

複円形シールド工法における建物基礎杭への 近接施工結果報告

Multi-face shield tunneling construction in neighborhood of structure pile foundation

粥川幸司¹⁾・原田知成²⁾・谷口 勉²⁾・速水正樹³⁾・萩原 勉³⁾

Koji KAYUKAWA, Tomonari HARADA, Tsutomu TANIGUCHI, Masaki HAYAMI and Tsutomu HAGIWARA

In construction work of subway No.4 line, Yagoto Minami section, multi-face shield tunneling construction occurred in the neighborhood 550mm apart from a pile of foundation of an existing structure. To clarify the influence of shield excavation to the piles, trial construction was carried out beforehand, and relationship between shield excavation and ground deformation was revealed. In pile neighboring construction, the shield over-cutting caused disturbance to the ground surrounding the piles, however, the pile foundation was found safe. Furthermore, this construction confirmed that, grouting from the shield machine could effectively restrain ground deformation initiated during the shield machine passing by.

Key Words: multi-face-shield method, neighboring construction, piles, ground deformation, FEM analysis

1. はじめに

名古屋市高速度鉄道第4号線は大曾根から砂田橋、名古屋大学(仮称)、八事、新瑞橋に至る建設延長11.3kmの地下鉄道である。八事南工区は清水ヶ岡駅(仮称)から八事駅までの約1kmを泥土圧式複円形シールド工法で施工するものである。

ところで、近年、都市地下空間の過密化にともない、シールド工事においても既存の地下トンネルや建物基礎といった地下構造物と近接して施工せざるを得ない場合が増えている。本工事においても、延長約1kmの内、発進側より約400mは道路下であるが、それ以降のほとんどが民地下となり、さらに、線路線形の制約から既存建築物の基礎杭の間を最小離隔550mmで近接して掘進することとなった。そのため、シールド掘進にともなう杭ならびに建物への影響が懸念され、それらの検討が必要となった。そこで、本工事ではシールド機の掘進管理情報や地盤変状を把握することを目的に、シールド発進後の路下区間を利用したトライアル施工を実施し、その成果をもとに当該建物の基礎杭との近接施工を行った。本報ではこれらの結果を報告する。

2. 工事の概要

トンネル工事は外径6.52m×11.12mの泥土圧式複円形シールド工法(写真-1)にて鉄道複線断面シールドトンネルを構築するものである。シールドは清水ヶ岡駅(仮称)から発進し、約400mの道路下を掘進の後、曲線半

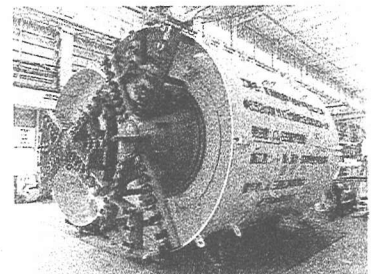


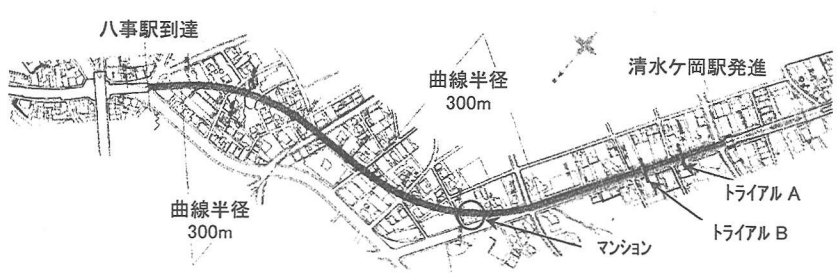
写真-1 複円形シールド機

- 1) 正会員 ハザマ 技術・環境本部 技術研究所
- 2) 名古屋市 交通局
- 3) 正会員 ハザマ 名古屋支店 地下鉄八事南作業所

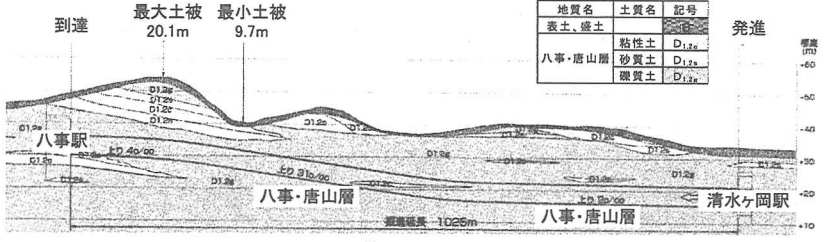
径 300m の S 字曲線施工にて八事駅に到達する（図－1）。工事延長は約 1km で、路線後半のほとんどが民地下である。

トンネル周辺の地質は、「八事・唐山層」と呼ばれる第四紀洪積層の粘土混じり砂礫地盤で、トンネル位置では概ね N 値 50 以上である。また、土被りは 10～20m で（図－2）、地下水位は NP=25m 前後である。

本工事では、図－1 中に示した位置で既存の建物（RC 造 10 階建マンション）の直下をシールドが通過する（距離程 9k032m、以下、基礎杭近接断面と称する）。この際、シールドと建物基礎杭（φ1400mm、場所打ち杭）との離隔が最小 550mm となり（図－3）、掘進にともなう基礎杭への影響が懸念された。



図－1 路線平面図



図－2 路線縦断面図および地質図

3. トライアル施工での掘進管理状況の把握

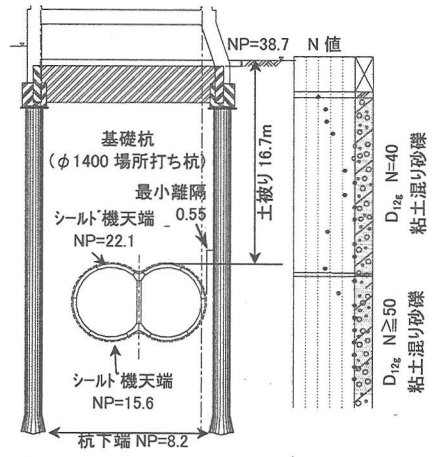
(1) 検討方針

本工事では、基礎杭との近接施工に先だち、シールド機の掘進にともなう掘進管理情報や地盤の変状状態を把握することを目的に、シールド発進後の道路下を利用したトライアル施工を実施し、その成果を当該近接施工に生かすことを試みた。具体的には、

- ・シールド発進後の道路下で地盤変状計測を実施する（2 断面）。
 - ・当該箇所での地盤変状とシールド機の地盤への作用力（切羽圧、裏込め注入圧、量、総推力、カッタートルクなど）との相関を把握し、地盤変状と関連する掘進管理情報を収集する。
- また、これらの情報をもとに基礎杭近接断面で次の項目に関する動態観測を実施することとした。
- ・基礎杭近傍における地盤の水平変位（挿入式傾斜計を用いて計測）。
 - ・基礎構造物直上での地表面沈下の測量、および建物観測（傾斜、沈下）。

(2) トライアル施工断面の設定

ここでは、距離程 9k400m、および 9k293m 地点をトライアル施工 A、B として設定した。これらの断面状況を図－4、5 に示す。各断面では基礎杭近接断面と同様に、シールド周囲のほとんどが粘土混じり砂礫地盤である。なお、土被りはトライアル施工 A で 12.5m、トライアル施工 B で 16.8m である。また、9k032m の近接施工断面の状況は図－3 に示した通りで、土被りは 16.7m である。一方、地盤変状に関する計測工として、ここではシールド直上 1m、およびその上部へ 3.25m 離れで合計 3 点／断面の層別沈下計を用いた沈下計測を行うこととした。なお、シールド掘進時の各種掘進情報はシールド機に搭載されている計器によるものを用いた。



図－3 シールド、基礎杭の位置関係（基礎杭近接断面 9k032m）

4. 施工結果

(1) 掘進に係わる計測結果

トライアル施工 A, B, および基礎杭近接断面を通過するシールド機で計測した切羽圧（チャンバー土圧）、総推力、カッタートルク、裏込め注入圧を図-6～8に示す。なお、トライアル施工 B ではシールド機が右にローリングしつつあった。そこで、その補正のために、シールド機右側インパート部、左側クラウン部で 20～40mm 程度の余堀りを行った。また、基礎

杭近接施工区間では曲線半径 300m の右カーブであるので、シールド機右側でスプリングライン近傍 140mm の余堀り、左側でローリング補正のためインパート部 100mm の余堀りを行った。

a) チャンバー土圧

トライアル施工 A で概ね 170kPa、トライアル施工 B で約 200kPa、基礎杭近接断面で 180～190kPa であった。特に、基礎杭近接断面ではばらつきが少なく、

b) 総推力

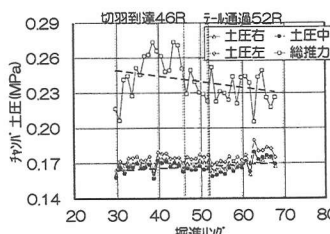
トライアル施工 A で約 2.7×10^4 kN、トライアル施工 B で約 2.9×10^4 kN であった。これらは土被りの相違により若干の推力の上昇があったものと思われる。一方、基礎杭近接断面では約 $2.4 \sim 2.5 \times 10^4$ kN であり、土被りがトライアル施工 B と同程度であるにも関わらず、比較的小さい推力であった。

c) カッタートルク

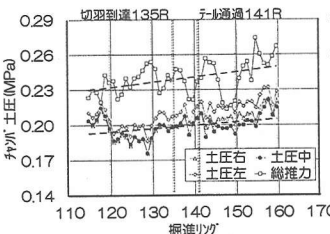
カッタートルクはいずれの区間も概ね $1.0 \sim 1.5 \times 10^3$ kN・m 程度であった。特に基礎杭近接断面ではトルクのばらつきが少なく、左右カッターとも同様なトルク値である。トライアル施工 A, B では左カッターの方が大きい、トライアル施工 B 以降では右カッターの方が大きくなっている。

d) 裏込め注入圧

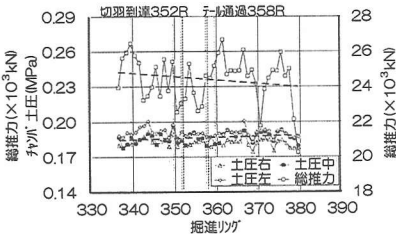
トライアル施工 A、基礎杭近接断面では約 0.15MPa、トライアル施工 B では約 0.20MPa であった。



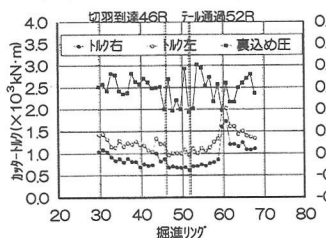
(a) チャンバー土圧、総推力



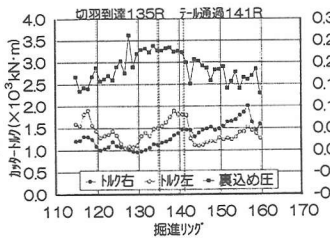
(a) チャンバー土圧、総推力



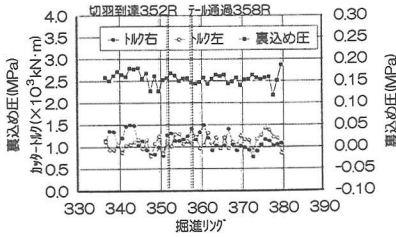
(a) チャンバー土圧、総推力



(b) カッタートルク、裏込め注入圧



(b) カッタートルク、裏込め注入圧



(b) カッタートルク、裏込め注入圧

図-6 トライアル施工 A

図-7 トライアル施工 B

図-8 基礎杭近接断面

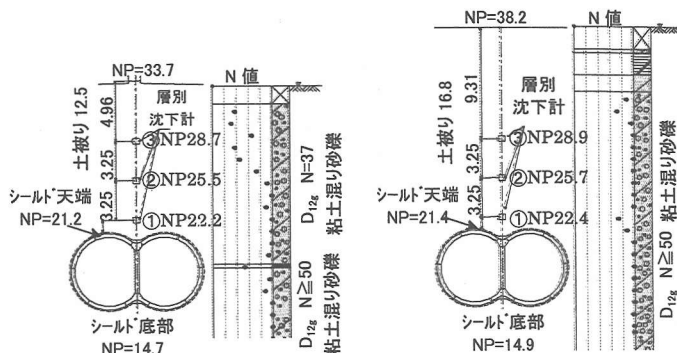


図-4 トライアル施工 A
(9k400m)

図-5 トライアル施工 B
(9k293m)

(2) トライアル施工での地盤沈下計測結果

① トライアル施工 A

トライアル施工 A の層別沈下計による沈下時刻歴を図-9に示す。沈下量は表-1の通りである。各測点の沈下の発生状況(時刻歴)より、先行沈下が 0.3～

0.5mm 程度認められ、次いでシールド機通過中に大きく沈下している。その後、テール部での裏込め注入による地盤の

乱れで若干の沈下を発生している。すなわち、シールド掘進にともなう地盤変状は、切羽でのオーバーカットによるシールド機胴体と地盤の空隙が存在するためにシールド通過中に大きく表れ、テールが到達した時点ではほぼ沈下が収束する傾向にある。ただし、テール到達以降で大きな沈下が発生していないのは、裏込め注入の効果によるものである。

一方、各測定点の沈下量を比べると、シールド直上 1m である NP=22.2m 地点では沈下が 4mm 程度となっているが、シールド上約 4.3m 離れた NP=25.5m 地点では約半分の 2mm となっている。これらのことから、シールド掘進にともなう地盤の緩み高さは、硬質砂質地盤の場合、通常考えられているシールド機外径の 1.5 倍よりも小さく、今回の場合、図-10に示したような状況になっていることが考えられる。

② トライアル施工 B

トライアル施工 B での沈下時刻歴を図-11に示す。また、沈下量は表-2の通りである。各測点の沈下の発生状況より、ここでは先行沈下はほとんど認められな

かったが、シールド通過中に大きく沈下を発生している。これらの傾向はトライアル施工 A の場合と同様である。ところで、シールド直上の NP=22.4m 地点でシールドテール通過前に約 1mm の隆起が認められる。これは、シールド通過中の引きずりや沈下発生などの不測に事態に備えたシールド機内からの空隙充填材注入の効果を確認するため、計測断面を通過中に材料の機内注入を行ったが、その影響が表れたものと考えられる。逆に、硬質砂質地盤の場合、機内注入により地盤の沈下をある程度抑制できる可能性があることがわかった。

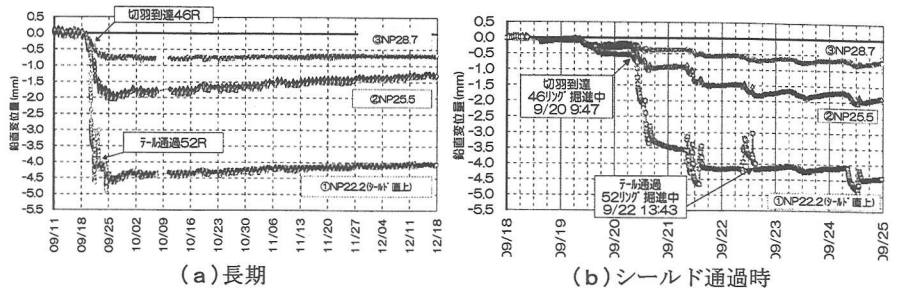


図-9 トライアル施工 A 沈下結果

表-1 トライアル施工 A 沈下結果

沈下の種類	①NP=22.2地点沈下(mm)			②NP=25.5地点沈下(mm)			③NP=28.7地点沈下(mm)		
	差分	累積	比率(%)*	差分	累積	比率(%)*	差分	累積	比率(%)*
先行沈下	0.5	0.5	11%	0.4	0.4	20%	0.3	0.3	38%
シールド機通過中	3.6	4.1	80%	1.4	1.8	70%	0.4	0.7	50%
シールド機通過後	0.4	4.5	9%	0.2	2.0	10%	0.1	0.8	13%
後続沈下	-0.4	4.1	-	-0.5	1.5	-	-0.1	0.7	-

*比率：ここでは、当該地点の差分値を最大累積値で除した。数値は沈下：正、隆起：負で表した。

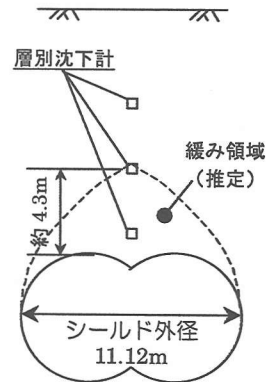


図-10 緩み領域の模式図

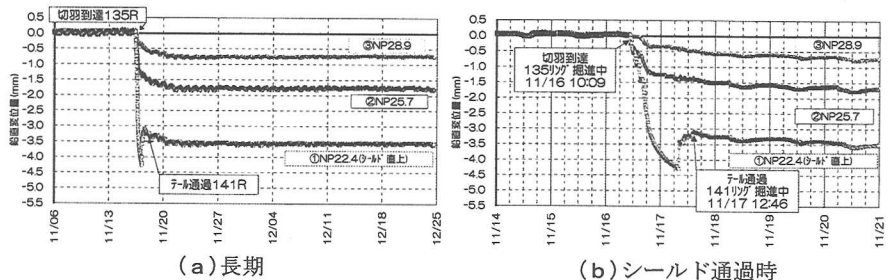


図-11 トライアル施工 B 沈下結果

表-2 トライアル施工 B 沈下結果

沈下の種類	①NP=22.4地点沈下(mm)			②NP=25.7地点沈下(mm)			③NP=28.9地点沈下(mm)		
	差分	累積	比率(%)*	差分	累積	比率(%)*	差分	累積	比率(%)*
先行沈下	0.0	0.0	0%	0.0	0.0	0%	0.0	0.0	0%
シールド機通過中	4.3	4.3	-	1.4	1.4	78%	0.4	0.4	67%
シールド機通過後	-1.1	3.2	-	0.3	1.7	17%	0.2	0.6	33%
後続沈下	0.4	3.6	-	0.1	1.8	6%	0.0	0.6	0%

*比率：ここでは、当該地点の差分値を最大累積値で除した。数値は沈下：正、隆起：負で表した。

一方、各測定点の沈下量を比べると、シールド直上 1m である NP=22.2m 地点では、機内注入を行わなかった場合、沈下が約 4.5~5mm 程度になると予想されるが、シールド上約 4.3m 離れた NP=25.7m 地点では約半分の 1.8mm となっている。これらのことは、図-10で示したトライアル施工 A と同様に、緩み高さが小さくなっていることを示すものと考えられる。

(3) 基礎杭近接断面の計測結果

近接施工断面においては、シールドと最も近接する基礎杭の直近の地盤中に傾斜計を埋設し、基礎杭の水平方向変位（シールド掘進方向、断面方向の2方向）を計

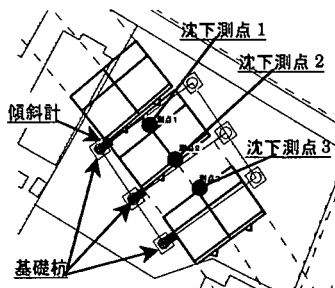


図-12 基礎杭近接断面計測

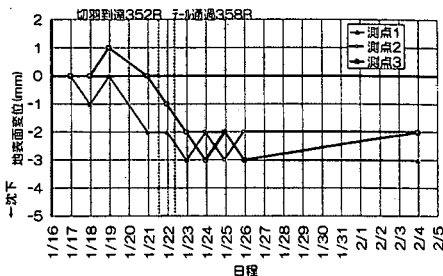
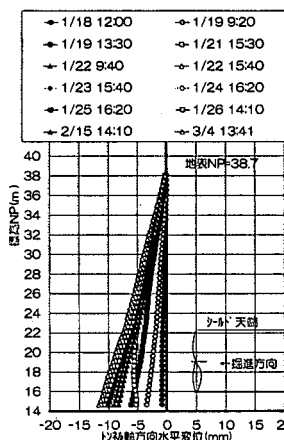


図-13 基礎杭近接断面 沈下測量結果

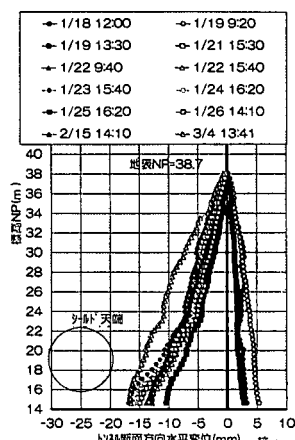
測した。また、これとあわせて建物駐車場内定点での地表面レベル測量を行った（図-12）。

レベル測量による地表面沈下（図-13）に関しては、シールドの通過前より 1mm 程度の沈下または隆起があり、シールド通過直前より沈下し始め、最終的に 2~3mm の沈下となった。

次に、基礎杭の直近での傾斜計による地盤水平変位結果をシールド掘進方向、断面方向の変位分布で図-14に、シールド天端、スプリングライン、インバート部の深度での水平変位時刻歴で図-15に示した。なお、測定結果はいずれも杭頭との相対変位で示している。



(a) 掘進方向



(b) 断面方向

図-14 基礎杭近傍地盤の水平変位分布

シールド掘進方向では、切羽通過前より掘進方向に変位し始め、切羽通過時に約 5mm、切羽通過後に 8mm~10mm 程度の変位量となった。一方、シールド断面方向では、まず、切羽が到達する前にシールドと反対方向に変位（シールド位置で約 5mm）し、切羽の通過後にシールド側へ約 10mm 程度変位している。

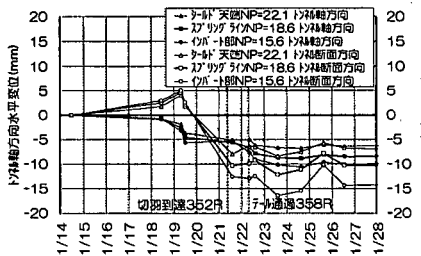


図-15 水平変位時刻歴

これらの状況から、まず、切羽到達前では切羽圧や掘削土砂の取り込みの関係より地盤を押し気味に掘進したことが可能性として考えられる。一方、切羽が通過した後では、基線に対するシールド機の蛇行がほとんどないものとすれば、基礎杭、傾斜計、シールド掘削線の位置関係は図-16の通りである。そこで、余堀りを 140mm で行っているので傾斜計との地盤厚さが 90mm 程度となり、掘削で傾斜計側部の地盤が乱された状態となる。その結果、10~15mm という大きな測定結果になったものと考えられる。

なお、建物基礎杭の安全性に関しては、杭を杭頭および杭端を固定とした単純梁とし傾斜計で得られた水平変位を強制変位として与えたフレームモデルでの応力度照査を行った。その結果、杭が地盤水平変位まで変位したとしても、応力度は許容応力度以内となった。また、基礎杭のシールド掘削壁面までの土被りが理論上 200mm 以

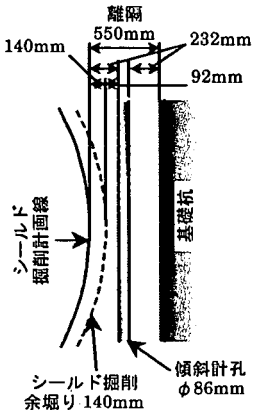


図-16 基礎杭、傾斜計、シールド掘削線の位置関係

上残っていることから、杭は安全であるものと考えられた。

表－３ FEM解析と計測値の比較

(4) トライアル施工での地盤変状解析

トライアル施工 A, B において、地盤沈下に関する 2 次元 FEM 解析を試みた。解析では、硬質地盤における地盤変状解析として中山らの方法¹⁾を用い、沈下計測結果を参照して補正係数 α に係わるパラメータスタディを行った (表－3)。

掘進にともなう地盤沈下は、シールド直上では数 mm 程度の沈下を記録しているが、それより上方の測点では 1mm 前後となっている。これは、図－10 で示したように掘進にともないトンネル直上に緩み領域が発生しその部分が沈

下となって表れるが、それより上部では地盤のアーチ効果が發揮され微少な沈下になる、といった現象が考えられる。また、これらの計測された沈下は、その発生状況から主に切羽でのオーバーカットによるシールド機と地盤間の空隙発生に起因するものと考えられる。

これらの現象に対して、解析結果は概ね計測値よりも大きめの値となっており、さらにトンネル上の 3 点での計測値と比較し、ほぼ沈下量が一致すると思われる場合の補正係数 α は、各解析ケースでばらつきが見られた。これらについては、以下のことから、シールド掘進の全体的な地盤変状を表現しきれないものと考えられた。

- ・解析では、地盤全体を弾性体として扱っているので、図－10 で示したような掘削による緩み領域の発生を表現できず、トンネル直上から地表面に至るまで全体的な沈下となってしまう。
- ・解析では、テールボイドの発生が地盤沈下の主要因と捉えている。しかしながら、昨今のシールド掘進管理技術の進歩により、テールボイドの早期充填が実施されており、テールボイドでの裏込め注入にともなう地盤の乱れに起因する沈下はあるものの、計測結果よりテールボイドでの沈下は小さいと考えられる。一方、地盤変状の大部分はシールド機の通過中に発生しており、これらの現象を解析に取り入れる必要がある。

5. おわりに

本報では、複円形シールド工法における建物基礎杭への近接施工について報告した。施工の結果、基礎杭および建物本体に大きな影響を与えることもなく無事にシールドを通過させることができた。また同時に、硬質地盤でのシールド掘進にともなう地盤変状は、シールド機の通過中が最も大きいこと、また、これを抑制するためにはシールド機内からの注入などによりシールド機と地盤の空隙を充填することが有効であることも判明した。しかしながら一方で、シールド掘進にともなう地盤変状予測においては、その要因を考慮した解析方法を考えることも必要である。

近年の都市地下空間の過密化にともない、今後のシールド工事においてもますます施工条件が厳しくなると予想される。今後、シールド工事のさらなる高度化に向けて、上記の課題を含めて検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 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 ~141, 1988.9

解析の種類	補正係数 α (%)	トライアル施工 A 沈下比較 (mm)						トライアル施工 B 沈下比較 (mm)					
		裏込め注入圧 P:						裏込め注入圧 P:					
		事前予測解析: 150kN/m ² 事後解析: 150kN/m ²						事前予測解析: 150kN/m ² 事後解析: 200kN/m ²					
		NP22.2		NP25.7		NP28.7		NP22.4		NP25.7		NP28.9	
事後解析	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)	完成時 (シールド沈下)	施工時 (シールド通過後)
	10	1.81	8.57	1.53	7.57	1.35	6.80						
	15	2.72	9.30	2.83	8.17	2.04	7.32						
	20	3.62	10.03	3.07	8.76	2.71	7.84						
	25	4.52	10.76	3.83	9.36	3.39	8.37						
	30	5.43	11.50	4.60	9.96	4.07	8.89	2.08	10.08	1.51	8.85	1.69	7.87
	35	6.34	12.23	5.37	10.55	4.75	9.41	2.43	10.31	2.22	9.04	1.98	8.03
	40	7.24	12.96	6.13	11.15	5.43	9.94	2.78	10.53	2.54	9.22	2.26	8.20
	45	8.15	13.69	6.90	11.75	6.10	10.46	3.13	10.76	2.86	9.41	2.54	8.36
	50	9.05	14.42	7.67	12.34	6.78	10.99	3.47	10.99	3.18	9.60	2.82	8.53
	55							3.82	11.22	3.50	9.79	3.11	8.69
	60							4.17	11.44	3.81	9.98	3.39	8.85
	65							4.52	11.67	4.14	10.17	3.67	9.02
	70							4.86	11.90	4.45	10.36	3.95	9.18
	75							5.21	12.12	4.77	10.54	4.24	9.35
	80							5.56	12.35	5.09	10.73	4.52	9.51
事前	30	5.43	11.50	4.60	9.96	4.07	8.89	6.52	13.68	6.46	11.30	4.78	10.38
沈下計測値		4.5	4.1	2.0	1.5	0.8	0.7	3.2 (4.5)*1	3.6 (4.9)*1	1.7	1.8	0.6	0.6

注: 事後解析はトライアル施工区間①で補正係数 $\alpha=10\sim50\%$ 、トライアル施工区間②で補正係数 $\alpha=30\sim80\%$ で実施。
注1): () 内は機内注入をしなかった場合の予測値。