

トンネル掘削による地表面沈下予測有限要素解析手法について  
FEM ANALYSIS OF SURFACE SETTLEMENT BY TUNNEL EXCAVATION

角湯 克典\*・猪熊 明\*\*・山村 浩介\*\*\*

Katsunori KADOYU, Akira INOKUMA and Kousuke YAMAMURA

In case we analyze the surface settlement that caused by tunnel excavation by FEM, there are three major important factors, ANALYZED AREA, ROCK MASS QUALITY, FORCE FOR THE SIMULATION OF TUNNEL EXCAVATION. The result of analysis depends on these three factors. But in analyzing the surface settlement by FEM, it is well known that the bigger the earth covering is, the bigger the calculated surface settlement becomes, if the other conditions are the same. So in this study we regard loosening pressure of Terzaghi as the force for the simulation of tunnel excavation. Using this proposed method, we show the real surface settlement can be suitably estimated.

Keyword:FEM, surface settlement, loosening pressure of Terzaghi, force for the simulation of tunnel excavation

## 1. まえがき

地下空間の利用は、近年におけるわが国の過密化した都市部における土地利用を考えたとき必ず話題にのぼるものの一つということがいえよう。しかし一方で地下空間を構築する際には地表面沈下が発生する場合が多く、都市部においては地上部及び地下部の土地利用が高密度化しているため、地表面沈下は適切に制御すべきであると考えられ、そのため事前設計の段階で地表面沈下を予測することが重要である。現在、トンネル掘削にともなう地表面沈下量を予測する手法としては経験式によるものおよびFEM等の数値解析によるものの大きく2つに分類することが出来よう。本研究はこのうちFEMで地表面沈下量を解析する際、応力解放率の設定によって地表面沈下がどの様に影響を受けるかを解析したものである。

## 2. 従来の解析手法の問題点と提案する手法

### 2・1 従来の解析手法の問題点

---

\* 正会員 建設省土木研究所 トンネル研究室

\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所 トンネル研究室長

\*\*\* 建設省土木研究所 トンネル研究室 部外研究員 東洋建設(株)

有限要素解析を用いて地表面沈下を解析する際、一般に解析領域、地山物性値、応力解放率の3要素を如何に設定するかが非常に重要でありかつこの設定方法により解析結果が左右される。これまでの解析で解析対象とする領域については、下方境界としては応力集中の支障がなければトンネル下端インパートよりトンネル直径、側方境界としてはトンネル中心より土被り厚の2倍程度を確保するのが妥当であると考えられる<sup>1)</sup>。また地山物性値に関しては原則としては孔内載荷試験や標準貫入試験等の原位置試験をもちいて変形係数、内部摩擦角、粘着力を設定するのが妥当であると考えられる。

応力解放率については従来までの考え方によれば、初期地山応力が切羽到達前と切羽到達後である割合をもって解放され合計100%解放されるという考えに基づいて解析されてきた。しかしながらこの考えの基に解析を行えば均一地盤においては土被り比が大きくなれば地表面沈下量が大きくなるという解析結果が得られる(図-1)。これに対して、実際のトンネルでは土被りが大きくなると、アーチアクションが作用して、地表面沈下量は小さくなる。これは各種実験によっても確認されている。このようなことが起こる要因として考えられるのは、土被りが大きくなるとアーチアクションが作用するという現象を数値解析では十分表現できないということに起因していると考えられる。

また、全く同様な地盤に図-2のように開削工法とトンネル工法で空間を構築する際、自由面の浮き上がり量すなわちリバウンド量は、開削工法で施工された方が大きくなることが実測の結果として知られている。これは開削工法では自由面にもともと作用していた鉛直荷重が解放されリバウンドが発生するのに対して、トンネル工法では、鉛直荷重に対して地山がアーチアクションもしくは免圧圏が形成されることによりリバウンド量が開削工法に比して小さくなると説明される。従来の解析手法はこの違った現象を初期応力を解放するという同じ取り扱いとして解析を行っている。こういったことが土被り比が大きくなると地表面沈下量が大きくなるという解析結果を生じる要因と考えられる。

### 2・2 提案する手法

本研究でわれわれは、トンネル掘削面に掘削後形成される免圧圏を数値解析上考慮する必要があると考えた。つまりトンネルが掘削される予定面には、もともと土被り相当の初期応力が作用するが、トンネルが掘削されると免圧圏が形成されるためトンネル掘削面には免圧圏相当の土塊の荷重が作用するものと考えた。この免圧圏相当の土塊の荷重としてわれわれは、シールド工法のセグメント覆工の設計に用いられるTerzaghiの緩み土圧を考えた。すなわちアーチアクションを数値解析上反映させる手段として支保立て込み後に解放され支保に作用する土圧をTerzaghiの緩み土圧であると提案し解析を行う。

ここで従来からある土圧論としてアーチ作用と免圧圏について説明を加える。これを模型的に考える。まずトンネルの側壁下部を通るすべり面が生じ、それより上の部分が滑り落ちようとする。したがってすべり

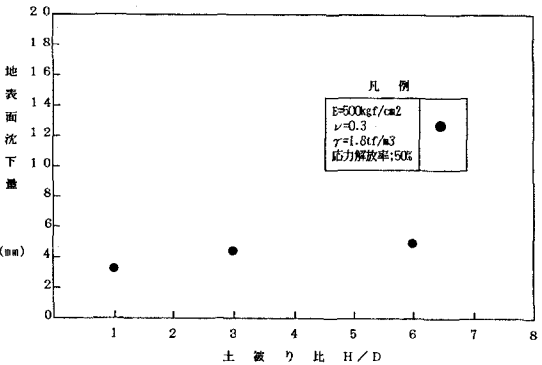


図1 均一地盤における地表面沈下解析値と土被り比との関係 (下方境界1D 側方境界2H 支保なし)

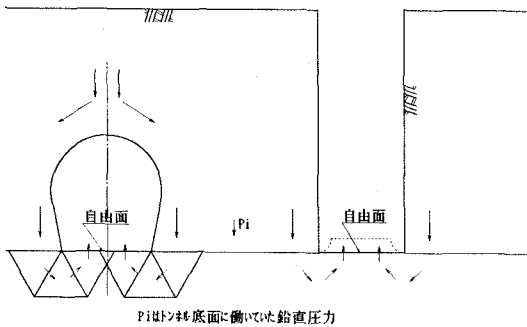


図2 山岳トンネル工法と開削工法

面の下方には反対方向の摩擦抵抗が働く。トンネルの中では地山が空所へすべり出すことによって、すべり面の空所の側に地山が圧縮されるので更に第2のすべり面が生じる。このように次々にすべり面が生じ、その上の地山の部分が移動していく。このような現象は継続破壊と呼ばれるもので、周辺の地山の岩片が自由に落下しえないときはついには1つの安定したすべり面の包絡線によって囲まれたゾーンができる。このゾーンは一種の免圧帯となり、上方からの荷重はその外側の地山の部分が受け持つため、中では地山は破碎されて相互にせり持ってアーチ（グラウンドアーチ）を形成すると考えられている<sup>2)</sup>（図-3）。このことからトンネル掘削をシミュレートするためにはアーチアクションおよび免圧圏を考える必要がある。トンネル掘削時には免圧圏の外側の地山に起因する初期応力は、トンネル掘削に影響を与えないものと考えて、トンネル掘削面には掘削後Terzaghiの緩み土圧を作用させるのは妥当であると考えた。さらに以上のようなことを裏づけるものとし

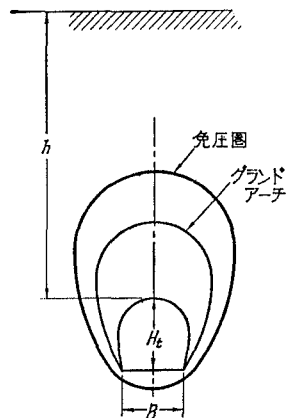


図3 アーチアクションおよび免圧圏

まず1つは現在の設計理論の考え方である。トンネルの支保構造の設計では、土圧としては緩み土圧と真の土圧が考えられている。緩み土圧は、地山には節理や層理と呼ばれるような力学的な不連続面が多数存在するので、力学的不連続面のところで分離や移動が生じ、トンネル周辺の地山が緩むために生じるものと考えられている。一方真の土圧は通常、初期応力から推定されるものである。しかし、初期応力である真の土圧が問題となるのは稀であり、力学的な不連続面の影響による地山の挙動が主要な問題となると考えられているため、トンネルの支保構造の設計ではほとんど緩み土圧が問題となる<sup>3)</sup>。したがって、解放応力も緩み土圧に相当する応力を想定するのは妥当であると考ええる。

もう1つわれわれの考えを裏付けるものとしては、シールド工法で施工されたトンネルの地表面沈下量の解析例である。シールド工法で掘削されたトンネルの地表面沈下量を解析する手法としては、掘削相当外力として初期応力を100%解放しないやり方が一般的である。一例を挙げれば、硬質粘性地盤で泥水シールドで施工されたトンネルの地表面沈下量を解析する手法として、掘削相当外力に掘削予定面の初期応力から泥水圧を差引きある率を乗じたものを用い、これを掘削予定面に作用させ掘削をシミュレートしているものである。またこの例で解析を行えば現地地の地表面沈下量の実測データとよく適合することが確認されている<sup>4)</sup>。

よって掘削相当外力を初期応力とせず、Terzaghiの緩み土圧とする本提案手法は、以上の2点から支持されるものと考え、またアーチアクションを数値解析上反映させる手段として現象を的確に理解したものと考え解析を行った。

### 3. 緩み土圧による応力解放率の設定と試計算

解析は二次元平面歪み条件で弾性線形モデルを用いて有限要素解析を行った。解析手法としては、一般には実際の切羽の三次元的進行を二次元で表現するために応力解放率というものを適当に設定し、切羽到達前の解放応力と切羽到達後の解放応力を求めるという解析をおこなっている。通常、解放応力としては切羽到達前に初期地山応力の30～50%が解放され、切羽到達後に残りの初期地山応力が解放されるとしている。本研究ではこのような従来の応力解放率の設定により解放応力を算定する方法とは異なり、シールド工法のセグメント設計等に用いられているTerzaghiの緩み土圧をもちいて解放応力を算定する方法を提案する。この解析手法によれば、切羽到達後に解放される応力をTerzaghiの緩み土圧であると規定し切羽到達前に解放される応力はこのTerzaghiの緩み土圧にある係数（0～1）を乗じたものであるとする。解析対象とするモ

デル地盤としては東京圏周辺を対象とした地盤物性に関するアンケート調査および文献・資料調査を行い設定した。これを表－１に示す。表－１は東京周辺の洪積層のうちでも比較的固結が進んだ地山であるということができよう。

解析手順としてはまず解析領域内の初期応力を自重解析により算定し（STEP 1）、つぎにTerzaghiの緩み高さに基づく解放応力を計算し（STEP 2）、解放応力（Terzaghiの緩み土圧にある率を乗じたもの）に基づく切羽到達直後の変位分布等の計算を行う（STEP 3）、最後に解放応力（Terzaghiの緩み土圧）に基づく切羽到達後の変位分布等の計算値をSTEP 3の計算結果に加算する（STEP 4）。解析ケースとしては表－２に示す

ような２４ケースで行うものとする。Terzaghiの緩み高さは各土被り厚にたいして表－３のようになる。ここで土被り厚が小さい場合切羽到達前と切羽到達後の解放応力の和が自重解析による初期応力を越える場合が考えられるが、このときは初期応力が切羽到達前と切羽到達後で表－２に示す割合で解放されるものとする。解析によりえられたトンネル中心直上の地表面沈下量を図－４、図－５に示す。これらより次のようなことが言える。

- ①支保なしのケースで緩み高さに基づき解放応力が算定されている場合は、地表面沈下量は土被り比が大きいほど小さくなる傾向を示す。
- ②支保ありのケースでは切羽到達前後の解放応力比によって地表面沈下量は、土被り比が大きくなるほど地表面沈下量が大きくなるパターンもしくは、ある土被り比のときに地表面沈下量が最大となるパターンを示している。

表－１ モデル地盤の物性値

| 物性                      | 物 性 値 |
|-------------------------|-------|
| N値                      | 50以上  |
| 湿潤密度 $\gamma_t$ (g/cm3) | 1.90  |
| 一軸圧縮強度 $qu$ (kgf/cm2)   | 5.0   |
| 粘着力 $c$ (kgf/cm2)       | 1.0   |
| 内部摩擦角 $\phi$ (deg)      | 35.0  |
| 変形係数 $E$ 50             | 1000  |
| ポアソン比 $\nu$             | 0.48  |
| 側圧係数                    | 1.0   |

表－２ 解析ケース

| パラメータ                |                        |
|----------------------|------------------------|
| トンネル断面               | D： 10 m                |
| 土被り比                 | 1.0， 2.0， 3.0， 5.0     |
| 解析領域                 | 側方境界2H、下方境界1D          |
| 支保構造                 | 無支保<br>吹付けコンクリート(15cm) |
| $\Delta Pf/\Delta P$ | 0/1， 0.5/1， 1/1        |

ここで  
D：円形トンネル断面直径  
H：トンネル直上の土被り厚  
 $\Delta P$ ：切羽到達後の解放応力(Terzaghiの緩み土圧)  
 $\Delta Pf$ ：切羽到達前の解放応力

表－３ Terzaghiの緩み高さ

| 土被り比 | Terzaghiの緩み高さ(cm) |
|------|-------------------|
| 1    | 554.50318         |
| 2    | 917.05817         |
| 3    | 1154.1102         |
| 4    | 1410.4443         |

#### ４．計算結果と現場計測との比較

##### ４・１弾性解析と現場計測との比較

次に、本研究ではこの解析結果がどの程度現場の実績結果を反映しているかを確認するために文献調査<sup>5)</sup>を行い地表面沈下量の実測値と本解析結果の比較を行った。このとき解析結果である地表面沈下量の絶対値を支配するものとして変形特性を表す変形係数が実測を行った地盤と解析対象とした地盤で大きく異なればこれらを単に比較するだけでは全く意味の無いものになってしまう。よって本研究では実測値のトンネルごとの地質の相違を補正する１つの手段として変形係数による地表面沈下量の補正を次式で行う事を考えた。

$$S' = S \times E_p / E$$

ただし

- $S'$ ：変形係数で補正した地表面沈下量
- $S$ ：地表面沈下量の実測値
- $E$ ：文献調査によって得られている変形係数  
(孔内載荷試験等)
- $E_p$ ：パラメータスタディに用いた変形係数  
(1， 0 0 0 kgf/cm<sup>2</sup>)

この補正した地表面沈下量の実測値を解析結果と合

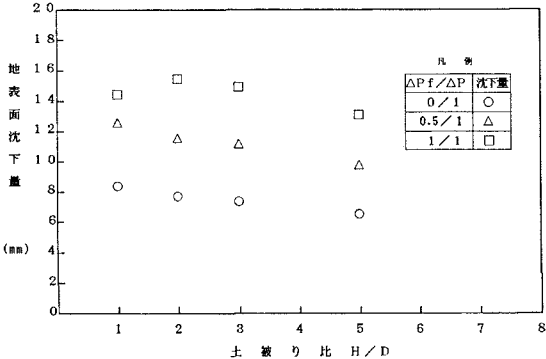


図 ４ パラメータスタディによる地表面沈下と土被り比との関係  
(下方境界1D 支保なし)

わせて図-6、図-7に示す。ここでは解析結果のどのケースが実測値と適合しているかを判断するため、解析結果に対する実測値の誤差を求めた。

その結果

- ①支保なしの場合は、 $\Delta Pf / \Delta P = 0.5 / 1$  がもっとも誤差が小さい。
- ②支保ありの場合は、土被り比が2以下の時は $\Delta Pf / \Delta P = 1 / 1$  がもっとも誤差が小さく、土被り比が2より大きい時は $\Delta Pf / \Delta P = 0.5 / 1$  がもっとも誤差が小さい。

という結論が得られた。

よって今後解析を行う際は、支保なしの場合は切羽到達前解放応力：切羽到達後解放応力=0.5：1、支保ありの場合は、土被り比が2以下の時は切羽到達前解放応力：切羽到達後解放応力=1：1、土被り比が2より大きい時は切羽到達前解放応力：切羽到達後解放応力=0.5：1の比率で原則として行う事とした。

4・2 土被りが浅い場合の弾塑性解析と現場計測との比較

Terzaghiの緩み土圧を用いてトンネル掘削にともなう地表面沈下量を予測する手法は、3.で行った解析によりその妥当性はほぼ認められた。しかしながら図-6、図-7より土被り比が2より小さくなる範囲においては解析結果と実測値が適合しているとは言いがたい。これは土被り比が小さくなると土のアーチアクションが期待できずトンネル掘削によって生じる天端沈下量がそのまま地表面沈下量となるためであると考えられる。よって本研究ではこのような土被り比が浅い場合の地山の挙動を弾塑性解析を用いれば表現出来るのではないかと考え解析を試みた。解析は有限要素解析をもちいて二次元平面歪み条件で弾塑性解析を行った。また応力-ひずみモデルとしては完全塑性モデル、破壊条件式としてはDrucker-Pragerの降伏条件を用いた。解析手法、解析手順は弾性解析と同様とする。また解析対象とするモデル地盤については塑性領域を発生させるために強度特性を支配する内部摩擦角、粘着力を表-4のように変化させた。また解析ケースとしては土被り比の浅い場合（土被り比 0.5,1.0,1.5）を対象とし支保構造のモデル化は考えず、解放応力については3.の結果に基づいた。解析結果を図-8に示す。また3.と同様に補正した地表面沈下量の実測値を解析結果と合わせて図-9に示す。これらより本条件のようなケースでは次のような結論を得る事が出来る。

①弾塑性解析を用いて解析を行っても土被り比が小さいときの地表面の変形挙動は再現する事が出来ない。

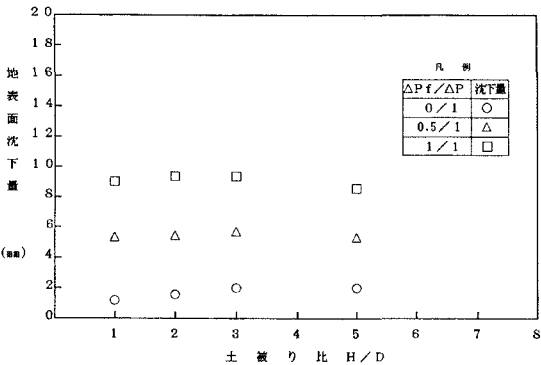


図5 パラメータスタディによる地表面沈下と土被り比との関係 (下方境界1D 支保あり)

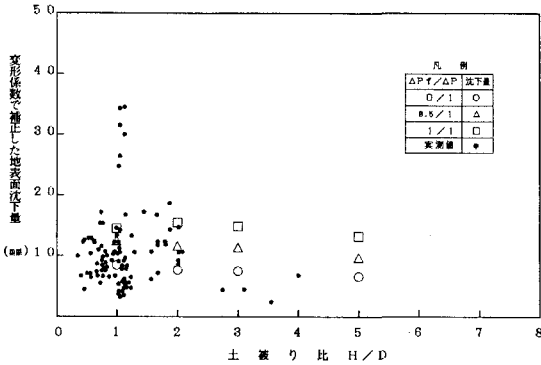


図6 パラメータスタディと文献調査の沈下量の補正値との対比 (下方境界1D 支保なし)

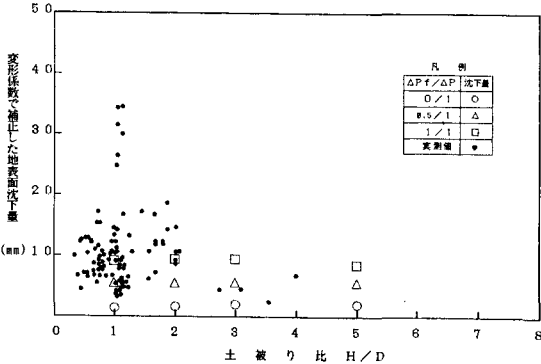


図7 パラメータスタディと文献調査の沈下量の補正値との対比 (下方境界1D 支保あり)

表-4 解析条件

| パラメータ                          |            |
|--------------------------------|------------|
| 内部摩擦角 $\phi$ (deg)             | 25.0, 35.0 |
| 粘着力 $c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0.1, 1.0   |

対象とし支保構造のモデル化は考えず、解放応力については3.の結果に基づいた。解析結果を図-8に示す。また3.と同様に補正した地表面沈下量の実測値を解析結果と合わせて図-9に示す。これらより本条件のようなケースでは次のような結論を得る事が出来る。

①弾塑性解析を用いて解析を行っても土被り比が小さいときの地表面の変形挙動は再現する事が出来ない。

②強度特性（土の内部摩擦角、粘着力）が変化しても地表面沈下量にはさして影響を与えない。

また土被り比が小さい場合に地表面沈下量の実測値がばらつくのはこういった土の強度、変形特性だけが要因ではなく施工の良否がかなり主要な要因になっていると考えられる。

## 5. 結論

本解析より以下のような結論が得られた。

有限要素解析を用いて地表面沈下量を解析する場合、弾性解析では、切羽到達後の解放応力をTerzaghiの緩み土圧とし切羽到達前と切羽到達後の解放応力の比は支保をモデル化しない場合は0.5/1、支保をモデル化する場合土被り比が2以下の時は1/1、土被り比が2より大きいときは0.5/1とすると解析値と実測値とは比較的よく一致する。地山をモデル化するときN値を用いて変形係数を推定するとき、 $E = 7N$ とすると地山によっては変形係数を過小に評価する事がある。

## 6. おわりに

本研究は現場のニーズを鑑み比較的容易にしかも精度よく地表面沈下量の予測値を得る事を目的として行ってきたが、地表面沈下量はこれら解析結果のみから判断するのではなく既往の工事事例や計測結果などを参考に総合的に判断する必要がある。今後はこれらをふまえ地表面沈下予測・対策マニュアル（案）を作成する予定であり、さらにデータの蓄積を図り問題点があれば随時マニュアルに手を加えて行きたいと思っている。最後に本研究は、建設省土木研究所、（財）先端建設技術センター、民間12社（（株）大林組、（株）奥村組、川崎重工業（株）、（株）熊谷組、佐藤工業（株）、清水建設（株）、東急建設（株）、同和公営（株）、（株）間組、（株）フジタ、前田建設工業（株）、（株）三井三池製作所）で昭和63年度より平成3年度にわたり行ってきた建設省総合技術開発プロジェクトの研究において得られた成果の一部である。

## 7. 参考文献

- 1) 角湯克典、猪熊明、山村浩介：「未固結合水地山トンネルにおける地盤変状予測に関する研究」、第1回トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻、pp.159～164、1991.12.
- 2) 高橋彦治：湧水と地圧、pp.99～PP.100、1963.
- 3) 道路トンネル技術基準（構造編）・同解説、日本道路協会、1989.
- 4) 中山、中村、中島：「泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について」、土木学会論文集、第397号、pp.133～PP.141、1988.9.
- 5) トンネルと地下、日本トンネル技術協会、vol.12,no9,1981～vol.21,no9,1990 の内、地表面沈下実測値の記してあるもの

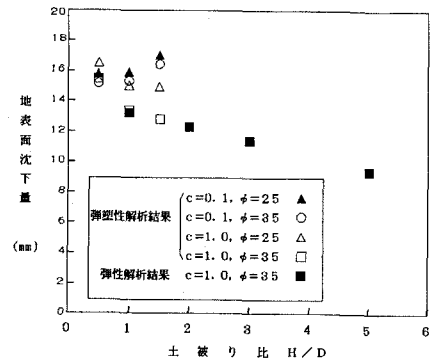


図8 地表面沈下量と土被り比との関係（無支保の場合）

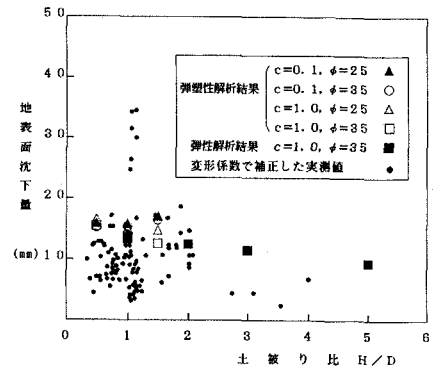


図9 解析結果と実測値との対比（無支保の場合）  
（実測値は変形係数で補正したもの）