

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

岡崎 泰幸^{1*}・熊坂 博夫²・進士 正人³

¹山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻（〒755-8611 宇部市常盤台二丁目16-1）

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

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

*E-mail: t009vf@yamaguchi-u.ac.jp

本研究は、不均質性を内包する岩盤に対してトンネル掘削を行う際の、等価な初期応力や物性を評価する方法について議論する。そのため、不均質な岩盤モデルを作成し、トンネル掘削解析を実施した。そして、得られたトンネル掘削時の地中変位から岩盤を均質モデルと仮定した逆解析を行った。その結果、不均質な岩盤にトンネルを掘削すると、不均質性の程度により弾性係数や初期応力は大きく変化するものの、トンネル掘削面付近の岩盤の不均質性により強く影響を受けることが分かった。すなわち、トンネル壁面の不均質性を正確に評価することでトンネル掘削時の岩盤挙動がより精度よく予測できることが分かった。

Key Words : inhomogeneous rock mass, numerical analysis, back analysis, modulus of elasticity

1. はじめに

岩盤にトンネルなどの地中構造物を建設する時、事前に掘削時の状況を把握するため、数値解析を用いてトンネル周辺の応力状態と変形挙動を予測する。この場合、岩盤は本来不均質であるにも関わらず、岩盤の力学特性は均質な状態を仮定し、初期応力は等方応力状態として実施されることが多い。そのため、施工段階において現場計測を行い、岩盤の挙動を把握することで、設計や当初実施した数値解析の見直しを行う「情報化施工」が一般に行われている。現場計測の結果から岩盤の状態を把握する解析手法の一つとして、トンネル掘削中の変位計測結果から、岩盤の弾性係数や初期応力を推定する逆解析手法が提案されている¹⁾。

本研究では不均質性を有する岩盤を再現し、その岩盤中にトンネル掘削を行った際のトンネル周辺の地中変位を求める。そして、得られた地中変位を用いて岩盤を均質モデルと仮定した逆解析を行い、岩盤の弾性係数、初期応力・初期主応力の傾きを求める。この逆解析結果は不均質岩盤を逆解析において見かけ上均質モデルと仮定したために得られた初期応力・弾性係数・応力の傾きである。この結果から、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を検討する。

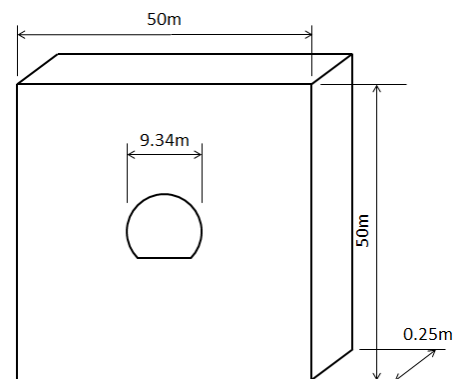


図-1 解析モデルの寸法

2. 不均質岩盤の順解析

(1) 数値解析モデル

本研究に用いる解析モデルの寸法（奥行き0.25m）を図-1に示す。解析モデルのメッシュの最小基本寸法は0.2m×0.2m×0.25mとし、岩盤の不均質性は、異なる弾性係数をもつ四角形要素の大きさを変化させて組み合わせることで表現した。

(2) 初期応力の設定と掘削時の拘束条件

順解析で仮定する初期応力は5MPaの等方応力状態と鉛直応力を5MPa、水平応力（奥行方向も同様）を

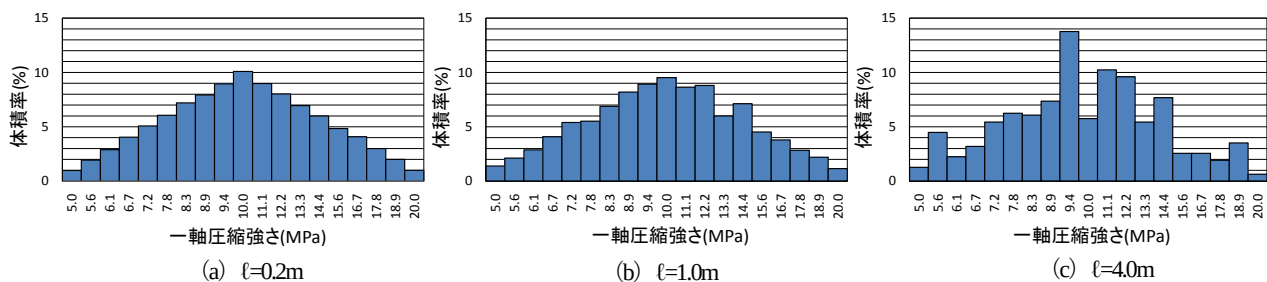


図-2 岩盤の一軸圧縮強度 (σ_c) の頻度分布

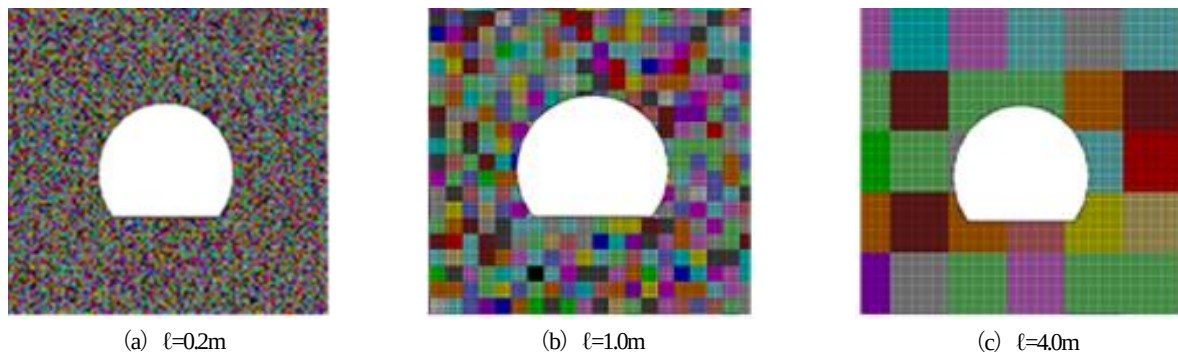


図-3 トンネル近傍の不均質岩盤の物性分布状態

表-1 解析モデル数と不均質寸法 ℓ / トンネル直径 D

不均質寸法 ℓ (m)	解析モデル数	不均質寸法 ℓ /代表径D
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

6.25MPaにした応力状態（側圧係数1.25）の2パターンの応力状態を仮定した。

(3) 岩盤物性の不均質性の設定

a) 物性値の設定について

岩盤物性は既往の研究²⁾を参考に、基本物性を一軸圧縮強度 (σ_c) 10MPaとし、その最大値を20MPa, 最小値を5MPaと設定した。また、一軸圧縮強度 (σ_c) は5～10MPaおよび10～20MPaの間を等間隔に8分割に離散化し個々の要素の物性値とした。岩盤中の一軸圧縮強度 (σ_c) の分布は乱数を用いて、解析モデル全体における各物性値の要素の体積率を三角形分布となるように設定した。ここで、体積率とは前述の岩盤の物性値をもつ要素数が解析モデル領域内に占める割合である。

順解析では岩盤を弾性体と仮定した。それぞれの要素の弾性係数E, ポアソン比 ν は、次式(1), (2)で示される軟岩における一軸圧縮強度 (σ_c) との相関式を用いて設定した³⁾。

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

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

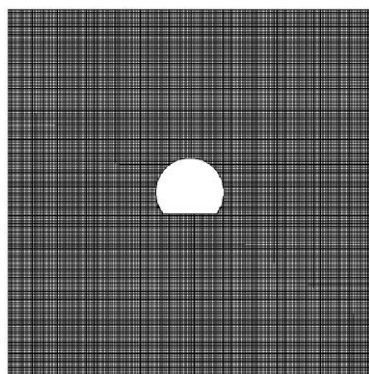
b) 不均質性の設定について

本研究で想定した不均質性は、一定の物性値を有する要素寸法（以下、「不均質寸法 ℓ 」と呼ぶ。）の大きさの変化で表現している。そこで、解析ケースは不均質寸法 (ℓ) を0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0mとする5ケースとした。それぞれのケースにおいて、全て異なる物性分布のモデ

ルを設定し、表-1に示すような解析モデル数で解析を行った。不均質寸法 (ℓ) が0.2, 1.0, 4.0mの各ケースの一軸圧縮強度 (σ_c) の頻度分布の一例を図-2に示す。また、トンネル近傍付近の不均質岩盤の物性分布状態の例を図-3に示す。ここで、図-3の色の違いはそれぞれの要素の弾性係数とポアソン比の違いを示している。図-2, 3より明らかなように、不均質寸法 (ℓ) が大きくなるに伴い、モデルの不均質要素数が少なくなる。（例えば、不均質寸法 ℓ が0.2m, 1.0m, 4.0mの時で、不均質要素数はそれぞれ62500個, 2500個, 169個となる。）そのため、三角形分布を目指したものの、体積率の分布はある程度ばらつくことが分かる。

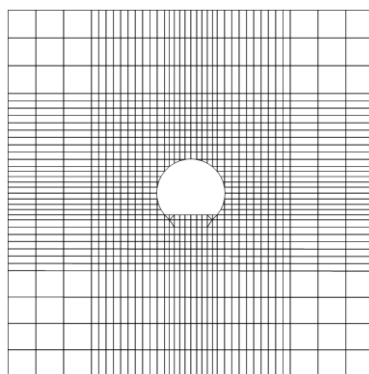
(4) 掘削解析モデルの境界条件

掘削解析ではモデル前面・背面に面外方向の変位拘束とした。ここではモデル上面にも変位拘束（鉛直固定・水平自由）としている。



(a) 順解析に用いた要素分割図

全要素数：62664個



(b) 逆解析に用いた要素分割図

全要素数：1250個

図-4 解析に用いたモデル

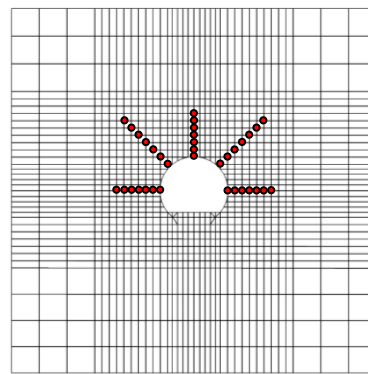
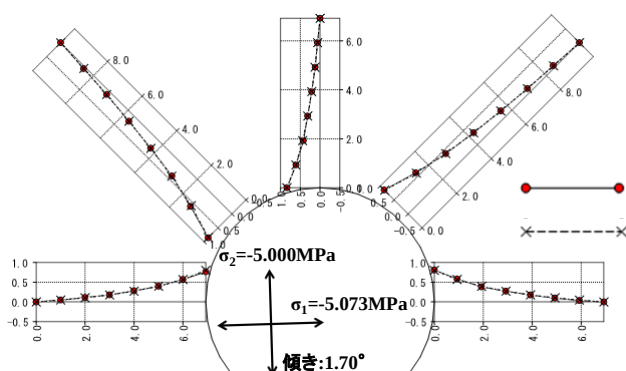


図-5 逆解析時の地中内変位の入力点

表-2 モデルの違いによる逆解析の精度

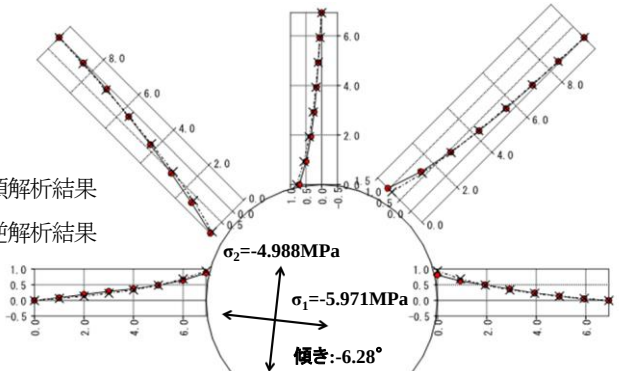
	水平応力(σ_x)	鉛直応力(σ_y)	せん断応力(τ_{xy})	弾性係数(E)
順解析で与えたパラメータ	-5.000	-5.000	0	2009
逆解析で算出されたパラメータ	-4.993	-5.000	0.001	1987

単位：MPa



水平応力 σ_x (MPa)	-5.073	せん断応力 τ_{xy} (MPa)	-0.002
鉛直応力 σ_y (MPa)	-5.000	弾性係数(MPa)	2151

(a) 不均質寸法 $l=0.2m$



水平応力 σ_x (MPa)	-5.959	せん断応力 τ_{xy} (MPa)	0.107
鉛直応力 σ_y (MPa)	-5.000	弾性係数(MPa)	2215

(b) 不均質寸法 $l=4.0m$

図-6 等方応力状態の順解析結果と逆解析結果の地中内変位比較図 (単位：cm)

3. 不均質岩盤の逆解析

(1) 逆解析プログラム

本研究では、直接逆解析プログラムDBAP¹⁾を用いた。このプログラムが仮定する岩盤モデルは弾性モデルであり、計測変位（例えば、内空変位、天端沈下、地中内変位）、鉛直土被り圧（ σ_y ）、ポアソン比を入力データとし、掘削断面の初期水平応力（ σ_x ）、せん断応力（ τ_{xy} ）および弾性係数を逆解析する。

(2) 逆解析の解析条件

a) 逆解析モデル

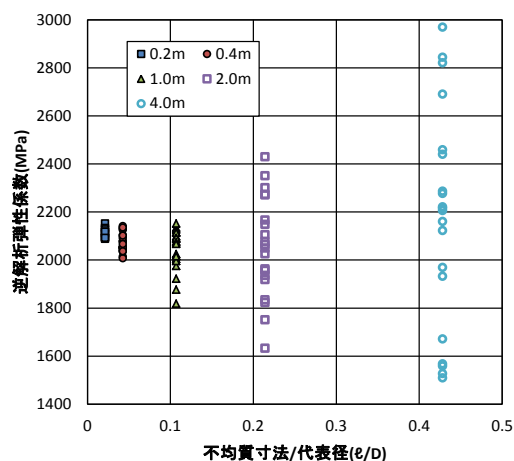
解析に用いたモデル図を図-4に示す。図-4(b)に示すように逆解析で用いたモデルは図-4(a)に示す順解析で用いた解析モデルより簡素な解析モデルを採用している。解析メッシュの違いを調べるため、同じ初期応力および弾性係数、ポアソン比を与えた時の均質岩盤をトンネル掘削する順解析を行い変位を求め、その変位から逆解析

で弾性係数を求めた時の比較を表-2に示す。この表-2から、モデルの簡素化による影響は小さく、本研究の逆解析では図-4(b)の解析モデルを用いることとした。

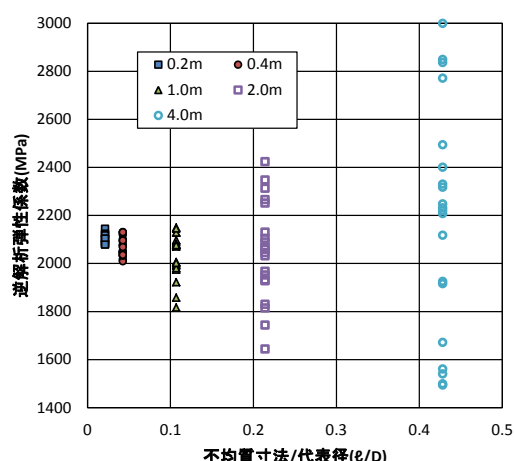
b) 逆解析を行う際に与えたパラメータ

本研究で逆解析を行う際に入力するパラメータは、地中内変位、鉛直土被り圧（ σ_y ）、ポアソン比である。逆解析で用いる順解析における地中内変位の算出位置を図-5に示す。ここで、地中内変位はトンネル地中変位を模擬して、トンネル中心から計測線上の最も遠い点の半径方向の変位との相対変位量のことである。

逆解析は、不均質寸法 l を変化させた作成した90モデルに対し、初期応力を変化させて実施された順解析結果（180ケース）のすべての地中変位量に対し実施した。そして、不均質寸法 l および初期応力を変化させた時の岩盤を均質モデルとした時の弾性係数および初期応力を求めた。なお、土被り圧（ σ_y ）は鉛直応力とし、順解析時に与えた鉛直応力である5MPaを与えた。また、ポアソン比は順解析時にモデルの上面に等変位速度を与え、モ



(a) 5MPaの等方応力状態



(b) 鉛直応力5MPa・水平応力6.25MPaの応力状態

図-7 逆解析弾性係数と不均質寸法/トンネル直径の関係

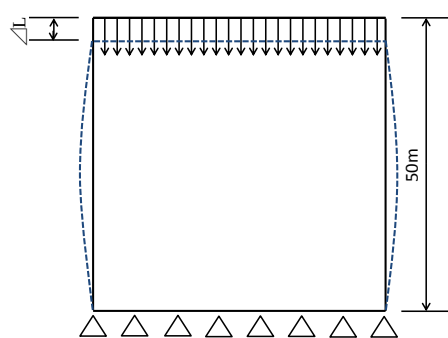


図-8 一軸圧縮数値実験

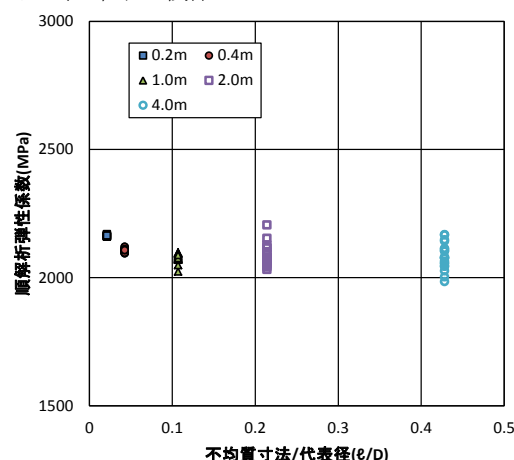


図-9 順解析弾性係数と不均質寸法/トンネル直径の関係

デル全体の縦ひずみと横ひずみの比により算出した。これにより、逆解析で仮定するポアソン比は0.285～0.290とした。各解析ケースにおけるポアソン比の相違は逆解析に与える影響は少ないと考えられるため、各モデル毎に異なるポアソン比を用いた。

4. 逆解析結果と考察

等方応力時の不均質寸法が異なる逆解析結果と順解析結果の地中変位の比較図の一例を図-6に示す。また、図中に、逆解析の結果得られた初期応力分布および弾性係数を示す。この図から明らかなように順解析と逆解析の地中変位の比較結果は、不均質寸法が大きくなると若干ずれが見られるものの概ねよく一致する。それにもかかわらず、不均質寸法 (l) が大きくなると順解析の初期応力と逆解析の初期応力は不均質性の影響を受けて変化することが分かる。また、弾性係数についても不均質寸法 (l) の違いによりばらつきが生じる。本研究ではこのような傾向について考察する。

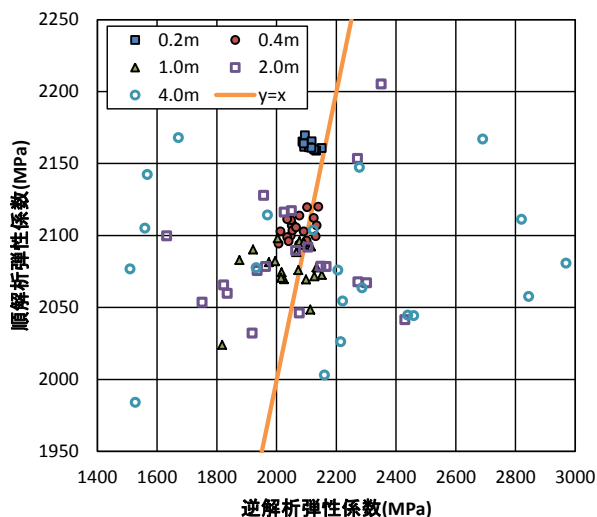
(1) 逆解析により算出した弾性係数の結果

a) 逆解析によって算出した弾性係数

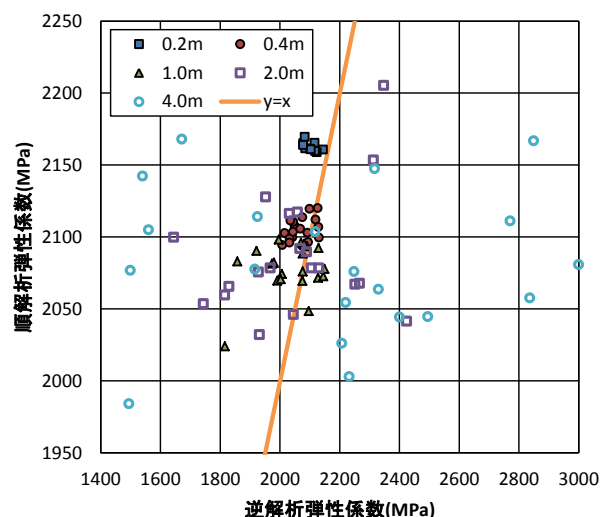
弾性係数の逆解析結果と不均質寸法 (l) / トンネル直径 (D) との関係を図-7に示す。本研究では、逆解析により得られる弾性係数を“逆解析弾性係数”と呼ぶ。なお、表-1にも示すように水平軸は不均質寸法 (l) をトンネル代表径 (D) で除して無次元化している。この図から、不均質寸法 (l) が大きくなるにつれて逆解析弾性係数のばらつきも大きくなり、不均質寸法が $l=4.0\text{m}$ の時には1,500~3,000MPaで分布することが分かる。これは、図-7(a)に示す等方応力時も図-7(b)に示す側圧係数を1.25とした時でもほぼ同様の結果となる。

b) モデル全体の弾性係数

本研究では逆解析弾性係数と比較するために、順解析の不均質岩盤モデルに対して、図-8に示すようなモデル全体の一軸圧縮数値実験を行い、応力-ひずみ関係から不均質岩盤における平均的な弾性係数を算出した。本研究ではこれを“順解析弾性係数”と呼ぶ。この順解析弾性係数と不均質寸法 (l) / トンネル直径 (D) の関係を図-9に示す。この図から、順解析弾性係数は不均質寸法が大きくなるにつれ、順解析弾性係数の平均値は若干低

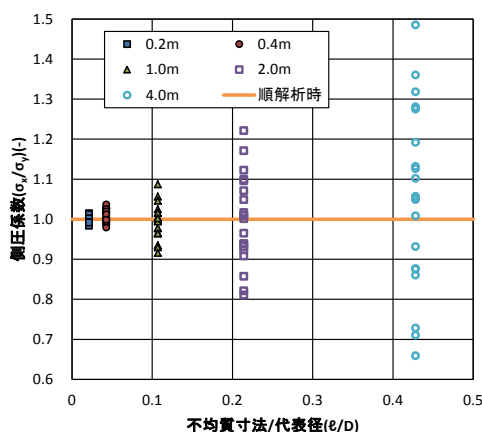


(a) 5MPaの等方応力状態

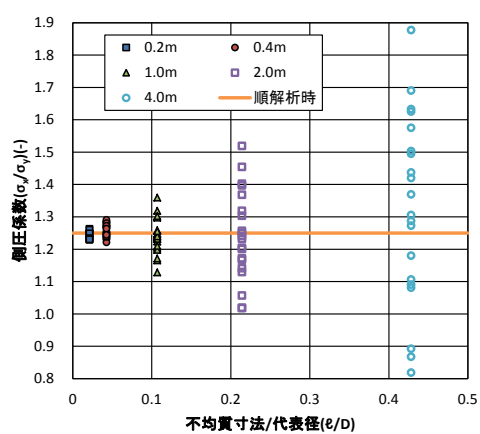


(b) 鉛直応力5MPa・水平応力6.25MPaの応力状態

図-10 順解析弾性係数と逆解析弾性係数の関係



(a) 5MPaの等方応力状態



(b) 鉛直応力5MPa・水平応力6.25MPaの応力状態

図-11 側圧係数 (σ_x/σ_y) と不均質寸法/トンネル直径の関係

下する傾向を示すことが分かる。

c) 順解析弾性係数と逆解析弾性係数との関係

順解析弾性係数と逆解析弾性係数の関係を図-10に示す。

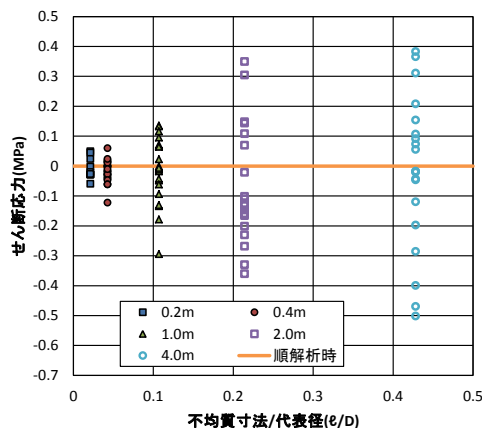
図-10から、不均質寸法 $l=0.2m$ で0~4%程度、不均質寸法 $l=0.4m$ で2~5%程度、不均質寸法 $l=1.0m$ で4~12%程度、不均質寸法 $l=2.0m$ で16~29%程度、不均質寸法 $l=4.0m$ で30~39%程度のばらつきで、不均質寸法が大きくなるにつれて、順解析弾性係数に比較して逆解析弾性係数のばらつきが大きくなること分かる。このことから、不均質寸法10m以下、つまりトンネル直径 $D=934m$ に対して不均質寸法(l)が約0.1D以下では、不均質岩盤に対してトンネル掘削を実施しても、岩盤の平均的な弾性係数のばらつきは小さいことが分かる。従って、トンネル掘削の場合、不均質寸法(l)が約0.1D以下の岩盤では岩盤をほぼ等価な弾性体と仮定してもよいと考えられる。逆に不均質寸法 $l=24m$ 、つまりトンネル直径 D に対して不均質寸法が約0.1D以上では、逆解析弾性係数は順解析弾性係数の値より大きくばらつく。つまり、不均質寸法(l)が0.1D以上では岩盤全体を等価な弾性体ととらえることができないことが分かる。このような結果は、

図-10(b)に示すように側圧係数が1.25の時も同様である。

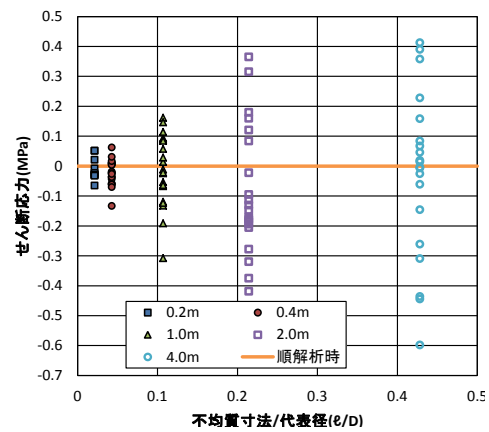
(2) 初期応力の逆解析結果

a) 側圧係数 (σ_x/σ_y) の逆解析結果

側圧係数 (σ_x/σ_y) の逆解析結果と不均質寸法 (l) / トンネル直径 (D) の関係を図-11に示す。ここで図-11の鉛直軸は、逆解析時に与えた鉛直応力 (σ_y) が5MPaの固定値であるため、実質、水平応力 (σ_x) の変化率を表している。図-11から、図-7と同様に不均質寸法が大きくなるにつれて側圧係数 (σ_x/σ_y) のばらつきが大きくなり、等方応力時も側圧係数1.25時もよく似た結果を得た。順解析時の初期応力に対して逆解析の初期応力のばらつきは、不均質寸法 $l=0.2m$ で2~2%程度、不均質寸法 $l=0.4m$ で3~4%程度、不均質寸法 $l=1.0m$ で10~9%程度、不均質寸法 $l=2.0m$ で19~22%程度、不均質寸法 $l=4.0m$ で35~50%程度であった。このばらつき範囲は、弾性係数のばらつき範囲は若干異なる。このことから、不均質岩盤を等価な弾性体とみなしてよいと考えられるトンネル直径に対する不均質寸法の大きさは、弾性係数の評価と初期応力とは異なる可



(a) 5MPaの等方応力状態



(b) 鉛直応力5MPa・水平応力6.25MPaの応力状態

図-12 セン断応力と不均質寸法/トンネル直径の関係

能性があると考えられる。

b) セン断応力の逆解析結果

セン断応力の逆解析結果と不均質寸法 (l) / トンネル直径 (D) の関係を図-12に示す。図-12から、図-7, 11と同様に不均質寸法が大きくなるにつれてセン断応力のばらつきが大きくなる。等方応力時も側圧係数1.25時もほぼ同様の結果である。この結果は、順解析の初期応力でセン断応力を0と設定していたにもかかわらず生じている。このことから、不均質な岩盤にトンネル掘削を行うと、見かけ上セン断応力が発生し、主軸が傾くと逆解析では評価する場合があることが分かる。

5. おわりに

本研究では、不均質岩盤中にトンネル掘削を行い、それにより得られた地中変位に対して岩盤を均質と仮定した逆解析を行い、不均質な岩盤をにかけ上均質モデルと仮定した時、岩盤の初期応力、弾性係数、応力の傾きにばらつきが生じることがわかった。その中でトンネルの

代表径 D に対して不均質寸法 (l) が0.1 D 程度ならば、不均質岩盤をほぼ等価な弾性体と仮定できることが分かった。今後は、傾きを有する初期応力状態の地山に対して、不均質な影響に対する検証をさらに行っていきたい。また、トンネル周辺の岩盤の弾性係数に着目して、岩盤の応力や変形をより正確に把握していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

EVALUATION OF INITIAL STRESS AND MATERIAL PROPERTIES OF INHOMOGENEOUS ROCK MASS BY USING BACK ANALYSIS

Yasuyuki OKAZAKI, Hiroo KUMASAKA and Masato SHINJI

This study discusses the distribution of the modulus of elasticity and the initial stresses in inhomogeneous rock mass. At first, numerical analyses of tunnel excavation are carried out in inhomogeneous rock mass. The displacements of extensometer measurement around tunnel can be collected. Secondary, the back analyses assuming as homogeneous rock are carried out by using extensometer displacements. From the result of back analysis, the average modulus of elasticity and the initial stresses are different from the initial parameter of numerical analysis. In addition, inhomogeneous rock mass can be assumed as the apparent continuum material if inhomogeneous length is 10% less than the diameter of tunnel.