

トンネル切羽における 設計管理システム開発の試み

(株)建設技術研究所 篠原 郷志 *1

日本大学生産工学研究科 ○田蔵 慎一郎*2

日本大学生産工学部 高崎 英邦 *3

By Satoshi SHINOHARA, Shinichiro TAZOH, Hidekuni TAKASAKI

トンネル施工時の最終変位量を予測する方法として、FEMをはじめ様々な数値解析手法が適用されているが、一般に精度が悪いのが実状である。そこで、施工の最前線で得られる変位記録や地山観察を、支保パターンに応じた最終変位量の予測に役立てることができれば、より経済的かつ安全な施工が期待できる。本報告では、先ず、先行する区間において、トンネル掘削時の切羽観察データと変位記録から地山弾性係数を推定する関係式を予め設定する。次いで、後続の区間において、先行区間で求めた関係式を用いて掘削直後の切羽観察から地山弾性係数を推定し、適切な支保パターンを想定して2次元弾性FEM解析により最終変位量や支保応力を推定する。そして、許容変位や許容応力に収まる適切な支保パターンを選定し施工する、すなわちトンネル切羽における設計管理システムの適用可能性を検討することを目的としている。実際のトンネルで試行した結果、本システムは実用可能性があることが分かったが、今後さらに多くのトンネルでの検証を行うことによって、本システムの信頼性を向上させることが必要である。

【キーワード】設計管理システム、切羽観察、地山弾性係数

1. 研究の背景と目的

変状が大きい軟岩および土砂層におけるトンネル工事では、設計時に施工時の最終変位量を予測することは非常に重要である。この最終変位量を予測する方法として、FEMをはじめ様々な数値解析手法が適用されているが、一般に精度が悪いのが実状である。したがって現状では、施工中の切羽・支保観察や計測による管理が不可欠であり、いわゆる情報化施工が導入されている。しかし一般の情報化施工では、変形等を観測しつつ次工程における設計・施工

対策を施したり、既掘削区間では、変形が収束に至るのは一般に切羽通過後1～3D(D:掘削幅)後といわれており、対策が後追いのようになって経済性・安全性を低下させることもある。そこで、施工の最前線で得られる切羽観察を有効に利用し、最終変位量予測に役立てることができれば、より経済的かつ安全な施工が期待できる。

以上を背景とした本報告は、先ず、先行する区間において、トンネル掘削時の切羽観察データとトンネル変位から地山弾性係数を推定する関係式を予め設定する。次いで後続の区間において、先行区間で求めた関係式を用いて掘削直後の切羽観察から地山弾性係数を推定し、適切な支保パターンを想定して

*1 東京本社 情報部

*2 土木工学専攻 博士課程前期 047-474-2426

*3 土木工学科 教授

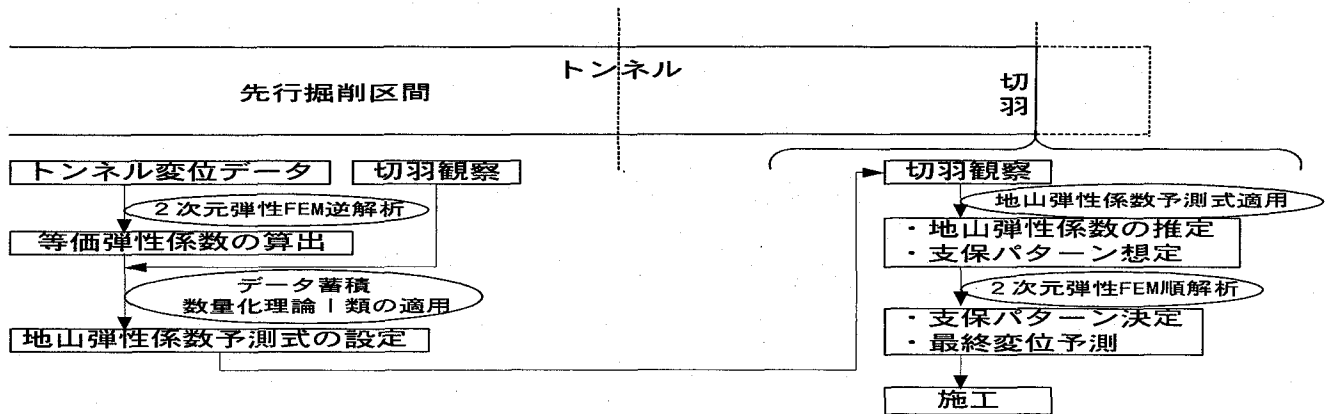


図-1 トンネル切羽における設計管理システム

表-1 Bトンネルの概要

トンネル断面諸元					支保 ハ・ター	ロックボルト				吹付けコンクリート		鋼製支保工		
地山等級 (岩 種)	掘削工法	掘削幅 (m)	掘削高 (m)	掘削断面積 (m ²)		長さ (m)	本数 (本)	設置間隔(m)		吹付け厚 (m)	吹付け 範囲	鋼材	設置間隔(m)	
								周方向	延長方向				周方向	延長方向
D (砂岩・礫岩)	上半先進 ベンチカット	11.4	7.6	64.0	DⅠ	4	18	1.2	1.0	0.15	上・下半	H125	上・下半	1.0
					DⅡ	4	18	1.2	1.0	0.20	上・下半	H150	上・下半	1.0
					DⅢ	4	8	1.2	1.0	0.25	上・下半	H200	上・下半	1.0

2次元弾性FEM解析により最終変位量や支保応力を推定する。そして、許容変位や許容応力に収まる適当な支保パターンを選定し施工する、すなわちトンネル切羽における設計管理システムの適用可能性を検討することを目的としている。

2. トンネル切羽における設計管理システム

図-1 は、本システムの構成と手順の流れを示したものである。先ず、先行する掘削区間において計測されたトンネル変位記録と、予め準備した地山-トンネル系設計モデル(ここでは2次元弾性FEMモデルを採用)から地山の等価弾性係数を逆解析により求める¹⁾。同時にその断面の地山観察データを収録しておく。そして多くの断面におけるデータから、多変量解析手法のひとつである数量化理論Ⅰ類を適用して、地山の等価弾性係数と切羽観察結果の関係式を導く。次いで後続工程から本システムの運用に入るが、前項で求めた関係式により、地山の最も確からしい弾性係数を切羽観察直後に予測できることになる。直ちに、得られた地山弾性係数を2次元弾性解析FEMモデルに適用し、複数の支保パターンから許容変位や許容応力度に納まる最も適当な支保パターンを選択して施工すればよい。

3. トンネルの概要と解析モデル

3.1 システム開発に用いたトンネルの概要

システム開発に用いたBトンネルは、全長895m

のトンネルであり、地質は新第三紀中新世の泥岩、礫岩、砂岩が分布し、下位には花崗岩類が分布する。掘削工法は、上半先進ベンチカット工法を採用している。断面諸元および支保パターンをまとめて表-1に示す。

3.2 解析モデル化

地山-トンネル系の解析対象領域は図-2に示すとおりである。支保材のモデル化は、ロックボルトを棒要素、吹付けコンクリートを面要素、鋼製支保工

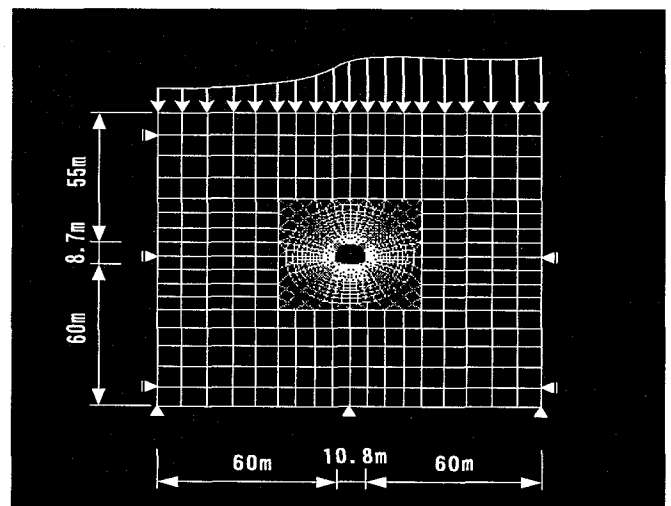


図-2 解析モデル化

表-2 入力定数

	項目	入力値
地山	単位体積重量 γ	20 kN/m ³
	ポアソン比 ν	0.3
ロックボルト	弾性係数 E_s	2.1×10^5 MPa
	断面積 A_s	303 mm ²
吹付けコンクリート	弾性係数 E_c	3.4×10^4 MPa
	ポアソン比 ν_c	0.2
鋼製支保工	弾性係数 E_s	2.1×10^5 MPa

表-3 分析に用いた説明変数のアイテム及びカテゴリー区分

アイテム	カテゴリー	1	2	3
A:切羽の状態		・肌落ちがある ・頻繁に肌落ちがある、鏡面の押出しがある	・核無し、鏡吹付けが必要	
B:素掘面の状態		・崩落し易く掘削後早期に支保が必要(鋼製支保)	・掘削に先行して山留めが必要(フォアハuling)	
C:岩の強度		・ハンマー軽打撃で容易に割れる ・容易に崩せる、ハンマーの先がくい込む	・土砂状、粘土状、ハンマーの刃先で割れる	
D:風化変質		・切羽全体が変色強度相当に低下 ・切羽の一部が破碎、粘土化変質	・切羽全体が破碎、粘土化変質、当初より未固結	
E:割れ目の間隔		・20cm>d≧5cm	・5cm>d 破碎、当初より未固結	
F:割れ目の状態		・部分的に変質し薄い粘土を挟む ・粘土層を挟む、鏡肌が見られる	・厚い粘土や土砂を挟む	
G:割れ目の形態		・層状、片状、板状	・当初より未固結	
H:湧水		・滴水、にじみ出し	・集中湧水	・全面湧水
I:水による劣化		・軟弱化する	・崩壊・流出する	
J:支保パターン		・D I	・D II	・D III
K:土被り		・100m>h≧50m	・50m>h≧20m	・20m>h

を梁要素に置換した。表-2 は解析時に必要となる B トンネルの地山・支保材の入力定数を示したものである²⁾。また、切羽からの変位計測以前に生じる先行変位を、切羽からの実測変位に加算する必要がある。その際に必要となる掘削解放率は、3次元 FEM 解析を行った結果に基づき 35%とした³⁾。よって、逆解析において入力する変位は、切羽より計測された変位を 0.65 で除して、掘削前の初期状態からの変位量として求めることができる。

4. 地山等価弾性係数と切羽観察の関係性

4.1 関係式を求める手順

解析モデルの入力定数、また実際の変位データを用いて、FEM 逆解析により等価弾性係数を求める。多くの切羽面におけるデータを蓄積し、等価弾性係数と切羽観察の関係性を、多変量解析の一種である数量化理論Ⅰ類を用いて分析する。すなわち、前者が目的変数(等価弾性係数)、後者を変位量に大きく影響すると考えられる「支保パターン」と「土被り」を加えて説明変数とする。そして精度良い関係式が得られれば、アイテムのカテゴリースコアを係数として用い、地山弾性係数予測式として利用できるようになる。分析に適用した説明変数をまとめて表-3 に示す。

4.2 分析結果

1 回目の分析結果を表-4 に示す。分析結果を見ると、予測精度を示す決定係数 R^2 は 0.7978 と比較的良好な結果が得られた。しかし 11 アイテム全てを用いて地山弾性係数を予測する手法では、観察項目が多く、現場において即座に地山弾性係数を予測することが困難である。したがって予測精度を保ちつつ、地山弾性係数への影響が少ないアイテムを除いて必要最小限で予測を行うことが望ましい。

アイテムの絞り込みはレンジと偏相関係数の値を考慮して行うが、決定係数 R^2 の値の増減程度が、アイテムの削減可否の目安となる。計 6 回の分析から最終的に「土被り」、「割れ目の状態」、「湧水」、「支保パターン」の 4 アイテムに絞り込んだ。この 4 アイテムでの分析結果を表-5 に示す。予測精度を示す決定係数 R^2 は 0.7611 と 11 アイテムの場合の値に比較して低減の程度が小さいことから、予測精度を確保できると考えられる。

表-4 解析結果(解析1)

アイテム	カテゴリースコア	レンジ	偏相関係数
A:切羽の状態	1 15.6790 2 -8.2521	23.9311	0.0658
B:素掘面の状態	1 2.9343 2 -5.1700	8.1043	0.0212
C:岩の強度	1 -8.0062 2 69.3875	77.3937	0.1610
D:風化変質	1 -4.7026 2 86.2151	90.9178	0.1411
E:割れ目の間隔	1 13.7385 2 -74.7987	88.5372	0.2372
F:割れ目の状態	1 80.3812 2 -131.5329	211.9141	0.5531
G:割れ目の形態	1 -57.5522 2 9.2084	66.7606	0.1820
H:湧水	1 81.9085 2 0.3032 3 -54.9378	136.8462	0.3573
I:水による劣化	1 6.4518 2 -68.3891	74.8409	0.1783
J:支保パターン	1 61.3267 2 30.3825 3 -91.5844	152.9111	0.3075
K:土被り	1 133.3914 2 -49.2784 3 -160.5295	293.9209	0.5566
定数項	a_0 223.4310		$R^2:0.7978$

表-5 解析結果(解析5)

アイテム	カテゴリースコア	レンジ	偏相関係数
F:割れ目の状態	1 48.3407 2 -79.1030	127.4437	0.4659
H:湧水	1 65.0593 2 17.3873 3 -62.4161	127.4754	0.4126
J:支保パターン	1 80.5607 2 0.9096 3 -63.9721	144.5328	0.3547
K:土被り	1 148.8365 2 -65.7432 3 -169.6235	318.4600	0.6988
定数項	a_0 223.4310		$R^2:0.7611$

5. 設計管理システムの信頼性検証

4 章において求めた予測式による地山弾性係数値（予測値）と、逆解析により算出した各断面の等価弾性係数値を各断面ごとに求めて比較した結果を図-3 に示す。地山弾性係数の大きい、すなわちピークは近似精度が良くない。しかし大きな変位を生じる小さな地山弾性係数を示す区間は、比較的精度が良いといえる。このことは、本方式により地山弾性係数を推定してトンネル変位や支保応力を算出することの実用的可能性を示唆している。

6. まとめ

本研究では、設計段階におけるトンネル最終変位量予測の精度確保が困難であることから、先行する区間においてトンネル掘削時の切羽観察から地山弾性係数を推定する方法を予め設定し、その後の区間において最終変位量や支保応力を推定する「トンネル切羽における設計管理システム」の開発を試みた。実用的精度の範囲では本システムの適用性はあるとの示唆は得られたが、今後の課題として、さらに多くのトンネルでの検証を行い、本システムの信頼性を確認することが必要である。

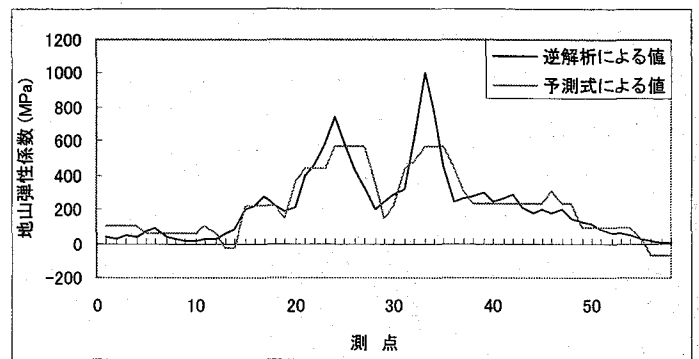


図-3 予測式による弾性係数と逆解析による等価弾性係数

【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, 第 337 号, (1983), pp.137~145
- 2) 瀬崎満弘, Omer AYDAN, 市川康明, 川本朧万: 岩盤データベースを用いた NATM 事前設計のための物性値, 土木学会論文報告集, 第 421 号, (1990), pp.125~133
- 3) 篠原郷志, 高崎英邦: FEM によるトンネル切羽周辺挙動に関する研究, 第 36 回日本大学生産工学部学術講演会土木部会講演概要, (2003), pp.147~150

The Trial of Development of Tunnel-support selection System at the Face by the Observational Procedure

By Satoshi SHINOHARA, Shinichiro TAZOH, Hidekuni TAKASAKI

This report aims to try development of tunnel-support selection system at the face by way of the observational procedure. That is to say, firstly, in the initial excavation part of the tunnel, the relationship between the equivalent elastic modulus of ground and ground conditions is defined by means of the statistical method. Then, in the following excavation part, after taking the elastic modulus of ground and observing ground conditions of the face, 2D-FEM model estimate deformation of tunnel and stress of supports, simultaneously.