

4心円シールド掘進に伴う既設洞道の挙動と 縦断方向の影響予測手法

Displacement behavior of existing tunnel caused by 4-centered shield driving, and new technique to predict influence along tunnel longitudinal direction

岡田 仁¹⁾・中村益美²⁾・笠井靖浩³⁾・神田 誠¹⁾・粥川幸司⁴⁾

Hitoshi OKADA¹⁾, Masumi NAKAMURA²⁾, Yasuhiro KASAI³⁾, Makoto KODA¹⁾, and Koji KAYUKAWA⁴⁾

Influence from 4-centered shield tunneling to existing adjacent structures has been investigated by FEM analysis and vertical displacement measurements. It was found that the actual release stress ratio obtained for the 4-centered shield method is almost similar to that of round shield method. Furthermore, in estimating displacement distribution along shield longitudinal direction based on cross-sectional maximum displacement and influencing limit, the authors proposed to use non-dimensionalized 3-dimension curve method. By comparing predicted displacements with the actual measured ones, the effectiveness of the technique was confirmed.

Key Words :4-centered shield method, adjacent structure, prediction of influence, FEM analysis, stress release ratio

1. はじめに

都心部における地下では、地下鉄やライフライン等の地下構造物の輻輳化が進んでいる。そのため、既設構造物に近接して新設構造物が建設されることが多くなっている。これらの建設には、従来、円形シールド工法が用いられてきたが、近年では供用時に不要となる空間をできるだけ排除しコスト低減を図るため、矩形、楕円形、複円形といった非円形のシールド工法が増えつつある。¹⁾

これらのシールド工法による施工は今後も増えるものと予想されるが、それによって近接する既設構造物がどのような影響を受けるかは明確になっていない。また、シールド掘進による既設構造物の変位予測のうち、シールド横断方向については2次元FEM解析により実用上の定量的な評価が可能と考えられている¹⁾²⁾³⁾ものの、シールド縦断方向に関する既設構造物の変位予測手法は未解明な部分が多い。

そこで本論文では、非円形シールドの施工に伴う既設構造物への影響を把握するための予測手法の確立を目的として、地下鉄12号線（現 大江戸線）六本木駅建設工事において電力洞道とマンホール直下で施工された4心円シールド工法⁴⁾を例として、既設構造物に与える挙動を考察⁵⁾⁶⁾し、従来の円形シールドとの比較を行うとともに、実測データの分析結果にもとづき洞道縦断方向の影響予測手法の提案を行った。

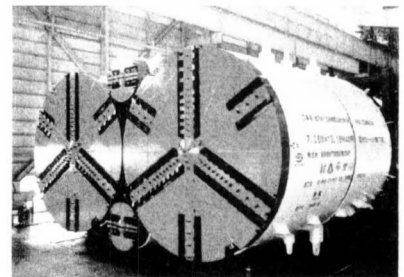


写真-1 4心円シールド機

2. 4心円シールドと検討対象洞道の概要

今回検討の対象とする既設構造物は、図-1に示すようにφ4100洞道（RCセグメント、二次巻無）、φ3350

1) 正会員 東京電力㈱東京支店

2) 正会員 東京都下水道局

3) 正会員 東京電力㈱送変電技術センター

4) 正会員 ハザマ技術研究所

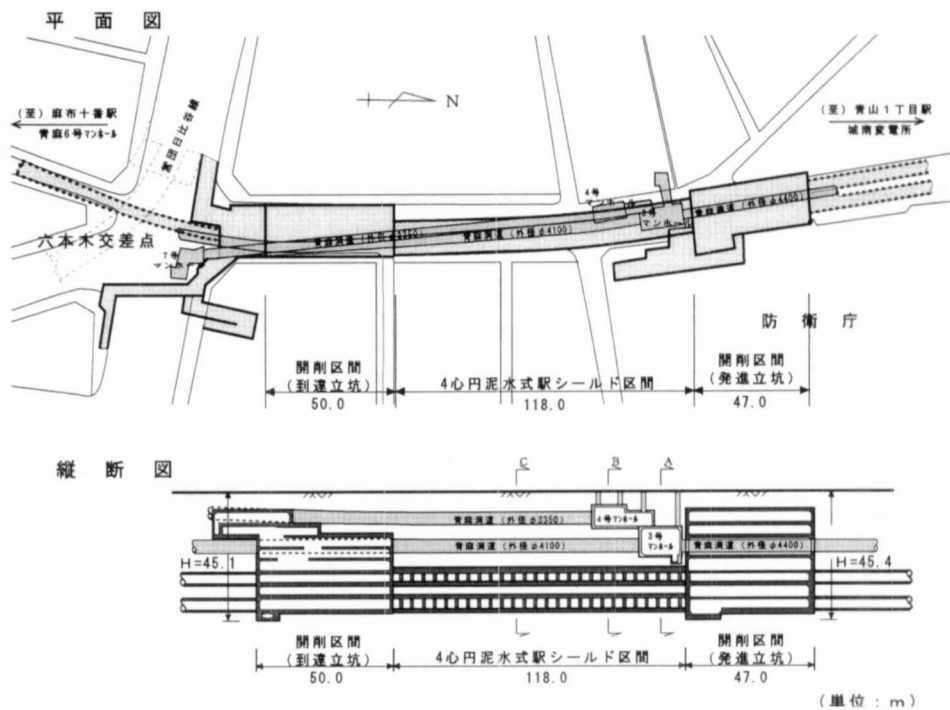


図-1 平・縦断面図

洞道（鋼製セグメント、二次巻有）ならびに3号マンホール（ $B=8.7\text{m}$ 、 $W=17.1\text{m}$ 、 $H=12.5\text{m}$ ）、4号マンホール（ $B=6.7\text{m}$ 、 $W=12.5\text{m}$ 、 $H=8.3\text{m}$ ）である。六本木駅建設工事は、地下に重要埋設物が幅輻していることから、駅両端部の立坑を開削工法で、その間を上下二段のシールド工法で計画、施工された。トンネルの施工手順は下段トンネル→上段シールドの順であった。なお上段は下段の掘進完了後に施工したものである。4心円シールド機（写真-1）は、幅

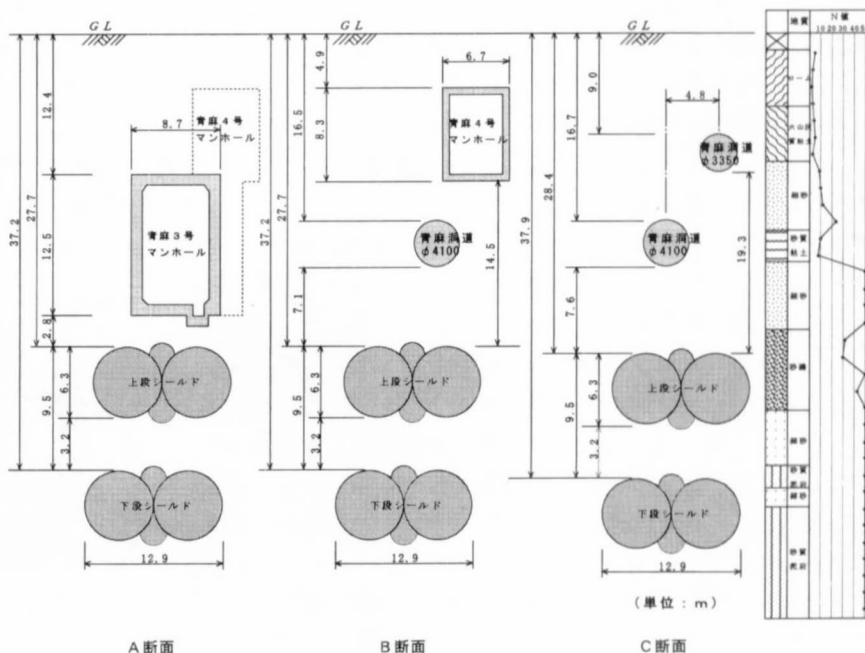


図-2 横断面図（FEM解析断面）

約13.2m、高さ約6.8m、機長8.1mで左右に $\phi 6.3\text{m}$ 、上下に $\phi 1.7\text{m}$ の回転カッターを有する泥水式シールド機である。土被りは上段トンネルで約28m、下段シールドで約37mである。また、上段トンネルは3号マンホールと約2.8m、 $\phi 4100$ 洞道と約7.1mの離隔で、非常に近接している（図-2参照）。六本木駅付近の地質構成は、図-2に示す通りで、地表より表土（Ts）、関東ローム層（Lm、Lc）、東京層砂質土（To-s）、東京層粘性土（To-c）、東京層砂礫（To-g）、江戸川層砂質土（Ed-s）、上総層泥岩（Kam）である。地下水位はGL-10m付近

である。トンネル掘削対象地盤は、上段トンネルが砂礫と細砂、下段トンネルが細砂と砂質泥岩である。これらの層での N 値は 50 以上と非常に締まっている。洞道と両トンネル間には主に細砂が存在するが一部粘性土も存在している。なお、3 号マンホールと上段トンネル間は残置杭撤去のための地盤改良を行っている。

3. 4 心円シールド掘進に伴う既設構造物の挙動

(1)下段トンネル施工に伴う挙動および F E M 解析結果との比較

下段トンネル施工に伴う既設洞道の挙動を観測するために、図-3 に示すように沈下計を配置して鉛直変位の計測を行った。また、F E M 弾性解析を実施し、洞道とマンホールの実測値と比較した。

F E M 解析は図-2 に示す 3 断面で実施した。解析ステップは図-4 に示す 6 ステップで行った。ステップ 3 および 5 の掘削による解放応力には、中山らの式¹³⁾を用い、[計算に用いる解放応力] = [補正係数] × {[原地中応力] - [テールボイド内圧力]}を用いた。ただしここでは、テールボイド内圧力として裏込注入圧 (300kN/m²) を用

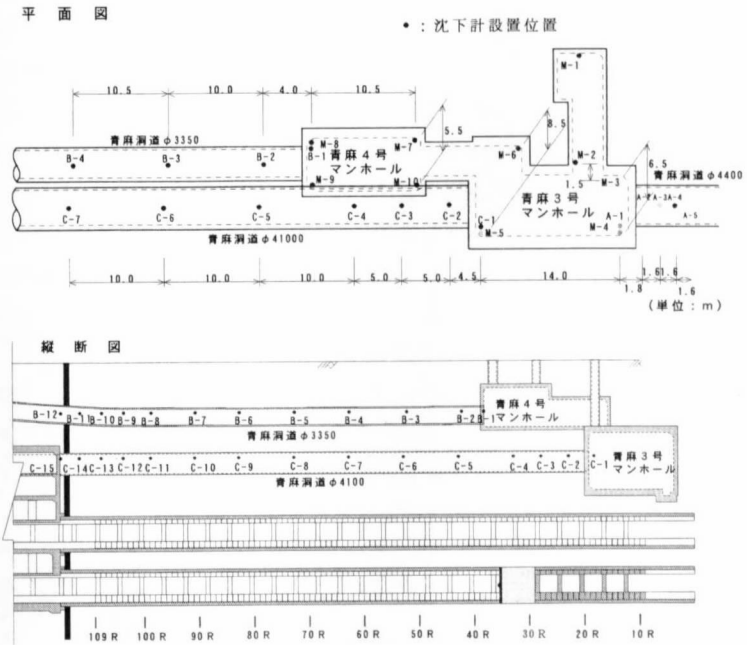


図-3 計器配置図

施工手順	初期状態	マンホール施工後	下段シールド 施工	上段シールド 施工 (完成)
解析内容	Step1 (初期応力) マンホール構築前の地山の初期応力状態を計算 鉛直方向 $\sigma_v = \gamma h$ 水平方向 $\sigma_h = \lambda \gamma h$ $= \nu / (1 - \nu) \gamma h$	Step2 (マンホール施工) - マンホール部地山およびマンホール部上部掘削 - マンホール部材 (ビーム要素) 組込 - マンホール部材、埋戻地山自重を負荷	Step3 (先行シールド応力解放) - 下部シールドマシンの外径掘削 - 解放応力 $\Delta \sigma = k (\sigma_0 - p)$ - k: 補正係数 35% σ_0: Step2での地山応力 - p: 裏込注入圧 (300kN/m²) Step4 (覆工部材組込) - セグメントライニングをビーム要素で、裏込材を平面要素で組込 - 残りの解放応力、セグメントライニング、裏込材自重を負荷 (下段シールド完成)	Step5 (後行シールド応力解放) - 上部シールドマシンの外径掘削 - 解放応力 $\Delta \sigma = k (\sigma_0 - p)$ - k: 補正係数 35% σ_0: Step4での地山応力 - p: 裏込注入圧 (300kN/m²) Step6 (覆工部材組込) - セグメントライニングをビーム要素で、裏込材を平面要素で組込 - 残りの解放応力、セグメントライニング、裏込材自重を負荷 (上段シールド完成)
モデル概要				

図-4 解析ステップ

いた。また補正係数は、硬質地盤の単心円シールドの実績が 30 ～ 40 %⁷⁾ であることから 35 % とした。これらの数値より換算される解放応力と原地中応力（初期応力）の比である応力解放率⁷⁾⁸⁾は約 19 % であった。なお対象地盤の解析定数は表-1 に示すものを用いた。ここで弾性係数については粘性土の場合、一軸圧縮試験と孔内水平載荷試験の結果を考慮して設定し、砂質土については N 値を用いて $E=28N$ で設定した。またポアソン比については、粘性土で 0.45、砂質土で 0.35 とした。下段シールドが発進してから到達するまでの 3 号マンホールと ϕ 4100 洞道の沈下実績データを図-5、6 に示す。3 号マンホールは、下段シールド到達時には平均で 6.8mm の沈下量となった。これは、FEM 解析値(7.3mm)の 93 % であった。なお、12/1 ～ 1/19 はシールドマシンの段取り替え（後方設備をトンネル内へ投入）のため掘進が停止した期間である。 ϕ 4100 洞道の沈下は、3 号マンホールに近い計測点からシールド通過に伴い順次沈下しはじめているが、下段シールド到達時には各計測点の沈下量が平均で 8.5mm となった。この値は、FEM 解析値(11.0mm)の 77 % 程度であった。

表-1 解析定数一覧

	弾性係数 (MN/m^2)	ポアソン比	単位重量 (kN/m^3)
L m	22.00	0.45	14
L c	11.30	0.45	16
T o-s 上	26.70	0.35	19
T o-c	6.60	0.45	16
T o-s 下	110.00	0.35	19
T o-g	70.00	0.35	19
E d-s	80.60	0.35	19
K a m	165.60	0.45	19
地盤改良部 ⁹⁾	300.00	0.35	19

実際の計測値が解析値（予測値）を下回ったことより、解析で用いた補正係数 35 % は実施工ではもう少し小さく、（計測値／解析値）の比率で乗じて 27 ～ 32 % 程度であったと思われる。これらの値を応力解放率に換算すると 15 ～ 18 % となり、最近のシールド工事における応力解放率に近いものであった⁷⁾⁸⁾。これらのことから、4 心円シールド工法においても従来の単心円シールドの場合と同程度の応力解放率を用いることにより実用的な地盤変位を推定できるものと考えられた。

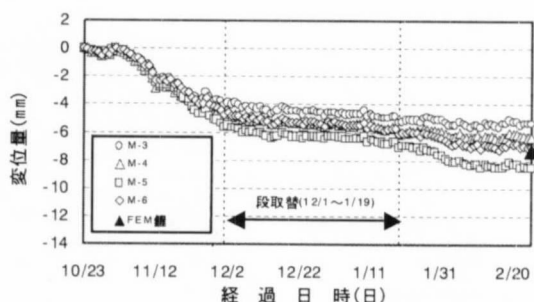


図-5 3号マンホール変位の経時変化

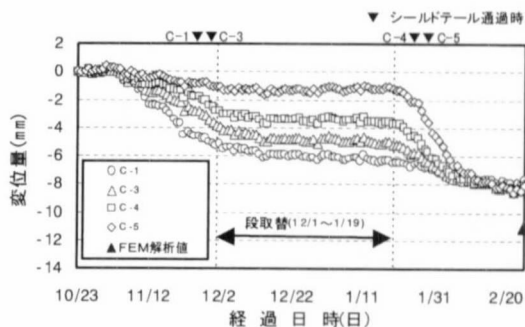


図-6 ϕ 4100 洞道変位の経時変化

(2) 下段シールド通過に伴う洞道の変位分布

下段シールド通過に伴う ϕ 4100 洞道における鉛直変位の経時変化を図-7 に示す。縦軸に変位量（沈下量）、横軸に各沈下計の発進立坑の土止位置からの距離で整理した。図より鉛直変位はシールドの進行に伴い 3 号マンホール側から到達立坑側へと順次変化している。

また、各沈下計測値をシールドテール位置からの距離と変位量の関係で整理すると図-8 が得られた。この図より洞道の沈下はシールドテール位置

の前方 40m から発生し、後方 40m でほぼ収束している。宮川ら¹⁰⁾が示すテールボイドによる地盤変位の影響範囲（影響角度 $\alpha = \pi/4 - \phi/2$ ）で整理すると、今回の対象地盤は硬い砂質地盤で内部摩擦角 ϕ は三軸圧縮試験の結果より 39° であることから、影響範囲は 80m となり図-8 とほぼ一致した。

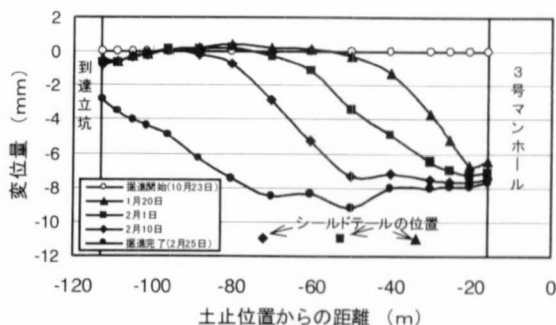


図-7 洞道変位分布の経時変化

一方、洞道の寸法、構造、地盤条件が異なる上段シールド通過の際のφ 3350 洞道の変位分布も同様な方法で整理すると図-9 が得られた。この場合もφ 3350 洞道の影響範囲は74m となり、図から得られる影響範囲とほぼ一致した。

次に洞道の変位量を各計測点の最大変位量で、またテール位置からの距離を影響範囲でそれぞれ無次元化して整理すると図-10 のようになり、硬質地盤では洞道の寸法、構造および新設シールドとの離隔の違いによらず一元化して表せることが判明した。また、データのばらつきを考慮し、変位分布の曲率が安全側となるような3 次曲線で近似すると式(1)が得られ、φ 4100 洞道とφ 3350 洞道の変位分布は、いずれも式(1)で推定することが可能であると考えられた。

$$Y=2X^3-1.5X-0.5 \quad (1)$$

ここで X：テール位置からの距離／影響範囲

Y：変位量／最大変位量

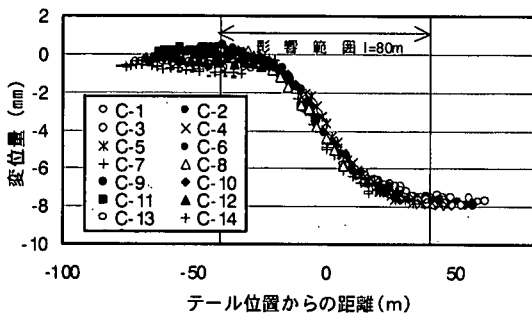


図-8 下段シールド通過に伴うφ 4100 洞道の変位分布

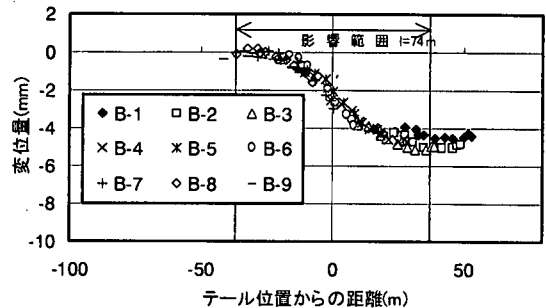


図-9 上段シールド通過に伴うφ 3350 洞道の変位分布

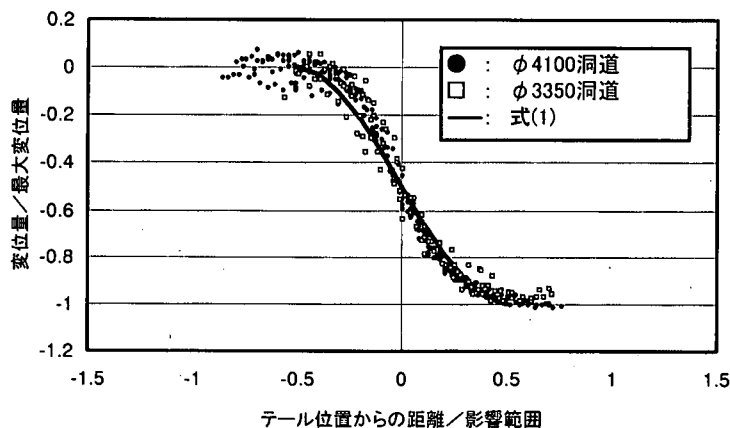


図-10 φ 4100 洞道とφ 3350 洞道の変位分布

4. 洞道縦断方向における変位分布の予測手法の検討

(1)変位分布の予測の考え方

縦断方向の相対変位により洞道の発生応力が問題となるのは、次のケースが考えられる。

- ①マンホールに最大変位が発生する場合
- ②洞道の最大変位がマンホールの最大変位より大きく、洞道の変位がマンホールに拘束され、洞道の曲率が大きくなる場合

③マンホール等の拘束がない範囲で洞道に変位が発生する場合

これらのうち、今回最も影響が大きかったのは②のケースであり、洞道の曲率が最大となるのは、シールドテール部がマンホールから（影響範囲／2）の距離だけ進んだ時であった。

シールド通過に伴う既設洞道の沈下は、シールドが近づくにつれて最初にマンホール、次に洞道部のマンホールに近い点から順次沈下が蓄積され、シールドテール部通過時にさらに大きく沈下し、その後シールドが遠ざかるにつれ最大沈下量に収束する。つまり地盤条件等により影響範囲や最大沈下量は異なるものの、変位分布の形状は3次式の形態になると考えられる。また図-10に示したように、影響範囲と洞道の最大沈下量が求まれば式(1)により洞道の変位分布式が得られる。ここで得られる変位分布式はマンホール等の拘束がない場合であり（前述の③のケースに相当）、マンホールの拘束がある場合は、弾性床上のフレームモデルを洞道部とマンホール部に分けてモデル化し、最初に式(1)で得られた変位に相当する荷重を洞道部に与え、その後マンホール部の変位を横断面の解析値に強制的に合わせることで、マンホール等による変位分布が表現できると考えられる。これらの考えを上段シールド通過時のφ4100洞道の変位分布の予測に適用し、実測変位と比較検討することによりその妥当性を評価した。

(2)洞道部の変位分布の予測

φ4100洞道の上段シールド通過の際の影響角度は、下段シールド通過時と同様にして求めることとし、対象地盤が硬い砂地盤で内部摩擦角 ϕ は 39° であることから、 $\alpha = 25^\circ$ となる。よって上段シールド通過の際の影響範囲は40mとなる（図-11参照）。

最大変位量は横断面のFEM弾性解析から求め、最大変位量と影響範囲を式(1)に代入することにより上段シールド通過時の変位を予測する。その結果は図-12に示す通りである。ただし、この予測変位はマンホールの拘束効果が考慮されていないため、洞道とマンホールを図-13に示すように弾性支床上の梁にモデル化し、マンホールの拘束効果を予測に反映させることとした。ここで、洞道は一樣剛性の梁で $EI=15,000\text{MN/m}^2$ 、 $EA=26,000\text{MN/m}^2$ 、地盤反力係数は道路橋示方書の手法により $k_v=160\text{MN/m}^2$ を用いた。マンホールは変形を許さない剛な梁とし地盤反力係数に $k_v=164\text{MN/m}^2$ を用い、接合部はヒンジ結合とした。支点は両端に設定し水平方向へは移動で

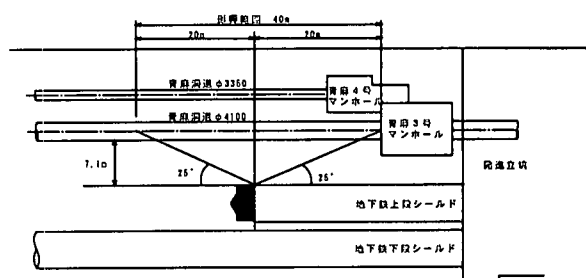


図-11 上段シールド通過時の影響範囲

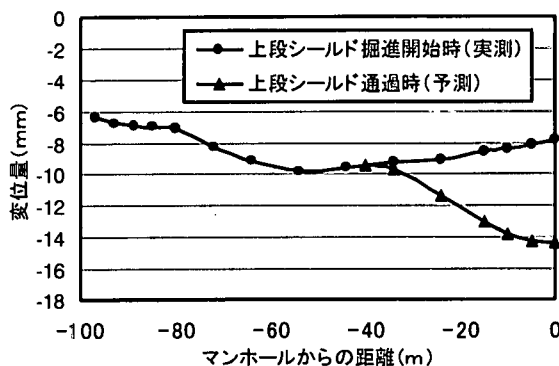


図-12 φ4100洞道の予測変位

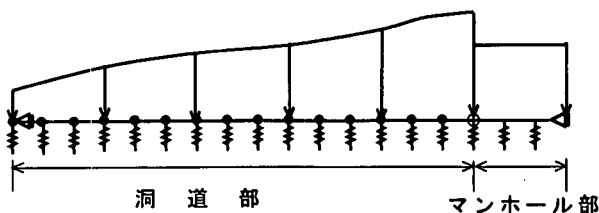


図-13 モデル概要

きない構造とした。このモデルの洞道部に荷重を載荷し、洞道の出力変位が前述の予測変位と一致するようにした。その後、マンホール部にFEM弾性解析による予測変位相当分の強制変位を与えることにより、マンホールに拘束された洞道の変位分布が得られる。解析結果による予測変位と実測変位の分布を図-14に示す。

(3) 洞道の予測変位と実測変位の比較

予測変位と実測変位を比較するとマンホール接続部付近で変位モードが合わなくなっている。この原因として以下のことが考えられる。

変位分布の予測はシールドテールを中心に前後20mの影響範囲を設定して行ったが、マンホールと上段シールド間は地盤改良を行っているため、マンホール下部通過時は洞道部の先行沈下はわずかしき発生しなかったと考えられる。そこで式(1)を用いて変位分布を推定する際に、先行沈下分を削除して分布を求めることとした。つまり図-15に示すように、シールドテール部がマンホールとの接続部の直下に位置する場合に相当する先行沈下量を削除するもので、図の(a)の値から(b)の値を減ずることにより求める。これにより、修正予測変位と実測変位を比較すると図-16が得られた。マンホールとの接続部の変位量は予測と実測で異なるものの変位モードは概ね一致した。

5. まとめ

非円形シールドの施工に伴う既設構造物への影響を把握するため、地下鉄12号線六本木駅工区の4心円シールドにおいて、洞道の沈下計測と地盤変状解析を試みた。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- ① 4心円シールド通過に伴う応力解放率(解放応力と原地中応力の比)は15～18%となり、既往の円形シールドの場合と同程度であった。
- ② 4心円シールドのような非円形シールドにおいても、単心円シールドと同様な手法により地盤変状を予測することが可能であった。

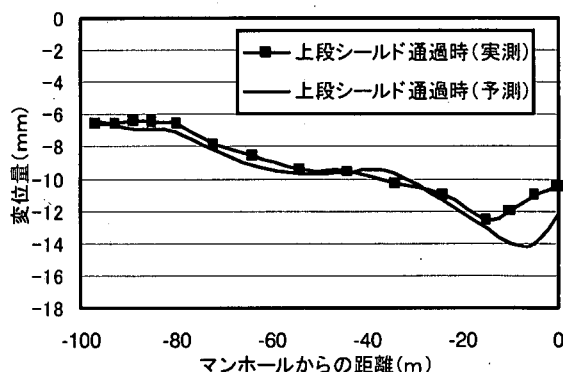


図-14 予測変位分布と実測変位分布の比較

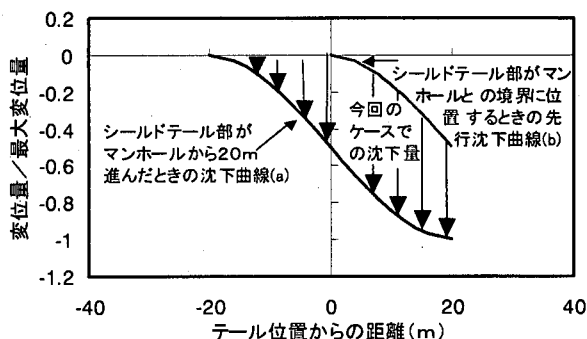


図-15 先行沈下削除の概念図

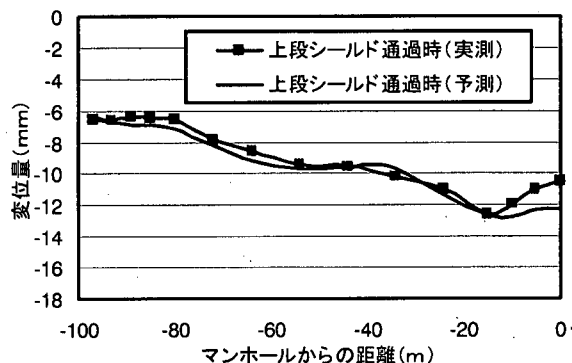


図-16 修正予測変位分布と実測変位分布の比較

- ③シールド掘進に伴う既設洞道の縦断方向の変位予測については、実施工における沈下データを（変位量／最大変位量）と（テール位置からの距離／影響範囲）で整理すると、硬質地盤の場合は既設洞道の寸法、構造に係わらず変位分布を一元化できる。
- ④マンホールのような剛性の高い構造物に洞道が拘束される場合はフレームモデルに縦断方向の変位をフィッティングさせることにより、縦断方向の変位分布の予測精度を向上させることができる。
- ⑤上記3次式ならびにフレームモデルにより縦断方向変位分布のフィッティングが可能なることから、洞道の発生断面力（発生応力）の予測を行うことが可能である。

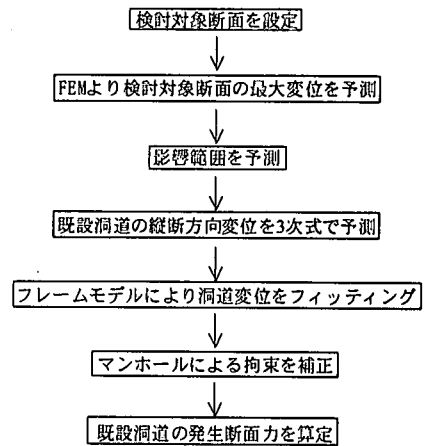


図-17 影響予測フロー

- ⑥以上の結果にもとづき、図-17 に示す影響予測フロー

により既設構造物の縦断方向の応力照査が可能であることを示した。

今回、マンホールと洞道直下を平行して通過する非円形シールドによる施工であったが、実測データの分析により、これまで未解明な点が多かった縦断方向の予測が可能となった。今後も多くの地点で今回用いた方法でデータ整理を進め、予測手法の妥当性を検証したい。

参考文献

- 1) シールドトンネルの新技术、土木工学社 1995.1
- 2) 山田、吉田、間片、橋本：沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について、土木学会論文集 No.373/VI-5、pp.103～112、1986.9
- 3) 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、No.397/VI-9、pp.133～141、1988.9
- 4) 小浦場、大西、粥川：4心円シールド工法による上下二段の地下鉄駅の建設、土木学会、地下鉄12号線環状部の施工技術、pp.101～114、2000.11
- 5) 石川、花見、笠井、西尾：シールド掘進に伴う既設洞道の縦断方向の影響予測に関する一手法、土木学会第54回年次学術講演会、Ⅲ-B、pp.242～243、1999.9
- 6) 神田、笠井、粥川：シールド掘進に伴う既設洞道の縦断方向の影響検討について、土木学会第55回年次学術講演会、Ⅲ-B157、2000.9
- 7) 藤井、真下、石村、真弓：シールド掘削における地盤変状予測、土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集、第9巻、pp.243～248、1999.11
- 8) 小峰、助川、綿引：近接施工における既設構造物の挙動について、土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集、第7巻、pp.389～394、1997.11
- 9) ジェットグラウト工法技術資料、日本ジェットグラウト協会、1997.8
- 10) 宮川、久保、町田、水谷、坪井：シールド掘進による地盤変状の実用予測手法の提案、土木学会論文集 No.528/VI-29、115-129、1995.12