

(17) 高圧噴射攪拌改良先受け工法による変位抑制効果

日本道路公団試験研究所
(株) 富士総合研究所

正会員 多賀直大 磯野龍昭 ○佐藤淳
正会員 伊東淳 樽井稔

"THE EFFECT OF THE UMBRELLA METHOD DURING TUNNEL EXCAVATION"

Naoharu TAGA, Tatuaki ISONO, Jun SATO, Japan Highway Public Co.
Jun ITO, Minoru TARUI, Fuji Research Institute

The authors numerically investigated the behaviors of tunnels during the excavation by The RJFP (Rodin Jet Fore Pile) method. In General, the behaviors of tunnels during the excavation have been analyzed by two-dimensional finite element method. However, the stresses and the deformation in the longitudinal direction should be analyzed by three-dimensional model. Furthermore, in the case of the umbrella method the three dimensional analysis is definitely essential to examine the behavior of the tunnels and the safety of the excavation.

The authors conducted three-dimensional analysis of the tunnel behavior during the construction of Shoryou Tunnel of Tomei Highway, where the umbrella method was applied, and examined the effectiveness of the numerical method by comparing the numerical results with the observed ones.

From the analysis, it was shown that the umbrella method is useful to design a large tunnels, because a comparative study of the analysis resulted measurement data agreed in quantitative.

1. はじめに

近年、ヨーロッパのトンネル工事では、地質条件の悪い箇所や特殊条件箇所で大規模先受け工を用いて周辺地山を補強し、掘削断面を極力大きくすることにより大型機械を使用する工法が主流となってきている。また、日本国内においてもロディンジェットフォアパイリング工法に代表される高圧噴射攪拌工法が施工実績を増やしつつあり、日本道路公団でも東名高速道路改築工事の所領第一トンネルでこの工法を採用し良好な施工実績を得ている。

しかし、この工法はトンネル切羽前方地山での応力解放や変位の抑制に効果を発揮すると思われるが、先受け工の力学的挙動やそのメカニズムは十分に解明されているとは言い難い。

そこで、本研究では高圧噴射攪拌工法等の先受け効果について、数値解析手法による検討を行った。数値解析手法としては、トンネルおよび切羽前方の地山挙動等を評価する必要があるため、3次元有限要素法解析を用いた。なお、先受け工の解析手法、解析結果評価方法等は未だ確立されていないため、計測結果と解析結果を比較することにより解析手法の妥当性も合わせて検証を行った。

2. 東名高速道路改築工事所領第一トンネルの概要

所領第一トンネルは東名高速道路改築工事、大井松田～御殿場間の静岡県小山町内、足柄山地の北西部に位置し、西側には下流で酒匂川となる鮎沢川が流れ、北に丹沢山地、北西に富士火山、南東に箱根火山が位置している。土被りは最大で約16m、掘削断面は三車線の三心円断面、断面積は約130m²である。

また、当該地区の地質は未固結な火山性の砂質土や砂レキあるいはスコリア、ロームより構成されている。トンネル部の地質は、スコリア質ロームを主体としたものでトンネル底盤部に白旗ローム層、切羽全面には密に締まった古富士ローム層、その上部に未固結の古富士ローム層が約5m、その上部より地表まで約5mが未固結のローム、スコリアの互層となっている。

3. 解析手法

3. 1 解析モデル

高圧噴射攪拌工法による変位抑制効果を確認するために、3次元弾性非線形逐次掘削解析を実施した。本研究ではまず図-3.1に示すモデル(テストモデル)を用いて高圧噴射攪拌工法の力学的挙動を検討し、次に図-3.2に示す所領第一トンネルのモデルを用いて計測値との比較検討を行った。

テストケースの解析モデルは半断面でモデル化し、トンネル掘削径を8m、土被りを8m(=1D:Dはトンネル掘削径)として、解析に用いる地山物性値は表-3.1の単一地盤とした。高圧噴射攪拌工法の打設範囲角度は、アーチ部180°区間である。

所領第一トンネルにおける解析は、解析値と比較するため計測データが揃っている断面を選定した。解析モデルは、トンネル掘削径を16m、土被りを10.5m(≒0.6D)とし、実地形を考慮した3地層からなる全断面モデルとした。また、地山物性値は地質調査の試験結果等を参考に表-3.2に示すように定めた。高圧噴射攪拌工法の打設範囲角度は、施工に合わせてアーチ部120°区間である。

吹付コンクリートと鋼アーチ支保工は、それぞれシェル要素、ビーム要素でモデル化した。表-3.3に構造物性値を示す。

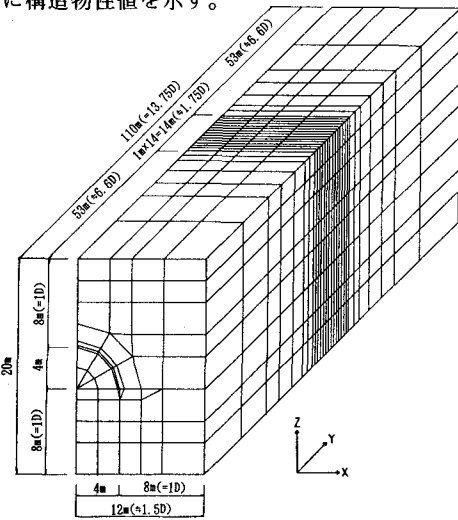


図-3.1 解析モデル(テストモデル)

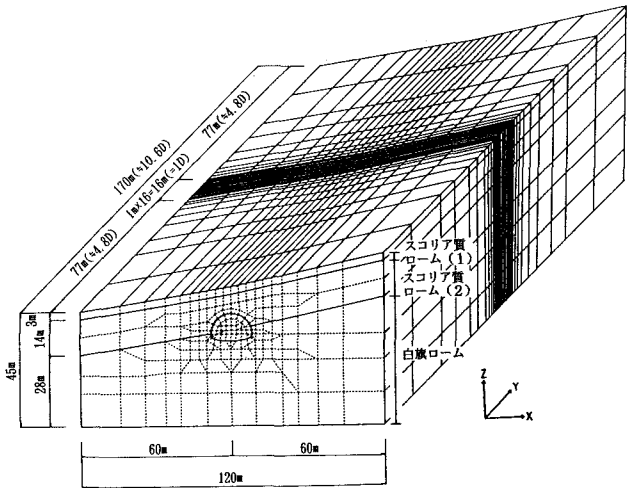


図-3.2 解析モデル(所領第一トンネル)

表-3.1 地山物性値一覧表

	単位体積重量 γ (t/m^3)	変形係数 E (kgf/cm^2)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kgf/cm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)
スコリア質 ローム(1)	1.42	160	0.40	0.2	10

表-3.3 構造物性値一覧表

支保部材	仕様	解析モデル	弾性係数 E (kgf/cm^2)	断面積 A (cm^2)	断面2次 I (cm^4)
吹付コンクリート	t=25cm	シェル要素	4.0×10^4	2500.	
鋼アーチ支保工	H-250	ビーム要素	2.1×10^6	63.53	4720.
RJFP	t=40cm	ソリッド要素	6.8×10^3	4000.	

表-3.2 地山物性値一覧表

	単位体積重量 γ (t/m^3)	変形係数 E (kgf/cm^2)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kgf/cm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)
スコリア質 ローム(1)	1.42	160	0.40	0.2	10
スコリア質 ローム(2)	1.62	380	0.40	0.4	10
白旗 ローム	2.0	1400	0.35	1.5	40

3. 2 解析ステップ

所領第一トンネルの解析は表-3.4に示すステップで行った。先ず高噴射攪拌工法の打設範囲の物性値をR J F Pの物性値に変更する。次に1間(1 m)掘削し、1間遅れで支保を建て込む。これらを繰り返し、1間掘削毎の増分変位、増分応力を求め、これを1掘進長ずつずらしながら重ね合わせて最終状態を求めた。なお、テストモデルの解析も同様のステップである。

4. 解析結果

4. 1 力学的挙動の検討解析

テストモデルの解析は先受け長の違いによる変位抑制効果を解析上みることを目的に行った。先受け長は、1、2、3、6、9 mおよび設置しないケースとした。弾性線形の解析では、先受け工による変位抑制効果はみられたが先受け長の違いによる変位抑制効果の差は顕著に現れなかった。また、地山を非線形材料として取り扱った解析では、先受け長の違いによる変位抑制効果の差がみられた。

図-4.1は、天端における切羽進行をパラメータとした沈下量の特性曲線である。縦軸は沈下量を表し、横軸は切羽位置を示す。Dはトンネル直径(=8 m)を示し、正(+)は切羽後方、負(-)は切羽前方を示す。先受け工による変位抑制は、切羽前方から現れ、切羽面では先受け工無しの場合の約30%強の変位抑制、収束値では約30%弱の変位抑制がみられた。先受け長の違いによる変化は、長くなるほどその効果は大きい。このことから、この解析条件では、先受け長は、トンネル掘削高さ(=4 m)の1.5倍以上あれば変位抑制効果は、ほぼ同様に約30%の抑制となる。

表-3.4 解析ステップ

STAGE		備 考
1		初期応力の設定
2	91 90 89 88 87 86 85 84 83 82 81 80 79 78	奥行き91mまで先受け工打設 奥行き79mまで掘削 奥行き78mまで支保工追加 《先受け長12m》
3		79~80mまで掘削 (1間(=1m)掘削) 78~79mまで支保工追加 (支保工1基追加) 《先受け長11m》
10		1間(=1m)掘削し、 支保工1基追加を繰り返す 87~88mまで掘削 (1間(=1m)掘削) 86~87mまで支保工追加 (支保工1基追加) 《先受け長3m》

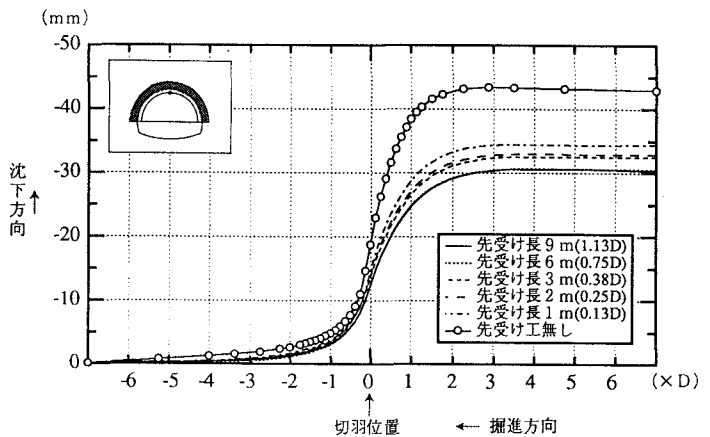


図-4.1 変位特性曲線(天端沈下)

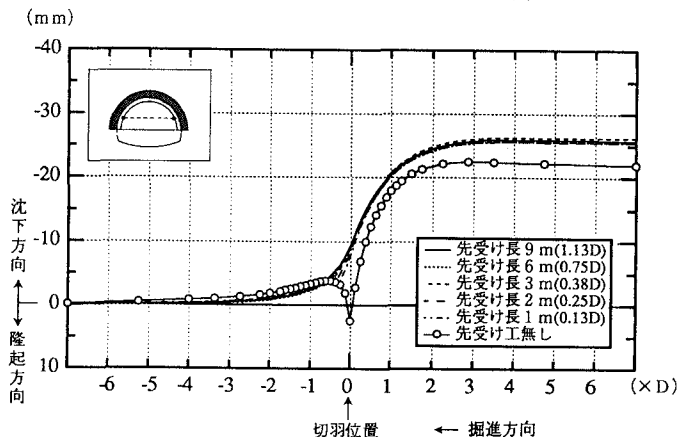


図-4.2 変位特性曲線(水平内空変位)

図-4.2に上半脚部における鉛直変位の変位特性曲線を示す。上半脚部における沈下量は、先受け工の長さには依存せず一様の変位傾向がみられる。これは、先受け工によりアーチが剛構造になることから、クラウン部の沈下を弾性的に脚部に伝達するため、脚部沈下が先受け工無しのケースに比べ卓越する結果となっている。

このことから、未固結な土砂地山で先受け工法を採用する場合、脚部におけるサイドパイルやフットパイル等で脚部沈下を抑制すれば、先受け工による変位抑制効果はさらに期待できるものになると思われる。

4.2 所領第一トンネルにおける解析

図-4.3は、所領第一トンネルモデルの天端沈下の解析結果（先受け工有り無し）を変位特性曲線に示した。図中の実線は、先受け工有りのケースで、破線は、先受け工無しのケースである。先受け工による切羽前方の変位抑制効果は、テストモデルのアーチ部 180° 打設ケースに比べて若干小さいが、切羽前後の変位勾配は緩やかになっており、先受け工設置による変位抑制は、切羽面および収束値で約20%となった。

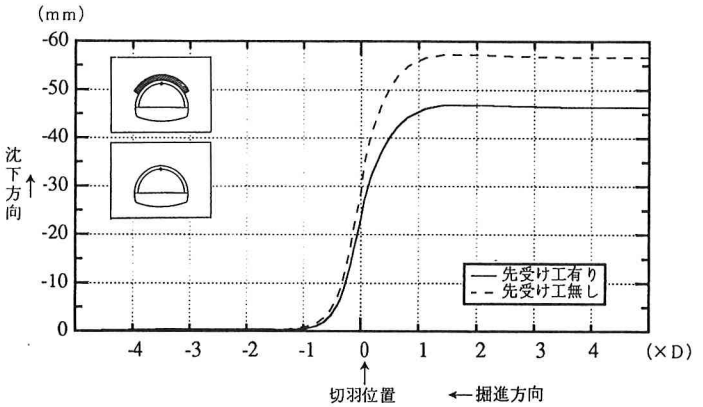


図-4.3 変位特性曲線(天端沈下)

図-4.4は、側壁(SL+1m up)の水平内空の変位特性曲線である。トンネル掘削による変位挙動の傾向は、支保設置直前まではコンバージェンス（縮小）方向に変位し、支保設置以降はダイバージェンス（拡大）方向に変位する。この変位挙動は偏平大断面（縦横比=0.65）の特徴であり、東名改築工事の他の3車線トンネルでも同様の傾向が計測により確認されている。先受け工による側壁内空変位の拘束は大きく約80%の変位抑制効果を発揮する。先受け工によるこれらの変位抑制効果は、土被りや地山強度比によっても異なると思われるが、本工法は、解析結果からも切羽の安定向上や変位抑制には有効な手段であるといえる。

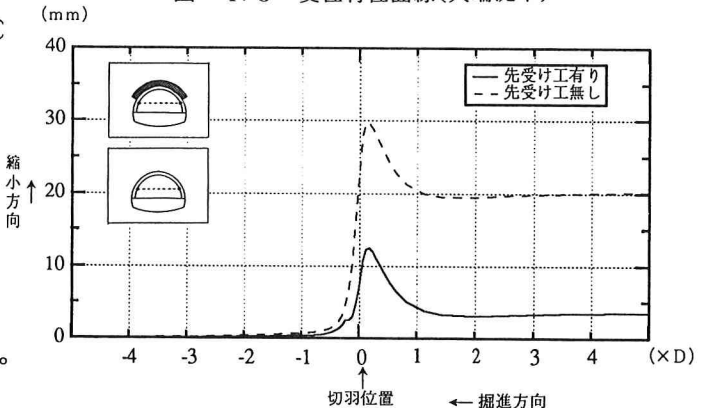


図-4.4 変位特性曲線(水平内空変位)

図-4.5は、先受け工（パイル）の変形状を表した図である。先受け工（パイル）の変形は、切羽前方では殆ど変形せず、切羽位置で屈曲点となり、切羽後方1.5D程度で収束する。

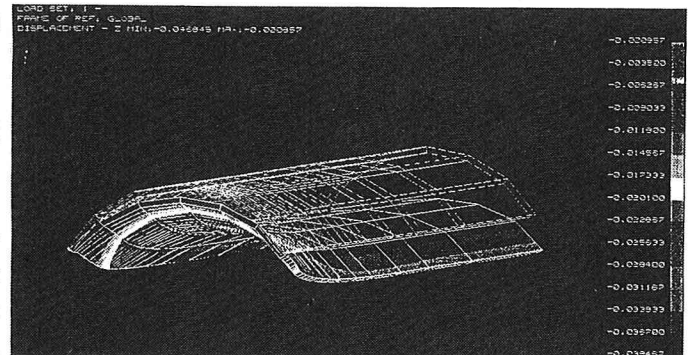


図-4.5 鉛直変位(先受け工パイル)

図4.6は、解析値および計測値の天端沈下を比較したグラフである。図中の数値は、解析値を計測開始時期に合わせてプロットしたものである。解析値の変位傾向は計測値を良く再現している。

図4.7は、解析値および計測値の側壁（SL+1m up）の水平内空変位を比較したグラフである。図中の数値は、解析値を計測開始時期に合わせてプロットしたものである。天端沈下と同様に解析値の変位傾向は計測値を良く再現している。

5. まとめ

本解析手法は、実現象（計測値）をよく再現でき、高圧噴射攪拌工法（先受け工）の設計を行ううえで十分有効な手段であることが確認できた。また、力学機構の解明により以下に示す今後の同工法および大断面トンネルの設計に有用な情報を得た。

- ・トンネル掘削により切羽前方地山が塑性化しないような条件（弾性線形）

では、先受け工による変位抑制効果はその長さに依存しない（ただし、 $0.1D$ 程度は必要と考えられる）。トンネル掘削により切羽前方地山が塑性化（ゆるむ）するような条件（弾性非線形）では、先受け工による変位抑制効果はその長さにより多少変化する。ただし、先受け工が掘削高さ（トンネル半径）の 1.5 倍以上あればその長さに依存しない。

- ・実施工における先受け工は最小有効長を考慮して設計すべきものであるが、上記より先受け長が $0.1 \sim 0.2D$ 前後あれば現実的な効果は期待できると考えられる。

- ・高圧噴射攪拌工法（先受け工）による変位抑制は、天端で $20 \sim 30\%$ 、側壁水平内空変位で $50 \sim 70\%$ 程度である。

- ・脚部沈下を抑制するような工法を取れば、先受け工の変位抑制効果はさらに増大する。

6. 今後の課題

本論文は「変位」に着目して先受け工の力学的挙動の解明を試みたが、地山応力、先受け工応力、支保応力等の応力面からも解明して行く必要がある。また、今後は地質条件や土被りとの関係についても考慮し、先受け工による変位抑制効果の力学的機構を更に研究して行く所存である。

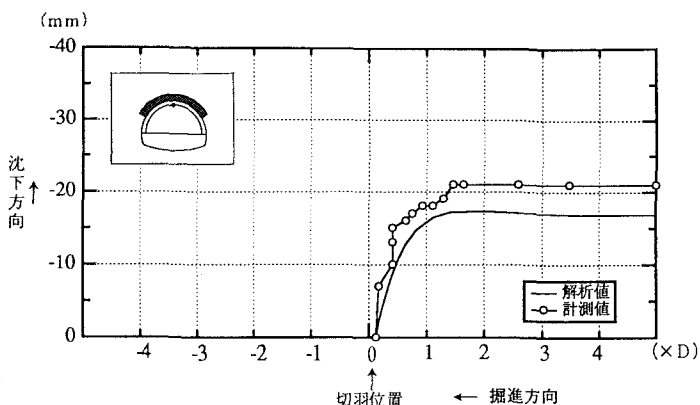


図-4.6 変位特性曲線(天端沈下)

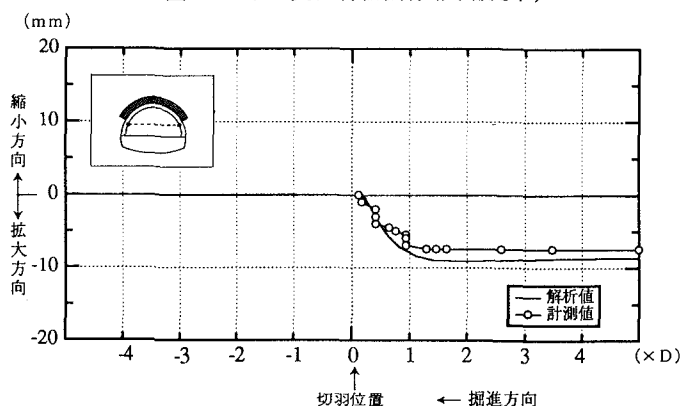


図-4.7 変位特性曲線(水平内空変位)