

トンネル切羽における設計管理システム開発の試み

～数量化理論を用いた地山弾性係数の推定法～

日大生産工(院) 田蔵 慎一郎 日大生産工 高崎 英邦

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、変位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、また既掘削区間では、内空変位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、対策が後追的になって経済性・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研究では、最も汎用性の高い2次元FEM弾性解析手法を設計に適用する際に、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手法を開発する。具体的には、Bトンネルの地質・計測データを用いて逆解析により等価弾性係数を求める。そして多変量解析の一つである数量化理論 類を用いて、Bトンネルの切羽観察と地山弾性係数の関係性を分析する。得られた関係式をB、Mトンネルの地山弾性係数予測に適用することにより、切羽観察から地山弾性係数を推定する手

法の適用可能性を検討することを目的としている。

2. トンネルデータとFEM逆解析

2.1 トンネルデータ

解析に適用したB、Mトンネルの地質、断面諸元をまとめて表-1に示す。

表 - 1 トンネルデータ

Bトンネル断面諸元				
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)
D (砂岩・礫岩)	上半先進 ベンチカット	11.4	7.6	64.0
Mトンネル断面諸元				
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)
D (泥岩・砂質泥岩)	全断面	10.6	8.7	75.8

2.2 解析に用いたFEMプログラムおよび解析モデル化

本研究では、「ISNA - DBAP/FEM 逆解析・有限要素法解析プログラム」を用いて解析を行った。本プログラムは逆解析、すなわち変位計測データから地山の弾性係数および地山の初期応力を求めることができる¹⁾。

B トンネルの地山-トンネル系の解析対象領域は図-1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

Presumption of the Elastic Modulus of ground by using Statistical Method

Shinichiro TAZOH and Hidekuni TAKASAKI

ートを面要素、鋼製支保工を梁要素に置換した。表-2 は解析時に必要となる地山・支保材の入力定数を示したものである。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²⁾。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。

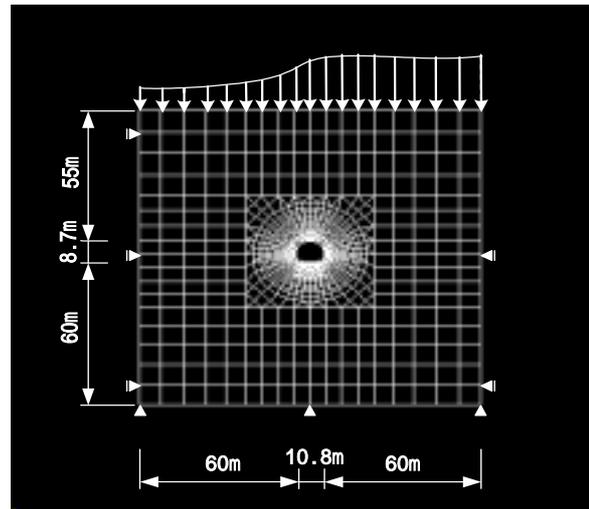


図 - 1 解析モデル化

2.3 解析結果

B トンネルの逆解析結果を図-2、M トンネルの逆解析結果を図-3 に示す。変位量の大きい B トンネルの等価弾性係数は全体的に小さく、全 58 断面中の 46 断面が 0~300Mpa 以内に集中している。また変位量の小さい M トンネルの等価弾性係数は B トンネルに比べて大きく、非常にばらつきのある結果となった。

表 - 2 入力定数

項目	入力値	
地山	単位体積重量	20 kN/m ³
	ポアソン比	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 ³ MPa
	ポアソン比 e	0.2
鋼製支保工	弾性係数 E _s	2.1 × 10 ⁵ MPa

3. 地山弾性係数と切羽観察の関係性

3.1 関係式を求める手順

前章で求めた等価弾性係数を用いて地山弾性係数と切羽観察との関係性を、多変量解析の一種である数量化理論 類により分析する。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。そして精度の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。B トンネルの分析に適用した説明変数を表-3 に示す。

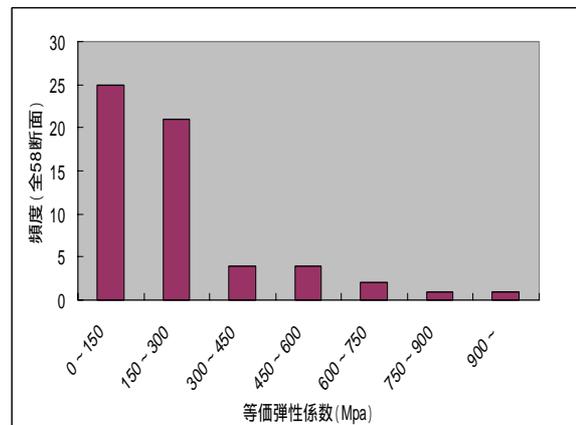


図 - 2 Bトンネルの逆解析結果

3.2 B トンネルの分析結果

1 回目の分析結果を表-4 に示す。分析結果を見ると、予測精度を示す重相関係数 R は 0.8875 と比較的良好な結果が得られた。しかし 11 アイテ

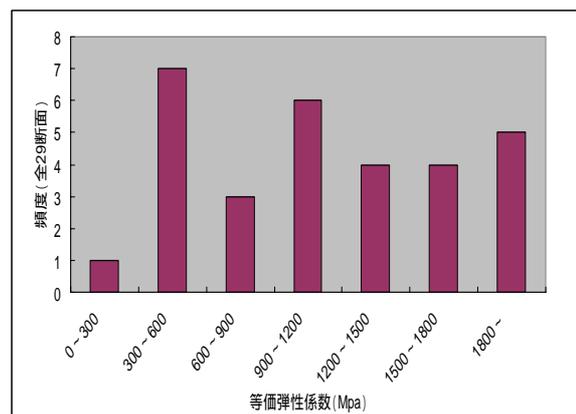


図 - 3 Mトンネルの逆解析結果

表 - 3 Bトンネルの分析に用いた説明変数のアイテム及びカテゴリ

アイテム	カテゴリ	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(フォールイック)	
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	・D	・D
K:土被り		・100m > h 50m	・50m > h 20m	・20m > h

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にはレンジと偏相関係数の値を考慮して行うが、重相関係数 R の値の増減程度が、アイテムの削減可否になる。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。予測精度を示す重相関係数 R は 0.8724 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。

3.3 Mトンネルの分析結果

Bトンネルの分析時に絞り込んだ「土被り」、「割れ目の状態」、「湧水」、「支保パターン」の 4 アイテムで M トンネルでの分析を行った。分析結果を表-6 に示す。予測精度を示す重相関係数 R は 0.6796 であり、精度は良くない。これは図-3 に示すように、M トンネルの等価弾性係数値にばらつきがあるため、相関性が導きにくいのが原因である。

4. 地山弾性係数推定法の実用性

3章において求めた予測式による地山弾性係

表 - 4 分析結果(第1回)

アイテム	カテゴリ	レンジ	偏相関係数
A:切羽の状態	1	15.6790	23.9311
	2	-8.2521	
B:素掘面の状態	1	2.9343	8.1043
	2	-5.1700	
C:岩の強度	1	-8.0062	77.3937
	2	69.3875	
D:風化変質	1	-4.7026	90.9178
	2	86.2151	
E:割れ目の間隔	1	13.7385	88.5372
	2	-74.7987	
F:割れ目の状態	1	80.3812	211.9141
	2	-131.5329	
G:割れ目の形態	1	-57.5522	66.7606
	2	9.2084	
H:湧水	1	81.9085	136.8462
	2	0.3032	
	3	-54.9378	
I:水による劣化	1	6.4518	74.8409
	2	-68.3891	
J:支保パターン	1	61.3267	152.9111
	2	30.3825	
	3	-91.5844	
K:土被り	1	133.3914	293.9209
	2	-49.2784	
	3	-160.5295	
定数項	a ₀	223.4310	R:0.8875

表 - 5 分析結果(第6回)

アイテム	カテゴリ	レンジ	偏相関係数
F:割れ目の状態	1	48.3407	127.4437
	2	-79.1030	
H:湧水	1	65.0593	127.4754
	2	17.3873	
	3	-62.4161	
J:支保パターン	1	80.5607	144.5328
	2	0.9096	
	3	-63.9721	
K:土被り	1	148.8365	318.4600
	2	-65.7432	
	3	-169.6235	
定数項	a ₀	223.4310	R:0.8724

表 - 6 分析結果(Mトンネル)

アイテム	カテゴリ	レンジ	偏相関係数
F:割れ目の状態	1	191.1027	369.4652
	2	-178.3625	
H:湧水	1	-23.2785	675.0773
	2	651.7987	
J:支保パターン	1	-87.2209	1538.3562
	2	1300.1345	
	3	-238.2217	
K:土被り	1	110.3505	320.0165
	2	-209.6660	
定数項	a ₀	1263.0348	R:0.6796

数（予測値）と、逆解析により算出した各断面の等価弾性係数を各断面ごとに比較した結果を図-4（Bトンネル）と図-5（Mトンネル）に示す。両トンネルとも弾性係数の大きい、すなわちピークは近似精度が良くない。これは両トンネルともピーク付近の弾性係数の大きな変化に対して、切羽観察記録のカテゴリーに変化がなく、何断面も同じ観察結果が得られることが原因である。つまり、特にMトンネルのような切羽が安定して変位量が小さいトンネルよりも、Bトンネルのような最終変位量予測が困難なトンネルのほうが、ばらつきのある切羽観察が得られることから、切羽観察から数量化理論を用いて地山弾性係数を予測する手法は有効であると考えられる。しかし両トンネルとも、大きな変位を生じる小さな地山弾性係数を示す区間では、比較的精度が良く、本推定法の実用的可能性を示唆している。

5. 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、切羽観察を用いた数量化理論 類の適用による地山弾性係数の予測手法開発を試みた。Bトンネルの分析により、「土被り」、「割れ目の状態」、「湧水」、「支保パターン」の4項目が地山弾性係数に大きく影響することが明らかになった。また、同アイテムを用いてMトンネルで分析を行った結果、大きな変位を生じる小さな地山弾性係数を示す区間では、比較的精度が良く、切羽観察における「割れ目の状態」、「湧水」の項目に「土被り」、「支保パターン」を加えて数量化理論 類の適用により地山弾性係数を推定する手法の適用性はあるとの示唆が得られた。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、地山弾性係数推定法の信頼性を確認することが必要である。

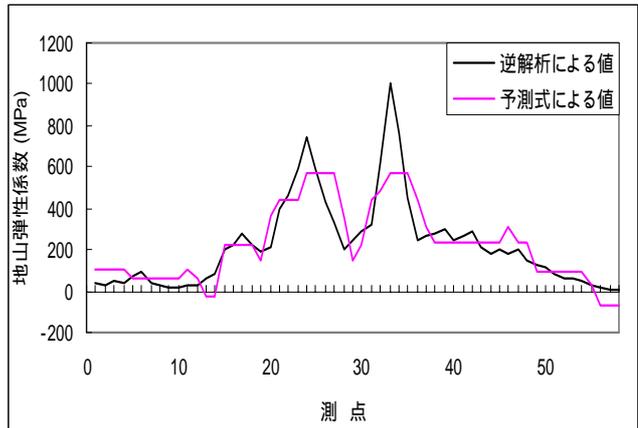


図-4 予測式による弾性係数と等価弾性係数(Bトンネル)

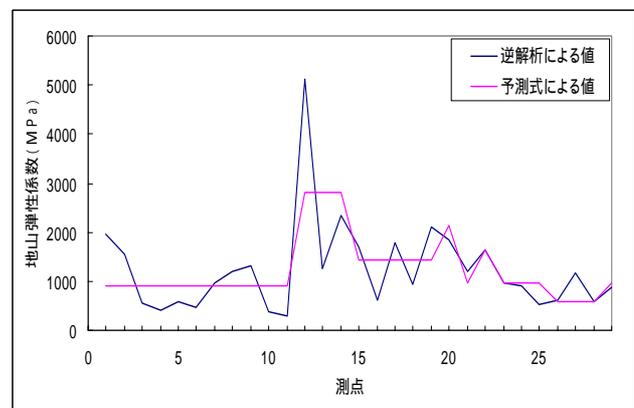


図-5 予測式による弾性係数と等価弾性係数(Mトンネル)

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) 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