

(40) トンネル先受け工に関する設計手法の提案

日本道路公団試験研究所
(株) 富士総合研究所

正会員 中田雅博 ○佐藤淳
正会員 伊東淳 樽井稔

" A PROPOSAL FOR DESIGNING AN UMBRELLA METHOD "

Masahiro NAKATA, Jun SATO, Japan Highway Public Co.
Jun ITO, Minoru TARUI, Fuji Research Institute

Recently, number of tunnel's construction with umbrella method, for example Rodin Jet Fore Piling (RJFP), is increasing at bad ground condition or special situation in Japan. And these measurement data is accumulated.

We have been studying the behavior of tunnels during excavation with umbrella method by comparing 3-dimensional (3D) numerical analysis results with these measurement data. And we had showed that RJFP had effects of suppressing displacement and release of in-situ stress ahead of the tunnel face.

In this paper, we analyzed measurement data of the tunnel which was excavated by side heading NATM with umbrella method, where was constructed in Yokohama, did a 3D Finite Element Method (FEM) analysis of the tunnel, and made a comparative study from a point of view of displacement and RJFP's strain. In result, we confirmed that it was possible for 3D FEM modeling to show the behavior of ground and RJFP.

We propose one method of structural design of tunnel during excavation with umbrella method by use of the beam method on elastic floor. It is show that the simple method good coincide.

1. はじめに

近年、日本国内のトンネル工事においては、地質条件の悪い箇所や特殊条件箇所でのロディンジェットフォアパイリング工法（以下、RJFPとする。）に代表される大規模先受け工の施工実績が増えつつある。また、それに伴いRJFPに関する計測データも蓄積されてきている。しかしながら、それらの計測結果からRJFPの効果や力学的挙動が十分に解明されているとはいえず、設計手法についてもパイプルーフの慣用設計法に準じた検討にとどまり、未だ確立されていないのが現状である。

これに対し、筆者らは、RJFPを補助工法として採用した「東名改築所領第1トンネル」を対象とした3次元有限要素法解析（以下、3次元FEM解析とする。）から、RJFPによる地表面沈下等の変位抑制効果や切羽前方の応力解放抑制効果を確認した。^{1) 2)} 本報では、次なる検討ステップとして、最近横浜で施工され、RJFPパイルのひずみ等を詳細に計測した3車線道路トンネルを対象に3次元FEM解析を実施し、先ず天端沈下等の変形形態を再現した後、RJFPパイルに関する計測値との比較を中心に検討・分析を加えるものである。また、それらの検討結果からRJFPを設計する際に、簡便に取り扱える評価モデルや剛性について提案する。

2. トンネルおよび地質概要

検討対象となる3車線トンネルは、側壁導坑先進工法で供用中のトンネルに近接施工されたものである。また、本トンネルは掘削断面が大きいだけでなく、土被りが最大17mと薄く、地表には住宅や道路が存在するという厳しい条件下での施工であった。

本地区の地質は、基盤となる第三紀～前期洪積世の上総層群および前期洪積世の相模層群そして関東ローム層等からなり、トンネル区間の上部には盛土、ローム、ローム質粘土等が分布している。また、トンネル区間の大部分は、固結シルト～砂質シルト層であり、一軸圧縮強度は5～8kgf/cm²である。

3. 計測概要

本トンネルの計測工は、前述したように非常に厳しい条件下での施工であったため、既設トンネルや周辺構造物への影響度合を把握することを目的に計画され、実施された。その中で既設トンネルへの影響対策と地表面沈下抑制を目的として採用されたR J F Pについては、支保メカニズム等の把握や躯体の安全性確認のために周方向ひずみと縦断方向の曲げひずみが計測された。図-1にR J F P計測位置図を示す。

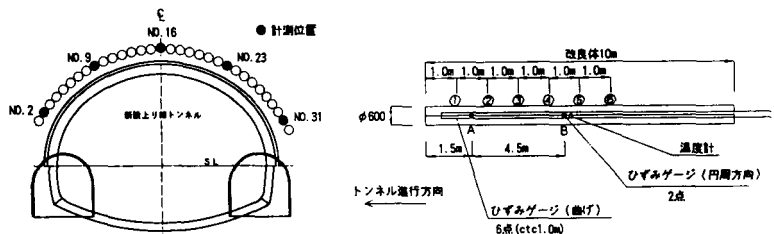


図-1 R J F P計測位置図

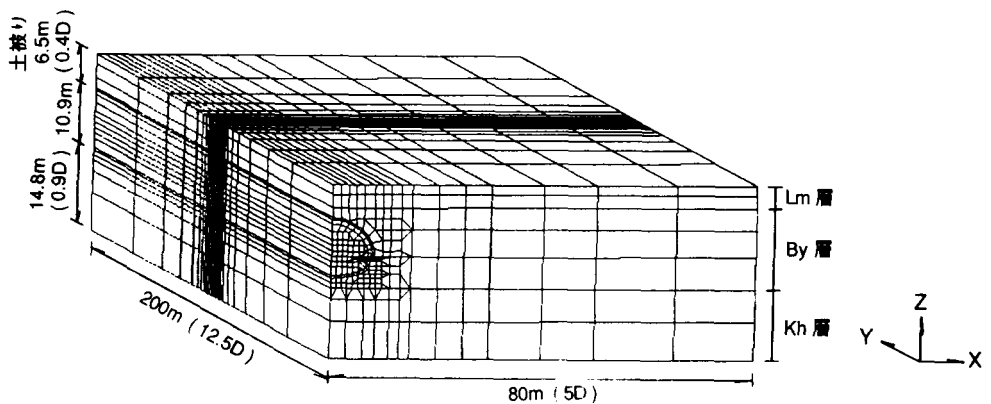


図-2 解析モデル図

表-1 地山物性値一覧表

	単位体積重量 $\gamma(t/m^3)$	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 $\phi(^{\circ})$
ローム層 Lm	1.40	100.0	0.40	4.0	5.0
相模層 By	1.55	450.0	0.375	18.0	12.0
上総層 Kh	1.85	5000.0	0.30	140.0	15.0

表-2 構造物性値一覧表

	仕様	解析モデル	変形係数 $E(kgf/cm^2)$	断面積 $A(cm^2)$	断面2次 $I(cm^4)$
本 既設コンクリート	$t=10cm$	シェル要素	4.0×10^4	1000.	—
坑 間アーチ保工	H-125	ビーム要素	2.1×10^6	30.31	847.
導 既設コンクリート	$t=20cm$	シェル要素	4.0×10^4	2000.	—
坑 間アーチ保工	H-200	ビーム要素	2.1×10^6	63.53	4720.
RJFP	$t=40cm$	ソリッド要素	1.875×10^4	4000.	—
側壁コンクリート	—	ソリッド要素	2.35×10^5	—	—

4. 解析内容と解析条件

今回の3次元FEM解析は、R J F Pの支保効果の把握と解析する際のパイルの剛性を確認するために実施したものである。

解析対象とする断面は、パイルのひずみ計測が実施され、地表面形状がフラットで計測工Aの斜め側線がほぼ左右対称なことからトンネルセンターを対称軸とした半断面にてモデル化した。

解析モデルは、図-2に示すようにトンネル掘削幅を16m、土被りを6.5mとし、解析領域は、トンネル横断方向の水平方向を5D（Dはトンネル径で約16m）、SLから下方向を1.2D、トンネル軸方向を12.5Dとしている。また、使用した材料定数を表-1、表-2に示す。地山定数は地質調査等の試験結果も参考にはするが、基本的に逆解析から設定した。なお、R J F Pのモデル化は、掘削すると同時にアーチ120°区間を地山の剛性から改良後の剛性に置換する。

解析のステップは、既報¹⁾²⁾同様に逐次掘削より求めた増分変位を1掘進長ずつずらしながら重ね合わせて最終状態を評価した。

5. 解析結果

検討当初の解析は、R J F Pの弾性係数を試験施工時の一軸圧縮強度試験結果より比例配分して推定した7500kgf/cm²として逆解析した結果、代表位置での変位量は再現できたが、そのときのR J F Pパイルのひずみは、計測値に比べ解析値の方がかなり大きくなった。ただし、ひずみの発生位置やモードは比較的良く近似されていたことから、R J F Pの弾性係数をパラメータとした逆解析を再度実施し、以下のような結果を得た。

(1) 変位

地表面沈下、天端沈下、水平内空変位の解析値と計測値の変位特性曲線による比較グラフをそれぞれ図-3～5に示す。図中の初期値は、解析値を実際の計測開始時期に合わせてプロットした。

天端沈下の比較グラフをみると、解析値は切羽後方9m付近まで変位速度、絶対量ともに計測値をよく再現しており、その後の計測値の隆起方向への動きが見受けられるが、上半掘削の収束値はほぼ再現していると言える。また、水平内空変位も計測値に若干の増減はあるが、収束値はほぼ再現している。地表面沈下は、計測データの入手不足のため計測値のプロット点は少ないが、収束値は再現している。

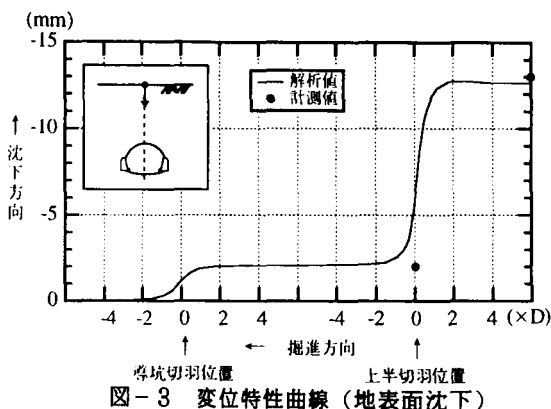


図-3 変位特性曲線（地表面沈下）

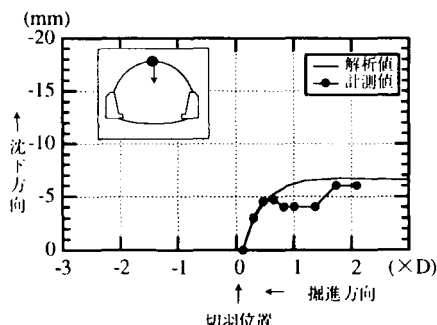


図-4 変位特性曲線（天端沈下）

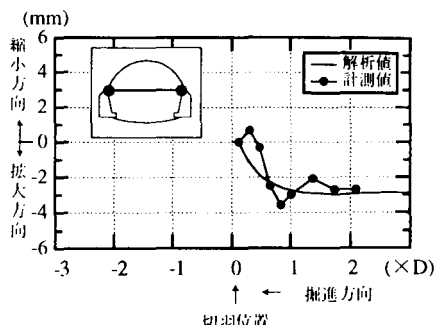


図-5 変位特性曲線（水平内空変位）

(2) R J F P ひずみ

R J F P の縦断方向曲げひずみと周方向ひずみの解析値と計測値の比較グラフを図-6、図-7に示す。両図の横軸は切羽の進行を表し、右から左に向かって掘進方向である。また、図-6の縦軸は0を境に-が内空側への引張ひずみ、+が地山側への引張ひずみを示し、図-7の縦軸は-が圧縮を表している。なお、解析値と比較する計測位置は、前述したトンネル右肩部とした。

縦断方向の曲げひずみは、図中の凡例のように1 mピッチで6つの測点が設けられているが、解析値との比較グラフを作成するにあたって、全測定値を書き込むとグラフが繁雑になるため、矢印でマークしたR J F P先端付近の測点の値で比較することとした。図より縦断方向の曲げひずみは、切羽前方3 m付近から動き始め、切羽前方1 m付近で内空側に最大の引張ひずみが発生した後、切羽通過とともに地山側へ引張ひずみが生じて、再度内空側引張へとひずみは移行する。この動きについては、解析値もほぼ追従しており、絶対値をみても良く再現できていると思われる。

周方向のひずみは、図中の凡例のように2つの測点が設けられ、解析値との比較には曲げひずみ同様にR J F P先端側の測定値とした。図より周方向のひずみは、切羽の進行とともに圧縮ひずみが増加する傾向にあり、解析値もそのような傾向にある。また、絶対値についても解析値は、計測値を良く再現している。

このように、本地山条件においてはR J F Pの剛性を一軸圧縮強度試験結果より推定した 7500 kgf/cm^2 の2.5倍に相当する 18750 kgf/cm^2 とすることにより、R J F Pパイルのひずみを再現することが可能となった。

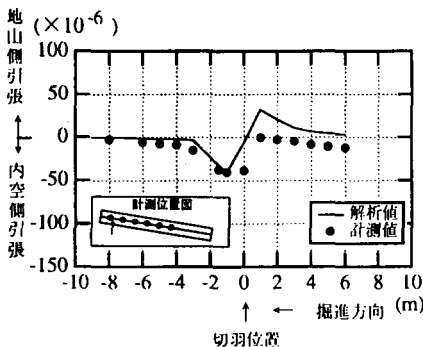


図-6 縦断方向曲げひずみ比較グラフ

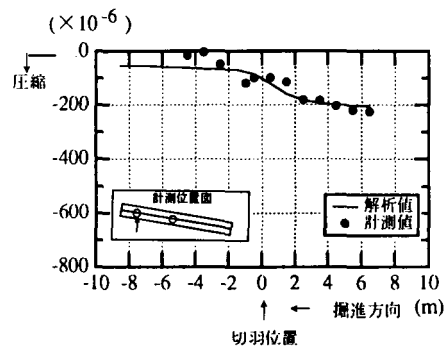


図-7 周方向ひずみ比較グラフ

6. R J F Pにおける設計方法の提案

解析値と計測値の比較より、R J F Pの挙動や支保効果を把握するうえで、3次元解析は有用な方法であることが示された。しかしながら、R J F P設計方法として3次元解析を用いることは、経済性や実用性を考慮すると難しいと思われる。

これより、計測値を再現できる縦断方向の簡易なR J F Pパイル設計方法が望まれるが、図-8に示す従来までのパイプーフ慣用設計法に基づいた単純梁モデルや一端固定他端単純支承梁モデルでは、計測値のような切羽近傍の動きは表現できない。

そこで、図-9のような切羽前方および後方の地盤反力を考慮した弾性床土梁の簡略モデルを設定した。解析

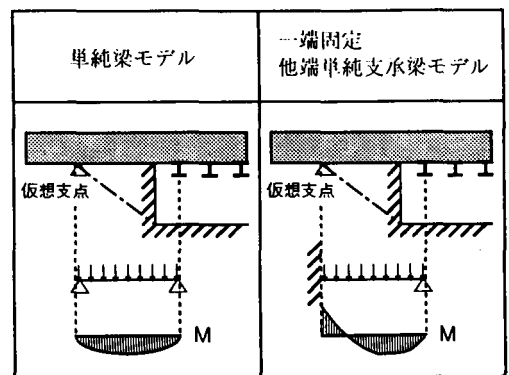


図-8 パイプーフ設計法に準じたモデル図

モデルは、R J F Pが切羽前方10mまであり、後方はとりあえず20mとしている。次に解析条件としては、R J F Pパイルの径を60cm、剛性は先の3次元解析で用いた値とした。また、荷重は全土荷重を1掘削部分に載荷するが、これで得られた結果は1掘進長あたりの増分ひずみということになるため、3次元解析のように1掘進長づつずらしながら重ね合わせ、累積変位および応力を算定した。なお、地盤バネは支保剛性も考慮して設定し、全バネ値を一様とした。

図-10に簡略モデルによる解析値と計測値を比較した縦断方向曲げひずみのグラフを示す。簡略モデルにより求めた曲げひずみの挙動は、3次元解析結果同様のモードとなり、また計測値のモードとも一致する。これより、弾性床上梁による簡略モデルが、R J F P設計方法になり得ることが示された。

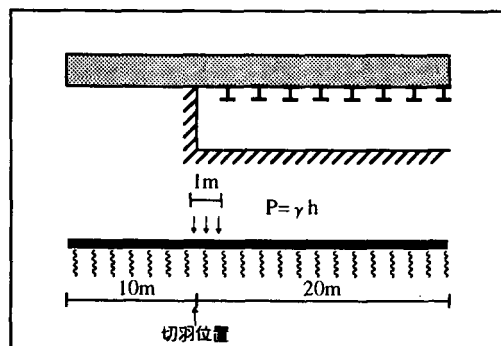


図-9 弾性床上梁による簡略モデル図

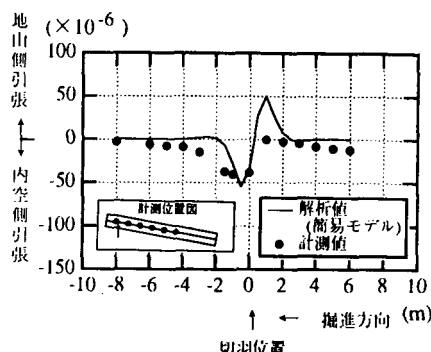


図-10 縦断方向曲げひずみ比較グラフ (簡易解析モデル)

7. まとめ

3次元FEM解析や弾性床上梁による簡略モデルの結果とR J F Pパイルのひずみ計測値を比較検討した結果、次のような知見が得られた。

- 1) 3次元FEM解析は、地山やトンネル壁面の変形量を再現するだけでなく、R J F Pパイルのひずみモードや絶対量をも再現することが可能である。
- 2) 従来FEM解析でR J F Pをモデル化した際のパイル剛性は、パイルの一軸圧縮強度試験結果等を基に設定していたが、本3次元解析では従来通りの方法により設定した剛性に対し、変形量とパイルのひずみを同時に再現するには、パイルの剛性を約2.5倍すればよいことが示された。
- 3) 縦断方向のパイル構造設計方法としては、パイプルーフ設計において用いられている単純バネ等のモデルにて検討されているが、このモデルでは切羽近傍の動きを表現することは難しい。これに対し、本報で提案した弾性床上梁による簡略モデルにおいては、切羽近傍の計測値のモードを表現できることが確認された。

今後は、今回提案した簡略モデルの精度向上やR J F Pパイルの剛性を把握するために、地山条件等を種々変更させた詳細検討を実施していく予定である。また、本報には紙面の関係上から縦断方向のR J F Pパイル設計方法を中心に検討結果を紹介したが、横断方向の設計方法についても簡易なモデルを設定して検討中である。

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
- 2) 中田雅博・佐野信夫・佐藤淳・伊東淳・樽井稔：アンブレラ工法における切羽進行に伴う地山応力変化、第3回トンネル工学研究発表会、1993