

二次元縦断面解析による先受け工の検討

STUDY OF FOREPILES BY TWO DIMENSIONAL ANALYSIS OF VERTICAL SECTION ALONG TUNNEL AXIS

高橋祐治*・大野 清**・森川誠司***・福岡 孝****

Yuji TAKAHASHI, Kiyoshi OHNO, Seiji MORIKAWA and Takashi HUKUOKA

One of the purposes of tunnel excavation analysis is to investigate stability of tunnel faces. For precise investigation of the stability, three dimensional analysis is required, but it is complicated and time consuming work. In this paper, two dimensional analysis of a vertical section along a tunnel axis is performed and the effects of forepiles are studied. The results of the analysis indicate that forepiles reduce area of failure zone and tunnel crown settlements.

Key words:forepile, NATM, 2D FEM analysis, stability of tunnel face

1. まえがき

トンネル掘削に伴う周辺地山の安定性や支保工の安全性を検討する場合の解析手法としては、簡易な理論式や経験式による方法と、有限要素法(FEM)等の数値解析法による方法とがある。

NATMは現場の観察・計測の情報を設計や施工にフィードバックしながら掘削を進めるところに特徴がある。FEMは現場における施工ステップや地層構成、様々な支保部材をモデル化することができ、次掘進に際し有用な情報を提供することができるため、NATMにおける解析的検討の主流となっている。

トンネルの安定性検討、特に先受け工を必要とするような地山における検討では、切羽近傍の三次元挙動の把握が重要である。これまでのトンネルにおけるFEM解析は、トンネル軸に直交する横断面をモデル化した二次元解析が主流であり、切羽における先受け工等のモデル化には工夫が必要であった。最近は、コンピュータの性能向上、解析技術の進歩により、三次元FEM解析も行えるようになってきたが、設計において三次元FEM解析を多用するレベルには達していないのが実状である。

本報告では、三次元FEM解析よりも簡便に解析が行え、先受け工を含む切羽近傍の挙動を把握することができる二次元縦断面解析を行い、その結果より得られた知見を報告する。

なお、解析の対象としたトンネルは、本州四国連絡橋公団・本四連絡橋道路・舞子トンネル南工事の土砂部アンブレラ工法区間である。

* 正会員	鹿島建設株式会社	土木設計本部設計技術部
** 正会員 工博	鹿島建設株式会社	土木技術本部工務部
*** 正会員 工修	鹿島建設株式会社	情報システム部
****正会員	鹿島建設株式会社	大阪支店

2. 解析条件

2・1 支保部材

解析の対象とした断面の形状を図－1に、支保部材諸元を表－1示す。支保部材の種類は吹付けコンクリート、鋼製支保工、先受け工及びサイドパイルであり、吹付けコンクリートはソリッド要素で、鋼製支保工と先受け工はビーム要素でモデル化した。サイドパイルについては解析上省略した。

2・2 地盤

解析用メッシュ及び地盤物性値を図－2に示す。周辺地盤はソリッド要素でモデル化した。また、境界条件は、左右端が水平方向拘束、鉛直ローラーとし、下端は水平ローラー、鉛直方向拘束とした。

2・3 二次元縦断面モデル化の手法

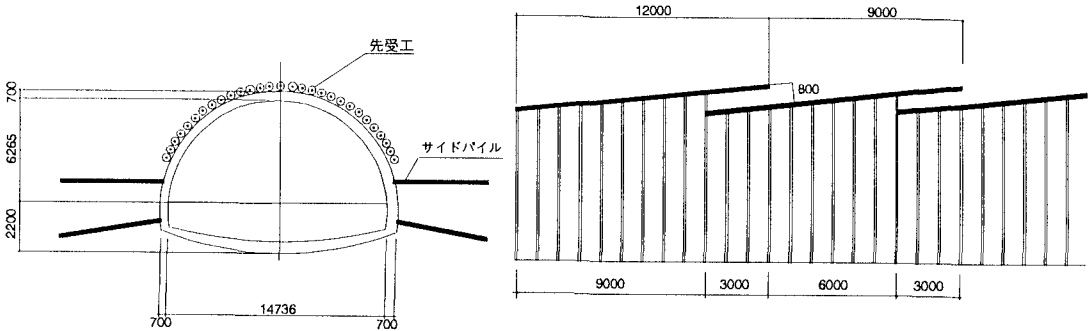
二次元縦断面解析では、側壁地山や吹付けコンクリート、鋼製支保工の剛性を適切に評価する必要がある。二次元縦断面解析では、トンネル、周辺地山を単位厚さの板にモデル化することから、ここでは、図－3に示すように、二次元横断面素掘りモデルにおける変形量と一辺の長さが単位長の柱に初期地圧相当の荷重を作用させたときの変形量とが等しくなるように柱の剛性を求め、これを掘削部の剛性として用いた。鋼製支保工の剛性についても同様の考え方で剛性を求めた。

2・4 掘削ステップ

掘削ステップを図－4に示す。解析は実際に近い施工ステップに従い、モデル左端から上半断面の掘削を行った。今回の解析では、全掘進長を26mとしたため、実施工に合わせ上半断面の掘削のみとなった。

2・5 解析ケース

今回解析を行ったケースを表－2に示す。



図－1 トンネル断面形状

表－1 支保部材諸元

支保部材		弾性係数(kgf/cm ²)	断面積(cm ²)	断面2次モーメント(cm ⁴)
吹付けコンクリート		4.0×10 ⁴	t=25cm	—
鋼製支保工(H-250×250×9×14)		2.1×10 ⁶	92.18	10,800
先受工	トビチューブ (φ114.3,t=6)	2.1×10 ⁶	20.41	300.2
	セメント注入材	2.2×10 ⁵	82.19	537.6

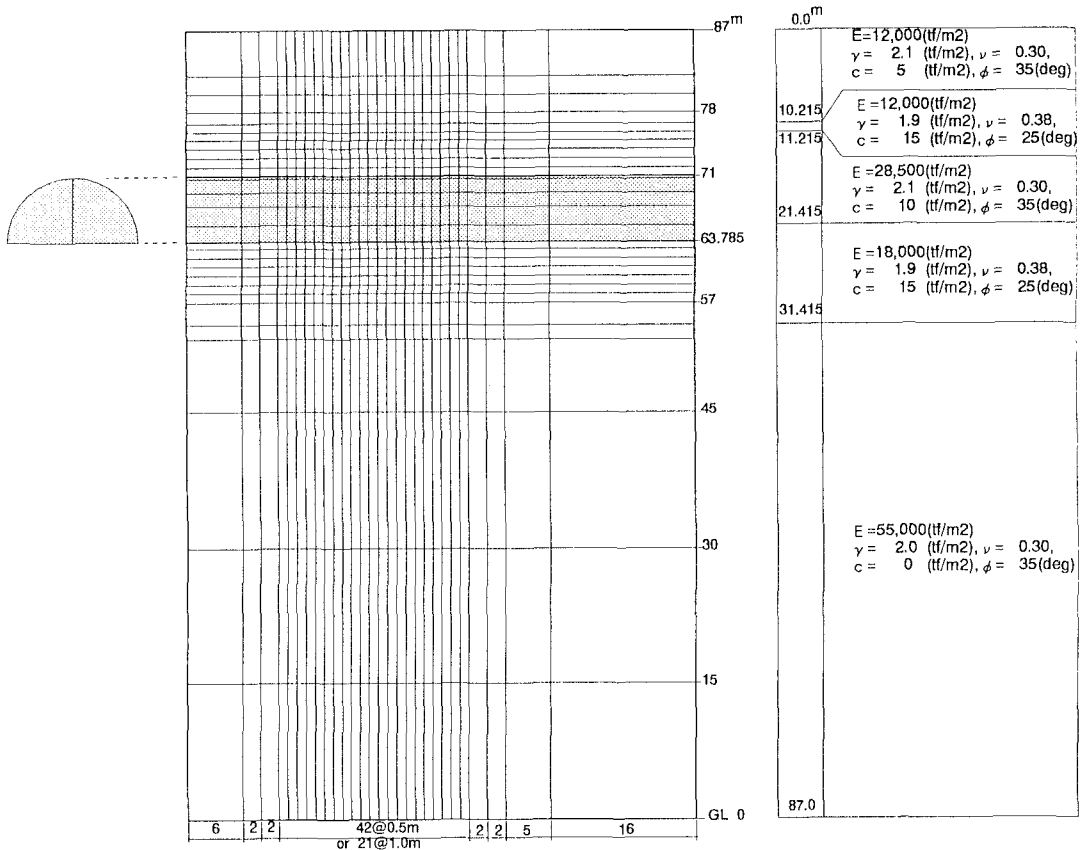


図-2 解析用メッシュ及び物性値

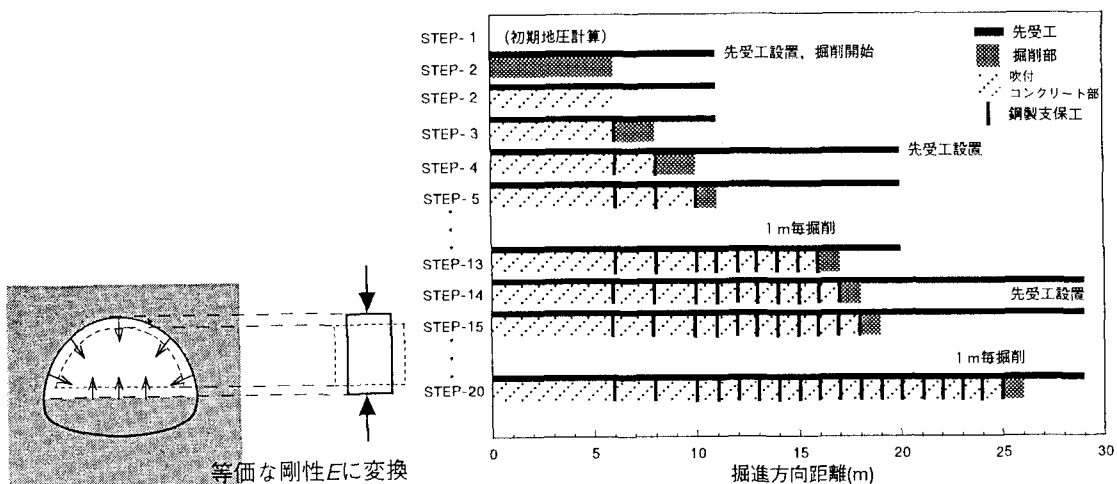


図-3 掘削部剛性のモデル化概念

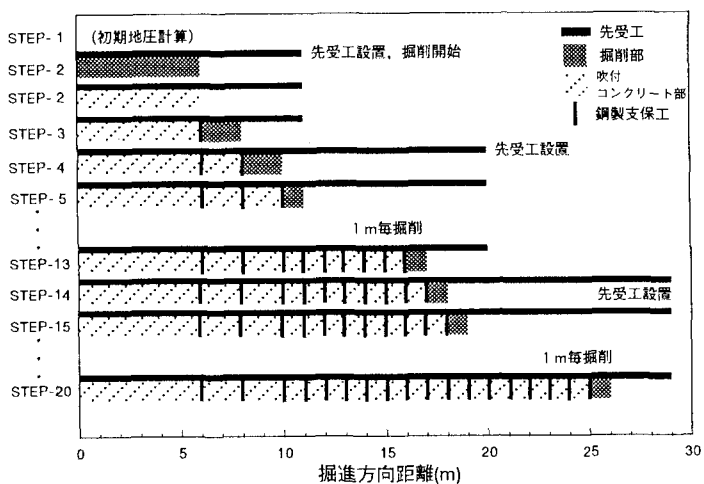


図-4 掘削ステップ

表－2 解析ケース一覧表

ケースNo.	変形特性	先受け工	掘進方向メッシュ間隔
1	線形弾性	あり	1.0m
2	非線形弾性	あり	
3	線形弾性	なし	
4	非線形弾性	なし	
5	線形弾性	あり	0.5m
6	非線形弾性	あり	
7	線形弾性	なし	
8	非線形弾性	なし	

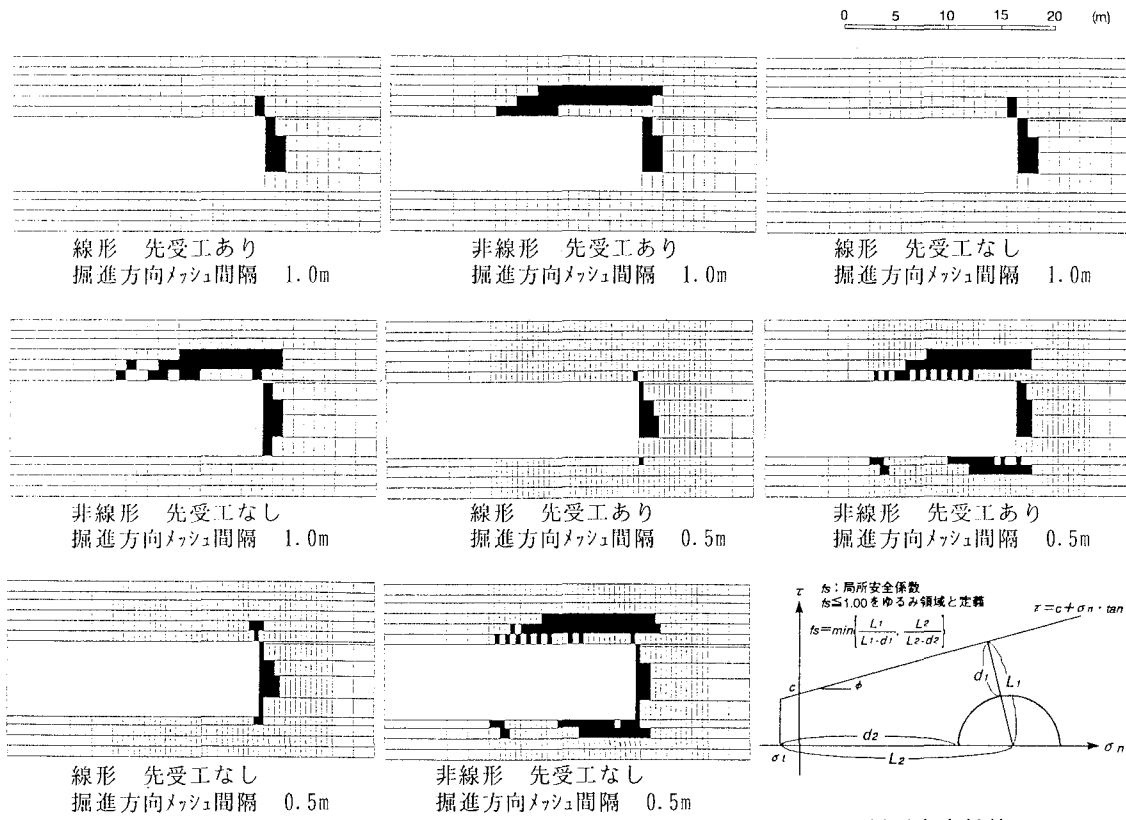
3. 解析結果

3・1 ゆるみ領域

ここでは、地山の応力がせん断強度あるいは引張強度に達した要素、すなわち局所安全係数が1以下の要素をゆるみ領域とした。各ケースのゆるみ領域を図－5に示す。

先受け工の有無によるゆるみ領域の範囲の違いは、切羽近傍に見られる。掘進方向メッシュ間隔0.5mの場合で見ると、弾性解析では先受け工がない場合にはゆるみ高さが2mであるのに対し、先受け工を入れることによって1mになる。非線形解析では、先受け工の有無に関わらずゆるみ高さは3mで同じであるが、先受け工を入れることにより切羽前方上部のゆるみ範囲が2.5mから1.5mになる。これにより、先受け工の切羽前方のゆるみ抑制効果が確認できた。

また、メッシュ間隔に関わらず、他の条件が同じであればゆるみ領域の範囲はほぼ同じ結果となっている。



図－5 ゆるみ領域

3・2 変形量

弾性解析による天端沈下の解析結果を図-6に、非線形弾性解析によるそれを図-7に示す。また、弾性解析、非線形弾性解析によるトンネル中心線上の地表面沈下を図-8、9に示す。これらの図には計測結果を併せて示した。

図-6、7から天端沈下について以下のことがわかる。

- ・計算値と計測値とは、概ね合っているといえる。
- ・切羽距離が14m（掘削高さの約2倍）で収束する。
- ・先受け工を入れることにより、収束値が弾性解析で1～2％、非線形解析で3～6％小さくなる。
- ・切羽通過直後（切羽距離4m）の変位量では、先受け工を入れることにより、弾性解析で5～6％、非線形解析で7～10％小さくなる。先受け工の切羽近傍における変位の拘束効果が確認できた。
- ・先受け工の効果は、非線形解析のときに大きい。
- ・弾性解析では掘削の影響が切羽の後方まで及ぶが、非線形解析では切羽近傍のゆるみ領域の変位が大きく、後方への影響は小さい。

図-8、9から地表面沈下について以下のことがわかる。

- ・全体的な傾向は天端沈下と同様である。
- ・切羽直上における沈下量は、先受け工を入れることにより、弾性解析では8～13％、非線形解析では11～15％小さくなる。
- ・収束値では、先受け工の有無による差は小さい。
- ・ただし、計測値と比較すると、計算値は約2倍の沈下量となっている。

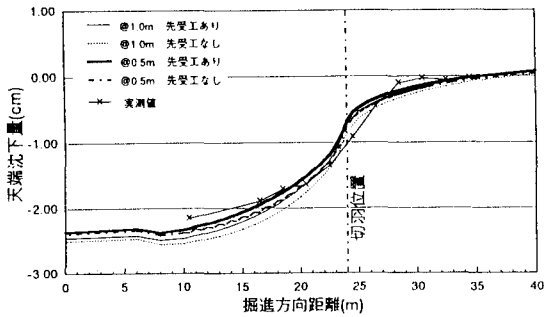


図-6 天端沈下量（弾性解析）

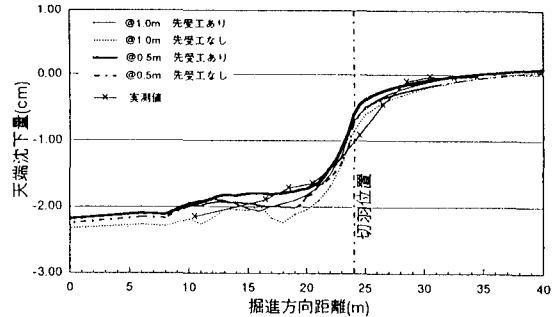


図-7 天端沈下量（非線形弾性解析）

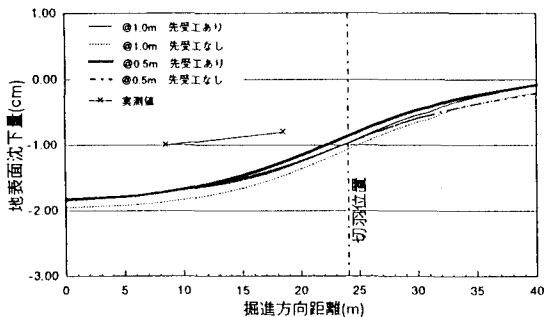


図-8 地表面沈下量（弾性解析）

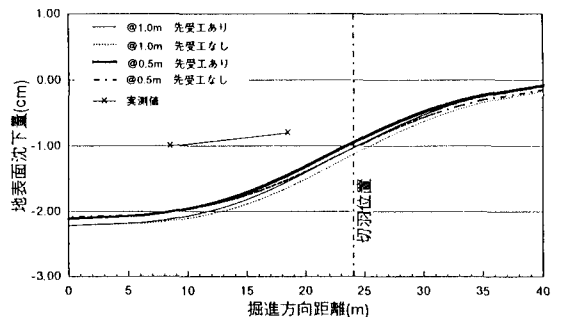


図-9 地表面沈下量（非線形弾性解析）

3・3 先受け工の断面力

先受け工の曲げモーメントを図-10に、また、軸力を図-11に示す。

曲げモーメントの計測値から以下のことがいえる。

- ・鋼製支保工間の計測点が下側引張、鋼製支保工位置の計測点が上側引張となっていること、切羽前方で上側引張の曲げモーメントが生じていることから、先受け工は、鋼製支保工を弾性支点、切羽前方地山を弾性分布バネとするはりに地山荷重が作用しているものと考えられる。
- ・切羽面前後の下側引張曲げモーメントの範囲が広がっているのは、実際には切羽の余掘が0.5m程度あることが影響していると考えられる。
- ・切羽前方の曲げモーメント発生範囲は約3mであり、実施工において先受け工のラップ長を3mとしていることは適切であるといえる。
- ・鋼製支保工間の下側引張の曲げモーメントを再現するには、FEM解析の手法上、掘進方向のメッシュ間隔を1掘進長より狭くする必要がある。

したがって、ここではメッシュ間隔0.5mの解析結果のみを整理した。

計算結果と計測値とを比較すると以下のとおりである。

- ・曲げモーメントの計測値と計算値とを比較すると切羽面での値は計算値の方が弾性解析で約1.5倍、非線形解析で約2倍となっており、全体的に計算値の方が大きくなっている。これは、解析では地山と先受け工が同じ変形ををするとしているのに対し、実際には先受け工の剛性が地山の剛性に比べて高いため、先受け工の変形が地山の変形に追従していないためと考えられる。
- ・軸力については、計測値が引張となっているのに対し、解析結果では圧縮となっている。これは、解析では、側方境界を水平方向拘束にしているためと考えられる。側方境界のモデル化には工夫が必要である。

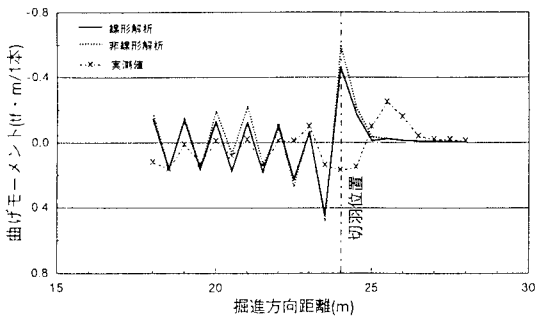


図-10 先受け工の曲げモーメント

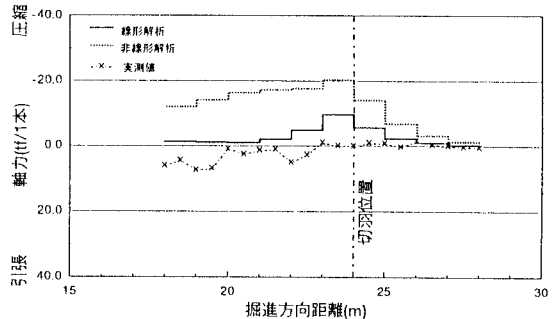


図-11 先受け工の軸力

4. まとめ

二次元縦断面解析により、①天端沈下量の予測、②先受け工の曲げモーメントの推定が可能であることがわかった。ただし、先受け工の軸力を適切に評価するためには、側方境界のモデル化に工夫が必要である。

先受け工を設けることにより、天端沈下は弾性解析では1～2%、非線形解析では3～6%小さくなり、また、切羽前方のゆるみ領域も狭くなることが解析により確認できた。

謝 辞

計測データをご提供いただきました本州四国連絡橋公団・第一建設局舞子工事事務所にお礼申し上げます。