

都市トンネル施工時の切羽安定性評価指標 TFI の提案

山口大学大学院理工学研究科 学生会員 ○佐々木 亨

山口大学大学院創成科学研究科 正会員 森本 真吾, 進士 正人

1. はじめに

山岳工法で都市トンネルを施工する際、トンネル切羽の安定性を確保することはきわめて重要であり、自立が困難となるような軟弱地山では補助工法を適宜実施する必要がある。特に、都市部の非常に軟弱な地盤や低土被り部に山岳工法でトンネルを構築する場合には適切な補助工法の選定がより重要な課題である。過去、トンネル切羽の安定性については数値解析を含めさまざまな検討がなされている。しかしながら、設計時において切羽安定性に関する定量的な指標は乏しく、切羽安定性の評価や切羽不安定時における補助工法の選定は設計者の総合的な判断にゆだねられているのが現状である。

本研究は山岳道路トンネルの標準支保パターンにおいて最も軟弱な地山に対応する地山等級 DII の物性値¹⁾を基準とし、切羽の安定性が問題となるような都市部軟弱地盤を粘着力 c と内部摩擦角 ϕ をさらに低下させることにより再現し、3次元トンネル掘削解析を行い、トンネル切羽に発生するせん断ひずみと限界せん断ひずみを比較することで土被り高さと地山物性値から切羽安定性評価 TFI を提案する。

使用した解析コードは Itasca 社製の FLAC-3D である。

この研究を行うことでトンネル設計時において土被りおよび粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、トンネル断面が既知であれば切羽の安定性を把握することができ、最適な設計につながるのではないかと考える。

2. 対象とした軟弱地山のモデル化と解析手順

2-1. 地山物性値の設定

既往研究²⁾を参考に、地山等級 DII の物性値¹⁾を基準として c と ϕ を低下させ、その組み合わせにより切羽の自立性が問題となるような軟弱地山を表現した。解析で用いた物性値を表-1 に示す。また、与条件から算出される各ケースの限界せん断ひずみ³⁾を表-2 に示す。

2-2. 解析モデル

地山は等方弾塑性体で Mohr-Coulomb の破壊基準

に従うものとした。本研究では土被りと切羽安定性の関係を考察するために 15m, 50m, 100m の 3 種類の土被りをモデル化して解析を行った。評価断面位置はモデル中央とし、境界条件はトンネル側方およびトンネル軸方向は拘束面からの影響を受けないように切羽面、側面からそれぞれ 4D 程度離すこととした。また、トンネル底面までの距離は掘削時の応力解放による盤膨れを考慮し、土被りと同じ深さとした。トンネル掘削断面は、二車線道路トンネルおよび三車線道路トンネルを想定した形状寸法とし、トンネル半径はそれぞれ 5.5m と 8.7m とした。解析断面図を図-1 に示す。また、今回はトンネルの対称性を考慮し半断面とした。支保工としては二車線の場合、DII パターンを想定し、鋼製支保工 H-150、吹付コンクリート $t=20\text{cm}$ とし、三車線の場合も DII パターンを想定した鋼製支保工 H-200、吹付コンクリート $t=25\text{cm}$ とした。支保工の入力物性値(表-1)はそれぞれの支保工の剛性を等価に置き換えた単位堆積重量と弾性係数とし、シェル要素を用いて表現した。

表-1 解析物性値

	単位体積重量 $\gamma (\text{kgf/m}^3)$	弾性係数	ポアソン比	粘着力	内部摩擦角
		$E (\text{MPa})$	μ	$c (\text{MPa})$	$\phi (^\circ)$
地山	2100	150	0.35	0.001~0.2	0~30
支保工	二車線	2509	8134	0.20	
	三車線	2539	9235	0.20	
インバート	2400	22000	0.20		

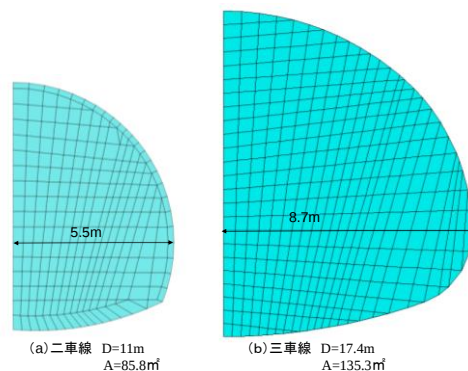


図-1 断面形状図

キーワード 切羽, 安定性, TFI, 限界せん断ひずみ, トンネル, 3次元数値解析,

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号 山口大学工学部 社会建設工学科

TEL 0836-85-9332

2-2. 解析手順

本解析では 4D（二車線：40m，三車線：65m）までを一括掘削し，直後から切羽手前 1m まで支保工とインバートを設置して解析を行った。

解析終了後，各ケースの切羽の最大せん断ひずみと表-2 に示す各ケースの限界せん断ひずみ³⁾を比較して安定性の評価を行った．発生ひずみが限界せん断ひずみ内となる許容土被り高さ⁴⁾を算出した。

表-2 各ケースの限界せん断ひずみ(%)

境界せん断ひずみ	c(MPa)						
	0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
φ (°)	30	5.671	7.323	8.144	9.458	12.214	17.128
	25	5.880	7.594	8.445	9.808	12.666	17.762
	20	6.089	7.864	8.745	10.156	13.116	18.392
	15	6.298	8.134	9.045	10.505	13.566	19.024
	10	6.510	8.407	9.348	10.857	14.021	19.662
	5	6.725	8.684	9.657	11.216	14.484	20.311
	0	6.945	8.969	9.973	11.583	14.959	20.977

3. 解析結果

二車線および三車線トンネル断面で得られた許容土被りの値⁴⁾を表-3 に示す．許容土被りは掘削断面が大きくなるにつれて小さくなっていることがわかる。

本論文では許容土被りを応用し，新たな安定性評価指標 TFI(Tunnel Face stability Index)の提案を行った。

TFI は式 (1) を用いて算出した。

$$TFI = \frac{H(m) \times D(m)}{A(m^2)} \quad (1)$$

ここで，H：許容土被り高さ(m) D：トンネル直径(m)
A：トンネル断面積(m²)

式 (1) から算出された粘着力を変化させた時の TFI を整理した結果を図-2 に示す。

この図から内部摩擦角 φ が 10° から 30° の範囲で 2 車線および 3 車線トンネルにおける切羽の安定性を，設計時に得られる情報のみで評価することができる．すなわち，もし検討するトンネルの物性と想定される土被り高さが図-2 に示す TFI よりも大きい場合，そのトンネル切羽は D II パターンで安定せず，何らかの補助工法を用いる必要があると判断できる．逆に TFI の値が領域よりも小さい場合，切羽は安定していると判断できる。

4. 結論

今回の研究により許容土被りを用いて断面の大きさを考慮した新たな切羽安定性の評価指標 TFI を提案した。

この TFI を用いることにより設計の段階で断面形状および物性値 (c, φ)，土被りが既知であれば軟弱地山

における切羽の安定性と補助工法の必要性を判断することができる．今後は，実際例にあてはめる有用性を検証していきたい。

表-3 各ケースの許容土被り

(a) 2 車線

		c(MPa)						
		(m)						
φ (°)	30	190	166	156	139	113	77	×
	25	165	139	124	109	85	50	×
	20	145	110	95	80	55	×	×
	15	115	80	65	60	35	×	×
	10	90	70	55	35	×	×	×
	5							

(b) 3 車線

		c(MPa)						
		(m)						
φ (°)	30	160	135	120	100	80	15	×
	25	135	105	95	80	50	×	×
	20	110	85	75	60	25	×	×
	15	90	60	50	40	8	×	×
	10	70	50	35	20	×	×	×
	5							

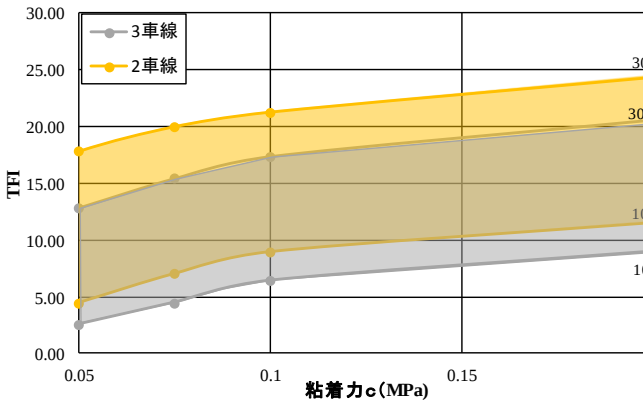


図-2 TFI 領域図

参考文献

1) 日本道路公団試験研究所：トンネル数値解析マニュアル 試験研究所技術資料，第358号，1998.10.10
2) 森本真吾，進士正人，中川浩二：地山特性の違いによるトンネル切羽挙動の把握，第 58 回土木学会年次学術講演会，III-037，pp. 73-74，2003.3.9
3) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No493/III-27，pp. 185-188，1994
4) 佐々木亨，森本真吾，進士正人：都市 NATM 設計時の切羽安定性評価手法の提案，第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 211-216，2016