

# 地山の不均質性を考慮した山岳トンネル支保工の信頼性設計に関する基礎的研究

岡崎 泰幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 助教.

現状の山岳トンネルの支保設計の多くは、道路・鉄道トンネルともに地山等級と経験的な指標に基づく地山分類によって支保パターンが決定されている。このような設計手法は、地山の不均質性などに起因する地山の不確実性を明確に考慮しておらず、トンネル設計が内包する施工中のトンネル崩壊などのリスクの検討が不足していると考えられる。そこで、本研究では、山岳トンネルの施工中の安全性をより適切に確保するために、数値解析を用いて地山の不均質性が支保工応力に与える影響の把握を試みた結果を基にして、その支保工応力の不確実性を信頼性設計の考え方を用いて考慮できる山岳トンネルの支保設計に関する基礎的検討を行った。

キーワード：トンネル，不均質性，数値解析，信頼性設計

## 1. はじめに

現状の山岳トンネルの支保設計の多くは、道路・鉄道トンネルともに地山等級と経験的な指標に基づく地山分類によって支保パターンが決定されるというトンネル特有の設計が行われており、従来の経験に大きく依存している。このような経験的な設計手法は、地山の不均質性などに起因する地山の不確実性を明確に考慮しておらず、トンネルの支保設計が内包する施工中のトンネル崩壊などのリスクの検討が不足していると考えられる。逆に言えば、トンネルの支保設計に地山の不確実性を十分に考慮していないことから、過度な支保や覆工を採用している可能性があり、トンネル建設コストの経済性の検討が不足しているとも考えられる。加えて、設計条件に特殊な条件（特殊な使用用途や超大断面など）が含まれるトンネルを山岳工法で建設する場合、トンネル支保工の健全性の照査には数値解析が一般的に用いられるが、地山を地層ごとに均質と仮定する程度の簡略化したトンネル掘削解析が実施されることが多く、上記に示したような検討が同様に不足している。すなわち、現状の山岳トンネルの支保設計は、地山の不均質性などに起因して生じるトンネル支保工に作用する応力の不確実性を十分に考慮できておらず、適切なトンネルの設計ができていないと言え難い。

そこで、著者<sup>1)</sup>は、まず地山の不均質性を考慮した疑似2次元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、山岳工法で施工されたトンネルで取得さ

れた支保工応力計測結果と同様な傾向の結果を再現した。本研究では、その解析結果から得られる支保工応力のばらつきを統計的に評価し、その支保工応力の不確実性を信頼性設計（レベルI設計法）の考え方を用いて考慮できる山岳トンネルの支保設計に関する基礎的検討を行う。特に、本研究では、地山の不均質性が支保工応力に与える影響をレベルI設計法に用いられる部分係数として算出し定量化を試みる。

## 2. 既往研究

著者<sup>1)</sup>の既往研究では、有限差解析コードFLAC 3D<sup>2)</sup> 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、地山の不均質性を考慮した疑似2次元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、山岳工法で施工されたトンネルで取得された支保工応力計測結果と同様な傾向の結果を再現した。

そのトンネル掘削解析では、著者<sup>3)</sup>の既往研究と同様に、地山が本来有する物性の不均質性を同じ地山物性値をもつ正方形要素の集合体で再現し、その集合体を変化させることで地山の不均質性のスケールの違いを表現した。なお、個々の正方形要素の集合体の大きさを“均質寸法”と定義し、既往研究ではそれを0.2, 1.0, 2.0mと設定し（図-1参照）、トンネル掘削解析を実施した<sup>1)</sup>。ここで、図-1中の着色は、地山物性値の違いを表現している。各均質寸法の解析モデルにおける地山物性値の配

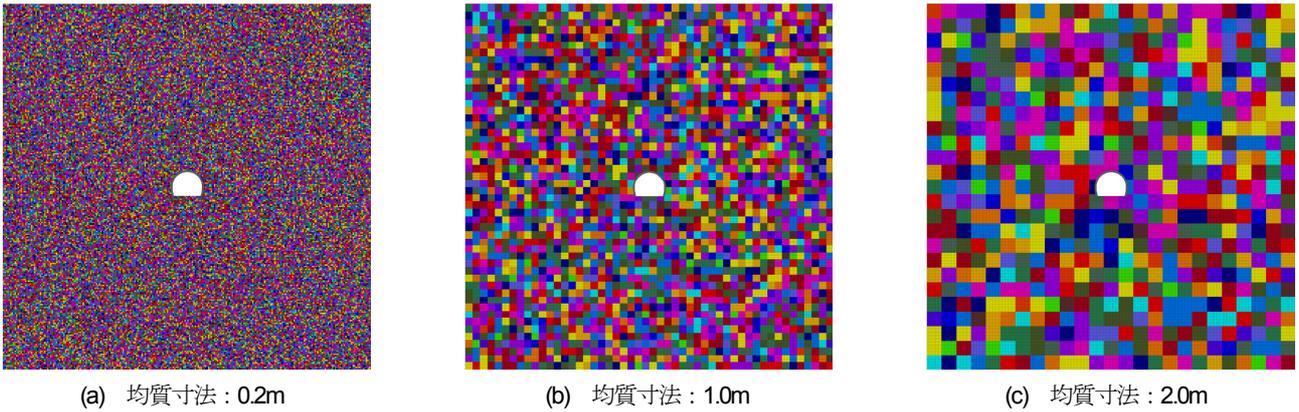


図-1 地山の不均質性を考慮した解析モデルの物性分布状態の一例<sup>1)</sup>

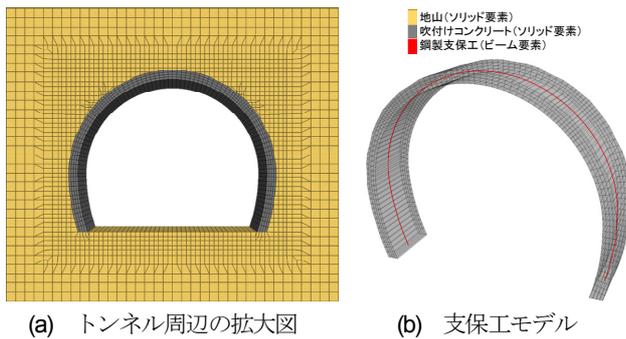


図-2 解析モデル拡大図<sup>1)</sup>

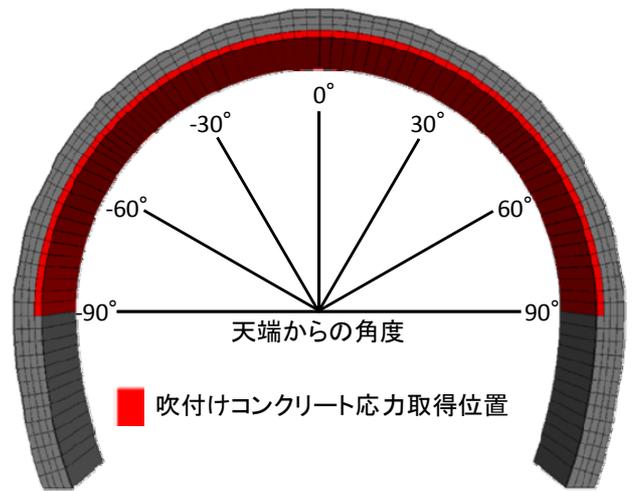


図-3 吹付けコンクリート覆工の応力取得位置<sup>1)</sup>

置は、解析モデルの各均質寸法に対して異なる乱数を発生させて、設定した解析用の一軸圧縮強さの頻度分布に近づくようにランダムに各要素群に配列させることにより決定した。ここで、地山物性値の配列が異なる解析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1.0mおよび2.0mでそれぞれ100ケースとした。

数値解析における諸条件（解析領域と境界条件、解析モデル、地山物性値の設定、支保工物性値の設定、初期応力の設定、掘削応力解放率の設定および掘削解析手順）に関しては、文献1)を参照されたい。ただし、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われ、鋼製支保工のモデル化はビーム要素で行われている（図-2参照）。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されている（図-2(b)中赤線参照）。

上記のような条件において、地山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、均質寸法が1.0m~2.0m（掘削径Dに対して約0.2D~0.4D）であるケースにおいて、取得された支保工応力計測結果と同様な傾向の結果が十分再現できることがわかっている<sup>1)</sup>。

### 3. 支保工応力のばらつきに関する評価

本章では、著者<sup>1)</sup>の既往研究の解析結果から得られる支保工応力のばらつきを統計的に評価する。

#### (1) 支保工応力の取得位置

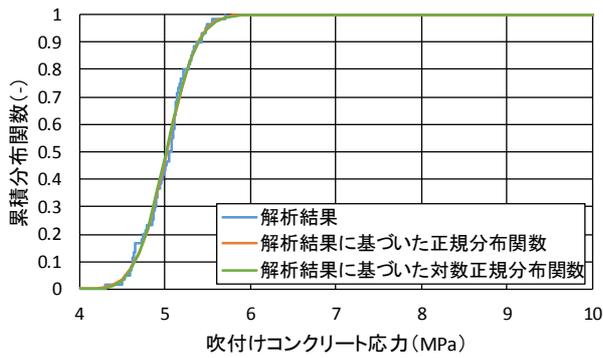
解析結果から取得する吹付けコンクリート覆工の応力取得位置を図-3に示す。本論文では、最大圧縮応力が最大になると予測される坑道近傍の位置である図-3の赤色の位置の吹付けコンクリート応力を取得した。

鋼製支保工応力については、解析後のビーム要素（図-2(b)中赤線参照）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外縁応力を算出した。

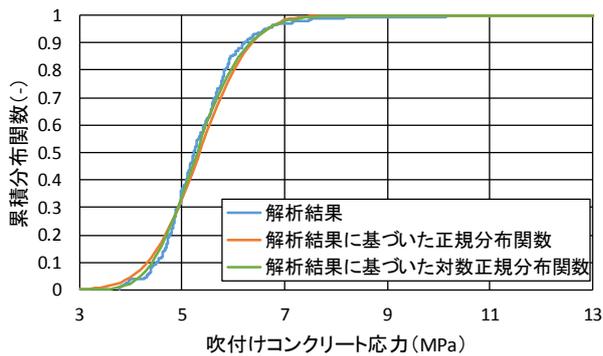
山岳トンネルの施工時の安全性については、天端部の崩壊が最も問題になると考えられるため、取得する支保工応力データは坑道の上半のみとした。取得したデータは、図-3に示すように天端からの角度別に分けて評価することとした。ここで、天端からの角度は掘削方向に向かって天端から時計回りを正とした。

#### (2) 支保工応力のばらつきの把握

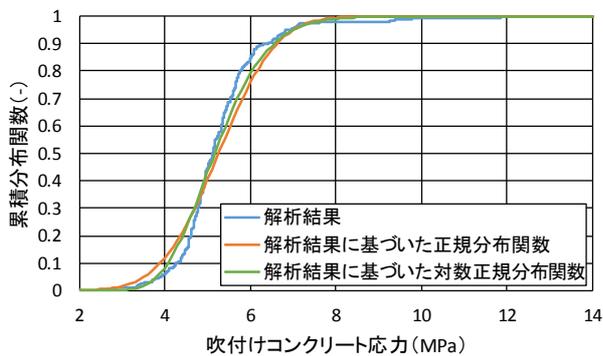
支保工応力のばらつきを把握するために、支保工応力のばらつきを近似できる分布曲線を調査する。そこで、本研究では各均質寸法の天端からの角度90°の位置の各支保工応力に対し、正規分布関数と対数正規分布関数を用いて、図-4に示すようなKolmogorov-Smirnov検定<sup>4)</sup>を行った。図中には、一例として吹付けコンクリート応力の



(a) 均質寸法 : 0.2m



(b) 均質寸法 : 1.0m



(c) 均質寸法 : 2.0m

図4 吹付けコンクリート応力の累積度数と確率分布関数

検定結果のみを示す。その結果、支保工応力の累積度数と各分布関数との差の最大値と有意水準5%の限界値は、表-1に示すような結果となった。表-1中の黄色で塗られたケースは、累積度数と各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。表から、正規分布関数で検定を実施したケースでは、均質寸法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頻度分布は、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、均質寸法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

表-1 各支保工応力の累積度数と各確率分布関数の比較結果

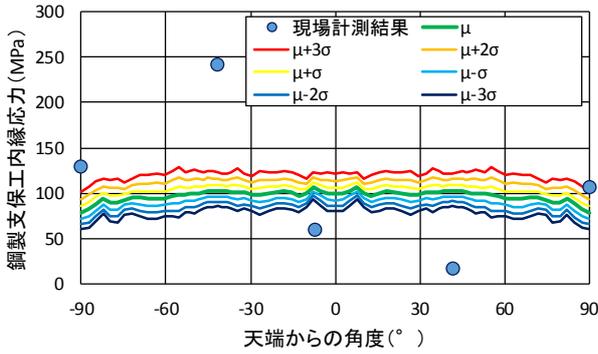
均質寸法	支保工応力	累積度数と正規分布関数との差の最大値	累積度数と対数正規分布関数との差の最大値	有意水準5%の限界値
0.2m	吹付けコンクリート応力	0.074	0.085	0.176
	鋼製支保工内縁応力	0.072	0.087	
	鋼製支保工外縁応力	0.149	0.135	
1.0m	吹付けコンクリート応力	0.071	0.049	0.096
	鋼製支保工内縁応力	0.076	0.054	
	鋼製支保工外縁応力	0.112	0.079	
2.0m	吹付けコンクリート応力	0.126	0.086	0.096
	鋼製支保工内縁応力	0.106	0.095	
	鋼製支保工外縁応力	0.160	0.104	

ケースも少ないことがわかる。つまり、解析から得られた支保工応力の頻度分布は、対数正規分布でおおよそ近似できることがわかった。従って、以降では、解析から得られた支保工応力のばらつきは、対数正規分布を用いて評価することとした。

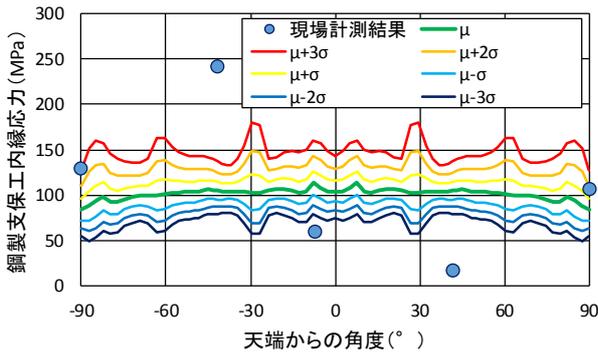
### (3) 支保工応力のばらつきに関する統計的評価

続いて、総計460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均質寸法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平均 ( $\mu$ ) および標準偏差 ( $\sigma$ ) を算出し、 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ 、 $\mu \pm 3\sigma$ として支保工応力のばらつきを統計的に評価した。その結果の一例（鋼製支保工内縁応力）を図-5に示す。図中には、山岳工法で施工されたトンネルで現場計測された鋼製支保工内縁応力のピーク値を同時に示している<sup>1)</sup>。

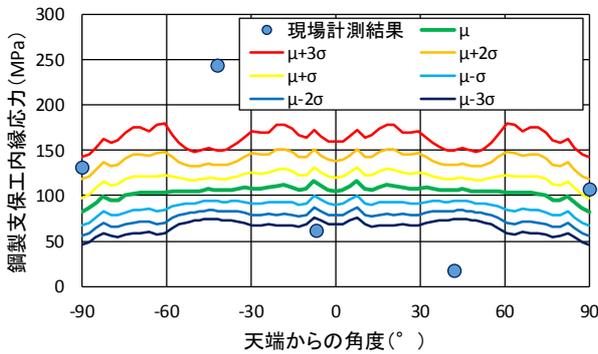
図-5から明らかなように、均質寸法を大きくしても平均値はどのケースもほぼ変化しないものの、支保工応力のばらつき範囲は徐々に広がるのがわかる。また、図-5のその範囲に現場計測結果を当てはめると、現場計測結果が均質寸法0.2m, 1.0m, 2.0mで $\mu \pm 3\sigma$ 内にそれぞれ0%, 40%, 40%分布することがわかる。つまり、均質寸法が大きくなるにつれて、支保工応力のばらつき範囲 ( $\mu \pm 3\sigma$ ) にB計測結果が分布する割合が大きくなるのがわかる。すなわち、事前調査から材料物性の頻度分布を求めてある程度の大きさの均質寸法を設定し、それらをもとにモンテカルロシミュレーションを実施し、その結果に対して分布関数（本研究では、対数正規分布関数）を想定すると、支保工に作用する応力の変動量を確率的に予測できると考えられる。つまり、図-5の天端からの角度45°の現場計測結果のように、現場データが支保工応力のばらつき範囲 ( $\mu \pm 3\sigma$ ) に分布しない箇所があったとしても、確率的にそのような箇所は少ないと説明することができると考えられる。



(a) 均質寸法 : 0.2m



(b) 均質寸法 : 1.0m



(c) 均質寸法 : 2.0m

図-5 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

トンネル構造物の安全性などを考慮に入れた上で、作用する応力に対してどの程度の余裕をとるかは非常に重要な課題である。地山材料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応力を確率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と考えられる。次章では、本章で得られた支保工応力データに対数正規分布を適用した上で、その支保工応力の不確実性を信頼性設計（レベルI設計法）の考え方をを用いて考慮できる山岳トンネルの支保設計に関する基礎的検討を行う。

#### 4. 山岳トンネルの支保設計への信頼性設計（レベルI設計法）の適用に関する基礎的検討

本章では、前章で得られた支保工応力データに対数正規分布を適用した上で、その支保工応力の不確実性を信頼性設計（レベルI設計法）の考え方をを用いて考慮できる山岳トンネルの支保設計に関する基礎的検討を行う。特に、本章では、地山の不均質性が支保工応力に与える影響をレベルI設計法に用いられる部分係数として算出し定量化を試みる。

##### (1) レベルI設計法

レベルI設計法は、荷重や材料特性値等の不確実性に対し、それらの特性値またはそれらを基に計算された荷重や抵抗を部分係数により割り引くことで対処し、従来の決定論的な設計照査式を用いることで信頼性を確保しようとする設計法である<sup>5)</sup>。よって、この設計法は、部分係数法などと呼ばれている。例えば、コンクリート標準示方書では、線形解析を用いて断面破壊の終局限界状態の照査（構造物の安全性照査）を行う場合、以下に示すような設計照査式となる<sup>6)</sup>。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0 \quad (1a)$$

$$R_d = f'_{ck} / \gamma_m / \gamma_b \quad (1b)$$

$$S_d = \sum \{ \gamma_a \cdot (\gamma_f \cdot F_k) \} \quad (1c)$$

ここで、 $\gamma_i$ ：構造物係数、 $S_d$ ：設計断面力、 $R_d$ ：設計断面耐力、 $f'_{ck}$ ：設計基準強度、 $\gamma_m$ ：材料係数、 $\gamma_b$ ：部材係数、 $\gamma_f$ ：荷重係数、 $\gamma_a$ ：構造解析係数である。

上記のような部分係数を定めることで、レベルI設計法の性能照査は容易となる。そのため、例えばEurocode<sup>7)</sup>などにおいて部分係数法は採用されている。このような部分係数の決定は、確率に基づいて実施される。本研究では、地山の不均質性がトンネル支保工応力に与える影響を部分係数（以下の式的作用係数 $\gamma$ ）として定量的に示すために、以下の確率変数が対数正規分布に従う場合の式<sup>8)</sup>を用いることとした。

$$\phi R_n \geq \gamma S_n \quad (2a)$$

$$\phi = \exp(-\alpha_R \beta_T V_R) \frac{\mu_R}{R_n} \quad (2b)$$

$$\gamma = \exp(\alpha_S \beta_T V_S) \frac{\mu_S}{S_n} \quad (2c)$$

ここで、 $\phi$ ：耐力係数、 $R_n$ ：部材耐力の公称耐力、 $\gamma$ ：作用係数、 $S_n$ ：作用の基本値、 $\alpha_R$ 、 $\alpha_S$ ：分離係数（変動係数の関数）、 $\beta_T$ ：目標信頼性指標、 $\mu_S$ 、 $\mu_R$ ：作用力および部材耐力の平均値、 $V_S$ 、 $V_R$ ：作用力および部材耐力の

表-2 用いる支保工応力のデータ位置とその統計量

	均質寸法 (m)	天端からの 角度(°)	平均 $\mu$ (MPa)	標準偏差 $\sigma$ (MPa)	$\mu+3\sigma$ (MPa)
吹付け コンクリート 応力	0.2	1.27	6.38	0.32	7.42
	1.0	28.0	6.57	0.85	9.61
	2.0	62.0	6.53	1.14	10.8
鋼製 支保工 内縁応力	0.2	55.5	98.1	9.21	129
	1.0	29.4	103	20.0	180
	2.0	60.6	104	19.6	179
鋼製 支保工 外縁応力	0.2	26.6	105	8.95	135
	1.0	26.6	110	18.6	180
	2.0	60.6	104	26.5	214

変動係数である。

(2) 部分係数の算出における諸条件

本研究では、式(2a)の作用を前章で得られた支保工応力、部材耐力を支保工応力に抵抗する支保工の部材強度とした。その際、用いる支保工応力のデータは、各均質寸法の各天端からの角度のデータに対数正規分布を仮定した際に $\mu+3\sigma$ が最も大きくなった位置を用いた(表-2参照)。ここで、式(2c)の分離係数 $\alpha_s$ 、支保工応力の平均値 $\mu_s$ および支保工応力の変動係数 $V_{st}$ は、表-2から求められる値である。また、終局限界状態を対象として用いられる目標信頼性指標 $\beta_{st}$ は3.1, 3.8, 4.3と提案されている<sup>9)</sup>ことから、それぞれの目標信頼性指標 $\beta_r$ を用いることとした。式(2c)の作用の基本値 $S_{st}$ は、本検討では支保工応力の基本値を指すが、その値は地山条件によって変化するため得ることが難しい。そこで、既往研究<sup>1)</sup>において地山の不均質性を考慮する際に用いた地山物性の頻度分布の平均物性値を用い、地山を均質と仮定した同様なトンネル掘削解析を行った。そして、その解析結果の支保工応力を式(2c)中の作用の基本値 $S_{st}$ とした。以上の各値から、式(2c)を用いて作用係数 $\gamma$ を算出した。このような方法により算出された作用係数 $\gamma$ は、地山の不均質性が支保工応力に与える影響を確率的に評価した定量的な値といえる。

一方で、式(2b)、(2c)からわかるように、構造物の設計に確率変数を用いる場合、本来、作用力と部材耐力の両者を確率変数で表現する。しかしながら、既往研究<sup>1)</sup>で実施したトンネル掘削解析では、支保部材の強度のばらつきが地山の材料物性のばらつきと比較して小さいため、支保部材を均質と仮定している。そのため、支保工の部材強度(部材耐力)は確率変数とせず一定とすることとした。この際、各支保工の部材強度(終局限界)は表-3に示すように定義し、これらの値を式(2b)中の部材耐力の公称耐力 $R_n$ とした。なお、各支保工の部材強度(終局限界)は、文献(10)(11)を参考にして定めた。ここで、支保工の引張の終局限界を定義していないのは、トンネル掘削時の支保工において、基本的には圧縮軸力が卓越し、曲げの影響によって局部的に発生する引張応力が小さいと考えられるためである。以上から、本検討では各支保工の部材強度を一定と定義したため、部材強度の変動係

表-3 支保工の部材強度(終局限界)の定義<sup>9)(10)</sup>

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

(注) 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  $\gamma_i = 1.1$

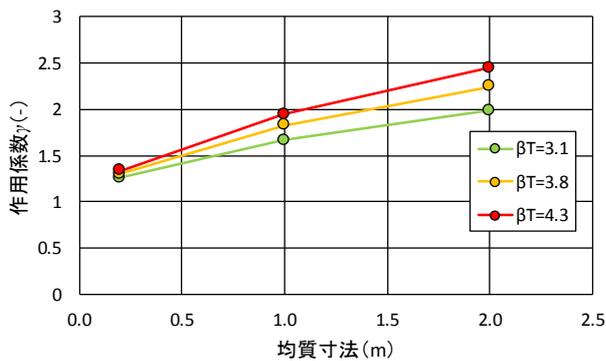
吹付けコンクリートの低減係数  $k_1 = 0.85$

数 $V_{st}$ は0となる。そのため、耐力係数 $\phi$ は必ず1.0の固定値となる。

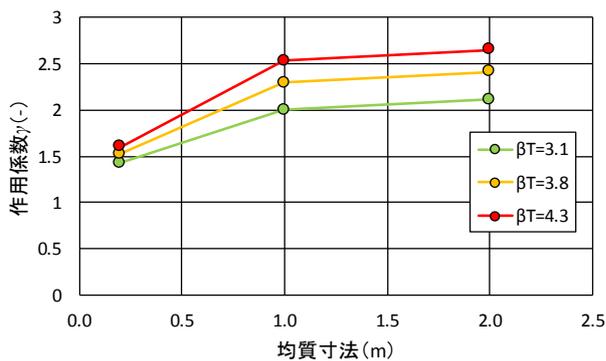
(3) 作用係数の算出結果

地山の不均質性が支保工応力に与える影響を確率的に評価した定量的な値である作用係数 $\gamma$ の算出結果を図-6に示す。図から、均質寸法が大きくなるにつれて作用係数 $\gamma$ が大きくなるのがわかる。つまり、均質寸法が大きくなるほど、地山の不均質性が支保工応力に与える影響が大きくなるのがわかった。既往研究<sup>1)</sup>から、現場で計測されるような支保工に作用する局所的な応力集中を表現するには、均質寸法1.0~2.0m(掘削径Dに対して約0.2D~0.4D)以上の均質寸法を考慮する必要があったことを考えると、本研究で対象とした地山における地山の不均質性がトンネル支保工応力に与える影響は約2.0倍以上を想定する必要があると考えられる。

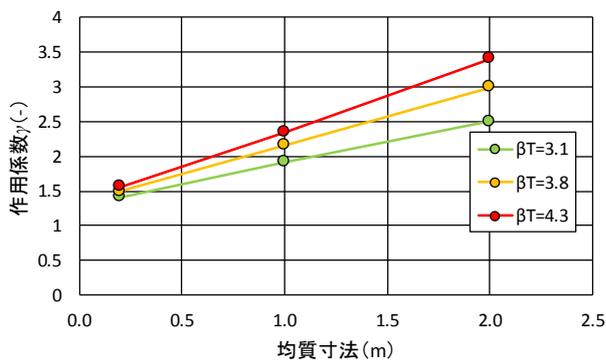
現状の山岳トンネルの支保設計の多くは、地山の不均質性などに起因して生じるトンネル支保工に作用する応力の不確実性を十分に考慮できておらず、適切なトンネルの設計ができているとは言い難い。本検討のように、地山の不均質性がトンネル支保工応力に与える影響を作用係数 $\gamma$ として確率的かつ定量的に示すことができれば、地山物性値の平均値を用いて数値解析を行い、得られた支保工応力を作用係数 $\gamma$ 倍した値を支保工応力の許容値(終局限界など)以下にすることにより、地山の不均質性を考慮したトンネルの支保設計が実施できると考えられる。



(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6 各支保工応力から算出した作用係数

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、地山の不均質性を考慮した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対数正規分布関数で近似し、その支保工応力の不確実性を信頼性設計（レベル I 設計法）の考え方をを用いて考慮できる山岳トンネルの支保設計に関する基礎的検討を行った。特に、本研究では、地山の不均質性が支保工応力に与える影響をレベル I 設計法に用いられる部分係数として算出し定量化を試みた。以下に、その得られた知見を示す。

1) 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、そ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。

- 事前調査から材料物性の頻度分布を求め、地山の不均質性を考慮したモンテカルロシミュレーションを実施し、その解析結果である支保工応力に対して確率分布（本章では、対数正規分布）を想定することで、トンネル支保工応力の変動量を予測でき、確率的にその変動を説明することができると考えられた。
- 各支保工応力から作用係数を算出した結果、対象地山における地山の不均質性がトンネル支保工応力に与える影響は、約2.0倍以上を想定する必要があると考えられた。
- 地山の不均質性がトンネル支保工応力に与える影響を作用係数 $\gamma$ として定量的に示すことができれば、地山の不均質性を考慮したトンネルの支保設計が実施できると考えられた。

本研究では、地山の不均質性に起因して生じるトンネル支保工に作用する応力の不確実性のみには着目しておらず、その他の不確実性については着目していない。そのため、岩盤の不連続性や支保工物性値のばらつきなどに関する不確実性をどのように考慮するかが今後の課題といえる。

## 参考文献

- 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.1-11\_15, 2016.
- 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.
- 岡崎泰幸, 熊坂博夫, 進士正人: 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, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.2, pp.66-77, 2015.
- 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, 丸善株式会社, 1977.
- 本城勇介, 地盤構造物の設計論と設計コード, 第39回地盤工学研究発表会, 展望講演資料, pp.43-59, 2004.
- 土木学会編: 2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.26-29, 2012.
- CEN: EN1997-1:2004 Eurocode7: Geotechnical design – Part 1: general rules, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- 神田順 (監修): 限界状態設計法の挑戦—若き建築構造技術者に向けて, pp.12-35, 株式会社建設技術, 2004.
- ISO: General principle on reliability for structures, International Standard ISO 2394, 1998.
- 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.
- 日本鉄道建設公団: NATM 設計施工指針, pp.338-339, 1996.

