

博士論文

地山物性の不均質性がトンネル掘削時の挙動
に及ぼす影響に関する基礎的研究

A Fundamental Study on the Effects of Heterogeneity of
Geomechanical Properties on Behavior of Tunnels during Excavation

平成 31 年 3 月

岡崎 泰幸

Yasuyuki Okazaki

山口大学大学院 理工学研究科

学位論文の要旨

コンピュータの発達と数値計算技術の向上により、現在、数値解析は様々な分野で活用されている。トンネルなどの地下構造物の分野においても、トンネルの設計などを目的として数値解析が用いられる場合が多々ある。しかしながら、トンネルの設計時に数値解析を用いたとしても、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想をはるかに超える挙動が生じ、人身事故などの発生を余儀なくすることもある。このような困難を克服するために、トンネルなどの地下構造物の分野においては、不連続体と連続体の観点から、地山の不連続性や異方性を考慮した地山のモデル化が積極的に行われ、それらが地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が数多く実施されてきた。

その一方で、地山は、天然材料であるがゆえに同一地層内においても地山物性が空間的にばらつき（不均質性）を有しているという特徴も有している。この特徴は、不連続体の範疇で解析しうる地山の場合、不連続面に起因する挙動が卓越することから問題となることが少ないが、連続体の範疇で解析しうる地山の場合は、地山物性の不均質性に依存した挙動となり、構造物の安定性などに問題を及ぼす場合がある。しかしながら、トンネルなどの地下構造物の分野では、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合であったとしても、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が行われた例は非常に少ないのが現状である。それに加え、実設計において連続体解析を用いる場合、地山を均質と仮定できる条件についてはあまり議論がなされていないにも関わらず、地山物性の不均質性はモデル化に反映せず、地山の各地層を均質な材料と仮定するのが一般的である。そのため、現状の連続体解析による地下構造物の設計は、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関するリスク評価を十分にできていないと考えられる。したがって、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合の数値解析による地下構造物の設計をより高度なものとし、施工時の安全性などを適切に確保するためには、トンネルなどの地下構造物の分野においても、地山が本来有する地山物性の不均質性を考慮し、地山物性の不均質性がトンネルなどの地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していく必要があると考えられる。

そこで、本論文では、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくための基礎的な知見を得ることを目的とし、地山物性の不均質性を考慮した連続体解析を用いて、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の地山と支保工の挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究を行った。まず、本論文では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにするこ

とを目的として、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られたトンネル周辺変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行った。そして、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削時において不均質な地山を均質と仮定できる条件について検討した。その結果、地山物性の不均質性に関するパラメータである変動スケールの平均がトンネル直径に対して0.09以下であれば、不均質な地山を大域的にはほぼ均質と仮定できることが示され、地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなることが明らかとなった。次に、幌延深地層研究計画で得られた現場試験データを用いて同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、現場で実際に得られている支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討した。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行った。これらの取り組みにより、現場で計測されるような支保工応力の局所的な増加を事前に予測するためには、地山物性の不均質性を考慮した解析が必要であることが示された。その一方で、現場で計測されるような支保工応力の局所的な増加を予測した際に、どの程度の安全余裕度をとるかが今後の重要な課題と考えられた。

この研究により、今後の地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくための基礎的な知見を得ることができた。

Abstract of doctoral thesis

Advances in computers and improvement in numerical computing technology have led to the use of numerical analysis in a variety of fields. In the field of underground structures such as tunnels, numerical analysis is often used for their design. However, it is not unusual for results of numerical analysis to differ from actual behavior, and, in some cases, the differences between reality and predictions are large enough to cause serious accidents. To overcome this drawback, in previous study, the effects of discontinuity and anisotropy of the ground on the behavior and stability of underground structures have been predicted and evaluated via ground modeling with respect to continuous and discontinuous bodies.

On the other hand, ground, being a natural material, exhibits spatial variation (heterogeneity) in geomechanical properties, even within the same stratum. This characteristic is rarely a problem in cases where the ground is considered a discontinuous body, since in such cases, behavior originating in the planes of discontinuity dominates. However, in cases where the ground is considered a continuous body, problems might arise in terms of stability of structures, since the actual behavior depends on the heterogeneity of the geomechanical properties. Despite this, even in the latter cases, there are currently very few examples of predictions/evaluations of the effects of heterogeneity of geomechanical properties on the behavior and stability of underground structures, in particular, of cases that consider the heterogeneity of geomechanical properties within the same stratum. Additionally, when continuum analysis is used in actual design, it is common to assume that each stratum is a homogeneous material, without reflecting the heterogeneity of geomechanical properties in the modeling, and without a proper discussion of the conditions under which the ground can be assumed homogeneous. For this reason, the current design of underground structures using continuum analysis is considered inadequate in terms of assessing risk related to the effects of heterogeneity of geomechanical properties on the behavior and stability of underground structures. Hence, to improve the design of underground structures using numerical analysis in cases where the ground can be considered a continuous body, and ensure adequate safety during construction, it is necessary to consider the heterogeneity of geomechanical properties, and predict and evaluate its effects on the behavior and stability of underground structures such as tunnels.

The aim of this work was to gain fundamental knowledge for predicting and evaluating the effects of heterogeneity of geomechanical properties on the behavior and stability of underground structures. For this purpose, I studied the effects of heterogeneity of geomechanical properties on the behavior of ground and tunnel supports during tunnel excavation using continuum analysis while considering the heterogeneity of geomechanical properties.

To identify the extent of heterogeneity of geomechanical properties for which ground can be

assumed homogeneous while performing tunnel excavation analyses, such an analysis was first performed taking into account the heterogeneity of ground deformation properties within the same stratum. Using the displacements around the tunnel obtained from this analysis, a back analysis was then performed assuming that the ground was homogeneous. Next, by evaluating the variations and differences in the analysis results, the conditions that allow heterogeneous ground in the same stratum to be assumed homogeneous during tunnel excavation analysis were examined. My results indicated that when the average of the scale of fluctuation relative to the tunnel diameter, a parameter related to the heterogeneity of geomechanical properties, ≤ 0.09 , heterogeneous ground can be assumed roughly homogeneous on a global scale. This indicated that the magnitude of the scale of fluctuation relative to the tunnel diameter is an important factor for predicting and evaluating the effects of heterogeneity of geomechanical properties on ground behavior around a tunnel.

Next, the question of whether local increase in tunnel support stress obtained in actual field measurements can be predicted from the perspective of heterogeneity of geomechanical properties was investigated by performing a tunnel excavation analysis taking into account the heterogeneity of geomechanical properties within the same stratum using field data obtained from the Horonobe Underground Research Project. In addition, a statistical evaluation of local increase in the measured support stress was performed by statistically analyzing the variation in support stress obtained from the tunnel excavation analysis and evaluating the effects of the heterogeneity of geomechanical properties on tunnel support stress. My studies revealed that an advance prediction of local increase in tunnel support stress requires analyses that take into account the heterogeneity of geomechanical properties. The question of how large the margin of safety should be while predicting local increase in tunnel support stress is an important topic for future research.

This study provided fundamental knowledge for predicting and evaluating the effects of heterogeneity of geomechanical properties on the behavior and stability of underground structures for the future.

目次

第1章 序論	
1. 1. 研究の背景	1
1. 2. 本研究の目的と概要	4
1. 3. 本論文の構成	5
参考文献	7
第2章 既往の研究	
2. 1. はじめに	9
2. 2. 地山のモデル化と代表的な数値解析手法	9
2. 2. 1. 地山のモデル化の考え方	9
2. 2. 2. 連続体解析	10
2. 2. 3. 不連続体解析	13
2. 3. 地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析	16
参考文献	21
第3章 トンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる条件に関する検討	
3. 1. はじめに	27
3. 2. 地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析	28
3. 2. 1. 採用した数値解析手法	28
3. 2. 2. トンネル掘削解析モデルの寸法	29
3. 2. 3. 地山の不均質性の設定	29
3. 2. 4. 初期応力の設定とトンネル掘削解析時の諸条件	37
3. 2. 5. トンネル掘削解析時の変位取得位置	39
3. 3. トンネル掘削時における不均質地山の逆解析	41
3. 3. 1. 採用した逆解析プログラム	41
3. 3. 2. 逆解析に用いる入力パラメータ	42
3. 3. 3. 逆解析に用いた解析モデル	42
3. 3. 4. 逆解析結果と考察	44
3. 4. トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺挙動の詳細な比較	51
3. 5. 結論	68
参考文献	69

第4章 地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響に関する検討	
4. 1. はじめに	71
4. 2. 現場概要	72
4. 3. 350m調査坑道におけるB計測結果とその考察	75
4. 3. 1. B計測	75
4. 3. 2. 支保部材の限界状態	77
4. 3. 3. B計測結果と限界状態の比較	78
4. 4. 対象地山の一軸圧縮強さの確率分布と解析で用いる地山物性値の設定	80
4. 4. 1. 一軸圧縮強さのばらつき	80
4. 4. 2. 解析上の一軸圧縮強さの確率分布の設定	82
4. 4. 3. 強度特性と一軸圧縮強さとの関係	83
4. 4. 4. 変形特性と一軸圧縮強さとの関係	85
4. 4. 5. 解析用物性値	88
4. 5. 地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析	89
4. 5. 1. トンネル掘削解析における諸条件	89
4. 5. 2. 数値解析結果	100
4. 6. 結論	110
参考文献	111
第5章 結論	
5. 1. 本研究のまとめ	113
5. 2. 今後の展望	117

謝辞

第1章 序論

1. 1. 研究の背景

コンピュータの発達と数値計算技術の向上により、現在、数値解析は様々な分野で活用されている¹⁾。地下構造物の分野においても、トンネルの設計などを目的として数値解析が用いられる場合が多々ある。しかしながら、トンネルの設計時に数値解析を用いたとしても、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想をはるかに超える挙動が生じ、人身事故などの発生を余儀なくすることもある。これは、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の性状が、地質学的な成因からサイト毎に異なる不均質性や不連続性、異方性を有しており（図1-1参照）、そのような地山の力学的な挙動をモデル化し、構造物の挙動予測や安定性評価を精度よく行うことが極めて難しいためである^{2),3)}。

このような困難を克服するために、従来から数多くの数値解析手法が提案されてきた⁴⁾。

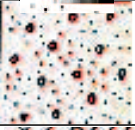
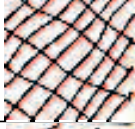
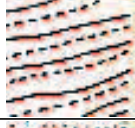
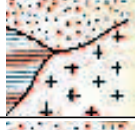
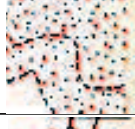

		地山性状	例示
地山	等方性	(a) 均質地山 おおむね均質等方な地山で硬岩、軟岩、塊状地山を含む。 含礫層など局部的に不均質な場合もあり物性試験に注意を要する。	
		(b) 節理地山 硬岩地山に多く、節理系統性の卓越度合いにより、物性評価上、巨視的に等方性か異方性かに分かれる。	
	異方性	(c) 層状地山 異種物性の地層が互層をなす地山と均質地山中に顕著な層理・片理などが存在して異方性を示すものがある。	
		(d) 異種均質地山 物性の異なる2種以上の地層が多層構造・不整合などを形成する地山。他のモデルと複合することが多い。	
	不均質	(e) 風化変質地山 風化変質により局所的に劣化している地山。物性値は一般に漸移するので、岩級別の適切なゾーニングが必要となる。	
		(f) 断層破碎帯を含む地山 断層破碎帯などの弱層の存在が物性評価上顕著な要素となる地山。	

図1-1 様々な地山の性状とその例示²⁾

そのアプローチは、地山を不連続体として取り扱う方法と連続体として取り扱う方法の2つに大別される⁵⁾。前者は、地山内の不連続面（例えば、断層など）を具体的に表現することにより、地山の力学的な挙動をモデル化しようとするもので、個別要素法（Distinct Element Method ; DEM）⁶⁾や不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis ; DDA）⁷⁾などが挙げられる。これらの不連続体解析は、不連続面の間隔が構造物の寸法とオーダー的に等しく、地山の力学的な挙動が主に不連続面の力学特性およびその分布特性に支配される硬岩地山などを対象に用いられる^{8),9)}。これに対し、後者は、地山の力学的な挙動を連続体でモデル化しようとするもので、有限要素法（Finite Element Method ; FEM）を中心に有限差分法（Finite Difference Method ; FDM）や境界要素法（Boundary Element Method ; BEM）などが挙げられる^{8),10)}。これらの連続体解析は、不連続面がほとんどない地山や地山の力学的な挙動が主に地山の材料特性に支配される地山（例えば、軟岩地山や砂質土系地山など）などを対象に用いられる⁸⁾。その他にも、1方向の不連続面群が存在する地山（異方性地山）や不特定多数の不連続面群が存在する地山を対象として、地山を等価な連続体に置き換えて解析する方法なども提案されている¹¹⁾。すなわち、トンネルなどの地下構造物の分野においては、不連続体と連続体の観点から、地山の不連続性や異方性を考慮した地山のモデル化が積極的に行われ、それらが地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が数多く実施されてきた。

一方で、地山は、天然材料であるがゆえに同一地層内においても地山物性（例えば、ヤング係数や一軸圧縮強さなど）が空間的にばらつき（不均質性）を有しているという特徴ももっている¹²⁾（図1-2参照）。この特徴は、不連続体の範疇で解析しうる地山の場合、不連続面に起因する挙動が卓越することから問題となることが少ないが、連続体の範疇で解

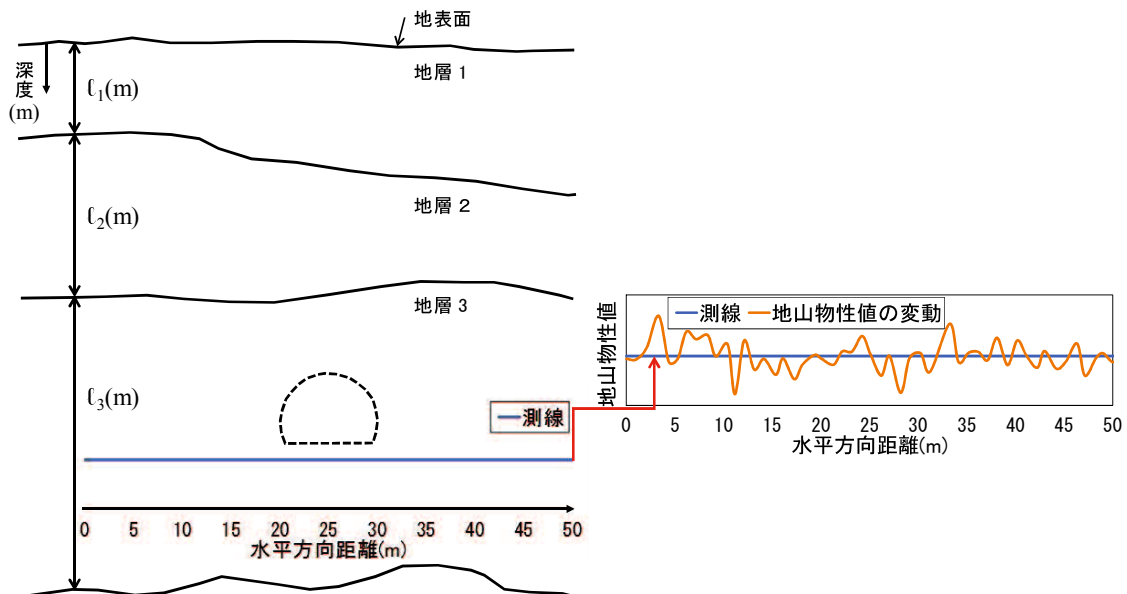


図1-2 同一地層内における地山物性値の空間的なばらつきのイメージ図

析しうる地山の場合は、地山物性の不均質性に依存した挙動となり、構造物の安定性などに問題を及ぼす場合がある¹³⁾。そのため、連続体の範疇で解析しうる地山（例えば、砂質土系地山など）を取り扱うことが多い基礎・土構造物の分野では¹⁴⁾、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を連続体解析にどのように考慮するかといった試みが従来からなされてきた¹⁵⁾。その主な方法の一つとして、地山物性値の空間的なばらつきをエルゴード性（ある一点のばらつきが空間全体のばらつきに等しいとする性質）を仮定する確率場として取り扱い、FEMやFDMなどに基づく連続体解析の各要素または要素群（隣接する複数の要素）に地山物性値を与えることによって地山物性の不均質性を考慮する方法がある¹⁶⁾。この方法では、主として事例調査によって蓄積された鉛直・水平方向の地山物性値のデータを基に地山物性の不均質性が考慮されモデル化される¹⁷⁾。基礎・土構造物の分野では、このようなモデル化による連続体解析を用いて、地山物性の不均質性が基礎・土構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が数多く実施されてきた。現在では、その解析とモンテカルロ・シミュレーションを組み合わせることにより、地山物性の不均質性が基礎・土構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を確率的かつ定量的に評価することが可能となっている¹⁸⁾。

しかしながら、トンネルなどの地下構造物の分野では、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合であったとしても、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が行われた例は非常に少ない。それに加え、実設計において連続体解析を用いる場合、地山を均質と仮定できる条件についてはあまり議論がなされていないにも関わらず、地山物性の不均質性はモデル化に反映せず、地山の各地層（例えば、図1-2中の地層1~3など）を均質な材料と仮定するのが一般的である¹⁹⁾。また、その際の解析で採用される地山物性値は、事前調査で得られた地山物性値にばらつきがあるにも関わらず、簡易的にその平均値が用いられる場合もあるのが現状である。そのため、現状の連続体解析による地下構造物の設計は、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関するリスク評価を十分にできていないと考えられる。実際に、連続体解析による設計時の地山物性の不均質性に関する評価不足がトンネルにおける事故発生要因の1つとなっている場合がある。例えば、福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場の道路陥没事故では、地山の強度の不均質性への評価が不十分なまま連続体解析（地山の各地層を均質と仮定し、各地層の地山物性値に事前調査で得られた地山物性値の平均値を用いた解析）による設計が実施されたことが事故発生要因の1つとされている²⁰⁾。したがって、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合の数値解析による地下構造物の設計をより高度なものとし、施工時の安全性などを適切に確保するためには、トンネルなどの地下構造物の分野においても、地山物性の不均質性が構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する検討を十分にを行い、その影響を予測・評価していく必要があると考えられる。

1. 2. 本研究の目的と概要

上述したような背景を鑑み、本研究では、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくための基礎的な知見を得ることを目的とし、地山物性の不均質性を考慮した連続体解析を用いて、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の地山と支保工の挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究を行う。

特に、本研究では、まずトンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られたトンネル周辺変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行う。そして、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について提案する。それに加え、本研究では、現場試験データを用いて同様な方法によって同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロ・シミュレーションを実施し、実際に得られているトンネルの現場計測結果（トンネル支保工応力）の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討する。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、現場計測結果（トンネル支保工応力）の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。

トンネルなどの地下構造物の分野では、地山物性の不均質性を考慮した数値解析を用いて、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が行われた例は非常に少なく、上記のような検討は実施されていない。上記のような検討を行うことにより、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくための基礎的な知見が得られることが期待される。

1. 3. 本論文の構成

本論文は、第1章から第6章で構成した。各章の概要は以下の示すとおりである。また、図1-4に本論文の構成を示す。

【第1章 序論】

本章では、数値解析による地下構造物の設計の現状とその課題について述べ、本研究の目的と概要およびその構成を示す。

【第2章 既往の研究】

本章では、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の力学的な挙動をモデル化するための基本的な考え方を概説し、その考えに基づき提案されている代表的な数値解析手法を例示する。そして、従来、トンネルなどの地下構造物の分野において着目されることが少なかった地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析に関する既往研究について述べる。

【第3章 トンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる条件に関する検討】

本章では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られたトンネル周辺変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行う。そして、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について提案する。

【第4章 地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響に関する検討】

本章では、まず現場試験データを用いて第3章と同様な方法によって同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロ・シミュレーションを実施し、実際に得られているトンネルの現場計測結果（トンネル支保工応力）の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討する。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、現場計測結果（トンネル支保工応力）の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。

【第5章 結論】

本章では、本研究を通して得られた知見と課題について整理し、本論文の結論とする。

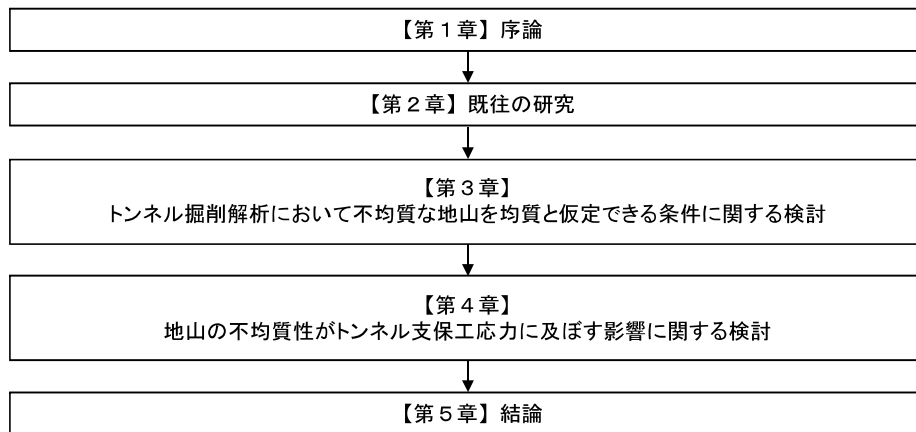


図1-3 本論文の構成

参考文献

- 1) 長沼一洋:特集解説「数値解析技術と建設分野への応用」,大林組技術研究所報, No.73-01, 2009.
- 2) 日本材料学会編:岩の力学 基礎から応用まで, 丸善, p.505-510, 1993.
- 3) 川本眺万:岩盤工学を巡る諸問題, 資源と素材, Vol.106, No.14, pp.835-841, 1990.
- 4) 応用力学委員会 計算力学小委員会:土木工学における計算力学手法の研究動向, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol. 68, No.1, pp.31-50, 2012.
- 5) 桜井春輔, 清水則一:不連続性岩盤の解析手法の現状, 土と基礎, Vol.40, No.11, pp.39-44, 1992.
- 6) Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proc. the International Symposium on Rock Mechanics, Nancy, No.II-8, 1971.
- 7) 例えば, 日本計算工学会編, 大西有三, 佐々木猛, Shi, G.H., 不連続性岩盤解析実用化研究会:計算力学レクチャーシリーズ6 不連続変形法(DDA), 丸善, 2005.
- 8) 土木学会:トンネル・ライブラリー16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, 丸善, pp.131-134, 2006.
- 9) 桜井春輔, 谷河正也:岩盤の不連続面の影響を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析, 土木学会論文集, No.403/VI-10, pp.75-84, 1989.
- 10) 日本材料学会編:ロックメカニクス, 技報堂出版, pp.144-147, 2002.
- 11) 例えば, 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄:節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.229-240, 2000.
- 12) 日比野敏:技術者に必要な岩盤の知識, 鹿島出版会, pp.72-76, 2007.
- 13) 桜井春輔, 土居康成:有限要素法による斜面の信頼性解析, 土木学会論文集, No.330, pp.87-97, 1983.
- 14) 久武勝保, 村上敏夫:地盤の連続体・不連続体挙動の一解析手法, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.175-180, 1995.
- 15) 本城勇介:地盤工学における信頼性設計法に関する研究の展開と課題, 土と基礎, Vol.63, No.5, pp.1-5, 2015.
- 16) 本城勇介, 大竹雄:地盤工学技術者のための確率統計入門 5. 確率過程と確率場, 地盤工学会誌, 61(1), pp.48-55, 2013.
- 17) Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H.: Characterization of geotechnical variability, Canadian Geotechnical Journal, Vol.36, No.4, pp.612-624, 1999.
- 18) 大竹雄, 本城勇介:地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつきの簡易信頼性評価法の検証, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.68, No.3, pp.475-490, 2012.
- 19) 吉田秀典, 高森大資, 和田光真:非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.387-396, 2003.

- 20) 福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会 | 国立研究開発法人 土木研究所 -PWRI- , <https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/kentou-iinkai.html>, 2019 年 2 月 14 日.

第2章

既往の研究

2. 1. はじめに

トンネルなどの地下構造物の設計に数値解析を用いたとしても、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想をはるかに超える挙動が生じ、人身事故などの発生を余儀なくすることもある。これは、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の性状が、地質学的な成因からサイト毎に異なる不均質性や不連続性、異方性を有しており、そのような地山の力学的な挙動をモデル化し、構造物の挙動予測や安定性評価を精度よく行うことが極めて難しいためである。このような困難を克服するために、従来から数多くの数値解析手法が提案されている。

そこで、本章では、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の力学的な挙動をモデル化するための基本的な考え方を概説し、その考えに基づき提案されている代表的な数値解析手法を例示する。そして、従来、トンネルなどの地下構造物の分野において着目されることが少なかった地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析に関する既往研究について述べる。

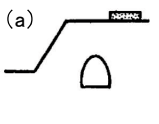
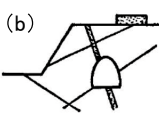
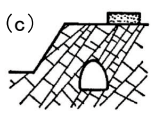
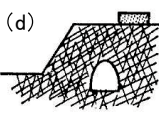
2. 2. 地山のモデル化と代表的な数値解析手法^{1),2),3),4),5),6),7)}

本節では、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の力学的な挙動をモデル化するための基本的な考え方を概説し、その考えに基づき提案されている代表的な数値解析手法を例示する。

2. 2. 1. 地山のモデル化の考え方

トンネルなどの地下構造物が建設される地山の力学的な挙動は、地山材料と不連続面から構成される複合的な挙動となる。このような地山の力学的な挙動をモデル化する方法として、地山を連続体として取り扱う方法と不連続体として取り扱う方法がある¹⁾。一般に、構成粒子間の結合力が弱い軟岩地山や砂質土系地山などをモデル化する場合、地山の力学的な挙動が不連続面ではなく、主に地山の材料特性に支配されることから、地山を連続体として取り扱うことが多い⁸⁾。一方で、構成粒子間の結合力が非常に強い硬岩地山などをモデル化する場合、地山の力学的な挙動が地山の材料特性ではなく、主に不連続面の力学特性およびその分布特性に支配されることから、地山を不連続体として取り扱うことが多い⁹⁾。すなわち、地山内に存在する不連続面の影響度合いは地山の材料特性によって異なるため、

表2-1 地山のモデルと解析手法¹⁾

地山のモデル	不連続面の状態	解析手法
(a) 	ほとんど存在しない	連続体解析
(b) 	規模の大きい不連続面が地下構造物周辺に存在する	不連続体解析
(c) 	多くの不連続面により、地下構造物周辺に岩石ブロックが存在する	不連続体解析
(d) 	不特定多数の不連続面が存在する	連続体解析 (等価連続体解析)

地山の材料特性によって適した地山のモデル化があると考えられている。

一方で、地下構造物が建設される地山のモデル化を行う場合、上述した地山の材料特性だけではなく、地山内の不連続面の間隔と地下構造物の相対的なスケールも考慮しなければならず¹⁰⁾、その両者の関係によって適した地山のモデル化があるとも考えられている(表2-1参照)¹⁾。例えば、表2-1(a)のような不連続面がほとんどない地山の場合、連続体としてモデル化される。表2-1(b)のような規模の大きい不連続面(例えば、断層など)が地下構造物の周辺に存在している地山の場合、不連続面による不連続体的な挙動とそれ以外の領域の連続体的な挙動が考慮されモデル化される。また、表2-1(c)のように不連続面が多く、地下構造物周辺に岩盤ブロックが形成している地山の場合、それぞれのブロックを剛体と仮定し不連続体としてモデル化される。加えて、表2-1(d)のように不特定多数の不連続面が存在する地山の場合、地山は等価な擬似連続体としてモデル化される。

つまり、地下構造物が建設される地山は、地山の材料特性および地山内の不連続面の間隔と地下構造物の相対的なスケールの関係を踏まえた上で、「連続体(等価連続体)」または「不連続体」としてモデル化される。現在では、上記に示した地山のモデル化の考えに基づき、様々な連続体解析と不連続解析が提案されている。以下に、代表的な連続体解析と不連続解析を例示する。

2. 2. 2. 連続体解析

地山を連続体として取り扱う連続体解析は、有限要素法(Finite Element Method ; FEM)による解析が1960年代に土木工学分野に適用されるようになり¹¹⁾、トンネルなどの地下構造物の分野でも用いられるようになった。現在では、FEMを中心に有限差分法(Finite Difference

Method ; FDM) や境界要素法 (Boundary Element Method ; BEM) などが地下構造物の設計などに利用されている^{8),9)}。これらの連続体解析は、不連続面がほとんどない地山 (表2-1 (a) 参照) や、地山の力学的な挙動が主に地山の材料特性に支配される地山 (例えば、軟岩地山や砂質土系地山など) などを対象に用いられる解析手法である⁸⁾。一方で、連続体解析の範疇ではあるが、表2-1 (d) に示すような不特定多数の不連続面群が存在する地山や1方向の不連続面群が存在する地山 (異方性地山) を対象として、地山を等価な連続体に置き換えて解析する手法である等価連続体解析も数多く提案されている。以下に、提案されている代表的な等価連続体解析を中心に例示する。

当初のFEM解析での地山物性は、等方性あるいは直交異方性モデルで表現されていたが¹²⁾、Singh¹³⁾は複合材料の理論に基づいて、不連続面を有する地山のインタクトな (不連続面を含まない) 部分と平行または直交する不連続面のコンプライアンスを重ね合わせることにより、異方性を有する地山を等価な連続体に置き換える構成式 (コンプライアンスモデル) を提案した。その後、Oda¹⁴⁾は、実際の岩盤において観測される不連続面の幾何学特性を考慮して、不連続面を有する地山の弾性コンプライアンステンソルを算出する方法 (Crack Tensor Model¹⁵⁾) を提案した。そして、山辺ら¹⁶⁾は、そのCrack Tensor ModelをFEMに導入し、多数の不連続面を有する地山を等価な連続体に置き換える解析手法を提案した。また、京谷ら¹⁷⁾は金属のクリープ損傷理論に基づいて、不連続面を材料内の有効断面積の減少と考慮して、その不連続面を損傷テンソルとして表現する方法 (Damage Tensor Model) を提案した。そして、そのDamage Tensor ModelをFEMに導入し、多数の不連続面を有する地山を等価な連続体に置き換える解析手法を提案した¹⁸⁾。

前述した等価連続体解析は、主として地山の变形特性に着目した解析手法であるが、地山の破壊 (地山内のインタクトな部分や不連続面の破壊) も同時に考慮した解析手法も提案されている。例えば、佐々木ら¹⁹⁾は、不連続面を有する地山がインタクトな部分、無指向性の微小クラック、指向性の不連続面から構成されることを仮定し、それぞれに变形特性と強度特性を設けて直列的に重ね合わせた複合降伏モデル (Multiple Yield Model) を提案しており、そのモデルをFEMの弾塑性解析の構成式に導入した。北條ら²⁰⁾は、不連続面の剛性にロックボルトの剛性を加えたコンプライアンスと地山内のインタクトな部分のコンプライアンスを重ね合わせた、ロックボルトの効果と不連続面の破壊を考慮したモデル (Equivalent Rockbolt Model ; EQRモデル) を提案しており、そのモデルをFEMに導入した。また、吉田ら²¹⁾は、不連続面の破壊 (せん断すべりおよび開口) を考慮した不連続面を有する地山の構成式のモデル化 (Micromechanics-Based Continuum Model ; MBCモデル) をマイクロメカニクス連続体理論に基づいて導出しており、その構成式をFEMに組み込んだ。加えて、田坂ら²²⁾は、不連続面を有する地山が無指向性の微小クラックを含むインタクトな部分と一方向に卓越する不連続面から構成されると仮定し、それぞれをひずみ軟化材料と弾完全塑性材料として、インタクトな部分と不連続面の破壊を考慮したモデル (Nonlinear Analysis Program Including Softening Model ; NAPISモデル) を提案しFEMに組み込んだ。その後、堀井ら²³⁾²⁴⁾

は、不連続面を有する地山中に地下発電所が建設された際の現場計測結果を対象として、上記に示した各等価連続体解析を適用し、各解析手法の比較検討を実施している。

一方で、FEM以外の連続体解析の一つとして、Cundallら²⁵⁾は有限差分解析コード（Fast Lagrangian Analysis of Continua ; FLAC）を提案している。FLACの最大の特徴は、有限要素の各節点において陽解法およびFDMに基づいた運動方程式をたてるため、FEMのようにマトリックスを形成する必要がない点である。また、時間ステップの進行毎に節点を新しい座標に変更することができ、大変形挙動をシミュレートできる点も特徴といえる。この提案されたコードには、モール・クーロンの破壊規準を考慮した特定方向の弱面を含んだ異方性塑性モデル（Ubiquitous Joint Model²⁶⁾）が組み込まれており、特定方向の不連続面を有する地山を等価な連続体に置き換えて解析することもできる。

上記したFEMとFDMは、対象とした領域を有限個の要素に分割する領域法とも呼ばれる手法であるが、一方で、境界を有限個の要素に分割して区分的に評価するBEMと呼ばれる手法もある²⁷⁾。Crouchら²⁸⁾はそのBEMに基づいて、不連続面の配置が規則正しい地山を異方性の弾性体で近似した等価連続体解析（異方性モデル）を提案した。BEMは境界のみをモデル化するため、FEMやFDMと比較してメッシュ生成を簡便にでき未知量を減少できるといった利点がある。しかしながら、一般的に、BEMはFEMやFDMほど多くのサブ領域を持つことができないため、材料の不均質性を取り扱う際にはFEMやFDMと比較して優れていないといった問題点がある。また、BEMによって非線形材料の挙動をシミュレーションする際、領域積分を度々実施する必要があるため、FEMやFDMと比較して効率的ではないといった問題点もある。そのため、BEMは均質かつ線形弾性体の問題を解くのによりふさわしいと考えられている³⁾。

上記に示した等価連続体解析を簡易的に分類した図を図2-1に示す。

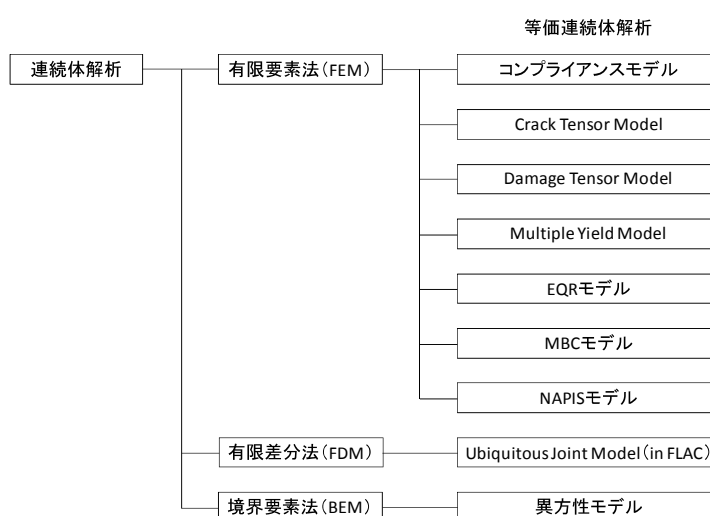


図2-1 等価連続体解析の分類

2. 2. 3. 不連続体解析

不連続体解析は、地山内の不連続面を具体的に表現することにより、不連続面の力学特性および分布特性に大きく依存した地山の変形・破壊挙動を解析する手法である。例えば、不連続面の間隔が構造物の寸法とオーダー的に等しく（表2-1 (b), 表2-1 (c)参照），地山の力学的な挙動が主に不連続面の力学特性およびその分布特性に支配される硬岩地山などを対象に用いられる解析手法である^{8),29)}。一方で、土粒子をそのままモデル化して土砂地山の崩壊挙動を解析したり、岩石内の結晶をブロックとしてモデル化して岩石で観察されるひび割れの進展を再現したりする場合にも用いられる解析手法である。以下に、提案されている代表的な不連続体解析を例示する。

1) ジョイント要素を用いたFEM

1960年代に土木工学分野で用いられ始めたFEM解析では、不連続面のすべりなどによる変位や応力の不連続性およびその破壊を考慮することができなかった。そこで、その問題を解決するために、不連続体解析の先駆けであるジョイント要素を用いたFEMが提案され始めた。例えば、Goodman³⁰⁾はFEM解析上で、不連続面を厚みのない4節点長方形要素と考え、不連続面のせん断剛性と垂直剛性を考慮したジョイント要素を提案した。また、Zienkiewicz³¹⁾やGhaboussi³²⁾は、Goodman³⁰⁾の提案したジョイント要素の改善を目的とし、要素の曲げを考慮できるジョイント要素や塑性理論に基づくジョイント要素などを提案した。現在では、上述したジョイント要素の他にも様々なジョイント要素が提案されており、地山内に存在する破砕帯や断層などをモデル化する際によく用いられている³³⁾。

2) 剛体ばねモデル, Finite Element Spring Method

解析対象を多数の剛体要素でモデル化し、各剛体要素間を垂直・接線方向ばねで結合した剛体ばねモデル（Rigid Body-Spring Model ; RBSM）がKawai³⁴⁾によって1970年代に提案された。RBSMの各剛体要素の運動は並進と回転によって表され、FEMと同様な形式で解かれるのが特徴である。RBSMは塑性変形や破壊の本質はすべりにあるという考えに基づいたモデルであるため、不連続面を有する地山の解析にも適用されている³⁵⁾。一方で、RBSMは要素を剛体と仮定するため、不連続面以外で発生する地山材料そのものの破壊などが考慮できないといった課題があった。そこで、浜島³⁶⁾は要素の変形にFEMを、要素間にRBSMを用いた解析手法（Finite Element Spring Method ; FESM）を提案した。そして、鈴木ら³⁷⁾は、FESMの不連続面を有する地山のモデルと実験結果との比較を行い、FESMが不連続面を有する地山の解析に適用可能であることを示している。

3) 個別要素法

1970年代に提案されたRBSMと同時期に、大変形を考慮した動的な不連続体解析である個別要素法（Distinct Element Method ; DEM）が提案され始めた。DEMの最も代表的な手法と

して、例えばCundall³⁸⁾は、岩盤や岩石全体を剛体の多角形ブロックの集合体として二次元でモデル化し、各々のブロックに対して並進と回転の運動方程式をたてて、陽的な差分法を用いて逐次的に解く手法を提案した。その後、この提案された手法は、三角形要素の有限体積メッシュによるブロックの内部離散化を用いることによって、変形体のブロックが適用できるように拡張された³⁹⁾。その拡張された手法の解析コードとして、二次元問題を対象としたUniversal Distinct Element Code (UDEEC)⁴⁰⁾が開発されている。さらに、その手法は三次元問題に拡張され^{41),42)}、3DEC⁴³⁾が開発されている。これらの手法において、ブロックの間の相互作用は、接線方向のばね剛性とせん断強度および法線方向のばね剛性と引張強度を用いて表される。例えば、小杉ら⁴⁴⁾は、UDEECを用いて不連続面を有する地山のトンネル掘削時の挙動予測解析を実施している。

前述したように、Cundall³⁸⁾がDEMを提案した当初は剛体の多角形ブロックが用いられていた。しかしながら、接触アルゴリズムがシンプルであるという理由から、剛体の球体ブロック（粒子）によるDEMも用いられるようになった^{45),46)}。その粒子間の接触は、法線およびせん断方向のばね剛性ならびに摩擦係数によって表されていたが、岩石の破壊挙動や土砂の崩壊挙動をシミュレーションするために、粒子間に結束（Bond）が導入されたモデルが提案された。その提案されたモデルを含んだ粒子によるDEMの代表的な解析コードとして、例えば二次元および三次元問題を対象としたParticle Flow Code (PFC)⁴⁷⁾がある。PFCでは、粒子同士の接触点の破壊を表現するモデル（Contact Bond Model）や粒子同士の接合が回転破壊にも抵抗するモデル（Parallel Bond Model）を用いることが可能となっている⁷⁾。剛体の球体ブロックによるDEMを用いて地下構造物を対象とした解析を行う場合、土砂地山を対象とし、崩壊メカニズムや崩壊挙動をシミュレーションするために用いられることが多い。

近年では、岩石供試体の数値シミュレーションを目的としたモデルではあるが、UDEECにおいて、粒子に基づくUDEECモデル（Grain-based UDEEC Model）と呼ばれる微小な多角形変形体ブロックの集合体による岩石モデルが提案されており⁷⁾、ランダムなボロノイ分割を考慮したGrain-based UDEEC Model⁴⁸⁾やランダムなデローニー三角分割を考慮したGrain-based UDEEC Model⁴⁹⁾などもある。同様な目的でPFCにおいては、粒子構造として房をなす粒子群（Clustered Particles）を考慮する手法⁵⁰⁾や粒子同士が固定された粒子群（Clumped Particles）を幾何学的に配置する手法⁵¹⁾、Flat-joint Modelと呼ばれる新しい接触モデル⁵²⁾などが提案されている。

4) 不連続変形法、マニフォールド法

Shiら⁵³⁾は、地山や岩石全体を変形体の多角形ブロックの集合体としてモデル化し、計測変位と計算変位の誤差を最小化することによって個々のブロックの剛体変位、ひずみおよび剛体回転を逆解析する解析手法である不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis ; DDA）を提案した。ここで、ブロック内におけるひずみは一定とされ、ブロック内の変位は重心の剛体変位、ひずみおよび剛体回転で表現された。その後、DDAは、様々な物性や荷重

条件などに関してポテンシャルエネルギーを最小化することで決定される全体剛性方程式を求め、各ブロックの接触部にばねを導入して接触条件が満たされるまで全体剛性方程式が再度組み立てられるような繰り返し計算が行われるようになり、順解析ができるように拡張された⁵⁴⁾。DDAは有限要素法とよく似ており、陰解法を用いて解かれることが前述したUDEECやPFCと大きく異なる点である。順解析が実施できるようにDDAが拡張された後、DDAは地山の不連続性を想定した地下構造物やモデル実験に適用され、不連続性を有する地山の解析手法として有効であることが示されている⁵⁵⁾。

その後、Shi⁵⁶⁾はFEMとDDAを統合した解析手法であるマニフォールド法を提案した。マニフォールド法は有限要素法を一般化したものであり⁵⁷⁾、「近似関数の定義される数学的な領域（数学メッシュ）」と「支配方程式を満足すべき物理的な部分領域（物理メッシュ）」を分離して考慮できるのが最大の特徴である⁵⁸⁾。つまり、マニフォールド法は数学メッシュに物理的な不連続面を付加することにより、不連続性を有する地山の挙動解析に適用することができると考えられている⁵⁹⁾。

5) ブロック理論

剛体仮定による（構造物が変形しない）不連続体解析も開発されており、Goodmanら⁶⁰⁾によって提案されたブロック理論がある。ブロック理論は、調査によって得られた三次元の不連続面の幾何学的情報から最も危険な岩石ブロック（キーブロック）を抽出し、極限平衡解析を用いてその岩石ブロックの移動可能性を解析する手法である。ブロック理論は実際の地下空洞掘削時に適用されており、発見されたキーブロックに対して適切な補強（修正設計）を実施することで合理的な施工が可能であることが示されている⁶¹⁾。

上記に示した不連続体解析を簡易的に分類した図を図2-2に示す。図2-2内の解析手法の他に、近年では、不連続性を有する地山における亀裂進展のメカニズムの解明を目的とし、有限メッシュを必要としない、あるいは存在を意識しないメッシュフリー法と総称される手法（例えば、エレメントフリーガラーキン法⁶²⁾など）や、FEMにおける1の分割（Partition of Unity ; PU）⁶³⁾特性に着目した一般化有限要素法（例えば、拡張型有限要素法⁶⁴⁾⁶⁵⁾、有限被覆法⁶⁶⁾など）が提案されている。

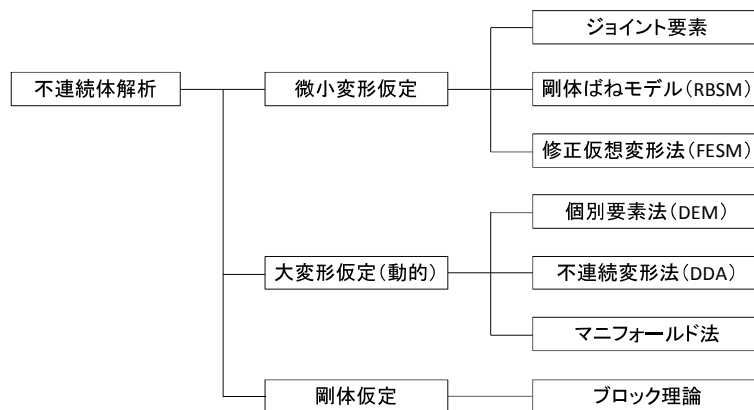


図2-2 不連続体解析の分類⁵⁴⁾

2. 3. 地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析

本節では、従来、トンネルなどの地下構造物の分野において着目されることが少なかった地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析に関する既往研究について述べる。

前節からわかるように、トンネルなどの地下構造物の分野においては、不連続体と連続体の観点から、地山の不連続性や異方性を考慮した地山のモデル化が積極的に行われ、提案された様々な連続体解析と不連続解析によって、地山の不連続性や異方性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が実施されてきた。一方で、地山は、天然材料であるがゆえに同一地層内においても地山物性が空間的にばらつき（不均質性）を有しているという特徴も持っている⁶⁷⁾（図1-2参照）。そのため、同様な地点から試料を採取して、種々の室内要素試験を行い変形特性や強度特性を求めたとしても、それらにはばらつきが

表2-2 岩種に対する一軸圧縮強さの変動係数（一部省略）⁶⁸⁾

岩種	一軸圧縮強さの各統計量		
	平均 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数
泥岩	2.28~3.21	0.371~1.07	0.162~0.387
砂岩	1.11~2.00	0.700~1.39	0.332~0.463
凝灰岩	87.9~113	23.3~26.1	0.231~0.385
片岩	6.94~98.0	5.87~60.7	0.619~0.846
流紋岩	59.6~93.0	24.3~56.9	0.408~0.678
花崗閃緑岩	10.7~94.3	9.23~47.2	0.448~0.836
花崗岩	0.057~140	0.021~57.7	0.227~0.888
輝緑凝灰岩	36.5	28.9	0.793
凝灰角礫岩	7.88	3.03	0.384

※各岩種の統計量に範囲(~)が存在するのは、供試体の採取地点が複数存在する、または各採取地点において岩盤等級が異なるためである。

存在している。例えば、伊藤ら⁶⁸⁾は岩種・岩盤等級毎に岩石供試体の一軸圧縮試験を行い、その強度にばらつきがあることを報告している（表2-2参照）。このような特徴は、不連続体の範疇で解析しうる地山の場合、不連続面に起因する挙動が卓越することから問題となることが少ないが、連続体の範疇で解析しうる地山の場合は、地山物性の不均質性に依存した挙動となり、構造物の安定性などに問題を及ぼす場合がある⁶⁹⁾。そのため、連続体の範疇で解析しうる地山（例えば、砂質土系地山など）を取り扱うことが多い基礎・土構造物の分野では⁷⁰⁾、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を連続体解析にどのように考慮するかといった試みが従来からなされてきた⁷¹⁾。その主な方法の一つとして、地山物性値の空間的なばらつきをエルゴード性（ある一点のばらつきが空間全体のばらつきに等しいとする性質）を仮定する確率場として取り扱い、FEMやFDMなどに基づく連続体解析の各要素または要素群（隣接する複数の要素）に地山物性値を与えることによって地山物性の不均質性を考慮する方法がある。この方法では、主として事例調査によって蓄積された鉛直（または水平）方向の地山物性値の平均（地山物性値に深度依存性が存在する場合は、トレンド）、分散（または変動係数）や変動スケールのばらつき範囲とその平均などを基に地山物性の不均質性が考慮されモデル化される（図2-3参照）⁷²⁾。ここで、変動スケール（Scale of Fluctuation）⁷³⁾とは、図2-4に示すように、調査から得られたデータを補間した際の地山物性値の連続データがすべて平均（またはトレンド）以上またはそれ以下となる区間の大きさである。図2-4中には、調査から得られたデータを補間した際の変動スケールの抽出例とすべての変動スケールの平均を示している。

当初、上記の方法では、地山物性値のばらつき（頻度分布）が主に正規分布や対数正規分布、ワイブル分布などの確率分布に従う^{68),74)}ことから、それらの確率分布に従う地山物性

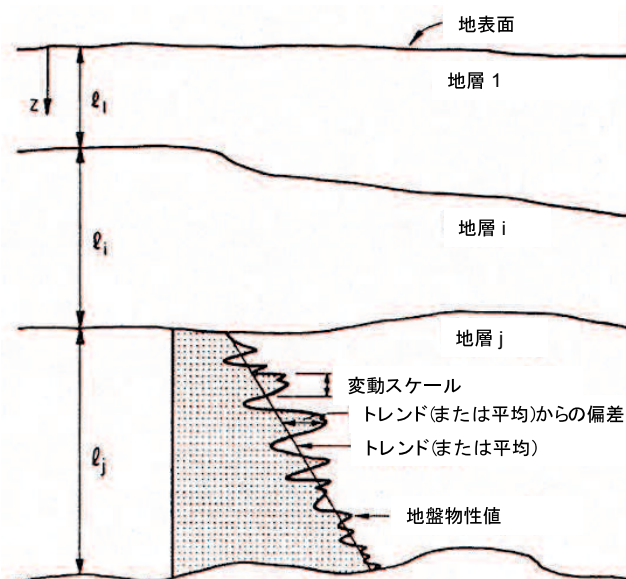


図2-3 鉛直方向の地山物性値の固有変動性のイメージ図（一部加筆修正）⁷²⁾

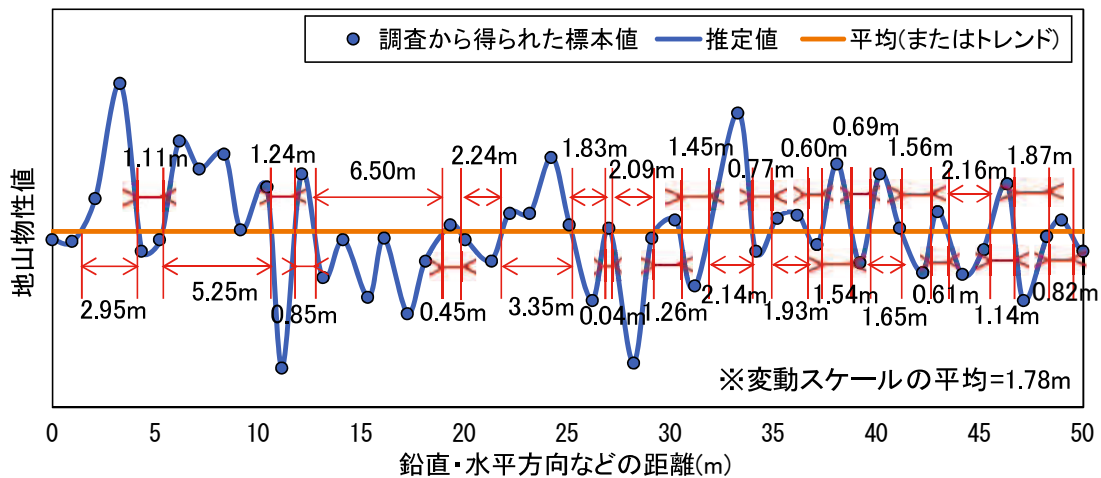


図2-4 変動スケールの概念図

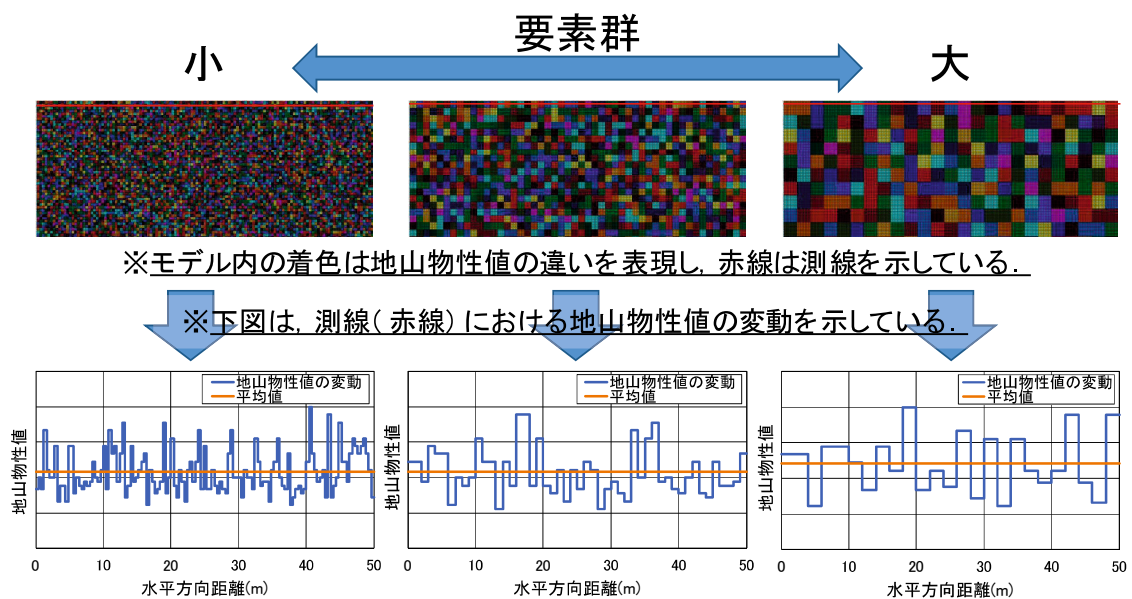


図2-5 確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法の概要図

値を連続体解析の各要素にランダムに与えることによって、地山物性の不均質性を考慮した連続体解析を実施していた。例えば、川本ら⁷⁵⁾は、正規分布に従うヤング係数とポアソン比をFEMの各要素にランダムに与えた様々な基礎的なFEM解析を行い、応力や変形のばらつきを検討している。このような方法による解析は近年でも活用されており、例えばTang^{76),77)}は、FEMを基礎とした解析の各要素にワイブル分布に従うヤング係数と強度をランダムに与えることによって、岩石で観察される破壊現象を表現する解析コードRock Failure Process Analysisを提案している。また、確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法(図2-5参照)なども提案されており、そのような地山物性の不均質

性が盛土の沈下量に及ぼす影響についても検討されている⁷⁸⁾。

その一方で、確率分布に従う地山物性値を2地点間の相関特性（例えば、自己相関関数（元データと任意の距離分をずらしたデータとの相関）など）を考慮して要素に与える方法も提案されており、特に2地点間において相関がみられる地山を対象に数多くの検討が実施されている。この方法が用いられる場合、事例調査によって蓄積された地山物性値の統計的性質のデータ⁷⁹⁾から、地山物性値の確率分布は、正規分布や対数正規分布が仮定される場合が多く、2地点間の相関特性を近似する関数形としては、指数型、ガウス型が用いられることが多い⁸⁰⁾。例えば、Fentonら⁸¹⁾は、地山物性値の確率分布を対数正規分布、2地点間の相関特性を指数型の自己相関関数とした確率場をFEMに導入し、地山物性の不均質性がフーチングによる沈下量に及ぼす影響について検討している。加えて、Griffithsら⁸²⁾は同様な方法を用いて、地山物性の不均質性が斜面の破壊に及ぼす影響について検討している。また、若井ら⁷⁸⁾は、地山物性値の確率分布を正規分布、2地点間の相関特性を指数型の自己相関関数とした確率場をFEMに導入し、地山物性の不均質性が盛土の地震時残留変形量に及ぼす影響について検討している。その他にも、上記と類似した方法により、地山物性の不均質性が透水係数や支持力に及ぼす影響などについても検討されている^{83),84)}。

前述した確率分布に従う地山物性値を連続体解析の各要素や要素群にランダムに与える方法で作成されるモデルは、**図2-5**からわかるように地山物性値の変動スケールのばらつき範囲とその平均が要素や要素群の大きさに依存するモデルである。また、要素や要素群の大きさに相当する距離内の自己相関係数が1.0であり、その距離を超えた位置において自己相関係数が急激に0になるようなモデルである。すなわち、比較的近い2地点間において相関が見られないといった極めてランダムな場を想定しているモデルである。一方で、確率分布に従う地山物性値を2地点間の相関特性（例えば、自己相関関数など）を考慮して要素に与える方法で作成されるモデルは、地山物性値の変動スケールのばらつき範囲とその平均が用いる自己相関関数に依存し、2地点間の相関特性が2地点間の距離が大きくなるにつれて滑らかに減少するようなモデルである。すなわち、比較的近い2地点間において相関がみられる場を想定しているモデルである。前述した両者のモデル化は、対象とする問題の性質に応じて選択されるべきと考えられている⁷⁸⁾。一方で、このような地山物性値の空間的なばらつきを確率場として取り扱う方法によるモデル化は、計測を実施していない地点の地山物性値を便宜的に決定するモデル化であり、本来の地山物性の不均質性を再現しているとは言えない。しかしながら、現在では、そのようなモデル化に基づく解析とモンテカルロ・シミュレーションを組み合わせることにより、地山物性の不均質性が基礎・土構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関して確率的かつ定量的な評価が実施されている^{85),86)}。

一方で、地山物性値は計測された場所（標本点）では唯一の値をとることから、その計測された値（標本値）を用いて地山物性値の空間的なばらつきを推定（内挿）しモデル化する方法などもある。その代表的な例として、Kriging⁸⁷⁾によって開発され、Matheron⁸⁸⁾によって数学的に定式化されたクリギング（Kriging）が挙げられる。クリギングは、いくつかの標本点

で得られる標本値の分布から、最尤法や最小二乗法などにより、推定誤差が最小となるように解析領域内の任意地点における値を推定する方法である⁸⁹⁾。そのため、クリギングは、標本点間の値の推定誤差を確率的に取り扱うこともできる方法である。この方法により、地山内の様々な物性値の空間的なばらつきが推定されており、例えば、鈴木ら⁹⁰⁾は土質調査資料にクリギングを適用し、土質定数の空間分布を推定している。また、大西ら⁹¹⁾は、有限個の現地調査の結果を用いて、成層堆積地山内の比抵抗値などの空間分布を推定している。その他にも、クリギングによる液状化領域の空間分布の推定⁹²⁾や地震動の空間分布の推定⁸⁹⁾などが実施されている。

連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱うことが多い基礎・土構造物の分野では、上記のようなモデル化とその解析などにより、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性が基礎・土構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が数多く実施されてきた。一方で、トンネルなどの地下構造物の分野では、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合であったとしても、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が行われた例は以下のように非常に少ない。例えば、Suら⁹³⁾は、正規分布に従うヤング係数とポアソン比をFEMの各要素にランダムに与えるモデルによりトンネル掘削解析を行い、地山物性の不均質性がトンネル周辺の応力に及ぼす影響について検討している。また、熊坂⁹⁴⁾⁹⁵⁾は、近似した対数正規分布に従う地山物性値をFDMの各要素群にランダムに与えるモデルによりトンネル掘削解析を行い、地山物性の不均質性がトンネル周辺の応力や変形に及ぼす影響について検討している。加えて、Stavropoulouら⁹⁶⁾は計測された地山物性値を用いてクリギングを行い、推定した地山物性値の空間分布をFDMに適用し、トンネル掘削解析を実施している。以上から、本論文の**第3章**および**第4章**で実施するような検討は行われていないのが現状である。

連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合の数値解析による地下構造物の設計などをより高度なものとし、施工時の安全性などを適切に確保するためにも、トンネルなどの地下構造物の分野においても、地山が本来有する地山物性の不均質性を考慮し、地山物性の不均質性がトンネルなどの地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を積極的に予測・評価していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 清水則一: 不連続性岩盤の解析手法の現状, 土と基礎, Vol.40, No.11, pp.39-44, 1992.
- 2) 宇野晴彦, 石田毅, 水田義明: 岩盤モデルおよび解析手法の歴史的な変遷と特徴, 資源と素材, Vol.118, pp.150-156, 2002.
- 3) Jing, L.: A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.40, Issue 3, pp.283-353, 2003.
- 4) 亀村勝美: 不連続性岩盤の調査・解析と評価: 4.不連続性岩盤における調査・解析事例(応力変形問題) (その1), 土と基礎, Vol.48, No.4, pp.51-56, 2000.
- 5) 応用力学委員会 計算力学小委員会: 土木工学における計算力学手法の研究動向, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68, No.1, pp.31-50, 2012.
- 6) 車谷麻緒, 寺田賢二郎: 一般化有限要素法による不連続性の近似に関する比較考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.I_129-I_138, 2012.
- 7) Lisjak, A. and Grasselli, G.: A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses, J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.6, Issue 4, pp.301-314, 2014.
- 8) 土木学会: トンネル・ライブラリー16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, 丸善, pp.131-134, 2006.
- 9) 日本材料学会編: ロックメカニクス, 技報堂出版, pp.73-75, 144-147, 2002.
- 10) 川本朧万, 吉中龍之進, 日比野敏: 岩盤力学(朝倉土木工学講座 23), 朝倉書店, pp.5-8, 1975.
- 11) 地盤工学会: はじめて学ぶ有限要素法, 丸善, pp.1-4, 2003.
- 12) Goodman, R.E. (赤井浩一, 川本朧万, 大西有三訳): 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, pp.244-247, 1987.
- 13) Singh, B.: Continuum characterization of jointed rock masses (Part I – The constitutive equations), Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.10, pp.311-335, 1973.
- 14) Oda, M.: An experimental study of the elasticity on mylonite rock with random cracks, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- 15) Oda, M., Suzuki, K. and Maeshibu, T.: Elastic compliance for rock-like materials, Soils and Foundations, Vol.24, No.3, pp.27-40, 1984.
- 16) 山辺正, 原夏生, 小田匡寛: クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメーターの決定に関する研究, No.382/III-7, pp.121-130, 1987.
- 17) 京谷孝史, 市川康明, 川本朧万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.27-35, 1985.

- 18) 京谷孝史, 市川康明, 川本眺万 : 岩盤の力学特性評価における損傷力学的アプローチ, 土と基礎, Vol.35, No.3, pp.23-28, 1987.
- 19) 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文男 : 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.59-68, 1994.
- 20) 北條明, 中村真, 打田靖夫, 櫻井春輔 : 不連続性岩盤におけるロックボルトの設計法について, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.143-153, 1996.
- 21) 吉田秀典, 堀井秀之 : マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996.
- 22) 田坂嘉章, 宇野晴彦, 大森剛志, 工藤奎吾 : 節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法と大規模地下空洞掘削への適用, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.73-90, 2000.
- 23) 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄 : 等価連続体解析手法による塩原発電所空洞掘削時挙動の比較検討, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.211-227, 2000.
- 24) 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄 : 節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.229-240, 2000.
- 25) Cundall, P.A. and Board, M. : A microcomputer program for modeling large-strain plasticity programs, Proc. the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, pp.2101-2108, 1988.
- 26) Itasca Consulting Group, Inc. : FLAC3D constitutive models, Version 5.0, Minneapolis, 2012.
- 27) 小林昭一 : 積分方程式法 (境界要素法) の発展, 土木学会論文集, Vol.350/I-2, pp.9-22, 1984.
- 28) Crouch, S.L. and Starfield A.M. : Boundary element methods in solid mechanics, George Allen & Unwin, 1983.
- 29) 櫻井春輔, 谷河正也 : 岩盤の不連続面の影響を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析, 土木学会論文集, No.403/VI-10, pp.75-84, 1989.
- 30) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. : A model for the mechanics of jointed rock, J. the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.94, Issue 3, pp.637-660, 1968.
- 31) Zienkiewicz, O.C., Best, B., Dullage, C. and Stagg, K. : Analysis of nonlinear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems, Proc. the 2nd International Congress on Rock Mechanics, Belgrade, 1970.
- 32) Ghaboussi, J., Wilson, E.L. and Isenberg, J. : Finite element for rock joints and interfaces, J. the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, Issue 10, pp.849-862, 1973.
- 33) 三橋祐太, 橋本学, 奥田洋司 : 地盤解析のための有限要素モデリング (拡張 Goodman ジョイント要素とメッシュ生成法) , 日本計算工学会論文集, No.20160022, 2016.
- 34) Kawai, T. : New element models in discrete structural analysis, J. the Society of Naval Architects

- of Japan, Vol.141, pp.174-180, 1977.
- 35) Hanajima, R. and Kawai, T. : On the discrete analysis of the jointed rock media, J. the Japan Society of Engineering Geology, Vol.22, Issue 2, pp.15-22, 1981.
 - 36) 浜島良吉 : 修正仮想変位法および修正仮想応力法に基づく要素内変形を考慮した不連続体解析, 第42回応用力学連合講演会講演予稿集, pp.263-264, 1993.
 - 37) 鈴木隆次, 浜島良吉 : 要素変形を考慮した不連続体解析による応力伝達, 変形, 破壊強度解析, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp.23-38, 1996.
 - 38) Cundall, P.A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proc. the International Symposium on Rock Mechanics, Nancy, No.II-8, 1971.
 - 39) Cundall, P.A. : UDEC—a generalized distinct element program for modelling jointed rock, Report PCAR-1-80, Peter Cundall Associates, European Research Office, US Army Corps of Engineers, 1980.
 - 40) Itasca Consulting Group, Inc. : UDEC Manual, 1992.
 - 41) Cundall, P.A. : Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.25, Issue 3, pp.107-116, 1988.
 - 42) Hart, R., Cundall, P.A. and Lemos, J. : Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part II. Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.25, Issue 3, pp.117-125, 1988.
 - 43) Itasca Consulting Group, Inc. : 3DEC Manual, 1994.
 - 44) 例えば, 小杉昌幸, 中川光雄, 石原治幸 : 不連続岩盤の挙動予測に基づくトンネル支保設計, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.21-30, 1994.
 - 45) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. : A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, Issue 1, pp.47-65, 1979.
 - 46) 森口周二, 前田健一, 松島亘志, 中田幸男, 小山倫史 : 地盤工学のための個別要素法 3. 一次元の個別要素法, 地盤工学会誌, 63(5), pp.53-60, 2015.
 - 47) Itasca Consulting Group, Inc. : PFC codes manuals, 1995.
 - 48) Christianson, M., Board, M. and Rigby, D. : UDEC simulation of triaxial testing of lithophysal tuff, Proc. the 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), ARMA-06-968, Golden, 2006.
 - 49) Kazerani, T. : Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.64, pp.44-55, 2013.
 - 50) Potyondy, D.O. and Cundall, P.A. : A bonded-particle model for rock, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.41, Issue 8, pp.1329-1364, 2004.

- 51) Cho, N., Martin, C.D. and Segol D.C. : A clumped particle model for rock, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.44, Issue 7, pp.997-1010, 2007.
- 52) Potyondy, D.O. : A flat-jointed bonded-particle material for hard rock, *Proc. the 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-2012-501*, Chicago, 2012.
- 53) Shi, G.H. and Goodman, R.E. : Two dimensional discontinuous deformation analysis, *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.9, pp.541-556, 1985.
- 54) 日本計算工学会編, 大西有三, 佐々木猛, Shi, G.H., 不連続性岩盤解析実用化研究会 : 計算力学レクチャーシリーズ 6 不連続変形法(DDA), 丸善, 2005.
- 55) 例えば, 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進 : 不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用に関する研究, *土木学会論文集*, No.493/III-27, pp.11-20, 1994.
- 56) Shi, G.H. : Manifold method of material analysis, *Trans. the 9th Army Conference on Applied Mathematics and Computing*, Report No.92-1. U.S. Army Research Office, 1991.
- 57) 大西有三 : 数値解析・最近の動向, *土と基礎*, Vol.43, No.7, pp.3-6, 1995.
- 58) 浅井光輝, 寺田賢二郎 : 有限被覆法による不連続面進展解析, *応用力学論文集*, Vol.6, pp.193-200, 2003.
- 59) 例えば, 佐々木猛, 大西有三 : 4 節点アイソパラメトリック要素 Manifold 法による節理性岩盤の弾塑性解析, 第 54 回理論応用力学講演会 講演論文集, 2005.
- 60) Goodman, R.E. and Shi, G.H. : *Block theory and its application to rock engineering*, Prentice-Hall, 1985.
- 61) 例えば, 大西有三, 手塚昌信, 田中誠, 西村毅 : 地下空洞掘削時におけるキープロック解析の適用について, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.58-62, 1997.
- 62) Belytschko, T., Lu, Y.Y. and Gu, L. : Element-free galerkin methods, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.37, Issue 2, pp.229-256, 1994.
- 63) Babuška, I. and Melenk, J.M. : The partition of unity method, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.40, Issue 4, pp.727-758, 1997.
- 64) Belytschko, T. and Black, T. : Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.45, Issue 5, pp.601-620, 1999.
- 65) Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T. : A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.46, Issue 1, pp.131-150, 1999.
- 66) K. Terada, M. Asai and M. Yamagishi: Finite cover method for linear and nonlinear analyses of heterogeneous solids, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.58, Issue 9, pp.1321-1346, 2003.
- 67) 日比野敏 : 技術者に必要な岩盤の知識, 鹿島出版会, pp.72-76, 2007.
- 68) 伊藤洋, 北原義浩 : 地盤物性のバラツキの評価法 (その 1) - 地盤物性のバラツキの実態とその表示法 -, 電力中央研究所研究報告, 384025, 1985.

- 69) 桜井春輔, 土居康成 : 有限要素法による斜面の信頼性解析, 土木学会論文集, No.330, pp.87-97, 1983.
- 70) 久武勝保, 村上敏夫 : 地盤の連続体・不連続体挙動の一解析手法, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.175-180, 1995.
- 71) 本城勇介 : 地盤工学における信頼性設計法に関する研究の展開と課題, 土と基礎, Vol.63, No.5, pp.1-5, 2015.
- 72) Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. : Characterization of geotechnical variability, Canadian Geotechnical Journal, Vol.36, No.4, pp.612-624, 1999.
- 73) Nie, X., Huang, H., Liu, Z. and Lacasse, S. : Scale of fluctuation for geotechnical probabilistic analysis, Proc. the 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (5th ISGSR), Rotterdam, 2015.
- 74) Lumb, P. : The variability of natural soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.3, No.2, pp.74-97, 1966.
- 75) 川本眺万, 岩永建夫, 林義信 : 材料特性のランダム性を考慮した二, 三の有限要素解析, 材料, Vol.22, No.242, pp.990-995, 1973.
- 76) Tang, C.A. : Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.34, No.2, pp.249-261, 1997.
- 77) Tang, C.A. and Tang, S. : Applications of rock failure process analysis (RFPA) method, J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.3, Issue 4, pp.352-372, 2011.
- 78) 例えば, 若井明彦, 鶴飼恵三, 谷茂 : 不均質な土構造物の地震時残留沈下量に関する信頼性設計のための基礎的研究, 応用力学論文集, Vol.8, pp.663-672, 2005.
- 79) 松尾稔 : 地盤工学 信頼性設計の理念と実際, 技報堂出版, pp.55-107, 1984.
- 80) 本城勇介, 大竹雄 : 地盤工学技術者のための確率統計入門 : 5. 確率過程と確率場, 地盤工学会誌, 61(1), pp.48-55, 2013.
- 81) Fenton, G.A. and Griffiths, D.V. : Probabilistic foundation settlement on spatially random soil, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.128, Issue 5, pp.381-390, 2002.
- 82) Griffiths, D.V. and Fenton, G.A. : Probabilistic slope stability analysis by finite elements, J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.130, Issue 5, pp.507-518, 2004.
- 83) 齋藤雅彦, 川谷健 : 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.245-258, 2001.
- 84) 笠間清伸, 善功企, Whittle, A.J. : 確率数値限界解析を用いた粘性土地盤の支持力特性, 応用力学論文集, Vol.11, pp.291-298, 2008.
- 85) 例えば, 大竹雄, 本城勇介 : 地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつきの簡易信頼性評価法の検証, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.3, pp.475-490, 2012.
- 86) 例えば, 本城勇介, 大竹雄 : 簡易な地盤構造物信頼性解析法の開発と浅い基礎の設計問題への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.4, pp.372-386, 2014.

- 87) Krige, D.G. : Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation, J. the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp.13-38, 1966.
- 88) Matheron, G. : Principles of geostatistics, Economic Geology, Vol.58, pp.1246-1266, 1963.
- 89) 菅井径世, 森保宏, 小川克郎 : クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.707, pp39-46, 2015.
- 90) 鈴木誠, 石井清 : 土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法, 土木学会論文集, No.394/III-9, 1988.
- 91) 大西有三, 田中誠, 大澤英昭 : 不均質地盤内の地盤定数の推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.457/III-21, pp.51-58, 1992.
- 92) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦勝 : 液状化領域の空間分布推定法の提案とほぼ水平な地盤における流動予測への適用, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.155-166, 1999.
- 93) Su, Y.L., Wang, Y.J. and Stefanko, R. : Finite element analysis of underground stresses utilizing stochastically simulated material properties, Proc. 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics, ARMA-69-0253, Berkeley, 1969.
- 94) 例えば, 熊坂博夫 : 地山の不均質性の分布スケールがトンネル周辺の応力状態に及ぼす影響について, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, 3-239, pp.477-478, 2005.
- 95) 例えば, 熊坂博夫 : 不均質な弾塑性地山におけるトンネル周辺地山の応力状態に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, 3-317, pp.633-634, 2008.
- 96) Stavropoulou, M., Exadaktylos, G. and Saratsis, G. : A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock, J. Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.40, Issue 3, pp.213-243, 2007.

第3章

トンネル掘削解析において不均質な地山を
均質と仮定できる条件に関する検討

3. 1. はじめに

トンネルなどの地下構造物の建設を行う場合、数値解析によるトンネル掘削解析を用いてトンネル周辺の地山の変形挙動と応力状態を予測し、その解析結果を基にトンネルの設計（周辺地山の安定性評価と支保量の設計）を行う場合がある。しかしながら、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想をはるかに超える挙動が生じ、トンネルの安定性が損なわれることもある。これは、トンネルが建設される地山の性状が、地質学的な成因からサイト毎に異なる不均質性や不連続性、異方性を有しており、そのような地山の力学的な挙動をモデル化し、トンネルの挙動予測や安定性評価を精度よく行うことが極めて難しいためである¹⁾²⁾。このような困難を克服するために、従来から数多くの数値解析手法が提案されている（第2章参照）。

しかしながら、地山が本来有する地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の挙動や安定性に及ぼす影響を数値解析で評価した例は非常に少ない（第2章参照）。それに加え、実設計においてトンネル掘削解析を実施する場合、地山を均質と仮定できる条件についてあまり議論がなされていないにも関わらず、地山物性の不均質性はモデル化に反映せず、地山の各地層を均質な材料と仮定することが多い³⁾。すなわち、トンネル掘削解析を行う際、地山物性の不均質性がどの程度であれば地山を均質と仮定してもよいか、均質と仮定した影響が少ないかといった検討は十分に実施されていないのが現状である。

そこで、本章では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の変形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られたトンネル周辺変位（特に、地中変位）を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行う。このトンネル周辺変位に着目した逆解析により得られる解析結果（例えば、ヤング係数など）は、トンネル掘削時における地山物性の不均質状態を平均的な地山として評価した結果といえる。そして、本章では、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について提案する。

3. 2. 地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析

本節では、確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法⁴⁾ (図2-5参照)を用いて、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施する。そして、特に、山岳トンネル掘削時の現場計測結果として求められることのあるトンネル周辺の地中変位に相当する変位を取得する。以下に、解析条件や変位取得位置などを示す。

3. 2. 1. 採用した数値解析手法

本研究で実施するトンネル掘削解析では、三次元有限差分法 (Finite Difference Method ; FDM) 解析コードFLAC3Dを採用した。FLAC3Dは、Cundallら⁵⁾が提案した土質および岩盤構造物を対象にした三次元FDMに基づく連続体解析手法である。

FLAC3Dの最大の特徴は、静的問題を解くことを目的としながらも支配方程式に運動方程式を採用して (擬似静的問題) , 独自の離散化手法を組み込むことにより、小さな荷重を受けた地盤の弾性状態から、大きな荷重による地盤の破壊状態に至るまでの過程を逐次的に再現することができる点にある⁶⁾。また、FLAC3Dは差分法をベースに置いているが、独自の計算テクニックを導入しているため、要素形状が従来の差分法のように縦横等間隔の差分格子に限定されないといった特徴もある。

FLAC3Dの計算プロセスを図3-1に示す。FLAC3Dは図3-1に示すような計算サイクルを何回も繰り返しながら、数理的な減衰を用いて運動方程式における不釣り合いな力を消失させていき、平衡状態における解析結果を得ることができる解析手法である。

本論文では、FDMに基づく連続体解析手法であるFLAC3Dを用いて、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施する。以下の項において、掘削解析時の諸条件について示す。

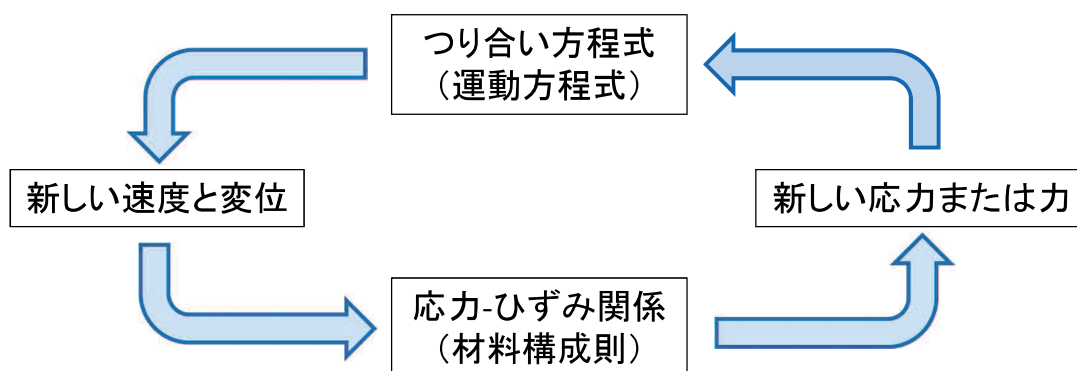


図3-1 FLAC3Dの計算プロセス⁶⁾

3. 2. 2. トンネル掘削解析モデルの寸法

本章で用いたトンネル掘削解析モデルの寸法を図3-2に示す。図からわかるように、トンネル形状とその寸法は、インバートなしの複線トンネル（トンネル直径 $D=9.34\text{m}$ ）とし、解析領域は $50\text{m} \times 50\text{m}$ とした。また、解析領域内の要素の基本寸法は、トンネル周辺部を除き、 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.25\text{m}$ とし、総要素数は62664個とした。ここで、トンネル掘削解析モデルの奥行きを 0.25m と微小にしたのは、奥行き方向の変位を拘束することで、二次元平面ひずみ状態を仮定し、疑似二次元解析とするためである。

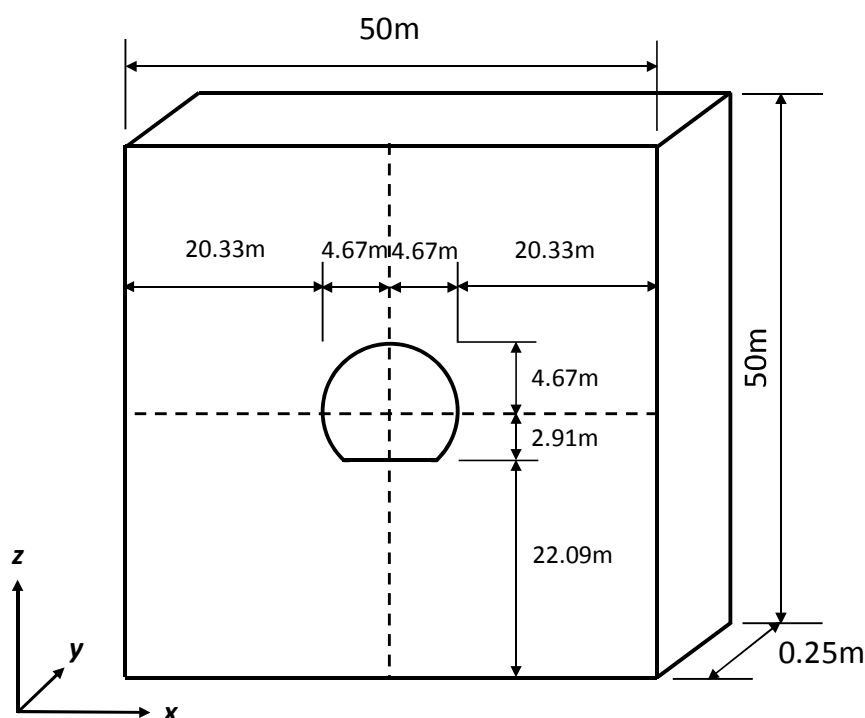


図 3-2 トンネル掘削解析モデルの寸法

3. 2. 3. 地山物性の不均質性の設定

第2章で述べたように、地山は、天然材料であるがゆえに同一地層内においても地山物性が空間的にばらつき（不均質性）を有しているという特徴をもっている⁷⁾。そのため、同様な地点から試料を採取して、種々の室内要素試験を行い変形特性や強度特性を求めたとしても、それらにはばらつきが存在している。このような特徴は、不連続体の範疇で解析しうる地山の場合、不連続面に起因する挙動が卓越することから問題となることが少ないが、連続体の範疇で解析しうる地山の場合は、地山物性の不均質性に依存した挙動となり、構造物の安定性などに問題を及ぼす場合がある⁸⁾。そのため、連続体の範疇で解析しうる地山（例えば、砂質土系地山など）を取り扱うことが多い基礎・土構造物の分野では⁹⁾、地山物性の不均質性を連続体解析に考慮する方法が数多く提案されている（第2章参照）。

そこで、本節では、地山物性の不均質性を連続体解析に考慮する方法の一つである確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法⁴⁾ (図2-5参照) をFDMに基づく連続体解析であるFLAC3Dに導入し、同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析モデル (本章では、“不均質地山モデル” と呼ぶこととする) を作成する。特に、本章では、トンネル掘削時における地山物性の不均質性に関する検討を行う第一歩として、地山の材料構成則を等方線形弾性体とし、地山の变形特性のばらつきのみを考慮した。以下に、本研究のトンネル掘削解析で用いる地山物性値の確率分布と地山物性の不均質性を記述し、不均質地山モデルの作成例とその特徴を示す。

a) 地山物性値の確率分布の設定

本論文で用いるFLAC3Dは連続体解析手法であり、不連続面がほとんどない地山 (表2-1(a) 参照) や、地山の力学的な挙動が主に地山の材料特性に支配される地山 (例えば、軟岩地山や砂質土系地山など) などを対象に用いられる解析手法である⁶⁾。そこで、本研究のトンネル掘削解析で用いる地山物性値は、地山の力学的な挙動が主に地山の材料特性に支配される軟岩地山の地山物性値を用いることとした。以下に、本研究のトンネル掘削解析で用いる地山物性値の確率分布について記述する。

泥岩や凝灰岩などの軟岩に分類される地山の一軸圧縮強さは一般的に 20MPa 以下である。本章では、熊坂⁴⁾が地山物性値のばらつき範囲の捉え方を「倍半分」と考えていたことを参考に、基本物性値を一軸圧縮強さ 10MPa とした上で、物性値のばらつき範囲の最大値を 2 倍の 20MPa、最小値を 1/2 倍の 5MPa とした。そして、5~20MPa の範囲内における一軸圧縮強さのとり値は、5~10MPa および 10~20MPa の間を等間隔に 8 分割した際の計 19 個の値とした。そして、地山の一軸圧縮強さの確率分布は、基本物性値の一軸圧縮強さ 10MPa を中心に一軸圧縮強さが減少または増加するごとに徐々に分布確率が減少する離散型三角分布 (図 3-3 参照) を仮定した⁴⁾。ここで、図 3-3 の縦軸は体積率となっているが、体積率とはそれぞれの地山物性値をもつ要素の体積が解析モデルの総体積に占める割合のことであるため、各物性値の分布確率ともいえる。

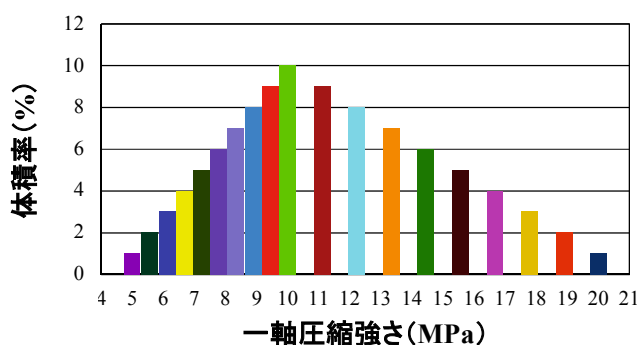


図 3-3 本章で用いる一軸圧縮強さの確率分布

表 3-1 一軸圧縮強さに対する解析用物性値

material	分布確率(%)	一軸圧縮強さ(MPa)	ヤング係数(MPa)	ポアソン比(-)
material1	1.0	5.00	761.5	0.3420
material2	2.0	5.56	882.5	0.3323
material3	3.0	6.11	1008	0.3236
material4	4.0	6.67	1139	0.3159
material5	5.0	7.22	1274	0.3090
material6	6.0	7.78	1413	0.3028
material7	7.0	8.33	1557	0.2972
material8	8.0	8.89	1704	0.2923
material9	9.0	9.44	1855	0.2878
material10	10.0	10.0	2010	0.2838
material11	9.0	11.1	2329	0.2771
material12	8.0	12.2	2661	0.2717
material13	7.0	13.3	3006	0.2674
material14	6.0	14.4	3363	0.2639
material15	5.0	15.6	3730	0.2611
material16	4.0	16.7	4108	0.2589
material17	3.0	17.8	4497	0.2571
material18	2.0	18.9	4895	0.2557
material19	1.0	20.0	5303	0.2546
	平均(MPa)	10.9	2334	0.2845
	不偏標準偏差(MPa)	3.45	1037	0.0199
	変動係数(%)	31.6	44.43	7.001

また、本章のトンネル掘削解析では、地山の材料構成則を等方線形弾性体としているため、次式に示される軟岩における一軸圧縮強さとの相関式¹⁰⁾を用いて、一軸圧縮強さ (q_u) をヤング係数 (E) およびポアソン比 (ν) に変換し、これらの値をトンネル掘削解析に用いることとした。表3-1にトンネル掘削解析で用いるヤング係数とポアソン比の値を示す。

$$E = 80q_u^{1.4} \quad (3-1)$$

$$\nu = 0.25 \left(1 + e^{-0.2q_u} \right) \quad (3-2)$$

岩石の物性値のばらつきに関する既往研究^{11),12),13)}によると、岩石の一軸圧縮強さの確率分布は一般的に正規分布や対数正規分布、ワイブル分布などの確率分布関数に従うと考えられており、本章で用いる一軸圧縮強さの確率分布は対数正規分布を近似化したものに該当する。また、本章で用いる一軸圧縮強さの確率分布から求めた変動係数は約 30%であり (表 3-1 参照)、伊藤ら¹¹⁾の研究により求められた軟岩 (砂岩および泥岩) の一軸圧縮強さの変動係数の範囲内である。加えて、一般的に、連続体の範疇で解析しうる地山の場合、一軸圧縮強さの変動係数は 30%程度の値を取ることが多い¹⁴⁾。したがって、本章で設定した一軸圧縮強さの確率分布は、現実的なばらつきを有する確率分布といえる。本章では、上記のように設定した一軸圧縮強さの確率分布 (変動係数 30%程度の近似的な対数正規分布) を用いるが、その形状と平均および変動係数の値は岩種などによって異なるため、注意が必要である。

b) 地山物性の不均質性の設定とその特徴

第2章で述べたように、地山が本来有する地山物性の不均質性を連続体解析に考慮する主な方法の一つとして、地山物性値の空間的なばらつきをエルゴード性（ある一点のばらつきが空間全体のばらつきに等しいとする性質）を仮定する確率場として取り扱い、FEMやFDMなどに基づく連続体解析の各要素または要素群（隣接する複数の要素）に地山物性値を与えることによって地山物性の不均質性を考慮する方法がある。本章では、この方法の中の1つである確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法⁴⁾（図2-5参照）を用いて、FLAC3D上で作成したトンネル掘削解析モデル（3.2.2.参照）に同一地層内における地山物性の不均質性を考慮し、不均質地山モデルを作成する。ここで、採用する確率分布は、3.2.3.a)で示したとおりである。また、地山物性値を与える要素群の形状は正方形に限定し、その寸法は0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0mの5種類とする（ただし、0.2mの場合、トンネル周辺部を除き、単一要素となる）。本論文では、このような正方形要素群の大きさを“均質寸法”と定義する。

実際に作成した各不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の一例を図3-4に示す。また、作成した各不均質地山モデルの地山物性の分布状況の一例を図3-5に示す。ここで、図3-5における不均質地山モデルの着色は、図3-4に示すそれぞれの一軸圧縮強さの着色に対応している。図3-4から、均質寸法が大きくなるにつれ、図2-5に示した離散型三角分布となっていないことがわかる。これは、均質寸法0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0mにおけるそれぞれの要素群（均質寸法）の数が62500個、15625個、2500個、625個、169個となり、

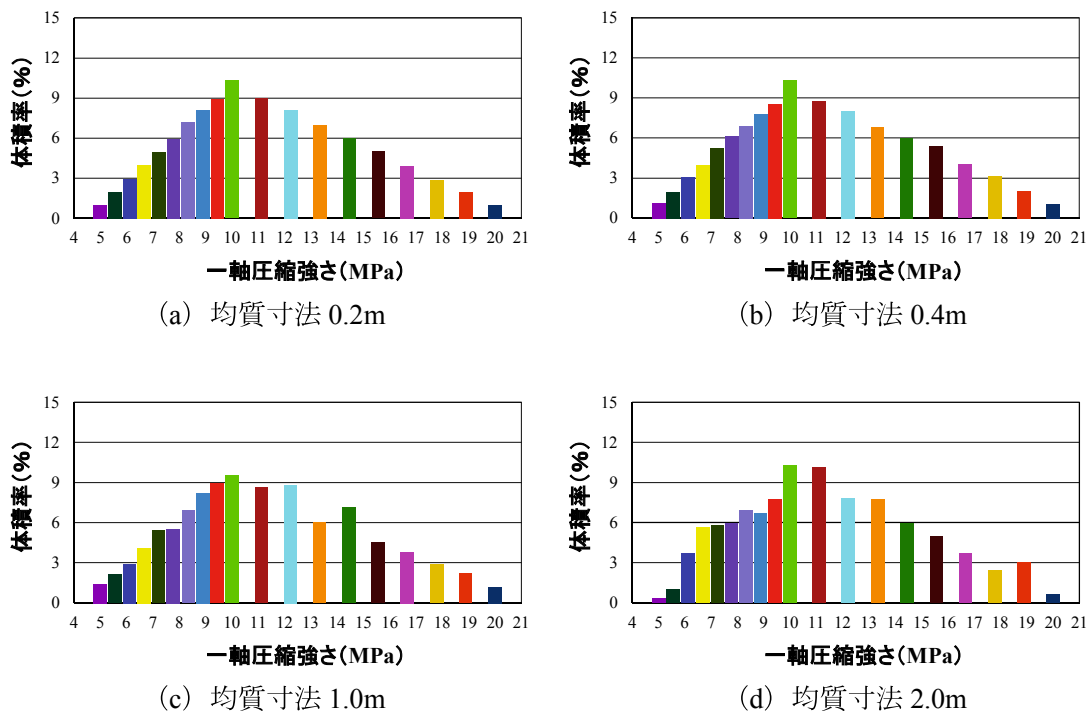
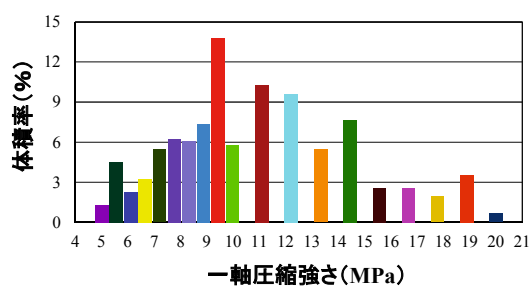
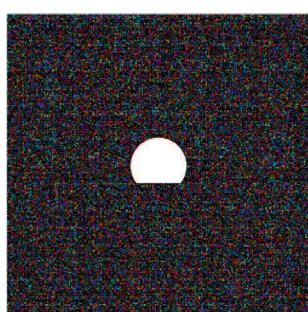


図3-4 各不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の一例 (1/2)

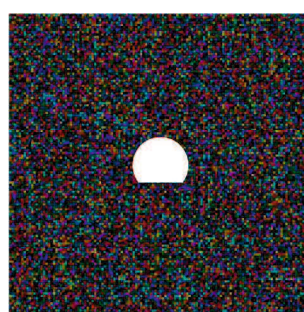


(e) 均質寸法 4.0m

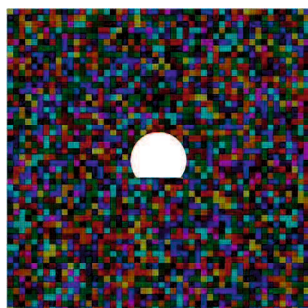
図3-4 各不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の一例 (2/2)



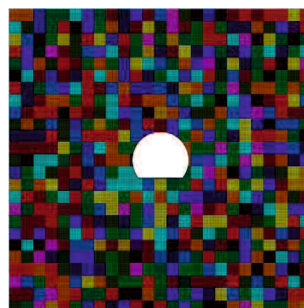
(a) 均質寸法 0.2m



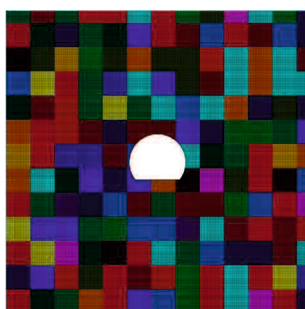
(b) 均質寸法 0.4m



(c) 均質寸法 1.0m



(d) 均質寸法 2.0m



(e) 均質寸法 4.0m

図3-5 各不均質地山モデルにおける地山物性の分布状況の一例

均質寸法が大きくなるにつれて乱数を割り当てる数が減少するためである。特に、均質寸法4.0mのケースは、要素群の数が最も少ないため、不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布が仮定した確率分布（図3-3参照）に近づきにくいことがわかる。また、均質寸法4.0mのケースでは、不均質地山モデルのトンネル直径が約9mであるため、トンネル壁面の約半分の領域が同じ物性で占めることになることがわかる（図3-5参照）。

続いて、図3-5の各不均質地山モデルがどのような地山物性値の固有変動性を想定しているかを明確にする。そこで、まず図3-5の各不均質地山モデルの任意の鉛直位置において、水平方向の各位置（要素）における地山物性値を抽出した（図3-6参照）。ここで、鉛直方向の地山物性値の固有変動性を示さずに、水平方向の地山物性値の固有変動性のみを示したのは、本研究における不均質地山モデルが地山物性値を与える要素群の形状を正方形に限定しており、鉛直・水平方向ともに同様な地山物性値の固有変動性を示すためである。

図3-6から、均質寸法の変化させることによって、異なる地山物性値の固有変動性を有する不均質地山モデルを作成することが可能となっていることがわかる。特に、実際の地盤調査から得ることができ、なおかつ地山物性の不均質性を考慮する際に重要となるパラメータである変動スケールのばらつき範囲とその平均（図2-4参照）が変化していることがわかる。ここで、変動スケール（Scale of Fluctuation）とは、第2章で述べたように、調査から得られたデータを補間した際の地山物性値の連続データがすべて平均（またはトレンド）以上またはそれ以下となる区間の大きさである¹⁵⁾。そこで、各不均質地山モデルがどのような地山物性値の固有変動性を想定しているかをより明確にするために、図3-5の各不均質地山モデルの任意の鉛直位置5箇所において、水平方向の各位置（要素）における地山物性値を抽出し、図3-7(a)に示すように変動スケールを算出した。このように算出した変動スケールと均質寸法の関係を図3-7(b)に示す。図3-7(b)から、地山物性値の変動スケールのばらつき範囲とその平均が均質寸法の大きさに依存し、変動スケールの平均は均質寸法の約2倍となることがわかる。すなわち、上記のような方法で作成する不均質地山モデルは、変動スケールの平均が均質寸法の約2倍となるモデルといえる。一方で、本研究における不均質地山モデルは、均質寸法に相当する距離内の自己相関係数（元データと任意の距離分をずらしたデータとの相関）が1.0であり、その距離を超えた位置において自己相関係数が急激に0になるようなモデルでもある。すなわち、比較的近い2地点間において相関が見られないといった極めてランダムな場を想定している。

本研究では、以上のような地山物性値の固有変動性を想定している不均質地山モデルを表3-2に示すケース数ほど作成した。この各ケースの不均質地山モデルの作成においては、解析モデル全体の各要素群（均質寸法）に対して異なる乱数を発生させて、それぞれ配置が異なる不均質地山モデルを作成した。ここで、均質寸法はあくまで同じ物性値をもつ領域の大きさであるため、不均質地山モデルにおける各要素の大きさはすべての不均質地山モデルにおいて同じである。また、表3-2における変動スケールの平均は、図3-7(b)の変動スケールの平均と均質寸法の関係から、簡易的に均質寸法の2倍として算出したもので

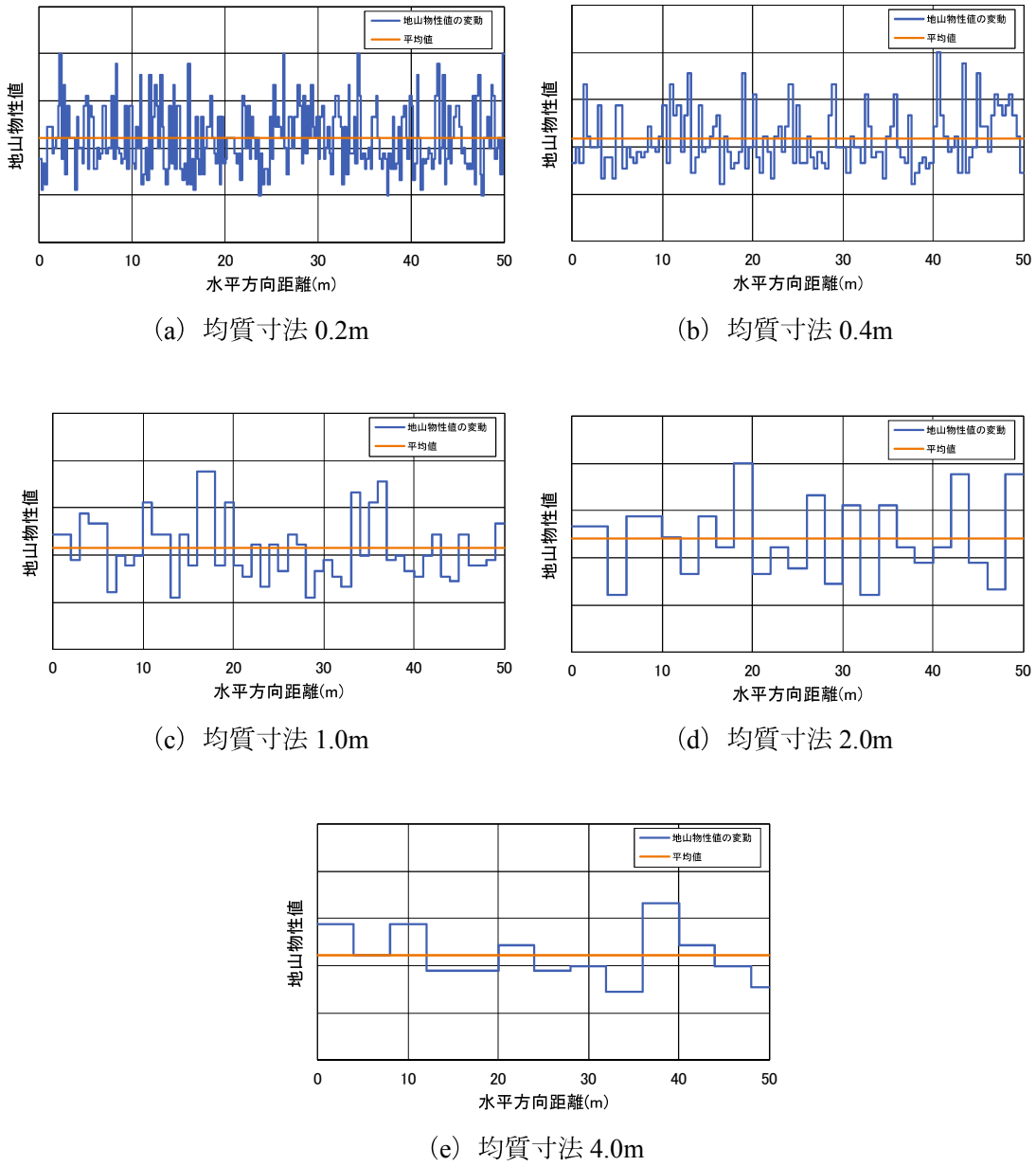


図3-6 各不均質地山モデルにおける地山物性値の固有変動性の例

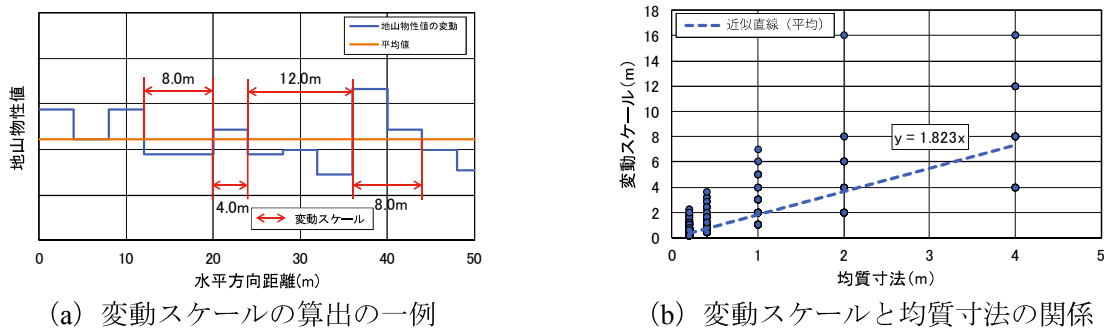


図3-7 不均質地山モデルにおける変動スケールの算出の一例と変動スケールの値

表 3-2 トンネル直径に対する各寸法の割合と解析ケース数

均質寸法 (m)	変動スケールの平均 (m)	均質寸法 / トンネル直径	変動スケールの平均 / トンネル直径	不均質地山モデルのケース数
0.2	0.4	0.02	0.04	10
0.4	0.8	0.04	0.09	20
1.0	2.0	0.11	0.21	20
2.0	4.0	0.21	0.43	20
4.0	8.0	0.43	0.86	20

※ただし、本章では初期応力条件を3ケースとしたため(次項参照)、それぞれ配置が異なる不均質地山モデルのケース数は総計270(90ケース×3初期応力)ケースとなる。

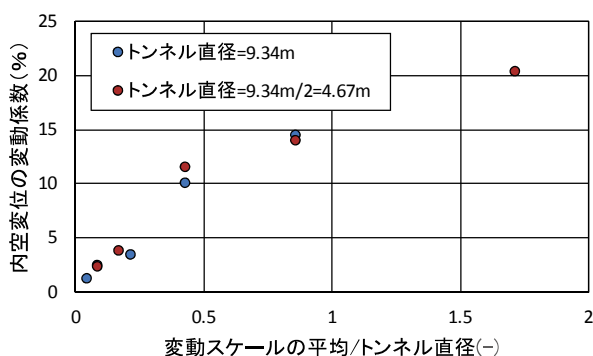


図3-8 内空変位の変動係数と変動スケールの平均/トンネル直径の関係

ある。加えて、表 3-2 において均質寸法や変動スケールの平均をトンネル直径で除して無次元化しているのは、トンネル直径の異なるトンネルにおいても汎用性をもたせるためである。実際に、図 3-5 に示した不均質地山モデルのトンネル直径を半分にしたモデルを新たに同数作成し、同様な解析条件を与えたトンネル掘削解析を実施したところ、同じ均質寸法または変動スケールの平均のケースにおけるトンネル周辺変位のばらつき（ここでは、特にトンネルのスプリングラインにおける内空変位の変動係数に着目した）が均質寸法または変動スケールの平均/トンネル直径に依存することがわかっている（図 3-8 参照）。そこで、本章では、以降このような無次元化した値に着目することとし、特に、地山物性の不均質性を考慮する際に重要となるパラメータである変動スケールをトンネル直径で除した値である「変動スケールの平均/トンネル直径」に着目し、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を評価することとした。

3. 2. 4. 初期応力の設定とトンネル掘削解析時の諸条件

本章で採用した不均質地山モデルのトンネル掘削時における初期応力条件を表 3-3 に示す。また、本章においては圧縮応力を正とする。本章の初期応力条件は、表 3-3 に示すように、ケース 1 (5MPa の等方応力状態)、ケース 2 (解析ケース 1 の側圧を 1.25 倍した状態)、ケース 3 (解析ケース 2 に水平主応力の傾き 30° に相当するせん断応力を追加した状態) の 3 ケースとした。以降、初期応力の各ケース名をそれぞれ“等方応力”、“側圧卓越初期応力”、“非対称初期応力”と呼ぶ。これらの 3 ケースの初期応力条件は、それぞれの不均質地山モデル 90 ケース (表 3-2 参照) に適用するため、それぞれ配置が異なる不均質地山モデルのケース数は総計 270 (90 ケース×3 初期応力) ケースとなる。

すべての解析ケースにおいて、鉛直応力は 5MPa と設定した。これは、地山の単位体積重量を 20kN/m³ とすると、土被り約 250m に相当する値であり、我が国の道路トンネルの最大深度に相当すると考えられる。また、図 3-9 に高速道路トンネル建設時の土被り高さと同側圧係数の調査結果を示す。この図から土被りが 75m を超過すると、側圧が約 0.7~1.3 とばらつくことがわかる。そのため、本章では解析ケース 2 のような水平方向初期応力の卓越を想定したケースでもトンネル掘削解析を実施する。また、解析ケース 2 の状態に加え、トンネル形状に対し非対称な初期応力 (初期せん断応力) を想定した場合も解析ケース 3 としてトンネル掘削解析を実施する。

表 3-3 不均質地山モデルの初期応力条件

ケース	ケース名	初期応力条件		
		水平応力 σ_x, σ_y (MPa)	鉛直応力 σ_z (MPa)	せん断応力 τ_{xz} (MPa)
1	等方応力	5.0	5.0	0
2	側圧卓越初期応力	6.25	5.0	0
3	非対称初期応力	6.25	5.0	1.0825

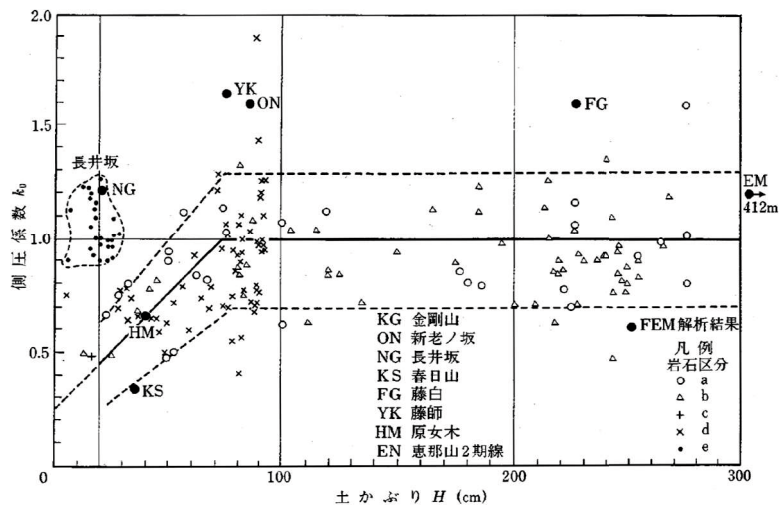


図 3-9 側圧係数と土被りの関係¹⁶⁾

また、不均質地山モデルにおけるトンネル掘削解析時の境界条件は、解析領域の面外法線方向の変位を拘束条件とした。続いて、トンネル掘削解析時の応力解放に関する説明を以下に示す。図3-10から、三次元トンネル掘削解析を実施した場合、切羽がある地点に到達する前に、そのある地点周辺の地山にはすでに変形が生じており、更なる掘削による影響で変形が生じることがわかる。その掘削過程を模擬するために、二次元トンネル掘削解析では、切羽到達前の先行変位を表現するための応力の一次解放と、支保建て込み後の応力の二次解放といった2段階の応力解放が実施される。その場合、一次解放時の応力が解放される割合（応力解放率）は30~50%が一般的である。本章における不均質地山モデルのトンネル掘削解析は、3.2.2.で述べたように、二次元平面ひずみ状態を仮定した二次元トンネル掘削解析であるが、本章ではトンネル掘削時における地山物性の不均質性の評価をより簡潔にするために、一次解放時の応力解放率は設定しないこと（すなわち、応力解放率100%の一括掘削）とした。加えて、支保工のモデル化も行わないこととした。

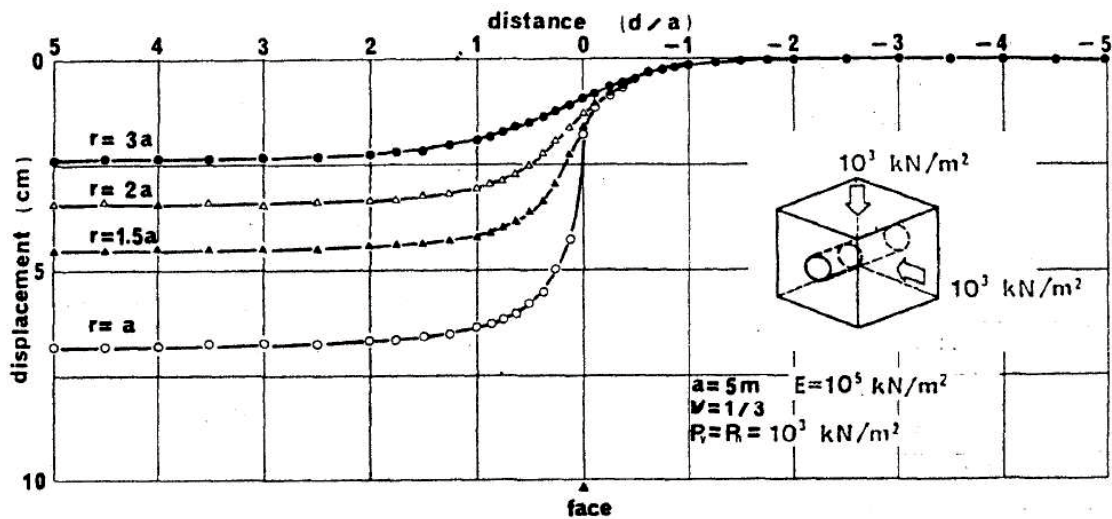


図3-10 三次元トンネル掘削解析による変位特性曲線¹⁷⁾

3. 2. 5. トンネル掘削解析時の変位取得位置

本章で作成した不均質地山モデルに、上記に示した初期応力条件下でのトンネル掘削解析を実施し、トンネル周辺変位の取得を行った。本研究では、特にトンネル掘削時に現場計測される場合がある地中変位に着目し取得することとした。ここで、「地中変位」とはトンネル施工時の代表的な現場計測である地中変位計測を模擬し、トンネル壁面から計測線上の最深点の半径方向の変位と計測線上の各点の半径方向の変位との相対変位量である。本章において、地中変位に着目したのは、トンネル掘削時に現場計測される変位の中で最も計測点が多く、最もトンネル周辺挙動を把握することができる現実的な現場計測変位であるためである。図3-11にトンネル掘削解析時における地中変位の計測点を示す。

本研究におけるトンネル掘削解析時の計測個数は、図3-11に示すように1計測断面あたり5測線40箇所である。しかしながら、地中変位は相対変位量として評価されるため、計測線上の最深点では、同じ点における半径方向の変位の相対変位量となる。つまり、最深点における地中変位（相対変位量）は必ず0となる。したがって、本研究における地中変位のデータ数は、実質的には1計測断面あたり5測線35データとなり、図3-12に示すとおりとなる。図3-12は、変動スケールの平均／トンネル直径が0.04および初期応力条件が5MPaの等方応力である時の地中変位の計測結果の一例である。

上記のようなトンネル掘削解析から得られる地中変位を以降で実施する逆解析で用いることとした。

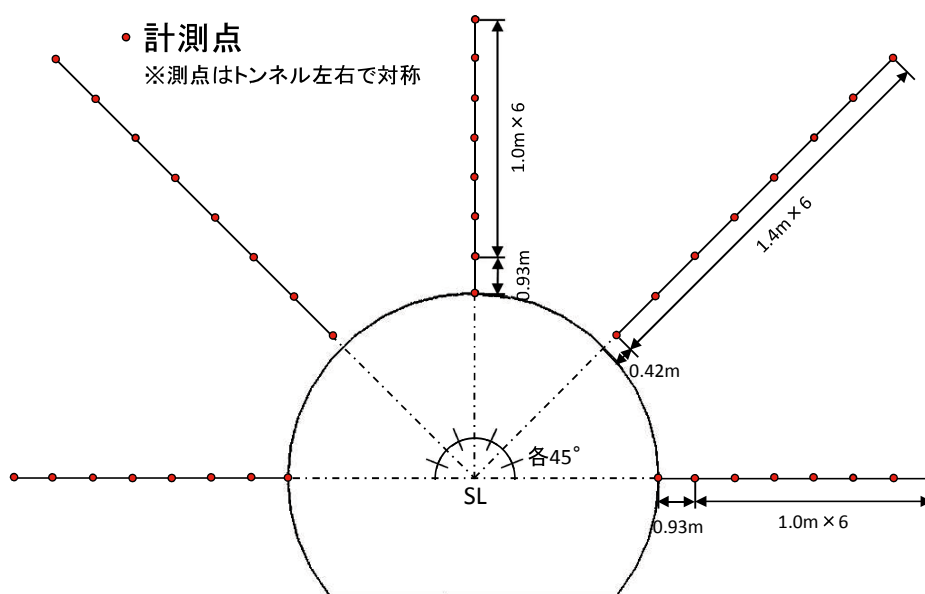


図 3-11 トンネル掘削解析時における地中変位計測点

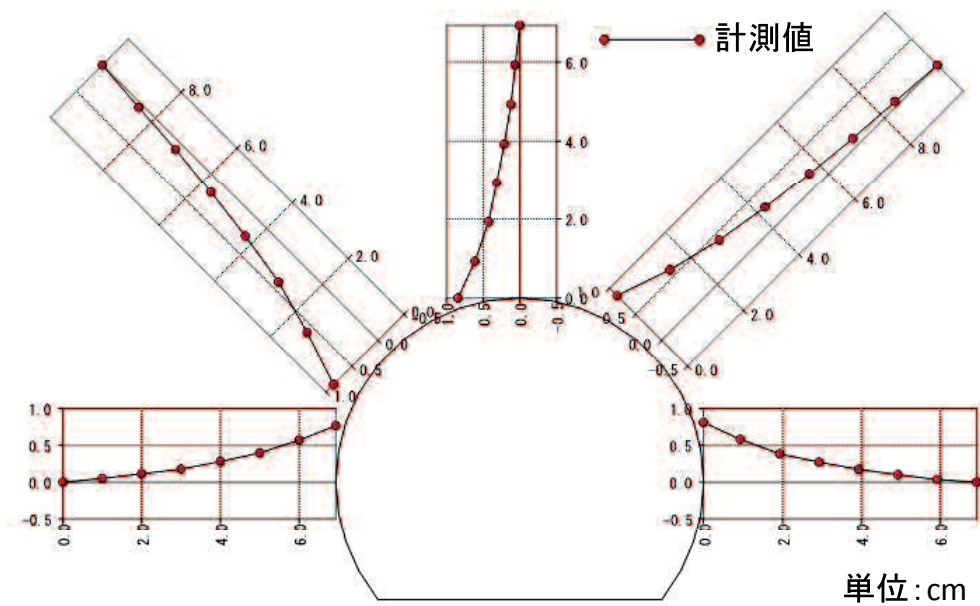


図 3-12 地中変位の計測結果の一例

3. 3. トンネル掘削時における不均質地山の逆解析

本節では、前節のトンネル掘削解析から得られる地中変位の計測結果を用いて、地山を均質と仮定した逆解析を実施する。この地中変位に着目した逆解析から得られる結果は、トンネル掘削時における地山物性の不均質状態を平均的な地山として評価した結果といえる。そして、トンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較を行うとともに、逆解析から得られる結果（特に、ヤング係数）のばらつきに関する評価を行う。

3. 3. 1. 採用した逆解析プログラム

本章で採用した逆解析プログラムは、桜井ら^{18),19)}によって開発された直接逆解析プログラム DBAP/M である。DBAP/M は、有限要素法に基づきトンネル掘削時に得られる変位計測結果を入力値として、地山の平均的なヤング係数および初期応力を最小二乗法により求める逆解析プログラムである。

DBAP/M では、以下のような仮定に基づいて解析が実施される。

- ① 地山を均質等方の二次元線形弾性体と仮定する。したがって、地山物性値はヤング係数とポアソン比のみとなる。また、DBAP/M では地山のポアソン比は仮定する。
- ② 地山の初期応力は、**図 3-13**に示すような巨視的にとらえた値であり、局所的な値ではない。しかしながら、土被りが大きくなると、このような巨視的な値でも、実際に作用している初期応力と等しくなると考えている。また、DBAP/M では鉛直応力 σ_z を土被り圧 (=平均的な単位体積重量×土被り高さ) として仮定する (**図 3-13** 参照)。
- ③ 仮定するポアソン比および鉛直応力 σ_z を除くと、等方線形弾性体の二次元空間における未知量は水平応力 σ_x 、せん断応力 τ_{xz} およびヤング係数の 3 つとなる (**図 3-13** 参照)。DBAP/M では、これらの未知量を同定するため、測定変位は最低 3 個以上必要となる。したがって、内空変位と天端沈下の組み合わせでも逆解析は可能である。

つまり、DBAP/M は、均質等方の二次元線形弾性体と仮定した地山において、計測変位

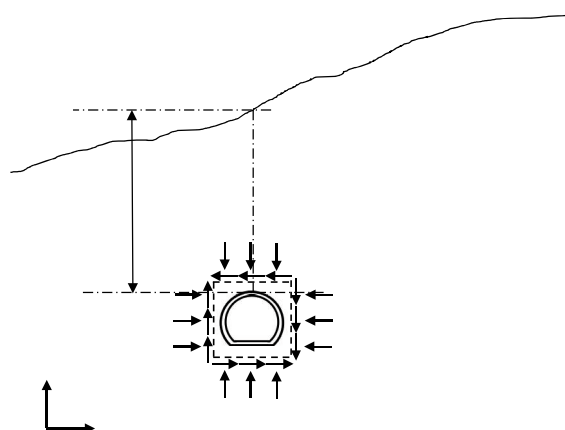


図 3-13 トンネルに作用する初期応力（圧縮を正とする）

を3つ以上入力し、なおかつ鉛直応力およびポアソン比を仮定することで、最小二乗法により、その計測変位を最もよく再現する水平応力、せん断応力およびヤング係数を推定することができる逆解析手法である。

地山を均質等方の線形弾性体と仮定するDBAP/Mでは、地山物性の不均質性や地山材料の非線形性の影響などが考慮されておらず、現場への適用には限界があると考えられる。このことから、様々な逆解析の研究が実施されている。例えば、大西ら²⁰⁾は、不均質岩盤での大まかな材料定数の同定は均質地盤と同様に可能であることを述べている。また、桜井ら²¹⁾は、ノルム最小化法を用いる非弾性ひずみを考慮した直接逆解析法を提案し、地山の非弾性挙動の逆解析が可能であると述べている。さらに、武内ら²²⁾は、桜井ら²¹⁾が提案した逆解析にヤング係数低減率を導入し、岩盤の非均質性を考慮した逆解析手法を提案している。それらに対し、本研究は、あくまで不均質な地山を均質な地山と仮定した際の解析結果に及ぼす影響に着目するため、本章のトンネル掘削解析と同じ地山の材料構成則を用いて地山を均質と仮定するDBAP/Mを用いる。

3.3.2. 逆解析に用いる入力パラメータ

先に述べたように、DBAP/Mに用いる入力パラメータは、計測変位、鉛直応力およびポアソン比である。本章で用いた計測変位（入力変位）は、前節で求めた各不均質地山モデルの地中変位（図3-12参照）であり、入力点の位置は前節で記述した計測点の位置（図3-11参照）と同じとした。また、逆解析に用いる鉛直応力はトンネル掘削解析時に用いた5MPaと仮定した（表3-3参照）。加えて、ポアソン比は、一軸圧縮強さの確率分布（図3-3参照）における基本物性値である一軸圧縮強さ10MPaから算出される0.2838と仮定した（表3-1参照）。

3.3.3. 逆解析に用いる解析モデル

逆解析に用いる解析モデル（以下、逆解析モデルと呼ぶこととする）を図3-14に示す。解析領域、掘削領域および境界条件は、前節の図3-2で用いた不均質地山モデルと同様である。しかしながら、逆解析モデルの総要素数は1250個であり、不均質地山モデル（総要素数：62664個）よりかなり要素数が少ない。また、不均質地山モデルは二次元平面ひずみを仮定しているものの、三次元直方体要素を採用している。それに対し、逆解析モデルは二次元平面ひずみ要素を採用しているといった違いがある。そのため、要素数、要素の次元数の相違が逆解析結果の精度に及ぼす影響が懸念される。

そこで、前節で用いた不均質地山モデルのヤング係数およびポアソン比を一定（均質）としたトンネル掘削解析をFLAC3Dで実施し、地中変位の計測結果を得た。そして、その地中変位からDBAP/Mで逆解析を行い、トンネル掘削解析の入力値と逆解析から得られた結果（水平応力 σ_x 、せん断応力 τ_{xz} 、ヤング係数E）を比較した。その結果を表3-4に示す。この表から明らかなように、両者は工学的に十分一致しており、逆解析モデルの要素数の

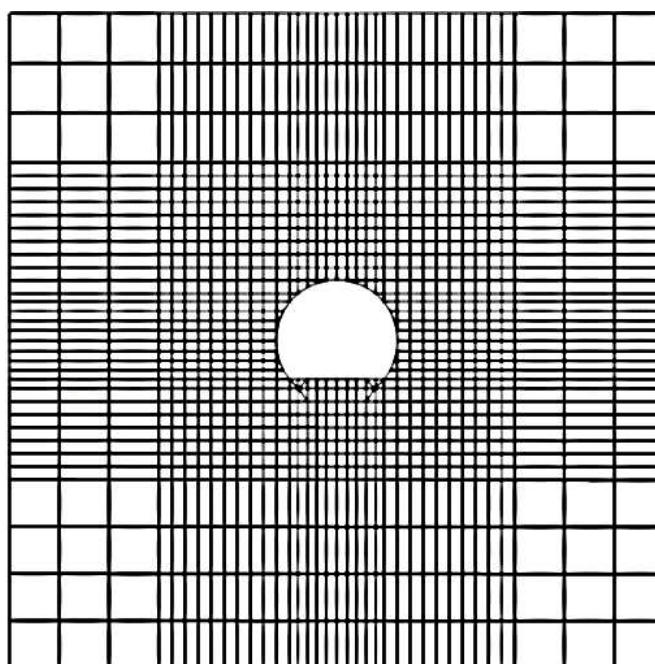


図 3-14 逆解析モデル

表 3-4 解析モデルの相違による逆解析結果の精度

	水平応力 σ_x (MPa)	鉛直応力 σ_z (MPa)	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	ヤング係数 E(MPa)
トンネル 掘削解析	5.000	5.000	0.000	2009
逆解析	4.993	5.000	-0.001	1987

簡略化による影響と要素の次元数の相違による影響は小さいことがわかる。そこで、本章の逆解析では図 3-14 の逆解析モデルを用いることとした。

3. 3. 4. 逆解析結果と考察

不均質地山モデルのトンネル掘削解析結果を用いて、地山を均質と仮定した逆解析を実施した。この逆解析から得られる結果は、トンネル掘削時における地山物性の不均質状態を平均的な地山として評価した結果といえる。本項では、トンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較を行うとともに、逆解析から得られる結果（特に、ヤング係数）のばらつきに関する評価とその考察を行う。逆解析は与える変位によって結果が変化することから、ここで指す逆解析から得られる結果は地中変位に着目した場合の1つの結果である。そのため、本項では、結果の値そのものではなく、主に値のばらつきや相違に着目して逆解析結果を評価する。これにより、不均質な地山を均質と仮定した際の影響を評価する。

a) トンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較

初期応力条件（表 3-3 参照）を変化させた各変動スケールの平均／トンネル直径（表 3-2 参照）におけるトンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較例を図 3-15、図 3-16、図 3-17 に示す。これらの図中に、逆解析から得られた初期応力分布（圧縮応力を正とする）とヤング係数をあわせて示す。

各図(a)より、変動スケールの平均／トンネル直径=0.04 の時、トンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果は、極めてよく一致する。また、逆解析によって得られる初期応力分布もほぼ当初のトンネル掘削解析で与えた初期応力条件（表 3-3 参照）に近い結果である。しかし、各図(b)～(e)に示すように、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるとトンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果にはわずかなずれが生じるとともに、変形をより一致させるために逆解析の初期応力分布が当初のトンネル掘削解析で与えた初期応力条件と異なる傾向を示していることがわかる。特に、変動スケールの平均／トンネル直径が最も大きい各図(e)では、これらの傾向が顕著であり、逆解析結果の水平応力やせん断応力がトンネル掘削解析で与えた初期応力条件と大きく異なることがわかる。すなわち、地山を均質と仮定する逆解析において、地山物性の不均質状態の変化は、ヤング係数はもちろんであるが、水平応力やせん断応力の大きさの変化としても表現されることがわかる。

また、各図の比較から、初期応力が等方応力である時だけ主応力の傾きが大きくばらついていることがわかる。これは、主応力の傾き α が以下の式²³⁾から求められることによって、初期応力が等方応力である時だけ $\sigma_z - \sigma_x$ の値が 0 に近づき、次式の括弧内の値が大きくなってしまったためである。

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau_{xz}}{\sigma_z - \sigma_x} \right) \quad (3-3)$$

以上の理由から、逆解析から得られた主応力の傾きは、初期応力が等方応力である際にトンネル掘削解析で与えたものと全く異なった値を示す場合があった。しかしながら、図 3-16、図 3-17 の初期応力が等方応力である時以外のケースでは、主応力の傾きはトンネル

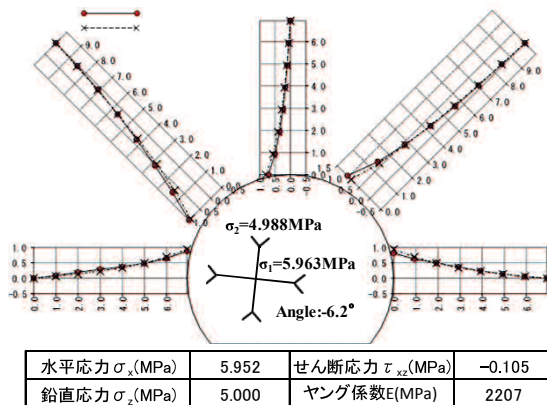
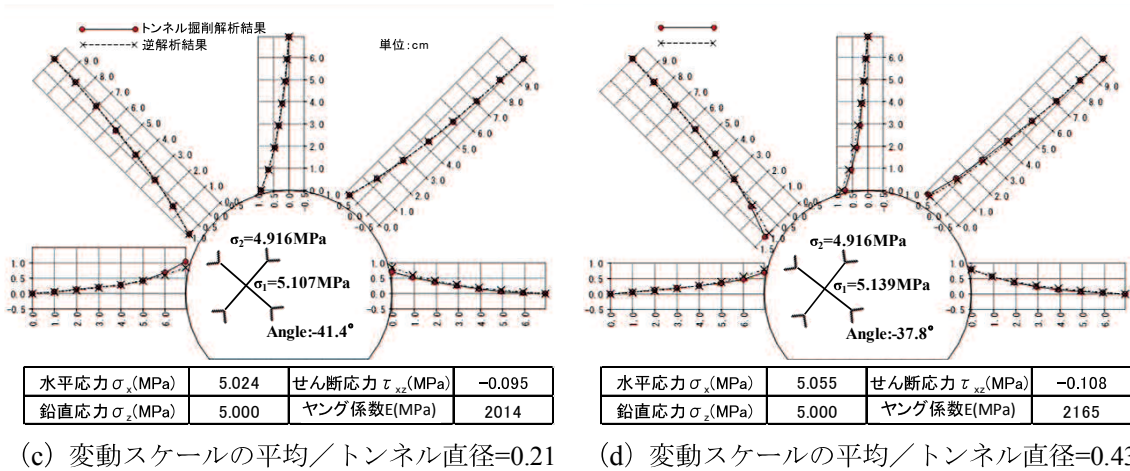
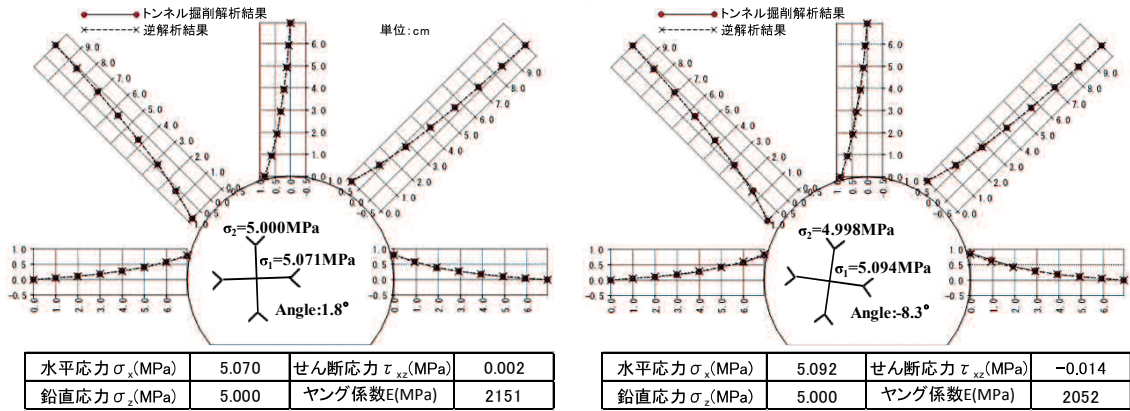
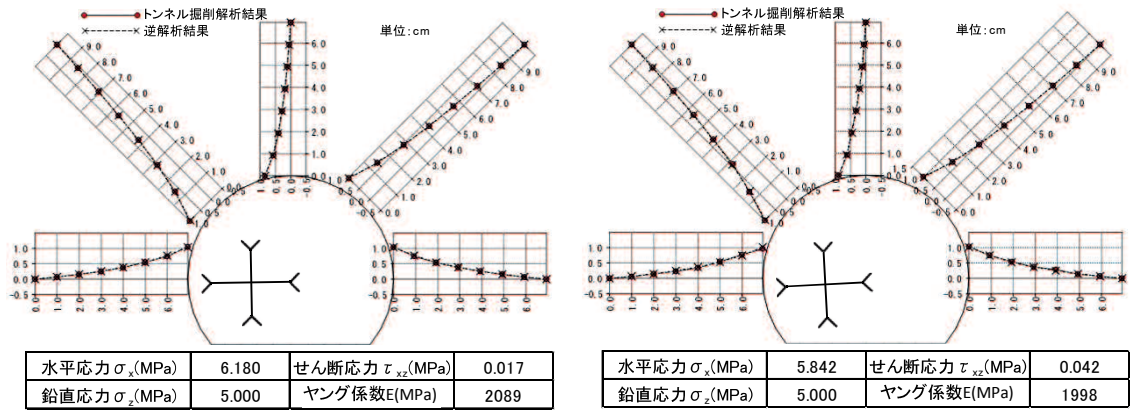
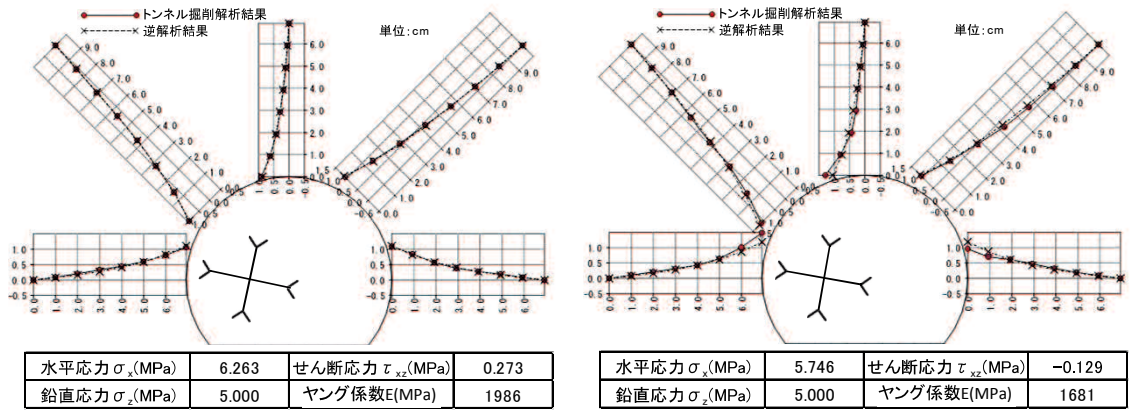


図 3-15 等方応力時のトンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較例



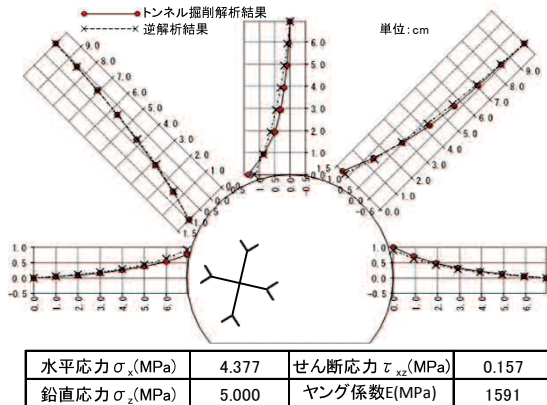
(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04

(b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09



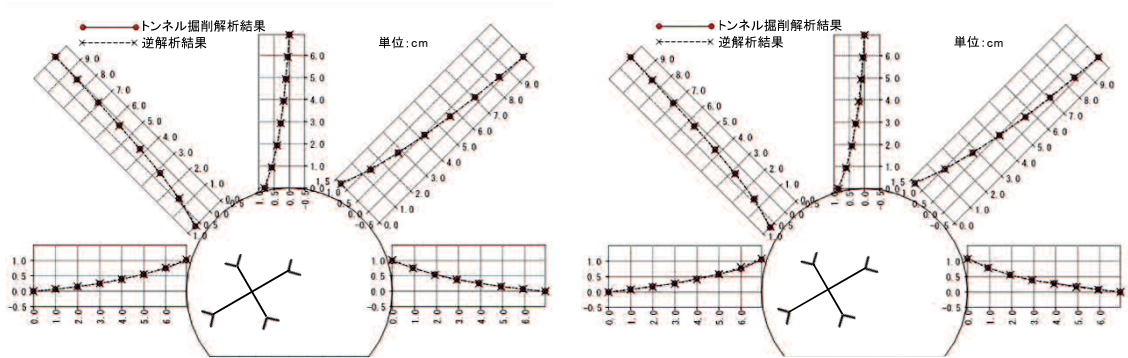
(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43



(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

図 3-16 側圧卓越初期応力時のトンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較例

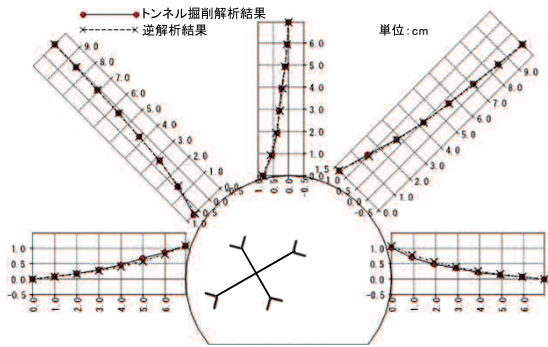


水平応力 σ_x (MPa)	6.191	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	1.048
鉛直応力 σ_z (MPa)	5.000	ヤング係数E(MPa)	2120

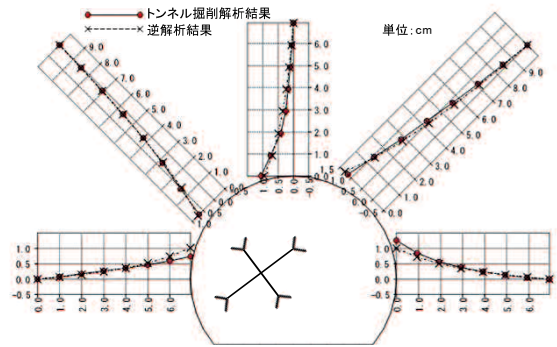
水平応力 σ_x (MPa)	6.249	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	1.070
鉛直応力 σ_z (MPa)	5.000	ヤング係数E(MPa)	2042

(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04

(b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09



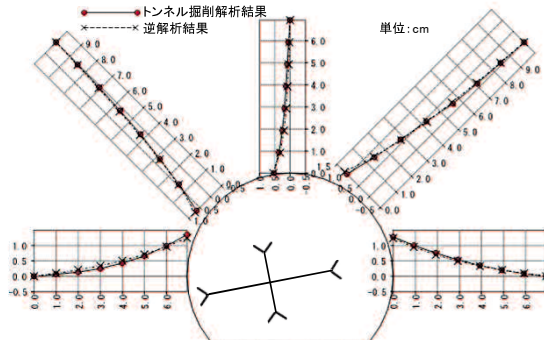
水平応力 σ_x (MPa)	6.328	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	1.113
鉛直応力 σ_z (MPa)	5.000	ヤング係数E(MPa)	2067



水平応力 σ_x (MPa)	5.470	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	0.809
鉛直応力 σ_z (MPa)	5.000	ヤング係数E(MPa)	1864

(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43



水平応力 σ_x (MPa)	9.560	せん断応力 τ_{xz} (MPa)	0.958
鉛直応力 σ_z (MPa)	5.000	ヤング係数E(MPa)	2826

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

図 3-17 非対称初期応力時のトンネル掘削解析と逆解析の地中変位結果の比較例

掘削解析で与えた値と同様な値を示し、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるにつれてトンネル掘削解析で与えた値とより異なるという先に述べた傾向を示すことがわかる。

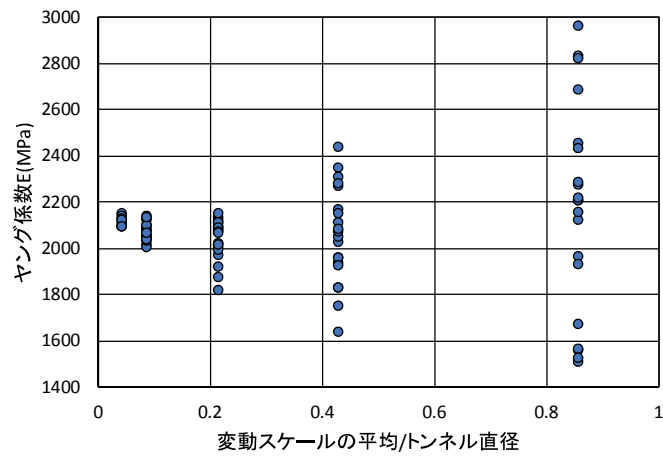
b) 逆解析結果のばらつきに関する結果と考察

不均質地山を均質と仮定する逆解析において、地山物性の不均質状態の変化は、ヤング係数や水平応力、せん断応力の大きさの変化として表現されることがわかった。そこで、逆解析結果（特に、ヤング係数）のばらつきに関する考察を行う。

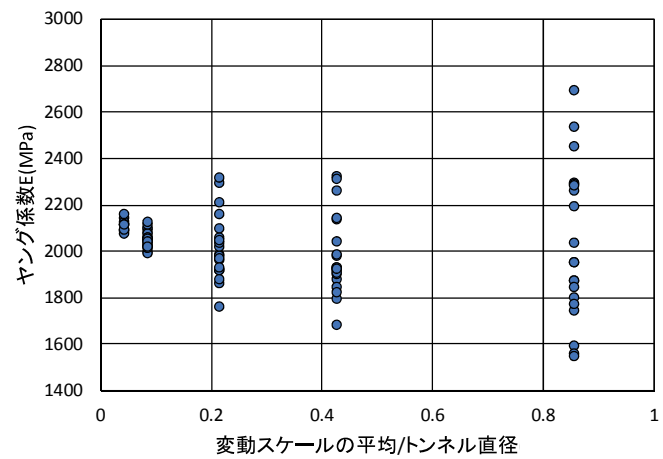
逆解析から得られたヤング係数と変動スケールの平均／トンネル直径の関係を図 3-18 に示す。また、それぞれの図のタイトルには、表 3-3 に示したトンネル掘削解析時に与えた初期応力ケース名を示している。図 3-18 から、初期応力条件が変化してもヤング係数のばらつきの傾向はあまり変化しないことがわかる。これは、不均質地山モデルが塑性変形の生じない等方線形弾性体であり、初期応力のみが変化したためと考えられる。また、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなると、逆解析から得られるヤング係数のばらつきが大きくなることがわかる。これは、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるにつれて、ヤング係数の小さいまたは大きい材料がトンネル周辺領域に広く分布する場合があります。逆解析において一致させようとするトンネル周辺変位（地中変位）の変形モードが他のケースの不均質地山モデルと比較して大きく異なる場合があるためである（図 3-19 参照）。すなわち、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるほど、トンネル周辺変位（地中変位）に及ぼす影響が大きいといえる。一方で、変動スケールの平均／トンネル直径が小さくなるにつれて、ヤング係数のばらつきが小さくなることがわかる。この結果より、変動スケールの平均／トンネル直径が小さくなるほど、同じ均質寸法のケース同士の均質さが増すと考えられる。

上述したようなヤング係数のばらつきを定量的に評価するために、逆解析から得られたヤング係数のばらつきの平均と（不偏）標準偏差からヤング係数の変動係数を求めた。その結果と変動スケールの平均／トンネル直径の関係を図 3-20 に示す。図 3-20 から、変動スケールの平均／トンネル直径が小さいほど、ヤング係数がばらつく可能性が低く、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山をほぼ均質および平均的物性（本章では、ヤング係数）としてとらえることができると考えられる。一方で、変動スケールの平均／トンネル直径が大きいほど、ヤング係数がばらつく可能性が大きく、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質な地山ととらえることが難しいと考えられる。

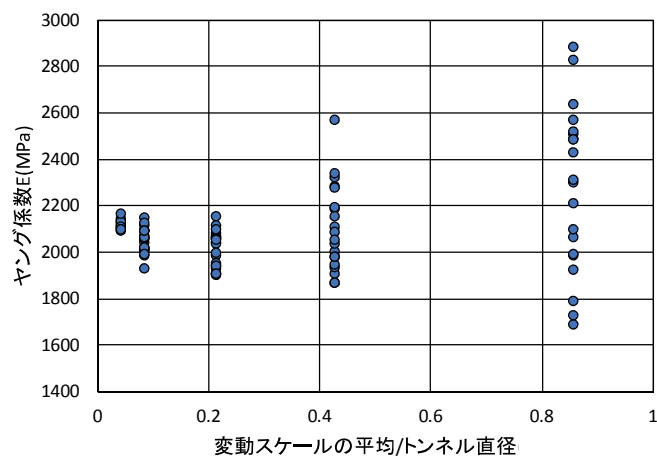
他の逆解析結果である水平応力およびせん断応力は、初期応力条件が変化した場合、設定した条件によってばらつきの平均が当然異なる。しかしながら、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるにつれて、逆解析結果のばらつきが大きくなるという傾向は、上記で示したヤング係数と同じであったため、本論文ではそれらの図化を省略する。



(a) 初期応力ケース 1：等方応力



(b) 初期応力ケース 2：側圧卓越初期応力



(c) 初期応力ケース 3：非対称初期応力

図 3-18 逆解析から得られたヤング係数と変動スケールの平均／トンネル直径の関係

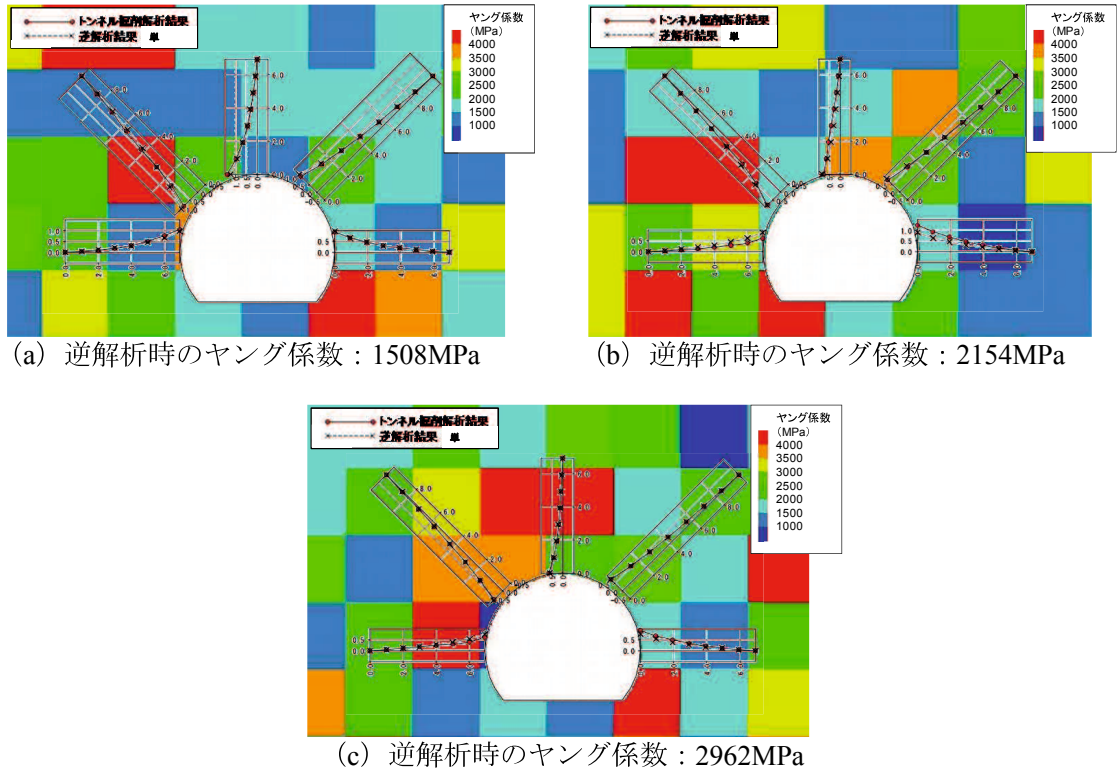


図 3-19 不均質地山モデルにおけるヤング係数の分布状況とその際の地中変位
(変動スケールの平均/トンネル直径=0.86, 初期応力ケース 1：等方応力のケース)

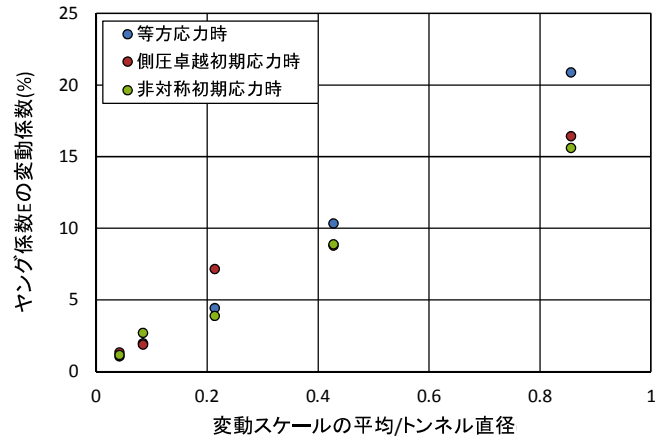


図 3-20 ヤング係数の変動係数と変動スケールの平均/トンネル直径の関係

3. 4. トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺挙動の詳細な比較

前節の逆解析から得られたヤング係数のばらつきの定量的な評価から、変動スケールの平均／トンネル直径が小さいほど、逆解析から得られるヤング係数がばらつく可能性が低く、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山をほぼ均質および平均的物性（本章では、ヤング係数）としてとらえることができると考えられた。

そこで、本節では、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件（変動スケールの平均／トンネル直径の条件）をより定量的に示すために、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析（3. 2. 参照）のトンネル周辺挙動と、トンネル掘削時における不均質地山の逆解析（3. 3. 参照）に基づいたトンネル掘削解析のトンネル周辺挙動の詳細な比較を行う。ここで、トンネル掘削時における不均質地山の逆解析に基づいたトンネル掘削解析のトンネル周辺挙動は、3. 3. の逆解析結果（水平応力、せん断応力およびヤング係数）と地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析と同様な要素分割モデル（図3-2参照）を用いて、FLAC3Dでトンネル掘削解析を実施した結果である。以下、両者を比較する際には、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析結果を“トンネル掘削解析結果”，トンネル掘削時における不均質地山の逆解析に基づいたトンネル掘削解析結果を“逆解析結果”と区別することとする。

そこで、まず同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件を推察するために、トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺の変位コンター図の比較と最大せん断ひずみ分布図の比較を行う。初期応力条件（表 3-3 参照）を変化させた各変動スケールの平均／トンネル直径におけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺の変位コンター図の比較を図 3-21, 図 3-22, 図 3-23 に示す。加えて、初期応力条件（表 3-3 参照）を変化させた各変動スケールの平均／トンネル直径におけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較を図 3-24, 図 3-25, 図 3-26 に示す。ここで、図 3-21～図 3-26 の各変動スケールの平均／トンネル直径における比較は、図 3-18 の各変動スケールの平均／トンネル直径においてヤング係数が最も小さい極端な例の逆解析結果とそれに対応するトンネル掘削解析結果を示している。

図3-21～図3-26 (a) (b) に示す変動スケールの平均／トンネル直径が0.04, 0.09の時、トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺挙動には、わずかな違いや局所的な違いなどがあるものの非常によく似た挙動を示していることがわかる。また、各図(c)の変動スケールの平均／トンネル直径が0.21の時、変動スケールの平均／トンネル直径が0.04, 0.09の時と比べ、トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺挙動の傾向には若干の違いがみられるものの、逆解析結果はトンネル掘削解析結果の特徴をおおよそとらえることができていることがわかる。それに対し、各図(d) (e)の変動スケールの平均／トンネル直径が0.43, 0.86の時、トンネル掘削解析と逆解析のトンネル周辺挙動の傾向にはより大きな違いが生じており、特に初期応力が等方応力と側圧卓越初期応力の際には逆解析結果でみられるような左右の

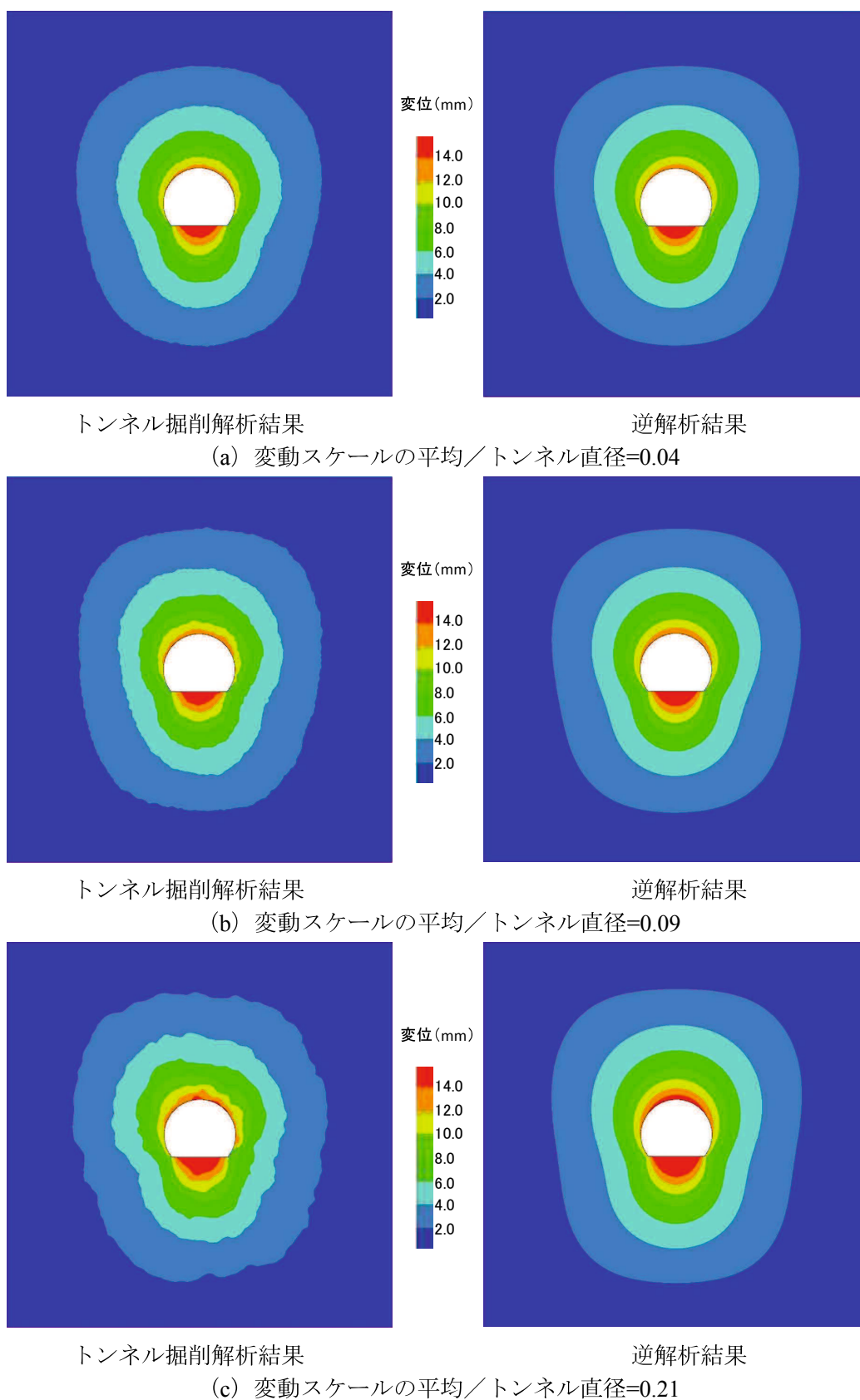
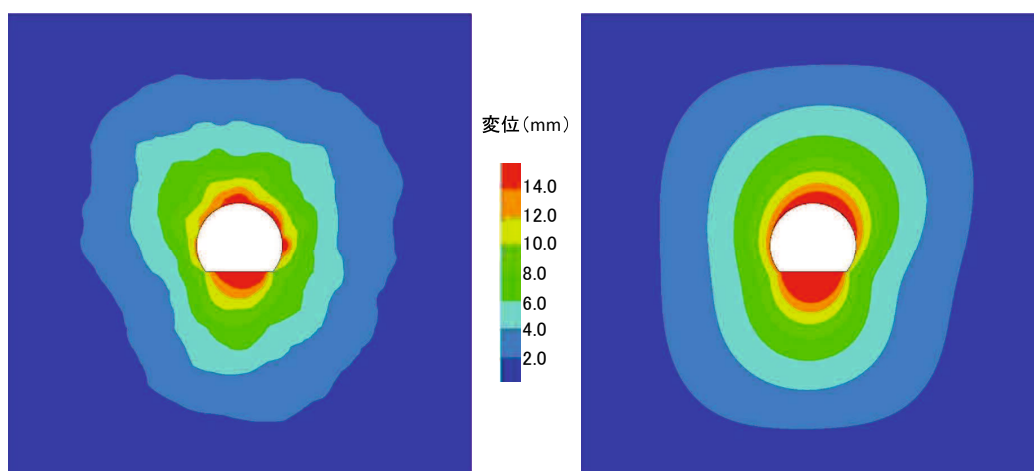


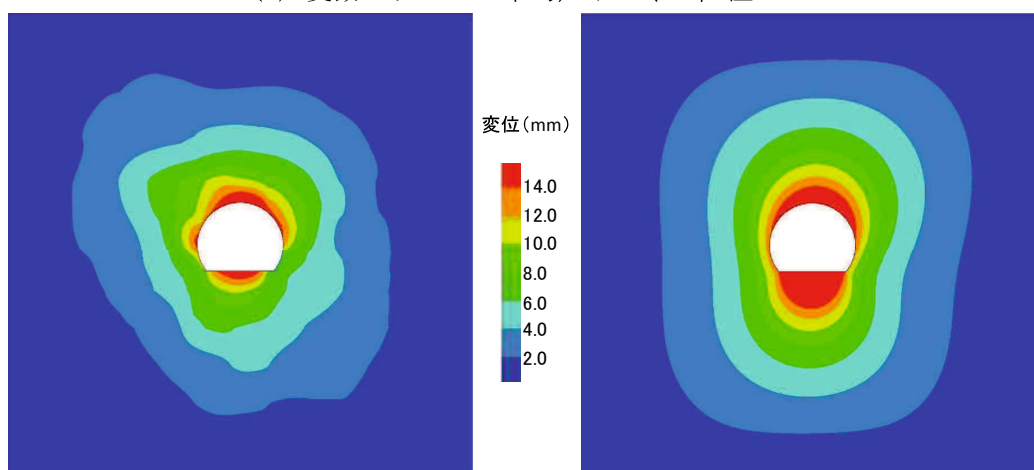
図3-21 等方応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

図3-21 等方応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (2/2)

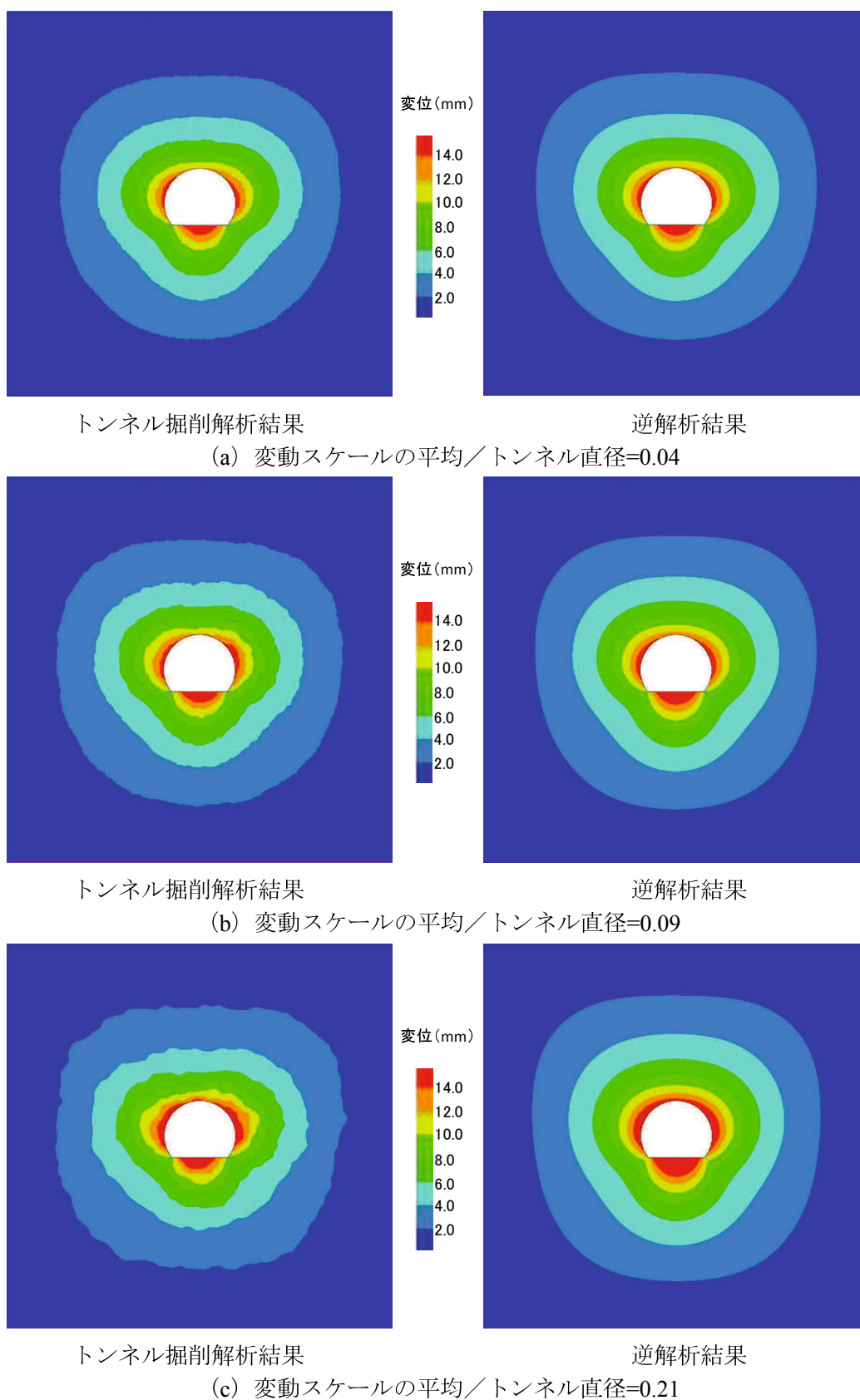
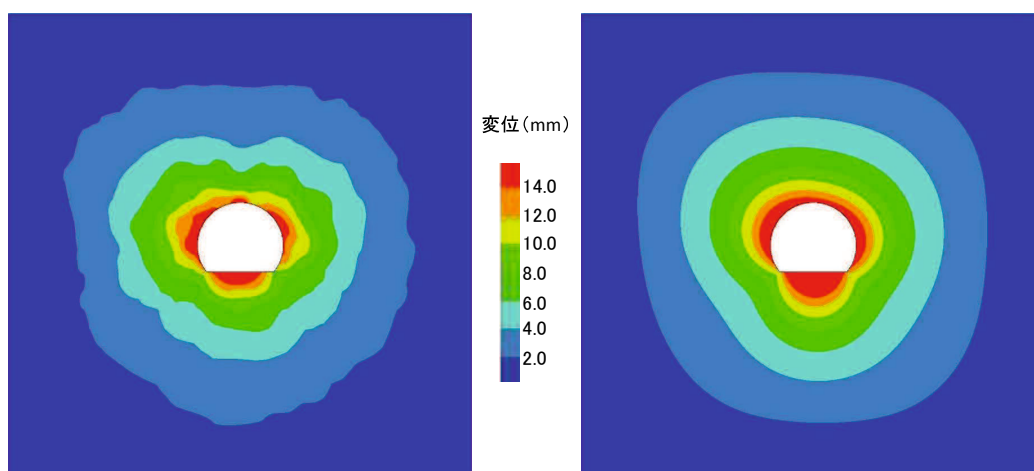


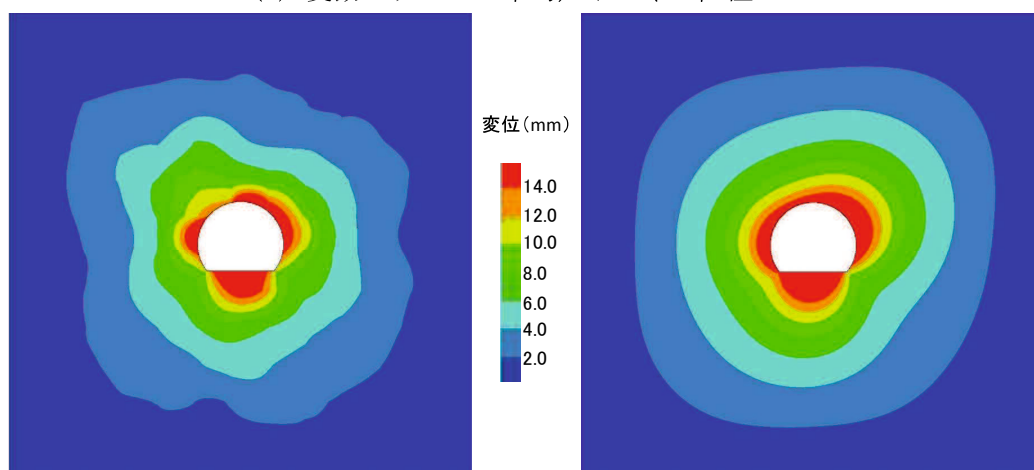
図3-22 側圧卓越初期応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

図3-22 側圧卓越初期応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (2/2)

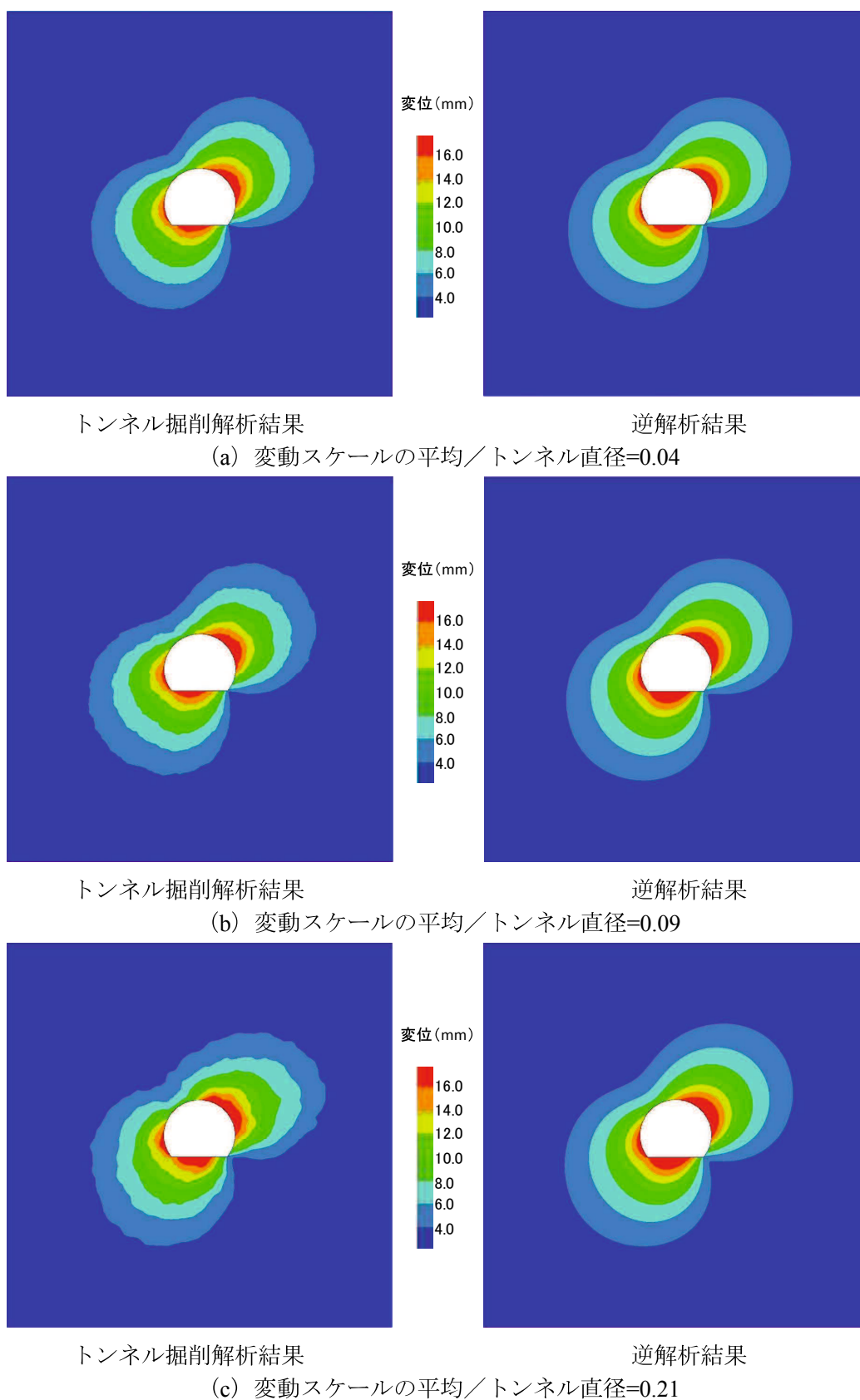
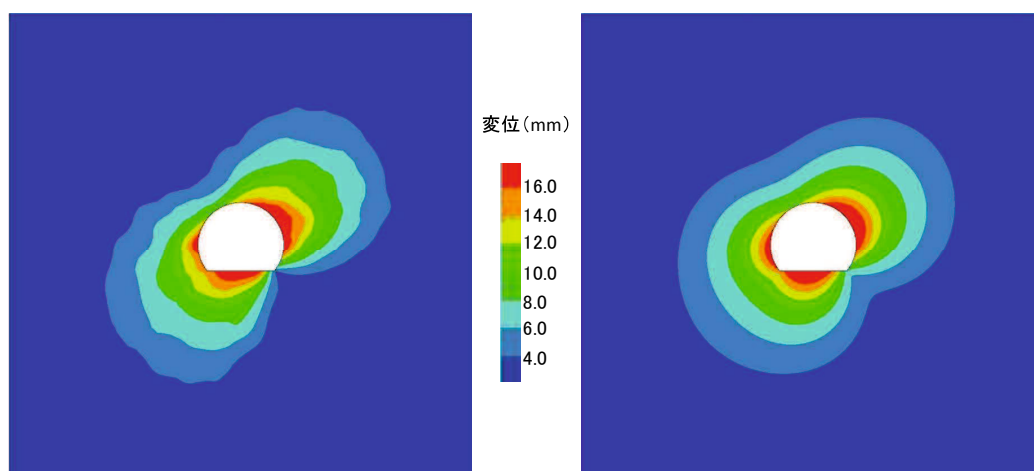


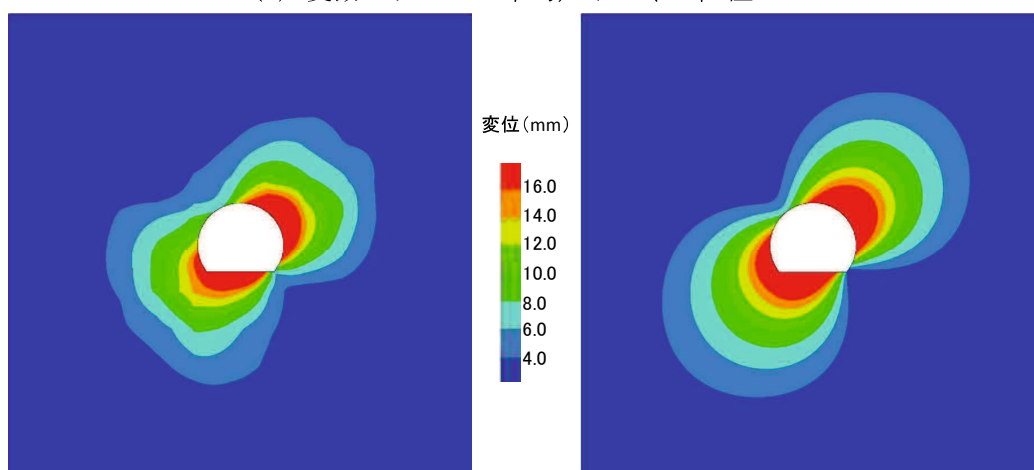
図3-23 非対称初期応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43

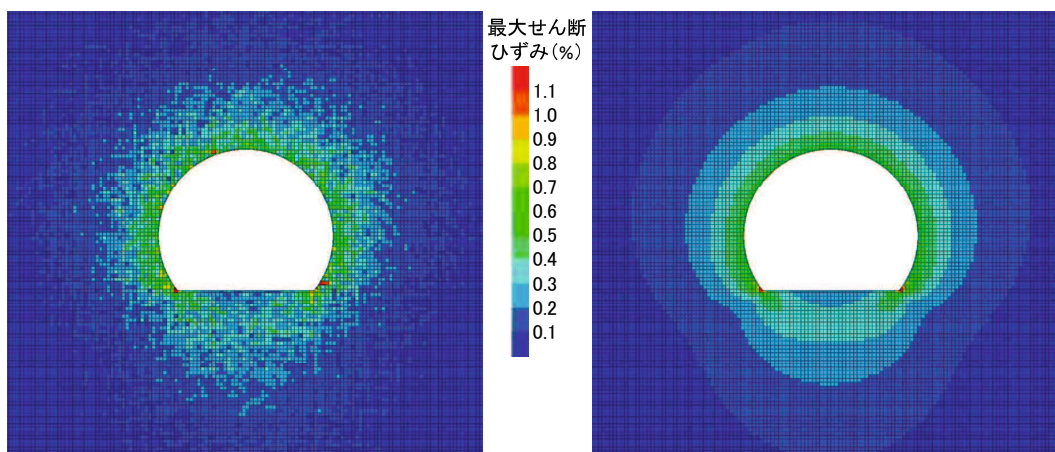


トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

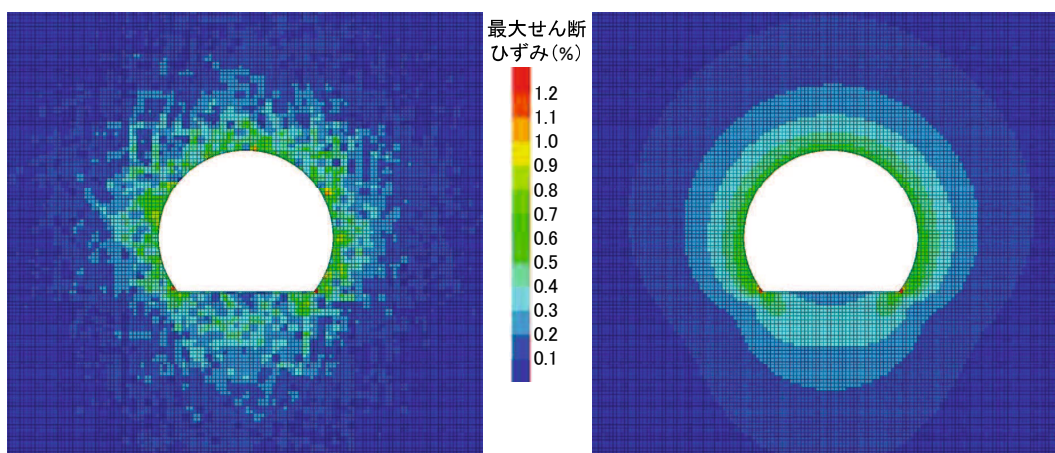
図3-23 非対称初期応力時におけるトンネル周辺の変位コンター図の比較 (2/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

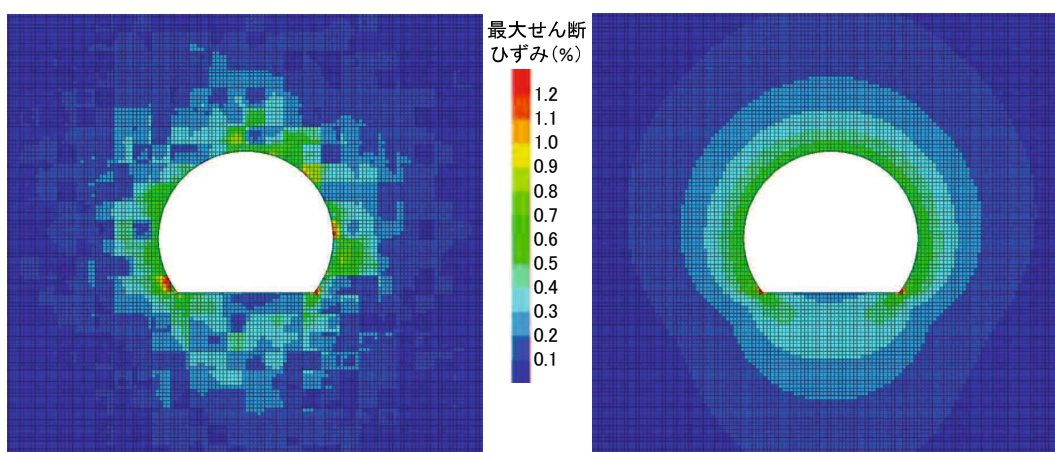
(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09

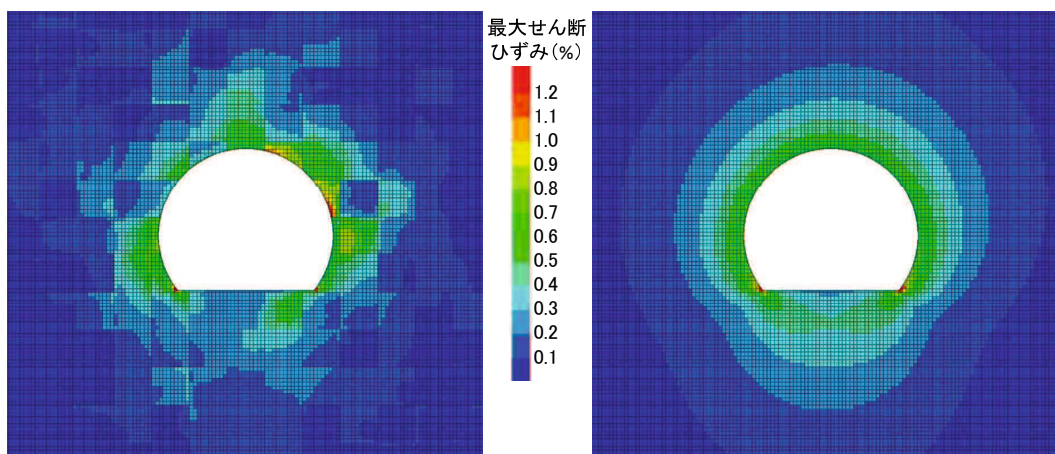


トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21

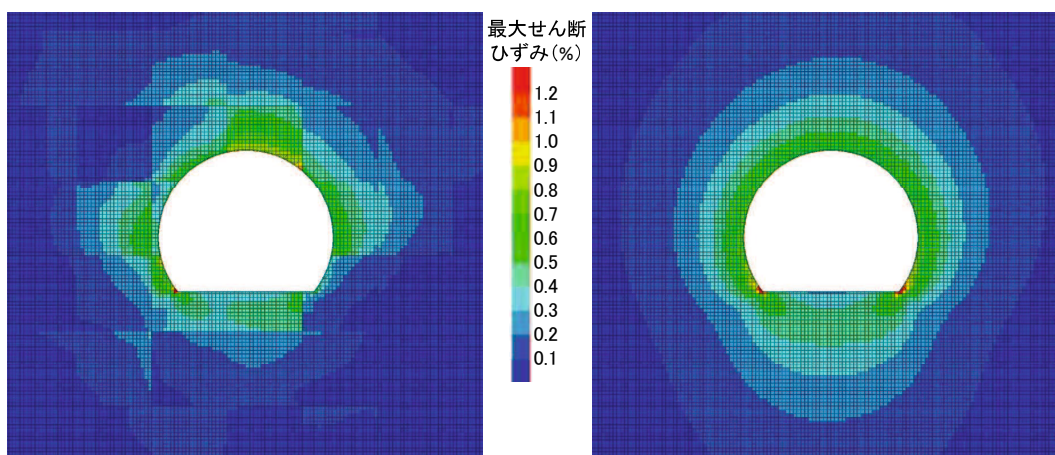
図3-24 等方応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43

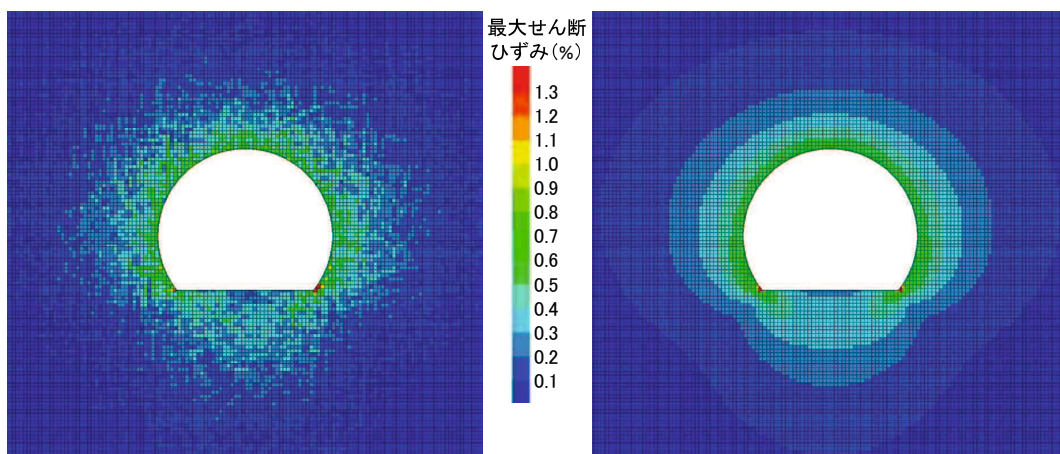


トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

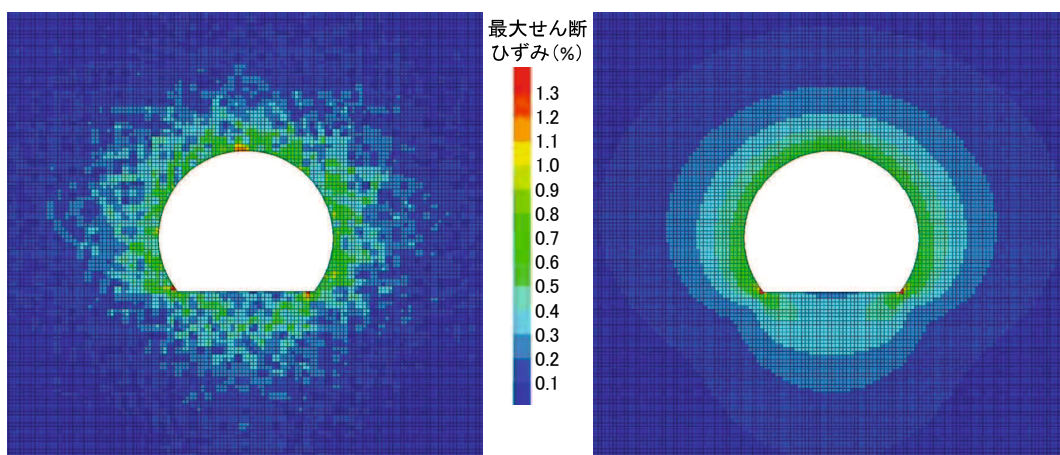
図3-24 等方応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (2/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

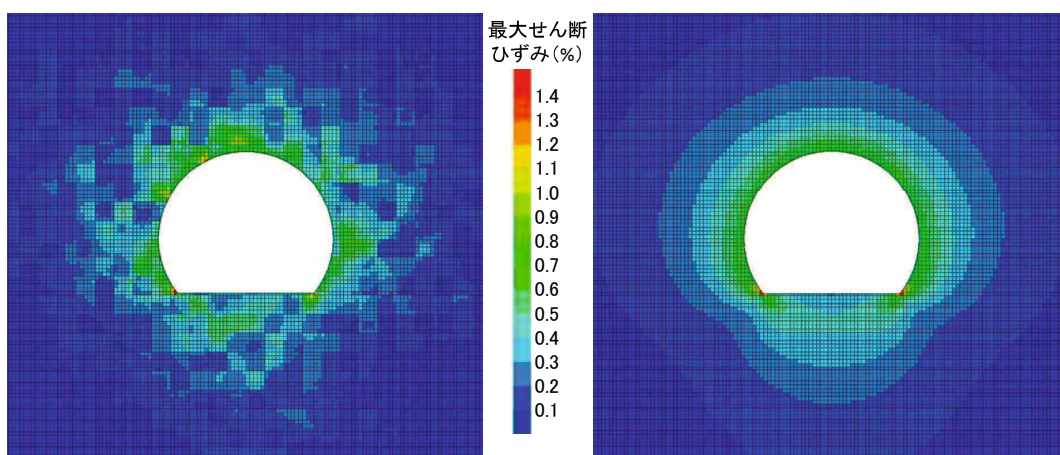
(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09

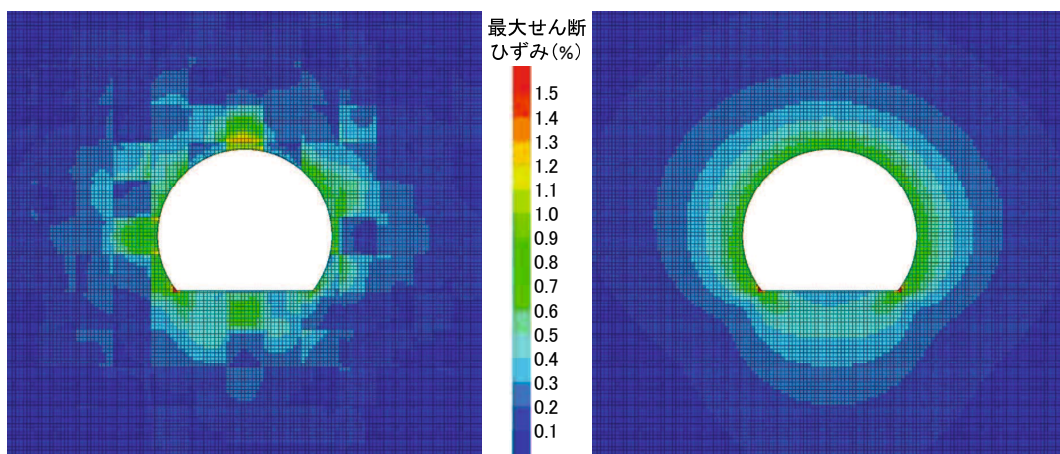


トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21

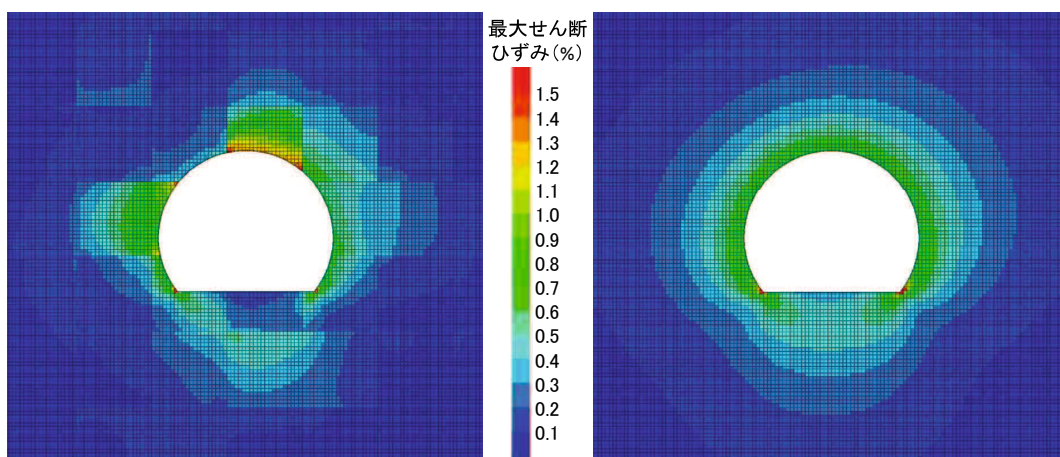
図3-25 側圧卓越初期応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果

逆解析結果

(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43

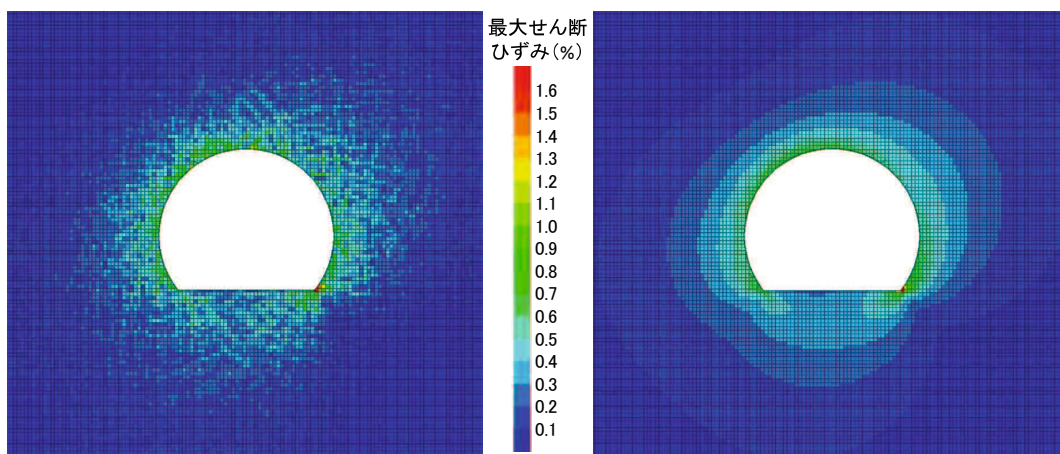


トンネル掘削解析結果

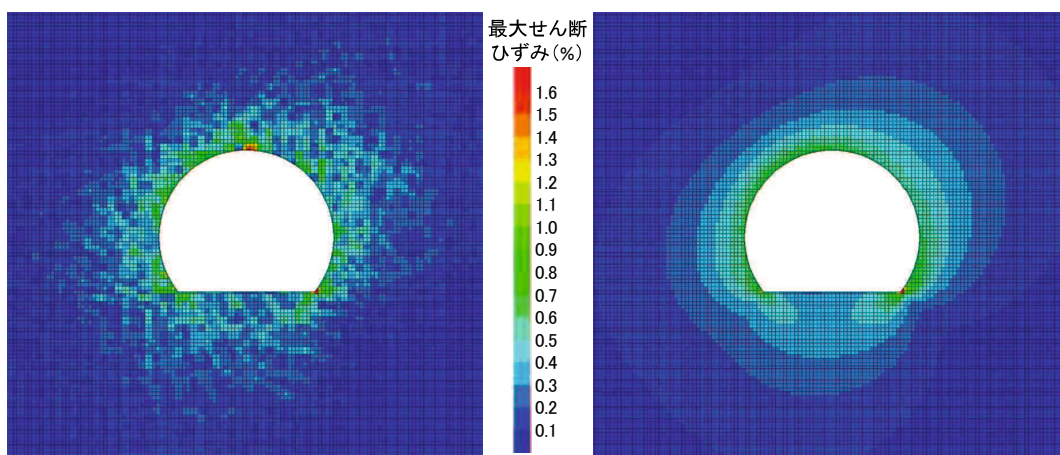
逆解析結果

(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

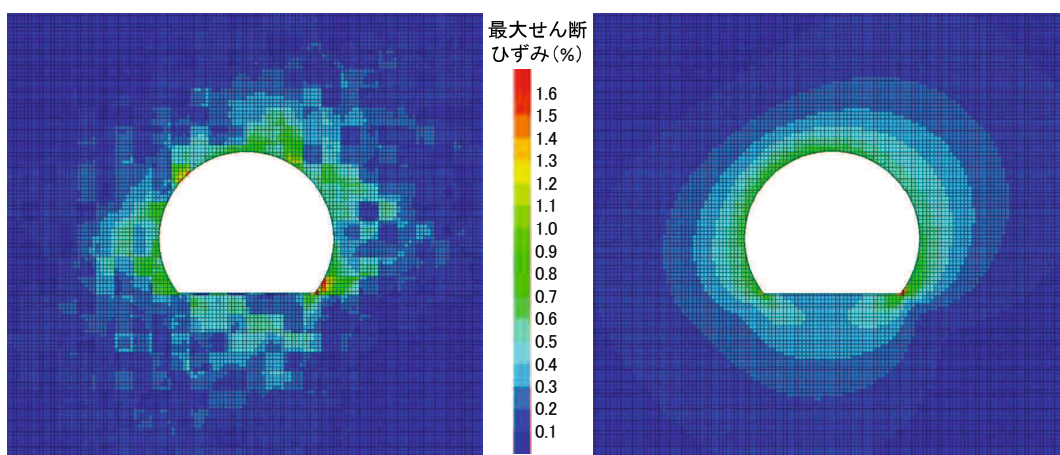
図3-25 側圧卓越初期応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果
逆解析結果
(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04

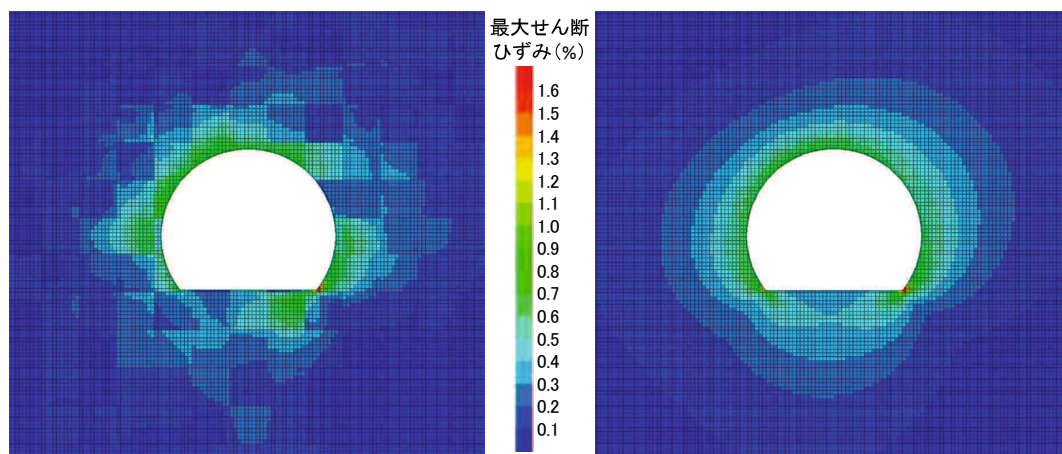


トンネル掘削解析結果
逆解析結果
(b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09

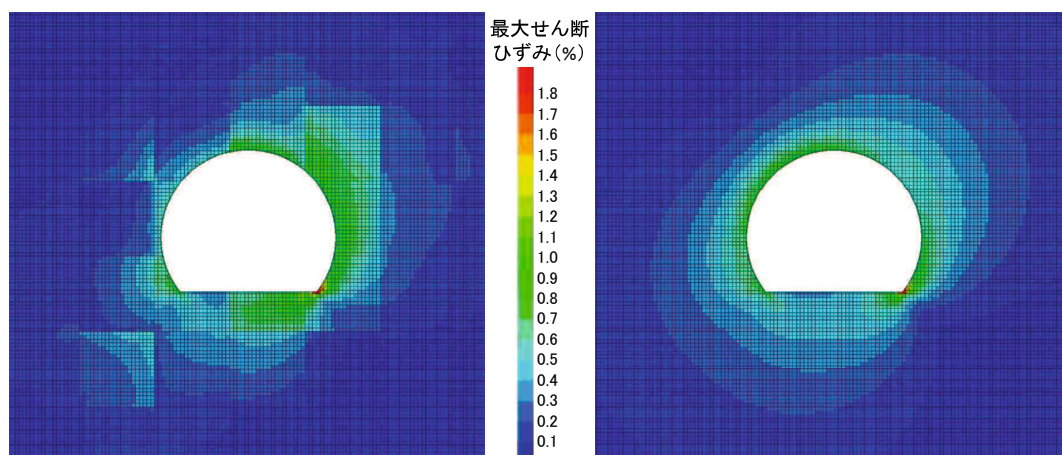


トンネル掘削解析結果
逆解析結果
(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21

図3-26 非対称初期応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (1/2)



トンネル掘削解析結果
逆解析結果
(d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43



トンネル掘削解析結果
逆解析結果
(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

図3-26 非対称初期応力時におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布図の比較 (2/2)

対称性がトンネル掘削解析結果では大きく損なわれていることがわかる。以上の比較結果から、不均質な地山を均質と仮定できる地山条件は、変動スケールの平均／トンネル直径が0.09以下または0.21以下であることが推察できる。

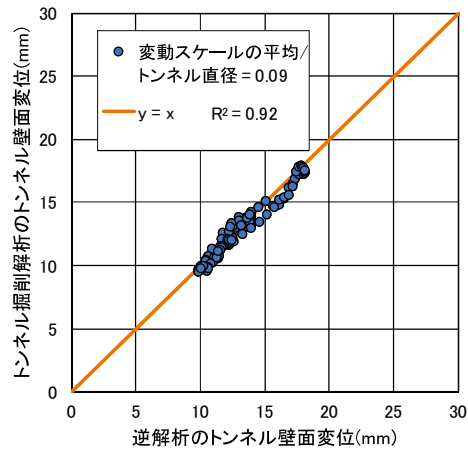
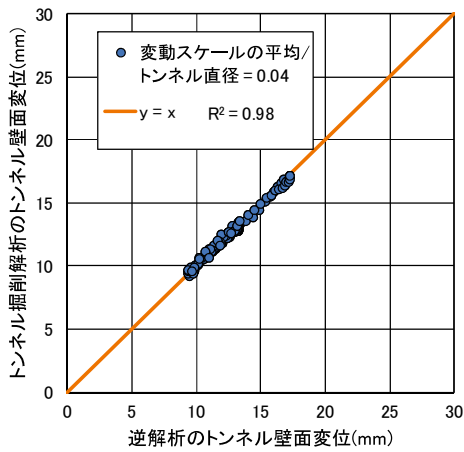
続いて、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件（変動スケールの平均／トンネル直径の条件）をより定量的に示すために、トンネル掘削解析と逆解析における同位置のトンネル壁面変位を比較する。そして、両者の一致度合いを決定係数 R^2 により定量的に評価することで、不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について検討する。ここで、トンネル壁面変位に着目して不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について検討するのは、図3-21～図3-23 (a) (b)からわかるように、不均質な地山と均質な地山のトンネル壁面変位が非常に良く一致すれば、地山の全体的な挙動も非常に良く一致することになり、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトン

ネル周辺地山の挙動に及ぼす影響が少ないと考えられるためである。トンネル掘削解析と逆解析における同位置のトンネル壁面変位の比較結果を図3-27、図3-28、図3-29に示す。各図に示すトンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位は、図3-21、図3-22、図3-23に示したケースにおけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位である。また、各図には、以下の式(3-4)より求めた $y=x$ に対する決定係数 R^2 を示している。

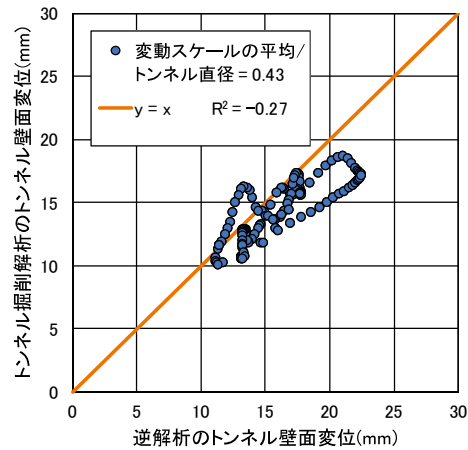
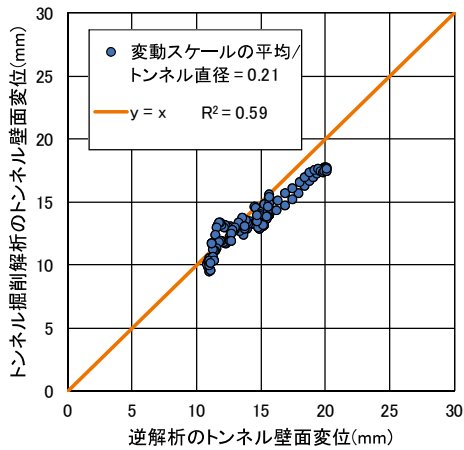
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\because \hat{y}_i = x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i) \quad (3-4)$$

ここで、 n ：トンネル壁面における節点の合計数、 y_i ：トンネル掘削解析の各節点におけるトンネル壁面変位、 x_i ：逆解析の各節点におけるトンネル壁面変位である。一般的に、決定係数 R^2 は、2変数のデータ群を直線($y=ax+b$)で回帰した際に、説明変数 x で従属変数 y をどれくらい説明できるのかを表した指標であるが、本研究では、トンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位がどの程度一致するかを定量的に示すために、 $y=x$ に対する決定係数 R^2 を算出している。そのため、通常の決定係数とは異なることに注意されたい。また、この決定係数 R^2 は、1に近づくほど回帰式（本研究では、 x_i ）と実際のデータ（本研究では、 y_i ）の一致度合いが高いことを表した指標であり、一般にその値が0.8以上であれば、非常に良い一致度合いであると考えられている。

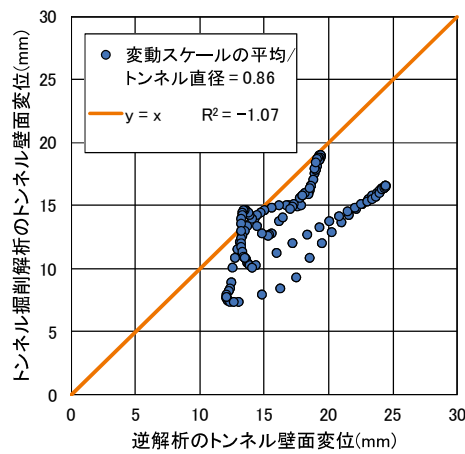
図3-27、図3-28、図3-29から、変動スケールの平均／トンネル直径が0.09以下であれば、どのような初期応力条件（表3-3参照）であったとしても、決定係数 R^2 が0.8以上となることがわかる。すなわち、変動スケールの平均／トンネル直径が0.09以下であれば、不均質な地山と均質な地山のトンネル壁面変位が非常に良く一致し、不均質地山を大域的には均質と仮定できると考えられる。逆に、 $0.09 < \text{変動スケールの平均} / \text{トンネル直径} \leq 0.86$ の場合、初期応力条件（表3-3参照）によっては、決定係数 R^2 が0.8より大きく下回るケースがあることがわかる。すなわち、 $0.09 < \text{変動スケールの平均} / \text{トンネル直径} \leq 0.86$ の場合、不均質な地山と均質な地山のトンネル壁面変位が整合せず、不均質な地山を均質と仮定することが難しいことがわかる。以上から、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなることがわかった。



(a) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.04 (b) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.09

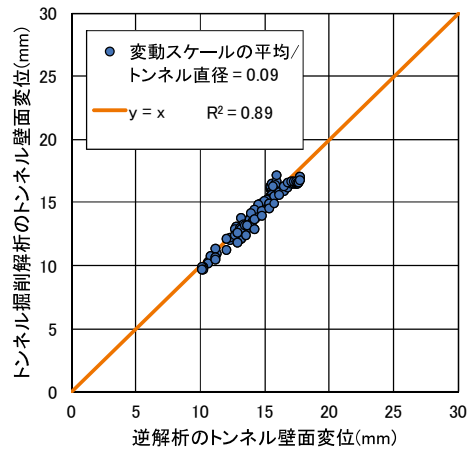
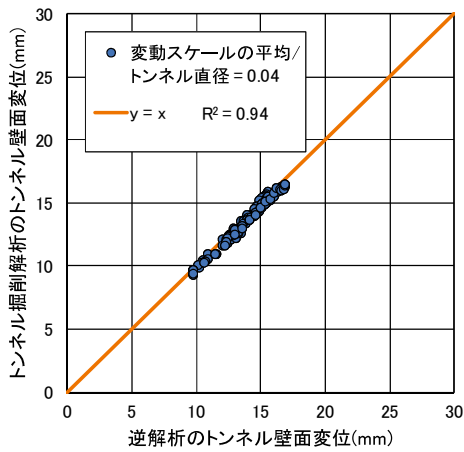


(c) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.21 (d) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.43

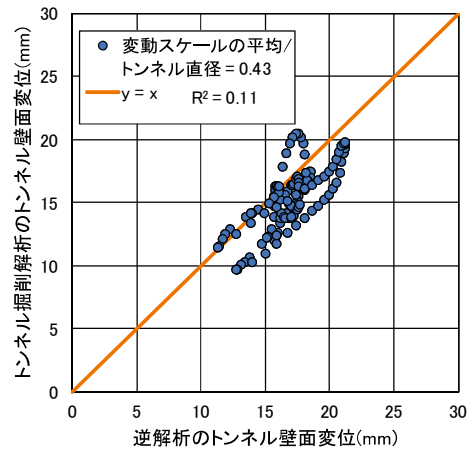
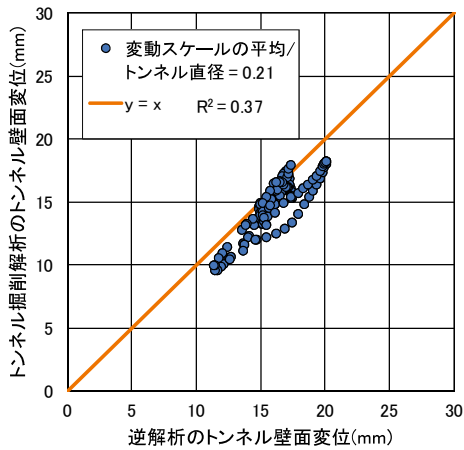


(e) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.86

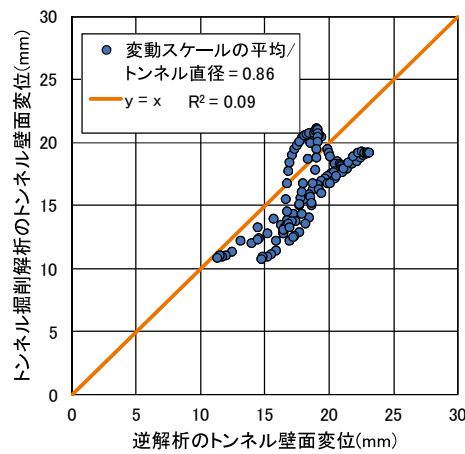
図 3-23 等方応力時におけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位の比較



(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.04 (b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09

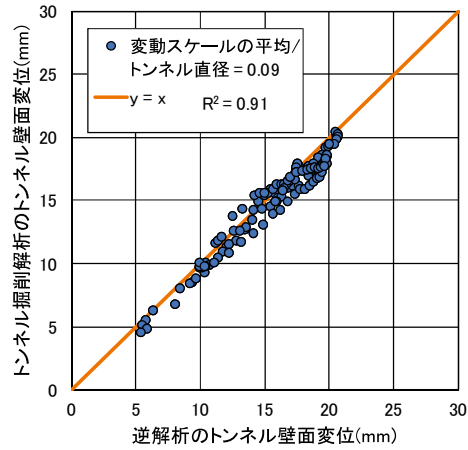
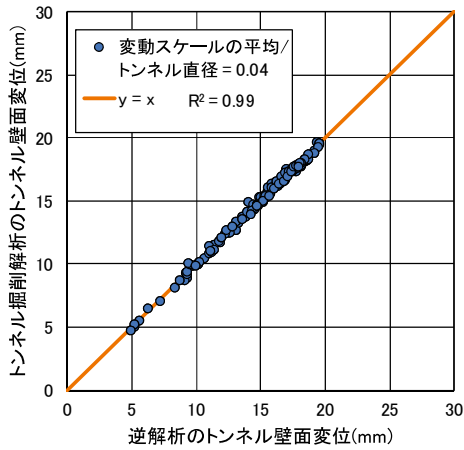


(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.21 (d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.43

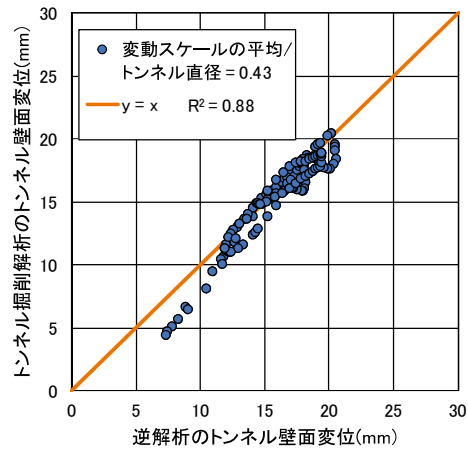
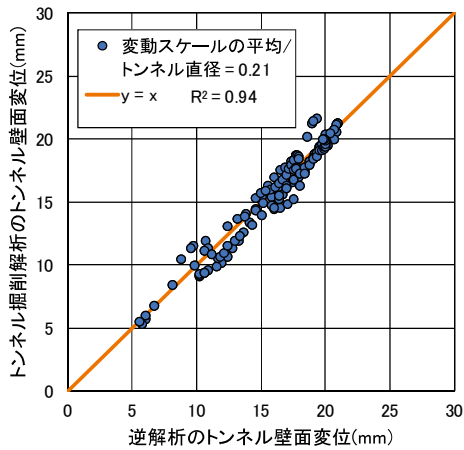


(e) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.86

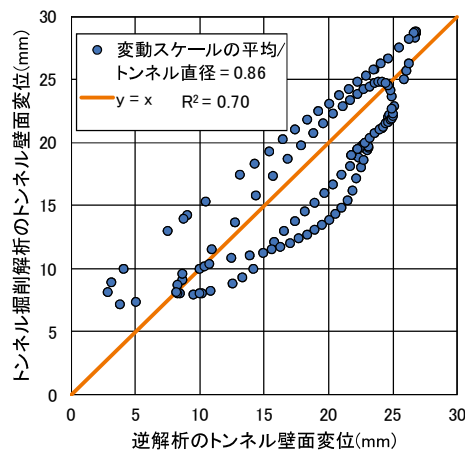
図 3-24 側圧卓越初期応力時におけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位の比較



(a) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.04 (b) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.09



(c) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.21 (d) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.43



(e) 変動スケールの平均 / トンネル直径=0.86

図 3-25 非対称初期応力時におけるトンネル掘削解析と逆解析のトンネル壁面変位の比較

3. 5. 結論

本章では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られた地中変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行った。この地中変位に着目した逆解析により得られる解析結果（例えば、ヤング係数など）は、トンネル掘削時における地山物性の不均質状態を平均的な地山として評価した結果といえる。そして、本章では、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる地山条件について検討した。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなると、トンネル周辺変位に及ぼす影響が大きくなり、逆解析から得られるヤング係数のばらつきが大きくなることがわかった。一方で、変動スケールの平均／トンネル直径が小さくなるほど、ヤング係数のばらつきが小さくなり、同じ変動スケールの平均／トンネル直径のケース同士の均質さが増すことがわかった。
- 2) 変動スケールの平均／トンネル直径が 0.09 以下であれば、不均質な地山と均質な地山のトンネル壁面変位が非常に良く一致し、不均質地山を大域的には均質と仮定できることがわかった。
- 3) $0.09 < \text{変動スケールの平均} / \text{トンネル直径} \leq 0.86$ の場合、不均質な地山と均質な地山のトンネル壁面変位が整合せず、不均質な地山を均質と仮定することが難しいことがわかった。
- 4) 以上から、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなることがわかった。

参考文献

- 1) 日本材料学会編：岩の力学 基礎から応用まで，丸善，p.505-510，1993.
- 2) 川本朧万：岩盤工学を巡る諸問題，資源と素材，Vol.106，No.14，pp.835-841，1990.
- 3) 吉田秀典，高森大資，和田光真：非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究，応用力学論文集，Vol.6，pp.387-396，2003.
- 4) 例えば，熊坂博夫：地山の不均質性の分布スケールがトンネル周辺の応力状態に及ぼす影響について，土木学会第60回年次学術講演会概要集，3-239，pp.477-478，2005.
- 5) Cundall, P.A. and Board, M. : A microcomputer program for modeling large-strain plasticity programs, Proc. the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, pp.2101-2108, 1988.
- 6) 土木学会：トンネル・ライブラリー16号 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，丸善，pp.131-139，2006.
- 7) 日比野敏：技術者に必要な岩盤の知識，鹿島出版会，pp.72-76，2007.
- 8) 桜井春輔，土居康成：有限要素法による斜面の信頼性解析，土木学会論文集，No.330，pp.87-97，1983.
- 9) 久武勝保，村上敏夫：地盤の連続体・不連続体挙動の一解析手法，土木学会論文集，No.523/III-32，pp.175-180，1995.
- 10) アイダン・オメール，赤木和之，伊藤孝，川本朧万：スクィーズイング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について，土木学会論文集，No.448/III-19，pp.73-82，1992.
- 11) 伊藤洋，北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法（その1）—地盤物性のバラツキの実態とその表示法—，電力中央研究所研究報告，384025，1985.
- 12) 伊藤洋，北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法（その2）—物性のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響—，電力中央研究所研究報告，384026，1985.
- 13) 大久保誠介，福井勝則，羽柴公博，新孝一：岩石の強度とクリープ寿命の分布特性に関する一考察，資源と素材，Vol.119，pp.734-740，2003.
- 14) 松尾稔：地盤工学 信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，pp.55-107，1984.
- 15) Nie, X., Huang, H., Liu, Z. and Lacasse, S. : Scale of fluctuation for geotechnical probabilistic analysis, Proc. the 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (5th ISGSR), Rotterdam, 2015.
- 16) 日本道路公団試験所：日本道路公団試験所技術資料第350号，トンネルの標準設計に関する研究報告書，p.18，1986.
- 17) 谷本親伯，畠昭治郎：切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本的概念，土木学会論文報告集，No.325，pp.93-106，1982.
- 18) 桜井春輔，武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文報告集，No.337，pp.137-145，1983.

- 19) 櫻井春輔, 進士正人: マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.37-46, 1985.
- 20) 大西有三, 東出明宏: 不均質岩盤の弾性定数と幾何学的特性の同定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.93-101, 1985.
- 21) 櫻井春輔, 芥川真一, 徳留修: ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析, 土木学会論文集, No.517/III-31, pp.197-202, 1995.
- 22) 武内邦文, 志村友行, 芥川真一, 櫻井春輔: 岩盤の非均質性を考慮した逆解析手法の開発とその適用性, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.241-252, 2000.
- 23) 西松裕一: 岩盤力学, 東京大学出版会, pp.12-13, 1999.

第4章

地山物性の不均質性がトンネル支保工応力 に及ぼす影響に関する検討

4. 1. はじめに

トンネルなどの地下構造物の建設を行う場合、数値解析によるトンネル掘削解析を用いてトンネル周辺の地山の変形挙動と応力状態を予測し、その解析結果を基にトンネルの設計（周辺地山の安定性評価と支保量の設計）を行う場合がある。特に、連続体の範疇で解析しうる地山を対象とした事前設計段階における数値解析では、鉛直初期応力を土被り高さから想定し、周辺地域での同様なトンネル施工時の変位発生状況から水平初期応力を想定した上で、地山を地層ごとに均質と仮定したトンネル掘削解析を実施するのが一般的である。しかしながら、本来の地山はたとえ同一地層内であっても地山物性の不均質性を有しているため、そのような数値解析で実際の地山の変形挙動や支保工に作用する応力分布を事前に予測することは極めて困難である。実際に、連続体の範疇で解析しうる地山として取り扱うことが多い軟岩地山内に施工された幌延深地層研究計画における350m調査坑道（図4-1参照）で取得された支保工応力計測結果は、計測箇所の一部において局所的に設計で想定している限界値を超える結果が得られている。

そこで、本章では、まず幌延深地層研究計画で得られた現場試験データを用いて第3章と同様な方法によって同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロシミュレーションを実施し、実際に得られている350m調査坑道の支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討する。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。

本章において、幌延深地層研究計画の現場計測結果に着目したのは、坑道建設前に多数の高品質な地盤調査が実施され、同地点の地山物性値や初期応力分布が精度よく測定されているからである。以下、本章では“坑道”と“トンネル”を同義とする。

4. 2. 現場概要

幌延深地層研究センターでは、堆積岩を対象として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の信頼性向上のための調査研究を段階的に進めている。現在、調査研究は、地上からの調査研究段階（第1段階）および坑道掘削時の調査研究段階（第2段階）を終了しており、地下施設での調査研究段階（第3段階）に移行している¹⁾。このうち、第2段階では、地下施設の実施設計²⁾と計測計画および情報化施工プログラム^{3),4)}にもとづき、坑道（立坑および調査坑道）の掘削が実施され、坑道掘削に伴う坑道の変形や支保工に発生する応力の計測などが行われた。

幌延深地層研究計画の第2段階で施工された350m調査坑道（図4-1参照）付近の地質は、珪質泥岩から成る稚内層であり、その上位層には珪藻質泥岩から成る声間層が存在している（図4-2参照）。ここで、図4-2中のヘアークラック（Hr）は、岩盤中の潜在的な割れ目を指す。各層におけるボーリングコアでの一軸圧縮強さはそれぞれ8.9～34.9MPa、1.44～9.80MPaであり、いわゆる軟岩に位置づけられる⁵⁾。350m調査坑道の施工は全断面工法を用いたNATMで実施されており、掘削は自由断面掘削機または大型ブレイカによる機械掘削方式であった。掘進長は1.0mを基本とし、掘進長1.2mおよび1.5mでの掘削も一部実施された。

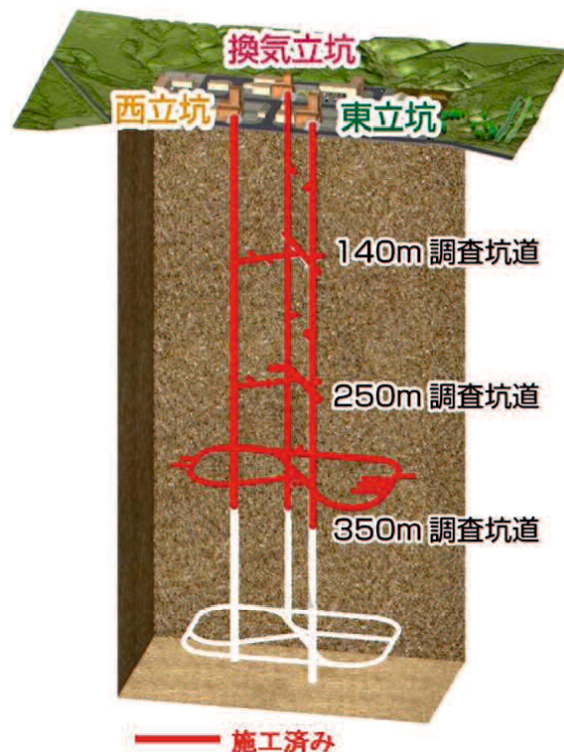


図4-1 地下調査坑道配置図（一部抜粋）¹⁾

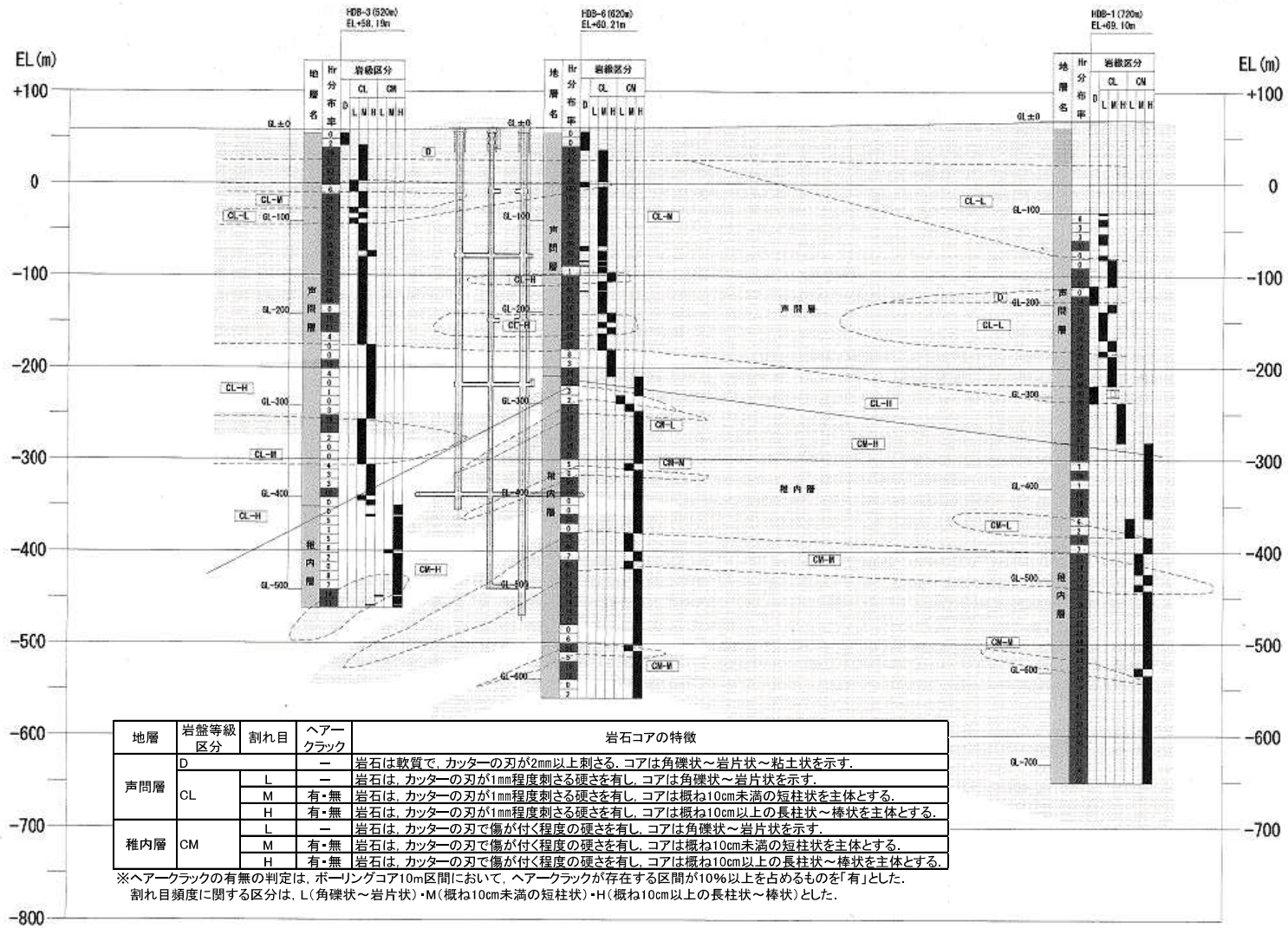


図 4-2 地下坑道周辺の地質断面図およびボーリングコアでの岩盤等級区分 (一部加筆修正) 4)

350m調査坑道の平面図を図4-3に示す。NATMでは、施工に合わせて現場計測を行い、計測結果に基づいて設計を見直す情報化施工を実施するのが一般的である。現場計測には、一定の間隔で坑内変位（内空変位，天端沈下）を計測する“A計測”と，代表的な断面を選定して地中変位や支保工応力などを計測する“B計測”がある。図4-3中には，350m調査坑道の交差部を除く一般部において，支保工の応力計測（以降，“B計測”と呼ぶこととする）が実施された平面位置も合わせて示す。また，図4-4にB計測実施位置における採用支保パターンを示す。図4-4の支保パターンにおいてロックボルトの本数が少ないのは，ロックボルトの施工による水みちの増加を配慮して，ロックボルトの打設本数を減らした支保パターンを採用したためである。

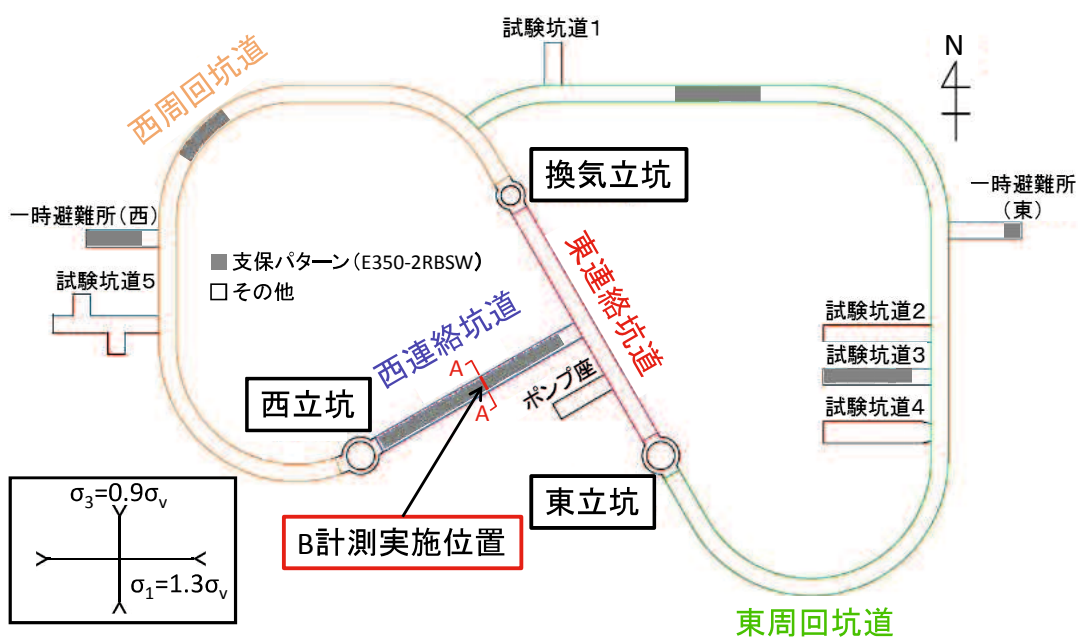


図4-3 350m調査坑道平面図（一部加筆修正）¹⁾

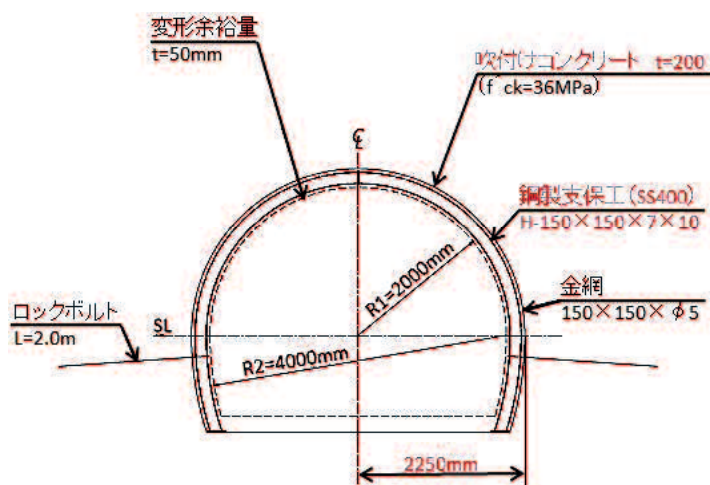


図4-4 B計測実施位置（A-A断面）の支保パターン図（一部加筆修正）⁶⁾

4. 3. 350m調査坑道におけるB計測結果とその考察

本節では、調査坑道を設計するにあたり定義された支保部材の限界状態と、**図4-3**のB計測実施位置で計測された吹付けコンクリート応力および鋼製支保工縁応力の比較およびその結果の考察を行う。B計測は350m調査坑道において全5箇所で行われたが、本章では調査坑道の交差がトンネル支保工応力に与える影響ではなく、実際に得られている350m調査坑道の支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討することが主題である。そのため、調査坑道が交差することによる影響が少ないと考えられる**図4-3**のB計測実施位置のB計測結果（特に、吹付けコンクリート応力、鋼製支保工縁応力）に着目することとした。

4. 3. 1. B計測

350m調査坑道において実施されたB計測結果は、幌延深地層研究計画平成25年度地下施設計測データ集で報告されている⁷⁾。本章では、そのB計測結果の中から、特に吹付けコンクリート応力と鋼製支保工縁応力に着目する。そして、本項ではそれらのB計測方法や計測機器の設置位置について記述する。

a) B計測方法と計測機器⁷⁾

吹付けコンクリート応力については、吹付けコンクリート打設後にコンクリート有効応力計（**写真4-1**参照）を設置し、1時間ごとの自動計測を行った。

鋼製支保工応力については、ひずみゲージを設置した鋼製支保工を建て込み、鋼製支保工応力計（**写真4-2**参照）により1時間ごとの自動計測を行った。鋼製支保工応力計は、鋼製支保工に発生するひずみ量から、鋼製支保工に発生している軸力、曲げ、せん断力の3成分を計測するものである。また、鋼製支保工縁応力（外縁応力および内縁応力）は、軸力および曲げの計測結果と鋼製支保工（SS400）の断面積と断面係数から算出した。



写真4-1 吹付けコンクリート応力計（GK-20N-202，東横エルメス）⁷⁾

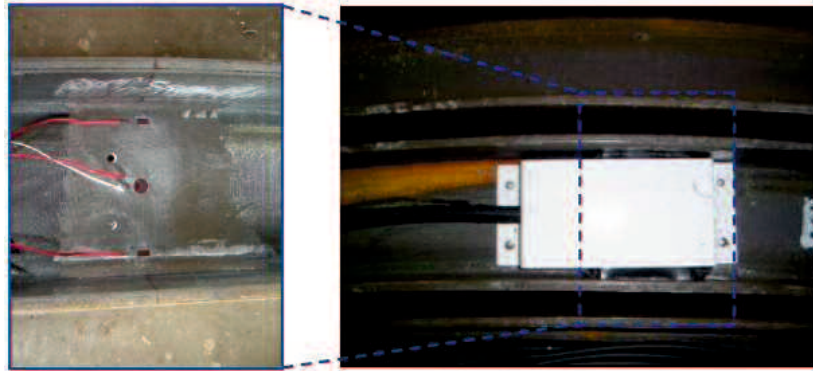
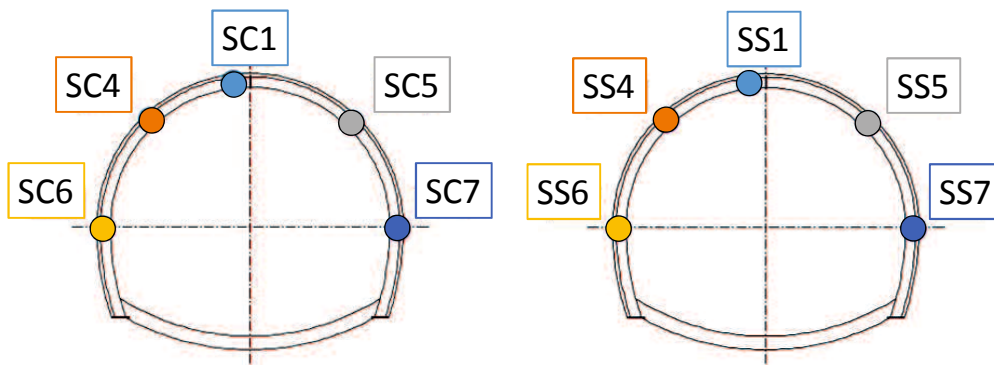


写真4-2 鋼製支保工応力計（KFG-5-350-C1, D16-11, 共和電業）⁸⁾

b) 計測断面の位置と計測機器の設置位置

計測断面の位置は図 4-3 中に示した B 計測実施位置であり，支保パターンは図 4-4 中に示した支保パターンである．その B 計測実施位置における各計測機器の設置位置は，図 4-5 に示すような 5 箇所である．各計測機器の設置位置の名称は，図 4-5 に示す名称とする．また，吹付けコンクリート応力計は吹付けコンクリート支保工表面から地山方向に約 140mm の位置に設置された（写真 4-3 参照）．



(a) 吹付けコンクリート応力計

(b) 鋼製支保工応力計

図 4-5 B 計測実施位置における計測機器の設置位置（一部加筆修正）⁷⁾



写真 4-3 吹付けコンクリート計の設置状況

4. 3. 2. 支保部材の限界状態

350m調査坑道の支保設計では、**図4-4**の支保パターンに示すロックボルトを除く各支保部材に対して使用限界と終局限界が定義された（**表4-1**参照）。使用限界は坑道の使用性に関する照査に対応する限界値であり、最も内側に設置する支保部材（本設構造物）に対して設定された。ここで、使用限界を定義したのは、調査者や見学者の坑道の使用性を考慮するためである。また、終局限界は坑道の安全性に関する照査に対応する限界値であり、吹付けコンクリートによる二次支保工が設置されるまでの一次支保工の部材（仮設構造物）に対して設定された。そして、地山を均質と仮定した数値解析により支保工に発生する応力（吹付けコンクリート応力、鋼製支保工縁応力）が各限界状態以下になることを確認し、支保パターンが設計された。例えば、**図4-3**のB計測実施位置における支保パターンでは、吹付けコンクリートによる二次支保工は採用されていないため、支保部材の健全性評価には本設構造物に対する限界値である使用限界のみが用いられた。

以下に、**表4-1**のように各限界状態を定義した際の判断要因を記述する。吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の終局限界は、設計当時のコンクリート標準示方書〔設計編〕⁸⁾とNATM設計施工指針⁹⁾を参考にして定められた。また、吹付けコンクリートの使用限界は、コンクリートの圧縮応力度の制限値である設計基準強度の40%と設定された¹⁰⁾。一方、鋼製支保工の使用限界は、コンクリート標準示方書〔設計編〕において鉄筋の圧縮応力度の制限値が定められていないことから、実施設計²⁾時の値を参考に鋼製支保工の規格の破断応力度の40%と設定された。実際の支保設計時においては、鋼製支保工の引張の限界状態が設定されたが、鋼製支保工に発生する断面力は、基本的に圧縮軸力が卓越し、曲げの影響によって局部的に発生する引張応力は大きくないと考えられる。そのため、本章では、鋼製支保工の引張の各限界状態の記述を省略する。

表4-1 支保部材の限界状態の設定

支保部材	規格・仕様	使用限界		終局限界	
		圧縮 (MPa)	計算式	圧縮 (MPa)	計算式
吹付け コンクリート	設計基準 強度 $f'_{ck} =$ 36MPa	14.4	$0.4f'_{ck}$	19.5	$\frac{k_1 \cdot f'_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i}$
鋼製支保工	H-150 (SS400)	160	$0.4f_y$	202	$\frac{f'_y}{\gamma_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i}$

(注) 破断応力度 [SS400] $f_y = 400\text{MPa}$

降伏応力度 [SS400] $f'_y = 245\text{MPa}$

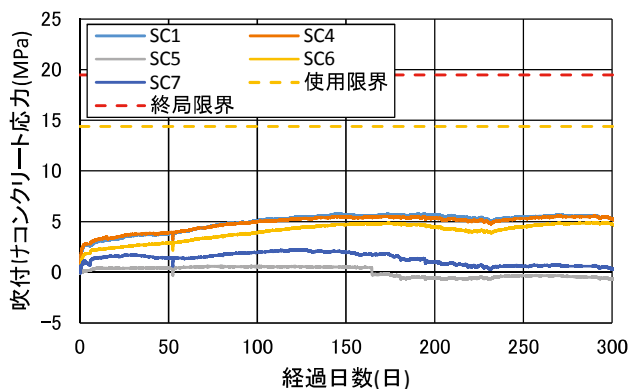
材料係数 [吹付けコンクリート] $\gamma_c = 1.3$, [鋼製支保工] $\gamma_s = 1.0$

部材係数 $\gamma_b = 1.1$, 構造物係数 $\gamma_i = 1.1$

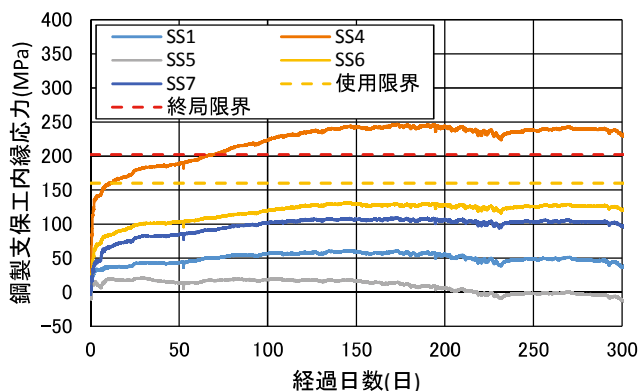
吹付けコンクリートの低減係数 $k_1 = 0.85$

4. 3. 3. B計測結果と限界状態の比較

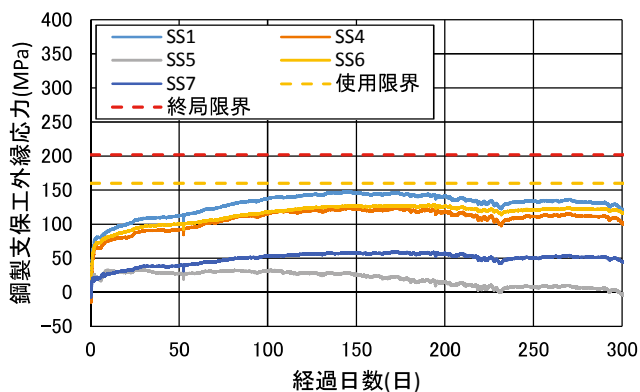
図4-3のB計測実施位置において計測された各B計測データと経過日数の関係⁷⁾を図4-6に示す。ここで、図4-6の各B計測データの配色は、図4-5の各計測機器の設置位置の配色と対応している。また、表4-1のように定義された各限界状態は、図4-6中にそれぞれ色違いの点線として示す。



(a) 吹付けコンクリート応力



(b) 鋼製支保工内縁応力



(c) 鋼製支保工外縁応力

図4-6 B計測結果の経日変化図と限界状態の比較

図4-6(a)から、吹付けコンクリートに発生したすべての応力は、設定した使用限界以下となっていることがわかる。ただし、この計測値と使用限界の比較では、B計測の各計測機器が吹付けコンクリート支保工表面から地山方向に約140mmの位置に設置されているため、吹付けコンクリート縁応力を計測できておらず、支保に作用する最大応力を計測できていないとは限らない。しかしながら、トンネル覆工では軸力が卓越していると考えられること、計測値と使用限界には大きな差があることから、吹付けコンクリート縁応力も使用限界以下に収まっていると推定される。また、図4-6(c)から、鋼製支保工に発生したすべての外縁応力も、設定した使用限界以下となっていることがわかる。一方、図4-6(b)に示すように、左肩部(図4-5(b)のSS4参照)の鋼製支保工内縁応力は使用限界を超過し、なおかつ終局限界をも超過している。このことから、支保設計時の数値解析において、支保工全体に作用する応力が使用限界以下になることを確認したにも関わらず、実施工では鋼製支保工縁応力が局所的に増加し使用限界を超過していることがわかる。

図4-6から、吹付けコンクリート応力値と鋼製支保工内縁応力値が坑道断面において左右対称となっておらず偏っていることがわかる。よって、鋼製支保工内縁応力が使用限界を超過した要因としては、偏圧や地山の不連続性または地山物性の不均質性の影響などが考えられる。しかし、当現場は施工前に極めて多くの地盤調査が実施され、地山内の初期応力分布までもが精度よく測定された状態で事前解析が実施されている。そのため、偏圧による影響の可能性は少ないと考えられる。また、当該地山は連続体の範疇で解析しうる地山として取り扱うことが多い軟岩地山であり、支保工応力を取得したB計測断面位置においては、図4-7に示す350m西連絡坑道(図4-3参照)における壁面観察結果から不連続面(割れ目)が少ないことがわかり、地山の不連続性が支保工応力に与える影響の可能性も少ないと考えられる。したがって、本章では、350m調査坑道で実際に得られている支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から評価することとし、同一地層内(本研究では、稚内層)における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施することとした。

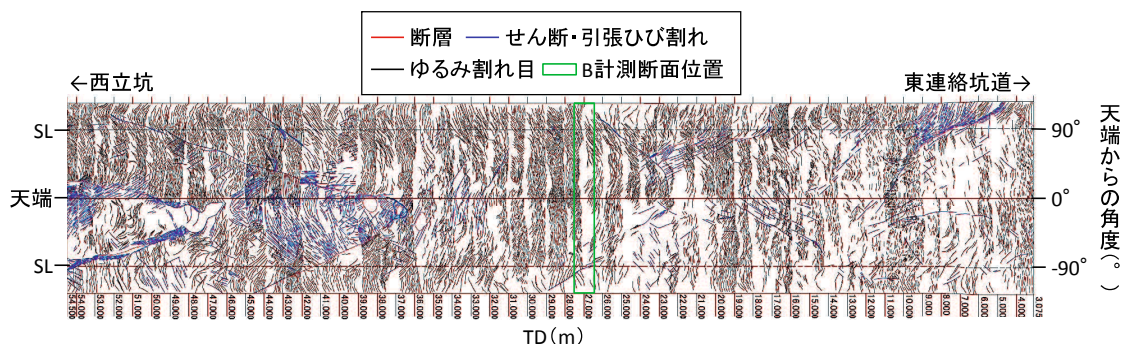


図 4-7 350m 西連絡坑道における壁面観察結果⁷⁾

4. 4. 対象地山の一軸圧縮強さの確率分布と解析で用いる地山物性値の設定

本節では、350m調査坑道付近の地質である稚内層の一軸圧縮強さのばらつきを整理し、次節に示す地山物性の不均質性を考慮した数値解析で用いる一軸圧縮強さの確率分布の設定を行う。また、350m調査坑道の実施設計における数値解析では、弾完全塑性解析（破壊規準：モールクーロンの破壊規準）を採用していた²⁾ことから、次節の解析でも同じ力学モデルを採用することとした。そこで、本節では、稚内層における一軸圧縮強さと弾完全塑性解析を実施するに当たり必要な地山物性値（ヤング係数、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角、引張強度）との関係を整理し、次節の解析で用いる地山物性値（以降、“解析用物性値”と呼ぶこととする）を設定する。

4. 4. 1. 一軸圧縮強さのばらつき

地上からの調査および350m調査坑道において取得したボーリングコアの一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さの試験結果^{11),12),13)}と地層境界との深度差の関係を図4-8に示す。なお、図中に示す「地層境界との深度差」とは、稚内層とその上位層である声問層の地層境界を0とし、上位層方向を正とした場合の距離で定義した。このような整理を実施したのは、周辺地山の地層が褶曲しており、同一深度においても地層が異なる場合があるからである。

換気立坑掘削前の先行ボーリング調査によって得られた岩石コアの観察結果から、地下施設周辺の声問層と稚内層の地層境界は深度236.5mであると判断された¹²⁾。このことから、350m調査坑道における地層境界との深度差は-113.5mと判断した（図4-7中の350m調査坑道）。そのため、一軸圧縮強さの頻度分布として整理する際には、地層境界との深度差-113.5mの周辺データ（図4-7中の採用物性値の範囲）を用いた。その整理した結果を図4-9に、それらの結果の平均や標準偏差などを表4-2に示す。図4-9中には、階級範囲（2MPa）、サンプル個数（102個）および表4-2中の一軸圧縮試験結果の平均と標準偏差から算出した正規分布曲

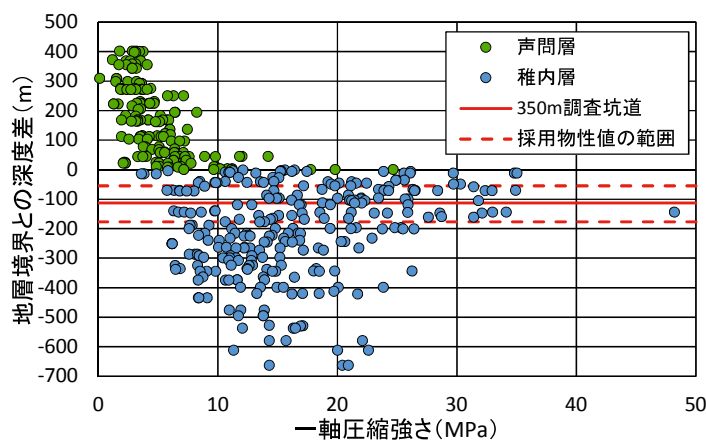


図4-8 地層境界との深度差と一軸圧縮強さの関係

線を示している。この図から、稚内層の一軸圧縮強さの頻度分布は、おおよそ正規分布曲線で近似できることがわかる。また、これらのデータを用いて、図4-10に示すようなKolmogorov-Smirnov検定¹⁴⁾を行った。その結果、一軸圧縮試験結果の累積度数と正規分布関数との差の最大値は図4-10に示すように0.07となった。この場合、サンプル数は102個であることから、有意水準5%の限界値は0.135である。両者の差の最大値0.07の方が限界値0.135より低いことから、適用した正規分布関数が有意水準5%で妥当であることが確認できた。

表4-2 一軸圧縮強試験結果の一軸圧縮強さの統計量

	一軸圧縮試験結果
平均(MPa)	19.6
不偏分散(MPa ²)	67.4
不偏標準偏差(MPa)	8.2
変動係数(%)	41.8

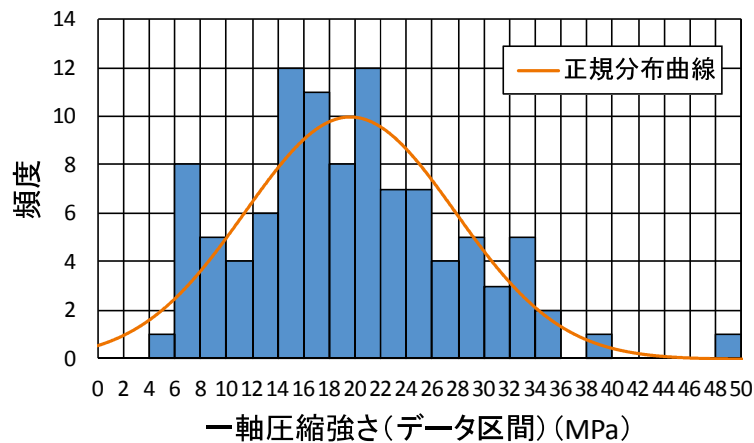


図4-9 一軸圧縮強さの頻度分布 (サンプル数 : 102個)

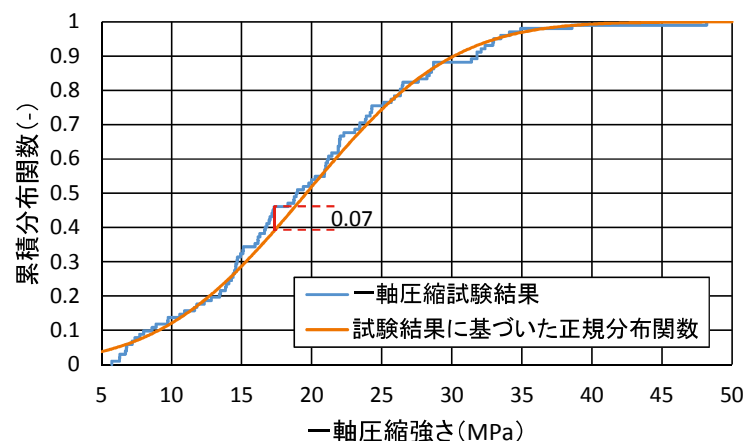


図4-10 一軸圧縮試験結果の累積度数 (サンプル数 : 102個) と正規分布関数

4. 4. 2. 解析上の一軸圧縮強さの確率分布の設定

図4-9の正規分布曲線のサンプル個数を100個とした正規分布曲線を図4-11内に示す。また、この正規分布曲線に合うように頻度総数を100として、図4-11に示すような一軸圧縮強さの頻度分布の設定を行った。ここで、図4-11における縦軸の頻度は、一軸圧縮強さの頻度分布の階級の間接値に対する頻度とする。また、表4-3に設定した一軸圧縮強さの頻度分布の平均や標準偏差などを示す。表4-2と表4-3から、一軸圧縮試験結果の統計量と設定した一軸圧縮強さの頻度分布の統計量がほぼ同等であることがわかる。また、図4-11の正規分布関数と設定した一軸圧縮強さの頻度分布の累積度数との差の最大値が図4-12に示すように0.08と有意水準5%の限界値より小さいことがわかる。したがって、設定した一軸圧縮強さの頻度分布でも正規分布曲線を十分近似できると考えられる。そこで、図4-11に示す階級の間接値である19個の一軸圧縮強さの頻度分布（離散型の近似的な正規分布）を解析上の一軸圧縮強さの確率分布として用いることとした。

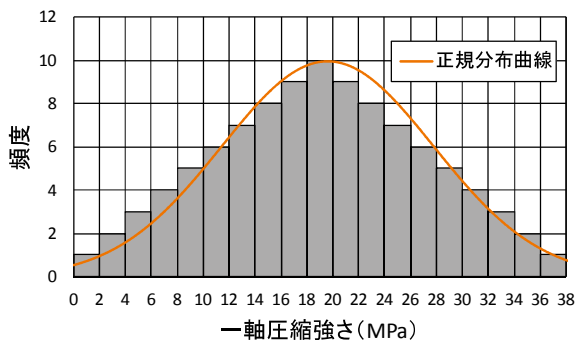


図4-11 一軸圧縮強さの頻度分布の設定

表4-3 設定した一軸圧縮強さの頻度分布の統計量

	解析用物性値
平均(MPa)	19.0
不偏分散(MPa ²)	66.0
不偏標準偏差(MPa)	8.1
変動係数(%)	42.8

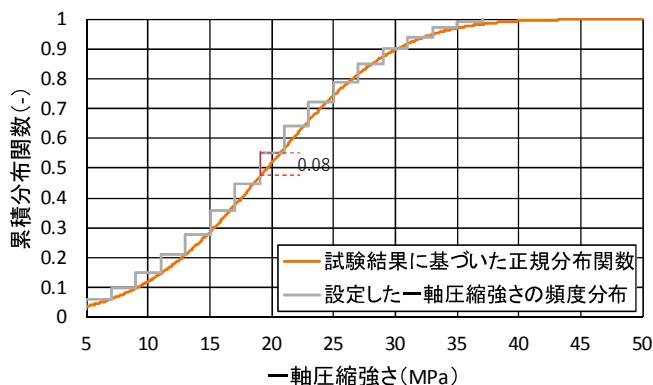


図4-12 正規分布関数と設定した一軸圧縮強さの頻度分布の累積度数

4. 4. 3. 強度特性と一軸圧縮強さとの関係

本項では、地下施設周辺の地上からの地質調査において取得したボーリングコアの三軸圧縮試験（CD試験）結果¹⁵⁾から、稚内層における内部摩擦角および粘着力と一軸圧縮強さとの関係について整理する。ここで、一軸圧縮強さ（ q_u ）は、三軸圧縮試験（CD試験）から得られた内部摩擦角および粘着力から以下の式(4-1)を用いて算出する。

$$q_u = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4-1)$$

ここで、 c ：粘着力（MPa）， ϕ ：内部摩擦角（°）である。また、地下施設周辺の地上からの地質調査において取得したボーリングコアの一軸圧縮試験と圧裂引張試験結果^{11),12)}から、対象地山における一軸圧縮強さと引張強度との関係について整理する。そして、以上の整理した関係を踏まえ、次節の解析で用いる解析用物性値を設定する。

a) 内部摩擦角と一軸圧縮強さとの関係

稚内層における内部摩擦角と一軸圧縮強さとの関係を図4-13に示す。図の近似直線から、稚内層における内部摩擦角は、一軸圧縮強さが変化してもあまり変化しないことがわかる。つまり、稚内層において、内部摩擦角は一軸圧縮強さに依存しないと考えられる。そこで、解析用物性値の内部摩擦角は、平均値である 26.8° の一定値とすることとした（図4-13参照）。

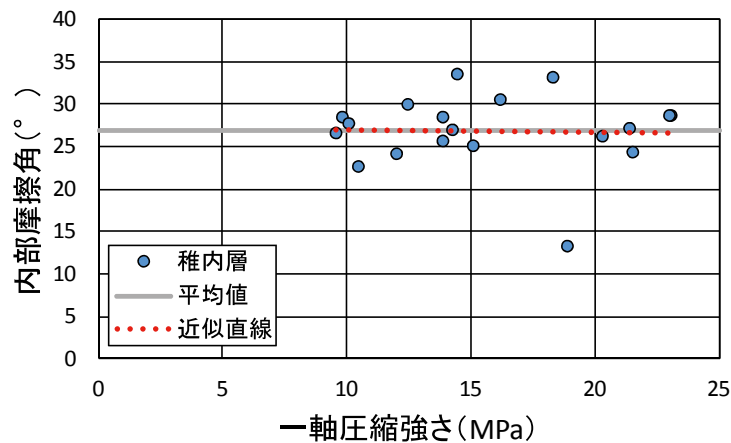


図4-13 稚内層における内部摩擦角と一軸圧縮強さとの関係

b) 粘着力と一軸圧縮強さとの関係

稚内層における粘着力と一軸圧縮強さとの関係を図4-14に示す。図から、稚内層における粘着力は、一軸圧縮強さの増加に伴い、増加する傾向があることがわかる。ここで、前項で設定した一軸圧縮強さの確率分布の各値と先程設定した内部摩擦角 26.8° から粘着力（図4-14中の換算粘着力）を算出したところ、三軸試験結果と非常に整合していることがわかった。そのため、この換算粘着力を解析用物性値の粘着力とすることとした。

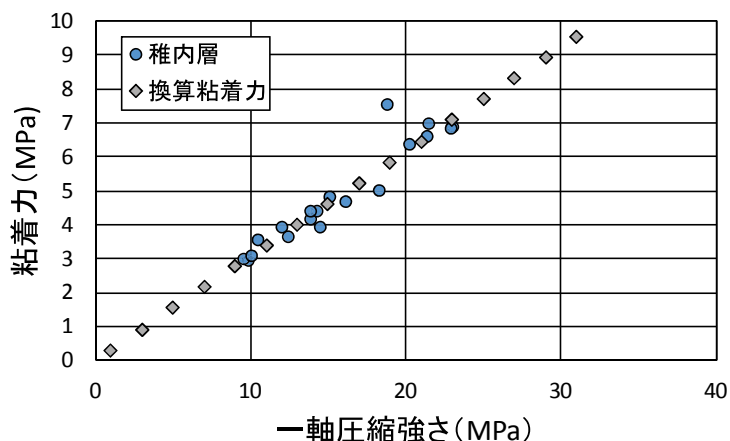


図4-14 稚内層における粘着力と一軸圧縮強さとの関係

c) 一軸圧縮強さと引張強度との関係

地層境界との深度差の区間別の一軸圧縮強さと引張強度の関係を図4-15に示す。図中の各プロットは、地層境界との深度差100m毎の一軸圧縮強さの平均と引張強度の平均の関係である。また、図中の350m調査坑道周辺のプロットは、地層境界との深度差-113.5m（350m調査坑道の推定位置）を挟むような区間である地層境界との深度差-66.5m～-176.72mの区間の一軸圧縮強さの平均と引張強度の平均の関係である。図4-15に示す近似直線から、引張強度は一軸圧縮強さの約1/10であることがわかる。よって、図4-11で設定した一軸圧縮強さの確率分布の各値に1/10を乗じた値を、解析用物性値の引張強度とすることとした。

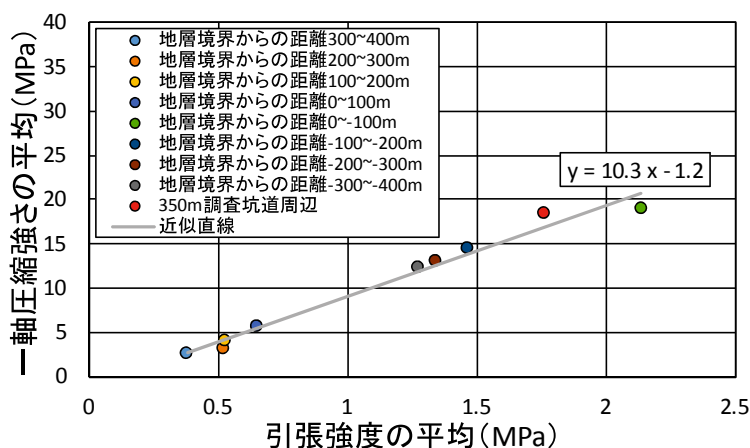


図4-15 深度区間別の一軸圧縮強さと引張強度との関係

4. 4. 4. 変形特性と一軸圧縮強さとの関係

本項では、地下施設周辺の地上からの地質調査において取得したボーリングコアの一軸圧縮試験結果^{11),12),13)}から、ヤング係数およびポアソン比と一軸圧縮強さの関係について整理する。ここで指すヤング係数およびポアソン比は、ひずみゲージによるヤング係数 E_{50} と静ポアソン比 ν であり、それぞれ以下の式¹⁶⁾によって求められたものである。

$$E_{50} = \frac{(q_u / 2)}{\varepsilon_{50}} \quad (4-2)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} \quad (4-3)$$

ここで、 q_u ：一軸圧縮強さ、 ε_{50} ：ひずみゲージによる縦ひずみ (q_u の50%応力レベル)、 ε_h ： $(q_u/10)$ に対応する横方向のひずみ、 ε_v ： $(q_u/10)$ に対応する縦方向のひずみである。そして、以上の整理した関係を踏まえ、次節の解析で用いる解析用物性値を設定する。

a) ヤング係数と一軸圧縮強さとの関係

稚内層におけるヤング係数と一軸圧縮強さの関係を図4-16に示す。図から、ヤング係数は一軸圧縮強さの増加に伴い、増加する傾向があることがわかる。そこで、まず図に示すような切片を0とする線形近似を行い、4. 4. 2で設定した一軸圧縮強さの確率分布の各値をその近似直線に代入することで、それぞれの一軸圧縮強さに対するヤング係数を算出した（以降、そのヤング係数を換算ヤング係数と称す）。

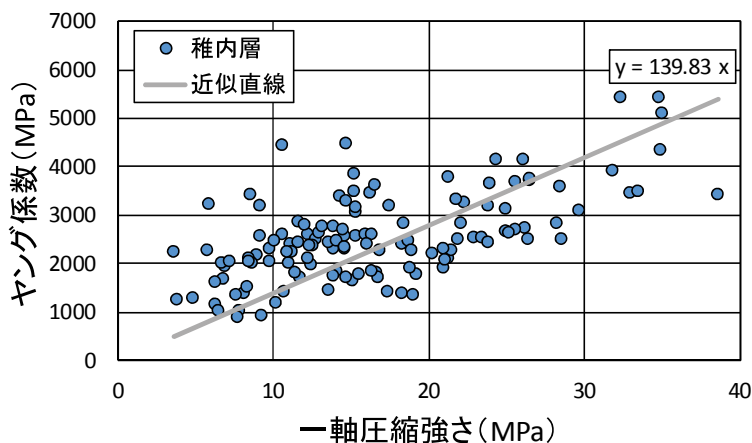


図4-16 稚内層におけるヤング係数と一軸圧縮強さの関係

上記のように算出した換算ヤング係数の頻度分布と、図4-9と同じ一軸圧縮試験^{11),12),13)}から得られたヤング係数の頻度分布の比較図を図4-17に示す。図の横軸の階級は、図4-16の近似直線の傾きの約2倍とした。また、図中にはサンプル個数を100個とした正規分布曲線も同時に示している。図4-17から、一軸圧縮試験から得られた稚内層のヤング係数の頻度分布は、

おおよそ正規分布曲線で近似できることがわかる。また、これらのデータを用いて、図4-10と同様にKolmogorov-Smirnov検定¹⁴⁾を行った(図4-18参照)。その結果、一軸圧縮試験から得られたヤング係数の累積度数と正規分布関数との差の最大値は図4-18に示すように0.086となった。この場合、サンプル数は102個であることから、有意水準5%の限界値は0.135である。両者の差の最大値0.086の方が限界値0.135より低いことから、適用した正規分布関数が有意水準5%で妥当であることが確認できた。

また、正規分布関数と換算ヤング係数の頻度分布(図4-17参照)の累積度数との差の最大値が図4-19に示すように0.12と有意水準5%の限界値より小さいことがわかる。よって、換算ヤング係数の頻度分布でも正規分布曲線を十分近似できることから、換算ヤング係数を解析用物性値のヤング係数とすることとした。

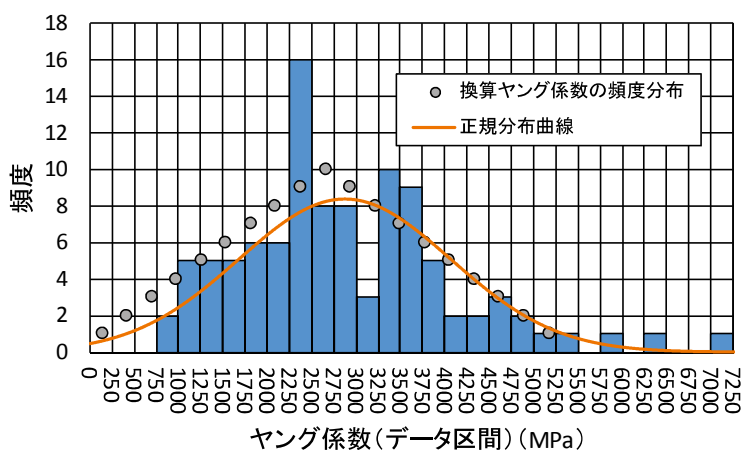


図4-17 ヤング係数の頻度分布(一軸圧縮試験結果および換算ヤング係数)

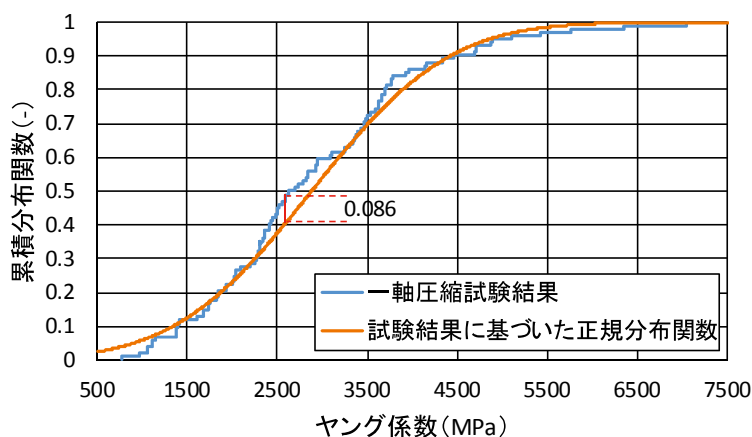


図4-18 ヤング係数の累積度数(サンプル数:102個)と正規分布関数

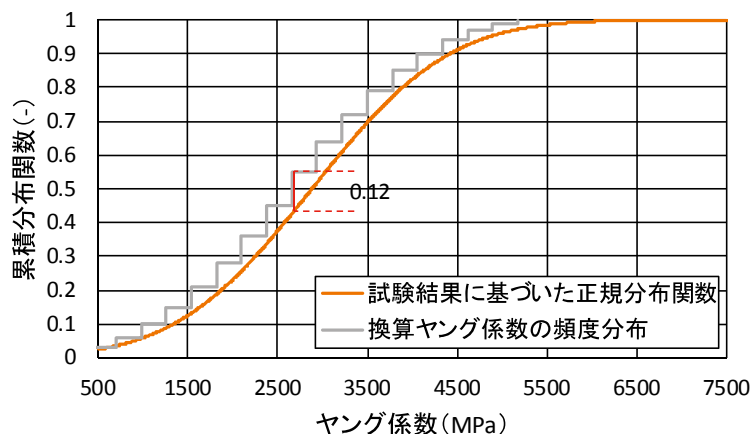


図4-19 正規分布関数と換算ヤング係数の頻度分布の累積度数

c) ポアソン比と一軸圧縮強さとの関係

稚内層におけるポアソン比と一軸圧縮強さの関係を図4-20に示す。図の近似直線から、稚内層におけるポアソン比は、一軸圧縮強さの増加に伴い、増加する傾向があることがわかる。しかし、その近似直線の傾きは小さいことがわかる。また、ポアソン比の変化が解析結果に与える影響は小さいことが知られている¹⁷⁾。そのため、解析用物性値のポアソン比は、平均値である0.193の一定値とすることとした（図4-20参照）。

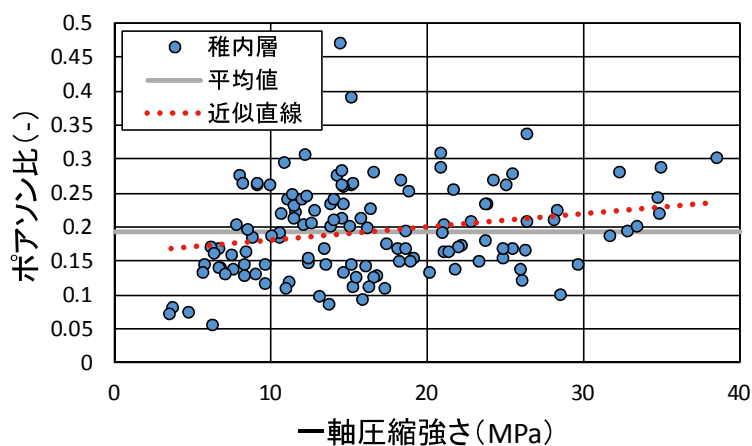


図4-20 稚内層におけるポアソン比と一軸圧縮強さの関係

4. 4. 5. 解析用物性値

本節で設定した解析上の一軸圧縮強さの確率分布（4. 4. 2参照）の各値に対する解析用物性値（4. 4. 3, 4. 4. 4参照）を表4-4に示す。本節で設定した解析上の一軸圧縮強さの確率分布と表4-4に示すような19ケースの地山物性値を用いて、次節で同一地層内（本研究では、稚内層）における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施する。

表4-4 一軸圧縮強さに対する解析用物性値

material	分布確率 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比 (-)
material1	1.0	1.00	26.8	0.31	0.10	139.8	0.193
material2	2.0	3.00		0.92	0.30	419.5	
material3	3.0	5.00		1.54	0.50	699.2	
material4	4.0	7.00		2.15	0.70	978.8	
material5	5.0	9.00		2.77	0.90	1258	
material6	6.0	11.0		3.38	1.10	1538	
material7	7.0	13.0		4.00	1.30	1818	
material8	8.0	15.0		4.61	1.50	2097	
material9	9.0	17.0		5.23	1.70	2377	
material10	10.0	19.0		5.84	1.90	2657	
material11	9.0	21.0		6.46	2.10	2936	
material12	8.0	23.0		7.07	2.30	3216	
material13	7.0	25.0		7.69	2.50	3496	
material14	6.0	27.0		8.31	2.70	3775	
material15	5.0	29.0		8.92	2.90	4055	
material16	4.0	31.0		9.54	3.10	4335	
material17	3.0	33.0		10.2	3.30	4614	
material18	2.0	35.0		10.8	3.50	4894	
material19	1.0	37.0		11.4	3.70	5174	
	平均(MPa)	19.0	26.8	5.84	1.90	2657	0.193
	不偏標準偏差(MPa)	8.12	0	2.50	0.81	1136	0
	変動係数(%)	42.8	0	42.8	42.8	42.76	0

4. 5. 地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析

本節では、三次元有限差分法 (Finite Difference Method ; FDM) 解析コードFLAC3D¹⁸⁾ (3. 2. 1 参照) の弾完全塑性解析 (破壊規準: モールクーロンの破壊規準) を用いて、第3章と同様な方法によって同一地層内 (本研究では、稚内層) における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロシミュレーションを実施する。そして、実際に得られている350m調査坑道のB計測結果の局所的な増加 (図4-6参照) を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討する。ここで、比較するB計測データの応力状態は、図4-6において応力値が収束している経過日数150日時点の応力状態とする。加えて、本節では、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。

4. 5. 1. トンネル掘削解析における諸条件

本項では、本章において実施する地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析における諸条件について記述する。

a) 解析領域と境界条件

図4-21に、トンネル掘削解析における解析領域と境界条件を示す。ここで、坑道掘削壁面から境界までの距離は、約5D (D: トンネル直径) とした。また、解析領域内の要素の基本寸法は、トンネル周辺部を除き、すべてのケース共通で0.2m×0.2m×1mとした。なお、本研究で用いるFLAC3Dは三次元解析であるが、奥行き方向の解析領域を1mとし、その方向の変位を拘束することで、二次元平面ひずみ状態を仮定し、疑似二次元解析とした。また、他の境界条件に関しては、図4-21に示すような拘束条件とした。

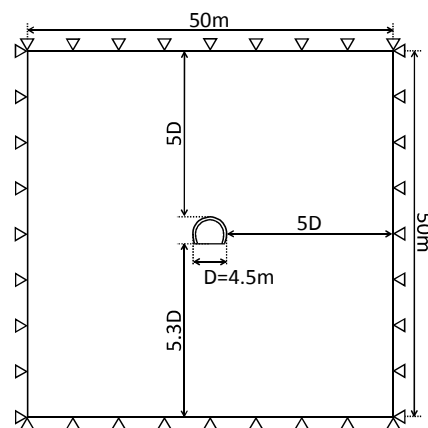


図4-21 トンネル掘削解析における解析領域と境界条件

b) トンネル掘削解析モデル

図4-22に、本章で用いるトンネル掘削解析モデルのトンネル周辺の拡大図と支保工モデルを示す。ここで、図4-22(a)のトンネル形状とその寸法は、図4-3のB計測実施位置の坑道形状とその寸法を模擬している。また、図4-22(b)の支保工モデルは、図4-3のB計測実施位置で施工された支保パターンである図4-4の支保パターンを対象にモデル化している。

図4-22の地山および吹付けコンクリートのモデル化はソリッド要素で行い、鋼製支保工のモデル化はビーム要素で行った。また、鋼製支保工の配置は、モデル化した吹付けコンクリートの中間部に配置することとした(図4-22(b)中赤線参照)。一方で、ロックボルトは実際の施工では様々な支保効果が期待できると考えられているが、ロックボルトの支保効果の定量的なモデル化は検討段階であり、多くの課題があるのが現状である^{19),20)}。したがって、本章では安全側の評価の観点も踏まえ、ロックボルトの支保効果は期待しないこととし、解析上でロックボルトのモデル化はしないこととした。

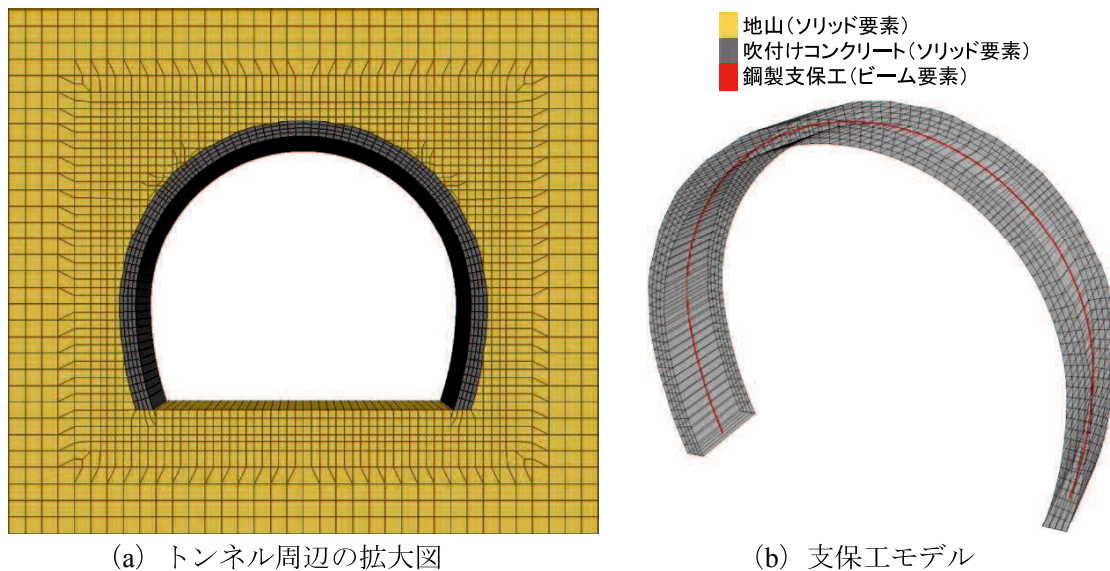


図4-22 トンネル掘削解析モデル

c) 地山物性の不均質性の設定とその特徴

本章では、第3章で採用した確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法²¹⁾を用いて、FLAC3D上で作成したトンネル掘削解析モデル(図4-22参照)に同一地層内における地山物性の不均質性を考慮し、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析モデル(本章では、“不均質地山モデル”と呼ぶこととする)を作成する。ここで、採用する確率分布は、図4-11で示したとおりであり、その確率分布の各値に対する解析用物性値は、表4-4で示したとおりである。また、地山物性値を与える要素群の形状は正方形に限定し、その寸法は0.2, 0.4, 1.0, 2.0mの4種類とすることとした(ただし、0.2mの場合、トンネル周辺部を除き、単一要素となる)。本論文では、このような正方形要素群のスケール

を“均質寸法”と定義している（第3章参照）。

本章で作成する不均質地山モデルは、第3章で作成した不均質地山モデルと同じ方法を用いて地山物性の不均質性を考慮するため、第3章で作成した不均質地山モデルと同様な地山物性値の固有変動性（すなわち、変動スケール（Scale of Fluctuation）²²⁾のばらつき範囲とその平均（図2-4参照））を有するモデルとなる（図4-23、図4-24参照）。特に、本研究では、第3章と同様に、地山物性値を与える要素群の形状を正方形に限定していることから、地山物性値の固有変動性が鉛直・水平方向ともに同様な傾向を示すモデルとなる。一方で、本研究における不均質地山モデルは、第3章と同様に、均質寸法に相当する距離内の自己相関係数が1.0であり、その距離を超えた位置において自己相関係数が急激に0になるようなモデルでもある。すなわち、比較的近い2地点間において相関が見られないといった極めてランダムな場を想定しているモデルでもある。本研究では、以上のような第3章と同様な地山物性値の固有変動性を想定し、同一地層内における地山物性の不均質性に着目した不均質地山モデルを作成する。

各均質寸法の不均質地山モデルのケース数（標本数）は、それぞれ30ケースの後述するような手順のトンネル掘削解析を行い、トンネル支保工応力の不偏分散を算出した後に、信頼区間を鋼製支保工縁応力 $\pm 5\text{MPa}$ 、吹付けコンクリート応力 $\pm 0.3\text{MPa}$ 、加えて信頼度を95%と定めて算定した²³⁾。その結果にもとづき、各均質寸法の不均質地山モデルの解析ケース数は、均質寸法0.2mで30ケース、均質寸法0.4mで60ケース、均質寸法1.0mおよび2.0mでそれぞれ100ケースとした（表4-5参照）。表中の各ケースにおける不均質地山モデルの作成においては、解析モデル全体の各要素群（均質寸法）に対して異なる乱数を発生させて、それぞれ配置が異なる不均質地山モデルを作成した。また、表4-5における変動スケールの平均は、図4-24の変動スケールの平均と均質寸法の関係から、簡易的に均質寸法の2倍として算出したものである。加えて、表4-5において均質寸法および変動スケールの平均をトンネル直径で除して無次元化しているのは、第3章でも述べたようにトンネル直径の異なるトンネルにおいても汎用性をもたせるためである。本章では、第3章と同様に、以降このような無次元化した値に着目することとし、特に、地山物性の不均質性を考慮する際に重要となるパラメータである変動スケールをトンネル直径で除した値である「変動スケールの平均／トンネル直径」に着目し、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することとした。

第3章の不均質地山モデルでは、この変動スケールの平均／トンネル直径が0.04～0.86となるモデルを用いた（表3-2参照）。本章では、第3章の結果を踏まえ、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響が最も小さいと考えられる変動スケールの平均／トンネル直径=0.04のケースを省略することとした。ただし、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響が大きくなると予想される変動スケールの平均／トンネル直径が大きいケースの変動スケールの平均／トンネル直径は、第3章の不均質地山モデルと本章の不均質地山モデルとでほぼ対応させている（表3-2、表4-5参照）。加えて、第3章の不

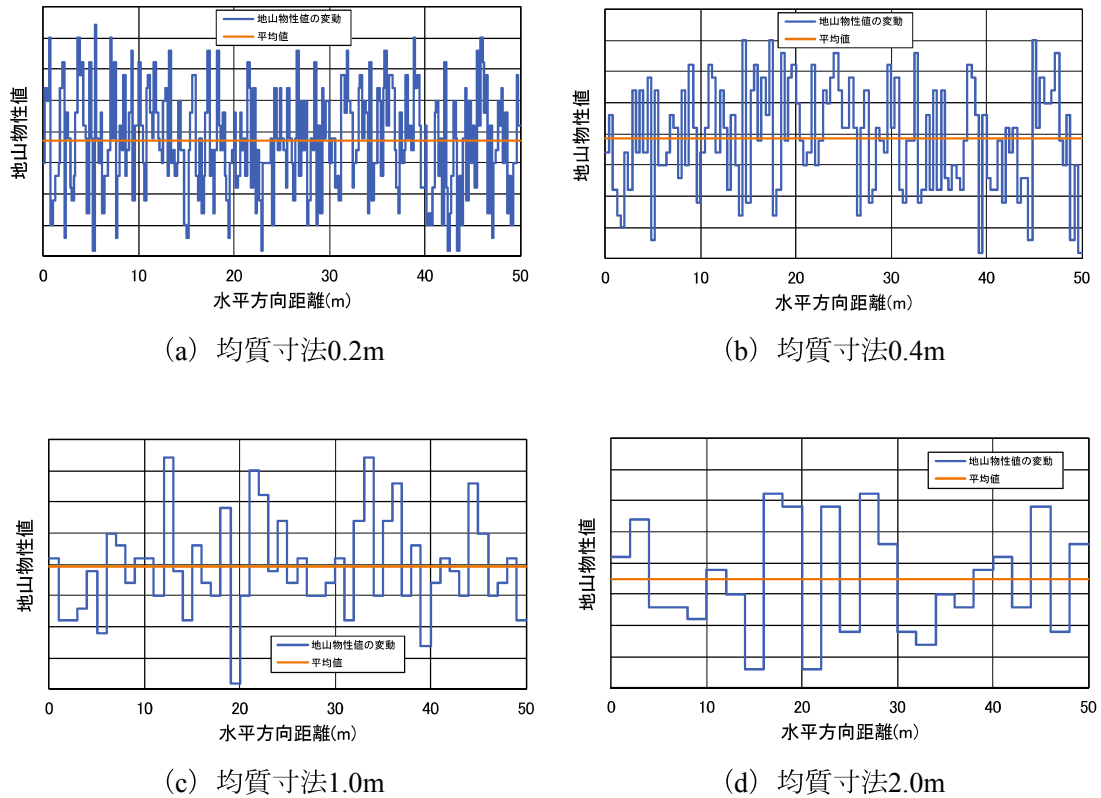


図4-23 各均質寸法における地山物性値の固有変動性の一例

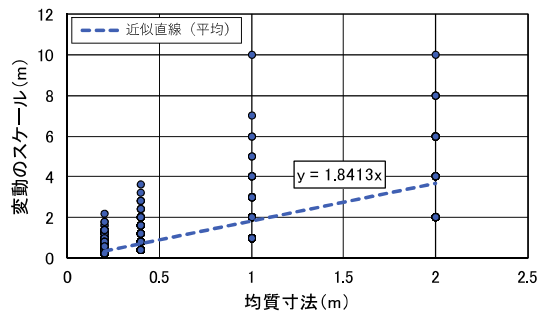


図4-24 各均質寸法における水平・鉛直方向の変動スケールのばらつきと平均

表4-5 トンネル直径に対する各寸法の割合と解析ケース数

均質寸法(m)	変動スケールの平均(m)	均質寸法/ トンネル直径(-)	変動スケールの平均/ トンネル直径(-)	不均質地山モデル のケース数
0.2	0.4	0.04	0.09	30
0.4	0.8	0.09	0.18	60
1.0	2.0	0.22	0.44	100
2.0	4.0	0.44	0.89	100

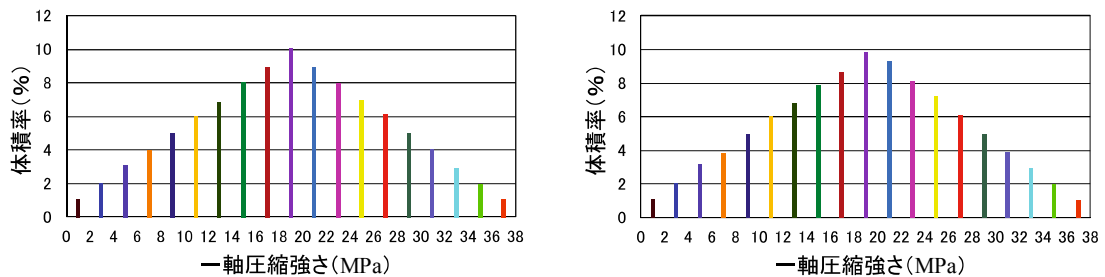
均質地山モデルでは、材料構成則として線形弾性体を採用していたが、本章の不均質地山モデルでは、350m 調査坑道の実施設計における数値解析において弾完全塑性解析（破壊規準：

モールクーロンの破壊規準)を採用していた²⁾ことから、弾完全塑性体(破壊規準:モールクーロンの破壊規準)を採用している。そのため、本章の不均質地山モデルは、第3章の不均質地山モデルと異なり、トンネル周辺部の地山が塑性化する可能性があるモデルとなっている。

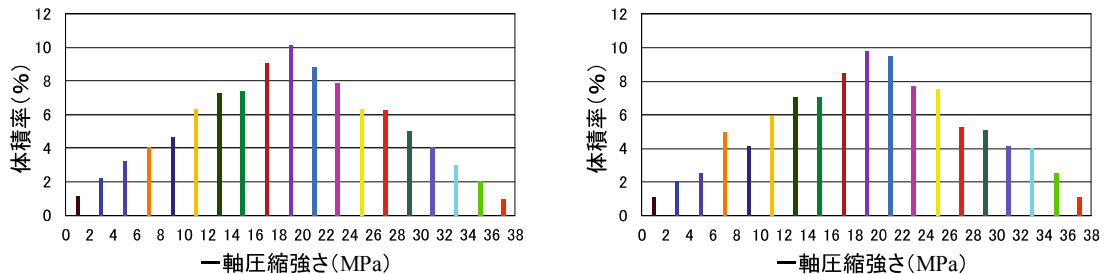
d) 不均質地山モデルの作成例

作成した不均質地山モデルの各変動スケールの平均/トンネル直径における一軸圧縮強さの頻度分布の一例を図4-25に示す。ここで、図4-25の縦軸は体積率となっているが、体積率とはそれぞれの地山物性値をもつ要素の体積が解析モデルの総体積に占める割合のことであるため、各物性値の分布確率ともいえる。図4-25から、不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布が仮定した確率分布(図4-11参照)を十分に表現できていることが確認できる。

また、作成した不均質地山モデルの地山物性の分布状況の一例を図4-26に示す。ここで、図4-26における不均質地山モデルの着色は、図4-25に示すそれぞれの一軸圧縮強さの着色に対応している。図4-26に示すように、トンネル直径が4.5mであるため、変動スケールの平均/トンネル直径=0.89のケースではトンネル壁面の約半分の領域が同じ物性で占めることになることがわかる。

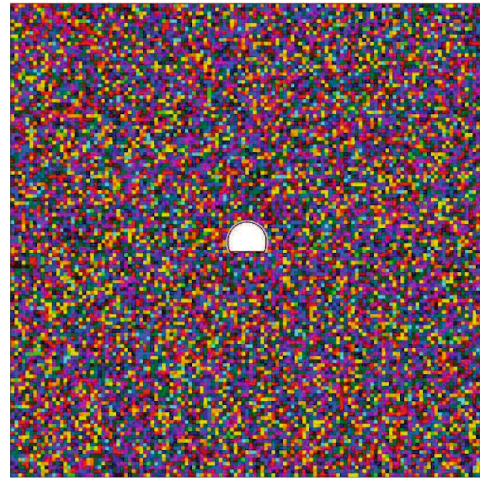
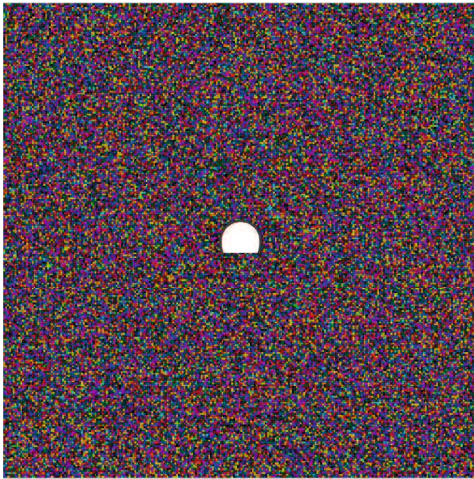


(a) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.18

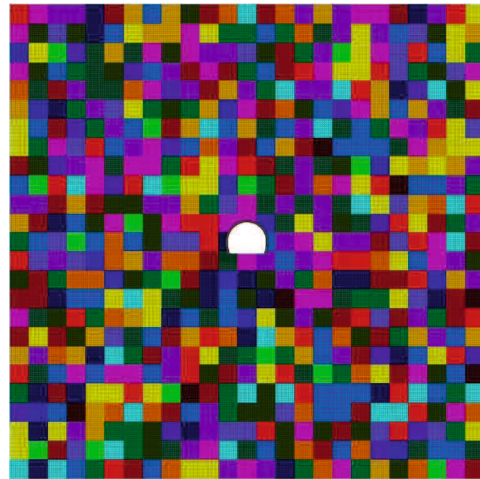
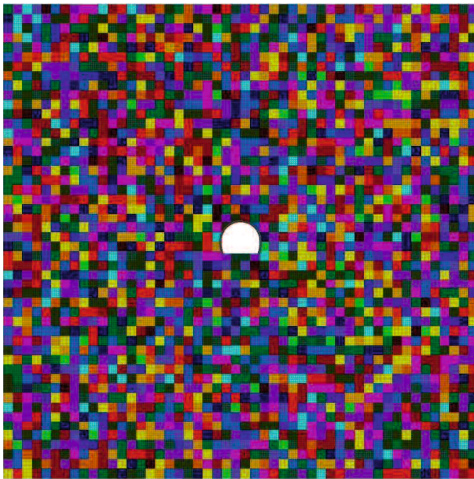


(c) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.89

図4-25 各不均質地山モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の例



(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.18



(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.89

図 4-26 各不均質地山モデルにおける地山物性の分布状況の例

e) 支保工物性値の設定

解析に用いる支保工物性値は、幌延深地層研究計画における地下施設の実施設設計²⁾で用いられた表4-6に示す支保工物性値を採用した。ただし、吹付けコンクリートのヤング係数は本来、時間経過と共に上昇するため、実施設設計²⁾とは異なり、掘削の進行による時間経過を考慮することとした。

そこで、吹付けコンクリートのヤング係数と経過時間の関係を得るために、まず、250m調査坑道における原位置吹付け施工強度試験の結果²⁴⁾を対数近似した(図4-27参照)。図中の試験結果は、図4-3に示すB計測実施位置において実際に施工された低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの試験結果である。

表4-6 支保工物性値

	鋼製支保工	吹付け コンクリート
規格・仕様	H-150 (SS400)	支保厚=20cm ($f'_{ck}=36\text{MPa}$)
ヤング係数 (MPa)	210000	時間経過を 考慮して増加
ポアソン比 (-)	0.3	0.2
断面積 (m^2)	3.965×10^{-3}	
断面2次モーメント (m^4)	1.620×10^{-5}	
要素種別	ビーム要素	ソリッド要素

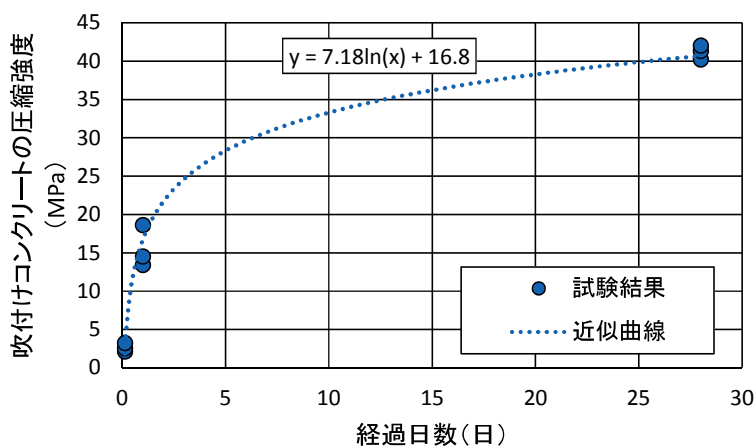


図4-27 吹付けコンクリートの圧縮強度と経過日数との関係

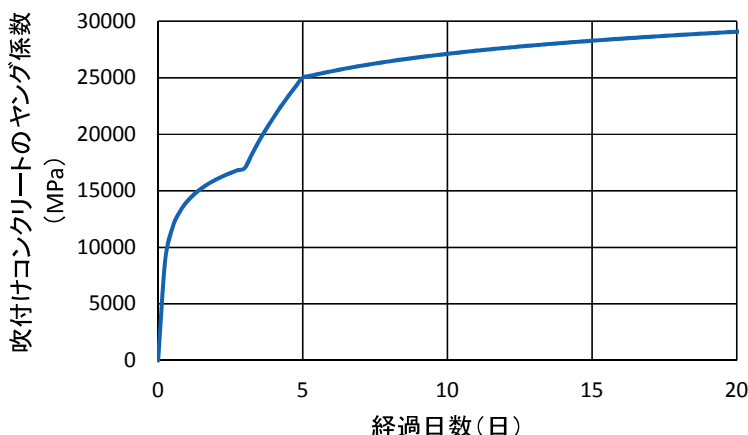


図 4-28 吹付けコンクリートのヤング係数と経過日数との関係

図 4-27 の経過日数ごとの圧縮強度を、コンクリート標準示方書〔設計編〕のヤング係数と圧縮強度の関係²⁵⁾に代入し、各経過日数における吹付けコンクリートのヤング係数を算出した(図 4-28 参照)²⁶⁾。この図から、数値解析上で吹付けコンクリートのヤング係数を設定することとし、掘削の進行による時間経過を考慮した。

f) 初期応力の設定

地下施設近傍で実施されたボーリング調査²⁷⁾²⁸⁾によって得られた岩石コアの観察結果から、実施設計²⁾において、各地層の単位体積重量および層厚が推定された。その推定結果に基づき、表 4-7 に示すように、鉛直応力は土被り 350m 相当の応力である 5359.1kN/m² (約 5.4MPa) とした。

トンネル断面方向の側圧係数は、調査ボーリング孔において実施された水圧破碎法によって求められた図 4-3 中に示した東西・南北方向の応力場⁴⁾から、掘削方向が反時計回りに 30° 傾いていることを考慮して 1.01 とした。また、トンネル掘削(奥行き)方向の側圧係数は、同様な考慮を行い 1.21 とした。

表 4-7 鉛直応力の推定

層名	単位体積重量(kN/m ³)	層厚(m)	単位体積重量(kN/m ³) × 層厚(m)
シルト層	14.8	25.0	370.0
声間層	15.1	301.0	4545.1
稚内層	18.5	24.0	444.0
		合計	5359.1

g) 掘削応力解放率の設定および掘削解析手順

本章におけるトンネル掘削解析は、4.5.1a)で述べたように、平面ひずみ状態を仮定した疑似二次元解析である。そのようなトンネル掘削解析では、実際のトンネル掘削過程を模擬するために、掘削応力解放率を設定する必要がある²⁹⁾。

そこで、まずFLAC3Dを用いて三次元1m逐次掘削解析（円孔素掘り、線形弾性解析）を行った。その三次元逐次掘削解析モデルを図4-29に示す。図4-29のモデルの境界条件については、4.5.1.a)に示した条件と同じとした。また、解析で用いる物性値については、表4-4に示した解析用物性値の平均値であるmaterial10のヤング係数とポアソン比を用いることとした。加えて、初期応力については、4.5.1.e)で設定した値を用いることとした。上記した解析条件の解析結果から、図4-29の奥行き50m地点の天端沈下と切羽離れの関係を求めた（図4-30参照）。図4-30の横軸の切羽離れは、奥行き50m地点を0m、モデルの奥行き方向を正とした際の切羽までの距離と定義している。

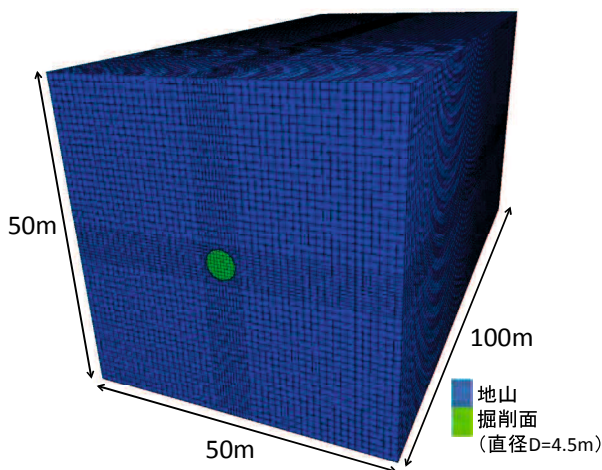


図4-29 三次元逐次掘削解析モデル

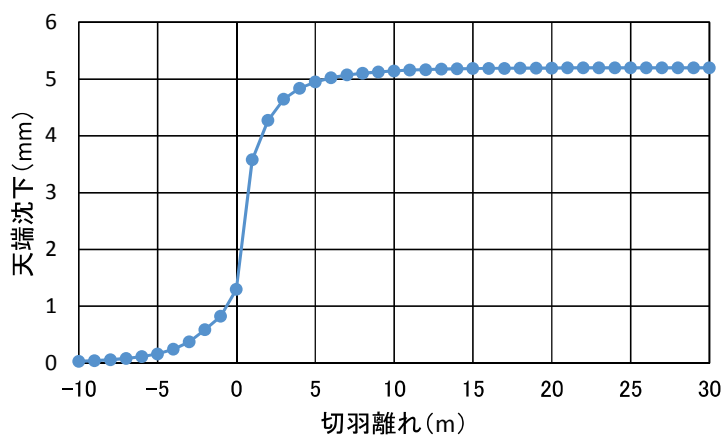


図4-30 天端沈下と切羽離れとの関係

そして、図 4-30 における天端沈下の最大値を掘削応力解放率 100%として、各切羽離れにおける天端沈下との比率から各切羽離れにおける掘削応力解放率を求めた(図 4-31 参照)。なお、図 4-31 中の各ステップは、以降で示す表 4-8 中の解析ステップと対応している。

続いて、1m の掘削に 0.5 日を要すると仮定し、掘削の経過日数と掘削応力解放率の関係性を算出した(表 4-8 参照)。表 4-8 に示すように、本解析(疑似二次元解析)では解析対象断面から 1m 掘削進行後(切羽離れ 1m 時)を経過日数 0 日とし、その際には無支保状態とした。このように設定したのは、切羽観察等によって生じる支保工設置の遅延を考慮したためである。

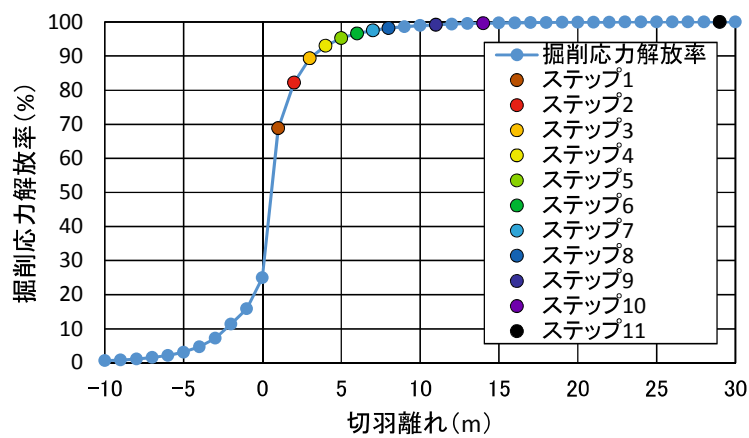


図 4-31 掘削応力解放率と切羽離れとの関係

表 4-8 掘削解析手順

解析ステップ	支保工の設置	切羽離れ(m) (経過日数(日))	掘削応力 解放率 (%)	吹付けコンクリートの ヤング係数(MPa) (経過日数(日))
ステップ1	無	1 (0)	68.9	
ステップ2	有	2 (0.5)	82.2	8949 (0.25)
ステップ3	有	3 (1.0)	89.4	13151 (0.75)
ステップ4	有	4 (1.5)	93.0	14701 (1.25)
ステップ5	有	5 (2.0)	95.2	15638 (1.75)
ステップ6	有	6 (2.5)	96.6	16303 (2.25)
ステップ7	有	7 (3.0)	97.6	16816 (2.75)
ステップ8	有	8 (3.5)	98.2	18283 (3.25)
ステップ9	有	11 (5.0)	99.2	22471 (4.25)
ステップ10	有	14 (6.5)	99.6	25448 (5.75)
ステップ11	有	29 (14.0)	100.0	27190 (10.25)

上述したように、トンネル掘削は、大まかに2mの掘削に1日を要すると仮定したが、本章の数値解析で設定した切羽離れと経過日数の関係は、実施工における切羽離れと経過日数の関係をおおよそ近似できていることがわかる（図4-32参照）。両者の関係は、経過日数3.5日以降に大きな違いがあるが、表4-8に示すように経過日数3.5日以降の残りの掘削応力解放率は全体の2%程度と非常に少ないため、数値解析における切羽離れと経過日数の関係は実施工における切羽離れと経過日数の関係を十分に表現できているといえる。

表4-8からわかるように、吹付けコンクリートの施工時点からの経過日数は、1つ前と現在の解析ステップの掘削の経過日数の中間の経過日数を用いることとした。そして、設定した吹付けコンクリートの施工時点からの経過日数から、図4-28の関係をj用いて吹付けコンクリートのヤング係数を算出した。

上記のように設定した表4-8の掘削解析手順および各種条件にもとづき、各変動スケールの平均/トンネル直径のすべての解析ケース（290ケース）でトンネル掘削解析を実施した。

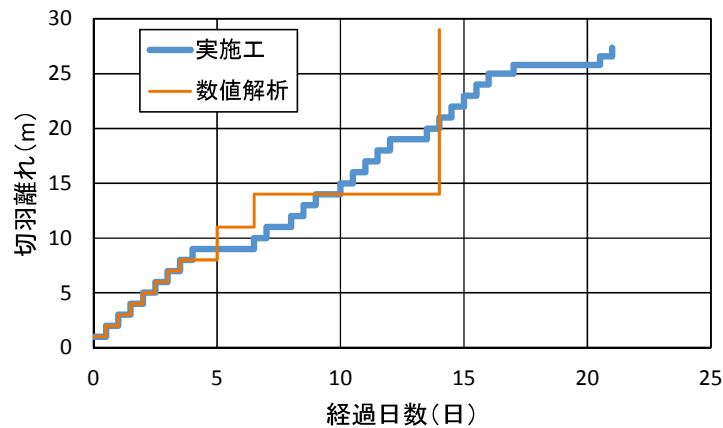


図4-32 掘削応力解放率と切羽離れの関係

4. 5. 2. 数値解析結果

本項では、前項において設定した解析条件に基づいて、同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施した結果を示す。そして、実際に得られている350m調査坑道の支保工応力計測結果の局所的な増加（図4-6参照）を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討する。加えて、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。

a) 支保工応力の取得位置

解析結果から得られる吹付けコンクリート覆工の応力取得位置を図4-33に示す。B計測実施位置の吹付けコンクリート応力計（図4-5、写真4-3参照）は、吹付けコンクリート表面から地山方向に約140mmの位置に設置されているため、図4-33に示す青色の各要素の最大圧縮応力を吹付けコンクリート覆工の応力として取得した。本章では、この応力を“吹付けコンクリート中間部応力”と呼ぶこととする。加えて、最大圧縮応力が最大になると予測される位置である図4-33の赤色の各要素の最大圧縮応力も取得した。本章では、この応力を“吹付けコンクリート内側応力”と呼ぶこととする。

鋼製支保工縁応力については、掘削解析後のビーム要素（図4-22(b)参照）から得られる軸力と曲げモーメントから、鋼製支保工内縁応力および鋼製支保工外縁応力を算出した。

また、図4-5に示すように現場計測されたB計測位置は坑道の上半のみであったため、取得する支保工応力データは坑道の上半のみとした。取得したデータは、図4-33に示すように天端からの角度別に分けて評価することとした。ここで、天端からの角度は掘削方向に向かって天端から時計回りを正とした。

各変動スケールの平均／トンネル直径の全ケースにおいて、上記のようなデータの取得および算出を行ったが、解析モデルを左右入れ替えた際の解析結果も、解析結果を評価する

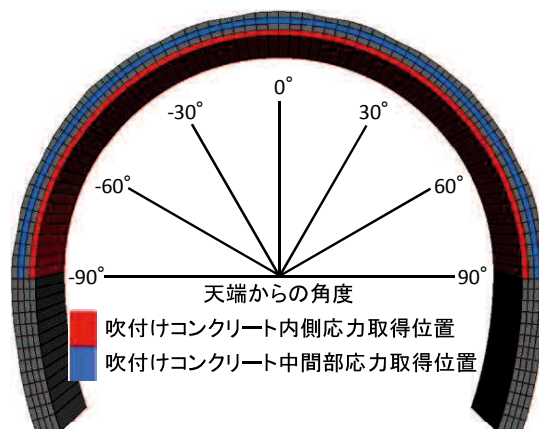
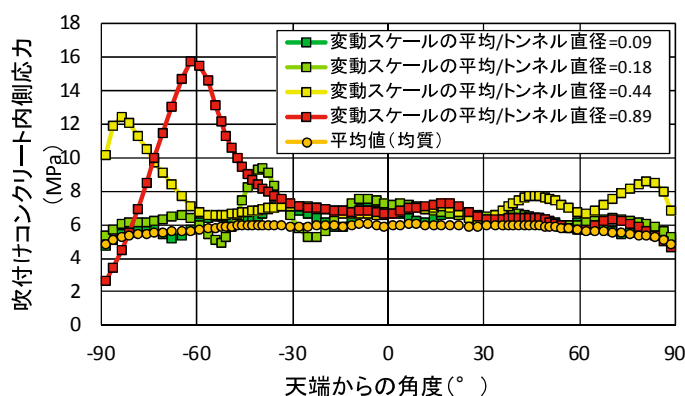


図4-33 吹付けコンクリート覆工の応力取得位置

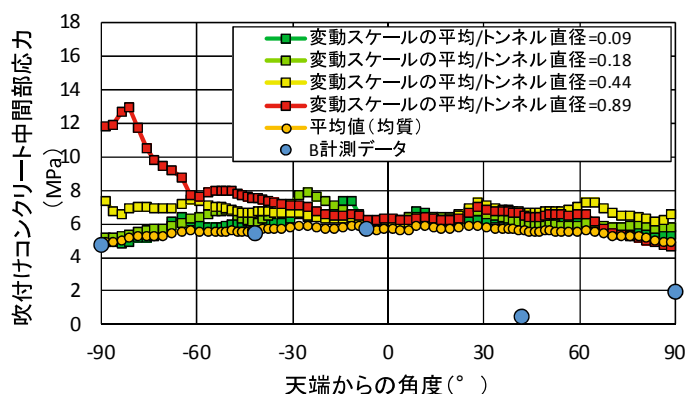
際には用いた。そのため、解析結果を評価する場合の全解析ケース数は、変動スケールの平均／トンネル直径=0.09で60ケース、変動スケールの平均／トンネル直径=0.18で120ケース、変動スケールの平均／トンネル直径=0.44、0.89でそれぞれ200ケースである。

b) B計測結果と数値解析結果の比較とその考察

B計測結果と数値解析結果の比較例を図4-34、図4-35に示す。図4-34、図4-35の各図の横軸は、図4-33に示した天端からの角度である。また、図4-34、図4-35に示した各変動スケールの平均／トンネル直径の解析結果は、各変動スケールの平均／トンネル直径のケースの中で鋼製支保工に最も大きな応力が生じたケース、または図4-6の経過日数150日時点のB計測結果と傾向が似ているケースを抽出し示している。加えて、凡例の「平均値(均質)」は、表4-4に示した解析用物性値の平均値であるmaterial10のみを用いて、地山を均質と仮定したトンネル掘削解析を実施した際の支保工応力分布結果である。

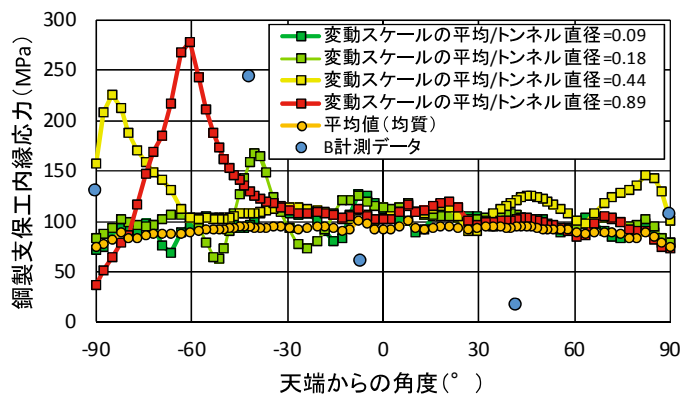


(a) 吹付けコンクリート内側応力

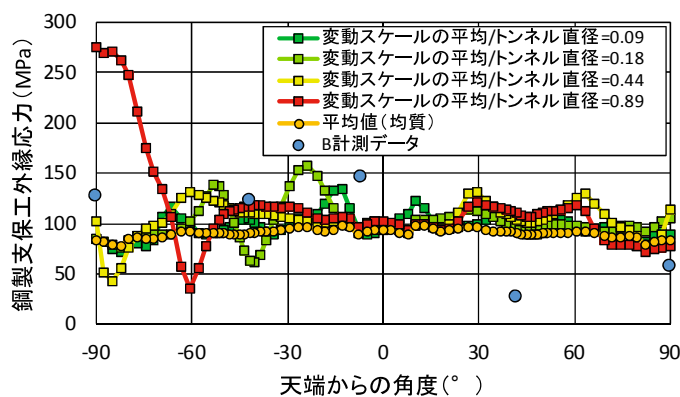


(b) 吹付けコンクリート中間部応力

図4-34 吹付けコンクリートのB計測結果と数値解析結果の比較例



(a) 鋼製支保工内縁応力



(b) 鋼製支保工外縁応力

図 4-35 鋼製支保工の B 計測結果と数値解析結果の比較例

図 4-34 に示す吹付けコンクリートの内側応力および中間部応力分布から、平均値(均質)および変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 のケースでは、ほぼ一定の応力が吹付けコンクリート覆工全周にわたり発生していることがわかる。この結果は、第 3 章で得られた結果(変動スケールの平均/トンネル直径が 0.09 以下であれば、不均質地山を大域的には均質と仮定できると考えられる。)に整合するものであった。一方で、変動スケールの平均/トンネル直径が 0.18~0.89 になると局所的に大きな応力が吹付けコンクリート覆工の一部に発生していることがわかる。また、図 4-35 に示す鋼製支保工内縁応力および外縁応力からも同様な傾向がみられることがわかる。これらの結果も、第 3 章で得られた結果(0.09<変動スケールの平均/トンネル直径≤0.86 の場合、不均質な地山を均質と仮定することが難しい。)におおよそ整合するものであった。このような局所的な応力は、図 4-34、図 4-35 の変動スケールの平均/トンネル直径=0.89 のケースを例にとると、トンネル周辺の低強度領域が塑性化して支保工に大きな曲げ作用が生じることによって発生していることがわかった。B 計測で得られた局所的な応力の増加も大きな曲げ作用によるものであったことが

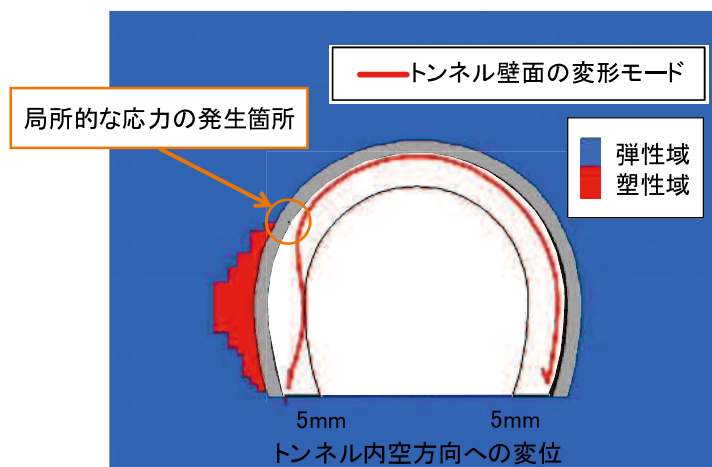


図 4-36 局所的な支保工応力の発生箇所の一例

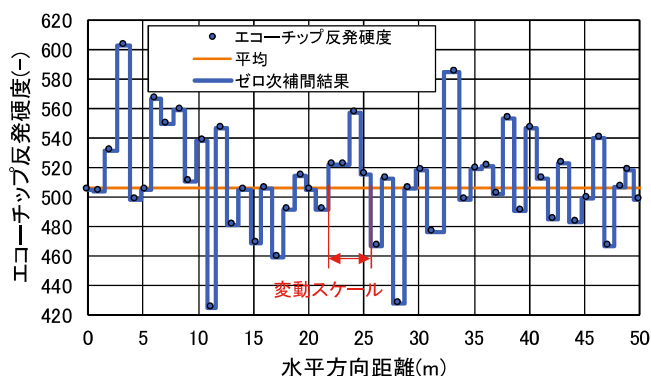


図4-37 350m西連絡坑道におけるエコーチップ反発硬度の固有変動性の一例⁷⁾

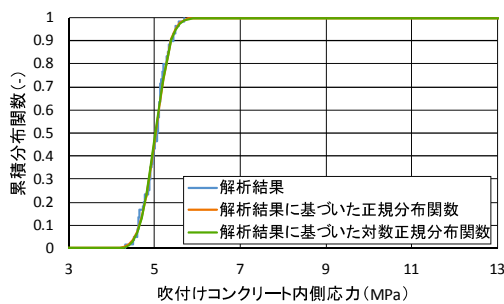
ら、現場の B 計測実施位置でも同様な現象が起きている可能性があると考えられる。

また、B 計測結果との比較が可能な図 4-34 (b) に示す吹付けコンクリート覆工の中間部応力分布では、平均値 (均質) および変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 の解析結果は B 計測結果を全体的によく再現できていることがわかる。一方、図 4-35 (a) に示す鋼製支保工の内縁応力分布から、平均値 (均質) および変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 のケースでは、鋼製支保工に発生する応力分布はほぼ一定に分布し、B 計測で得られたような局所的な応力は再現できないことがわかる。しかしながら、変動スケールの平均/トンネル直径=0.44~0.89 のような地山物性値の変動スケールをより大きくしたケースでは、B 計測結果と最大値の出現位置 (天端からの角度) は異なるものの、支保工に発生した局所的な応力自体はよく再現できていることがわかる。このような再現性の相違が生じた要因として、本解析の地山および吹付けコンクリートが連続体で表現されており、吹付けコンクリートの付着特性などが考慮されていないためと考えられる。しかしながら、本解析により、B 計測で得られたような曲げ作用による局所的な応力が、地山物性の不均質性の観点から予測

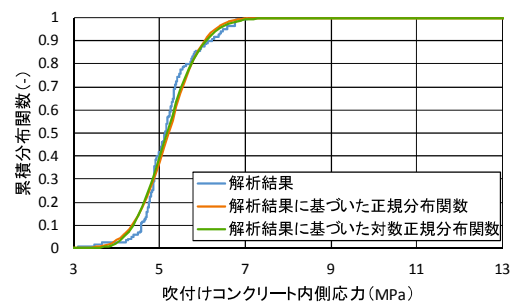
できることがわかった。また、そのような局所的な応力を再現するには、0.44~0.89の変動スケールの平均/トンネル直径を考慮する必要があることがわかった。実際に、支保工応力を取得した350m西連絡坑道(図4-3参照)において、一軸圧縮強さと明瞭な相関がみられるエコーチップ反発硬度³⁰⁾の水平方向データ(図4-37参照)を本研究の解析モデルの固有変動性と同様になるゼロ次補間を用いて整理した結果、その変動スケールの平均は1.93m(変動スケールの平均/トンネル直径=0.43)と同程度の値であった⁷⁾。この結果から、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターになりうるということがわかった。

c) 支保工応力のばらつきに関する評価

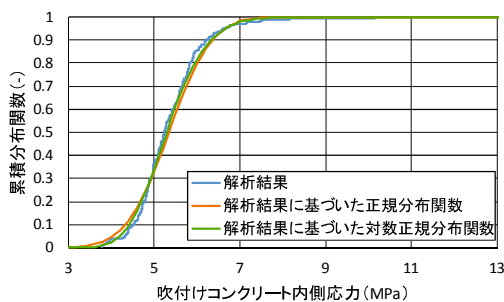
続いて、総計580ケース(解析モデルを左右入れ替えたケースを含む)のすべての解析ケースにおける、各変動スケールの平均/トンネル直径の天端からの角度別の支保工応力のばらつきを統計処理することにより、同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価し、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行う。そこで、まず、支保工応力のばらつきを近似できる確率分布関数を把握するために、正規分布関数と対数正規分布関数を用いて、各変動スケールの平均/トンネル直径の天端からの角度90°の位置の各支保工応力に対し、図4-38、図4-39、図4-40、図4-41に示すようなKolmogorov-Smirnov検定¹⁴⁾を行った。その結果、支保工応力の累積度数と各確率



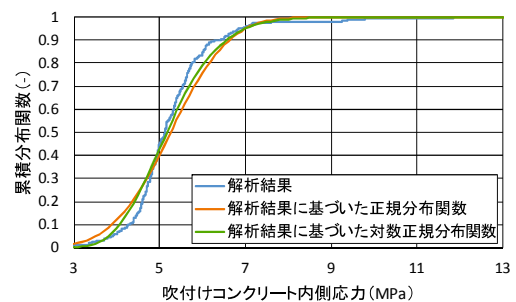
(a) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.09



(b) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.18

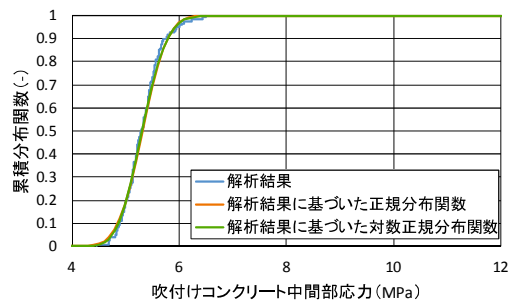
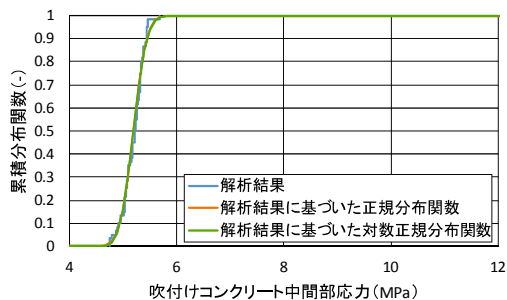


(c) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.44

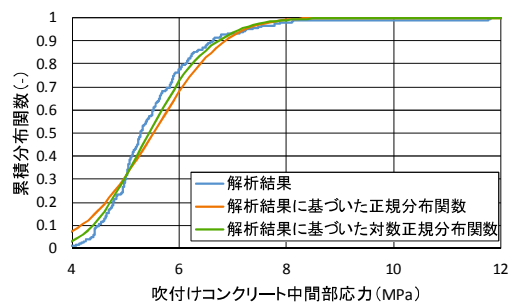
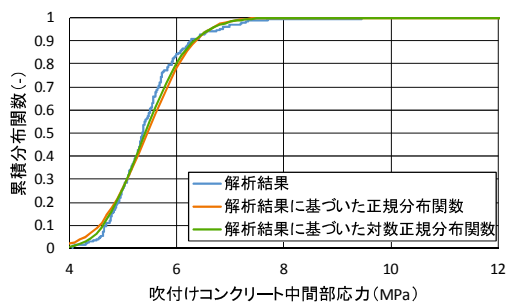


(d) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.89

図4-38 吹付けコンクリート内側応力の累積度数と確率分布関数

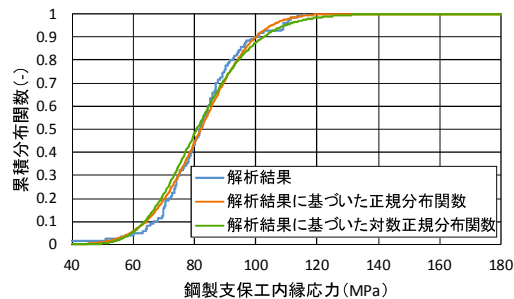
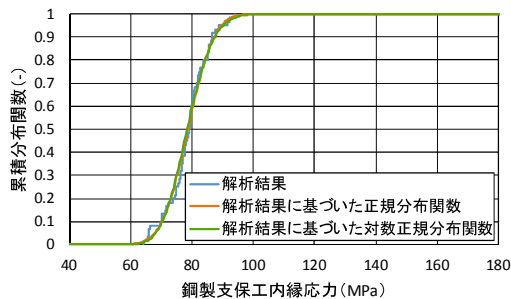


(a) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.18

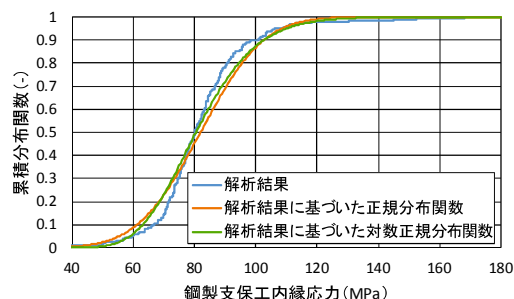
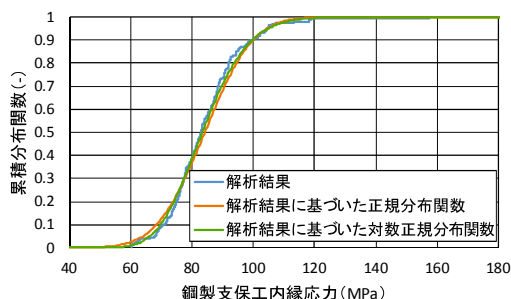


(c) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.89

図 4-39 吹付けコンクリート中間部応力の累積度数と確率分布関数



(a) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.18



(c) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均/トンネル直径=0.89

図 4-40 鋼製支保工内縁応力の累積度数と確率分布関数

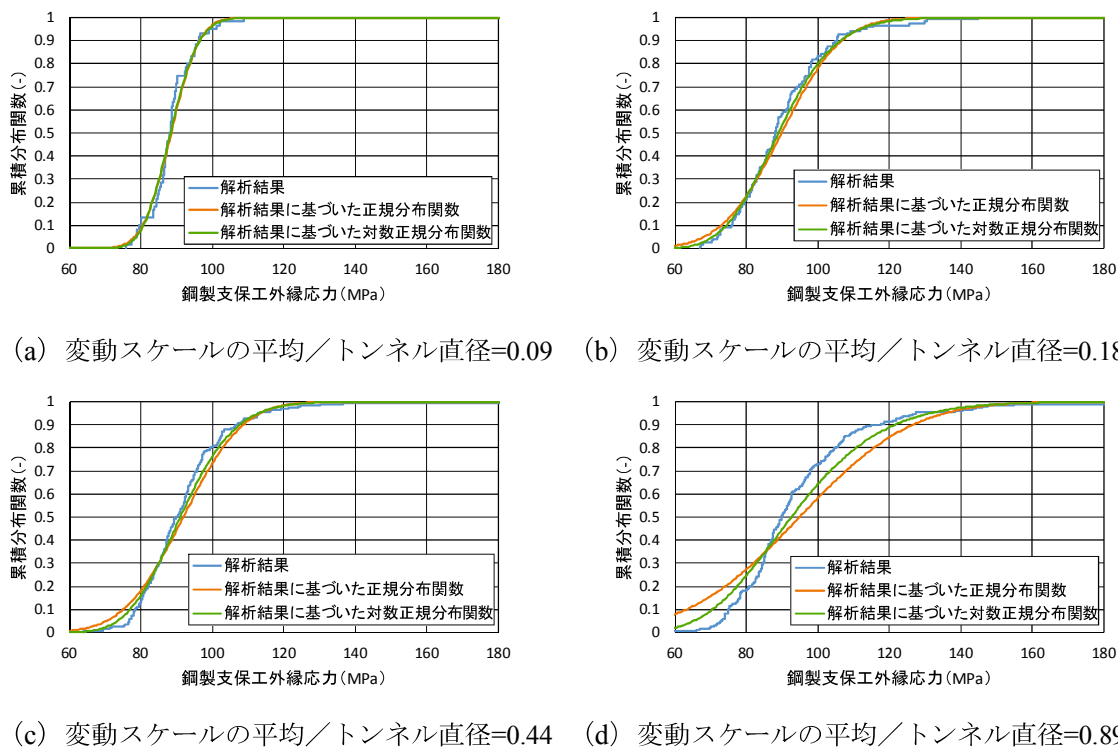


図 4-41 鋼製支保工外縁応力の累積度数と確率分布関数

表 4-9 各支保工応力の累積度数と各確率分布関数の比較結果

変動スケールの平均 /トンネル直径(-)	支保工応力	累積度数と正規分布関数 との差の最大値	累積度数と対数正規分布関数 との差の最大値	有意水準5% の限界値
0.09	吹付けコンクリート内側応力	0.074	0.085	0.176
	吹付けコンクリート中間部応力	0.081	0.087	
	鋼製支保工内縁応力	0.072	0.087	
	鋼製支保工外縁応力	0.149	0.135	
0.18	吹付けコンクリート内側応力	0.123	0.102	0.124
	吹付けコンクリート中間部応力	0.052	0.047	
	鋼製支保工内縁応力	0.068	0.091	
	鋼製支保工外縁応力	0.104	0.077	
0.44	吹付けコンクリート内側応力	0.071	0.049	0.096
	吹付けコンクリート中間部応力	0.104	0.077	
	鋼製支保工内縁応力	0.076	0.054	
	鋼製支保工外縁応力	0.112	0.079	
0.89	吹付けコンクリート内側応力	0.126	0.086	0.096
	吹付けコンクリート中間部応力	0.116	0.082	
	鋼製支保工内縁応力	0.106	0.095	
	鋼製支保工外縁応力	0.160	0.104	

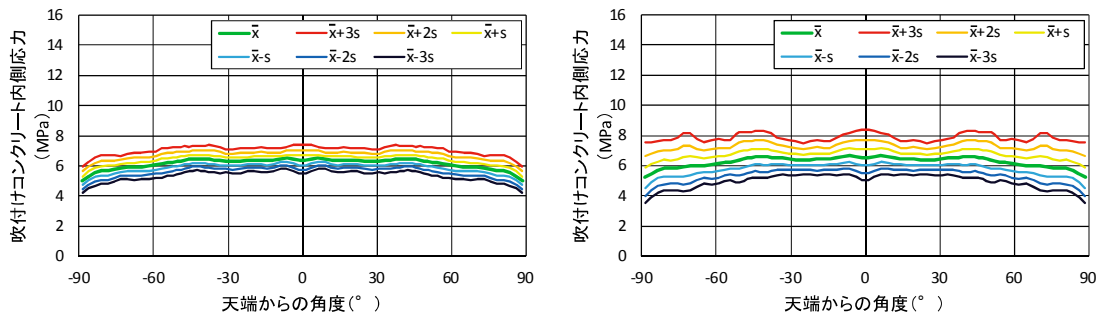
分布関数との差の最大値と有意水準 5%の限界値は、表 4-9 に示すような結果となった。表 4-9 中の黄色で塗られたケースは、支保工応力の累積度数と各確率分布関数との差の最大値が有意水準 5%の限界値を超過し、適用した確率分布関数が有意水準 5%で妥当でなかったケースである。表 4-9 から、正規分布関数で検定を実施したケースでは、変動スケールの平均/トンネル直径が大きくなるに従い有意水準 5%で妥当であるケースが減少することがわかる。つまり、解析から得られた支保工応力のばらつきは、正規分布で評価することが難し

いといえる。一方、対数正規分布関数で検定を実施したケースでは、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなったとしても有意水準 5%で妥当であるケースが多く、有意水準 5%で妥当でないケースも少ないことがわかる。つまり、本解析（変動スケールの平均／トンネル直径が 0.09～0.89 のケース）から得られる支保工応力のばらつきは、対数正規分布でおおよそ近似できることがわかった。そこで、本研究では、対数正規分布を用いて解析結果（支保工応力）のばらつきの評価を行うこととした。

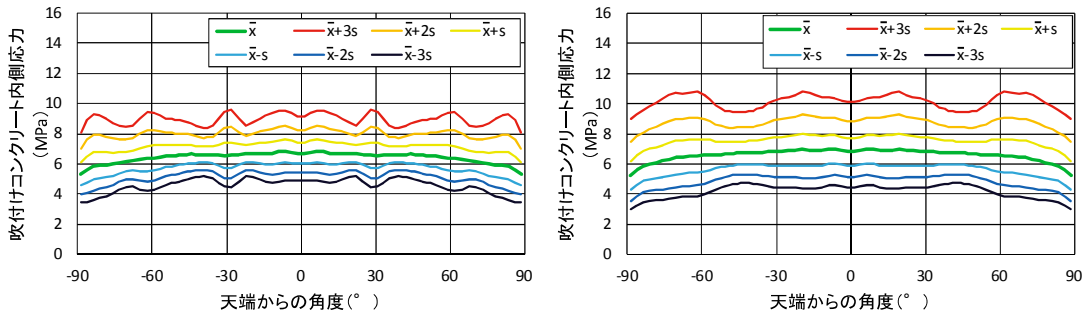
続いて、総計 580 ケース（解析モデルを左右入れ替えたケースを含む）のすべての解析ケースを変動スケールの平均／トンネル直径別に対数正規分布を用いて、天端からの角度ごとに支保工応力の標本平均 (\bar{x}) および不偏標準偏差 (s) を算出し、 $\bar{x}\pm s$, $\bar{x}\pm 2s$, $\bar{x}\pm 3s$ として同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価した。その結果を図 4-42, 図 4-43, 図 4-44, 図 4-45 に示す。これらの図から明らかなように、変動スケールの平均／トンネル直径を大きくしても平均値ほどのケースもほぼ変化しないものの、支保工応力のばらつき範囲は徐々に広がることわかる。

また、図 4-43, 図 4-44, 図 4-45 のその範囲に B 計測結果を当てはめると、図 4-43 では B 計測結果がすべてのケースで $\bar{x}\pm 3s$ 内に 60%分布し、図 4-44 では B 計測結果が変動スケールの平均／トンネル直径=0.09, 0.18, 0.44, 0.89 で $\bar{x}\pm 3s$ 内にそれぞれ 0%, 40%, 40%, 40%分布し、図 4-45 では B 計測結果が変動スケールの平均／トンネル直径=0.09, 0.18, 0.44, 0.89 で $\bar{x}\pm 3s$ 内にそれぞれ 0%, 40%, 80%, 80%分布することがわかる。つまり、変動スケールの平均／トンネル直径が大きくなるにつれて、支保工応力のばらつき範囲 ($\bar{x}\pm 3s$) に B 計測結果が分布する割合が大きくなることわかる。以上の結果を踏まえると、事前調査から地山物性値の確率分布と変動スケールのばらつき範囲とその平均を設定し、それらを基に地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロシミュレーションを実施し、その結果に対して確率分布関数を用いると、支保工に作用する応力の変動量のある程度予測できる可能性があると考えられる。

一方で、350m 西連絡坑道（図 4-3 参照）において、一軸圧縮強さと明瞭な相関がみられるエコーチップ反発硬度³⁰⁾の変動スケールの平均が 1.93m（変動スケールの平均／トンネル直径=0.43）であった⁷⁾ことを考えると、対象現場における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響については、図 4-42～図 4-45 に示す変動スケールの平均／トンネル直径=0.44 時程度の支保工応力のばらつきを考慮する必要があると考えられる。しかしながら、変動スケールの平均／トンネル直径=0.44 時の支保工応力のばらつきを考慮したとしても、図 4-44 (c) に示す 350m 調査坑道で得られた B 計測結果の局所的な増加は支保工応力のばらつき範囲 ($\bar{x}\pm 3s$) に分布しないことがわかる。したがって、図 4-44 に示す 350m 調査坑道で得られた B 計測結果の局所的な増加は、地山物性の不均質性の観点から考えるとかなり特異なケースであることがわかった。本検討により、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施することでこのような特異なケースをある程度予測できることがわかったが、トンネル構造物の重要度、使用性、安全性を考慮に入れた上で、このような局

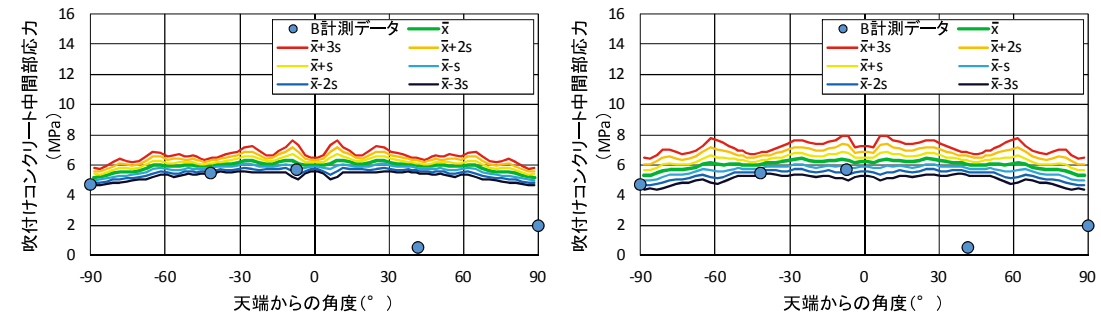


(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.18

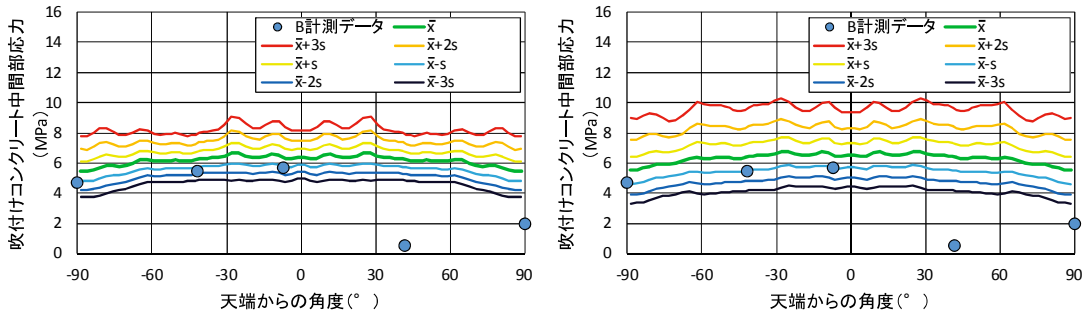


(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.89

図 4-42 吹付けコンクリート内側応力の平均と標準偏差に基づくばらつきの評価



(a) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.09 (b) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.18



(c) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.44 (d) 変動スケールの平均／トンネル直径=0.89

図 4-43 吹付けコンクリート中間部応力の平均と標準偏差に基づくばらつきの評価

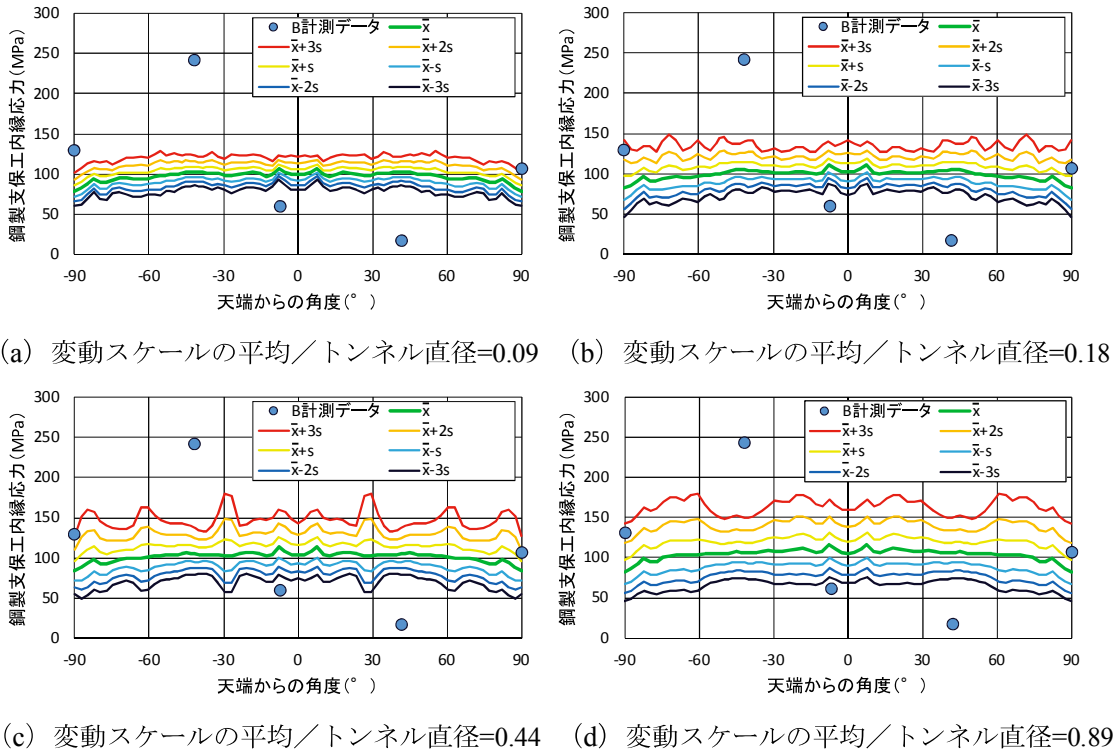


図 4-44 鋼製支保工内縁応力の平均と標準偏差に基づくばらつきの評価

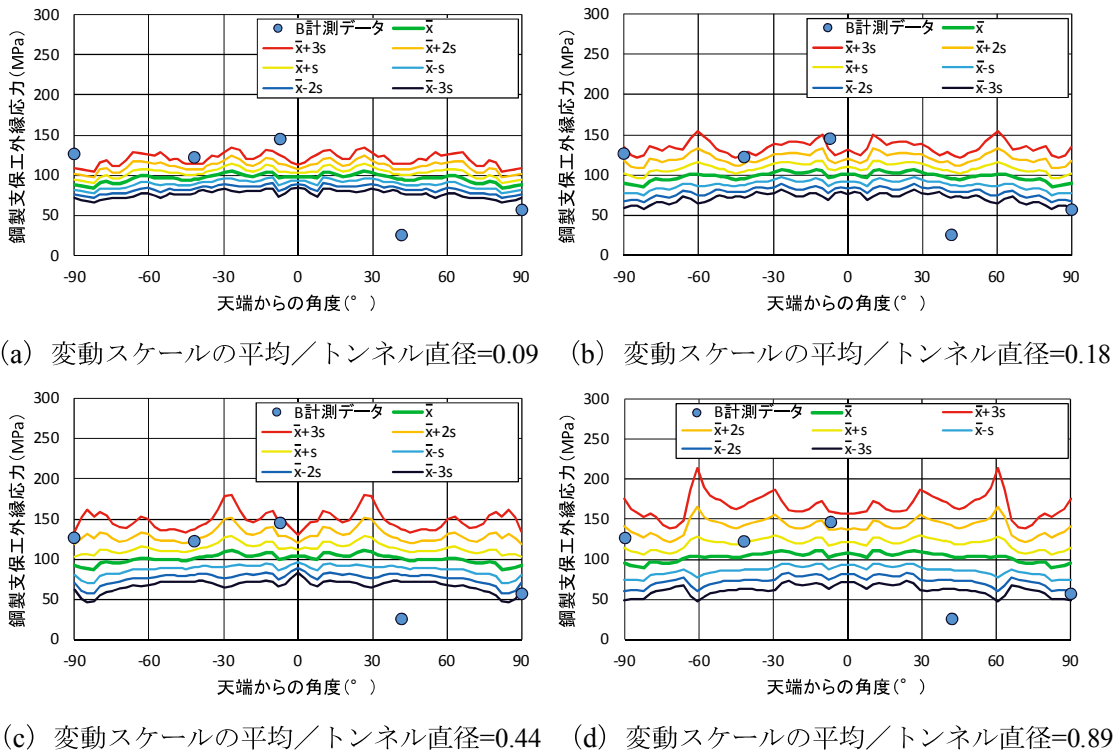


図 4-45 鋼製支保工外縁応力の平均と標準偏差に基づくばらつきの評価

所的な応力に対してどの程度の余裕度をとるかは非常に重要な課題と考えられる。しかしながら、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施することで支保工に作用する局所的な応力を統計的に説明することができれば、安全性などに関する余裕度をその確率に基づいて定めることができ、安全性と経済性のバランスのとれた支保設計が実施できる可能性があると考えられる。

4. 6. 結論

本章では、まず幌延深地層研究計画で得られた現場試験データを用いて第3章と同様な方法によって同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、実際に得られている350m調査坑道の支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討した。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行った。以下に、その得られた知見を示す。

- 1) 本章で実施した地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析により、現場計測で得られたような支保工応力の局所的な増加が、地山物性の不均質性の観点から予測できることがわかった。また、そのような支保工応力の局所的な増加を再現するには、現場計測実施位置では 0.44~0.89 の変動スケールの平均/トンネル直径を考慮する必要があることがわかった。
- 2) 支保工応力を取得した坑道において、一軸圧縮強さと明瞭な相関がみられるエコーチップ反発硬度の水平方向データを整理した結果、変動スケールの平均は 1.93m (変動スケールの平均/トンネル直径=0.43) であった。1)と同程度の値を得たことから、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターになりうることがわかった。
- 3) トンネル掘削解析から得られた支保工応力のばらつきを正規分布関数と対数正規分布関数を用いて評価した結果、変動スケールの平均/トンネル直径が 0.09~0.89 であれば、そのばらつきを対数正規分布でおおよそ近似できることがわかった。
- 4) 対数正規分布を用いてトンネル掘削解析から得られた支保工応力のばらつきを評価した結果、350m 調査坑道の支保工応力計測結果の局所的な増加は、地山物性の不均質性の観点から考えるとかなり特異なケースであることがわかった。このような局所的な応力に対してどの程度の余裕度をとるかが今後の重要な課題と考えられる。

参考文献

- 1) (編) 花室孝広：幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2015-017, 2015.
- 2) 森岡宏之, 山崎雅直, 松井裕哉, 尾留川剛, 山口雄大：幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計）, JAEA-Research 2008-009, 2008.
- 3) 森岡宏之, 山口雄大, 舟木泰智, 尾留川剛：幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム, JAEA-Research 2007-050, 2007.
- 4) 山崎雅直, 山口雄大, 舟木泰智, 藤川大輔, 津坂仁和：幌延深地層研究計画における水平坑道掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム, JAEA-Research 2008-068, 2008.
- 5) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044, pp.385-406, 2007.
- 6) 南出賢司, 矢吹義生, 名合牧人, 萩原健司, 本島貴之, 森本勤, 工藤元, 捻金礎人, 橋本祐太, 青柳和平, 亀村勝美：初期地圧の異方性を有する堆積軟岩における周回坑道の支保設計について, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, VI-162, pp.323-324, 2014.
- 7) 青柳和平, 川手訓：幌延深地層研究計画 平成 25 年度地下施設計測データ集, JAEA-Data/Code 2015-017, 2015.
- 8) 土木学会編：2007 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕, p.28, 2007.
- 9) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針, pp.338-339, 1996.
- 10) 土木学会編：2007 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕, p.162, 2007.
- 11) 大野宏和, 武田匡樹, 松岡 稔幸：深層ボーリング孔を利用した地質学的調査および力学試験データ集(HDB-1~11 孔), JAEA-Data/Code 2015-021, 2016.
- 12) 舟木泰智, 常盤哲也, 石井英一, 羽出山吉裕, 松尾重明, 津田和康, 小泉朗, 石川泰己, 大條裕一, 杉山和稔：幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング(PB-V01 孔)調査報告書; 地質調査, JAEA-Data/Code 2008-013, 2008.
- 13) 青柳和平, 櫻井彰孝, 丹生屋純夫：幌延深地層研究センターの 350m ポンプ座における初期地圧測定, JAEA-Data/Code 2015-010, 2015.
- 14) Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (伊藤学, 亀田弘行訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎, pp.274-277, 丸善, 1977.
- 15) 青柳和平, 石井英一, 近藤桂二, 津坂仁和, 藤田朝雄：幌延深地層研究所における三軸圧縮試験による岩石強度特性の検討, JAEA-Research 2015-001, 2015.
- 16) 例えば, 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創：幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), JNC-TJ1400 2002-010, 4 章, pp.26-27, 2002.

- 17) 例えば, 櫻井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集, No.337, pp.137-145, 1983.
- 18) Cundall, P. A. and Board, M. : A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Programs, Proc. of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp.2101-2108, 1988.
- 19) 北條明, 中村真, 打田靖夫, 櫻井春輔: 不連続性岩盤におけるロックボルトの設計法について, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.143-153, 1996.
- 20) 蔣宇静, 江崎哲郎, 横田康行: 軟岩地山トンネルの安定におけるロックボルトの力学的作用効果, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.19-31, 1997.
- 21) 例えば, 熊坂博夫: 地山の不均質性の分布スケールがトンネル周辺の応力状態に及ぼす影響について, 土木学会第60回年次学術講演会概要集, 3-239, pp.477-478, 2005.
- 22) Nie, X., Huang, H., Liu, Z. and Lacasse, S. : Scale of Fluctuation for Geotechnical Probabilistic Analysis, Proc. the 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (5th ISGSR), Rotterdam, 2015.
- 23) Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (伊藤学, 亀田弘行訳) : 土木・建築のための確率・統計の基礎, pp.229-232, 丸善, 1977.
- 24) 中山雅, 澤田純之, 佐藤治夫, 杉田裕: 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性—250m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, JAEA-Research 2012-023, 2012.
- 25) 土木学会編: 2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], p.341, 2007.
- 26) 小池真史, 田口敬介, 大島基義, 青木智幸, 田村武: トンネル掘削解析の高度化, 大成建設技術センター報, 第42号, pp.25-1-25-9, 2009.
- 27) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖: 幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-3 孔), JNC-TJ5420 2004-003, 2003.
- 28) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一: 幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-6,7,8) のうち HDB-6 孔, JNC-TJ 5400 2005-004, 2004.
- 29) 谷本親伯, 畠昭治郎: 切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本的概念, 土木学会論文報告集, No.325, pp.93-106, 1982.
- 30) 津坂仁和: 堆積軟岩における立坑掘削の内空変位計則に基づく岩盤挙動分類の提案, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.181-192, 2010.

第5章

結論

5. 1. 本研究のまとめ

コンピュータの発達と数値計算技術の向上により、現在、数値解析は様々な分野で活用されている。トンネルなどの地下構造物の分野においても、トンネルの設計などを目的として数値解析が用いられる場合が多々ある。しかしながら、トンネルの設計時に数値解析を用いたとしても、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想をはるかに超える挙動が生じ、人身事故などの発生を余儀なくすることもある。このような困難を克服するために、トンネルなどの地下構造物の分野においては、不連続体と連続体の観点から、地山の不連続性や異方性を考慮した地山のモデル化が積極的に行われ、それらが地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が数多く実施されてきた。

その一方で、地山は、天然材料であるがゆえに同一地層内においても地山物性が空間的にばらつき（不均質性）を有しているという特徴も持っている。この特徴は、不連続体の範疇で解析しうる地山の場合、不連続面に起因する挙動が卓越することから問題となることが少ないが、連続体の範疇で解析しうる地山の場合は、地山物性の不均質性に依存した挙動となり、構造物の安定性などに問題を及ぼす場合がある。しかしながら、トンネルなどの地下構造物の分野では、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合であったとしても、地山が本来有する同一地層内における地山物性の不均質性を考慮して、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関する予測・評価が行われた例は非常に少ないのが現状である。それに加え、実設計において連続体解析を用いる場合、地山を均質と仮定できる条件についてはあまり議論がなされていないにも関わらず、地山物性の不均質性はモデル化に反映せず、地山の各地層を均質な材料と仮定するのが一般的である。そのため、現状の連続体解析による地下構造物の設計は、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響に関するリスク評価を十分にできていないと考えられる。したがって、連続体の範疇で解析しうる地山を取り扱う場合の数値解析による地下構造物の設計をより高度なものとし、施工時の安全性などを適切に確保するためには、トンネルなどの地下構造物の分野においても、地山が本来有する地山物性の不均質性を考慮し、地山物性の不均質性がトンネルなどの地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していく必要があると考えられる。

上述したような背景を鑑み、本論文では、地山物性の不均質性が地下構造物の挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくための基礎的な知見を得ることを目的とし、地山物性の不均質性を考慮した連続体解析を用いて、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の地山

と支保工の挙動に及ぼす影響に関する基礎的研究を行った。以下に、本論文で実施した各検討とそれにより得られた結論を要約する。

まず、本論文では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の变形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られた地中変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行った。そして、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる条件について検討した。その結果、地山物性の不均質性に関するパラメータである変動スケールの平均/トンネル直径が 0.09 以下であれば、トンネル壁面の挙動が均質な地山と同様な挙動に近づき、不均質な地山を大域的には均質と仮定できることがわかった。一方で、 $0.09 < \text{変動スケールの平均/トンネル直径} \leq 0.86$ の場合、トンネル壁面の挙動が均質な地山の挙動と傾向が異なり、不均質な地山を均質と仮定することが難しいことがわかった。以上から、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなることがわかった。

次に、幌延深地層研究計画で得られた現場試験データを用いて同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロシミュレーションを実施し、現場で実際に得られている支保工応力計測結果の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討した。その結果、現場で得られたような支保工応力計測結果の局所的な増加が、地山物性の不均質性を考慮した解析から予測できることが示され、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターになりうることがわかった。また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行った。その結果、支保工応力計測結果の局所的な増加は、地山物性の不均質性の観点から考えるとかなり特異なケースであることがわかった。このような局所的な応力に対してどの程度の余裕をとるかが今後の重要な課題であると考えられた。

本論文で得られた結論を各章毎に要約する。

【第1章 序論】

本章では、数値解析による地下構造物の設計の現状とその課題について述べ、本研究の目的と概要およびその構成を示した。

【第2章 既往の研究】

本章では、トンネルなどの地下構造物が建設される地山の力学的な挙動をモデル化するための基本的な考え方を概説し、その考えに基づき提案されている代表的な数値解析手法を例示した。そして、従来、トンネルなどの地下構造物の分野において着目されることが少なかった地山物性の不均質性を考慮した地山のモデル化とその解析に関する既往研究について述べた。

【第3章 トンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる条件に関する検討】

本章では、トンネル掘削解析を行う際に、どの程度の地山物性の不均質性であれば地山を均質と仮定してもよいかを明らかにすることを目的として、同一地層内における地山の変形特性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、それより得られた地中変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行った。そして、これらの解析結果のばらつきや違いを評価することにより、同一地層内におけるトンネル掘削解析において不均質な地山を均質と仮定できる条件について検討した。その結果、地山物性の不均質性に関するパラメータである変動スケールの平均／トンネル直径が0.09以下であれば、トンネル壁面の挙動が均質な地山と同様な挙動に近づき、不均質な地山を大域的には均質と仮定できることがわかった。一方で、 $0.09 < \text{変動スケールの平均} / \text{トンネル直径} \leq 0.86$ の場合、トンネル壁面の挙動が均質な地山の挙動と傾向が異なり、不均質な地山を均質と仮定することが難しいことがわかった。以上から、トンネル掘削時における地山物性の不均質性がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなることがわかった。

【第4章 地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響に関する検討】

本章では、まず幌延深地層研究計画で得られた現場試験データを用いて第3章と同様な方法によって同一地層内における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析のモンテカルロシミュレーションを実施し、実際に得られているトンネルの現場計測結果（トンネル支保工応力）の局所的な増加を地山物性の不均質性の観点から予測できるかを検討した。その結果、現場計測で得られたような支保工応力の局所的な増加が、地山物性の不均質性を考慮した解析から予測できることが示され、地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を予測・評価していくためには、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが

重要なファクターになりうることがわかった。

また、トンネル掘削解析から得られる支保工応力のばらつきを統計処理して同一地層内における地山物性の不均質性がトンネル支保工応力に及ぼす影響を評価することにより、支保工応力計測結果の局所的な増加に対し統計的な評価を行った。その結果、支保工応力計測結果の局所的な増加は、地山物性の不均質性の観点から考えるとかなり特異なケースであることがわかった。このような局所的な応力に対してどの程度の余裕をとるかが今後の重要な課題であると考えられた。

5. 2. 今後の課題と展望

本論文では、確率分布に従う地山物性値を与える要素群の広さを変化させる方法によって地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の地山と支保工の挙動に及ぼす影響に関する研究を行った。これにより、トンネル掘削時において地山物性の不均質性を取り扱う場合、トンネル直径に対する変動スケールの大きさが重要なファクターとなりうるという知見を得ることができた。しかしながら、本論文における地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析は、地山物性の不均質性（すなわち、地山物性値の確率分布および変動スケールのばらつき範囲とその平均）を簡便に捉えたものであり、地山物性の不均質性がトンネル掘削時の地山と支保工の挙動に及ぼす影響を正確に把握できているとは言い難い。以上の点を踏まえ、今後の課題と展望を以下に挙げる。

- (1) 地山物性の不均質性をより把握するために、地山物性値の固有変動性（変動スケールのばらつき範囲とその平均）の調査を行う。
- (2) 実際の地山物性値の固有変動性を連続体解析に考慮できる方法について検討する。
- (3) 地山物性の不均質性がトンネル掘削解析結果に及ぼす影響を求めて現場計測結果との比較を多く行い、解析モデルの妥当性についてより詳細に検証する。
- (4) 地山物性の不均質性がトンネルの安定性に及ぼす影響を定量的に評価する方法について検討し、その評価方法の妥当性について検証する。

謝辞

本論文は、筆者が山口大学大学院理工学研究科 博士前期・後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。本研究の遂行および研究成果をまとめるにあたり、多くの先生方、先輩、同級生、後輩から御指導と御支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科 進士 正人 教授には、指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、熱心なご指導を賜りました。ここに、深謝の意を表します。

山口大学大学院創成科学研究科 清水 則一 教授、山口大学大学院創成科学研究科 麻生 稔彦 教授、山口大学大学院創成科学研究科 鈴木 素之 教授ならびに山口大学大学院創成科学研究科 吉武 勇 准教授には、ご多忙な中、副査として御助言を戴くとともに、本論文の細部にわたり丁寧な御指導を賜りました。ここに、感謝の意を表すとともに、御礼申し上げます。

元清水建設株式会社技術研究所 熊坂 博夫 博士には、本研究の核となった発想を使用させて戴くとともに、本研究に対して貴重な御助言を数多く賜りました。また、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター 青柳和平 博士には、現場データを提供して戴くとともに、本研究に対して有益な御助言を数多く賜りました。ここに、同氏に対して心より感謝申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科 中島 伸一郎 准教授には、研究で行き詰る度に相談に乗って頂くとともに、研究の指針を示して頂きました。また、山口大学大学院創成科学研究科 林 久資 助教授には、本研究に対して御助言を頂くとともに、本論文をまとめる際にご支援を頂きました。ここに、同氏に対して厚く御礼申し上げます。

松江工業高等専門学校環境・建設工学科長荒尾慎司教授を始めとする松江工業高等専門学校環境・建設工学科の教職員の皆様には、本論文の作成にあたり、多大なる御支援と御激励を頂きました。ここに、松江工業高等専門学校環境・建設工学科の教職員の皆様に対して深く御礼申し上げます。

西松建設株式会社 大谷 達彦 博士、中電技術コンサルタント株式会社 石田 滋樹 博士、株式会社オリエンタルコンサルタンツグローバル 阿部 玲子 博士、ドボクリエイト株式会社 森本 真吾 氏ならびに中電技術コンサルタント株式会社 岸田 展明 博士を始めとする同研究室出身の先輩諸氏には、学位取得に向けての暖かい御助言、御激励を頂きました。ここに、同研究室出身の先輩諸氏に対して深く感謝いたします。また、同研究室において日夜共に過ごし、切磋琢磨しながら励ましあった先輩諸氏、同級生諸氏ならびに後輩諸氏にも感謝申し上げます。

本論文は、数多くの方々の御指導と御支援がなければ成し遂げられませんでした。あらためて皆様に心より感謝申し上げます。最後になりましたが、長年にわたって私の研究活動を経済面のみならず精神面からも支え励ましてくれた両親と姉、祖母に心より深く感謝いたします。本当に心からありがとう。