

土被りの小さいトンネルにおける大型先受け工の 効果に関する評価手法

Evaluation method for effect of the Umbrella Method and Pre-Lining Method in the shallow-depth tunnel

伊藤 隆¹⁾・越智 修¹⁾・小山 昭²⁾・中川 信男³⁾・重田佳幸³⁾

Takashi ITOH, Osamu OCHI, Akira OYAMA, Nobuo NAKAGAWA and Yoshiyuki SHIGETA

Generally, the shallow-depth tunnel is constructed by an auxiliary method. It is thought that especially an Umbrella Method and Pre-Lining Method is effective in control of surface settlement, the improvement in face stability.

Evaluating surface settlement control effect quantitative on Umbrella Method and Pre-Lining is presented. Considering simulation related with measurement value on surface settlement, a new design method of Umbrella Method and Pre-Lining Method is proposed. Simulation is calculated by 2-dimensional finite element method.

Key Words: shallow depth, Umbrella Method, Pre-Lining Method, design, finite elements method

1. はじめに

地山にアーチアクションが働かないような、土被りの小さい土砂地山に山岳工法でトンネルを構築する際、一般的には何らかの補助工法を用いて施工されている。特に、大型先受け工は、地表面の沈下抑止や切羽の安定性の向上などに有効と考えられているが、その効果を定量的に評価する手法は確立されていない。

大型先受け工の設計では、①地表面沈下抑止効果、②切羽の安定性、③構造耐力について検討する必要があると考えられる。これらのうち、大型先受け工の地表面沈下抑止効果については二次元有限要素法による数値解析手法を用いて検討した例は多くあるが、統一的な評価手法が確立されるまでには至っていない。

本報告では、大型先受け工の設計をする上で検討すべき項目のうち地表面沈下抑止効果を定量的に評価する手法として二次元有限要素法を用いて、実際に大型先受け工が施工されたトンネルで計測値と解析値の比較を行い、設計方法について1つの手法を提案するものである。

2. 地表面沈下抑止効果の検討上の問題点

地表面沈下抑止効果の検討を行う場合、トンネル及びトンネル周辺地山について評価する必要があるため、有限要素法による数値解析が有効と考えられる。また、大型先受け工の効果は三次元的であり、理想的には三次元有限要素法による解析が望ましいが、入力値の増加と精度、物性値、計算コスト、計算時間等の問題で二次元有限

1)正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室

2)日本鉄道建設公団 設計技術室

3)正会員 (株)ダイヤコンサルタント 関東支社東京支店

要素法による非線形解析が一般的に実施されている。

二次元有限要素法で解析を実施する際の留意点としては、応力解放率や地山の変形係数、解析領域の設定、初期地圧、大型先受け工の物性値など多くの要因が解析結果に影響を与えると考えられるが、その中でも特に重要なパラメータは、トンネル掘削による三次元的な挙動を擬似的に表現する応力解放率と地山の変形係数である。

切羽到達時の応力解放率は、三次元解析や実際の計測結果により 30～40%の値を用いている場合が一般的であるが、地山のアーチアクションが働かないような土被りの小さい地山でこの値をそのまま適用することには問題がある。また、地山の変形係数の設定には、孔内水平載荷試験や室内試験により得られた物性値を用いられているが、これらの値は点におけるデータであるため、トンネル全体またはトンネル周辺地山全体の物性が表現されているとは限らない。

ここでは、切羽到達時の応力解放率、地山の変形係数に着目した逆解析を行うことで、事前設計における地表面沈下の効果を評価するための 1 手法を提案するものである。

3. 検討方法

切羽到達時の応力解放率、地山の変形係数を検討するため、土被りの小さいトンネルに対して、大型先受け工として AGF 工法と PASS 工法を実施したトンネルと、大型先受け工を実施していないトンネルを対象に逆解析を実施した。

図-1 に逆解析手法の流れを示す。逆解析は、二次元非線形解析（電中研方式）とし、以下に示す手順にしたがってパラメータスタディーを実施した。

図中の①では、天端沈下量と内空変位の比率（内空変位比率 λ ）の解析値と計測値が一致するときの側圧係数 K_0 を同定した。

図中の②では、地表面沈下量と天端沈下量の比率（沈下比率）の解析値と計測値が一致するときの切羽到達時の応力解放率 α を同定した。

図中の③では、天端沈下量および内空変位の解析値と計測値が一致するときの初期変形係数を同定した。

この逆解析手法を用い、大型先受け工が施工されたトンネルと、大型先受け工が施工されていないトンネルについて、応力解放率と変形係数を検討することで、事前設計におけるこれらの有効な設定方法について提案する。なお、逆解析に用いた初期入力物性値の

うち変形係数は、孔内水平載荷試験および室内試験の結果より設定した。大型先受け工は、改良ゾーンを弾性体面要素としてモデル化し、弾性係数を AGF 工法については地山の 10 倍、PASS 工法については試験結果に基

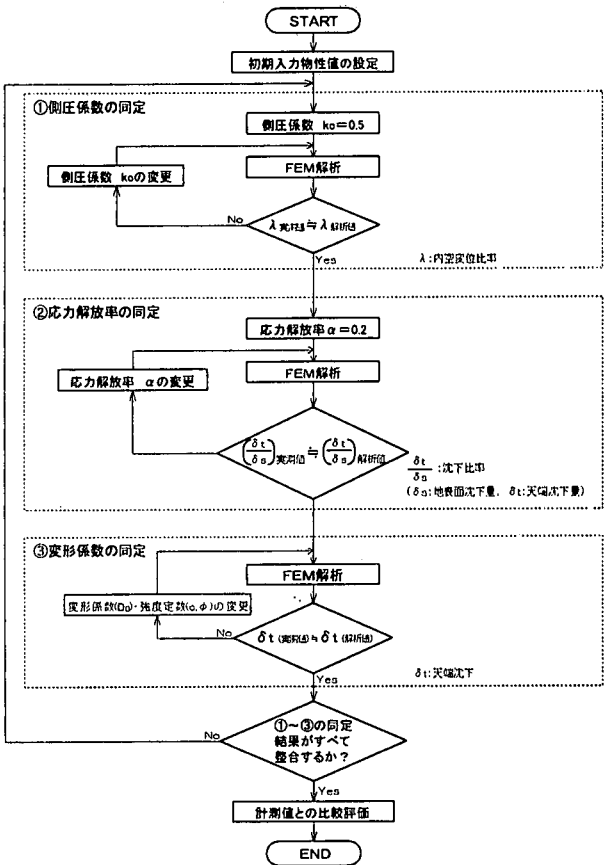


図-1 逆解析の流れ

づき設定した。また、解析領域、支保工の物性値等については、NA TM設計施工指針¹⁾を参考として設定した。

4. 実測データによる逆解析

(1) 対象トンネルの概要

解析を行ったトンネルは、鉄道複線断面で土被り10m未満の大型先受け工を実施した2トンネル(AGF工法、PASS工法各1トンネル)と、大型先受け工を実施していない1トンネルである。表-1にトンネルの概要と計測値を示す。

表-1 トンネルの諸元と計測値

解析ケース (トンネル名)	CASE 1 (新倶利伽羅トンネル)			CASE 2 (勝田台トンネル)			CASE 3 (神戸トンネル)		
解析断面(キロ程)	北陸新幹線 (6km351m)			東葉高速線 (15km990m)			北陸新幹線 (12km165m)		
周辺地山	塊状シルト岩			ローム、凝灰質粘土			ローム、凝灰質粘土		
土被り厚(m)	8.2m			6.8m			8.5m		
大型先受け工	AGF工法			PASS工法			先受け工なし		
先受け長(m)	12.5m			4.0m			-		
施工段階	切羽到達時	上半収束時	下半収束時	切羽到達時	上半収束時	下半収束時	切羽到達時	上半収束時	下半収束時
地表面沈下量(mm)	30.8	138.6	170.6	15.0	25.0	34.0	10.0	11.0	23.0
天端沈下量(mm)	-	90.6	116.8	-	-	26.0	-	11.0	18.0
内空変位量(mm)	-	9.0	5.0	-	-	-4.0	-	-5.8	-6.9

注) 地表面沈下量 + : 沈下, - : 隆起
天端沈下量 + : 沈下, - : 隆起
内空変位量 + : 拡大, - : 縮小

(2) 逆解析結果

表-2、表-3に同定した物性値と解析結果を示す。また、図-2～図-4に地表面沈下量と天端沈下量の切羽進行に伴う変化の比較図を示す。

表-2 地山物性値および応力解放率の同定結果

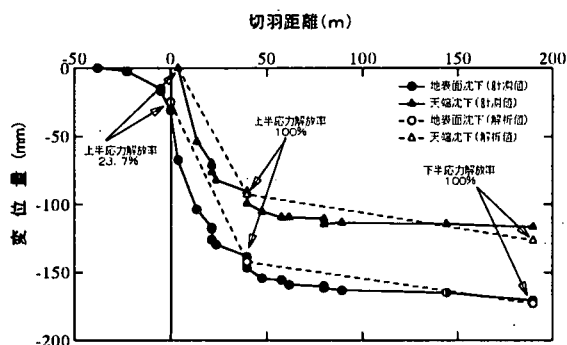
トンネル名		CASE1 (新倶利伽羅トンネル)							CASE2 (勝田台トンネル)							CASE3 (神戸トンネル)														
解析断面 (キロ程)		北陸新幹線 (6km351m)							東葉高速線 (15km990m)							北陸新幹線 (12km165m)														
土被り厚 (m)		8.2m							6.8m							8.5m														
大型先受け工		AGF工法							PASS工法							先受け工なし														
項 目		地質	層厚	γ_t	D_0	ν_0	C	ϕ	地質	層厚	γ_t	D_0	ν_0	C	ϕ	地質	層厚	γ_t	D_0	ν_0	C	ϕ								
地層構成	10m	強風化 シルト岩	9.3	16.5	9300	0.35	47	15	ローム	4.8	14	12480	0.4	2.4	22	ローム	7.5	17	2600	1.8	7	24.4								
	20m		風化 シルト岩	13.7	18	31000	0.35	73	15	凝灰質 粘土 (Ds1)	2	16	7200	0.4	0	18	凝灰 角礫岩1	6.2	22	26000	8.2	316	42.9							
										砂質土 (Ds1)	2.2	19	23520	0.35	2.9	37								凝灰質 粘土 (Ds2)	2.5	14	12240	0.4	7	32
										砂質土 (Ds2)	23.5	19	52800	0.35	1.9	35														
	30m	シルト岩	11	18.5	1000000	0.3	860	20									凝灰 角礫岩2	12.2	22	109200	8.2	316	42.3							
38m																	凝灰 角礫岩3	7	22	195000	8.2	316	42.3							
側圧係数 K_0		0.27							0.42							0.58														
切羽到達時の 応力解放率		23.7							17.3							8.0														
先受け工弾性係数		93000							5000000							—														

注) 層厚: (m), γ_t : 単位体積重量(kN/m³), D_0 : 初期変形係数(kN/m²), ν_0 : 初期ポアソン比, C: 粘着力(kN/m²), ϕ : 内部摩擦角(deg), 応力解放率: (%), 先受け工の弾性係数: (kN/m²)

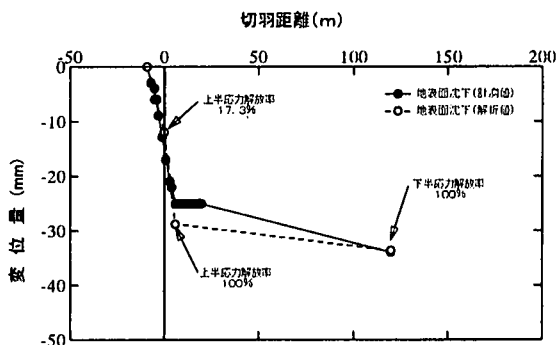
表－３ 主要施工段階の変位量比較一覧表

解析ケース	施工段階	CASE1 (AGF工法)			CASE2(PASS工法)			CASE3 (先受けなし)		
		切羽到達時	上半収束時	下半収束時	切羽到達時	上半収束時	下半収束時	切羽到達時	上半収束時	下半収束時
地表面沈下量 (mm)	計測値	30.8	138.5	170.6	15.0	25.0	34.0	10.0	11.0	23.0
	解析値	24.8	142.4	173.2	12.0	28.8	33.7	12.6	21.0	22.4
天端沈下量 (mm)	計測値	-	90.6	116.8	-	-	26.0	-	11.0	18.0
	解析値	-	92.7	126.6	-	21.5	26.0	-	14.5	16.4
内空変位量 (mm)	計測値	-	9.0	5.0	-	-	-4.0	-	-5.8	-6.9
	解析値	-	15.8	2.4	-	8.7	-3.8	-	7.4	-6.6

注) 地表面沈下量 +: 沈下, - : 隆起
 天端沈下量 +: 沈下, - : 隆起
 内空変位量 +: 拡大, - : 縮小



図－２ 切羽距離と変位量
(CASE 1 : AGF工法)



図－３ 切羽距離と変位量
(CASE 2 : PASS工法)

逆解析の結果を以下にまとめる。

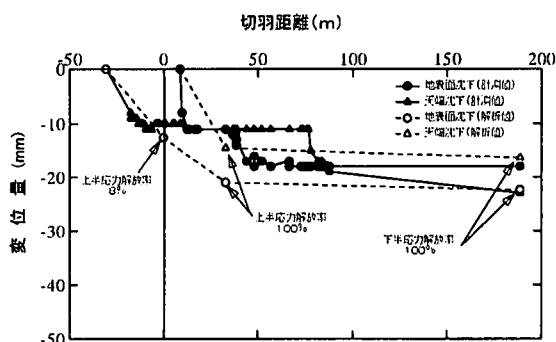
①切羽到達時の応力解放率は、CASE 1 (AGF工法) で 23.7%, CASE 2 (PASS工法) で 17.3%, CASE 3 (大型先受けなし) で 8% となった。

②変形係数は、事前に調査結果に基づき設定したものと比較すると、CASE 1 (AGF工法) で 1.3 倍, CASE 2 (PASS工法) で 2.4 倍, CASE 3 (先受けなし) で 0.3 倍とバラツキの大きい結果となった。これは、初期の変形係数の設定方法が、同一項目の試験結果から得られたものではないために生じた差であると考える。

③CASE 1 (AGF工法) の地表面沈下および天端沈下は、各施工段階の計測値と解析値で一致する傾向となった。しかし、内空変位の変位発生傾向は合っているものの解析値が計測値の約半分の値となった。

④CASE 2 (PASS工法) の地表面沈下は、各施工段階で一致した。また、天端沈下および内空変位についても、収束値で一致している。

⑤CASE 3 (先受けなし) の地表面沈下、天端沈下および内空変位は、収束値で一致しているが、上半収束段階では、解析値が計測値に比べ地表面沈下量で 2 倍程度、天端沈下量で 1.5 倍程度となった。



図－４ 切羽距離と変位量
(CASE 3 : 先受けなし)

(3) 切羽到達時の応力解放率

逆解析の結果より、事前設計に用いる応力解放率について検討を行った。図-5に切羽到達時の応力解放率と地表面沈下量の変位比率の関係を示す。ここで、変位比率は、切羽到達時の地表面沈下量と収束時の地表面沈下量の比率を示している。

図-5より切羽到達時の応力解放率と地表面沈下量の変位比率について以下のように考察する。

①大型先受け工が実施されていないトンネルについては、切羽到達時の応力解放率は10%程度であり、そのときの変位比率は60%程度となる。また、切羽到達後に支保工と地山が複合して受け持つ応力解放率は90%程度、切羽到達後の変位比率は40%程度となる。

②大型先受け工を実施しているトンネルについては、切羽到達時の応力解放率は20%程度と大型先受け工を実施していない場合より大きくなるが、逆にそのときの変位比率は15~40%程度と小さくなる。また、切羽到達後に支保工と地山が複合して受け持つ応力解放率は80%程度に減少し、切羽到達後の変位比率は60~85%程度に増加する。これは、大型先受け工により掘削前に地山が改良されるためと考えられる。

③PASS工法に比べAGF工法の方が切羽到達時の応力解放率は10%程度増加する。また、そのときの変位比率は20%程度減少する。これは、大型先受け工の先受け長の違いにより地山の改良効果が異なるためと考えられる。

これらより、アーチアクションが期待できない土被りの小さいトンネルにおける事前解析に用いる切羽到達時の応力解放率は、大型先受け工を実施しない場合には、10%程度を、大型先受け工を実施する場合には、地山への改良効果を考慮に入れて15~25%を用いることで評価できるものと考えられる。

5. 地表面沈下抑止効果の検証

これらの結果から、大型先受け工が実施された断面において大型先受け工がない場合の解析を実施した。

解析した断面は、PASS工法を実施した勝田台トンネルである。入力物性値は、逆解析により得られた結果を採用した。図-6に各施工段階における地表面沈下量の比較を示す。

その結果、切羽到達時の地表面沈下量は、大型先受け工施工時で12mm、先受け工がない場合で14.4mmとなり、収束時には、大型先受け工施工時で33.7mm、先受け工がない場合で36.6mmとなった。これらより、大型先受け工(PASS工法)の地表面抑止効果は、切羽到達時で20%程度、収束時で10%程度であると評価できる。

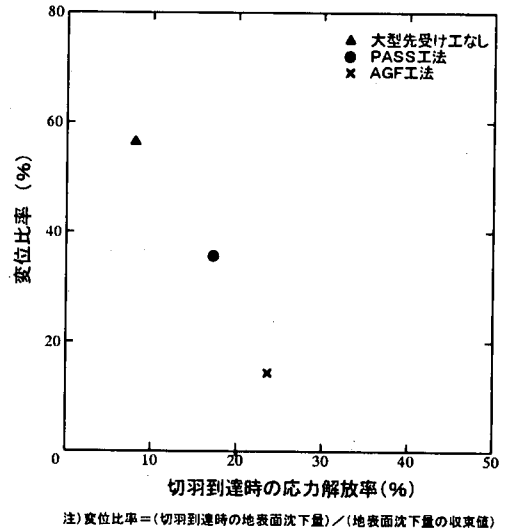
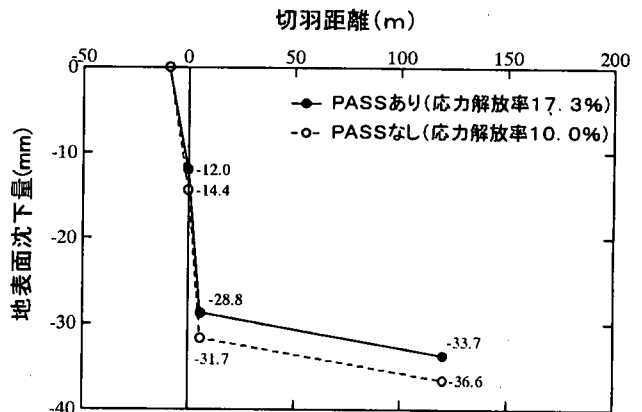


図-5 応力解放率と変位比率



6. まとめ

大型先受け工の地表面沈下量の抑止効果と事前設計における地表面沈下量の予測手法について以下の検討を行った。

- ①地表面沈下量と天端沈下量、内空変位量の計測値を再現するための逆解析手法を検討した。
 - ②大型先受け工が施工されたトンネルにおいて、大型先受け工を施工しない場合のシミュレーション解析により、大型先受け工の地表面抑止効果の検証をおこなった。
- 今回の検討で得られた知見は、以下のとおりである。
- ①大型先受け工（PASS工法）の地表面沈下抑止効果として切羽到達時では20%程度、収束時では10%程度の効果が解析上得られた。
 - ②本報告で対象としたような土被り10m以下と小さい山岳トンネルにおいて、二次元有限要素法を用いて大型先受け工の地表面沈下を把握する場合には、切羽到達時の応力解放率は、大型先受け工を施工しない場合で10%程度、大型先受け工を施工した場合で15～25%とすることで地表面沈下を予測することができる。

7. おわりに

大型先受け工の事前設計における地表面沈下量の予測手法のうち応力解放率について一つの提案をしたが、対象としたトンネルが3トンネルであり、今後は、本手法での逆解析による事例を増やすとともに、地山の変形係数および大型先受け工の入力物性値の設定方法、解析領域の設定方法をさらに検討する必要があると考える。また、大型先受け工の効果について模型実験および三次元解析等によりさらに検討していく必要があると考える。

参考文献

- 1) NATM設計施工指針，平成8年2月，日本鉄道建設公団
- 2) プレイニング工法設計指針（案），平成8年12月，（社）日本鉄道技術協会