

縦断面方向変位を利用した前方地山状況予測の検証

山口大学大学院理工学研究科 学生会員 ○竹村 いずみ 岡部 康成

山口大学大学院理工学研究科 正会員 進士 正人

西松建設株式会社 正会員 大谷 達彦

1. はじめに

山岳トンネル施工中の地山状況の観察・計測としては切羽観察や内空変位計測および天端沈下計測が代表的である。これらの計測はトンネル掘削におけるトンネル壁面の変形挙動を計測するもので、それら変位挙動に基づく情報化施工が一般に実施されている。近年、内空変位計測は光波測距儀による三次元での絶対変位計測が主流となったため、著者らは天端や内空変位計測結果として利用されていない掘削方向（縦断面方向）変位が切羽前方の地山状態により変化することに着目した前方地山の予測手法を提案している¹⁾。

本研究では、この提案手法を実際の施工データに適用し、その適用性を検証する。合わせて、三次元数値解析を用いてトンネル縦断面方向の天端沈下分布に基づいた三次元地山モデルを作成し、評価・検討を行う。

2. 縦断面方向変位を用いた予測手法

解析手法としてFLAC3Dを用い、弾塑性体モデルによるトンネル掘削解析を行った。解析に用いたモデルを図-1に示す。図に示す通り奥行き180mの中央部90mで領域の物性値が変化する三次元モデルを想定し、境界面より40m手前に計測断面を設置した。トンネル掘削（トンネル直径11m）は領域①より1mずつ行い、切羽から1m遅れて支保工・インバートを設置した。表-1に、解析で用いた物性値の一覧を示す。表に示すように領域②の弾性係数を0.1E（前方がより軟らかい）、5.0E（前方がより硬い）にそれぞれ変化させた場合の、切羽の進行に伴う計測断面のトンネル天端部掘削方向変位を図-2に示す。図から前方物性値の違いによってそれぞれ異なった変位挙動を示すことが分かる。そこで、それぞれのケースの変位分布を線型近似し、傾きを求める。この傾きを平均変位量¹⁾（＝縦断面方向変位の増加量/計測点から切羽までの距離）と定義すると、前方地山が硬い場合（②:5.0E）では平均変位量は正、反対に軟らかい場合（②:0.1E）では負の値をそれぞれ示すことがわかる。

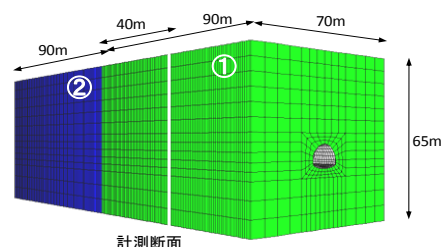


図-1 三次元解析モデル

表-1 解析物性値

	①	②	②	②	②	②
	E	0.1E	1.0E	5.0E	支保工	インバート
弾性係数 (MPa)	1000	100	1000	5000	4000	4000
単位体積重量 (kg/m³)	2300	2300	2300	2300	2400	2400
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
粘着力 (MPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
内部摩擦角 (°)	40	40	40	40	45	45

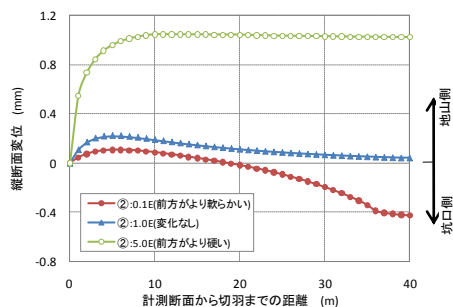


図-2 計測断面の天端部掘削方向変位

3. 予測手法の適用性の検証

3-1. 現場計測データを用いた予測法

縦断面方向変位を用いた前方地山予測について、その適用性を検証するために、A トンネルの坑口より400～820m区間計測データを用いた。なお、A トンネルの計測データは充分丁寧な計測が実地されており、計測の信頼度は高い。まず各計測断面の天端部縦断面方向変位を用いて平均変位量をそれぞれ算出し、切羽評価点の変化との比較を行った。図-3にその傾向を示す。この図には、各計測断面から評価される平均変位量が計測断面より40m前方の地山状態を表すため、計測断面をシフトさせて切羽評価点と比較を行っている¹⁾。この図より、坑口からの距離約430～580m、680～780m区間では切羽評価点の変化と平均変位量は似た挙動を示していることがわかる。

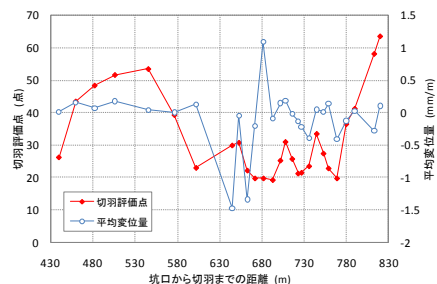


図-3 平均変位量と切羽評価点の比較

キーワード 情報化施工, 掘削方向変位, 平均変位量, 切羽評価点

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院理工学研究科進士研究室 TEL 0836-85-9332

次に、この図から各計測断面の平均変位量がどれだけ正確に前方予測できているかを検討するために図-4のような整理を行った。すなわち、この図は平均変位量・切羽評価点の各計測断面間における傾きに着目した図で、各計測断面間の傾きが正であれば上辺に、負であれば下辺にそれぞれプロットしたものである。すなわち、両方の点が重なっていれば平均変位量が正しく前方を予測できていることになる。この図より平均変位量の正答率を算出すると、26点中17点が一致したので、現場計測データにより算出した平均変位量の正答率は65%と考えられる。

3-2. 三次元数値解析による検証

次に、三次元解析モデルによる平均変位量の検証を行った。これはトンネル全体の地山状態をより現実近づけることで、平均変位量が現場計測データを用いた場合よりもより精度良く表現されることを期待したためである。図-5に作成した三次元解析モデルを示す。解析では、まずAトンネルの坑口より400～820m区間の現場計測データ(天端沈下計測)および土被り高さから地山の二次元円孔の理論解に基づく簡易逆解析法より、表-2に示す解析物性値(弾性係数)の比を決定した²⁾。さらに、モデルをより現実近づけるため、土被り高さを変化させた上で支保剛性及びトンネル形状を考慮した奥行き460mの三次元弾塑性体モデルを作成した。検証はその三次元モデルにおいて20～440mまでの420m区間の変位データを使用した。これまでと同様に掘削は1mずつ行い、切羽から1m遅れて支保工・インバートの設置を行った。計測断面は現場計測データと比較しやすくするために現場データと同じ箇所に設置した。図-6に解析モデルから算出した各計測断面の平均変位量を40m前方にずらしたものと切羽評価点の挙動を比較した結果を示す。この図より、三次元モデルによる平均変位量は図-3に示す実際の平均変位量より滑らかな挙動を示すものの全体的には一致傾向が読みとれる。次に、図-7に平均変位量の一貫状況を示す。この図より平均変位量の正答率を算出すると、26点中15点が一致したので、三次元数値解析による平均変位量の正答率は58%となる。すなわち、切羽評価点と解析による挙動の相関は、現場計測データを用いた結果とほぼ同様で、より平均変位量を一致させるには、平均変位量に加えて地山の局所的な変化を表現する手法を検討する必要があることがわかった。

4. まとめ

本研究では、平均変位量による前方地山予測について、現場での計測データを用いた予測法と数値解析を用いた場合のそれぞれ適用性を検証した。その結果、現場計測データを用いた場合の方が数値解析の場合よりも若干良い65%程度の正答率が算出された。この結果から、丁寧な現場計測が実地されると縦断面変位を利用したデータによる前方地山予測はほぼ適用可能であるといえる。しかし一部、算出した平均変位量と切羽評価点が一貫しにくい原因については種々考えられるが、切羽が停止している時の内空変位の時間依存による変位増加を考慮するなど、今後、検討が必要な点も多い。加えて、地山の不連続な挙動を予測しきれない箇所も存在し、それらが平均変位量に影響したものと考えられる。また、地山の局所的な変化が平均変位量に与える影響は無視できないため、今後は平均変位量から前方地山の局所的な変化を予測する方法について、さらに研究を進めていきたい。

参考文献 1) 小松原渉, 進士正人:「三次元内空変位計測の有効な活用方法」土木学会第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 論文番号40, pp.225-230 2009年1月

2) 応用地質株式会社: 応用地質年報 OYO TECHNICAL REPORT NO.10 1988

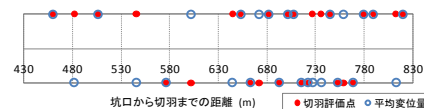


図-4 平均変位量の一貫状況

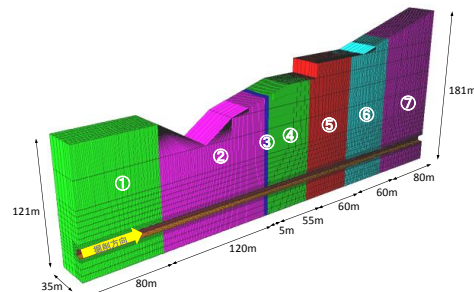


図-5 三次元解析モデル

表-2 解析物性値

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	支保工	インバート
弾性係数 (MPa)	500	1500	50	500	100	800	1500	4000	4000
単位体積重量 (kg/m ³)	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2400	2400
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
粘着力 (MPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
内部摩擦角 (°)	40	40	40	40	40	40	40	45	45

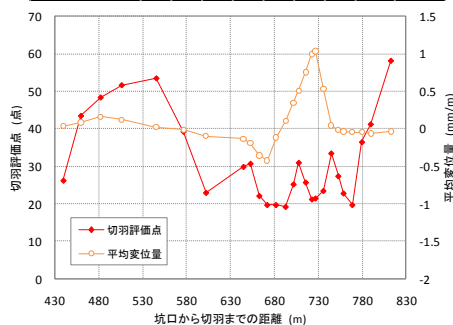


図-6 平均変位量と切羽評価点の比較

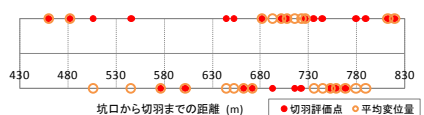


図-7 平均変位量の一貫状況