

地山物性の空間的な変動が トンネル掘削時の支保工応力に及ぼす影響

岡崎 泰幸¹・林 久資²・森本 真吾³・進士 正人⁴

¹正会員 松江工業高等専門学校助教 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)
E-mail: okazaki@matsue-ct.jp

²正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 大学研究推進機構 C206)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁴フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

トンネルの支保設計で数値解析を用いる場合、地山物性の空間的な変動は考慮せず、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、現場計測結果が解析結果を大きく超える場合があるのが現状である。そこで、本研究では、トンネルの支保設計時の数値解析において地山物性の空間的な変動をどのように捉え考慮すれば、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測できるかを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基に検討した。その結果、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、トンネル掘削解析において地山物性値のばらつきを考慮することは当然であるが、地山物性が変動するスケールも考慮する必要があることがわかった。

Key Words: tunnel support design, heterogeneous rock mass, spatial variation, numerical analysis

1. はじめに

山岳トンネルの支保設計では、設計条件に特殊な条件(特殊な地山や断面形状など)があり、従来の実績に基づいた設計では設計検討が不十分となる場合、解析的手法が適用される。その際、近年では、地山と支保工がモデル化された有限要素法 (Finite Element Method ; FEM) や有限差分法 (Finite Difference Method ; FDM) などの連続体解析により、トンネル掘削時におけるトンネル周辺地山の挙動や支保工に発生する応力を予測・評価し、トンネルの構造安定性などを照査することが多い¹⁾。しかしながら、このような連続体解析をトンネルなどの地下構造物の設計に適用する場合、地山が本来有する地山物性(例えば、ヤング係数や一軸圧縮強さなど)の空間的な変動(図-1参照)、すなわち不均質性を無視して、地山の各地層(例えば、図-1中の地層1~3)を均質な材料と仮定するのが一般的である²⁾。また、その際の各地層の地山物性値は、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、山岳トンネ

ルの支保設計時に上述したような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大きく超える挙動

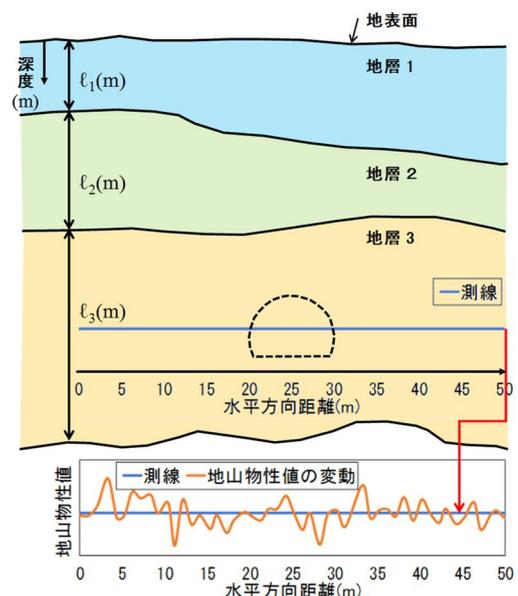


図-1 地山物性の空間的な変動のイメージ図

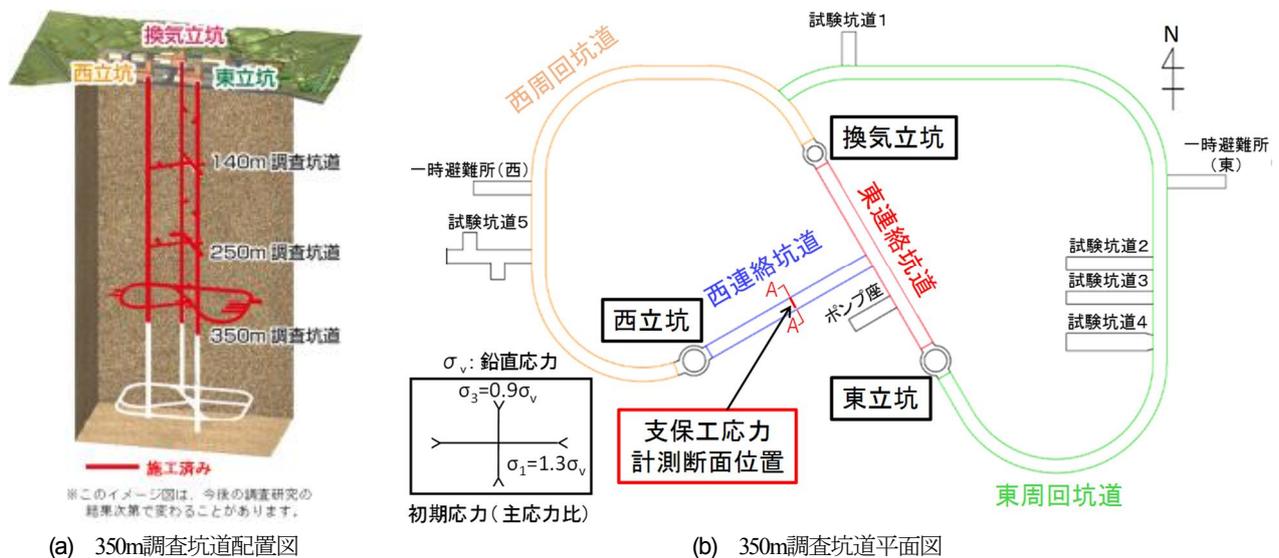


図-2 幌延深地層研究計画における 350m 調査坑道（一部抜粋および一部加筆修正）³⁾⁴⁾

が生じるケースもある。例えば、事前調査から得られた地山物性値がばらつきを有する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-2 参照）で取得された支保工応力計測結果は、計測断面の一部の箇所において事前の支保設計時の数値解析（地山物性を均質と仮定した連続体解析）結果を大きく超える結果を示している⁶⁾。したがって、トンネル施工時の安全性などをより適切に確保するためにも、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネル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。しかしながら、そのような影響を予測・評価しようとする研究⁷⁾は少なく、十分な検討が実施されていないのが現状である。

以上の理由から、著者ら⁶⁾は、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していく第一歩として、現場データから設定した確率分布に従う地山物性値を連続体解析の各正方形要素または要素群にランダムに与える方法（図-6 参照）に基づ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し、幌延深地層研究計画における 350m 調査坑道（図-2 参照）で取得された局所的な支保工応力の増大を地山物性の不均質性の観点から予測できうるかを検討した。そして、トンネル掘削径に対する正方形要素または要素群（すなわち、均質な正方形領域）のスケールの大きさによっては、同様な支保工応力の増大を予測できることを明らかとした（詳細は第 2 章参照）。しかしながら、著者ら⁶⁾の研究では、地山物性の空間的な不均質性を均質な領域のスケールの大きさのみで捉えていることから、実地山の地山物性の不均質性との関係性が定かではなく、どのような地山物性の不均質性を考慮することによって実現象に近い結果が予測できたかが明確ではないといった問題があった。

そこで、本研究では、トンネル掘削解析において地山物性の空間的な不均質性をどのように捉え考慮すれば、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測できるかをより明確にすることを目的とし、著者ら⁶⁾の既往研究における解析モデルの地山物性の空間的な変動を調査し、特に地山物性が変動するスケールに着目した整理を実施した。そして、地山物性が変動するスケールがどの程度であれば、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測できるかを求め、その際のスケールが実際の現場におけるスケールと整合するかを検討した。

本研究において幌延深地層研究計画における 350m 調査坑道に着目するのは、坑道建設前後に大変丁寧な地盤調査が実施され、様々な現場データが精度よく測定されているからである。

2. 対象地山の地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析⁶⁾

著者ら⁶⁾は、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していく第一歩として、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、幌延深地層研究計画における 350m 調査坑道（図-2 参照）で取得された局所的な支保工応力の増大を地山物性の不均質性の観点から予測できうるかを検討している。本章では、この著者らの既往研究（以下、本章では「既往研究」と称する。）の概要を示す。

(1) 対象とした現場と着目した計測結果の概要

幌延深地層研究センターでは、高レベル放射性廃棄物

表-1 対象現場の岩種と施工時の概要

岩種	新第三紀堆積岩 (塊状の珪質泥岩から成る稚内層)
支保工法	全断面工法を用いたNATM
掘削	自由断面掘削機または 大型ブレーカによる機械方式
掘削長	1.0m~1.5m

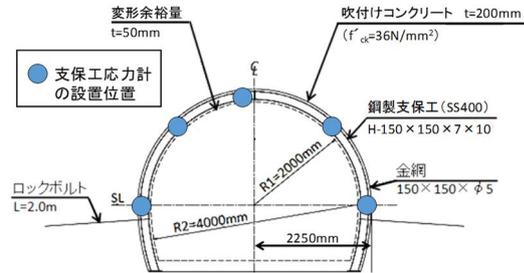
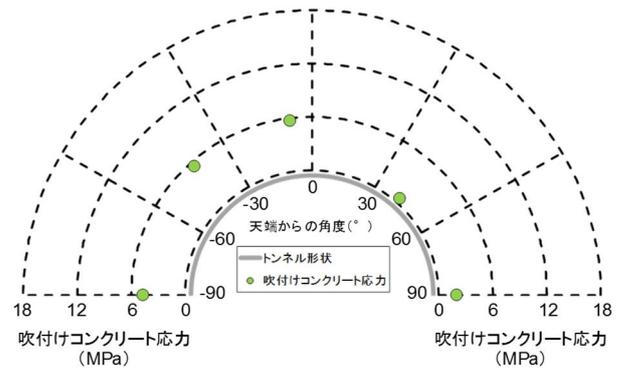


図-3 支保工応力計測断面位置 (A-A断面) の支保パターン (一部加筆修正)⁵⁾

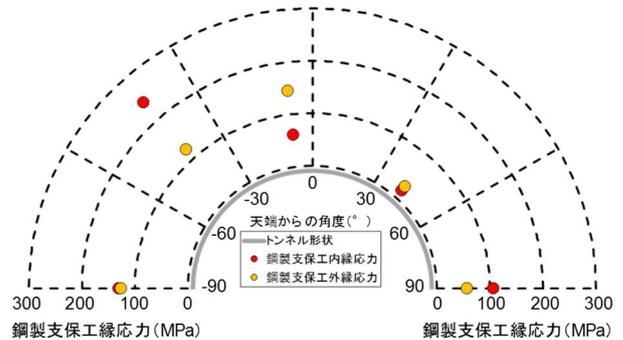
の地層処分技術の信頼性向上のための調査研究を実施している。既往研究では、幌延深地層研究センターにおいて幌延深地層研究計画を基に施工された 350m 調査坑道 (図-2 参照) を対象としている。対象とした現場の岩種と施工時の概要は表-1 に示すとおりである。ここで、対象とした地山のボーリングコアでの一軸圧縮強さは 8.9~34.9MPa であり、いわゆる軟岩に位置づけられると報告されている⁹⁾。

また、350m 調査坑道では、坑道掘削に伴う坑道の変形や支保工に発生する応力などの計測が実施されており、いくつかの坑道断面位置において支保工応力計 (コンクリート有効応力計、鋼製支保工応力計 (ひずみゲージ)) が設置されている。図-2(b) に示す支保工応力計測断面位置がその 1 つであり、既往研究ではこの坑道断面位置の支保工応力計測結果 (吹付けコンクリート応力、鋼製支保工内外縁応力) に着目している。その支保工応力計測断面位置における支保パターンと支保工応力計の設置位置は、図-3 に示すとおりである。ここで、図-2(b) に示す支保工応力計測断面位置の支保工応力計測結果のみに着目したのは、他の計測断面位置の周辺に坑道の交差部が存在していたためである。

図-2(b) に示す支保工応力計測断面位置の支保工応力計測結果 (応力値が収束した時点の値) を図-4 に示す。図-4 から、既往研究において着目した支保工応力計測結果は、支保工応力の計測箇所の一部 (特に、左肩部) において局所的に支保工応力が増大した結果が得られていることがわかる。このような局所的な支保工応力の増加が生じた要因としては、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。しかしながら、計測された地山内の初期応力分布 (図-2(b) 内参照) を与



(a) 吹付けコンクリート応力



(b) 鋼製支保工縁応力

図-4 支保工応力計測結果

え、地山物性を均質と仮定した解析を行ったとしても局所的に増加した支保工応力が得られないこと (図-9 参照)、支保工応力計測断面位置の壁面観察結果において不連続面 (割れ目) が少ない⁶⁾ ことから、偏圧や地山の不連続性による影響の可能性は少ないと考えられた。したがって、既往研究では、支保工応力計測結果の局所的な増大を地山物性の不均質性の影響と考え、地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析によってその増大を予測できうるかを検討している。

(2) トンネル掘削解析における諸条件

地山物性の不均質性を考慮したトンネル掘削解析には、有限差分解析コード FLAC3D¹⁰⁾ ver.5.0 の弾完全塑性解析 (破壊規準: モールクーロンの破壊規準) を用いている。以下に、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際の各種条件を示す。既往研究では、下記に示す各種条件にもとづき、トンネル掘削解析を実施している。

a) 解析領域と境界条件

図-4 に、解析領域と境界条件を示す。図中の D はトンネル掘削径である。また、奥行き方向の解析領域は 1m とし、トンネル掘削方向の変位を固定することで、平面ひずみ状態を仮定し、疑似二次元解析としている。

b) 解析モデル

図-5 に、解析モデルのトンネル周辺の拡大図と支保工

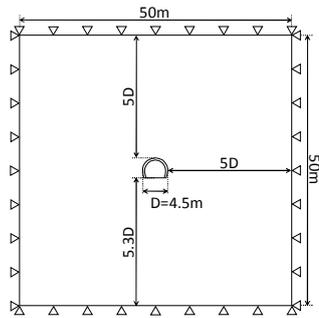
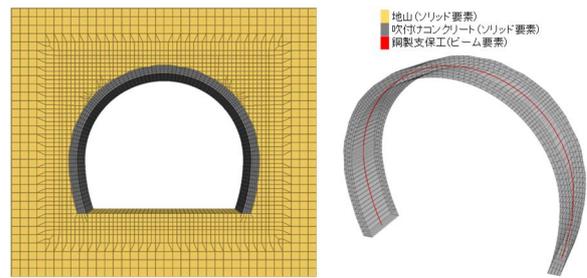
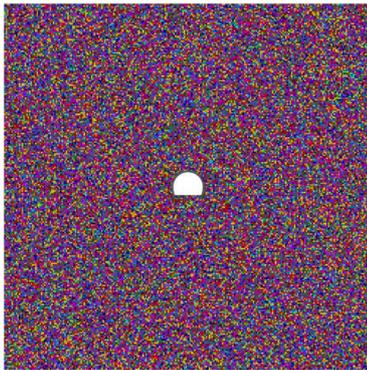


図-4 解析領域と境界条件⁹⁾

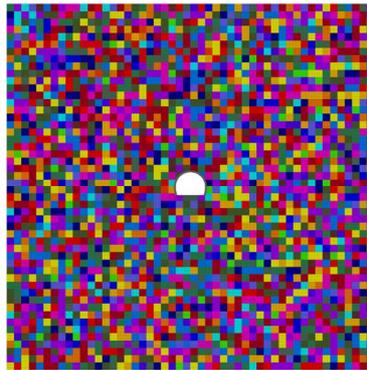


(a) トンネル周辺の拡大図 (b) 支保工モデル

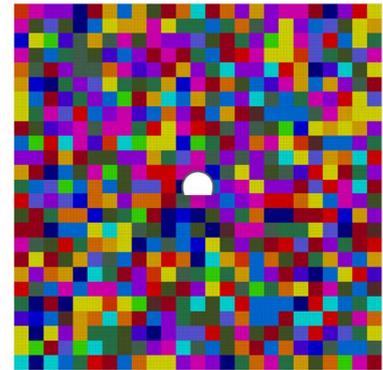
図-5 解析モデル拡大図⁹⁾



(a) 均質寸法：0.2m

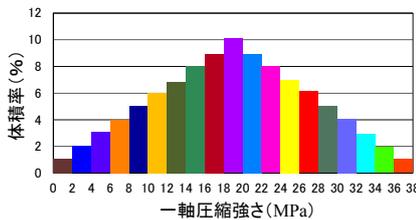


(b) 均質寸法：1.0m

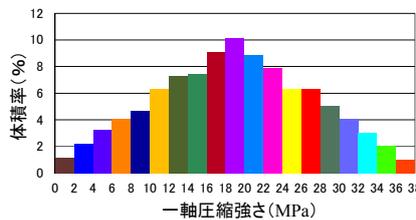


(c) 均質寸法：2.0m

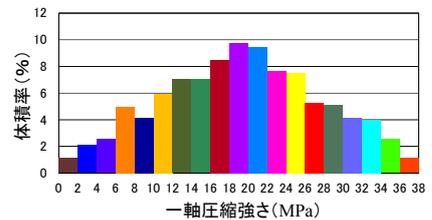
図-6 地山物性の不均質性を考慮した解析モデルの物性分布状態の例⁹⁾



(a) 均質寸法：0.2m



(b) 均質寸法：1.0m



(c) 均質寸法：2.0m

図-7 地山物性の不均質性を考慮した解析モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の例⁹⁾

モデルを示す。ここで、図-5に示すモデルのトンネル掘削領域と支保工モデルは、図-3の支保工応力計測断面位置の状況を模擬しモデル化したものである。また、この際、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ている(図-5参照)。一方、ロックボルトは、安全側の評価の観点から支保効果を期待しないこととし、解析上、ロックボルトのモデル化は行わないこととしている。

c) 地山物性の不均質性の設定と地山物性値の設定

既往研究では、熊坂⁹⁾などが提案している「確率分布に従う地山物性値を連続体解析の各正方形要素または要素群にランダムに与える方法」に基づいて、地山物性の空間的な不均質性を考慮しモデル化している。特に既往研究では、その正方形要素または要素群(すなわち、均質な正方形領域)のスケールの大きさを“均質寸法”と定義し、トンネル掘削径に対するその大きさを変化させ

ることによって異なる地山物性の空間的な不均質性を表現している。図-6に、既往研究で用いた地山物性の不均質性を考慮した解析モデルの例を示す。図中の着色は、後述する地山物性値の違いを表している。なお、既往研究では均質寸法を0.2, 1.0, 2.0m(トンネル掘削径Dに対して約0.04D~0.4D)と設定している(図-6参照)。

一方で、地山物性値の確率分布は、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⁾を基にして、図-7に示すような一軸圧縮強さの確率分布(階級の間中値である19個の一軸圧縮強さを用いた離散型の近似的な正規分布)としている。図-7は、実際に各均質寸法の解析モデルを作成した際の一軸圧縮強さの頻度分布の例である。ここで、図-7中の体積率とは、いわゆる頻度であり、各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である。なお、図

表-2 解析用地山物性値⁹⁾

物性値 ケース	一軸圧縮強さ (MPa)	分布確率 (%)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比 (-)
1	1.0	1.0	26.8	0.31	0.10	139.8	0.193
2	3.0	2.0		0.92	0.30	419.5	
3	5.0	3.0		1.54	0.50	699.2	
4	7.0	4.0		2.15	0.70	978.8	
5	9.0	5.0		2.77	0.90	1258.5	
6	11.0	6.0		3.38	1.10	1538.1	
7	13.0	7.0		4.00	1.30	1817.8	
8	15.0	8.0		4.61	1.50	2097.5	
9	17.0	9.0		5.23	1.70	2377.1	
10	19.0	10.0		5.84	1.90	2656.8	
11	21.0	9.0		6.46	2.10	2936.4	
12	23.0	8.0		7.07	2.30	3216.1	
13	25.0	7.0		7.69	2.50	3495.8	
14	27.0	6.0		8.31	2.70	3775.4	
15	29.0	5.0		8.92	2.90	4055.1	
16	31.0	4.0		9.54	3.10	4334.7	
17	33.0	3.0		10.15	3.30	4614.4	
18	35.0	2.0		10.77	3.50	4894.1	
19	37.0	1.0		11.38	3.70	5173.7	

表-3 支保工物性値⁹⁾

	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 ($f_{ck}=36\text{N/mm}^2$)
弾性係数 (MPa)	210000	解析ステップ ごとに増加
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^3)	1.620×10^{-5}	
要素種別	ビーム要素	ソリッド要素

-7における各一軸圧縮強さの体積率の着色は、図-6に示す各均質寸法の着色に対応している。図-7から、各均質寸法の解析モデルにおいて同様な一軸圧縮強さの頻度分布が設定できていることがわかる。一方で、弾完全塑性解析を実施する上で必要となる各地山物性値（ヤング係数、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角、引張強度）は、一軸圧縮試験¹¹⁾¹²⁾¹³⁾と三軸圧縮試験の結果¹⁴⁾から得られた一軸圧縮強さと各地山物性値との関係から表-2に示すように設定している。

既往研究では、上記に示した解析モデルを作成する際、各均質寸法に対して異なる乱数を発生させて作成しており、地山物性値の配列が異なる解析モデルを均質寸法0.2mで30ケース、均質寸法1.0mおよび2.0mでそれぞれ100ケース作成している。

d) 初期応力の設定

鉛直応力は土被り350m相当の応力（約5.4MPa）を作用させた。また、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東西、南北方向の応力場（図-2(b)内参照）から、掘削方向が西から南西方向に30°傾いていることを考慮して1.01としている。

e) 支保工物性値と掘削応力解放率の設定

解析に使用する支保工物性値は、幌延深地層研究計画の実施設計¹⁵⁾で用いられた表-3に示す支保工物性値を採用している。ただし、吹付けコンクリートの弾性係数は、実施設計¹⁵⁾と異なり、掘削の進行による時間経過を考慮している。加えて、既往研究における数値解析は、平面ひずみ状態を仮定した疑似二次元解析であるため、掘削応力解放率の設定を行っている。上記のような設定（掘削の経過日数と掘削応力解放率および吹付けコンクリートの弾性係数の関係）の詳細については、参考文献6)を参照されたい。

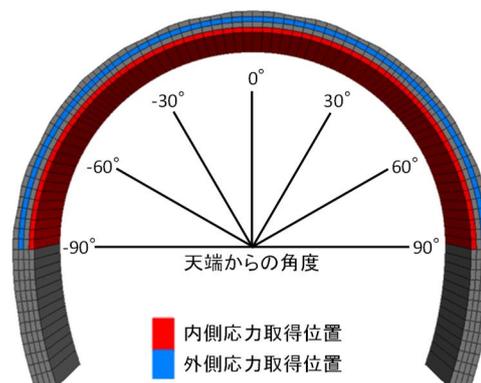


図-8 吹付けコンクリート覆工の応力取得位置⁶⁾

(3) 数値解析結果

a) 支保工応力の取得位置

解析結果の吹付けコンクリート覆工の応力取得位置を図-8に示す。ここで、支保工応力計（コンクリート有効応力計）の設置位置（図-3参照）は、吹付けコンクリート表面から地山方向に約140mmの位置であるため、既往研究では図-8に示すような青色の位置の吹付けコンクリート覆工の応力（最大圧縮応力）を取得している。加えて、最大圧縮応力が最大になると予測される図-8の赤色の位置の吹付けコンクリート覆工の応力も取得している。本論文では、図-8の青色の位置の吹付けコンクリート応力を“吹付けコンクリート外側応力”と呼び、図-8の赤色の位置の吹付けコンクリート応力を“吹付けコンクリート内側応力”と呼ぶ。一方、鋼製支保工縁応力については、解析後のビーム要素（図-5(b)参照）から得られる軸力と曲げモーメントから、内縁応力および外縁応力を算出している。

また、対象現場における支保工応力計の設置位置（図-3参照）が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ている。加えて、取得したデータは、図-8に示すように天端からの角度別に分けて整理した。

b) 現場計測結果と数値解析結果の比較

現場計測結果と数値解析結果の比較の一例を図-9に示す。図-9の各図の横軸は、図-8に示した天端からの角度

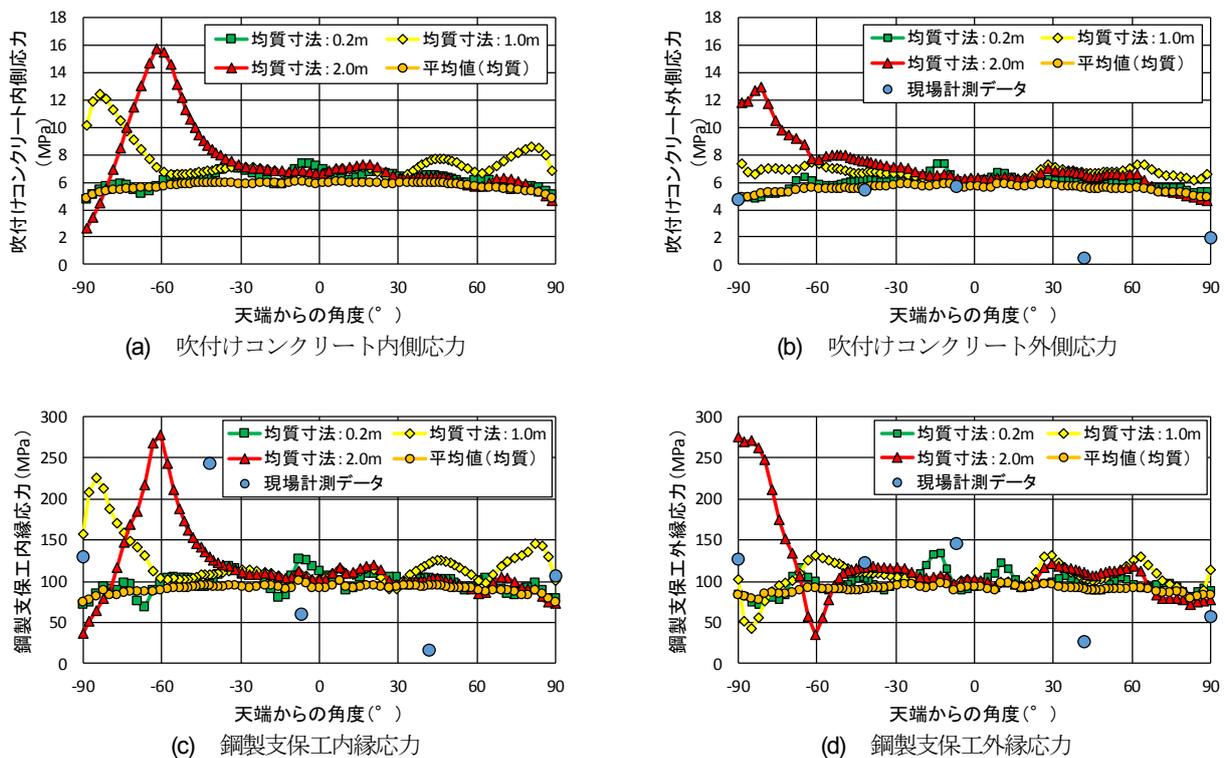


図-9 現場計測結果と数値解析結果の比較の一例⁹⁾

である。また、図-9に示す各均質寸法の解析結果は、各均質寸法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に示した支保工応力計測結果（図-9内の現場計測データ）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-2に示した解析用地山物性値の平均値である物性値ケース10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の解析結果である。

図-9から、トンネル掘削径に対して均質寸法が0.2mのケースおよび平均値（均質）のケースでは、ほぼ一定の応力が支保工全周にわたり発生しており、現場で計測されたような局所的な支保工応力の増大を再現できないことがわかる。一方で、トンネル掘削径に対して均質寸法1.0m～2.0mのケースでは、局部的に大きな支保工応力が発生しており、現場で計測されたような局所的な支保工応力の増大を再現できていることがわかる。したがって、現場で計測されたような局所的な支保工応力の増大は、本章で用いたような地山物性の不均質性を考慮した解析モデルでも十分表現できることがわかった。また、そのような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、1.0m～2.0m程度の均質寸法、つまりトンネル掘削径D（≒4.5m）に対して約0.2D～0.4D程度の均質寸法の不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施する必要があることがわかった。

3. 解析モデルにおける地山物性の空間的な変動の把握

第2章に示した著者ら⁹⁾の既往研究では、地山物性の空間的な不均質性を均質寸法の大きさのみで捉えていることから、どのような地山物性の不均質性を考慮することによって実現象に近い結果が予測できたかが明確ではない。そこで、本章では、著者ら⁹⁾の既往研究における解析モデルがどのような地山物性の不均質性を考慮しているかを明確にするために、解析モデル内の地山物性の空間的な変動を調査する。そして、その結果を踏まえ、どのような地山物性の空間的な変動であれば、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測できるかについて再検討する。

そこで、まず図-6の各均質寸法の解析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（特に、一軸圧縮強さ）を抽出し、地山物性値と水平方向距離の関係（すなわち、水平方向の地山物性の空間的な変動）を求めた。その結果を図-10に示す。ここで、鉛直方向の地山物性の空間的な変動を示さず、水平方向の地山物性の空間的な変動のみを示しているのは、本論文の解析モデルにおける地山物性値を与える要素群の形状が正方形であり、鉛直・水平方向ともに同様な地山物性の空間的な変動を示すためである。

図-10から、均質寸法の大きさを変化させることによって、異なる地山物性の空間的な不均質性を有する解析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。

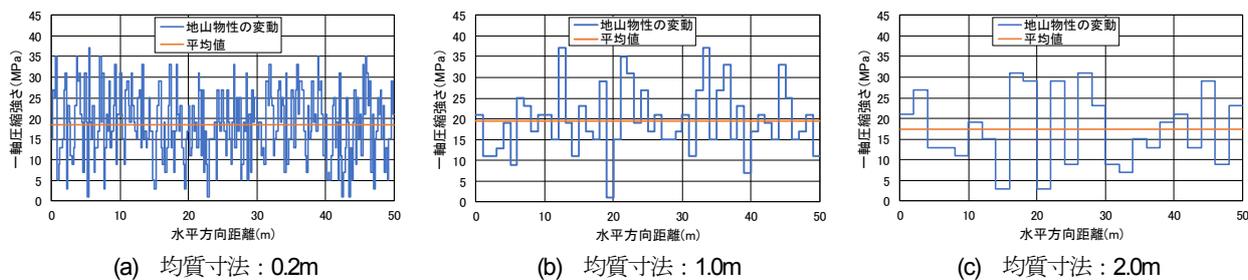


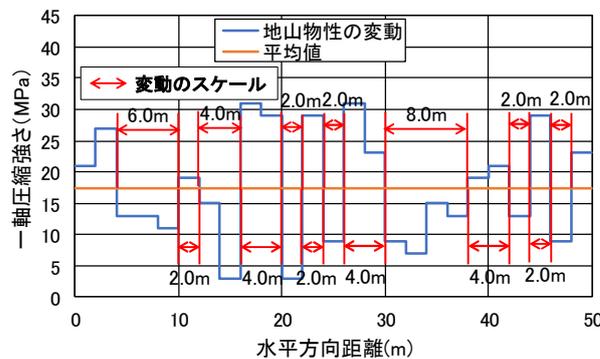
図-10 地山物性の不均質性を考慮した解析モデルにおける水平方向の地山物性の空間的な変動の例

特に、均質寸法の大きさを変化させることによって、地山物性が平均値を上下変動する際のスケールが変化していることがわかる。そこで、各均質寸法の解析モデルがどのような地山物性の空間的な変動を考慮しているかをより定量的に示すために、地山物性が平均値を上下変動する際のスケールに着目した整理を実施することとした。このような地山物性が平均値を上下変動する際のスケールは、特に基礎・土構造物の分野では、変動のスケール (Scale of Fluctuation) ¹⁶⁾ と定義されていることから、本論文でも同様に変動のスケールと定義することとする。

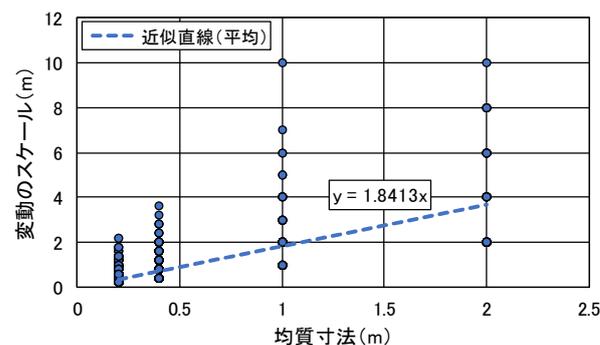
図-6の各均質寸法の解析モデルの任意の鉛直位置5箇所において、水平方向の各位置(要素)における地山物性値(特に、一軸圧縮強さ)を抽出し、図-11(a)に示すように変動のスケールを算出した。このように算出した変動のスケールと各解析モデルの均質寸法の関係を図-11(b)に示す。図-11(b)から、地山物性の変動のスケールのばらつき範囲とその平均は均質寸法の大きさによって変化していることがわかる。特に、変動のスケールの平均は均質寸法が大きくなるほど大きくなり、均質寸法の約2倍となることがわかる。すなわち、各均質寸法の解析モデルは、地山物性の変動のスケールの平均が均質寸法の約2倍となるモデルといえる。以上の結果と第2章の結果を踏まえると、350m調査坑道で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、約2.0m~4.0m程度の変動のスケールの平均、つまりトンネル掘削径D(=4.5m)に対して約0.4D~0.8D程度の地山物性の変動のスケールの平均を考慮したトンネル掘削解析を実施する必要があることがわかった。

4. 実現場における地山物性の空間的な変動の把握とその考察

第3章の検討により、350m調査坑道で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、約2.0m~4.0m程度の変動のスケールの平均を考慮したトンネル掘削解析を実施する必要があることがわかった。本章では、変動のスケールの平均を考慮したトンネル掘削解析を実施すれば、現場で取得されたような局所的な支



(a) 変動のスケールの算出例



(b) 変動のスケールと均質寸法の関係

図-11 地山物性の不均質性を考慮した解析モデルにおける変動のスケールの算出例と変動のスケールの値

保工応力の増大を予測できることをより明確に示すために、第3章で得られた変動のスケールの平均と実現場における変動のスケールの平均が整合するかについて検討する。

そこで、本章では、支保工応力を取得した350m西連絡坑道(図-2(b)参照)で得られているエコーチップ反発硬度の水平方向データ(図-12参照)¹⁷⁾に着目し、実現場における地山物性の変動のスケールの平均を算出することとした。ここで、エコーチップ反発硬度に着目したのは、エコーチップ反発硬度が一軸圧縮強さと明瞭な相関がみられる値であるためである¹⁸⁾。そして、図-12のデータに対して本論文の解析モデルと同様な補間の考え方であるゼロ次補間を用いて変動のスケールおよびその平均を算出した(図-13参照)。その結果、実現場における地山物性の変動のスケールの平均は1.8m~2.1m(トンネル掘削径Dに対して約0.4D~0.47D)となり、第3

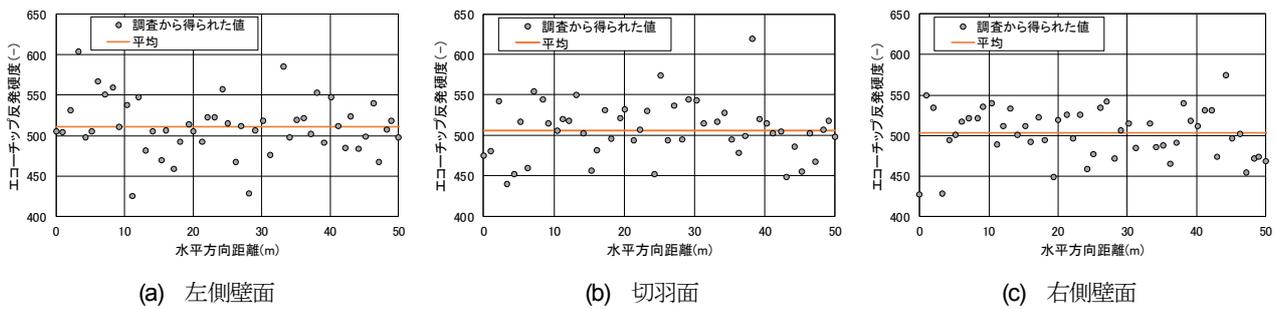


図-12 350m西連絡坑道における水平方向のエコーチップ反発硬度の空間的な変動

章の結果と同程度の値をとることがわかった。したがって、350m 調査坑道で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、トンネル掘削解析において地山物性値のばらつきを考慮することは当然であるが、変動のスケールも考慮する必要があることがわかった。すなわち、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくためには、地山物性の変動の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。一方で、事前のボーリング調査や施工中の切羽前方穿孔探査などから、地山物性の変動のスケールを得ることができれば、地山内の地山物性の不均質具合を評価する指標になりうることも考えられる。

本論文で着目した地山物性の変動のスケールは、トンネルの分野において着目されていないのが現状である。今後、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくためにも、地山内の地山物性の変動のスケールに関する調査を実施していく必要があると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、トンネル掘削解析において地山物性の空間的な不均質性をどのように捉え考慮すれば、350m 調査坑道で取得された局所的な支保工応力の増大を予測できるかを明らかにすることを目的とし、作成した地山物性の不均質性を考慮した解析モデルの地山物性の空間的な変動を調査し、特に地山物性の変動のスケールに着目した整理を実施した。そして、地山物性の変動のスケールがどの程度であれば、現場で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測できるかを求め、その際のスケールが実際の現場におけるスケールと整合するかを検討した。以下に、その得られた知見を示す。

- 1) 本論文で実施した地山物性の変動のスケールに着目した整理により、350m調査坑道で取得されたような局所的な支保工応力の増大を予測するためには、約2.0m～4.0m程度の変動のスケールの平均を

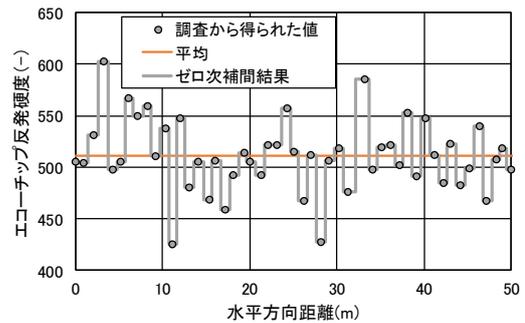


図-13 350m西連絡坑道における変動のスケールの算出例

考慮したトンネル掘削解析を実施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1.8m～2.1mであった。1)と同程度の値を得たことから、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価していくためには、地山物性の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。

本論文で着目した地山物性の変動のスケールは、トンネルの分野において着目されておらず、測定が試みられていないのが現状である。今後、地山物性の空間的な不均質性が及ぼす影響を予測・評価していくためにも、地山内の地山物性の変動のスケールを調査していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 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，pp.119-130，丸善，2006。
- 2) 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。
- 3) (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。
- 4) 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.
- 5) 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.
 - 6) 岡崎泰幸, 青柳和平, 熊坂博夫, 進士正人: トンネル掘削時のトンネル支保工応力に地山の不均質性が与える影響, 土木学会論文集 F1 特集号 (トンネル工学), Vol.72, No.3, pp. I_1-I_15, 2016.
 - 7) 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, 1969.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 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) 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.
 - 15) 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.
 - 16) 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)*, 2015.
 - 17) 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.
 - 18) 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.

(2019. 8. 9 受付)

THE EFFECT OF SPATIAL VARIATION OF GEOMECHANICAL PROPERTIES ON TUNNEL SUPPORT STRESS DURING TUNNEL EXCAVATION

Yasuyuki OKAZAKI, Hisashi HAYASHI, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

When using numerical analysis in tunnel support design, it is general to assume that each layer of the rock mass is homogeneous without considering spatial variation of geomechanical properties. Therefore, field measurement results may greatly exceed analysis results. So, in this study, In consideration of the spatial variation of geomechanical properties in the numerical analysis at the time of tunnel support design, it was examined whether the local increase of tunnel support stress measured in the field could be predicted. As a result, in order to predict the local increase of tunnel support stress measured in the field, it is necessary to consider not only the variation of geomechanical properties but also the scale of fluctuation of geomechanical properties.