

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	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
氏 名	中村 明彦
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>本研究の成果として、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 温度解析および湿気移動解析においては、主要な入力データである外気温や相対湿度が、解析精度を左右する。本研究では、30年間の全国の気象観測データをもとに、緯度、経度、標高の位置情報から、日本全国の外気温、相対湿度の年間の推移を簡便に予測する予測式を構築した。また、トンネル坑内の実測値をもとに、上記で予測した外気温や相対湿度からトンネル坑内の気温や相対湿度の予測手法を提案した。 ➤ ひび割れ解析の基本となる温度解析について、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。 ➤ 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を開発した。この解析コードは、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外気温の高さ方向の違いも同定可能、④湿気移動解析においては本研究で提案した透湿率、湿気容量および蒸発率の算出方法を組み込んだことなどの特徴がある。 ➤ 温度解析におけるモデル化にあたっては、セントルのモデル化、覆工コンクリートの天端上面と防水シートとの界面に空気層を考慮したモデル化、トンネル高さ方向の坑内外気温分布(天端と脚部の温度差)を考慮したモデルを提案し、この妥当性を示した。 ➤ 通常のマスコングリートと同様の断熱温度上昇式が適用できるように、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。 ➤ 温度解析における材料特性値として、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こと、天端上面空気層を考慮し、天端上面のシートの熱伝導率を低減することなどを提案した。 ➤ 湿気移動解析にあたっては、大型の実験結果から、透湿率、湿気容量および蒸発率の算定式を提案した。 	

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

(論文博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博乙 第 0144 号	氏名	中村 明彦
最終試験担当者		主査委員	中村 秀明 清水 則一 進士 正人 高海 克彦 古武 勇
【論文題目】			
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)			
【論文審査の結果及び試験，諮問の結果】			
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>			

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。

公聴会には、学内外から 23 名の聴講者があった。公聴会での主な質問は、①環境予測モデルのトンネル坑内での対象位置、②提案されたひび割れ解析手法の事前設計での適用性、③外気温予測の 10 年平年値への対応、④施工時だけでなく供用時への適用の可能性、⑤長期間解析の適用性、などであった。いずれの質問に対しても発表者から適切な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。論文内容および審査会、公聴会での質疑に関する応答などから、最終試験を合格とした。

なお、主要な関連論文（査読付き）の発表状況は下記のとおりである。（関連論文：計 5 編）

1. 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集, Vol.35, No.1, pp.1273-1278, 2013 年 7 月
2. 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われ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析, 土木学会論文集 F1, Vol.70, No.3, pp. I_1-I_16, 2014 年 11 月
3. 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, Vol.72, No.3, pp.288-303, 2016 年 8 月
4. 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 年 7 月
5. 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, pp.I_18-I_29, 2019 年 2 月