

アンブレラ工法における切羽進行に伴う地山応力変化 THE EFFECT OF THE UMBRELLA METHOD DURING TUNNEL EXCAVATION

中田雅博*・佐野信夫*・佐藤 淳*・伊東 淳**・樽井 稔**
Masahiro Nakada, Nobuo Sano, Jun Sato, Jun Ito, Minoru Tarui

The authors numerically investigated the behaviors of tunnels during the excavation by the umbrella (RJFP; Rodin Jet Fore Pile) method. The stresses and the deformation in the longitudinal direction should be analyzed by three dimensional(=3D) model. The authors conducted 3D analysis of the tunnel behavior during the construction of the SHYORYO Tunnel of Tomei Expressway, where the umbrella method was applied, and examined the effectiveness of the numerical method by comparing the such results with the observed ones. From the analysis, it was shown that the umbrella method is useful to design a large tunnels.

Keyword: large tunnels, umbrella method, three dimensional numerically analysis.

1. はじめに

近年、ヨーロッパのトンネル工事においては、大規模先受け工を用いて掘削断面を極力大きくし大型機械を使用する工法が主流となってきた。

日本国内においては、地質条件の悪い箇所や特殊条件箇所において大規模先受け工が採用され、ロディンジェットフォアパイリング工法に代表されるアンブレラ工法が施工実績を増やしつつある。日本道路公団においては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。

この工法は、トンネル切羽前方での応力解放の抑制や変位抑制効果を発揮すると思われる。しかし、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いえない。

本研究ではアンブレラ工法の効果について、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。しかし、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、まずトンネル内空変位に着目し、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を検証した¹⁾。次に切羽進行に伴う切羽前方および切羽直近地山の応力変化に着目し、アンブレラ工法の力学的挙動に知見を得た。

* 正会員 日本道路公団試験研究所 トンネル研究室

** 正会員 (株)富士総合研究所 解析技術第1部

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であり、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. 解析条件

3・1 解析内容および手法

アンブレラ工法による変位および応力解放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、図-1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。解析モデルはトンネル掘削幅を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-1に示すように定めた。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。また、アンブレラ工法のモデル化は掘削すると同時に地山の剛性から改良後の剛性に変更する。なお、アンブレラ工法の打設範囲角度は、施工に合わせて120°とした。表-2に構造物性値を示す。

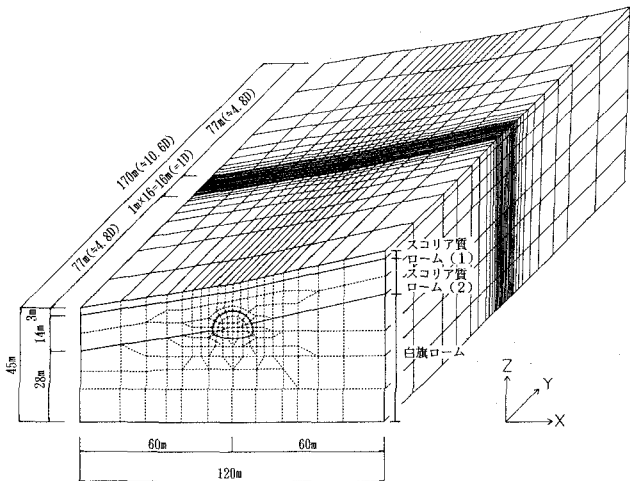


図-1 解析モデル(所領第一トンネル)

表-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 (°)
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

表-2 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	2.1×10^8	63.53	4720.
RJFP	t=40cm	ワレット要素	6.8×10^3	4000.	

3・2 解析ステップ

所領第一トンネルの解析は図-2に示すステップで行った。まずアンブレラ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(1m)掘削し、1間遅れて支保を建て込む。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。

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まで先受工打設 奥行き79mまで掘削 奥行き78mまで支保工追加 《先受長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) 《先受長11m》
{	{	1間(=1m)掘削し、 支保工1基追加を繰り返し
10		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) 《先受長3m》

図-2 解析ステップ

4. 解析結果

4・1 トンネル内空変位

図-3、図-4は、所領第一トンネルモデルの天端沈下、水平内空変位(SL+1.0m)の解析結果および計測値を変位特性曲線に示したものである。図中の初期値は、解析値を実際の計測開始時期(=切羽後方1.0m)に合わせてプロットした。解析値の変位傾向は、計測開始時期より初期変位速度カーブ、収束傾向に入るカーブ、収束にいたるまで天端沈下、水平内空変位共計測値を良く再現している。解析値および計測値の絶対値が一致していないのは変形係数の精度のためであり、解析手法には問題ないものと思われる。

変位に着目し、解析値と計測値を比較することにより、本3次元FEM解析手法の妥当性を確認した。その上で3次元FEM解析による、切羽進行に伴う地山応力の変化について考察を加えることにした。

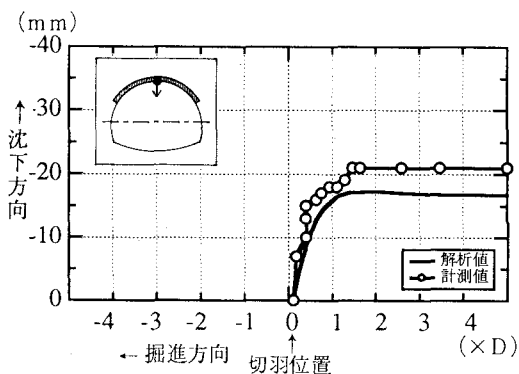


図-3 変位特性曲線(天端沈下)

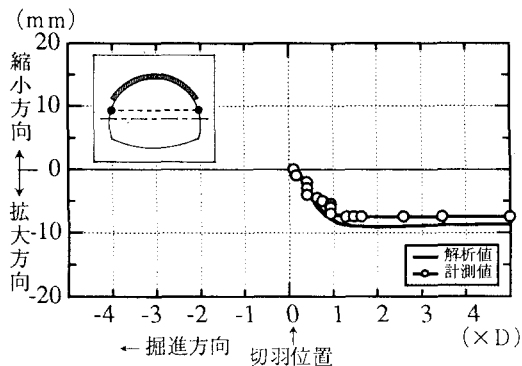


図-4 変位特性曲線(水平内空変位)

4・2 地山応力

(a) 3次元FEM解析による切羽進行に伴う地山応力の変化

図-5、図-6は2車線道路トンネルの切羽進行に伴う地山応力の変化を示したものである。解析条件は、土被り $h=100$ m、地山区分は日本道路公団のD Iクラスに相当する。図中の実線は σ_x (水平方向応力)、破線は σ_y (軸方向=縦断方向応力)、一点破線は σ_z (鉛直応力)を示す。グラフの横軸は切羽位置を表し、Dはトンネル幅(=10m)を表し、(-)は切羽前方、(+)は切羽後方を示す。縦軸は地山応力の変化を表したもので、初期応力で正規化している。

図-5は、天端付近の地山応力を示したものである。地山応力の変化は、それぞれ切羽前方-2D付近から現れ、切羽面まで $\sigma_x (= \sigma_\theta)$ および $\sigma_z (= \sigma_R)$ は増加し、 σ_y は切羽前方-0.5D付近まで減少(解放)した後増加する。切羽通過後は、 σ_x は支保設置時に一度若干ではあるが応力解放されるが、その後再び増加し、切羽後方2D付近で収束する。 σ_y は切羽通過時に増加のピークをむかえ、その後減少して切羽後方2D付近で初期応力に戻る。 σ_z は切羽前方-0.5D付近から増加し始め切羽通過直後急激に解放される。

図-6は、脚部付近の地山応力を表したものであるが、 $\sigma_x = \sigma_R$ 、 $\sigma_z = \sigma_\theta$ が対応関係にあることを考慮すれば、切羽進行に伴う地山応力変化は天端付近の地山応力変化と同様に切羽通過に伴い、周方向応力は、初期応力より増加し、半径方向応力は解放されることになる。この結果を同一メッシュの2次元FEMの結果と比較すると、2次元FEMの結果は、3次元FEMの収束値(+2D)とほぼ一致する。

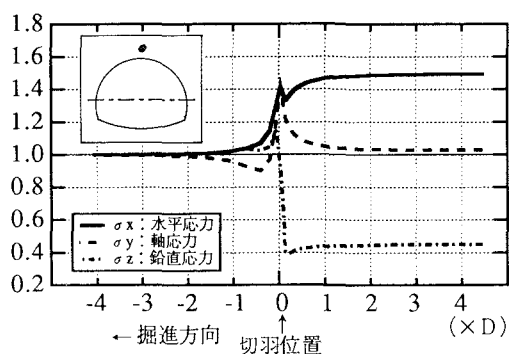


図-5 地山応力変化グラフ(天端付近)

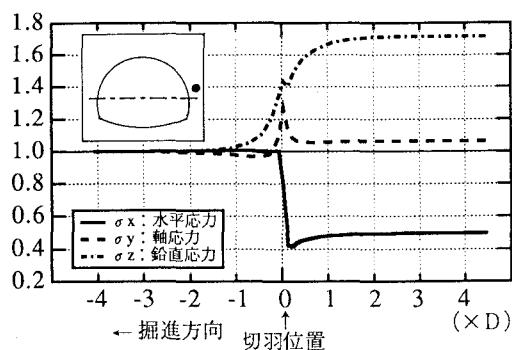


図-6 地山応力変化グラフ(脚部付近)

(b) 所領第一トンネルモデル

図-7(アンブレラ工法無し)、図-8(アンブレラ工法有り)は、切羽進行に伴う天端付近の地山応力変化を示したものである。地山応力の変化を見ると、アンブレラ工法無しのケースでは σ_y のみ切羽前方-3D付近から現れ、 σ_x 、 σ_z は-1.5D付近から現れる。一方、アンブレラ工法を施工したケースでは、 σ_y のみ切羽前方-2D付近から現れ、 σ_x 、 σ_z は-1D付近から現れる。これより、アンブレラ工法を施工することにより、切羽前方応力の変化位置は切羽に近づき、特に σ_y (軸方向)の応力解放を切羽前方より抑制していることがわかる。切羽通過後は、偏平大断面、低土被り、偏圧地形という条件のため、前述した2車線断面の解析結果とは異なる傾向を示し、切羽直近よりいずれの応力も解放される。

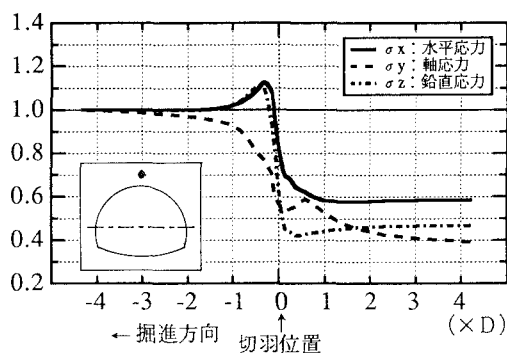


図-7 地山応力変化グラフ
(天端付近: アンブレラ無)

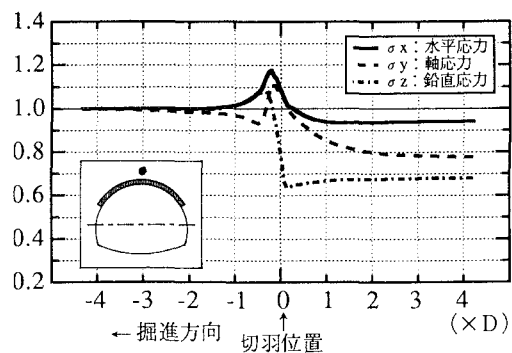


図-8 地山応力変化グラフ
(天端付近: アンブレラ有)

図-9（アンブレラ工法無し）、図-10（アンブレラ工法有り）は、天端付近の地山応力変化をモールの応力円（ σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ）で表したもので、実線は初期応力状態を表し、破線は切羽前方2mの応力状態を表す。両図より、アンブレラ工法無しでは切羽前方2m位置で破壊包絡線に達しているが、アンブレラ工法を施工した解析では初期地山応力状態からほとんど変化していないことがわかる。

このようにアンブレラ工法はトンネルクラウン付近地山において、トンネル掘削による応力解放を抑制し、その結果、地山の塑性化を抑制する。

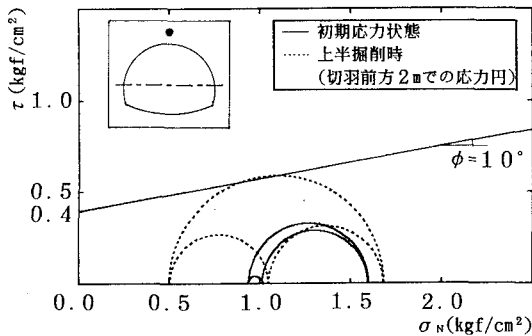


図-9 モールの応力円
(天端付近：アンブレラ無)

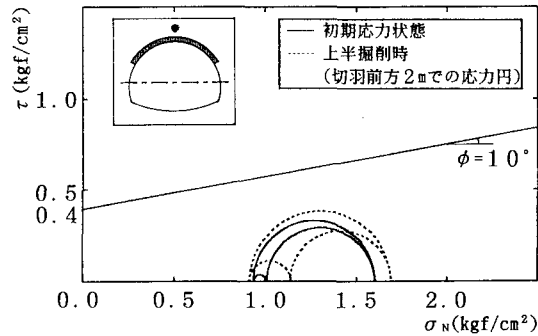


図-10 モールの応力円
(天端付近：アンブレラ有)

図-11（アンブレラ工法無し）、図-12（アンブレラ工法有り）は、切羽進行に伴うトンネル左側脚部付近の地山応力変化を示したものである。地山応力の変化を見ると、アンブレラ工法無しのケースでは σ_y が切羽前方-2D付近から現れ、 σ_x 、 σ_z は-1D付近から現れる。一方、アンブレラ工法を施工したケースでは、切羽前方-1Dに満たない所から σ_x 、 σ_y 、 σ_z ともに現れる。これより、若干ではあるが切羽前方における応力解放を抑制していることがわかる。また、切羽近傍ではアンブレラの有無でかなり違う動きを示すのが認識できる。アンブレラ工法無しのケースは切羽が近づくにつれて σ_x 、 σ_y が減少し、切羽通過後増加するのに対し、アンブレラ工法を施工したケースは切羽通過後、多少減少する他はいずれの応力も増加する傾向にある。これらの動きは前述した2車線道路トンネルの解析結果とは異なるものである。特にアンブレラ工法を施工したケースは半径方向応力に相当する σ_x （水平応力）が切羽通過後に若干減少した後増加傾向に転じる動きは2車線道路トンネルの解析結果には見られない。この動きの要因としては解析対象としている断面が扁平であり、地山に比べ剛性の高いアンブレラを設置されているため、トンネルクラウン付近の地山応力が脚部に直接的に伝達され、水平変位がダイバージェンス側に動いたためだと思われる。

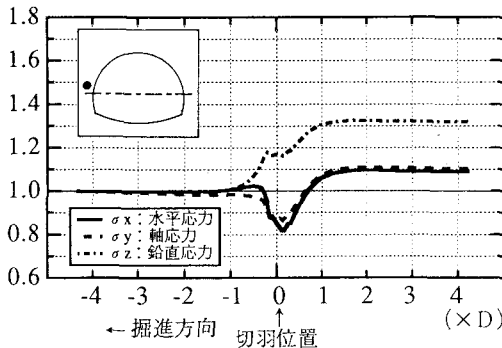


図-11 地山応力変化グラフ
(脚部付近：アンブレラ無)

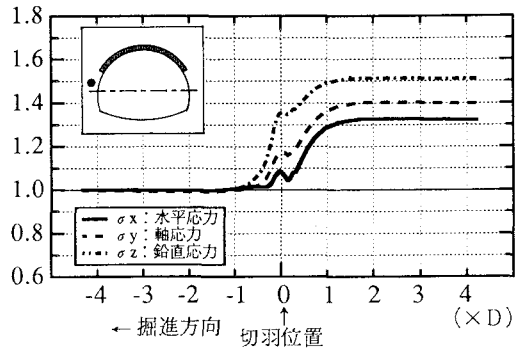


図-12 地山応力変化グラフ
(脚部付近：アンブレラ有)

図-13 (アンブレラ工法無し)、図-14 (アンブレラ工法有り) は、左側脚部付近の地山応力変化をモールの応力円 (σ_1 、 σ_2 、 σ_3) で表したもので、実線は初期応力状態を表し、破線は切羽前方2mの応力状態を表す。両図から分かるように、アンブレラ工法無しのケースの応力円が引張側に移行して破壊包絡線に達するのに対し、アンブレラ工法を施工したケースの応力円は圧縮側に移行して破壊包絡線に達している。このように脚部付近の地山応力は、トンネルクラウン付近の応力が剛なアンブレラにより伝達され、圧縮側応力が増加する傾向にある。よってアンブレラ工法をトンネル工事に計画する場合は、脚部の地盤支持力等の検討を十分に行う必要がある。

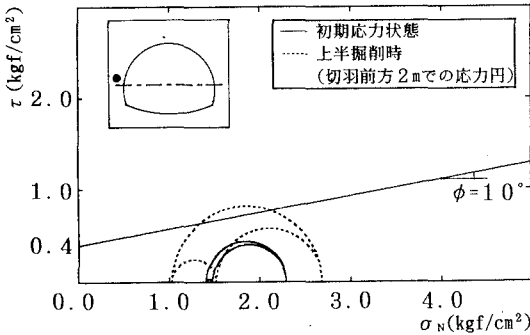


図-13 モールの応力円
(脚部付近：アンブレラ無し)

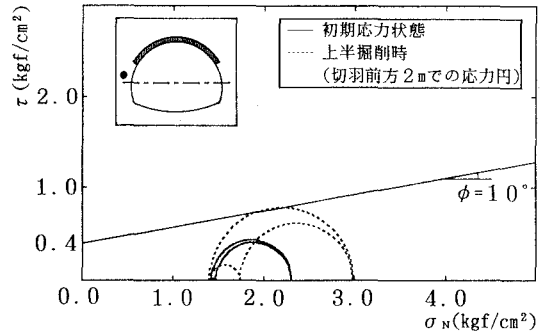


図-14 モールの応力円
(脚部付近：アンブレラ有)

5. おわりに

アンブレラ工法を採用した場合の切羽進行に伴う地山応力の変化について以下に示す知見が得られた。また、今後の同工法及び大断面トンネルの設計に有用な情報を得た。

- (a) トンネル掘削により生じる天端周辺での地山応力の変化は、アンブレラ無しのケースで切羽前方-3D (Dはトンネル幅) より現れ、切羽直近にて急激に解放される。これに対し、アンブレラを施工したケースでは、地山応力の変化位置が切羽に近づき、切羽前方-2D付近から現れる。
- (b) アンブレラを設置することにより、地山応力の変化は小さくなる。また、軸方向応力に関しては、トンネル掘削による応力解放が切羽前方より抑制され、その結果地山の塑性化を抑制する。
- (c) 地山の塑性化を抑制することにより掘削によって生じる変位が抑制される。
- (d) 上半脚部付近の地山応力はアンブレラを施工した場合、各方向応力ともに支保工建込み後増大する傾向にある。これはトンネルクラウンに載荷される鉛直応力が、地山に比べより剛体であるアンブレラを介してアンブレラ脚部に伝達され応力解放されるためであろう。これより、アンブレラ工法を計画する際には脚部付近地山の塑性化が考えられることから脚部付近の地盤支持力の確保に注意すべきである。そして、支持力が確保されるような状況が設定されればアンブレラ工法の変位および応力解放抑制効果というものはかなり期待できると思われる。

6. 参考文献

- 1) 多賀直大・磯野龍昭・佐藤 淳・伊東 淳・樽井 稔：高圧噴射攪拌改良先受け工法による変位抑制効果，第25回岩盤力学に関するシンポジウム，1993