

粒子群最適化による現場計測データを用いたトンネル逆解析 Back analysis using monitoring data on site with particle swarm optimization

亀谷 英樹* 岡村 貴彦**
Hideki Kameya Takahiko Okamura
尾沢 孝三** 梅田 克史**
Kouzou Ozawa Katsushi Umeda
鈴木 健**
Takeshi Suzuki

要 約

トンネル建設工事における情報化施工の一つとして数値解析を用いた逆解析がある。逆解析は、地山や支保部材の挙動を、詳細かつ定量的に表現することができるため、メカニズムの把握、対策工や施工方法の検討において強力な設計ツールとなる。

筆者らは、粒子群最適化（Particle Swarm Optimization：PSO）による最適化手法と有限差分法を組み合わせた比較的簡易な逆解析手法を考案し、数値シミュレーションによって、非線形構成則の地山物性値や地山初期応力に関する複数のパラメータを同時に推定することを試みた。

本稿は、実際の現場計測データを用いた逆解析によって、本手法の実現場への適用性について検証するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 粒子群最適化の概要
- § 3. トンネル工事の概要と逆解析の基本条件
- § 4. I期線トンネルの逆解析
- § 5. II期線トンネルの逆解析
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

NATMによるトンネル建設工事では、現場計測データを用いた情報化施工は施工管理の基本であり、特殊地山や近接施工など現場条件が厳しくなるほど、その重要性や有用性は大きくなる。

情報化施工の一つとして、数値解析を用いた逆解析がある。逆解析は、地山や支保部材および近接構造物の挙動を、詳細かつ定量的に表現することができるため、メカニズムの把握、対策工や施工方法の検討において、強力な設計ツールとなる。

しかしながら、既往の逆解析手法は、弾性解析に限られたり、同定パラメータが少数に制限されることなど制約

条件が多く、他方では、特殊な理論や専用プログラムを使用するため汎用性が低いなどの問題が存在する^{1),2),3)}。

そこで、筆者らは、粒子群最適化（Particle Swarm Optimization：PSO^{4),5),6)}による最適化手法と有限差分法を組み合わせた比較的簡易な逆解析手法によって、地山の非線形特性値や初期応力に関する複数のパラメータを同時に推定することを試み、数値シミュレーションによって、本解析手法の妥当性や問題点について検証を行った^{7),8)}。

本稿は、その次段階として、実際の現場計測データを用いた逆解析を実施し、実現場における適用性について検証するものである。

§ 2. 粒子群最適化の概要

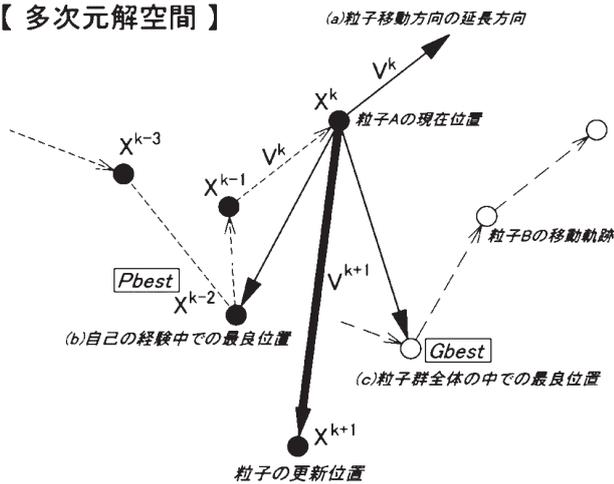
2-1 粒子群最適化の概要

粒子群最適化（Particle Swarm Optimization：PSO）は、1995年にJames KennedyとRussell Eberhart⁵⁾によって提唱された群知能（Swarm Intelligence⁴⁾）と云われる最適化手法の一つであり、鳥や魚など群れを形成して行動する社会性生物の習性をモデルとしている。すなわち、多数の鳥や魚などが群れを形成し、個々の個体が有する情報を互いに交換しあうことで、最も豊かな餌場や目的地への最短ルートを検索するものである。ここで、個々の

* 土木設計部設計課

** 関東土木（支）生麦トンネル（出）

【多次元解空間】



図一1 PSOにおける粒子位置の更新の概念図

個体は、ごく単純な行動原理のみに従って行動するが、それらが群れを成すと驚くほど高い知性を発揮し、目的を達成するために複雑な問題の中で最適な方法や組合せを発見することができる。

上記の考え方を基にして、粒子群最適化は、個々の個体を多次元解空間に存在する多数の粒子の集団とモデル化し、それらの粒子が互いに情報を交換しながら飛び回ることによって、設計者が設定した評価関数の値が最良となる位置を検索するものである。

本手法は、概念が非常に単純明快であり、種々の問題への適用が比較的容易であるが、乱数を用いて同定パラメータを検索するため、同じ条件下で逆解析を複数回実施しても得られる解が必ずしも厳密に一致しない特徴がある。このため、適用に際しては、解析を複数回実施して、この誤差が工学的見地から問題がないことを確認しておく必要がある。

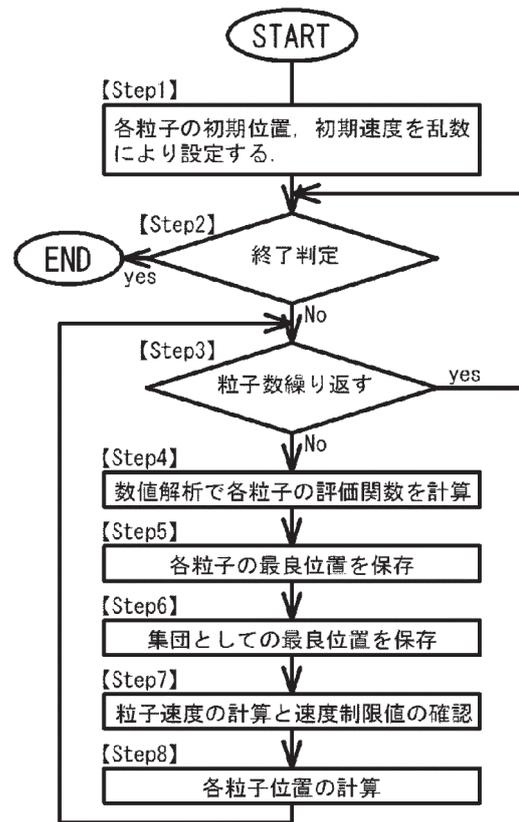
また、検索するパラメータが多くなったり、解空間の制約条件が広範になると解析に要する時間が長くなる特徴がある。

2-2 粒子群最適化の基本的アルゴリズム

最適解が存在する多次元の解空間において、複数の粒子 (Particle) が群れを成して存在する場合について考える。それぞれの粒子は、多次元空間の点として表現され、その移動過程において、設計者が設定した評価関数による値を計算しながら移動する。

個々の粒子は、それまでの移動軌跡の中で最良の位置 (Personal best position) を自己の最適解として保持している。また、他の全ての粒子も含め、これまでの移動軌跡の中で集団内の最良の位置 (Global best position) を集団の最適解として保持している。各粒子は、この2つの最適解を基にして、それぞれの粒子位置を更新して移動する。

より具体的な移動形態を図一1を用いて説明する。粒



図一2 PSOのフローチャート

子は群れを成して移動しており、その中のある粒子 A は X^{k-3} , X^{k-2} , X^{k-1} の順に移動して現在は X^k に位置している。ここで、 X^k の次に移動する方向について考える。粒子群最適化では、次に移動する方向として以下の3つを考える。

- (a) 粒子が移動して来た方向の延長方向
- (b) 今までに自分が移動してきた軌跡の中で最良位置 (Personal best position) への方向
- (c) 群れ (粒子群全体) の中で最良位置 (Global best position) への方向

粒子群最適化では、(a), (b), (c) の各ベクトルを足し合わせた方向が次に進む方向となる。計算のフローチャートを図一2に示し、各ステップにおける処理工程の概略を以下に記述する。

【Step 1】 粒子の初期位置および初期速度などの設定

n 次元の解空間内に検索する制約範囲を設定し、粒子の初期位置や初期速度を乱数により設定する。

【Step 2】 終了判定

繰り返し計算回数が最大計算ステップ数に達するか、あるいは解が収束したと判定されれば計算終了とする。

【Step 3】 粒子ごとに計算

粒子ごとに Step 4~Step 8 を繰り返す。

【Step 4】 評価関数の計算

個々の粒子の評価関数を計算する。本研究において、

評価関数 E_f は、式(1)の様に、トンネル坑内の計測変位 T_i と後述する有限差分法による解析変位 δ_i の誤差の二乗和として設定し、その値が最小になるパラメータの組み合わせを検索する。

$$E_f = \sum_{i=1}^n (T_i - \delta_i)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

ここに、 T_i : 計測された変位置 (mm)
 δ_i : 計算された変位置 (mm)
 n : 計測点の数

【Step 5】 個々の粒子の最良位置を保存

個々の粒子について、それぞれの粒子がこれまでに移動してきた軌跡の中での最良位置 (Personal best position : $Pbest$) での評価関数との比較を行い、評価関数が小さければその時の粒子の位置を $Pbest$ に保存する。

【Step 6】 集団としての最良位置を保存

Step 5 で $Pbest$ への保存が行われた場合、さらに集団全体におけるこれまでの最良位置 (Global best position : $Gbest$) での評価関数との比較を行い、評価関数が小さければその時の粒子の位置を $Gbest$ に保存する。

【Step 7】 粒子速度の計算と速度制限値の確認

それぞれの粒子速度は式(2)で計算する。

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot \frac{(Pbest_i - X_i^k)}{\Delta t} + c_2 \cdot r_2 \cdot \frac{(Gbest - X_i^k)}{\Delta t} \quad (2)$$

ここに、 V_i^{k+1} : 粒子 i のステップ $k+1$ における速度
 V_i^k : 粒子 i のステップ k における速度
 X_i^k : 粒子 i のステップ k における位置
 w : 粒子の慣性
 c_1, c_2 : 認知的および社会的パラメータ
 r_1, r_2 : 0~1 の乱数
 Δt : タイムステップ

また、 $Pbest_i$ は、前述したように粒子 i のこれまでの軌跡の中で一番評価関数が小さかった最良の位置であり、 $Gbest$ は全ての粒子における最良の位置である。

ここで、粒子の速度にはあらかじめ制限値 V_{max} を設けておき、式(2)で計算された速度が V_{max} を超えた場合には、式(2)の速度として V_{max} を採用する。

【Step 8】 粒子位置の計算

それぞれの粒子の位置は式(3)で計算する。以上の計算を全ての粒子について Step 4~Step 8 を繰り返す。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad (3)$$

2-3 粒子群最適化のパラメータ

粒子群最適化で設定が必要なパラメータは、 $w, c_1, c_2, \Delta t, V_{max}$ の5つと、集団のサイズ n ならびに最大計算ス

テップ数 K_{max} である。このうちタイムステップの Δt は、単位時間を考えているので通常1が用いられる⁶⁾。 w は粒子の慣性であり、大きな値を設定すると大域的動作となり、小さな値では局所的動作となる。 c_1, c_2 は、それぞれ認知的および社会的パラメータと呼ばれるもので、進む方向を選ぶとき、過去の自分の経験に重みを置くか、それとも群れ (集団) の経験に重みを置くかのパラメータである。 V_{max} は、速度を計算するときの制限値であり、大きく設定すると広い範囲の大まかな探索となり、小さく設定すると狭い範囲の細かな探索となる。集団のサイズ n は、解空間の広さに応じて設定し、多く設定するほど細かい探索が可能になるが、計算時間が増大する。最大計算ステップ数は、十分収束すると思われる回数を設定するもので、一般的には経験的に決められる。

本研究では、既往の文献⁶⁾などを参考にして表-1の様にパラメータを設定した。

表-1 粒子群最適化のパラメータ

PSO パラメータ	設定値
w (粒子の慣性)	1.0
C_1 (認知的パラメータ)	2.0
C_2 (社会的パラメータ)	2.0
Δt (タイムステップ)	1.0
V_{max} (速度の制限値)	$\frac{Range(i)}{2} \sim 0$
n (粒子の数)	20
k_{max} (最大計算ステップ)	40~80

※ $Range(i)$: パラメータ i の制約範囲

§ 3. トンネル工事の概要と逆解析の基本

3-1 トンネル工事の概要

逆解析を実施するトンネルは、現在建設中の横浜環状北線の関連街路である岸谷生麦線の双設トンネルである。両トンネルの延長は約 270 m で都市部山岳工法で建設されている。双設トンネルのうち、先行施工した生麦行きトンネル (以下、I 期線トンネル) は平成 19 年 8 月に、後行の国道 1 号行きトンネル (以下、II 期線トンネル) は平成 24 年 8 月にそれぞれ竣工している。

当該トンネルの特徴は大きく 2 つある。すなわち、市街地特有の諸条件より、掘削を開始する起点側坑口から約 150 m 区間では両者の純離隔を 1.8~6.7 m 程度しか確保できなかったことと、土被り約 13.5 m の地表部直上に中学校校舎、グラウンドおよび体育館が近接していることである (図-3~5 参照)。中学校校舎と体育館は杭基礎構造であり、アンダーピニングによる受替杭の施工を行って、トンネル掘削時には切羽に出現する既設杭を撤去しながら施工を行った。受替え工事および I・II 期

線トンネルの設計・施工については、参考文献9)～12)にて報告している。

3-2 地形地質の概要

当該トンネルの掘削地山は、標高約40mの洪積台地に位置する土砂地山であり、上総層群を基盤として、その上位を相模層群の末吉層ロームと新規ロームが覆う地層層序である。

トンネルの切羽に出現する地質は、更新世の新規ロームLm1と相模層群の凝灰質粘土Lmc、シルト質細砂Ss1および砂質シルトSc2である。このうち、切羽上方に出現するLm1、Lmcは比較的硬質であった。トンネル肩部以深に出現するSs1はN=4~75で、比較的良く締まった砂質土であるが、強度のバラツキが大きい特徴を有していた。Sc2は下半以深に分布する硬質粘性土である。

地質調査結果¹³⁾や既往の資料などから設定された地山物性値を表-2に示す。

3-3 逆解析の基本条件

本解析では、前述した最適化手法と有限差分法をベースとしたFLAC^{3D} (Itasca社)¹⁴⁾を組み合わせ、二次元平面ひずみ問題・微小変形問題として逆解析を行った。本検討での解析モデルを図-6に示す。本解析モデルは、解析時間の短縮のため、トンネル側方の解析領域を通常

よりもやや小さくしている。

解析断面は、土被りが最大で、中学校校舎手前のNo.0+90断面とした。当該断面において、I期線トンネルは上半先進掘削工法、II期線トンネルは補助ベンチ付き全断面掘削・早期閉合による掘削工法で施工を行った。

地山の構成則は、トンネル周辺のLm1、Lmc、Ss1、Sc2の4層をMohr-Coulomb則の降伏条件による完全弾塑性体とし、B層を弾性体と設定した。これは、事前の予備解析の結果から、B層の表層地山には塑性領域が発生しないこと、その他の4層に関しては、完全弾塑性モデルを用いることで、実現象を比較的良く再現できたこと

表-2 地山の物性値

	代表N値	単位体積重量γ(kN/m ³)	地山変形係数D(MN/m ²)	ポアソン比ν	粘着力c(kN/m ²)	内部摩擦角φ(deg)
B	1	14	0.8 (3.2)	0.35	8	5
Lm1	5	13	13 (52)	0.35	35	20
Lmc	3	15	10 (40)	0.35	55	15
Ss1	32	19	17 (68)	0.35	4	35
Sc2	7	15	16 (64)	0.35	140	20

※地山変形係数は孔内水平載荷試験による値であり、同欄の括弧内はその値を4倍¹⁵⁾し平板載荷試験相当に換算した値を示す。

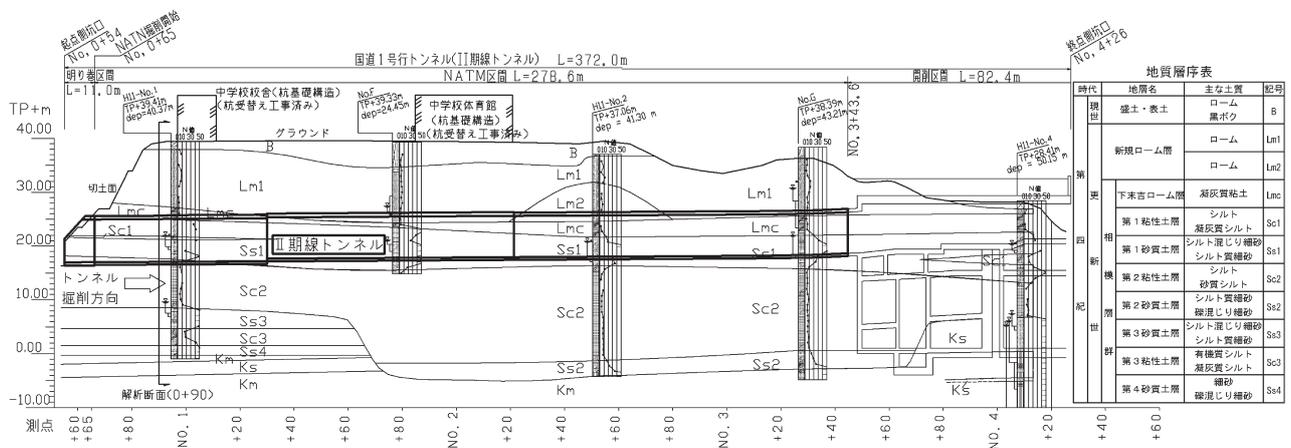


図-3 II期線トンネル縦断面図

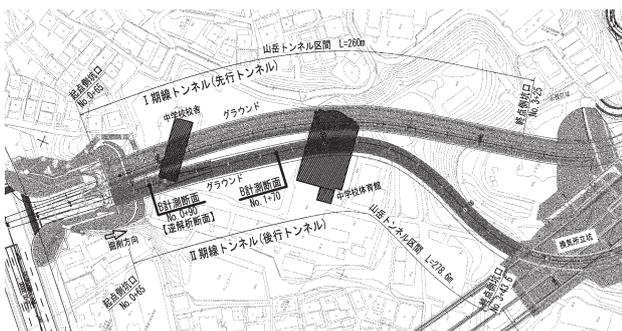


図-4 トンネル平面図

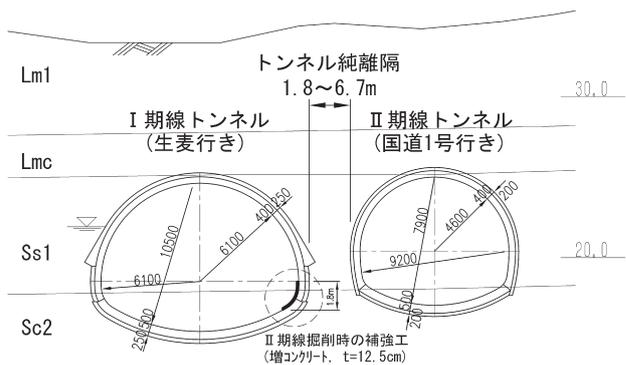


図-5 トンネル断面図

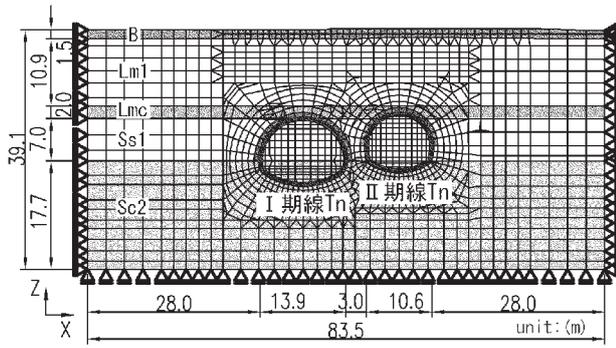


図-6 有限差分法の数値解析モデル図 (No.0+90)

表-3 解析手順と掘削解放率

解析ステップ	施工箇所	施工段階	掘削解放率 [※] (%)		
			上半	下半	インバート
Stage 1	—	初期応力解析	—	—	—
Stage 2	I 期線 トンネル (上半先進掘削工法)	上半掘削	30	—	—
Stage 3		上半支保設置	100	—	—
Stage 4		下半掘削	—	30	—
Stage 5		下半支保設置	—	100	—
Stage 6		インバート掘削	—	—	30
Stage 7		インバート打設	—	—	100
Stage 8		II 期線 トンネル (全断面掘削・早期閉合)	I 期線覆工打設	$\alpha 8_x$	$\beta 8_x$
	上半掘削 (A-A)		$\alpha 8_z$	$\beta 8_z$	
Stage 9	上半支保設置		$\alpha 9_x$	$\beta 9_x$	
	下半掘削 (B-B)		$\alpha 9_z$	$\beta 9_z$	
Stage 10	下半支保設置		$\alpha 10_x$	$\beta 10_x$	
	インバート掘削 (C-C)	$\alpha 10_z$	$\beta 10_z$		
Stage 11	一次インバート設置	100	100		
	トンネル完成 (D-D)	100	100		

※ II 期線の施工段階の断面位置 (A-A~D-D) は図-11 に示す。II 期線の掘削解放率 $\alpha \cdot \beta$ は鉛直方向 Z と水平方向 X について独立に同定する。

※ II 期線の掘削解放率は Stage11 において各方向がそれぞれ 100% となる様に調整する。

から設定した。また、支保部材と覆工は弾性体とした。

逆解析は、I 期線トンネル掘削時と II 期線トンネル掘削時に 2 回に分けて実施した。すなわち、I 期線では地山の非線形特性値を逆解析した (表-3 の Stage1~7 参照)。一方、II 期線では、I 期線で逆解析した地山物性値を固定パラメータとして、全断面掘削工法の掘削解放率を鉛直方向と水平方向についてそれぞれ独立に逆解析した (表-3 の Stage8~11 参照)。

表-4 I 期線トンネル掘削時の同定パラメータと制約範囲

	変形係数 D (MN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
B	1~10	—	—
Lm1	30~100	10~80	10~25
Lmc	30~100	20~90	10~25
Ss1	40~100	1~10	30~40
Sc2	50~120	80~170	15~25

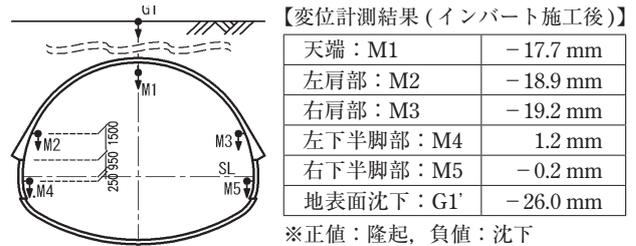


図-7 I 期線トンネル掘削時の変位計測位置と計測結果

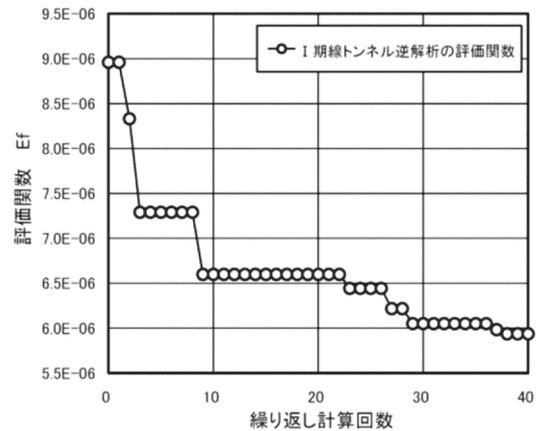


図-8 I 期線トンネル逆解析の評価関数の推移

§ 4. I 期線トンネルの逆解析

4-1 同定パラメータと制約条件

I 期線トンネルの逆解析における同定パラメータは、非線形構成則の地山物性値とした。すなわち、完全弾塑性体でモデル化した Lm1, Lmc, Ss1, Sc2 の 4 層の地山については、変形係数、粘着力および内部摩擦角の 3 種類を同定パラメータとした。一方、弾性体でモデル化した B 層の地山に関しては、変形係数のみを同定パラメータとした。なお、各土層の単位体積重量は試験結果にバラツキが少ないこと、また、ポアソン比は解に与える影響が小さいと考えられることから、それぞれ固定パラメータとした⁷⁾。

以上から、I 期線トンネルにおける同定パラメータは全 13 個となり、これらを同時に推定することとした。

同定パラメータの制約範囲を表一4に示す。各同定パラメータの制約範囲は、地質調査から得られた試験結果を参考にして設定した。また、初期応力解析時に地山が塑性化しないように配慮した。

4-2 計測データと PSO パラメータ

評価関数 E_f は、図一7に示したI期線トンネルの坑内計測変位（沈下：5点）とI期線トンネル直上の地表面沈下（1点）の全6測点について、前述した式(1)により計算した。

粒子群最適化の粒子数と繰り返し計算回数は、試算による収束傾向から、それぞれ20個と40回と設定した。

4-3 支保部材と補助工法および先行解放率

I期線トンネルの支保部材は、鋼製支保工 H200@1 m (SS400) と吹付けコンクリート $t=25\text{ cm}$ ($\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$) である。逆解析では、吹付けの弾性係数を $E_c=4000\text{N/mm}^2$ とし、鋼製支保工との合成梁でモデル化した。また、本工事では、土砂地山での定着特性や削孔時の地山の乱れなどを考慮して、I・II期線共に、システムロックボルトの施工を省略している。先受け工法などの補助工法のモデル化は、参考文献11)、12)と同様に設定した。トンネル掘削過程における掘削解放率は現場計測結果などから表一3のStage1~7のように設定した^{11),12)}。

4-4 I期線トンネルの逆解析結果

粒子全体の最小評価関数と繰返し回数との関係を図一8に示す。計算開始直後の初期段階で評価関数が大幅縮小している。これは解空間の大きさに対して、粒子数が多かったことや制約範囲が比較的小さかことが考えられる。

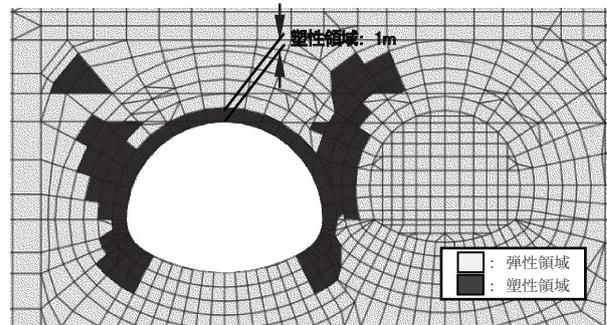
I期線トンネルの計測結果と逆解析結果との比較を表一5に示す。同表より、左下半脚部：M4の1測点に関してはやや乖離が見られるものの、全体としての平均誤差は1 mm以下であり、逆解析結果は実現象を精度よく再現していると評価できる。最小評価関数に対する同定パラメータの一覧を表一6に示す。逆解析により得られた変形係数は、平板載荷試験相当（同表の括弧内数値：孔内水平載荷試験結果の4倍¹⁵⁾）の変形係数におおむね近い値となった。また、粘着力と内部摩擦角に関しても地質調査結果におおむね近い値となった。

図一9、10に、Stage7における塑性領域と最大せん断ひずみの分布図を示す。塑性領域は、トンネル天端の深度1 m範囲に分布し、さらにトンネル側壁から上方へ進展している。これは、トンネルの沈下に伴う側方地山のすべりによって発生したせん断帯と考えられる。最大せん断ひずみについても同様にトンネル側部の上半支保工脚部と下半支保工脚部付近に卓越領域が確認できる。

表一5 I期線トンネルの計測変位と逆解析変位との比較

計測位置	計測結果 $T_i(\text{mm})$	解析結果 $\delta_i(\text{mm})$	誤差の絶対値 $ T_i-\delta_i (\text{mm})$
天端：M1	-17.7	-18.1	0.4
左肩部：M2	-18.9	-18.4	0.5
右肩部：M3	-19.2	-19.8	0.6
左下半脚部：M4	1.2	-0.9	2.1
右下半脚部：M5	-0.2	-0.9	0.7
地表面沈下：G1'	-26.0	-25.6	0.4

※正值：隆起，負値：沈下

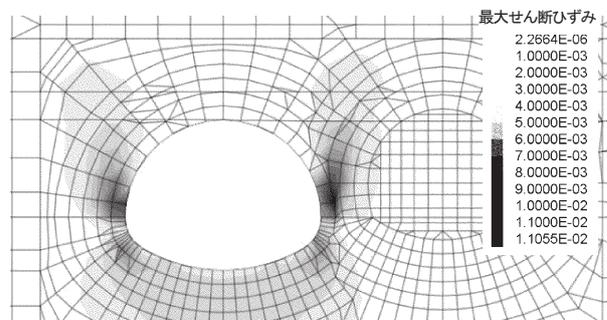


図一9 地山の塑性領域の分布（I期線トンネル掘削後，Stage7）

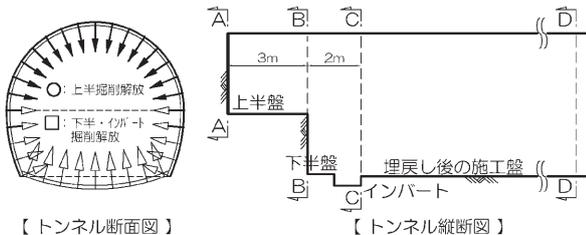
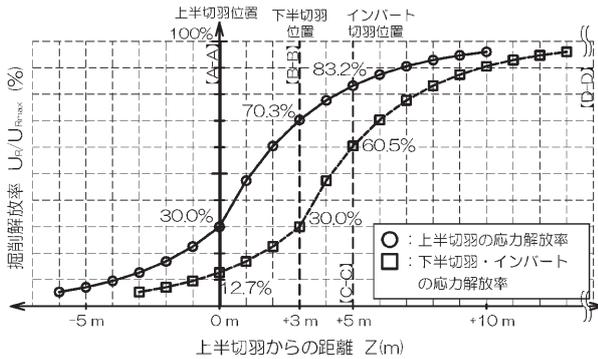
表一6 I期線トンネルの逆解析で得られた地山物性値

	逆解析結果			地質調査結果		
	変形係数 D (MN/m^2)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (deg)	変形係数 D^{*1} (MN/m^2)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (deg)
B	1.2	—	—	0.8 (3.2)	—	—
Lm1	87.2	68.9	17.1	13 (52)	35	20
Lmc	35.8	64.8	18.3	10 (40)	55	15
Ss1	90.3	2.0	30.9	17 (68)	4	35
Sc2	73.4	90.0	21.6	16 (64)	140	20

※1 地質調査結果の地山変形係数は孔内水平載荷試験による値であり、同欄の括弧内はその値を4倍¹⁵⁾して平板載荷試験相当に換算した値を示す。



図一10 地山の最大せん断ひずみ分布（I期線トンネル掘削後，Stage7）



図一11 切羽位置と応力解放率との関係

§ 5. II期線トンネルの逆解析

5-1 掘削解放モデルと同定パラメータ

II期線トンネルは、補助ベンチ付き全断面掘削・早期閉合による掘削工法を採用した。この掘削工法は、地山の乱れを最小限に抑え、周囲への影響低減に資するものであるが、二次元解析においては、上半、下半およびインバートの各切羽位置が近接しているため、掘削解放力が重なることや支保部材や地山の剛性によってトンネル縦断方向に変形が干渉するなどの理由から、モデル化が困難になる。筆者らは、参考文献(11)、(12)において、M. Panet⁽⁶⁾の式(4)を用いて、図一11の様に、上半と下半・インバートに関して2本の掘削解放率曲線を単純に重ね合わせて掘削解放力のモデル化を試みた。すなわち、前述の2つの問題のうちの前者的に対するモデル化を試みた。このモデル化による解析結果とB計測結果との比較から、解析結果は大局的に安全側の評価であったが、変形モードなどの細部までを正確に模擬することはできていなかった^{(11)、(12)}。この原因として、前述した問題のうちの後者、すなわち、支保部材や地山の剛性によるトンネル縦断方向への変形の干渉が考えられた。

$$\left. \begin{aligned} Z \geq 0 (\text{切羽後方}) : U_R/U_{Rmax} &= c_0 + c_1(1 - e^{-|Z|/(0.7r)}) \\ Z < 0 (\text{切羽前方}) : U_R/U_{Rmax} &= c_0 - c_1(1 - e^{-|Z|/(0.7r)}) \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 U_R/U_{Rmax} ：壁面変位率（掘削解放率）
 Z ：切羽距離(m)， r ：トンネル半径(=5m)⁽¹¹⁾
 c_0 ：先行変位率(=0.3)⁽¹¹⁾， c_1 ：1- c_0

そこで、本解析では、トンネル縦断方向への変形の干渉によって、見かけの掘削解放率が変化すると考えて、上

表一7 II期線トンネルの掘削解放率の制約範囲 (%)

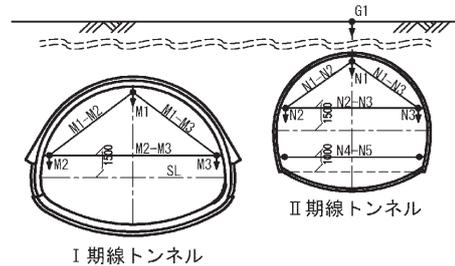
	上半 α^*_x, α^*_z		下半・インバート β^*_x, β^*_z	
	水平方向 X	鉛直方向 Z	水平方向 X	鉛直方向 Z
Stage8 : A-A	0~15	5~40	0~15	5~40
Stage9 : B-B	0~35	0~20	0~20	20~60
Stage10 : C-C	30~90	0~20	0~25	0~30
Stage11 : D-D	100		100	

※Stage8~10は増分解放率を示す。Stage11はStage8~11の総和を示す。

表一8 II期線トンネル掘削時の計測変位 (単位: mm)

I期線トンネル		II期線トンネル	
天端 : M1	+1.2	天端 : N1	-2.5
左肩部 : M2	-1.0	左肩部 : N2	-3.5
右肩部 : M3	-2.5	右肩部 : N3	-3.2
左斜測線 : M1-M2	+2.2	左斜測線 : N1-N2	-2.5
右斜測線 : M1-M3	+1.3	右斜測線 : N1-N3	-1.6
水平測線 : M2-M3	-0.7	水平測線 1 : N2-N3	-3.0
		水平測線 2 : N4-N5	-1.2
		地表面沈下 : G1	-7.8

※正值：隆起・伸長
 負値：沈下・収縮
 ※地表面沈下 G1はII期線トンネル直上の値を示す。

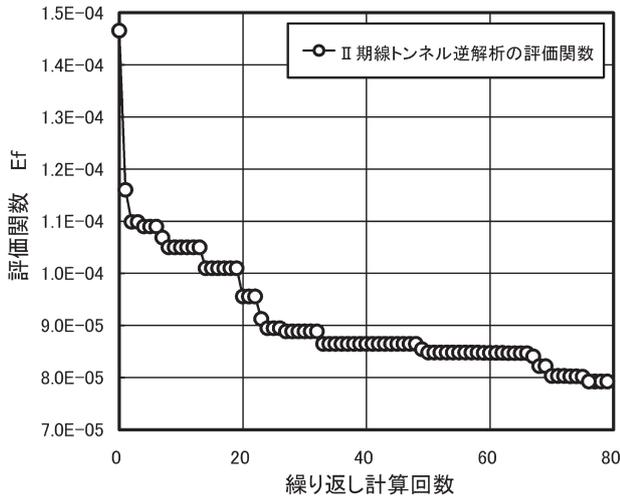


図一12 II期線トンネル掘削時の変位計測の位置

半、下半、インバートの各掘削位置での掘削解放率を同定パラメータにすることとした。

同定パラメータは、上半と下半・インバートの2つに大別し、図一11中のA-A~C-C断面について、それぞれ水平方向(X方向)と鉛直方向(Z方向)の掘削解放率を独立して推定することとした(表一3参照)。なお、トンネル完成時のD-D断面における掘削解放率は常に100%とした。掘削解放率の制約範囲を表一7に示す。この範囲は、広範な制約範囲を仮設定した予備解析を行って、その収束傾向を参考にして設定した。

地山物性値は、I期線トンネルの逆解析結果をそのまま採用し、I期線トンネル掘削後の状態から本逆解析を実施した。



図一13 II期線トンネル逆解析の評価関数の推移

表一9 II期線トンネル逆解析における計測変位と解析変位との比較

	計測位置		計測結果	解析結果	誤差の絶対値 $ T_i - \delta_i $ (mm)
			Ti(mm)	δ_i (mm)	
II期	天端	N1	-2.5	-3.9	1.4
	左肩部	N2	-3.5	-3.0	0.5
	右肩部	N3	-3.2	-1.9	1.3
	左斜測線	N1-N2	-2.5	1.0	3.5
	右斜測線	N1-N3	-1.6	1.2	2.8
	水平測線 1	N2-N3	-3.0	-0.2	2.8
	水平測線 2	N4-N5	-1.2	-0.5	0.7
	地表面沈下	G1	-7.8	-9.8	2.0
I期	天端	M1	1.2	-3.6	4.8
	左肩部	M2	-1.0	-3.6	2.6
	右肩部	M3	-2.5	-4.8	2.3
	左斜測線	M1-M2	2.2	1.2	1.0
	右斜測線	M1-M3	1.3	0.5	0.8
	水平測線	M2-M3	-0.7	1.7	2.4

※正值：隆起・伸長，負値：沈下・収縮

5-2 計測データと PSO パラメータ

II期線トンネル掘削時の変位計測結果と計測位置をそれぞれ表一8と図一12に示す。表一8は、II期線トンネルの掘削開始から完了までの計測値（増分値）を示すものである。逆解析の評価関数 E_f は、これら全14測点の計測変位と解析変位の誤差の二乗和とした。

粒子群最適化の粒子数と繰り返し計算回数は、試算による収束傾向から、それぞれ20個と80回と設定した。

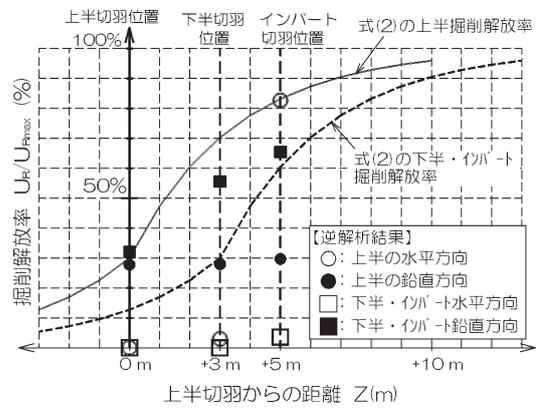
5-3 支保部材と補助工法

II期線トンネルの支保部材は、鋼製支保工 H150@1 m (SS400) と吹付けコンクリート $t=20$ cm ($\sigma_{ck}=18N/mm^2$) であり、前述したI期線と同様に合成梁としてモ

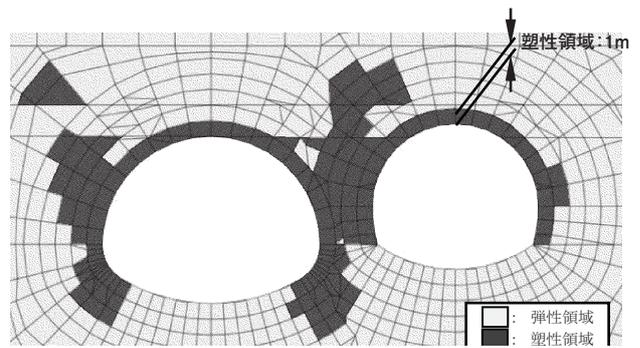
表一10 II期線トンネルの逆解析で得られた掘削解放率 (%)

	逆解析結果				M.Panet の重ね合せ ^{(11), (12)}	
	上半 α_x^*, α_z^*		下半・インバート β_x^*, β_z^*		上半	下半 インバート
	水平 X	鉛直 Z	水平 X	鉛直 Z	XZ 共通	XZ 共通
Stage8 A-A	0.4	27.8	0.0	32.0	30.0	12.7
Stage9 B-B	3.0 (2.6)	28.0 (0.2)	0.2 (0.2)	55.6 (23.6)	70.3	30.0
Stage10 C-C	82.7 (79.7)	29.7 (1.7)	3.6 (3.4)	65.5 (9.9)	83.2	60.5
Stage11 D-D	100.0 (17.3)	100.0 (70.3)	100.0 (96.4)	100.0 (34.5)	100.0	100.0

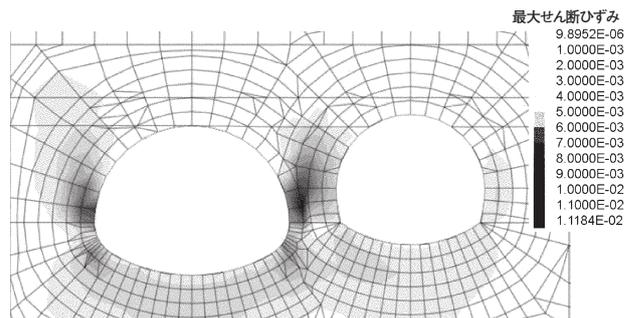
※表中の値は累積の掘削解放率を示す。括弧内は増分値を示す。



図一14 II期線逆解析で得られた掘削解放率



図一15 地山の塑性領域の分布 (II期線 Tn 掘削後, Stage 11)



図一16 地山の最大せん断ひずみ分布 (II期線 Tn 掘削後, Stage 11)

デル化した。Ⅰ期線では、Ⅱ期線のトンネル掘削前に覆工 ($\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$, $t=40\text{ cm}$ (一部 $t=52.5\text{ cm}$)) を構築したため、解析では梁要素としてモデル化した。補助工法は、参考文献 11), 12) と同様にモデル化を行った。

5-4 Ⅱ期線トンネルの逆解析結果

粒子全体の最小評価関数と繰り返し回数との関係を図-13に示す。同図より、評価関数は徐々に減少しているものの、繰り返し回数が40回を超えると減少傾向はやや緩慢となっている。

Ⅱ期線トンネル掘削時の計測結果と解析結果との比較を表-9に示す(前述の計測値に対応する増分値)。同表より、両トンネルの肩部の沈下、Ⅰ期線の内空変位および地表面沈下は比較的模擬できているが、両トンネルの天端沈下やⅡ期線の内空変位は計測結果と逆解析結果が乖離する結果となった。全体としての平均誤差は約2.4 mmであり、やや誤差の大きい結果となった。

最小評価関数に対する同定パラメータを表-10と図-14に示す。これらの結果から、トンネル断面閉合前のA-A~C-C断面における掘削解放率は、バラツキが大きく、一般的に知られている値(図-11参照)よりもかなり小さい解放率もあった。

これは、上半切羽から後方5 mという近接した位置でトンネル断面を閉合したため、閉合部による変形抑制効果が切羽の変形にまで影響を与え、見かけの掘削解放率を複雑化させたと考えられる。また、同じ断面位置でも、鉛直と水平方向の解放率が大きく異なる断面もあり、A-A~C-Cでは水平方向の解放率が小さい傾向にあった。これらの影響特性とその大きさは、地山性状、支保剛性、切羽と閉合位置との距離、トンネル断面形状や縦横比などの多くのパラメータに関係していると考えられる。

Stage11における塑性領域と最大せん断ひずみの分布図を図-15, 16に示す。同図より、Ⅱ期線トンネルの掘削によって、両トンネル間のピラー部とⅡ期線周辺の厚さ1 m範囲が新たに塑性化したものの、Ⅰ期線のように、側壁や脚部から塑性領域が上方へ進展する傾向はⅡ期線では確認できなかった。また、図-9と図-15, 図-10と図-16を比較すると、Ⅱ期線の掘削によって、塑性領域やせん断ひずみ分布が大きく拡大または増大することはなかった。これは、全断面掘削・早期閉合による掘削工法が地山の変形や沈下を効果的に抑制したためと考えられる。

以上から、全断面掘削・早期閉合の掘削解放率の傾向や地山の変形抑制効果の傾向を確認することができた。

しかしながら、Ⅱ期線トンネルの逆解析においては、計測変位の再現性がⅠ期線ほど良好ではなかった。

この原因としては、Ⅰ期線掘削後の2本目のトンネル掘削であるため現象が複雑化したこと、水平方向の変形が特に計測結果と乖離したことから側圧係数の設定に問題があったことなどが考えられる。また、当該断面の切

羽周辺には中学校校舎の杭基礎が散在し、トンネル掘削時には切羽でそれらの杭を適宜撤去したため、その施工時の影響を受けたことも原因として考えられる。

§6. まとめ

本稿では、粒子群最適化と有限差分法を組み合わせた最適化手法を用いて、現場計測データによるトンネル掘削問題の逆解析を行った。その結果、本逆解析手法は、非線形構成則に関する複数のパラメータを同時に推定しても、変形状や同定パラメータについて、おおむね妥当な再現性を示すことを確認した。

現場計測データには、機械的・人為的な計測誤差や地山の不均一性など不可避な不確実性が多く含まれるため、逆解析の精度や収束性は数値シミュレーションに比較して大きく低下する場合が多い。しかしながら、Ⅰ期線トンネルの逆解析においては、解析結果は計測結果をほぼ正確に再現することができたため、本解析手法の当該現場への適用性は良好であったと評価できる。

Ⅱ期線トンネルでは、全断面掘削・早期閉合の掘削解放率を逆解析した。計測変位の再現性はⅠ期線の逆解析よりも良好ではなかったが、全断面掘削・早期閉合の掘削解放率の傾向や地山の変形抑制効果の傾向を確認することができた。すなわち、トンネル断面閉合位置よりも切羽側の見かけの掘削解放率が、一般的に知られている値よりもかなり小さくなっていることが分かった。これは、トンネル断面閉合による変形抑制効果が大きいこと、切羽付近の変形も抑制されたためと考えられる。

なお、Ⅱ期線トンネルに関しては、掘削工法のモデル化や同定パラメータの選定について再考する必要があると考えられるが、評価関数の最小化が順調に図れていることから、逆解析の手法自体に問題はなかったと考えられる。

以上から、本稿で報告した逆解析手法は、数値解析のモデル化や同定パラメータの選定について適切に配慮すれば、実現場での計測データに対しても十分対応が可能であり、トンネル工事の実務において有効な設計・施工管理ツールとして活用できると考えられる。

謝辞: 本研究における最適化手法の適用に関しては、山口大学大学院の中村秀明教授に多大なるご指導とご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集, No. 337, pp. 137-145, 1983.9
- 2) 武内邦夫, 志村友行, 芥川真一, 桜井春輔: 逆解析適用結果に基づく岩盤安定性予測解析法の開発, 土木学会論文集, No.701/Ⅲ-58, pp. 253-262, 2002.3

- 3) 福田毅, 山田浩幸, 藤澤 勉, 大村修一, 村上 章: 逆解析を用いた情報化施工の高度化に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 17 巻/pp. 59-65, 2007.11
- 4) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001
- 5) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle Swarm Optimization, *Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995
- 6) 中村秀明, 王 桂萱, 江本久雄, 宮本文穂: Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析, 土木学会論文集, Vol. 62, No.1, pp. 107-118, 2006.2
- 7) 亀谷英樹: 粒子群最適化を用いたトンネル掘削問題の逆解析, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号, 2012.11
- 8) 岡井崇彦, 亀谷英樹: 粒子群最適化を用いたトンネル掘削問題の逆解析, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-027, pp. 53-54, 2012.9
- 9) 寺山 徹, 津野和宏, 石黒順一, 守山和郎: 横浜市道岸谷生麦線トンネル建設に伴う生麦中学校校舎アンダーピニング工事の設計・施工概要, 基礎工, Vol. 35-No.5, pp. 60-64, 2007.5
- 10) 津野和宏: 全断面早期閉合による都市部山岳工法トンネル安定対策, トンネル工学報告集, 第 17 巻, pp. 43-49, 2007.11
- 11) 落合栄司, 浅野 靖, 神崎正美, 岡村貴彦, 亀谷英樹: 地上構造物と近接する双設トンネルの設計・施工, トンネル工学報告集, 第 21 巻, pp. 71-78, 2011.11
- 12) 多田浩治, 津野和宏, 石丸 潔, 亀谷英樹: 構造物直下の双設トンネルを早期閉合により施工, トンネルと地下, 第 43 巻 7 号, pp. 23-33, 2012.7
- 13) 首都高速道路(株)神奈川建設局: 岸谷生麦線トンネルの設計施工に関する小委員会 報告書(案), 2007.6
- 14) 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 Geo-mechanics*, 1988
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, p. 285, 2012.3
- 16) M.Panet: Time-dependent deformation in underground works, *Proceedings International Congress on Rock Mechanics 4th 790902* Vol. 3, pp. 279-289, 1979