

有限要素法によるトンネル外周地盤の挙動解析例

齋藤二郎 藤原紀夫
内藤和章

Applications of the Finite Element Method to Tunnel Surroundings Behavior Analysis

Jiro Saito Toshio Fujiwara
Kazuaki Naito

Abstract

When the behavior of tunnel surroundings is analyzed by the finite element method, the advantage of the method is that the behavior of the tunnel surroundings can be clearly known since it is possible to show the stress distributions and displacements throughout the surroundings. The following four examples of analysis are shown: (1) parallel driven tunnels, (2) cutting of ground above and to the sides of existing tunnelling, (3) cutting face stability, and (4) settlement analysis of tunnelling due to embankment. These examples are compared with model tests, field measurements, etc., and the advantages of the finite element method are shown.

概要

有限要素法を用いて、トンネル外周地盤の挙動解析を行なう場合、その利点は地盤内各点の応力と変位を計算し、これらを図示することができるために、地盤内部の全体にわたって明瞭にその挙動を見ることができる点にある。解析例として、(1) 並設シールドトンネル (2) 既設シールドトンネルの上側部を開削した場合 (3) 切羽の安定 (4) 宅造盛土によるトンネルの沈下・変形解析の4つについて示す。これらと実測値および寒天模型実験結果などと比較検討し、有限要素法がトンネル外周地盤の挙動解析に用いて、非常に有力な手法であることを示す。

1. まえがき

有限要素法は、近年電子計算機の発展と結びついて構造力学、連続体の力学をはじめ、熱および浸透流など応用力学のあらゆる分野に浸透している。著者らはここ数年来、この解析方法を土木工事の実際の構造物に適用することを試みてきた^{1),2)}。ここでは、それらのうち、トンネル外周地盤の挙動解析に用いた4つの解析例を示し、これらと模型実験結果、実測値などと比較して、この解析方法の有用性を示すことにする。

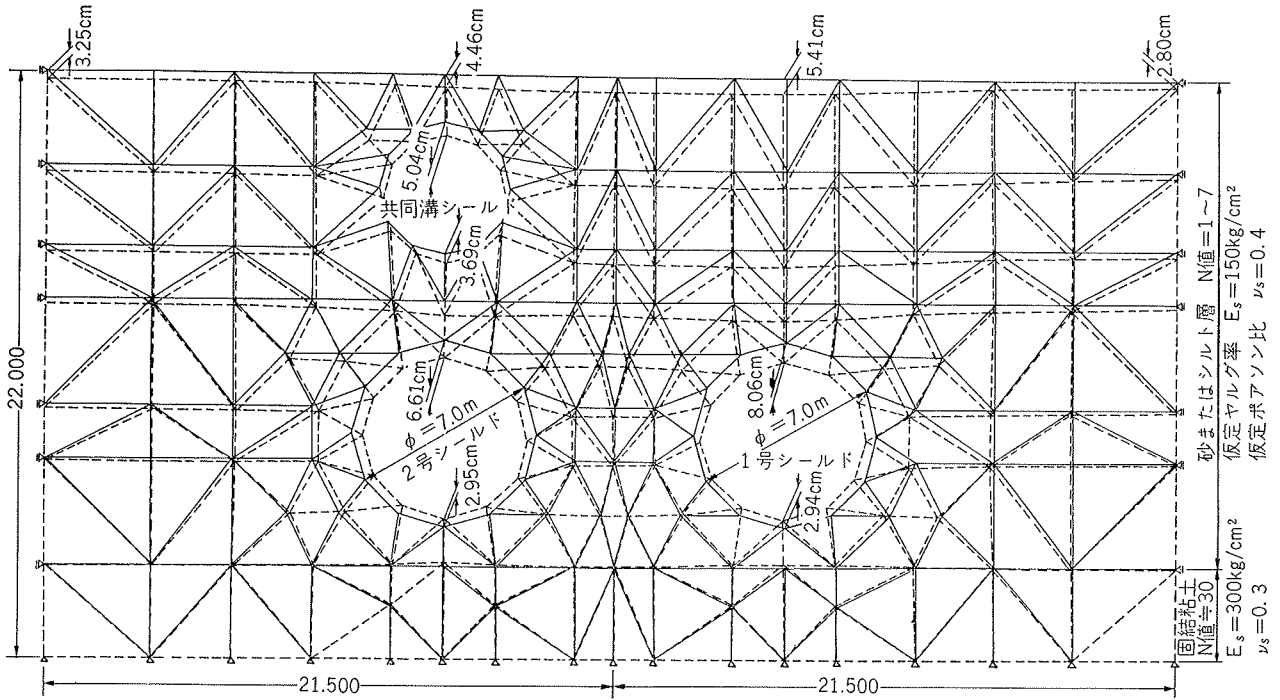
有限要素法によって弾性問題を解く場合には、基本的な式が、細部の釣合い条件を考慮することなく、取り扱う系の全ポテンシャルエネルギーを最小にすることを用いて公式化する。この詳細については、他の文献³⁾にも見られるので省略する。

2. 並設シールドの場合 (解析例・その1)

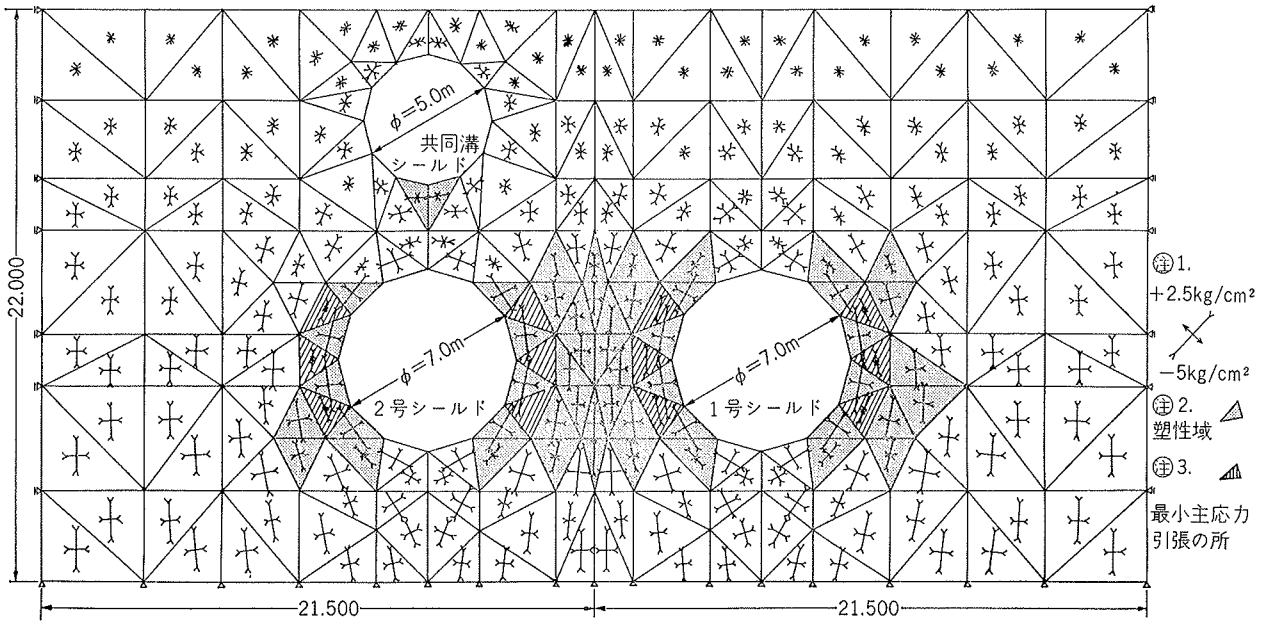
この解析例は地下鉄の並設シールドトンネルを施工

後、その上部に共同溝トンネルを建設する場合、共同溝の建設方法として、オープンカット工法が良いか、シールド工法が良いかを検討するために行なったものである。ここでは、紙面の都合で、その結果の一部を示すことにする。解析手順は重ね合せ法⁴⁾と呼ばれる方法を用いる。すなわち、地盤内にトンネルが掘削されている状態を考え、それに自重および外荷重を作用させた場合を解析するもので、トンネル掘削によって生ずる変位は、この条件のもとで得られた値から、掘削前の初期沈下量を差し引いて求める。応力状態はさきの解析結果によって、そのまま与えられる。

次に、計算条件は、(a)地盤は完全弾性体と仮定。(b)解析は平面ヒズミ問題として、シールド横断面について二次元的に取り扱う。(c)セグメント覆土は考慮しない。すなわち、トンネル掘削孔内周囲の地盤変位はテールクリアランスを越えない。(d)地盤定数などは(図-1)の右端に示す値を用いる。(e)上載荷重は考えていないので、節点荷重は自重によるもののみとなる。



図一 1号、2号シールドと共同溝シールドが通過した時の地盤変位図



図二 1号、2号シールドと共同溝シールドが通過した時の地盤内応力図

(図一)に2本の地下鉄シールドと共同溝シールドの3本のシールドが通過した時の地盤変位図を示す。地下鉄1号シールドの掘削孔(φ=7.0m)は全体に縮められるように変形し、坑頂で8.1cm下がり、坑底は2.9cm浮上っている。2号シールドの掘削孔(φ=7.0m)も全体に縮められるように変形し、坑頂で6.6cm下がり、坑底は2.95cm浮上っている。共同溝シールドの掘削孔は坑頂で5.04cm下がり、坑底では3.7cm下がりが見られる。地表面の沈下は1号シ-

ールドの真上で5.41cm、共同溝シールドの真上で4.5cmを示している。

(図二)は(図一)に対応する地盤内応力図である。図中で黒くぬりつぶした部分は塑性域である。これはクーロンの破壊基準 $\tau=C+\sigma\tan\phi$ を用いて、計算された主応力からモール円を描き、判定したものである。(図三)にその判定の一例を示す。なお、上述のC(粘着力)とφ(内部マサツ角)は土質試験結果の値を用いた。

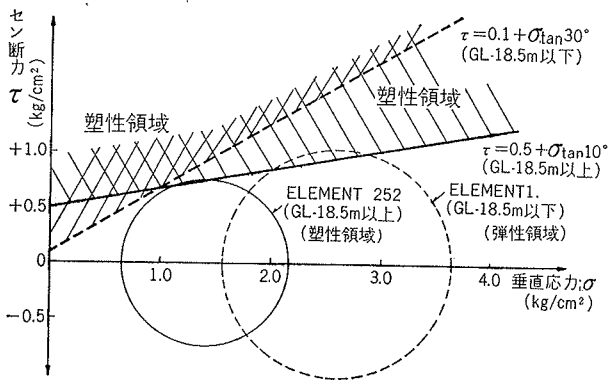


図-3 塑性領域の判定図

一方、有限要素法解析の正当性を調べるために、寒天を地盤に見立てて、これにトンネル孔を掘って、地盤の挙動をチェックしてみた。(図-4)は2本の地下鉄シールド孔部分を掘削した後、上載荷重40kgをかけて掘削孔を降伏状態にした時の写真である。写真の中の格子線は、地盤内の変位状態をみる目的で、掘削前に正方形の格子に画いておいたものである。地盤内の変位は(図-1)に似た傾向を示し、塑性領域は(図-2)に示したようにトンネル孔の両側部からでき、ここから破壊しているのが見られる。

3. 既設シールドトンネルの上側部を開削した場合(解析例・その2)

大阪において、営業中の複線断面シールドトンネル40m区間を駅部に改造するために、トンネルの上部と側部を開削する工事が行なわれた。トンネルは改造工

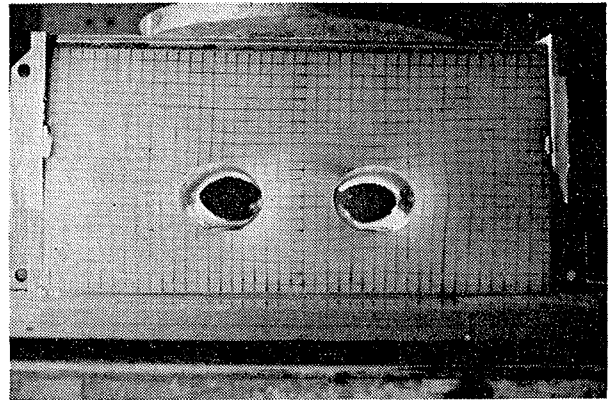


図-4 寒天模型実験によるトンネル孔の破壊

事を予想して、ダクトイルセグメントのまま残されていた。開削に先だって、トンネル内の両側には地中連続壁(幅:60cm)が施工され、その後、駅部構築は逆

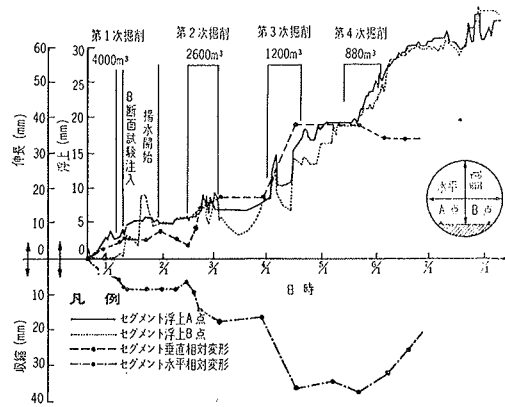


図-5 セグメントの相対変形と浮上

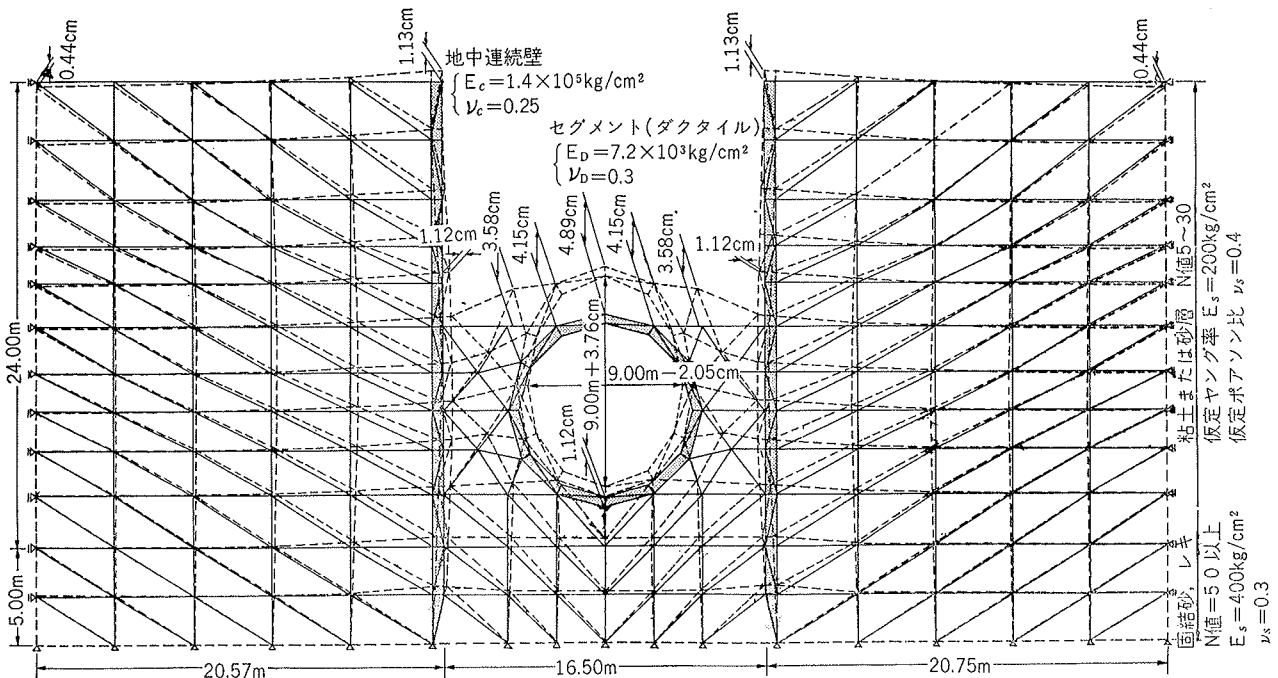


図-6 トンネル上部を開削した時の地盤および、トンネルの変位図(第3次掘削)

巻き工法で施工された。

(図一5)に実測したセグメントの相対変位と浮上量の経時変化図を示す。掘削が進むにつれて、セグメントは水平方向に縮み、垂直方向は伸び、その量はほぼ等しく最大40mmに達している。また、掘削につれてセグメントの底部は浮上し、最大35mmに達している。なお、図中に示した第1次、2次、3次、4次掘削とは、トンネルの坑頂から、それぞれ6.50m、1.90m、0.0m、-3.70mの所までの掘削を意味している。

(図一6)は有限要素法で解析した第3次掘削時点におけるトンネルを含めた地盤の変位図である。計算条件としての境界拘束条件および地盤・セグメント・地中連続壁の弾性定数などは、本図の中に示した通りである。坑頂で4.9cm浮上がり、坑底部は1.1cm浮上している。セグメントの相対的な変形は垂直方向で3.8cm伸び、水平方向には2.1cmだけ縮んでいるのが見られる。これらの値は(図一5)に示した第3次掘削時点における実測値とほぼ等しい。

4. 切羽の安定 (解析例・その3)

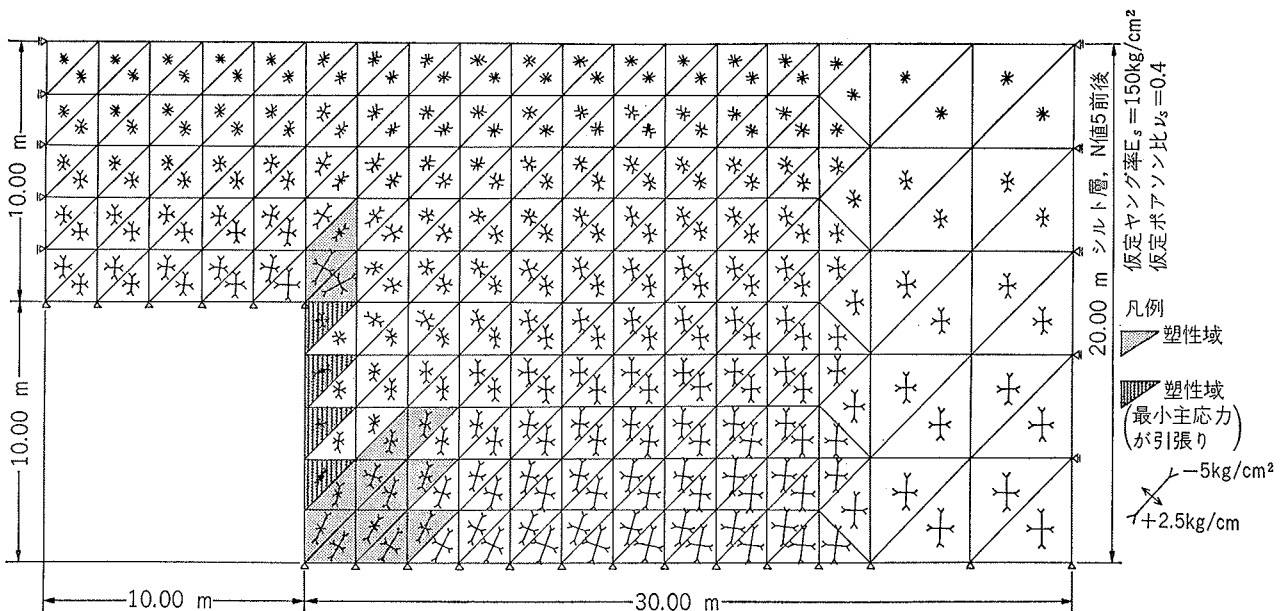
シールド工事において、切羽の安定は重要である。切羽の安定が保たれないと、切羽の崩壊をきたす。崩壊しないまでも、大きな地表面沈下の誘因となつて、しばしば問題を起す。実際の施工にあたっては、切羽をフェースジャッキで押さえ、切羽全面を一度に開

放することなく、一部ずつ開きながら掘削を進めてゆく方法がとられる。

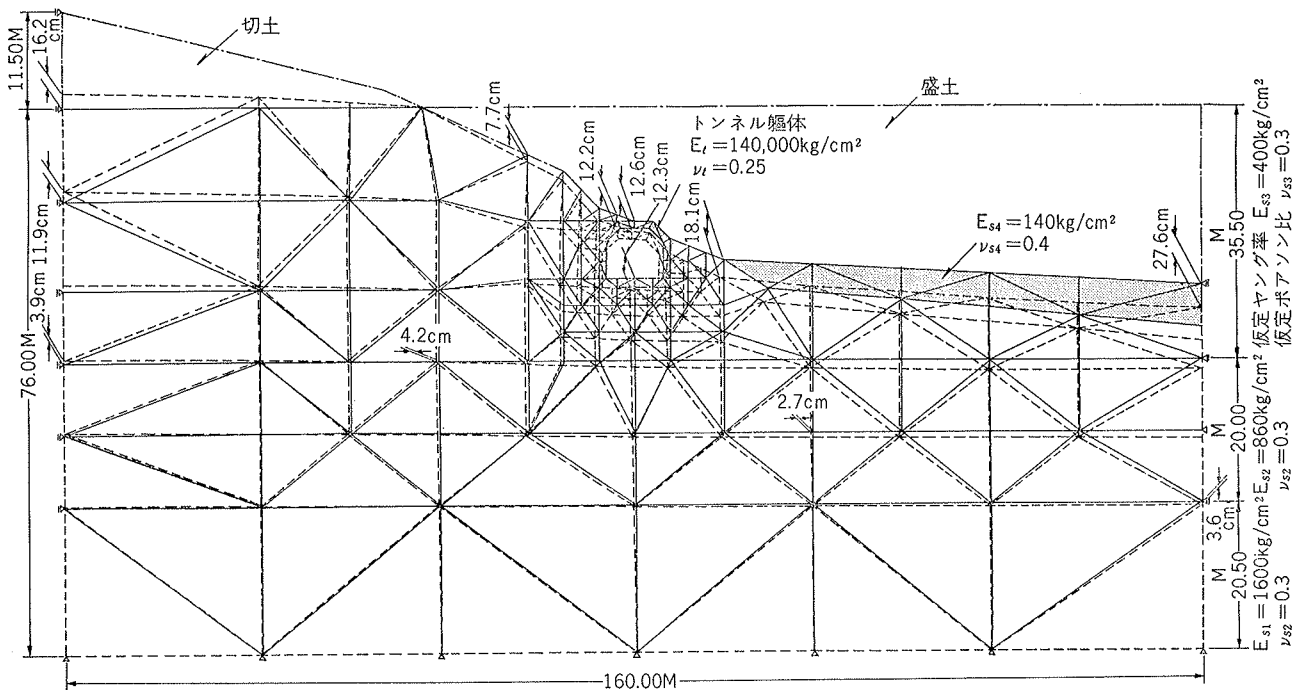
解析のモデルとして、比較的軟弱なシルト層を通過する外径10mのシールドを想定する。外径10mのトンネルは地下鉄の複線断面のトンネルを意味する。このトンネルの切羽をフェースジャッキで押えないで、全面開放した場合の地盤変位および応力状態を解析してみた。(図一7)は解析結果であり、土被りとトンネル外径が等しい場合の地盤内応力図である。計算条件は図中に示す地盤定数と境界拘束状態を用いている。図中で黒くぬりつぶした部分は塑性領域を示している。この判定には前述したクーロンの破壊基準を用いた。この際、粘着力 $C=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 、内部マサック $\phi=10^\circ$ と仮定した。切羽周辺の応力は、切羽の頂部に極を有し、切羽の底部を通過する対数ら線にそつて主応力方向が定まり、この対数ら線が破壊面となっているのが見られる。この現象は著者らの模型実験⁵⁾でも見られた。ここでは紙面の関係で示すことができないが、この時の切羽面は5.8cmふくれ出し、地表面は切羽から10m離れた所で1.2cm沈下した¹⁾。

5. 宅造盛土によるトンネルの沈下 (解析例・その4)

武蔵野南線のあるトンネルはその完成後、その上に約20mの宅造盛土が施工される。そのため、この宅造盛土によって、トンネルがどのように変形・沈下す



図一7 切羽を全面開放した場合の地盤内応力図



図一八 宅造盛土によるトンネルおよび地盤の変位状況

るかを、有限要素法解析を用いて検討してみた。

(図一八)は解析結果であり、トンネルを含む地盤の変位図である。地盤定数などの計算条件は図中に示した通りである。なお、地盤のヤング率 E_s の推定には、この地盤が稲城砂と呼ばれる締った細砂層であることを考慮して、 $E_s = 1.5(71 + 4.9N)$ (kg/cm^2) を用いた。ただし N は N 値を意味している。

宅造盛土によって、トンネル底部は 12.3cm 沈下し、頂部は 12.6cm 沈下している。したがって、トンネル構築自体は鉛直方向に 0.3cm 縮むことになる。

地盤は全体的にみると右側が沈下し、左側が隆起している。これは右側を盛土するのであるから当然であろう。ただし、土の変形特性として、载荷による沈下と除荷による隆起はその重荷が同じであれば隆起の方が小さい。したがって、左側の隆起はこの現象を表わしていると思われるので、絶対値は計算値よりも小さくなるであろう。

6. むすび

以上に示した解析例に見られるように、有限要素法はトンネル外周地盤の挙動解析に用いて非常に有効な手法であると言える。一方、これらの解析結果の問題点を述べると、地盤挙動の傾向はつかめても、その絶対値(変位量など)はそのまま信用することができない点にある。

今後改良すべき点を具体的に述べると次のごとくなる。(1)二次元解析であるため、横断方向の地盤のゆるみと同時に起こる切羽の呼び込みを同時に解析していない。(2)地盤を弾性体と仮定するには無理があり、加えて、この弾性定数を決定する方法があいまいで現在の所、解析者の総合的判断にたよっている。(3)トンネル掘削時における地下水低下による影響、たとえば圧密現象などは考慮されていない。(4)境界拘束条件と要素の大きさなどについての詳しい検討がなされていない。(5)裏込め注入の影響も考慮していない。これらの問題点のうち、あるものは容易に解決されるものも含まれており、今後の解析では大いに検討を進めるつもりである。

参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 藤原; 有限要素法によるシールド外周地盤の挙動解析例, 土木学会第27回講演, III-148
- 2) 斎藤, 藤原; 有限要素法による浸透流・熱流などの解析, 大林組技術研究所報, No. 7, 1973
- 3) 吉識雅夫監訳・O・Cシィンキーヴィッツ/Y・Kチューン著; マトリックス有限要素法, 培風館
- 4) 川本, 上野, 宮地; 双設トンネルの開削に伴う応力および変形状態, 土木学会第24回講演, III-95
- 5) 斎藤, 内藤, 藤原; シールド切羽の安定に関する実験的研究, 土木学会第26回講演, III-135