

地山特性曲線および応力解放曲線を用いたトンネル掘削時の地山 挙動予測

PREDICTION OF GROUND BEHAVIOR USING GROUND CHARACTERISTIC CURVE AND STRESS RELEASE CURVE

鈴木 健之¹⁾・土門 剛²⁾・西村 和夫³⁾・徐 景源⁴⁾

Takeyuki SUZUKI, Tsuyoshi DOMON, Kazuo NISHIMURA and Kyoungwon Seo

One of the method for predicting surface settlement at next tunnel-face is that convergence curve are estimated using three types of curves, advancing rate, stress release and ground characteristic based on in-situ monitoring. In this method, point-symmetrical growth curve is generally adopted as stress release curve (SRC) especially in 2-D analysis. However, it has been obvious that the SRC computed by 3-D analysis has resulted in non point-symmetrical curve. The purposes of this study are to use the Gompertz's curve as non-point symmetrical growth curve to predict the surface settlement in 2-D analysis and to verify the validity our method in comparison with field data.

Key Words : stress release curve , ground characteristic curve , surface settlement

1. はじめに

山岳トンネルの標準工法である NATM では、周辺地山の变形挙動を予測して、最適な支保工を設計することが重要である。变形挙動を予測する方法である地山特性曲線法は、地山特性曲線と支保特性曲線および応力解放曲線により最適な支保工の剛性や打設位置を評価する方法であると同時に地山挙動を概念的に理解することもできる^{1)~4)}。一方、数値解析によって地山の变形挙動を予測することが行われており⁵⁾⁶⁾、実際には数値解析によって評価することが多い。しかし、数値解析では解析モデルや解析精度と比較して入力物性値の精度が低い。また、複雑な解析モデルにすればするほど入力パラメータは増加するという難点がある。

近年、梨本ら²⁾³⁾により孔内除荷模型実験により地山特性曲線を求め、設計の目標として支保圧の極小値ではなく、最小掘削範囲とする設計法の提案がなされ、また佐藤ら⁴⁾により地山特性曲線と応力解放曲線に点対称の指数関数を用いることにより、膨張性泥岩地山における力学的挙動の定量的把握が行われている。これらの研究は土被りの深いトンネルに対するものであり、支保の効果は支保特性曲線により評価される。本論文では土被りの浅いトンネルを対象とし、解析をより簡便に行うために弾性係数に支保の効果を含む見かけの弾性係数を用いて解析を行った。

これらの状況を踏まえて、本研究では NATM におけるフィードバック手法の簡便な解析モデルとして地山特性曲線と弾性理論である Jeffery の理論式を適用し、応力解放曲線には非対称型成長曲線の 1 つである Gompertz 曲線を用いて地表面沈下挙動の予測を行った。さらに、本解析手法の妥当性と適用性を確認した上で、先行変位の計測が困難である天端沈下や内空変位の予測へ拡張することを最終的な目的としている。本論文では、その第一段階として地山特性曲線法を用いて先受け工のない地山での地表面沈下データの沈下予測を行い本解析法の妥当性を確認し、先受け工のある現場データを用いて同様の解析を行い、本解析法の先受け工のある地山に対する適用性の確認を行った。

1) 学生会員 博士 (工学) 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

2) 正会員 東京都立大学 工学部 土木工学科

3) 正会員 工学博士 東京都立大学 工学部 土木工学科

4) 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

2. 解析方法

解析の方法は次の①～⑦の手順に示すように、現場で計測した実測の地表面沈下量と解析から求めた解析上の地表面沈下量を非線形最小二乗法を用いて最適な地表面沈下曲線を求め、次に掘削される切羽に対し解析結果を反映するものである(図1)。

- ① 現場の実測データから切羽進行曲線と実測の沈下曲線を描く(図1の第1象限、第4象限)。
- ② 切羽からの距離を応力解放曲線を表す式に代入し応力解放率を求め応力解放曲線を描く(図1第2象限)。
- ③ 応力解放率からトンネル内空に見かけ上作用する内圧を求め、これを沈下量を求める式に代入し地山特性曲線を描く(図1第3象限)。
- ④ ②と③により解析上の沈下曲線を描く(図1第4象限)。
- ⑤ 実測の沈下量と解析の沈下量の残差をとり、その二乗和を求める。
- ⑥ 各パラメータを変化させ②～⑤の手順を繰り返す。
- ⑦ 残差の二乗和が最小になったときのパラメータ値をこの測点での最適なパラメータ値とする。

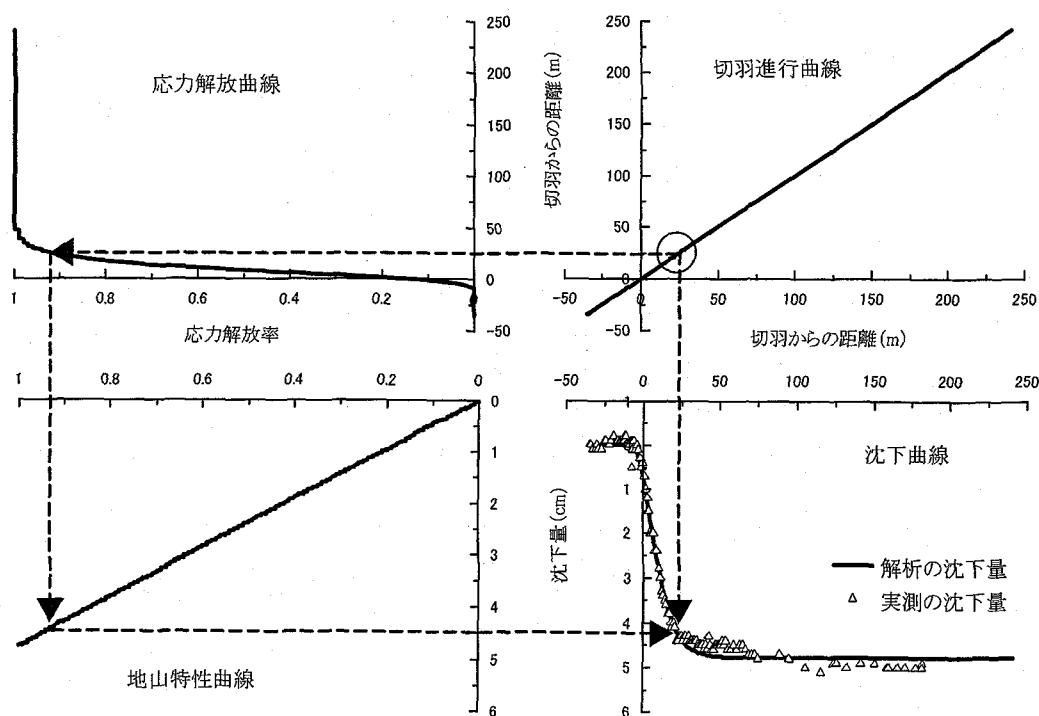


図1 解析手順

ここで沈下曲線が非対称型の成長曲線に近い曲線形状であることなどから式(1)のように非対称型の成長曲線の1つである Gompertz 曲線を応力解放曲線として用いる⁷⁾。

$$\lambda = k a^{b t} \quad (1)$$

ここで、 λ : 応力解放率、 k : 飽和解放率、 a : 切羽到達時の応力解放率、 b : 切羽到達時の接線勾配、 t : 切羽からの距離(m) とする。

本解析では切羽通過後から十分に時間が経過した時点で、トンネル内空の見かけの内圧が完全に解放されるとみなし、飽和解放率 k を1で固定する。また a, b を解析のパラメータとする。

また、FEM 解析よりも簡易に地表面沈下量を算定する方法として弾性理論解の Jeffery の理論式を用いて沈下量を求める⁸⁾。Jeffery は半無限弾性地山に円形トンネルを掘削した場合の最大地表面沈下量 U は次式で求まるとした。

$$U = (1 + \nu^2) \frac{p}{E} \frac{4r_0(h + r_0)}{(h + r_0)^2 - r_0^2} \quad (2)$$

ここで、 U ：地表面沈下量(m)、 p ：トンネル内空に見かけ上作用する内圧、 E ：見かけの弾性係数(MPa)、 ν ：ポアソン比、 r_0 ：トンネル半径(m)、 h ：土被り厚(m) とする。

本解析では式(2)の見かけの弾性係数 E をパラメータとして解析を行う。ここでは見かけの弾性係数を支保工や加背割りの効果も含んだ弾性係数と定義する。

以上より Jeffery の理論式により解析解を求め、式(1)の a, b と式(2)の E をパラメータとして非線形最小二乗法により最適な沈下曲線を求め、そのときのパラメータ値の妥当性と連続する各測点間のパラメータ値の変化の比較、検討を行う。

3. 解析結果

本解析では先受け工のないトンネルと先受け工のあるトンネルについて解析を行う。まず、先受け工を施工しない地山のデータを用い、解析方法の適用性等を把握し、先受け工を施工した地山のデータで先受けに対する適用性を把握する。

3.1 先受け工なしのトンネルにおける解析

3.1.1 解析対象トンネル

先受け工なしの解析で A トンネルのデータを用いる。A トンネルはショートベンチカット工法が採用され、トンネル部の地質は主に砂質土、粘性土である。また、土被りは約 10m でほぼ一定である。以上より、解析領域は地質、工法、土被りが一定とみなされる。

3.1.2 解析条件

解析に用いる物性値を表 1 に示す。ここで、トンネル半径は掘削断面積を等価な円形断面に換算したときの円形トンネルの半径を用い、全断面掘削と仮定する。解析に用いた土被り厚は各測点での実測値である。解析には STA780～STA870 の間の 11 の計測地点を用いた。

表 1 地山の諸物性値

単位体積重量	17 (kN/m ³)	内部摩擦角	30°
ポアソン比	0.3	換算トンネル半径	5.0 (m)
土被り厚	8.3(m)～10(m)	パラメータ a (初期値)	0.3
パラメータ b (初期値)	0.8	パラメータ E (初期値)	3.0(MPa)

3.1.3 解析結果

各測点で測られた沈下曲線はいずれも非常に類似した沈下形状である。その一例として実測と解析の地表面沈下曲線の STA790 におけるトンネル中心線上の実測および解析の地表面沈下量と切羽距離の関係を図 2 に示す。ここで、解析の沈下曲線として非対称型のゴンベルツ曲線に加え、比較のために対称型のロジスティック曲線もあわせて示した。本図よりロジスティック曲線での解析結果は実測の沈下曲線よりも沈下が早期に生じていることが分かる。一方、ゴンベルツ曲線の解析結果ではほぼ

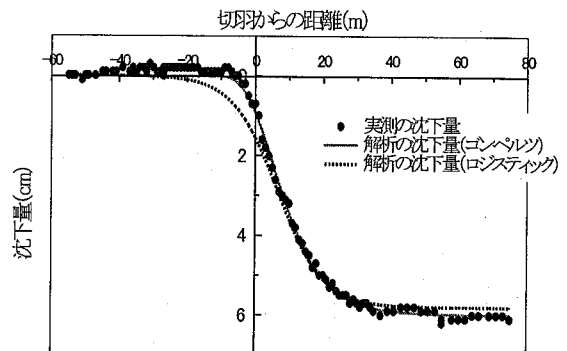


図 2 実測と解析の地表面沈下曲線

実測値と同様の沈下形状となっている。このことから沈下曲線の形状は非対称であると判断できる。したがって、応力解放曲線としてゴンペルツ曲線を用いることにより、地山の応力解放を十分に評価でき、実測の地表面沈下とよく一致した沈下曲線を描くことができる。

次に、各測点でのパラメータ値の変化 (a, b とみかけの弾性係数 E と収束後の解析沈下量をそれぞれ最大値で除した無次元量) を図 3 に、各測点の実測と解析の収束後の地表面沈下量の比較を図 4 に示す。

本解析で用いているような工法、土被り、地質一定の条件でトンネルを掘削した場合、応力解放曲線はどの地点でも同じ曲線であると考えられるが、図 3 に示されるように本解析の結果でも応力解放曲線のパラメータである a, b が各測点でほぼ一定であることから応力解放曲線は全ての測点で非常に類似した曲線であると考えられる。また、図 4 より実測と解析の収束後の地表面沈下量はどの測点でもよく一致している。以上のことより工法、土被り、地質がほぼ一定条件ならば、パラメータ a, b は一定の値を取り、さらに、図 2 のように解析で求めた沈下曲線が実測の沈下曲線とほぼ一致していることから最小二乗法で最適な曲線を決定する本解析方法は実際の地山挙動予測に適用できると考えられる。

一方、図 5 に示すように、収束後の解析の地表面沈下量と見かけの弾性係数 E の間にはほぼ線形関係である。したがって、パラメータ E は収束後の沈下量によって変化するパラメータであることが分かる。

3.2 先受け工のあるトンネルにおける解析

3.2.1 解析対象トンネル

先受け工のある解析では B トンネルのデータを用いる。B トンネルは上半先進ベンチカット工法が採用され、トンネル部の地質は新第三紀の軟岩ならびに盛土区間である。また、土被りはほぼ一定で約 10m となっている。以上のように解析領域は地質、工法、土被りがほぼ一定の条件とみなされる。

3.2.2 解析条件

解析に用いる物性値を表 2 に示す。トンネル半径は掘削断面積を等価な円形断面に換算したときの円形トンネルの半径を用い、全断面掘削と仮定する。土被り厚についてはすべての測点で 10m として解析を行っている。解析には STA4500 ～ 6500 の間の長尺先受け工法が採用されている 18 の計測地点のデータを用いた。

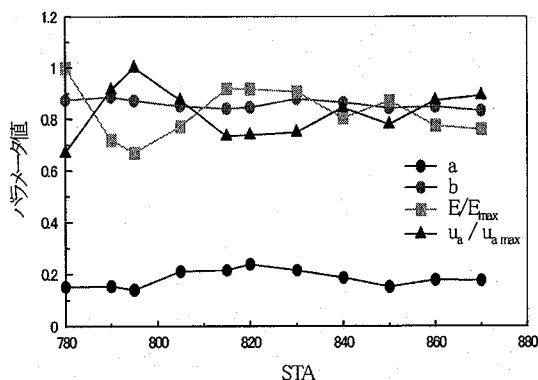


図 3 各測点におけるパラメータ値

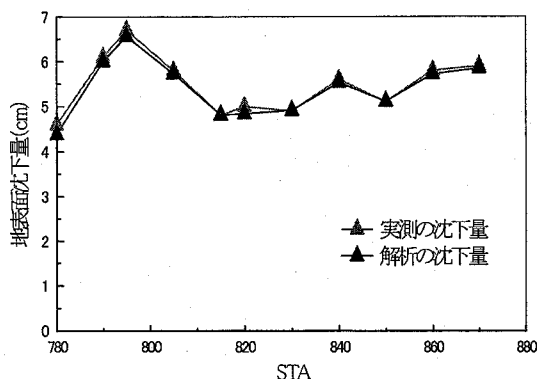


図 4 実測と解析の地表面沈下の比較

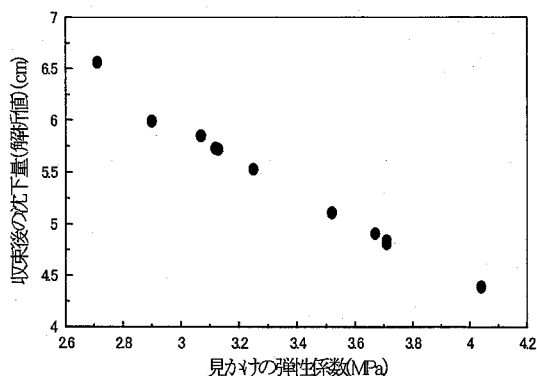


図 5 収束後の沈下量と見かけの弾性係数の関係

表2 Bトンネルの諸物性値

単位体積重量	16.5(kN/m ³)	内部摩擦角	20°
ポアソン比	0.45	換算トンネル半径	5.6 (m)
土被り厚	10(m)	パラメータ a (初期値)	0.3
パラメータ b (初期値)	0.8	パラメータ E (初期値)	3.0(MPa)

3.2.3 解析結果

図6はSTA6300のトンネル中心線上における実測と解析の地表面沈下量と切羽距離の関係を示している。Bトンネルの地表面沈下曲線の特徴としてすべての測点で切羽通過前3D付近から先行沈下量がほぼ一定の1.0cm前後であることが実測値からわかっているが、これは先受け工の影響によるものと思われる。本図のように先行変位が早くから生じているトンネルに対しても実測と解析の沈下曲線がよく一致していることから先受け工のあるトンネルに対しても応力解放曲線としてゴンベルツ曲線を用いることで応力解放を適切に評価でき、その結果として実測の沈下曲線とよく一致した沈下曲線を描くことがわかる。

次に、各測点でのパラメータ値の変化 (a, b とみかけの弾性係数 E と収束後の解析沈下量をそれぞれ最大値で除した無次元量) を図7に、また各 STA の実測と解析の地表面沈下量収束値の比較を図8に示す。

パラメータ a は収束沈下量と切羽到達時の先行沈下量の比を表す。したがって、このケースでは先行沈下がほぼ一定の値をとっているため、図7に示すように収束後の沈下量が増加すれば、a の値は減少する。しかし、a の値は緩やかな変化を示しており、次の切羽に結果を反映できると考えられる。パラメータ b は先受けなしの場合と同様にほぼ一定の値をとっているが、先受けなしの場合よりも高い値をとっている。これはBトンネルがAトンネルよりもベンチ長が長いこと沈下勾配が緩やかになったためと考えられる。パラメータ E/E_{max} に関しては図9の収束後の沈下量と見かけの弾性係数の関係に示すように、先受け工なしの場合とは異なり線形関係が成り立たない。これは、見かけの弾性係数が大きいために弾性係数の変化に対する沈下量の変化が小さくなったためである。また図6、図8より早期に沈下が生じ、収束性の悪い地山に対しても本解析法は適用できることが確認された。

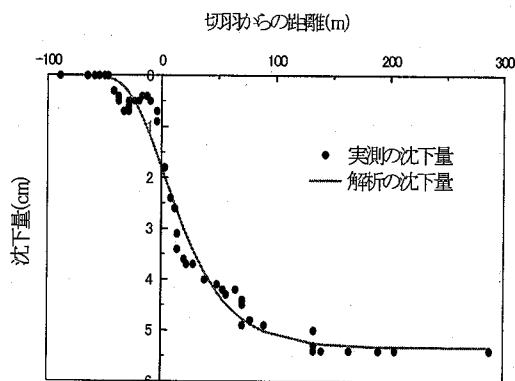


図6 実測と解析の地表面沈下曲線

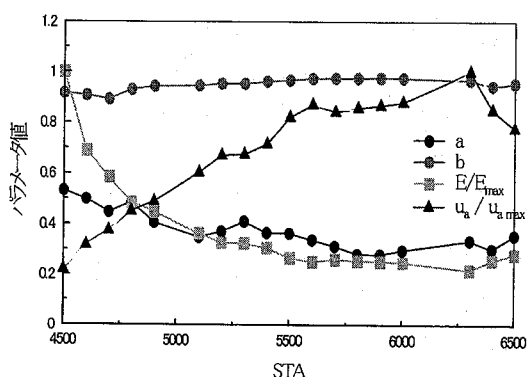


図7 各測点におけるパラメータ値

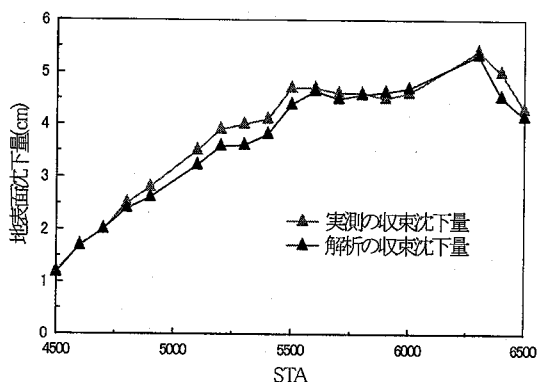


図8 実測と解析の地表面沈下の比較

4. 結論

本研究により以下のことが確認された。

- ① 工法、地質、土被りが一定の条件では、先受け工なしの場合、実測と解析の地表面沈下曲線はよく一致する。また、先受け工ありの場合は先行沈下が早く生じているにもかかわらず、本手法により最適な地表面沈下曲線を求めることができる。
- ② 沈下曲線は切羽直近で大きく沈下し、切羽通過後は徐々に沈下する非対称の形状であるため、弾性挙動が卓越する地山に対して解析を行う場合には非対称型成長曲線のゴンペルツ曲線で応力解放を評価することが可能である。
- ③ 工法、地質、土被りが一定ならば先受け工なしではa,b ほぼ一定、先受け工ありの場合はb のみ一定である。ただしa はその変化は緩やかであるので次に掘削される切羽挙動の予測に結果を反映してもよいと考えられる。

(参考文献)

- 1) P.Egger : Deformation at the Face of the Heading and Determination of the Cohesion of the Rock Mass, Underground Space Vol.4, No.5, pp.313-318
- 2) 梨本裕、高森貞彦、今田徹：孔内除荷模型実験による地山特性曲線とトンネルの最適設計、土木学会論文集VI、pp.41～48、1992年3月
- 3) 梨本裕、高森貞彦、今田徹：地山特性曲線を求める手段としての孔内載荷試験、土木学会論文集VI、pp.39～46
- 4) 佐藤正彦、安川正春、北川隆、一条俊之、曾我誠意：特性曲線法によるトンネルの先行変位の考察、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.355～360、1987年
- 5) 角湯克典、猪熊明、山村浩介：トンネル掘削による地表面沈下予測有限要素解析手法について、トンネル工学研究発表会論文・報告集、1992年10月
- 6) 久武勝保、伊藤富雄：トンネル掘削によって生じる地表面沈下の境界要素法による三次元解析、土木学会論文報告集、1982年11月
- 7) 山岸宏著：生物の成長学、講談社サイエンティフィク、p.71
- 8) k・チェッキー著、島田隆夫訳：トンネル工学、鹿島出版会、p.653

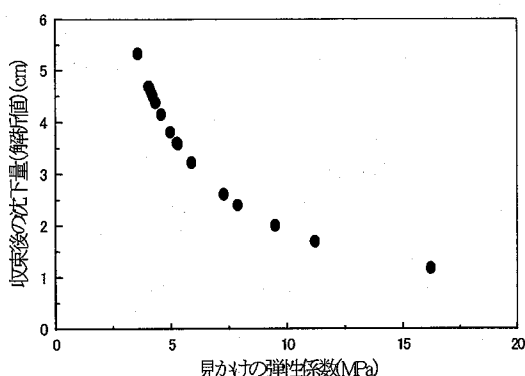


図9 収束後の沈下量と見かけの弾性係数の関係