3-4

# 施工過程を考慮したシールド掘進に伴う近接構造物の影響予測

沢田充弘[1]・太田　拡[2]・橋本　正[3]・長屋淳一[3]
[1]大阪市交通局・[2]大阪市交通事業振興公社・[3]地域 地盤 環境 研究所

## 1．はじめに

シールドトンネル掘削に伴う周辺地盤および近接構造物への影響予測手法としてＦＥＭ解析が多用されるが，多くは想定される応力解放率により応力解放力を評価し，トンネル周辺地盤に解放応力を与えて解析される。しかし，現場計測結果ではシールドマシン通過時に周辺地盤を隆起させたり，シールド上部は沈下するが，シールド側部では地盤を押し広げるような挙動が計測されており，施工条件によっては解放応力でなく付加応力が作用し，しかもトンネル円周の位置により解放応力あるいは作用応力の状態は異なることが考えられる。本論文では，現場計測データを基にシールドマシン通過時における地盤変形と切羽圧力や裏込注入圧などの施工データの関係よりシールドマシン通過時における地盤変形要因を分析し，シールド掘削のＦＥＭ解析における施工条件を考慮した荷重モデルの検討を行った。

## 2．シールド掘進に伴う地盤変形

シールド掘進に伴う地盤変形の要因について現場計測データを基に検討を行う。検討に用いたシールド現場の施工概要を表-１，表-２に示す。表-１に示す計測現場は，シールド外径がφ5430～7250mm で，いずれも沖積粘土層を掘進したものであり，表-２は洪積粘土および砂･砂礫層を掘進したものであり，比較的硬質な地盤である。図-１，図-２にシールド通過に伴う周辺地盤の鉛直変位と水平変位の変化を示す。なお，鉛直変位はシールド直上部，水平変位はシールド側部におけるスプリングライン深度の計測値である。

表-１　計測現場の施工概要（軟弱粘土地盤）

| 現場名 | 計測断面 | 施工条件 | | | 地盤条件 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 土被り厚 (m) | ｼｰﾙﾄﾞ径 (m) | 施工方法 | 掘削土層 | N値 上部 | N値 側部 | $q_u$ (kN/m²) 上部 | $q_u$ (kN/m²) 側部 |
| A 現場 | 1 断面 | 15.3 | 7.15 | 泥水 | 沖積粘土 | 0 | 2 | 98 | 127.4 |
| | 2 断面 | 15.3 | 7.15 | 泥水 | 沖積粘土 | 0 | 2 | 98 | 127.4 |
| B 現場 | 1 断面 | 11.0 | 5.44 | 泥水 | 沖積粘土 | 2 | 3 | 88.2 | 117.6 |
| C 現場 | 1 断面 | 17.9 | 7.25 | 泥土圧 | 沖積粘土 | 3 | 7 | 98 | 117.6 |
| D 現場 | 1 断面 | 14.8 | 5.44 | 泥土圧 | 沖積粘土 | 3 | 4 | 165 | 194 |
| E 現場 | 1 断面 | 12.1 | 7.25 | 土圧 | 沖積粘土 | 3 | 4 | 98 | 127.4 |
| | 2 断面 | 12.2 | 7.25 | 土圧 | 沖積粘土 | 3 | 4 | 98 | 127.4 |
| | 3 断面 | 12.7 | 7.25 | 土圧 | 沖積粘土 | 3 | 4 | 98 | 127.4 |

表-２　計測現場の施工概要（硬質地盤）

| 現場名 | 計測断面 | 施工条件 | | | 地盤条件 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 土被り厚 (m) | ｼｰﾙﾄﾞ径 (m) | 施工方法 | 掘削土層 | N値 上半 | N値 下半 | $q_u$ (kN/m²) 上半 | $q_u$ (kN/m²) 下半 |
| F 現場 | 1 断面 | 28.2 | 5.44 | 土圧 | 大阪層群粘土 | 16 | | — | — |
| | 2 断面 | 16.73 | 5.44 | 土圧 | 大阪層群砂層 | 83 | 91 | — | — |
| G 現場 | 1 断面 | 37.635 | 8.24 | 泥土圧 | 洪積粘土 | 7 | | 360 | |
| | 2 断面 | 35.217 | 8.24 | 泥土圧 | 洪積砂礫層 | 60 以上 | | — | |
| H 現場 | 1 断面 | 22.19 | 8.31 | 泥水 | 上半:洪積粘土 下半:洪積砂層 | — | 40 | 300 | — |
| | 2 断面 | 22.19 | 8.31 | 泥水 | 上半:洪積粘土 下半:洪積砂層 | — | 40 | 300 | — |
| J 現場 | 1 断面 | 22.44 | 6.90 | 泥水 | 上半:洪積粘土 下半:洪積砂層 | — | 40 | 300 | — |
| | 2 断面 | 22.316 | 6.90 | 泥水 | 上半:洪積粘土 下半:洪積砂層 | — | 40 | 300 | — |
| | 3 断面 | 22.280 | 6.90 | 泥水 | 上半:洪積粘土 下半:洪積砂層 | — | 40 | 300 | — |

Prediction of influence on neighboring structure due to shield excavation considering construction process.
H. Ohta[1], M. Sawada[2], T. Hashimoto[3], J. Nagaya[3] ([1]Osaka Transport Promotion Corporation , [2]Osaka Municipal Trans-portation Bureau, [3]Geo-Research Institute)
Key WORD : Shield tunnel, Ground Deformation, Prediction Analysis, Backfill Grouting

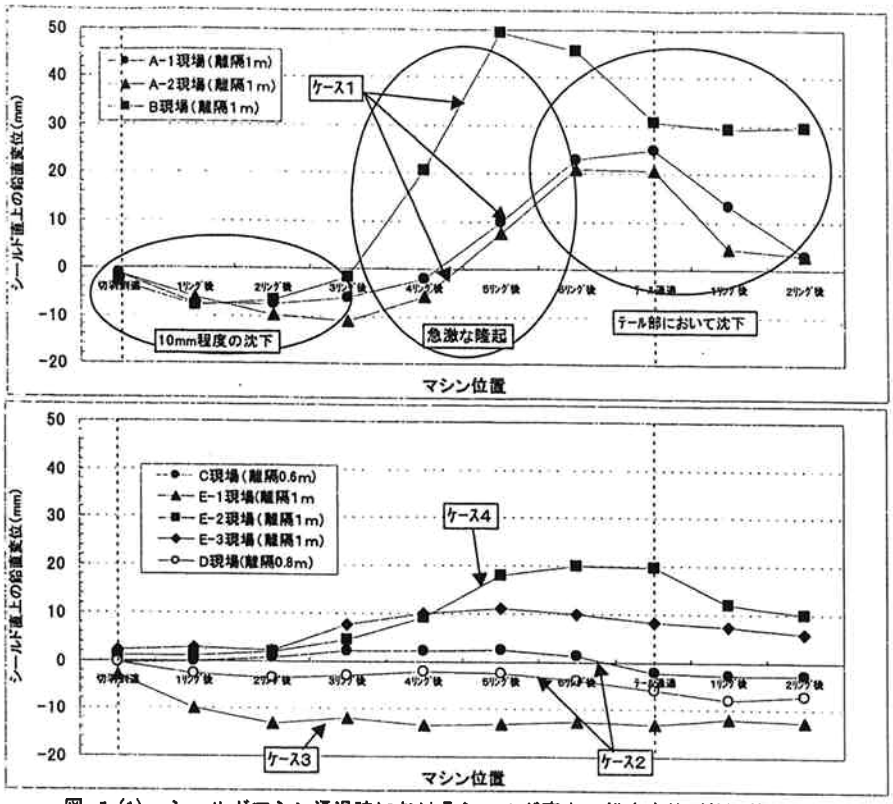



図-1(1)　シールドマシン通過時におけるシールド直上の鉛直変位（軟弱粘土地盤）

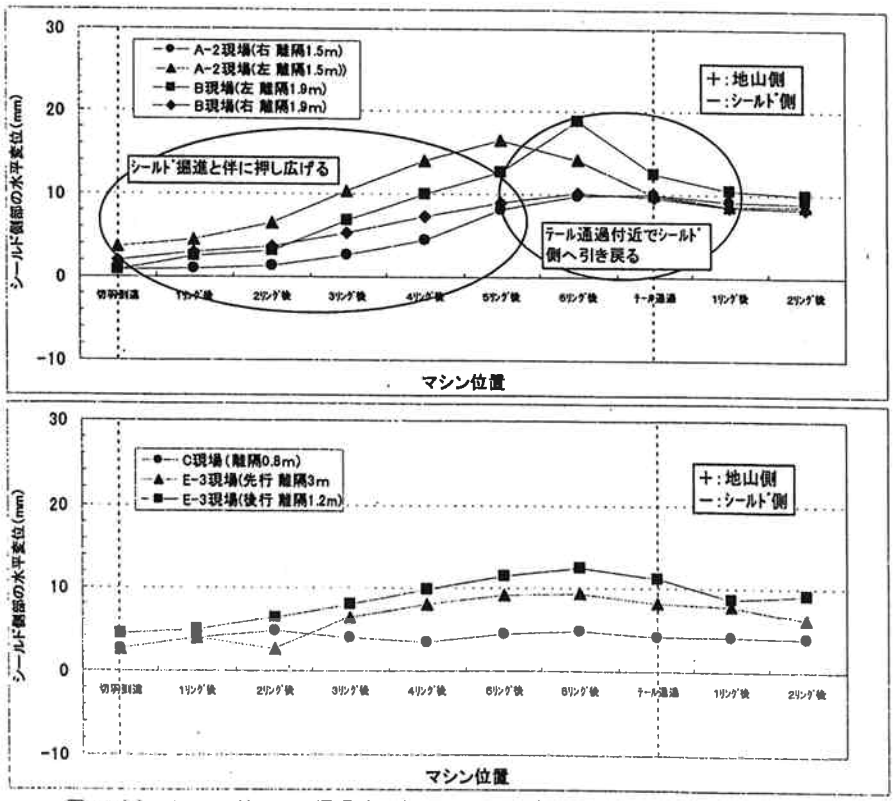



図-1(2)　シールドマシン通過時におけるシールド側部の水平変位（軟弱粘土地盤）

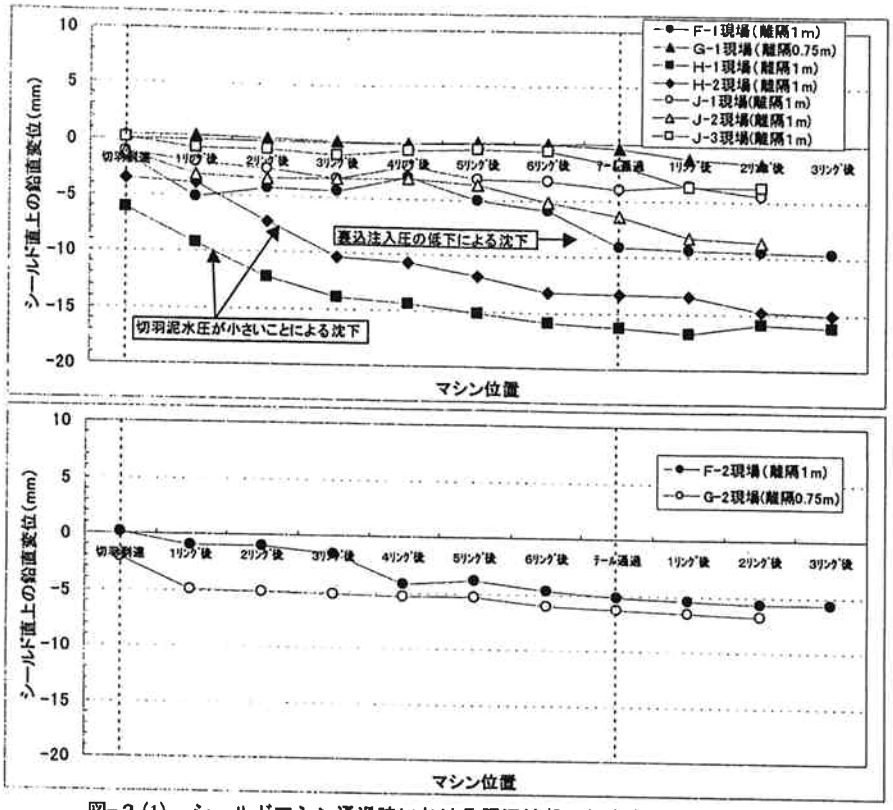



図-2(1)　シールドマシン通過時における周辺地盤の鉛直変位（硬質地盤）

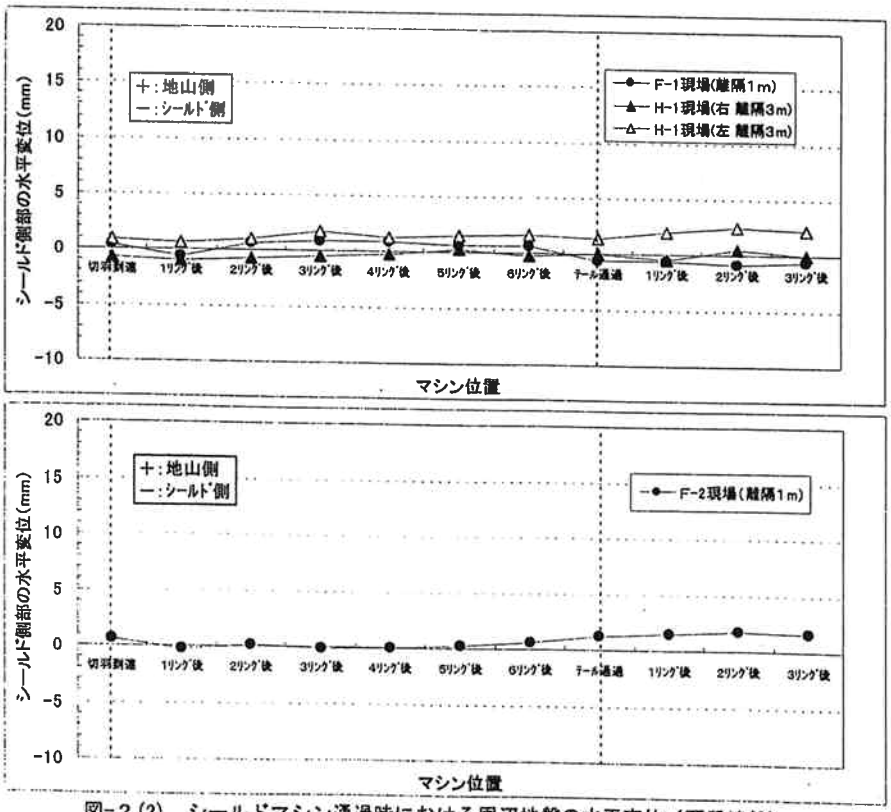



図-2(2)　シールドマシン通過時における周辺地盤の水平変位（硬質地盤）

図-１(1)より軟弱粘土地盤におけるシールドマシン通過時におけるシールド直上地盤の変位傾向は，以下の４つのパターンに分けられる。

ケース１：シールドマシン前半部で沈下，マシン後半部で大きく隆起する。(A-1, A-2, B 現場)

ケース２：シールドマシン通過中は全般に変位が小さい。(C, D 現場)

ケース３：シールドマシン前半部で沈下，マシン後半部ではほぼ一定である。(E-1 現場)

ケース４：シールドマシン通過全般に隆起傾向，テール通過後に沈下。(E-2, E-3 現場)

また，図-１(2)よりシールド側部(スプリングライン深度)における水平変位は，各現場で変形量に違いがあるが，全体的な傾向としては，切羽到達時において数 mm の押し広げが生じ，シールドマシンの通過時に押し広げ量が増加した後，テール通過時にシールド側へ引き戻る変位が生じることが分かる。これらの計測現場はいずれも沖積粘土地盤を掘進したものであり，土被り厚 11.0～17.9m，シールド径 5.44～7.12m と大きな違いはないが，周辺地盤の変形状況は大きく異なる。これらの変形挙動の違いは，切羽圧，シールドマシンの姿勢制御，裏込注入などの施工条件の違いによるものであり，シールド通過に伴う地盤変形予測においてはこれらの施工条件を考慮した解析を行うことが必要である。

硬質地盤を掘進した現場計測データでは，図-２に見られるようにいずれの現場も切羽通過～テール通過まで沈下傾向にあり，軟弱粘土地盤で見られるような裏込注入による隆起は生じていない。また，水平変位については，地盤を押し広げる方向に変位する傾向が見られるが，その変位量は２～３mm 程度であり非常に小さい。

## ３．地盤変形の要因分析

シールド通過に伴う周辺地盤の変形は各施工段階毎にその要因が異なる。現場計測データより各施工段階毎の地盤変形要因分析を行う。

**１）切羽到達時**

切羽到達までは，切羽圧力と切羽面における地山の側方土圧のバランスが地盤変形の要因と考えられる。しかし，図-１より切羽到達時のシールド直上における地盤変位は数 mm 程度の変位で抑えられており，シールド通過時に発生する変位に比べると非常に小さいことが分かる。密閉型シールドによるシールド掘進では，地山に大きな変形を及ぼさない切羽圧力管理が可能であり，現在のシールド施工技術では，切羽到達時までの地盤変位は十分制御可能であると考えられる。

**２）シールドマシン通過時**

**①切羽泥水圧の影響**

軟弱粘土地盤の現場計測データより切羽通過後のシールドマシン前半部では，シールド掘進に伴いシールド直上部において沈下が生じる傾向にあるが，シールド側部地盤では、地盤を押し広げる方向に変位が生じている。このような地盤挙動は，地山応力とシールドマシン側から地山への作用圧力の差圧により変形が生じると考えられる。シールド前半部においてシールド側から地山に作用する圧力としては，泥水式シールドの場合，切羽より泥水がシールド背面の余掘り部分に回り込み，この泥水圧が地山へ作用する圧力となる。通常，泥水圧は切羽面での側圧にバランスする圧力で設定され，かつ，静水圧的な圧力分布となる。これに対して，地山の鉛直応力は側方応力に比べて大きいため，シールド直上地盤では泥水圧＜地山応力($\sigma_v$)となる。一方，側方地盤は，泥水圧≒地山応力($\sigma_h=\sigma_v \cdot K_0$)となり，変形はほとんど生じないと考えられるが，実際には，泥水式シールドにおいても地山を押し広げるような変位が生じており，いずれの現場も切羽到達前より変位が生じている。土圧式および泥土圧式シールドにおいて切羽の泥土がシールド背面に回り込むことは考えにくく，マシン背面の余掘り部分には水圧相当の圧力であると考えられるが，土圧および泥土圧式シールドの場合にも側方地盤で押し広げが生じている。このような水平変位は，切羽圧力が地山側方圧力よりも大きめに設定されていた

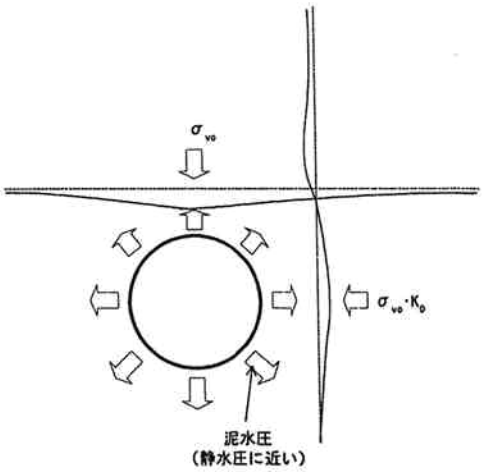



図-３　マシン通過時における地山への作用圧力

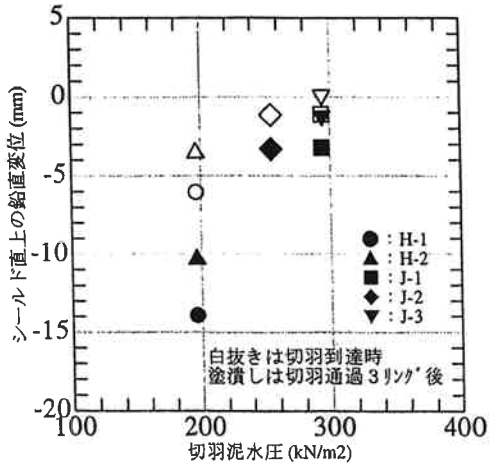



図-４　切羽泥水圧と鉛直変位の関係(洪積粘土)[1)]

ことやシールドマシンと地山間の摩擦による付加圧力が作用すること等が原因と考えられる。よって，地山応力とシールドから地山へ作用する圧力の関係は，図-３のようになり，シールド直上地盤が沈下，側部地盤が若干の押し広げ方向に変形する傾向となる。また，図-２に示す硬質地盤の現場の内，H現場とＪ現場[1]は，同じ洪積粘土層をほぼ同深度で掘進している。しかし，両現場のシールド直上における鉛直変位は異なる挙動を示しており，その要因として切羽泥水圧の制御にあると考えられる。H現場の２つの計測断面通過時における切羽泥水圧は196kN/m²で施工されているのに対して，Ｊ現場のJ-1断面が294 kN/m²，J-2が255 kN/m²，J-3は掘進中が255 kN/m²，停止中が294 kN/m²で施工されている。これらの切羽泥水圧と直上沈下の関係を図-４に示す。図-４に示す白抜きは切羽到達時，塗潰しは切羽通過３リング後の値を示している。これより切羽到達時のみでなく，切羽通過３リング後までのマシン前半部においても切羽泥水圧が小さい程，シールド直上の沈下量も増加しており，シールドマシン背面に回り込んだ泥水圧が地盤変形に影響していると考えられる。但し，切羽からの回り込みがないと思われる土圧式および泥土圧式シールドにおいてもシールド側部において地盤を押し出す変位が生じており，その変形要因については，さらに検討を要する。

**３）テール通過付近**

シールドマシン後半部においてはシールド直上，側部地盤ともに地盤を押し広げる方向に変位が生じており，これらの変形要因としては裏込注入が最も大きな影響を与えると考えられる。図-５に軟弱粘土地盤における裏込注入圧と地山応力の差圧と離隔 0.5mにおける地盤変位の関係を示す。ここで，地山応力はシールドの土被り圧および側圧係数 K＝0.7 と仮定した場合のスプリングラインにおける水平応力であり，裏込注入圧はセグメント背面に設置した土圧計およびグラウトホールに取り付けた圧力計により計測された値である。裏込注入圧の計測データは掘進中に変動するが，ここでは掘進停止後から再掘進の間に収束した裏込注入圧を示している。両者の関係は，ばらつきは大きいが裏込注入圧と地山応力の差圧も大きい場合に，直上地盤が大きく隆起する傾向があり，裏込注入がシールドマシン後半部の地盤変位に大きく影響していることが考えられる。これらの現場計測では，トンネル近傍における粘土地盤中の間隙水圧が計測されており，計測位置における初期地山応力＋間隙水圧増分をシールド通過時における地山への作用圧力と考えられる。図-６に裏込注入圧と間隙水圧増分から求めた地山への作用圧力の関係を示す。図-６よりシールド掘進に伴う地山への作用圧力は，1.0～1.3ｐｇ（ｐｇ：裏込注入圧）の範囲で作用すると考えられる。この０～30%の付加圧力は，シールドマシンの姿勢制御，マシンと地山の摩擦および掘進時における裏込注入圧の変動などが考えられる。

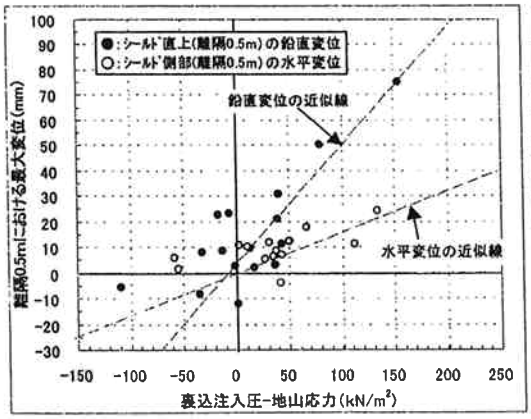



図-５　裏込注入圧と地山応力の差圧と鉛直変位の関係

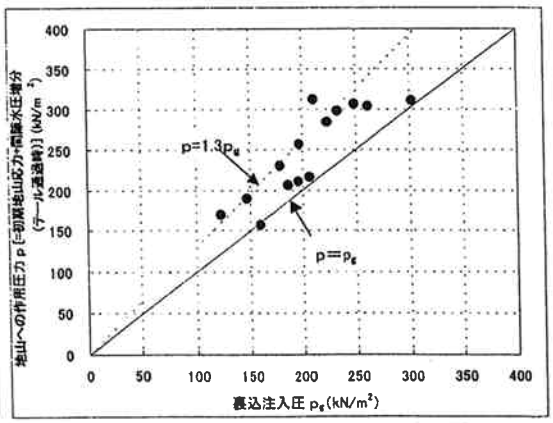



図-６　裏込注入圧と地山への作用圧力の関係

表-３に現場計測データを基にした地盤変形の要因分析をまとめる。

表-３　地盤変形の要因

| 施工段階 | 要　因 | 地盤変形の現象 |
|---|---|---|
| 切羽到達時 | 切羽圧とｼｰﾙﾄﾞ掘進深度における側方土圧との差圧 | 切羽圧＜地山側圧→隆起，押し広げ<br>切羽圧＞地山側圧→沈下，引き込み |
| マシン前半部 | ｼｰﾙﾄﾞﾏｼﾝ背面圧と地山応力との差圧 | ・泥水式シールドの場合，切羽からマシン背面の余掘り部分に泥水が回り込む。切羽泥水圧はトンネル中心深度における静止土圧相当で掘進され，泥水圧は等方的な圧力として作用するため，<br>ｼｰﾙﾄﾞ上部 マシン背面圧＜地山応力 →沈下<br>ｼｰﾙﾄﾞ側部 マシン背面圧≒地山応力 →変形小 |
| マシン後半部 | 裏込注入圧＋付加圧力と地山応力の差圧 | 軟弱粘土地盤において裏込注入圧は土被り圧相当で注入される場合もあり，その制御は難しく土被り圧よりも大きな注入圧が作用し，隆起および押し広げが生じるケースがある。また，施工時においては常に一定圧とはならず，裏込部の圧力は変動し，その変動幅も変形量に影響する。 |

## 4．施工過程を考慮した予測解析手法

シールド掘進に伴う地盤変形を解析するには，シールド掘進により掘削面における圧力変化を適切に評価することが重要である。ここでは，地盤変形の要因分析結果を基に各施工段階における掘削面における圧力変化を評価する方法を示し，２次元ＦＥＭ解析によるシールド掘進に伴う周辺地盤変形解析における荷重モデルの考え方を提案する。

### １）解析ステップ

①切羽到達時（Step1）

地山側圧と切羽圧力のバランスによるが，密閉式シールドにおける切羽圧力制御では，数㎜程度の地盤変形で抑えられるため，応力解放率α=0～5%程度とする。

②マシン前半部(Step2)

余掘り部分に回り込んだ泥水圧と地山応力の差圧を掘削面に載荷する。この場合，泥水圧分布は泥水の比重分だけ，深度方向に大きくなる圧力分布を考える。また，この時の地山応力は前ステップにおける変形後の応力とする。

③マシン後半部～テール通過時（Step3）

裏込注入圧と地山応力の差圧を掘削面に載荷し，裏込注入圧は図-６に示す０～30%の付加圧力を考慮する。この場合，裏込注入圧分布は裏込注入圧の比重分だけ，深度方向に大きくなる圧力分布とする。また，この時の地山応力は前ステップにおける変形後の応力とする。

### ２）３次元応力状態から２次元応力状態への補正値

上述のようにシールドマシン通過時における地山への作用圧力として背面泥水圧や裏込注入圧を考慮するが，シールド軸方向を考えるとこれらの作用圧力はシールドマシン部或いはテール部分でのみ作用する圧力であり，３次元的な応力状態にある。これを２次元ＦＥＭ解析で行った場合，作用圧力がシールド軸方向全体に作用した解析を行うこととなり，作用圧力を大きく評価してしまうこととなる。ここでは，これらの圧力の作用範囲をパラメータとした３次元ＦＥＭ解析によりトンネル掘削逐次解析を行い，荷重載荷範囲と３次元応力状態から２次元応力状態への補正値βの関係を求めた。尚，この解析ではトンネル掘削による解放応力を地山への作用圧力と考え，逐次掘削によるテールボイド長Ｌを圧力載荷範囲として検討する。図-７に解析に用いたメッシュ図を示す。解析条件および解析手順は以下のようである。

【解析条件】

・対象地盤：均一な弾性地盤（Ｅ=1000kN/m²，ν=0.3）
・トンネル径：５ｍ
・土被り厚：10m

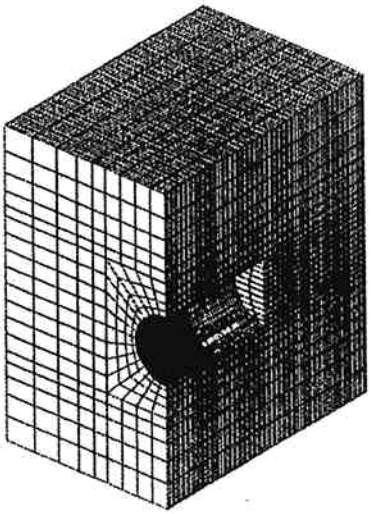
【解析手順】

①解析領域の側方境界より所定のテールボイド長を掘削する。
②さらにトンネル部分を１要素(25cm)ずつ掘進すると同時にテールボイド最終部に覆工(シェル要素)を設置する。
③以後②をくり返し行い，トンネルの逐次解析を行う。
④トンネルの掘削が進み，トンネル周辺の応力状態が２次元化した部分の覆工に作用する応力（トンネル周辺要素の応力）を求め，以下の式で補正値βを算出する。

$$\beta=(\sigma_0-\sigma)/\sigma_0$$

$\sigma_0$：トンネル周辺要素の初期応力
$\sigma$　：トンネル掘削後の周辺要素の応力

図-８にテールボイド長Ｌ(=圧力載荷範囲)／掘削径Ｄと２次元応力状態への補正値βの関係を示す。図-８よりＬ/Ｄとβの関係は双曲線的な関係にあり，Ｌ/Ｄ=1.0 ではβ=0.9であり，Ｌ/Ｄが 1.0 以上であれば，２次元状態と３次元状態がほぼ等価であると考えられる。



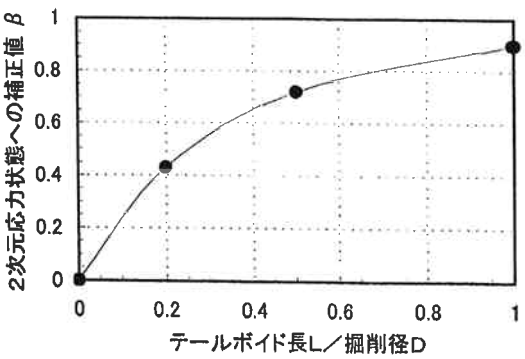
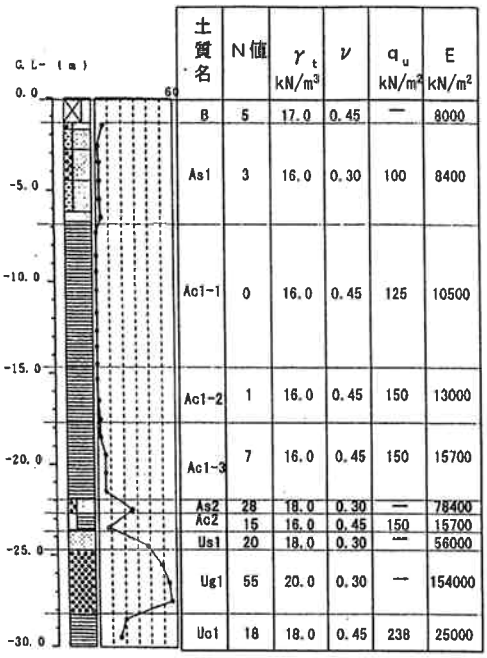



図-８　Ｌ／Ｄとβの関係

## 5．解析事例

1）土質パラメータ

今回提案する施工条件を考慮した荷重モデルによるＦＥＭ解析を用いてＡ-１現場の地盤変形解析を行った。シールドトンネルは沖積粘土層を土被り厚 15.3mで掘進し，工法は泥水式シールドが用いられている。図-９にＡ現場における土質柱状図と解析に用いた土質パラメータを示す。




| 土質名 | N値 | $\gamma_t$ kN/m³ | ν | $q_u$ kN/m² | E kN/m² |
|---|---|---|---|---|---|
| B | 5 | 17.0 | 0.45 | — | 8000 |
| As1 | 3 | 16.0 | 0.30 | 100 | 8400 |
| Ac1-1 | 0 | 16.0 | 0.45 | 125 | 10500 |
| Ac1-2 | 1 | 16.0 | 0.45 | 150 | 13000 |
| Ac1-3 | 7 | 16.0 | 0.45 | 150 | 15700 |
| As2 | 28 | 18.0 | 0.30 | — | 78400 |
| Ac2 | 15 | 16.0 | 0.45 | 150 | 15700 |
| Us1 | 20 | 18.0 | 0.30 | — | 56000 |
| Ug1 | 55 | 20.0 | 0.30 | — | 154000 |
| Uc1 | 18 | 18.0 | 0.45 | 238 | 25000 |

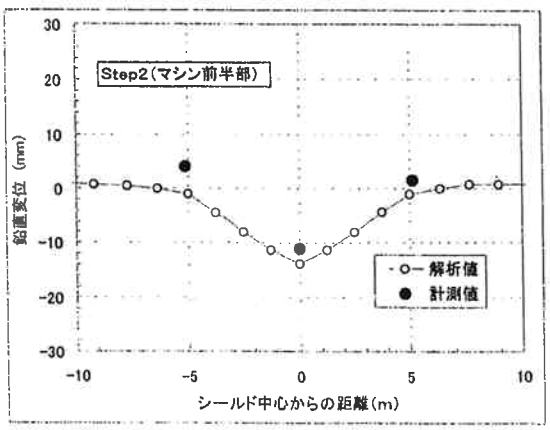
図-９　解析に用いた土質パラメータ

２）荷重条件

Ａ-１現場における施工条件は，計測断面掘進時のシールドマシンデータよりStep2における切羽泥水圧は約216kN/m²とした。Step3 における裏込注入圧は，セグメント背面に設置した土圧計の計測値より掘進停止後から再掘進までの収束である 265kN/m²と設定し，これに 30%の付加圧力を考慮し，265～346kN/m²の範囲で解析を行った。２次元応力状態の補正値については，Step２における泥水圧作用範囲をシールドマシン長の 1/2，Step３の裏込注入圧作用範囲は，裏込材がテール通過３リング後には硬化すると考え，セグメント幅の２リング分として図-８のL/Dとβの関係より求めた。

３）解析結果

図-10，図-11 にシールド直上の鉛直変位およびシールド側部の水平変位についての計測値と解析値の比較図を示す。Step2 はマシン前半部(計測値は切羽通過後３リング値)と Step３はテール通過時である。マシン前半部における計測値は，シールド直上で約 10㎜の沈下，シールド側部では約２㎜の押し広げが生じており，解析値は計測値にほぼ一致した結果である。また，テール通過時の計測値は，周辺地盤全体の押し広げが生じており，シールド直上における鉛直変位は，約 20㎜の隆起が生じ，シールド側部では約 10㎜ の押し広げが生じている。これらの変形形状は Step２において切羽からシールド背面へ回り込んだ泥水圧，Step3 において裏込注入圧を載荷荷重として考慮することにより，計測値の変位分布と同様な解析結果が得られている。このような，変形は従来の応力解放率を設定する解析では表し得ないものであり，泥水圧や裏込注入圧などによる地山への作用圧力と地山との差圧を考慮することにより，より実際の変形挙動に近い予測が可能となる。但し，シールド直上の鉛直変位の計測値はｐ=1.３ｐ$_g$よりも大きく隆起している部分もあり，定量的に評価しきれていない部分もある。周辺地盤全体の変形分布の定量的な評価を行うには，付加圧力の要因を分析し，付加圧力の分布などについて，さらに検討を行う必要がある。



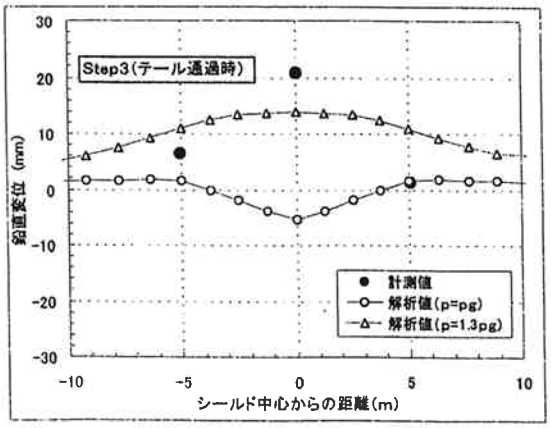




図-10　シールド直上(離隔１m)の鉛直変位における計測値と解析値の比較

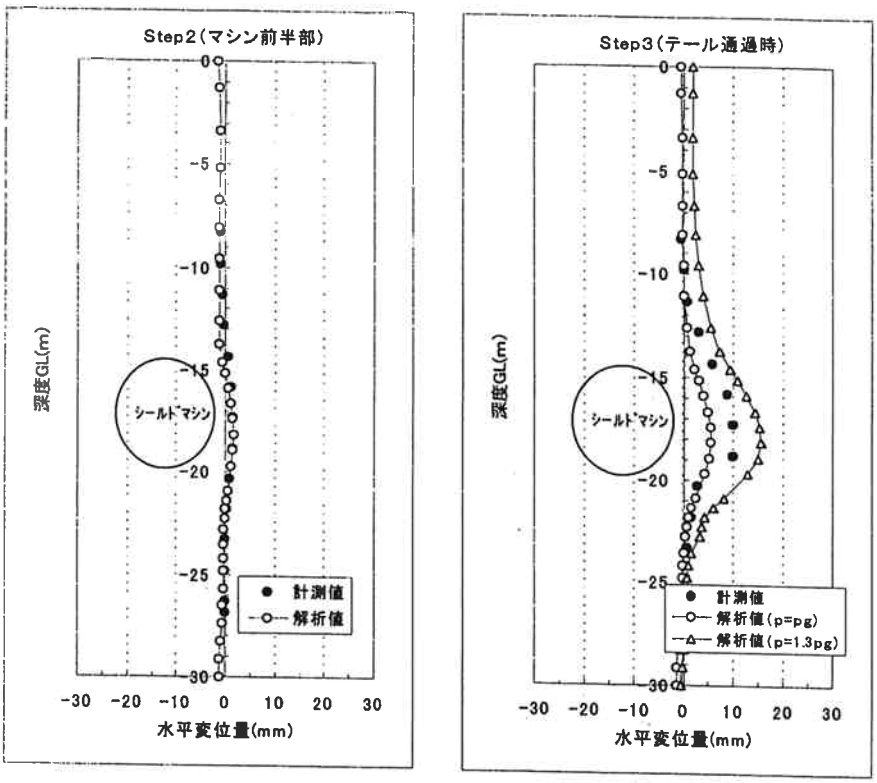



図-11　シールド側部の水平変位における計測値と解析値の比較

## 6．おわりに

シールド掘進に伴う周辺地盤の変形について現場計測結果より地盤変形状況を整理し，シールド施工段階毎における地山への作用圧力を分析し，ＦＥＭ解析による地盤変形予測における荷重モデルについて検討を行った。その結果，以下のような結論を得た。

①シールドマシン前半部では，泥水式シールドの場合，マシン背面の余掘り部分に切羽から泥水が回り込み，泥水圧がシールド側から地山へ作用する圧力となる。但し，切羽からの回り込みがないと思われる土圧式および泥土圧式シールドの場合においても側部地盤における押し広げが生じており，その変形要因については，今後さらに検討を要する。

②シールドマシン後半部～テール通過時における地盤変形は，裏込注入圧が最も大きな要因であり，裏込注入圧＋裏込注入圧の０～30%程度の付加圧力が作用することが考えられる。この付加圧力についてのピッチングやマシンと地盤の摩擦および裏込注入圧のばらつきなどが考えられるが，各要因の影響度および付加圧力の分布状況などについて，さらに，検討を行う必要がある。

③シールド掘進時の地盤変形解析における荷重モデルとしてシールド掘進に伴う地山への作用圧力と地山応力との差圧を載荷荷重とするモデルを提案した。このモデルにより現場計測結果に見られるような鉛直方向が沈下し，側方地盤が押し広げられるような挙動も評価することが可能であり，より実際に近い変形挙動を予測することができると思われる。

## 参考文献

1）小嶌清伍，大江 徹，橋本 正，長屋淳一：洪積地盤における地下河川トンネルの施工条件と地盤変形の関係，第37回地盤工学研究発表会，投稿中.