

トンネル掘削解析において 地山の不均質性を考慮すべき条件

岡崎 泰幸¹・熊坂 博夫²・進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: v001wc@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

E-mail: h.kumasaka@shimz.co.jp

³正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

不均質性を潜在的に内包する地山にトンネル掘削解析を行う際、地山の不均質性はトンネル掘削時の地山挙動に影響を与える。しかし、不均質材料の配列状態に地山の力学特性は支配されるため、平均的な地山特性を事前にかつ定量的に評価することは容易ではない。本研究では不均質材料の変形特性が近似的に対数正規分布を有する掘削解析モデルを作成した。そして、トンネル掘削解析から得られる変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行い、平均的な地山の弾性係数や初期応力分布などを求めた。その結果、トンネル径に対する均質領域の比に着目して整理すると、逆解析から得られる弾性係数や初期応力分布は地山の平均値よりも大きくばらつくことがわかった。これらの結果から、トンネル掘削解析を行う際の地山の不均質性を考慮すべき条件を明らかにした。

Key Words : *inhomogeneous rock mass, numerical analysis, material properties, initial stress*

1. はじめに

山岳トンネルなど連続した地中構造物を建設する場合、トンネル建設予定箇所での弾性波探査などの物理探査や地質踏査・ボーリング調査などが実施されるが、事前調査の段階で十分な地質情報を得ることは難しい。その限られた情報から、標準設計を適用する場合や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、その結果を参考にトンネル設計(周辺地山の安定性評価と支保量的设计)を行う場合などがある。しかしながら、実際にトンネル掘削解析を実施する場合、地山は、本来、不均質であるにも関わらず、各地層毎に均質で様な物性を想定して実施されることが多い。

そのため、地山の不均質性が変形挙動などに与える影響に関して、数多くの研究がなされている。そのアプローチは大別して、不連続体と連続体の観点から実施されている。地山の不均質性を不連続体として捉える場合、岩盤の不連続面間に働く力やその不連続面によるメッシュの分割方法などが重要である。そこで、大西・河野¹⁾は、ポロノイ分割を用いた個別要素法による岩盤の挙動

解析を実施している。また、山下ら²⁾は、地下発電所建設時の現場計測結果に対し、不連続な変形挙動を個別要素法を用いて表現している。地山(岩盤)は不連続体であるため、不連続体として解析を実施することは正統なアプローチといえる。しかしながら、構造物の施工前にすべての不連続面を把握することは非常に難しいのが現状である。そこで、施工前の段階では、地山を連続体として捉える場合が一般的である。その場合、強度や変形特性などの不均質性や材料特性の異方性が考えられ、なおかつ地山材料の物性頻度分布も重要である。このような観点から、川本ら³⁾は、材料の強度特性のばらつきが正規分布であると想定した上で、有限要素法を用いてアースダムのすべり安全率へ及ぼす影響などを述べている。また、桜井・土居⁴⁾は有限要素法を用いて斜面の信頼性解析を実施し、斜面の破壊確率を提案している。さらに、近年では、不連続岩盤中に建設された地下発電所建設時の現場計測結果に対し、等価な連続体モデルを適用し、現場計測結果を表現する様々な等価連続体解析が提案されており、各解析手法の比較・検討がなされている⁵⁾。

このように、地山の不均質性に対し、数多くの解析的

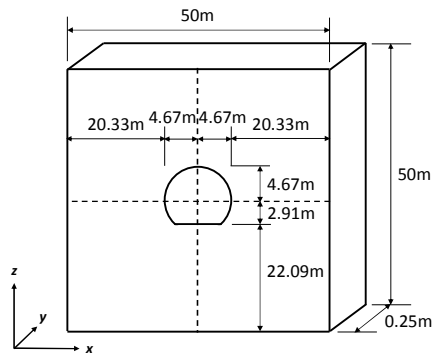


図-1 掘削解析モデル

アプローチが行われているが、地山にトンネル掘削を行う際、どの程度の地山の不均質性であれば様な物性を想定してもよいか、均質とした影響が少ないかといった基礎的な検討は十分に実施されていない。

そこで、本研究は不均質な地山を模擬した連続体掘削解析モデルを作成し、トンネル掘削解析を行い、トンネル周辺の地中変位、内空変位、天端沈下に相当する変位を求める。その後、得られた変位を用いて地山を均質と仮定した逆解析を行い、均質地山の弾性係数や初期応力、最大せん断ひずみ分布を求める。この逆解析により得られる弾性係数や初期応力、最大せん断ひずみ分布は、トンネル掘削を想定した場合における地山の不均質状態を平均的な地山として評価した結果ともいえる。

これらの結果を用いて、著者らが一部報告した内容⁹⁾に、新たに内空変位計測や地中変位計測などの計測位置や計測方法の違いによる逆解析結果への影響やトンネル掘削解析とその逆解析の最大せん断ひずみ分布図の違いなどの考察を加えた。そして、これらを総括して、トンネル掘削解析を対象とした場合における均質と想定できる地山条件について明らかにする。

2. 不均質地山のトンネル掘削解析

(1) 掘削解析モデル

本研究のトンネル掘削解析には、三次元有限差分法解析コードFLAC3D⁷⁾を用いる。FLAC3Dver5.0で用いた2車線道路トンネルの掘削解析モデルを図-1に示す。

掘削解析モデルの境界条件は、解析領域の面外法線方向の変位を拘束条件とした。また、掘削解析モデルの単位奥行きは0.25mであり、奥行き両面のy軸方向の変位を拘束しているため、FLAC3Dは三次元解析であるが、二次元平面ひずみ状態を仮定している。また、解析モデル内の要素の基本寸法はすべてのケース共通で0.2 m×0.2 m×0.25 mであり、均質寸法0.4 mのケースでは、基本寸法の要素が4個組み合わせることで構成されている。

表-1 トンネル掘削解析モデルと均質寸法/トンネル直径

均質寸法(m)	掘削解析モデル ケース数	均質寸法/ トンネル直径
0.2	10	0.021
0.4	20	0.043
1.0	20	0.107
2.0	20	0.214
4.0	20	0.428

(2) 地山の不均質性の設定

地山の不均質性には、地山強度の不均質性や変形特性の不均質性などが考えられる。また、不均質材料の平均的な物性は、材料の幾何学的な配置状態や載荷方向や載荷条件に依存する⁸⁾。本研究では、地山の不均質性を検討する第一歩として、地山材料を線形弾性体と仮定し、基本寸法で構成される同じ弾性係数をもつ要素の集合体で作る要素群の大きさを“均質寸法”と定義し、均質寸法を変化させることで地山の不均質性を表現した。

a) 強度の不均質性に基づく地山物性のばらつきの設定

伊藤・新⁹⁾は、岩石の強度のばらつきを、岩種毎の強度分布関数により表現している。さらに、大久保ら¹⁰⁾は、岩石強度のばらつきを確定論と確率過程論の観点から、両者とも分布関数としてワイブル分布を用いることで、岩石強度のばらつきを捉える提案をしている。

著者の一人¹¹⁾は、これらの岩石の不均質性の研究を参考に、地山の不均質性がトンネル掘削解析結果に及ぼす影響に関する予備的検討を実施し、トンネル掘削に限定・特化した場合の掘削解析モデルを提案している。本研究では、この提案された掘削解析モデルを採用した。提案された掘削解析モデルにおける地山物性分布は、基本物性として、一軸圧縮強さ (σ_c) を10 MPaとした上で、近似的な対数正規分布を仮定し、その最大値を20 MPa、最小値を5 MPaとした。一軸圧縮強さの分布は5~10 MPaおよび10~20 MPaの間を等間隔に8分割し19の物性値を有する要素群とした。そして、地山の一軸圧縮強さの頻度分布は、掘削解析モデル全体における各物性値の要素の体積率が基本物性である10 MPaを最頻度とする非対称の三角形分布となるように設定し、乱数を用いて不規則に配置した。ここで、体積率とは前述の地山の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。

トンネル掘削解析では地山を等方線形弾性体と仮定し、各要素の弾性係数 E (MPa)、ポアソン比 ν (無次元) は、次次に示される軟岩における一軸圧縮強さ σ_c (MPa) とのそれぞれの経験的な相関式¹²⁾を用いて設定した。

$$E = 80\sigma_c^{1.4} \quad (1)$$

$$\nu = 0.25(1 + e^{-0.2\sigma_c}) \quad (2)$$

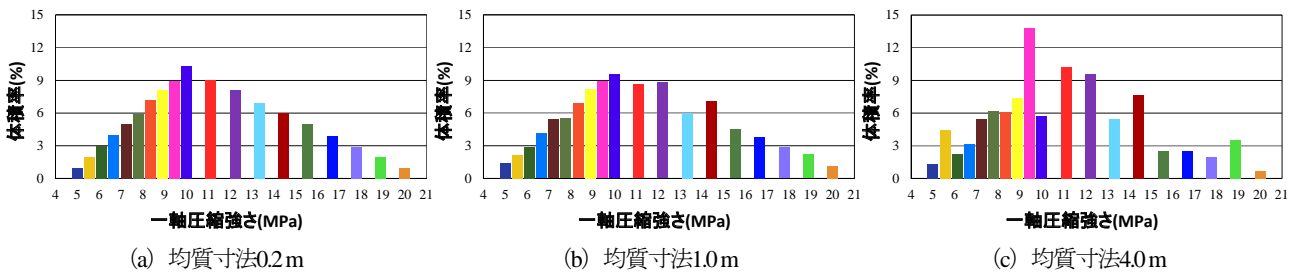


図-2 掘削解析モデルにおける一軸圧縮強さの頻度分布の一例

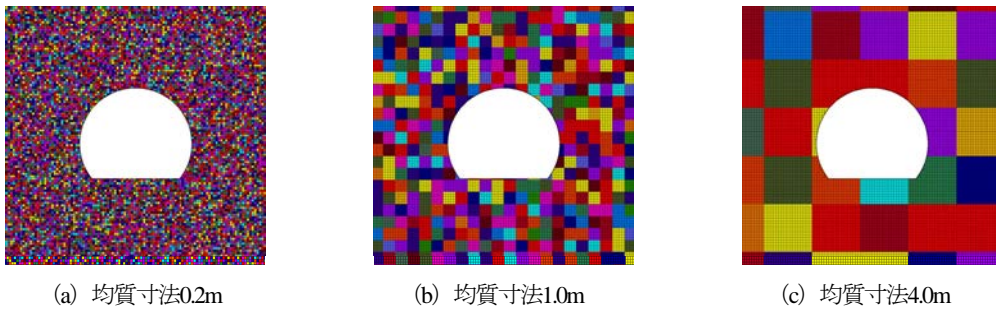


図-3 トンネル近傍における掘削解析モデルの物性分布状態の一例

b) 均質寸法の設定

本研究では、解析ケースは均質寸法を0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0 mとする5ケースを設定した。各ケースにおいて、図-1に示す掘削解析モデル全体の各要素に対して異なる乱数を発生させて得られる物性分布による掘削解析モデルを作成し、表-1に示す掘削解析モデルケース数とした。均質寸法が0.2, 1.0, 4.0 mのそれぞれのケースにおける掘削解析モデルの一軸圧縮強さの頻度分布の一例を図-2に示す。図からわかるように、10 MPaを最頻度とした三角形分布となっているものの、それぞれ均質寸法毎における要素群の数は62500個、2500個、169個となるため、特に均質寸法4.0 mのケースでは、要素群の数が少なく、体積率の分布もきれいな三角形分布とはならず、若干ばらついている。

また、トンネル近傍における掘削解析モデルの物性分布状況の一例を図-3に示す。この図からわかるように、トンネル掘削径が約9 mなので、均質寸法4.0 mのケースではトンネル壁面の多くの領域が同じ物性の要素で占めることになることがわかる。なお、図-3において、要素モデルの着色は図-2に示すそれぞれの要素群の弾性係数とポアソン比の組み合わせに対応している。

(3) 初期応力の設定と掘削解析

トンネル掘削解析において仮定した初期応力は、以下の3ケースとした。本論文では、以下、圧縮応力を正として取り扱う。

- 1) 5 MPaの静水圧状態
- 2) 1) に対し、テクトニックな水平方向初期応力の卓越を想定した鉛直応力を5 MPa、水平応力（奥行き

方向も同様）を6.25 MPaにした応力状態

- 3) 2) に対し、トンネル形状に対し非対称な初期応力を想定した、水平主応力が30度水平辺から傾いた応力状態（せん断応力1.0825 MPaを加えた状態）

このような初期応力状態を仮定した上で、表-1に示すすべての掘削解析モデルに対し、トンネル掘削解析を実施した。本研究では、不均質地山にトンネル掘削した際の逆解析結果のばらつきに対する影響を把握することが目的であるため、応力解放率は100%とした。

このトンネル掘削解析で得られるトンネル周辺変位を逆解析で用いることとした。

3. 不均質地山の逆解析

不均質地山の逆解析において、大西・東出¹³⁾は、不均質地山での適用を目指して、大まかに区分された地層モデルにおける材料定数の同定の可能性を示した。それに対し、本研究では不均質地山の各材料定数の同定を行うのではなく、あくまで不均質地山モデルに対し、均質地山と仮定した逆解析を行った時の弾性係数および初期応力分布に与える影響に着目する。

(1) 逆解析プログラム

逆解析プログラムは、桜井・進士¹⁴⁾が開発した直接逆解析プログラムDBAP/Mを用いる。このプログラムは、等方均質線形弾性体を仮定した二次元地山において、計測変位（たとえば、地中変位、内空変位、天端沈下）を使用し、鉛直応力 (σ_z)（現場では土被り圧）、ポアソ

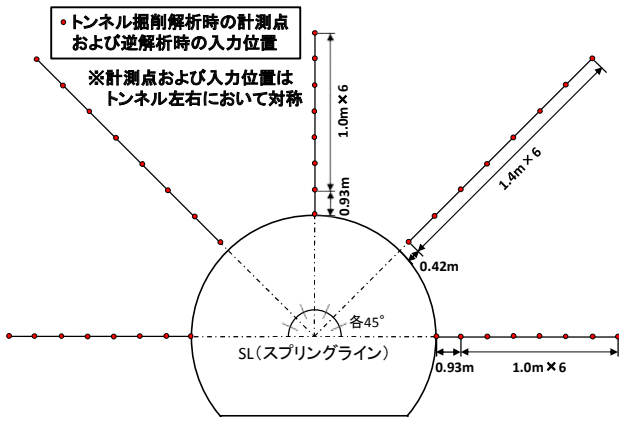


図4 解析における地中変位の計測点および入力位置

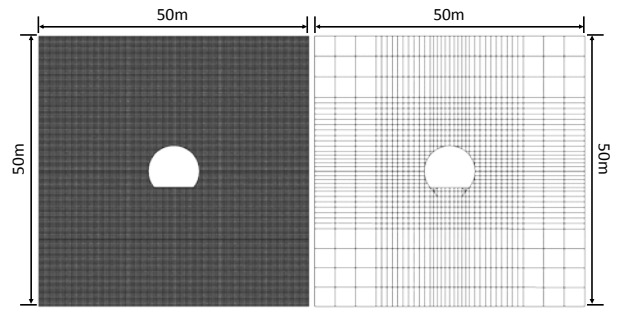
ン比 (ν) を仮定して、計測変位と解析変位の誤差の二乗和を目的関数とする最小二乗法により、計測変位をもっともよく再現する掘削断面の初期水平応力 (σ_x)、初期せん断応力 (τ_{xz}) および弾性係数を逆解析により推定する。

(2) 逆解析に用いる計測データおよび仮定

逆解析に用いる計測データは、トンネル掘削解析によって得られた地中変位または内空変位と天端沈下の組み合わせを使用した。ここで使用される変位は、計測の精度や掘削進行による時間的ばらつきなどの施工上の要素は考慮されていない。そのため、地山物性のばらつきは計測変位のばらつきとしてそのまま評価されることとなる。逆解析で用いる地中変位の入力位置を図-4に示す。ここで「地中変位」とはトンネル施工で用いられ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。そのため、本研究ではトンネル掘削解析時の計測個数は1計測断面あたり5測線40箇所であるが、逆解析時の入力個数は1計測断面あたり5測線35データとなる。

次に、逆解析で用いる計測データとして内空変位と天端沈下の組み合わせについて述べる。通常、これらの計測は「A計測」と呼ばれている。具体的には、天端沈下とは、天端部の絶対鉛直変位である。また、内空変位とは、天端とトンネルSL (スプリングライン) の右部および天端とトンネルSLの左部、トンネルSLの右部とトンネルSLの左部の3箇所相対変位量である。従って、本研究でこのA計測を用いる場合、逆解析時の入力個数は1計測断面あたり4箇所とした (図-7参照)。

逆解析は、表-1の均質寸法を変化させた90モデルに対し、それぞれ前述の初期応力を変化させた3ケースの270ケースを実施した。そして、地山を均質等方線形弾性体と仮定した際の弾性係数および初期応力を求めた。なお、逆解析に用いる鉛直応力はトンネル掘削解析時で用いた



(a) 掘削解析モデルの要素分割図
全要素数：62664個
(b) 逆解析モデルの要素分割図
全要素数：1250個

図5 解析に用いた要素分割図

表-2 モデルの要素分割の相違による逆解析の精度

	水平応力 σ_x (MPa)	鉛直応力 σ_z (MPa)	せん断 応力 τ_{xz} (MPa)	弾性係数 E (MPa)
トンネル掘削解析	5.000	5.000	0	2009
逆解析 (地中変位)	4.993	5.000	-0.001	1987
逆解析 (A計測)	5.006	5.000	-0.0003	2008

鉛直応力である5 MPaと仮定した。また、ポアソン比は不均質性の物性分布における基準強度である一軸圧縮強度10 MPaから式(2)により算出される0.2838と仮定した。

(3) 解析モデルの違いがそれぞれの解析結果に与える影響の比較

掘削解析モデルと逆解析モデルの要素分割図の比較を図-5に示す。ここで、両者の解析領域は図-1に示した時と同様である。図-5(b)に示すように逆解析モデルは図-5(a)に示す掘削解析モデルより、簡素な要素分割モデルを採用している。また、トンネル掘削解析は3次元有限差分法であるのに対し、逆解析は2次元有限要素法を採用している。そのため、要素分割・解析手法・計測条件 (入力変位) の違いが解析結果の精度に及ぼす影響が懸念された。

そこで、地山の弾性係数、ポアソン比を一定としたトンネル掘削解析をFLAC3Dで実施し、地中変位とA計測変位を求めた。そして、その地中変位、A計測変位からDBAP/Mで逆解析を行い、その逆解析で得られた弾性係数・初期応力とトンネル掘削解析の入力値を比較した。その結果を表-2に示す。この表から明らかのように、両者は工学的に十分一致しており、逆解析モデルで用いた要素分割の簡略等による影響は小さいことがわかる。したがって、本研究の逆解析では図-5の要素分割を用いることとした。

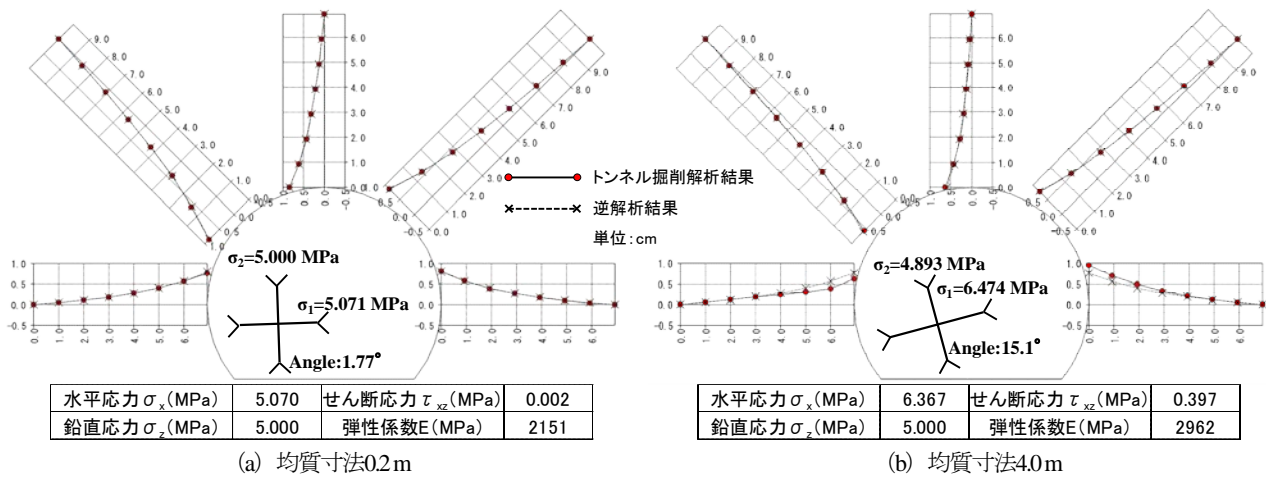


図-6 等方応力状態におけるトンネル掘削解析の地中変位結果と逆解析結果の比較図

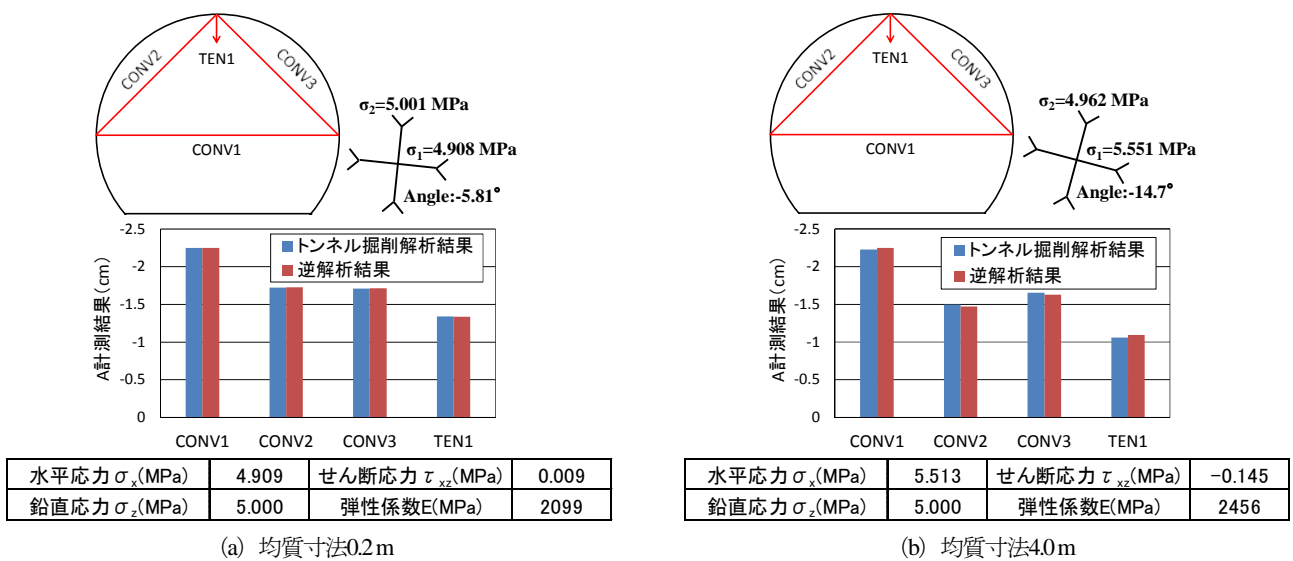


図-7 等方応力状態におけるトンネル掘削解析によるA計測結果と逆解析結果の比較図

4. 逆解析結果と考察

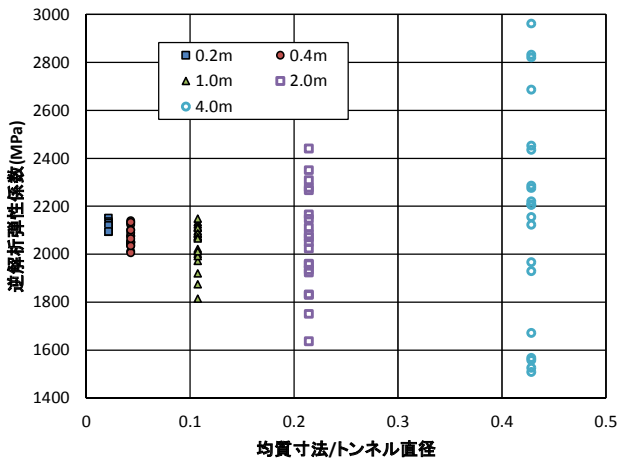
等方応力条件において均質寸法が異なるトンネル掘削解析と逆解析の結果における地中変位およびA計測の比較の一例を図-6, 7に示す。また、図中に、逆解析から得られた初期応力分布と弾性係数をあわせて示す。両図(a)より、均質寸法0.2 mの時、トンネル掘削解析と逆解析の変位は、極めてよく一致する。また、逆解析によって得られる初期応力分布もほぼ当初のトンネル掘削解析で与えた5 MPaに近い結果であり、初期応力の傾きも小さい。しかし、両図(b)に示すように、均質寸法が大きくなるとトンネル掘削解析時と逆解析の変位には共に若干のずれが認められるとともに、変形をより一致させるために逆解析の初期応力の主軸も傾く。すなわち、逆解析において、地山の不均質性は、弾性係数はもちろんであるが、水平初期応力やせん断初期応力の大きさの変化としても再現されることがわかる。

(1) 逆解析から得られた弾性係数

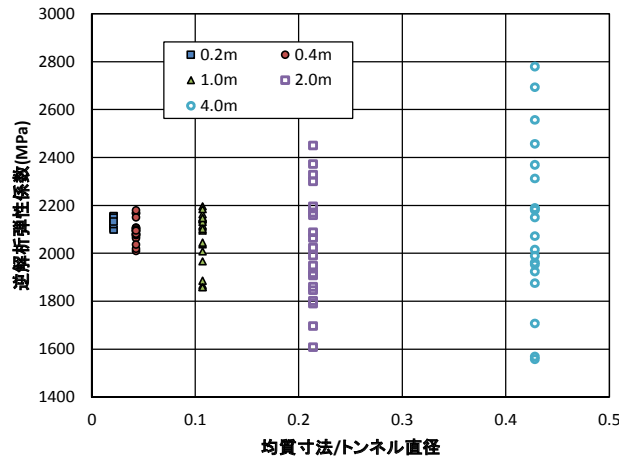
a) 不均質性が弾性係数に与える影響

すべてのケースにおいて逆解析により得られた弾性係数と均質寸法/トンネル直径との関係を図-8, 9に示す。図-8において、逆解析時に与えた変位データは、トンネル掘削解析の地中変位を入力値とした場合であり、同様に、図-9においては、A計測をそれぞれ入力値とした場合の弾性係数の分布図である。また、図-8, 9に示す各図には、トンネル掘削解析時に設定した初期応力の値も併せて示している。本研究では、逆解析によって算出される弾性係数を“逆解析弾性係数”と呼ぶ。なお、水平軸は表-1で示したように均質寸法をトンネル直径で除して無次元化している。

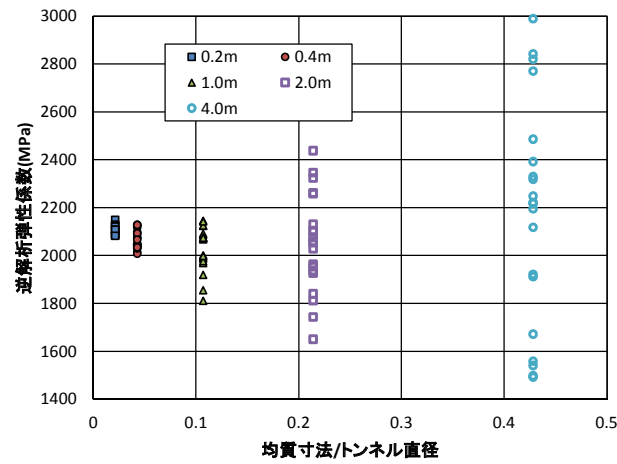
図-8, 9の各図から、均質寸法が大きくなるに伴い、逆解析弾性係数のばらつきも大きくなることわかる。また、初期応力の組み合わせを変えても、均質寸法が大きくなるに伴い、逆解析弾性係数のばらつきも大きくなること、加えて、逆解析に用いる変位データの組み合わせ



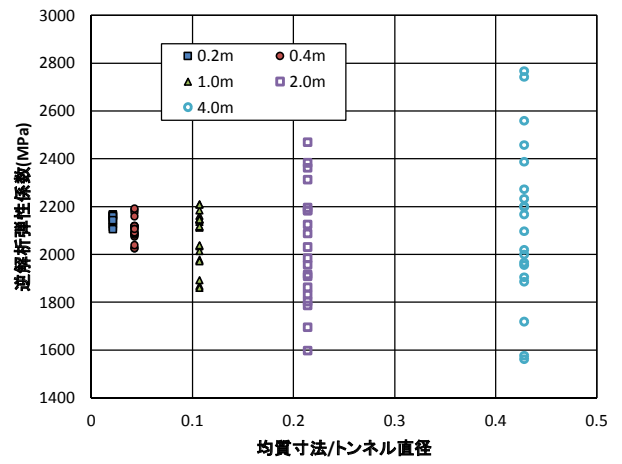
(a) $\sigma_x=5 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=0 \text{ MPa}$



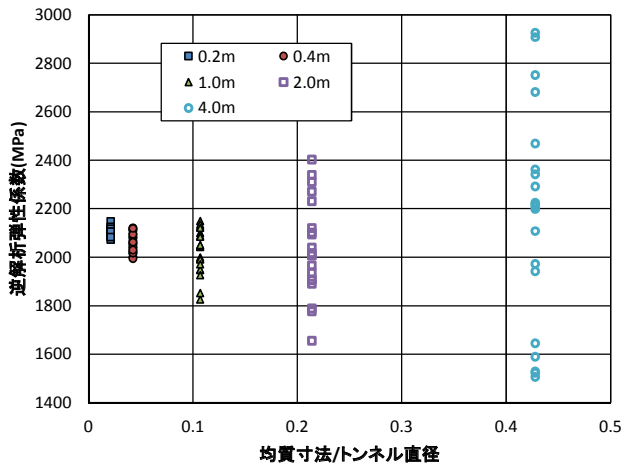
(a) $\sigma_x=5 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=0 \text{ MPa}$



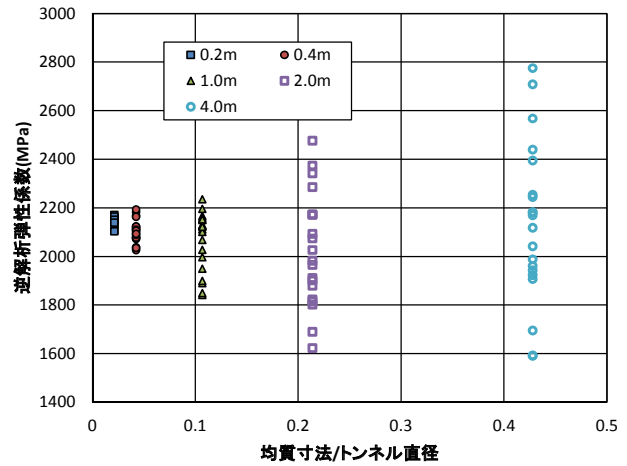
(b) $\sigma_x=6.25 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=0 \text{ MPa}$



(b) $\sigma_x=6.25 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=0 \text{ MPa}$



(c) $\sigma_x=6.25 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=1.0825 \text{ MPa}$



(c) $\sigma_x=6.25 \text{ MPa}$, $\sigma_z=5 \text{ MPa}$, $\tau_c=1.0825 \text{ MPa}$

図-8 逆解析弾性係数と均質寸法/トンネル直径の関係
(地中変位結果を入力データとした場合)

図-9 逆解析弾性係数と均質寸法/トンネル直径の関係
(A計測結果を入力データとした場合)

せがA計測あるいは地中変位など、どのような組み合わせを用いても、逆解析弾性係数の分布は同様な傾向を示すことがわかる。このような傾向が生じるのは、均質寸法が大きくなるに伴い、トンネル掘削解析で得られる変位のばらつきが大きくなるためである。

また、前述したように、図-9に示すA計測を入力値と

した場合は、図-8に示す地中変位を入力値とした逆解析結果に比べて入力データ数が少ない。そのため、逆解析結果も影響を受けると考えられるが、図-8、9を比較しても、入力変位（計測方法とデータ数）を変化させた逆解析から得られる弾性係数のばらつきに大きな変化はみられない。このような結果が得られたのは、入力変位

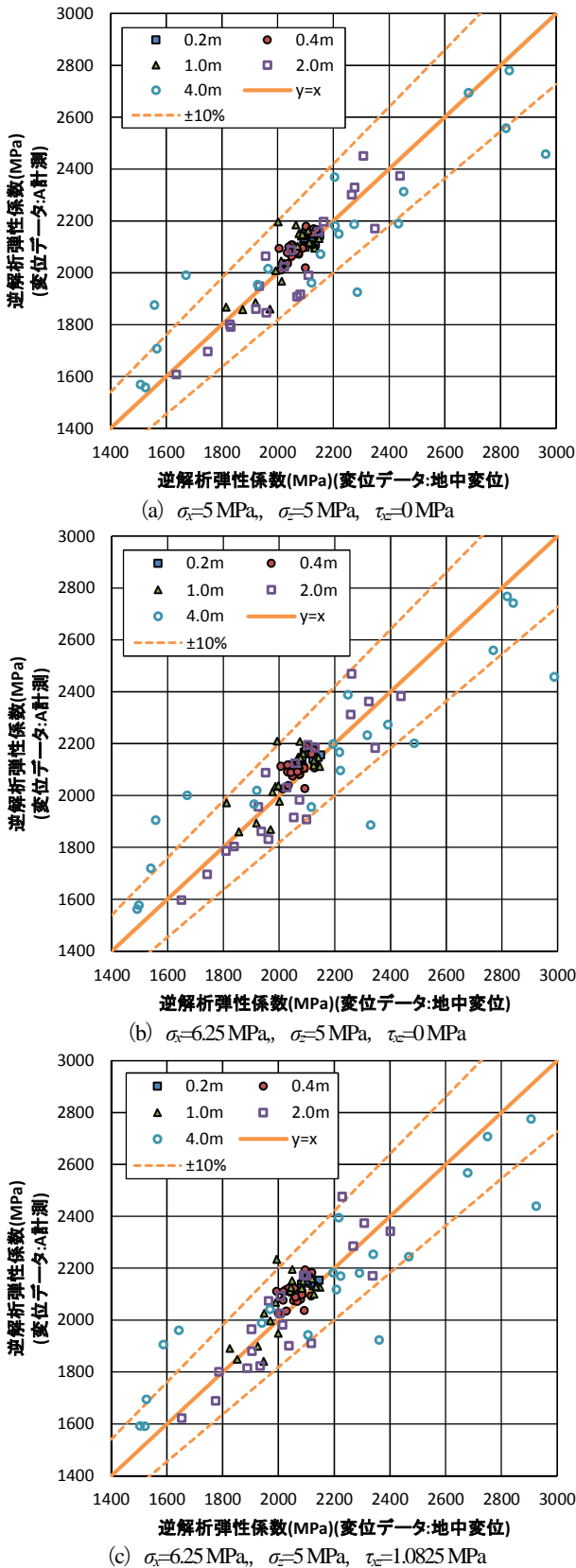


図-10 用いる計測データのの違いによる逆解析弾性係数の比較

そのものに計測誤差が含まれていないことなども要因と考えられる。したがって、A計測結果そのものに誤差が含まれる場合、逆解析結果のばらつきに与える影響はより大きくなると考えられる。

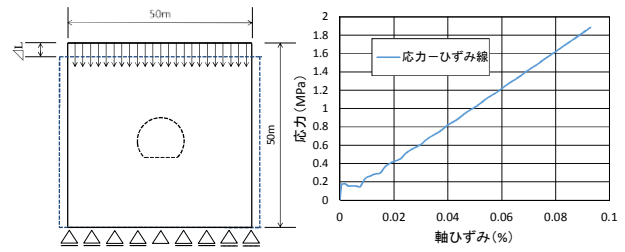


図-11 数値一軸圧縮実験

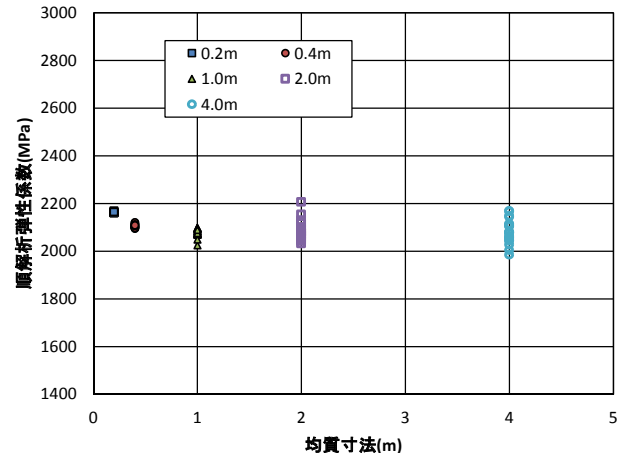
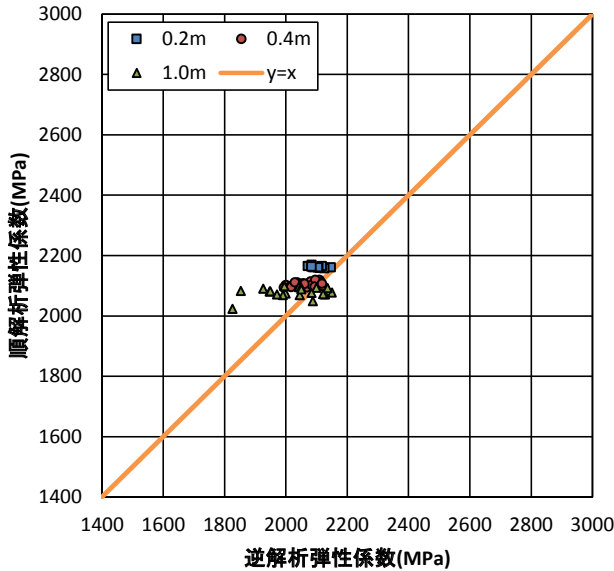


図-12 順解析弾性係数と均質寸法の関係

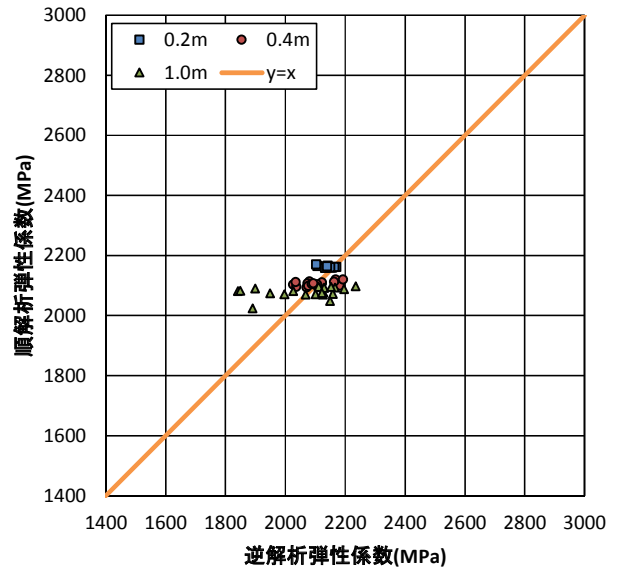
ここで、計測データの組み合わせを変化させた逆解析の影響を評価するために、それぞれの逆解析により得られる弾性係数を比較した(図-10参照)。なお、図-10には、図-8、9と同様にトンネル掘削解析で用いた初期応力条件も合わせて示す。また、図-10中の破線は $y=x$ の直線からの弾性係数のばらつき $\pm 10\%$ の範囲を示している。これらの図より、均質寸法が2.0 m以下の場合、それぞれの逆解析弾性係数の差は、ほぼ $\pm 10\%$ に収まることがわかる。このことは、逆解析時に与える変位データが少ない場合と多い場合を比較しても、得られる逆解析弾性係数に極端な差は生じないことがわかる。しかしながら、均質寸法が4.0 mの場合は $\pm 10\%$ の範囲よりも大きくばらつくことがわかる。このことから、トンネル直径に対して均質寸法が約0.2以下であれば、計測断面数は多いものの逆解析への入力データ数の少ないA計測でも地中変位計測結果と同様の評価ができることを示している。

b) 順解析弾性係数と逆解析弾性係数との比較

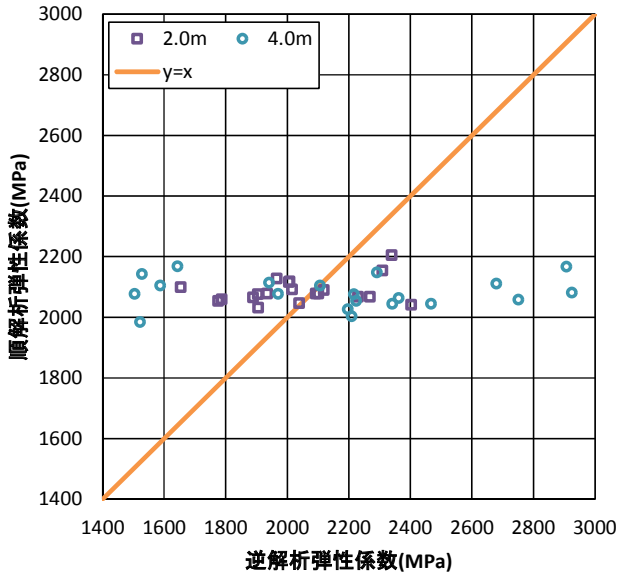
掘削解析モデルにおけるモデル全体の平均的な弾性係数を算出するために、図-11に示すように掘削解析モデル上部全面から等変位を与える数値一軸圧縮実験を行い、得られる応力-ひずみ関係から不均質地山における平均的な弾性係数を算出した。ここで、応力は掘削解析モデル最上面の各要素の鉛直方向応力(σ_z)を平均したものとし、弾性係数は解析結果が安定した時の応力とひずみの値から算出した。本研究ではこのように算出された弾



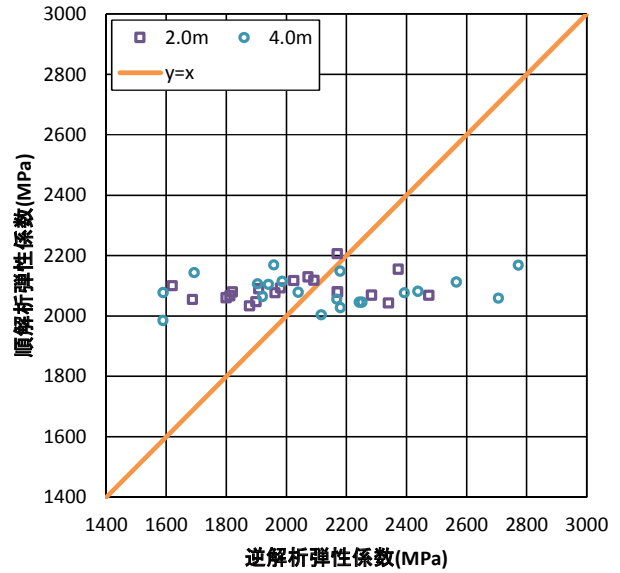
(a) 入力変位データが地中変位の場合
(均質寸法0.2m, 0.4m, 1.0m)



(b) 入力変位データがA計測の場合
(均質寸法0.2m, 0.4m, 1.0m)



(c) 入力変位データが地中変位の場合
(均質寸法2.0m, 4.0m)



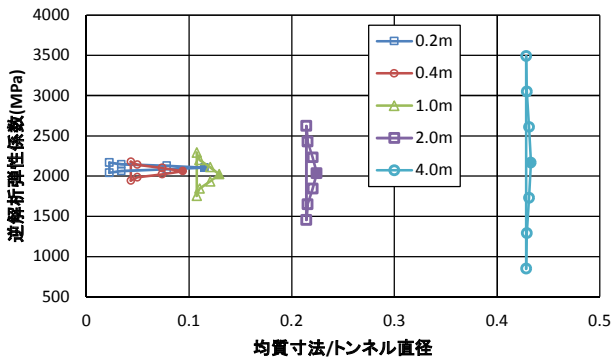
(d) 入力変位データがA計測の場合
(均質寸法2.0m, 4.0m)

図-13 均質寸法の違いによる順解析弾性係数と逆解析弾性係数の比較

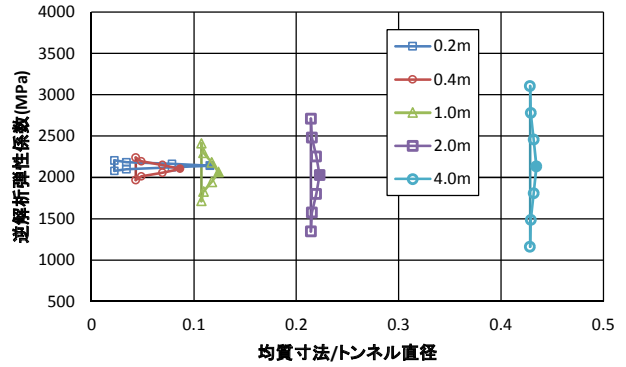
性係数を“順解析弾性係数”と呼ぶ。この順解析弾性係数と均質寸法との関係を図-12に示す。この図から明らかかなように、順解析弾性係数は均質寸法が大きくなるにともない、その平均値は若干低下する傾向を示すものの、弾性係数のばらつきの範囲は200 MPaであることがわかる。このばらつきの原因は、複合材料としての平均的弾性係数が材料の配置状況と荷重の荷重方向によって支配されるためと考えられる³⁾。この順解析弾性係数と逆解析弾性係数との比較を行う。

同じ掘削解析モデル毎の順解析弾性係数と逆解析弾性係数の比較結果を図-13に示す。すでに、図-10に示すように初期応力を変化させても、逆解析弾性係数は同様な

結果が得られることはわかっているため、図-13ではトンネル掘削解析時の初期応力が鉛直応力5 MPa・水平応力6.25 MPa・せん断応力1.0825 MPaの結果のみを示している。この図から、均質寸法が大きくなるにつれて、順解析弾性係数に対して逆解析弾性係数は大きくばらついて分布することがわかる。すなわち、均質寸法が大きくなるにつれて、掘削解析モデル全体に対して数値一軸圧縮実験を行った場合とトンネル掘削を行った場合では弾性係数の評価が大きく異なることがわかる。このことから、均質寸法が大きくなるほど、トンネル掘削断面周辺の弾性係数に逆解析結果は強く依存すると考えられる。



(a) 変位データが地中変位の場合



(b) 変位データがA計測の場合

図-14 均質寸法の違いによる逆解析弾性係数の頻度分布

(2) 逆解析弾性係数のばらつきの定量的評価

上述したような弾性係数のばらつきを定量的に判断するために、得られた逆解析弾性係数に対し、正規分布を想定し、確率密度関数として、平均・標準偏差との関係を求めた。ここで、中心極限定理より母集団の分布（本研究においては、図-2にあたる。）がどのような分布であっても、サンプル数を十分にとればその誤差は近似的に正規分布に従うことから、本研究では正規分布を想定した。図-14に、その結果を示す。図-14の各均質寸法の線上のプロットはぬりつぶされた中央のマークが逆解析弾性係数の平均値を示し、それぞれ平均から上下に離れるごとの標準偏差 $\sigma \sim 3\sigma$, $-\sigma \sim -3\sigma$ の値を白抜きのマークで示している。また、図の便宜上、各均質寸法における確率密度関数（曲線）の頻度は強調して表示している。さらに、図-15に、逆解析弾性係数の変動係数と均質寸法/トンネル直径の関係を示す。

この図-14と図-15から、均質寸法が1.0 m以下、つまりトンネル直径に対する均質寸法が約0.1以下では、トンネル掘削時の逆解析弾性係数の変動係数は5%程度となることがわかる。従って、切羽観察結果などから切羽の平均的な均質寸法を推定してトンネル径で除し、その値が約0.1以下の地山であれば、トンネル掘削時には、地山をほぼ均質および平均的物性として捉えることができることがわかる。逆に、トンネル直径に対して均質寸法が0.2以上では、逆解析弾性係数は順解析弾性係数と比較して極めて大きくばらつく可能性があり、地山全体を均質な地山ととらえることが難しいと考えられる。この関係から、同じ地層内にA計測結果が多数ある場合は、多数のA計測結果による逆解析弾性係数とその変動係数を求めた上で、図-15にあてはめることで、地山の不均質性を定量的に示すことも可能となる。

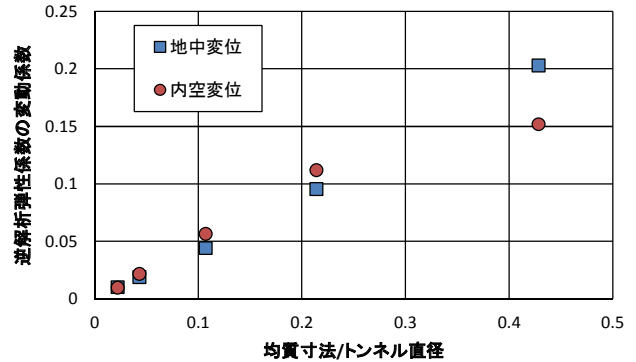


図-15 逆解析弾性係数の変動係数と均質寸法/トンネル直径の関係

5. トンネル掘削解析時と逆解析時の最大せん断ひずみ分布の比較

櫻井ら¹⁵⁾は、トンネルの周辺地山の安定性を評価するために、逆解析によって地山の最大せん断ひずみの分布を求め、室内試験で求められた限界ひずみと比較することを提案している。これまで述べてきたように、トンネル掘削時の計測変位を用いた逆解析により推定される弾性係数や初期応力は、地山の不均質性により大きく変化する。したがって、逆解析で求められる最大せん断ひずみ分布も、実際に地山に発生している最大せん断ひずみ分布を再現できていない可能性も考えられる。

そこで、5 MPaの等方応力状態における均質寸法0.2 m, 1.0 m, 4.0 mのトンネル掘削解析時とその地中変位計測結果を用いた逆解析によって推定された最大せん断ひずみ分布図の比較を図-16に示す。ここで、図-16(a), (c)に示す均質寸法0.2mと4.0mの例は、図-6に示すトンネル掘削解析時の地中変位と逆解析による地中変位の比較図として示したケースである。図-6から、トンネル掘削解析と逆解析の変位の結果は均質寸法が変化してもほぼ同様な結果を示していることがわかる。しかし、図-16に示すようにトンネル掘削解析時の最大せん断ひずみ分布は、均質寸法の違いによる影響を強く受けている。

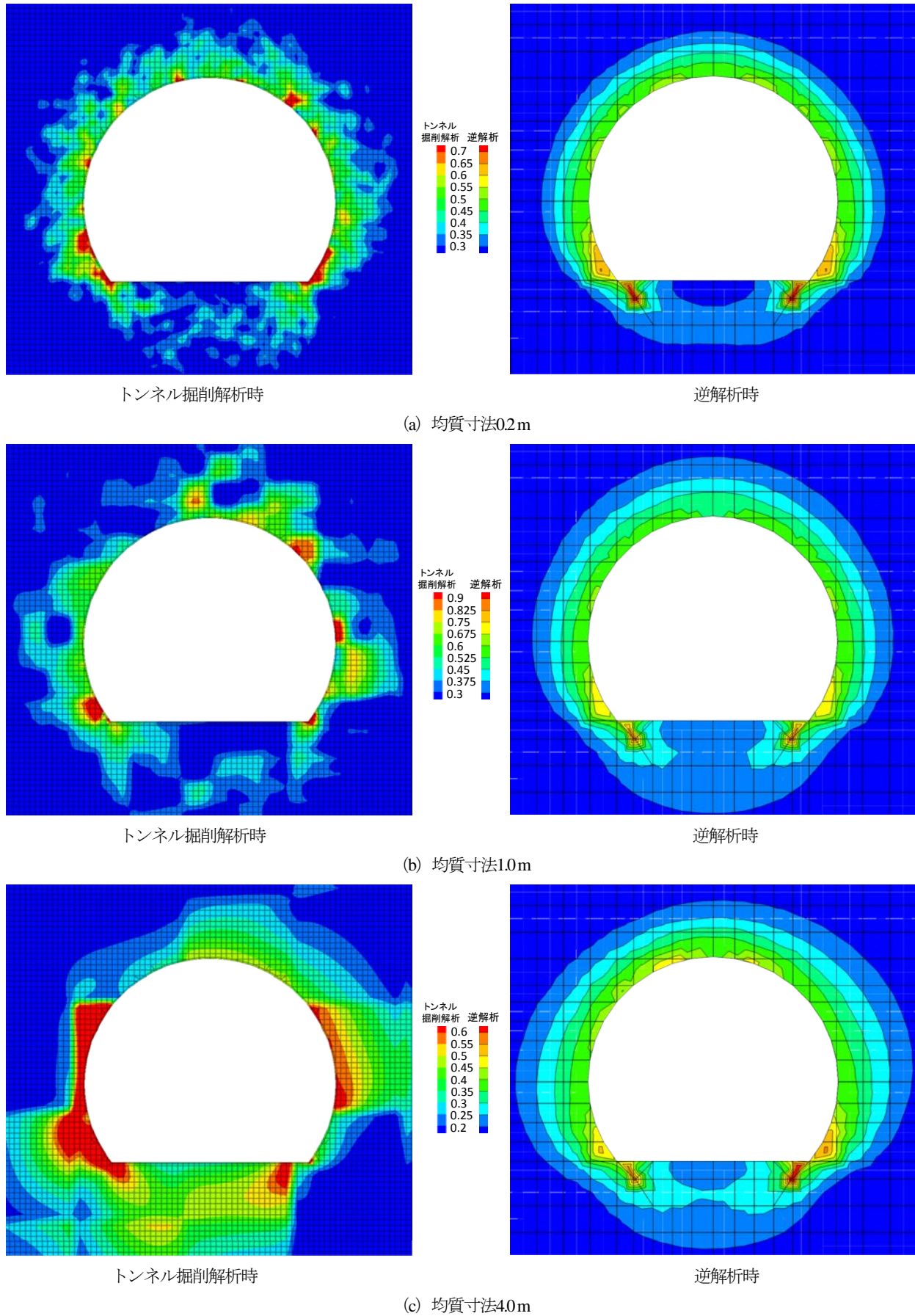


図-16 等方応力状態におけるトンネル掘削解析時と逆解析時の最大せん断ひずみ分布図 (単位: %)

図-16(a)に示す均質寸法0.2 mの時、局所的な弾性係数の変化により、トンネル壁面の所々に大きな最大せん断ひずみが発生しているが、逆解析により推定された最大せん断ひずみ分布は地山を一樣な線形弾性体と仮定しているため、ほぼ一樣に変化する分布となっている。しかし、両者は、局所的な違いがあるもののよく似たひずみ分布を示している。また、図-16(b)に示す均質寸法1.0 mの時も最大せん断ひずみ分布の特徴をおおよそ捉えることができています。

それに対し、図-16(c)に示す均質寸法4.0 mの場合、特に弾性係数の低い領域がトンネル壁面付近に配置されている場合には、そこに大きな最大せん断ひずみが発生している。しかし、逆解析で得られた最大せん断ひずみ分布図では、均質寸法0.2 mの時と比べ、トンネル掘削解析時の最大せん断ひずみ分布がばらついているが、逆解析にひずみのピーク部分の再現ができていないことがわかる。これらの結果より、最大せん断ひずみ分布の比較からも均質寸法が2.0 m以上（トンネル直径に対して均質寸法が約0.2以上）である場合は、地山を均質および平均的物性として評価することが難しいことがわかる。

6. おわりに

本研究では、不均質な地山中にトンネル掘削解析を行い、それより得られた地中変位またはA計測に対して地山を均質と仮定した逆解析を行った。そして、不均質な地山を線形弾性体と仮定した時の地山の弾性係数、初期応力のばらつきを評価した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 逆解析時に与える変位データが地中変位またはA計測と異なる種類においても、トンネル直径に対して均質寸法が約0.2以下であれば、逆解析弾性係数に大きな差がないことがわかった。
- 2) トンネルの直径に対して均質寸法が約0.1以下ならば、不均質地山をほぼ均質な物性をもつ地山と想定してもよいことがわかった。
- 3) トンネル直径に対して均質寸法が約0.2以上である場合、逆解析による最大せん断ひずみのピーク部分の再現が難しいことがわかった。最大せん断ひずみ分布を用いて地山の安定性を評価する場合は、実際に発生しているひずみ分布と異なることに注意が必要である。

今後は、実際のトンネル計測データに適用し、トンネル周辺の地山の不均質性の把握、並びに、実際の変形挙動や応力状態から、地山の不均質性を詳細に把握する方

法等を検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 大西有三, 河野正雄: ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp.231-239, 1986.
- 2) 山下裕司, 江藤芳武, 蔣宇静, 李博, 澤田昌孝: 大規模地下空洞掘削時の岩盤変形挙動に対する個別要素法による評価, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.138-150, 2009.
- 3) 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, 土木学会第 27 回年次学術講演会概要集, 第 3 部門, pp.253-256, 1972.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 岡崎泰幸, 熊坂博夫, 進士正人: 逆解析を用いた不均質岩盤の初期応力および物性に関する基礎的研究, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.22-27, 2014.
- 7) 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*, 1988.
- 8) 大南正瑛編: マイクロメカニクス入門, pp.112-137, オーム社, 1980.
- 9) 伊藤洋, 新孝一: 地盤物性値のばらつきとその影響評価—原子力発電所基礎地盤および周辺斜面の安定性—, 電力中央研究所報告, U87058, 1988.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) アイダン・オメール, 赤木和之, 伊藤孝, 川本眺万: 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.
- 13) 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.
- 14) 桜井春輔, 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.
- 15) 櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.185-188, 1994.

(2014. 8. 25 受付)

CONDITIONS TO CONSIDER INHOMOGENEITY OF THE GROUND ON TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS

Yasuyuki OKAZAKI, Hiroo KUMASAKA and Masato SHINJI

Inhomogeneity of the ground affects the deformation behavior around a tunnel when tunnel excavation analysis is carried out. However, it is hard to evaluate the inhomogeneity of the ground quantitatively before tunnel excavation. So, numerical analyses of tunnel excavation were carried out under inhomogeneous analytical model that material properties have triangle distribution approximately. The displacements around a tunnel were collected after tunnel excavation. Back analyses assuming a homogeneous rock mass were carried out by using measured displacements. From back analysis, it was found that the young's modulus and initial stress from back analysis are different from them of numerical analysis. As a result, the range that should consider the inhomogeneity was revealed under the tunnel excavation analysis.