

1. 岩盤の不均質性がトンネル掘削時の逆解析結果に与える影響

Influences of results of back analysis by means of the inhomogeneity in rock mass

○岡崎泰幸（山口大学）・熊坂博夫（清水建設）・進士正人（山口大学）

1. はじめに

岩盤内に山岳トンネルなどの連続した地中構造物を建設する場合、事前調査では、十分な地質情報を得ることは難しい。そこで、数値解析などを用いてトンネル周辺の岩盤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の設計を行う場合などがある。その数値解析を実施する際、岩盤の物理特性は、本来、不均質であるにも関わらず、その力学特性は各地層で均質で、さらに一様な応力状態を想定して実施されることが多い。

このような事前情報の不足に起因する岩盤の様々な想定条件を補完するため、施工中に現場計測を行い、当初実施した数値解析の妥当性の検討を行い、場合によっては事前設計を見直す、「情報化施工」が行われている。現場計測の方法は種々多様であるが、基本的にはトンネル掘削により生じる岩盤の変形量を計測して評価している。しかし、計測結果から直接、岩盤の力学特性や初期応力状態を評価できることが望ましい。そこで、トンネル施工中の変位計測データから、岩盤の弾性係数や初期応力分布を推定する逆解析手法が提案・利用されてきた。そして、最大せん断ひずみ分布を描き、限界ひずみと比較する施工管理手法が提案されている¹⁾。

本研究では不均質な岩盤を模擬したモデルを作成し、トンネル掘削解析を行ない、トンネル周辺の地中変位を求める。得られた地中変位を用いて岩盤を均質と仮定した逆解析を行う。この逆解析により得られる弾性係数や初期応力分布、並びにそれらから推定される最大せん断ひずみ分布は、トンネル掘削時における岩盤の不均質状態を評価した結果ともいえる。これらの結果から、岩盤の不均質性がトンネル掘削時の逆解析結果に与える影響並びに解析を行う場合に不均質性を検討すべき範囲を明らかにする。

2. 不均質岩盤のトンネル掘削解析

(1) トンネル掘削解析における解析モデル

本研究のトンネル掘削解析では、有限差分法コードFLAC3Dを用いる。FLAC3Dで用いた解析モデル寸法を図-1に示す。FLAC3Dは三次元解析であるが、解析モデルの単位奥行きを0.25mとし、奥行き方向の面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ている。また、解析モデル内の要素の最小寸法はどのケースとも0.2m×0.2m×0.25mである。

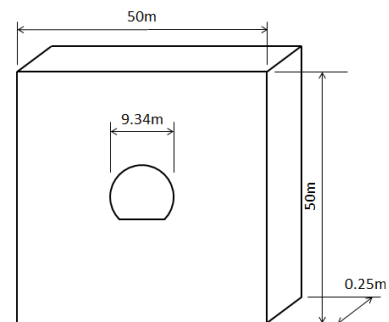


図-1 トンネル掘削解析モデルの寸法

表-1 解析モデルと均質寸法/トンネル直径

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

(2) 岩盤物性の不均質性の設定

岩盤の不均質性は、岩盤がもつ強度の不均質性や応力-ひずみ関係に関わる変形特性などの不均質性が考えられる。本研究では、岩盤の不均質性を検討する第一歩として、岩盤を線形弾性体と仮定し、同じ弾性係数をもつ要素の集合体で作

る直方体要素群の大きさを“均質寸法”と定義し、均質寸法を変化させることで岩盤の変形特性の不均質性を表現した。

a) 物性値の設定

著者の一人は、既往の岩石の不均質性の研究²⁾を参考に、岩盤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検討し、トンネル掘削に限定・特化した場合の解析モデルを提案している³⁾。提案した解析モデルにおける岩盤物性の範囲は、基本物性を一軸圧縮強さ10MPaとし、その最大値を20MPa、最小値を5MPaとした。一軸圧縮強さの分布は5~10MPaおよび10~20MPa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、岩盤の一軸圧縮強さの頻度分布は、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の10MPaを最頻度分布とする三角形分布となるように設定した。この分布は、近似的な対数正規分布と考え設定している。ここで、体積率とは前述の一定の岩盤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岩盤を線形弾性体と仮定した。各要素の弾性係数 E 、ポアソン比 ν は、次式(1)、(2)に示される軟岩における一軸圧縮強さ σ_c との経験的な相関式を用いて設定した⁸⁾。

$$E = 80\sigma_c^{1.4} \quad (1) \quad \nu = 0.25(1 + e^{-0.2\sigma_c}) \quad (2)$$

b) 不均質性の設定

本研究では、解析ケースは均質寸法を0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0mとする5ケースを設定した。各ケースにおいて、解析モデルの各要素群に対して乱数を発生させて異なる物性分布として、解析モデルを作成した。均質寸法が0.2, 1.0, 4.0mのケース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、均質寸法が大きくなるにつれて、それぞれの均質寸法における要素群数は62500個、2500個、169個と小さくなるため、体積率の分布は必ずしもきれいな三角形分布とはならない。また、トンネル近傍の不均質岩盤の物性の分布状況の一例を図-3に示す。なお、図-2、図-3の着色は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。

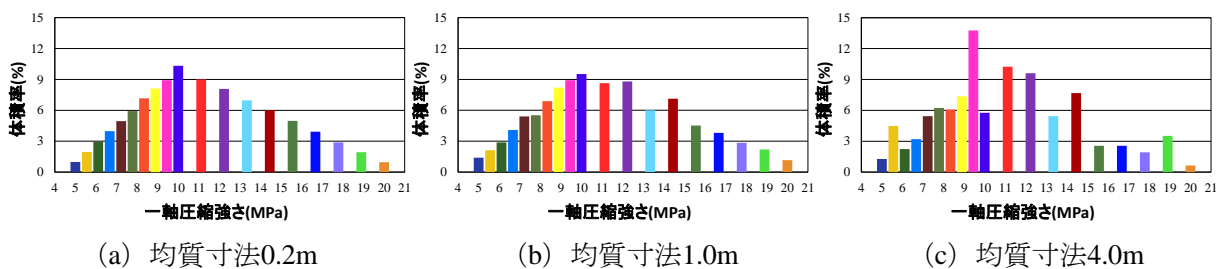


図-2 岩盤の一軸圧縮強さの頻度分布の一例

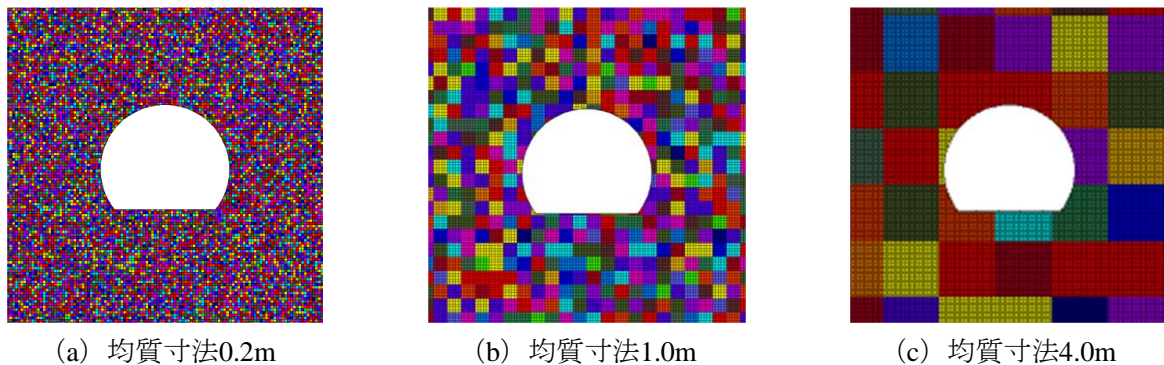
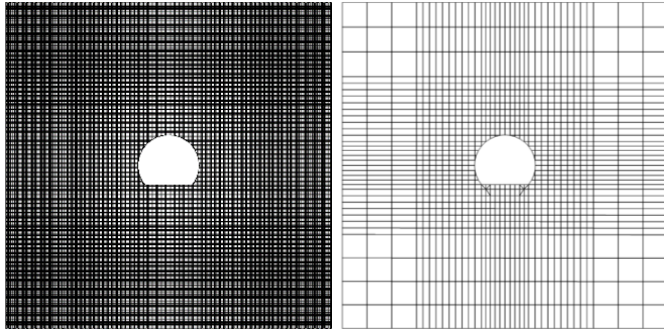


図-3 トンネル近傍の不均質岩盤の物性の分布状態の一例



(a)トンネル掘削に用いる要素分割図 全要素数：62664個
 (b)逆解析に用いる要素分割図 全要素数：1250個

図-4 解析に用いたモデル

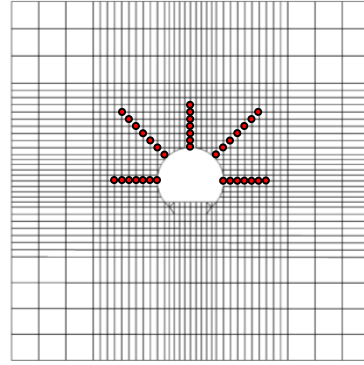


図-5 逆解析時の地中変位の入力位置

(3) 初期応力の設定とトンネル掘削解析

トンネル掘削解析において仮定した初期応力は、以下の2ケースとし、表-1の計90モデルに対しトンネル掘削解析を行った。

- ① 5MPaの等方応力状態
- ② 鉛直応力を5MPa、水平応力（奥行き方向も同様）を6.25MPa、せん断応力1.0825MPaを追加した応力状態（水平主応力の傾き30°）

表-2 モデルの要素分割の相違による影響

	水平応力 σ_x (MPa)	鉛直応力 σ_y (MPa)	せん断応力 τ_{xy} (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

3. 不均質岩盤の逆解析

(1) 逆解析プログラム

逆解析プログラムは、著者の一人が開発した直接解析プログラムDBAP/Mを用いる¹⁾。このプログラムは、2次元の線形弾性体を仮定した岩盤において、トンネル掘削時の計測変位（たとえば、地中変位など）、鉛直土被り圧（ σ_y ）、ポアソン比（ ν ）を入力データとして、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_{xy} ）および弾性係数（E）を逆解析により算定する。本研究では不均質岩盤モデルに対し、均質と仮定した逆解析を行った際の影響、特に弾性係数、初期応力分布および最大せん断ひずみ分布に与える影響に着目する。

(2) 逆解析時の入力パラメータと解析モデルの違いによる影響の検討

a) 逆解析で与える入力パラメータ

逆解析で用いる地中変位の入力位置を図-5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。また、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鉛直応力である5MPaを与え、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さ10MPaから式(2)により推定されるポアソン比0.2838を与えた。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2ケースの180ケースに実施した。

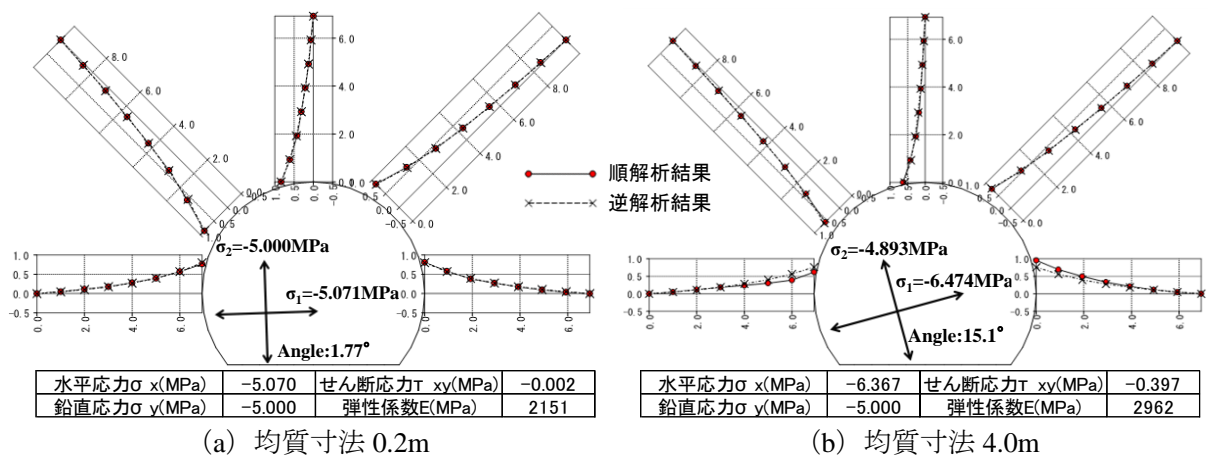


図-6 等方応力状態におけるトンネル掘削解析の地中変位結果と逆解析結果の比較図(単位: cm)

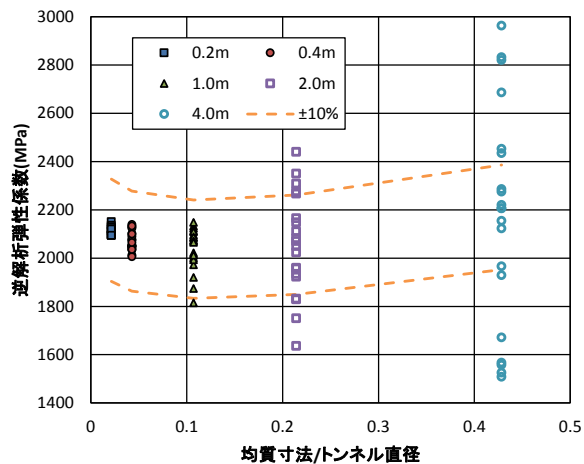
b) トンネル掘削解析と逆解析で用いる解析モデル

トンネル掘削解析と逆解析に用いた解析モデルの要素分割図の比較を図-4に示す。図-4(b)に示すように逆解析で用いた解析モデルは図-4(a)に示すトンネル掘削解析で用いた解析モデルより、簡素な要素分割モデルを採用している。そのため、分割数の違い等が解析結果の精度に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、岩盤の弾性係数、ポアソン比を一定とし、同じ初期応力を与えたトンネル掘削解析をFLAC3Dで実施し、図-5に示すような地中変位を求めた。そして、その地中変位のデータを用いて逆解析を行い、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、逆解析モデルで用いた要素分割の簡略化による影響は小さいことがわかる。そこで、本研究では図-4の解析モデルを用いることとした。

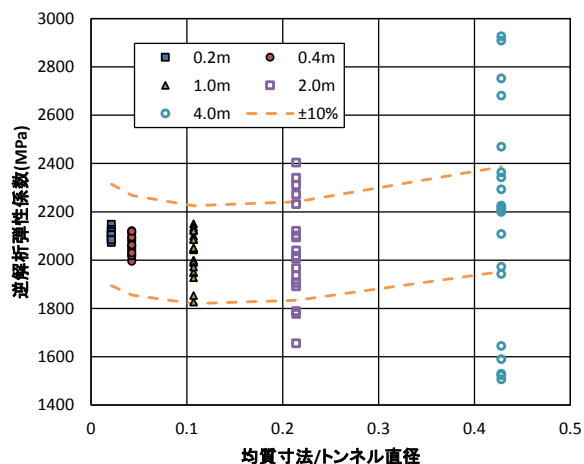
4. 逆解析結果と考察

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の比較の一例を図-6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示す。図より、均質寸法0.2mの時、トンネル掘削解析と逆解析の地中変位は、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5MPaに近い結果であり、初期応力の傾きも小さい。しかし、図-6(b)の例に示すように、均質寸法が大きくなるとトンネル掘削解析時の変位と逆解析時の変位との間には若干のずれが認められるとともに、変形を一致させるために逆解析の初期応力の主軸が傾いていることがわかる。すなわち、逆解析では、岩盤の不均質性は弾性係数・水平初期応力・せん断初期応力の大きさの変化としても再現されていることがわかる。

本研究では逆解析により算出した弾性係数を“逆解析弾性係数”と呼ぶ。逆解析弾性係数と均質寸法/トンネル直径の関係を図-7に示す。図中の破線は、各均質寸法の逆解析弾性係数の平均から $\pm 10\%$ の値の線である。この図から、均質寸法が大きくなるにつれて、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。加えて、図-7(a)(b)を比較してトンネル掘削解析時の初期応力が変わっても、逆解析弾性係数のばらつきの範囲はほぼ変わらないこともわかる。また、均質寸法が1.0m以下、つまりトンネル直径に対して均質寸法が約0.1以下では、トンネル掘削時の逆



(a) $\sigma_x=5\text{MPa}$, $\sigma_y=5\text{MPa}$, $\tau_{xy}=0\text{MPa}$



(b) $\sigma_x=5\text{MPa}$, $\sigma_y=6.25\text{MPa}$, $\tau_{xy}=1.0825\text{MPa}$

図-7 逆解析弾性係数と均質寸法/トンネル直径の関係

解析弾性係数の平均からのばらつきは約10%以下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、その結果をトンネル径で除した場合、その値が約0.1以下の岩盤は、トンネル掘削時には、ほぼ均質な岩盤と仮定してもよいと考えられる。逆に、トンネル直径に対して均質寸法が0.1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、岩盤全体を均質な岩盤ととらえることが難しいことがわかる。

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

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、岩盤の不均質性により影響を受け大きく変化する。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、実際に岩盤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、5MPaの等方応力状態における均質寸法0.2m, 1.0m, 4.0m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結果を図-8に示す。ここで、均質寸法0.2mと4.0m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に示したケースである。図-6に示すように、トンネル掘削解析と逆解析の地中変位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。しかし、図-8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、均質寸法の違いの影響を強く受けている。各ケースを詳しく述べると、均質寸法0.2mの時は、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。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、均質寸法1.0mの時は、均質寸法0.2m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局所的にばらついているが、逆解析により推定された最大せん断ひずみ分布はその特徴をおおよそ捉えることができている。それに対し、均質寸法4.0mの場合では、トンネル掘削解析において局所的な最大せん断ひずみが大きく発生しており、逆解析ではその最大せん断ひずみの再現は難しいことがわかる。

6. おわりに

本研究では、不均質な岩盤中にトンネル掘削解析を行い、それにより得られた地中変位に対し

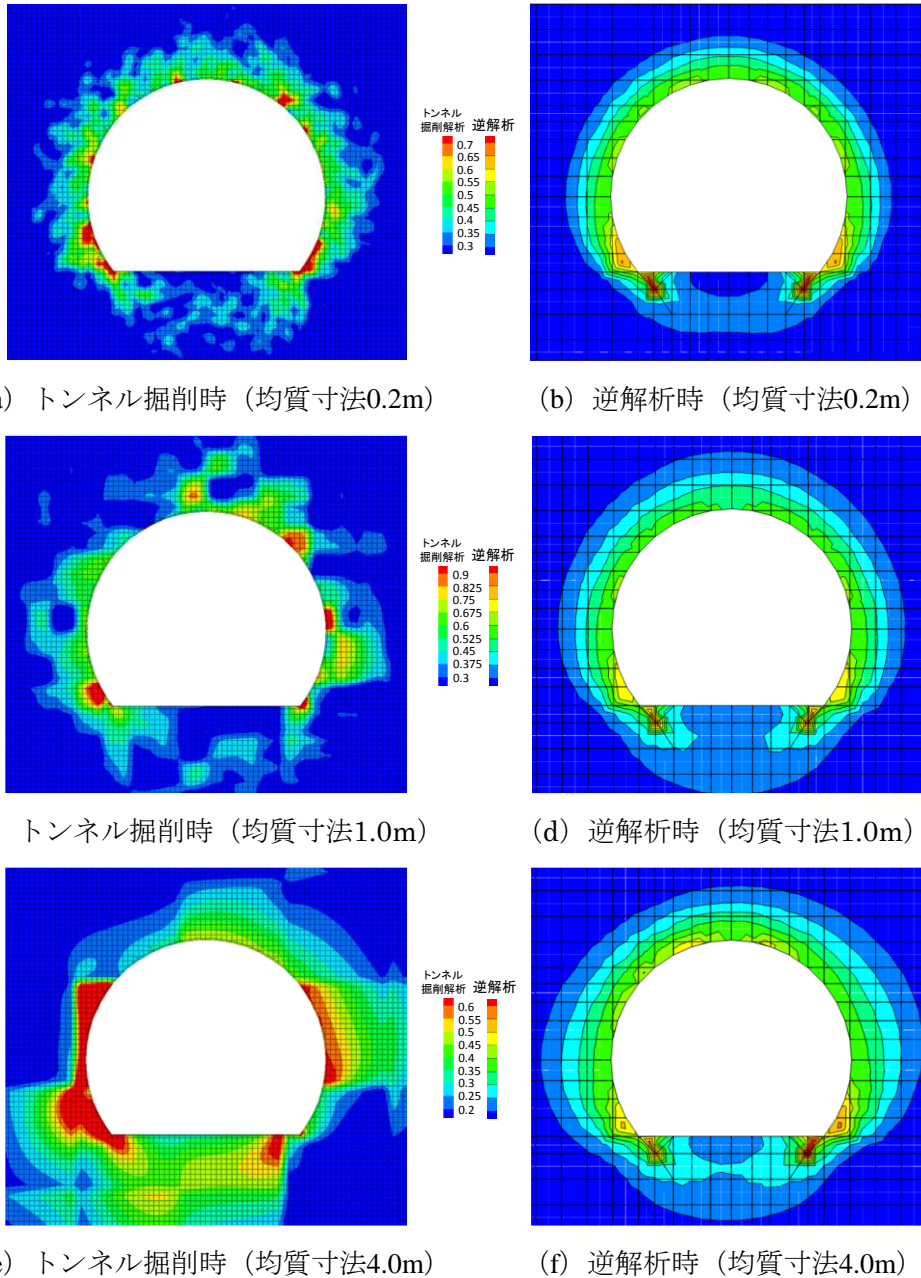


図-8 等方応力状態におけるトンネル掘削時と逆解析時の最大せん断ひずみ分布図 (単位 : %)

て岩盤を線形均質弾性体と仮定した逆解析を行った。そして、岩盤の弾性係数と初期応力のばらつき、最大せん断ひずみ分布を評価した。その結果、トンネル直径に対して均質寸法が0.1程度以下ならば、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。また、同時に最大せん断ひずみ分布も逆解析によりほぼ再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 櫻井春輔, 進士正人: マイコン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.
- 2) 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.
- 3) 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.