

トンネル覆工コンクリートのひび割れ解析
におけるモデル化と入力値の検討
Modeling and Input Data Considerations
in Crack Analysis of Tunnel Lining Concrete

2019年3月

中村 明彦

山口大学 大学院 理工学研究科

学位論文の要旨

山岳トンネル(NATM)において、ひび割れの少ない高品質の覆工コンクリートの構築は重要な課題の一つである。覆工コンクリート施工後 1~2 年で発生する初期ひび割れは、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を踏まえたうえで、予測検討する必要があるが、明確な予測手法はないのが現状である。例えば、これまではマスコンクリートにおける温度解析をそのまま適用してきたが、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を考慮したものではない。このため、必ずしも、現地における温度計測などの計測結果と整合するものではなく、覆工コンクリートに発生した初期ひび割れの原因究明やひび割れの予測などにおいて、実現象を十分に説明できないのが現状である。

トンネル覆工コンクリートに発生する初期ひび割れを予測するためには、温度解析をもとに覆工コンクリートの温度分布を求め、その結果を踏まえて湿気移動解析、さらに応力解析（ひび割れ解析）を行う必要がある。本研究は、覆工コンクリートの初期ひび割れを対象に温度解析、湿気移動解析、応力解析を複合して予測できる解析モデルの構築、および、環境条件や材料特性値などの入力データの適正化を検討することにより、初期ひび割れ予測の精度向上を目的とするものである。

本論文は全 6 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景および研究の目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第 2 章「山岳トンネルの覆工コンクリート」では、覆工コンクリートの設計に関する考え方や施工法の変遷について整理したうえで、NATM における覆工コンクリートの設計、施工、品質管理および維持管理、さらには最近の長期品質保証制度について整理し、覆工コンクリートの考え方を改めて整理した。

第 3 章「覆工コンクリートの初期ひび割れとその予測手法」では、ひび割れの大半を占めると考えられる初期ひび割れに関する既往の研究事例を整理し、覆工コンクリートの初期ひび割れの発生要因やその予測方法などに対する課題を整理した。そのうえで、覆工コンクリートの初期ひび割れの大きな要因であるとされる温度応力、および乾燥収縮に関する解析手法を整理するとともに、もっとも基本となる温度解析について、現状における解析手法のトンネル覆工の温度解析への適用性を確認するため、複数の変数の逆解析が可能な粒子群最適化（PSO : Particle Swarm Optimization）による検証を試みた。

第 4 章「環境条件の予測手法」では、温度解析や湿気移動解析で重要となる外気温や大気中の水分量などの環境条件の経時的な推移を把握するため、気象観測データをもとに、位置情報（緯度、経度、標高）から、全国各地の任意の地点における日平均気温や日平均水蒸気圧の年間変動を把握できる予測式を構築した。さらに、覆工コンクリートの温度応力解析や乾燥収縮解析を行うにあたっては、トンネル坑内の温湿度を把握する必要があるため、トンネル坑内での気象条件の計測データを分析し、予測式の構築を試

みた。

第5章「覆工コンクリートのひび割れ解析におけるモデル化と材料特性値の検討」では、覆工コンクリートの温度解析に対応できるモデルを構築するとともに、適切な材料特性値の設定を目的とし、感度分析を行ったうえで、複数の変数を同定できる PSO（粒子群最適化）を用い、トンネル覆工に適用可能なモデル化や材料特性値に関する検討を行った。また、覆工コンクリートは、乾燥収縮の影響が大きいことが考えられことから、コンクリート内の水分状態（相対湿度分布）を明らかにする必要がある。そこで、より正確にコンクリート中の相対湿度分布を求めるため、大型の実験結果をもとに透湿率、湿気容量、蒸発率などの材料特性値に関する検討を加えた。さらに、本研究で提案したモデル化や入力パラメータの設定方法による温度解析および、湿気移動解析を踏まえた応力解析を行い、覆工コンクリートの初期ひび割れに関する考察を行った。

第6章「結論」では、第4章、第5章で提案した事項を中心に研究成果を取りまとめるとともに、今後の課題について整理した。

Abstract

In the construction by NATM, construction of high-quality lining concrete with few cracks is one of the important issues. Initial cracks occurring in 1 to 2 years after construction need to be predicted and considered based on the construction method of the tunnel lining and the specificity of the structure. However, there is no established method to predict the cracking of lining concrete. For example, the thermal stress analysis in massive concrete has been applied, but it is impossible to sufficiently explain the actual phenomenon in the initial cracks generated in the lining concrete.

Therefore, in this study, we developed an analytical model that can be predicted by combining thermal analysis, moisture movement analysis, and stress analysis for the initial cracks of lining concrete. Furthermore, by examining the validity of input data such as environmental conditions and material properties, we improved the accuracy of the initial crack prediction.

This thesis consists of 6 chapters, and contents of each chapter are shown below:

【Chapter 1 : Introduction】

The background, the purpose of this study and the outline of the theses are presented in this chapter.

【Chapter 2 : Lining Concrete of Mountain Tunnel】

Chapter 2 describes the concept of the lining concrete design and the transition of the construction method. Also, design, construction, quality control and maintenance of lining concrete are summarized in this chapter.

【Chapter 3 : Initial Cracks of Lining Concrete and its Prediction Method】

Chapter 3 summarizes previous studies on the initial cracks of the tunnel lining concrete. And this chapter also summarizes issues such as the factors causing the initial cracks of lining concrete and the method of predicting cracks.

【Chapter 4 : Prediction Method of Environmental Condition】

The seasonal fluctuation models of vapor pressure, ambient temperature and relative humidity are constructed by using the latest meteorological data.

【Chapter 5 : Consideration of Modeling and Material Characteristic Value in Crack Analysis of Lining Concrete】

The model applicable to the temperature analysis of lining concrete is constructed. And the proper setting of material property values is proposed.

【Chapter 6 : Summary】

Chapter 6 presents the remarkable conclusion of this study and describes future problems at the end of the thesis.

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
【参考文献】	6
第2章 山岳トンネルの覆工コンクリート	7
2.1 山岳トンネルの覆工コンクリートの変遷	7
2.2 NATMにおける覆工コンクリートの設計と要求性能	11
2.2.1 NATMにおける覆工コンクリートの基本的考え方	11
2.2.2 覆工コンクリートの設計	13
2.2.3 覆工コンクリートの要求性能	14
2.2.4 覆工コンクリートの長期保証制度の試行	17
2.3 覆工コンクリートの施工と施工管理	18
2.3.1 覆工コンクリート施工の流れ	18
2.3.2 覆工コンクリートの施工に関するマニュアル類	21
2.3.3 コンクリートの材料試験および フレッシュコンクリートの試験	22
2.3.4 シート防水工	23
2.4 覆工コンクリートの維持管理	24
2.4.1 山岳トンネルの点検管理	24
2.4.2 山岳トンネルにおける供用後の事故事例 と維持管理基準類の経緯	26
2.4.3 事後保全から予防保全への移行	29
2.4.4 2012年以降のトンネル維持管理に関する動向	31
2.5 第2章のまとめ	35
【参考文献】	36

第3章 覆工コンクリートの初期ひび割れとその予測手法	41
3.1 覆工コンクリートに発生するひび割れについて	41
3.1.1 ひび割れの発生要因とパターン	41
3.1.2 NATMにおけるひび割れ発生の例	43
3.1.3 覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制対策	46
3.2 覆工コンクリートのひび割れに関する既往研究	49
3.2.1 NATMにおける覆工コンクリートに関する 研究と技術基準などの推移	49
3.2.2 トンネル維持管理における覆工コンクリート のひび割れ評価に関する研究	52
3.2.3 覆工コンクリートの初期ひび割れに関する既往研究	55
3.3 初期ひび割れの予測方法について	68
3.3.1 概要	68
3.3.2 温度解析	69
3.3.3 乾燥収縮ひずみの予測と湿気移動解析	73
3.4 計測データにもとづく温度解析の適用性に関する検証	78
3.4.1 概要	78
3.4.2 粒子群最適化(PSO)	78
3.4.3 PSOによる材料特性値の同定手法	81
3.4.4 標準値を用いた温度解析の検証	83
3.4.5 PSOによる材料特性値の同定結果	86
3.4.6 同定値を用いた発生要因別のひび割れ解析	91
3.5 第3章のまとめ(研究課題の抽出)	96
【参考文献】	99
第4章 環境条件の予測手法	103
4.1 概要	103
4.2 外気温の予測	104
4.2.1 モデル構築に用いた気象データ	104
4.2.2 外気温モデルの比較検討	106
4.2.3 外気温モデルの構築	111

4.3	水蒸気圧および相対湿度の予測	116
4.3.1	空気中の水分量の指標と気象データ	116
4.3.2	水蒸気圧の予測	118
4.3.3	相対湿度の予測	126
4.3.4	水蒸気圧および相対湿度予測モデルのまとめ	129
4.4	トンネル坑内の環境条件の予測	130
4.4.1	既往研究の概要	130
4.4.2	廃線トンネル内における坑内温湿度の計測結果	132
4.4.3	坑内外気温のモデル化	135
4.4.4	坑内相対湿度のモデル化	139
4.4.5	各種要因による坑内環境予測モデルの補正	141
4.5	第4章のまとめと課題	147
	【参考文献】	149

第5章 覆エコンクリートのひび割れ解析に

	おけるモデル化と材料特性値の検討	151
5.1	覆エコンクリートの温度解析モデルの検討	151
5.1.1	覆エコンクリートの温度解析における課題	151
5.1.2	解析モデルの検討	153
5.1.3	セントル, 防水シートおよび天端上面空気層の モデル化と入力値	156
5.2	覆エコンクリートの温度解析における 材料特性値の検討	159
5.2.1	入力パラメータの感度分析	159
5.2.2	逆解析による材料特性値の検討	164
5.2.3	PSOによる逆解析と同定結果	169
5.2.4	温度解析における提案入力値の検証	173
5.3	湿気移動解析における材料特性値の検討	180
5.3.1	湿気移動解析における材料特性値の課題	180
5.3.2	鍵本らの実験の概要	180
5.3.3	従来の材料特性値による相対湿度算出結果の検証	182

5.3.4	湿気移動解析における材料特性値の提案	183
5.3.5	提案した材料特性値の検証	187
5.4	覆工コンクリートの応力解析結果の検証	188
5.4.1	高山らの実験結果による検証	188
5.4.2	F トンネルを対象としたひび割れ解析	196
5.5	第5章のまとめ	203
	【参考文献】	205
第6章	結論	207
	謝辞	213
	本研究に関して発表した論文	215

第 1 章

序 論

第1章 序 論

1.1 研究の背景

「吹付けロックボルト工法（以下、NATM）」は、1970年代後半に我が国に導入され、現在、山岳トンネル工法の標準工法とされている。NATMは地山の強度を積極的に利用するもので、地山の変位が収束した後に覆工コンクリートを施工することを基本とし、覆工の薄肉化・簡素化などにより、合理的で経済的なトンネルの建設が可能であるとされている。

しかし、NATM導入当初、覆工コンクリートに従来のトンネルではみられなかったひび割れが発生する事例があり、覆工コンクリートのひび割れ防止が重要な課題として取上げられた¹⁾。この研究の結果として、防水シートによる背面拘束の抑制対策が実施されるものとされ、現在に至っている。

その後、覆工コンクリートのひび割れは力学的には重大な欠陥とはならないとの認識で経過したが、1999年6月に山陽新幹線福岡トンネルの覆工落下事故が発生し²⁾、これを契機に、トンネルの安全性に対する社会的な信頼性が低下した。いわゆる「トンネルの安全神話の崩壊」である。

一方、2000年頃には、高度成長期に多く建設されたインフラ設備が30年～40年経過するため、インフラ設備に対してもアセットマネジメントの研究が盛んとなり、インフラ設備の維持管理は事後保全から予防保全へ、さらには保全予防への移行が取りざたされていた^{た例えば 3)}。このような中で、2012年には、中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故⁴⁾を経験し、トンネルを始めとするインフラ設備の安全性の保証は、社会的な責務として認識されるようになってきている。

本来、インフラ設備では設計～施工～維持管理が一貫したものとする必要があるが、覆工コンクリートでは設計～施工～維持管理が必ずしも一貫したものとなっていないのが現実であり、以下に示すような矛盾をかかえている、

- a) 覆工コンクリートには力学的機能は少ないとされ、設計時には脇役である。しかし、維持管理では覆工コンクリートは主役と見做され、ひび割れに着目した評価が主体である。設計思想と維持管理の考え方が整合していない。

b) 品質保証制度の試行⁵⁾を含め、ひび割れの少ない覆工コンクリートの施工が求められている。しかし、これは、施工者の企業努力に依存しているもので、設計時、発注時には従前の構造、品質とされ、養生も考慮されていないなど、設計・施工の乖離が大きい。

また、コンクリートの研究者やトンネルの研究者において、覆工コンクリートはコンクリート構造物として体系づけた研究が行われてこなかったのも現実である。

近年では、山岳トンネルの覆工コンクリートは、地下の空間、すなわちトンネルを安全、快適に提供するための重要な構造物であるとの認識から、その要求性能を含め、体系づけた研究が実施され始めている。

覆工コンクリートに発生するひび割れに対しても、とらえ方に変化がみられる。覆工コンクリートにおけるひび割れは、直ちに力学的な欠陥とはならないものの、はく落によるコンクリート片の落下は、第三者への影響もふくめ、重大な事故の要因となる。さらに、覆工コンクリートの構造的な欠陥に至る懸念もある不具合と考えられるようになってきており、ひび割れの少ない高品質の覆工コンクリートが求められている。

このような背景から、覆工コンクリートにおいても、施工後1~2年で発生する初期ひび割れを対象としたひび割れ解析が要求される機会が増えてきている。

覆工コンクリートに発生する初期ひび割れは、マスコンクリートと同様に、水和熱に起因する温度応力や、乾燥収縮に起因するもので、さらには、早期の脱枠により若材齢に自重が作用することの影響が複合して発生するものと考えられている。しかしながら、その発生メカニズムが十分に解明されているとはいえず、ひび割れ発生予測やひび割れの評価も困難である。たとえば、トンネル天端から肩部にかけて縦断方向に延びるひび割れは、土圧などの外力によるものか、温度応力や乾燥収縮によるものか、判断が難しく、トンネルの健全度評価においても明確な判断ができないことも多い。

覆工コンクリートの初期ひび割れの発生は、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を踏まえたうえで、検討する必要があると考えられるが、明確な予測手法がないのが現状である。たとえば、温度応力では、マスコンクリートにおける温度解析や温度応力解析をそのまま適用してきたが、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を考慮したものではない。このため、必ずしも、現地における温度計測などの計測結果と整合するものではなく、覆工コンクリートに発生した初期ひび割れの原因究明や初期ひび割れの予測などにおいて、実現象を十分に説明できないのが現状である。

1.2 研究の目的

トンネル覆工コンクリートに発生する初期ひび割れを予測するためには、温度解析をもとに覆工コンクリートの温度分布を求め、それらの結果を踏まえて湿気移動解析、さらに応力解析を行う必要がある。これらの解析の精度は、入力する環境条件や材料特性値によるところが大きく、正確な環境条件や材料特性値を入力しなければ、信頼できる解析結果は得られない。

本研究は、覆工コンクリートの施工後1~2年に生じる初期ひび割れを対象に、温度解析、湿気移動解析、応力解析を複合して予測できるモデルの構築および、これら解析に必要な環境条件や材料特性値などの入力データの検討を目的とする。

図-1.1 にコンクリートのひび割れ解析の流れと本研究における研究課題を示す。

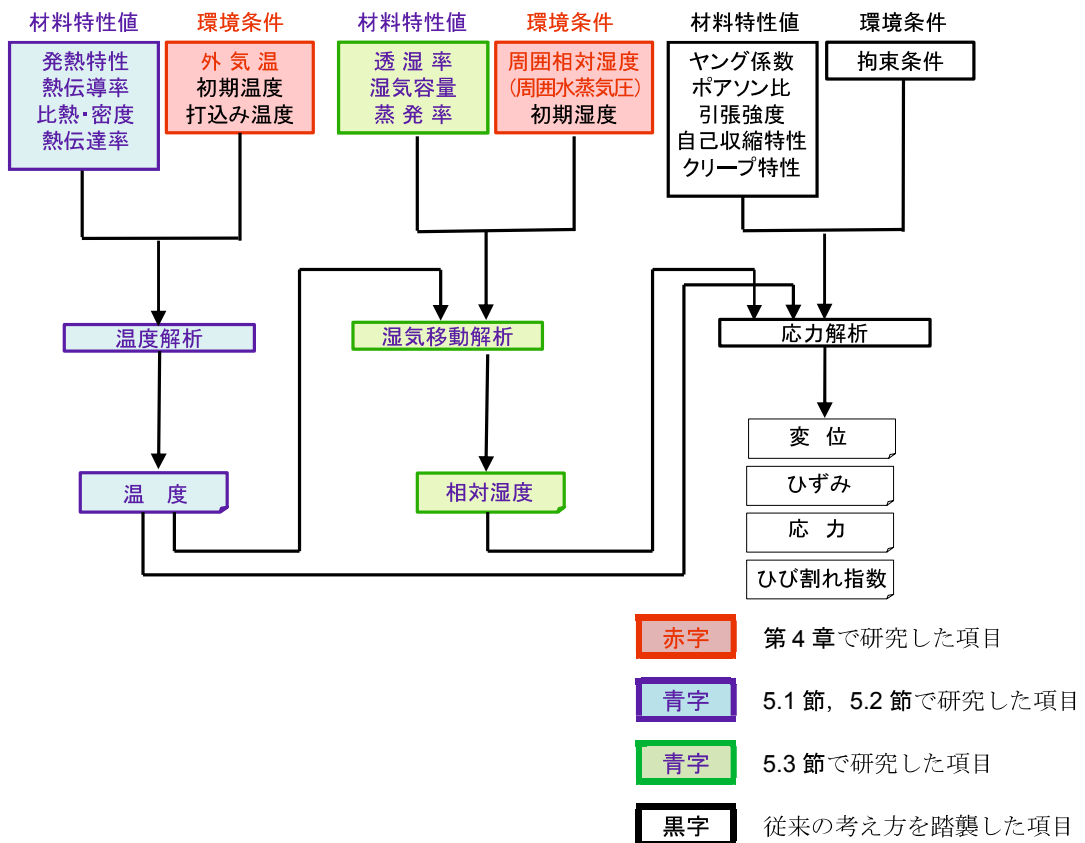


図-1.1 コンクリートのひび割れ解析の流れと本研究の関係

本研究では、図-1.1の着色部に示すように、温度解析、湿気移動解析のための環境条件の入力値の設定、覆工コンクリートの温度解析のためのモデル化および材料特性値に関する検討、コンクリートの湿気移動解析のための材料特性値に関する検討を行うものである。

1.3 本論文の構成

本論文は、6章から構成されている。本論文の構成を図-1.2に示す。

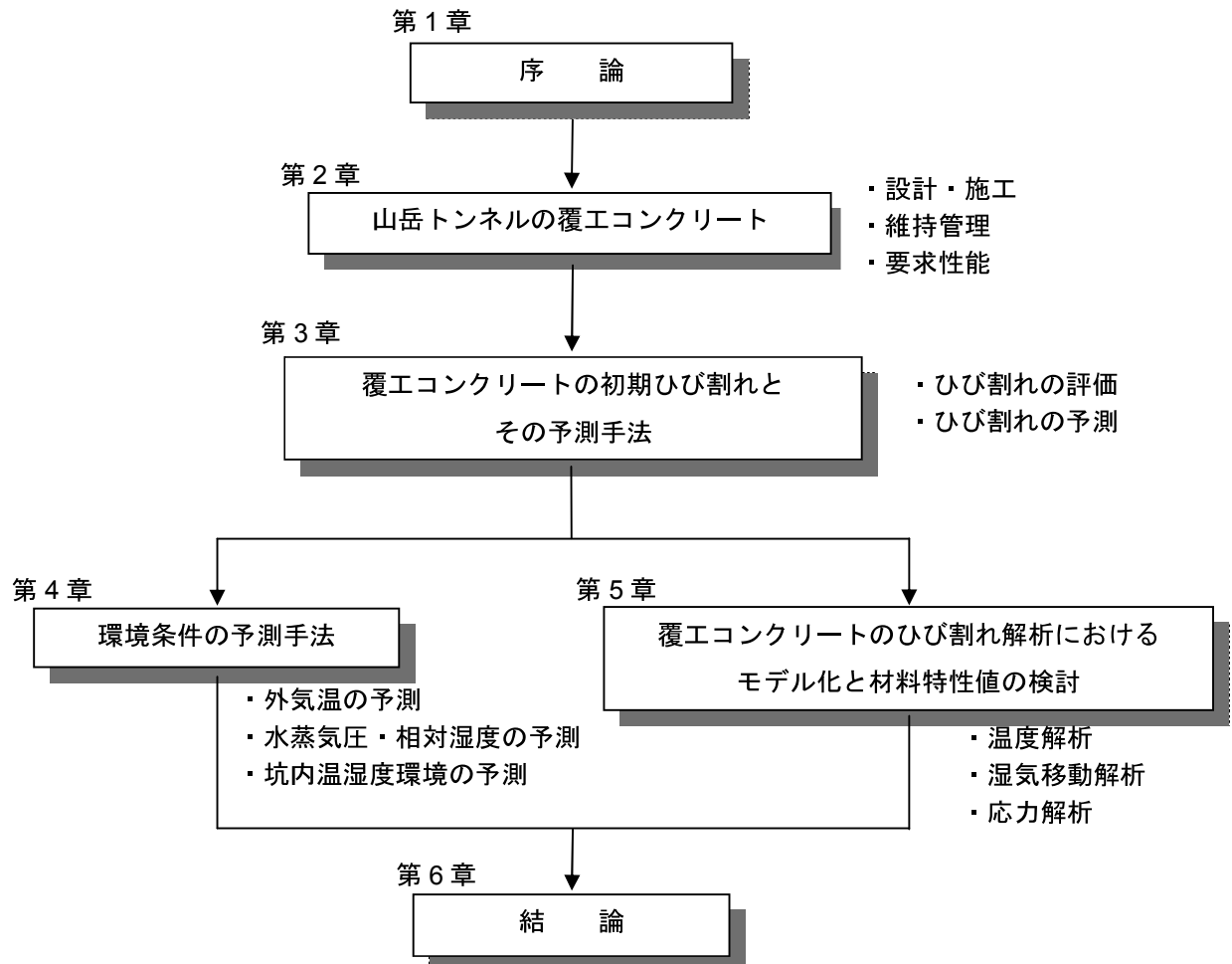


図-1.2 本論文の構成

【第1章 序論】

本研究の背景および研究の目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

【第2章 山岳トンネルの覆工コンクリート】

山岳トンネルの覆工コンクリートは、矢板工法，NATMを問わず，その機能や役割が明確でないのが現状である。そこで，本章では覆工コンクリートの設計に関する考え方や施工法の変遷について整理したうえで，NATMにおける覆工コンクリートの設計，施工，品質管理および維持管理，さらには最近の長期品質保証制度について整理し，覆工コンクリートの考え方を改めて整理した。

【第3章 覆工コンクリートの初期ひび割れとその予測手法】

トンネルの維持管理では、覆工コンクリートに発生するひび割れをおもな対象として、その健全度を評価することが主体である。本章では、ひび割れの大半を占めると考えられる初期ひび割れに関する既往の研究事例を整理し、覆工コンクリートの初期ひび割れの発生要因やその予測方法などに対する課題を整理した。

そのうえで、覆工コンクリートの初期ひび割れの大きな要因であるとされる温度応力、および乾燥収縮に関する解析手法を整理するとともに、もっとも基本となる温度解析について、現状における解析手法のトンネル覆工の温度解析への適用性を確認するため、複数の変数の逆解析が可能な粒子群最適化（PSO : Particle Swarm Optimization）^{6,7)}による検証を試みた。

【第4章 環境条件の予測手法】

温度解析や湿気移動解析では、とくに、外気温や大気中の水分量などの環境条件の経時的な推移を把握することが必要であり、重要な入力データとなる。

本章では、これら解析の入力データとして活用するため、気象観測データをもとに、位置情報（緯度、経度、標高）から、全国各地の任意の地点における日平均気温や日平均水蒸気圧の年間変動を把握できる予測式を構築した。さらに、覆工コンクリートの温度応力解析や乾燥収縮解析を行うにあたっては、トンネル坑内の温湿度を把握する必要があり、トンネル坑内での気象条件の計測データを分析し、予測式の構築を試みた。

【第5章 覆工コンクリートのひび割れ解析におけるモデル化と材料特性値の検討】

覆工コンクリートの温度解析においては、マスコンクリートとは形状や構造が異なるため、覆工コンクリートに適応可能な材料特性値を設定する必要があると考えられる。このため、本章では覆工コンクリートの温度解析に対応できるモデル化を構築するとともに、適切な材料特性値の設定を目的とし、感度分析を行ったうえで、複数の変数を同定できるPSO（粒子群最適化）を用い、トンネル覆工に適用可能なモデル化や材料特性値に関する検討を行った。

また、覆工コンクリートは部材厚に比べ表面積が広いことから、乾燥収縮の影響が大きいことが考えられる。乾燥収縮の影響を正確に評価するには、コンクリート内の水分状態（相対湿度分布）が明らかになっている必要がある。本研究では、より正確にコンクリート中の相対湿度分布を求めるため、大型の実験結果をもとに透湿率、湿気容量、蒸発率などの材料特性値に関する検討を加えた。

さらに、本研究で提案したモデル化や入力パラメータの設定方法による温度解析および、湿気移動解析を踏まえた応力解析を行い、覆工コンクリートの初期ひび割れに関する考察を行った。

【第6章 結論】

本章では、第4章、第5章で提案した事項を中心に研究成果を取りまとめるとともに、今後の課題について整理した。

【参考文献】

- 1) 日本トンネル技術協会：硬岩 NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.59-62，1982.3
- 2) 朝倉俊弘：トンネルの健全度診断，地盤工学会，土構造物・基礎・トンネルの健全度診断技術講習会講演資料，p.1-7，2000.11
- 3) 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技法堂出版，p.4，2005.11
- 4) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，2013.6
- 5) 国土交通省中国地方整備局：トンネル工事の長期保証制度（試行）の運用，土木設計マニュアル第3編道路編 第6章トンネル，pp.3-6-55-3-6-77，2015.4
- 6) James Kennedy, Russell Eberhart and Yuhui Shi：Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001
- 7) James Kennedy and Russell Eberhart：Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.

第2章

山岳トンネルの覆工コンクリート

第2章 山岳トンネルの覆工コンクリート

2.1 山岳トンネルの覆工コンクリートの変遷

わが国における山岳トンネルの施工法および覆工コンクリートの材料や施工法の変遷を図-2.1示す。

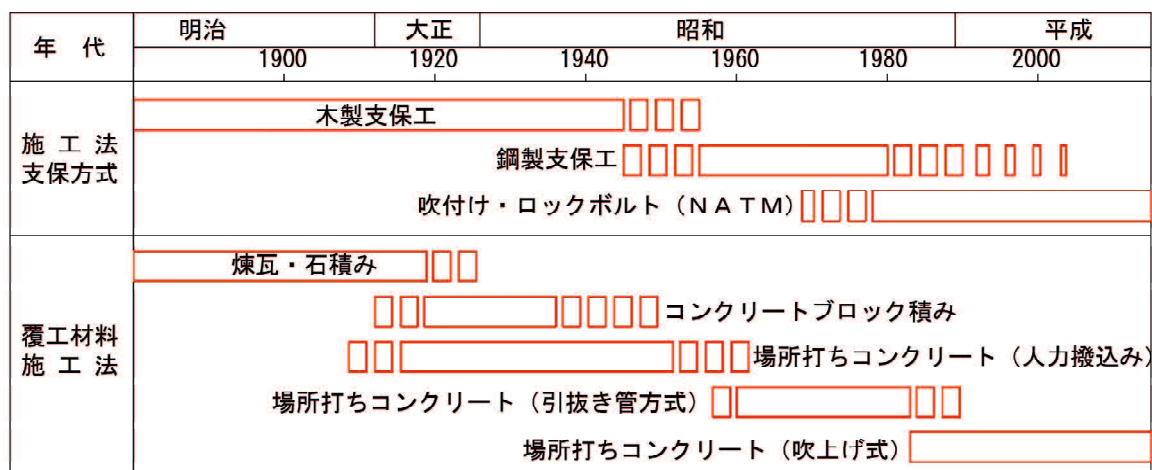


図-2.1 わが国のトンネル掘削および覆工の施工法の変遷

わが国において初めて近代工法で山岳トンネルが施工されたのは、1880年（明治13年）完成の東海道本線逢坂山トンネル¹⁾であり、道路トンネルでは1904年（明治37年）に天城隧道が完成している（写真-2.1）。当時は、小さな断面（加背）に分割し、加背ごとに木材を組立てる木製支保工で地山を支持しながら、切り抜け掘削が行われていた。木製支保工によるトンネル掘削は明治～昭和30年ころまで行われていた。

木製支保工では作業空間が狭いので、人力掘削を余儀なくされており、掘削後は支保工を一旦外



写真-2.1 天城隧道北側坑口
(2015.08撮影)

して覆工を構築する「木外し」という危険な作業を伴うものであった。明治～大正初期の覆工材料は、他の構造物と同様に煉瓦積みや石積みであった。図-2.2は煉瓦積み覆工の施工状況である。木外しを行った後、木製の型枠（図中のEはトンネル縦断方向の上木、Gは断面方向の上木）を組み立て、煉瓦積み覆工が行われていた。

大正時代に入ると場所打ちコンクリートが導入されたが、アーチ部へのコンクリート打込みが困難であり、アーチ部にはコンクリートブロック積み覆工が行われていた。

1923年（大正12年）に発生した関東大震災の経験より、昭和になってブロック積みより耐震性に優れる場所打ちコンクリート覆工が推奨され、普及することになる。

昭和30年代以降は、鋼製支保工に木製矢板を組合わせて地山を支保する矢板工法が確立され標準工法とされた。これは当時、高度成長期に全国的に大量のトンネルを一斉に構築する必要性から、トンネル掘削や構築作業に大型機械を導入するために、大きな作業空間を確保できるように耐荷力の大きな鋼製支保工が用いられるようになったためである。矢板工法では掘削時には鋼製支保工が土圧を受持ち、覆工コンクリート施工後は、覆工コンクリートと鋼製支保工が一体となって土圧を受持つという考え方であることから、覆工コンクリートは土圧に対する耐荷力を見込み、比較的巻厚が厚い無筋コンクリート構造として設計された。

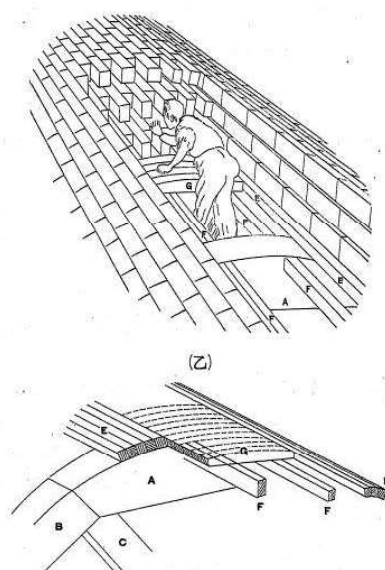


図-2.2 煉瓦積み覆工施工状況²⁾

表-2.1 矢板工法における覆工コンクリートの巻厚の目安³⁾

地質分類	設計巻厚	備 考
A	45cm	施工可能であれば、45cm以下でも良い。
B	〃	〃
C	60cm	裏込め注入を行う。支持力の不足する場合および偏圧のある場合はインバートを設ける。
D	〃	〃
E	—	地山の挙動に合わせて設計する。2重巻き、鉄筋コンクリート覆工など、必要により形状を変更する。

注) この表は、鋼アーチ支保工などを用いて掘削し、場所打ちコンクリートにより覆工を行う場合についてのものである。

矢板工法時代の覆工コンクリートの施工は、従来の木製型枠を用いた人力による打込みから、鋼製型枠を用いた機械による打込みに移行し、コンクリートを圧送するコンクリートプレーサやアジテータ付きコンクリートプレッサーが用いられた。

矢板工法では図-2.3に示すように矢板を介して鋼製支保工で地山を支持するもので、

矢板と地山の間には空隙が存在し、これが覆工コンクリート施工後にも残りやすいという欠点を有していた。コンクリートの充填が困難なアーチクラウン部には、コンクリート打込み用の管を設置し、配管を順次引き抜きながらコンクリートを打込む引抜き管方式が採用された（図-2.4）。

たとえば、φ6”のパイプを内管として型枠直前で外管φ8”に圧送し、外管を順次引抜く方法（図-2.5）や、配管を設置する配管台車を準備し、パイプ台車を移動しながら引抜く方法（図-2.6）が取られていた。

このような引抜き管方式では、天端部（とくに配管部より上部）に充填できない部分が残るという問題を抱えていた。

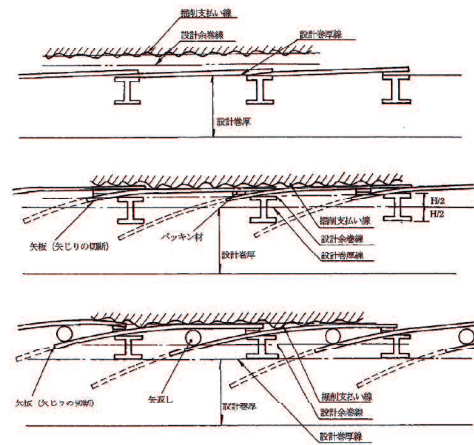


図-2.3 矢板の設置状況と覆工の設計巻厚⁴⁾

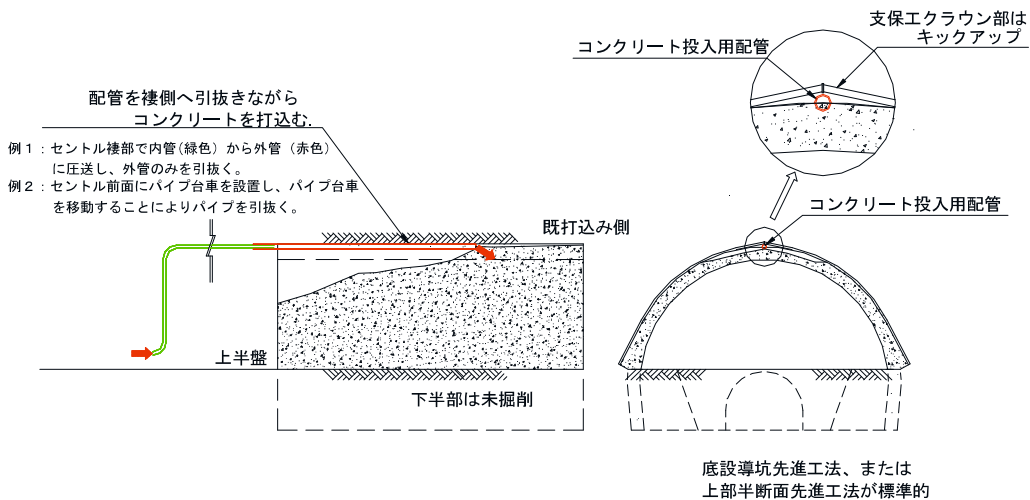


図-2.4 コンクリート打込みの概要図

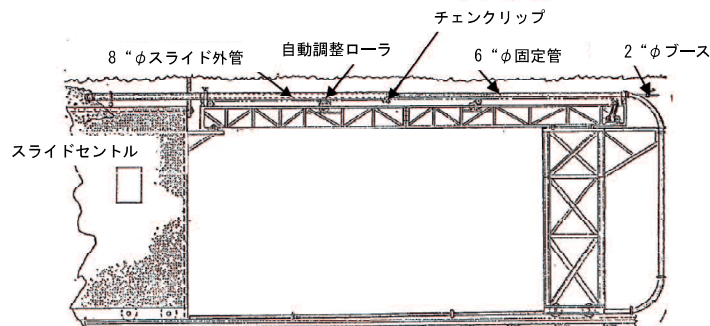


図-2.5 コンクリート圧送スライドパイプ構造図⁵⁾を加筆修正

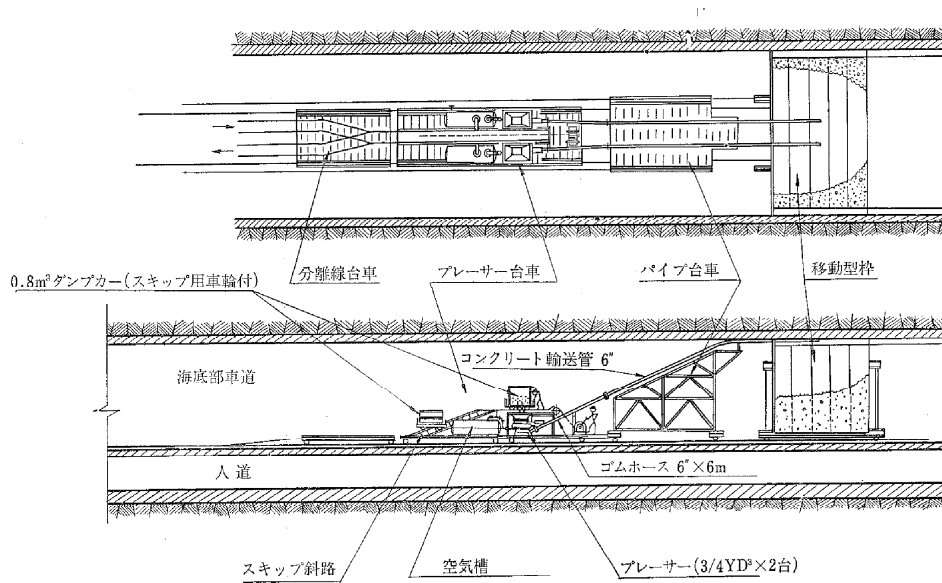


図-2.6 パイプ台車の例（関門道路トンネルアーチ覆工施工図）⁶⁾

このように、矢板工法では、構造上、および施工上ともに、覆工背面に空隙が残りやすいため、地山条件が悪い区間では裏込め注入を行うこととされていたが、裏込め注入が不十分で、空隙が残存しているトンネルも多くみられる。

当時のトンネルの施工法は底設導坑先進上部半断面工法、または上部半断面先進工法が主流であった。覆工の手順として、上半アーチ部の覆工コンクリートを先行して施工した後、下半（土平）を掘削して側壁コンクリートを施工する逆巻き工法が標準的に用いられた。アーチ部と側壁部のせめ部の施工目地は、図-2.7 に示すように後で硬練りモルタルを充填するなどの方法が採られたため、モルタルなどの経年劣化による漏水や浮き、はく離などの発生が維持管理上の問題として顕在化してきている。

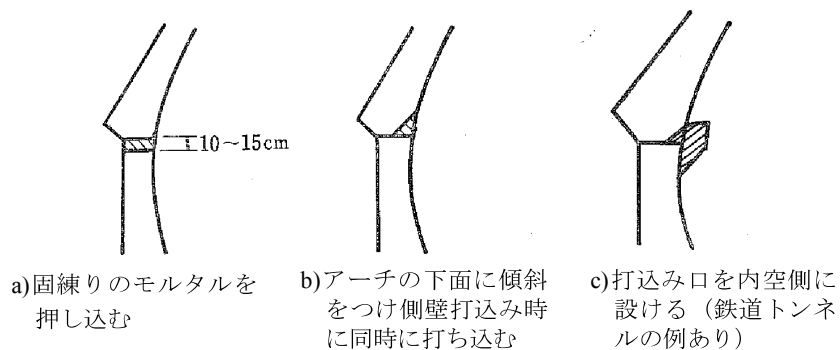


図-2.7 アーチと側壁のせめ部の施工⁷⁾を加筆修正

2.2 NATMにおける覆工コンクリートの設計と要求性能

2.2.1 NATMにおける覆工コンクリートの基本的考え方

地山（岩盤）は本来、支保能力を有しており、掘削された後も自分自身を支え、安定を保とうとする力を発揮する。NATMが従来の山岳工法と根本的に異なるのは、地山の有する支保能力を最大限に活用してトンネルの設計と施工を行う概念と、それに必要なロックボルトや吹付けコンクリートなどの具体的な対応方法を示したことである。

NATMでは地山の変位が収束した後に覆工コンクリートを施工することを基本とし、原則として覆工には荷重は作用させないという考え方であるため、覆工の薄肉化・簡素化などにより、合理的で経済的なトンネルの建設が可能であるとされている。

NATM導入当初、覆工コンクリートは力学的な機能は持たないものとされ、たとえば、NATMの設計・施工の合理化に関する研究（鉄道技術研究所 1982年3月）によると、「通常の場合はNATMにおける二次覆工はいわゆる“化粧巻”と考えることが多く、原則として地山荷重は分担しないと考え、とくに設計は行わない。」と記されている⁸⁾。

一方では、従来のトンネルでは見られなかったひび割れが発生する例が多く、ひび割れの原因追求とひび割れ防止が重要な課題として取り上げられた。このため、昭和56年度～57年度に日本トンネル技術協会において、NATMの覆工コンクリートに対する研究が実施され、その成果でNATMの覆工コンクリートは以下のように位置付けられている^{9), 10)}。

- ・覆工コンクリートの役割は、力学的な役割とそれ以外の役割に分けて考えられ、一般的には力学的な役割は小さい。
- ・力学的な機能以外の役割としては、長期にわたる構造物としての機能の維持、保守性、防水性、内装機能、トンネル内施設の保持機能が期待される。
- ・一般的な地山における二次覆工は力学的機能を必要としないため、施工性を考慮してできるだけ経済的な設計とすべきである。
- ・覆工コンクリートに生じたひび割れは背面拘束によるものと考えられ、シートによる背面拘束の除去が有効である。

この考え方を踏襲して、NATMが定着してきた昭和61年度版トンネル標準示方書（山岳工法編）では、第51条覆工一般（平成8年度版トンネル標準示方書（山岳工法編）では第57条）の解説として、以下のように記されている^{11), 12)}。

「トンネルの覆工は、道路、鉄道、および水路などの使用目的、使用の条件などに適合した設計を行わなければならない。また、長く土圧などの作用荷重に耐え、亀裂、変形、崩壊などを起こさないもので、漏水などによる浸食や強度の減少のない耐久性のあるものでなければならない。一般に、覆工はトンネルの使用開始後にこれを改修することは非常に困難であるので、将来、改修の必要のないように、十分に配慮しなければならない。」

その後、山陽新幹線での覆工コンクリートの崩落事故などの経験を経て、覆工コンクリートのひび割れなどの初期欠陥に対する配慮が必要とされたことから、2006年制定

トンネル標準示方書 山岳工法では、第60条覆工一般の解説に以下が追記されている¹³⁾。

「覆工は、アーチ状の薄いコンクリート構造体を地山と型枠に挟まれた狭い空間にトンネル内側から形成する構造であるため、締固めやコンクリートの打込みには厳しい条件が多く、表面仕上がり不良が発生しやすい。そのため、想定される問題点を明らかにし、その要因を排除するように設計する必要がある。」

覆工コンクリートの基本的な考え方に着目すると、従来は、前述したようにトンネル標準示方書などにおいて、力学的機能と力学的機能以外の機能の2つに大別して整理されてきたが、第二東名神の扁平大断面トンネルの計画にあたり、日本トンネル技術協会では覆工特別小委員会を設置し、覆工コンクリートの機能を再度整理している¹⁴⁾。同書では NATM における覆工コンクリートの機能として、新たに不確定要素に関する機能（余力保持機能、変形性能保持機能）という考え方を加え、供用性に関する機能、不確定要素に対する機能、力学的な機能の3つに区分し定義した。

その後、土木学会が発刊した「山岳トンネル覆工の現状と対策」において、不確定要素に関する機能の中に、構造的安定機能を加えて以下のように定義している¹⁵⁾。

表-2.2 覆工コンクリートに期待される機能

供用性に関する機能	
内空断面の保持機能	建築限界など、供用上必要な内空を保持する。
防水機能	トンネル内施設の漏水による不具合に対して防水性を保持する。
耐火機能	トンネル内火災に対する耐火能力を付与する。
保守管理機能	変状の早期発見のために覆工表面を平滑に仕上げる。
トンネル内施設の保持	トンネル内諸設備の取付け性を考慮する機能。
不確定要素に関する機能	
余力保持機能	供用後に不確定な理由により覆工に作用する追加の荷重に耐え得る余力を保持する。
変形性能保持機能	覆工構造系が不安定になるまでの変形が大きく、トンネル崩壊を一気に進展させない。
構造的安定機能	インバートなどを設置することで、構造的安定性を確保する。
力学的な機能	
付加外力支持機能	覆工施工後に、予定している外力が作用する場合に、これに耐え得る覆工耐力を確保する。
支保工補完機能	膨張性地山など、支保工やその他の補強工ではトンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工し、支保工に付加し、トンネルの安定に必要な拘束力を与える。

2.2.2 覆工コンクリートの設計

一般的な地山の場合、覆工コンクリートは無筋コンクリートを用い、施工性を勘案したうえで、経験的に求められた設計巻厚が採用されている。

- ・ 2車線道路トンネル（W=8.5~12.5m）や鉄道の複線断面（W=8.5m）、新幹線断面（W=9.5m）では30cm。（道路トンネル坑口部では35cm、Wは内空断面幅）
- ・ 単線鉄道トンネル（W=4.76m）では25cm、国交省の小断面トンネル（W=3.0~5.0m）では20cm。
- ・ 3車線クラスの大断面道路トンネル（W=12.5~14.0m）では40cm

覆工コンクリートは、基本的には力学的機能を考慮しないものとし、道路トンネル、鉄道トンネルともに設計基準強度 18N/mm² の無筋コンクリートとされている。表-2.3 に覆工コンクリートの標準的な配合例を示す。

表-2.3 覆工コンクリートの標準的な規格例

企業者種別	設計基準強度	粗骨材の最大寸法	スランプ	空気量	単位セメント量	水セメント比	セメント種別	備考		
a	アーチ	18N/mm ²	40mm	15±2.5cm	4.5±1.5	270kg/m ³	60%以下	N, BB	※1	
	インバート	18N/mm ²	40mm	8±2.5cm	4.5±1.5	—	—	N, BB	※2	
b	アーチ	18N/mm ²	40mm	15cm	—	270kg/m ³	—			
	インバート	18N/mm ²	40mm	8cm	—	230kg/m ³	—			
c	アーチ(C)	18N/mm ²	40mm	15±2.5cm	4.5±1.5	270kg/m ³	60%以下	BB 以上		
	アーチ(D)	18N/mm ²	40mm	15±2.5cm	4.5±1.5	310kg/m ³	60%以下	BB 以上	※3	
	インバート	18N/mm ²	40mm	8±2.5cm	—	—	—	BB 以上		
d	アーチ	18N/mm ²	40mm	15cm	—	270kg/m ³	—	—		
	インバート	18N/mm ²	40mm	8cm	—	—	—	—		
e	アーチ	18N/mm ²	40mm	15cm	—	270kg/m ³	60%以下	BB		
	インバート	18N/mm ²	40mm	8cm	—	230kg/m ³	60%以下	BB		
f	アーチ	18N/mm ²	40mm	15cm 程度	4.5	270kg/m ³	60%以下	—		
	インバート	18N/mm ²	40mm	8cm 程度	4.5	270kg/m ³	60%以下	—		
g	温暖	アーチ	18N/mm ²	40mm	15±2.5cm	4.5±1.5	—	60%以下	BB, (N)	※4
		インバート	18N/mm ²	40mm	8±2.5cm	4.5±1.5	—	60%以下	BB, (N)	
	寒冷	アーチ	18N/mm ²	40mm	15±2.5cm	5.5±1.5	—	58%以下	BB, (N)	※4
		インバート	18N/mm ²	40mm	8±2.5cm	5.5±1.5	—	58%以下	BB, (N)	

a. NEXCO（平成24年度以前）¹⁶⁾ b. 近畿地整¹⁷⁾ c. 九州地整¹⁸⁾ d. 中国地整¹⁹⁾、北陸地整²⁰⁾ e. 四国地整²¹⁾ f. 北海道開発局²²⁾ g. 鉄道運輸機構²³⁾

N：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメントB種

※1：平成25年度より中流動コンクリートを基本とする。塩化物含有量は0.30kg/m³以下

※2：塩化物含有量は0.60kg/m³以下

※3：D I，D IIを対象に鋼繊維補強コンクリート（0.3%/m³）を採用。非鋼繊維を用いる場合には単位セメント量は340kg/m³とする。

※4：温暖地（寒冷地坑口200mより奥を含む）に適用，BBを優先とする。単位水量の上限値は165kg/m³。

※5：寒冷地の坑口部200m間に適用。BBを優先とする。単位水量の上限値は165kg/m³。

東・中・西高速道路株式会社（以下、NEXCO）では平成25年度より、アーチコンクリートには中流動コンクリートを用いることを基本とし²⁴⁾、表-2.4に示すように配合決定のための基準が示されている。

中流動コンクリートは、とくに天端部の締固め不足によるコンクリートの密実性の低下を抑制する目的で開発されたものがある。スランプフローが35～50cm程度と普通コンクリートと高流動コンクリートの中間的な性質をもったコンクリートで、軽微な締固めで均一に充填できる特徴がある。

表-2.4 中流動覆工コンクリートの配合決定のための基準²⁵⁾に加筆修正

種別 ※1	設計 基準強度	粗骨材の 最大寸法	スランプ スランプ フロー	加振変 形試験 (cm)	最低単位 セメント量	セメント の種類	単位水量	最大塩化 物含有量 (cl^-)
FA	24N/ mm^2	20mm	21cm \pm 2.5 35~50cm	※2	270kg/ m^3	N	180kg/ m^3	300g/ m^3
LS		25mm				N, BB	175kg/ m^3	
Ad						N, BB	175kg/ m^3	

※1：FA：粉体系（フライアッシュ）、LS：粉体系（石粉混入）、Ad：増粘剤系

※2：10秒加振後のスランプフローの広がり10 \pm 3cm

加振後の広がったコンクリートにおいて、中央部に粗骨材が露出した状態を呈することなく周辺部に2cm以上のペーストや遊離した水の帯がないこと。

2.2.3 覆工コンクリートの要求性能

構造物設計の国際的な体系化が進む中、土木学会トンネル工学委員会では、2004年12月にトンネル構造物の設計法の将来像と国際標準への対応に関する検討部会を設置し、2009年にはトンネルライブラリー第21号性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメントを発刊した。同書を引用して作成した山岳トンネルの要求性能を表-2.5に示す²⁶⁾。

鉄道構造物では、構造物の維持管理にあたっては、要求される性能をあらかじめ定めたいうで、検査対象となる構造物が所有の性能を有するか否かを確認することを基本としている。表-2.6には、トンネル構造物の要求性能と性能評価指標の例²⁷⁾を示す。

また、滝川ら²⁸⁾は、高速道路トンネルを対象に要求性能を体系化して明確にするとともに、現行の点検・評価法を実用化した性能評価法（性能代替指標とその評価基準）の確立を目的とした研究を行っている。

表-2.7は山岳トンネル（無筋コンクリート）を対象として、規定化した要求性能と性能代替指標を示したものであり、着色部は覆工コンクリートを対象としたものである。

覆工コンクリートを対象とした要求性能項目は、利用者の安全性能として、はく落が生じないこと、および漏水が生じないこと、構造安定性としては覆工が安定すること、耐久性能として覆工・諸設備の劣化原因となる漏水が生じないこと、覆工材料が劣化しないことが挙げられ、それぞれの性能代替指標が示されている。

表-2.5 トンネルの要求性能（中項目）の整理・分類結果のまとめ²⁶⁾の一部引用

大項目	中項目	鉄道	道路	備考
① 利用者の安全性能	安全に走行できる	○	○	
	利用者の安全を直接脅かさない	○	○	はく落、漏水が生じない
	非常時に安全に避難できる	○	○	
② 利用者の使用性能	快適に走行できる	—	○	
	通行規制を最小限とすることができる	—	○	
	乗り心地がよい	○	○	
② 構造安定性能	利用者に不快感・不安感を与えない	○	○	
	常時作用する荷重に対し安定する	○	○	覆工、地山が安定する
	必要な耐震性能を有する	○	○	
	想定される荷重の変化に対して安定する	○	○	
③ 耐久性能	火災時においても安定する	—	○	火災時にも覆工が安定する
	防食性がよい	○	○	
	覆工材／コンクリートが劣化しない	○	○	
④ 管理者の使用性能	防水材／止水性がよい	○	○	
	必要な需要を満足できる	○	○	
	列車が安定的に走行できる	○	—	
⑤ 維持管理性能	必要なトンネル諸設備を設置・稼働できる	○	○	
	安全・容易に点検・清掃できる	○	○	
⑥ 周辺への影響度	安全・容易に補修・補強ができる	○	○	
	地下水への影響が少ない	○	○	
	周辺地盤への影響が少ない	○	○	
	周辺の物件への影響が少ない	○	○	
	周辺での振動・騒音が少ない	○	○	
	周辺の大気汚染への影響が少ない	—	○	
	景観・美観を著しく損なわない	○	○	

○：該当する項目

表-2.6 トンネル構造物の要求性能と性能評価指標²⁷⁾

要求性能	性能項目	具体的な内容
安全性	① トンネル構造の安定性	トンネルが崩壊しないこと
	② 建築限界と覆工との離隔	建築限界を支障しないこと
	③ 路盤部の安定性	列車の安全な運行に支障するような路盤の隆起・沈下・移動が生じないこと
	④ はく落に対する安定性	列車の安全な運行に支障するようなコンクリート片、補修材等のはく落が生じないこと
	⑤ 漏水・凍結に対する安全性	列車の安全な運行に支障するような漏水・凍結が生じないこと
使用性	⑥ 漏水・凍結に対する使用性	漏水・凍結が坑内設備の機能に影響を及ぼさないこと
	⑦ 表面の汚れ	検査に著しく支障する汚れがないこと
	⑧ 周辺環境に与える影響	周辺環境に有害な影響を与えないこと
復旧性	⑨ 災害時等の復旧性	復旧対策が必要となるような災害時の偶発的な作用を受けた場合でもトンネルが崩壊せず性能回復が容易に行えること

表-2.7 規定化した要求性能と性能評価代替え指標の例(無筋覆工)²⁸⁾ を加筆・修正

大項目	中項目	小項目	性能代替指標
利用者の 安全性能	安全に走行できる	良好な道路線形を確保できる	設計速度, 車両の種類, 道路幾何構造
		なめらかに走行できる	路面の平坦性など
		必要な視認性を確保できる	照明の機能など
	非常時に利用者が安全に避難できる	非常時に防災設備が確実に作動する. 防災設備を適切に配置できる.	トンネル等級に応じた非常用設備
	利用者の安全を直接脅かさない	必要な換気能力を確保できる	換気施設の有無, 換気施設設計条件など
		はく落が生じない(材料劣化)	豆板, スケール, ひび割れ(材料劣化), ブロック場(閉合)補修劣化, 打継目の目地切れ, 段差目地のずれ・開き
		漏水が生じない	漏水(アーチ, 側壁), 遊離石灰(アーチ), 漏水防止樋, はく落対策施設(樋・はく落対策網(ネット), ボルトナット(取付金具))
利用者の 用性能	快適に走行できる.	快適に走行できる.	舗装, 照明の状況等, クレーム
	通行規制を最小限とすることができる.	通行規制を最小限とすることができる.	クレーム
	利用者に不快感・不安感を与えない.	利用者が不快感・不安感を持つような漏水・ひび割れが見られない(汚れ等)	クレーム
		必要な視認性を確保できる	路面表示, 視線誘導標, クレーム
構造安定性能	常時作用する荷重に対して安定する.	覆工が安定する.	外力による変状(最大ひび割れ幅, 最大ひび割れ幅の長さ(連続している箇所), 方向性, ひび割れ幅の分布, パターン(亀甲型), パターン(閉合型), パターン(交差・分離), エフロレッセンス, 漏水, 中央排水溝の湧水の流れの有無)
		地山が安定する	内空変位速度, 変状現象など
	想定される荷重変化に対して安定する.	供用期間中に想定される近接施工による影響や周辺環境の変化など, 荷重条件の変化に対して必要な対価性能を有する.	
		地すべりなどによる荷重変動	
	必要な耐震性能を有する	供用期間中に想定される地震変動に対して覆工が必要な耐荷性能を有する.	
耐久性能	防水性がよい	覆工・諸設備の劣化要因となる漏水が生じない	漏水
	覆工材料が劣化しない	覆工材料が劣化しない	漏水による酸, 塩類の流入, 水酸化カルシウムの溶脱
管理者の 使用性能	必要な需要を満足するための諸設備を設置できる		トンネル等級に応じた諸設備能力(諸設備の種類, 設置間隔, はく煙濃度, CO濃度, クレーム)
管理者の 維持管理性能	安全容易に点検・清掃	日常の巡回・点検・清掃が安全・容易	監視員通路の有無, 通路の規模など
	安全容易に補修・補強	内空断面に補修補強余裕が確保	覆工から監視員歩行空間までの距離
周辺への 影響度	地下水への影響	地下水位変動が許容値以内 周辺の地下水汚染影響が許容値以内	クレーム
	周辺地盤への影響	地表面沈下・隆起が許容値以内	クレーム
	周辺での振動・騒音	周辺での振動・騒音が許容値以内	環境基準による評価, クレーム
	周辺での大気汚染	周辺での大気汚染の影響が許容値以内	環境基準による評価, クレーム

※: 覆工に関連する項目以外の性能代替指標は簡潔に標記した。

2.2.4 覆工コンクリートの長期保証制度の試行

国土交通省東北地方整備局は、平成23年（2011年）12月に公告した国道45号釜石山田道路工事と同吉浜道路工事の2件を対象として全国で初めて、長期保証を条件としたコンクリート構造物工事を試行した。釜石山田道路はトンネル覆工コンクリートとコンクリート橋上部、吉浜道路はトンネル覆工コンクリートを対象として、施工完了からおおむね5年後に「クラック幅」を点検し、基準値（0.3mm）を超えた場合は施工者に補修工事を求めるものとされている。この後、東北地方整備局では多くのトンネルで長期保証制度が試行されている。

また、国土交通省中国地方整備局は、平成26年度（2014年度）に発注する全てのトンネル工事にトンネル覆工コンクリートの長期保証制度を適用すると発表した。

これはトンネル覆工コンクリートの長期保証に関する検討委員会で長期保証の対象とするひび割れの基準値やインセンティブの内容などを決めたもので、土木工事設計マニュアルの中でトンネル工事の長期保証制度要領（試行）の運用に規定されている²⁹⁾。

保証期間は3年間とし、施工後3年間に発生するひび割れの状況が対象とされ、幅3mm以上、長さが5m以上、かつ最大幅1mm以上のひび割れは、丁寧な施工により避けられると判断し、補修対象に設定されている。さらに変状の進行に伴い、浮き・はく離・はく落の危険性がある「半月状」「幅0.3mm以上のひび割れによりブロック化しているもの」も補修対象とされる。

表-2.8 保証項目、保証基準と対策(補修)方法²⁹⁾ 物庫証

保証項目	保証基準	対策(補修)方法
覆工コンクリートのひび割れ (目地内を除く)	ひび割れ幅の最大値が3mm未満	ひび割れ注入など
	ひび割れ長さが5mを超える場合はひび割れ幅の最大値は1mm未満	
	半月状のひび割れがない	部分改築など
	幅0.3mm以上のひび割れによるブロック化がない。	

表-2.9 長期保証制度における保障と瑕疵の関係²⁹⁾

制度	適用期間	使用状態	過失の有無	措置
長期保証	3年	通常の仕様は可能	過失がない	修補
瑕疵	2年(一般的な過失) 10年(故意または重大な過失)	通常の仕様に耐えられない	過失がある	損害賠償 修補

2.3 覆工コンクリートの施工と施工管理

2.3.1 覆工コンクリートの施工の流れ

覆工コンクリートは、一般的には生コンクリートを使用する計画とされ、スライドセントル（移動型枠）を用いた全断面覆工コンクリートで計画される。生コンクリートはアジデーターカーによるコンクリート運搬、コンクリートポンプ車によるコンクリート打込みを行う。図-2.8に覆工コンクリートの施工概要図を、写真-2.2、写真-2.3にスライドセントルの写真を、図-2.9に覆工コンクリートの施工の流れを示す。

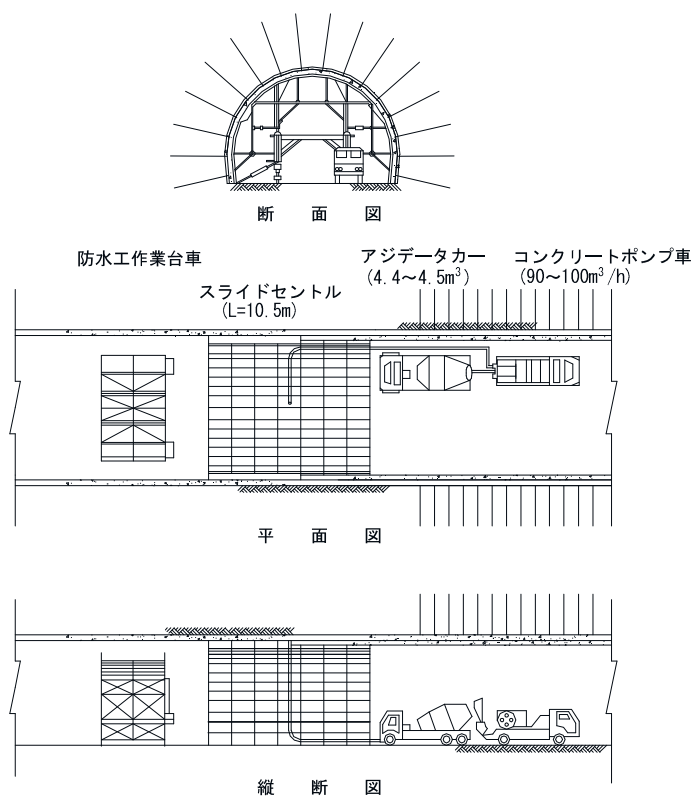


図-2.8 覆工コンクリート施工概要



写真-2.2 スライドセントル全景³⁰⁾



写真-2.3 スライドセントル設置状況³⁰⁾

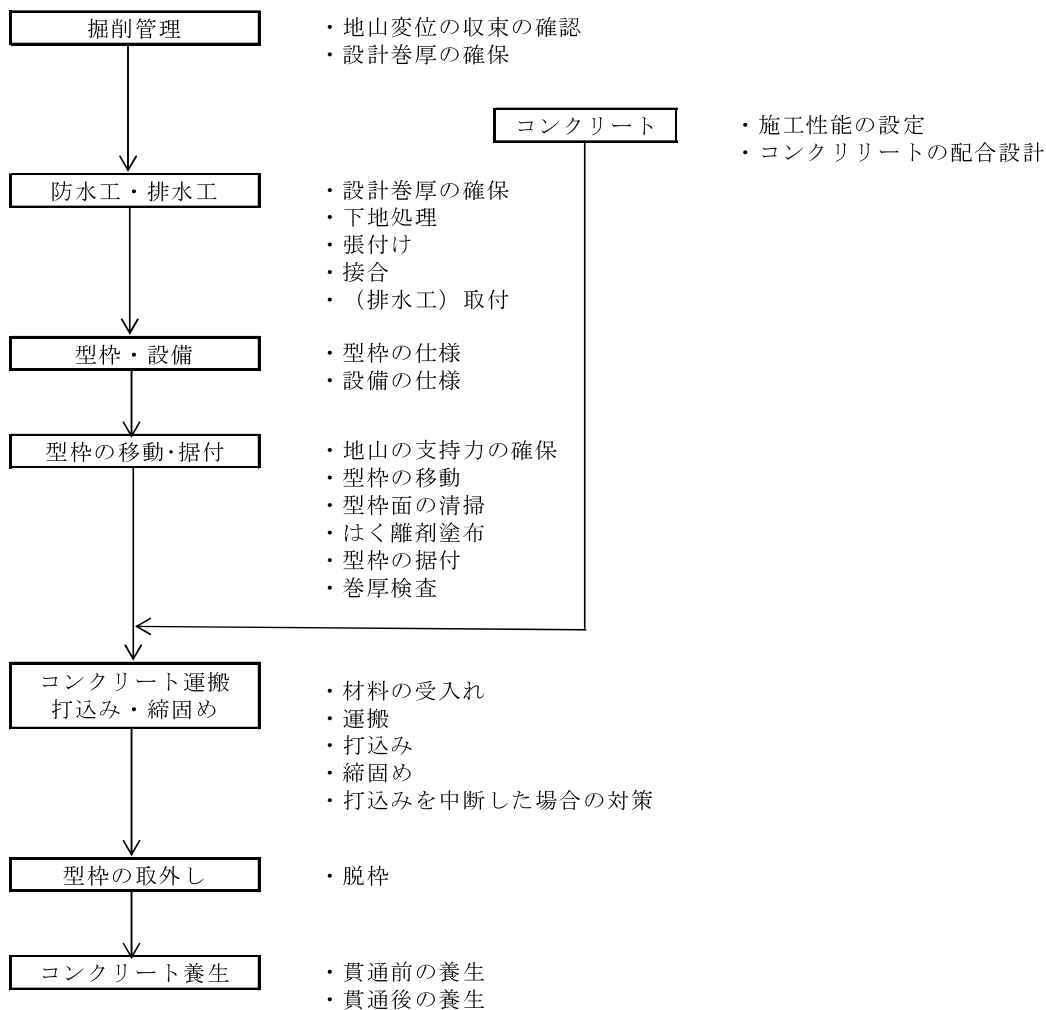


図-2.9 覆工コンクリート施工の流れ³¹⁾を加筆修正

覆工コンクリートの施工にあたっては、設計巻厚が確保されていること、および地山の変位が収束していることを確認する必要がある。これらを確認後、防水作業台車を用いて防水シートを敷設する。防水シートは、漏水の防止のほか、覆工コンクリートの背面拘束の低減、ひび割れ抑制を目的として、吹付けコンクリート面に敷設することが標準とされている。

スライドセントルは、延長 10.5m のものが標準的に使用されており、可縮機能を持ち、スライドセントル据付け→コンクリ打込み→養生→スライドセントル移動・据付けを繰り返して、コンクリートを打込むものである。

生コンクリートの運搬は、材料が分離しないようにトラックミキサー、アジテータ付き運搬機を用いるものとされ、コンクリートの練混ぜから打込み終了までの時間は、外気温が 25℃を超える時で、1.5 時間、25℃以下の時でも 2 時間以内とされている。

脱枠時の圧縮強度は 2.0～3.0N/mm² 程度が目安とされ、コンクリート打込み終了後、12～20 時間程度で脱枠されることが多い。

覆工コンクリートは、背面を吹付けコンクリート、内側をスライドセントルで囲まれた密閉空間に厚さ30cm程度の無筋コンクリートを打込むもので、これが施工上の大きな特徴となっている。

アーチ肩部以下のコンクリートの打込みは、スライドセントルに設置されている検査窓を用い、**図-2.10**に示すように下部の検査窓から順次打込み、棒状バイブレータで締固める（**写真-2.4**参照）。この際、材料分離を抑制し、均質で密実なコンクリートを打込むため、1.5m以上落下させない、バイブレータによる横流しは行わないなどの留意が必要である。天端へのコンクリート打込みは、吹上げ方式による打込みに切替える。吹上げ方式では従来の引抜き方式に比較し、天端への充填性は改善されたものの、狭隘な箇所での作業で作業員が手の届く範囲でしか締固められないことなど、作業性が悪く、品質が不均一になる可能性があるなどの問題点が残されている。



写真-2.4 覆工コンクリート
(側壁部)締固め状況³²⁾

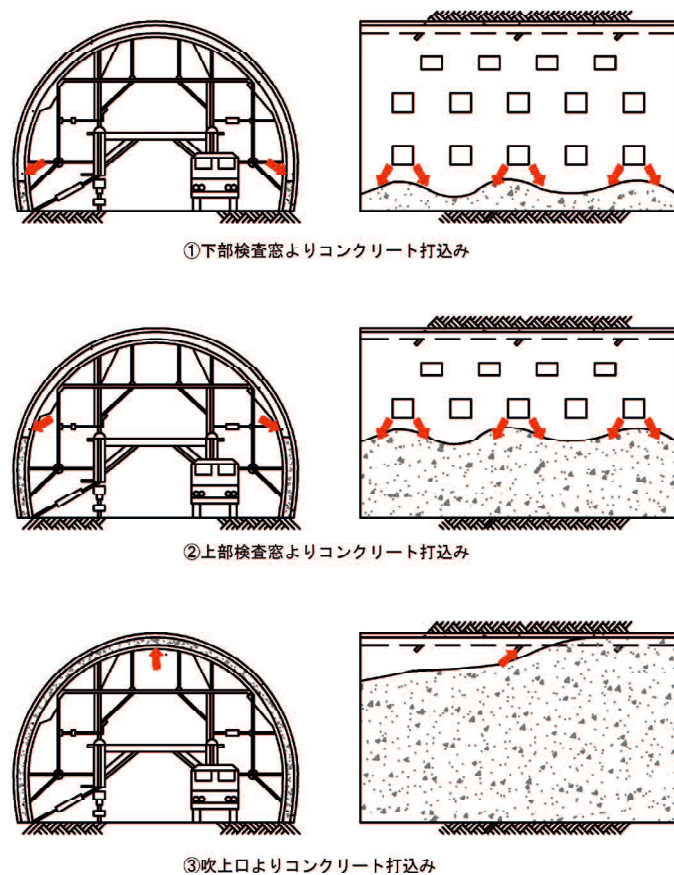


図-2.10 覆工コンクリートの打込み手順³³⁾を参考に作成

2.3.2 覆工コンクリートの施工に関するマニュアル類

平成8年版のトンネル標準示方書では、覆工コンクリートの施工に関して、第127条に覆工コンクリートの現場配合、第128条に生コンクリートの運搬、第129条に覆工コンクリートの打込みについて記されていた³⁴⁾。

これに対し、2006年制定版では第132条に覆工コンクリートの締固め、第133条に覆工コンクリートの養生が追加されている³⁵⁾。この標準示方書の記述の追加の契機となったのが、1999年6月に発生した山陽新幹線福岡トンネルの覆工からコンクリート塊が落下して、走行中の列車を直撃するという衝撃的な事故である（後述2.4.2項参照）。

その後も覆工コンクリートの落下が相次ぎ、トンネルの安全性に対する社会的な懸念が増大する中で、土木学会コンクリート委員会は、1999年10月、トンネルコンクリート施工指針作成小委員会を急遽設置し、2000年7月にはトンネルコンクリート施工指針（案）を発行した。この内容が、2006年制定版トンネル標準示方書にも反映されている。

同指針（案）では、山岳トンネルの覆工コンクリートを対象に、施工計画、コンクリートの施工性能、コンクリートの配合設計、製造、施工、および検査について取りまとめられている。施工に関しては、シート張付け、鉄筋、型枠、運搬、打込み、締固め、継ぎ目、および養生に関して半分以上のページをさいて詳述されている³⁶⁾。

以降、これに呼応して、各機関でトンネル覆工コンクリートの施工に関する手引きやマニュアルがまとめられている。

2001年に日本トンネル技術協会でもまとめられた覆工コンクリート施工の手引き³⁷⁾では、さらに現場で使用しやすくするため、巻末には詳細なチェックシートが示されている。

鉄道トンネル関係では、同じく2001年に旧日本鉄道建設公団によりトンネル覆工コンクリート施工管理マニュアル（案）³⁸⁾が整備され、現行の山岳トンネル設計施工標準に引継がれている。

NEXCOでは2002年に旧日本道路公団試験研究所（現高速道路総合技術研究所）において、覆工コンクリートの施工を対象に覆工コンクリート施工管理マニュアルが取りまとめられ、具体的な数値や、打継ぎ目の構造などが具体的に示されるとともに、覆工コンクリート打込みの際のチェックシートを添付³⁹⁾、コンクリート施工管理要領⁴⁰⁾と併せて、現場での施工管理に適用されている。

なお、NEXCOでは平成26年度より中流動コンクリートを標準としており²⁴⁾、現行のトンネル施工管理要領など²⁵⁾、⁴¹⁾は、中流動コンクリートを対象としている。

2.3.3 コンクリートの材料試験およびフレッシュコンクリートの試験

コンクリートの材料試験および規格値については、国土交通省では土木工事施工管理基準及び規格値（案）に規定され、表-2.10 に示すような材料試験および、表-2.11 に示すようなフレッシュコンクリートに関する試験を実施して品質管理を行っている⁴²⁾。

表-2.10 おもなコンクリートの材料試験の項目

項 目	試 験 方 法
アルカリ骨材反応対策	JIS A1145（化学法） JIS A1146（モルタルバー法）
骨材のふるい分け試験	JIS A1102
骨材の密度および吸水試験	JIS A1109、JIS A1110
粗骨材のすりへり試験	JIS A1121
骨材の微粒分量試験	JIS A1103
砂の有機不純物試験	JIS A1105()（玉砕以外の砕砂は試験不要）
モルタルの圧縮強度による砂の試験	JIS A1142
骨材中の粘土塊量の試験	JIS A1137（玉砕以外の砕砂は試験不要）
硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験	JIS A1122
セメントの物理試験	JIS R5201
ポルトランドセメントの化学分析	JIS R5202
練混ぜ水の水質試験	JIS A5308

表-2.11 おもなフレッシュコンクリートの試験

項 目	試 験 方 法
スランブ試験	JIS A1101
単位水量測定	
コンクリートの圧縮強度試験	JIS A1108
塩化物総量規制（塩化物含有量）	JIS A1444 または簡易塩分測定器
空気量測定	JISA1116、JISA1118、JISA1128
コアによる強度試験	JISA1107
コンクリートの洗い分析試験	JISA1112
温 度	JISA1156

また、NEXCO では中流動覆工コンクリートの採用にともない、トンネル施工管理要領において、材料の品質管理基準、基準試験の項目や日常管理試験の項目およびこれらの頻度を定めている²⁵⁾。

2.3.4 シート防水工

シート防水工は、漏水防止という本来の目的のほかに、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの絶縁による覆工コンクリートのひび割れの発生防止を期待して使用される。

防水シート ($t=0.8\text{mm}$ 以上) と透水性緩衝材 ($t=3\text{mm}$, 30kg/m^2) との組合されたものとされ、防水シートのおもな材料は、プラスチック系のエチレン酢酸ビニル共重合体 (EVA)、ポリ塩化ビニル (PVC) およびエチレン共重合体ビチューメン (ECB) であり、中でも EVA の採用が多い。

裏面緩衝材は厚さ $t=3\text{mm}$ 、単位面積あたりの質量 300kg/m^2 以上とされ、材質としてはポリプロピレン (PP)、ポリエステル (PET) などの繊維製品がおもに使用される。

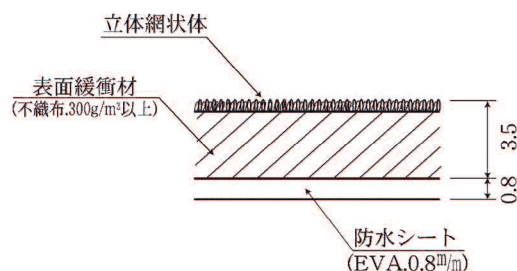


図-2.11 立体網状体付き防水シートの例⁴³⁾

表-2.12 防水シートの規格⁴⁴⁾

項目	試験法	規格
比重	JISK6773 (20℃)	0.95±0.05
引張強さ (N/mm ²)	〃	15.7 以上
伸び (%)	〃	600 以上
引裂強さ (N/mm ²)	JISK6301 (20℃)	4.9 以上

防水シートの施工は、シート台車を用いて展張りするもので、漏水が生じないように吹付けコンクリート面にピンなどを用いて内打鉋方式で固定させることとされている。

シートは重ね代を設けて、溶着接合するものとし、ロックボルトの頭部に対しては、シートが破損しないように、保護キャップ、不織布や発泡スチロールによるボルト頭部保護を行う必要がある。

写真-2.5 は、防水シートの展張り完了時の写真であり、奥に見えるのはシート台車である。



写真-2.5 防水シート展張り完了状況⁴⁵⁾

2.4 覆工コンクリートの維持管理

2.4.1 山岳トンネルの点検管理

(1) 山岳トンネルの維持管理

トンネルとは地中の空間そのものであり、この空間を保持するための材料、すなわち、地山、支保工、および覆工コンクリートが維持管理の対象となる。このうち、覆工コンクリートは最も内空側に位置し、その変状は、覆工コンクリートに期待される機能を満たさなくなるとともに、コンクリート片の崩落は第三者を巻き込んだ事故にもつながりかねない。

このため、覆工コンクリートは、力学的機能が明確でなく、とくに NATM では力学的機能が期待されていない場合が多いにも関わらず、維持管理の面では主役として取り扱われる。

覆工に対する健全度評価、劣化予測を精度よく行うためには、いうまでもなく、ひび割れをはじめとする変状要因を把握することが不可欠である。

本節では、山岳トンネルの維持管理について、過去の経緯、近年の動向をもとに、今後の課題を整理する。

(2) 山岳トンネルの点検

山岳トンネルの点検・維持管理は、各企業者や管理者によって名称は異なるが、**図-2.13** に示すように、一般的には定期的にトンネルの状態を把握する一次点検と、詳細に変状を把握し原因を推定する二次点検とに区分される。

道路トンネルでは日常点検、異常時点検、臨時点検および定期点検により変状を確認し、点検結果にもとづいて調査の必要性を判定する。

2014 年に改訂された道路トンネル定期点検要領（国土交通省道路局国道・防災課）によると、「定期点検では、道路ト

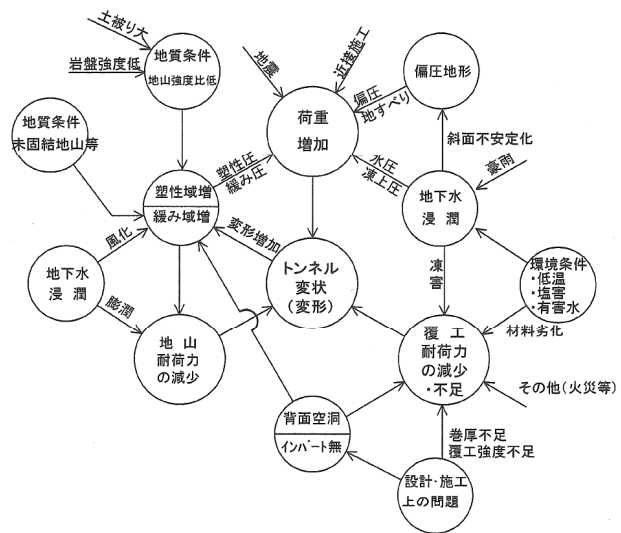


図-2.12 トンネル変状の関係図 ⁴⁶⁾

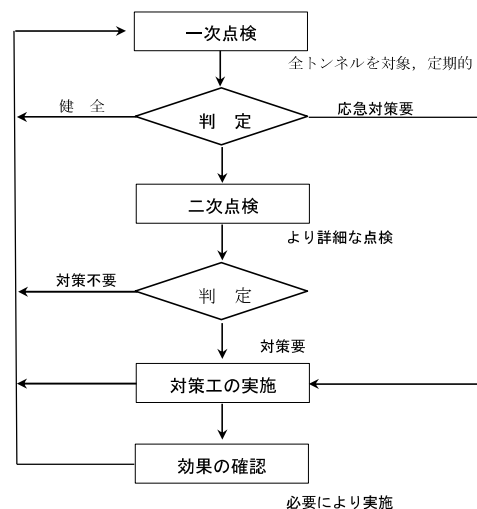


図-2.13 一般的なトンネル維持管理 ⁴⁷⁾

ンネルの変状・異常を把握，診断し，当該道路トンネルに必要な措置を特定するために必要な情報を得るものであり，安全で円滑な交通の確保や第三者への被害の防止を図るなど，トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施する。」とされている⁴⁸⁾。

具体的な内容は地方自治体管轄のトンネルを含め，道路法の道路におけるトンネルを対象に以下を定めている。

- ・定期点検の頻度は5年に1回の頻度で実施することを基本とする。
- ・定期点検は，近接目視により行うことを基本とし，必要に応じて触診や打音などの非破壊検査などを実施する。
- ・定期点検は定期点検を行うために必要な知識及び技能を有する者が行う。
- ・健全性の診断は変状などの健全性の診断とトンネルごとの健全性の診断を行うものとし，ともに以下を基本とする。

表-2.13 判定区分（変状などの健全性の診断）⁴⁹⁾

区 分		状 態
I	健 全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが，予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり，早期に措置を講ずべき状態。
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている，または，生じる可能性が著しく高く，緊急に措置を講ずべき状態。

鉄道トンネルにおける点検は，おもに構造物と軌道整備の維持管理との観点から行われており，全般調査，随時検査，個別検査などで体系づけられている。

全般検査は，構造物全般の健全度の把握，個別検査の要否および措置の要否の判定のために2年ごとに行うことを基本とする定期検査である。また，随時検査は地震や大雨，融雪による異常出水などの災害による変状が発生した場合などに行う検査である。これらの検査で対策が必要であると判定された構造物に対して行うものが個別検査であり，変状原因の推定，変状の予測および性能項目の詳細な照査を行って健全度判定を行う。

トンネルについては，表-2.14 に示すように，構造物の状態とは別にはく落に対する健全度の判定も求められている。

表-2.14 トンネルにおけるはく落に関する変状の状態と標準的な健全度の区分⁵⁰⁾

健全度	変 状 の 状 態
α	近い将来，安全を脅かすか，はく落が生じるおそれのあるもの
β	当面，安全を脅かすか，はく落のおそれはないが，将来，健全度が α になるおそれがあるもの
γ	安全を脅かすか，はく落のおそれがないもの

2.4.2 山岳トンネルにおける供用後の事故事例と維持管理基準類の経緯

供用後のトンネルの事故は、トンネルの維持管理の考え方や基準類の整備に影響を与える契機となる事例がみられる。

表-2.15 に新聞や各機関の発表から供用後の山岳トンネルにおける崩落事故、崩落現象の事例の一部を、表-2.16 にトンネルの維持管理・点検に関する基準やマニュアルの経緯を示す。着色部はその後のトンネル維持管理において契機となったトンネル事故を示すものである。

1990年2月4日に、千葉県の国道127号小山野トンネルで、約200 m³の土砂が覆工コンクリートを巻き込んで崩落する変状が発生した⁵¹⁾。この変状では車や人に被害はなかったが、その後、交通止めとなり、利用者への影響が生じた。

この崩落事故を契機に当時の建設省では、全国でトンネル緊急点検を実施するとともに、1993年には現行の道路トンネル維持管理便覧⁵²⁾が発刊された。

1999年には、鉄道トンネルで崩落事故が連続して発生した⁵³⁾。1999年6月27日には山陽新幹線福岡トンネル内で覆工コンクリート片(225kg)が剥離し、走行中の列車の屋根に落下したことにより、停電が発生、列車が停止した。続いて同年10月9日には山陽新幹線北九州トンネルで、横334cm、縦35cm、厚さ15cm、重さ226kgの突起コンクリートが軌道脇に落下しているのが、夜間に発見された。さらに同年11月28日には室蘭本線礼文浜トンネルで、重さ2t(直径3m、高さ40cmの円柱状)のコンクリート塊が剥落し、列車が乗り上げるという事故が発生した。これらのトンネルの覆工崩落事故は、たまたま、事故が連続したのではなく、トンネル施工上あるいは、維持管理上に崩落の要因が内在していたものと考えられ、その後のトンネルの覆工コンクリートの施工法や維持管理に対する考え方が変わる大きな契機となった。

表-2.16 に示したように、これらの覆工コンクリートの崩落事故を契機として、道路トンネル、鉄道トンネルともに、点検や維持管理について指針やマニュアルの作成が行われ、現行の指針類が作成された。また、覆工コンクリートの初期ひび割れが進展し、崩落に至ったことから、覆工コンクリートの施工法についても見直され、指針や手引きなどが整備された。

2012年12月には、中央自動車道笹子トンネルにおいて、天井板が138m間にわたり落下し、3台の自動車が出火し、死者9名、負傷者2名を出す最悪の事態となったのは、記憶に新しいところである。この事故は覆工コンクリートそのものの崩落ではないが、多大な第三者被害を伴ったこともあり、わが国のインフラ全体の安全性が問われることとなった。

トンネルの崩落事故は社会的影響が大きく、走行車両や利用者など、第三者を巻き込んだ重大事故となるリスクを持っていることが再認識させられた事故であった。

表-2.15 トンネルにおける崩落事故・崩落現象の例

発生年月	トンネル名	崩落塊規模	崩落原因
1988年4月	JR 篠ノ井線 冠着トンネル	モルタル, 幅 3.6m, 長 16m, 厚 30mm	アーチ部の漏水防止用モルタル
1990年2月	国道 127 号 小山野トンネル	高 4m, 幅 5.5m, 長 6.6m 土砂量 200 m ³	覆工背面の空洞に起因する突発性崩壊
1999年6月	山陽新幹線 福岡トンネル	225kg	コールドジョイント
1999年10月	山陽新幹線 北九州トンネル	334×35×15cm, 重さ 226kg	側壁コンクリートの突起コンクリート (迫め部注ぎ口)の崩落
1999年10月	JR 飯田線 小沢トンネル	側壁部岩盤崩落(素掘り) 1.7×3.7×0.75m, 2t	側壁部(素掘り, アーチは覆工)の岩 盤が風化の進行により崩落
1999年11月	JR 海峡線 第2今泉トンネル	コンクリート片, 1.2k g	
1999年11月	室蘭本線 礼文浜トンネル	重さ 2t (直径 3m, 高さ 40cm の円柱状)	押抜きせん断(施工直後の若材齢時に 生じた弱線)
2004年10月	上越新幹線 魚沼トンネル外	中越地震により, 上越新幹線魚沼 TN. 堀之内 TN. 妙見 TN. 滝谷 TN, 国道 17 号和南津 TN. 蕨神発電所水路 TN 等でコンクリート片落下	
2006年8月	広島県営水道 送水トンネル	10.6m区間の覆工崩壊	トンネル上部の不良地山の劣化が進行 し, 岩盤の一部が崩壊
2007年10月	九州自動車道 福智山トンネル	15×5×4.5cm (360 g) 他, 4 片の剥落	
2007年12月	浜田自動車道 岩畳トンネル	全 12 片, 総重量 60kg 最大 33×15×15cm	打継ぎ目部のコンクリート落下
2008年2月	阪和自動車道 東岩代トンネル	全 30 片, 総重量 0.5kg 最大 12×3.5×1cm	
2008年4月	北陸道 日野トンネル	監視員通路部, コンクリート とタイル 50kg の崩落	
2008年7月	高知自動車道 明神トンネル	全 9 片 最大 2.7kg, 14×11×7cm	
2009年7月	山陽新幹線 鞍手トンネル	7 片, 総重量 6kg 最大 2.2kg, 21×14×4.5cm	存置された仮設鋼材腐食に伴う周辺コ ンクリート片の崩落.
2011年8月	国道 151 号 太和金トンネル	直径 2m の範囲で頂部が剥 落, 土砂 150 m ³ が流入	台風時に, 覆工背面の空洞背面地山の 崩壊
2011年12月	山陽新幹線 第2米川トンネル	10 片, 総重量 940 g	
2012年6月	九州新幹線 塩嶺トンネル	1 片, 重量不明	
2012年12月	中央自動車道 笹子トンネル	138mにわたり, 天井板(PC) が落下	天井板の吊り金具(アンカーボルト)の 劣化
2013年1月	国道 371 号 紀見トンネル	肩部より, 90×40×10cm のコ ンクリート片落下	
2013年1月	上越新幹線 大清水トンネル	モルタル片, 24.7kg	打継ぎ目の化粧モルタルのはく離
2013年1月	東北新幹線 第2有壁トンネル	モルタル片 4 個, 1.4kg	地面から 30cm の側壁のモルタルのは く離
2013年1月	東北新幹線 一関トンネル	モルタル片 1.6kg	
2013年1月	国道 410 号 大戸見トンネル	モルタル 3.5t	
2013年2月	JR 中央東線 善知鳥トンネル	モルタル片 6 個, 17.7kg 最大 4.2kg	
2013年2月	国道 388 号 新浦城トンネル	内装用タイル 100 枚以上	内装用タイルのはく離

表-2.16 トンネルの維持管理・点検に関する基準・マニュアルの経緯

	道路関係	鉄道関係	崩落事故等
1990年	通達：トンネル緊急点検 通達：平成2年度防災点検	トンネル補強・補修マニュアル	小山野 Tn
1991年			
1992年			
1993年	道路トンネル維持管理便覧		
1994年			
1995年			
1996年			
1997年			
1998年	設計要領トンネル・保全編(変状対策)	変状トンネル対策工設計マニュアル	
1999年	通達：トンネル緊急点検	トンネル保守管理マニュアル(運輸省)	山陽新幹線・福岡、北九州 Tn 他
2000年		山陽新幹線トンネル安全総点検 トンネル保守マニュアル(案)	
2001年	道路構造物点検要領(案)		
2002年	道路トンネル定期点検要領(案)	都市トンネル保守マニュアル(案)	
2003年	道路トンネル変状対策マニュアル(案) 道路構造物点検要領(案)改訂		
2004年			
2005年	保全点検要領		
2006年	設計要領トンネル・保全編(変状対策)改訂		
2007年		維持管理標準・トンネル トンネル補修・補強マニュアル	
2008年			
2009年			
2010年			
2011年			
2012年	設計要領トンネル・保全編(変状対策)改訂 保全点検要領(構造物編)改訂		笹子 Tn
2013年	総点検実施要領(案)【道路トンネル編】		
2014年	道路トンネル定期点検要領		
2015年	道路トンネル維持管理便覧(本体工編)		

道路関係のうち、青字は、NEXCO(旧 JH) 関係

2.4.3 事後保全から予防保全への移行

高度成長期（1955～1973年）に多く建設されたインフラ設備が、30～40年を経過する2000年頃から、インフラ設備のアセットマネジメント、ストックマネジメントが研究されるようになり、維持管理は従来の事後保全から予防保全への移行が急務であるとされている。本項では、土木学会や国土交通省におけるトンネルの維持管理の面においても重要となる予防保全への取組みの流れを示す。

(1) 土木学会 アセットマネジメント研究小委員会の研究経緯

2002年に土木学会では、建設マネジメント委員会の中に、アセットマネジメント研究小委員会が設置され⁵⁴⁾、2005年11月には研究成果として、アセットマネジメント導入への挑戦が出版された。本書では社会資本のアセットマネジメントを以下のように定義されている⁵⁵⁾。

「国民の共有財産である社会資本を、国民の利益向上のために、長期的視点に立って、効率的、効果的に管理・運営する体系化された実践活動。工学、経済学、経営学などの分野における知見を総合的に用いながら、継続して（ねばり強く）行うものである。」

また、「アセットマネジメントとは、市場では融資産・不動産の運用という意味で用いられる。したがって、物理的資産の管理に止まるならば敢えてアセットマネジメントという用語を使うに及ばない。維持管理の合理化・最適化という工学的研究の延長を示す用語で十分である。」とされている⁵⁶⁾。

(2) 国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム～構造改善プログラム

国土交通省では、2003年に国土交通省公共事業コスト構造改革プログラムを発表した⁵⁷⁾。同プログラムの管理の見直しの中で、「施策21：アセットマネジメント手法など、ライフサイクルコストを考慮した計画的な維持管理を行う。施策22：既存ストックを有効活用し、適正な管理を推進し、新設・更新費を低減するとともに、早期の効果発現を図る。」とされている。

また、補修・更新が必要な道路構造物が飛躍的に増大しており、すでに「更新時代」の始まりであるとの認識から、2002年6月に道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する委員会を設置し、翌2003年4月には、道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する提言を取りまとめ、アセットマネジメントの考え方や必要な要素技術などの検討成果が公表された⁵⁸⁾。

2008年3月には、国土交通省公共事業コスト構造改善プログラムを発表、戦略的な維持管理の中で、「施策19：公共施設の点検結果などにかかるデータベースの整備、施策20：公共施設の健全度を評価するための指標の設定、施策21：公共施設の長寿命化に関する計画策定の推進、施策22：地域の実情や施設特性に応じた維持管理の推進」を具体的施策として掲げられている⁵⁹⁾。

(3) 国土技術総合研究所 スtockマネジメント研究会

国土交通省国土技術政策総合研究所では、2006年にストックマネジメント研究会を設置、メンテナンスストックのマネジメントの研究に着手した。同研究会では、アセットマネジメントとストックマネジメントを以下のようにとらえ、社会資本の戦略的維持管理として扱うべきはストックマネジメントであるとされている⁶⁰⁾。

- ・アセットマネジメント：投資用資産の管理を実際の所有者・投資家に代行して行う。
- ・ストックマネジメント：社会資本施設の特徴である「必要不可欠だがあってあたりまえ」という永久への暗黙の期待がかかる蓄積としての社会資本の機能を維持すること。

ライフサイクルコストの縮減や長寿命化を図るストック型社会への転換を推進していく必要があるとし、事後的管理から予防保全的管理への移行が重要であるとしている。

予防保全的管理は、図-2.14に示すように点検、健全度評価、劣化予測、および補修補強の4つのフェーズからなるとし、それぞれのフェーズでの問題が提起されている。

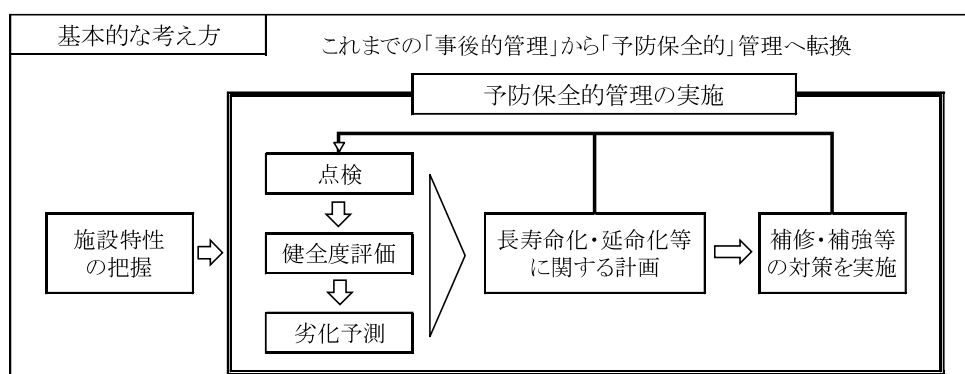


図-2.14 予防保全的管理の基本的な考え方⁶¹⁾

(4) 近畿地方整備局の取り組み・・・道路トンネルの健全性評価技術の研究

国土交通省近畿地方整備局では、2005年度より、道路トンネル健全性評価技術プロジェクトを発足させ、2010年8月にはその研究成果を報告書に取りまとめている⁶²⁾。

この研究では、現状のトンネルマネジメント手法の整理を行ったうえで、望ましいマネジメント手法の検討を行い、トンネルのアセットマネジメントのあるべき姿を検討している。計測技術の活用やトンネルデータのビジュアル化の検討では、計測技術として画像処理技術やレーザ計測技術などを取上げ、その適用性を検討するとともに、データベース三次元画像を用いる手法について検討されている。

これらの技術を基本とし、劣化のモデル化・経年変化、ライフサイクルを考慮したトンネルアセットマネジメントに活用するため、覆工コンクリートのひび割れ進展を考慮したトンネル健全性低下予測手法および、トンネルアセットマネジメントシステムの検討が行われた。

2.4.4 2012年以降のトンネル維持管理に関する動向

笹子トンネルの天井板の落下事故を契機として行われた2012年以降における社会資本メンテナンスの検討経緯を表-2.17に示す。

表-2.17 2012年(平成24年)以降の社会資本メンテナンスの検討経緯

	◆	◇	○	◎	△	▲	☆	内 容
2012.7			○					小委員会設立
2012.8								
2012.9								
2012.10								
2012.11							☆	委員会設立
2012.12								笹子トンネル天井板の落下事故発生
		◇						調査・検討委員会設立
			○					キックオフ「メンテナンス政策元年」/緊急提言
2013.1				◎				道路メンテナンス技術小委員会設立
						▲		社会資本の老朽化対策会議設置
2013.2						▲		社会資本の維持管理・更新に向けて当面講ずるべき措置
			◎					総点検実施要領(案)/第2回委員会
2013.3								
2013.4			◎					道路の老朽化対策の本格実施に関する提言
							☆	中間とりまとめ
2013.5						▲		社会資本の老朽化対策室設置
					△			「日本再興戦略」閣議決定
2013.6			◎					道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて/中間とりまとめ
		◇						調査・検討委員会報告書
2013.7								
2013.8								
2013.9								
2013.10					△			関係省庁連絡会議設置
2013.11					△			インフラ長寿命化基本計画
2013.12			○					今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について(答申書)
2014.1							☆	技術検討委員会報告書
2014.2				◎				道路トンネル定期点検基準(案), 要領(案)/第5回委員会
2014.3	◆							道路法施行規則の一部を改正する省令案公布
2014.4			◎					道路の老朽化対策の本格実施に関する提言(案)
2014.5						▲		インフラ長寿命化計画(行動計画)
2014.6			◎					道路トンネル定期点検要領
2014.7	◆							道路法施行規則の一部を改正する省令案施行

◆：道路法施行規則の一部改正

◇：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会

○：社会資本整備審議会社会資本メンテナンス戦略小委員会

◎：社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会，同分科会メンテナンス技術小委員会

△：インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議

▲：社会資本の老朽化対策会議

☆：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会

(1) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会

2012年12月に発生した笹子トンネルの天井板落下事故を受けて、国土交通省では事故の2日後には「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会」を立ち上げ、事故の原因を調査するとともに、今後の設計・施工・維持管理のあり方について提言が行われている⁶³⁾。まとめとして、各道路管理者が直ちに再発防止策を講じることを期待するとともに、点検要領の整備、設計基準の改訂および新技術の開発を提言し、教訓として、各種情報の共有・継承の重要性が示されている。

(2) 社会資本審議会・交通政策審議会 社会資本メンテナンス戦略小委員会

国土交通省では、笹子トンネル天井板落下事故の4ヶ月前にあたる2012年7月31日には、社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会社会資本メンテナンス戦略小委員会を設置し、今後の社会資本の維持管理・更新のあり方についての検討が始められていた。同小委員会では、笹子トンネルの天井板落下事故を受けて、2013年1月に「メンテナンス政策元年」と位置づけ、以下の緊急提言が行われている⁶⁴⁾。

- ① 「インフラの健全性診断のための総点検」などの緊急実施
- ② インフラの健全性などに関するカルテの整備
- ③ インフラの健全性などの国民への公表
- ④ 長期的視点に立った維持管理・更新計画の策定
- ⑤ 地方公共団体などへの支援
- ⑥ 維持管理・更新をシステムチックに行うための実施プロセスの再構築
- ⑦ 維持管理・更新に係る情報の収集・蓄積
- ⑧ 維持管理・更新に係る予算の確保
- ⑨ 組織・制度の変革と人材育成
- ⑩ 効率的・効果的な維持管理・更新のための技術開発の推進

同年12月には「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について」と題する答申書が作成されている⁶⁵⁾。

(3) 社会資本整備審議会 道路分科会

社会資本メンテナンス戦略小委員会と平行して、社会資本整備審議会道路分科会基本政策部会では、2014年4月に、道路の老朽化対策の本格実施に関する提言(案)をとりまとめ、最後の警告として今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れと警告している⁶⁶⁾。

具体的な対応については、2013年1月に社会資本審議会道路分科会道路メンテナンス技術小委員会を設置、2013年6月に中間とりまとめとして、「道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて」がまとめられている⁶⁷⁾。

メンテナンスサイクルの構築にあたっては、安全性の確保（利用者や第三者への被害の防止）、長寿命化、道路構造物の特性を踏まえた対応を重要な視点とされている。

また、技術基準類の整備も重要な審議事項としており、これを受けて、道路局では、2014年6月には7月の道路法施工規則の一部改正に向けて、道路トンネル定期点検要領

がまとめられた。これらの点検では、第三者被害を防止することを視点として、判定区分をⅠ=健全、Ⅱa、Ⅱb=予防保全段階、Ⅲ=早期措置段階、Ⅳ=緊急措置段階の5段階に分割されている⁴⁹⁾。

(4) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議

2013年6月に閣議決定した「日本再興戦略」に基づき、同年10月には「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」が設置された。同年11月には「インフラ長寿命化基本計画」が取りまとめられ、インフラ長寿命化基本計画（ロードマップ）が示された⁶⁸⁾。

ロードマップでは、2013年度をスタートとし、2020年頃には国内の重要インフラ・老朽インフラの20%でセンサー、ロボットなどを活用すること、および新材料の実用化に目途をつけることが目標とされている。2030年頃には老朽化インフラに起因する重要インフラの重大事故【ゼロ】、国内の重要インフラ・老朽インフラのすべてでセンサー・ロボットなどを活用、および点検・補修などのセンサー・ロボットなどの世界市場の3割の獲得が目標とされている。

(5) 国土交通省社会資本の老朽化対策会議（社会資本の老朽化対策室）

2013年1月に社会資本の老朽化対策会議を設置、同年3月には、社会資本の維持管理・更新に向けて当面講ずるべき措置がまとめられた⁶⁹⁾。さらに、同年5月には、社会資本老朽化対策室を設置、2014年5月には、前述のインフラ長寿命化基本計画⁶⁸⁾を受けてインフラ長寿命化計画(行動計画)平成26年度～平成32年度がまとめられている⁷⁰⁾。

行動計画では、VI. 必要施策に係る取組みの方向性として、点検・診断／修繕・更新など、基準類の整備、情報基盤の整備と活用、個別施策計画の策定・推進、新技術の開発・導入、予算管理、体制の構築、法令などの整備の各項目に対して方向性が示されている。

(6) 道路法施行法の一部改正

国土交通省では、道路の維持・修繕に関する具体的な基準などを定めるため、道路法施行規則の一部を改正する省令、およびトンネルなどの健全性の診断結果の分類に関する告示を2014年3月31日に公布し⁷¹⁾、7月1日に施行された。

具体的な内容は、橋梁・トンネルなどは、国が定める統一的な基準により、5年に1回の頻度で、近接目視により点検を行うことを基本とすること、点検、診断の結果などについて、記録・保存すること、および統一的な尺度で健全性の診断結果を分類することである。

(7) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会(NEXCO)

NEXCOでは、笹子トンネル天井板崩落事故のわずか1ヶ月前にあたる2012年11月に、高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会を設置し、2013年4月に高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ⁷²⁾を、2014年1月

には高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術委員会報告書が取りまとめられた⁷³⁾。

この中では、高速道路資産の長期保全および更新を基本的に大規模更新、大規模修繕、および通常修繕に分類している。大規模更新および大規模修繕は、ライフサイクルコストの最小化、予防保全および性能強化の観点を考慮し、技術的見地から必要かつ効果的な対策を講ずることにより、高速道路ネットワークの機能を長期にわたって健全に保つために行うとされている。なお、トンネルに対しても健全性および性能に対する概念などが示されている。

(8) 次世代インフラ用ロボット現場検証委員会

トンネルの点検技術に関しても研究開発が活発であり、2013年7月に設立された次世代インフラ用ロボット開発・導入検討会の検討を踏まえ、2014年2月には、次世代社会インフラ用ロボット検証委員会トンネル維持管理部会において、同年7月に現場検証対象技術が決定され、10月より現場検証が行われている。

平成27年度には現場検証をまとめ、「公募技術は近接目視の代替えもしくは支援ができる技術、および打音検査の代替えもしくは支援ができる技術であり、8件の技術に対して現場検証が行われたが、いずれの技術も現段階では、現状技術の代替えまたは、全面的な支援には至らないものの、今後の開発の方向性が示された」とされている⁷⁴⁾。

(9) 土木学会地下空間委員会

土木学会地下空間委員会では、2005年より、地下構造物へのアセットマネジメントの適用化検討に取り組み、2015年2月にはその成果を地下空間ライブラリー第1号地下構造物のアセットマネジメント—導入に向けて—を取りまとめた⁷⁵⁾。同書では第3章山岳トンネルにおけるアセットマネジメントでは、道路トンネルを題材にして、その要求性能を明確にするとともに、点検結果を基に劣化を判断する現状の方法に加えて、点検結果を定量的な判定指標としてとらえる方法と劣化予測のための判定項目を抽出し、判定項目ごとに劣化度を定量化した健全度判定法（保有性能評価法）が提案されている。そして、マルコフ過程を用いて、対象トンネルの劣化変状要因ごとに正規確率を求め、将来時点の発生確率を予測する方法が紹介されている。

2.5 第2章のまとめ

(1) 覆工コンクリートの対する考え方

本来、インフラ設備では設計～施工～維持管理が一貫したものとする必要があるが、覆工コンクリートでは、必ずしも一貫したものとなっていないのが現実であり、以下のような矛盾を抱えている。

- a) 覆工コンクリートには力学的機能が期待されることは少なく、設計時には脇役的位置である。しかしながら、維持管理では覆工コンクリートは主役とみなされ、ひび割れに着目した評価が主体である。設計思想と維持管理の考え方が整合していないと言える。
- b) 品質保証制度の試行⁹⁾を含め、ひび割れの少ない覆工コンクリートの施工が求められている。しかしながら、これは、施工者の企業努力に依存しているもので、設計時、発注時には従前の構造、品質とされ、養生も考慮されていないなど、設計・施工の乖離が大きい。

コンクリートの研究者やトンネルの研究者において、覆工コンクリートはコンクリート構造物として体系づけた研究が行われてこなかったのも現実である。

近年では、山岳トンネルの覆工コンクリートは、地下の空間、すなわちトンネルを安全、快適に提供するための重要な構造物であるとの認識から、その要求性能を含め、体系づけた研究が実施するようになってきている。

(2) 覆工コンクリートに発生するひび割れに対する考え方

NATMの支保を構成する地山、支保工、および覆工コンクリートのうち、覆工コンクリートは最も内空側に位置し、覆工コンクリートに変状が生じた場合、トンネルを利用する第三者の安全性を脅かす要因、すなわち使用性を損なう要因となることが懸念される。

また、覆工コンクリートに変状が生じた場合、外力に起因するものであっても、はく落につながる浮きであっても、まず、覆工コンクリートにひび割れが生じ、これが進展することにより、覆工の変状や、浮き・はく落に至ることに着目すると、覆工コンクリートに発生するひび割れを極力抑制することが重要となる。

このため、ひび割れの少ない高品質な覆工コンクリートの施工が要求され、ひび割れなどの欠陥に対して対策を講じる必要がある場合には、設計時あるいは施工時に有害なひび割れの発生をできるだけ防ぐ配慮を行うことが重要とされている。

【参考文献】

- 1) 小島芳之：鉄道技術来し方行く未，発展の系譜と今後の発展，第19回鉄道山岳トンネルの建設，RRR，Vol.70，No.10，pp.28-31，2013.10
- 2) 田辺朔郎：とんねる，丸善，p.28，1922.2
- 3) 日本道路協会：道路トンネル便覧，p.112，1975.1
- 4) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，p.299，2006.7
- 5) 高山昭，山中傳四朗：覆工入門(3)，トンネルと地下，Vol.5.No.2，p.110，1974.2
- 6) 住友彰，伊吹山四郎：トンネルの設計と施工，東京・金原出版，p.139，1968.11
- 7) 住友彰，伊吹山四郎：トンネルの設計と施工，東京・金原出版，p.144，1968.11
- 8) 国鉄 NATM 研究会：NATM の設計・施工の合理化に関する研究，日本国有鉄道鉄道技術研究所，p.95，1982.3
- 9) 日本トンネル技術協会：硬岩 NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.105-106，1982.3
- 10) 日本トンネル技術協会：NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.111-113，1983.3
- 11) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳）・同解説，p.70，1986.11
- 12) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説，pp.91-92，1996.7
- 13) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，p.94-65，2006.7
- 14) 日本トンネル技術協会：トンネルの覆工に関する調査研究報告書，pp.13-16，1999.11
- 15) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー第12号 山岳トンネル覆工の現状と対策，土木学会，p.6-8，2002.9
- 16) 東・中・西日本高速道路株式会社：コンクリート施工管理要領，p.8，2012.7
- 17) 国土交通省近畿地方整備局：設計便覧道路編第8章トンネル，pp.8-30，2012.4
- 18) 国土交通省九州地方整備局：土木工事設計要領第Ⅲ編道路編第3章トンネル設計，pp.道3-40，2011.7
- 19) 国土交通省中国地方整備局：土木工事設計マニュアル第3編道路編第6章トンネル，pp.3-6-39，2015.4
- 20) 国土交通省北陸地方整備局：設計要領(道路編)第10章トンネル，pp.10-21，2012.4
- 21) 国土交通省四国地方整備局：設計便覧道路編第9章トンネル，pp.9-51，2014.4
- 22) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領第4集トンネル，p.4-6-2，2015.4
- 23) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp.102-103，2014.5
- 24) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル編(1)本体工建設編，pp.123-124，2013.7
- 25) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領，p.39，2013.7
- 26) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー第21号性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント，土木学会，p.47，2009.10

- 27) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, p.11, 2007.1
- 28) 滝川駿介, 卷田将聡, 森山守, 木村定雄：高速道路トンネルの要求性能の規定化と実用的な性能評価基準の検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, IV-116, P.231-232, 2013.9
- 29) 国土交通省中国地方整備局：トンネル工事の長期保証制度(試行)の運用, 土木設計マニュアル第 3 編道路編 第 6 章トンネル, pp.3-6-55-3-6-77, 2015.4
- 30) 建設省中部地方建設局高山工事事務所：安房峠道路工事誌, p.361, 1999.11
- 31) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー第 12 号 山岳トンネル覆工の現状と対策, 土木学会, p.34, 2002.9
- 32) 高速道路技術センタートンネル研究部会：写真で見る道路トンネル, 高速道路技術センター, p.23, 1996.7
- 33) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートライブラリー102 トンネルコンクリート施工指針(案), 土木学会, p.45, 2000.7
- 34) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳)・同解説, pp.165-167, 1986.11
- 35) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, p.176, 2006.7
- 36) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートライブラリー102 トンネルコンクリート施工指針(案), 土木学会, pp.28-52, 2000.7
- 37) 日本トンネル技術協会：覆工コンクリート施工の手引き, 2001.12
- 38) 日本鉄道建設公団：覆工コンクリート施工管理マニュアル(案), 2001.2
- 39) 日本道路公団試験研究所：覆工コンクリート施工管理マニュアル, 2002.3
- 40) 東・中・西日本高速道路株式会社：コンクリート施工管理要領, 2015.7
- 41) 高速道路総合技術研究所：NEXCO 中流動覆工コンクリート技術のまとめ, 2011.12
- 42) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値(案), 品質管理及び規格値(案), pp.29-31, 2011.3
- 43) 建設省中部地方建設局高山工事事務所：安房峠道路工事誌, p.330, 1999.11
- 44) 国土交通省北陸地方整備局：設計要領(道路編)第 10 章トンネル, pp.10-24, 2012.4
- 45) 高速道路技術センタートンネル研究部会：写真で見る道路トンネル, 高速道路技術センター, p.20, 1996.7
- 46) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの変状メカニズム, 土木学会, 2003.9
- 47) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー第 25 号山岳トンネルのインバート設計・施工から維持管理まで, p.189, 2013.11
- 48) 国土交通省 道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領, p.5, 2014.6
- 49) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領, p.4, 2014.6
- 50) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル(案), 2000.5
- 51) 猪熊明：道路トンネルの緊急点検と今後の維持管理, トンネルと地下 Vol.21, No.10, pp.35-40, 1990.10
- 52) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧, 1993.11

- 53) 朝倉俊弘：トンネルの健全度診断，地盤工学会，土構造物・基礎・トンネルの健全度診断技術講習会講演資料，pp.1-7，2000.11
- 54) 土木学会建設マネジメント委員会：“アセットマネジメント導入への挑戦”～新たな社会資本マネジメントシステムの構築に向けて～，土木学会平成15年度全国大会研究討論会研-08資料，2003.9
- 55) 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技法堂出版，p.4，2005.11
- 56) 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技法堂出版，pp.32-33，2005.11
- 57) 国土交通省：国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム，2003.3
- 58) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する委員会：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する提言，2003.4
- 59) 国土交通省：国土交通省公共事業コスト構造改善プログラム，2008.3
- 60) 西川和廣：社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か，平成20年度国土技術政策総合研究所後援会講演集，pp.7-22，2008.12
- 61) 岸田弘之：社会資本のストックマネジメントの推進に向けて，平成24年度国土技術政策総合研究所資料No.699，pp.151-170，2012.12
- 62) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術プロジェクト：道路トンネル健全性評価技術プロジェクト研究成果報告書，近畿地方整備局，2010.8
- 63) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，2013.6
- 64) 社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会社会資本メンテナンス戦略小委員会：本格的なメンテナンス時代に向けたインフラ政策の総合的な充実～キックオフ「メンテナンス政策元年」～，2013.1
- 65) 社会資本整備審議会・交通政策審議会 技術分科会技術部会 社会資本メンテナンス戦略小委員会：今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について 答申，2013.12
- 66) 社会資本整備審議会 道路分科会 基本政策部会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言(案)，2014.6
- 67) 社会資本整備審議会 道路分科会 道路メンテナンス技術小委員会：道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて，2013.6
- 68) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，2013.11
- 69) 国土交通省：社会資本の維持管理・更新に向けて当面講ずるべき措置，2013.3
- 70) 国土交通省：国土交通省 インフラ長寿命化計画（行動計画）平成26年度～平成32年度，2014.5
- 71) 国土交通省道路局：道路の維持修繕に関する法令・告示の制定について，Press Release，2014.4
- 72) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ，2013.4

- 73) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014.1
- 74) 次世代社会インフラロボット現場検証委員会 トンネル維持管理部会：トンネルの維持管理技術の現場検証・評価の結果，国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課，2015.3
- 75) 土木学会地下空間委員会：地下空間ライブラリー第1号 地下構造物のアセットマネジメントー導入に向けてー，土木学会，2015.2

第3章

覆工コンクリートの初期ひび割れとその予測手法

第3章 覆工コンクリートの初期ひび割れと その予測手法

3.1 覆工コンクリートに発生するひび割れについて

3.1.1 ひび割れの発生要因とパターン

コンクリートは、たとえ外力が作用しない条件下であってもひび割れが生じることは避けられないことが多く、NATMにおける覆工コンクリートも例外ではない。

覆工コンクリートのひび割れの原因は、表-3.1にも示したように外因（外力，環境）と内因（材料，設計・施工）に大別され，一般にはこれらが複合して生じるものであると考えられる。

表-3.1 原因別に分類した覆工ひび割れ発生要因

外因	外力	地圧，水圧，近接施工，地震
	環境	凍結・融解，凍上，火災，酸・塩類，温度変化，鉄筋の発錆
内因	材料	水和熱，アルカリ骨材反応，乾燥収縮，ブリーディング，異常凝結
	設計・施工	巻厚不足，養生不足，型枠の早期脱型，型枠の沈下，不均質な打込み，打継目の施工不良

ジェオフロンテ研究会では，覆工コンクリート標準仕様WGを組織し，2013年には最近の覆工技術に関する調査報告書¹⁾を発刊した。同書では覆工コンクリートのひび割れ発生要因を日本コンクリート工学協会のコンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針のひび割れ発生要因の分類²⁾をもとに，コンクリートのひび割れ発生原因と山岳トンネルにおける覆工コンクリートの変状原因の分類対比表が作成されている。

山岳トンネル覆工コンクリートの変状原因の分類を表-3.2に示す。表-3.2の着色部は山岳トンネル特有の変状（ひび割れ）発生を示すものである。

表-3.2 山岳トンネル覆工コンクリートの変状原因の分類³⁾の一部を引用・加筆

大分類	中分類	小分類	番号	変 状 要 因
A 材料	使用 材料	セメ ント	A1	セメントの異常凝結
			A2	セメントの水和熱
			A3	セメントの異常膨張
		骨 材	A4	骨材に含まれる泥分
			A5	低品質な骨材
			A6	低反応骨材（アルカリ骨材反応）
	コンクリート	A7	コンクリート中の塩化物	
		A8	コンクリートの沈下・ブリージング	
		A9	乾燥収縮時のインバート打継部における拘束、 コンクリート硬化時の収縮に伴う背面地山との拘束	
		A10	コンクリート中の自己収縮	
B 施工	コンク リート	練混ぜ	B1	混和材の不均一な分散
			B2	長期間の練混ぜ
		運 搬	B3	ポンプ圧送時の配合の不適當な変更
			B4	地山変位収束前の打込み開始、不適當な配管切換え順序、コンクリートの横流し、 不適當なコンクリート打込み高さ
		打込み	B5	急速な打込み
			B6	天端部の不十分な締固め
		養 生	B7	硬化前の過大な発破振動
			B8	初期養生の中の急激な乾燥
			B9	初期凍害
		打 継	B10	インバートと覆工の不適當な打継ぎ処理
	鋼材 配置		B11	鋼材の乱れ
		B12	かぶり（厚さ）の不足	
	型 枠	型 枠	B13	セントルフォームのはらみ（セントルの補強不足、左右不均等な打込みによる偏圧）
			B14	型枠からの漏水
			B15	セントルの早期脱枠
		支保工	B16	セントルの沈下
	コールドジョイント	B17	コンクリート供給中断や機械トラブルによる打込み中断	
C 使用 環境	熱・水分 作用	温度 湿度	C1	トンネル貫通前後の環境温度・湿度の変化
			C2	部材両面の温度・湿度の差
			C3	凍結融解の繰返し
			C4	火災
			C5	表面加熱
	化学作用	C6	酸・塩類の化学作用	
		C7	中性化による内部鋼材のさび	
		C8	塩化物の浸透による内部鋼材のさび	
D 構造 外力	荷 重	長 期	D1	設計荷重以内の長期的な荷重
			D2	偏圧、斜面クリープ、塑性圧、緩み荷重による鉛直厚、水圧、地盤沈下、地耐力不足
		短 期	D3	設計荷重以内の短期的な荷重
			D4	押し出し性地山、地すべり、地震、近接施工の影響
	構造設計	D5	設計の不具合（インバートの未設置、排水工の不良、抱き擁壁コンクリートの底盤、押さえ盛土の不足など）	
	支持条件	D6	地耐力不足	
		D7	凍結圧、断越工の未設置	
E. その他			覆工背面の空隙、排水工の不具合、覆工巻厚の不足、セントルセット・脱枠時の過度の圧力、セントルとコンクリートの付着	

着色部は山岳トンネル特有の変状要因

材料・環境に起因するひび割れのうち覆工コンクリートに最も多く見られるものが温度収縮ならびに乾燥収縮に起因するひび割れである。温度応力、乾燥収縮に起因するひび割れのパターンを図-3.1に示す。

パターン①は、覆工コンクリートに発生するひび割れの代表的なもので、ほぼトンネル軸方向に直線的に伸びるもので天端付近からアーチ下部の範囲で生じやすいとされている。このひび割れは外力によるひび割れと見分けがつきにくい場合もある。

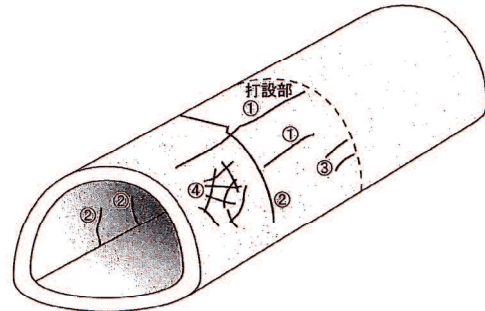


図-3.1 温度応力および乾燥収縮に起因するひび割れパターン⁴⁾

パターン②のひび割れはトンネル軸直角方向に伸びるもので、インバートとの接合部から上向きに規則的間隔で発生するものがほとんどであるが、まれに覆工スパン中央部において覆工コンクリートの全周にわたる場合もある。

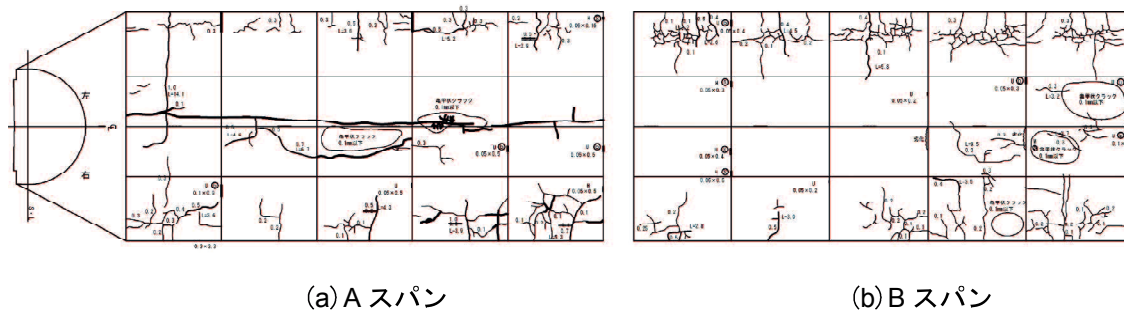
パターン③は打継目付近でトンネル軸方向に伸びるもので長さは短いが規則的間隔で生じやすい。

パターン④のひび割れはランダムな方向のひび割れが亀甲状あるいは網の目状に分布するもので、アーチ部に発生しやすい。閉合している場合には、はく落につながるため、注意を要するひび割れである。

3.1.2 NATMにおけるひび割れ発生例

(1) A トンネルの例

図-3.2はNATMで施工された延長400m程度のAトンネルの2区間(それぞれ1スパン9mの5スパン分)のひび割れの展開図の例である。



(a) A スパン

(b) B スパン

図-3.2 NATMにおけるひび割れ展開図の事例

A トンネルは 1990 年代前半に施工されたトンネルで、完成後 20 年を経ており、覆工全スパンでひび割れが多くみられ、部分的に亀甲状に発生している。A スパンでは前述のパターン①：天端付近のトンネル軸方向のひび割れとパターン②：側壁下部のトンネル軸直角方向のひび割れが、B スパンではパターン②：側壁下部のトンネル軸直角方向のひび割れが顕著である。一部でひび割れ補修（供用前に実施されたものと考えられる）が実施されているが、再度ひび割れが発生し、変状が進行したことが認められる。

とくに打継目付近で材料劣化が著しく、浮き、はく離が多く、漏水、遊離石灰が見られる。ひび割れの原因としては、外力によるものではなく、覆工表面部の乾燥収縮、温度ひび割れ、打継目付近の打込み時にエアーが抜けきらないことにより材質劣化し、浮き、はく落につながったものと考えられる。対策として、表面処理対策およびはく落防止工などが行われた。

(2) B トンネルの例

B トンネル（I 期線）は、平成 22 年度までに 3 回の点検⁵⁾を行っている。ひび割れは、以下に示すように完成翌年以降、5 年目までに進行したものと考えられる。

- ・ 初回点検（完成翌年）：利用者被害につながるうきやはく離はない。
- ・ 2 回目点検（完成 5 年後）：ひび割れ、うき、はく離が増加、進行していると評価された。おもな変状は不規則で不連続な網目状ひび割れなどであった。
- ・ 3 回目点検（完成 7 年後）：2 回目点検以降、一部進行が見られた。

図-3.3 に B トンネル（I 期線）のひび割れ発生状況を示す。本トンネルにおけるひび割れの特徴は以下のとおりである。

- ・ 初期段階では、インバートの境界部に端を発する横断方向のひび割れが発生した。
- ・ 無筋区間の殆どのスパンでトンネル天端部軸方向に、また、一部のスパンではスプリングライン上部で軸方向のひび割れが発生した。
- ・ 無筋区間の一部では、トンネル円周方向にひび割れが発生した。
- ・ 鉄筋区間では開口した軸方向、円周方向のひび割れはなく、ランダムなヘアクラックが主体である。

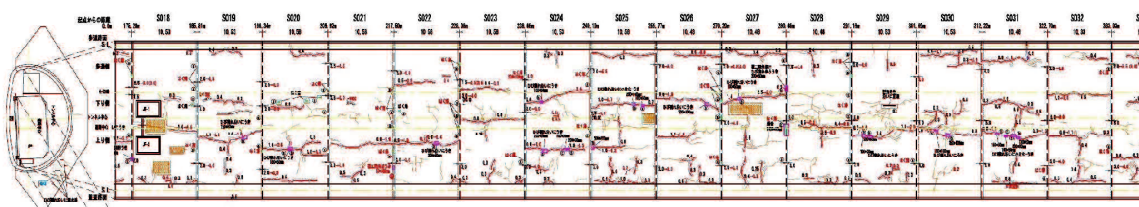


図-3.3 B トンネルの坑内ひび割れ変状箇所⁶⁾

これらのひび割れ要因を検討するため、外力を考慮した骨組み解析や温度応力解析を実施した結果、ひび割れ原因は以下のように推定されている⁵⁾。

- ・ 初期段階でのひび割れは温度収縮や乾燥収縮が主要因であると考えられる。

- ・ 上半3芯円の扁平大断面トンネルであり、天端部に限らずスプリングライン上部の拘束状態が変化することで応力集中し、ひび割れが発生した可能性がある。
- ・ 全線にインバートが設置されており、インバートコンクリートの拘束により円周方向にひび割れが発生したものと考えられる。
- ・ トンネル全線にかけて湧水が少なかったため、結露による覆工の養生効果が小さく、長期的に収縮が生じやすい環境であったことも一要因として考えられる。

この結果を踏まえて、BトンネルⅡ期線では、天端部の吹上げ口の増設、長尺パイプレータ設置や自動噴霧による湿潤養生などのひび割れ抑制対策を実施されている。この結果、図-3.4に示すように、ほとんど、ひび割れが発生していない。

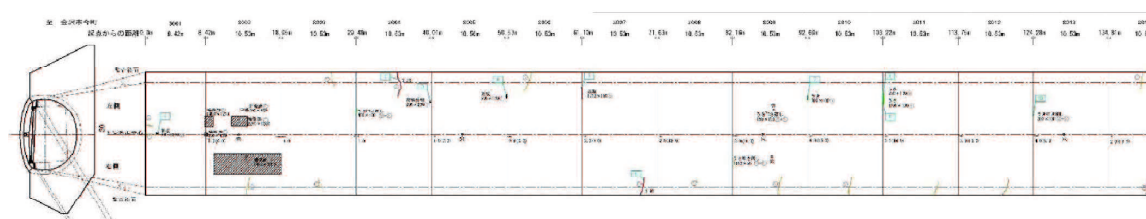


図-3.4 ひび割れ事例⁶⁾

(3) Cトンネルの例

Cトンネルは、未固結層に掘削されたトンネルであり、トンネル中央部の滞水層を掘削した区間では非排水構造として、覆工コンクリートに鉄筋補強が行われている。

ひび割れ発生区間は、上記区間に隣接する難透水層中に掘削された排水トンネル構造であり、覆工コンクリートは無筋コンクリート構造である。

ひび割れ発生区間では、トンネルSL付近で、漏水をともなうひび割れが発生し、最大0.9mm幅のひび割れが発見された⁷⁾。

ひび割れ発生区間は3箇所あったが、それぞれが25m程度と限定的であり、施工後1年経過した時点で発生したことから、自然的要因の外力が働いたものと考えられた。

また、変状形態としてSL付近で漏水をともなう開口ひび割れが発生していることから、地下水位の上昇にともなう水圧が原因と推定される。対策工としては水抜き孔を設置するとともに継続調査が実施されている。

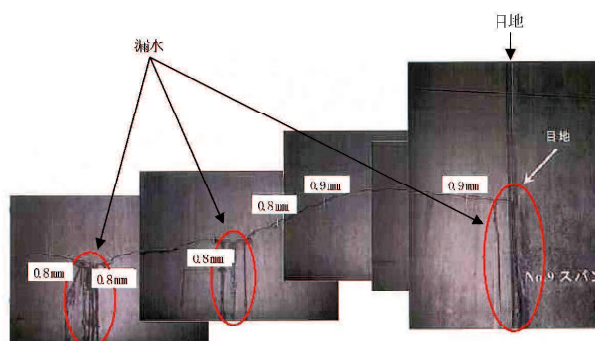


写真-3.1 Cトンネルにおけるひび割れ発生状況 (SLよりやや上方)⁷⁾

3.1.3 覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制対策

近年では、トンネルの長寿命化、維持管理費の縮減を図るうえで、初期ひび割れの少ない高品質な覆工コンクリートをめざし、長期保証制度を試行されるなど、新技術や新工法の開発や実用化が盛んである。

覆工コンクリートのひび割れ抑制対策は、要因別に以下のA～Eの5項目に分類することができる。

- A：コンクリートが材料分離なく確実に充填できること（とくに天端）。
- B：水和反応時の温度応力によるひび割れを抑制すること。
- C：乾燥収縮によるひび割れの発生を抑制すること。
- D：型枠を外す時期は所定のコンクリート強度が得られていること。
- E：背面の空隙の除去，背面拘束の抑制，ひび割れが生じた際ははく落防止対策。

また、覆工コンクリートの品質向上対策を整理するにあたっては、施工順序に従い、以下のように分類できる。

- ① フレッシュコンクリートの配合，混和剤（材）など，材料に関するもの。
- ② コンクリートの打込み，締固めに関するもので，材料の横流しの抑制，均一な締固めを目的としたものや，背面処理に関するもの。
- ③ 脱枠時のコンクリートの材齢強度の確保を目的とするもの。
- ④ 脱枠後のコンクリート養生に関する技術。
- ⑤ その他のひび割れ抑制対策，はく落防止対策

コンクリート材料に関するもの，すなわち，コンクリートの配合に係るものとして，膨張材添加によるケミカルプレストレスの導入，流動性の向上により，均一なコンクリートの打込みを目的とするものなど，多様なものがある。コンクリート材料に関するものは，いずれもひび割れ抑制効果は高いものと評価されているが，材料単価が高額となる傾向にある。なお，NEXCOでは中流動コンクリートを標準工法とするものとし，トンネル施工管理要領に仕様などを定めている⁸⁾。

補強用短繊維の混入は，おもに靱性の強化（ひび割れが発生しても進行やはく落を抑制する）を目的とし，鋼繊維の混入のほか，近年では非鋼繊維を混入するケースが増えてきている。

覆工コンクリートの施工面での特徴は，覆工コンクリートは部材厚に比べ，周長，延長方向ともに長い形状であり，狭く，閉塞された空間に，吹上げ方式でコンクリートを打込むという特殊な施工環境にある。このため，打込み時に材料が分離し，不均質な構造となったり，覆工背面に空隙が生じやすく，ひび割れ発生の要因の一つとなっていると考えられ，この対策として種々の工夫がなされている。上述の中流動コンクリートの採用もこの問題に対応したものである。

具体的な対策としては，高所からの生コンクリートの落下や横流しを防止することが挙げられ，打込みに用いるスライドセントルの検査窓および吹上げ口の増設や，自動配

管切換えシステムの採用などが挙げられる。とくに天端への確実な充填や締固めは、重要な課題と認識され、天端への確実な充填や締固めに主眼を置いた長尺バイブレータの設置などの新技術が多く見られ、充填性を管理する計測技術も実用化されている。

また、覆工コンクリート背面の空隙やブリーディングの除去、あるいは背面を平滑に仕上げるなど、覆工背面に対する対策事例も見られる。これらの対策は重要な対策であるが、単独で使用されることは少なく、後述の養生工法と併用することで、効果が発揮されるものと考えられる。

一方、施工サイクルの問題から、覆工コンクリートの脱枠までの時間が比較的、短時間であるため、脱枠時のコンクリート強度を安定して確保することが重要となる。なお、前述の中流動コンクリートを用いた場合、強度発現が遅い傾向にあり、セントル脱枠時の強度管理がとくに重要となるとされている。

ただし、この対策は覆工の施工サイクルに関わるもので、目立った新技術と言われるものは少ないようである。この中で、ツインアーチフォーム工法や春秋コンクリートは有効な新技術であると考えられるが、特殊な専用セントルが必要であるなど、経済的な面での問題がある。

覆工コンクリートの初期ひび割れの主要因と考えられる水和熱による温度応力や乾燥収縮に対する対策工はコンクリート打込み直後から、脱枠時にかけて実施される。

脱枠後の養生は、品質向上の基本技術であり、多くの工法が提案されている。いずれの工法も、外気遮断、湿潤養生を行うもので、手段や材料などに多様なものである。

たとえば、**図-3.5**は脱枠後の覆工コンクリートに対して、外部への水分の逸散を防止する保水養生だけでなく、外部から水を積極的に供給する給水養生を可能とした工法の一例である。水和反応が進行中のセメントに対して養生水が確実に供給できるので、コンクリートが緻密化し、品質が向上するとされている。

また、セントル付近あるいは、坑口にバルーンなどでトンネル断面を閉塞し、外気と遮断することにより、養生温度や湿度をコントロールするものや、移動台車に搭載した噴霧器による湿潤養生システムなど、多様な対策工が開発、実用化されている。

その他の対策工法としては、コンクリート打込み時に補強材を敷設するなど、ひび割れの抑制やひび割れが生じた際ははく落を防止する対策方法がある。

表-3.3に、覆工コンクリートの品質向上に関する技術を整理して示す。

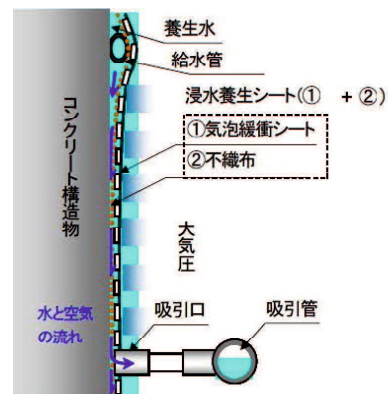


図-3.5 アクアカーテンの構成⁹⁾

表-3.3 覆工コンクリートの品質向上対策の一覧表

分類	工 法	手 段	目 的				
			A	B	C	D	E
① 材 料	膨張材添加	ケミカルプレストレスによる引張力の抑制		○	○		
	収縮低減型高性能 AE 減水剤	コンクリートの収縮低減機能を付加			○		
	流動化剤添加	流動性の高いコンクリートを使用し、コンクリートの均一性を高める。			○		
	中流動コンクリート		○				
	繊維補強コンクリート	繊維混入による補強。					○
② 打込み・締固め	検査窓の増設	コンクリートを均一に投入し、型枠内の横移動を抑制する。	○				
	自動配管切換えシステム		○				
	肩部吹上げ打込み孔の増設		○				
	覆工天端締固めシステム	締固め困難な天端部の締固め。	○				
	充填感知システム	充填を感知する計測システム	○				
	背面平滑型ライニング	覆工背面の平滑仕上げ（背面拘束の抑制）					○
	吸引チューブ	背面のブリーディングの吸引除去					○
③ 脱枠強度	ツインアーチフォーム工法	型枠存置時間を長くし、脱枠時の強度を確保する。					○
	春秋コンクリート	打込み温度および型枠内の温度を調整する。					○
	FRP セントル	断熱性材料により、脱枠時強度を確保する。					○
	積算温度強度管理システム	温度計測システムにより、脱枠時間を管理する。					○
④ 脱枠後の養生	バルーン（カーテン）養生	外気遮断による保温対策		○		○	
	アクアカーテン	水分供給可能な養生シートによる給水養生。		○	○		
	ミスト養生（密閉型）	専用台車による密閉空間での噴霧湿潤養生		○	○		
	ミスト養生（自走型）	自走式専用台車による噴霧湿潤養生			○		
	養生パネル、シート	養生パネル(シート)による湿潤養生、保温養生		○	○		
	塗布型高性能収縮低減剤	コンクリート表面への塗布含浸による改質			○		
⑤ その他	T-FREG 工法	補強繊維シートの表層部での埋込み					○
	ハーバーネット	補強繊維ネットの敷設によるひび割れ抑制					○
	クラック防止センサー	覆工端部（つま部）接触による角かけなどの防止					○

A：コンクリートの材料分離がなく、確実に充填できること。

B：水和反応時の温度応力によるひび割れの抑制

C：乾燥収縮によるひび割れの抑制

D：脱型時に所定の材齢強度が得られていること。

E：その他のひび割れ抑制対策

3.2 覆工コンクリートのひび割れに関する既往研究

3.2.1 NATMにおける覆工コンクリートに関する研究と技術基準などの推移

NATM が標準工法とされた 1980 年代初旬以降における覆工コンクリートに関する研究や技術基準などの推移を表-3.4(1), (2)に示す。

この表にまとめたように、NATM が導入された 1980 年代初旬には、日本トンネル技術協会において、覆工コンクリートに発生したひび割れに関する研究を行うとともに、NATM における覆工の基本的な考え方が整理された。それ以降、これら日本トンネル技術協会の研究成果をもとに、覆工コンクリートの設計、施工が行なわれていたが、1999 年には覆工コンクリートの崩落事故が連続し、覆工コンクリートの安全神話の崩壊として、社会を騒がせた事故が続いた。

これらの崩落事故を起こしたトンネルは、矢板工法によるトンネルであったが、NATM の覆工コンクリートのあり方を見直す契機ともなっており、2000 年以降、覆工コンクリートに対する研究や基準類の整備が行われた。

その後、2005 年頃からは、戦後の高度成長期に整備された社会資本が供用後 50 年を迎えるようになったのを契機に予防保全、アセットマネジメントなどをキーワードに、社会ストックのアセットマネジメントが注目されるようになった(2.4.3 項参照)。

一方では、公共工事の発注形態が転換期を迎え、総合評価型発注方式への移行が進み、これを背景に覆工コンクリートの品質管理の注目度が上がり、覆工コンクリート施工時の品質向上技術や、維持管理時の覆工コンクリートの健全度評価などに対する研究が増えてきている。

2012 年には中央道の笹子トンネルでの天井版落下事故を経て、より一層、覆工コンクリートの品質の向上、維持管理技術の向上などが求められるようになってきている。

覆工コンクリートに発生するひび割れに関する研究は、

- ・ 発生したひび割れの評価、覆工コンクリートの健全度評価、さらには、将来のひび割れ進展、劣化予測に関するもの
- ・ 初期ひび割れの発生原因の検討やひび割れ発生予測あるいは、ひび割れ幅の予測の 2 つに大別される。

3.2.2 項では、前者の研究事例として、一連の流れで研究されているひび割れ評価に関する研究について概要を示す。

3.2.3 項では、後者の研究事例として、NATM において覆工コンクリートに発生する初期ひび割れの主要因と考えられている水和発熱による温度応力ひび割れや乾燥収縮ひび割れに関する既往研究を調査した。

表-3.4 (1) 覆工コンクリートに関する研究の推移(1)

年度	覆工コンクリートに関する研究等	NAITM 関連示方書・技術基準・設計要領等	覆工コンクリートを取り巻く情勢
1983	• NAITM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書/JTA	• NAITM 設計施工指針(案) /旧国鉄他	
1984	• NAITM における二次覆工のひび割れ防止対策に関する研究/JTA • NAITM における2次覆工の温度応力とひずみ(DI2) /片瀬ら		
1985	• NAITM2 次覆工の温度応力解析 /片瀬ら		
1986		• トンネル標準示方書(S61年版) /土木学会 • 設計要領第三集・トンネル改訂/旧JH	
1987			
1988			
1989		• 道路トンネル技術基準(H 元版) /道路協会	
1990	• トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひび割れに関する調査報告書 /土研		• R127 小山野 TN 覆工崩落
1991			
1992			
1993		• 道路トンネル維持管理便覧 /道路協会	
1994			
1995			
1996		• トンネル標準示方書(H8年版) /土木学会 • NAITM 設計施工指針 /旧鉄建公団	
1997		• 設計要領第三集・トンネル改訂/旧JH	
1998		• 変状トンネル対策工器具マニュアル /鉄道総研 • トンネル変状調査マニュアル /旧JH 試験所	
1999			• 山陽幹線 福岡 TN、北九州 TN、室蘭本線礼文浜 TN 覆工崩落

表-3.4 (2) 覆工コンクリートに関する研究の推移(2)

年度	覆工コンクリートに関する研究等	NAATM 関連示方書・技術基準・設計要領等	関連する社会情勢等
2000	トンネルコンクリート施工指針(案)/土木学会 コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策/土木学会	トンネル保守管理マニュアル/運輸省 トンネル保守マニュアル(案)/鉄道総研	総合評価落札方式の標準ガイドライン
2001	覆工コンクリートの手引き/JTA トンネル覆工コンクリート施工管理マニュアル/旧鉄建公社	道路トンネル定期点検要領(案)/国交省 トンネルの維持管理/土木学会	
2002	山岳トンネル覆工の現状と対策/土木学会 覆工コンクリート施工マニュアル/旧JH	道路トンネル技術基準(H15版)/道路協会 設計要領第三集・トンネル改訂/旧JH 道路トンネル変状対策マニュアル(案)/土研	
2003	トンネルの変状メカニズム/土木学会		
2004	トンネル覆工コンクリートの品質・機軸向上に関する基礎的研究/馬場弘二 二次覆工コンクリートの適切な配合および施工方法について/GF		
2005	山岳トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れ特性と点検評価に関する研究/伊藤哲男 トンネル覆工の収縮ひび割れに関する研究/真下ら		「公共工事の品質確保の促進に関する法律」施行
2006		トンネル標準示方書(2006)/土木学会	ストックマネジメント研究会/国総研 総合評価落札方式本格導入
2007	高速道路トンネル覆工の合理的点検システムと健全度評価の定量化に関する研究/佐野信夫	鉄道構造物等維持管理標準・トンネル/鉄道総研 トンネル補修・補強マニュアル/鉄道総研	九州道管智山TN覆工崩落
2008		山岳トンネル設計施工標準/JRTT	マスコングリートでのひび割れ制御指針 2008/JCI
2009	トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究/高山博文		山陽新幹手TN覆工崩落
2010	道路トンネルの健全度評価技術の研究/道路トンネル健全度評価技術研究プロジェクト 近畿地整 伊予田らの研究 (~2011)		
2011	NEXCO 中流動コンクリート支脚のまとめ/NEXCO 山岳トンネルにおける覆工コンクリート標準仕様について/GF	設計要領第三集・トンネル改訂/NEXCO	東日本大震災
2012			中央道笹子トンネル天井板崩落
2013		総点検実施要領(案)【道路トンネル編】	社会資本の老朽化対策会議/国交省 R371 紀見TN、東北幹一関TN等覆工崩落
2014	最近の覆工技術に関する調査報告/GF トンネル覆工コンクリートの長期保証に関する検討委員会/中国地整		道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について 道路法施行規則の一部改正等

JTA: 日本トンネル技術協会, GF: ジェオフロンテ研究会, 旧JH: 旧日本道路公社(現NEXCO), JRTT: 鉄道運輸機構, JCI: 日本コンクリート工学協会

3.2.2 トンネル維持管理における覆工コンクリートのひび割れ評価に関する研究

伊藤ら¹⁰⁾はトンネル変状の広範囲なデータを収集する目的から、老朽化に起因したと考えられるトンネルの覆工ひび割れ調査を実施している。本調査では近接目視点検および叩き点検（はく落危険個所の叩き落としを含む）を行い、ひび割れ展開図を作成するとともに、①ひび割れ方向性、②ひび割れ形態、③漏水・遊離石灰の有無、④はく落片の形状、⑤はく落箇所近傍のひび割れ幅、⑥中性化深さを整理・記録し、ひび割れ方向性、ひび割れ幅、ひび割れ交差角度とはく落の関係を整理している。なお、本研究ではひび割れ方向性を図-3.6に示すように、トンネル軸を中心に16分割し、横断ひび割れ、縦断ひび割れ、および斜めひび割れを定義している。ひび割れの規模や形状などから、はく落に繋がるひび割れに対する評価を行うにあたり、重要となる因子を抽出し、客観的・定量的なひび割れ評価の可能性を示唆している。

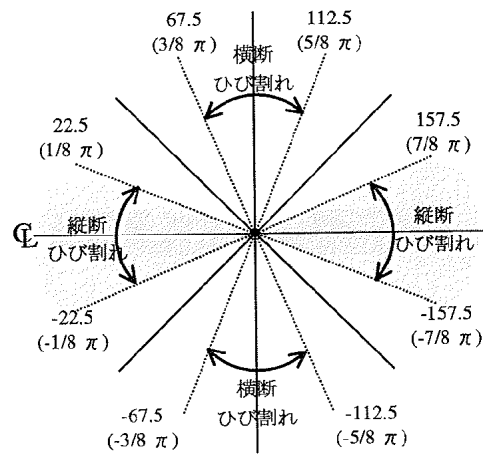


図-3.6 ひび割れ方向性の定義¹⁰⁾

重田ら¹¹⁾は岩盤中のクラックを定量化する指標であるクラックテンソルの考え方を参考にして、TCI (Tunnel-lining Crack Index) を提案している。TCIは現状のひび割れ展開図の利用を前提に、扱いを容易にするため、2次元上に作成されたひび割れ展開図から式(3-1)を用いて数値化したものである。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (l^{(k)})^\alpha (b^{(k)})^\beta \cos\theta_i^{(k)} \cos\theta_j^{(k)} \quad \dots(3-1)$$

ここに、 A ：対象とする覆工コンクリートの面積

n ：ひび割れの本数

$l^{(k)}$ ： k 番目のひび割れの長さ

$b^{(k)}$ ： k 番目のひび割れの幅

$\theta_i^{(k)}$ ： k 番目のひび割れの法線ベクトルが i 軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$ ： k 番目のひび割れの法線ベクトルが j 軸となす角度

α ：ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β ：ひび割れ長さの重み付けに関する係数

を表す。

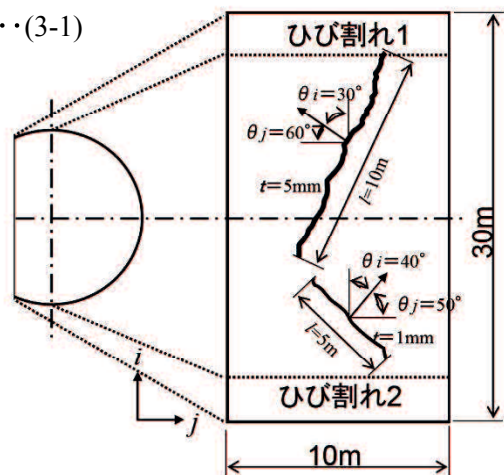


図-3.7 TCIの基礎式と算出例のためのひび割れ展開図¹¹⁾を加筆修正

TCI 評価法ではトンネル軸方向、トンネル軸直角方向の成分を個々に定量化できるため、とくにはく落に繋がるひび割れ成分（一般にはトンネル軸方向）に着目した評価や方向により重みづけを行うことも可能となる。TCI 評価法を汎用的な評価方法とするためには、実トンネルへ適用し、その適用性検証する必要があるとし、さらに、将来的にはひび割れの方向性や幅、ひび割れ部位に応じた重みづけ評価を行うことで、より詳細な健全度評価が可能としている。

山田ら¹²⁾は点検作業の効率化のため、覆工コンクリートの健全度評価の定量化を図るため、変状ごとに点数をつけ、評価の定量化した「新健全度評価基準」を提案している。

通行車両に対するコンクリート片のはく落災害を未然に防止することが最優先事項であることから、健全度評価基準の構築にあたっては、図-3.8に示すように「外力による変状」、「はく落」、「漏水」の3項目を変状評価の対象としている。

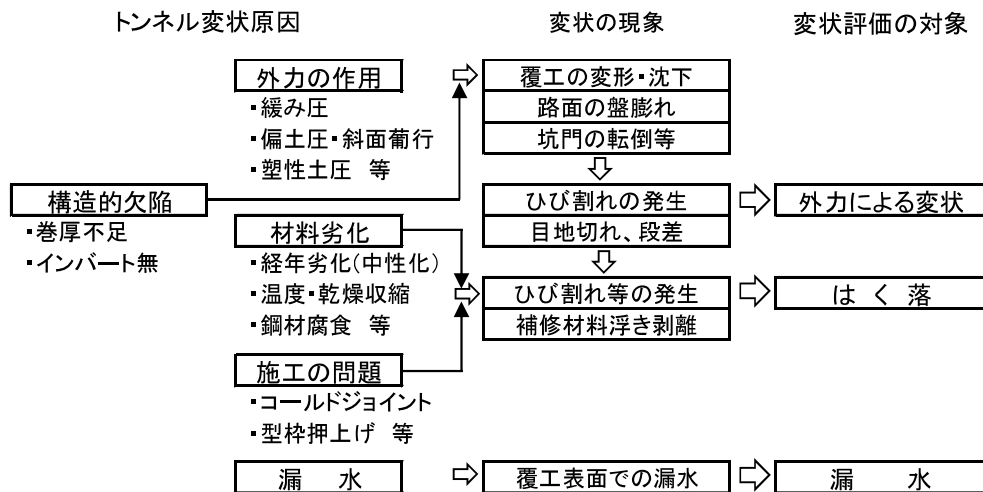


図-3.8 変状の原因・現象と評価対象の概要¹²⁾

覆工コンクリートの健全度を判定するための観察項目として、最大ひび割れ幅、最大幅を有するひび割れの長さ（連続している箇所）、方向性、ひび割れの分布、ひび割れのパターン、遊離石灰、漏水の7項目を抽出している。抽出した観察項目の評価区分を2~5段階に設定し、レーザー光線などによる覆工コンクリートの表面画像を用いて、机上でひび割れ展開図を作成し、スパンごとに配点を行うことを基本としている。

さらに、山田ら¹³⁾は、画像データにもとづく点数換算法による健全度評価¹⁰⁾のうち、ひび割れ情報から数値化される4項目に対して、TCIの考え方を導入することにより、より定量的・客観的にひび割れ評価を行うことを提案している。

前述した新健全度評価基準に対し、TCIを導入した評価基準の適用性を検討した結果、収束関数のゴール式を用い、TCIを健全度評価基準のひび割れ評価点に取り入れることが可能であり、これにより、客観性や効率性の向上が可能であることを示している。

図-3.9 に上述した各々の既往研究の関係を示す。

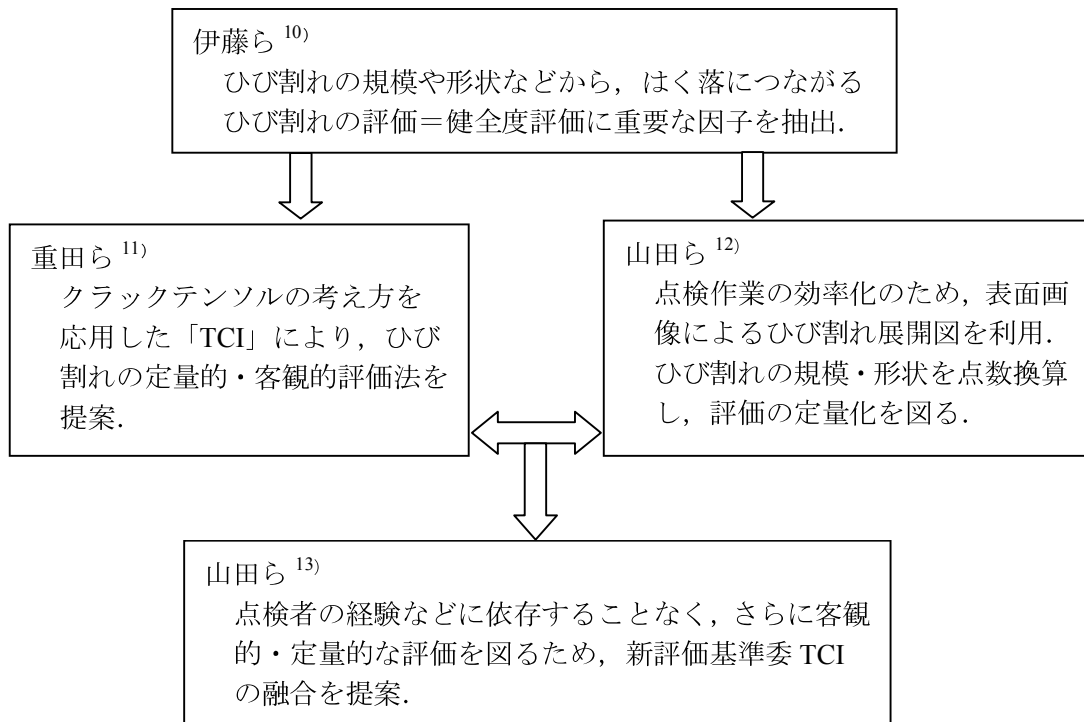


図-3.9 ひび割れ評価に関する既往研究の関係

これらの研究は、覆工コンクリートに発生するひび割れは、覆工の損傷、はく落の危険性を示す指標となる。すなわち、外力に起因するものであっても、はく落に繋がる浮きであっても、まず、覆工コンクリートにひび割れが生じ、これが進展することにより、覆工の変状や、浮き・はく落に至ることに着目している。

前述した点検作業が容易な表面画像を用い、より定量的・客観的な指標を得ることができる新評価基準は、点検調査→健全度評価の一連の作業が容易であり、多くの定量的な評価データを取ることができるため、以下のようなメリットがあるとしている。

- ・ 点検頻度を密にすることも可能で、詳細調査が必要なトンネルの抽出が可能である。
- ・ 他のトンネルの変状状況とも定量的に比較することが可能で、補修・補強の優先順位を決定しやすい。
- ・ 経年による変状進行状況の定量的評価を行うことができる。

3.2.3 覆工コンクリートの初期ひび割れに関する既往研究

NATMの覆工コンクリートの初期ひび割れを扱った研究としては、NATMの本格的導入からまもなく、日本トンネル技術協会の委員会においてNATMの二次覆工に発生したひび割れの解明を目的とした研究がある。続いて、片瀬らの研究^{14)~16)}が日本トンネル技術協会の機関誌であるトンネルと地下に発表された。

1990年には当時の建設省土木研究所で、トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひび割れに関する調査が行われている。

これらの研究により、NATMの覆工コンクリートの設計の考え方、ひび割れ制御方法などが示され、現在に至っている。

その後、1999年に発生した山陽新幹線の覆工コンクリート崩落事故を契機に、トンネルの覆工コンクリートの安全性が議論され、覆工コンクリートのひび割れ抑制に対する要求が年々高まってくるとともに、覆工コンクリートの初期ひび割れに対する研究も増えてきている。

(1) 日本トンネル技術協会における研究（1982年～1983年）

NATMの導入当初、覆工コンクリートに従来ではみられないひび割れが多く発生することから、日本トンネル技術協会では、ひび割れの原因追求とひび割れ防止対策の検討が行われた。

NATMの覆工コンクリートのひび割れ発生状況の踏査の結果、ひび割れ防止対策を行っていないトンネルでは、地質やトンネル断面にかかわらず、高い割合でひび割れの発生がみられ、ひび割れの発生はNATMの覆工コンクリートの一般的な現象であることが認められた。この原因は現場計測や理論的な検討から、背面拘束（外部拘束）によって生じるコンクリートの温度応力および長期にわたって生じる乾燥収縮によるものであることが明らかにされている¹⁷⁾。

ひび割れ抑制対策としては、支保工と覆工を絶縁する方法、コンクリートの品質を改良する方法、ひび割れを集中あるいは分散させる方法、および被膜養生による方法が考えられ、図-3.10に示すように試験施工を踏まえた検討が実施された¹⁸⁾。

これらの抑制対策は、いずれも一定の効果が認められるが、とくに防水シートによる背面拘束の影響を取り除くことが有効であるとされている¹⁹⁾。なお、本研究では覆工コンクリートのひび割れに対する研究とともに、覆工コンクリートの基本的な設計の考え方が整理されており²⁰⁾、現在に至るまで、NATMの覆工コンクリートの基本的な考え方がとされている。

2次覆工コンクリート 試験施工区間 L=127.4m
 パターンⅡ-2 I=30cm L=40.0m パターンⅢ-2 I=30cm L=87.4m パターンⅣ-2 I=30cm L=87.4m

CASE No	21100	21106	21105	21119	21138	21142	21150	21151	21163	21174	21184	21190	21195	21205	21215	21224
ひびわれ対策	未対策	膨張材添加 (120φ範囲)	膨張材添加 (180φ範囲)	シート施工 (180φ範囲)	減水剤添加 (120φ範囲)	ファイバースト施工 (180φ範囲)	ファイバースト施工 (180φ範囲)	ビニールシート施工 (180φ範囲)	ビニールシート施工 (180φ範囲)	不織布シート施工 (180φ範囲)	発泡スチロール施工 (180φ範囲)	不織布シート施工 (180φ範囲)	不織布シート施工 (180φ範囲)	未対策	ビニールシート施工 (180φ範囲)	
説明	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL
断面	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU
施工断面	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL	FL
コンクリート配合	A	A+C	A+C	A	A	A+D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
使用材料		チップUSA-100R	チップUSA-100R	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110	チップUSA-110
1回	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2回		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3回																
4回																
5回																
6回																
7回																
第2週迄	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
試験性																
材料																
強度																
引張強さ																
耐水性																
透水性																
施工性																
施工管理の難易																
総合判断	X	X	X	O	O	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
備考																

図-3.10 覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制対策の試験施工の例 (15)

(2) 片瀬らの研究（トンネルと地下，1984年～1986年）

片瀬らの研究^{14)~16)}により，日本トンネル技術協会の機関誌であるトンネルと地下に3編の研究成果が発表されている．これらの研究では，実トンネルにおける試験施工，および有限要素法による温度応力解析を実施し，初期ひび割れの発生要因が研究されている．

現場試験では，覆工コンクリート内の温度および，ひずみが計測された．

温度計測の結果では，覆工コンクリートの midpoint 部で，打込み後1日程度で最高温度に達し，防水シートの有無による差は見られないとされている．

ひずみ計測の結果は，自由膨張時のひずみと拘束時のひずみの比から，拘束度 k を定義し，整理している．拘束度は防水シートの有無による差が大きく，下記に示すように，防水シートのない場合には，拘束度が大きく，方向による差も認められるのに，対して防水シートのある場合には，拘束度が小さく，方向による差もほとんどない結果となっている¹⁴⁾．

- ・ 防水シートのない区間：縦断方向 $k=0.59$ ，周方向 $k=0.78$
- ・ 防水シートのある区間：縦断方向，周方向 $k=0.31$

また，背面の凹凸をモデル化し，有限要素法による温度応力解析を実施している．有限要素法は図-3.11 に示すモデルにより，コンクリートの弾性係数を若材齢時の一定値，線膨張係数を $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ とし，温度変化 20°C を与えたものである．

現場計測および解析結果より，以下の傾向が示されている¹⁵⁾．

- ・ 自由面に生じる引張力は，背面の凹凸の有無や程度による大きな差はなく，拘束度の差は10～20%程度である．
- ・ トンネル縦断方向の拘束度は，防水シートの有無にかかわらず，天端付近で最も小さな値を取る傾向にある．
- ・ コンクリート表面からの放熱は悪く，断熱状態に近い状態にあると推定される．

また，翌年の研究では，コンクリートの硬化過程に着目して，覆工内に発生する温度応力について，水和発熱および硬化時の弾性係数の経時変化を考慮した非定常解析を行っている¹⁶⁾．本解析は，覆工内の温度分布は一様でないこと，覆工の拘束条件は周辺岩盤のみでなく，両端脚部はインバートにより拘束を受けていることを考慮したもので，解析結果から以下の傾向が示されている．

- ・ 覆工内周方向には引張応力が生じる．この引張応力は両端インバート付近を除き，一様な分布を示す．
- ・ 覆工厚が厚くなるほど，発生する最大引張応力は大きくなる．
- ・ 覆工厚が一定であれば，発生する最大引張応力は岩盤の弾性係数が大きいほど大きくなる．

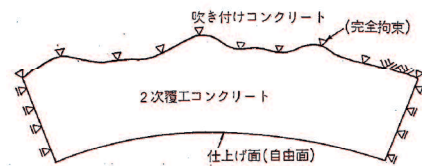


図-3.11 モデルの例（拘束条件）¹⁵⁾

(3) 土木研究所による研究（1990年）

本研究では、覆工コンクリートの初期ひび割れを対象として、実態調査、背面拘束模型実験およびFEM解析による温度応力解析が実施されている。

実態調査では、防水シートを施工したケースで、覆工コンクリートの温度とひずみが計測された。計測結果から、コンクリート内部の温度上昇中は拘束度（拘束度=1-計測されたひずみ/温度膨張によるひずみ）は大きくなるが、温度下降に伴い拘束度は0になり、防水シートの効果で、覆工コンクリートは自由に変形できるとの結果が得られている²¹⁾。

模型実験では、背面拘束に着目して、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間にS2（防水シート0.2mm）、H（不織布3.0mm）、SH（防水シート0.2mm+不織布3.0mm）の3種類に対して凹凸形状を変えて、一面せん断試験に準じた試験を実施した。この結果、S2およびHでは十分な緩衝効果が得られない場合もあるが、通常現場で採用されているSHではすべてのケースで、引張応力に余裕があり、十分な緩衝効果が得られるとしている²²⁾。

また、温度応力解析（有限要素法）では、覆工コンクリートのひび割れ要因と考えられるコンクリートの収縮を背面拘束の問題として取り扱い、背面拘束が小さい方がコンクリート内に発生する応力が小さくなることを指摘している²³⁾。

(4) 馬場らの研究（2004年）

覆工コンクリートの品質向上を目的に、ひび割れの抑制方法を研究したものである。トンネル内の温度、湿度の実態調査を行った結果、以下を示している²⁴⁾。

- ・ 高炉セメントは乾燥収縮が大きく、ひび割れが発生しやすい。
- ・ コンクリートの打込みにおいて、吹上げ切替え後の適切な締固めが難しく、構造物としての一体化した密実で均一な品質の構築に疑問が残る。

また、トンネル坑内環境を調査するとともに、湿度および養生方法が異なる条件下における覆工コンクリートの乾燥収縮状況について実験、検討が行われている。

坑内環境実態調査では、換気設備の大型化により坑内施工環境は、これまで考えられてきた高湿度条件ではないことを指摘している。室内実験においては、湿度が低い条件にあるほど、覆工コンクリートの乾燥開始時期が早くなることを確認し、週1回程度の散水養生の効果は大きいとしている²⁵⁾。

また、防水シート敷設によるひび割れ抑制効果が大きいことを確認し、その効果が十分発揮されるような掘削断面や吹付け面の平滑化、防水シートの適切な敷設が重要であるとしている²⁵⁾。

ただし、現状のトンネル施工において、ひび割れ発生の低減を目指すためには、防水シートの適切な敷設に加え、散水養生の実施や膨張材の使用が効果的であるとしている。

(5) 越智らの研究 (2004年)

東北新幹線、および九州新幹線の NATM による施工されたトンネルにおいて、施工時の初期ひび割れについて実態調査を実施し、以下の知見が得られている²⁶⁾。

- ・ 覆工施工月：東北新幹線では、冬季 (11~3月) の施工でひび割れ発生確率が高く、夏季 (7~8月) で発生確率は低い。これに対して九州新幹線では、6月の施工で、発生確率がピークとなっており、10~12月で発生確率は低くなっている。
- ・ 打込み温度：東北新幹線で打込み温度 16℃以下の場合に、ひび割れ発生確率が 40% と高く、16℃以上では 20%程度である。九州新幹線では、22℃付近でひび割れ発生確率が最も低く、22℃以上でも、以下でもひび割れ発生確率は高くなる。このことより、打込み温度 16℃~23℃程度でひび割れ発生確率は低くなるとしている。
- ・ コンクリートの配合：単位セメント量、単位水量が増すほど、ひび割れ発生確率は高くなる傾向を示す。

また、この知見をもとに非定常熱伝導解析と温度応力解析により、諸パラメータと覆工応力の関係をシミュレートしている。

本解析に先立ち、熱伝達率、収縮・クリープの影響、背面拘束状態の影響について検討し、以下のような解析条件を設定している。

a) 熱伝達率の影響検討

熱伝達率の値の違いが温度応力に及ぼす影響を検討している。熱伝達率は風速に応じて 4~20W/m²°C であることから、熱伝達率 4, 10, 20W/m²°C の 3 ケースについてパラメータスタディを行った結果 (表-3.5)、安全側の配慮から熱伝達率 4W/m²°C を採用している。

表-3.5 熱伝達率の検討結果²⁶⁾

	熱伝達率	最高温度	坑内側縁応力 (引張)
Case1	4W/m ² °C	28.5°C	0.86N/mm ²
Case2	10W/m ² °C	25.8°C	0.56N/mm ²
Case3	20W/m ² °C	24.1°C	0.38N/mm ²

b) 収縮・クリープの影響検討

乾燥収縮などの収縮やクリープが、覆工応力に及ぼす影響度合いを検討した (図-3.12)。物性値はコンクリート標準示方書に準拠している。

図-3.12 に示すように温度応力のみ Case1 : ▲ ではほぼ 1ヶ月程度で応力値が収束するのに対し、収縮を考慮した Case4 : ● では、10日前後から影響が大きくなり、解析モデルの妥当性を検討する上では無視できないとしている。クリープを考慮した Case5 : ■, Case4 : ● に比較して引張応力は大きく低減されて評価された。しかし、Case5 : ■ は引張側のクリープは十分解明されていないため、圧縮側と同じクリープが発生するとの仮定で行ったものであることから、参考値として扱う程度として、以降の解析には温度応力と収縮を考慮 (Case4) するものとされている。

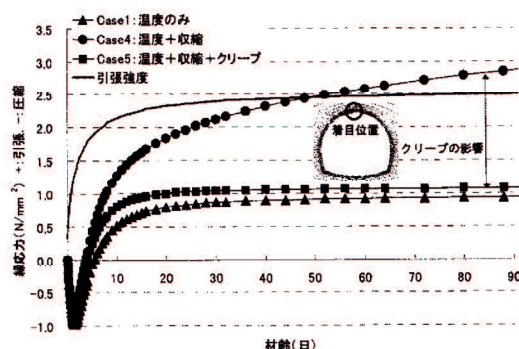


図-3.12 収縮・クリープの影響を考慮した二次覆工(クラウン部)の応力履歴²⁶⁾

c) 背面拘束の影響

防水シートを設置しても、天端部と側壁部は拘束条件が異なる可能性もあり、天端の拘束条件を変化させたパラメータスタディを行っている(図-3.13)。この結果、Case8(天端部 50° に隙間がある=拘束がない場合)が、天端部の引張応力が最も大きくなる結果となった(図-3.14)。

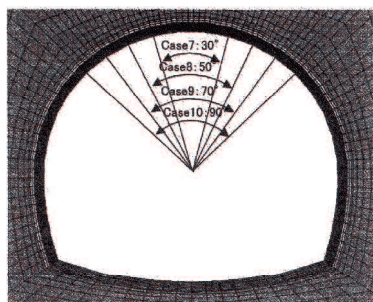


図-3.13 解析ケース²⁶⁾
(覆工背面の隙間の範囲)

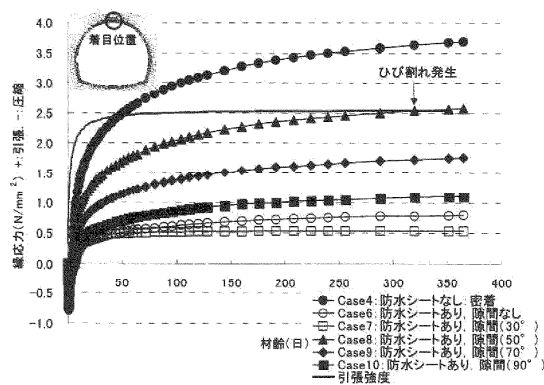


図-3.14 クラウン部の坑内側の覆工応力の履歴²⁶⁾

上記の解析条件のもと、以下の解析ケースで非定常熱伝導解析と温度応力解析実施されている。

表-3.6 解析ケース²⁶⁾

ケース	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	気温 (°C)	湿度 (%)	検討項目
①	268	161	22	15	65	基本ケース
②	298	178	22	15	65	コンクリートの配合
③	268	161	15	15	65	打込み温度
④	268	161	30	15	65	打込み温度
⑤S	268	161	26	注1)	65	打込み時期および コンクリートの配合
⑤w	268	161	14	注2)	65	
⑥S	298	178	26	注1)	65	
⑥w	298	178	14	注2)	65	

本研究により、以下のような傾向が認められた。

- ・ 実態調査、解析結果ともに、単位水量、単位セメント量が多いほど、ひび割れが発生しやすい。
- ・ 実態調査では、16~23°Cの場合がひび割れ発生が少ない傾向にあったが、解析結果では、打込み温度が高くなるほど、引張応力が大きく、ひび割れが発生しやすい。
- ・ 夏季に施工した場合の方が、冬季に施工した場合より、ひび割れは生じやすい。
- ・ 覆工天端の隙間範囲(非拘束範囲)が、ひび割れ発生に影響があり、予備解析では非拘束範囲 50° の場合が最もひび割れ発生しやすい傾向にあった。

(6) ジェオフロンテ研究会における研究 (2004年)

本研究では、覆工コンクリートに要求される性能を明らかにするとともに、覆工コンクリートに発生するひび割れを分類、その原因について研究したうえで、要求性能を満たす覆工コンクリートの配合、施工方法について提案が行われている。

本研究における初期ひび割れの統計的な原因推定では、以下のような事項が明らかにされている²⁷⁾。

- ・ スランプ 16cm 以上とすると、ひび割れ発生率は大幅に少なくなる。
- ・ 単位セメント量はひび割れ発生率に影響は少ない。これは、単位セメント量を大きくすると温度応力が大きくなる傾向にあるが、材料分離抵抗も大きくなり、この両者が相殺されているものと考えられる。
- ・ 単位水量が多いほど、ひび割れ発生率は小さい。単位水量が多いほど乾燥収縮は大きくなる傾向にあるが、流動性の向上により均一なコンクリートの打込みが可能となり、この影響が勝っているものと考えられる。
- ・ 計測された圧縮強度は $25\sim 35\text{N}/\text{mm}^2$ 程度でひび割れ発生率が小さく、適正な圧縮強度であるといえる。圧縮強度が小さいと引張強度も小さく、また、圧縮強度が大きいと単位セメント量が増え、温度応力が卓越しているものと考えられる。
- ・ 施工時期に関しては、夏季に施工したものがひび割れ発生率が大きくなっている。夏季には外気およびコンクリート温度が高くなるとともに、スランプダウンが大きく流動性の低下が影響しているものと考えられる。
- ・ 貫通前に施工されたコンクリートと貫通後に施工されたコンクリートは打込み後の環境は異なるものの養生、その他の影響もあり、大差がない結果となっている。
- ・ 貫通時期については、冬季に貫通したものは条件は悪いが、養生が十分なされているためか、ひび割れ発生率は低い、夏から秋にかけての貫通は、養生も少なく、貫通後の温度降下が大きいいため、ひび割れ発生率が大きくなっている。

また、本研究では温度応力解析、および乾燥収縮によるひび割れ解析が行われている、解析結果では乾燥収縮あるいは温度応力のみではひび割れは発生しにくいとしているが、実構造物では両者が並行して発生していることから、その合力によりひび割れの発生が十分懸念されるとしている²⁸⁾。

覆工コンクリートの高品質化のための改善策としては、コンクリートの流動性の向上、温度ひび割れや乾燥収縮によるひび割れ発生抑制が重要であるとされている。

具体的な配合例として、コンクリートのレベルを一般、準高性能、および高性能の3種類を設定したうえで、覆工コンクリートの最適な材料と配合組合せおよび、各レベルに応じた配合例が表-3.7、表-3.8のように提案されている²⁹⁾。

なお、単位水量については、一般に土木構造物では $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とされているが、覆工コンクリートのひび割れの統計データをもとに、 $185\text{kg}/\text{m}^3$ 以下としている。

ただし、高性能 AE 剤や流動化剤を用いて流動性を向上させることができる場合には、 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とするのが望ましいとしている。

表-3.7 最適な材料と配合の組合せの提案²⁹⁾

レベル	コンセプト	材 料	配 合	施工上の留意点
一 般	従来よりスランブを少し大きくしたもの。ただし、十分な締固めが必要	高性能 AE 減水剤 流動化剤	スランブ位：18cm 程度 単位水量：185kg/m ³ 以下 (高性能 AE 減水剤を用いる場合は、175 kg/m ³ 以下)	締固めを十分に行う。 AE 減水剤を使用する場合より、凝結時間が多少遅延する。
準高性能	一般よりさらにスランブを大きく下もの。締固め作業を低減できる。ひび割れ抑制対策も含む。	高性能 AE 減水剤 膨張材など	スランブフロー：40cm (スランブ 23cm 程度) 単位水量：185kg/m ³ 以下 (高性能 AE 減水剤を用いる場合は、175 kg/m ³ 以下)	材料分離を生じるので、締固めをかけすぎない。 凝結時間が遅延する。
高 性 能	自己充填性を有する高流動コンクリート。ひび割れ抑制対策も含む。	低発熱セメント 高性能 AE 減水剤 膨張材など	スランブフロー： 60~70cm 程度 (スランブ 23cm 程度) 単位水量：185kg/m ³ 以下 (高性能 AE 減水剤を用いる場合は、175 kg/m ³ 以下)	基本的に締固めは行わない。 型枠は液圧で設計する。 凝結時間がかなり遅延する可能性がある。 強度発現が遅いので脱枠後も養生を行う必要がある。

表-3.8 各レベルの最適な配合例²⁹⁾

レベル	セメント種類	スランブまたはスランブフロー	W/C	S/a	空気量	単位量 (kg/m ³)						混和剤の種類
						W	C	LP	EX	S	G	
一 般	NまたはBB	18	55%	48.3%	4.5%	170	309			896	959	SP
準高性能	NまたはM	23 [※] (40)	50%	47.8%	4.5%	170	340		20	838	945	SP
高 性 能	NまたはM	65	50%	49.0%	4.5%	175	330	220	20	755	810	SP
	L	65	50%	49.3%	4.5%	170	320	230	20	765	810	

N：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメント B 種，M：中庸熟ポルトランドセメント，L：低熟ポルトランドセメント
LP：石灰石微粉末，EX：膨張材（低添加型），SP：高性能 AE 減水材
※：中流動コンクリート

(7) 土木研究所による研究（2005 年）

覆工コンクリートの耐久性の向上を目的とし、覆工コンクリートに発生する温度応力および乾燥収縮によるひび割れに着目した室内での要素実験を行った結果、以下のような結論が得られている³⁰⁾。

- ・ プレーンコンクリートに対しては、単位水量が少ない方がひび割れ発生は抑制される傾向にある。
- ・ 鋼繊維補強コンクリートにより、ひび割れの発生を完全に抑止することはできないが、ひび割れの発生を遅延させる効果が認められた。また、鋼繊維の混入により、ひび割れ発生後にコンクリートに発生するひずみを抑制でき、ひび割れ開口を抑制できる。
- ・ 乾燥収縮によるひび割れに対しては、湿度の影響が大きく、養生時に湿潤状態に保つことができれば、初期ひび割れを抑制できる可能性は大きい。風による影響は少なく、風により湿度が下がらなければ、ひび割れ発生に影響はない。

(8) 高山らの研究（2009年）

高山らの研究は、山岳トンネルの覆工コンクリートの初期ひび割れの発生メカニズムの解明、発生予測手法の確立、および、抑制対策を目的としたものである。

a) ひび割れ実態調査

東北新幹線の3トンネルにおいて施工実態調査を実施して以下の事項が把握された³¹⁾。

- ・ ひび割れの発生スパンは全体の40%程度である。半数以上が天端部で発生しており、その80%以上が縦断ひび割れである。側壁部のひび割れは、縦断方向と横断方向がほぼ同程度の割合で発生している。
- ・ 縦断ひび割れの60%以上が、一本に伸びたひび割れである。ひび割れ長さ、発生形態ともに外力によるひび割れの発生状況と類似する。

b) 坑内環境、コンクリート品質との関係

天端部の縦断ひび割れに着目し、施工環境やコンクリートの品質とひび割れ発生との因果関係についての分析結果から、覆工コンクリートのひび割れの発生は、以下のように坑内湿度、坑内温度および打込み温度に関係することが認められた³¹⁾。

- ・ コンクリートの水セメント比は、ひび割れ発生への顕著な相関は見られない。
- ・ 18℃以下および26℃以上の打込み温度でひび割れ発生割合が高い。
- ・ 坑内温度が低い場合（19.5℃以下）でひび割れ発生割合が高い。
- ・ 坑内湿度が低く乾燥している状態でひび割れ発生割合が高い。

c) 覆工コンクリート施工時期との関係

内空変位の収束後に施工された覆工コンクリートを対象に、夏季施工と冬季施工についてひび割れ発生状況、坑内環境とコンクリート内部ひずみ、および表面ひずみの計測を実施し、以下のような知見が得られている³¹⁾。

- ・ 夏季施工、冬季施工でもトンネル天端の軸方向に伸びるひび割れが確認される。
- ・ 夏季施工ではひび割れ幅0.1mm未満で、長さが短く、ひび割れ深さも比較的小さい。これに対して、冬季施工ではひび割れ幅0.2mm程度のひび割れが多く発生し、延長の長い縦断ひび割れが見られ、ひび割れ深さも夏季施工と比較して大きい。
- ・ 内部ひずみは収縮側を示し、地山側と内空側の差は夏季施工では天端部で最大50μ程度、冬季施工では肩部で最大100μ程度である。
- ・ 脱枠時の覆工コンクリート内部ひずみと内部温度を見ると、夏季施工では脱枠した時点で内部温度はピークに達し、時間の経過とともに温度が低下した。一方、冬季施工では、脱枠時では、まだ増加傾向にある。また、冬季施工では夏季施工に比べ、脱枠時に収縮側のひずみが顕著に現れている。
- ・ コンクリートの強度試験の結果では、28日強度に差はないが、冬季施工の方が夏季施工に比べ、若材齢時（15時間）の強度が低い。
- ・ 表面ひずみは、内空側ひずみと比較して、夏季施工で約100μ、冬季施工で約500μ大きくなっており、コンクリート表面と内空側のひずみ差は、コンクリート内部のひずみ差に比べて大きい。
- ・ 夏季施工では脱枠後に坑内環境変化時に表面ひずみの変動が大きく発生した。一

方、冬季施工では、脱枠直後から表面ひずみが大きく変動している。

d) 湿気移動を考慮した評価法

覆工コンクリートでは、コンクリートの硬化過程での水和発熱、放熱や乾燥は、断面内で様ではないと考えられるため、図-3.15に示すように、コンクリートの断面内での乾燥収縮に関する不均一性を考慮する湿気移動を考慮した評価法を提案、適用の妥当性の検討が行われている。

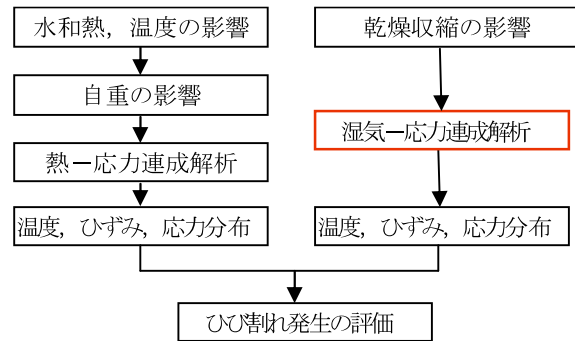


図-3.15 湿気移動を考慮した評価法³¹⁾

この解析結果と模型試験結果との比較・検討において以下の成果が得られた。

- ・ 湿気移動を考慮した評価法は、これまで一般に用いられてきた土木学会式による評価法に比べて精度よく模型試験の結果を再現できる。
- ・ トンネル内空側の環境条件で湿度を低下させた場合には、コンクリート内部の収縮ひずみ、応力は大きくなり、ひび割れが発生しやすくなる。
- ・ 覆工コンクリート内部に発生する収縮ひずみは、乾燥収縮が支配的である。

次に、現地計測結果に対して、湿気移動を考慮した評価法の適用を試みた結果、以下の成果が得られた。

- ・ 湿気移動を考慮した評価法は、計測値とほぼ一致し、実トンネルにおいても内部ひずみおよびひび割れの発生を再現できる。
- ・ ひび割れの発生時期はトンネル坑内の湿度が急激に低下した時期であり、坑内湿度がひび割れ発生に影響していると考えられる。

さらに、坑内湿度、脱枠時間、打込み温度、坑内温度とコンクリートの品質に影響を与える単位水量を変化させた場合のひび割れ発生に関するパラメータスタディを実施した結果、覆工コンクリートのひび割れ発生の程度に最も大きく影響する要因は、坑内湿度であるとしている。

e) ひび割れ抑制対策の提案

これらの成果をもとに、初期ひび割れの抑制対策として、①事前に試験などで打込み時のコンクリート温度の設定、②湿度100%として打込み時のコンクリート水蒸気圧（飽和蒸気圧）を算定、③算定した水蒸気圧-25hPaを坑内水蒸気圧の最小値と設定、④図-3.16に示すようにこの最小水蒸気圧以上の状態となるような坑内温度・坑内湿度を設定・管理する手法を提案している³²⁾。

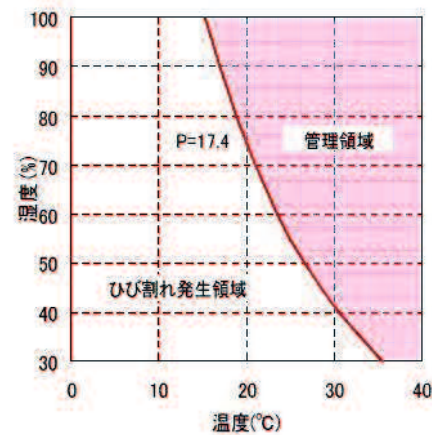


図-3.16 ひび割れ幅抑制管理図³²⁾
(コンクリート温度 30°Cの例)

(9) 伊代田らの研究 (2010年～2011年)

初期養生とその後の周囲環境の変化が乾燥収縮量に及ぼす影響を明らかにするため、供試体で養生方法と養生後の環境変化をパラメータとした乾燥収縮量とコンクリート内部の湿度を測定した。また、トンネル貫通前後の環境変化が乾燥収縮に与える影響を実構造物で測定、比較検討を行い、以下の知見が得られている^{33), 34)}。

- ・ 初期養生期間中は養生方法によって乾燥収縮量に差が見られるが、初期の養生方法が同じであれば、その後の環境変化が異なっても終局の乾燥収縮量には大差ない。このことから、初期養生が重要であると考えられる。
- ・ セメント種類の比較では、高炉セメントB種では、長期間水分を供給することで、急激に湿度が低下しても、乾燥収縮は大きく生じない。
- ・ 乾燥収縮量とコンクリート内部湿度は相関性がみられ、普通ポルトランドセメントより、高炉セメントB種の方が湿度変化に敏感である。
- ・ 実構造物での測定では、坑口付近では外部の環境の影響を受けるため、坑口に近づくにつれ乾燥収縮量は増加する傾向にあった (図-3.17, 図-3.18)。

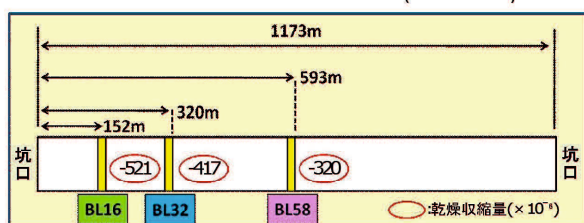


図-3.17 測定ブロックの位置と測定結果³⁴⁾

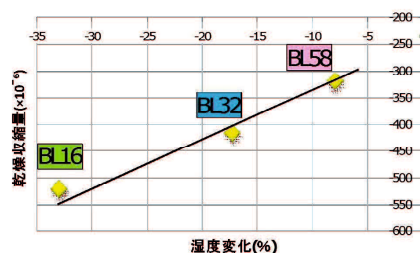


図-3.18 乾燥収縮量と湿度変化の関係³⁴⁾

真空吸水試験により、脱枠時期による養生効果を定量的に把握するとともに、コンクリート表層部と内部の乾燥収縮ひずみと内部湿度を測定している。試験結果では、以下のような傾向が得られている³⁵⁾。

- ・ 脱枠時期が遅いほど、真空吸水面積率が低下する傾向がある (図-3.19)。高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントに比較し、1日後の脱枠では真空吸水断面率が大きいですが、3日以降の脱枠では逆に小さくなる。
- ・ W/Cの増加に伴い真空吸水面積率が増加する傾向がある。また、表層部では真空吸水面積率が大きくなり、内部では小さくなる。
- ・ 普通ポルトランドセメントでは、深さ3cm以内では、脱枠時期による影響を受けるが、3cm以深では脱枠時期の影響をさほど受けない。
- ・ 高炉セメントB種では、脱枠時期による影響が大きく、脱枠1日では4～5cmまで影響を受け、それ以降の脱枠は普通ポルトランドセメントと大差ない。

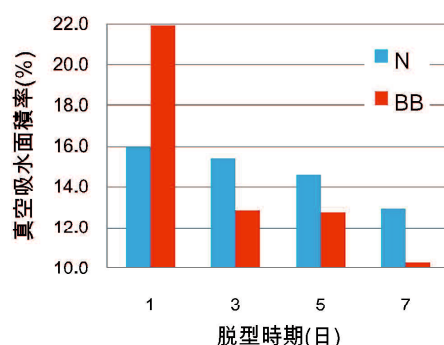


図-3.19 脱枠時期と真空吸水面積率の関係³⁵⁾

(10) 細田らの研究 (2015～2018)

2011年の地震・津波災害後の東北地方の覆工を支える復興道路，復興支援道路には，約110箇所のトンネルが建設されている．これらのトンネルの覆工コンクリートの施工にあたり，細田ら³⁶⁾は山口県の品質確保システム³⁷⁾の導入を含め，コンクリートの品質確保に関する提案を行っている．

覆工コンクリート品質向上の取組み³⁸⁾の一環として，施工チェックシート，目視チェックシートの提案とともに，表面吸水試験法 (SWAT) の適用を提案している．

また，Chamilaら³⁹⁾は，覆工コンクリートにおける温度応力解析のモデル化について，いくつかの提案を行っている．この研究の目的は，施工継手や防水シートを正確にモデル化し，コンクリートの材料特性を適切に考慮した一般的な有限要素法を用いて，覆工コンクリートの適切なモデリング方法を確立することである．

温度応力解析にあたっては，図-3.20，図-3.21に示すように，クラウンを通る中心線を対称軸にトンネルの半断面をモデル化している．図-3.20には解析で設定した熱伝達境界条件を示し，表-3.9には熱伝達境界に関する熱伝達率を示している．

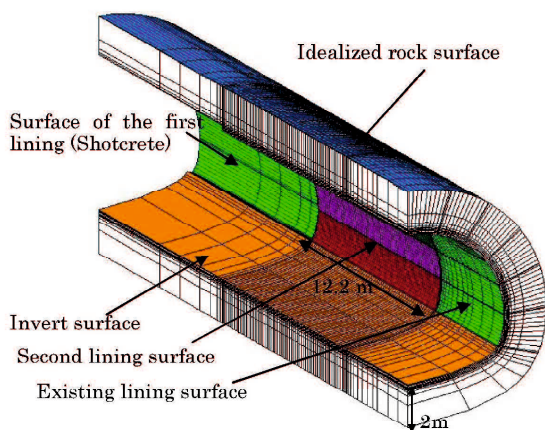


図-3.20 解析モデルと熱伝達境界面³⁹⁾

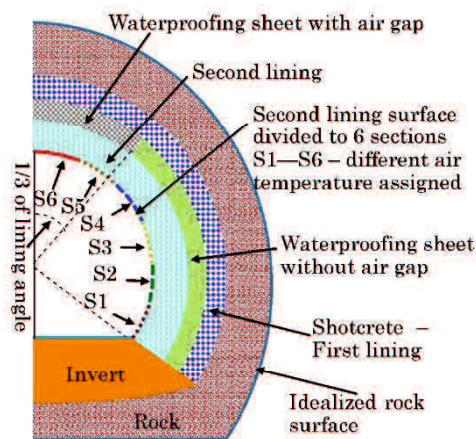


図-3.21 断面およびモデルの構成要素³⁹⁾

表-3.9 熱伝達境界における熱伝達率³⁹⁾

項目	熱伝達率 (W/m ² °C)		備考
	型枠設置時	脱枠後	
覆工コンクリート表面	6	10	大野，細田 (2012)
インバート表面	6	6	土で被覆
覆工コンクリート既施工部	14	14	ひび割れ制御指針 2016
吹付けコンクリート表面	14	14	ひび割れ制御指針 2016
岩盤表面	3.5	3.5	パラメトリックスタディ

解析モデルのおもな提案は以下のとおりである。

- ・ 防水シート (J1) は、覆工コンクリートが吹付けコンクリートから機械的に分離されることを可能にする非線形ジョイント要素でモデル化している。
- ・ 吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間にクラウンの近くに空隙 (エアギャップ) をモデル化している。エアギャップを有する範囲は、図-3.21 に示すように中心線からの 1/3 の範囲である。
- ・ エアギャップは図-3.22 のように考え、それぞれの熱伝導率を以下のように設定している。
 - ・ 空気空隙を含む複合熱伝導率は $0.0064\text{W/m}^\circ\text{C}$
 - ・ 空隙のない複合防水シート (不織布非圧縮) 熱伝導率 $0.175\text{W/m}^\circ\text{C}$
 - ・ 空隙のない複合防水シート (不織布圧縮) 熱伝導率 $0.246\text{W/m}^\circ\text{C}$

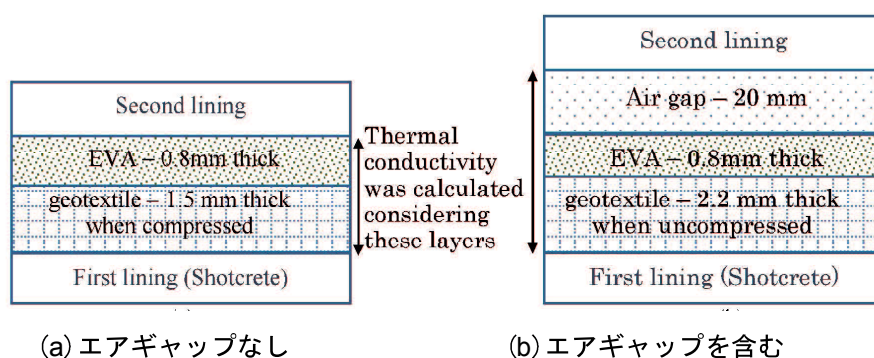


図-3.22 防水シートのモデリング³⁹⁾

また、岩間ら⁴⁰⁾は、実トンネルの計測データで検証されたモデルを用いて、数値シミュレーションを行い、材料物性値や外気温などが覆工コンクリートのひび割れリスクに及ぼす影響について分析している。

その結果、冬季における外気温の入力値の影響、コンクリートのヤング率の低減係数の影響、コンクリートの線膨張係数の影響、およびコンクリートの自己収縮ひずみの影響などに言及している。

3.3 初期ひび割れの予測手法について

3.3.1 概要

(1) ひび割れ解析の流れ

覆工コンクリートに施工後 1~2 年で発生する初期ひび割れは、温度収縮、自己収縮、乾燥収縮などのコンクリートの収縮が要因となっている。

温度収縮は、セメントが水和反応を起こして固まる際に発生する水和熱によって上昇した部材内の温度が下降する際に生じる収縮であり、自己収縮はセメントと水が反応して生じる水和生成物の体積がもとの両者の体積より減少することにより生じる収縮である。乾燥収縮は、コンクリート内部の水分が外部に逸散することによって生じる収縮である。

一般にコンクリート構造物における初期ひび割れの予測は、温度解析によりコンクリート部材内の温度分布の経時変化を予測、必要に応じて別途求めた自己収縮量および乾燥収縮量を重ね合わせて体積変化を算出した後、応力解析（温度応力解析）により、各材齢において部材に発生する引張応力を求めることにより行われている。

一般的なひび割れ発生の評価および対策立案のフローを図-3.23 に示す。

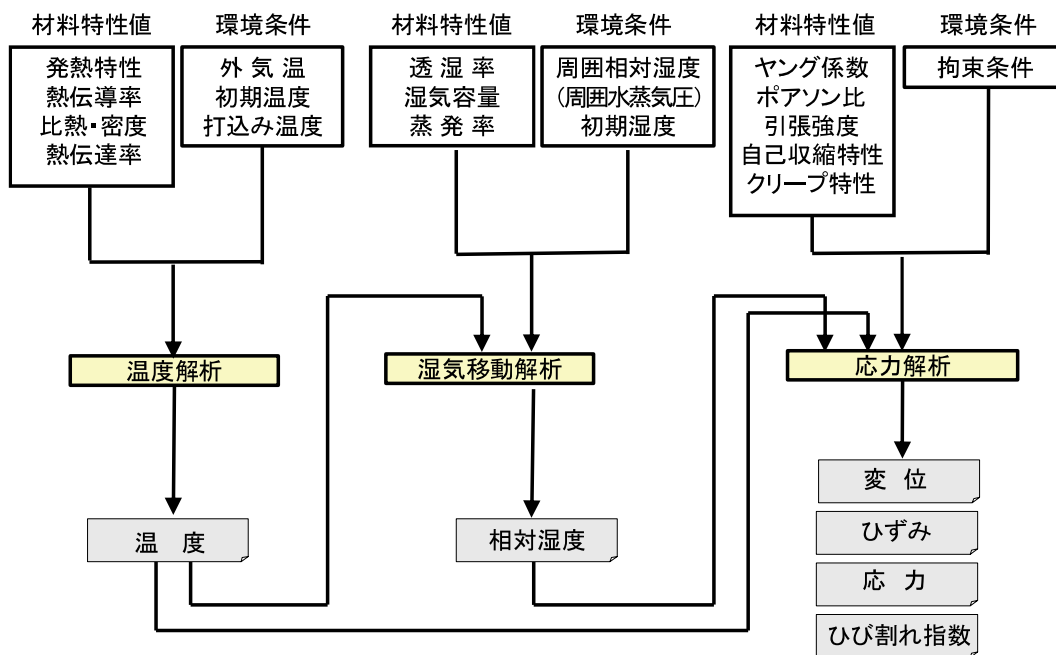


図-3.23 ひび割れ発生の評価および対策立案のフロー

また、コンクリートの温度応力解析では、コンクリート自重を考慮することは少ないが、トンネル覆工コンクリートでは打込み後 16~20 時間で脱枠するため、コンクリート自重によるひずみを考慮することが必要となる場合もある。

(2) ひび割れ指数

一般にコンクリートのひび割れ発生の評価は、日本コンクリート工学協会のマスコンクリートひび割れ制御指針 2016⁴¹⁾ にもとづくひび割れ指数(土木学会コンクリート標準示方書では安全係数⁴²⁾ と表記)を用いて行う。

ひび割れ指数とは、ある時刻歴におけるコンクリートの引張強度 $f_i(t_e)$ と躯体に発生する引張応力 $\sigma_i(t_e)$ との比率を表すもので、次式により表せる。このひび割れ指数は、図-3.24 のひび割れ発生確率曲線に対応している。

$$\text{ひび割れ指数} \quad : \quad I_{cr} = \frac{f_i(t_e)}{\sigma_i(t_e)} \quad \dots (3.2)$$

$$\text{ひび割れ発生確率} \quad : \quad P(I_{cr}) = 1 - \exp\left(-\frac{I_{cr}}{0.92}\right)^{-0.429} \quad \dots (3.3)$$

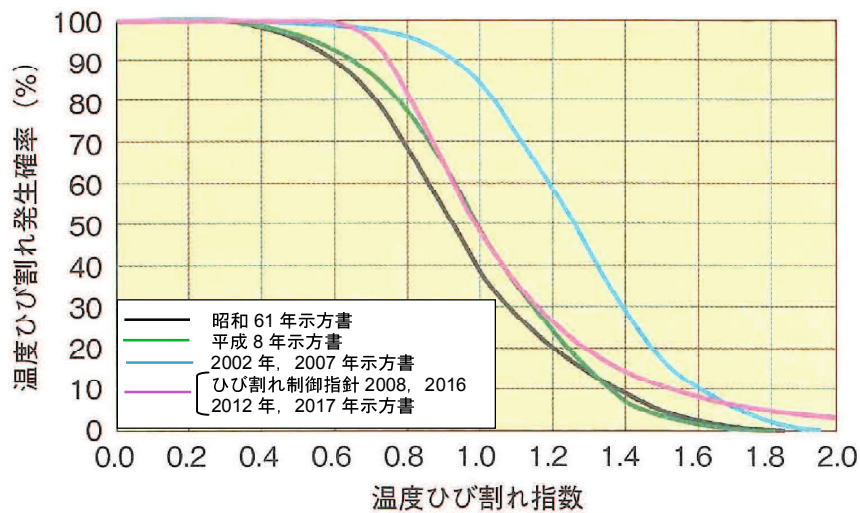


図-3.24 ひび割れ発生確率曲線の変遷⁴³⁾ を加筆修正

表-3.10 ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

ひび割れの制御水準	ひび割れ発生確率	ひび割れ指数 (安全係数)
ひび割れを防止したい場合	5% 以下	1.85 以下
ひび割れをできるだけ制御したい場合	15% 以下	1.40 以下
ひび割れを許容するが、ひび割れ幅が過大とならないよう制御したい場合	50% 以下	1.0 以下

3.3.2 温度解析

(1) 概説

コンクリートは打込み後、セメントの水和発熱によりコンクリート温度は上昇、温度は数日で最高温度に達し、その後、水和反応の収束にともない放熱によって徐々に外気温程度に降下する。温度上昇時には、温度上昇とともに部材は膨張しようとするが、内部の膨張は表面部より大きいため、表面部では内部拘束により引張応力発生し、引張応力がコンクリートの引張強度より大きくなるとひび割れが発生する（図-3.25 参照）。

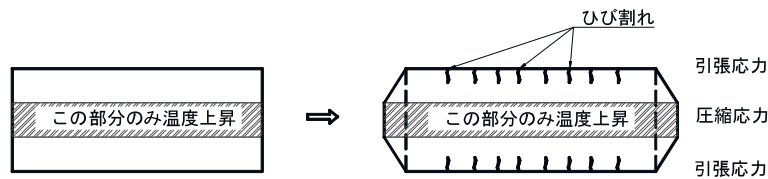


図-3.25 内部拘束の概念図

また、コンクリート温度が降下する際には、地盤や既設コンクリートによって受ける拘束（外部拘束）などにより部材には自由に変形できないため、拘束ひずみ（拘束により収縮できなかった分のひずみ）が生じる。

コンクリートのヤング係数は材齢とともに大きくなるため、温度上昇過程に発生する圧縮応力よりも降下過程に発生する引張応力が大きくなり、この引張応力がコンクリートの引張強度より大きくなるとひび割れが発生することになる（図-3.26 参照）。

ただし、覆工コンクリートの背面はアイソレーション効果を期待して防水シートが施工されており、背面拘束は非常に小さいと考えてよい。

このように、コンクリート内部では、水和発熱やそれにとまなう熱の移動、外気への放熱などで、場所によって温度が時々刻々と変わる。これを予測するのが温度解析（非定常熱伝導解析）である。

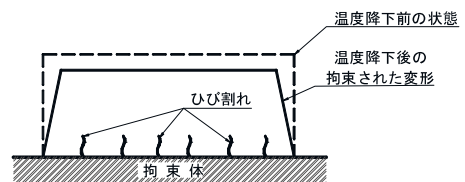


図-3.26 外部拘束の概念図

(2) 非定常熱伝導解析

熱はエネルギーであり、熱交換とはエネルギーの移動になり、以下を原則とする。

- ・ 全体のもつ熱量は一定である。（熱力学第一法則）
- ・ 熱は高いところから低いところに向かって流れる。（熱力学第二法則）

コンクリートの水和熱はセメントの種類、単位セメント量、打込み温度などで決まる。熱力学第二法則から、硬化過程にあるコンクリート構造物は、発熱しているコンクリートから温度の低い外部へ流れることになる。その方向は、覆工コンクリート⇒防水シート⇒吹付けコンクリート⇒地盤（熱伝導：固体内部の熱交換）、あるいは覆工コンクリ

ート⇒型枠⇒外部（熱伝達：固体と液体または気体との熱交換）となる。

部材内の温度分布やその履歴は、一般的には、断熱温度上昇特性を発熱項として非定常熱伝導解析によって計算することができる。非定常熱伝導の支配方程式は、式 (3.4) で表される⁴⁴⁾。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q}(t) \quad \dots (3.4)$$

ここに、 ρ ：密度 (kg/m³)， c ：比熱 (kJ/kg°C)， T ：温度(°C)

t ：時間， κ ：熱伝導率 (W/m°C)

$\dot{Q}(t)$ ：コンクリートの発熱率 (単位時間あたりの発熱量)

式 (3.4) は、エネルギー保存則であり、(内部エネルギー) = (熱伝導) + (発熱) という熱収支を表している。

右辺第2項は、強制加熱，輻射，化学反応などにより単位時間に単位面積あたりに外部から供給される熱量を表しており，その時間的変化率は \dot{Q} で表される。発熱量は ρc で除した温度の単位で評価することが多く，一般的には式 (3.5) が用いられている。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t}) \quad \dots (3.5)$$

ここに、 $Q(t)$ ：断熱温度上昇量 (°C)， t ：材齢 (日)

Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量 (°C)

γ ：断熱温度上昇速度係数

式 (3.5) は断熱温度上昇式と呼ばれており，マッシュブなコンクリートの中心部では熱の出入りがない断熱状態であるため，その中心部の温度履歴を指数関数で表したものである。

Q_{∞} および γ は供試体を熱の出入りがない断熱に保った状態で温度を計測する断熱温度上昇試験によって求められるが，指針類では過去に行った実験結果から，セメントの種類ごとに，単位セメント量や打込み温度の関数として整理されている。

実際の温度解析では，式 (3.5) を式 (3.4) の右辺第2項の発熱率 (単位時間あたりの発熱量) に組み込む必要がある。

式 (3.4) を時間ごとに解くと，各時刻における温度分布が計算される。通常，式 (3.4) に示す非定常熱伝導方程式は，有限要素法で解かれる。

コンクリートのひび割れ解析の特徴は，コンクリートの硬化過程で，材料特性値が時間とともに変化することや，リフトに分割したコンクリートの打込みにより，要素の追加や境界条件の変化を考慮する必要があり，構造系が変わるところにある。

(3) 境界条件

式 (3.4) は領域内の任意点で、任意の時刻に成立すべき方程式であり、これを具体的に解くには、境界条件を必要とする。解析において一般的に考慮すべき境界条件として、温度固定境界と熱伝達境界が挙げられる。このうち、温度固定境界は応力解析における変位固定境界と同様に扱うことができる。一方、熱伝達境界は、境界からの熱の伝達を表したもので、単位面積あたりの流出熱量 q は次式で表される。

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad \dots (3.6)$$

ここに、 α_c : 熱伝達率(W/m²°C), T_c : 周囲の温度(°C)

熱伝達率は、コンクリートから熱が直接、または型枠を通じて外気に放散される場合の熱の伝えやすさを扱うものであり、型枠・養生に関しては、温度解析では熱伝達率で表現することとなる。コンクリート標準示方書などに標準値が示されているが、この数値はあくまでも一般値であり、熱伝達率は風速の影響が大きいとされている。

(4) 断熱温度上昇特性値

コンクリートの断熱温度上昇特性は、一般に式 (3.5) で表現される。断熱温度特性値は、コンクリートを断熱状態で養生し、セメントの水和熱によって生じるコンクリートの温度上昇特性を測定して、得られる熱的特性値であり、打込み温度、セメント種別、セメント量より変化する値として、表-3.11 に示すような標準値⁴⁵⁾が示されている。

表-3.11 断熱上昇特性式の係数の標準値の一例

セメントの種類	近似式	250kg/m ³ ≤ Wc ≤ 400kg/m ³	
普通ポルトランドセメント	$Q_\infty = a + b \times Ta$	$a = 17.5 + 0.113Wc$	$b = -0.146 + 0.000308 \times Wc$
	$\gamma = a + b \times Ta$	$a = -0.426 + 0.00207Wc$	$b = 0.0471 + 0.0000188 \times Wc$
高炉セメント B 種	$Q_\infty = a + b \times Ta$	$a = 17.9 + 0.115Wc$	$b = -0.149 + 0.000314 \times Wc$
	$\gamma = a + b \times Ta$	$a = -0.325 + 0.00156Wc$	$b = 0.0216 + 0.000039 \times Wc$

断熱温度上昇式により、算定した標準的な断熱温度上昇量を図-3.27 に示す。

この図に示すように、断熱状態での水和発熱による温度上昇は2~3日で終局断熱温度上昇量に達することとなり、熱移動がなければ以降は平衡状態となる。

図-3.28 には水和発熱のイメージ図を示す。マスコンクリートでは表面付近を除き、多くの部位は断熱状態とみなすことができ、断熱状態と同じ水和発熱が全断面で

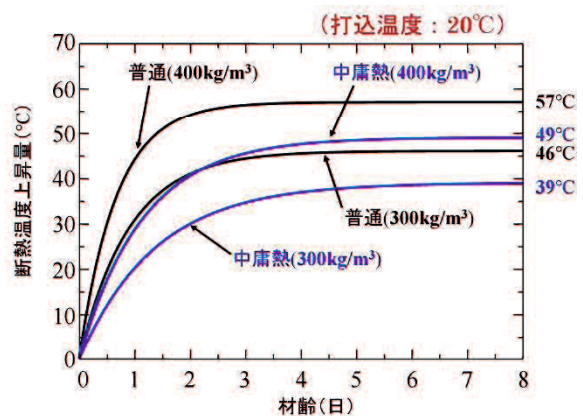


図-3.27 標準的な断熱温度上昇量²³⁾

発生しているものとして、断熱温度上昇式が適用されている。

一方、覆工コンクリートは部材厚が薄く、コンクリート体積に比較して表面積が大きい
ため、必ずしも断熱状態であるとは言えない。したがって、断熱状態と同じ水和発熱
が全断面で起こっているとの仮定は適用できない可能性がある。設計にあたっては、部
材によって、温度履歴に応じて断面ごとに発熱率を変えるなどの対応も考えられるが現
実的には対応は困難である。

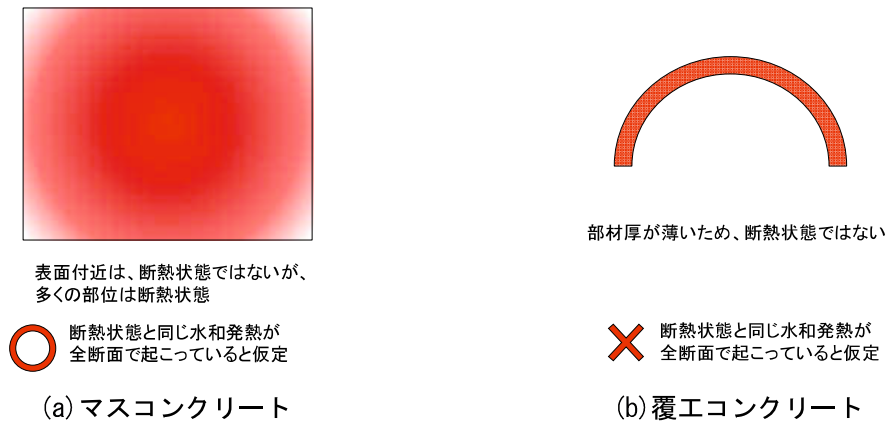


図-3.28 水和発熱のイメージ

3.3.3 乾燥収縮ひずみの予測と湿気移動解析

(1) 概説

乾燥収縮はコンクリートが乾燥を受けて硬化体中の水分が逸散し、収縮する現象である。コンクリートの乾燥収縮にともなう応力は、コンクリート表面からの水分の逸散によるコンクリート自体の収縮が拘束されることによって、コンクリートに応力が発生する。一般にはコンクリート内部に比較して、表面の方が乾燥収縮速度が速いため、表面の収縮は拘束を受けて引張応力が発生し、ひび割れの要因となる（図-3.29 参照）。

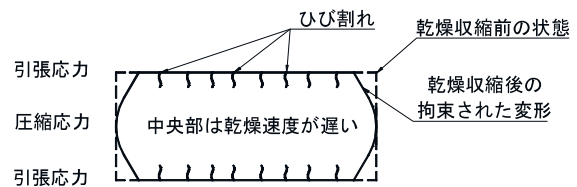


図-3.29 乾燥収縮の概念図

(2) 乾燥収縮ひずみの予測式

乾燥収縮の特性値は、室内試験により乾燥収縮ひずみを予測することが望まれているが、コンクリートの乾燥収縮ひずみの計測は、長期にわたるため、設計の段階において、実験により乾燥収縮ひずみを求めることは容易ではない。したがって、多くの国々で、

その国の実情にあった予測式が提案されている。

一般に乾燥収縮ひずみは、十分な乾燥期間が過ぎれば、ある収束値に近づくと考えられており、その収束値および経時変化は構造物周辺の温湿度などの環境条件、セメントや骨材などの使用材料の種類、単位水量などのコンクリートの配合および部材の形状寸法の影響を受けるとされている。したがって、予測式では乾燥収縮ひずみの最終値と最終値に至る経時的進行を予測するものである。経時的進行を代数的に求める場合は、式(3.7)に示す指数式、あるいは式(3.8)に示す双曲線式で表されることが多い⁴⁶⁾。

表-3.12には代表的な予測式で入力する要素を示す^{46) ~52)}。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} [1 - \exp\{\beta(t - t_0)\}] \quad \dots (3.7)$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left\{ \frac{t - t_0}{A + B(t - t_0)} \right\}^n \quad \dots (3.8)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 材齢 t_0 より乾燥を開始したコンクリートの材齢 t における乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみ最終値

β, A, B および n : 定数

表-3.12 乾燥収縮ひずみの各予測式で考慮されている要因⁴⁶⁾を追加修正

	ACI	CEB/FIP-90	JCI-TC911	JSCE2007年	JSCE2017年
乾燥開始時材齢	○	○	○	○	○
乾燥収縮期間	○	○		○	
相対湿度	○	○	○	○	○
体積-表面積比	○			○	
部材厚さ	○	○			○
スランブ	○				
単位水量			○	○	○
単位セメント量	○				
セメントの種類		○	○		
空気量	○				
細骨材率	○				
圧縮強度		○	○		
温度				○	
水セメント比					○
骨材品質					○
骨材中の水分					○

乾燥収縮ひずみの予測式の例として、日本コンクリート工学会が提唱する JCI-TC911 予測式 (3.9) ~ (3.11) を示す⁵⁰⁾。

$$\varepsilon_{sh\infty} = \frac{\varepsilon_{sh\rho}}{1 + \phi \cdot t_0} \quad \dots (3.9)$$

$$\varepsilon_{sh\rho} = \frac{\alpha \cdot (1-h) \cdot W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} = \frac{\alpha \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \cdot W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad \dots (3.10)$$

$$\phi = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\} \quad \dots (3.11)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値 (μ ; $\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh\rho}$, ϕ : 回帰分析によりもとめられる係数

α : セメントの種類による係数 (普通セメント : $\alpha=11$)

t_0 : 乾燥開始材齢 (日), ($t_0 \geq 98$ のとき, $t_0=98$)

h : 相対湿度 (0.4~1.0), RH : 相対湿度 (%) (40%~100%)

W : 単位水量 (kg/m^3), $f'_c(28)$: 28日圧縮強度 (MPa)

(3) 湿気移動則と湿気移動方程式

一般的なコンクリート構造物において、初期ひび割れを予測する場合には図-3.30(a)に示すように温度応力解析により、ひび割れ発生予測を行うが、覆工コンクリートは、体積に比較して表面積が大きく、乾燥収縮の影響が大きいものと考えられ、乾燥収縮を含めたひび割れ予測が必要である。

実務分野で乾燥収縮を考慮する場合、乾燥収縮ひずみは断面内で一様と仮定し、前述の予測式で算定するのが一般的である。しかし、コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート中の水分移動にともなって生じるものであり、精度良い予測を行う場合には、コンクリート中の湿気移動解析による部材内の湿度分布にもとづき、部材断面内部に発生するコンクリートの乾燥収縮ひずみを求めることが必要となる。



(a) 一般的な初期ひび割れ解析

(b) 湿気移動を考慮したひび割れ解析

図-3.30 ひび割れ解析の流れ

湿気移動解析は、おもにコンクリート表面から水分が逸散することによる乾燥を解析するものである。湿気移動の非線形支配方程式は (内部湿気量) = (湿気移動) - (湿気損失) という湿気収支を式 (3.12) で示している⁴⁴⁾。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_p \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) - \frac{dq_h}{dt} \quad \dots (3.12)$$

ここに, $(dq/dP)_p$: 湿気容量 ($\text{g/m}^3 \cdot \text{mmHg}$)

λ_p : 透湿率 ($\text{g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$), P : 蒸気圧 (mmHg)

dq_h/dt : 水和による湿気密度変化 ($\text{g/hr} \cdot \text{m}^3$)

(4) 境界条件

式 (3.12) は, 領域内の任意点で, 任意の時刻に成立すべき方程式であり, これを具体的に解くには, 境界条件を必要とする. 解析において一般的に考慮すべき主な境界条件として, 湿気固定境界と湿気伝達境界が挙げられる. このうち, 湿気固定境界は応力解析における変位固定境界や温度解析における温度固定境界と同様で良い.

一方, 湿気伝達境界は, 現在までにいくつかの式が提案されているが, 最も一般的に採用されているのは次式⁵³⁾である.

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P - P_0) \quad \dots (3.13)$$

ここに, α : 蒸発率 ($\text{g/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$)

P_0 : 周囲の蒸気圧 (mmHg)

(5) 透湿率, 湿気容量, および蒸発率

湿気移動に関わる物性値は, 透湿率 λ_p ($\text{g/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$), 湿気容量 $(dq/dP)_p$ ($\text{g/m}^3 \cdot \text{mmHg}$), さらには境界面における蒸発率 α ($\text{g/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$) がある.

透湿率と湿気容量は, 西岡ら⁵⁴⁾の研究により 図-3.31 および, 図-3.32 にもとづき, 式 (3.14) ~ 式 (3.18) に示すように相対湿度との関係を表すことができる.

a) 透湿率

$$\bullet \quad 0 \leq RH \leq 60\% \text{ のとき} : \lambda = 0.0019 \quad \dots (3.14)$$

$$\bullet \quad RH \geq 60\% \text{ のとき} : \lambda = 0.0088RH^2 - 0.0022RH + 0.00009 \quad \dots (3.15)$$

※式中での RH は, 百分率ではなく, 小数で表示.

b) 湿気容量

$$\bullet \quad 0 \leq RH \leq 60\% \text{ のとき} : \frac{dq}{dP} = 2500 \quad \dots (3.16)$$

$$\bullet \quad 60 \leq RH \leq 80\% \text{ のとき} : \frac{dq}{dP} = 9590RH - 3254 \quad \dots (3.17)$$

・ $RH \geq 80\%$ のとき : $\frac{dq}{dP} = 70710 RH - 52150$. . . (3.18)

※式中での RH は、百分率ではなく、小数で表示。

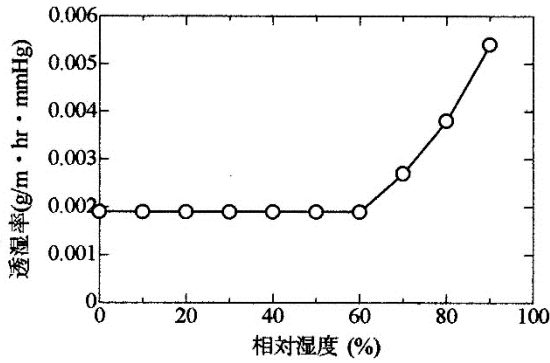


図-3.31 相対湿度と透湿率の関係⁵³⁾

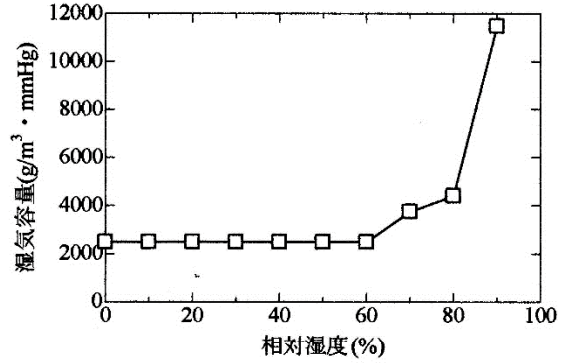


図-3.32 相対湿度と湿気容量の関係⁵³⁾

c) 蒸発率

蒸発率は、堀部ら⁵⁴⁾が行った水分蒸発量および蒸気圧の計測結果(図-3.33 参照)から、相対湿度と蒸発率との関係を式(3.19)および式(3.20)で定義することができる。

・ $0 \leq RH \leq 70\%$ のとき : $\alpha = 0.194$. . . (3.19)

・ $70 \leq RH \leq 100\%$ のとき : $\alpha = 13.6RH^2 - 17.1RH + 5.5$. . . (3.20)

湿気移動則は、コンクリートのように常に温度変化が生じる固体を対象とする場合は、水蒸気圧 P で定義した方が合理的であると考えられる。しかし、水蒸気圧は一般的でなく扱いが難しいため、入出力は相対湿度で行うのが一般的である。

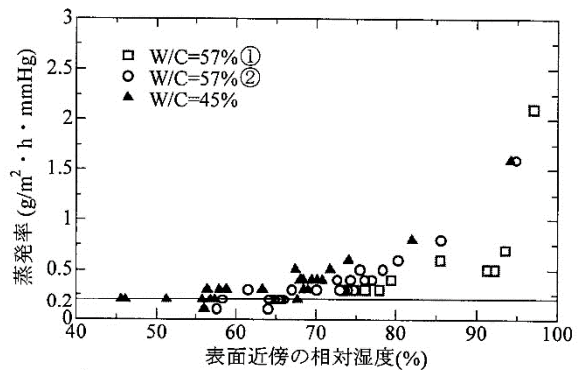


図-3.33 蒸発率 (W/C による比較)⁵⁴⁾

d) 検討課題

ここで示した透湿率、湿気容量、および蒸発率は、現行の日本コンクリート工学会から発売されている温度応力ソフト解析 JCMAC3 に組み込まれているものである。しかしながら、古い文献によるものでもあり、この値を使用した場合には、乾燥収縮が過大に評価されるということが指摘されている。

3.4 計測データにもとづく温度解析の適用性に関する検証

3.4.1 概要

トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れを予測するためには、温度解析や湿気移動解析が不可欠である。しかしながら、これらの解析の精度は入力する材料物性値によるところが大きく、正確な材料特性値を入力しなければ、正確な解析結果は得られない。

トンネルの覆工コンクリートはトンネル延長方向の長さや、断面方向の内周長さに比べ、部材厚が薄いという特殊な形状をしており、コンクリート体積に対して、表面積が大きくなるという特徴を有する。このため、マスコンクリートを対象とした既往の文献などに記載される材料特性値を採用しても、必ずしも信頼性における解析結果を得ることができない場合がある。そこで、本研究では、非定常熱伝導 FEM と粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization, 以下 PSO) を組合わせた効率的な逆解析手法により、トンネルの覆工コンクリートを対象とした材料特性値の同定を行うものである⁵⁵⁾。

3.4.2 粒子群最適化 (PSO)

(1) 粒子群最適化 PSO の概要

粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization) は、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用したもので、1995年に James Kennedy と Russell Eberhart^{56), 57)}によって提案された。

PSO は概念が非常にシンプルであり、また、種々の問題への適用も比較的簡単であることから、連続変数の最適化が可能である。Kennedy らによって提案された PSO の基本的概念を以下に示す。

- ・ 多次元の解空間を粒子 (Particle) が群れを成して動き廻り、その移動の過程で最適位置 (最適解) を見つける。
- ・ 各粒子は多次元空間の点として扱われ、自己の移動軌跡およびほかの粒子の移動軌跡によって各粒子の移動が決まる。
- ・ 各粒子は、解空間におけるこれまでの移動軌跡の中で最良の位置 ($Pbest_i$: Personal best position) を最適解として保持している。また、ほかのすべての粒子も含め、これまでの移動軌跡の中で集団内の最良の位置 ($Gbest$: Global best position) を最適解として保持している。

粒子 (鳥や魚など群れを成して移動する生物) の移動を例に PSO の基本的概念をさらに詳しく説明する。

鳥の群れが餌を求めて移動していることを想定する。仲間の誰かがエサのある場所を見つけると、群れの残りはどこにいても情報を共有し、次第にそこに集まって周辺を探索する。同時に各個体が探索した良い場所を覚えていて、そこに戻る動きを見せる場合もある。

図-3.34 に示すように、粒子は群れを成して移動しており、その中のある粒子は①から②、②から③に移動しているものとする。ここで、③において次に移動する方向について考える。PSO では、次に移動する方向として、(a)進んで来た方向の延長、(b)今までに自分が移動してきた軌跡の中で最良位置 (Personal best position) の方向、および(c)群れ (ほかの粒子を含めた集団全体) の中で最良位置 (Global best position) の方向の3つを考えており、(a)、(b)、(c)の各ベクトルを足し合わせた方向が次に進む方向となる。この過程を繰り返し、最適解に粒子が集約されることとなる。

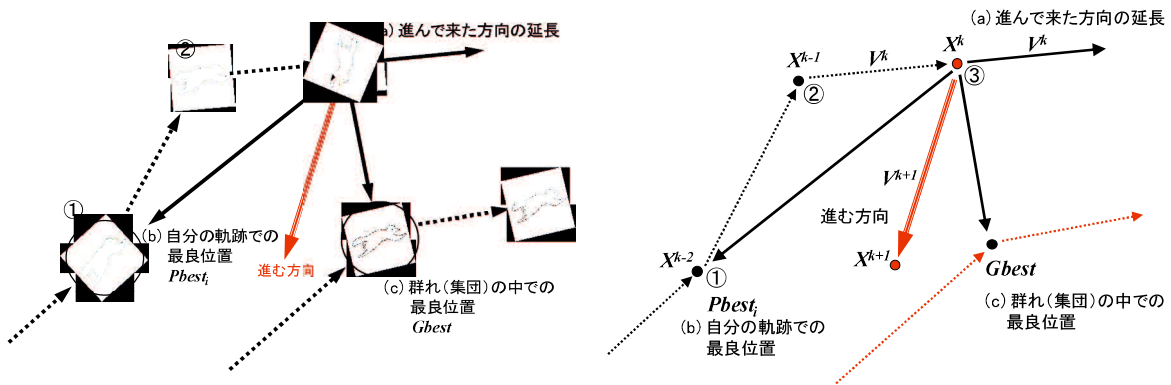


図-3.34 PSOにおける粒子の移動

(2) PSO の処理手順

PSO の実際の処理手順について、PSO を温度解析の逆解析に用いた場合を例とした図-3.35 により説明する。

【Step 1】 n 次元の解空間内において粒子の初期位置および初期速度をランダムに設定する。

【Step 2】 最大計算ステップ数に達するか、あるいは解が収束すると計算を終わる。

【Step 3】 粒子ごとに Step 4～Step 8 を繰り返す。

【Step 4】 個々の粒子の評価値を計算する。本研究では評価値は後述する式 (3.23) で計算される残差平方和 S であり、評価値が小さいほど、良い位置にいるといえる。

【Step 5】 個々の粒子について、各粒子がこれまでの移動軌跡の中での最良位置 (Personal best position : $Pbest_i$) の評価値との比較を行い評価値が小さければそのときの粒子位置を $Pbest$ に保存する。

【Step 6】 Step 5 で $Pbest_i$ へ保存した場合、さらに集団全体におけるこれまでの最良位置 (Global best position : $Gbest$) の評価値との比較を行い、評価値が小さければそのときの粒子位置を $Gbest$ に保存する。

【Step 7】 各粒子の速度を以下の式 (3.21) で計算する。

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot \frac{(Pbest_i - X_i^k)}{\Delta t} + c_2 \cdot r_2 \cdot \frac{(Gbest - X_i^k)}{\Delta t} \quad \dots (3.21)$$

ここに、 V_i^{k+1} : 粒子 i のステップ $k+1$ における速度、
 V_i^k : 粒子 i のステップ k における速度
 X_i^k : 粒子 i のステップ k における位置
 w : 粒子の慣性、 c_1, c_2 : 認知的および社会的パラメータ
 r_1, r_2 : 0~1 の乱数、 Δt : タイムステップ

また、 P_{best} は、前述したように粒子 i のこれまでの軌跡の中で一番評価値が小さかった最良位置であり、 G_{best} はすべての粒子における最良位置である。なお、粒子の速度にはあらかじめ制限値 V_{max} を設けておき、式 (3.21) で計算された速度が V_{max} を超えた場合には、式 (3.21) の速度として V_{max} を使う。

【Step 8】 各粒子の位置は、式 (3.22) で計算する。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad \dots (3.22)$$

以上の操作を最大計算ステップ数に達するまで繰り返すことにより、誤差が最小となる熱材料特性値を同定することができる。

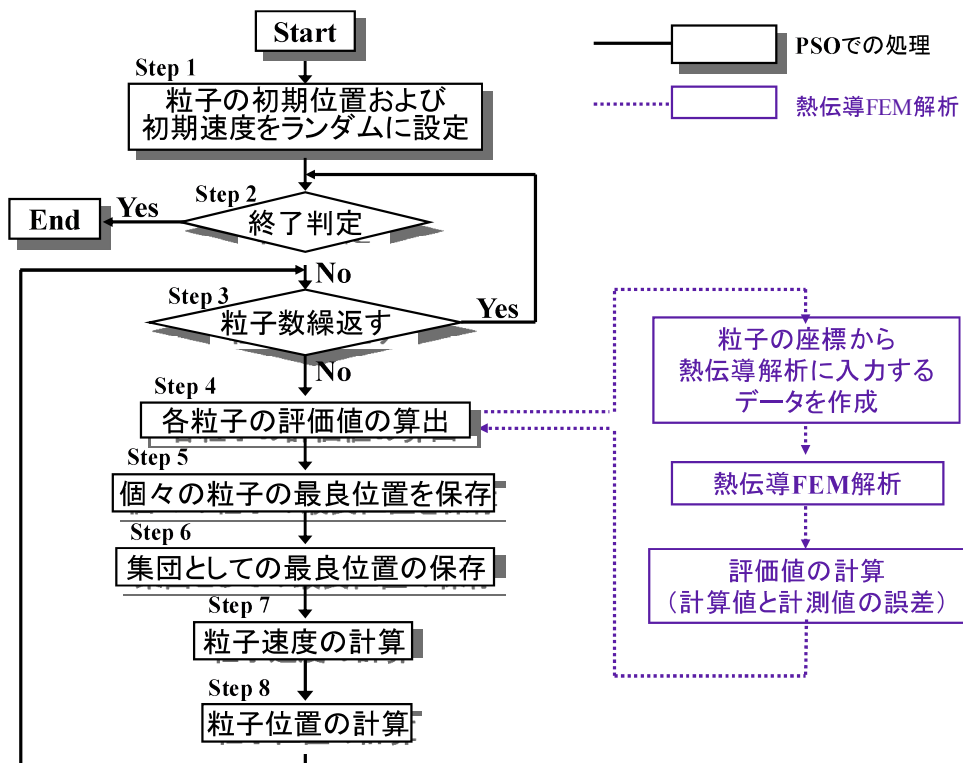


図-3.35 PSO のフローチャート

(3) PSOのパラメータ

PSOを行うにあたり、必要なパラメータは、式(3.21)に示す $w, c_1, c_2, \Delta t, V_{\max}$ の5つと、集団のサイズ n ならびに最大計算ステップ数 k_{\max} である。

このうちタイムステップの Δt は、単位時間を考えているので通常1が用いられる。 w は粒子の慣性であり、大きな値を設定すると大域的動作となり、小さな値では局所的動作となる。 c_1, c_2 それぞれ認知的および社会的パラメータと呼ばれるもので、進む方向を選ぶとき、過去の自分経験に重みを置くか、それとも群れ(集団)の経験に重みを置くかのパラメータである。 c_1, c_2 には前述したように、それぞれ、 r_1, r_2 で示される乱数(1以下)を乗じて用いられる。速度の制限値 V_{\max} については、はじめは局所解に陥らないように大きな値を設定し、探索がある程度進んだ場合には、細かく探索できるように計算ステップに応じた可変値を採用している。また、粒子数 n についても、可変値を採用しており、探索が進み、ある程度収束してきた場合には、粒子数を減らしている。

本研究で設定したパラメータの一覧を表-3.13に示す。これらの値は、他の研究者⁵⁸⁾らが設定している値を参考に、何回かの試行により決定したものである。

表-3.13 PSOのパラメータ

パラメータ	設定した値
w (粒子の慣性)	1.0
c_1 (認知的パラメータ)	2.0
c_2 (社会的パラメータ)	2.0
Δt (タイムステップ)	1.0
V_{\max} (速度の制限値)	$Range(i)/2 \sim 0$
n (粒子の数)	20~5
k_{\max} (最大計算ステップ)	100

※ $Range(i)$: パラメータ i の範囲

3.4.3 PSOによる材料特性値の同定手法

温度解析では覆工コンクリート内で計測された温度と熱伝導 FEM 解析⁵⁹⁾により計算された温度との残差平方和 S (目的関数) が最小となるように PSO を用いて、材料特性値を同定する。

$$S = \sum_{i=1}^m (T_i - \phi_i)^2 \rightarrow \min \quad \dots (3.23)$$

ここに、 T_i : 計測された温度 (°C), ϕ_i : 計算された温度 (°C)

m : 計測点の数

PSO では、粒子を群れで移動する生物として扱っており、同定する材料特性値の数を次元とする解空間の中を粒子が移動し、その移動の過程で最適な粒子の座標位置(材料特性値の組合せ)が同定される。たとえば、熱伝導率、熱伝達率、熱容量の3つの材料特性値を同定する場合には、3次元の解空間となり、その座標位置から最適な熱伝導率、熱伝達率、熱容量の組合せが求まる。PSOによる同定では、あらかじめ解空間の範囲を

設定しておくため、解空間をはずれた極端な値が同定されることはない。

中村ら⁶⁰⁾は2次元での熱伝導逆解析で PSO の有効性をすでに検証しており、本研究では計算時間を短縮するため、従来のアルゴリズムに改良を加え、3次元での実問題に適用する。図-3.36 に PSO の同定プロセスを示す。

PSO では、はじめに同定する材料特性値を座標軸とする多次元の解空間として表現する。この時の次元数は同定したい材料特性値の数であり、それぞれの軸のスケール、すなわち各座標軸の範囲は、材料特性値が取り得ると考えられる値の最小値と最大値を設定するため、解空間を外れた極端な値が同定されることはない。

この解空間上にいくつかの Particle (粒子) をランダムに配置する。それぞれの粒子の位置 (座標) は、材料特性値に対応している。ここで設定された粒子の座標値 (材料特性値) をもとに、熱伝導 FEM 解析に入力する入力データを作成する。粒子の数だけ、入力データが作成されることとなる。

次に、この粒子ごとの入力データを使って、熱伝導 FEM 解析を行い、この温度計算結果と、あらかじめ現場で計測されている計測温度との誤差を計算する。具体的には、計測点すべてについて、それぞれの時間ステップごとに、計測値と計算値との残差平方和を計算し、残差平方和の累積値が評価値となる。すなわち評価値が小さい粒子ほど良い位置にいるといえる。この位置の最適化に PSO を用いている。

この過程を繰り返すことにより、誤差が収束し、最も誤差の少ない粒子位置すなわち、材料特性値の組合せを得ることができる。

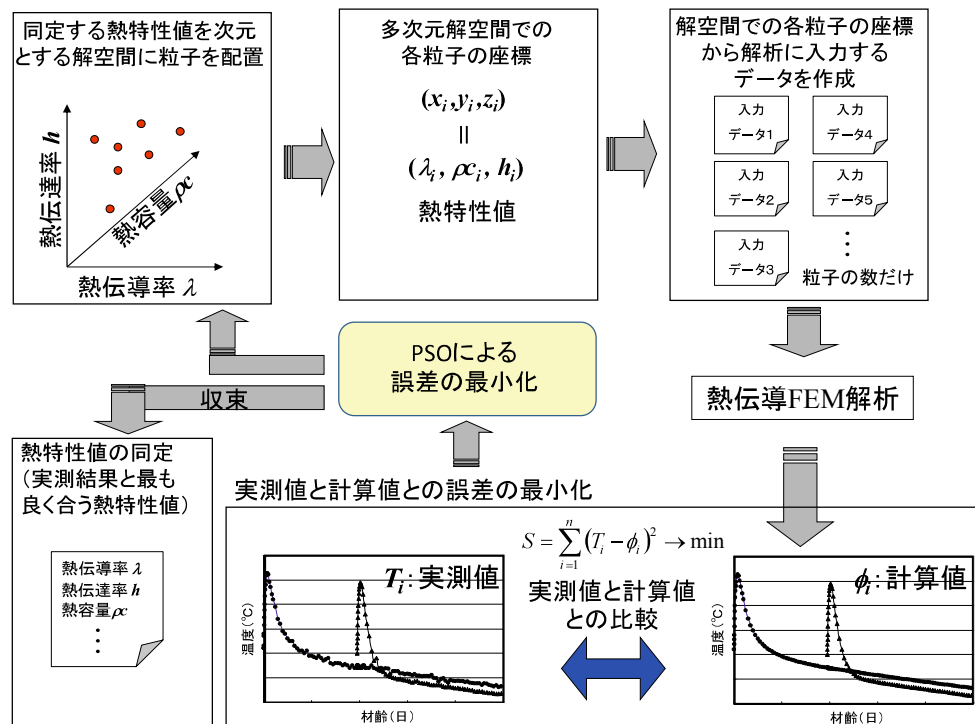


図-3.36 PSO の同定プロセス

3.4.4 標準値を用いた温度解析の検証

(1) 計測データ

Dトンネルでは、坑口より50m程度の位置で、コンクリート打込み時より840時間(35日間)コンクリート内の温度が計測されている。本研究ではこの計測データを用いて、温度解析を実施し、温度解析のトンネル覆工への適用性について調査した⁵⁵⁾。

図-3.37に温度計測位置を、図-3.38に各計測点と外気温の温度履歴を示す。

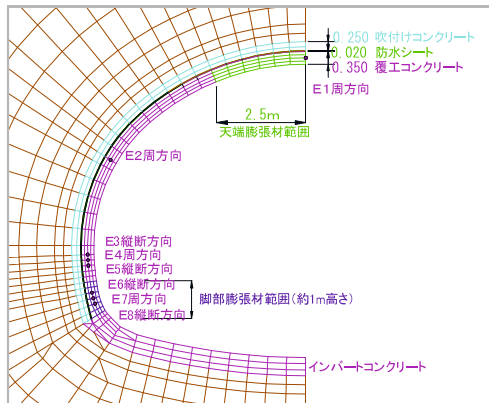


図-3.37 温度計測点

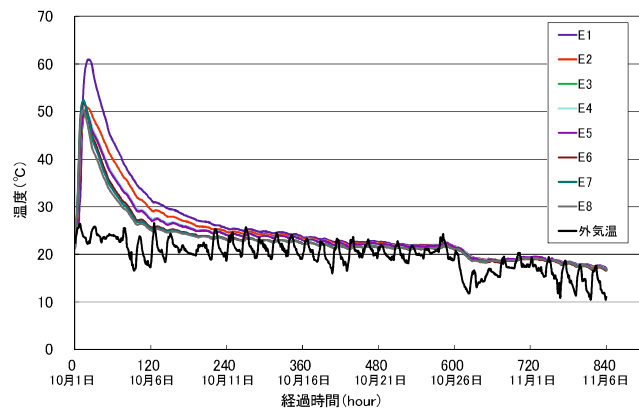


図-3.38 各計測点と外気温の温度履歴

Dトンネル坑口部で覆工コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントであるが、ひび割れの発生が懸念された天端と脚部には膨張材が添加されている。

表-3.14にコンクリートの配合を示す。

表-3.14 覆工コンクリートの配合 (kg/m³)

部材	水結合材比 W/B(%)	細骨材率 s/a(%)	水 W	セメント C	膨張材 Ex	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
側壁部	55	51.1	164	299	—	940	918	3.58
天端・脚部	51	51.1	164	299	20	940	918	3.58

(2) 解析モデルと解析条件

計測データを用いて図-3.39に示すモデルによりトンネル覆工コンクリートの材料特性値の同定を行う。このモデルは、打込み順序をもとに覆工コンクリートを8分割したものである。図-3.39ではそれぞれの要素とその表面を表している。

本研究では、トンネル縦断方向のひび割れの検証を目的とするため、二次元平面ひずみ問題として扱う。すなわち、応力解析において、面外方向の温度解析や湿気移動解析は行うものの、面外方向の変位を拘束することによって、温度変化や乾燥による面外方向へのひずみを0と固定した。解析モデルは左右対称性を考慮して半断面でモデル化し単位奥行き長さとした。

なお、本解析で用いた解析プログラムは、汎用の熱伝導FEM解析コード⁶¹⁾を改良して使っている。

表-3.15に打込み開始時間と初期温度を示す。コンクリートの初期温度は、計測された打込み温度を用い、その他については、16℃と仮定した。また、コンクリート内部の温度計測点は、前述した図-3.37および表-3.15に、各計測点および外気温の温度履歴を図-3.38に示したとおりである。

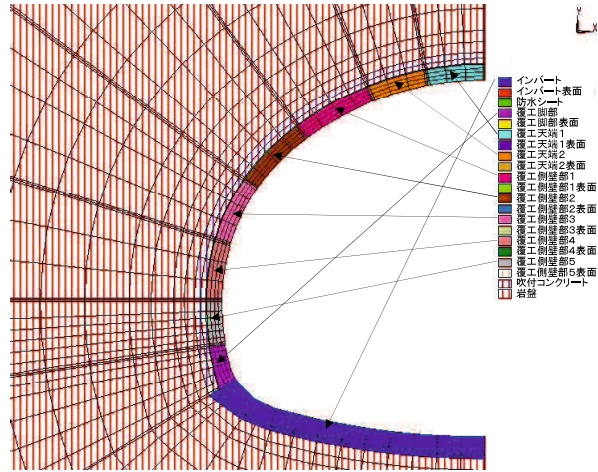


図-3.39 覆工コンクリートの有限要素モデル

表-3.15 打込み開始時間と初期温度

No.	部 位	打込み開始時間	経過時間	初期温度
1	岩盤	—	—	16.0℃
2	防水シート	—	—	16.0℃
3	吹付けコンクリート	—	—	16.0℃
4	インバート	—	—	16.0℃
5	覆工脚部	8:00	0 時間	21.2℃
6	覆工側壁部 5	9:00	1 時間	22.8℃
7	覆工側壁部 4	10:00	2 時間	23.8℃
8	覆工側壁部 3	11:00	3 時間	24.8℃
9	覆工側壁部 2	12:00	4 時間	25.3℃
10	覆工側壁部 1	13:00	5 時間	25.8℃
11	覆工天端 1, 2	14:00	6 時間	26.5℃

表-3.16 計測箇所一覧表

No.	計測	記号	設置方向
1	天端	E1	周方向
2	側壁部	E2	周方向
3	側壁部	E3	縦断方向
4	側壁部	E4	周方向
5	側壁部	E5	縦断方向
6	脚部	E6	縦断方向
7	脚部	E7	周方向
8	脚部	E8	縦断方向

(3) 標準的な材料材料性値による解析結果

コンクリートの材料特性値は表-3.17 に示すように、コンクリート標準示方書など⁴⁵⁾、⁶²⁾に示されている参考値とし、密度は2300kg/m³を用いた。断熱温度上昇特性については、セメントの種類や単位セメント量、打込み温度を参考にコンクリート標準示方書⁴⁵⁾より計算した表-3.18 に示す値を用いた。

表-3.17 材料特性値(コンクリート)

		採用値	コンクリート標準示方書 ⁴⁵⁾	ひびわれ制御指針 ⁶²⁾	
コンクリート	熱伝導率 (W/m ² C)	2.6	2.6~2.8	2.6	
	比 熱 (kJ/kg ² C)	1.05	1.00~1.25	1.05	
	密 度 (kg/m ³)	2,300	—	—	
	熱伝達率 (W/m ² C)	型枠	2.0	14	14
		型枠なし	12.0	14	14

表-3.18 コンクリート標準示方書による断熱温度上昇特性

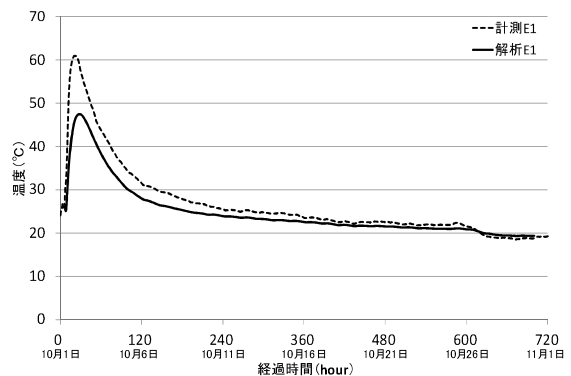
No.	部 位	断熱温度上昇量 Q_{∞}	断熱温度上昇特性 γ
5	覆工脚部	52.535	1.360
6	覆工側壁部 5	50.058	1.395
7	覆工側壁部 4	50.004	1.448
8	覆工側壁部 3	49.950	1.500
9	覆工側壁部 2	49.923	1.527
10	覆工側壁部 1	49.896	1.553
11	覆工天端 1, 2	52.282	1.641

岩盤の材料特性値は文献⁶²⁾を参考に一般的な値を設定している(表-3.19)。防水シートは、不織布とEVAの複合材であることから、材料特性値を特定することが困難であり、既往の文献⁶³⁾やカタログなどを参考にして、岩盤やコンクリートに比較して熱が伝わらないように設定した(表-3.19)。熱伝達率はトンネル内の閉鎖された空間であるため、通常のマスコングリートで設定する値より小さな値を設定している(表-3.19)。この図で見られるように、ピーク温度が発現する時間はほぼ差がなく、経時変化の傾向は一致しているといえる。

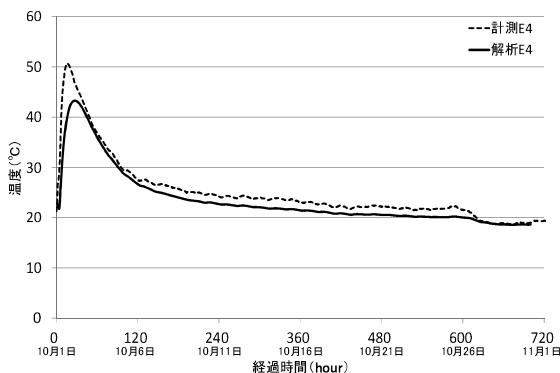
ただし、温度の絶対値、とくにピーク温度は計測値と解析結果ではかなりの温度差があり、最も差が大きい天端部では10℃以上、低い値となっており、必ずしも再現性がよいとはいえない結果となっている。

表-3.19 岩盤および防水シートの材料特性値

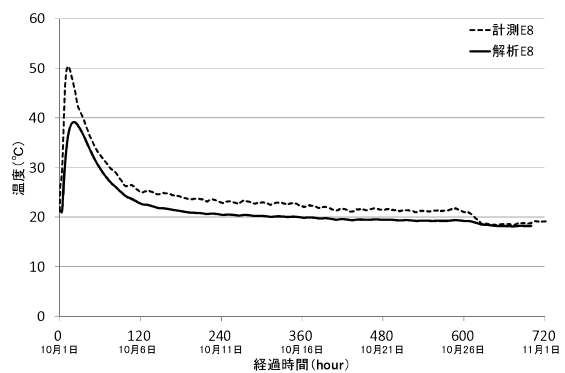
部位	熱伝導率	比熱	密度
	W/m℃	kJ/kg℃	kg/m ³
岩盤	3.45	0.79	2650
防水シート	0.3	2.30	1000



(a) 計測点 E1 (天端)



(b) 計測点 E4 (SL)



(c) 計測点 E8 (脚部)

図-3.40 一般的な材料特性値を用いた解析結果と計測値の比較

解析結果から温度解析は温度推移の傾向は一致しており、覆工コンクリートに適用で

きると考えられるが、解析結果、とくにピーク温度に乖離があり、入力値などに検討が必要である。なお、この乖離は、本解析での発熱モデルはコンクリートの全断面で断熱状態と同様の発熱が行われているものと仮定しているが、覆工コンクリートは部材厚が350mm程度であり、実際は断熱状態ではないことの影響によるものと思われる。

3.4.5 PSO による材料特性値の同定結果

(1) 同定ケース 1

前項で行った標準的なコンクリートの材料特性値を用いた温度解析の結果、現場での計測値の再現性が悪いことが確認された。

このため、PSOによる逆解析によりコンクリート部材の材料特性値を同定し、温度解析の適用性について検討する。

温度解析を行うにあたり、岩盤および防水シートの材料特性値は、前項で設定した数値（表-3.19 参照）を用いるものとし、コンクリートの熱伝達率もトンネル内の閉鎖された空間であるため、前項で設定した数値と同様、通常のマスコンクリートで設定する値より小さな値を設定した（表-3.17 参照）。

同定の対象としたのは、表-3.20 に示すように、コンクリートの熱伝導率、比熱、密度、および断熱温度上昇特性式における終局断熱温度上昇量 (Q_{∞})、温度上昇速度に関する係数 γ であり、比熱および密度は、両者の積である熱容量として同定した。なお、覆工コンクリートは脚部および天端は膨張材を添加しているため、側壁部の通常コンクリートと差別化し同定するものとした。

解空間（材料特性値）は、あらかじめ材料特性値が取り得ると考えられる値の最小値と最大値を設定したうえで、同定を行った。

表-3.20 材料特性値の設定と同定する項目

部 位	熱伝導率	比熱	密度	熱伝達率	外気温Type	Q_{∞}	γ
	W/m°C	kJ/kg°C	kg/m ³	W/m ² °C	—	°C	—
岩 盤	3.45	0.79	2650	—	—	—	—
防水シート	0.3	2.30	1000	—	—	—	—
吹付けコンクリート	同定①	同定②	—	—	—	—	—
インバート				型枠 2.0	1	—	—
覆工脚部				型枠なし	1	同定⑤	同定⑥
覆工側壁部 1~5				6~2	同定③	同定④	
覆工天端 1, 2			12.0	7	同定⑤	同定⑥	
外気温モデル	K_{\max} 同定⑦			α 同定⑧			

一般的に暖かい空気は上に移動することから、トンネル坑内の外気温は高さ方向に異なり上部ほど温度が高い傾向がある。また、閉鎖された空間であることから、施工中に機材から発生する熱およびコンクリートの水和発熱により通常の外気より暖められている可能性がある。そこで、表-3.21 に示すように覆工コンクリートの部位ごとに外気温を設定した。

具体的な外気温の設定方法を図-3.41 および図-3.42 に示す。図-3.41 は高さ方向の分布で時間ごとに变化する $K(t)$ に応じた補正温度 $\Delta T(t,y)$ を計測された外気温に加えている。図-3.42 は、 $K(t)$ の時間的变化を表しており、打込み初期に水和熱などで外気温が暖められることから、図-3.42 のように設定した。本研究では、外気温を補正するための K_{max} および α についても同定した。設定した材料特性値の範囲および一般的な値と対比して、同定された結果を表-3.22 に示す。

表-3.21 外気温 Type

No.	部 位
1	脚部表面、インバート表面
2	側壁部 5 表面
3	側壁部 4 表面
4	側壁部 3 表面
5	側壁部 2 表面
6	側壁部 1 表面
7	天端 1 表面、天端 2 表面

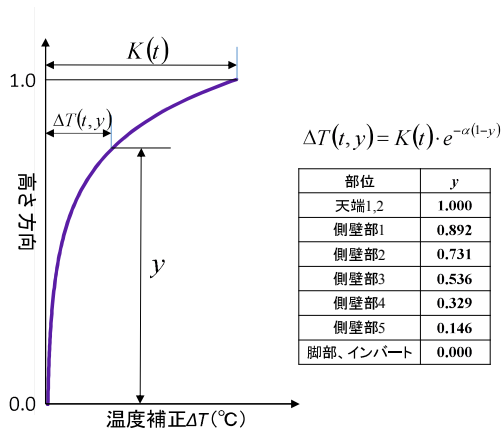


図-3.41 高さ方向の温度補正

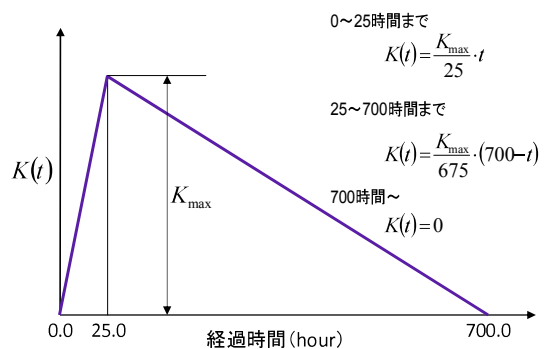


図-3.42 $K(t)$ の設定

表-3.22 同定された材料特性値

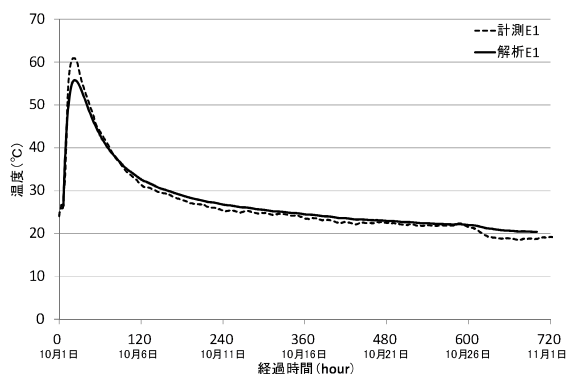
		同定	同定された材料特性値	材料特性値の設定範囲	コンクリート標準示方書 ⁹⁾	ひびわれ制御指針 ¹²⁾
コンクリート	熱伝導率	①	4.843 W/m°C	2.0~5.0	2.6	2.6~2.8
	熱容量	②	4072.14 kJ/m ³ °C	1.00~1.25	1.00~1.25	1.00~1.25
					比熱	—
	密度	—	—	—	—	—
	断熱温度上昇量 Q_{∞}	③	44.06 °C	40.0~60.0	—	—
	断熱温度上昇特性 γ	④	2.684	1.0~5.0	—	—
膨張材部分	断熱温度上昇量 Q_{∞}	⑤	52.23 °C	40.0~70.0	—	—
	断熱温度上昇特性 γ	⑥	2.586	1.0~5.0	—	—
外気温	K_{max}	⑦	3.439 °C	0.0~40.0	—	—
	α	⑧	0.029	0.0~5.0	—	—

同定された材料特性値は、一般的な値より大きなものもあり、とくに熱伝導率や熱容量は一般的な値より 1.5 倍以上の大きな値が同定されている。

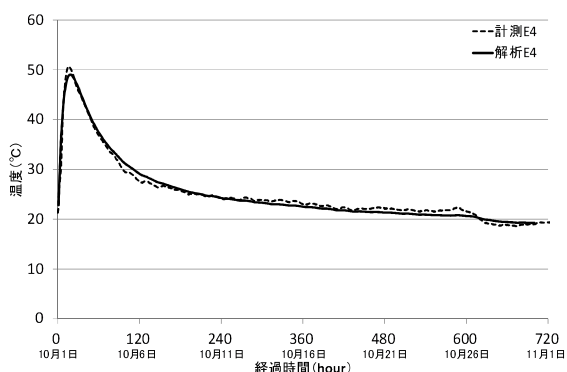
断熱温度上昇量 Q_x は膨張材部分の方が値は大きい。これは、現場での温度の計測値が天端で高いことが反映されていると考えられる。外気温については、 α の値が 0.029 と小さいことから、外気温の高さ方向の分布は思ったより小さい結果になった。トンネル内の外気温計測位置にもよるが、計測された温度より少し高いようである。

同定された値を用いて熱伝導 FEM 解析を行った結果から、計測された温度と解析結果による温度との比較を計測点別に図-3.43 に示す。

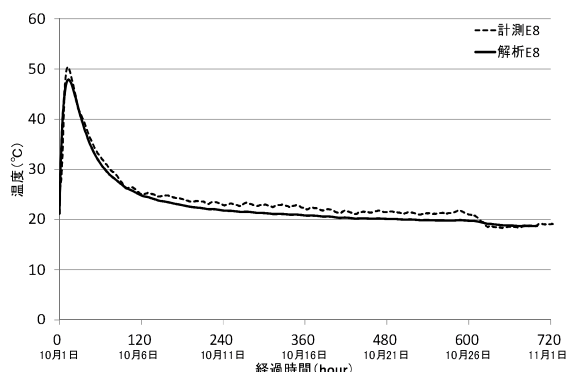
全体的な温度変化については、側壁部や脚部では比較的良く一致しており、同定した材料特性値を用いて、コンクリート内部温度の再現が可能であると考えられる。



(a) 計測点 E1 (天端)



(b) 計測点 E4 (SL)



(c) 計測点 E8 (脚部)

図-3.43 同定値(ケース 1)を用いた解析結果と計測値の比較

ただし、天端部の最高温度では、計測値と解析値に 5°C 程度の開きがあり、やや誤差が大きい。これは、天端部と脚部は同様の膨張材を添加したコンクリートが使用されており、同じ材料特性値と考え、同定したことによるものと考えられる。

すなわち、天端部と脚部とは施工条件が異なり、この影響で材料特性値も差別化した方が、計測値を再現しやすい可能性がある。このため、ケース 2 として、天端部と脚部を区別して同定するものとした。

(2) 同定ケース2

同定ケース1では、膨張材を用いた天端と脚部において、計測値と解析値の温度に若干の差がみられたこと、また、天端と脚部では初期温度が違うことから、覆工の脚部と天端部を区別し、コンクリートの熱伝導率、熱容量、断熱温度上昇量 Q_{∞} 、 γ および外気温モデル K_{max} 、 α を同定した。(表-3.23 参照)

表-3.23 材料特性値の設定と同定

部 位	熱伝導率	比熱	密度	熱伝達率	外気温Type	Q_{∞}	γ
	W/m ² C	kJ/kg ² C	kg/m ³	W/m ² C	—	°C	—
岩 盤	3.45	0.79	2650	—	—	—	—
防水シート	0.3	2.30	1000	—	—	—	—
吹付けコンクリート	同定①	同定②	型枠 2.0 型枠なし 12.0	—	—	—	—
インバート				1	—	—	
覆工脚部				1	同定⑤	同定⑥	
覆工側壁部 1~5				6~2	同定③	同定④	
覆工天端 1, 2				7	同定⑦	同定⑧	
外気温モデル	K_{max} 同定⑨			α 同定⑩			

同定された材料特性値を表-3.24 に示す。

同定ケース2では、同定ケース1と同様に、コンクリートの熱伝導率や熱容量は一般的な値より大きくなっている。天端コンクリートの γ は同定ケース1で同定された数値より大きくなっているが、天端コンクリートは初期温度が高く、水和が促進されているためと思われる。外気温の K_{max} 、 α は同定ケース1とやや差が生じる結果となっているが、 α の値が大きくなっていることから、高さ方向に若干の温度分布が生じている。

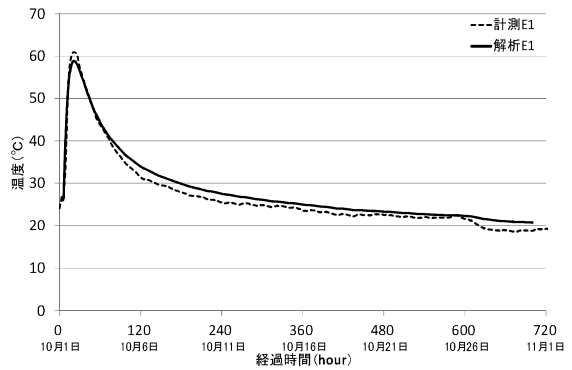
表-3.24 同定された材料特性値

		同定	同定された値	解空間の設定値
コンクリート	熱伝導率	①	4.972 W/m ² C	2.0~5.0
	熱容量	②	4338.28 kJ/m ³ C	2000~4500
	断熱温度上昇量 Q_{∞}	③	43.94 °C	40.0~60.0
	断熱温度上昇特性 γ	④	2.752	1.0~5.0
膨張材部分 (脚部)	断熱温度上昇量 Q_{∞}	⑤	50.63 °C	40.0~70.0
	断熱温度上昇特性 γ	⑥	2.642	1.0~5.0
膨張材部分 (天端)	断熱温度上昇量 Q_{∞}	⑦	51.30 °C	40.0~70.0
	断熱温度上昇特性 γ	⑧	3.224	1.0~5.0
外気温	K_{max}	⑨	2.175 °C	0.0~40.0
	α	⑩	0.190	0.0~5.0

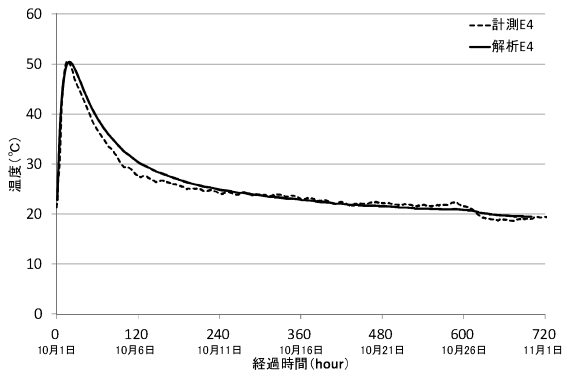
同定された材料特性値を用いて熱伝導 FEM 解析を行い、その結果と計測温度とを比較したコンクリート内部温度の経時変化グラフを図-3.44 に示す。

また、参考のため、それぞれの計測位置における計測値、同定ケース1および同定ケース2の最高温度を比較したものを図-3.45 に示す。

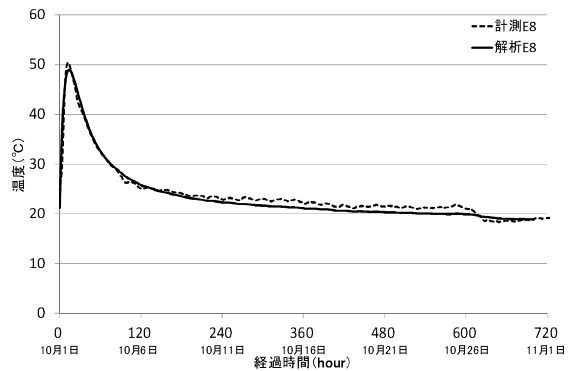
計測位置 E1 の最高温度については、同定ケース 1 では、5°C程度の差が生じているが、同定ケース 2 では、2°C程度の差となっている。いずれの計測位置についても最高温度は、同定ケース 2 のほうが計測温度に近い値となっており、全体的な温度変化についてもおおむね一致している。



(a) 計測点 E1 (天端)



(b) 計測点 E4 (SL)



(c) 計測点 E8 (脚部)

図-3.44 同定値(ケース 2)を用いた解析結果と計測値の比較

(3) 同定結果のまとめ

温度応力解析では、最高温度の予測はとくに重要となる。本研究では、熱伝導 FEM 解析と PSO を組み合わせた効果的な逆解析手法を提案し、覆工コンクリートの材料特性値の同定を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- PSOを用いた逆解析では、市販の汎用コードから得られた結果だけを用いて同定が行えるので、汎用コードを使った逆解析が可能である。
- 本研究で行った計測データを用いた逆解析では、10パラメータの同時同定が可能である。同定された材料特性値は、一般的な値より大きなものもあるが、設定範囲内の値が同定された。
- 同定された値を用いた順解析では、計測温度と比較的良く一致しており、本手法を用いることで、現場での計測値を再現できる。

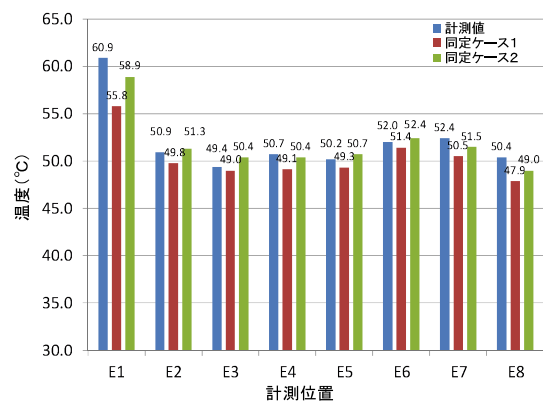


図-3.45 各解析ケースの最高温度の比較

3.4.6 同定値を用いた発生要因別のひび割れ解析

(1) 解析ケースとトンネル断面形状

山岳トンネルの覆工コンクリートに発生する初期ひび割れのおもな要因として、温度応力によるひび割れ、乾燥収縮によるひび割れ、および脱枠時の覆工自重によるひび割れが考えられる。

これらの要因別にひび割れ指数について検討を実施する。

実現場において、覆工コンクリートは連続して打込むが、本解析では4リフトを2時間ずつ掛けて、打込み開始から完了までを8時間とする(stage1~4)。その後、覆工打込み開始から24時間後に型枠を脱枠(stage5)し、180日後にトンネルが貫通する(stage6)。解析期間は覆工打込み開始から1年間までとする(表-3.25参照)。

表-3.25 FEMの解析手順

stage	各ステージ期間 Δt(hour)	各ステージの開始終了時間 t(hour) (括弧内:day)	施工内容
1	2	0 ~ 2 (0~0.08日)	リフト1打込み~完了
2	2	2 ~ 4 (0.08~0.17日)	リフト2打込み~完了
3	2	4 ~ 6 (0.17~0.25日)	リフト3打込み~完了
4	2	6 ~ 8 (0.25~0.33日)	リフト4打込み~完了
5	16	8 ~ 24 (0.33~1日)	打込み完了~脱枠
6	4296	24 ~ 4320 (1~180日)	脱枠後~Tn貫通
7	4460	4320 ~ 8784 (180~366日)	Tn貫通~解析終了

(注) stage6：覆工自重をt=24hrのときに作用させる。同時に覆工表面の乾燥を開始する。

stage7：トンネル貫通後、坑内湿度の変化を考慮して覆工表面の露出係数を変化させる

(2) 覆工コンクリートの解析諸元

覆工コンクリートなどの材料特性値を表-3.26に示す。

表-3.26 材料特性値

部 位	熱伝導率 (W/m°C)	比熱 (kJ/kg°C)	密度 (kg/m ³)	熱伝達率 (W/m ² °C)	Q_{∞} (°C)	γ
岩 盤	3.45	0.79	2650	—	—	—
防水シート	0.30	2.30	1000	—	—	—
吹付けコンクリート	4.97	1.735	2500	—	—	—
インバート	4.97	1.735	2500	2.0	—	—
覆 工	4.97	1.735 (4338)	2500 (0.00)	型枠=2 脱枠後=12	43.941	2.752

※比熱と密度の括弧内数値は、温度応力度と湿気移動解析において覆工自重を考慮しない場合の特性値を示す。

熱伝導率、熱伝達率、外気温度分布および断熱温度上昇特性 (Q_{∞} と γ) は、表-3.24に示す逆解析によって同定した値を用いた。ただし、本解析では、パラメータ解析での一

一般的な傾向を評価するため、覆工コンクリートは膨張材なしの配合とした。また、覆工コンクリートは、表-3.27に示すように実現場においては連続打込みされるが、数値解析では時間軸の離散化のために4リフトに分割してモデル化した。

表-3.27 打込み開始時間と初期温度

No.	部 位	打込み開始時間	経過時間	初期温度
1	岩 盤	—	—	16.0℃
2	防水シート	—	—	16.0℃
3	吹付けコンクリート	—	—	16.0℃
4	インバート	—	—	16.0℃
5	覆工リフト1	8:00	0 時間	21.2℃
6	覆工リフト2	10:00	2 時間	23.8℃
7	覆工リフト3	12:00	4 時間	25.3℃
8	覆工リフト4	14:00	6 時間	26.5℃

(3) 坑内温度と坑内湿度のモデル化

前述した逆解析と同様、外気温度のモデルは、トンネル天端ほど坑内温度が高くなるように指数関数で設定した。指数関数は、最高温度 K_{max} とトンネル高さ方向への温度上昇の程度 α を変数としている。

前述した材料特性の逆解析結果から、 $K_{max} = 2.175$, $\alpha = 0.190$ を固定値として採用する。なお、計測温度は、覆工打込みから1か月間のデータであるため、その後の11か月は当該トンネルの近傍の気象庁年平均気温より設定した(図-3.46 参照)。覆工表面の熱伝達係数は前述の逆解析での設定値を用いた。

坑内湿度および露出係数を表-3.28 に示す。露出係数は熱伝達率に掛けられる値であり、型枠存置中はコンクリート表面からの乾燥は生じないので0.0とした。

脱枠後は乾燥が生じるが、養生が行われており、さらにトンネル貫通前の閉鎖された空間では、乾燥の度合いが通常に比べ小さいため 0.5 と仮定した。トンネル貫通後は、通常どおりの乾燥となるため 1.0 とした。各部材の力学的特性を表-3.29 に示す。

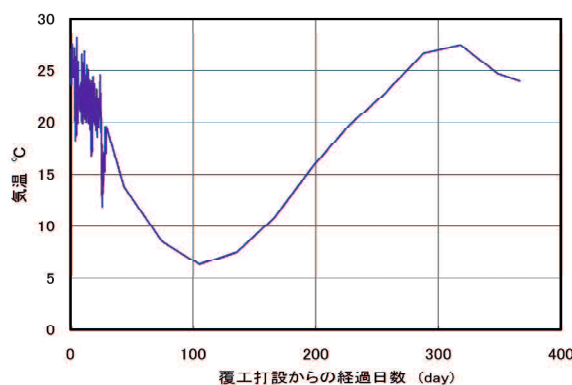


図-3.46 坑内温度の設定 (1年間の全体図)
($K_{max}=2.175$, $\alpha=0.190$ の場合)

表-3.28 トンネル坑内の相対湿度と覆工表面の熱伝達率

stage	各ステージの開始終了時間 t (hour)	施工内容	露出係数	坑内相対湿度 RH (%)	熱伝達率 ($W/m^2\text{C}$)
1	0～ 2 (0～0.08日)	リフト1打込み～完了	0.0	—	2
2	2～ 4 (0.08～0.17日)	リフト2打込み～完了	0.0	—	2
3	4～ 6 (0.17～0.25日)	リフト3打込み～完了	0.0	—	2
4	6～ 8 (0.25～0.33日)	リフト4打込み～完了	0.0	—	2
5	8～ 24 (0.33～ 1日)	打込み完了～脱枠	0.0	—	2
6	24～4320 (1～180日)	脱枠後～Tn貫通	0.5	60	12
7	4320～8784 (180～366日)	Tn貫通～解析終了	1.0	60	12

表-3.29 各材料の力学物性値

断面形状	弾性係数 E (kN/m^2)	ポアソン比 ν	線膨張係数 ϕ (μ/C)	単位体積重量 γ (kN/m^3)
地山物性値	150000	0.35	10	26.0
防水シート	100	0.20	10	10.0
吹付けコンクリート	2.2×10^7	0.20	10	23.0
インバートコンクリート	2.2×10^7	0.20	10	24.5
覆工コンクリート	材齢により 経時変化	0.20	10	24.5

(4) 湿気移動解析の材料特性値

湿気移動解析はコンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れを解析するのに必要である。湿気移動解析の解析手法および材料特性値は、汎用の温度応力解析コード⁶¹⁾に基本的に準拠した。当該プログラムは、岐阜大学の研究グループの研究成果^{54), 64), 65)}を基本的に採用している。なお、乾燥収縮により発生する引張応力の発生速度は極めて緩慢なため、本解析では、クリープによる影響を考慮してクリープ係数を3と仮定した⁶⁶⁾。

(5) 解析結果（ひびわれ発生要因別）

ひびわれ指数および引張応力の評価節点の位置は図-3.47 に示すとおりであり、すべて覆工内側表面の節点を示すものである。

図-3.48 には、「自重のみ」「乾燥収縮のみ」「温度応力のみ」「全要因を考慮」の4つのひび割れ要因別に、解析結果を整理して示す。左欄には、脱枠時および打込み1年後のひび割れ指数のコンター図を示し、右欄には発生要因（別に整理したひび割れ指数の経時変化を示す。

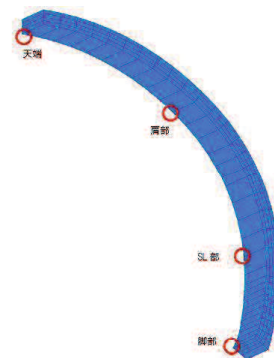


図-3.47 FEM 解析における評価節点位置

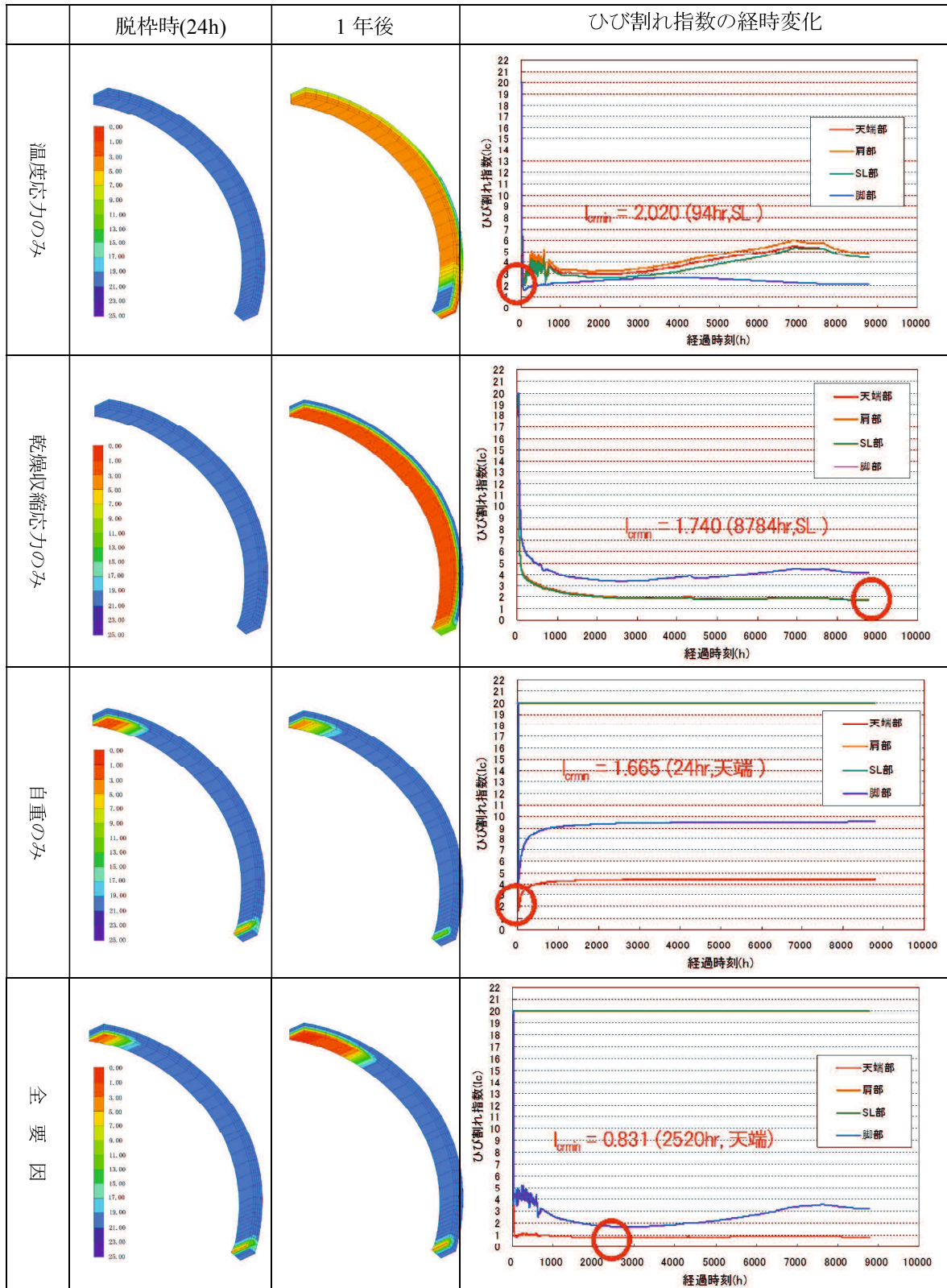


図-3.48 発生要因別のひび割れ指数の経時変化

(6) 試算結果のまとめ

試算結果では覆工天端の表面にトンネル縦断方向へのひび割れ指数が最も低くなり、これは実際のトンネル現場で多く見られるひび割れ形態に合致する。

また、トンネル貫通後に坑内湿度が大きく低下するとひび割れ指数が小さくなる傾向にある。実際の現象においても、トンネル貫通後の最初の冬季にひび割れが発生しやすい状況にあり、解析結果は実現象をおおむね模擬していると評価できる。

図-3.49には、各ひび割れ要因別に天端沈下量の経時変化グラフを示す。なお、本解析はクリープを考慮したものであり、個別の要因の変位量を足し合わせたものと、合計の変位量は一致していない。これらの図でもわかるように、天端沈下量は、脱枠時に自重の影響によりそのほとんどが生じ、その後は温度応力により斬変し、外気温が最も低くなる105日経過後に最大値を示す。この傾向はひび割れ指数と同様の傾向である。

本研究では、ひび割れを誘発する要因を個別に選定し、その要因ごとまたはそれらの複合的要因について、ひび割れ指数に与える影響を解析的に検証した。初期のひび割れ指数は自重の影響を受けており、その後、温度応力や乾燥収縮による影響が強くなる傾向にあり、環境条件や材料特性値を仮定したパラメータスタディにより、外気温や湿度の影響が大きいことが判明した。

今後、計測データに基づく覆工コンクリートの材料特性値の同定や外気温の設定方法などを通じ、より精度の高い入力値の設定方法を検討する必要がある。

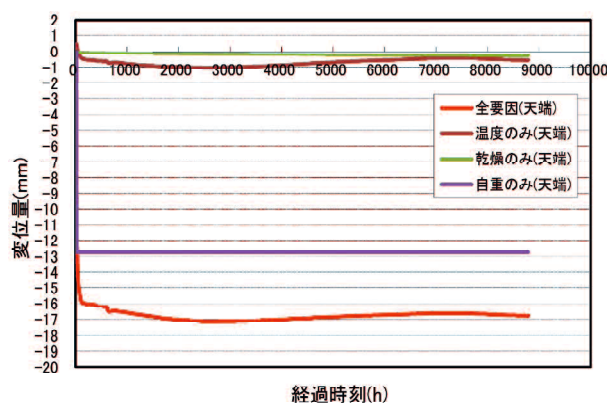


図-3.49 天端沈下量の経時変化

3.5 第3章のまとめ（研究課題の抽出）

本章では、覆工コンクリートのひび割れに着目し、3.1節においてその発生要因とパターンなどを既往の文献やひび割れ発生事例から整理した。3.2節では、覆工コンクリートのひび割れに関する既往研究事例として、発生したひび割れの評価に関する研究、およびひび割れ発生要因や発生予測について整理し、3.3節では、初期ひび割れ予測についてその流れや予測手法について示した。3.4節では、ひび割れ予測解析の基本となる温度解析について、マスコンクリートにおいて用いられる断熱温度上昇式の適用性を検証することを目的として、計測結果を再現できる入力値の同定を行った。

さらには、同定結果を用いて、検討課題の抽出を目的として、温度応力、乾燥収縮応力、自重による応力を複合したひび割れ指数の試算を行った。

以下に、本章の検討を踏まえた覆工コンクリートのひび割れ予測に関する課題を示す。

(1) 覆工コンクリートに発生するひび割れの要因

覆工コンクリートに施工後、1～2年後に発生するひび割れの要因は、前述の表-3.1に示したように、外力、環境、材料、および設計施工に係るものが考えられているが、実態では、このうち、初期に発生するひび割れの事例が多い。そのおもな要因は水和反応時の温度応力や乾燥収縮と考えられ、これにコンクリートの不均一性や、脱枠時の強度不足、背面拘束の不均一性などの施工に起因する要因により、ひび割れ発生の程度に影響を及ぼしていると考えられる。

これら覆工コンクリートに発生する初期ひび割れは、とくに天端にトンネル軸方向に延びるものが多いが、なぜ、天端に多く発生するのか、また、外力によるものか、温度応力や乾燥収縮によるものか、そのメカニズムを含めて明確な判断ができないことも多い。

(2) 覆工コンクリートのひび割れ予測の特徴

覆工コンクリートの初期ひび割れの発生は、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を踏まえたうえで、検討する必要がある。しかしながら、温度解析では、マスコンクリートにおける温度解析や温度応力解析をそのまま適用し、トンネル覆工の施工法や構造の特殊性を考慮したものではない。このため、必ずしも、現場における温度計測などの計測結果と整合するものではなく、覆工コンクリートに発生した初期ひび割れの原因究明や初期ひび割れの予測などにおいて、実現象を十分に説明できないのが現状である。とくに天端と側壁部でのコンクリート温度は、その到達温度に差がある場合が多いが、合理的に説明されていない。

覆工コンクリートの特徴としては、以下のような事項が挙げられる。

- ・ 覆工コンクリートは、トンネル延長方向の長さや、断面方向の内周長さに比べ、部材厚さが薄いという特殊な形状をしており、コンクリート体積に対して、表面積が大きくなるという特徴を有する。

- ・ 覆工コンクリートの施工においては、吹付けコンクリート面と型枠の間の狭い空間にコンクリートを打込むため、締固めなどの作業が容易ではないので、ひび割れや欠陥の要因となる場合がある。
- ・ 山岳トンネルの覆工コンクリートは、打込みから16～20時間程度で脱枠される特異な施工環境にあり、一般構造物に比較して、若材齢時に自重が作用し、初期ひび割れの発生を助長する原因の1つになっているとも考えられる。

トンネル覆工コンクリートにおけるひび割れを予測するためには、水和発熱や乾燥収縮に関する予測解析が重要であり、既往の研究においても、温度応力や乾燥収縮に関する解析が実施されている。

越智ら²⁶⁾の研究では、非定常熱伝導解析と温度応力解析により、単位水量、単位セメント量が多いほど、ひび割れが発生しやすいこと、打込み温度が高くなるほど、引張応力が大きく、ひび割れが発生しやすいこと、覆工天端の隙間範囲（非拘束範囲）が、ひび割れ発生に影響があり、非拘束範囲50°の場合が最もひび割れ発生しやすい傾向にあることを示している。

ジェオフロンテ研究会²⁸⁾の研究では温度応力解析、および乾燥収縮によるひび割れ解析を行い、乾燥収縮あるいは温度応力のみではひび割れは発生しにくく、その合力によりひび割れの発生が十分懸念されるとしている。

高山³⁰⁾は覆工コンクリートでは、コンクリートの硬化過程での水和熱の発生、放熱や乾燥に関しては、断面内で一様ではないと考えられるため、コンクリートの断面内での乾燥収縮に関する不均一性を考慮する湿気移動を考慮した評価法を提案し、適用の妥当性を示している。

細田ら³⁹⁾は、温度解析においてエアギャップ（上半部1/3範囲における防水シート背面の空気層）を設定したモデルなどを提案している。

このように、数値解析により、覆工コンクリートの初期ひび割れに関する傾向は、ある程度把握されているが、計測結果との相違もあり、また、事前予測に用いるのは、入力条件が明確でないのも現実である。一般構造物のコンクリートとは、施工条件が異なる山岳トンネルの覆工コンクリートでは、マスコンクリートと同様に扱えるかを含めて、入力条件などを十分、吟味する必要がある。

(3) 同定結果のまとめ

温度応力解析では、最高温度の予測はとくに重要となる。本研究では、熱伝導FEM解析とPSOを組み合わせた効果的な逆解析手法を提案し、覆工コンクリートの材料特性値の同定を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・ PSOを用いた逆解析では、市販の汎用コードから得られた結果だけを用いて同定が行えるので、汎用コードを使った逆解析が可能である。
- ・ 本研究で行った計測データを用いた逆解析では、10パラメータの同時同定が可能である。同定された材料特性値は、一般的な値より大きなものもあるが、設定範囲内の値

が同定された。

- ・ 同定された値を用いた順解析では、計測温度と比較的良好一致しており、適切な入力値を検討することで、断熱温度上昇式の適用が可能であり、本手法を用いることで、現場での計測値を再現できることが分かった。

(4) 試算結果のまとめ

同定結果を用いた試算結果では覆工天端の表面にトンネル縦断方向へのひび割れ指数が最も低くなり、これは実際のトンネル現場で多く見られるひび割れ形態に合致する。

また、トンネル貫通後に坑内湿度が大きく低下するとひび割れ指数が小さくなる傾向にある。実際の現象においても、トンネル貫通後の最初の冬季にひび割れが発生しやすい状況にあり、解析結果は実現象をおおむね模擬していると評価できる。

本研究では、ひび割れを誘発する要因を個別に選定し、その要因ごとまたはそれらの複合的要因について、ひび割れ指数に与える影響を解析的に検証した。初期のひび割れ指数は自重の影響を受けており、その後、温度応力や乾燥収縮による影響が強くなる傾向にあり、環境条件や材料特性値を仮定したパラメータスタディにより、外気温や湿度の影響が大きいことが判明した。

(5) 覆工コンクリートのひび割れ予測に関する課題

本章における検討で、覆工コンクリートの初期ひび割れ予測において、以下の事項が研究課題として挙げられる。

- ・ 温度解析において、マスコンクリートで用いられる断熱温度上昇式の適用は可能である。しかしながら、覆工コンクリートは断熱状態でないことから、入力値の設定にあたっては、十分な検討が必要である。なお、入力値の設定にあたっては、PSOによる計測値の同定が有効である。
- ・ 覆工コンクリートにおけるひび割れは、温度応力と乾燥収縮、さらには若材齢時での脱枠が複合したものと考えられ、これらを複合して検討することが重要である。なお、乾燥収縮にあたっては、土木学会などで提案されているのは部材全体を一要素として扱うものであり、要素分割した要素ごとに評価できる湿気移動を用いることが妥当であると考えられる。
- ・ 入力値として、環境条件、すなわち、外気温や湿度の影響が大きく、これらの設定が非常に重要である。

【参考文献】

- 1) ジェオフロンテ研究会：最近の覆工技術に関する調査報告書，2013.11
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針－2009－，pp.41-42，2009.3
- 3) ジェオフロンテ研究会：最近の覆工技術に関する調査報告書，p.29，2013.11
- 4) ジェオフロンテ研究会：最近の覆工技術に関する調査報告書，p.33-34，2013.11
- 5) 廣島隆，西村久志，古川めぐみ：大断面（卯辰）トンネルにおけるひび割れ原因の推定，平成24年度北陸地方整備局事業研究発表会，D/Ⅲ，No.10，2012.7
- 6) 田島功章，鈴木幸一：覆工コンクリートの品質向上に関する検討，平成26年度北陸地方整備局事業研究発表会，B/I，No.8，2014.7
- 7) 松本豊：圏央道笠森トンネルにおける覆工コンクリートのひび割れ原因と対策方針について，関東地方整備局，平成26年度スキルアップセミナー関東，一般(安心・安全(2)部門)，No.03，2014.7
- 8) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領，pp.36-43，2015.7
- 9) 庄野昭：アクアカーテンーコンクリートの浸水養生工法，平成24年度中国地方建設技術交流会〈山口県会場〉，2012.10
- 10) 伊藤哲男，馬場弘二，城間博通，吉武勇，中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ形態調査による剥落危険性評価，土木学会論文集 No.763／VI-63，PP.87-93，2004.6
- 11) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武勇，中川浩二：ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価，土木学会論文集 F vol.62，No.4，PP.628-632，2006.10
- 12) 山田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，吉武勇，中川浩二，西村和男：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準，土木学会論文集 F vol.63，No.1，pp.86-96，2007.3
- 13) 山田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，重田佳幸，吉武勇，西村和男：ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築，土木学会論文集 F vol.65，No.1，PP.11-16，2009.1
- 14) 片瀬貴文，谷本親伯，中島順雄：NATMにおける2次覆工の温度応力とひずみ測定(1)，トンネルと地下第15巻3号，pp.43-54，1984.3
- 15) 片瀬貴文，谷本親伯，中島順雄：NATMにおける2次覆工の温度応力とひずみ測定(2)，トンネルと地下第15巻4号，pp.33-38，1984.4
- 16) 満尾淳，片瀬貴文：NATM2次覆工の温度応力解析，トンネルと地下第16巻11号，pp.33-40，1985.11
- 17) 日本トンネル技術協会：硬岩 NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.59-62，1982.3
- 18) 日本トンネル技術協会：NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，p.60，1983.3

- 19) 日本トンネル技術協会：NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.46-54，1983.3
- 20) 日本トンネル技術協会：NATM における二次覆工の設計施工に関する調査研究報告書，pp.11-15，1983.3
- 21) 水谷敏則，猪熊明，大久保雅憲，稲野茂，平岡弘志：土木研究所資料第2836号トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひび割れに関する調査研究報告書，建設省土木研究所，道路部トンネル研究室，pp.1-4，1990.2
- 22) 水谷敏則，猪熊明，大久保雅憲，稲野茂，平岡弘志：土木研究所資料第2836号トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひび割れに関する調査研究報告書，建設省土木研究所，道路部トンネル研究室，pp.5-8，1990.2
- 23) 水谷敏則，猪熊明，大久保雅憲，稲野茂，平岡弘志：土木研究所資料第2836号トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひび割れに関する調査研究報告書，建設省土木研究所，道路部トンネル研究室，pp.9-20，1990.2
- 24) 馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究，山口大学大学院理工学研究科，学位論文，pp.37-39，2004.9
- 25) 馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究，山口大学大学院理工学研究科，学位論文，p.96，2004.9
- 26) 越智修，登坂敏雄，北川博通，奥利之，工藤暢章：NATM トンネル覆工のひび割れ発生に関する施工実態調査，土木学会，トンネル工学報告集第14巻，pp.287-294，2004.11
- 27) ジェオフロンテ研究会，覆工分科会覆工コンクリート WG：二次覆工コンクリートの適切な配合および施工方法について，ジェオフロンテ研究会，pp.15-29，2004.11
- 28) ジェオフロンテ研究会，覆工分科会覆工コンクリート WG：二次覆工コンクリートの適切な配合および施工方法について，ジェオフロンテ研究会，pp.39-41，2004.11
- 29) ジェオフロンテ研究会，覆工分科会覆工コンクリート WG：二次覆工コンクリートの適切な配合および施工方法について，ジェオフロンテ研究会，p.64，2004.11
- 30) 真下英人，砂金伸治，木谷努，遠藤拓雄：トンネル覆工の収縮ひび割れに関する研究，土木学会，トンネル工学論文集15巻，pp.1-11，2005.12
- 31) 高山博文，増田康男，仲山貴司，重田佳幸，Narentorn YINGYOGRATTANAKUL，朝倉俊弘：トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの現地計測・解析と発生抑制法の一考察，土木学会論文集F1（トンネル工学），Vol.67，No.1，pp.46-61，2011.12
- 32) 高山博文：トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究，京都大学，学位論文，p.111，2009.9
- 33) 伊代田岳史，松崎晋一郎，井ノ口公寛，歌川紀之：養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響，日本コンクリート工学協会，コンクリート年次論文集，Vol.32，No.1，pp.425-430，2010.7
- 34) 井ノ口公寛，佐藤健太郎，歌川紀之，伊代田岳史：初期養生方法と養生後の環境変化が乾燥収縮に与える影響，土木学会，第65回土木学会年次学術講演会，V-166，

- pp.131-132, 2010.9
- 35) 井ノ口公寛, 歌川紀之, 伊代田岳史: コンクリートの表層と内部の湿度の相違が乾燥収縮と耐久性に与える影響, 日本コンクリート工学協会, コンクリート年次論文集, Vol.33, No.1, pp.563-568, 2011.7
 - 36) 細田暁: 復興道路での品質確保と人材育成, コンクリート工学, Vol.53.No.1, pp.66-70, 2015.1
 - 37) 山口土木建築部: コンクリート構造物品質確保ガイド, 2014.4
 - 38) 伊藤忠彦, 細田暁, 林和彦, 西尾隆, 八巻大介: 覆工コンクリート品質向上の取り組みと表層品質の評価, 土木学会, トンネル工学報告集, 第24巻, I-4, pp.1-9, 2014.12
 - 39) Chamila, K. R, Hosoda, A. and Iwamura, K. : Modeling and Verification of Early Age thermal Stress in Second Lining Concrete of NATM tunnels, Journal of Advanced Concrete Technorogy, Vol. 15. pp.213-226, 2017.6
 - 40) 岩間慧大, 細田暁, 小宮隆之, 宮田和実: NATM トンネル覆工コンクリートのひび割れシミュレーションの施工・点検記録による検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No.1. pp.1221-1226, 2018.7
 - 41) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2016, p.56, 2016.11
 - 42) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.322, 2018.3
 - 43) 十河茂幸, 河野広隆, 今本啓一, 閑田徹志, 溝淵利明: コンクリートの初期ひび割れ対策, セメントジャーナル社, p.58, 2012.3
 - 44) 中村秀明: コンクリートの収縮ひび割れ対策①ひび割れ(温度応力)解析の基礎, コンクリート工学 Vol.50, No.2, pp.207-212, 2012.2
 - 45) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.332-336, 2018.3
 - 46) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), vol.69, No.4, 421-437, 2013
 - 47) 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測とその設計への適用に関する研究, 学位論文, 1993.3
 - 48) ACI Committee 209 : Prediction of Creep Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute Special Publication sp-76, pp.193-301, 1982
 - 49) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, pp. 57, 58, 1993
 - 50) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会報告書, pp.101-121, 2001
 - 51) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.45-49, 2008.3
 - 52) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.105-108, 2018.3
 - 53) 西岡栄香, 原田有: 多孔質物質の透湿率および湿気拡散について, セメント年報, XV, pp.274-278, 1961
 - 54) 堀部謙, 森川友博, 中村恭香, 森本博昭: コンクリート中の水分移動解析手法について, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.603-608, 2004.

- 55) 中村明彦, 國近光生, 亀谷英樹, 中村秀明: 覆工コンクリートの初期ひび割れ予測における熱特性値の同定とひび割れ解析, 土木学会論文集F1, vol.70, No.3, pp.1_1-1_16, 2015
- 56) James Kennedy, Russell Eberhart and Yuhui Shi : Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, 2001
- 57) James Kennedy and Russell Eberhart : Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
- 58) M. Clerc and J. Kennedy : The Particle Swarm: Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- 59) 矢川元基: 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1983.
- 60) 中村秀明, 王桂萱, 江本久雄, 宮本文穂: Particle Swarm Optimizationによるマスコンクリートの熱伝導逆解析, 土木学会論文集E, Vol.62, No.1, pp.107-118, 2006.
- 61) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートの温度応力解析プログラムJCMAC3 使用説明書, 2010.
- 62) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2016, p.53, 2016.11
- 63) ゴム・エラストマー研究会: ゴム・エラストマー活用ノート, 工業調査会, pp.173, 1990.
- 64) 籠橋忍, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.655-660, 2000.
- 65) 籠橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.685-692, 2001.
- 66) A.Ghali・R.Favre 著 (川上洵・櫻福浄,他訳): コンクリート構造物の応力と変形 [クリープ・乾燥収縮・ひび割れ], 技法堂出版, p.3, 1995

第4章

環境条件の予測手法

第4章 環境条件の予測手法

4.1 概要

コンクリート構造物の耐久性を左右する温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れなどの初期ひび割れは、気温や湿度などの外的要因の影響を大きく受ける。たとえば、温度ひび割れの発生が予想されるコンクリート構造物において、温度応力推定の最初のステップは、コンクリートの温度分布を精度良く求めることであるが、このための温度解析では入力として外気温が必要であり、その把握が非常に重要である。

同様に乾燥収縮ひずみの算出では、湿気移動を考慮した乾燥収縮ひずみ解析により、乾燥収縮ひずみの算出は可能であるが、入力値である相対湿度、または水蒸気圧など、空気中の水分量の把握が非常に重要である。また、湿気移動を相対湿度で考えた場合、相対湿度は温度の関数となることから、コンクリート中の温度を精度よく把握する必要があり、このためには、外気温の設定を精度よく行うことが必須条件である。

一方、トンネル坑内の温湿度環境は、坑外とは異なった傾向を示すことが知られている。覆工コンクリートの温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れを検討するにあたっては、トンネル坑内の環境条件（それぞれ、坑内外気温、坑内相対湿度、坑内水蒸気圧と称する）を把握する必要がある。

本章では、位置情報（緯度、経度、標高）と時間（1月1日からの経過日数）から、任意の位置の任意の月日の外気温や水蒸気圧、相対湿度の30年平年値（平均値）予測するモデルを構築した。

また、坑内外気温、坑内相対湿度は、坑口の環境条件を基本とし、トンネル奥行き方向の補正を加え、坑口からの距離（ z ）の関数として、温湿度を予測するモデルの構築を行うものである。図-4.1に環境条件予測モデルの概要を示す。

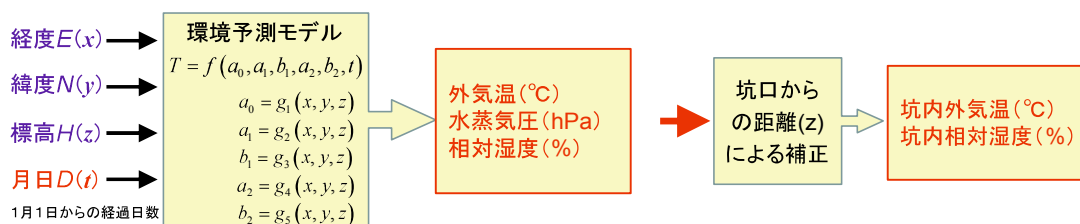


図-4.1 環境条件予測モデル

4.2 外気温の予測

4.2.1 モデル構築に用いた気象データ

(1) アメダス気象データ

本研究で使用した気象データは、アメダス（AMeDAS）で観測された気象データ^{1) 2)}である。アメダスで、観測している気象要素は、降水量、気温、日照時間、風向・風速の4要素である地点が多く、寒冷地においては積雪の深さも観測している。観測で得られたデータは通信回線などで気象庁内の地域気象観測センター（通称アメダスセンター）へ10分ごとに送信され、データの品質チェックを経たのち全国に配信されている。

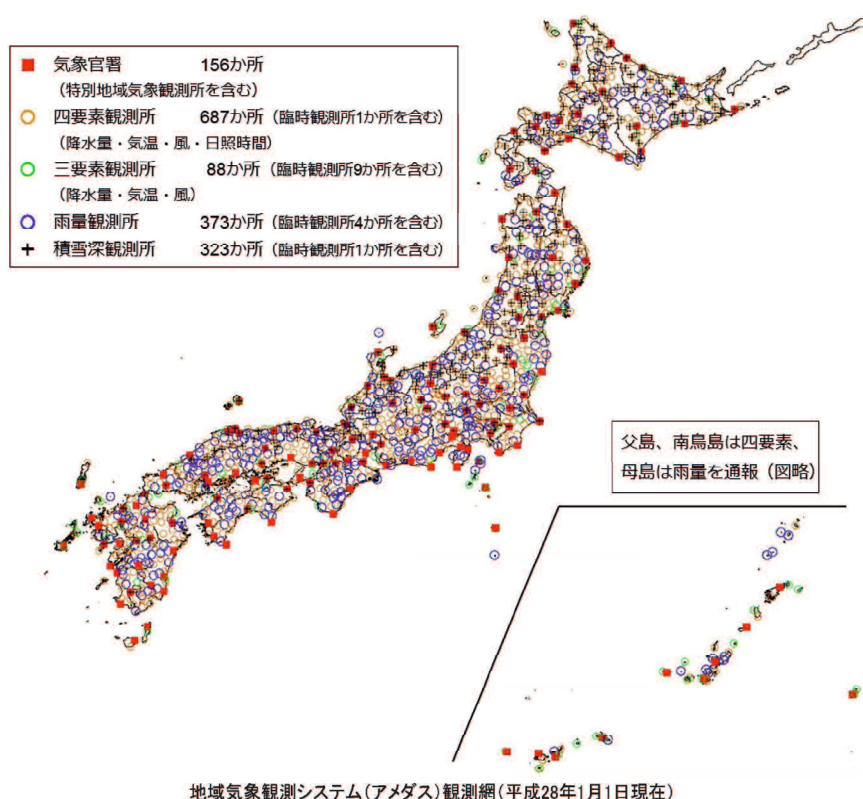


図-4.2 アメダス観測点の分布³⁾

なお、4.2.2 項の直線近似モデルおよびフーリエ級数モデルの構築は、気象業務支援センター：気象データベース・アメダス（フルセット版）2010¹⁾より 1986 年~2010 年までの 25 年分のデータを、4.2.3 項のフーリエ級数モデルの構築（更新）は、気象業務支援センター：気象データベース・アメダス（フルセット版）2015²⁾より 1985 年~2014 年までの 30 年間のデータ用いたものである。

(2) 解析データの作成

外気温モデル作成においては、原則として30年分以上のデータが揃っている観測所を対象としたが、設置期間が30年に満たない観測所についても、25年分以上のデータがあれば、解析対象に含めている。また、観測所のうち、本州をはじめとする主要4島（北海道、本州、四国、九州）から遠く離れた島（直線距離で30km以上）に設置された観測所は解析対象から除外した。表-4.1に示すようにアメダス観測所は全国に1311箇所があるが、本研究で最終的に解析の対象としたのは、717の観測所である。

表-4.1 解析の対象となる観測所

項目	観測所数
アメダス全観測所	1311
上記のうち気温が観測されている観測所	871
上記のうち25年以上のデータがある観測所	761
上記のうち離島（沖縄を含む）を除いた観測所	717

(3) 日平均気温の平均値算出

観測所ごとに、日ごとの日平均気温の平年値（30年間の平均値）を算出する。日平均気温の平均値の算出では、外れ値を除外するため、正規分布を仮定したスミルノフ・グラブス（Smirnov-Grubbs）検定⁴⁾を行った。スミルノフ・グラブス検定では、平均値からの偏差（平均偏差）が一番大きいデータを探し、その平均偏差と不偏標準偏差 σ との比を式(4.1)により求め、その値が有意点より高いものを外れ値として除外する。除去後は、同じ処理を繰り返し、有意点を上回るデータがなくなるまで繰り返す。今回の解析では有意点として5%を採用した。

$$T_i = \frac{|x_i - \mu|}{\sigma} \quad \dots (4.1)$$

ここに、 x_i ：気温データ、 μ ：気温データの平均値、

σ ：気温データの標準偏差

また、統計分析上の取扱いを容易にするため、海面更生温度による統計処理を行った。海面更生温度とは、気温減率 $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ として、標高の影響を除き、海面での温度に更正した気温をいう。30年平均した日平均気温の推移（1月1日から12月31日までの日平均気温が30年間平均されたもの）の一例（東京）を図-4.3に示す。

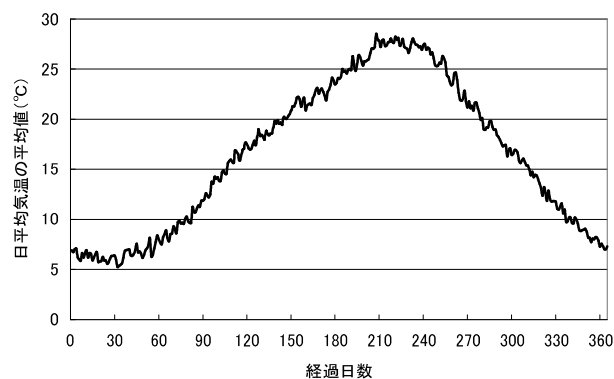


図-4.3 日平均気温の平均値（東京）

4.2.2 外気温モデルの比較検討

(1) 外気温モデルの概要

本研究での外気温モデルは、経度あるいは緯度、標高などの位置情報から任意の地点での任意の日の日平均気温の平均値を算出するものである。

中村ら⁵⁾は過去の研究で緯度と標高からその地点の日平均気温の平均値を算出するモデルを提案している。その際に用いたデータは、1983年から1992年までの10年間の気象観測記録⁶⁾であり、観測地点も全国154箇所とアメダス観測所の数に比べ少ない。

そこで本研究では、717カ所のアメダス観測所の1986年から2010年の25年間分の観測データを用いて、従来の外気温モデルを改良し、精度向上を試みた⁷⁾。ここでは、従来のモデル、直線近似モデル（単回帰、重回帰）およびフーリエ級数モデルの概要を述べるとともに、各モデルの比較を行った。なお、本項の直線近似モデルおよびフーリエ級数モデルの作成は、気象業務支援センター：気象データベース・アメダス（フルセット版）2010¹⁾を用いたものである。

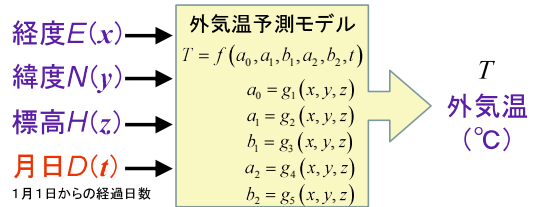


図-4.4 外気温予測モデルの概要

(2) 従来の外気温モデル（従来モデル）

従来構築した外気温モデル⁵⁾は、緯度と標高から次の3つの式によって日平均気温を計算するものである。

$$T_d = a_d(N - 35) + P_d - 0.006H \quad \dots (4.2)$$

$$a_d = \begin{cases} 0.212k - 1.864 & (N \leq 35) \\ 0.076k - 1.355 & (N \geq 35) \end{cases} \quad \dots (4.3)$$

$$P_d = 4.354k - 6.007 \quad \dots (4.4)$$

ここで、 T_d ：日平均気温(°C)

N ：求めたい地点の緯度(°)， H ：標高(m)

a_d ：傾き P_d ：交点の温度

ただし、 k は日平均気温を求めたい月である。 k の範囲は2～8月となり、8月を中心に左右対称と考え、たとえば10月のときは、 $k=6$ 、1月のときは、 $k=3$ 、9月中旬のときは、 $k=6.5$ となる。場所ごとに N 、 H の値を設定し、時期ごとに k を設定することで、 T_d として、その日ごとの日平均気温の平均値が求められる。

(3) 外気温モデル（直線近似モデル）の構築

全国の様々な観測所の日平均気温の平均値を観察した結果、日平均気温の平均値は、**図-4.5**に示すように a と b の座標値 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) が決まれば、次の式で直線近似で

◇ 区間① ($1 \leq x \leq x_1$)

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2 + 365}(x - x_1) + y_1 \quad \dots (4.5)$$

◇ 区間② ($x_1 \leq x \leq x_2$)

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + y_1 \quad \dots (4.6)$$

◇ 区間③ ($x_2 \leq x \leq 365$)

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2 + 365}(x - x_2) + y_2 \quad \dots (4.7)$$

ここに、 x : 経過日数 (日)、 y : 経過日数 x における日平均気温 (°C)

外気温モデルの構築では、海面更正された全国の717観測所について最適化手法である PSO (3.4.2 項参照) を用いて日平均気温の平均値と直線近似の誤差が最小となるように a と b の座標値 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) を同定した。

図-4.6 および**図-4.7** に同定された座標値を観測所の緯度との関係で示す。

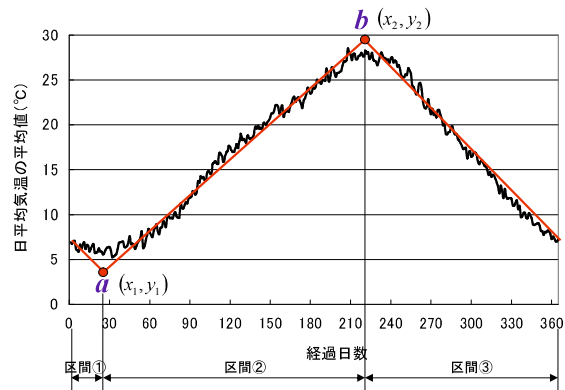


図-4.5 外気温のモデル化（直線近似モデル）

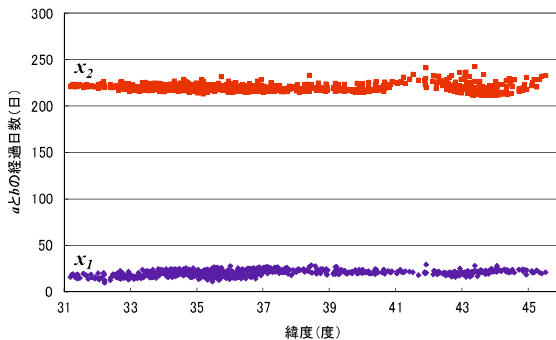


図-4.6 変曲点 a, b の経過日数 x_1, x_2 と緯度の関係

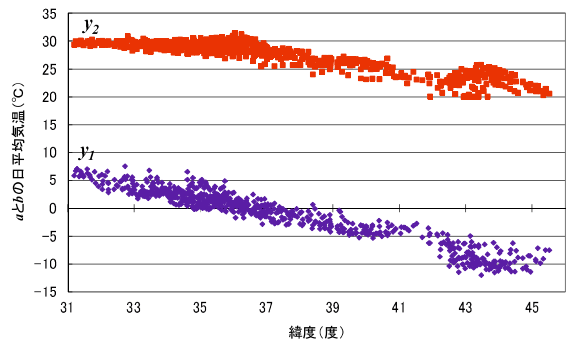


図-4.7 変曲点 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係

図-4.6 に示されるように同定された経過日数, つまり図-4.5 の a と b に対する経過日数は観測所によらず全国ほぼ同じで, x_1 は約 20 日, x_2 は約 220 日となっている。

一方, 同定された日平均気温, つまり図-4.5 の a と b に対する日平均気温は, 緯度が高くなるほど小さくなる傾向があり, その傾きは西日本と東日本で多少異なる。

これは, 日本列島は細長い形状をしており, 図-4.8 に示すように関東 (東経 138.5° , 北緯 36° 付近) を境としてこの形状が折れ曲がっているため, 北緯 36° 付近を境として傾向が異なると判断される。

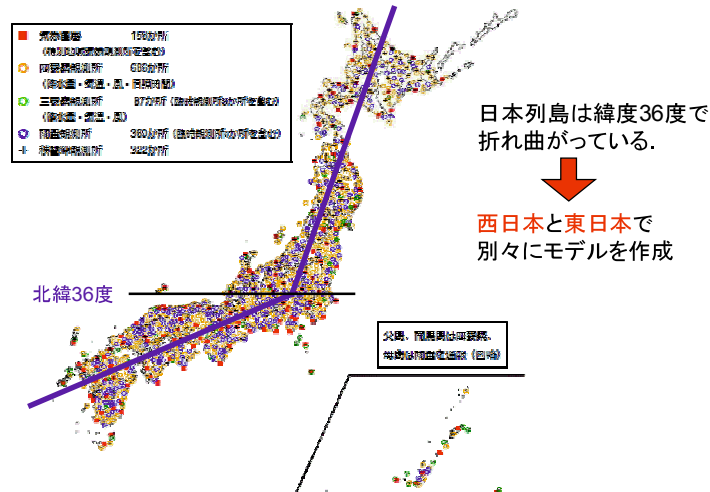


図-4.8 西日本と東日本の区分の説明図

そこで緯度 36° を境に西日本と東日本に分けてモデル式を構築した。西日本の回帰結果 (単回帰) を図-4.9 に, 東日本の回帰結果 (単回帰) を図-4.10 に示す。

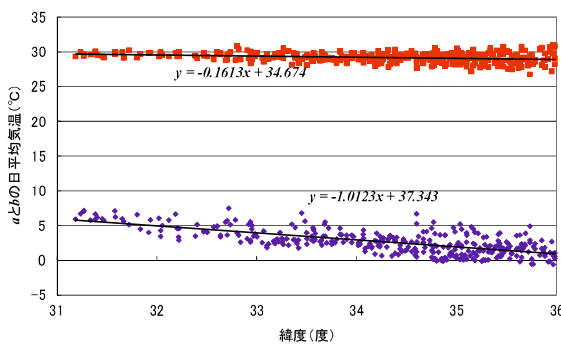


図-4.9 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係 (西日本)

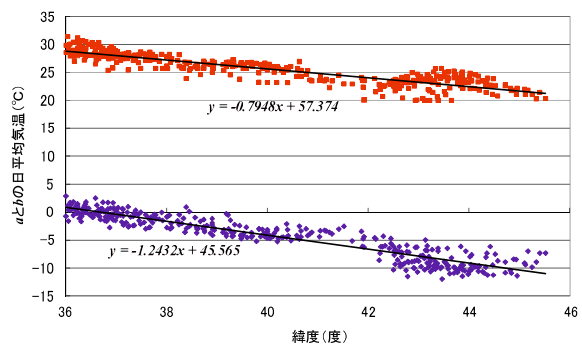


図-4.10 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係 (東日本)

モデルの構築では, 位置情報 (経度 E , 緯度 N , 標高 H) に応じた a と b の座標値 (x_1, y_1), (x_2, y_2) が必要となる。 x_1 と x_2 は, 図-4.5 より位置によらず全国ほぼ同一で $x_1=20$, $x_2=220$ となり, y_1 と y_2 については, 西日本と東日本でその傾向が異なっている。緯度 (N) のみで単回帰した結果と, 経度 (E), 緯度 (N), 標高 (H) で重回帰した結果を以下に示す。

◇ 西日本（緯度 36° 以下）

・ フーリエ係数の単回帰式

$$y_1 = -1.0123N + 37.343 \quad \dots (4.8)$$

$$y_2 = -0.1613N + 34.674 \quad \dots (4.9)$$

・ フーリエ係数の重回帰式

$$y_1 = 0.3665E - 1.6534N - 0.0016H + 10.3040 \quad \dots (4.10)$$

$$y_2 = 0.0049E - 0.2262N + 0.0014H + 36.0336 \quad \dots (4.11)$$

◇ 東日本（緯度 36° 以上）

・ フーリエ係数の単回帰式

$$y_1 = -1.2432N + 45.565 \quad \dots (4.12)$$

$$y_2 = -0.7948N + 57.374 \quad \dots (4.13)$$

・ フーリエ係数の重回帰式

$$y_1 = -0.2389E - 1.1642N - 0.0015H + 76.2851 \quad \dots (4.14)$$

$$y_2 = -0.3791E - 0.5190N + 0.0025H + 99.2381 \quad \dots (4.15)$$

各地点の日平均気温の平均値は、西日本では式 (4.8) ～式 (4.11)、東日本では式 (4.12) ～式 (4.15) に代入することにより求められる。

(4) 外気温モデル（フーリエ級数モデル）の構築

日平均気温の平均値の形状をより良く表す方法としてフーリエ級数を使う方法がある。フーリエ級数では、25 年間の日平均気温の平均値を次のような式で表現する。

本研究で対象とする気温は一つの極大値を持つ比較的単純な波形であることから、フーリエ級数の項数は 2 項までとした。なお、式 (4.16) は、海面更正された温度であり、実際に外気温を予測する場合には、式 (4.17) に示すように標高補正する必要がある。

$$y = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(x + \phi)\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(x + \phi)\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{365}(x + \phi)\right) + b_2 \sin\left(\frac{4\pi}{365}(x + \phi)\right) \quad \dots (4.16)$$

ここに、 x : 経過日数 (日)

y : 経過日数 x における日平均気温 (°C) の平均値 (海面更正)

a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 : フーリエ係数, ϕ : 位相

$$y' = y - 0.0016H \quad \dots (4.17)$$

ここに、 y' : 経過日数 x における日平均気温 (°C) の平均値

本研究では海面更正された全国の717観測所についてPSOを用いて日平均気温の平均値と式(4.16)で求めた近似曲線との誤差が最小となる $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \phi$ の6つのパラメータを同定した。同定の結果、 ϕ は観測所によらずほぼ160であったため、 $\phi=160$ に固定し、 ϕ を除いた5つのパラメータについて再度同定を行った。

各観測所ごとに同定した結果を、西日本、東日本に区分して、それぞれで、経度、緯度、標高で重回帰を行い、以下に示すようにフーリエ係数を設定した。

◇ 西日本（緯度 36° 以下）のフーリエ級数の重回帰式

$$a_0 = 0.3728E - 1.8847N - 0.0002H + 46.3362 \quad \dots (4.18)$$

$$a_1 = -0.1532E + 0.5882N + 0.0013H + 11.0208 \quad \dots (4.19)$$

$$b_1 = 0.0231E + 0.0363N - 0.0009H - 3.2352 \quad \dots (4.20)$$

$$a_2 = -0.0663E + 0.1507N + 3.7189 \quad \dots (4.21)$$

$$b_2 = 0.0279E - 0.0934N + 0.2468 \quad \dots (4.22)$$

◇ 東日本（緯度 36° 以上）のフーリエ級数の重回帰式

$$a_0 = -0.6333E - 1.6765N - 0.0010H + 177.4078 \quad \dots (4.23)$$

$$a_1 = -0.0771E + 0.2695N + 0.0017H + 11.8500 \quad \dots (4.24)$$

$$b_1 = -0.0136E + 0.0311N - 0.0006H + 2.0460 \quad \dots (4.25)$$

$$a_2 = -0.1172E - 0.0179N - 0.0001H + 17.0260 \quad \dots (4.26)$$

$$b_2 = 0.0288E - 0.0037N - 0.0004H - 3.1767 \quad \dots (4.27)$$

(5) 外気温モデルの精度の比較

本研究では、アメダス気象観測データを用いてコンクリートの温度解析の入力項目となる外気温について、全国各地の日平均気温の平年値（25年間の統計量）を比較的簡単に算出する外気温モデルを構築した。

外気温モデルとして、直線近似モデルとフーリエ級数モデルを新たに提案し、モデルパラメータを位置情報（経度と緯度と標高）から算出する式を構築した。構築された外気温モデルは、位置情報（経度と緯度と標高）がわかれば比較的簡単にその場所の日平均気温が計算でき、温度応力解析の精度向上につながるものと思われる。

4つの外気温モデルの精度を比較するため、それぞれのモデルについて1日あたりの平均的な誤差を717観測所について平均したものを表-4.2に示す。表より「フーリエ級数モデル」による予測が最も精度が良くなっている。

表-4.2 外気温モデルの精度の比較

従来モデル	直線近似(単)	直線近似(重)	フーリエ級数
1.540	1.321	1.256	1.030

4.2.3 外気温モデルの構築

(1) 外気温モデル（フーリエ級数モデル）の構築（更新）

最新の気象データベース・アメダス2015²⁾より、1985年から2014年までの30年の平均気温データを用いて、前述の検討において、最も精度よく予測可能な外気温モデル（フーリエ級数）を更新した⁸⁾。

フーリエ級数モデルは、前掲の式(4.16)と式(4.17)を合わせた式(4.28)で表すことができる。

$$T_{ave} = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_2 \sin\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) - 0.0065H \quad \dots (4.28)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

T_{ave} : 経過日数 t における日平均気温の予測値 (°C)

a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 : フーリエ係数=式(5.29)~式(5.38)参照

ϕ : 位相 ($\phi=160$)

H : 標高 (m)

本項では、前述の4.2.2(4)と同様に、海面更正された全国の717観測所について、各観測所ごとにPSOを用いて日平均気温の平均値と式(4.16)で求めた近似曲線との誤差が最小となる $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \phi$ の6つのパラメータを同定した。

表-4.3に西日本の338箇所の各観測所におけるPSOによる同定結果の一部を示す。

表-4.3 観測所ごとに同定したフーリエ級数の例

No.	経度 E	緯度 N	標高 H	同 定 値					標準誤差	観測所
				a_0	a_1	b_1	a_2	b_2		
1	140.6175	35.9522	37	29.87083	10.01469	1.54362	-0.42101	0.91769	0.031763	鹿島
2	140.2020	35.8845	4	28.65089	11.10148	0.88658	-0.32985	0.97041	0.031241	龍ヶ崎
3	139.0678	35.9844	232	29.51797	11.77361	0.50008	-0.12839	0.90340	0.032403	秩父
			⋮							
			⋮							
336	130.6339	31.2358	5	36.53599	9.47133	1.09051	-0.10974	0.92427	0.027220	板宿
337	131.0508	31.2683	8	36.17247	9.13989	0.96711	-0.18676	0.92474	0.027336	内之浦
338	130.8350	31.1858	182	35.12204	9.66155	0.71809	-0.14998	0.90612	0.028250	田代

表中の誤差の欄に示した数値は、外れ値を除いた30年間の日ごとの平均気温とモデルから求めた気温との誤差の二乗和を365日間累計したものを365で割り、さらにその平方根をとったもので、言い換えれば、モデルの1日あたりの平均的な誤差を表すものである。各観測所別に同定したものであるため、誤差は0.03℃程度と非常に小さな値となっている。

次に、西日本と東日本に分けて、観測所別に求めたフーリエ級数 (a_0, a_1, b_1, a_2, b_2) を、経度 E 、緯度 N 、標高 H により重回帰を行い、西日本、東日本におけるフーリエ級数を求める。重回帰を行った結果、得られたフーリエ級数を表-4.4、表-4.5に示す。

表-4.4 重回帰により算定したフーリエ級数（西日本）

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
重相関 R	0.83208	0.74551	0.56610	0.75749	0.60179
緯度 (E)	0.37366	-0.15756	0.02194	-0.06451	0.02832
経度 (N)	-1.86388	0.60942	0.03960	0.15563	-0.10090
標高 (H)	-0.00030	0.00131	-0.00088	-0.00008	-0.00008
切片	45.45162	10.97947	-3.19722	3.26477	0.48372

表-4.5 重回帰により算定したフーリエ級数（東日本）

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
重相関 R	0.98003	0.61398	0.41964	0.71736	0.46283
緯度 (E)	-0.62100	-0.07910	-0.01313	-0.11779	0.02818
経度 (N)	-1.67924	0.26780	0.03485	-0.01608	-0.00209
標高 (H)	0.00096	0.00169	-0.00066	-0.00011	-0.00036
切片	175.75622	12.36039	1.86095	17.02732	-3.12784

ここで得られた重回帰の結果より、式 (4.29) ~ 式 (4.38) によりフーリエ係数が算出できる。このフーリエ係数は経度 (E)、緯度 (N)、標高 (H) から、算出するもので、これを式 (4.28) に入力することにより、任意の場所、任意の経過日数の外気温（日平均気温）を求めることができる。

◇ 西日本のフーリエ級数の重回帰式

$$a_0 = 0.37366E - 1.86388N - 0.00030H + 45.45162 \quad \dots (4.29)$$

$$a_1 = -0.15756E + 0.60942N + 0.00131H + 10.97947 \quad \dots (4.30)$$

$$b_1 = 0.02194E + 0.03960N - 0.00088H - 3.19722 \quad \dots (4.31)$$

$$a_2 = -0.06451E + 0.15563N - 0.00008H + 3.26477 \quad \dots (4.32)$$

$$b_2 = 0.02832E - 0.10090N - 0.00008H + 0.48372 \quad \dots (4.33)$$

◇ 東日本のフーリエ級数の重回帰式

$$a_0 = -0.62100E - 1.67924N + 0.00096H + 175.75622 \quad \dots (4.34)$$

$$a_1 = -0.07910E + 0.26780N + 0.00169H + 12.36039 \quad \dots (4.35)$$

$$b_1 = -0.01313E + 0.03485N - 0.00066H + 1.86095 \quad \dots (4.36)$$

$$a_2 = -0.11779E - 0.01608N - 0.00011H + 17.02732 \quad \dots (4.37)$$

$$b_2 = 0.02818E - 0.00209N - 0.00036H - 3.12784 \quad \dots (4.38)$$

(2) 外気温モデルの検証

本研究で提案した外気温モデルにより各観測所位置で予測した結果と観測値（各観測所における30年平年値）を比較する。

日平均気温の平均値と外気温モデルとの適合性が良かった10観測所を表-4.6、適合性が悪かった10観測所を表-4.7および図-4.11示す。

表-4.6 外気温モデルの30年平年値との標準誤差上位10箇所

順位	観測所	経度 E	緯度 N	標高 H	標準誤差
1	大栃	133.8681	33.6858	210	0.534
2	川根本町	138.1186	35.1000	290	0.549
3	後免	130.6350	33.5845	12	0.562
4	行橋	130.9680	33.7020	7	0.574
5	日向	131.6000	32.4014	20	0.582
6	高鍋	131.5183	32.1178	4	0.584
7	加世田	130.3181	31.4025	9	0.587
8	本渡	130.1689	32.4670	30	0.597
9	佐伯	131.9003	32.9500	2	0.599
10	延岡	131.6511	32.5692	19	0.599

表-4.7 外気温モデルの30年平年値との標準誤差下位10箇所

順位	観測所	経度 E	緯度 N	標高 H	標準誤差
708	江ノ島	141.5856	38.3858	40	2.009
709	宗谷岬	141.9336	45.5172	26	2.020
710	大樹	143.2681	42.5000	87	2.060
711	知方学	144.7336	42.9342	149	2.129
712	大津	143.6356	42.6836	4	2.257
713	草津	138.5844	36.6167	1223	2.374
714	糖内	143.3186	42.7839	70	2.379
715	納沙布	145.7514	43.3850	12	2.699
716	えりも岬	143.2350	41.9181	63	2.861
717	奥日光	139.5000	36.7342	1292	2.877

表中の誤差の欄に示した数値は、前述したように予測結果と30年平年値との誤差の二乗和を365日間累計したものを365で割り、さらにその平方根をとったもので、言い換えれば、モデルの1日あたりの平均的な誤差を表している。

717観測所の中で適合性が良い上位10箇所は、表-4.6にも示すように、緯度35度以下の地点である。

これに対して、適合性が悪い下位10観測所は、北海道の太平洋岸に集中（6観測所）しており、他は708位の江ノ島観測所（宮城県）、および標高が1000m以上の712位の草津観測所、717位の奥日光観測所である。

標高1000mを超える草津観測所、奥日光観測所は特異箇所と相当するものと判断される。北海道はほぼ全域が亜寒帯湿潤気候に属し、積雪寒冷地帯であるが、とくに適合性が悪いのは太平洋岸に集中しており、708位の江ノ島観測所とともに、海流の影響を受けているものと考えられる。

また、順位別の標準誤差を示したグラフ図-4.12を見ると、400位程度まで（56%）は1°C以下の誤差、650位程度まで（90%）は1.5°C以下の誤差に入ることとなり、許容される範囲で外気温が予測できるものと考えられる。

図-4.13 に適合性が一番良かった大栃観測所（高知県）、図-4.14 には最も適合性が悪かった奥日光観測所（栃木県）の適合性をグラフで示す。717箇所中、適合性が最も良かった大栃観測所では、日平均気温の平均値と非常に良く一致しており、最も適合性が悪かった奥日光観測所では、とくに12月から3月にかけての期間は5°C程度の誤差が生じている。

また、図-4.15 に適合性順位350位の三戸観測所（青森県）、図-4.16 には適合性順位650位の新和観測所（北海道）の適合性をグラフで示す。

適合性350位の三戸観測所では最高気温時に2°C程度の誤差があるが、全体的に適合性が良いといえる。また、適合性650番目の新和観測所においても、最高気温時および最低気温時に2°C程度の誤差があるが、全体的に適合性が良いといえる。

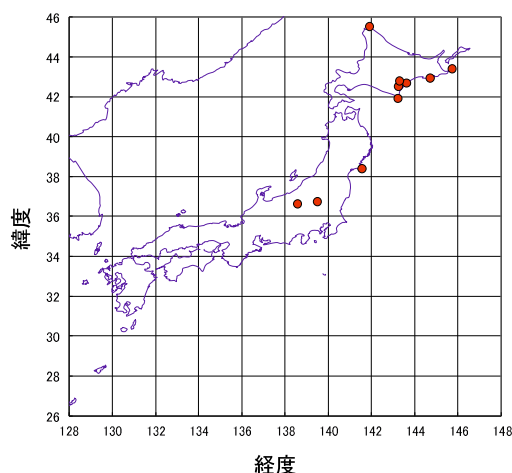


図-4.11 外気温の30年平年値との標準誤差下位10箇所の位置

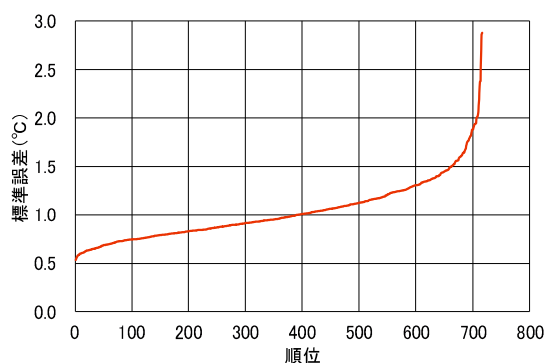


図-4.12 順位別の外気温の標準誤差

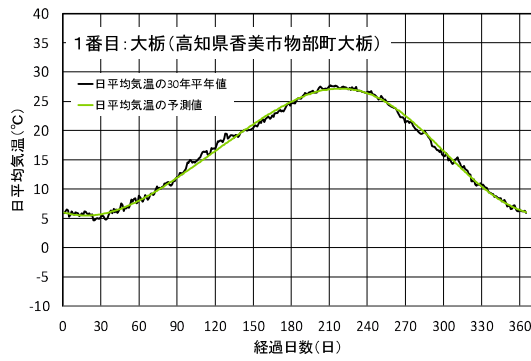


図-4.13 日平均気温の予測結果
(1 番目：大栃)

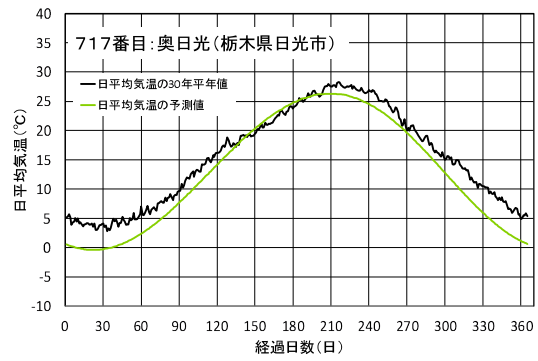


図-4.14 日平均気温の予測結果
(717 番目：奥日光)

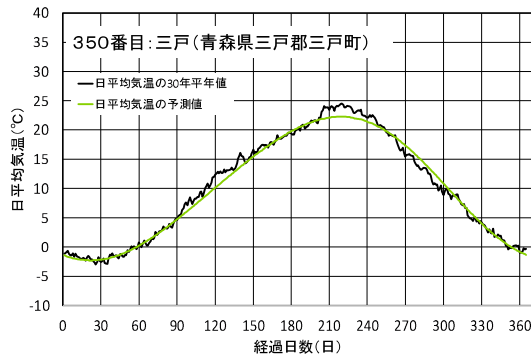


図-4.15 日平均気温の予測結果
(350 番目：三戸)

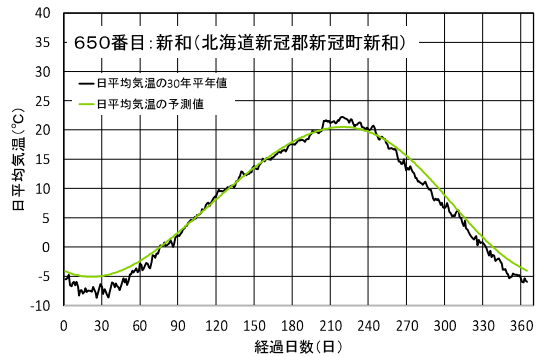


図-4.16 日平均気温の予測結果
(650 番目：新和)

本研究では、アメダス気象観測データを用いてコンクリートの温度解析の入力項目となる外気温について、全国各地の日平均気温の平年値（30年間の統計量）を比較的簡単に算出する外気温モデルを構築した。本研究で構築した外気温予測モデル（フーリエ級数モデル）は、位置情報（経度、緯度、標高）から、任意の位置、任意の経過日数の外気温（日平均気温）を簡易に求めることができるものであり、コンクリートの温度解析の精度向上につながるものと思われる。

ただし、構築された外気温モデルは北海道の太平洋岸での適合性が悪い結果となった。また、標高が高い高地についても、傾向が他と異なるため、適合性が悪くなっており、モデルの適用には注意が必要である。

4.3 水蒸気圧および相対湿度の予測

4.3.1 空気中の水分量の指標と気象データ

(1) 大気中の水分量の指標

大気中の水分量を表現する方法はいくつか存在する⁹⁾。水蒸気圧 (hPa) は大気圧のうち、水蒸気がしめる分圧であり、絶対湿度 (g/m^3) は単位体積中にある水蒸気の質量である。一般的によく用いられる相対湿度 (%) は、ある温度で大気を含むことができる飽和水蒸気圧を100として、その時点での空気中の水蒸気圧との比率を式 (4.39) で表したものである。なお、温度と飽和水蒸気圧との関係は、Tetensの式 (Tetens, 1930 ; Murray, 1967) ¹⁰⁾を摂氏に換算した式 (4.40) で表すことができる。

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad \dots (4.39)$$

$$P_s(T) = 6.1078 \exp \left\{ \frac{17.27(T-0.01)}{T+237.29} \right\} \quad \dots (4.40)$$

ここに、 RH : 相対湿度 (%)

P_s : 温度 T (°C) における飽和水蒸気圧 (hPa)

P_v : その時点での空気の水蒸気圧 (hPa)

\exp は指数関数である。

相対湿度は式 (4.39) からわかるように温度の関数となり、同じ場所、同じ日であっても年ごとの観測値は大きくばらつく。図-4.17、図-4.18に東京および山口における1985年から2014年までの30年間の相対湿度の観測結果を示す。図の横軸は1月1日からの経過日数で、縦軸は相対湿度であり、青い点は30年間の平年値である。相対湿度はばらつきが大きく、観測所によって年変動の傾向が大きく異なる。

図-4.19、図-4.20に東京および山口における1985年から2014年までの30年間の水蒸気圧の観測結果を示す。水蒸気圧は、年によって多少のばらつきはあるものの、相対湿度に比べてはるかに小さなばらつきとなっており、気温と同様に、冬は低く、夏は高くなっている。全国に約150箇所ある地上気象観測所について同様の比較を行ったが、他の観測所においても同様の傾向であった。

水蒸気圧は直接的に大気中の水分量を表しているが、相対湿度は温度の関数である飽和水蒸気圧との関係で間接的に水分量を表しているため、観測所により傾向が異なり、ばらつきが大きいものと思われる。相対湿度は傾向が把握しづらく、相対湿度を直接予測するモデルの構築は困難であるため、本研究では始めに比較的傾向が把握しやすい水蒸気圧について予測モデルを構築し、その後、水蒸気圧から相対湿度を予測するモデルを構築した。

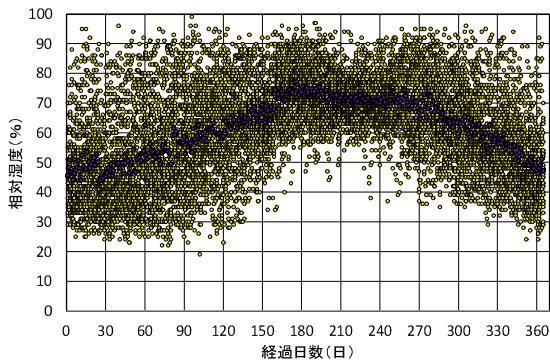


図-4.17 経過日数と相対湿度の関係（東京）

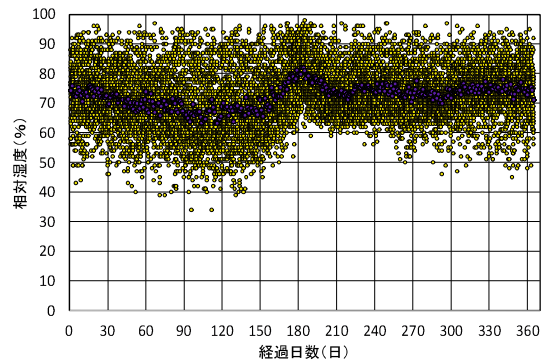


図-4.18 経過日数と相対湿度の関係（山口）

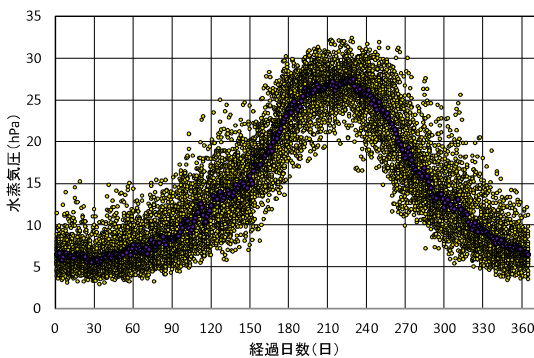


図-4.19 経過日数と水蒸気圧の関係（東京）

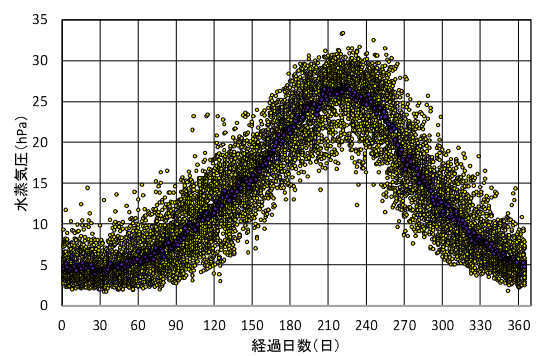


図-4.20 経過日数と水蒸気圧の関係（山口）

(2) 使用した気象データ

a) 地上観測日別データ

水蒸気圧や相対湿度は、地上気象観測所で観測されている地上観測日別データを用いる。地上気象観測所は、気象庁が運用している地上気象観測点の総称で、気象官署（気象台、測候所）および特別地域気象観測所を指す。気象官署は国内に約110箇所、特別地域気象観測所は約50箇所あり、気温や湿度などの気象データが地上気象観測装置によって自動観測されている。気象データベース・地上観測¹¹⁾は、気象庁年報をデータベース化したもので、地上気象観測所で観測された気象データが特別、日別に分けて収録されており、このうち地上観測日別データをおもに使用した。日別データには、日ごとに日平均気温、日最高気温、日最低気温、日平均水蒸気圧、日平均相対湿度、全天日射量、降水量など、26項目が収録されている。

本研究では、1985年から2014年までの30年分の日平均水蒸気圧、日平均相対湿度、日最低気温を抽出し、解析を行った。地上気象観測所のうち、本州をはじめとする主要4島（北海道、本州、四国、九州）から遠く離れた島（直線距離で30km以上）に設置された地上気象観測所および阿蘇山特別地域気象観測所は解析対象から除外した。地上気象観測所は全国に155箇所あるが、本研究で最終的に解析の対象としたのは、表-4.8に示す132箇所の地上気象観測所である。

表-4.8 地上気象観測所で解析の対象となる観測所

項目	観測所数
地上気象観測所	155
上記のうち離島(沖縄を含む)を除いた観測所	133
上記のうち火山(阿蘇山)を除いた観測所	132

モデル構築では、観測所ごとに、日平均水蒸気圧、日平均相対湿度を算出する。観測所によっては、データが欠損している場合もあるが、25年以上のデータがある場合は残りのデータを採用する。また、気象データは年によっては異常気象の影響などで通年の傾向よりかなり異なった傾向となる場合があり、外れ値を除外するため、正規分布を仮定したスミルノフ・グラブス (Smirnov-Grubbs) ⁴⁾ 検定を行った。

b) アメダス気象データ

経度、緯度、標高と時間の情報である1月1日からの経過日数から日最低気温を予測するために用いたデータは、4.2節で用いたアメダス気象データ ²⁾で、1985年から2014年までの30年分のデータを用いた。

4.3.2 水蒸気圧の予測

(1) 水蒸気圧予測モデルの種類

水蒸気圧の予測は、位置の情報である経度(E)、緯度(N)、標高(H)と時間の情報である1月1日からの経過日数(t)を入力することにより任意の地点における任意の日の水蒸気圧 (P_v) の平年値を求めるものである ⁸⁾。モデルの構築では、水蒸気圧を位置と時間の情報から直接求めるモデル (水蒸気圧直接予測モデル) と、位置と時間の情報をもとに日最低気温から間接的に求めるモデル (水蒸気圧間接予測モデル) の2種類のモデルの構築を試みた。2種類のモデルの概要を図-4.21 および図-4.22 に示す。

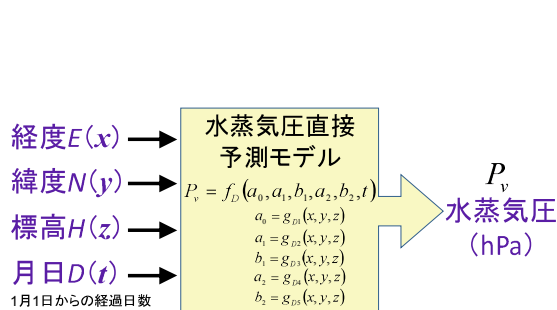


図-4.21 水蒸気圧直接予測モデル ⁸⁾

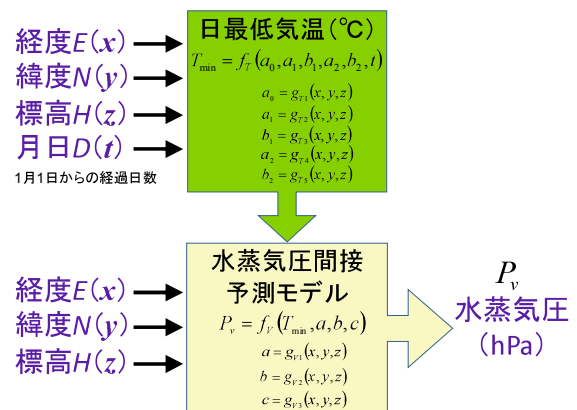


図-4.22 水蒸気圧間接予測モデル ⁸⁾

(2) 水蒸気圧直接予測モデルの構築

a) 水蒸気圧直接予測モデル

水蒸気圧直接予測モデルは、図-4.21に示したように、経度(E)、緯度(N)、標高(H)と1月1日からの経過日数(t)を直接入力することにより、任意の地点における任意の日の水蒸気圧を直接求めるものである。水蒸気圧は図-4.19および図-4.20に示したように1年を通して、冬に低く、夏に高くなる。そこでこの年変動を式(4.41)に示すように外気温モデルと同様にフーリエ級数で表した。

$$P_v = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_2 \sin\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) \dots (4.41)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

P_v : 経過日数 t における水蒸気圧の予測値 (hPa)

a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 : フーリエ係数

ϕ : 位相 (外気温モデルと同様 160 とする.)

本研究では、PSOを用いて、観測所ごとにフーリエ係数 (a_0, a_1, b_1, a_2, b_2) を最適化 (同定) し、さらに最適化されたフーリエ係数を経度、緯度、標高で重回帰した。

b) 水蒸気圧直接予測モデルのパラメータ

水蒸気圧直接予測モデルで同定するパラメータは、式(4.41)に示すように a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 の5つのフーリエ係数である。地上観測所ごとにこれらのフーリエ係数をPSO (粒子群最適化) で同定し、それらを経度、緯度、標高で重回帰した。重回帰の結果を表-4.9に示し、それらを式に表したものを式(4.42)～式(4.46)に示す。

表-4.9 水蒸気圧直接予測モデルの重回帰の結果

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
重相関係数	0.97826	0.95056	0.57786	0.43284	0.51780
緯度 (E)	0.04180	0.07599	0.03269	-0.05534	0.01934
経度 (N)	-1.20591	-0.34483	-0.05420	0.05411	-0.01808
標高 (H)	-0.00720	-0.00168	-0.00037	0.00010	-0.00030
切片	65.32465	11.95255	-0.79405	7.38446	-0.80752

$$a_0 = 0.04180E - 1.20591N - 0.00720H + 65.32465 \dots (4.42)$$

$$a_1 = 0.07599E - 0.34483N - 0.00168H + 11.95255 \dots (4.43)$$

$$b_1 = 0.03269E - 0.05420N - 0.00037H - 0.79405 \dots (4.44)$$

$$a_2 = -0.05534E + 0.05411N + 0.00010H + 7.38446 \dots (4.45)$$

$$b_2 = 0.01934E - 0.018008N - 0.00030H - 0.80752 \dots (4.46)$$

表-4.9に示すように a_2 については、重相関係数が小さいものの、その他のパラメータは、経度、緯度、標高と比較的よい相関を示した。経度、緯度、標高をもとに a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 を計算し、式(4.41)に代入することにより、任意の地点の水蒸気圧が算出できる。

水蒸気圧直接予測モデルで予測した水蒸気圧のうち、観測値である水蒸気圧の30年平年値との標準誤差上位10箇所を表-4.10に、下位10箇所を表-4.11に示す。表中の標準誤差は、予測値と30年平年値との平均平方誤差の平方根で、言い換えれば1日あたりの平均的な誤差を表している。予測値と30年平年値がよくあっている観測所はいずれも関東以東か、標高の高いところが多い。また、下位10箇所の観測所は、図-4.23に示すように京都を除いていずれも太平洋側であり、30年平年値より小さめに予測されている。これは湿った空気が太平洋側から流れ込むため、水蒸気圧が予測値より大きくなっているものと思われる。

図-4.24~4.27に標準誤差の小さい順に1番の諏訪観測所、45番目の山形観測所、90番目の福島観測所、最下位である132番目の銚子観測所の予測値と観測値との比較をそれぞれ示す。図中の赤い線が予測値であり、青い点が30年平年値である。また、黄色い点は30年間の日ごとの実測値である。

図-4.24~4.27からわかるように水蒸気圧は精度よく予測されており、最下位の銚子観測所でもそれほど大きな差は生じていない。

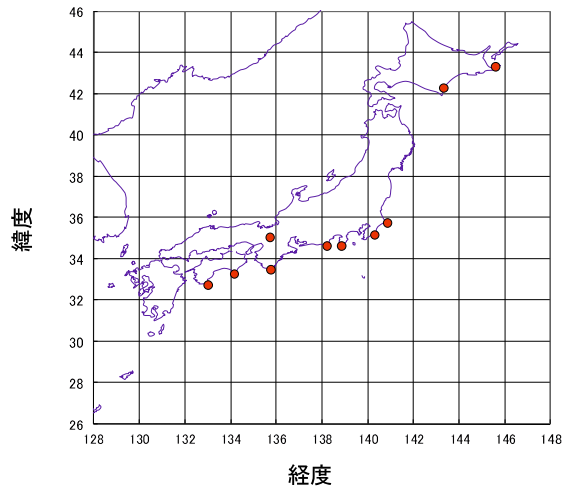


図-4.23 水蒸気圧(直接)の30年平年値との標準誤差下位10箇所の位置

表-4.10 水蒸気圧(直接)の30年平年値との標準誤差上位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(hPa)
1	諏訪	138.1117	36.0433	760.3	0.55527
2	河口湖	138.7633	35.4967	859.8	0.57814
3	軽井沢	138.5483	36.3383	999.1	0.58293
4	高山	137.2567	36.1533	560.1	0.61827
5	飯田	137.8383	35.5083	482.3	0.69842
6	敦賀	136.0650	35.6500	1.6	0.70324
7	秩父	139.0783	35.9900	218.0	0.70798
8	尾鷲	136.1950	34.0650	15.3	0.71416
9	札幌	141.3317	43.0567	17.2	0.71459
10	若松	139.9133	37.4850	212.1	0.71649

表-4.11 水蒸気圧(直接)の30年平年値との標準誤差下位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(hPa)
123	勝浦	140.3150	35.1467	11.9	1.23103
124	京都	135.7350	35.0117	41.4	1.24016
125	潮岬	135.7633	33.4483	73.0	1.32859
126	御前崎	138.2150	34.6017	44.7	1.34871
127	石廊崎	138.8467	34.6000	54.7	1.35609
128	清水	133.0117	32.7183	31.0	1.35737
129	広尾	143.3200	42.2917	32.4	1.40086
130	根室	145.5900	43.3283	25.2	1.45687
131	室戸岬	134.1800	33.2483	185.0	1.53575
132	銚子	140.8600	35.7367	20.1	1.59912

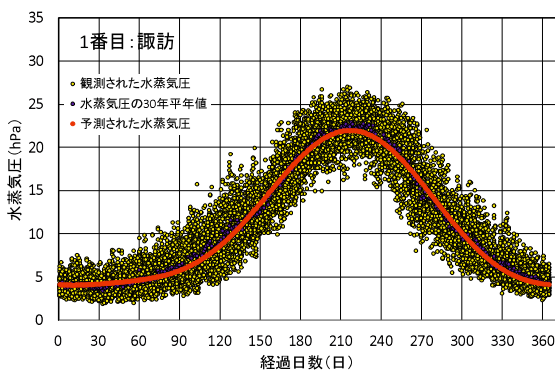


図-4.24 水蒸気圧(直接)の予測結果(1番目:諏訪)

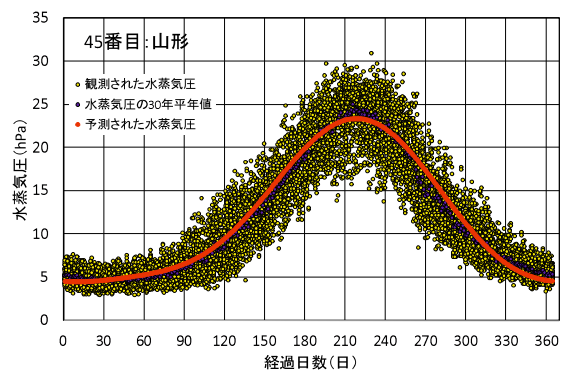


図-4.25 水蒸気圧(直接)の予測結果(45番目:山形)

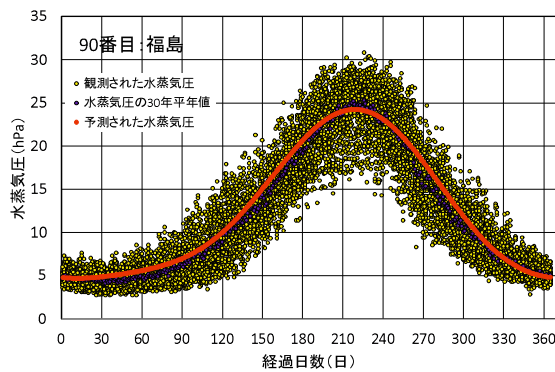


図-4.26 水蒸気圧(直接)の予測結果(90番目:福島)

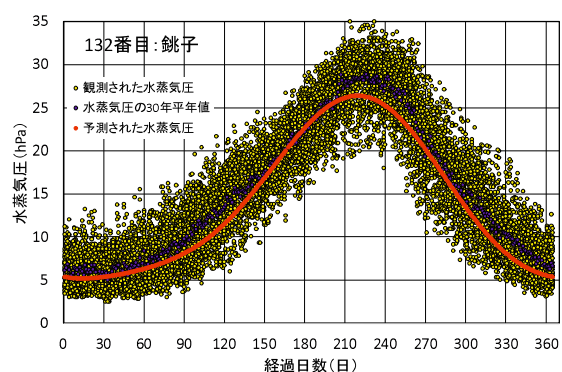


図-4.27 水蒸気圧(直接)の予測結果(132番目:銚子)

(3) 水蒸気圧間接予測モデルの構築

a) 水蒸気圧間接予測モデル

水蒸気圧間接予測モデルは、図-4.22に示したように、はじめに任意の地点における任意の日の日最低気温を求め、その後、日最低気温から水蒸気圧を求めるモデルである。

志賀の研究¹²⁾によれば、北海道などの寒冷地においては、任意の日の水蒸気圧は日最低気温時の飽和水蒸気圧にほぼ等しく、日最低気温を用いて水蒸気圧を高精度に推定することが可能である。これは、たとえ気温の高い昼間に大気中に多くの水分を含んでい

たととしても、朝方の気温が下がる時にはその最低気温に応じた飽和水蒸気圧までしか大気中に水分を含むことができず、飽和水蒸気圧を越えた水分は結露するためである。また、地上気象観測所の水蒸気圧の時間別観測データを分析すると、たとえ雨が降っていても水蒸気圧の日変動は比較的少なく、温度が下がれば飽和水蒸気圧までしか水蒸気を含めないため、水蒸気圧は1日の中で大きく変化しないことが確認されている。

図-4.28, 図-4.29に東京および山口における1985年から2014年までの30年分(365日×30年)の日最低気温と水蒸気圧の関係を示す。図中の青い点は、日最低気温時の飽和水蒸気圧を式(4.40)のTetensの式によって求めたもので、北海道などの寒冷地において、水蒸気圧は日最低気温から求めた飽和水蒸気圧とよい相関を示すが、寒冷地以外では一般に水蒸気圧は、日最低気温から求めた飽和水蒸気圧より小さくなる傾向がある。他の観測所についても確認を行ったが日最低気温と水蒸気圧は相関が高かった。

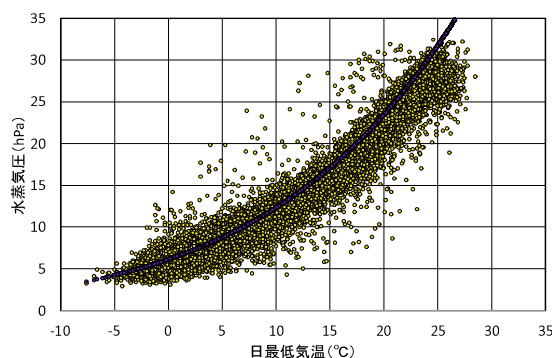
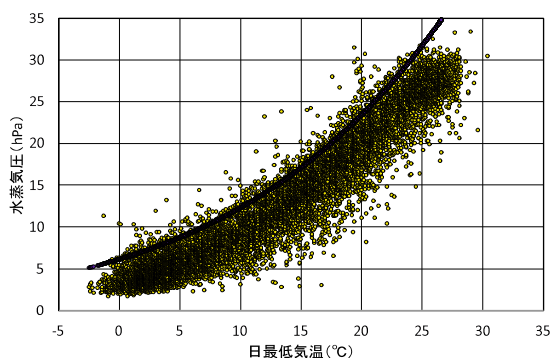


図-4.28 日最低気温と水蒸気圧の関係（東京） 図-4.29 日最低気温と水蒸気圧の関係（山口）

実際の日最低気温と水蒸気圧の関係は、Tetensの式で求めた飽和水蒸気圧よりも小さくなることから、本研究では、観測所ごとに、Tetensの式の係数を最適化し、日最低気温と水蒸気圧の関係式を作成した。具体的には式(4.40)に示すTetensの式を基本とした2パラメータの関係式および2パラメータの関係式を上下方向に平行移動した3パラメータの関係式を仮定し、その係数 a 、 b あるいは a 、 b 、 c を観測所ごとにPSOで求めた。

2パラメータ式

$$P_v(T_{\min}) = a \times \exp\left\{\frac{b(T_{\min} - 0.01)}{T_{\min} + 237.29}\right\} \quad \dots (4.47)$$

3パラメータ式

$$P_v(T_{\min}) = a \times \exp\left\{\frac{b(T_{\min} - 0.01)}{T_{\min} + 237.29}\right\} + c \quad \dots (4.48)$$

ここに、 P_v : 水蒸気圧 (hPa)

T_{\min} : 日最低気温 (°C)

a , b , c : 同定する係数

b) 日最低気温のパラメータ

日最低気温については、日平均気温を求める外気温モデルや、水蒸気圧直接予測モデルと同様の方法でモデルを作成する。具体的には緯度 36 度を境に西日本と東日本に分け、アメダスデータを用いて式 (4.49) のフーリエ係数をアメダス観測所ごとに PSO で同定し、さらに最適化されたフーリエ係数を経度、緯度、標高で重回帰した。

$$T_{\min} = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) + b_2 \sin\left(\frac{4\pi}{365}(t + \phi)\right) \dots (4.49)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

T_{\min} は : 経過日数 t における日最低気温の予測値 (°C)

a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 : フーリエ係数

ϕ : 位相 ($\phi=160$)

重回帰の結果を表-4.12および表-4.13に示す。表-4.12および表-4.13に示す係数を式 (4.49) に代入することにより、任意の地点における任意の日の日最低気温を求めることができる。なお、式 (4.49) で算出される日最低気温は、海面更正された日最低気温なので、実際の標高での日最低気温を求めるには、式 (4.49) で計算された値から標高 H (m) $\times 0.0065$ (°C/m) を減じる必要がある。

表-4.12 日最低気温の重回帰の結果 (西日本)

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
重相関係数	0.68747	0.58210	0.60256	0.81751	0.57286
緯度 (E)	0.45965	-0.05731	-0.00535	-0.16361	0.03417
経度 (N)	-1.94892	0.31154	0.15449	0.35842	-0.10933
標高 (H)	-0.00268	0.00120	-0.00051	0.00028	-0.00001
切片	28.84616	8.13879	-3.15641	10.11690	-0.04797

表-4.13 日最低気温の重回帰の結果 (東日本)

	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2
重相関係数	0.94779	0.61951	0.20651	0.71541	0.41312
緯度 (E)	-1.01465	0.17350	-0.02170	-0.15219	0.08640
経度 (N)	-1.62516	0.17840	0.02115	-0.07217	-0.05939
標高 (H)	-0.00077	0.00170	-0.00020	-0.00041	-0.00023
切片	220.80627	-19.42159	3.87384	24.68562	-9.09534

c) 水蒸気圧間接予測モデルのパラメータ

日最低気温と水蒸気圧の関係を地上気象観測所で観測されている地上観測日別データを用いて、同様にPSOで式 (4.47), (4.48) の係数 a, b あるいは a, b, c を観測所ごとに

同定し、経度、緯度、標高で重回帰した。重回帰の結果を表-4.14および表-4.15に示す。

表-4.14 および表-4.15 に示す係数をそれぞれ式 (4.47), (4.48) に代入することにより、日最低気温から任意の地点における任意の日の水蒸気圧を求めることができる。2パラメータ式は、重相関係数が 0.5 を下回っており、経度、緯度、標高との相関があまり高くないが、3パラメータ式では、ある程度の相関が認められる。

表-4.14 2パラメータ式重回帰の結果

	<i>a</i>	<i>b</i>
重相関係数	0.44680	0.35657
緯度 (<i>E</i>)	-0.06298	0.15649
経度 (<i>N</i>)	0.10019	-0.12324
標高 (<i>H</i>)	0.00102	-0.00109
切片	10.50931	0.63719

表-4.15 3パラメータ式重回帰の結果

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
重相関係数	0.58910	0.66907	0.74360
緯度 (<i>E</i>)	0.01499	0.01527	-0.09416
経度 (<i>N</i>)	-0.21086	0.27929	0.38937
標高 (<i>H</i>)	-0.00022	0.00010	0.00187
切片	13.18808	2.87235	-3.75650

日最低気温を予測した後、3パラメータ式を用いて水蒸気圧を予測した。予測された水蒸気圧について実測値である水蒸気圧の30年平年値との標準誤差上位10箇所を表-4.16に、下位10箇所を表-4.17に示す。上位10箇所の予測値は、水蒸気圧直接予測モデルよりよいものの、下位10箇所の予測精度は、水蒸気圧直接予測モデルより悪い。下位10箇所の観測所は、図-4.30に示すように西日本のいずれも太平洋側であり、水蒸気圧直接予測モデルと同様に30年平年値より小さめに予測されている。これら地域では、湿った空気が太平洋側から流れ込むため、水蒸気圧が予測値より大きくなっているものと思われる。

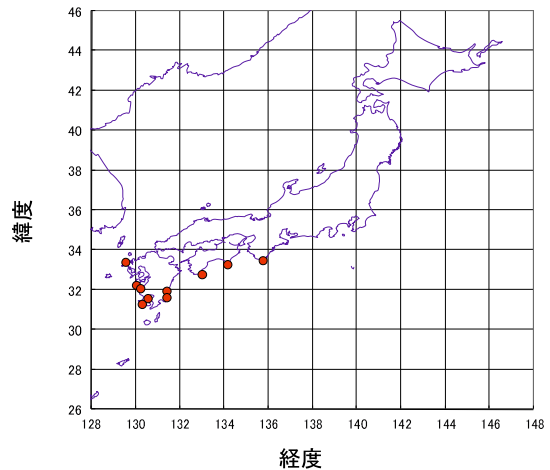


図-4.30 水蒸気圧(間接)の30年平年値との標準誤差下位10箇所の位置

表-4.16 水蒸気圧(間接)の30年平年値との標準誤差上位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(hPa)
1	長野	138.1950	36.6600	418.2	0.52459
2	甲府	138.5567	35.6633	272.8	0.56161
3	富山	137.2050	36.7067	8.6	0.57261
4	高山	137.2567	36.1533	560.1	0.58021
5	松本	137.9733	36.2433	610.0	0.59273
6	伏木	137.0567	36.7883	11.6	0.59570
7	前橋	139.0633	36.4017	112.1	0.59977
8	名古屋	136.9683	35.1650	51.1	0.62030
9	横浜	139.6550	35.4367	39.1	0.63510
10	秩父	139.0783	35.9900	218.0	0.63656

表-4.17 水蒸気圧(間接)の30年平年値との標準誤差下位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(hPa)
123	鹿児島	130.5517	31.5517	3.9	1.63468
124	宮崎	131.4233	31.9200	6.3	1.64964
125	油津	131.4100	31.5750	2.9	1.81921
126	牛深	130.0283	32.1950	3.0	1.87344
127	潮岬	135.7633	33.4483	73.0	1.88312
128	枕崎	130.2950	31.2683	29.5	1.99780
129	阿久根	130.2033	32.0250	40.1	2.00881
130	平戸	129.5533	33.3567	57.8	2.10094
131	清水	133.0117	32.7183	31.0	2.16673
132	室戸岬	134.1800	33.2483	185.0	2.47090

(3) 水蒸気圧予測モデルのまとめ

それぞれの予測モデルに対し、132の観測所についての標準誤差の平均値、標準偏差、最小値、最大値をまとめたものを表-4.18に示す。

表-4.18 水蒸気圧のモデルごとの予測結果

モデル 項目	直接予測 モデル	間接予測モデル	
		2パラメータ	3パラメータ
標準誤差の平均値	0.89562	1.07517	1.05554
標準誤差の標準偏差	0.18786	0.36733	0.36788
標準誤差の最小値	0.55527	0.48899	0.52459
標準誤差の最大値	1.59912	2.42655	2.47090

水蒸気圧直接予測モデルは、標準誤差の平均値が最も小さく、標準誤差のばらつきも小さい。図-4.31に水蒸気圧間接予測モデルで最下位の室戸岬観測所のそれぞれのモデルでの予測結果を示す。

予測結果はどのモデルも夏場に予測値が30年平年値を下回るが、水蒸気圧直接予測モデルでは誤差は小さく、どの観測地点でも比較的安定した予測が行える。

水蒸気圧予測モデルの構築により、これまででは点(全国で約150箇所の観測所)でしか参照できなかった水蒸気圧が面(全国各地の任意の地点)で参照できるようになった。

コンクリートの初期ひび割れ予測では、水蒸気圧の日変動の影響も考えられるが、地上気象観測所の水蒸気圧の時間別観測データを分析すると、たとえ雨が降っていたとしても水蒸気圧の日変動は比較的少なく、気温が下がれば飽和水蒸気圧までしか水蒸気を含めないため、水蒸気圧は1日の中で大きく変化しないことが確認されている。

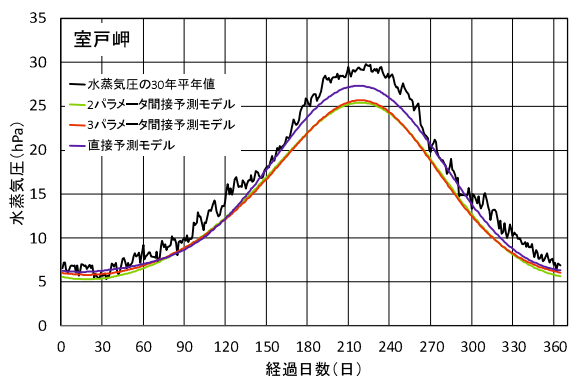


図-4.31 モデルごとの予測結果の比較

4.3.3 相対湿度の予測

(1) 水蒸気圧からの相対湿度の予測方法

水蒸気圧は、ある程度精度よく予測できるようになったが、一般的にはコンクリートの乾燥収縮の予測や鋼材の腐食予測など様々なところで、相対湿度が用いられることから、水蒸気圧の予測結果から相対湿度の予測モデルを提案する⁸⁾。

相対湿度は、式(4.39)に示したように、水蒸気圧を飽和水蒸気圧で除したものであり、温度と飽和水蒸気圧との関係は式(4.40)に示した Tetens の式で表すことができる。

したがって、4.2.3 項で予測した日平均気温から Tetens の式により飽和水蒸気圧を求め、4.3.2 項で予測した水蒸気圧との関係から相対湿度の算出を行うことができる。

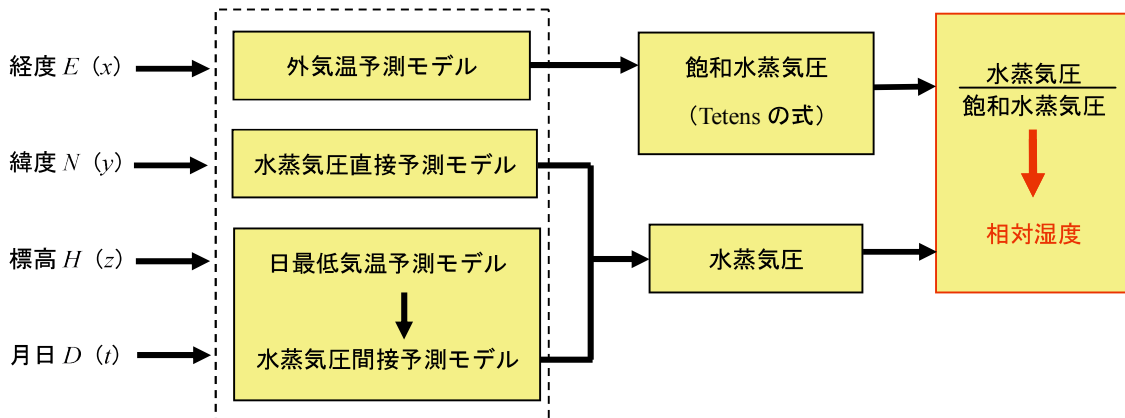


図-4.32 相対湿度の予測モデルの流れ

(2) 相対湿度の予測結果

それぞれの水蒸気圧予測モデルに対し、132 の観測所について相対湿度を求めた標準誤差の平均値、標準偏差、最小値、最大値を表-4.19 に示す。順位別の標準誤差とは、モデルごとに標準誤差を小さい順に並べたもので、標準誤差の推移を表している。

表-4.19 相対湿度のモデルごとの予測結果

モデル 項目	直接予測 モデル	間接予測モデル	
		2パラメータ	3パラメータ
標準誤差の平均値	6.45783	5.30184	5.41190
標準誤差の標準偏差	2.33598	2.03395	2.39055
標準誤差の最小値	2.58938	2.27202	2.51315
標準誤差の最大値	13.50504	13.26157	16.58856

水蒸気圧の予測では、水蒸気圧直接予測モデルの精度が一番高かったが、相対湿度の予測では、水蒸気圧間接予測モデル(2パラメータ)を用いたものが最も精度が高い結果となった。

これは、相対湿度予測モデル（水蒸気圧間接予測モデル利用）は、日最低気温から水蒸気圧を求め、日平均気温から飽和水蒸気圧を求めており、分母分子の両方が気温の関数となっているため、誤差が打ち消しあい、結果的に相対湿度予測モデル（水蒸気圧直接予測モデル利用）より、精度が高くなっていると考えられる。

順位別の標準誤差を図-4.33に示す。

図-4.33からわかるように、相対湿度は、132の観測所中120番目程度までは、標準誤差が10%以下であり、相対湿度のばらつきが上下20%程度あることを考えると比較的精度よく予測できている。

各モデルの標準誤差に対して平均を求め、その上位10箇所を表-4.20に、下位10箇所を表-4.21に、下位10箇所の観測所位置を図-4.34に示す。

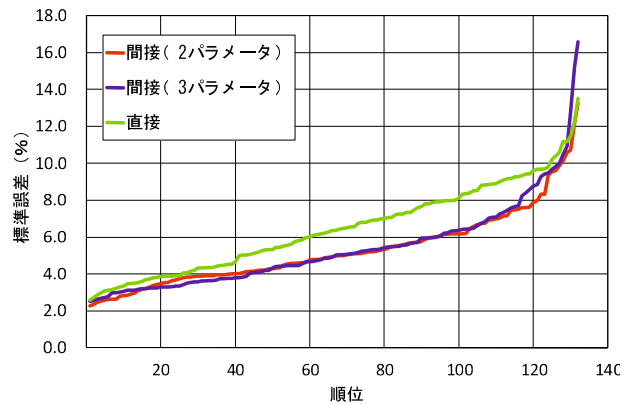


図-4.33 順位別の相対湿度の標準誤差

表-4.20 相対湿度の30年平年値との標準誤差上位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(%)		
					直接	間接2	間接3
1	伊良湖	137.0967	34.6250	6.2	3.120	3.095	2.792
2	三島	138.9300	35.1117	20.5	3.078	2.531	3.425
3	網代	139.0950	35.0433	66.9	3.346	3.655	2.642
4	四日市	136.5883	34.9267	47.2	2.993	3.471	3.626
5	姫路	134.6750	34.8367	38.2	3.731	2.797	3.665
6	福山	133.2500	34.4433	1.9	4.519	2.612	3.063
7	宇和島	132.5550	33.2233	2.4	2.719	3.681	3.855
8	津	136.5217	34.7300	2.6	4.325	3.296	2.729
9	鹿児島	130.5517	31.5517	3.9	5.022	2.623	3.244
10	敦賀	136.0650	35.6500	1.6	3.461	2.913	4.686

表-4.21 相対湿度の30年平年値との標準誤差下位10箇所

順位	観測所名	経度(度)	緯度(度)	標高(m)	標準誤差(%)		
					直接	間接2	間接3
123	稚内	141.6833	45.4133	2.8	11.485	5.881	8.861
124	平戸	129.5533	33.3567	57.8	9.672	9.592	8.412
125	東京	139.7633	35.6833	6.5	9.168	10.101	8.753
126	新庄	140.3150	38.7533	105.1	5.509	9.863	12.793
127	浦河	142.7800	42.1583	32.5	10.597	9.350	9.682
128	釧路	144.3917	42.9750	31.7	9.412	9.574	10.945
129	松本	137.9733	36.2433	610.0	11.159	10.580	9.464
130	前橋	139.0633	36.4017	112.1	13.505	10.721	8.575
131	根室	145.5900	43.3283	25.2	9.078	13.262	15.187
132	日光	139.5033	36.7350	1291.9	12.205	12.133	16.589

例外もあるが一般的な傾向としては、標高の高いところや北海道は予測精度が悪い。これは気温の予測精度が悪い地点であり、標高の高いところは高山気候であり、北海道は亜寒帯湿潤気候であるため、他の場所と傾向が異なるため、予測精度が悪いものと思われる。

図-4.35～図-4.38に標準誤差の小さい順に1番目の伊良湖観測所, 45番目の多度津観測所, 120番目の甲府観測所, 最下位である132番目の日光観測所の予測値と観測値との比較をそれぞれ示す。

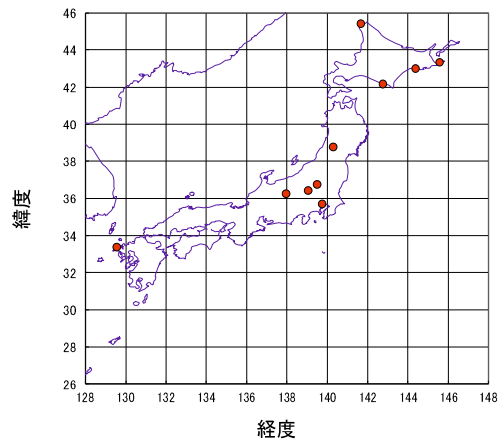


図-4.34 相対湿度の30年平年値との標準誤差下位10箇所の位置

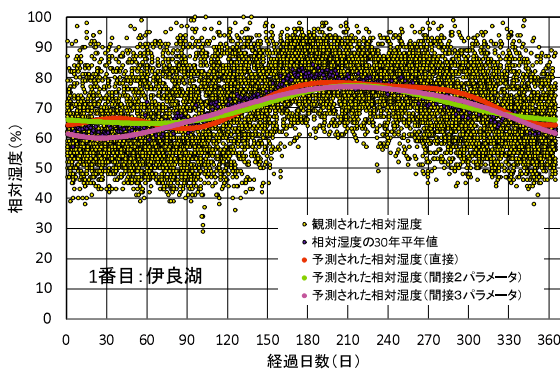


図-4.35 相対湿度の予測結果 (1番目: 伊良湖)

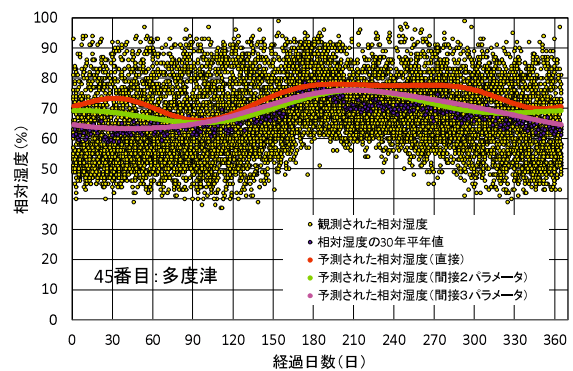


図-4.36 相対湿度の予測結果 (45番目: 多度津)

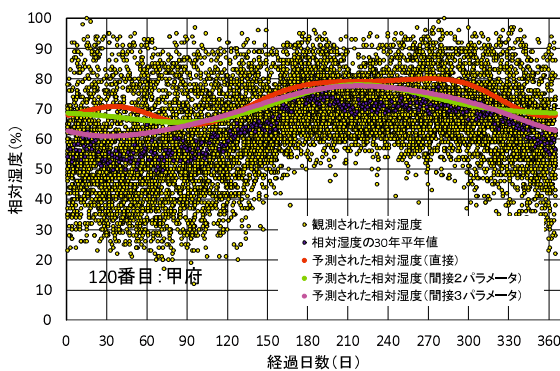


図-4.37 相対湿度の予測結果 (120番目: 甲府)

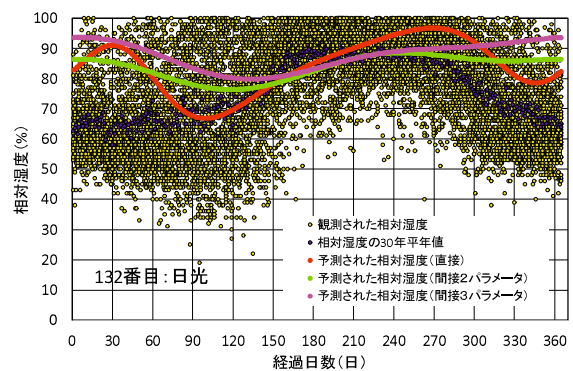


図-4.38 相対湿度の予測結果 (132番目: 日光)

図中の赤い線が水蒸気圧直接予測モデルの予測値であり、薄緑線が2パラメータの水蒸気圧間接予測モデルの予測値、赤紫線が3パラメータの水蒸気圧間接予測モデルの予測値、青い点が30年平年値である。また、黄色い点は30年間の日ごとの観測値である。

相対湿度予測モデルの構築により、これまでは点(全国で約150箇所の観測所)でしか

参照できなかった相対湿度が面（全国各地の任意の地点）で参照できるようになった。

実際の初期ひび割れ予測や構造物の耐久性評価では、相対湿度の日変動の影響も考えられる。相対湿度は、式(4.39)に示すように（水蒸気圧／飽和水蒸気圧）×100で計算され、水蒸気圧は時間によってあまり変わらないものの、飽和水蒸気圧が温度の関数となるため、日中は相対湿度が小さくなる。そのため、外気温の日変動がわかれば、相対湿度の日変動もある程度予測することが可能である。

4.3.4 水蒸気圧および相対湿度の予測モデルのまとめ

乾燥収縮解析には相対湿度が用いられているが、従来、相対湿度の直接的な予測は困難であった。そこで、本研究では空気中の水分量の絶対値を表す水蒸気圧に着目し、水蒸気圧の予測を試みた。水蒸気圧の予測に関しては外気温と同様の手法で水蒸気圧を直接予測する「水蒸気圧直接予測モデル」および、日最低気温と水蒸気圧の関係に着目し、日最低気温から水蒸気圧を間接的に予測する「水蒸気圧間接予測モデル」を構築した。さらに、水蒸気圧が比較的精度よく求められたことから、ここで求めた水蒸気圧と日平均気温から求めた飽和水蒸気圧の関係から、相対湿度を求める予測モデルを構築した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ◇ 水蒸気圧の年変動はフーリエ級数で近似可能であり、位置情報（経度、緯度、標高）と経過日数から水蒸気圧直接予測モデルを構築した。
- ◇ 水蒸気圧は日最低気温と非常によい相関があり、Tetens式を基本とする指数関数で回帰することが可能である。位置情報と経過日数から日最低気温を予測する式を構築し、これを用いて水蒸気圧間接予測モデルを構築した。
- ◇ 水蒸気圧の30年平年値と予測値を比較した結果、水蒸気圧直接予測モデルおよび水蒸気圧間接予測モデルとも位置情報と経過日数から、任意の地点における任意の日の水蒸気圧を精度よく予測することが可能となった。予測精度は水蒸気圧直接予測モデルが最もよい結果となっている。
- ◇ 水蒸気圧予測モデルでは太平洋に面した地点ではやや予測精度が低かった。これは湿った空気が太平洋側から流れ込むため、実際の水蒸気圧が予測値より大きくなっているものと考えられる。
- ◇ 相対湿度予測モデルでは、132の観測所中120番目程度までは標準誤差が10%以下であり、相対湿度のばらつきが上下20%程度あることを考えると比較的精度よく予測できている。
- ◇ 相対湿度の予測では相対湿度予測モデル（水蒸気圧直接予測モデル利用）に比べ、相対湿度予測モデル（水蒸気圧間接予測モデル利用）の精度が高かった。これは、相対湿度予測モデル（水蒸気圧間接予測モデル利用）は、相対湿度計算式の分母分子が気温の関数となっているため、誤差が打ち消しあい、結果的に水蒸気圧直接予測モデルより、精度が高くなっていると考えられる。

4.4 トンネル坑内の環境条件の予測

4.4.1 既往研究の概要

(1) 坑内の環境条件の予測に関する既往研究

トンネル坑内の温湿度などの環境条件は、坑外とは異なったものとなり、一般的には坑外に比較して温度変化が少なく、相対湿度は高くなる傾向があるとされている。

トンネル覆工コンクリートの温度解析、乾燥収縮解析および応力解析を行うにあたっては、坑内の環境条件を把握する必要がある。

天野、水田¹³⁾は火山・温泉地帯に位置し、供用後も坑内が高湿となることが懸念された国道158号安房トンネルを対象にトンネル内気象の予測計算を行っている。この予測計算では坑外気温、坑内岩盤温度、坑内への流入空気の風速（本トンネルは立坑集中排気方式での換気を行うため、常に坑外から坑内へ空気が流入する）や岩盤の熱特性などを入力値として、トンネル半径方向のモデルとトンネル延長方向のモデルを組合わせて、坑内温度や湿度を予測するものである。

また、畠山ら¹⁴⁾は寒冷地トンネルの断熱材の施工などの設計に用いることを目的に、トンネル半径方向のモデルとトンネル延長方向のモデルを組合わせて、坑内温度の予測を行っている。半径方向は覆工コンクリートと地山からなる2層平面モデルにより覆工コンクリート表面の温度を算出、延長方向はトンネル坑内に一定の風速が流入していると仮定し、年平均気温や年変動の振幅を坑口からの距離の関数として表している。

鈴木ら¹⁵⁾は、覆工コンクリートの養生判定に用いることを目的として、覆工コンクリート打込み位置（セントル位置）の温湿度を予測している。工事中の坑内換気方式を送気式とし、切羽側に送気された空気は、トンネル断面内を坑外へと排気されることを前提に、吹付けコンクリート壁面と気流との熱移動と湿気移動をモデル化し、熱流と湿気に関する収支式を解くことで、セントル付近の温湿度を求めるものである。

(2) 地中内温度

地表近くの地中温度は、建築の冷暖房の分野で研究されている。空気の流れは考慮しないが、坑外気温と坑内外気温の関係に類似するものがある。

一般に、深さ10mより深い地点の地中温度は、地上の気温変化に関わりなく、1年を通じてほぼ一定となり「不易層温度」と呼ばれ、不易層温度は年平均気温よりも1.5℃前後高いとされている。地表から50～60cmより深くなると地中温度の日変動はないと考えてよいので、年変動のみ考える。地表面温度の年変動を余弦関数と仮定し、不易層温度を T_{GRO} 、地表面温度の年較差を ΔT_{GRS} とすると、任意の日の深さ $z(m)$ における地中温度 T_{GRZ} は、以下の式で示される¹⁶⁾。

$$T_{GRZ} = T_{GRO} + \frac{1}{2} \Delta T_{GRS} \cdot A_z \cdot \cos\left(\frac{n - n_{mx} - B_z}{365} \cdot 2\pi\right) \quad \dots (4.50)$$

ここに、 T_{GRZ} : 任意の日の深さ z (m)における地中温度 (°C)
 T_{GRO} : 不易層温度 (°C) , ΔT_{GRS} : 地表面温度の年較差 (°C)
 n : 通日=1月1日から通して数えた日数 (日)
 n_{mx} : 地表面温度の年間最高値の生ずる日の通日 (日)
 A_z, B_z : 深さ z の振幅減衰率と時間遅れ. 次式による

$$A_z = e^{-C \cdot z} \quad \dots (4.51)$$

$$B_z = C \cdot z \frac{365}{2\pi} \quad \dots (4.52)$$

$$C = \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}} \quad \dots (4.53)$$

ここに、 a : 土の熱拡散率 (m^2/s)
 τ : 周期 (1年), すなわち, $\tau=365$ 日= $8760h=31.536 \times 10^6 s$

渡辺¹⁷⁾によれば地温不易層は、地下 10m 前後のところにあるので、10m の点を不易層深さとし、 ΔT_{GRS} の 0.5% の年変化を許すものとして、土の熱拡散率を逆算すると、 $a=0.0013 m^2/h=0.36 \times 10^{-6} m^2/s$ となる。すなわち、 $C = \sqrt{\frac{\pi}{0.36 \times 10^{-6} \times 31.536 \times 10^6}} = 0.526$ となるので、この値を用いて A_z, B_z を計算すると以下となる。

$$A_z = e^{-C \cdot z} = e^{-0.526z} \quad \dots (4.54)$$

$$B_z = C \cdot z \frac{365}{2\pi} = 0.526z \cdot \frac{365}{2\pi} = 30.556z \quad \dots (4.55)$$

不易層温度の代わりに年平均気温、地表面温度の年較差の代わりに気温の年較差を用いても問題ないとされている¹⁷⁾。また、 n_{mx} は年最高の地表面温度、便宜的には年最高の日平均気温が生じる日であり、わが国では 8 月 1 日とする。すなわち $n_{mx}=213$ となる。以上より式 (4.50) を書き改めると、以下となる。

$$T_{GRZ} = T_{GRO} + \frac{1}{2} \Delta T_{GRS} \cdot e^{-0.526z} \cdot \cos\{(n - 213 - 30.556z) \cdot 0.017214\} \quad \dots (4.56)$$

$$T_{GRZ} = T_{ave} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cdot e^{-0.526z} \cdot \cos\{(n - 213 - 30.556z) \cdot 0.017214\} \quad \dots (4.57)$$

ここに、 T_{ave} : 日平均気温の年平均 (°C)
 T_{max} : 日平均気温の年最高 (°C)
 T_{min} : 日平均気温の年最低 (°C)

4.4.2 廃線トンネル内における坑内温湿度の計測結果

(1) 計測が行われたトンネルの概要

長谷川，崔ら¹⁸⁾により，Eトンネル（中国地方の廃線トンネル，延長730m）において図-4.39に示すような計測点で，気温，湿度の測定（2010年2月4~2010年3月3日，2010年6月7日~11月30日）を実施し，これに基づく報告がなされている．Eトンネルの概要を表-4.22に示す．

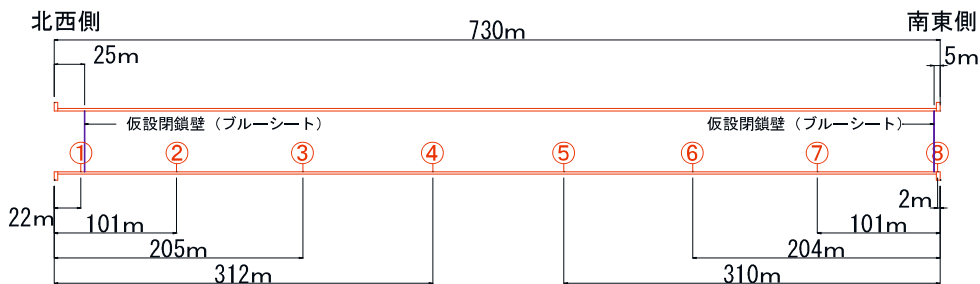


図-4.39 トンネル内の温湿度測定位置

表-4.22 計測した廃線トンネルの概要

項目		具体的な値
トンネル延長		730m
トンネル幅×高さ		3.62~3.80m×5.24m
トンネル位置	北西坑口	東経：132度12分43秒（132.211887度） 北緯：34度35分41秒（34.594778度） 標高：344m
	南東坑口	東経：132度13分00秒（132.216680度） 北緯：34度35分22秒（34.589518度） 標高：335m

本研究では，長谷川，崔らの報告¹⁸⁾以降に実施されたEトンネルにおける2010年6月7日より2011年3月22日の約10ヶ月間にわたる坑内温湿度の連続計測データのご提供をいただき，整理分析を行ったものである．

表-4.23 測定期間と坑口の閉鎖条件

測定期間	北西側入口	南東側入口	備考
6月7日~6月24日	閉鎖	閉鎖	
6月25日~9月30日	上部のみ開放	閉鎖	
11月1日~11月16日	上部のみ開放	全体の2割開放	
11月17日~3月22日	上部のみ開放		

※入口の閉鎖は，仮設閉鎖壁（ブルーシート）で行う
 ※11/1~11/6は，南側ブルーシートの一部が破損

(2) 計測結果とその考察

トンネル坑内奥行き方向の気温の計測結果を図-4.40 に示し、相対湿度の計測結果を図-4.41 に示す。計測は10分あるいは30分間隔で行われているが、1年間の傾向を調べるため、日平均気温と日平均相対湿度を求め、日ごとの値をプロットしている。

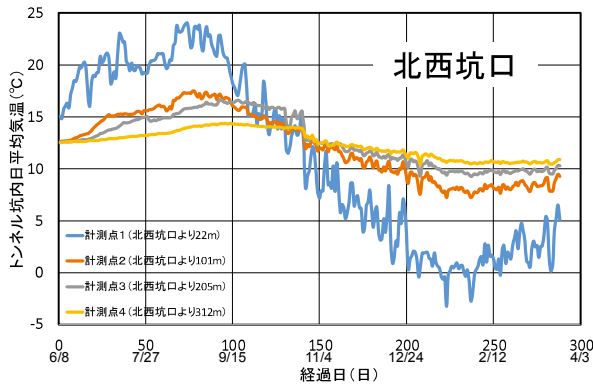


図-4.40 坑内日平均気温計測結果

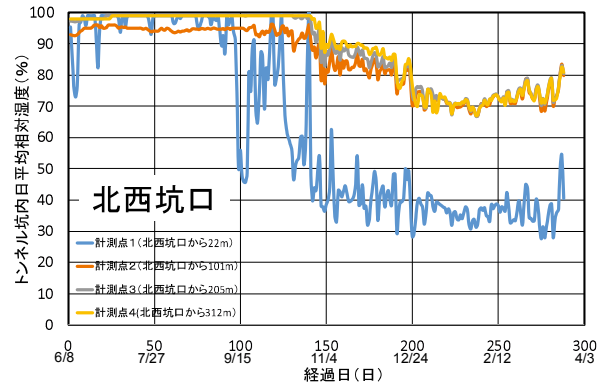


図-4.41 坑内日平均相対湿度計測結果

計測結果からわかるように、気温はトンネルの奥ほど年変動は小さくなっており、振幅は年間を通して小さくなっている。相対湿度は、夏季はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が低いため、ほぼ90%以上の高湿度であるが、冬季はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が高くなるため、相対湿度は下がっている。

トンネル坑内の気温は、図-4.40 に示すように日によってばらつくため、全体の傾向が把握し難い。そこで、坑内外気温の年変動をよりわかりやすく表すため、式(4.58)に示す余弦関数を用いて、坑内外気温を近似した。

$$T = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t + \phi)\right) \quad \dots (4.58)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

T : 経過日数 t における坑内外気温の予測値 (°C)

a_0, a_1 : 近似係数

ϕ : 位相 (日)

近似係数の同定は、PSO (3.4.2 項参照) を用いて、計測点ごとに近似係数と位相 (a_0, a_1, ϕ) を最適化 (同定) した。同定された近似係数および位相を表-4.24 に示し、それを用いて近似した坑内外気温 (計測点1~4) を図-4.42 に示す。

表-4.24 同定された近似係数と位相

	a_0	a_1	ϕ
計測点1	21.923	10.529	308.983
計測点2	23.866	4.196	293.538
計測点3	24.700	3.214	281.574
計測点4	24.313	1.801	276.451

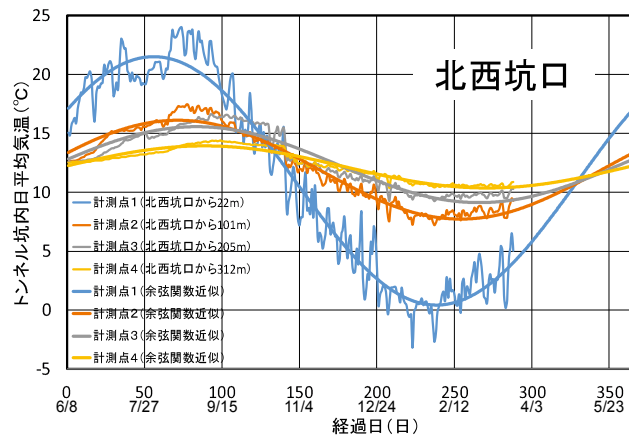


図-4.42 計測された気温の余弦関数による近似

余弦関数で近似した気温は計測した気温を良く近似しており、その温度履歴は、トンネルの奥になるほど年変動は小さくなり、ピークとなる時期も遅れている。そこで坑口からの距離と年振幅などの関係を表-4.25 に示す。

表-4.25 坑口からの距離と年振幅・ピーク遅れ

観測点	北西坑口			
	1	2	3	4
坑口からの距離 (m)	22	101	205	312
年最高気温 (°C)	21.5	16.1	15.6	14.0
年最低気温 (°C)	0.4	7.7	9.1	10.4
年平均気温 (°C)	11.0	11.9	12.4	12.2
年振幅 (°C)	10.5	4.2	3.2	1.8
年最高気温の経過日 (日)	56	71	83	89
年最低気温の経過日 (日)	238	254	266	271

表-4.25 より、トンネル坑内の気温は、トンネルの奥ほど一定値に近づき、年振幅は小さくなる。すなわちトンネルの奥ほど気温の日変動や年変動は小さくなり、一定温度に近づく。また、トンネル坑内の年平均気温も奥ほど高くなっているが、これは不易層や地温勾配の影響と思われる。さらに、最高温度や最低温度が表れる時間（日数）はトンネル奥ほど遅くなっていることがわかる。これは熱が伝わるのに時間が掛かるため、時間的なずれが生じているものと思われる。

4.4.3 坑内外気温のモデル化

(1) 坑内外気温のモデル式

前項でのトンネル坑内の温湿度環境の長期間計測結果より、トンネル坑内では、奥に行くほど、気温の日変動や年変動が小さくなり、年平均気温が上がることで、年間の最高温度や最低温度の現れる時間も遅れることが計測データより分かった。本項では、ひび割れ解析の入力値としてに使えるように、これらの傾向を踏まえ坑内外気温をモデル化する¹⁹⁾。

近藤は著書²⁰⁾の中で深さ z (m)における地中温度は、余弦関数を用いた以下の式で計算できると記している。

$$T_G = A \cos(\omega t - \varepsilon) + T_{ave} \quad \dots (4.59)$$

$$A = A_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \quad \dots (4.60)$$

$$\varepsilon = z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} \quad \dots (4.61)$$

ここに、 T_G ：深さ z (m)における地中温度(°C)

A ：深さ z (m)における振幅(°C)

t ：時間 (h)， ε ：深さ z (m)における位相遅れ (日)

T_{ave} ：地表面での年平均温度(°C)

A_0 ：地表面における振幅(°C) ω ：角振動数(1/s)

κ ：地中の熱拡散率(m²/s)

これらの式は、地中での温度振幅は、深さ方向に指数関数的に減衰し、位相遅れは線形であることを示している。なお、他の文献^{例えば²¹⁾}にも地中温度の計算式が示されているが基本的には近藤の式と同じ考えのものが多い。

トンネル坑内は水平方向に掘削され、掘削による空洞があるため、地中温度の傾向とは異なることが予想されるが、初期ひび割れ解析に簡便に用いることを目的としているため、近藤の式を基本にモデルを構築する。構築したモデルを式(4.62)～(4.65)に示す。

$$T_z = (T_{ave} + \alpha_z) + A_0 \cdot \beta_z \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_{max} - \gamma_z)\right) \quad \dots (4.62)$$

$$\alpha_z = K_1(1 - \exp(-C_1 \cdot z)) \quad \dots (4.63)$$

$$\beta_z = \exp(-C_2 \cdot z) \quad \dots (4.64)$$

$$\gamma_z = K_3(1 - \exp(-C_3 \cdot z)) \quad \dots (4.65)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

Z : トンネルの奥行き(m)

T_z : 経過日数 t における奥行き z の坑内外気温(°C)

T_{ave} : 坑口における年平均気温(°C)

A_0 : トンネル坑口における年振幅(°C)

t_{max} : 気温が最高になる経過日 (日本ではおおよそ 220 日)

α_z : 年平均気温の補正值 (°C) β_z : 振幅減少率

γ_z : 位相遅れ (日) K_1, K_3 : 比例定数,

C_1, C_2, C_3 : それぞれトンネルによって決まる係数である.

上式は、トンネル坑口における年平均気温と年振幅ならびに C_1, C_2, C_3 がわかれば坑内外気温が計算できることを意味する。以下にトンネル坑内の温湿度計測結果から、式 (4.63) ~ 式 (4.65) の各係数を算定する。

(2) 年平均気温の補正值

年平均気温の補正は、トンネル奥行き方向に年平均気温が上昇することを表現するものであり式 (4.51) で計算する。地中には不易層と呼ばれ、年間を通じて温度が一定となる領域が存在し、その温度は年平均気温より 1~2°C 高いと云われている。式 (4.51) は、地中における年平均気温が指数関数的に増加すると仮定したものである。なお、最大補正温度 K_1 は、不易層温度が年平均気温より 1~2°C 高いことから 2°C としている。

各計測点における年平均気温を坑口からの距離との関係で整理したものを図-4.43 に示す。計測点 4 (奥行き 312m) は全体的な傾向から外れているものの、その他の計測点については、指数関数的に増加し、トンネル奥ほど年平均温度が高くなっている。計測点 4 を除いてそれぞれの奥行きについて指数関数で回帰した結果は青鎖線のようになり、 $C_1=0.0104$ となった。

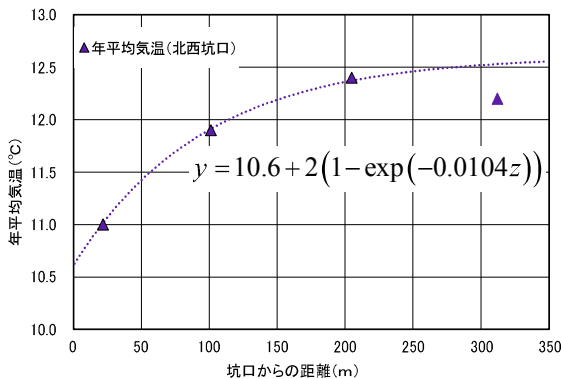


図-4.43 坑口からの距離と年平均気温

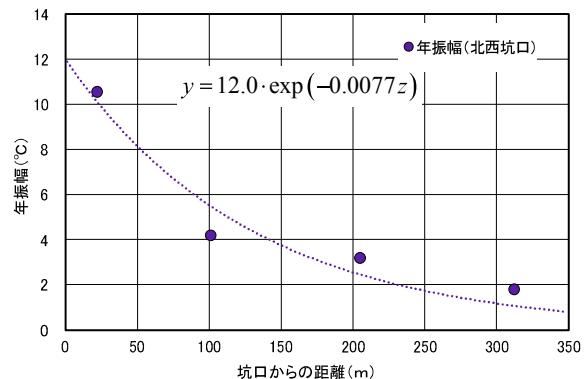


図-4.44 坑口からの距離と年振幅

3) 振幅減少

坑内外気温は、トンネルの奥ほど一定値に近づき、その振幅は小さくなる。振幅減少率は、気温の振幅が減少する割合である。図-4.44 に坑口からの距離と年振幅との関係を示す。図中の青鎖線は、指数関数で回帰した結果であり、このトンネルの場合は、 $C_2=0.0077$ となった。

(4) 位相遅れ

坑内外気温の最高気温や最低気温が表れる日数はトンネル奥ほど遅くなっている。図-4.45 に坑口からの距離と最高気温になる経過日との関係を示す。図中の青鎖線は指数回帰した結果であり、このトンネルの場合は、 $C_3=0.0063$ となっている。また、気温が最高になる経過日 t_{max} は、日本ではおおよそ 220 日であるが、本トンネルの坑口では、6 月 7 日から 50 日経過した日が最高気温になる経過日となっており、このトンネルでは $t_{max}=208$ となる。

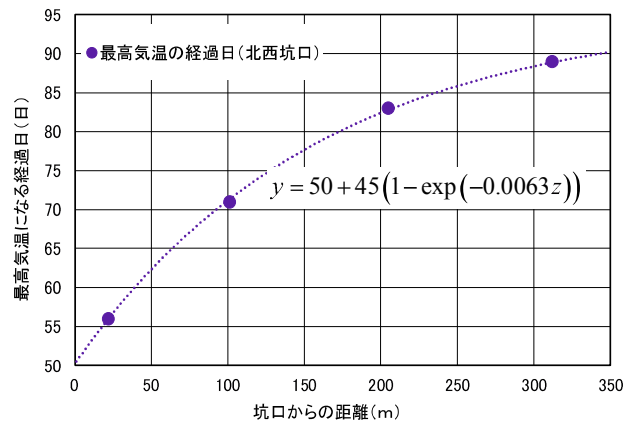


図-4.45 坑口からの距離と最高気温になる経過日

(5) 算定値を用いた坑内外気温の予測

算定された係数を用いて、坑内外気温の予測を式 (4.62) ~ 式 (4.65) で行い、実際の計測結果との比較を行った。設定した数値の一覧を表-4.26 に示し、計測値との比較を図-4.46 に示す。

表-4.26 坑内外気温推定に用いた設定値

変数	設定値	備考
T_{ave}	10.6	坑口年平均気温 (計測値より推定)
A_0	12.0	坑口年振幅 (計測値より推定)
t_{max}	208	最高気温経過日 (計測値より推定)
K_1	2.0	2.0°Cで固定
K_3	45	45 日で固定
C_1	0.0104	計測値より算定
C_2	0.0077	計測値より算定
C_3	0.0063	計測値より算定

予測値は、比較的良く予測できているが、計測点 2 では予測値の振幅が大きくなっており、計測点 4 では予測値の振幅が小さくなっている。

これは図-4.46 からわかるように指数減衰による振幅減少が回帰と計測値で差があるためである。

C_1, C_2, C_3 はトンネルによって決まる係数であり、本研究では計測結果をもとにこれらの係数を定めているが、新設トンネルでは計測結果がないため、これらの値をあらかじめ予測しておく必要がある。信頼性できる値を得るためには、今後種々のトンネルで様々な条件での計測デー

タの蓄積が必要不可欠であるが、本研究と同規模のトンネルでは、一般的な傾向はトンネルごとにそれほど大きく変わることはないため、本研究での値が係数設定での参考値となる。

本研究での主目的はモデル式を提案することであるため、一例での検討結果では係数の値そのものの信頼性は十分とは云えないが、モデル式の妥当性は検証できた。

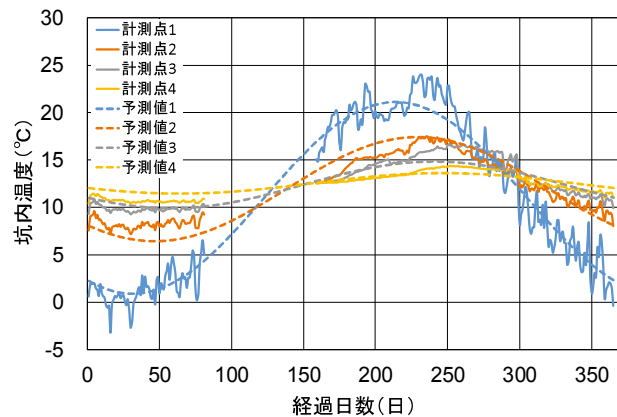


図-4.46 坑内外気温の計測値と予測値の比較

(6) 外気温予測モデルを利用した坑内外気温の予測

新設構造物における温度解析に式(4.50)で提案した坑内外気温モデルを使うためには、坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を設定する必要がある。過去に施工された構造物について検討する場合は、既に計測された気温があるが、新設構造物の場合には計測された気温が存在しないため、過去の気象観測記録から類推する必要がある。

式(4.28)で提案した外気温予測モデルにトンネル北西坑口の緯度、経度、標高を入力し、年間の気温履歴から坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を算出した。外気温予測モデルへの入力値とその出力結果を表-4.27に示す。

表-4.27 外気温予測モデルへの入力と出力

入力	北西坑口	経度	132.21194(132度12分43秒)
		緯度	34.59472(34度35分41秒)
		標高	344m
出力	坑口年平均気温 T_{ave}	12.9°C	
	坑口年振幅 A_0	11.8°C	
参考	加計アメダス観測点	経度	132.32(132度19分12秒)
		緯度	34.61(34度36分36秒)
		標高	210m

また、外気温予測モデルの妥当性を確認するため、算定された外気温とともに、北西坑口に近い計測点1の計測温度と北西坑口から最も近くに位置する加計アメダス観測点の同期間における観測温度を図-4.47に示す。なお、北西坑口と加計アメダス観測点の

標高が異なるため、標高差に気温減率 0.0065 (°C/m) を掛けたものをアメダス観測温度から減じて標高差の影響を除いている。

図-4.47 によると外気温予測モデルは、計測点 1 や加計アメダス観測温度と比べ全ての期間において温度が少し高めに算出されているが、外気温は年ごとにばらつくため、30 年平年値との多少の差はやむを得ないものとする。

参考のため、外気温予測モデルから算出された坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 を用いて、坑内温度を再度算出する。なお、坑口の年平均気温 T_{ave} と坑口の年振幅 A_0 以外の値は、表-4.26 の値を用いた。予測結果を図-4.48 に示す。

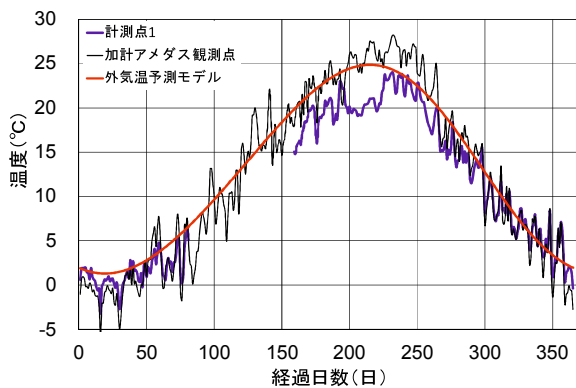


図-4.47 外気温予測モデルの妥当性

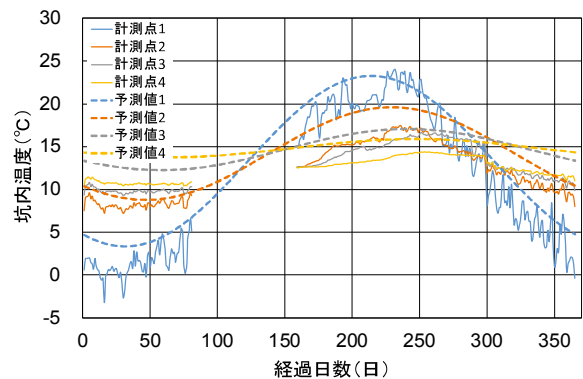


図-4.48 坑内外気温の計測値と予測値との比較

外気温予測モデルでは、坑口の年平均気温が高めに算出されているため、全体的に坑内温度が高く予測されているが、年振幅などは、外気温予測モデルから算出した値とほぼ同様であり、新設構造物の場合には外気温予測モデルの算出結果の利用が可能である。

4.4.4 坑内相対湿度のモデル化

(1) 坑内相対湿度の概要

坑内相対湿度は、図-4.41 に示すとおりであるが、夏季はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が低いため、ほぼ 90%以上の高い相対湿度である。冬季はトンネル坑外の気温よりも坑内の気温の方が高くなるため、相対湿度は下がっている。相対湿度 RH (%) は、式 (4.66) に示すように水蒸気圧 P_v (hPa) を飽和水蒸気圧 P_s (hPa) で割ったものである。また、温度 T (°C) と飽和水蒸気圧との関係は、Tetens の式¹⁰⁾を摂氏に換算した式 (4.67) で表すことができる。

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad \dots (4.66)$$

$$P_s(T) = 6.1078 \exp\left\{\frac{17.27(T-0.01)}{T+237.29}\right\} \quad \dots (4.67)$$

飽和水蒸気圧 P_s は、ある温度において空気中に含むことができる最大の水蒸気圧であり、温度が高いほど、大気中にたくさん水分を含むことができる。

トンネルにおいて、夏季は坑内よりも坑外の気温が高いため坑外の水蒸気圧は大きい。坑外の空気が坑内に流れ込み、気温が低下すると飽和水蒸気圧は小さくなり、飽和水蒸気圧を越えた水分は結露する。このため、坑内の水蒸気圧はほぼ飽和水蒸気圧に等しくなり、相対湿度は 100% に近くなる。一方、冬季は坑内よりも坑外の気温が低いため坑外の水蒸気圧は小さい。坑外の空気が坑内に流れ込み、気温が上昇すると飽和水蒸気圧が大きくなるため、相対湿度は小さくなる。

(2) 坑内相対湿度モデル式の提案

前述したように相対湿度は水蒸気圧と気温が関係するため、ばらつきが大きい。とくに計測点 1 は、ブルーシートの外側に位置するため、風の影響などを受けてばらつきが大きくなっている。図-4.41 に示すように奥行き 100m 以上の計測点 2, 3, 4 は相対湿度が比較的安定しているが、計測点 1 はかなりばらついており、信頼性が劣る。そこで、相対湿度の解析は、奥行き 100m 以上について行う。

余弦関数を用いた相対湿度のモデル式を式 (4.68) に示す。

$$RH_z = RH_{ave} + A_z \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_{max})\right) \quad \dots (4.68)$$

ここに、 t : 1月1日からの経過日数 (日)

z : トンネルの奥行き (m)

RH_z : 経過日数 t における奥行き z での坑内相対湿度 (%)
100% を上下炎とする。

RH_{ave} : 年平均相対湿度 (%)

A_z : 奥行き z での相対湿度の年振幅 (%)

t_{max} : 位相 (日), おおよそ 220 日である。

計測点 2, 3, 4 について年平均相対湿度、年振幅を求めた結果を丸めたものを表-4.28 に示し、その値を用いて予測した相対湿度を図-4.49 に示す。

表-4.28 坑内湿度推定に用いた設定値

計測点 (奥行き)	計測点 2 (101m)	計測点 3 (205m)	計測点 4 (312m)
年平均相対湿度 RH_{ave} (%)	85	90	95
相対湿度の年振幅 A_z (%)	15	20	25
経過日数 t_{max} (日)	220		

予測した相対湿度は実測の相対湿度と良い対応を示しており、この予測式での近似が可能である。しかしながら、今回の設定値は、トンネル奥行き100～300m程度を対象としており、さらに一例での計測結果での値である。信頼性の高い設定値を得るには、種々のトンネルのデータを蓄積し、解析を行う必要がある。

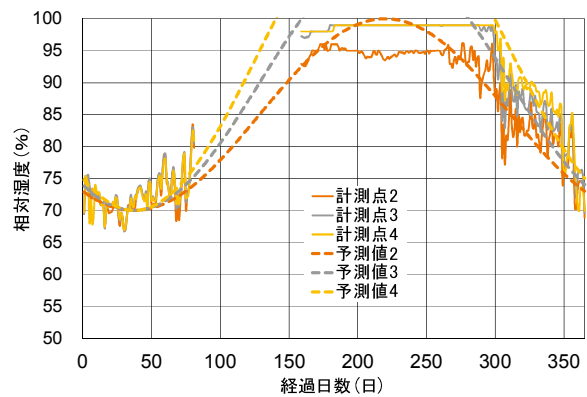


図-4.49 坑内相対湿度の実測と予測値との比

4.4.5 各種要因による坑内環境予測モデルの補正

(1) 坑内風速による補正

既往研究における坑内外気温の予測は風速の関数として整理されているのに対して、4.4.3項では坑内風速の影響を受けないものとして、坑内外気温の予測式を構築したが、実際には風の要因も考慮する必要がある。坑内風には自然風と工事中の換気風があり、貫通前には換気風の影響が大きく、貫通後は自然風の影響を大きく受けるものと考えられる。前述したように、天野、水田¹³⁾は、坑内温度の予測式を提案している。本研究では、この式から坑内通気量に着目した式に簡素化し、坑内風速の影響を試算した。

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot S \cdot \alpha \cdot (\theta_w - \theta_1)}{G \cdot c_p + \pi \cdot r_1 \cdot S \cdot \alpha} \quad \dots (4.69)$$

ここに、 θ_1, θ_2 : 計算範囲両端の気流温度 (°C)

θ_w : 壁面温度 (°C) : 不易層 = 年平均気温とする。

r_1 : トンネル半径 (m)

S : 計算区間長 (m)

α : トンネル壁面の熱伝達率 ($J/m^2 \cdot s \cdot K$)

G : 通気量 (kg/s)

c_p : 空気の定圧比熱 ($J/kg \cdot K$)

式 (4.69) に基づき、E トンネル坑外日平均気温の最高値 24.9°Cが、坑内の不易層温度 (ここでは、日平均気温の平均値 12.9°C+2°C=14.9°Cとした。) に収束する延長を風速ごとに試算して、表-4.29、図-4.45 に示す。この試算では、以下を入力値とした。

θ_w : 壁面温度 (不易層の年平均気温) = 14.9°C

r_1 : トンネル半径 = 3.0m

S : 計算区間長 (5~20m)

α : トンネル壁面の熱伝達率 = 風速の関数とみなし, 式 (5.69) による.

G : 通気量 (kg/s) . . . 風速を変数とし, 空気の密度 1.293kg/m³,
内空断面積 = 30m² として算定

c_p : 空気の低圧比熱 = 1000 (J/kg · K)

$$\alpha = 4.5 + 3.5v \quad \dots (4.70)$$

ここに, v : 坑内風速 (m/s)

なお, 式 (4.70) は, コンクリート標準示方書²²⁾ に, 通常コンクリート露出面のでは, 風速 2~3m/s の場合, 熱伝達率 12~14 (W/m²°C = J/m² · s · K) であり, 風速の増加に伴い, 熱伝達率は増加し, その増加割合の目安は風速 1m/s あたり 2.3~4.6J/m² · s · K 程度であるとされており, 本研究では, 風速 3m/s で, 熱伝達率 14J/m² · s · K, 1m/s あたりの増加率を 3.5 J/m² · s · K (平均値) と仮定した.

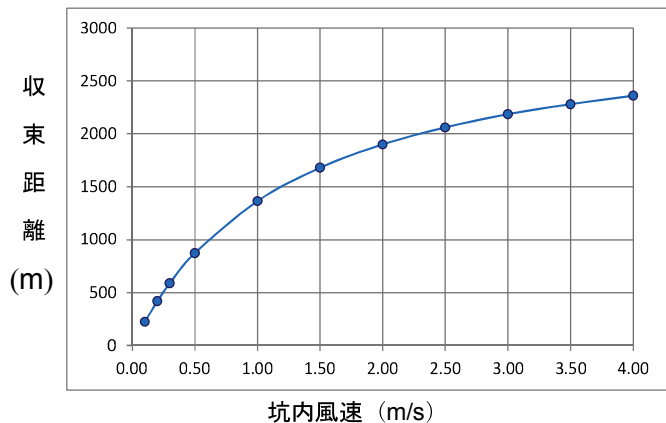


図-4.50 坑内風速と収束距離

表-4.29 坑内風速と収束距離

風速 (m/s)	収束距離	風速 0.2m/s に 対する距離比率
0.1	225	1.87
0.2	420	1.00
0.3	590	0.71
0.5	875	0.48
1.0	1365	0.31
1.5	1680	0.25
2.0	1900	0.22
2.5	2060	0.20
3.0	2185	0.19
3.5	2280	0.18
4.0	2360	0.18

風速と収束距離は図-4.50 に示すように相関関係にある. 表-4.29 右欄および図-4.51 は, 風速 2.0m/s を基準とし, 収束距離との比率を求め, グラフ化したものである. E トンネルにおける分析結果では, 坑内外気温が不易層温度に達するまでは 200m 程度, 年較差, および位相のずれが収束するのに 400m~500m 程度である. 図-4.50

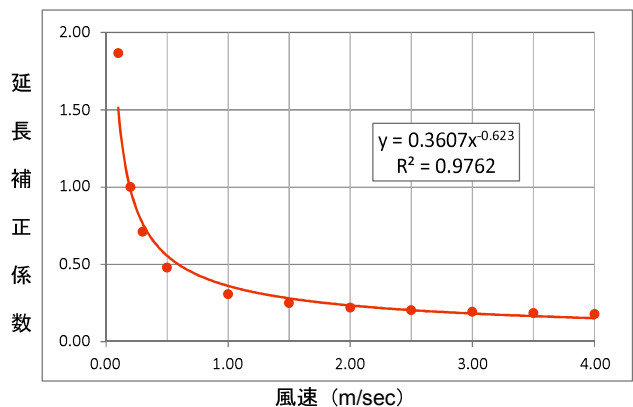


図-4.51 風速と補正係数 f の関係

および表-4.29 に示した試算結果に適合すると、風速は 0.1m/s～0.2m/s の範囲となる。この風速は、気象庁が示すビューフォート風力段階表によると、「風力段階=0，平穏：陸上では静穏。煙はまっすぐに昇る。海上では鏡のような海面」に相当し、E トンネルにおける観測結果は、風速の影響をほぼ受けないものと考えてよい。

また、風速と収束距離は図-4.50 に示すように相関関係にあるので、風速により坑口からの距離 z (m) を補正することができる。図-4.51 は、風速 0.2m/s を基準とし、収束距離との比率をグラフ化したものである。

すなわち、式 (4.62) ～式 (4.65) における z (m) を坑内距離補正係数 f とし、式 (4.71)、式 (4.72) を得ることができる。ここで得られた z' を入力値とし、式 (4.62) ～式 (4.65) により坑内外気温を算出することができる。ただし、この試算は仮定条件である壁面の熱伝達率の設定の影響を受けていることに注意を要する、

$$z' = f \cdot z \quad \dots (4.71)$$

$$f = 0.3607v^{-0.623} \quad \dots (4.72)$$

ここに、 f : 坑内距離補正係数

風速による補正は、一定の風速が長期間継続することが条件となる。たとえば、貫通後に一定風速が見込まれる場合や、貫通前でも一定の比較的大きな換気風がある場合には、風速の影響により補正する必要が生じる場合もある。

(2) 施工要因における補正

坑内温度に影響を与える要因として、工事用車両からの放熱、とくにセントル付近では照明やポンプ車、アジデータカーなどの工事用車両が集中し、打込まれたコンクリートの水和熱の影響も考えられる。この影響で、工事中の坑内温度は予測値よりやや高めとなり、さらに天端付近は施工基面付近より高めとなる傾向にある。

F トンネルでは、覆工コンクリートの温度計測とともに、天端付近、側壁付近で坑内外気温の計測が行われている²³⁾。坑内外気温および覆工コンクリートの温度計測結果を図-4.52 に示す。覆工コンクリートの天端温度は側壁よりも高く、また、坑内外気温も天端部の方が側壁部よりも高い。覆工コンクリートの温度は、約 20 日でほぼ坑内外気温に収束している。坑内外気温の傾向をさらに詳しくみるため、図-4.53 に坑内外気温のみの温度計測結果を示す。

図-4.53より坑内外気温は、側壁部より天端部の方が高く、天端部の温度はばらついている。ばらつきが小さいところを見ると、いずれも土曜日、日曜日となっており、現場が休みの日にばらつきが小さく、天端坑内外気温も低くなっている。現場稼働時には重機や照明による熱が上部に溜まるため、高さ方向に温度分布が生じているものと推察される。これは、後述するGトンネルの場合にも同じ傾向を示している。

本研究では、坑内外気温を時間と高さの関数として式 (4.73) および式 (4.74) でモデ

ル化する。式 (4.73) は、経過時間による上部と下部の温度差を表したもので、式 (4.74) は、高さ方向の温度補正量を表したものである (図-4.54, 図-4.55 参照)。

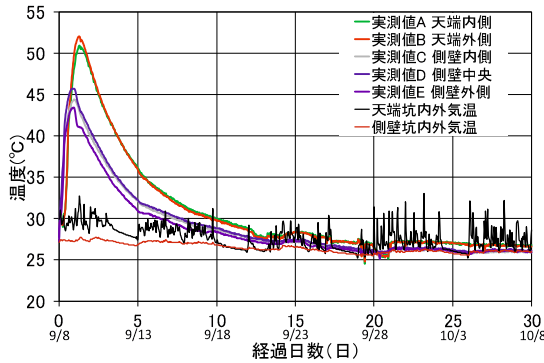


図-4.52 温度計測結果

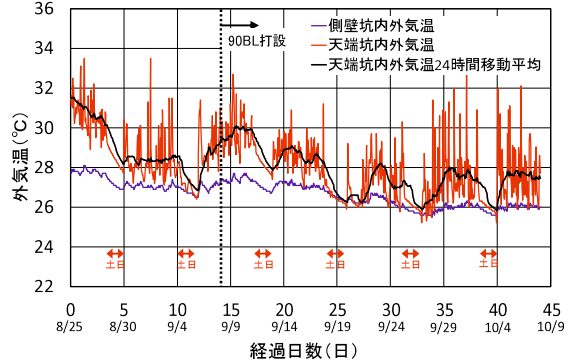


図-4.53 坑内の外気温計測結果

$$K(t) = K_{\max} - \varphi \cdot t \quad \dots (4.73)$$

$$\Delta T(t, y) = K(t) \cdot y^\alpha \quad \dots (4.74)$$

ここに、 $K(t)$: 経過時間 t ごとの上部と下部の温度差 (°C)

K_{\max} : 上部と下部の初期最大温度差 (°C)

φ : 温度降下勾配を表し、上部と下部の温度差の減少率 (°C/h)

t : 経過時間 (h)

$\Delta T(t, y)$: 高さ方向の温度補正量 (°C),

y : 高さを 0~1 の間で表現した正規化された高さ

α : 高さ方向の分布形状を決める係数

高さ方向の分布形状は、例えば α の値を 1.0 とすると直線分布となり、 α の値が 1.0 より小さい場合は下に凸、1.0 より大きい場合は上に凸の分布となる。

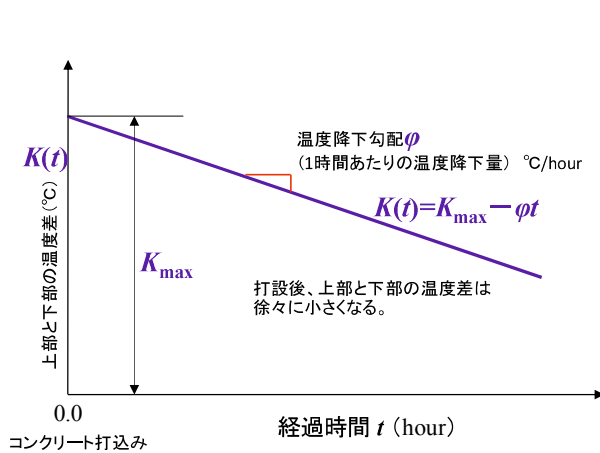


図-4.54 経過時間ごとの上部と下部の温度差

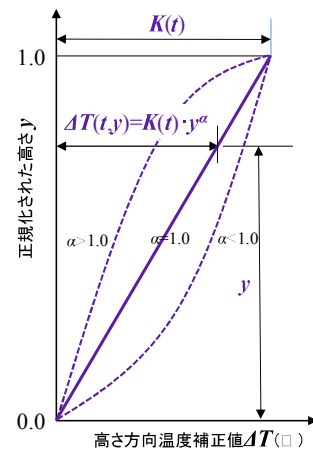


図-4.55 高さ方向の温度補正值

図-4.53 に示す坑内の側壁外気温と天端外気温の計測結果から、上部と下部の温度差を計算したものを図-4.56 に示す。この温度差から式 (4.73) の K_{max} および ϕ を計算すると、 $K_{max}=1.56^{\circ}\text{C}$ 、 $\phi=0.0205^{\circ}\text{C}/\text{day}=0.000854^{\circ}\text{C}/\text{h}$ となる。 α の値については、2 点しか計測されていないため、今回は 1.0 としている。

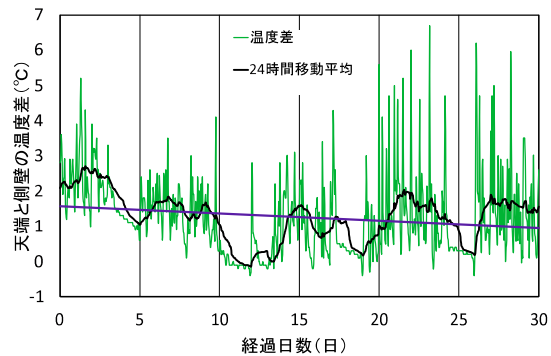


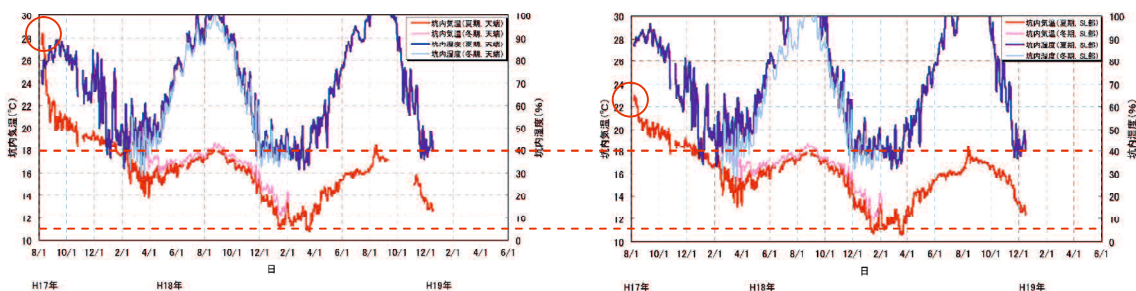
図-4.56 天端と側壁の坑内外気温差

また、高山の研究²⁴⁾では、G トンネルにおいて、初期ひび割れに関する現地計測が行われており、工事中に2年程度にわたる温湿度の計測結果が報告されている。

G トンネルは延長 26,455km にも及ぶ長大トンネルで、6 工区に分割して施工されており、計測が行われたのは、斜坑坑口から 2,800m の地点であり、天端部と側壁部で温湿度が計測されている。なお、覆工コンクリート打設時はすでに貫通していた。

坑内外気温計測の結果は図-4.57 に示すように、以下のような傾向を示している。ここでは、おもに夏季に覆工コンクリートが打込まれた箇所気温について検討する。

- ・覆工コンクリートの打込み時（平成 17 年 8 月 1 日）では、天端部で 28°C 、側壁部で 23°C 程度である。
- ・1 ヶ月後の 9 月には側壁と天端の温度差は認められず、当該箇所の坑内外気温は 20°C 程度である。
- ・平成 18 年、19 年には、坑内外気温は天端、側壁で差はなく、また、冬季に覆工コンクリートが施工された箇所とも差はなく、 $11^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ の間で推移している。この間の年平均気温は 14.5°C 程度、計測箇所での年格差は 7°C 程度である。



(a) 天端部

(b) 側壁部

図-4.57 坑内温度と湿度の関係 文献²³⁾ に加筆修正

また、G トンネルの位置する緯度、経度および標高から式(4.28)を用いて坑外の気温を求めると、表-4.30の右欄に示すとおりとなる。

表-4.30 坑内外気温の計測値と坑外気温の予測値

項目	坑内計測値	坑外予測値	備考
最高気温	18℃	21.9℃	
最低気温	11℃	-2.9℃	
年較差	7℃	24.8℃	減少率=0.282
平均気温	14.5℃	9.5℃	+5℃

式(4.71)を用いて、年較差(振幅)の減少率0.282から、坑内補正距離 z' を逆算すると、165m程度となる。坑内補正距離 $z'=165\text{m}$ として、坑口と当該箇所年平均気温の差を求めると、1.5℃程度となり、計測値5℃と比較し、3.5℃程度低いこととなる。

G トンネルにおける坑内外気温の計測結果は、本研究で提案した予測モデル結果と併せて、以下のように説明することができる。

- ・坑内補正距離 $z'=165\text{m}$ とし、坑口部の予測値から坑内外気温を求めると、年平均気温の差は1.5℃、年較差7℃であり、坑内年平均気温11℃、最高気温14.5℃、最低気温7.5℃程度となる。
- ・坑内作業の影響で、さらに3.5℃程度高くなるとすると、坑内年平均気温14.5℃、最高気温18℃、最低気温11℃程度となり、計測値に一致する。

すなわち、坑内補正距離165mとし、坑内機械による温度上昇を3.5℃と考えると、式(4.28)から、求められる坑外気温から、式(4.62)により、G トンネルの平成18年度、19年度の坑内外気温を説明できる。

さらに、覆工コンクリート打込み時には、上記坑内外気温に比較して、側壁部で5℃、天端部では10℃程度高い坑内外気温が計測されており、おおむね8ヶ月程度で天端と側壁の温度差がなくなっている。式(4.71)を適用すると、 $K_{\max}=5^\circ\text{C}$ 、 $\phi=0.0208^\circ\text{C}/\text{day}$ となる。

一方、坑内で計測された相対湿度は、夏季には100%を示すが、冬季には40%と非常に低い値が計測されている。前述した図4.41や、図-4.49で示したE トンネルでの計測結果と比較すると、夏季の傾向は一致するが、冬季の値は異なったものとなる。

従来、トンネル内の相対湿度は一定しており、高い値を示すと考えられていたが、これらの結果を見ると、冬季は必ずしも相対湿度が高いとは言えないことがうかがえる。

冬季には坑外では外気温および相対湿度が低いため、水蒸気圧も低くなる。これに対して、坑内の外気温は坑外の外気温に比較して高いため、同じ水蒸気圧の場合には、相対湿度はさらに低くなることとなる。貫通した場合には、風速の影響もあり、さらに水蒸気圧、相対湿度が低くなっていることも考えられる。

今後、坑内外における正確な水蒸気圧の測定に基づく水蒸気圧の予測モデルの構築が必要である。

4.5 第4章のまとめと課題

コンクリートの温度解析，湿気移動解析を精度よく行うためには，入力条件として，外気温，湿度などの気象条件が重要である．本章では，位置情報から，任意の位置，任意の月日の外気温および湿度，さらには坑内気象条件の予測モデルの構築を行った．

(1) 外気温の設定モデル

アメダス気象観測データを用いてコンクリートの温度解析の入力項目となる外気温について，全国各地の日平均気温の平年値（30年間の統計量）を比較的簡単に算出する外気温モデルを構築した．

外気温モデルとして，直線近似モデルとフーリエ級数モデルを新たに提案し，モデルパラメータを位置情報（経度と緯度と標高）から算出する式を構築したが，「フーリエ級数モデル」が最も精度が良くなっており，外気温設定モデルとして，式(4.28)を提案した．

構築された外気温モデルは，位置情報（経度と緯度と標高）がわかれば比較的簡単にその場所の日平均気温が計算でき，温度解析の精度向上につながるものと思われる．

(2) 水蒸気圧，相対湿度の予測モデル

空気中の水分量を表す指標としては，相対湿度および水蒸気圧がある．相対湿度の観測値はばらつきが大きいのに対して，水蒸気圧は気温と同様の年推移を示す．一般には湿気移動解析では相対湿度を入力値とするが，解析上，用いるのは水蒸気圧である．

このため，本研究ではまず，水蒸気圧を予測するモデルを構築するものとし，水蒸気圧予測モデルとして，水蒸気圧直接予測モデル，水蒸気圧間接予測モデル，および相対湿度予測モデルを構築した．構築された外気温モデルは，位置情報（経度と緯度と標高）がわかれば比較的簡単にその場所の水蒸気圧や相対湿度が計算でき，湿気移動解析の精度向上につながるものと思われる．

a) 直接予測モデル

水蒸気圧の年変動はフーリエ級数で近似可能であり，位置情報（経度，緯度，標高）と経過日数から水蒸気圧を直接予測するモデルとして，式(4.41)を提案した．水蒸気圧予測モデルの中では，最も精度がよい結果が得られた．

b) 間接予測モデル

水蒸気圧は日最低気温との相関が良いことから，位置情報と経過日数から日最低気温を予測する式を構築し，これを用いて水蒸気圧を間接的に予測するモデルとして，式(4.47)および式(4.48)を提案した．また，日最低気温を予測するモデルとして，式(4.49)を提案した．

c) 相対湿度予測モデル

さらに，上記水蒸気圧予測モデルにより予測した水蒸気圧と日平均気温予測モデルおよび Tetens の式から算出した飽和水蒸気圧との比率から，相対湿度を予測するモデルを構築した．

(3) 坑内外気温および相対湿度の予測モデル

本研究では、廃坑における計測結果をもとに、トンネル坑内の温湿度環境を分析し、坑内外気温の予測式として式(4.62)を、また、坑内相対湿度の予測式として式(4.68)を提案した。

坑内温湿度の予測式については、一例での検討であるため、係数の値そのものの信頼性は低いものの、温湿度環境を算定するための計算式の構築や外気温予測モデルの利用について道筋をつけることができた。

しかしながら、一例での分析結果であることや、さらには、風速や坑内作業の影響を考慮した温度予測が必要となるため、今後、計測データを蓄積し、適切な係数値を設定することが必要である。

【参考文献】

- 1) 気象業務支援センター：気象データベース・アメダス（フルセット版），ウェザートーイ 2010
- 2) 気象業務支援センター：気象データベース・アメダス（フルセット版），ウェザートーイ 2015
- 3) 気象庁：地域気象観測システム（アメダス）観測網（平成 28 年 1 月 1 日現在）
- 4) Grubbs, F. E. : Procedures for detecting outlying observations in samples, *Technometrics*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-21, 1969.
- 5) 中村秀明, 緒方香奈恵, 谷本俊夫, 浜田純夫：マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの提案, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.285-290, 1997.5
- 6) 日本気象協会：気象庁年報, 1983-1992, 日本気象協会
- 7) 中村秀明, 中村明彦, 河村 圭：マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの精度向上に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.1, pp.1273-1278, 2013.
- 8) 中村明彦, 國近光生, 河村圭, 中村秀明：コンクリート構造物耐久性評価のための気象環境条件のモデル化に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) Vol. 72 No. 3, pp.288-303, 2016.
- 9) 上田政文：湿度と蒸発, pp. 25-28, コロナ社, 2007
- 10) Murray, F. W. : On the computation of saturation vapor pressure, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 203-204, 1967.
- 11) 気象業務支援センター：気象データベース・地上観測, ウェザートーイ 2015.
- 12) 志賀弘行：アメダス観測地点における最低気温を用いた水蒸気圧の推定, 北海道立農業試験場集報, 第 84 号, pp. 99-100, 2003
- 13) 天野勲三, 水田義明：トンネル内気象の予測計算, 土木学会論文集, 第 387 号 / II -8, pp.219-228, 1987.11
- 14) 畠山幸佑, 川村巧, 三上隆：寒冷地トンネルにおける坑内延長方向の実用的な温度解析, 土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年度), 6-304, pp607-607, 2008.9
- 15) 鈴木圭一, 今津雅紀, 蔵重幹夫：覆工コンクリートの養生判定に対するトンネル内温湿度の予測方法について, 土木学会第 66 回年次学術講演会(平成 23 年度)VI-419, pp.837-838, 2011.9
- 16) 長谷川房雄：不定常熱伝導（渡辺要編：建築計画原論Ⅱ, 第 7 章）, 丸善, 1965.
- 17) 渡辺要：暖冷房設計用地中温度, 空気調和衛生工学, 38-2, pp23-32, 1964.2
- 18) 長谷川健, 崔軍, 湊政樹, 恩庄亜美, 橋本康平：廃線トンネルの熱環境に関する長期測定 その 1 2010 年の測定データ, 2010 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.34, pp.131-132, 2011.3

- 19) 中村明彦, 國近光生, 細田暁, 中村秀明: トンネル覆工コンクリート初期ひび割れ解析のためのトンネル坑内温湿度環境のモデル化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No. 1, pp. 1215- 1220, 2018.7
- 20) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, p.150, 1994.
- 21) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, pp.72-73, 1986.
- 22) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.326, 2018.3
- 23) 中村明彦, 國近光生, 中村秀明: 覆工コンクリート初期ひび割れ予測のための温度解析に関する考察, 土木学会論文集 F1, Vol.74, No.2, 2019, 掲載予定
- 24) 高山博文: トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ制御に関する研究, 京都大学, 学位論文, p.53, 2009.2

第5章

覆工コンクリートのひび割れ解析における モデル化と材料特性値の検討

第5章 覆工コンクリートのひび割れ解析 におけるモデル化と材料特性値の検討

5.1 覆工コンクリートの温度解析モデルの検討

5.1.1 覆工コンクリートの温度解析における課題

覆工コンクリートは構造上および施工上、通常のマスコングリートとは異なる部分が多く、温度解析を行うにあたっては、構造や施工法を考慮したうえで、解析モデルや入力値を吟味する必要がある。ここでは、覆工コンクリートの温度解析における特徴について、マスコングリートの温度解析と対比しながら述べる。

a) 部材厚が薄いため断熱状態ではない

一般的なマスコングリートは表面積に比べ体積が大きいことから、解析上は全断面において断熱温度上昇と同じ水和発熱が生じていると仮定して解析される。これに対して、覆工コンクリートは、トンネル延長方向の長さや、断面方向の内周長さに比べ、部材厚さが薄いため、厳密には断熱状態とはいえず、マスコングリートのように、全断面で同じ水和発熱が発生しているとの仮定は適用できない懸念がある。このため、一般的な断熱温度上昇特性式が適用できるのか、適用する場合にはその適用手法について検討を行う必要がある。

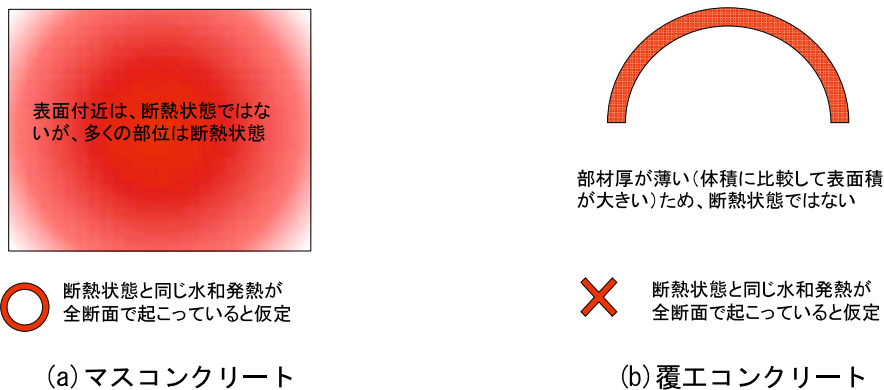


図-5.1 水和発熱のイメージ (図-3.28 を再掲)

b) 水和発熱によるコンクリート温度は側壁部に比較し、天端部が高い傾向にある

コンクリートの温度解析を行ううえでは、コンクリートの材料特性値などの入力条件は側壁部と天端部は同様である。しかしながら、計測データによるとほとんどの事例で天端部の方がピーク温度（水和発熱に起因する最高到達温度）が高くなるという特徴を有する。この原因を究明し、解析上の入力値を設定する必要がある。

c) セントルを考慮した解析の必要性

マスコンクリートの温度解析と同様に、覆工コンクリートの温度解析においても、一般には型枠（鋼製のスライドセントル、以下「セントル」と称する）はモデル化されない。しかしながら、セントルは熱伝導率が大きいため、熱の移動が速く、コンクリートの水和熱がセントルを伝わって拡散することや、セントルの温度上昇に費やされる可能性があるため、モデル化しない場合には、覆工コンクリートの温度が高く見積もられる可能性がある。

d) 天端上面の空気層

覆工コンクリートの背面は、全周にわたって吹付コンクリート（一般に防水シート）に接している。覆工コンクリートの天端部はコンクリートの充填が最後になるため、少なくとも施工時には空気層が存在する状態でのコンクリートの打込みとなり、さらに、コンクリートの沈下やブリーディング水が上部に溜まることにより、防水シートとの界面に薄層の空気層が残ることも考えられる。また、細田ら¹⁾はコンクリート打込み時に防水シートが両側に引張られることにより、防水シート背面に空気層（エアギャップ）が生じる可能性を指摘している。このような空気層の影響で覆工コンクリートから周辺への熱伝導が阻害されている可能性がある。

e) トンネル奥行き方向・高さ方向に温湿度環境が異なる

覆工コンクリートは4.4.3項で前述したようにトンネル奥行き方向に温湿度環境が異なるとともに、4.4.5項で示したように同じ断面であっても、高さ方向の坑内外気温が異なる傾向にある。このため、温度解析にあたっては奥行きと高さに応じて坑内外気温を考慮する必要がある。

f) 熱伝達率の設定値

トンネル施工時の坑内環境は、換気風や坑内車両の影響、養生の有無や貫通前後の風速の変化などにより、必ずしも同様ではない。たとえ貫通後であっても遮風シートで閉鎖されることが多いことから、吹きさらしの屋外に比べ、日照作用や風の影響を受けにくい。そのため、覆工コンクリート施工時の熱伝達率は、規準類に示されている値に比べ、小さい可能性がある。一方、貫通後に遮風シートが撤去された場合には、坑内環境が変化するため、坑内環境に応じた熱伝達率の設定が必要となる。

5.1.2 解析モデルの検討

(1) 解析コード

本研究における温度解析では、多くの試算や逆解析を行うため、覆工コンクリートの温度応力解析用に開発した2次元非定常熱伝導有限要素解析プログラムを用いた。この解析コードでは、セントルの撤去をモデル化できるように要素の除去を可能としたこと、PSOを組み込み、逆解析を可能としたこと、逆解析では外気温の高さ方向の違いも同定可能としたことなどに特徴がある。

(2) Fトンネルの概要

温度解析のモデルは、後述の逆解析に用いるFトンネルを用いる。Fトンネルは、**図-5.2**に示すような断面のトンネルであり、坑口より約1000mの位置で、側壁部および天端部の坑内および覆工コンクリート内部の温度計測が行われている。覆工コンクリート形状と内部の5箇所の温度計測位置を**図-5.2**の(a), (b)に示す。

なお、Fトンネルの覆工コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、配合は**表-5.1**に示すとおりである。

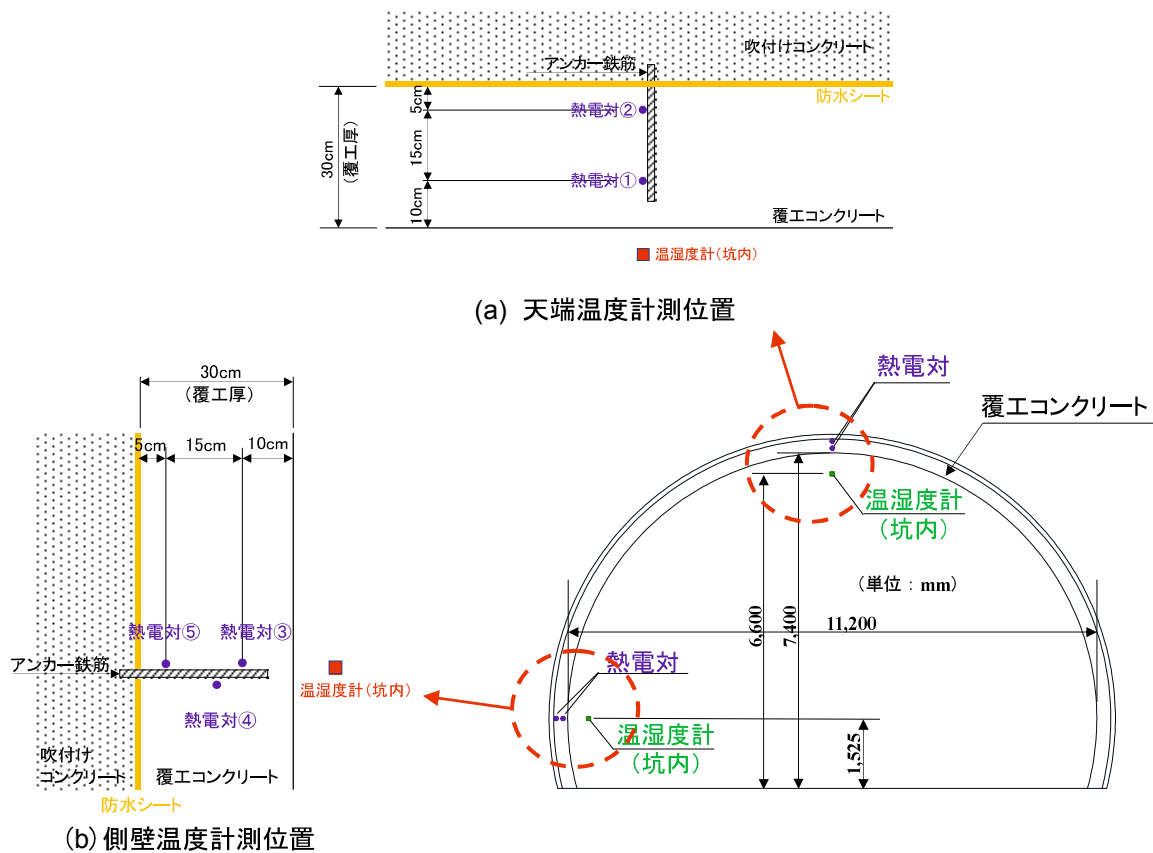


図-5.2 Fトンネル断面および温度計測位置

表-5.1 覆工コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)
56	171	303	861	938

(3) 解析モデル

解析に用いる有限要素メッシュは、岩盤領域の幅が 20m、高さ 37m で対称性を考慮した 1/2 モデルである。図-5.3 に有限要素メッシュを示す。

覆工コンクリート部分のコンクリート打込みは、実際は連続的に行われるが、解析では段階的に行われるとし、図-5.3 に示すように5つのリフトに分割した。

セントルの影響や天端上面の空気層の影響を調べるため、天端上面の空気層は、図-5.3(a) に示すように天端部の防水シートの熱伝導率を低減することで表現するものとし、セントルは図-5.3(b) に示すようにセントル要素をモデル化している。

なお、セントルをモデル化しない解析では図-5.3(c) に示すようにセントル部の要素は存在しない。また、熱伝達率を設定する伝熱境界は図-5.3(b), (c) に赤線で示した。

各リフトの打込み時刻や解析終了時刻を表-5.2 に示す。

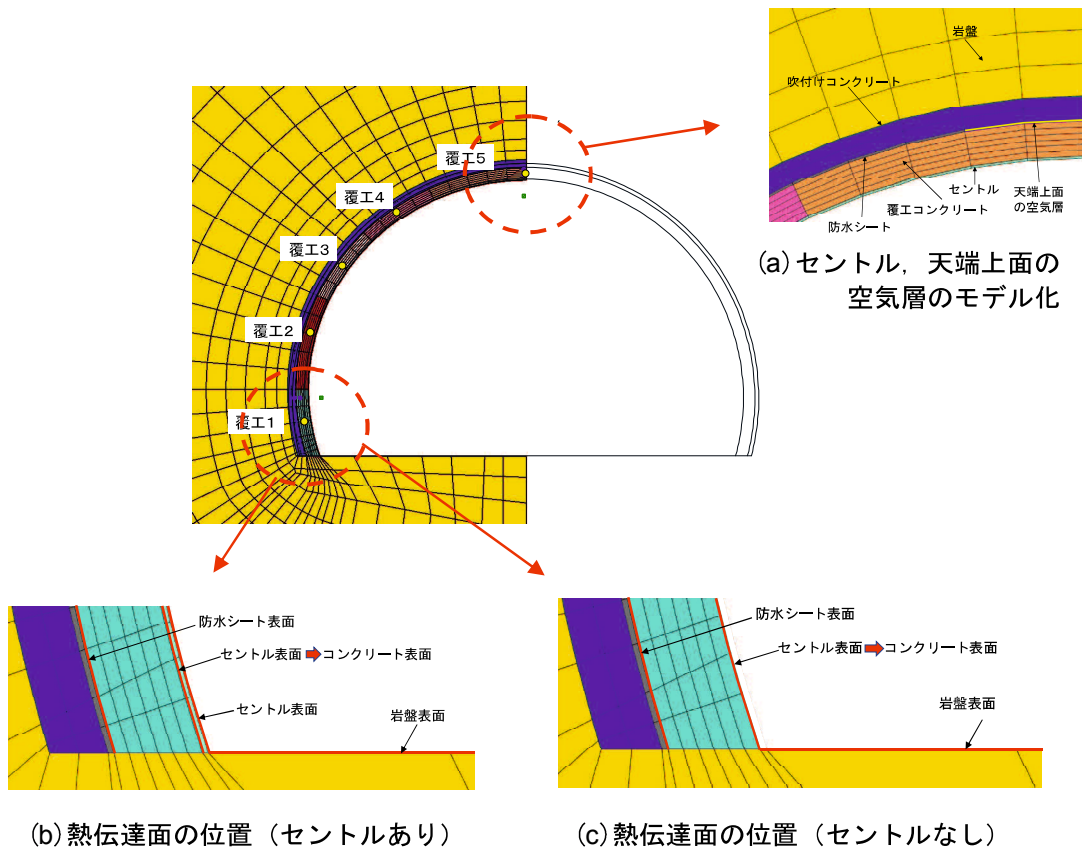


図-5.3 有限要素モデル(トンネル周辺)

表-5.2 リフトごとの打込み時刻と解析終了時刻

時刻		状況	備考
2016/9/8	9:00	覆工1打設	
2016/9/8	11:00	覆工2打設	
2016/9/8	13:00	覆工3打設	
2016/9/8	14:00	覆工4打設	
2016/9/8	16:00	覆工5打設	
2016/9/9	9:00	セントル撤去	覆工完了後, 16時間程度
2016/9/22	9:00	解析終了	

(4) 標準的な材料特性値

解析に用いる材料特性値は、表-5.3に示すように、規準書類に準拠した一般的な値を基本とし、検討を加えるものとする。表-5.4にはセントルをモデル化する場合のセントルの材料特性値を示す。なお、モデル化の検討や入力パラメータの感度分析においては、外気温は25°C一定とし、コンクリートの打込み温度は、30°C（外気温+5°C）とした。セントルや防水シートの材料特性値の換算値は後述の5.1.3項に示した。

また、熱伝達率は基本的には逆解析により同定するものとするが、材料の表面の状態や風速によって決まるもので、坑内は閉ざされた空間であり、風速も小さくなると考えられることから、基本解析においては表-5.5に示す値を基本値とした。

表-5.3 解析に用いた材料特性値などの入力値

部材(要素)名	項目	単位	入力値				
			覆工1	覆工2	覆工3	覆工4	覆工5
コンクリート	初期温度	°C	30				
	打込み時間		9:00	11:00	13:00	14:00	16:00
	断熱温度上昇特性 Q_0	°C	50.16				
	断熱温度上昇特性 γ		1.79				
	熱伝導率	W/m°C	2.7				
	比熱	kJ/kg°C	1.2				
	密度	Kg/m ³	2350				
吹付け コンクリート	初期温度	°C	25.0				
	熱伝導率	W/m°C	2.7				
	比熱	kJ/kg°C	1.2				
	密度	Kg/m ³	2350				
岩盤	初期温度	°C	25.0				
	熱伝導率	W/m°C	2.6				
	比熱	kJ/kg°C	1.05				
	密度	Kg/m ³	2400.0				
防水シート	初期温度	°C	25.0				
	熱伝導率	W/m°C	3.0 (換算値:表-5.6参照)				
	比熱	kJ/kg°C	2.3				
	密度	Kg/m ³	100.0 (換算値:表-5.6参照)				

表-5.4 セントルありの場合のセントルの材料特性値

セントル	初期温度	℃	25.0
	熱伝導率	W/m℃	167.0 (換算値：表-5.6 参照)
	比熱	kJ/kg℃	0.44
	密度	Kg/m ³	3935.0 (換算値：表-5.6 参照)

表-5.5 表面の熱伝達率と坑内外気温

項目	熱伝達率 W/m ² ℃	坑内外気温 ℃	備考
コンクリート表面	4.0	25 (一定値)	
岩盤表面	4.0	25 (一定値)	
防水シート表面	4.0	25 (一定値)	
セントル表面・セントル介在	4.0	25 (一定値)	

5.1.3 セントル、防水シートおよび天端上面空気層のモデル化と入力値

(1) 要素形状と材料特性の考え方

防水シートやセントルを実際の寸法でモデル化するとアスペクト比（要素の縦と横の比率）の非常に大きな扁平要素になり、解析精度が低下する。そのため、防水シートは、吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの間に厚さ 20mm の要素としてモデル化し、セントルは、覆工コンクリートの内空側に厚さ 20mm の要素としてモデル化している。

要素の寸法が、実際と異なっていることから、解析で入力する材料特性値は、寸法の違いを考慮した換算した値を用いている。具体的には、実際の防水シートそのものの厚さは不織布と併せて2.0mm程度と考えられる。素材そのものの熱伝導率は0.3W/m℃であるが、要素の厚さが20mm（要素厚10倍）であることから、熱伝導率を10倍し、3.0W/m℃を換算した熱伝導率としている。比熱と密度は、解析上は熱容量として扱われるため、密度のみを換算し、防水シートそのものの密度1,000kg/m³を0.1倍した100kg/m³を換算した密度としている。

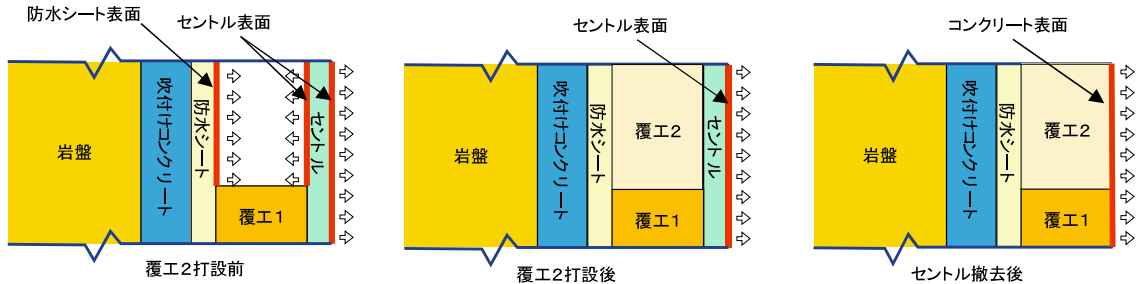
セントル（要素厚2倍）についても同様に入力値を設定した。材料そのものの値と換算した値を表-5.6に示す。

表-5.6 シートおよびセントルの材料特性の換算値

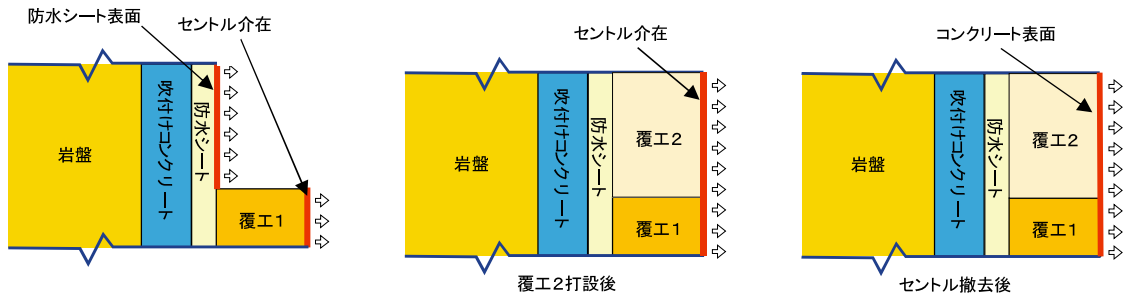
	換算前の値		換 算 値		備 考
	熱伝導率	密 度	熱伝導率	密 度	
	(W/m℃)	(kg/m ³)	(W/m℃)	(kg/m ³)	
防水シート	0.3	1000.0	3.0	100.0	要素厚 10 倍
セントル	83.5	7870.0	167.0	3935.0	要素厚 2 倍

(2) セントルのモデル化と熱伝達境界の考え方

セントルをモデル化した場合とモデル化しない場合の熱伝達境界の推移が良くわかるように、熱伝達境界の推移を覆工1から覆工2の打込み時を例にして図-5.4に示す。



(a) セントルをモデル化した場合



(b) セントルをモデル化しない場

図-5.4 熱伝達境界の推移

図-5.4(a)はセントルをモデル化した場合である。セントル撤去前は、覆工1で発生する水和熱は覆工1と接する防水シートおよびセントルとの熱の授受（熱伝導）を経て、防水シートおよびセントル内を移動し、それらの表面から放熱（熱伝達）される。セントル撤去後はコンクリート表面から直接、熱伝達されることとなる。

このため、覆工コンクリート（覆工2）とセントル間の境界面は、図-5.4(a)に示すように覆工2が打込まれるまではセントル表面の熱伝達率とし、覆工2打設後は熱伝達面ではなくなり、セントル撤去後はコンクリート表面の熱伝達率となる。

一方、図-5.4(b)はセントルをモデル化しない場合である。コンクリート表面は、始めはセントルを介したコンクリート表面の熱伝達率（以下、「セントル介在の熱伝達率」と称する）となり、セントル撤去後はコンクリート表面の熱伝達率となる。

すなわち、セントルをモデル化した場合は、セントル材料に熱伝導率を始めとする熱特性値を設定し、セントルでの熱の移動や放熱、セントル自体の温度上昇も含め、計算を行っているが、セントルをモデル化しない場合は、コンクリート表面の熱伝達率をセントル介在を考慮した熱伝達係数から、コンクリート表面の熱伝達率に変化させることで表現するものである。

(3) セントルのモデル化による効果の確認

覆工コンクリートの温度解析では、セントルの影響が考えられるため、従来と同様、セントルをモデル化しないもの（図-5.3(c)，以下「セントルなし」と称する）と、セントルを要素分割してモデル化したもの（図-5.3(b)，以下「セントルあり」と称する）の比較を行い、セントルの影響について考察する。セントルありとなしの節点温度の差分（セントルなしの節点温度を基準としたセントルありの節点温度）を図-5.5に示す。

なお、検討での節点温度の出力は、図-5.3に示す有限要素モデルの5つの覆工部分（図中の黄色い点）について行っている。

図-5.5の結果より、セントルありの場合は、セントルなしに比べ各節点温度は低くなる。とくに側壁下部（脚部）に相当する覆工1の節点温度は最大で1.8℃程度低くなる。これはセントルの熱伝導率が大きいため、熱の移動が速く、コンクリートの水和熱がセントルを伝わって拡散するとともに、セントル自体の温度上昇に費やされるためであり、その影響は最初にコンクリートを打込む脚部において最も大きいと推察される。

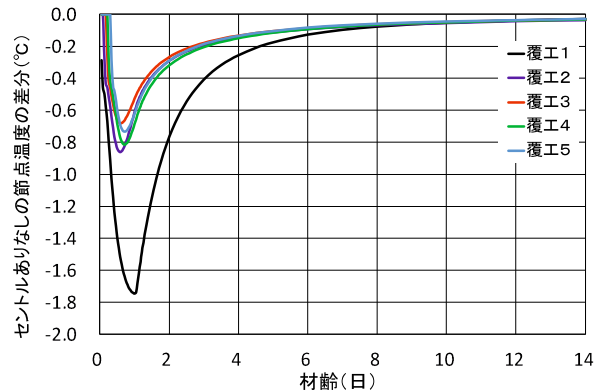


図-5.5 セントルありなしの節点温度の差分
（セントルなしの節点温度を基準とした
セントルありの節点温度）

(4) 天端上面の空気層のモデル化による効果の確認

前述したように覆工コンクリートの天端上面は熱伝導が界面の空気層で阻害されている可能性がある。

本研究では、天端上面の防水シートの熱伝導率を低減することによって界面の空気層の影響を表現した。

セントルありについて、防水シート天端部の熱伝導率を低減しないものと1/10、1/20に低減したときの天端部中心の節点温度の差分を図-5.6に示す。天端上面に空気層を考慮することによって、熱が背面に拡散しにくくなり、覆工コンクリート天端部中心の温度が3～5℃程度高くなる傾向を示すことが判明した。

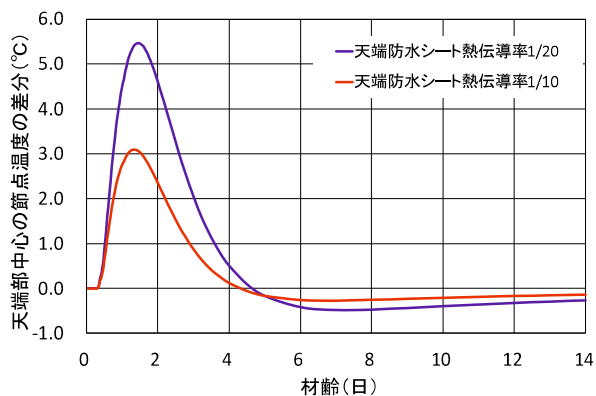


図-5.6 天端上面の空気層の影響による
天端部中心の節点温度の差分

5.2 覆工コンクリートの温度解析における材料特性値の検討

5.2.1 入力パラメータの感度解析

覆工コンクリートの温度解析を正確に行うためには、温度解析における入力値が温度解析結果にどの程度影響を及ぼすかを把握しておく必要がある。そこで、感度解析²⁾を行い、覆工コンクリートの温度解析に及ぼす入力値の影響を明らかにする。

有限要素モデルは図-5.3に示すものを用い、感度の算出は、図-5.3に示す5つの覆工部分（図中の黄色い点）についてセントルなしと、セントルありについて行う。温度解析に用いた入力パラメータは表-5.3～表-5.5のとおりである。セントルなしについては、表-5.4に示したセントルの物性値は使用しない。なお、セントルおよび防水シートは、5.1.3項で示したとおり換算値を使っている。

感度解析では、入力パラメータごとに、その入力値が10%大きくなった場合の各節点の温度変化量を感度と定義している。また、表-5.7、表-5.8中の正規化温度差とは、式(5.1)に示すように標準値を用いて計算した節点温度と、増加値を用いて計算した節点温度との温度差を全ステップ、5節点について平方和をしたものの平方根を全ステップ数、5節点で割ったもので、言い換えれば1ステップ1節点あたりの平均的な温度差である。

$$\theta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{nStep} \sum_{j=1}^{Node} (T_j - Ts_j)^2}}{nStep \times Node} \quad \dots (5.1)$$

ここに、 θ : 正規化温度差 (°C)

$nStep$: 全解析ステップ数 (=58)

$Node$: 観測節点数 (=5)

T_j : 増加値を用いて計算した節点温度 (°C)

Ts_j : 標準値を用いて計算した節点温度 (°C)

正規化温度差が大きければ節点温度に及ぼす影響が大きいものと考えられ、正規化温度差で影響順位を付けている。また、最大温度差は全ステップにおいて最も温度差が大きかったものである。

感度解析の結果ならびにその影響度合いをそれぞれ表-5.7と図-5.7、表-5.8と図-5.8に示す。図-5.7、図-5.8は影響順位ごとに各パラメータの正規化温度差を示した。

図-5.7、図-5.8によると、セントルなし、セントルありのどちらにおいても節点温度にはコンクリートの断熱温度上昇特性 Q_w が最も影響が大きい。次にコンクリートの比熱と坑内外気温が同程度で影響を及ぼす結果となっており、コンクリートの断熱温度上昇特性 γ が続いている。

表-5.7 感度解析結果（セントルなし）

入力パラメータ	単位	標準値	10% 増加率	正規化 温度差	最大 温度差	影響 順位
コンクリート熱伝導率	W/m°C	2.70	2.97	0.0197	-0.564	5
コンクリート比熱	kJ/kg°C	1.20	1.32	0.0473	1.245	2
コンクリート断熱温度上昇特性 Q_{∞}	°C	50.16	55.18	0.0850	2.163	1
コンクリート断熱温度上昇特性 γ	—	1.79	1.96	0.0341	1.185	4
岩盤熱伝導率	W/m°C	2.60	2.86	0.0053	-0.194	8
岩盤比熱	kJ/kg°C	1.05	1.16	0.0052	-0.177	9
防水シート熱伝導率	W/m°C	3.00	3.30	0.0015	-0.041	10
防水シート比熱	kJ/kg°C	2.30	2.53	0.0001	-0.005	11
コンクリート表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0130	-0.440	6
岩盤表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0000	-0.003	12
防水シート表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0000	-0.001	13
セントル介在の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0102	-0.399	7
坑内外気温	°C	25.00	27.50	0.0467	1.527	3

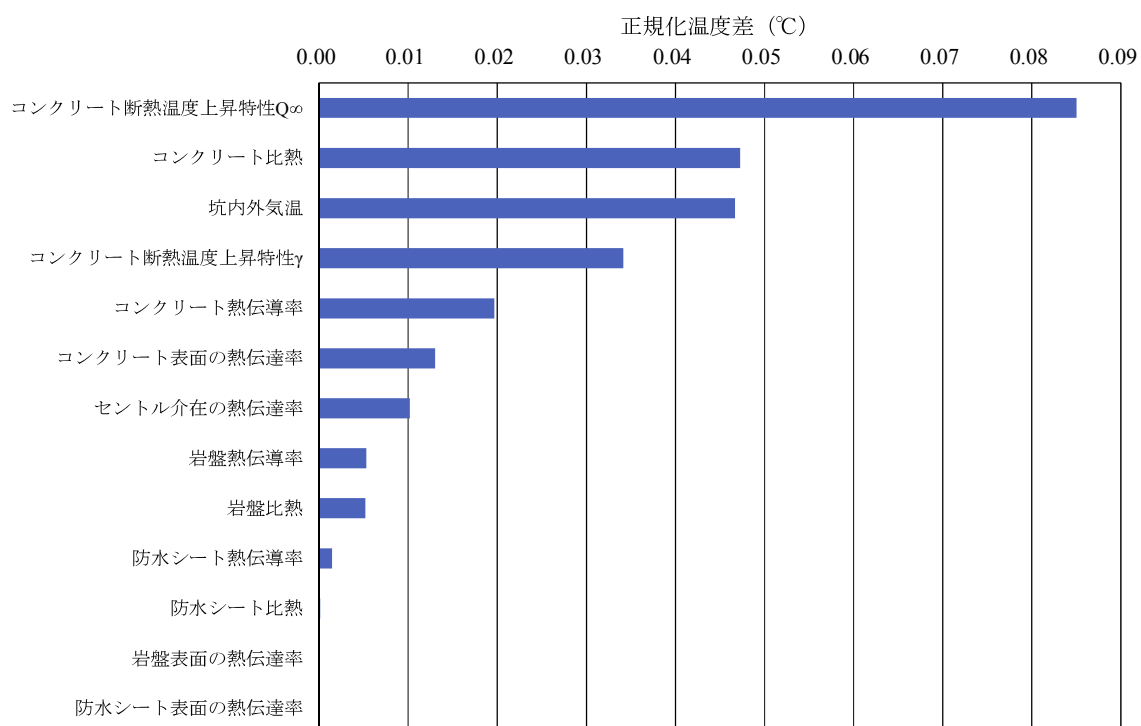


図-5.7 入力パラメータの影響度合い（セントルなし）

表-5.8 感度解析結果（セントルあり）

入力パラメータ	単位	標準値	10% 増加率	正規化 温度差	最大 温度差	影響 順位
コンクリート熱伝導率	W/m°C	2.70	2.97	0.0189	-0.520	5
コンクリート比熱	kJ/kg°C	1.20	1.32	0.0468	1.196	3
コンクリート断熱温度上昇特性 Q_{∞}	°C	50.16	55.18	0.0828	2.124	1
コンクリート断熱温度上昇特性 γ	—	1.79	1.96	0.0332	1.125	4
岩盤熱伝導率	W/m°C	2.60	2.86	0.0053	-0.188	8
岩盤比熱	kJ/kg°C	1.05	1.16	0.0052	-0.173	9
防水シート熱伝導率	W/m°C	3.00	3.30	0.0014	-0.040	11
防水シート比熱	kJ/kg°C	2.30	2.53	0.0001	-0.004	13
セントル熱伝導率	W/m°C	167.00	183.70	0.0011	-0.069	12
セントル比熱	kJ/kg°C	0.44	0.48	0.0016	-0.051	10
コンクリート表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0127	-0.433	6
岩盤表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0001	-0.007	14
防水シート表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0000	-0.001	15
セントル表面の熱伝達率	W/m ² °C	4.00	4.40	0.0087	-0.338	7
坑内外気温	°C	25.00	27.50	0.0489	-1.533	2

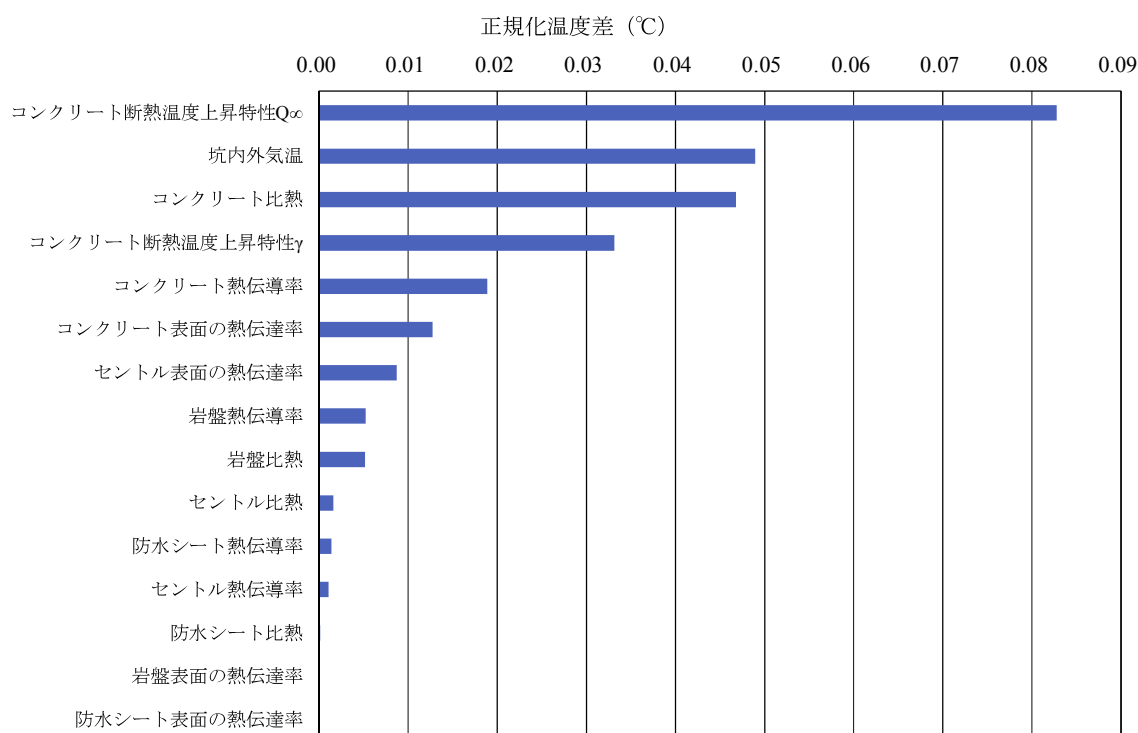


図-5.8 入力パラメータの影響度合い（セントルあり）

参考のため、セントルなしについて、表-5.3に示す標準値で解析した節点の温度履歴を図-5.9に示し、代表的な感度履歴を図-5.10～図-5.16に示す。

図-5.9には、覆工コンクリート各節点の温度履歴を示す。各節点ともに48°C付近まで温度上昇し、その後坑内外気温（25°C）に向けて収束している。初期の段階で温度が一旦下がっているが、これは、打込み温度が30°Cで、坑内外気温を25°Cと設定しているためである。また、覆工1の温度が他より少し外れているが、これは、覆工1のみが下端で岩盤と接しており、岩盤へ熱が移動するためである。

図-5.10にコンクリートの断熱温度上昇特性 Q_{∞} の感度履歴を示す。とくに発熱が活発な材齢初期に影響が大きく、 Q_{∞} の値が10%大きくなれば、最大で節点温度は2°C程度高くなる結果となった。

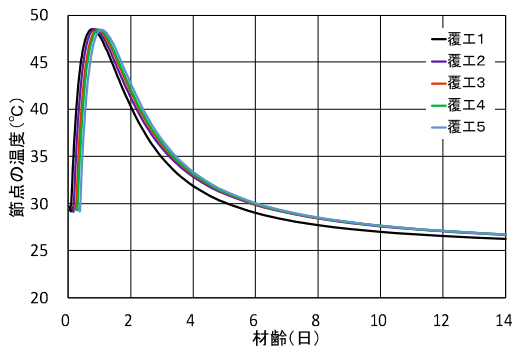


図-5.9 覆工コンクリートの温度履歴

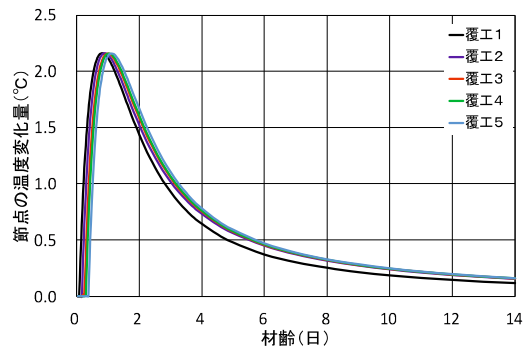


図-5.10 コンクリートの断熱温度上昇特性 Q_{∞} の感度履歴

図-5.11にコンクリートの断熱温度上昇特性 γ の感度履歴を示す。 γ は発熱速度に関する係数であるため、その感度は、材齢初期に影響が大きくなる。

図-5.12にコンクリートの熱伝導率の感度履歴を示す。熱伝導率が大きくなると熱が伝わりやすくなる。感度が負になっていることから、熱伝導率が大きくなると節点温度は低くなることとなる。

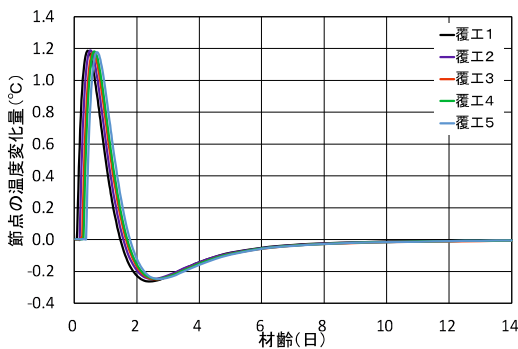


図-5.11 コンクリートの断熱温度上昇特性 γ の感度履歴

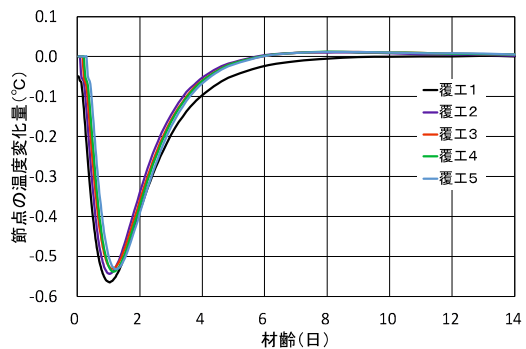


図-5.12 コンクリートの熱伝導率の感度履歴

図-5.13に岩盤の熱伝導率の感度履歴を示す。岩盤の熱伝導率が大きくなるほど岩盤内を熱が伝わりやすくなり、感度が負になっていることから節点温度は低くなることを示している。地山強度が低いほど熱伝導率は小さくなるため、覆工コンクリート温度が高くなる。

図-5.14にコンクリート表面の熱伝達率の感度履歴を示す。コンクリート表面の熱伝達率が大きくなると覆工コンクリートから外気に熱が移動しやすくなるため、感度は負になっている。

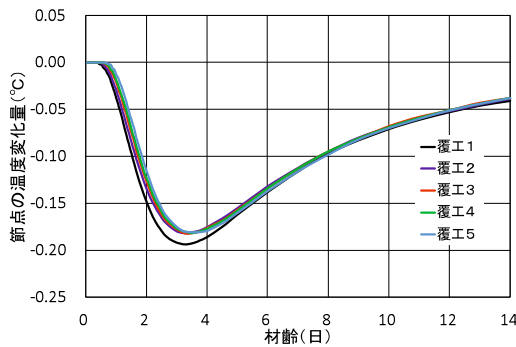


図-5.13 岩盤の熱伝導率の感度履歴

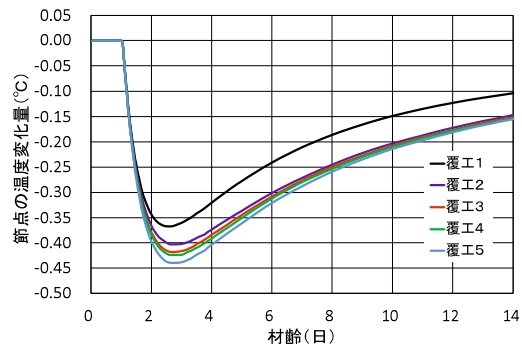


図-5.14 コンクリート表面の熱伝達率の感度履歴

図-5.15にセントル介在の熱伝達率の感度履歴を示す。熱伝達境界面がセントル介在となるのは、セントルが撤去されるまでの期間である。この期間に感度が負になっていることから節点温度は低くなる。また、セントルが撤去されるとその熱伝達面はコンクリート表面となるため、セントルの影響は徐々になくなる。材齢が進むほどコンクリートの水和発熱は収まり、坑内外気温に収束するため、図-5.16に示す坑内外気温の感度は、材齢の経過とともに大きくなる。最終的には坑内外気温に収束するため、最終値は坑内外気温の増加分(2.5°C)となる。

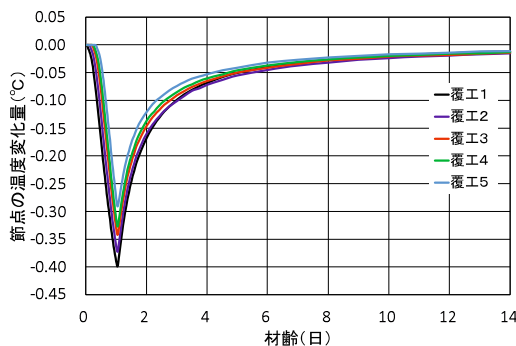


図-5.15 セントル介在の熱伝達率の感度履歴

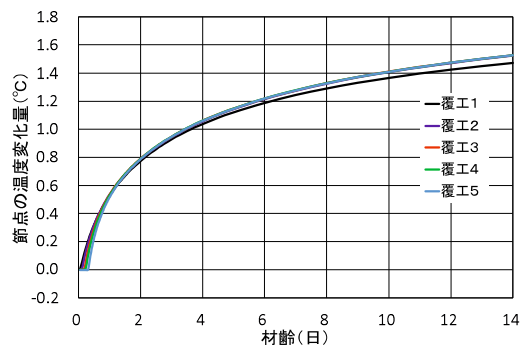


図-5.16 坑内外気温の感度履歴

5.2.2 逆解析による材料特性値の検討

前項で温度解析に及ぼす入力パラメータの影響を把握することができた。感度の大きな入力パラメータは、温度解析に及ぼす影響が大きいことを示し、信頼性の高い温度解析を実施するには、正確な値を入力する必要がある。Fトンネルでは、図-5.17に示すようにトンネル内の坑内外気温、覆工コンクリートの温度が計測されており、本研究ではこの計測値にフィッティングさせる形で、逆解析により入力値の検討を行う。

逆解析の手法には、simplex法、ガウス・ニュートン法、拡張カルマンフィルターなど様々な手法があるが、本研究では、熱伝導有限要素解析プログラムにそれほど手を加えなくても逆解析が行えるPSOを用いた。PSOは連続量の最適化に適しており、微分などの複雑な計算が不必要で、評価値が得られるものであれば、最適化できる汎用性のある最適化手法である。本研究では、非定常熱伝導有限要素解析プログラムにPSOを組み込むことにより、逆解析を行っている。詳しい解析手法については、3.4.2項を参照されたい。

(1) 逆解析に用いる計測データ

逆解析では、計算された値が、観測された値（計測データ）にフィットするように入力値の同定を行う。本研究では、図-5.2に示す熱電対①、②（天端部）、熱電対③、④、⑤（側壁部）で計測された温度を逆解析での計測データとして用いた。具体的な計測温度の履歴は図-5.17に示すとおりである。

逆解析における計測温度は、天端部の内側と外側、側壁部の内側と中央と外側の温度履歴はあまり変わらないことから、熱電対①および③で計測された温度を用い、解析モデルでの対応節点である節点950（天端）と節点462（側壁）の計算温度との差が最小になるように入力値を同定した。

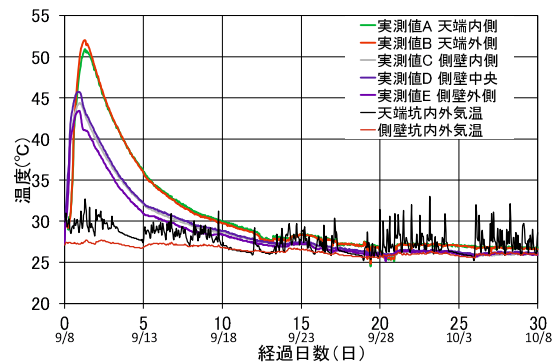


図-5.17 温度計測結果（図-4.52 を再掲）

(2) 逆解析に用いる入力パラメータの選定

温度解析に用いる入力パラメータには逆解析により同定が必要なものと、規準類から設定が可能な入力パラメータや感度が低いため逆解析による同定が必要でない入力パラメータがある。そこで、逆解析による同定が必要か否か、入力パラメータについて検討を行う。

コンクリートの熱伝導率や比熱は、通常のマスコンクリートでも覆工コンクリートでも、一般的な配合のコンクリートであれば変わらないため、規準類に示されている一般的な値を用いても差し支えないと考えられる。

a) 断熱温度特性

コンクリートの断熱温度上昇特性の Q_0 や γ は感度解析の結果から温度解析に及ぼす影響は大きい。一般的なマスコンクリートの温度解析では、体積に比べ表面積が小さいことから、通常は、新設コンクリートの全断面において断熱温度上昇と同様の水和発熱が起こっていると仮定して温度解析が行われている。

しかしながら、覆工コンクリートは部材厚が薄いため、図-5.1にも示したように断熱温度上昇と同様の水和発熱が起こっていると仮定するには限界がある。

セメントの水和は化学反応であり温度依存性がある。すなわち温度が高い場合には水和は促進され、温度が低い場合には水和は抑制される。覆工コンクリートは部材厚が薄いため、断熱状態に比べコンクリート温度が低くなっており水和が抑制されているが、一般的な解析では考慮されていない。このため、本研究では、従来の断熱温度上昇式を実務的に使用するにあたり、便宜的に見掛けの断熱温度上昇特性を用いることを提案し、コンクリートの断熱温度特性の Q_0 や γ は、逆解析により同定する。

b) 岩盤の熱伝導率，比熱

覆工コンクリートは岩盤に接している面積が比較的広いため、岩盤の熱伝導率や比熱の影響は、マスコンクリートに比べ大きいと判断される。これは、感度解析の結果からもうかがえる。しかしながら、岩盤の種類によってそれらの値は大きく異なるため、正確な値を把握するのは難しい。

コンクリート標準示方書³⁾では、一般的な岩盤の熱伝導率は、1.7~5.2W/m°Cと記されており、その幅は大きい。また、マスコンクリートのひび割れ制御指針⁴⁾には岩盤の種類と密度や比熱，熱伝導率の目安が記載されている。これをもとに補間値を計算した結果、岩盤の密度と比熱および熱伝導率は概ね表-5.9のように整理できる^{5),6)}。表中の着色部は、マスコンクリートのひび割れ制御指針⁴⁾の値を準用した箇所である。

表-5.9 岩盤の熱伝導率の目安

密度 kg/m ³	熱伝導率 W/m°C	比熱 kJ/kg°C	地山等級との対比 (参考)	
			旧 JH ⁵⁾	JRTT ⁶⁾
1600	0.64	3.50		S1
1700	0.81	3.05		
1800	1.00	2.60		S2
1900	1.21	2.15		R1
2000	1.44	1.70	E	S3, R2
2100	1.70	1.60	D II	R3
2200	1.98	1.25	D I	R4
2300	2.28	1.10	C II	R5
2400	2.60	1.05	C I	R6
2500	2.94	0.95	B	R7
2600	3.31	0.85	A	R8
2650	3.50	0.80		
2700	3.70	0.75		

c) 熱伝達率

一般的に熱伝達率は、風速が速いと熱伝達率は大きくなるとされている。規準類^{3),4)}に示されている熱伝達率の値(表-5.10)は、吹きさらしの屋外を想定しているが、トンネル施工中の坑内は閉鎖された空間であり、コンクリート表面などの熱伝達率は規準類に示されている値より小さくなることが予想されるため、熱伝達率は逆解析により同定する。なお、熱伝達率は材料の表面の状態(コンクリート表面の被覆状態など)や風速により決まるが、セントルありの場合は、型枠そのものをモデル化したので、コンクリート表面、セントル表面も外気に直接接触れることから、同様の値を基本とした。

表-5.10 熱伝達率の参考値^{3),4)}

No.	養生方法	熱伝達率 (W/m ² °C)
1	メタルフォーム	14
	湛水(湛水深さ10mm未満)	
2	散水(湛水深さ10mm未満)	8
3	湛水(湛水深さ10mm以上50mm未満)・むしろ養生を含む	8
4	湛水(湛水深さ50mm以上100mm未満)	8
5	合板	6
6	シート	5
7	養生マット・湛水+養生マット, 湛水+シートを含む	2
8	発泡スチロール(厚さ50mm)+シート	6, 4, 2
9	コンクリート・地盤・岩盤の露出面	14

(3) トンネル坑内外気温のモデル化

坑内外気温は、図-5.16に示すように材齢が進むほど節点温度に大きな影響を及ぼす。覆工コンクリートの温度計測では、一般的に図-5.17に示すように同じ配合のコンクリートを使っても側壁部よりも天端部の温度が高く、その原因は明らかでない。原因の一つとしては、図-5.18に示すように坑内外気温がトンネル断面の高さ方向に高くなっていること、打込みが午後になることが多く、打込み温度も高くなることなどの影響が考えられる。

本研究では、坑内外気温の高さ方向の相違についても考慮するものとした。

逆解析においては、高さ方向に2点以上の実測値がある場合は、実測値を用い、高さ方向に1点しか測定されていない場合は、以下に示すようなモデル化を行い、その入力値を逆解析で同定する。

坑内外気温を時間と高さの関数として式(5.2)および式(5.3)でモデル化する。

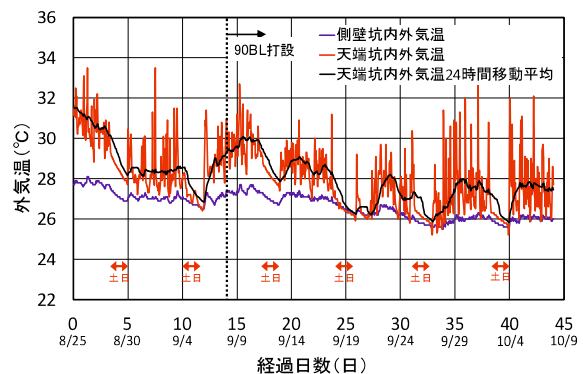


図-5.18 坑内外気温計測結果(図-4.53を再掲)

式 (5.2) は経過時間による上部と下部の温度差を表したものであり、式 (5.3) は高さ方向の温度補正量を表したものである (図-5.19, 図-5.20参照)。

$$K(t) = K_{\max} - \varphi \cdot t \quad \dots (5.2)$$

$$\Delta T(t, y) = K(t) \cdot y^\alpha \quad \dots (5.3)$$

ここに、 $K(t)$ は経過時間 t ごとの上部と下部の温度差 (°C)

K_{\max} : 上部と下部の初期最大温度差 (°C)

φ : 温度降下勾配 = 上部と下部の温度差の減少率 (°C/hour)

t : 経過時間 (hour)

$\Delta T(t, y)$: 高さ方向の温度補正量 (°C)

α : 高さ方向の分布形状を決める係数

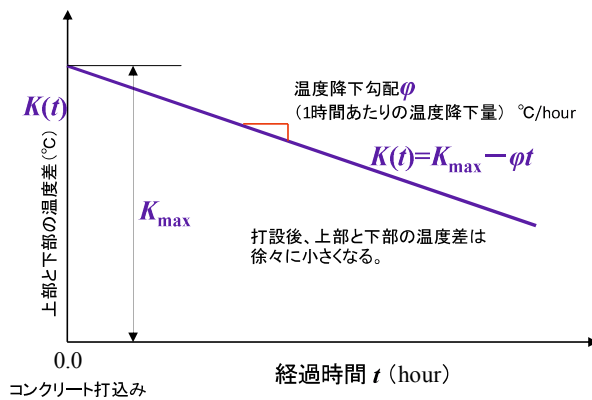


図-5.19 経過時間ごとの上部と下部の温度

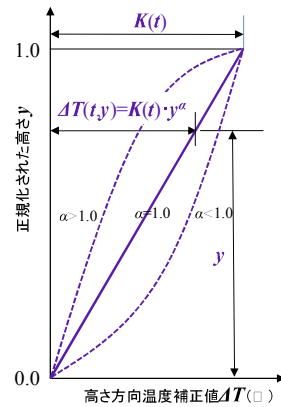


図-5.20 高さ方向の温度補正値

高さ方向の分布形状は、例えば α の値を1.0とすると直線分布となり、 α の値が1.0より小さい場合は下に凸、1.0より大きい場合は上に凸の分布となる。

また、坑内外気温は計測された値があることから、高さ方向に線形で温度が高くなる (図-5.20中の $\alpha=1.0$ の場合) ものとし、それぞれの覆工位置の坑内外気温を図-5.21のように設定した。

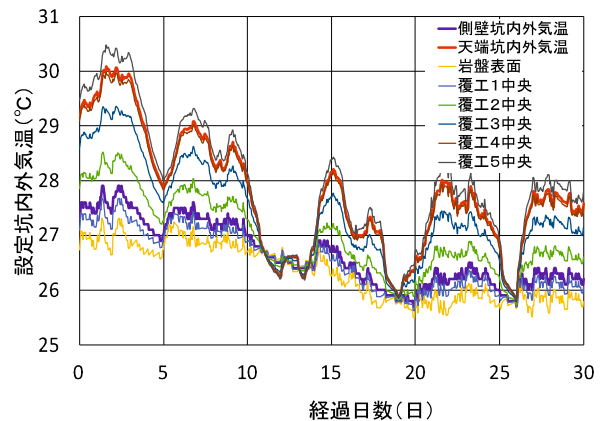


図-5.21 設定した坑内外気温

(4) 材料特性値の設定と同定する入力パラメータ

逆解析による入力パラメータの同定では、より正確なモデル化を行ったうえで、同定する入力パラメータ以外の値はできるだけ慎重に設定しておく必要がある。これは、設定値に誤差があると、その誤差を含めて入力パラメータを同定することになるためである。逆解析はより精度よく行うため、「セントルあり」で、天端上面の空気層を考慮したものについて行う。

同定する入力パラメータは、前述したようにコンクリートの断熱温度上昇特性 Q_{∞} , γ , コンクリートとセントル表面の熱伝達率, 天端上面防水シート(天端上面の空気層の箇所)の熱伝導率である。

その他の入力値については、規準類を参考に表-5.11のように設定した。岩盤は前述の表-5.9より、当該箇所の岩盤状況から設定、吹付けコンクリート、防水シート、セントルの熱伝導率, 比熱, 密度はそれぞれ、表-5.3にも示した標準的な値を用いる。

表-5.11中の着色部分は同定した入力パラメータであり、同じ色の箇所は同じ値として同定した。なお、表中の Q_{∞} , γ の()内数値は、単位セメント量, 打込み温度をもとに規準類から計算した断熱温度上昇特性である。覆工5は、打込み温度が異なるため他と比べ異なった値となっている。

表-5.11 材料特性値の設定と同定

部 位	熱伝導率 W/m°C	比熱 kJ/kg°C	密度 kg/m ³	熱伝達率 W/m ² °C	Q_{∞} °C	γ	
岩盤	2.6	1.05	2400	4.0	—	—	
吹付けコンクリート	2.7	1.2	2350	—	—	—	
防水シート	3.0	2.3	100	4.0	—	—	
天端上面防水シート	同定	2.3	100	4.0	—	—	
セントル	167	0.435	3935	同定	—	—	
覆工1	2.7	1.2	2350		同定	同定 (50.15)	同定 (1.796)
覆工2							
覆工3							
覆工4							
覆工5							

5.2.3 PSOによる逆解析と同定結果

(1) Case-1 (断熱温度上昇特性値を含めた同定)

表-5.11に示した天端上面の防水シート（空気層を考慮）の熱伝導率，覆工コンクリートおよびセントルの熱伝達率，覆工コンクリートの断熱温度上昇特性の Q_{∞} ， γ の4項目の同定を行った。

同定された入力値を表-5.12に，その同定値を用いた順解析の結果を図-5.22に示す。

表-5.12 同定された入力値 (Case-1)

入力パラメータ	標準値	同定値	比率
断熱温度上昇特性 Q_{∞} (°C)	50.15	38.69	0.77
断熱温度上昇特性 γ	1.796	1.544	0.86
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m°C)	—	0.101	—
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² °C)	—	2.043	—

断熱温度上昇特性の同定値は，単位セメント量や打込み温度から規準類で計算したものに比べ小さくなっている。小さくなる比率は，断熱温度上昇特性の Q_{∞} で8割弱， γ で8割強となっている。

次に天端上面の空気層の影響を考慮する天端上面防水シートの熱伝導率の同定値は，0.101 W/m°Cとなり，表-5.11に示す防水シートの熱伝導率の約1/30となっている。

コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率の同定値は，2.043 W/m²°Cであり，規準類に示されている値（14.0 W/m²°C）より大幅に小さな値となっている。

これは，坑内が閉鎖された空間で，ほとんど風速の影響を受けない環境であったことを示していると考えられる。

ただし，数値が一般値と比較して，極端に低いもので，他の誤差を含んだ同定結果となっている可能性も考えられる。

同定された値を用いた順解析の結果（計算値）と計測値との比較を図-5.22に示す。同定された値を用いた計算値と計測値は，天端部の温度下降時期でややずれているが，他は非常に良く一致している。

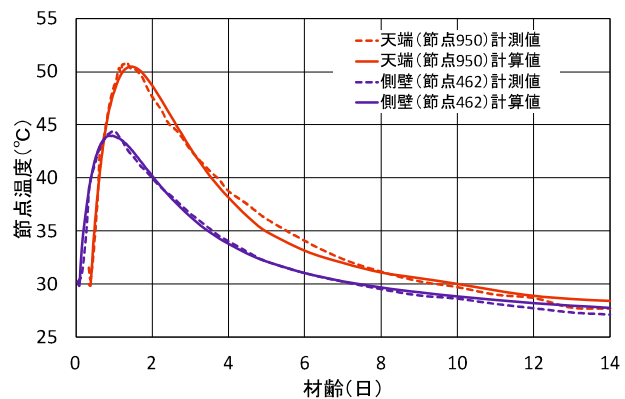


図-5.22 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (Case-1)

(2) Case-2 (断熱温度上昇特性値を補正值に固定した熱伝達率の同定)

規準類に示されている断熱温度上昇特性は、セメントの種類、単位セメント量、打込み温度で決まる値で、一般的には、材料の持つ特性値であると解釈されている。

しかし、一方では、覆工コンクリートはマスコンクリートと異なった構造であり、必ずしもマスコンクリートを対象として実験で得られた断熱温度上昇特性をそのまま使用できないことも想定できる。

そこで、事前の温度ひび割れ解析に用いることができるように、前述の同定結果を参考に、規準類で算定される断熱温度上昇特性 Q_{∞} 、 γ を8割に減じた値を覆工コンクリートの温度解析に用いる。

断熱温度上昇特性を8割に固定した状態で、再度、天端上面防水シートの熱伝導率やコンクリートおよびセントル表面の熱伝達率を同定した結果を表-5.13および図-5.23に示す。

表-5.13 同定された入力値 (Case-2)

入力パラメータ	同定値
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m ² C)	0.098
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² C)	2.342

同定された値をみると天端上面防水シートの熱伝導率は0.098 W/m²Cと若干ではあるが、前述した断熱上昇特性を固定しない場合より値が小さくなっている。

コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率は、2.342 W/m²Cであり、前述した断熱上昇特性を固定しない場合と比較して、若干大きな値となっている。

同定された値を用いた順解析の結果(計算値)と計測値を比較すると、図-5.23に示すように、同定された値を用いた計算値は計測値と良く一致している。

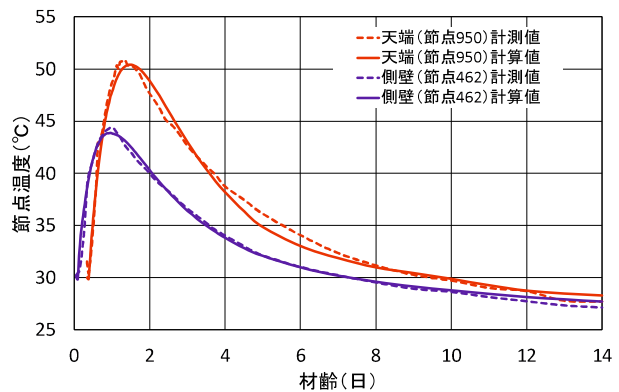


図-5.23 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (Case-2)

(3) Case-3 (上下部の温度差を含めた同定)

坑内外気温については図-5.21に示すように計測値を高さ方向に線形補間したが、実際は高さ方向の分布が明確でなく、温度差は大きくばらついている。

そこで、参考のため、断熱温度上昇特性を8割に固定した状態で、外気温の入力パラメータ K_{max} 、 ϕ 、 α を含めて、天端上面防水シートの熱伝導率やコンクリートおよびセントル表面の熱伝達率を同定した。同定した結果を表-5.14および図-5.24に示す。

表-5.14 同定された入力値 (Case-3)

入力パラメータ	同定値
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m ² °C)	0.158
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² °C)	2.296
上部と下部の初期最大温度差 K_{max} (°C)	9.1
1時間あたりの温度降下量 φ (°C/hour)	0.043
高さ方向の分布形状係数 α	3.962

表-5.14によると、Case-1, Case-2で設定した K_{max} , φ の値よりも大きな値が同定されており、天端上面防水シートの熱伝導率は0.158 W/m²°Cと大きくなっている。これは上部と下部の温度差 K_{max} と天端上面防水シートの熱伝導率は、ともに天端と側壁部のコンクリートの温度差に寄与するものであることの影響であると考えられる。

コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率についてはほとんど変わらない結果となっている。

なお、同定された値を用いた順解析の結果（計算値）と計測値を比較すると、同定された値を用いた計算値は計測値と全ての材齢で非常に良く一致している。

解析結果に対する外気温の影響は大きく、外気温の設定が重要な要因であることが改めて、認識できた。

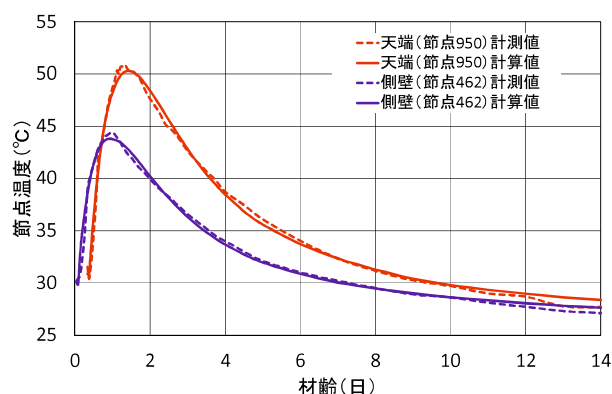


図-5.24 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (Case-3)

(4) Case-4 (セントルをモデル化しないケースの同定)

一般的な覆工コンクリートの温度解析では、セントルをモデル化しない場合が多い。そこで、セントルをモデル化しないケース（セントルなし）について、断熱温度上昇特性を8割に固定した状態で、再度、天端上面防水シートの熱伝導率やコンクリートおよびセントル表面の熱伝達率を同定した

セントルなしでは、セントルの影響が熱伝達境界の設定に効いてくる可能性があるため、熱伝達率はコンクリート表面、セントル介在に分けて同定する。

同定した結果を表-5.15に、同定された値を用いた準解析の結果を図-5.25に示す。

表-5.15 同定された入力値 (Case-4)

入力パラメータ	同定値
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m ² °C)	0.096
コンクリート表面の熱伝達率 (W/m ² °C)	2.537
セントル介在の熱伝達率 (W/m ² °C)	3.102

表-5.15に示すように、同定された値をみると、前述の表-5.13と比較して、天端上面防水シートの熱伝導率は $0.096 \text{ W/m}^2\text{C}$ とほぼ変わらない。

コンクリート表面の熱伝達率は $2.537 \text{ W/m}^2\text{C}$ であり、あまり変わらないがセントル介在の熱伝達率は、本来であればセントルが熱を奪うため、 $3.102 \text{ W/m}^2\text{C}$ となり、若干大きな値となっている。

図-5.25に示すように、同定された値を用いた順解析の結果（計算値）と計測値を比較すると、Case-2, Case-3（図-5.23, 図-5.24参照）よりはやや離れているが、比較的一致している。

セントルなしのモデルでは、セントル介在の熱伝達率を大きくすることでセントルの影響をある程度考慮できる結果となった。

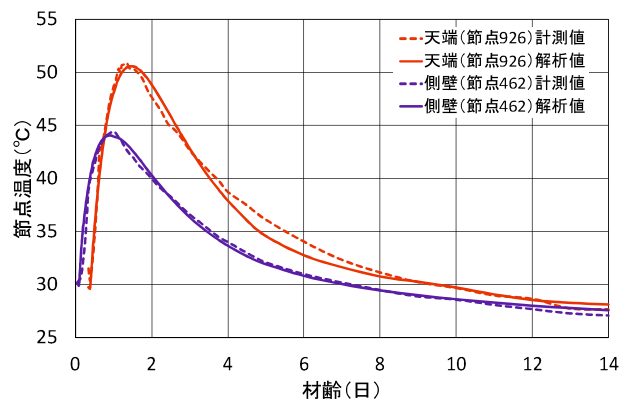


図-5.25 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (Case-4)

(5) 同定結果のまとめ

本件研究における同定結果により、以下のような知見が得られた。

- ◇ 覆工コンクリートにおいても、断熱温度上昇特性を低減することで、断熱温度上昇式を適用した温度解析により、実測値を再現することができる。すなわち、覆工コンクリートにおいても、断熱温度上昇式の適用は可能であり、適用にあたっては、断熱温度上昇特性値の補正を行うものとする。
- ◇ 水和発熱による覆工コンクリート温度は側壁部より天端の方が高くなる計測結果が得られるが、セントルおよび天端上部の空気層をモデル化することにより、この現象を合理的に説明できる。
- ◇ トンネル内、とくに覆工コンクリート施工箇所付近では、天端部と側壁部で坑内外気温に温度差があり、これを考慮した温度解析を行う必要があると考えられる。
- ◇ コンクリートやセントルの熱伝達率は、風速の影響を勘案し、トンネル内では低い値となる傾向が確認できた。

5.2.4 温度解析における提案入力値の検証

5.2.3項では、Fトンネルにおける計測結果を用いてPSOによる逆解析を行い、温度解析における材料特性値の検討を行った。本項では、さらにGトンネル、Dトンネルにおける計測結果を用いて、同様の逆解析を行った。また、5.4.1項では、高山らの実験トンネルに対して温度解析を実施しており、この結果を含めて材料特性値などの検証を行う。

(1) GトンネルAスパン

Gトンネルは、図-5.26に示す断面のトンネルであり、坑口付近の2スパンにおいて、覆工コンクリート打込み時に覆工コンクリート内の温度計測が行われている。

Aスパンでは膨張材、短繊維が添加されており、Bスパンは短繊維混入の普通コンクリートである。Aスパンのコンクリートの配合を表-5.16、および材料特性値を表-5.17に示す。

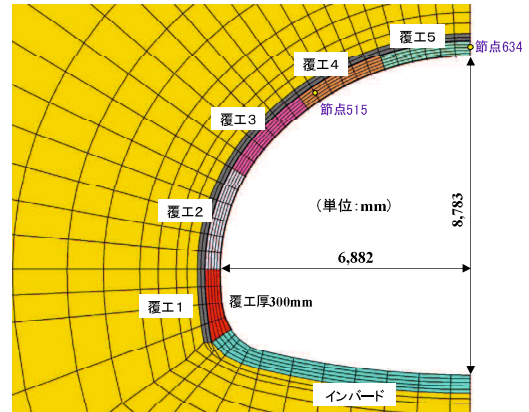


図-5.26 Gトンネル断面

表-5.16 覆工コンクリートの配合 (GTn. A)

水セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	膨張材 Ex (kg)	短繊維 kg
56	161	288	810	1048	20	0.91

膨張材：工場添加，セメント外割 20kg/m³

非鋼繊維補強：現場添加 (910g/m³)

表-5.17 材料特性値の設定と同定 (GTn. A)

部 位	熱伝導率 W/m°C	比熱 kJ/kg°C	密度 kg/m ³	熱伝達率 W/m ² °C	Q_{∞} °C	γ	
岩盤	2.0	1.25	2200	4.0	—	—	
吹付けコンクリート	2.7	1.2	2350	—	—	—	
防水シート	3.0	2.3	100	4.0	—	—	
天端上面防水シート	同定	2.3	100	4.0	—	—	
セントル	167	0.435	3935	同定	—	—	
覆工 1	2.7	1.2	2350		同定	同定	同定
覆工 2							
覆工 3							
覆工 4							
覆工 5							

天端上面シートの熱伝導率，セントルと覆工コンクリートの熱伝達率，温度上昇特性 Q_{∞} ， γ および坑内上下部の外気温差の同定を行った。

同定された入力値を表-5.18に，同定値を用いた順解析の結果を図-5.27に示す。

表-5.18 同定された入力値 (GTn. A1)

入力パラメータ	標準値	同定値	比率
断熱温度上昇特性 Q_{∞} (°C)	51.28	47.65	0.935
断熱温度上昇特性 γ	1.269	1.178	0.928
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m°C)	—	0.472	—
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² C)	—	8.309	—
上部と下部の初期最大温度差 K_{\max} (°C)		9.82	
1時間あたりの温度降下量 φ (°C/hour)		0.021	
高さ方向の分布形状係数 α		1.012	

断熱温度上昇特性の Q_{∞} および， γ で9割強となっている。次に天端上面の空気層の影響を考慮する天端上面防水シートの熱伝導率の同定値は，0.472 W/m°Cとなり，表-5.17に示す一般部の防水シートの熱伝導率の約16%となっている。

コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率の同定値は，8.3 W/m²Cであり，規準類に示されている値 (14.0 W/m²C) よりやや小さな値となっているが，Fトンネルに比較し，大きい値である。

同定された材料特性値を用いた順解析の結果では，側壁部のピーク温度がやや低い値となっているが，他はよく一致する。

次に， Q_{∞} ， γ を93%に低減した値を用いて，他の入力パラメータを同定した。同定した結果を表-5.19および図-5.28に示す。

表-5.19 同定された入力値 (GTn. A2)

入力パラメータ	同定値
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m°C)	0.38
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² C)	8.989
上部と下部の初期最大温度差 K_{\max} (°C)	9.987
1時間あたりの温度降下量 φ (°C/hour)	0.02
高さ方向の分布形状係数 α	3.962

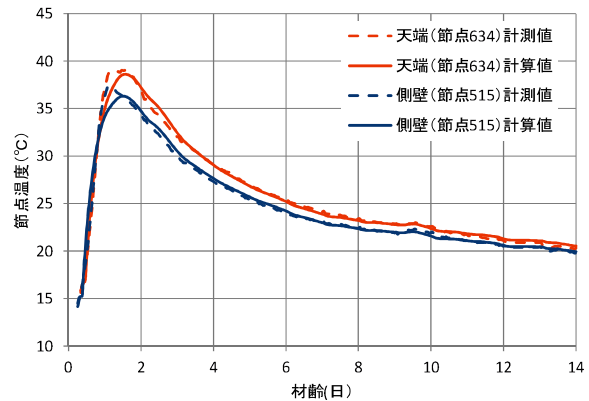


図-5.27 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (GTn. A1)

天端上面防水シートの熱伝導率は $0.38 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ と前述の同定結果と比較し、小さくなっており、熱伝達率は大きくなっている。

同定された材料特性値を用いた順解析の結果では、側壁部のピーク温度がやや低い値となっているが、他はよく一致する。

GトンネルAスパンでは、前述したFトンネルにおける同定結果と比較して、 Q_{∞} 、 γ の低減率が大きくなっている。これは、膨張材使用の影響による可能性もあると考えられる。

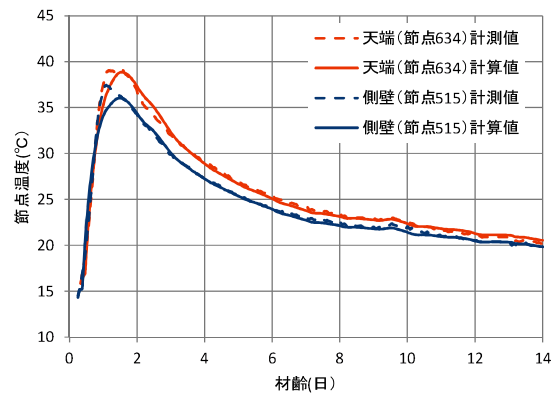


図-5.28 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (GTn. A2)

(2) GトンネルBスパン

前述のAスパンと隣接するスパンである。膨張材は使用されていないが、他はほぼAスパンと同様の条件である。覆工コンクリートの配合を表-5.20に示す。

表-5.20 覆工コンクリートの配合 (GTn. B)

水セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	膨張材 Ex (kg)	短繊維 Kg
56	161	288	810	1059	—	0.91

非鋼繊維補強：現場添加 (910g/m^3)

同定された入力値を表-5.21に、同定値を用いた順解析の結果をび図-5.29に示す。

表-5.21 同定された入力値 (GTn. B)

入力パラメータ	標準値	同定値	比率
断熱温度上昇特性 Q_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	48.90	39.36	0.805
断熱温度上昇特性 γ	1.220	0.980	0.803
天端上面防水シートの熱伝導率 ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)	—	0.324	—
コンクリートおよびセメントル表面の熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{C}$)	—	3.17	—
上部と下部の初期最大温度差 K_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	—	5.411	—
1時間あたりの温度降下量 φ ($^{\circ}\text{C}/\text{hour}$)	—	0.001	—
高さ方向の分布形状係数 α	—	2.398	—

断熱温度上昇特性の Q_{∞} 、 γ で8割程度とFトンネルと同様の結果が得られた。次に天端上面の空気層の影響を考慮する天端上面防水シートの熱伝導率の同定値は、 $0.324 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ となり、表-5.17に示す一般部の防水シートの熱伝導率の約10%となっている。

コンクリートおよびセメントル表面の熱伝達率の同定値は、 $3.17 \text{ W/m}^2\text{C}$ であり、規準類

に示されている値 (14.0 W/m²°C) より小さな値で、Fトンネルよりはやや大きい値である。

全般に計測結果との整合がよく、また、Fトンネルの同定結果ともよく整合する結果が得られている。

(3) Dトンネル

Dトンネルは、3.4.3項の試算に用いた図-5.30に示す断面のトンネルである。計測箇所は坑口部にあたり、鉄筋補強され、覆工コンクリート厚さが35cmであること、脚部および天端部に膨張材（側壁部は普通コンクリート）が添加されていることなど、やや条件が異なるスパンである。コンクリートの配合を表-5.22に示す。

また、コンクリート温度のピーク温度の計測値も、天端部=60.9°C、側壁=50.9°C、脚部=52.4°Cとなっており、ピーク温度が非常に高くなっているとともに、側壁部と天端部のピーク温度の差も大きく、他のデータと異なる傾向を示している。

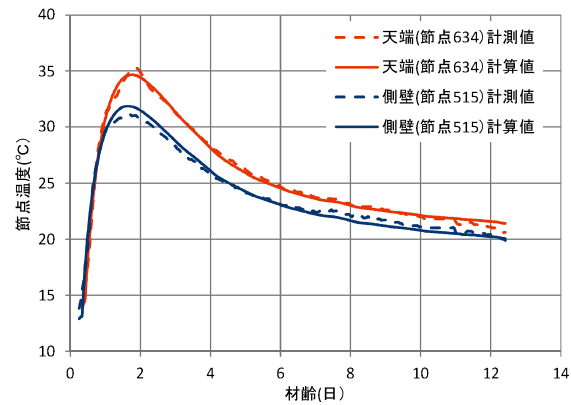


図-5.29 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (GTn. B)

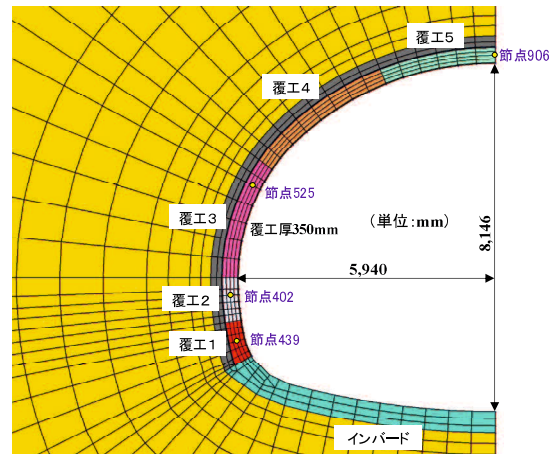


図-5.30 Dトンネル断面

表-5.22 覆工コンクリートの配合 (DTn.)

水セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	膨張材 Ex (kg)
55	164	299	940	918	20 (脚部・天端のみ)

膨張材：工場添加，セメント外割 20kg/m³

試行計算の結果、普通コンクリートを使用した側壁部の Q_c および γ は、基準類の計算式に基づく標準値を、また、膨張材を使用した脚部および天端のコンクリートでは断熱温度上昇特性 Q_m を1.1倍、 γ を1.2倍するものとする。このため、これらの値を固定して、天端上面防水シートの熱伝導率、セメントと覆工コンクリートの熱伝達率および坑内上下部の外気温差の同定を行った。

同定された入力値を表-5.24に示す。天端上面の空気層の影響を考慮する天端上面防水シートの熱伝導率の同定値は、0.083 W/m²°Cと小さな値であり、一般部の防水シートの熱伝導率の約2.8%となっている。コンクリートおよびセメント表面の熱伝達率の同定値は、9.4 W/m²°Cであり、規準類に示されている値 (14.0 W/m²°C) より小さな値で、Fトンネ

ルよりはやや大きい値であるが、ほぼ同様の傾向を示す。

同定値を用いた順解析の結果を図-5.31に示すが、比較的整合する結果が得られている。

表-5.23 熱特性値の設定と同定 (DTn.)

部 位	熱伝導率 W/m°C	比熱 kJ/kg°C	密度 kg/m ³	熱伝達率 W/m ² °C	Q_{∞} °C	γ
岩盤	1.7	1.6	2100	4.0	—	—
吹付けコンクリート	2.7	1.2	2350	—	—	—
防水シート	3.0	2.3	100	4.0	—	—
天端上面防水シート	同定	2.3	100	4.0	—	—
セントル	167	0.435	3935	同定	—	—
覆工1 (膨張材あり)	2.7	1.2	2350		57.32 (1.1)	2.19 (1.2)
覆工2					49.67 (1.0)	1.775 (1.0)
覆工3						
覆工4						
覆工5						
覆工6						
覆工7 (膨張材あり)					57.07 (1.1)	2.51 (1.2)

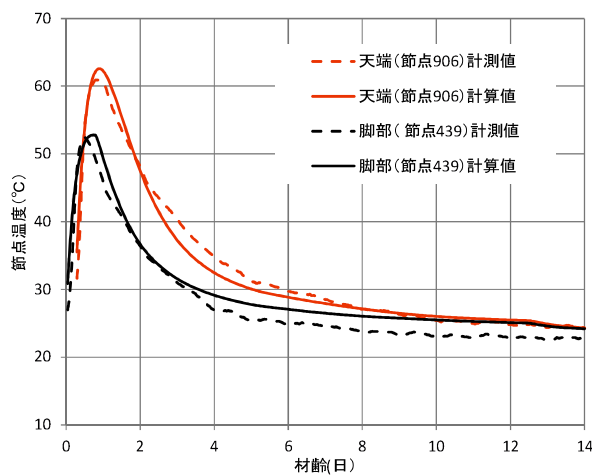
Q_{∞} , γ の値は、それぞれ () 内の補正值により補正したものである。

覆工1 : $Q_{\infty}=52.11 \times 1.1=57.32$, $\gamma=1.827 \times 1.2=2.19$

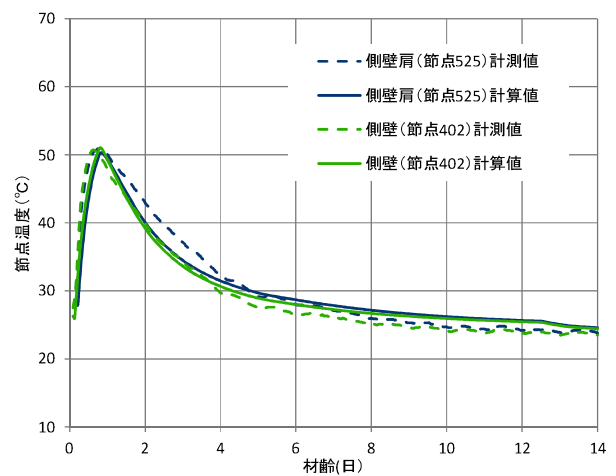
覆工7 : $Q_{\infty}=51.88 \times 1.1=57.07$, $\gamma=2.093 \times 1.1=2.51$

表-5.24 同定された入力値 (DTn.)

入力パラメータ	標準値	同定値	比率
天端上面防水シートの熱伝導率 (W/m°C)	—	0.083	—
コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率 (W/m ² °C)	—	9.434	—
上部と下部の初期最大温度差 K_{\max} (°C)		4.969	
1時間あたりの温度低下量 ϕ (°C/hour)		0.024	
高さ方向の分布形状係数 α		0.897	



(a) 脚部・天端 (膨張材使用)



(b) 側壁部 (普通コンクリート)

図-5.31 同定された値による順解析の結果と計測温度との比較 (DTn.)

(4) 検証結果のまとめ

本研究で行った温度解析における材料特性値を、表-5.25に一覧表で示す。

表-5.25 計測結果と整合する材料特性値の一覧

トンネル名	断熱温度上昇特性値の補正率		コンクリート・セントルの熱伝達率	天端上面防水シートの熱伝導率	上部と下部の初期最大温度差 K_{max}	備考
	Q_{∞}	γ	(W/m^2C)	(W/mC)	(C)	
Fトンネル	0.8	0.8	2.3	0.10	—	外気温計測値
実験トンネル	0.9	0.9	10.0	—	—	1/4スケール
GトンネルA	0.93	0.93	9.0	0.38	10.0	膨張材使用
GトンネルB	0.8	0.8	3.2	0.32	5.4	
Dトンネル	1.0	1.0	9.4	0.08	5.0	普通コンクリート
	1.1	1.2				膨張材使用

a) 天端と側壁のピーク温度の差について

いずれの計測結果においても、コンクリートのピーク温度は天端の方が、側壁部より高い結果となっている。コンクリートの材料特性値は同様であるが、天端上面防水シートの熱伝導率あるいは、坑内外気温の上部と下部の差 K_{max} により、この現象が再現できている。

b) 天端上面防水シートの熱伝導率

天端上面防水シートの熱伝導率は、他の部位の熱伝導率 3.0 と比較して、0.08~0.38 とバラツキがあるが、いずれのトンネルでの同定結果でも小さくなる。このばらつきは、天端付近のコンクリート打込み状況の相違によるものと考えられるが、他の要因による誤差を吸収した同定結果となっている可能性もある。とくに、坑内外気温の上部と下部の温度差との関係が大きく、同定解析では、外気温差が大きくなると、天端上面防水シートの熱伝導率は大きくなる傾向にある。

c) 坑内外気温の上部と下部の差

坑内外気温の上部と下部の差は、同定計算では $5^{\circ}C$ ~ $10^{\circ}C$ の範囲となった。コンクリート内の温度は坑内外気温にすりつくものであり、材齢が大きくなる方が感度大きい(解析への影響が大きい)傾向にある。上下の最大温度差は、天端部と側壁部のコンクリートのピーク時の温度差にも影響があるが、温度降下割合 ϕ がコンクリート温度の降下勾配にも影響がある。

d) 断熱温度上昇特性の低減比率

断熱温度上昇特性の低減比率(補正比率)は、普通コンクリートでは 0.8 程度、膨張材入りコンクリートでは 0.9~1.2 程度であり、膨張材入りは標準値に近く、普通コンクリートは低減した方が計測温度の再現性がよい。とくに、全断面で普通コンクリートを使用した F トンネル、G トンネルでは、同様に低減率 0.8 とした場合に再現性がよい結果となり、整合している。

実験トンネルでは、断熱温度上昇特性の比率は 0.9 程度であった。実験トンネルは内空要素 1/4 スケールであるが、覆工厚は 30cm と実物と同じ厚さであることに起因する可能性もある。内空周長と覆工厚の比は、F トンネルで 1.45%、G トンネルで 1.28%、D トンネルで 1.68%であるのに対して、実験トンネルでは 6.04%である。

e) 膨張材の影響について

一般には、膨張材はその添加量をセメント量に追加する（セメント量+膨張材量をセメント量とみなす）ことで、断熱温度上昇特性値 Q_w および γ の値を算定し、他の材料特性値は普通コンクリートと同様と考え、温度解析を行う。しかしながら、本研究における検討結果では異なった結果、すなわち、上述したように断熱温度上昇特性の低減比率は、普通コンクリートでは 0.8 程度、膨張材入りコンクリートでは 0.9~1.1 程度である結果が得られている。

G トンネルでは膨張材の添加以外は、ほぼ同様の材料条件、施工条件で覆工コンクリートが施工されているが、ピーク温度の計測値は、

- ・ A スパン：天端=39.0°C，側壁=37.4°C
- ・ B スパン：天端=35.7°C，側壁=31.1°C

と、膨張材添加量を加えたセメント量の差のみでは説明がつかない。

また、D トンネルでは、脚部と天端に膨張材を添加し、他の側壁部は普通コンクリートを用いているが、ピーク温度の計測値は、天端部=60.9°C，側壁=50.9°C，脚部=52.4°C となっており、同様に、膨張材添加量を加えたセメント量の差のみでは説明がつかない。

f) コンクリートおよびセントルの熱伝達率

コンクリートおよびセントル表面の熱伝達率は、基準類で示されている $14 \text{ W/m}^2\text{C}$ と比較すると小さな値となるが、トンネルごとに $2\sim 10 \text{ W/m}^2\text{C}$ とかなりばらつきがある。このばらつきは、風速を含めた坑内の環境条件の相違によるものと考えられるが、他の要因による誤差を吸収した同定結果である可能性もある。

5.3 湿気移動解析における材料特性値の検討

5.3.1 湿気移動解析における材料特性値の課題

覆工コンクリートは、部材厚さや体積に比べ表面積が広いこと、覆工厚が300mm程度であることから通常のマスコンクリートに比べ、乾燥収縮の影響が大きいと考えられる。乾燥収縮の影響を正確に評価するには、コンクリート内の水分状態（相対湿度分布）を明らかにする必要がある。

日本コンクリート工学会において作成した温度応力解析ソフトJCMAC3⁸⁾では、3.3.3項に示した式(3.13)を境界条件として、式(3.12)を解くことによって相対湿度分布を求めている。この際に、入力値として透湿率(g/m・h・mmHg)、湿気容量(g/m³・mmHg)、蒸発率(mmHg)が必要であるが、式(3.14)～式(3.18)(以下、従来式と称する)を用いた場合、乾燥し過ぎるとということが指摘されている。

そこで、本研究では、従来式で求められる透湿率、湿気容量、蒸発率による相対湿度の解析値を確認するとともに、より正確にコンクリート中の相対湿度分布を求めるため、PSOによる逆解析により、材料特性値(透湿率、湿気容量、蒸発率)の同定を行った。

下記に式(5.4)、式(5.5)(式(3.12)、式(3.13)の再掲)を示す。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_p \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) - \frac{dq_h}{dt} \quad \dots (5.4)$$

ここに、 $(dq/dP)_p$: 湿気容量 (g/m³・mmHg)

λ_p : 透湿率 (g/m・h・mmHg), P : 水蒸気圧 (mmHg)

dq_h/dt : 水和による湿気密度変化 (g/hr・m³)

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P - P_0) \quad \dots (5.5)$$

ここに、 α : 蒸発率 (g/m³・hr・mmHg)

P_0 : 周囲の水蒸気圧 (mmHg)

5.3.2 鍵本らの実験の概要

鍵本ら⁹⁾は図-5.32および写真-5.1に示すような大型の円柱供試体(直径450mm, 高さ900mm)を作成し、その内部の相対湿度を正確に測定している。

この計測は、周辺の外気温34.5°C, 湿度60%の環境下で行われており、円柱の表面から中心に向かって深さ1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 10cm, 20cmの位置で行われている。

この実験では大型の円柱を用いており、比較的深部の湿度計測が可能なこと、乾燥面

が側方であり、ブリーディング水の影響を排除できることに特徴がある。

供試体コンクリートの配合を表-5.26に示し、湿度計測結果を図-5.33に示す。

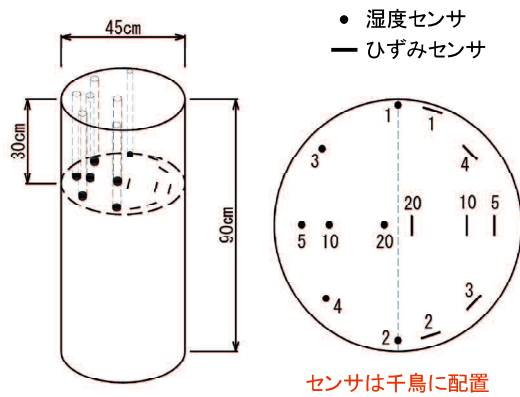


図-5.32 大型円柱供試体

写真-5.1 大型円柱供試体

表-5.26 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
20	55	45	175	318	833	1,030	0.795

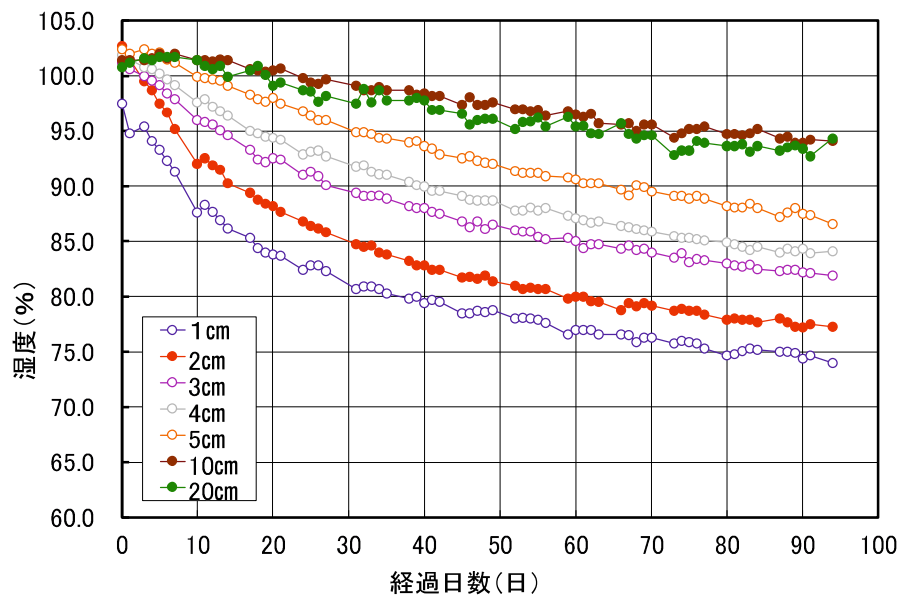


図-5.33 湿度計測結果

5.3.3 従来入力値による相対湿度算出結果の検証

前述したように、乾燥収縮の計算においては、式(5.5)を境界条件として、式(5.4)を解くことによって相対湿度分布を求めている。この際に、入力パラメータとして透湿率 ($\text{g/m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg}$)、湿気容量 ($\text{g/m}^3\cdot\text{mmHg}$)、蒸発率 (mmHg)が必要であるが、前述したように、従来の式(3.14)～式(3.18)を用いた場合、乾燥し過ぎるということが指摘されている。

そこで、本研究では、この提案式で求められる透湿率、湿気容量、蒸発率により相対湿度を解析し、鍵本らの実験結果と比較することにより、この式の妥当性を検証した。

(1) 解析コード

本研究における湿気移動逆解析では、覆工コンクリートの温度応力解析用に開発した2次元非線形非定常湿気移動有限要素解析プログラムにPSOを組み込んだものを用いた。

(2) 解析モデル

解析に用いる有限要素メッシュは、大型円柱供試体を模擬した半径が225mmの1/4モデルである。

図-5.34に有限要素メッシュを示す。メッシュの赤点はそれぞれ、1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 10cmの位置である。

なお、20cmの位置の計測データは、明らかに乾燥しすぎているため、逆解析での計測データからは除外している。

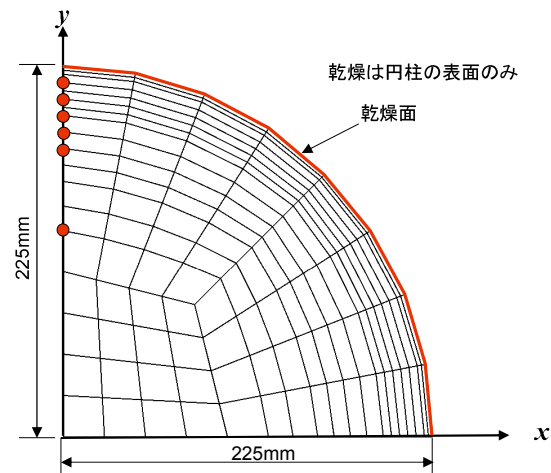


図-5.34 大型円柱供試体の有限要素

(3) 確認解析の結果

従来の提案式(3.14)～式(3.18)で求めた透湿率、湿気容量、蒸発率より、コンクリート中の相対湿度の推移を式(5.4)により求めた。

解析結果を計測結果と合わせて、図-5.35に示す。この図に示すように、深さ10cmの位置では比較的整合するものの、乾燥収縮が問題となる深さ5cm以下の表層付近の計測点では、相対湿度で5%以上小さくなる結果となり、従来式では乾燥し過ぎるという評価を証明する形となった。

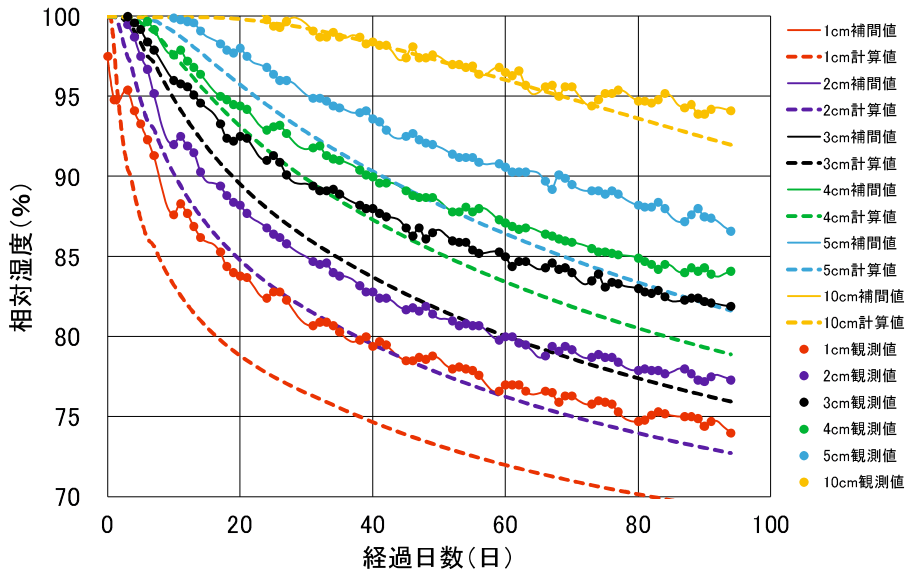


図-5.35 従来式によるコンクリート中の相対湿度の算定結果

5.3.4 湿気移動解析における材料特性値の提案

湿気移動解析の入力パラメータは、透湿率、湿気容量、蒸発率であるが、これらの材料特性値は相対湿度の関数となり、実際の解析では非線形の方程式を解く必要がある。また、湿気移動入力パラメータも相対湿度との関数で表現する必要がある。

3.3.3項に示したように透湿率、湿気容量、蒸発率などの材料特性値は、相対湿度60%までは、ほぼ一定でその後はほぼ2次関数により表現されている。

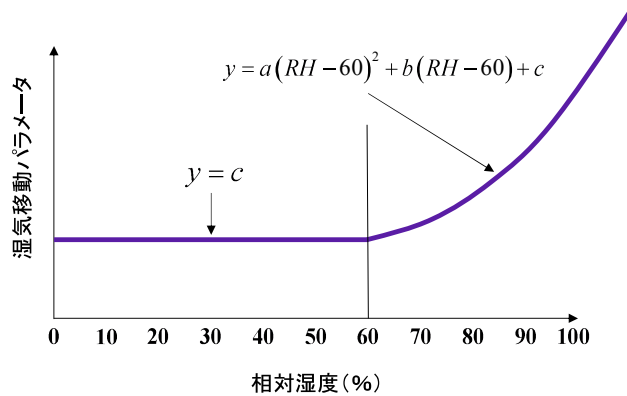


図-5.36 湿気移動材料特性値の2次関数での表現

本研究でも、図-5.36に示すように相対湿度60%までは一定で、その後は2次関数で表現することを基本とし、その係数 a 、 b 、 c を同定する。

透湿率、湿気容量、蒸発率のそれぞれの材料特性を2次関数で表現し、その係数を逆解析で同定することから、表-5.27に示すように全部で9つの係数を同定することになる。

表-5.27 同定すべき湿気移動入力パラメータと材料特性値の算出方法

	相 対 湿 度	
	$0\% \leq RH \leq 60\%$	$60\% < RH \leq 100\%$
透 湿 率	c_1	$a_1(RH - 60)^2 + b_1(RH - 60) + c_1$
湿気容量	c_2	$a_2(RH - 60)^2 + b_2(RH - 60) + c_2$
蒸 発 率	c_3	$a_3(RH - 60)^2 + b_3(RH - 60) + c_3$

しかしながら、透湿率や湿気容量、蒸発率は、相互に関係するため、そのまま逆解析を行うと、多数の箇所最適値が求まるため同定できない。

式(5.4)を見ると、左辺は湿気容量、右辺には透湿率があり、実質的にはこの両者の関係を求めればよいこととなる。

そこで、本研究では事前の試算結果から、透湿率を固定するとともに、事前の計算結果からほぼ0とみなせる係数を省略するものとして、以下の条件を設定したうえで、4つの係数 (b_2, c_2, a_3, c_3) を同定した。

- ・透湿率を 0.0025 と固定する ($a_1=0.0, b_1=0.0, c_1=0.0025$)
- ・湿気容量については第1項を省略する ($a_2=0.0$)
- ・蒸発率については第2項を省略する ($b_3=0.0$)

本解析では、深さ1cm~10cmの相対湿度の計測値と同定した係数を用いて計算した相対湿度との残差平方和S (目的関数) が最小となるようにフィッティングできる4つの係数 (b_2, c_2, a_3, c_3) の組合せを同定するものである。

目的関数は、1節点、1ステップあたりの誤差の二乗和 (残差平方和) であり、式(5.6)で表すことができる。

$$S = \sum_{i=1}^m (T_i - \phi_i)^2 \rightarrow \min \quad \dots (5.6)$$

ここに、 T_i : 計測された相対湿度, ϕ_i : 計算された相対湿度
 m : 計測点の数

同定には3.4.2節で説明したPSOを用いた。PSOは繰返し計算により、最良解を求めるもので、1回の試行計算で、粒子数30、繰返し回数100回、すなわち、3,000ケースの計算を行い、誤差を最小化 (収束) させているものである。なお、PSOは乱数を用いて最適化を行っているため、20回の試行を行い、最も誤差が少ないものを最良同定値とした。同定結果を表-5.28に示す。

また、参考のため、同定された材料特性値の関数形を図-5.37および図-5.38に示す。これらの図でわかるように、20回の試行計算ではすべて近い値に同定されており、本同

定計算の妥当性を示している。なお赤の太線は、最良同定値となったものである。

表-5.28 同定結果

試行回数	透湿率	湿気容量		蒸発率		残差平方和	摘要
	c_1	b_2	c_2	a_3	c_3		
1	0.0025	-11909.20	6192.44	0.34597	0.092927	0.00010154	
2	0.0025	-11940.20	6230.66	0.51186	0.090015	0.00010160	
3	0.0025	-11824.70	6153.89	0.41734	0.090544	0.00010156	
4	0.0025	-11900.80	6185.52	0.36632	0.091697	0.00010155	
5	0.0025	-11656.50	6119.81	0.44585	0.091089	0.00010159	
6	0.0025	-11750.40	6113.21	0.35359	0.090852	0.00010157	
7	0.0025	-11733.20	6140.94	0.42072	0.091020	0.00010156	
8	0.0025	-10591.70	5746.21	0.54274	0.085591	0.00010180	
9	0.0025	-11220.50	5958.87	0.44728	0.089299	0.00010164	
10	0.0025	-11842.70	6192.44	0.45178	0.090568	0.00010159	
11	0.0025	-11852.30	6199.34	0.44795	0.091263	0.00010158	
12	0.0025	-11484.70	6043.57	0.40356	0.090524	0.00010159	
13	0.0025	10920.10	5854.17	0.39843	0.089955	0.00010170	
14	0.0025	-11997.60	6224.09	0.43999	0.090500	0.00010154	
15	0.0025	-11785.90	6144.69	0.35286	0.092408	0.00010155	
16	0.0025	-11990.90	6217.79	0.35260	0.093075	0.00010152	最良同定値
17	0.0025	-11373.10	6016.29	0.42673	0.090014	0.00010161	
18	0.0025	-11867.40	6176.41	0.42210	0.091030	0.00010155	
19	0.0025	-11492.80	6041.81	0.51167	0.086683	0.00010166	
20	0.0025	-10918.80	5869.04	0.47359	0.086798	0.00010171	

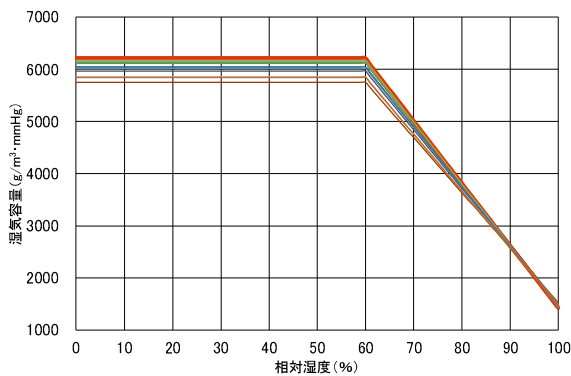


図-5.37 同定された湿気容量の関数形

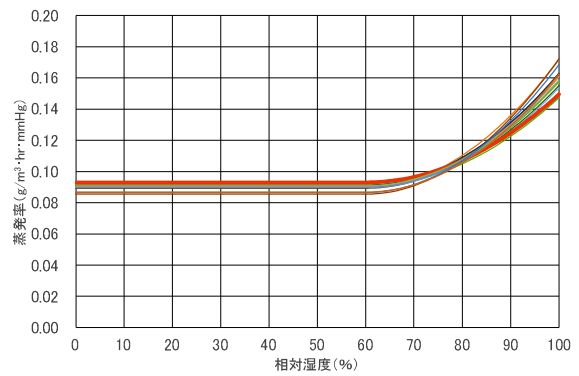


図-5.38 同定された蒸発率の関数形

同定の結果得られた透湿率，湿気容量および蒸発量の算定式は以下のとおりであり，同定された値を用いて順解析を行った結果は図-5.39に示すとおりである。

図-5.39にも示すとおり，計測値と計算値は従来式を用いた図-5.35と比較して，いずれの深さとも非常に良く一致しており，湿気移動解析の精度向上に繋がったと思われる。

a) 透湿率

・ $0 \leq RH \leq 100\%$ のとき : $\lambda = 0.0025$. . . (5.7)

b) 湿気容量

・ $0 \leq RH \leq 60\%$ のとき : $\frac{dq}{dP} = 6217.8$. . . (5.8)

・ $RH \geq 60\%$ のとき : $\frac{dq}{dP} = -11990.9(RH - 60) + 6217.8$. . . (5.9)

・ ※式中での RH は, 百分率で表示.

c) 蒸発率

・ $0 \leq RH \leq 60\%$ のとき : $\alpha = 0.093075$. . . (5.10)

・ $60 \leq RH \leq 100\%$ のとき : $\alpha = 0.3526(RH - 60)^2 + 0.093075$. . . (5.11)

※式中での RH は, 百分率で表示.

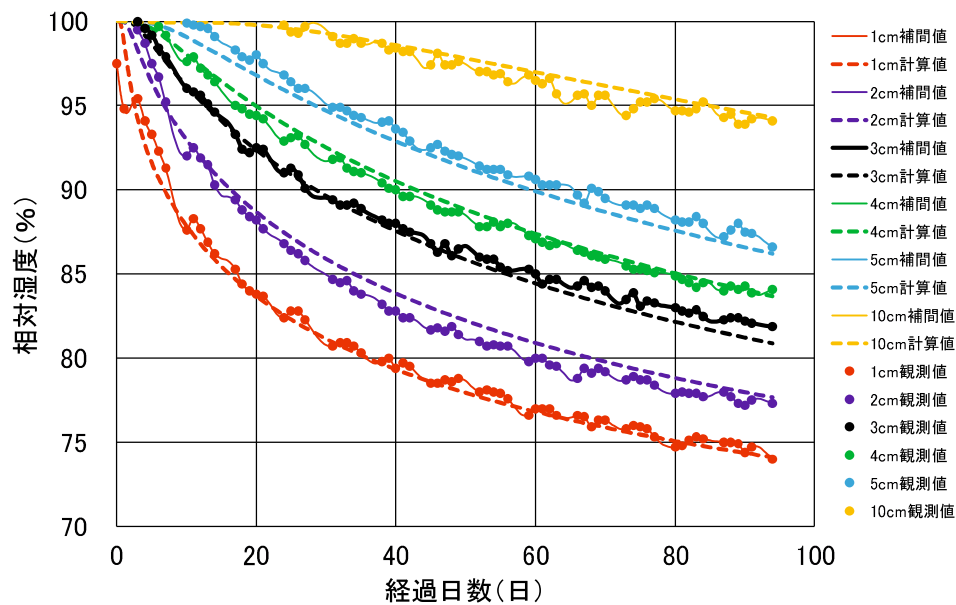


図-5.39 同定値を用いた順解析の結果

5.3.5 提案した材料特性値の検証

本項では、5.3.4項において提案した湿気移動解析に係る材料特性値（透湿率，湿気容量，蒸発率）について，他の実験結果を用いて検証する．

図-5.40は岐阜大学でコンクリート中の相対湿度を計測した際¹⁰⁾のコンクリート供試体である．

この計測では，外気温：20℃，周囲相対湿度：50%の条件下で，表面から1cm，3cm，5cmの位置で相対湿度が計測されている．

水分の蒸発は上面のみで，側面，下面はアルミ封緘処理されている．

コンクリートの配合は，表-5.29に示すとおりである．

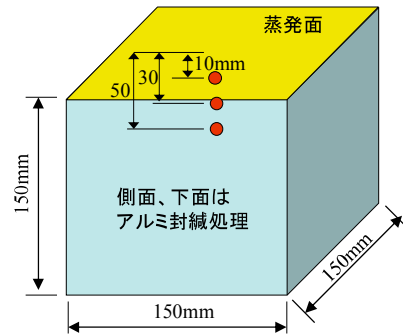


図-5.40 計測用供試体

表-5.29 コンクリートの配合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
普通ポルトランド	65	44	189	262	770	976

相対湿度の計測結果と，提案した材料特性値を用いた計算結果を併せて図-5.41に，従来式による計算結果と計測値を併せて図-5.42に示す．

この図で確認されるように，従来式では乾燥しすぎているのに対して，提案式では計測結果よりやや乾燥が進む傾向にあるが，従来式に比較して誤差は小さくなっている．

なお，この計測は上面を乾燥面としており，ブリーディング水の影響により，乾燥開始が遅くなっていることも考えられる．

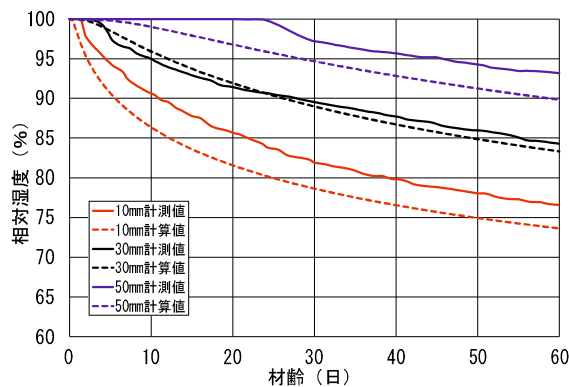


図-5.41 提案式による計算結果と計測値

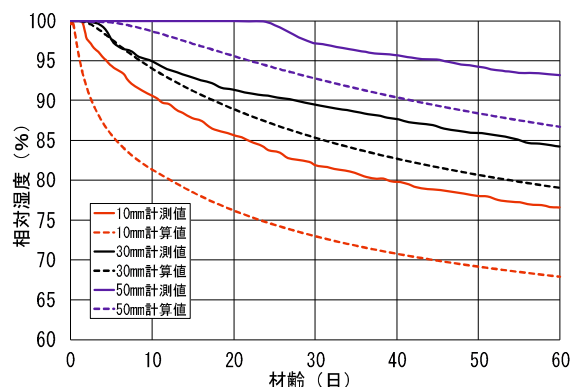


図-5.42 従来式による計算結果と計測値

5.4 覆工コンクリートの応力解析結果の検証

コンクリート打込み後、比較的早い段階で発生するコンクリートの収縮には、温度収縮、自己収縮、乾燥収縮などがあり、実際のひび割れは、これらの要因が複雑に絡み合っている。

これら収縮ひび割れの発生を予測するためには、温度解析を実施後、湿気移動解析（乾燥収縮を考慮する場合）を行い、さらに応力解析を実施する必要がある（図-5.43）。

本研究では、覆工コンクリートのひび割れ解析を対象に、図-5.43 に赤字で示した温度解析（5.1 節、5.2 節で検討）、湿気移動解析（5.3 節で検討）のモデル構築、それを可能にするプログラムの開発、および入力値の検討を行った。本節では、これによって、どの程度応力解析の結果を現実的なものに近づけられたかを検討するとともに、覆工コンクリートのひび割れ発生に、それぞれの要因がどの程度影響を与えているのかを明らかにする。

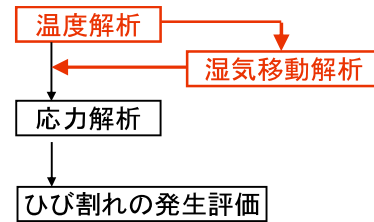


図-5.43 収縮によるひび割れ解析のフロー（図-3.30 を再掲）

5.4.1 高山らの実験結果による検証

高山ら^{11),12)}は、覆工コンクリートに生じるひび割れ発生メカニズムを探るため、大規模な模型実験を行っている。この実験は室内実験であり、温度および湿度が一定値にコントロールされ、また、覆工厚を含め、施工上の不確定要素が少なく、解析結果の検証に適していると考えられる。そこで、高山らの実験結果と本研究で提案した解析手法を用いた解析結果を比較することで、解析手法の妥当性を検討する。

(1) 試験体の概要

高山らは新幹線標準断面の 1/4 スケールの試験体で模型実験を行っている。表-5.30 にコンクリートの配合を示し、図-5.44 に試験体の断面を示す。

表-5.30 コンクリートの配合

セメント種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
普通ポルトランド	20	60	49	182	303	873	914

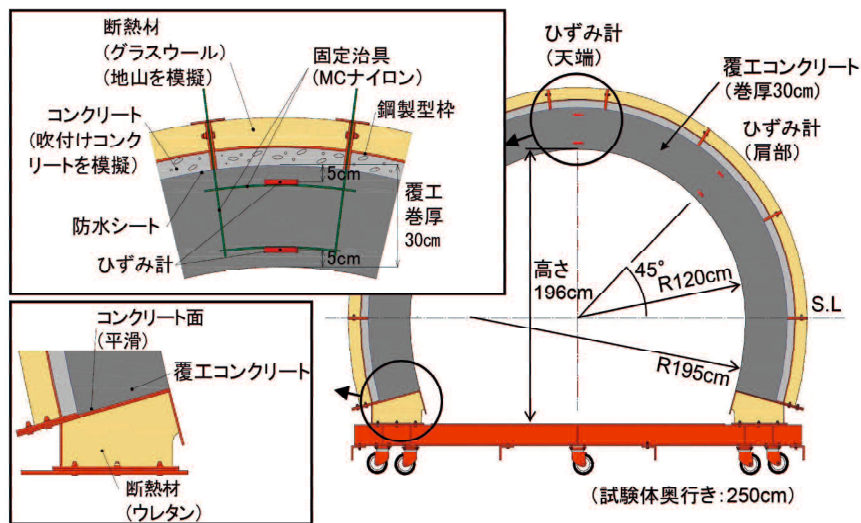


図-5.44 試験体の断面¹¹⁾

(2) 実験ケース

模型実験は、表-5.31 に示すような 4 つのケースで行われており、それぞれのケースで試験体内の温度と周方向のひずみが計測されている。本研究では、高山らの実験ケースのうち、湿度の異なる Case1 および Case2 と対象として検証を行う。なお、計測結果は、コンクリートの凝結開始時間である打込み完了後 8.5 時間後からの値である。

表-5.31 実験ケース

Case	気温 (°C)	風速 (m/s)	湿度 (%)	脱枠時間 (h)	打込み時のコンクリート温度 (°C)	防水シート	備考
Case1	21.5	1	60	18	15	有	標準ケース
Case2	20.0		50				乾燥の影響
Case3	20.0		60	12			乾燥・放熱の影響
Case4	20.0		18	25			放熱の影響

※Case1 の気温はコンクリート温度計測の結果を踏まえ、補正している。

(3) 解析モデル

図-5.44 の試験体の有限要素モデルを図-5.45 に示す。解析は、日本コンクリート工学会のひび割れ制御指針 2016¹³⁾ に準じて行っている。

解析に用いた温度解析の入力値を表-5.32、応力解析の入力値を表-5.33 に、さらに、外気温などの環境条件を表-5.34 に示す。湿気移動解析での入力値は、5.2 節で同定された値を用いている。

なお、防水シートを実際の寸法でモデル化するとアスペクト比 (要素の縦と横の比率) の非常に大きな扁平要素になり、解析精度が低下する。そのため、防水シートは、吹付けコンクリートと覆工コンクリートとの間に厚さ 10mm の要素としてモデル化している。

要素の寸法が、実際と異なっていることから、解析で入力する熱特性値は、寸法の違いを考慮した換算した値を用いている。具体的には、実際の防水シートそのものの厚さは不織布と併せて2.0mmで、熱伝導率は $0.3\text{W/m}^\circ\text{C}$ であるが、要素の厚さが10mm（要素厚5倍）であることから、熱伝導率を5倍し、 $1.5\text{W/m}^\circ\text{C}$ を換算した熱伝導率としている。

また、比熱と密度は、解析上は熱容量として扱われるため、密度のみを換算し、防水シートそのものの密度 1000kg/m^3 を0.2倍した 200kg/m^3 を換算した密度としている。

応力解析では、防水シートは圧縮には抵抗するが、引張に抵抗しないものとしてモデル化している。また、比熱と密度は、解析上は熱容量として扱われるため、密度のみを換算し、防水シートそのものの密度 1000kg/m^3 を0.2倍した 200kg/m^3 を換算した密度としている。

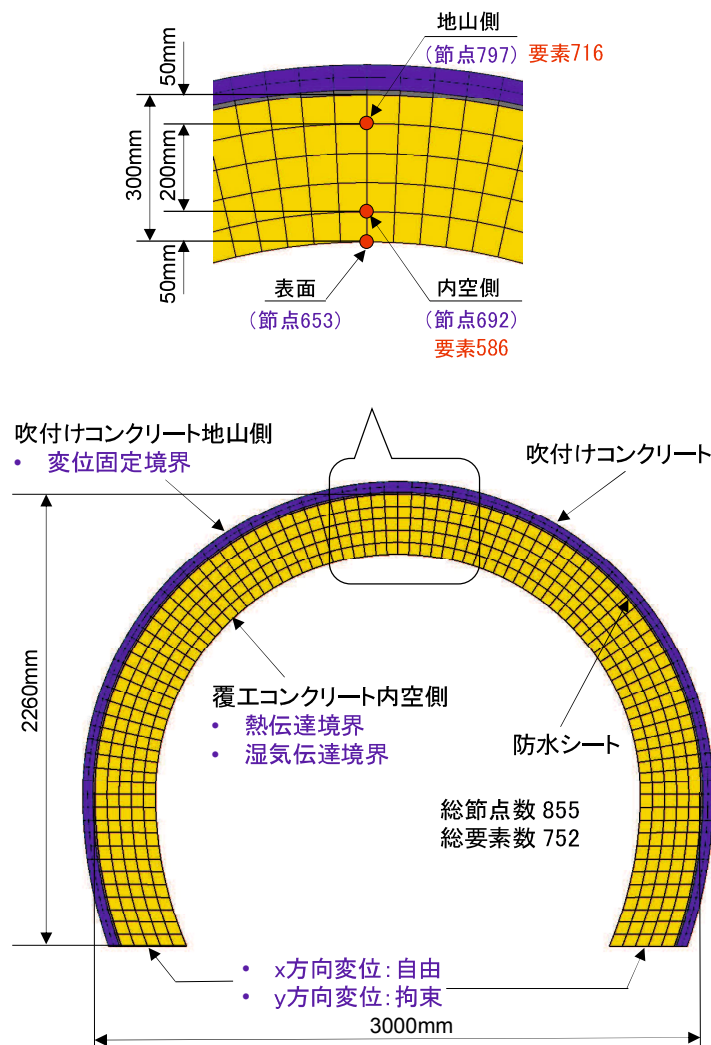


図-5.45 試験体の有限要素モデル

表-5.32 温度解析入力値

項目	単位	覆工コンクリート	吹付けコンクリート	防水シート
初期温度	°C	15.0(case1) 20.0(case2)	20.0	20.0
断熱温度上昇特性 Q_{∞}	°C	50.95(case1) 50.69(case2)	—	—
断熱温度上昇特性 γ	—	0.993(case1) 1.257(case2)	—	—
熱伝導率	W/m°C	2.7	2.7	1.5 (換算値)
比熱	kJ/kg°C	1.15	1.15	2.3
密度	Kg/m ³	2250	2150	200.0 (換算値)

表-5.33 応力解析入力値

項目	単位	覆工コンクリート	吹付けコンクリート	防水シート
セメント種類		普通ポルトランド	—	—
水セメント比	%	60	—	—
管理材齢	日	28	—	—
圧縮強度	N/mm ²	指針に準拠	—	—
引張強度	N/mm ²	指針に準拠	—	—
ヤング係数	N/mm ²	指針に準拠	22,000	2.0
ポアソン比		0.2	0.2	0.3
線膨張係数	/°C	10×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}

表-5.34 表面の熱伝達率と外気温、周囲相対湿度

覆工コンクリート表面	W/m ² °C	10.0
外気温	°C	21.5(Case1), 20.5(Case2)
周囲相対湿度	%	60.0

なお、高山らの研究では、覆工コンクリートの初期温度は Case1, Case2 とともに 15°C となっているが、実際問題としてコンクリートの打込み温度を管理することは非常に難しい。本研究では、実験結果の計測値から、Case2 は 20°C と設定した。また、外気温は実測での収束温度をもとに、21.5°C (Case1), 20.5°C (Case2) に設定した。

乾燥収縮ひずみに関しては、5.3.4 項で提案した材料特性値を用いて湿気移動解析を行い、コンクリートの湿度分布を算出し、乾燥収縮を考慮する。乾燥収縮の予測式は土木学会式、JCI 式、CEB 式など、いくつか提案されている。土木学会式は、算定式中に V/S (体積表面積比) が入力として必要である。これは部材の体積と表面積の比率を表しており、部材レベルで乾燥収縮を算定するものである。本研究では、詳細な検討を行うため、FEM により要素レベルで乾燥収縮ひずみを算出するものとし、式 (3.9) ~ 式 (3.11) に前掲した JCI-TC911 式¹⁴⁾により乾燥収縮ひずみを算定する。

(4) 標準値を用いた検証結果

高山らは実験において覆工コンクリートの温度および周方向のひずみを計測している。そこで、表-5.32～表-5.34 で設定した標準的な(断熱温度上昇特性 Q_0 と γ を補正しない)値での解析結果について、高山らの計測結果と比較し、考察を行う。

a) Case1

Case1 の温度および周方向のひずみについて、解析結果と計測結果との比較をそれぞれ、図-5.46 および図-5.47 に示す。

温度の比較では、最高温度は地山側、内空側ともに解析結果の方が3～5℃程度高い結果となっているが、温度の履歴は比較的良く一致しており、収束温度はほぼ同様である。

周方向ひずみは、経過日数5日～10日の間は内空側、地山側とも計測値に比べ解析値の方が大きいひずみ量となっている。内空側のひずみは15日以降は比較的良く一致しているが、地山側のひずみは、10日以降は解析値が横ばいで推移するのに対して、計測値は増加し続け、70日目で200 μ に達している。

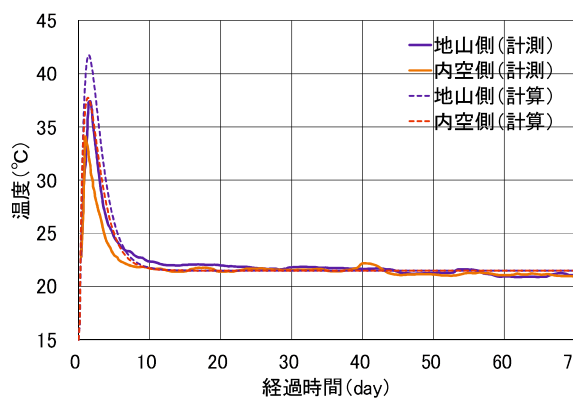


図-5.46 Case1 温度の比較

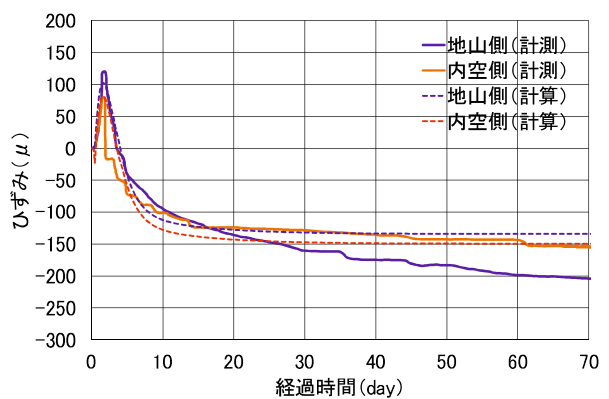


図-5.47 Case1 ひずみの比較

b) Case2

Case2 の温度および周方向のひずみについて、解析結果と計測結果との比較をそれぞれ、図-5.48 および図-5.49 に示す。

温度の比較では、Case1 と同様に最高温度は地山側、内空側ともに解析値の方が2～3℃程度高い結果となっているが、温度の履歴は比較的良く一致しており、収束温度はほぼ同様である。

周方向ひずみは、全区間を通じて計測値に比べ解析値の方が大きいひずみ量となっている。計測の最終段階(50日)では、内空側は比較的良く一致しているが、Case1 とは逆に地山側の計測値は解析値より小さい。

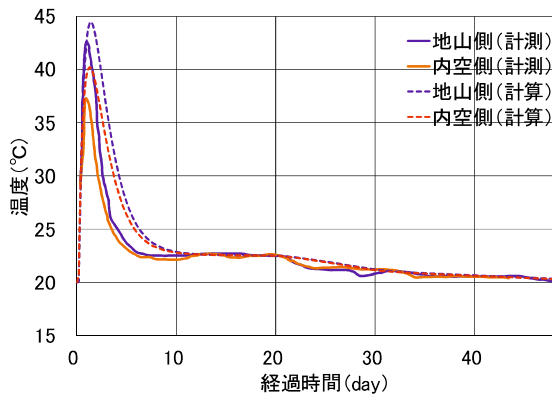


図-5.48 Case2 温度の比較

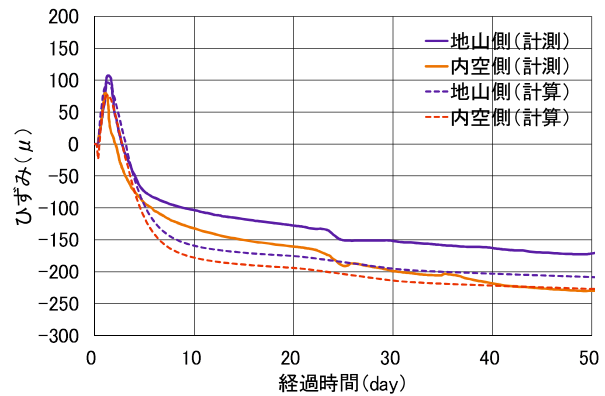


図-5.49 Case2 ひずみの比較

(5) 補正值を用いた検証結果

標準値を用いた解析では、Case1、Case2ともに温度の解析結果は計測結果より高かった。コンクリート内の温度の推移は、湿気移動解析においても基本条件となるものであり、5.2節で示したとおり、断熱温度上昇特性を低減する。

ここでは、試行計算の結果、断熱温度上昇特性の Q_{∞} と γ をそれぞれ9割程度低減した補正值を用いて解析を行った。設定した温度解析の入力値を表-5.35に示す。

- Case1 : Q_{∞} $50.95 \times 0.9 = 45.86$
 γ $0.993 \times 0.9 = 0.894$
- Case2 : Q_{∞} $50.69 \times 0.9 = 45.62$
 γ $1.257 \times 0.9 = 1.131$

表-5.35 温度解析入力値

項目	単位	覆工コンクリート	吹付けコンクリート	防水シート
初期温度	°C	15.0(case1) 20.0(case2)	20.0	20.0
断熱温度上昇特性 Q_{∞}	°C	45.86(case1) 45.62(case2)	—	—
断熱温度上昇特性 γ	—	0.894(case1) 1.131(case2)	—	—
熱伝導率	W/m°C	2.7	2.7	1.5 (換算値)
比熱	kJ/kg°C	1.15	1.15	2.3
密度	Kg/m ³	2250	2150	200.0 (換算値)

※断熱温度上昇特性 Q_{∞} , γ は、補正值 (0.9倍)

5.2節でのFトンネルにおける同定結果では、断熱温度上昇特性の Q_{∞} と γ をそれぞれ、8割程度に低減することで計測結果の再現性がよかったが、本実験結果に対しては、断

熱温度上昇特性を9割とすることで、最高温度はほぼ一致した。

これは、実験が内空半径が1/4縮尺で、覆工コンクリート厚さは実寸と同様30cmであることから、覆工コンクリートの体積と表面積の比率が異なることが要因の一つであると考えられる。断熱温度上昇特性を補正した場合での解析結果を以下に示す。

a) Case1

Case1の温度および周方向のひずみについて、解析結果と計測結果との比較をそれぞれ、図-5.50および図-5.51に示す。断熱温度上昇特性を9割とすることで、最高温度はほぼ一致した。

内空側の周方向ひずみは、経過日数30日程度までは、解析値と計測値はほぼ一致するが、30日以降では解析値は計測値よりやや小さくなっている。地山側のひずみは、10日以降は解析値が横ばいであるのに対して、計測値は増加し続け、70日目で200 μ に達する。

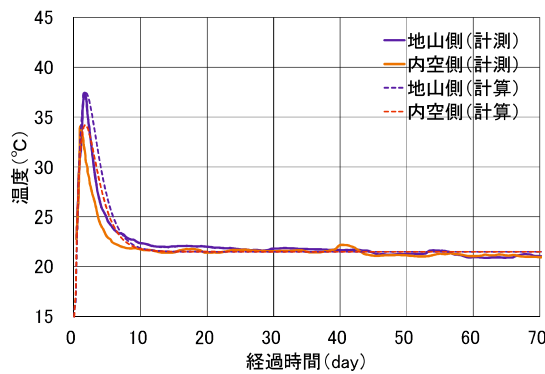


図-5.50 Case1 温度の比較

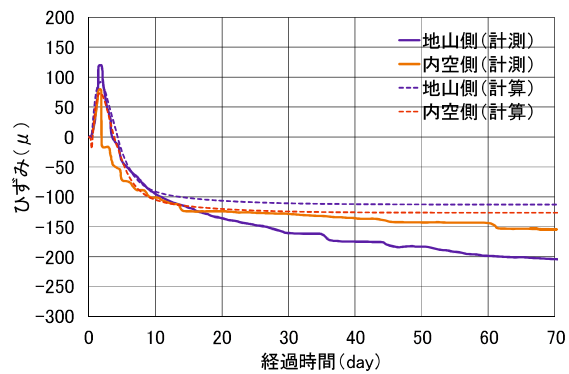


図-5.51 Case1 ひずみの比較

b) Case2

Case2の温度および周方向のひずみについて、解析結果と計測結果との比較をそれぞれ、図-5.52および図-5.53に示す。Case2についても断熱温度上昇特性を9割とすることで、温度は比較的一致した。

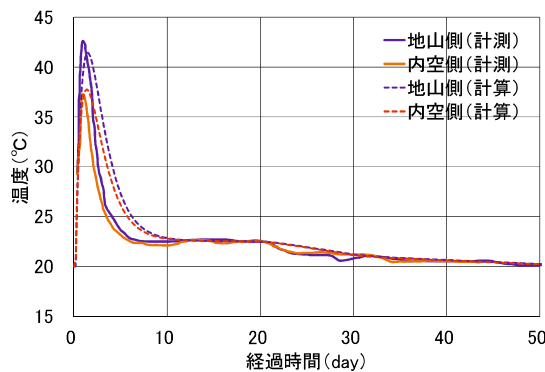


図-5.52 Case2 温度の比較

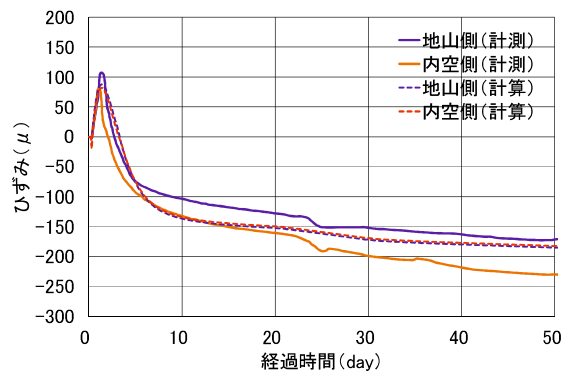


図-5.53 Case2 ひずみの比較

周方向ひずみの計測値は内空側が地山側より大きな値を示すのに対して、解析値は内空側と地山側はほぼ同様の値を示しており、内空側計測値と地山側計測値の中間の値を示す傾向にある。

内空側の周方向ひずみは、15日程度までは計測値と解析値はよく一致しており、15日以降は解析値が計測値より小さくなる。地山側の周方向ひずみは、解析値の方が全体に計測値より大きな値を示す。

(6) 検証結果のまとめ

実験トンネルを対象に、提案した入力値による温度解析、湿気移動を行った後に、応力解析を実施し、計測されたコンクリート内部の温度および、ひずみと対比した。

コンクリート温度は断熱温度特性値をセメント量などから算定される標準値を採用した解析値は、Case1, Case2ともに計測値と比較して、ピーク温度で3~5°C程度高くなる。これに対して、断熱温度特性値を9割とした補正值を用いたケースでは、解析値は計測値を再現することができている。

次に、断熱温度特性値を標準値としたケース、および補正值としたケース、それぞれで、提案した材料特性値を用いた湿気移動解析および応力解析を行い、ひずみを算出し、計測結果と比較した。なお、Case1の地山側ひずみは、内空側より大きく、また、周辺湿度が低いCase2の地山側ひずみより大きく、評価対象には不適であると判断した。

周方向ひずみの計測値と解析値を比較すると、Case1の地山側ひずみを除き、若材齢時には補正值を用いたケースの方が整合がよいが、材齢が進むと解析値は計測値と比較し、やや小さい値となる傾向にある。

標準値を用いた解析では、内空側は経過時間70日目（50日目）ではCase1, Case2ともにひずみ量は一致するが、若材齢時には大きなひずみ量を示し、ひび割れ評価に対しては、過大評価となる可能性がある。

参考として、補正值を使った場合のCase2を例にひび割れ指数(引張応力/引張強度の比)を算出して図-5.54に示す。この図で見ると、ひび割れ指数は12以上を示し、ひび割れ発生の確率は非常に低い結果となっている。最小値を示すのは10日~12日の間であり、この期間に限定すると、補正值を用いた計算値は計測値に整合している。

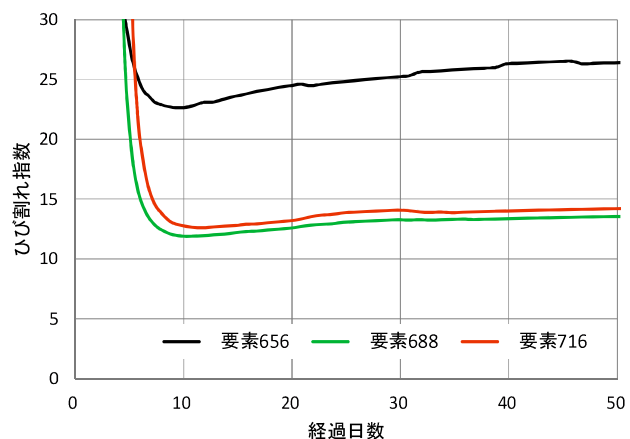


図-5.54 ひび割れ指数の試算結果

5.4.2 Fトンネルを対象としたひび割れ解析

覆工コンクリートは、通常のマスコングリートと比較すると、体積に比べ表面積が大きいことから乾燥収縮の影響が大きいことが予想される。また、比較的早期に脱枠されることから自重の影響も懸念される。

前節までの検討で、温度解析、湿気移動解析、応力解析が比較的精度良く行えることが確認できた。そこで、ここでは第5.1節、第5.2節で温度解析の対象としたFトンネルを取り上げ、これらの影響がどの程度なのか、ひび割れ解析を行い考察する。

(1) 解析モデル

Fトンネルの有限要素メッシュと応力解析における境界条件を図-5.55に示す。なお、トンネル周辺の詳細なメッシュは図-5.3に前掲したとおりである。

また、温度解析および応力解析の入力値を表-5.36、表-5.37および表-5.38にそれぞれ示す。なお、湿気移動解析で用いる材料特性値は、5.3節で同定したものをを用いた。

坑内外気温および坑内相対湿度は天端と側壁で計測されたデータがあることから、高さ方向に線形補間したものをを用いて、覆工コンクリートの打込み部位ごとに外気温や相対湿度を設定した。

設定した坑内外気温および坑内相対湿度を図-5.56、図-5.57に示す。相対湿度の計測結果では、比較的高い相対湿度が計測されている。また、側壁部より天端の方が低くなっている。これは天端の方が坑内外気温が高いため、空気中の水蒸気圧は同じでも、分母にあたる飽和水蒸気圧が高くなり、相対湿度が低くなっているものと考えられる。

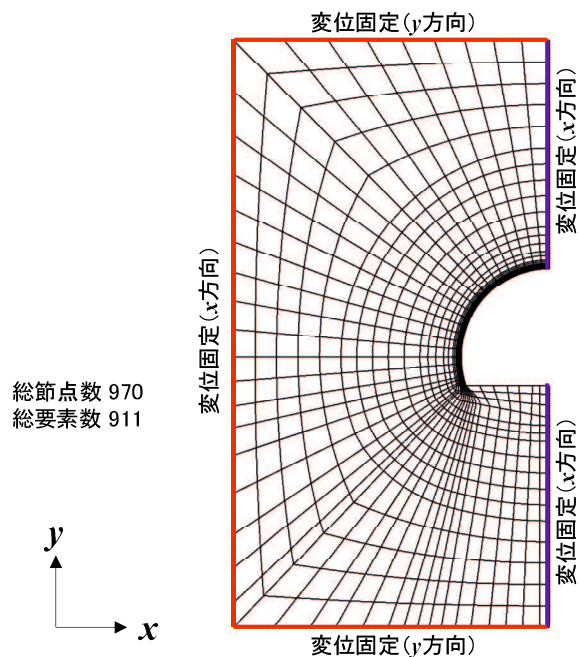


図-5.55 Fトンネルの有限要素メッシュ

表-5.36 解析に用いた入力値

部材(要素)名	項目	単位	入力値				
コンクリート	初期温度	℃	30				
	打込み時間		覆工1	覆工2	覆工3	覆工4	覆工5
			9:00	11:00	13:00	14:00	16:00
	断熱温度上昇特性 Q_0	℃	50.16×0.8=40.13				
	断熱温度上昇特性 γ		1.79×0.8=1.43				
	熱伝導率	W/m℃	2.7				
	比熱	kJ/kg℃	1.2				
密度	Kg/m ³	2350					
吹付け コンクリート	初期温度	℃	25.0				
	熱伝導率	W/m℃	2.7				
	比熱	kJ/kg℃	1.2				
	密度	Kg/m ³	2350				
岩盤	初期温度	℃	25.0				
	熱伝導率	W/m℃	2.6				
	比熱	kJ/kg℃	1.05				
	密度	Kg/m ³	2400.0				
防水シート	初期温度	℃	25.0				
	熱伝導率	W/m℃	3.0 (換算値)				
	比熱	kJ/kg℃	2.3				
	密度	Kg/m ³	100.0 (換算値)				
セントル	初期温度	℃	25.0				
	熱伝導率	W/m℃	167.0 (換算値)				
	比熱	kJ/kg℃	0.44				
	密度	Kg/m ³	3935.0 (換算値)				

※天端部防水シートは、熱伝導率を1/30 (=0.1 W/m℃) に低減

表-5.37 表面の熱伝達率と坑内外気温・湿度

項目	熱伝達率 W/m ² ℃	坑内外気温 ℃	坑内湿度 %
コンクリート表面	3.0	計測値を高さ 方向に調整	計測値を高さ 方向に調整
岩盤表面	3.0		
防水シート表面	3.0		
セントル表面・セントル介在	3.0		

表-5.38 応力解析入力値

項目	単位	覆工 コンクリート	岩盤	吹付け コンクリート	防水 シート	背面 空洞	セントル
セメント種類		普通 ポルトランド	—	—	—	—	—
水セメント比	%	56	—	—	—	—	—
管理材齢	日	28	—	—	—	—	—
圧縮強度	N/mm ²	指針に準拠	—	—	—	—	—
引張強度	N/mm ²	指針に準拠	—	—	—	—	—
ヤング係数	N/mm ²	指針に準拠	5,000	20,000	1.0	1.0	20,000,000
ポアソン比		0.2	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3
線膨張係数	/℃	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶

※自重を考慮 (載荷材齢は、打込み完了から17時間後)

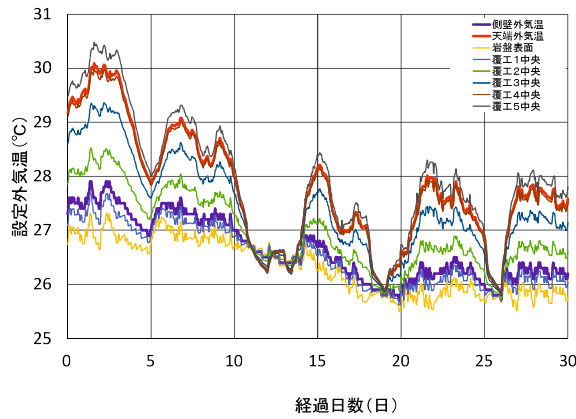


図-5.56 設定した外気温

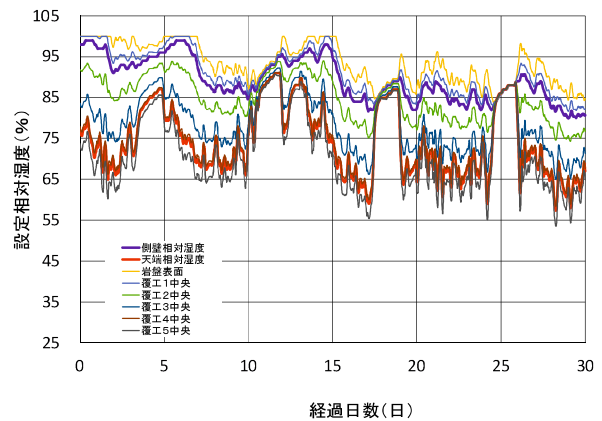
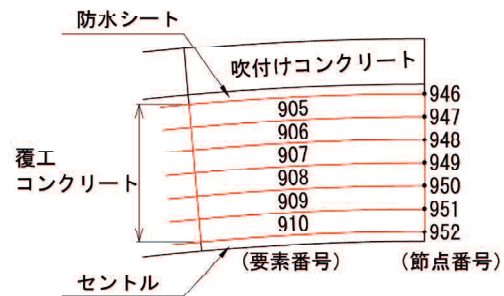


図-5.57 設定した相対湿度

(2) 解析結果

F トンネルでは、トンネルの天端部および側壁部で温度計測やひずみ計測が行われている。そこで温度や湿度の解析結果は、天端部や側壁部の節点で、ひずみの解析結果は、天端部や側壁部の要素について行う。図-5.58 に天端部の節点番号、要素番号を示す。



a) 温度解析結果

前節で設定した入力値を用いて計算した温度解析結果を計測値とともに図-5.59 に示す。

今回設定した入力値は、5.1.2 項で、温度の計測値と解析値が一致するように同定した値を用いたものであり、節点温度の計測値と解析値が一致する。

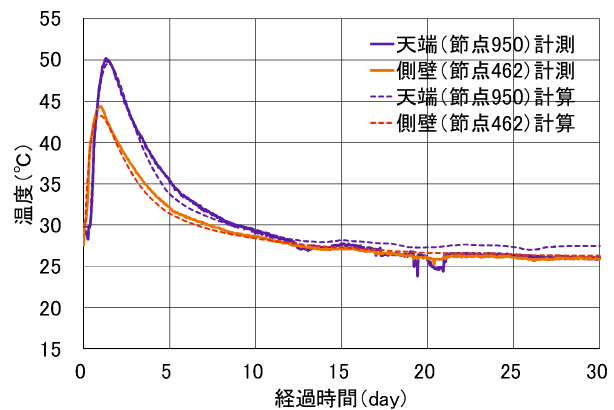


図-5.59 温度の計算値と計測値との比較

b) 相対湿度解析結果

コンクリート内の相対湿度の算定にあたり、透湿率、湿気容量および蒸発率は、5.3 節で提案した式 (5.7) ~ 式 (5.11) を用いた。なお、相対湿度については、計測が行われていないため、計算結果のみを示す。

相対湿度の計算結果を図-5.60 に示す。天端部の節点 950 と側壁部の節点 462 はともに、覆工コンクリートの内空側から 100mm の位置であることから、ほとんど乾燥していない (相対湿度は 99%以上の値である)。

相対湿度履歴は、始め相対湿度が下がり、その後少し上がった後に、徐々に下がるが、最初に下がるのは温度が上昇するため飽和水蒸気圧が大きくなったためであり、水蒸気圧はほとんど変化していないものと思われる。本研究での湿気移動解析は水蒸気圧を未知数として解かれるが、水蒸気圧は一般的でないため、温度との関係で得られる飽和水蒸気圧を用いて相対湿度に変換している。

参考のため、天端部の覆工厚さ方向の湿度履歴を図-5.61に示す。

表面の節点952は乾燥が進んでいるものの、周辺の相対湿度が比較的高い(図-5.57)こともあり、内部の節点はそれほど乾燥しておらず、表面付近での勾配がきついがわかる。

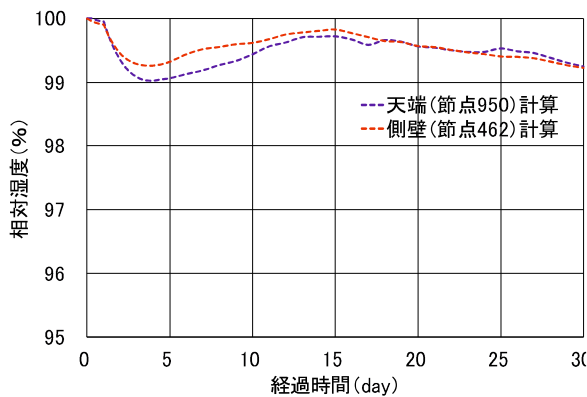


図-5.60 相対湿度の解析結果
(天端節点 950, 側壁節点 462)

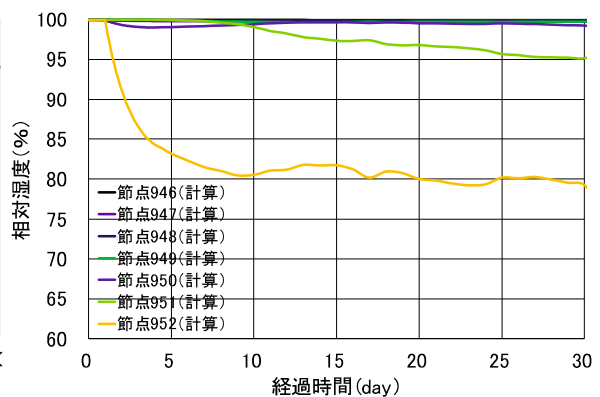


図-5.61 天端部深さ別の節点の相対湿度の解析結果

c) ひずみの計測結果と解析結果の比較

F トンネルでは、天端においてコンクリート内部のひずみが計測されている。計測された実ひずみを図-5.62に示す。

計測された実ひずみは、内空側がわずかにひずみは大きい、ほぼ同様の値に収束している。これは、前述の相対湿度の解析結果から、両節点ともほとんど乾燥していない可能性があり、このため、節点の相対湿度が同様であるため、ひずみの収束値も同程度となっている可能性もある。

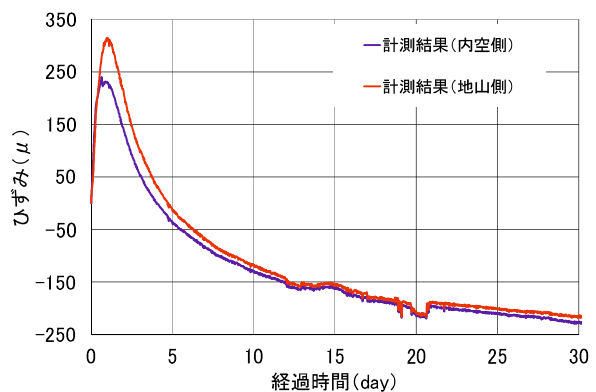


図-5.62 ひずみの計測結果

図-5.63には、温度応力、乾燥収縮ひずみおよび脱枠後の自重によるひずみを合成した計算値を示す。図-5.60によると、内空側より地山側へいくに従い、わずかではあるが、ひずみが増加する傾向にある。

図-5.64 に計測値と計算値を比較したものを示す。計測値は図-5.58 に示す 948 節点(内空側), 950 節点(地山側)で行われており, 計算結果は隣接する 905 要素, 906 要素(地山側), 908 要素, 909 要素における計算値を示した。

引張ひずみに着目すると内空側(青線)は材齢 10 日程度までは一致しており, 10 日以降は計測値より計算値が小さくなる傾向にある。また, 地山側(赤線)は逆に材齢 15 日程度までは計測値より計算値が大きくなり, 15 日以降は計測値と計算値がほぼ一致する結果が得られている。

若干の誤差はあるものの, 全体的にはほぼ再現できていると考えられる。

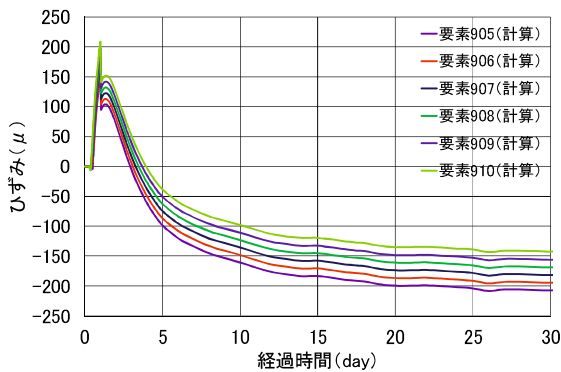


図-5.63 ひずみの解析結果

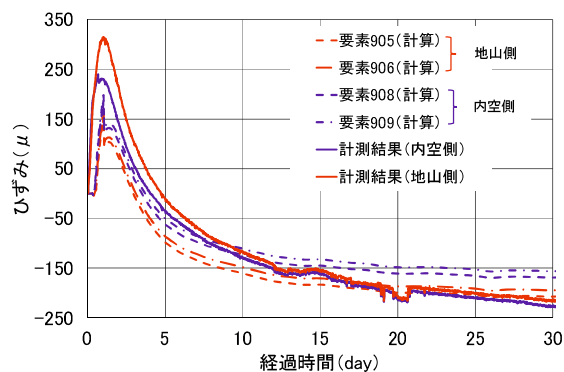


図-5.64 計測結果と解析結果のひずみの比較

d) 応力解析結果

覆工コンクリートは, 通常のマスコングリートと比較すると, 体積に比べ表面積が大きいことから乾燥収縮の影響が大きいことが予想される。また, 比較的早期に脱枠されることから自重の影響も懸念される。そこでここでは, これらの要因がひび割れ発生にどの程度, 影響を及ぼすか検討を行う。図-5.65 および図-5.66 に温度応力だけの最大主応力とひび割れ指数の履歴を示し, 図-5.67 および図-5.68 に温度応力に乾燥収縮の影響を加えたもの, さらに, 図-5.69 および図-5.70 に温度応力, 乾燥収縮に自重の影響を加えたものを示す。

温度応力のみ(図-5.65, 図-5.66)のケースと, 温度応力+乾燥収縮を考慮したケース(図-5.67, 図-5.68)を比較すると, 乾燥収縮を考慮することによって, 深度 10cm 以上の要素は温度応力だけのケースより最大主応力(引張応力)は減少しているが, 乾燥が著しい内空側表面の要素 910 では最大主応力大きくなり, これにともなって, ひび割れ指数が小さくなっている。とくに内空側表面の要素はひび割れ指数が, 1.0 を下回っており, 表面ではひび割れ発生の可能性が高いことを示している。

図-5.69, 図-5.70 にさらに自重を考慮した結果を示すが, 自重を考慮しない場合とほとんど変わらないことから自重による影響は, 小さいものと思われる。今回の解析結果では, 覆工コンクリートの変位は, 当初は天端が上方に上がるような形で変位し, 自重作用時(脱枠時)には, 全体が内空側へ縮小する形で変位しており, 覆工コンクリート

には自重による引張応力はほとんど発生していない。トンネル形状が上半単芯円であることによるものであると考えられ、扁平な断面形状である場合には自重による引張応力が発生することも考えられる。

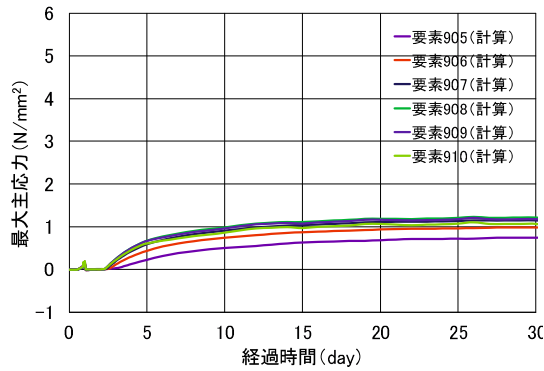


図-5.65 最大主応力 (温度応力のみ)

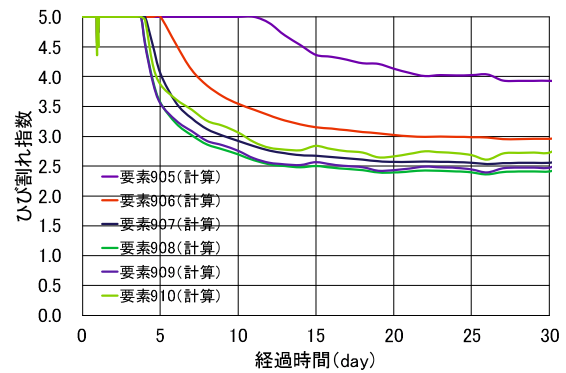


図-5.66 ひび割れ指数 (温度応力のみ)

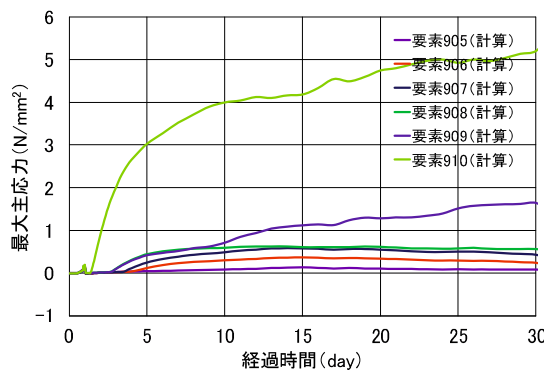


図-5.67 最大主応力 (温度応力+乾燥収縮)

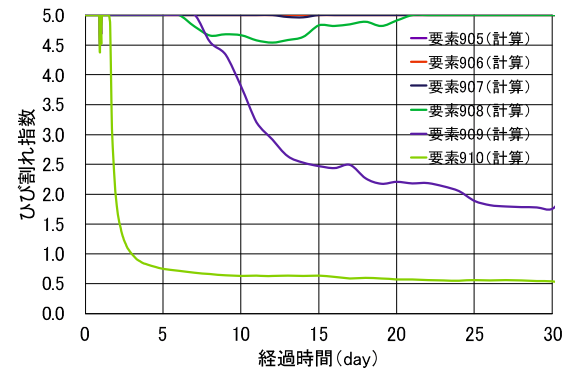


図-5.68 ひび割れ指数 (温度応力+乾燥収縮)

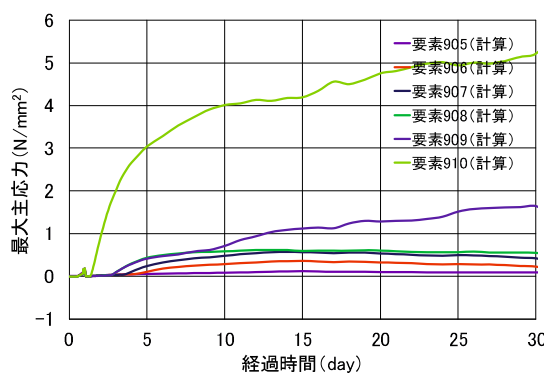


図-5.69 最大主応力
(温度応力+乾燥収縮+自重)

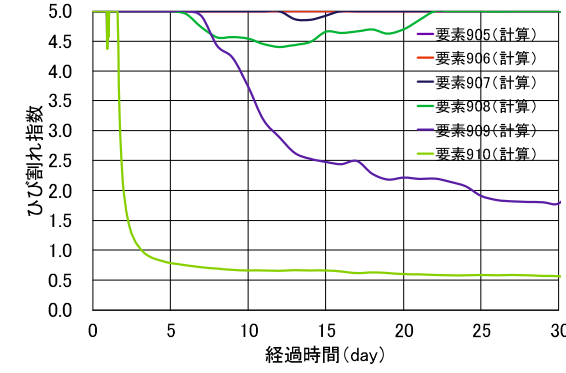


図-5.70 ひび割れ指数
(温度応力+乾燥収縮+自重)

注) 図中の要素 905 は最も地山側の要素であり、906→909 で内空側に移
行し、要素 910 は覆工表面の要素を示す。(図-5.58 参照)

図-5.71 には温度応力のみの場合と、温度応力+乾燥収縮を考慮した場合を内空側の要素について比較するため、内空側表面（要素 910）および内空側より 2 番目の要素（要素 909）を抽出し、最大主応力を示した。また、図-5.72 には同様にひび割れ指数について抽出した。

これらの図によると、温度応力のみの場合では、内空側表面の要素および 2 番目の要素とも、最大主応力はほぼ同様であり、このため、ひび割れ指数もほぼ同様で、ともに 2.0 を上回る結果となっている。

これに対して、内空側表面要素では温度応力のみでは最大主応力が 1.0N/mm^2 程度であったものが、乾燥収縮を考慮すると、最大主応力は乾燥開始時から急激に大きくなり、30 日目では 5.0N/mm^2 程度となっている。これにともない、ひび割れ指数も小さくなり、1.0 を下回る結果が得られている。

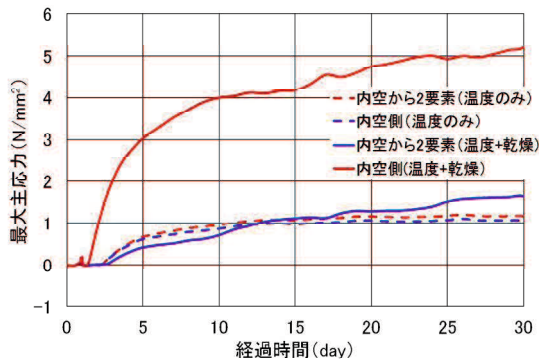


図-5.71 最大主応力の比較
(温度応力)と(温度応力+乾燥収縮)

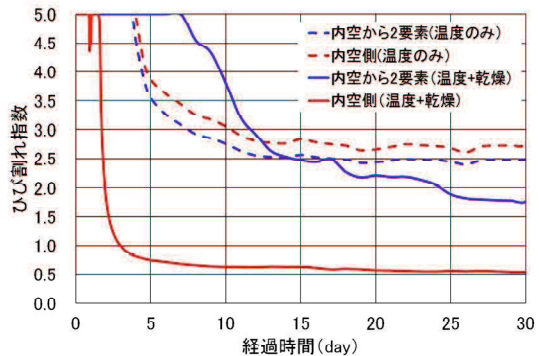


図-5.72 ひび割れ指数の比較
(温度応力)と(温度応力+乾燥収縮)

今回の解析の結果では、温度応力ではひび割れ発生確率は低いが、乾燥収縮が加わることにより、表面要素にひび割れ発生確率が高くなる結果となっている。

これは、一つの計算例ではあるが、覆工コンクリートの初期ひび割れを検討するにあたっては、温度応力と乾燥収縮を考慮する必要があることを示唆している。

5.5 第5章のまとめ

本章では、覆工コンクリートのひび割れ解析の基本となる温度解析および湿気移動解析について、覆工コンクリートに適応できる解析モデルの構築、材料特性値などの入力値の検討を行った。図-5.73に収縮によるひび割れ検討のフローに示した赤字部分が本章でのおもな研究対象である。

温度解析にあたっては、セントルのモデル化や天端坑内外気温の上下差による温度差を入力値として提案し、PSOによる逆解析を行い、入力値の検討を行った。研究にあたっては、このような解析が可能となるプログラムの構築を行った。

次にこの温度解析の結果を踏まえて、湿気移動解析を行った。湿気移動解析にあたっては、透湿率、湿気容量、および蒸発率の材料特性値の設定について課題があったため、大型実験の結果に基づく検討を加え、これら材料特性値の設定方法を提案した。

さらに、ここで提案した温度解析結果、これに基づく湿気移動解析結果を用いた応力解析、ひび割れ解析を実施して、考察を行ったものである。

本研究で得られた成果および知見を以下にまとめる。

- ◇ 本研究での解析を行うにあたり、2次元非定常熱伝導有限要素逆解析プログラムおよび2次元非線形非定常湿気移動有限要素逆解析プログラムを開発した。
- ◇ 温度解析に関する感度解析の結果より、覆工コンクリートの温度解析には、コンクリートの断熱温度上昇特性、坑内外気温、コンクリートの比熱や熱伝導率、コンクリート表面やセントル表面の熱伝達率、および岩盤の熱伝導率や比熱影響が大きいことが確認できた。
- ◇ 覆工コンクリートの温度解析において、セントルをモデル化することによって、コンクリートの水和熱がセントルを伝わって拡散する現象や、セントルそのものの温度上昇に費やされる現象が再現でき、より正確な温度解析が行える。
- ◇ 天端上部の防水シートの熱伝導率を1/10～1/30程度に低減することによって、天端上部の空気層をモデル化し、この現象を考慮することができた。
- ◇ 覆工コンクリート施工時は、トンネル坑内外気温に高さ方向の分布が生じ、上部ほど外気温が高くなる傾向にあり、これを解析モデルに取り入れることにより、温度解析の精度は向上する。
- ◇ セントルのモデル化、天端上部の空気層をモデル化、トンネル断面内の高さ方向の温度差のモデル化によって、水和発熱による覆工コンクリート温度が側壁部より天端の方が高くなる現象を模擬できる。これにより、天端に発生する縦断方向にひび割れが多く発生することも合理的に説明できる。

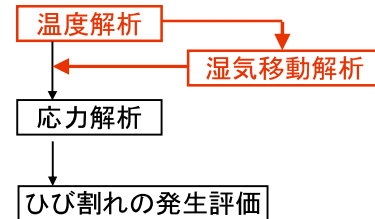


図-5.73 収縮によるひび割れ解析のフロー
(図-3.30 を再掲)

- ◇ コンクリートの断熱温度上昇特性は、規準類に示されている算定値より小さな値を用いることで、これまでと同様の手法で計算でき、本検討では、8割～9割程度に低減すれば、実現象を再現できることがわかった。
- ◇ トンネル施工中は閉鎖された空間であることから、コンクリート表面などの熱伝達率は、規準類に示されている値より小さくなる。
- ◇ 湿気移動解析にあたっては、透湿率、湿気容量、蒸発率の算定式について、具体的な提案を行うことができた。湿気移動解析を正確に行えるようになったことから、乾燥収縮を含めた応力解析がより正確に行えるようになった。
- ◇ 乾燥収縮や自己収縮など、さまざまな要因を考慮した温度応力解析が行えるようになった。これによって、覆工コンクリートでは、温度応力と乾燥収縮の影響を合わせて考える必要があることを示すことができた。
- ◇ 乾燥収縮の影響は大きく、乾燥が進む内空側表面ではその影響が著しい。また、乾燥収縮の影響は、材齢が進む（乾燥が進む）ほど、増加し長期に渡って影響を及ぼすものと考えられる。
- ◇ 断面形状にもよるが、本研究の対象とした一般的な断面では若材齢時の脱枠による自重の影響は比較的小さく、覆工コンクリートの主応力やひび割れ指数の増加はほとんどなかった。

上述したように、覆工コンクリートの温度応力、湿気移動解析において、計測データの分析や逆解析を通じて、ある程度、実現象を模擬できるモデル化や材料特性値などの入力値の設定方法を提案できた。しかしながら、本研究において使用した計測データは数例の計測結果によるものであり、また、ばらつきもあり、今後、さらに実現場や実験での計測データを蓄積し、これらデータに基づく研究が必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) Chamila K. Rankoth, Akira Hosoda, Keitai Iwama : Modeling and Verification of Early Age Thermal Stress in Second Lining Concrete of NATM Tunnels, Journal of Advanced Concrete Technology, vol.15, No.6, pp.213-226, 2017.
- 2) 中村秀明, 浜田純夫 : 材料の不確定性を考慮したコンクリート構造物の熱伝導有限要素解析, 土木学会論文集, No.496, V-24, pp.71-80, 1994
- 3) 土木学会編 : コンクリート標準示方書 [設計編][施工編] 2017 年制定, 土木学会, 2018.3.
- 4) 日本コンクリート工学会編 : マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 日本コンクリート工学会, 2016.11.
- 5) 日本道路公団試験所 : トンネル標準設計に関する研究報告書—数値解析と施工実績の分析—試験所技術資料第 350 号, pp.167-170, 1986.2.
- 6) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 : 山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.310, 2008.5.
- 7) 中村明彦, 國近光生, 中村秀明 : 覆工コンクリート初期ひび割れ予測のための温度解析に関する考察, 土木学会論文集 F1, Vol.74, No.2, 2019, 掲載予定
- 8) 日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト普及委員会 : JCMAC3, <http://www.jcmac.jp/index.html>, 2018.10
- 9) 鍵本広之, 安田幸弘, 木下 茂, 川村満紀 : 大型コンクリート円柱における A S R 表面ひび割れの発生メカニズム, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, pp.201-211, 2012.
- 10) 吉田圭一 : コンクリート中の湿気移動現象に関する研究, 岐阜大学平成 12 年度卒業論文, pp.29-32, 2001.2
- 11) 高山博文, 増田康男, 仲山貴司, 植村義幸, Narentorn YINGYONGRATTANAKUL, 朝倉俊弘 : トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの発生メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.132-145, 2010.3.
- 12) 高山博文 : トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究, 京都大学学位論文, 2009.9.
- 13) 日本コンクリート工学会編 : マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 日本コンクリート工学会, 2016.11.
- 14) 日本コンクリート協会 : コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会報告書, pp.101-121, 2001.

第 6 章

結 論

第6章 結 論

覆工コンクリートにおけるひび割れは、直ちに力学的な欠陥とはならないものの、構造的な欠陥に至る懸念もある不具合と評価されるものであり、ひび割れの少ない高品質の覆工コンクリートの構築は重要な課題の一つとされている。

このような背景から、覆工コンクリートにおいても、施工後1~2年で発生する初期ひび割れを対象としたひび割れ解析を要求されることが増えてきている。トンネル覆工コンクリートに施工後1~2年で発生する初期ひび割れを予測するためには、温度解析をもとに覆工コンクリートの温度分布を求め、その結果を踏まえて湿気移動解析、さらに応力解析（ひび割れ解析）を行う必要がある。

図-6.1 にコンクリートのひび割れ解析の流れと本研究の関係を示す。

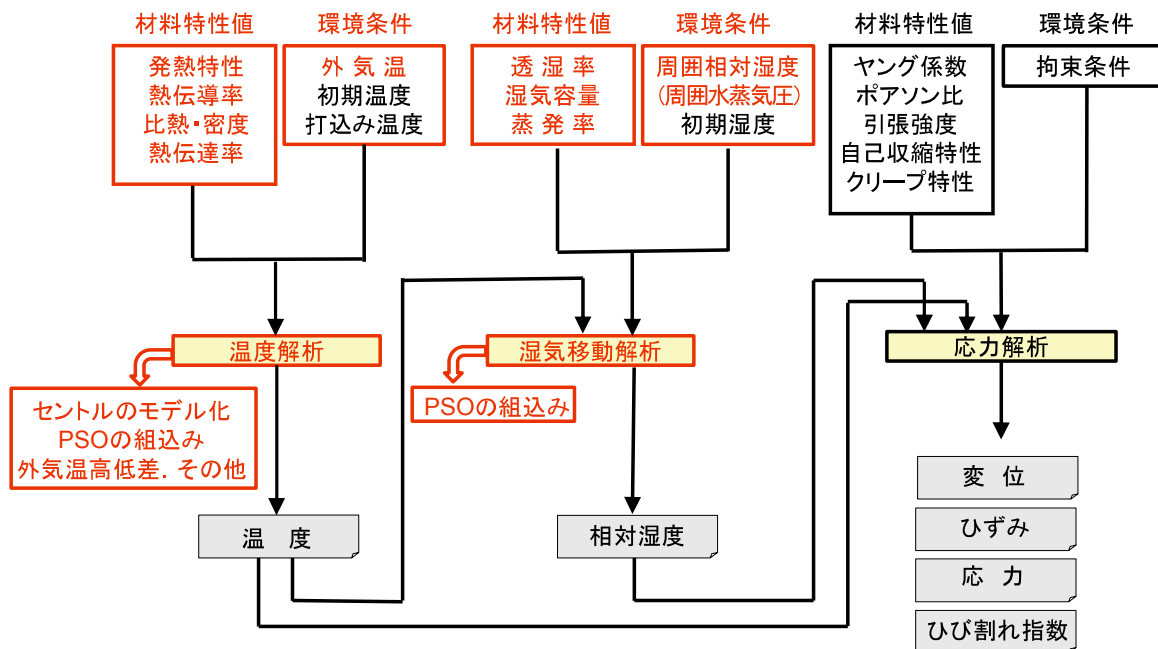


図-6.1 コンクリートのひび割れ解析の流れと本研究の関係

図-6.1 に赤字で示した項目が、本研究のおもな対象である。この図にも示したように、本研究は、覆工コンクリートの初期ひび割れを対象に温度解析、湿気移動解析、応力解析を複合して予測できる解析モデルの構築、および、環境条件や材料特性値などの入力データの適正化を検討することにより、初期ひび割れ予測の信頼性向上を目的とするものである。

(1) 環境条件の予測手法

コンクリートの温度解析や湿気移動解析は、主要な入力データである外気温、湿度が、解析の信頼性を左右する。このため、本研究では気象観測所やアメダス観測所から提供される30年間の全国の気象観測データをもとに、日本全国の外気温、湿度の年間の変動を予測する予測式を構築した。この予測モデルは、緯度、経度および標高を入力データとして、任意の位置、任意の月日の日平均気温や日平均水蒸気圧、相対湿度を求めることができるもので、今までは、ある限られた点（観測所位置）でしか得られなかった外気温や相対湿度、水蒸気圧などの環境条件が任意の地点で得られるようになった。とくに空気中の水分量については、観測箇所も少なく、また、ばらつきが大きく予測が極めて困難であったが、水蒸気圧による整理を行うことで、予測モデルを構築することができた。これらの予測モデルは、直接、コンクリートの温度解析や湿気移動解析の基本的な入力データとして、活用可能なもので、コンクリートの温度解析や湿気移動解析の信頼性の向上に有効である。

本研究で構築した環境予測モデルの一覧を表-6.1 に示す。

表-6.1 構築した環境予測モデル

環境予測モデル	予測モデルからの出力	算定式および算定表
日平均気温予測モデル	日平均気温の30年平年値	式(4.28)～式(4.38)
日平均水蒸気圧予測モデル (直接予測モデル)	日平均水蒸気圧の30年平年値 ※間接予測モデルは、日最低気温から水蒸気圧を算出	式(4.41)～式(4.46)
日平均水蒸気圧予測モデル (2パラメータ間接予測)		式(4.47), 式(4.49) 表-4.12, 表-4.13, 表-4.14
日平均水蒸気圧予測モデル (3パラメータ間接予測)		式(4.48), 式(4.49) 表-4.12, 表-4.13, 表-4.15
日平均相対湿度予測モデル	日平均相対湿度の30年平年値 ※日平均気温から求めた飽和水蒸気圧と日平均水蒸気圧から算出	

なお、外気温や水蒸気圧、相対湿度の予測はコンクリートの温度解析や湿気移動解析以外にも利活用が可能であり、地域区分の細分化による精度向上や、時間変動のモデル化も可能である。

坑内外気温、および相対湿度予測モデルについては、トンネル坑内の実測値をもとに、上記で予測した外気温、相対湿度から、予測モデルを構築した。本研究で構築した坑内環境予測モデルの一覧を表-6.2 に示す。

坑内環境予測モデルは一例での検討であるため、係数そのものの信頼性は低いものの、

坑内環境を算定するための計算式の構築や坑内外気温予測モデルの利用について道筋をつけることができた。今後は、計測データを蓄積し、適切な係数値を算出することにより、覆工コンクリートの温度解析や湿気移動解析の入力値として有効となると考えられる。

表-6.2 構築した坑内環境予測モデル

坑内環境予測モデル	予測モデルからの出力	算定式および算定表
坑内外気温予測モデル	トンネル坑内の日平均気温	式 (4.62) ~ 式 (4.65) 表-4.26
坑内相対湿度予測モデル	トンネル坑内の日平均相対湿度	式 (4.68) 表-4.28

(2) 覆工コンクリートのひび割れ解析におけるモデル化と材料特性値の検討

覆工コンクリートのひび割れ解析では、まず始めに時々刻々と変化する覆工コンクリートの温度分布を正確に把握することが基本となる。温度解析にあたっては、セントルのモデル化や坑内外気温の高さ方向の相違を考慮することを提案し、PSOによる逆解析を行い、これらの妥当性の検討を行った。なお、本研究では、このような解析が可能となるプログラムを独自に開発している。

次にこの温度解析の結果を踏まえて、湿気移動解析を行った。湿気移動解析にあたっては、入力としての材料特性値（透湿率、湿気容量、および蒸発率）の設定方法について課題があったため、他機関で行われた湿気移動実験の結果をもとに検討を行い、これら材料特性値の設定方法を提案した。

さらに、ここで提案した温度解析結果、これに基づく湿気移動解析結果を用いた応力解析（ひび割れ解析）を実施し、考察を行った。

本研究で得られた成果および知見を以下にまとめる。

◇ 本研究での解析を行うにあたり、2次元非定常熱伝導有限要素解析プログラムおよび2次元非線形非定常湿気移動有限要素解析プログラムを開発した。この解析コードは、温度解析においては、①セントルの撤去を模擬するため、要素の除去が可能、②PSOによる逆解析が可能、③逆解析では外気温の高さ方向の違いも同定可能、などの特徴がある。また、湿気移動解析においても、PSOによる逆解析が可能であり、材料特性値（透湿率、湿気容量、および蒸発率）の同定を行え、同定値を用いた解析が可能である。

◇ 温度解析では、入力値の感度分析や逆解析を行い、覆工コンクリートの温度解析に適用可能なモデルの構築、および入力値の設定手法などを提案した。

感度解析の結果より、覆工コンクリートの温度解析には、コンクリートの断熱温度上昇特性、坑内外気温、コンクリートの比熱や熱伝導率、コンクリート表面やセントル表面の熱伝達率の影響が大きいことが確認できた。また、マスコンクリートではあまり影響を及ぼさない岩盤の熱伝導率や比熱も覆工コンクリートの場合には影響があることが確認できた。

- ◇ 覆工コンクリートの温度解析では、一般にセントルはモデル化されないが、セントルを要素分割し、モデル化することによって、コンクリートの水和熱がセントルを伝わって拡散する現象やセントルそのものの温度上昇に費やされる現象が再現でき、より正確な温度解析が行える。
- ◇ 覆工コンクリートの天端上面はコンクリートの充填が最後となり、また、充填コンクリートの沈下やブリーディング水が上部に溜まるため、防水シートとの界面に空気層ができる。そのため、覆工コンクリートからの熱伝導が界面の空気層で阻害されている可能性がある。本研究では、天端上部の防水シートの熱伝導率を1/10～1/30程度に低減することによって、天端上部の空気層をモデル化し、この現象を考慮することを提案した。
- ◇ 覆工コンクリート施工時は、重機や照明による熱が上部に溜まるため、トンネル坑内外気温に高さ方向の分布が生じ、上部ほど外気温が高くなる傾向にあり、これを温度解析に取り入れることにより、温度解析の精度は向上する。
- ◇ マスコンクリートと同様の断熱温度上昇式の適用が可能なように、計測結果をもとにコンクリートの断熱温度上昇特性に対する補正率の考え方を提案した。
温度解析結果に大きな影響を及ぼすコンクリートの断熱温度上昇特性は、規準類に示されている算定値より小さな値となる傾向にあり、本検討では、8割～9割程度に低減すれば、実現象を再現できることがわかった。
- ◇ トンネル施工中は閉鎖された空間であることから、コンクリート表面などの熱伝達率は、規準類に示されている値より小さくなる。規準類で $14 \text{ W/m}^2\text{C}$ と示されている熱伝達率が、本検討では、 $2\sim 10 \text{ W/m}^2\text{C}$ となった。
- ◇ 湿気移動解析にあたっては、透湿率、湿気容量、蒸発率の設定が課題であると考えられる。これらの材料特性値の設定方法の検討にあたり、他機関で行われた湿気移動実験の結果をもとに検討（逆解析）を行い、透湿率、湿気容量、蒸発率の算定式について、具体的な提案を行うことができた。湿気移動解析を正確に行えるようになったことから、乾燥収縮を含めた応力解析がより正確に行えるようになった。
- ◇ 乾燥収縮や自己収縮などの要因を考慮した温度応力解析が行えるようになったことから、ひび割れ解析の精度向上につながると考えられる。この解析モデルを用いた試算によって、覆工コンクリートでは、温度応力と乾燥収縮の影響を合わせて考える必要があることを示すことができた。
- ◇ 乾燥収縮の影響は大きく、乾燥が進む内空側表面ではその影響が著しい。また、乾燥収縮の影響は、材齢が進む（乾燥が進む）ほど、増加し長期に渡って影響を及ぼすものと考えられる。
- ◇ 断面形状にもよるが、本研究で対象とした一般的な断面では若材齢時の脱枠による自重の影響は比較的小さく、覆工コンクリートの主応力やひび割れ指数の増加はほとんどなかった。

(3) 覆工コンクリートのひび割れ抑制にあたっての今後の課題

上述したように、覆工コンクリートの温度解析や湿気移動解析において、計測データの分析や逆解析を通じて、ある程度、実現象を模擬できるモデル化や材料特性値などの入力値の設定方法を提案できた。

たとえば、今までの計測事例から、覆工コンクリートの水和発熱において、天端部のコンクリート温度が側壁部に比較して高いケースが多く、一方では、覆工コンクリートのひび割れは、天端付近に縦断方向に発生することが多いことが知られている。この因果関係は明確にされたわけではないが、セントルのモデル化、天端上面の空気層のモデル化、天端と脚部での坑内外気温の差のモデル化などにより、天端付近のコンクリート温度が高くなることについては模擬できた。

しかしながら、本研究において使用した計測データは数例の計測結果によるものであり、また、ばらつきもあり、今後、さらに実現場や実験での計測データを蓄積し、これらデータに基づく分析が必要であると考えられる。

このデータのばらつきの要因は、さまざまなものが考えられるが、覆工コンクリート独特の施工や形状、構造の影響によるものもあり、外的な要因の影響を受けやすいことによることも一因であると考えられる。

たとえば、天端上面の空気層の状況、上部と下部の温度差、坑内の風速の影響などは各々のトンネルで異なるものと考えられる。さらに、覆工コンクリートの部材厚は、一般構造物と異なり、背面が掘削された地山であることから、設計部材厚にいわゆる余掘り、余巻きを含んだ厚さであることも特徴である。また、覆工コンクリートは、覆工厚が薄いのに対して表面積が大きく、外気温、周辺湿度などの環境とともに、覆工コンクリートと防水シートの界面やその背面の状態、岩盤の熱的材料特性値などの外的な要因の影響を大きく受け、コンクリートの水和発熱にも影響があると推察される。これらの要因がコンクリートの水和発熱の予測を困難なものとしていると考えられる。

湿気移動解析においては、室内実験のデータをもとに、材料特性値（透湿率、湿気容量、および蒸発率）を設定したが、一例での検討であるため、今後、多くのデータに基づく検討により、汎用性を高めるとともに、セメントの種類や配合の違いなどを明らかにする必要がある。

上述したように、今後、さらに多くの現場で、覆工コンクリートの温度や湿度、ひずみなどの計測データを蓄積し、これらデータに基づく分析が必要であると考えられる。

計測にあたっては、覆工コンクリートの断面方向で数箇所のコンクリート内の温度やひずみを計測するとともに、打込み温度、高さ方向での温度差を含めた坑内外気温や坑内水蒸気圧または坑内相対湿度の推移などを把握しておくことが望ましい。さらには、坑内風速の推移や覆工コンクリートの部材厚、背面の状況、地山熱特性値などの把握が望まれるところである。

謝 辞

本研究の遂行ならびに、論文の取りまとめにあたり、山口大学工学部中村秀明教授には、研究全般にわたりご懇切な指導をいただきました。本論文のテーマとしたトンネルの覆工コンクリートに関しては、建設コンサルタントとして今まで深く取組んでいなかったこともあり、基礎からの出発となりましたが、中村先生にはまさに手取り足取り温かくご指導いただきました。深く感謝いたします。

山口大学工学部清水則一教授，進士正人教授，高海克彦准教授，吉武勇准教授には、論文の構成から研究内容の細部にわたり、時には厳しく論文をまとめることの難しさについて、時には暖かく有益でかつ的確なご助言，ご指導を頂戴いたしました。深く感謝いたします。

株式会社森本組國近光生博士には、博士の先輩として、また、共同研究者として、土木学会論文集などの投稿論文の作成にあたり、休日返上で議論，ご指導いただきました。深く感謝いたします。

本研究は、NPO 法人臨床トンネル研究所理事長の中川浩二山口大学名誉教授から、扁平トンネルの覆工コンクリートのひび割れというテーマをいただいたことが発端です。研究の機会を与えていただいたことに感謝いたします。

私がトンネル屋としてスタートを切ったのはくしくも山口の地でした。40年前、大学を出て施工管理に着任したのが山口であり、そのときの上司が故崎山和男株式会社テムロ前社長です。崎山前社長には、トンネル屋としての手ほどきを受け、この10年後に株式会社テムロをともに創立することになります。改めて、感謝の意を表します。

本研究では、多くの方に様々な貴重な計測データのご提供を受けました。前西松建設株式会社の亀谷英樹氏，鹿島建設株式会社の横尾敦氏，五洋建設株式会社前田智之氏にはトンネル覆工コンクリートの温度計測のデータのご提供を受けました。また、近畿大学工学部崔軍教授には廃坑トンネルの坑内環境計測データのご提供を受けました。NPO 法人トンネル工学研究会理事長朝倉俊弘京都大学名誉教授にはトンネル室内実験データの使用を快く、許可いただき、また、温かい激励をいただきました。ここに深謝いたします。

そのほか、ここに書ききれなかった多くの人に支えられ、この研究を行うことができました。株式会社テムロ，有限会社エコストの社員の皆様には研究に対するご理解を賜り，ご協力をいただきました。感謝の意を表します。

最後に、休日や深夜の作業などに、文句も言わず支えてくれた妻真希，かまってやれなかった眞和彦，ごめんなさい。そして、ありがとう。



本論文に関する発表論文

- (1) 著者氏名：中村 秀明，中村 明彦，河村 圭
論文題目：マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの精度向上に関する研究
学術雑誌名：コンクリート工学年次論文集
巻，号，頁：35 巻，1 号，pp.1273-1278
発行年月：2013 年 7 月発行
(本文との関連：第 4 章)
- (2) 著者氏名：中村 明彦，國近 光生，亀谷 英樹，中村 秀明
論文題目：覆工コンクリートの初期ひびわれ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析
学術雑誌名：土木学会論文集 F1 (トンネル工学)
巻，号，頁：70 巻，3 号，pp.I_1-I_16
発行年月：2014 年 11 月発行
(本文との関連：第 3 章)
- (3) 著者氏名：中村 明彦，國近 光生，河村 圭，中村 秀明
論文題目：コンクリート構造物耐久性評価のための気象環境条件のモデル化に関する研究
学術雑誌名：土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)
巻，号，頁：72 巻，3 号，pp.288-303
発行年月：2016 年 8 月発行
(本文との関連：第 4 章)
- (4) 著者氏名：中村 明彦，國近 光生，細田 暁，中村 秀明
論文題目：トンネル覆工コンクリート初期ひび割れ解析のためのトンネル坑内温湿環境のモデル化に関する研究
学術雑誌名：コンクリート工学年次論文集
巻，号，頁：40 巻，1 号，pp.1215-1220
発行年月：2018 年 7 月発行
(本文との関連：第 4 章)
- (5) 著者氏名：中村 明彦，國近 光生，中村 秀明
論文題目：覆工コンクリート初期ひび割れ予測のための温度解析に関する考察
学術雑誌名：土木学会論文集 F1 (トンネル工学)
巻，号，頁：74 巻，2 号，
発行年月：2019 年掲載予定
(本文との関連：第 5 章)

