

## (9) 疑似三次元 F E M 解析による トンネル補助工法の効果について

フジタ工業株式会社 技術研究所 正会員 ○ 田口善文  
同 上 同 上 香川和夫

The Effect of Reinforcement in NATM Tunnel by Quasi-3-dimensional EFM Analysis

Yoshifumi TAGUCHI, Fujita Corporation  
Kazuo KAGAWA, Fujita Corporation

### Abstract

In recent years, many New Austrian Tunneling Method (MATM) tunnel have been constructed in diluvial sand. Various reinforcements have been employed to stabilize the face and to control surface settlement.

Numerical analysis of the effects of these reinforcements is a 3-dimensional problem. FEM analysis applied to this 3-dimensional problem is a complex and time consuming process.

The problem may be reduced to a 2-dimensional one, if spring elements with the equivalent effect of 3-dimensional ones are installed at each node. In this study, the model was compared with the 3-dimensional deformation and stress analysis of an unlined tunnel. Quasi-3-dimensional FEM analysis was carried out on the model using various different reinforcements, and the study was conducted on surface settlement and stability of the face.

### 1. はじめに

近年、土被りの薄い洪積砂層において、NATMでの施工が数多く見られるようになった。これらのトンネルにおいては、地表沈下の抑制、切羽の安定性の向上のために各種の補助工法を用いることが多い。これらの補助工法の効果を数値解析的に検討する場合、従来の三次元効果を考慮した二次元横断方向断面による解析では、補助工法の効果を評価することが困難であると思われる。一方、補助工法を施したトンネルの三次元 F E M 解析は非常に複雑な問題となり、多大の労力を要するようになる。

そこで、二次元平面ひずみ状態を仮定したトンネル縦断方向断面に、三次元効果と等価なバネを設けることによりこの問題を二次元化し、パイプルーフ等を設置した時の疑似三次元 F E M 解析を行い、地表沈下および切羽の安定性を検討したので報告する。<sup>1) 2)</sup>

### 2. 等価バネ要素を用いた疑似三次元モデル

図-1 に今回解析の対象とした三次元トンネルモデルを示す。このトンネルセンター部の縦断方向断面を平面ひずみ条件で表わした二次元モデルを考える。図-2 に三次元モデルとこの二次元平面ひずみモデルの相違を示す。この二次元モデルは平面ひずみ条件であるために、図中の斜線で示すようにトンネル部が横断方向に全て空洞となっており、三次元効果を評価できないことになる。従って、三次元モデルと二次元モデルを等価にするためには図-2 (a) に示す斜線部の土塊の効果を二次元モデルに取り込む必要がある。このためには、図-2 (a) の A 部分においては下向きの力を、C 部分においては上向きの力を、新たに三次

元効果として加える必要がある。そこで、図-2 (b) に示すように二次元モデルの各要素の節点に三次元解と等価になるバネ要素を設けることにした。このバネは水平方向バネと鉛直方向バネからなり、一方は固定端である。バネ定数  $k_v$ 、 $k_h$  は三次元弾性素掘り解析により求めた各節点の変位を逆解析することにより得られる。本来、各節点のバネ定数は各々異なった値であるが、ここでは簡便のために図-2 (b) に示すように同一水平線上では同じ  $k_v$ 、 $k_h$  の値を用いた。逆解析を5、6回繰り返すことにより、三次元解の変位と二次元解析の変位はほぼ一致する。

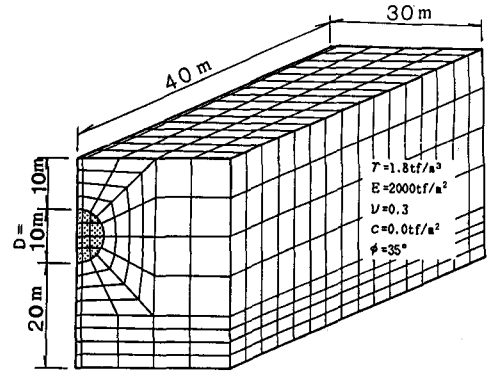


図-1 解析対象トンネル

### 3. 三次元解析との比較

図-1 に示すトンネル径  $D=10$  m、土被り  $1D$  の均質地山からなる円孔トンネルに対して、三次元解析を行った。その結果得られた各節点の変位を逆解析することにより、疑似三次元モデルの各バネ定数を決定し、その時の変形および応力状態を三次元解析結果と比較した。文献1) では全断面素掘り掘削の場合を想定したが、実際のトンネルを考えると上半先進ベンチカット掘削方式や吹付コン等の支保工が施工されることが多い。また掘進長は平均的に  $1.0$  m 程度である。そこで、実際のトンネルに近付けるために、ベンチ長  $5$  m とした上半先進ベンチカット掘削方式の場合に、一掘進長を  $1$  m、さらに支保工（吹付コン）を施工したトンネルに対して三次元解と疑似三次元解との比較を行った。図-3 (a) (b) は、ベンチカット掘削方式による素掘りの場合の三次元解析結果である。(a) は変位図を、(b) はモール・クーロンの破壊基準より

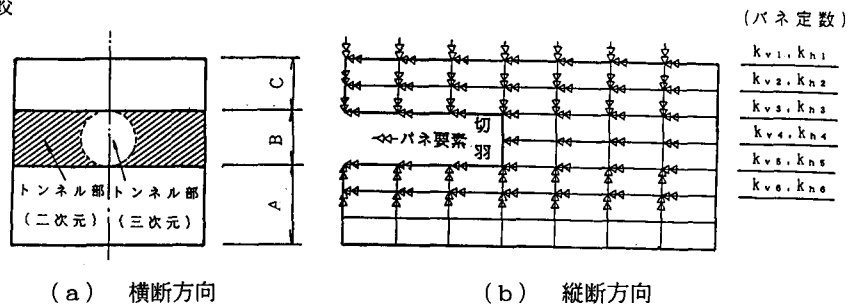
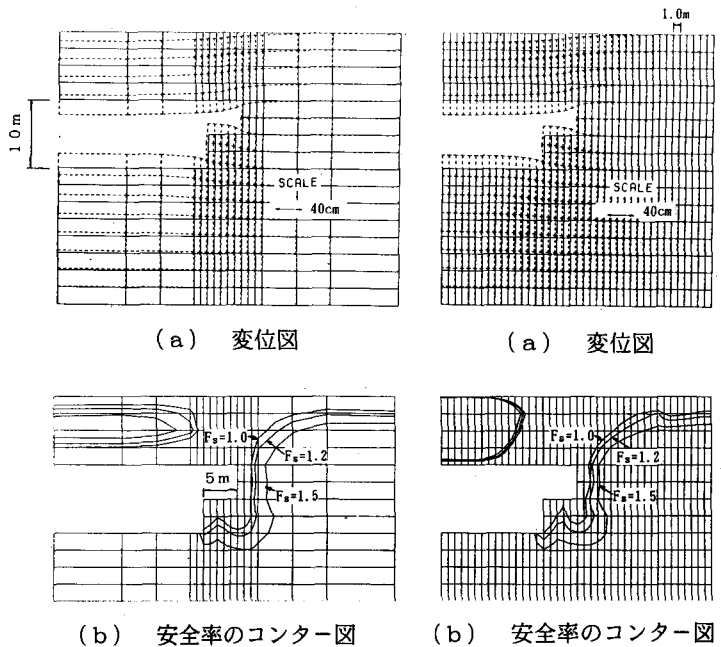


図-2 三次元と二次元モデルの相違

る結果得られた各節点の変位を逆解析することにより、疑似三次元モデルの各バネ定数を決定し、その時の変形および応力状態を三次元解析結果と比較した。文献1) では全断面素掘り掘削の場合を想定したが、実際のトンネルを考えると上半先進ベンチカット掘削方式や吹付コン等の支保工が施工されることが多い。また掘進長は平均的に  $1.0$  m 程度である。そこで、実際のトンネルに近付けるために、ベンチ長  $5$  m とした上半先進ベンチカット掘削方式の場合に、一掘進長を  $1$  m、さらに支保工（吹付コン）を施工したトンネルに対して三次元解と疑似三次元解との比較を行った。図-3 (a) (b) は、ベンチカット掘削方式による素掘りの場合の三次元解析結果である。(a) は変位図を、(b) はモール・クーロンの破壊基準より



(b) 安全率のコンター図

図-3 三次元解析結果

(b) 安全率のコンター図

図-4 疑似三次元解析結果

求めた安全率のコンター図を示している。 $F_s \leq 1.0$  の領域は塑性化している部分と考えられ、切羽前方 2.0m の範囲で塑性域となっている。また、地表面付近では、拘束圧  $\sigma_3$  が小さいために全域で塑性域となる結果が得られた。図-4 (a) (b) に疑似三次元モデルによる解析結果を示す。(a) に示す変位を逆解析により三次元解とほぼ一致させると、(b) に示す安全率のコンターも三次元解とほぼ一致し、応力的にもよりよい対応が見られる。また、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  そのものの値は切羽上方付近において三次元解より多少小さくなっている。これらのことから、当疑似三次元モデルを用いて、三次元効果を表現することがほぼ可能であり、補助工を含めた解析も比較的容易にできるものと考えられる。

#### 4. 補助工を施したトンネルの疑似三次元解析

この手法を用いて補助工を施したトンネルの疑似三次元解析を行った。図-5 に解析したトンネルの断面および寸法を示す。この断面は図-1 に示すトンネル径  $D=10\text{m}$ 、土被り 1 D の円孔トンネルと等価な疑似三次元モデルであり、各節点には円孔トンネルの三次元素掘り解析により求めた変位量を逆解析して得られた、等価なバネが入っている。また、掘削は上半先進ベンチカット方式とし、1 m ごとの掘削を行なうものとした。この断面に対し、支保工および補助工を設置して逐次掘削解析を行い、切羽の進行に伴う基準点 A (図中に示す) の沈下特性を求めた。補助工としては、パイプルーフおよびフォアパイリング工を想定し、その長さ、断面形状および打設角度を種々変化させてその効果を調べた。

図-6 に各補助工のモデル化を示す。(a) はパイプルーフ、(b) はフォアパイプの場合である。パイプルーフ工の場合は長尺物を一度に設置し、フォアパイプは長さ  $\ell$ 、打設角度  $\theta$  を変化させた。また、パイプの断面積、曲げ剛性は単位幅当りに換算してある。解析手順は図-7 に示すように、step 1 - 初期応力解析、step 2 - B 点まで素掘り掘削、step 3 - 支保工

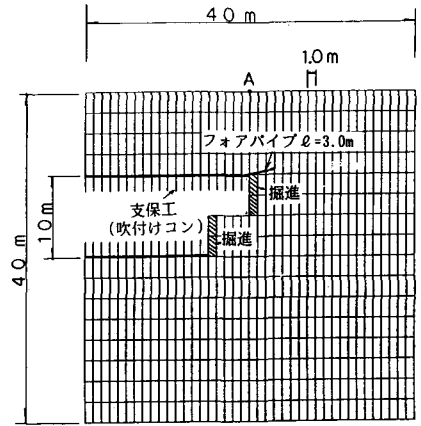


図-5 疑似三次元モデル  
(補助工あり)

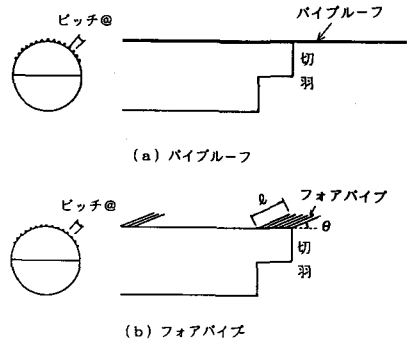


図-6 補助工のモデル化

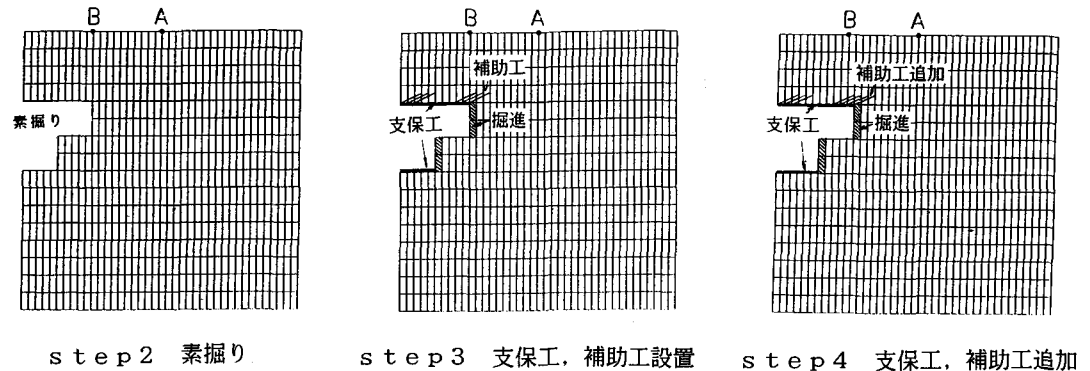


図-7 解析手順

(吹付コン) および補助工設置、その後0.1 D掘進、step4-支保工および補助工追加、その後0.1 D掘進、以下同様に逐次支保工および補助工を追加し、掘削を0.1 D毎進める方法で行った。図は補助工にフォアパイリング工 $\ell=3.0\text{m}$ を施した場合を示している。また、パイプルーフ工の場合は長尺物を一度に設置した。支保工はトラス要素でモデル化し、補助工はバンプルーフおよびフォアパイリング工を想定したので、曲げによる支保効果を優先し、梁要素でモデル化した。また、二次元断面支保工の三次元断面に対する等価な変形係数を求めることは非常に困難であることから、ここでは吹付コンを施したトンネルの三次元解析の変位を逆解析することにより求めた。

## 5. 補助工の効果

前述のようにして、パイプルーフ工を施した場合の切羽の進行に伴う基準点の地表沈下特性を求めた。図-8は地山の変形係数を $E=100\text{kgf/cm}^2$ とした場合にパイプルーフの断面形状を種々変化させた時の地表沈下特性を示す。図中の○印はパイプルーフなしの場合であり、△印は $\phi 48.6\text{mm}$ 、 $t=3.2\text{mm}$ 、□印は $\phi 114.3\text{mm}$ 、 $t=6.0\text{mm}$ 、▽印は $\phi 216.3\text{mm}$ 、 $t=8.2\text{mm}$ のパイプルーフを施した場合である。パイプルーフは長さ40mの長尺物を一度に設置し、逐次掘削解析を行った。この図からパイプの剛性が大きいほうが沈下抑制効果大きいことが分る。パイプルーフ $\phi 48.6\text{mm}$ の場合、切羽到達時のそれは13%であり、最終状態で5%程度である。また、パイプルーフ $\phi 216.3\text{mm}$ の場合、切羽到達時のそれは63%であり、最終状態で42%程度であり、切羽到達以前の先行沈下を大きく抑制していることが分る。

図-9に同様のケースの天端沈下特性を示す。天端沈下も地表沈下と同様に剛性の大きいほうが沈下が小さいことが分る。また、剛性が大きい方は先行隆起の現象が大きく生じている。図-10は上述の条件で地山の変形係数を $E=200\text{kgf/cm}^2$ とした場合である。この図からパイプの剛性が大きいほうが沈下抑制効果大きい、地山の変形係数 $E=100\text{kgf/cm}^2$ の場合に比べて沈下抑制率が低減され、パイプルーフ $\phi 48.6\text{mm}$ の場合、切羽到達時

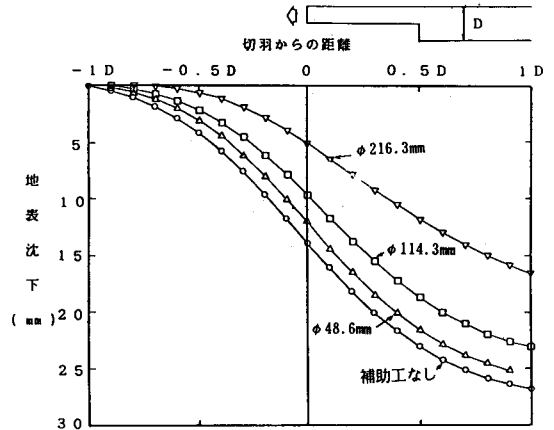


図-8 パイプルーフ工における断面形状の影響  
(地表沈下, 地山 $E=100\text{kgf/cm}^2$ )

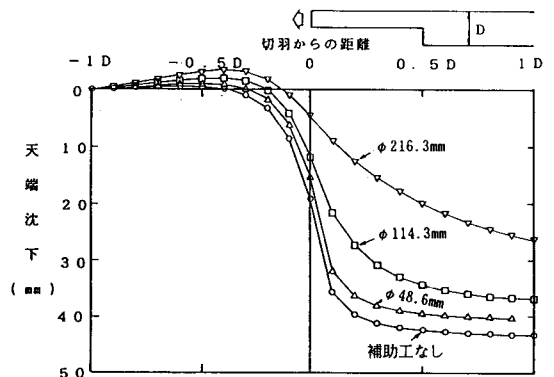


図-9 パイプルーフ工における断面形状の影響  
(天端沈下, 地山 $E=100\text{kgf/cm}^2$ )

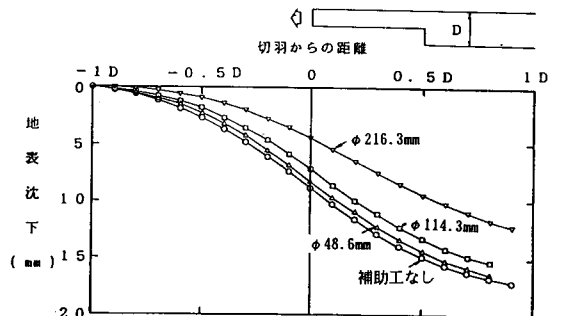
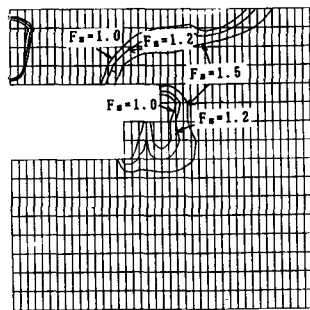
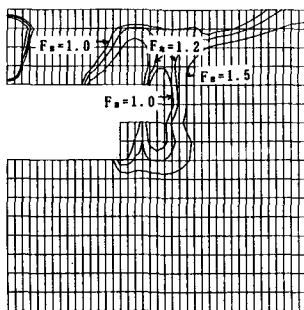


図-10 パイプルーフ工における断面形状の影響  
(地表沈下, 地山 $E=200\text{kgf/cm}^2$ )

の沈下抑制率は7%、最終状態で3%程度となっている。パイプルーφ216.3mmの場合でも、切羽到達時の沈下抑制率は50%、最終状態で31%程度である。図-11に基準点Aまで掘進した時の補助工なしの場合の安全率のコンター図を示す。また、図-12にφ216.3mmのパイプルーを施した時の安全率の



コンター図を示す。図から、パイプ

図-11 安全率のコンター図 (補助工なし)

図-12 安全率のコンター図 (パイプルーφ216.3mm)

ルーフを施した場合は、天端前上方付近の地山の安全率は高くなり、 $F_s \leq 1.0$ の塑性域が発生しない結果が得られた。また、パイプの剛性が大きいほうが天端付近の安全率は高くなる結果も得られた。

次に、フォアパイリング工φ48.6mm,  $t=3.2$ mmのパイプに対して、長さ、打設角度、地山の変形係数を種々変化させてその影響を調べた。図-13は地山の変形係数を $E=100\text{kgf/cm}^2$ とし、打設角度を $30^\circ$ の場合に打設長さを1.0m, 2.0m, 3.0mと変化させた時の基準点の地表沈下特性を示す。図からパイプの剛性が小さいために明確な差異は見られないが、長さが長い方が効果のある結果が得られた。また、打設角度に関しては、地山の変形係数、打設長等の要因により、その影響度は種々変化する結果が得られた。

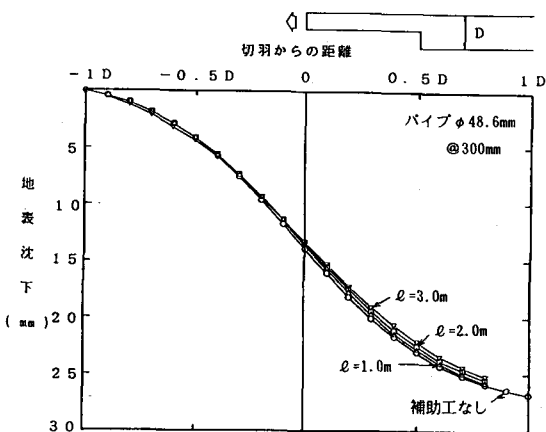


図-13 フォアパイリング工における打設長さの影響 (地表沈下, 地山 $E=100\text{kgf/cm}^2$ ,  $\theta=30^\circ$ )

## 6. まとめ

三次元効果を考慮した等価なバネを用いて、トンネル縦断方向断面を二次元平面ひずみ条件で表わした疑似三次元モデルは、三次元解析の変形および応力値をかなり近似することができる。そして、この手法を使って、パイプルー等を施したトンネルの解析を行った結果、以下の結果が得られた。

- (1) パイプルーを施した場合、地表沈下量および天端沈下量は減少する。そして、その減少の度合いはパイプの剛性が大きい方が大きい。
- (2) 地山の変形係数が高い場合には、パイプルーによる地表沈下量の減少の度合いは小さくなる。
- (3) パイプルーを施した場合、天端前上方の安全率が高くなり、切羽の安定性は向上する。そして、その度合いはパイプの剛性が大きい方が大きい。

今後は補助工を施したトンネルの三次元解析結果および実施工データとの対比を行い、当手法の検証を行って行く予定である。

【参考文献】 1) 田口善文, 波田光敬, 香川和夫, 鎌田正孝; 等価バネ要素を用いたトンネル縦断方向の応力変形解析, 第23回土質工学研究発表会, 1988. 2) 田口善文, 波田光敬, 香川和夫, 鎌田正孝; 補助工を施したトンネルの疑似三次元FEM解析について, 第43回土木学会年講, 1988