

地山特性曲線法を用いた先行変位予測

Prediction of antecedence displacement using Convergence-Confinement Method

鈴木健之¹・土門剛²・西村和夫³

Takeyuki Suzuki, Tsuyoshi Domon and Kazuo Nishimura

¹正会員 工修 社団法人施工技術総合研究所 研究第2部 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)

E-mail:suzuki@cmi.or.jp

²正会員 東京都立大学大学院 工学部助手 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 工博 東京都立大学大学院工学部 教授 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

We confirmed the prediction of surface settlement with Convergence Confinement Method. It is difficult to measure the antecedence settlement of convergence and crown settlement, which are used as a control point in tunnel excavation. In this investigation, we confirmed the prediction of displacement curve which do not measure antecedence settlement with Convergence Confinement Method.

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

1. 背景と目的

従来、都市トンネルは開削工法もしくはシールド工法により施工されてきたが、近年では洪積層からなる地山などにおいて、経済的に施工できるため山岳工法である NATM を用いて施工されるケースが多くなっている。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など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できる方法である^{1)~4)}。

一方、実際には有限要素法に代表される数値解析によって地山の变形挙動を予測^{5),6)}、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は低く、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。また、一般に行われる二次元解析では、切羽進行に伴う三次元的支保効果を応力解放率を用いて模擬するが、解放率の設定が解析結果を大きく左右するにもかかわらず、その設定は過去の類似の解析などの実績に基づいて設定されることが多く、それぞれの現場に適合する値として十分に検討されることは少ない。

このような数値解析の現状を鑑み、有限要素解析などの数値解析よりもモデリングの精度は劣るものの簡便に地山の挙動を評価できる地山特性曲線法の適用を検討することは、現場における簡便な評価手法の提案として有益であると考ええる。

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、支保工の効果は支保特性曲線により評価される。

著者らは土被りの浅い都市トンネルでは重要な管理項目となる先行変位の計測が含まれる地表面沈下曲線を用いて地山特性曲線法の適用性を確認している⁷⁾。この研究の過程で、地山特性曲線法では先行変位の影響が大きく、先行変位を含むデータを用いてパラメータを同定する方法が信頼性と解の安定性が高いことが明らかとなった。反面、通常のトンネル掘削では、管理項目として内空変位や天端沈下が通常用いられることから、地山特性曲線法を先行変位が得られない内空変位や天端沈下に適用する上

で、前述の先行変位の影響を評価しておくことは重要である。

本論文では土被りの浅いトンネルを対象とし、内空変位や天端沈下、つまり先行変位が計測されていないデータの予測など先行変位をパラメータとせざるを得ない場合を想定し、地表面沈下曲線から先行変位分を差し引いたデータを用いて、先行変位の予測の可能性を検討した。なお、解析をより簡便に行うために弾性係数に支保工や補助工法の支保効果を含ませる見かけの弾性係数を用いて地山特性曲線法による解析を行った。

2. 解析概要

(1) 解析概要

本解析では、地質条件、掘削工法、土被りがほぼ一定な現場の実測の地表面沈下曲線（図 1）から先行変位成分を除いた切羽通過後のデータ（図 2）を用い、地山特性曲線法から求めた解析上の地表面沈下曲線と比較、残差の二乗和を最小にすることでの先行変位と比較することにより行う。複数の計測断面で安定して解が求められるか否かにより、先行変位をパラメータとせざるを得ない場合を想定した地山特性曲線法の適用性を検討する。

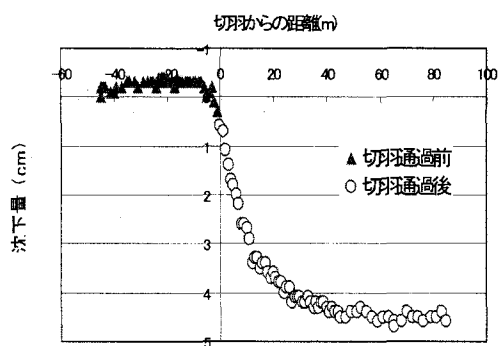


図 1 実測の地表面沈下曲線

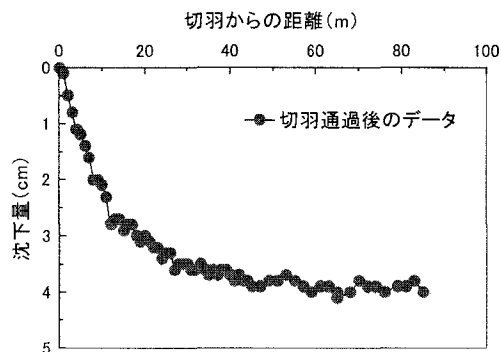


図 2 解析に用いる沈下曲線

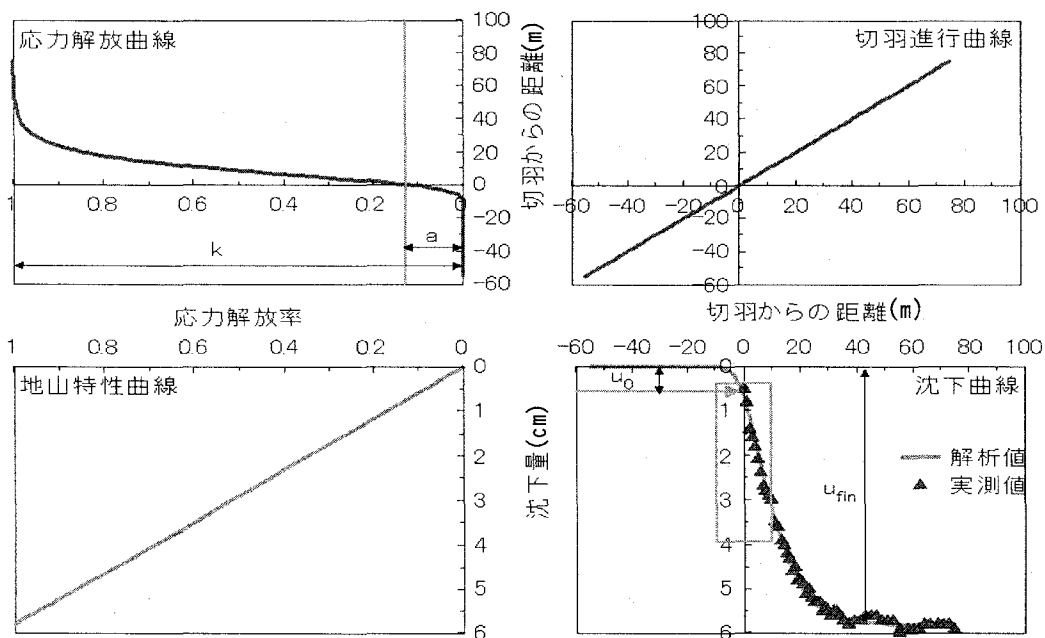


図 3 解析手順

(2) 解析手法

a) 解析手順

解析の方法は次の①～⑧の手順に示すように、先行変位を除いた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の残差の二乗和が最小となるパラメータ値を最適なパラメータ値とし、そのパラメータ値を用いて最適解として地表面沈下曲線を求める(図 3)。各測定断面ごとに解析を繰り返し、同定したパラメータ値および解析上の先行変位と実測の先行変位を比較する。ここで図中の a は切羽到達時の応力解放率、 k は飽和解放率、 u_0 は先行変位、 u_{fin} は収束後の沈下量を示す。なお、今回の解析は本解析手法の適用性を確認するものであるため、実際には切羽の進行、停止を繰り返す図 3 の切羽進行曲線は縦軸、横軸ともに切羽からの距離として単純化して時間の影響を省略して表記した。

- ① パラメータの初期値を設定する。未知数となる先行変位(u_0)も初期値を設定する。
- ② 現場の実測データから先行変位を除いた切羽進行曲線に仮定した初期値の先行変位を加えて実測の沈下曲線として描く(図 3 の第四象限)。
- ③ パラメータを応力解放率を示す式(後述(1)式)に代入して応力解放曲線を描く(図 3 第二象限)。
- ④ 応力解放曲線から切羽進行(図 3 の第一象限)に応じた応力解放率を求め、トンネル内空に見かけ上作用する内圧を計算して、これを変形を求める式(後述(2)式)に代入して地山特性曲線を描く(図 3 第三象限)。
- ⑤ 切羽進行に応じて③と④の作業を繰り返し、解析上の沈下曲線を描く(図 3 第四象限)。第四象限には仮定した先行変位に先行変位を除いた実測の沈下量を加えた”実測”の沈下曲線と、解析から求めた沈下曲線が描かれる。
- ⑥ ”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。
- ⑦ 各パラメータ(仮定した先行変位を含む)を変化させ②～⑥の手順を繰り返す。
- ⑧ 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。

b) 応力解放曲線式

一般に計測される沈下曲線や内空変位曲線の形状は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、本論文では式(1)に示すような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⁸⁾。

$$\lambda = ka^{bt} \quad (1)$$

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を表すパラメータ、 t : 切羽からの距離(m) とする。

なお、飽和解放率とはトンネルを掘削することによりどの程度まで応力が解放されるかを表したものである。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。

ここでパラメータ a の変化による応力解放曲線の変化を図 4 に、またパラメータ b の変化による応力解放曲線の変化を図 5 に示す。

なお、図 4 では $k=1, b=0.8$ としている。また、図 5 では $k=1, a=0.3$ として曲線を描いている。

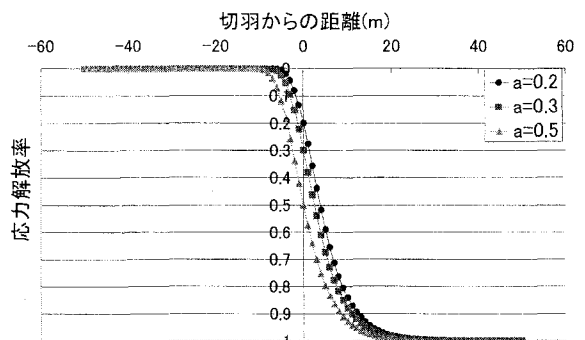


図 4 パラメータ a の変化による応力解放曲線

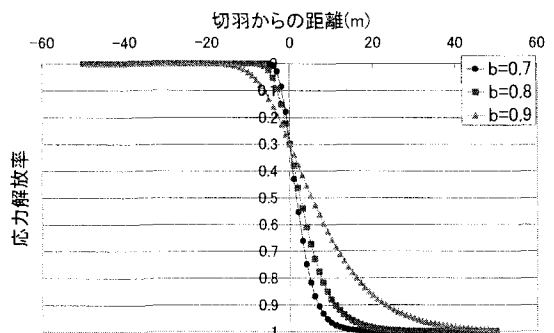


図 5 パラメータ b の変化による応力解放曲線

図4よりパラメータaの値が切羽到達時の応力解放率を表していることが確認できる。また図5よりパラメータbの値が沈下曲線の切羽進行に伴う勾配を表していることがわかる。また、パラメータbの値が大きくなるにつれて沈下曲線の勾配が緩やかになっていることがわかる。

応力解放曲線に Gompertz 曲線を用いているのは、実測の沈下曲線が非対称であることの他に、このように、Gompertz 曲線のパラメータの物理的意味合いが明確であることの理由にもよる。

c) 地山特性曲線式

地山特性曲線は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⁹⁾。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。この式は重力場での正確な解を与えないが、簡便で多く用いられていること、また、変形挙動が小さくてほぼ弾性範囲内に収まっていると考えられる場合には有用な式であることからここで用いた。

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

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(MPa)、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。なお、結果の表示においては沈下量はcmで表示している。

本解析ではb)で述べたように、飽和解放率kを1に設定している。したがって、支保工や補助工法、加背割りなどの支保効果はすべて弾性係数に反映される。それゆえ、式(2)の中の弾性係数は見かけの弾性係数としてのパラメータとなる。

図6にパラメータEの変化による地山特性曲線の変化を示す。

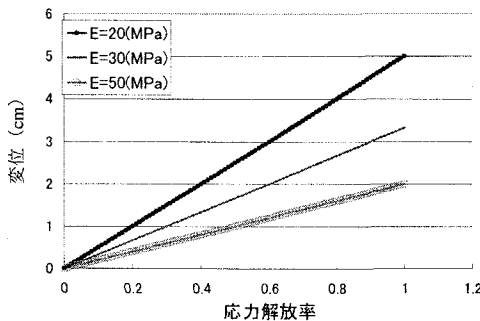


図6 パラメータEの変化による地山特性曲線

表1 解析ケース

	先行変位
Case1	パラメータ a, b, E の関数とする
Case2	パラメータ a, b, E とは別の独立したパラメータとする

以上の図4,5,6より、解析から求められる沈下曲線の形状を決定するパラメータはパラメータaとb、収束沈下量の大きさを決定するパラメータはパラメータEであることがわかる。したがって、応力解放曲線により形状が決定し、地山特性曲線により収束沈下量が決定する。

(3) 解析ケース

本解析では先行変位を表す方法として表1に示す2つのケースについて予測解析を行う。

Case1は先行変位をパラメータaの関数として表すケースである。

測点に切羽が到達したとき、応力解放率はパラメータaの値となり、沈下量は切羽到達時の沈下量、すなわち先行変位となる。また、切羽が通過して十分経ったときには応力は完全に解放され応力解放率は1となり、変位は収束する。これらの関係式を式(3)、(4)に示す。

$$a:k = u_0 : u_{fin} \quad (3)$$

$$u_0 = \frac{a}{k} u_{fin} \quad (4)$$

ここで、a：切羽到達時の応力解放率、k：飽和解放率、 u_0 ：先行変位、 u_{fin} ：収束後の変位とする。

収束後の変位はパラメータa, b, Eの3つのパラメータで表現されるから、式(4)の先行変位は結局、a, b, Eの3つのパラメータだけで表現できる。Case1ではa, b, Eの3つのパラメータだけで行うケースとして解析を行う。ただし、先行変位をa, b, Eの3つのパラメータの関数とした場合、解析から求めた先行変位を実測の先行変位の計測されていない沈下曲線に加えるため、実測と解析の先行変位は常に等しくなる。ゆえに、先行変位を除いた切羽通過後のデータの残差の二乗和が最小になるパラメータ値を解析から求めることになる。しかし、この考え方は先行変位が正確に予測できていることが前提となる。また、本

解析の目的は切羽通過後の曲線形状を合わせる事ではなく、先行変位の値を予測し、沈下曲線の形状を実測とほぼ一致させることにある。したがって、先行変位の重みを高くする必要がある。

そこで、Case2では先行変位をa, b, Eの3つのパラメータとは別の独立したパラメータとし、a, b, E, 先行変位の4つのパラメータで解析を行う。

(4) 解析条件

a) 解析対象トンネル

本解析では鉄道トンネルである 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。

b) 諸物性値

解析に用いる物性値を表 2 に示す。ここで、トンネル断面は掘削断面積を等価な円形断面に換算したときの円形断面とした。また、ベンチ長が比較的短く計測変位に下半掘削時の影響が現れていないことから、全断面掘削と等価と仮定する。

解析に用いた土被り厚は表 3 に示すとおりであり、各測点での実測値である。解析には測点 780~870 の間の 11 測点のデータを用いた。

また表 4, 5 に Case1 および Case2 のパラメータ初期値を示す。

なお、パラメータ a, b は 0.04、パラメータ E は 1 (MPa)、先行変位は 0.1 (cm) ずつ変化させる。またそれぞれのパラメータの範囲は a, b は 0 から 1、また E は地表面沈下で解析を行った際にパラメータ E の値が 20~40 (MPa) の範囲であったことから、上下 10 (MPa) ずつ余分に範囲をとり 10~50 (MPa) とし、先行変位は上記のパラメータ E の範囲であれば 5.0 (cm) を上限とすれば十分であることから以上のパラメータ範囲で解析を行った。

3. 解析結果と考察

図 7 にパラメータ a、図 8 にパラメータ b、図 9 にパラメータ E の Case1 および Case2 の解析結果を示す。これらの図は各測点における各パラメータの最適値をプロットしたものである。また、図 10 に先行変位の Case1 および Case2 の解析結果と実測の先行変位の比較を示し、図 11 に解析結果と実測の収束変位の比較を示す。なお、いずれの図にもすべての測点で実測

表 2 地山の諸物性値

単位体積重量 (kN/m^3)	17	内部摩擦角	30°
ポアソン比	0.3	換算トンネル半径 (m)	5.0

表 3 各測点の土被り厚

測点	土被り厚 (m)
780	8.9
790	10.0
795	8.9
805	8.7
815	8.7
820	8.4
830	8.3
840	8.4
850	8.3
860	8.5
870	8.4

表 4 Case1 のパラメータ初期値

パラメータ a (初期値)	0.04	パラメータ b (初期値)	0.04
パラメータ E (初期値) (MPa)	10		

表 5 Case2 のパラメータ初期値

パラメータ a (初期値)	0.04	パラメータ b (初期値)	0.04
パラメータ E (初期値) (MPa)	10	パラメータ 先行変位 (cm)	0.1

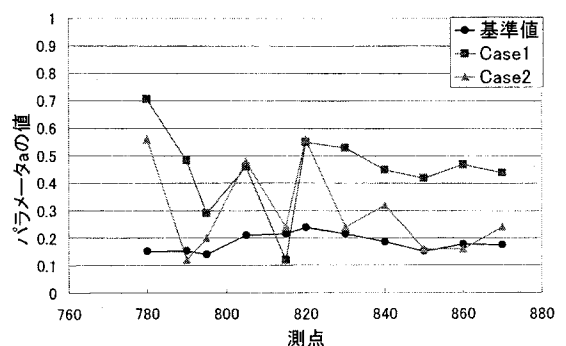


図 7 各ケースにおけるパラメータ a の比較

の沈下曲線とよく適合している先行変位ありの解析結果を基準値として合わせて示す。

図7よりCase 1は全体的に基準値の応力解放率より大きい値となっている。一方、Case2は測点780, 805, 820, 840の4測点以外は基準値とほぼ等しい値となっている。Case1およびCase2ともに先行変位を含む解析結果である基準値よりは変動が相対的に大きく、Case 2でも切羽での応力解放率に相当するパラメータaが一部で0.5に達している。

図8よりパラメータbはCase1, Case2にかかわらず実測の沈下勾配とほぼ等しい値となっていて安定した解が得られている。これは切羽における沈下量のみならず最終沈下量も含めて、それらの変化に比べ、沈下勾配の変化がすべての測点で相対的に小さいことに起因しているためであると考えられる。

図9よりパラメータEの値はCase1ではほとんどの測点で基準値よりも小さい値を示している。一方Case2ではパラメータaと同様、測点780, 805, 820の4測点以外は基準値とほぼ等しい値となった。

図10より先行変位の場合もパラメータa, Eと同様にCase1はほとんどの測点で基準値と値は異なり、Case2では測点780, 805, 820以外はほぼ等しい値となっている。また図11に示すように各ケースの収束変異を比較すると先行変位に比べ、基準値との比率が小さくなっている。これは切羽到達前の変位を除いた沈下曲線にパラメータとして求めた先行変位を加えることにより実測の沈下曲線としているので、基準値と解析値の差は先行変位の場合と収束変位の場合で等しくなるためである。したがって、基準値との比率は収束変位の方が小さくなる。例を挙げると、測点840では先行変位では基準値との比率は約2であるのに対し、収束変位では15%程度大きいだけである。

このことからCase2のパラメータの設定方法は先

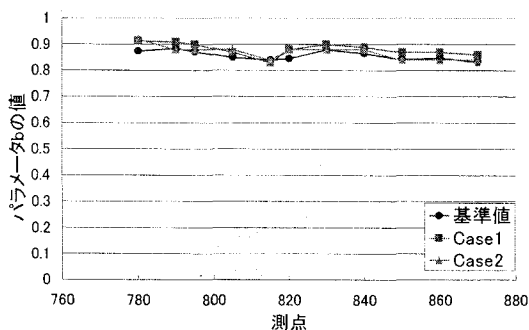


図8 各ケースにおけるパラメータbの比較

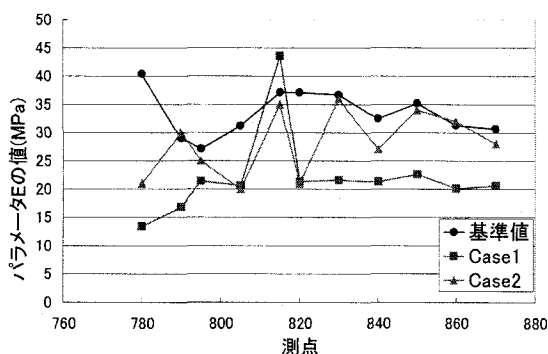


図9 各ケースにおけるパラメータEの比較

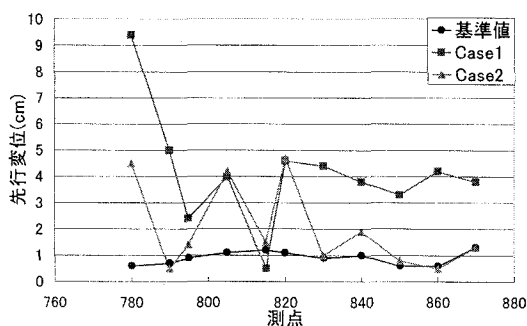


図10 各ケースにおける先行変位の比較

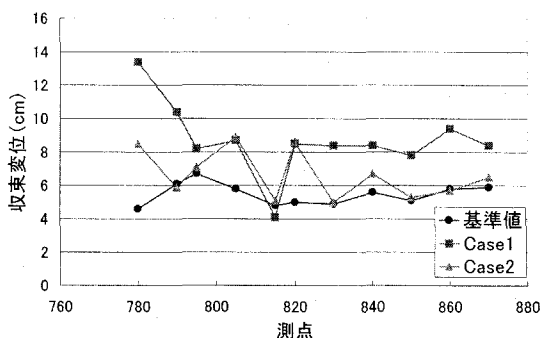


図11 各ケースにおける収束変位の比較

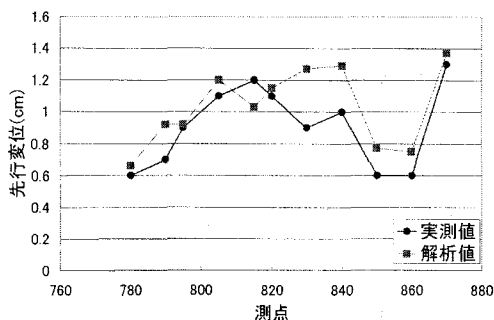


図12 地表面沈下解析の実測と解析の先行変位

行変位が計測されていないデータにおいて有効であると考えられる。

このように残差の二乗和が最小になる最適解を求めているにもかかわらずCase 1で先行変位が大きくずれているのは、以下の理由によると考えられる。

図12に示すように先行変位を含む地表面沈下で解析した場合でも実測値と解析値では先行変位の値は必ずしも一致するわけではない。最適解を求める計測データの範囲が先行変位を含めて最終変位までのデータを含んでいることから、先行変位が多少ずれても全体として残差が小さくなれば最適解となるからである。今までの本研究の結果では、先行変位を含んだパラメータの同定の結果、最終変位でのばらつきは図12に示した先行変位ほどはなく、沈下曲線は比較的安定して求められている。

反面、切羽通過時のある瞬間での実測と解析解の比較では最終変位ほどの精度を期待することは困難であると考えられる。

先行変位を独立パラメータとしたCase2が比較的安定しているのは、2. (2), c)で前述したように、全体のデータに対する形状を支配する応力解放曲線のパラメータで先行変位を決定する式(4)とは切り離し、全体データの上下移動を与える沈下の独立パラメータとして先行変位を加え、1自由度余分に与えて解析したことによると考えられる。

なお、自由度を多く与えると収束変位は合わせることができても見掛けの弾性係数を含め、各パラメータの物理的意味合いを失った値が同定されることは確認している。したがって、本研究で示したa, b, E, 先行変位の4つのパラメータが先行変位の計測されない天端沈下や内空変位の予測に対して適切であると考えられる。

また、Case1に比較して相対的に一致しているCase2において、基準値にほぼ一致しなかった測点780と一致した測点790の地表面沈下に先行変位データを加えて解析した時の実測値と解析値の比較を図13および図14に示す。

これらの図からも基準値に一致した測点790と一致しなかった測点780の地表面沈下のデータには明確な違いは認められず、先行変位を加えて解析した結果はどちらの測点でも実測値と解析値が非常に良く一致していることがわかる。このことから、Case2において基準値と一致する測点と一致しない測点では、沈下曲線の形状に差異は見られず、先行変位のあるデータで解析した場合には、両者とも実測の沈下曲線に一致している。

本文で示したように、先行変位が存在すること

は、変位の絶対位置が固定されていることを意味する。反面、先行変位データが無いことは、変位データの相対的な位置しか与えられていないことを意味する。このような場合、解析上仮定した変位曲線のモード、たとえば、応力解放曲線の基本形状と、地山特性曲線の形状に相対的な変位データがどの程度一致しているかが、重要となる。

もし、切羽通過後の変位データが、応力解放曲線の解放率50%~100%の曲線形状に一番適合するとすれば、解析結果は切羽での応力解放率を50%と解釈し、最終沈下量は地山特性曲線の弾性係数(弾性の場合)で調整することになる。図7と図9のCase1とCase2それぞれの値の基準値に対する相反的な動きはそのことを示している。

このことから、仮定する応力解放曲線の形状や先行変位計測が沈下量予測の解析に与える影響は非常に大きいことがわかる。実際には天端沈下や内空変位を計測する際には先行変位のみではなく切羽通過後から初期値計測時までには発生する変位である初期変位も切羽通過直後の計測は困難で、いつの時点での測定値か不明確である場合が多い。したがって、解析をより精度良く行うためには、先行変位をどれ

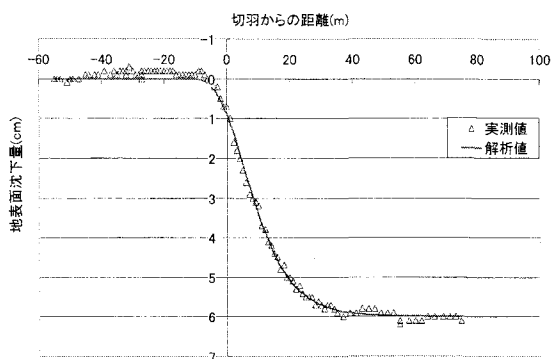


図13 測点780の先行変位ありの結果

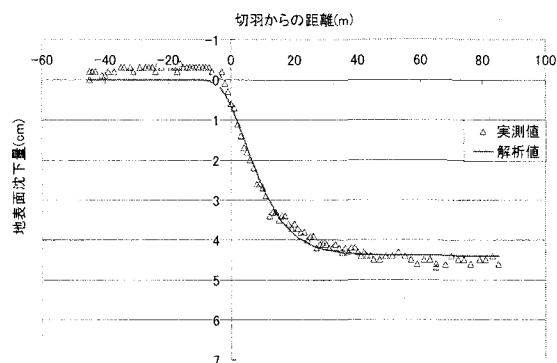


図14 測点790の先行変位ありの結果

だけ精度良く求めることができるか, また初期変位をどれだけ抑えることができるか, その変位曲線形状が切羽進行に伴って変化しているか否かが重要であると考えられる。

4. 結論

パラメータを a, b, E , 先行変位とすることで先行変位が計測されていないデータにおいても地山特性曲線法で先行変位と収束沈下量を予測できることが確認できた。しかし, 全体として先行変位を含む場合に比較して解の安定性が低下する。今後, 多くの実測ケースに対して本手法を適用し, 解の安定性の検討と, 適用条件を明確にする予定である。

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, 1980.
- 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, No. 444/VI-16, pp. 41~48, 1992.
- 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, No. 468/VI-19, pp. 39~46, 1993.
- 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.
- 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, pp. 161~166, 1992.
- 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, No. 327, pp. 107~113, 1982 年
- 7) 鈴木健之, 西村和夫, 土門剛 : 特性曲線法によるトンネル掘削時の地山挙動の予測, 第 56 回年次学術講演会, III-pp. 130~131, 2001.
- 8) 山岸宏著 : 生物の成長学, 講談社サイエンティフィク, p. 71
- 9) 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, 1977.