

土被りの浅い大断面トンネルにおける 地山挙動の非線形逆解析

NONLINEAR BACK ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF A SHALLOW LARGE TUNNEL

桜井 春輔¹⁾・藤村 三喜男²⁾・原田 浩史³⁾・岩野 政浩⁴⁾・加藤 隆⁵⁾

Shunsuke SAKURAI, Mikio FUJIMURA, Hiroshi HARADA, Masahiro IWANO, and Takashi KATO

In this study, a new form of back analysis procedure has been applied to the shallow large tunnel project to decide the appropriate support system and to evaluate the safety of a tunnel. By using this procedure, the unknowns including in-situ stress, Young's modulus, and arbitrary non-elastic strains occurring in a surrounding ground due to the tunnel excavation can be back-calculated efficiently and accurately.

Key Words: back analysis, excavation analysis, shallow tunnel, non-elastic strain

1. はじめに

土被りが浅いトンネルの周辺には塑性化された緩み領域が発生し、地表面沈下と天端沈下が同程度となる「とも下がり」現象が見られることがある。この現象では、緩み領域近傍にせん断すべりが生じており、弾性体や弾塑性体理論では説明できない。また、地山物性は、土質試験より把握されるが、コアの状態と実際の地山性状は異なることも多い。従って、土質試験結果に基づく地山物性によって、弾性解析や弾塑性解析を行った場合、解析結果は現場計測変位を十分に説明出来ない場合がある。このため、逆解析によって、計測変位より地山物性を逆推定する手法が多用される。この際、地山を的確にモデル化する必要があり、また、迅速に設計に反映させるために、取り扱いが容易で、数少ない入力データで解析できることが必須の条件となる。著者の一人は、すべりによるひずみの局所化を、せん断ひずみ量に応じたせん断剛性の低下によるものと仮定し、異方性損傷を考慮した構成関係式を提案した^{1),2)}。この構成関係式を用いれば、数少ない入力データにより、容易に地山の異方性、非線形性を表現することができる。

本報文では、まず、異方性損傷を考慮した解析手法について概説する。その後、この解析手法を用いて、首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル工事において、現場計測より非線形逆解析を行い、地山物性値を同定する。さらに、同定された地山物性を用いて予測解析を行い、最終変位量の予測や、補助工法の検討を行う。

1) 正会員 工博 Ph.D. 広島工業大学
2) 日本道路公団 東京建設局八王子工事事務所
3) 正会員 大成建設(株)・戸田建設(株)・佐田建設(株) 青梅トンネル南工事共同企業体
4) 正会員 Ph.D. 大成建設(株) 北信越支店
5) 正会員 大成建設(株) 土木設計第一部解析技術室

2. 工事概要^{3), 4)}

(1) 標準断面

青梅トンネルは、首都圏中央連絡自動車道(圏央道)の一部として、道路直下を上下線二層構造で計画された、土被り平均 8.6m、平均掘削断面積 230m²の卵型超大断面トンネルである。全長 2,095mのうち、中央部 1,090mにトンネル工法を、残りは開削工法を採用している。図-1に、トンネル標準断面図を示す。トンネル周辺の地質は、段丘礫層と関東ローム層である。段丘礫層は下位(GL-12.5m以深)の青梅礫層と、その上部の立川礫層からなり、数cmから約70cmまでの玉石を含む。

(2) 施工方法

図-2に、施工手順図を示す。施工方法の特徴としては、2段ベンチ掘削後、中床版以上の二次覆工を先行構築し、3段ベンチ掘削以降のトンネル天端部の沈下や崩落を抑制し、側方地盤の安定性を確保する。また、中床版は、側方変形を抑制するストラットの代替となり、側壁地山の安定性向上に大きく寄与する。3段ベンチ掘削以降は、上部二次覆工の下部を抜き掘りし、トンネル掘進と二次覆工構築を併進させるものとした。

(3) 補助工法

本トンネルでは、切羽安定、天端土塊の崩落防止、先行変位の抑制の目的で注入式長尺鋼管先受け工(アンブレラ工法)を打設している。また、2段ベンチ掘削にあたっては、側壁地山の不安定化を考慮して、ジェットグラウト工法によるフットパイルを1段ベンチ脚元に造成している。

(4) 計測概況

図-3に、試験工事区間(立坑から81m区間)における計測項目及び設置位置図を示す。以下に、試験工事区間における2段ベンチ掘削完了までの計測結果について概説する。

地表面沈下は、図-4に示す通り、トンネル切羽約3D(50m)手前から発生し、変形初期には最大約5mmの隆起が発生している。また、切羽到達までの沈下量は1段ベンチ収束値の15%以内と小さかった。これは、先受け工による先行変位抑制効果と考えられる。

地中水平変位は、図-5に示す通り、トンネル側壁部で内空方向に縮小する傾向となっている。また、地表面沈下とは異なり、先行変位率は、約30%となっている。これは、先受け工の変位率抑制効果の鉛直・水平方向での違いであると考えられる。

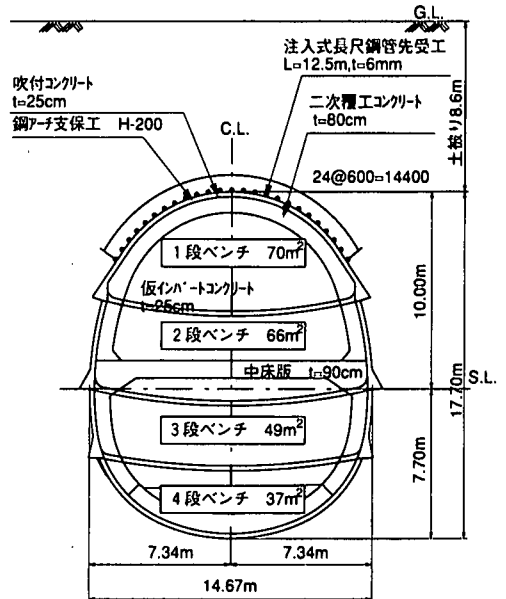


図-1 トンネル標準断面図

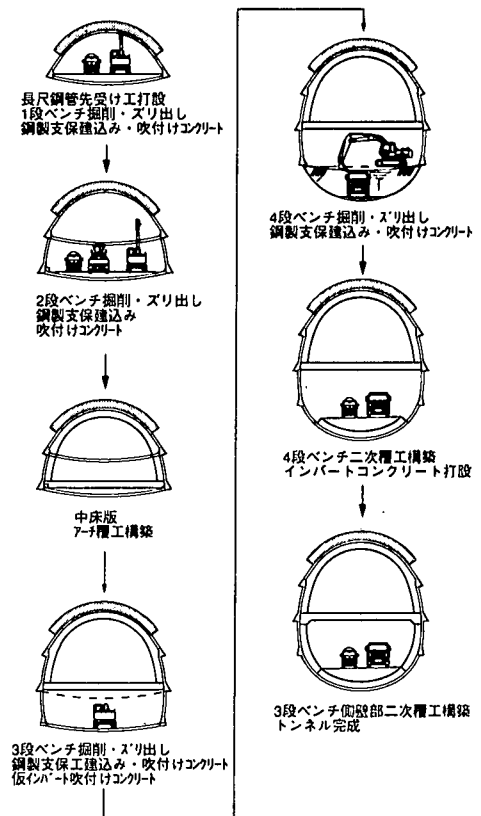


図-2 トンネル施工手順図

青梅トンネル立坑工事（試験工事）延長 L = 81.0m

⇨ 施工方向

測点		STA.172 +34.17	STA.173 +15.17	測定断面	数量
断面区分		DIV			
計測工 B	長尺先受工応力測定	↑5本	↑3本	↑5本	3 13
	鋼製支保工応力測定				2 24
	吹付コンクリート応力測定				2 24
	二次覆工応力測定		縦横断	縦断	5 54
	二次覆工沈下測定		縦横断	縦断	17 51
	地表沈下測定B				12 127
	地中沈下測定A				2 4
	地中沈下測定B				2 2
	地中水平変位測定				2 4
	地下水位測定	↑群井試験時			4 8
計測工 A	フットパッド軸力測定				2 4
	坑内観察調査	切羽毎実施（1日1回）			1 10
	内空変位測定		↑10m毎実施		10 10
	天端・脚部沈下測定		↑10m毎実施		10 10

図-3 試験工事における計測機器の配置

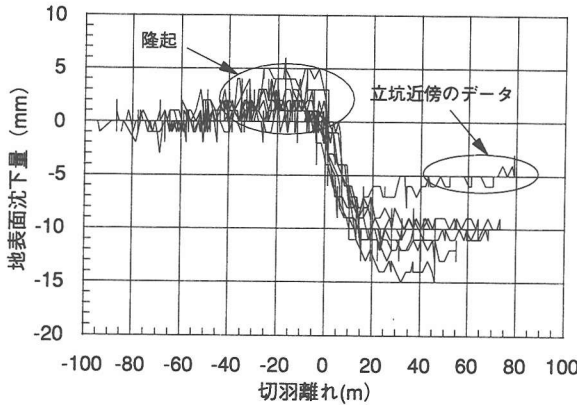


図-4 地表面沈下計測結果

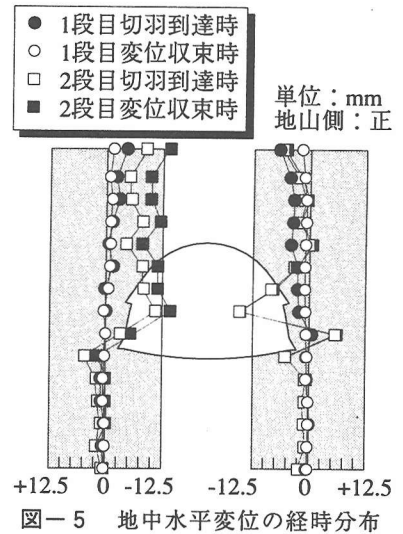


図-5 地中水平変位の経時分布

3. 異方性損傷を考慮した解析手法

(1) 応力-ひずみ関係

トンネル掘削による地山の塑性やゆるみの挙動を、せん断ひずみ量に依存するせん断剛性の低下に起因するものと考え、応力 $\{\sigma'\}$ とひずみ $\{\epsilon'\}$ の関係は、2次元平面ひずみ状態における局所座標系 (X', Y') において、次のように表されるものと仮定する。

$$\{\sigma'\} = [D']\{\epsilon'\} \quad (1)$$

ここで、 $[D']$ は局所座標系における応力ひずみマトリックスであり、次式で与えられる。

$$[D'] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu)(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (2)$$

なお、局所座標系は、 X' 軸がせん断すべり線の方向に一致するように設定する。

ここで、 m は、せん断剛性と直剛性の比 (G/E) であり、 $m=1/2(1+\nu)$ ならば弾性体として挙動し、

$m < 1/2(1+\nu)$ ならば応力状態から決定されるすべり面（モビライズド面）上ですべる挙動を表す。ここで、

$$m = 1/2(1+\nu) - d \quad (3)$$

と定義した。 d は塑性やゆるみによる損傷の程度を表し、異方性損傷パラメータと名付ける。 d とせん断ひずみ γ との関係は、一面せん断試験結果等から、次式を用いて近似することができる。

$$d = f(\gamma) = m_0 [1 - \text{Exp}(-100\alpha\gamma)] \quad (4)$$

m_0 は m の初期値（弾性体の場合の値）を表す。 α は d の変化度を表す係数であり、逆解析によって求める。

(2) 逆解析手法

逆解析によって求める未知のパラメータは、地山の変形係数、側圧係数、初期せん断応力、変数 α の 4 種類である。未知パラメータを求める具体的な手順は文献 1) に従って行う。ただし、変数 α は一義的に求めることができないため、数種類の α を代入して解析し、二乗平均誤差が最小となる α を収束値とする。

(3) 掘削解析の手順

トンネルの掘削解析を行う手順を箇条書きによって以下に示す。

- ① まず、トンネル周辺地山に緩み領域が発生していないと仮定して、弾性解析を行い、トンネル周辺地山に発生する応力とひずみを求める。
- ② ①で求めたせん断ひずみの値より、損傷パラメータ d を式(4)によって求め、せん断剛性を低下させ、式(1)を更新する。但し、せん断剛性は、地山の応力状態から決定されるすべり面方向($45^\circ \pm \phi/2$)のせん断ひずみ値によって低下させる。
- ③ 新しい式(1)によって解析を行い、応力及びひずみを計算する。
- ④ ②、③の操作を計算が収束するまで続ける。

4. とも下がり挙動の解析

(1) 概説

ここでは、2 段ベンチ掘削完了時における計測変位（坑内変位、地表面沈下、地中沈下、地中水平変位）に見られたとも下がり現象に対し損傷理論に基づく非線形逆解析を行い、現場付近の土質定数を推定する。さらに、推定された土質定数を用いて、掘削挙動予測解析を行い、最終段階における変形量を予測し、また、フットパイルの仕様について考察を行う。図-8 に現場計測における地中沈下の値を示す。これによると、地表面沈下の大きさと天端付近の地中沈下の値は大差なく、「とも下がり」が生じていると考えられる。

(2) 逆解析

本解析で用いた解析メッシュを図-6 に示す。なお、計算においては、文献 1) にならい、せん断剛性を低下させる範囲を、スプリングライン以上に限定し、損傷パラメータ設定範囲を図-7 のように定義した。

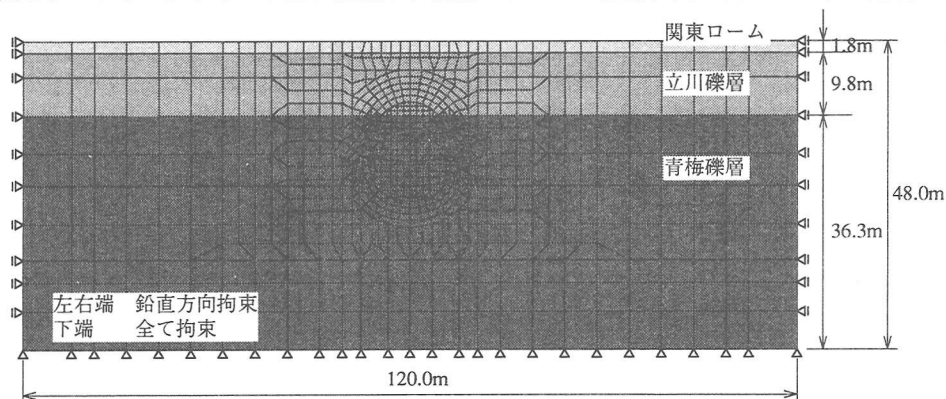


図-6 解析メッシュ図

逆解析の結果、 $\alpha=10$ の時に二乗平均誤差が最小になり、最適解となった。この時、弾性係数は 1260kgf/cm^2 となり、当初地山物性値よりもやや高めの値となった。側圧係数は 0.43 となり、静止土圧係数 0.54 より若干小さい。計測変位と逆解析結果とを比較した結果、逆解析結果が計測変位とは非常によく合致しており、逆解析は計測変位を非常によく表していると考えられる(図-8)。

図-9にトンネル掘削による増分最大せん断ひずみの分布図を示す。「とも下がり」現象に特有な、せん断ひずみ大きい領域がトンネル上方に「うさぎの耳」状に分布する結果となっている。

(3)掘削挙動予測解析

表-1に掘削解析を行った解析ケースを示す。ケース1は、地山物性を土質試験結果より求め、弾塑性計算を行った。ケース2、3では、逆解析結果の地山物性を用いて、損傷理論に基づいて計算した。また、ケース3では、1段目脚部より施工するフットパイル仕様を1段から2段に変更した場合の解析を行った。ケース2、3において、損傷パラメータの設定領域は、図-10の通りであり、掘削段階に応じて領域を順次拡大させた。

解析の結果、内空変位、地表面沈下の経時変化は図-11のようになった。以下に得られた知見を示す。

①弾塑性解析(ケース1)では、内空変位が拡大傾向にあり、2段ベンチ掘削時においてトンネルが縦方向に押しつぶされ、実挙動をうまく再現できないのに対し、損傷を考慮した解析(ケース2)では、内空へ縮小し、トンネル全体が内空側に変位する。これは、実挙動をかなりよく再現できていると考えられる。

②損傷理論による解析結果(ケース2)を用いて、トンネル完成時の変形挙動を予測すると、天端沈下は 39.5mm 、内空変位は 27.0mm 、天端直上の地表面沈下は 37.9mm 生じる。

③フットパイルを2段にすることによって、特にアーチ肩部の最大せん断ひずみの増加を抑制する効果が期待できる。この結果、天端沈下、内空変位、地表面沈下ともに約 15% の変形を抑えることができる。

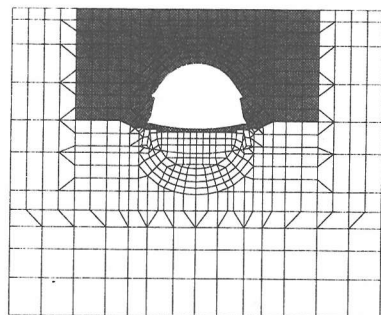


図-7 損傷パラメータ設定領域 (逆解析)

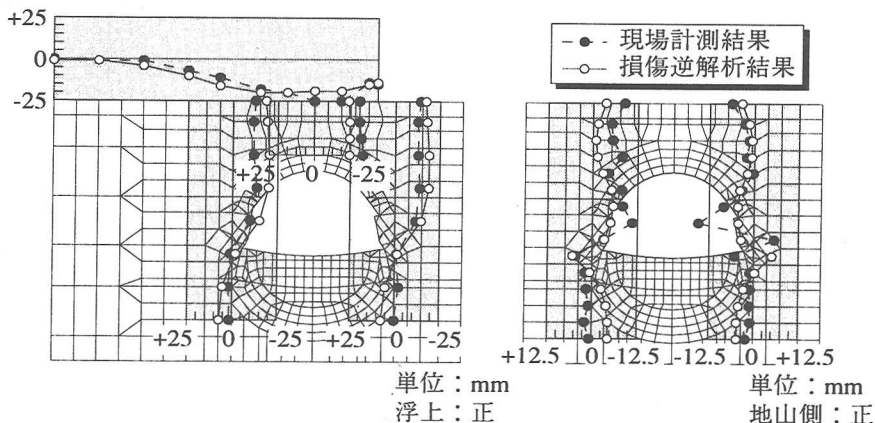


図-8 逆解析結果比較図
(a)地表面、地中沈下 (b)地中水平変位
単位：mm 浮上：正 単位：mm 地山側：正

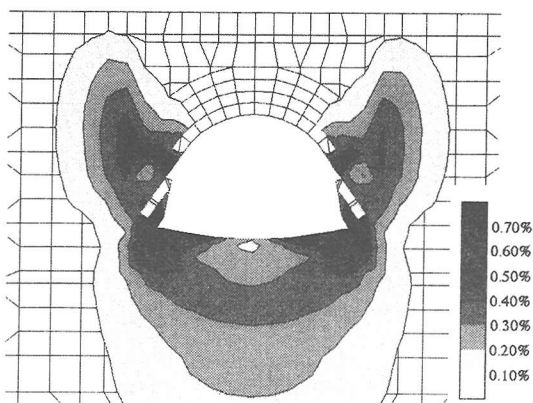


図-9 最大せん断ひずみ分布図

5. 結論および今後の課題

損傷を考慮した解析手法を逆解析、掘削挙動予測解析に導入し、土かぶりの浅い大断面トンネルである青梅トンネルの支保設計に用いた。得られた知見及び今後の課題を以下に示す。

①損傷によるせん断剛性低下を考慮した逆解析手法により、とも下がり現象をよくシミュレートできた。

②掘削挙動予測解析においては、完全弾塑性解析では、内空変位が拡大する傾向にあり、実挙動をうまく再現できなかったのに対し、損傷を考慮した解析では、内空へ縮小し、実挙動をかなりよく再現できた。

損傷を考慮した解析手法を用いて、逆解析によって地山物性を精度良く同定できた。この結果を用いて掘削挙動予測解析によって最終変形量が精度良く予測でき、今後様々な補助工法の検討に適用ができると考えられる。また、今回の検討を通して、損傷領域の設定手法、すべり面の決定方法等の課題も明らかとなった。今後、3、4段ベンチ掘削時の挙動計測を通して上記課題を克服し、未固結地山における大断面トンネルの合理的設計、施工に向けて更なる検討を加えたい。

参考文献

- 1)桜井(1998)：都市トンネルの実際、鹿島出版会、pp. 41-56.
- 2)奥田・阿部・桜井(1999)：土被りの浅い未固結地山トンネルの非線形逆解析、土木学会論文集(投稿中)
- 3)藤村・山野・原田・須藤(1998)：国内初の2層道路トンネル 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル、トンネルと地下、第29号、9号、pp. 15-25.
- 4)藤村・山野・原田・加藤(1999)：市街地道路直下の二層道路トンネルの施工 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル、土と基礎、第47号、7号、pp. 17-20.

表-1 掘削予測解析の解析ケース

解析ケース	地山物性	解析モデル	フットパイル
ケース1	土質試験結果	弾塑性	原設計(1段)
ケース2	逆解析結果	損傷を考慮	原設計(1段)
ケース3	逆解析結果	損傷を考慮	2段に変更

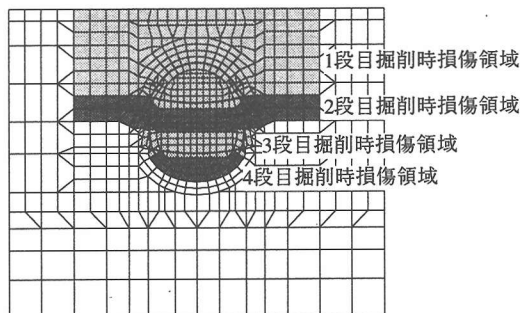
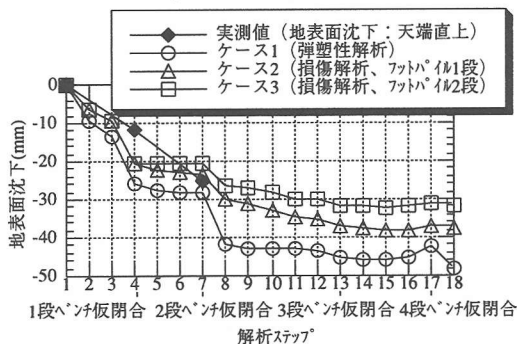
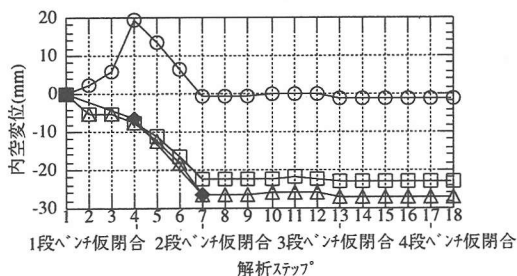


図-10 損傷パラメータ設定領域 (掘削予測解析)



(a) 天端直上地表面沈下経時変化図



(b) 内空変位経時変化図

図-11 掘削予測解析結果