

シールド工事における地盤変状の施工年代変化と地盤変状解析の課題

Changing in the ground deformation due to the shield tunnelling in different periods of construction and the subject of the numerical analysis

會田好雄¹⁾・佐藤紀司¹⁾・伊藤圭一²⁾・池谷正²⁾・田中弘²⁾

Yoshio AIDA, Toshikazu SATO, Keiichi ITO, Tadashi IKEYA, Hiroshi TANAKA

The preliminary analytical prediction of the ground deformation is an important subject in estimating the effects of the adjacent construction of shield tunnels. Through the statistical analysis of the data of ground settlement due to shield driving measured for different periods of the construction, the authors found out that the trends of ground settlement were on the decrease owing to the improvement of abilities of the shield machine. The study also showed that the numerical analysis by introducing the rate of stress release, which was determined on the basis of the rate of backfill grout, is applicable to the prediction of the ground deformation in the coming construction of shield tunnels.

Key Words : shield tunnel, ground subsidence, finite element analysis

1. はじめに

都区部普及率が概成100%を達成した東京都の下水道事業は再構築事業の時代を向かえた。ただし、地下空間の利用が盛んな都市部における再構築事業にあたっては、大深度での建設や既設地下構造物との近接施工が避けられない状況にある。このうち近接施工に関しては、これまでも各種機関による検討がなされ、一部は指針、要領等の形で公表されている。これらの資料では、シールド掘進に伴う近接程度の判定について取り上げているのが一般的であり、周辺地盤への影響に関する検討手法及び検討に用いる物性値の取り扱い等までについて解説したものは少ない。さらに各資料の発行年代からして、今後の都市部シールド工事における近接施工でこれらを参考にするには基礎データとしての資料が古く、現状とはそぐわない点が指摘できる。

本報文では、東京都下水道局がこれまでに積み重ねてきた施工実績から、シールド掘進に伴う地盤変状データを統一様式で再整理することで、施工年代を考慮した分析を実施し、さらにシールド工事における地盤変状解析での今後検討すべき点について提案するものである。

2. シールド機の年代別変化

高度成長期という時代背景と共に、シールド工法が我が国の都市部における主要な施工法として急速に進歩していった昭和40年代頃からの我が国のシールド機種別の推移を図-1に示す。昭和40年代から昭和50年代半ばまでは、開放型シールド機が主流であり、特に昭和40年代のシールド機は圧気併用の手掘式シールド機がその殆どを占めていた。昭和50年代に入ると省力化、安全面の確保から手掘式シールド機が大幅に減少し、かわって半機械式及び機械式に移行していった。昭和50年代後半になると機械化が更に進み、密閉型シールド機を中心とした施工が主流となり、今日に至っている。

1) 正会員 東京都下水道局 管路建設部設計指導課

2) 正会員 日本工営(株) 地盤構造部

図-1では昭和50年代に入るとシールド機全体の製造台数が増加する傾向にあり、都市部におけるシールド工事が盛んになったことがうかがえる。その結果、表-1に示すような各種機関による近接施工に関する指針、要領等が公表され活用されるようになった。

同表に示す指針類のうち、山岳トンネルを対象とした指針(No.7)を除くと7指針類中、約半数は昭和50年代半ば～昭和60年代に公表されており、シールド施工年代としては、図-1から開放型の手堀式シールド機から半機械式ないしは機械式シールド機に移行し始めた時代である。また、シールド掘進に伴う地盤変状に影響を与えると考えられる裏込めの注入時期や注入精度の進歩等を考慮すると、今後の近接施工の影響を検討するには資料が古いと言う点が指摘できる。

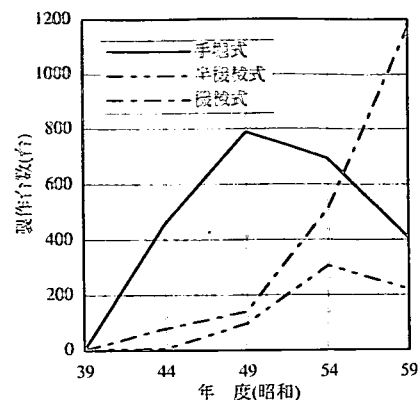


図-1 5年毎の機種別シールド製作台数 出典1)

表-1 主な近接施工指針類

No.	発行年代	近接施工指針及び要領	事業者	備考
1	昭和57年 4月	首都高速道路に近接する構造部の施工指導要領(案)	首都高速道路公団	
2	昭和58年 6月	近接基礎設計施工要領(案)	建設省土木研究所	
3	昭和60年11月	地中送電線土木工事における構造物近接部設計・施工指針	東京電力株式会社	現在改訂作業中
4	昭和62年 7月	近接施工の設計施工指針	鉄道総合技術研究所	
5	平成 2年 7月	設計要領,第二集,第五編 橋梁計画	日本道路公団	
6	平成 3年11月	営業線と交差する他企業工事における設計・施工管理要領(案)	帝都高速度交通公団	
7	平成 7年 1月	既設トンネル近接施工対策マニュアル	鉄道総合技術研究所	山岳トンネル対象
8	平成 8年 5月	近接施工に伴う設計施工指針(案)	阪神高速道路公団	

*尚、上記指針類の原型は、日本国有鉄道が昭和42年3月に制定した「近接橋台の設計施工指針（案）」（昭和62年7月に「近接施工の設計施工指針」として改訂）であり、他の指針もこれに準じたものが多い

3. 地盤変状実態の歴史

3.1 昭和40年代の地盤変状実態

図-2は文献2)に報告されている地表面沈下量とH/D(=土被り厚/シールド外径)の関係図を、以降の実態データとの比較が容易となるように軸目盛スケールを変更して引用掲載したものである。文献2)の発行年代から推察して、これらの地盤変状データは昭和40年代頃の地下鉄や下水道シールド工事によるものと考えられる。ほとんどのデータがH/D=4未満であることから、シールド掘進地盤はローム層等を除いては概ね沖積地盤が主体であったと推察される。文献2)によれば、砂質土では土被りが1～1.5D以下では浅くなるにしたがいシールド掘進に伴う地表面沈下量が急激に増加する傾向を示すが、粘性土地盤では明確な傾向が出ていないとしている。図中の補助線は原文によるもので、粘性土及び砂質土での地表面沈下量の平均的な傾向を示すものである。

3.2 昭和50年代～昭和60年代の地盤変状実態

図-3は文献3)に報告されている、著者らも一部参加した東京都下水道シールド管渠工事における地盤変状実態調査結果に基づく全地表面沈下量とH/Dの関係図である。シールド工事年代としては、土圧バランス、ブラインド、半機械式等の開放型シールド機を採用していた昭和50年代前半から、泥水加圧や泥土圧の密閉型シールド機に移行していった昭和60年代にかけてのシールド工事によるもので、シールド径は約3m～約8m、掘進地盤も沖積地盤から洪積地盤と多種多様である。縦軸を全地表面沈下量としているのは、例えば、軟弱な粘性土地盤で生じたシールド通過後の長期的な圧密沈下量等を含めた計測期間中の全沈下量を示しているためである。

図-2に比べて砂質地盤データでのH/D範囲が広がり、土被りの増加と共に地表面沈下量が減少する砂質地盤での傾向が明瞭であるが、図中の補助線(原文による)で示した砂質地盤データ範囲をみると、昭和40年代の傾向と大差ない。一方、粘性土地盤の場合はH/Dが増えても沈下量の減少傾向が見られないという点は図-2のデータと同様である。砂質地盤で見られるH/Dの増加に対する沈下の現象傾向は地盤のアーチ作用で説明できる内容である。

3.3 近年の密閉式シールド施工による地盤変状実態(平成4年～)

著者らが最近調査した、過去約5年間(平成4～)の下水道シールド管渠工事での地盤変状測定データのの一部を図-4～7に示す。シールド工事年代は密閉型シールドである泥土圧と泥水シールドの2種類であり、シールド径は約2m～約8mであるが、現在の再構築事業シールド径は比較的小口径が多いため2m～5mのデータが中心となっており、大深度化の影響も加わりH/Dが6までのデータが補充された。また、近接施工等の対策として事前に施工した地盤改良のある場合と地盤改良の無い場合を区別して示した。図4～5はこれまでの図と同様に砂質土と粘性土で整理したものである。図-4は、砂質地盤ではH/Dが2～3以上になると沈下が著しく減少し、粘性土地盤についても、ばらつきがあるものの、H/Dが大きくなるに従って沈下が減少する傾向を示した。

次にこれらデータを沖積地盤と洪積地盤に分類したものを図-6～7に示す。図-6によれば、沖積地盤ではH/Dが大きくなるに従って沈下が減少する傾向を示した。次に洪積地盤の沈下はH/Dに係わらず概ね6mm強であり、これらの傾向に沿わないデータは土被り厚が浅いものや洪積層の分類としては軟弱な七号地層を掘進しているシールド工事であった。図-7は地盤改良を実施したシールド工事について整理したデータではあるが中には大きな沈下量を示すデータが含まれており、むしろ地盤改良を施した場合にそれがかえって地盤を乱し、大きな沈下を示した等が考えられる。

3.4 施工年代を追った地盤変状の傾向

図-8は、これまでに示した昭和40年代から近年までの地表面沈下の最大値を通る線を地盤条件別に示したものである。同図によれば、シールド施工年代の推移により沈下の減少傾向が明瞭に認められる。この主要因は密閉型シールド機が主体となり切羽の安定精度が大幅に向上したことと、裏込め注入技術が改善されたためと推察される。

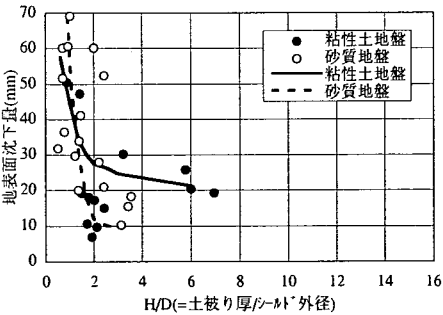


図-2 昭和40年代工事の地盤変状 文献2)

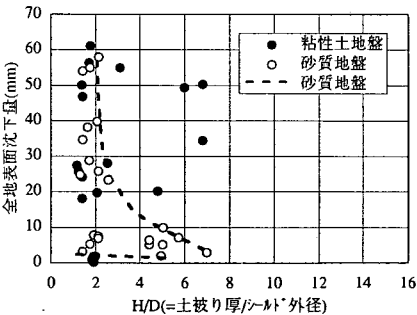


図-3 昭和50～60年代工事の地盤変状 文献3)

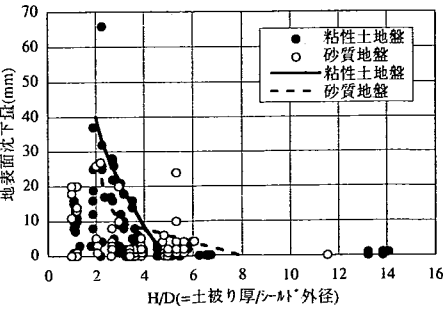


図-4 近年5年間の工事の地盤変状(地盤改良なし)

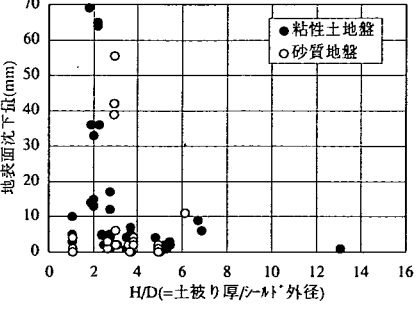


図-5 近年5年間の工事の地盤変状(地盤改良あり)

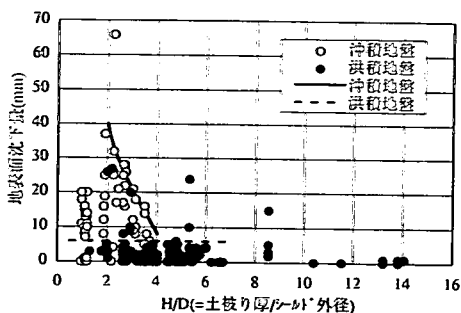


図-6 近年5年間の工事の地盤変状(地盤改良なし)

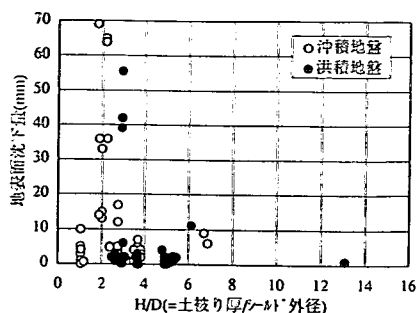


図-7 近年5年間の工事の地盤変状(地盤改良あり)

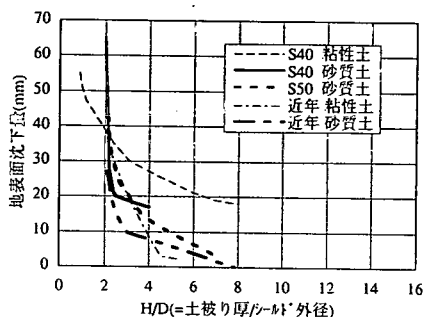


図-8 年代別の最大沈下量

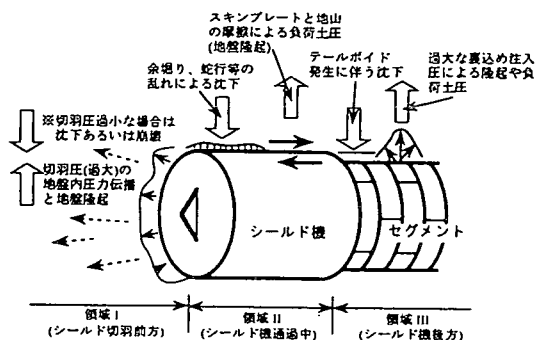


図-9 シールド掘進に伴う近接施工影響要因 出典4)

4. シールド掘進に伴う地盤変状解析

シールド掘進に伴い地盤に変状を与える可能性のある要因を表すと例えば図-9のように表せる。変状要因としてはシールド機の掘進段階に応じて3つの領域に区別でき、これまでの地盤変状解析は領域Ⅲに示すテールボイド沈下を主な検討対象として着目しており、本報文でも以降は領域Ⅲの地盤変状解析について記述する。

4.1 地盤変状解析手法の実情

二次元有限要素法を用いたシールド掘進に伴う地盤変状解析が実務検討で活用され始めた頃の代表的な報告として文献5),6)等があげらる。文献5)はシールド掘進に伴う地盤の緩み範囲を設定し、テールボイド量及びセグメント剛性を評価したステップ解析であり、応力解放によるシールド掘削壁面の変位を最大でも設計テールボイド量に限定した点が工夫されている。一方、文献6)は設計テールボイド量、セグメントの変形、裏込め充填率等の影響を応力解放率 α の導入で表し、実測値と整合する解析結果を誘導するものである。どちらも応力解放率を100%用いないという点で方法論は同じであるが、一般的な動向からすると、文献6)に準じた応力解放率を導入した解析が実務的に多用されているのが実情である。この場合、応力解放率を事例等により設定しなければならない点に合理性が欠ける。

4.2 裏込め充填率を考慮した応力解放率の設定

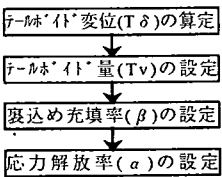
文献5)に準じて考えると、地盤の応力解放によるシールド掘削壁面の変位は最大でも設計テールボイド量に限定され、図-10の手順に従えば、裏込め充填率を考慮した応力解放率を設定できる。テールボイド変位($T\delta$)の算定は、テール通過直後に生じる地盤の応力解放がテールボイドにおける裏込め未注入部分の変位量に相当するものとし裏込め充填率からテールボイドに生じる変位量を次式によって算定する。

$T\delta = Tv(1-\beta)/T_{100}$

ここに、Tv:テールボイド量

β :裏込め充填率

T_{100} :応力解放率が100%時のテール変位量



5. 施工事例に基づく解析検討

図-10 応力解放率の設定手順

表-2に示す施工事例を用いて、裏込め充填率に着目して設定した応力解放率を用いた地盤変状解析値が実態とどの程度整合するかについて解析検討を実施した。図-11に施工年代別の沈下量と裏込め充填率の変化を示す。同図で、昭和50年代後半～昭和60年代のプロットについては、施工時の地盤変状計測結果ならびに裏込め充填率のコアサンプリング調査結果に基づいて関係を求めた。また、近年のデータプロットは、過去5年間に実施した施工データならびに地盤変状計測結果から応力解放率を逆解析し、裏込め充填率を算出して同図に併記した。沈下量は時代の進行とともに減少し、沈下のばらつき幅も狭くなる傾向を示すのに対し、裏込め充填率には大きな変動は見られない。

図-12に沈下量と裏込め充填率の関係を示す。裏込め充填率が高くなるほど沈下量が小さくなる傾向を示し、かつ、古い年代の実績より近年の実績の方がその傾向が顕著に現れている。この理由として、裏込め注入手法の時代的变化があげられる。昭和50年代後半～昭和60年代の実績データの大半は、裏込め注入の時期がセグメントがテールを抜けて数リング後に裏込め注入が実施されたデータであった。一方、近年の施工では殆どのデータが即時、もしくは同時注入で裏込め注入が実施されている。また、文献7)によると昭和50年代後半の裏込め注入施工実態調査では、裏込め注入の注入管理手法として圧管理52.4%、量管理46.0%だったのに対し、近年の施工では量圧管理60.9%、圧管理31.1%、量管理8.0%と、注入管理手法は量圧管理が主流となってきた。これら裏込め注入の施工精度の向上等が近年のシールド工事におけるテールボイド沈下量の減少、ならびに近年の実績の方が裏込め充填率が高くなるほど沈下量が小さくなる傾向が顕著に現れている要因の一つと評価できる。その結果、近年のシールド工事に係わる地盤変状解析での応力解放率の設定根拠に裏込め注入率が利用できると考えられる。

表-2 解析及び分析に使用した各工事の諸元

掘進地盤 種別	施工開始 年度	シールド 形式	シールド機 外径(mm)	テール・ボイド 量(mm)	土被り (m)	沈下量 (mm)	掘進 地盤	平均 N値	裏込め 注入時期	地盤改良
沖積層	昭和52年	泥水	4,950	75	9.0	55	砂質土	20	#N/A	なし
	昭和55年	土圧バランス	8,480	90	12.8	100	粘性土	0	60分程度	ロッド注入
	昭和55年	土圧加水	5,240	75	10.3	40	粘性土	36	90分程度	なし
	昭和55年	土圧バランス	4,440	75	9.7	102	粘性土	14	数リング遅	ロッド注入
	昭和55年	半機械	4,422	65	0.8	12	粘性土	28	2リング遅	二重管注入
	昭和55年	半機械	4,430	70	8.0	23	粘性土	9	30分程度	ロッド注入
	昭和55年	泥水	3,920	65	0.7	28	粘性土	22	即時注入	なし
	昭和59年	泥土	6,750	75	1.0	27	粘性土	-	数リング遅	なし
	昭和59年	泥土	6,750	75	9.5	26	粘性土	-	数リング遅	なし
	昭和59年	泥土	6,750	75	9.5	51	粘性土	-	数リング遅	なし
	昭和63年	泥水	4,700	75	5.9	27	粘性土	1	60分程度	なし
	平成4年	泥土	2,280	65	8.0	28	粘性土	0	半同時注入	なし
	平成5年	泥土	4,180	65	13.1	8	粘性土	1	即時注入	なし
洪積層	平成6年	泥土	2,890	70	7.6	25	粘性土	0	即時注入	なし
	昭和59年	泥土	8,210	80	1.6	3	粘性土	14	即時注入	なし
	昭和59年	泥土	5,840	70	16.0	3	粘性土	5	即時注入	モルタル杭
	昭和59年	泥土	8,210	80	17.0	6	砂質土	50	即時注入	噴射攪拌杭
	昭和59年	泥土	5,600	100	10.6	3	砂質土	37	即時注入	噴射攪拌杭
	平成4年	泥土	2,980	70	7.9	4	砂質土	50	半同時注入	なし
	平成7年	泥水	4,200	75	14.2	1	砂質土	50	即時注入	なし
	平成7年	泥土	3,480	65	0.6	3	粘性土	50	即時注入	なし

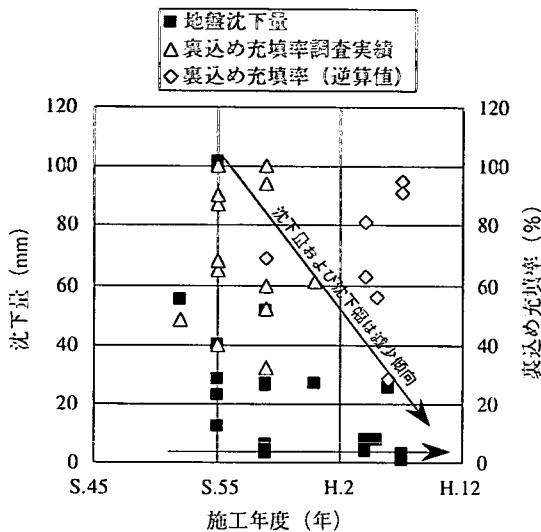


図-11 施工年代別の沈下量と裏込め充填率の関係

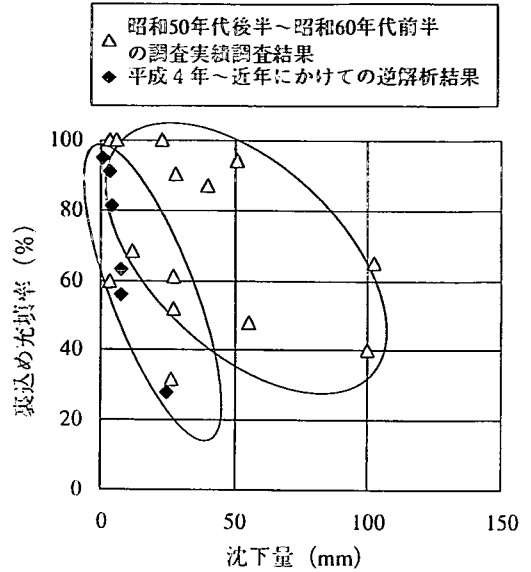


図-12 沈下量と裏込め充填率の関係

6. まとめ

シールド工事に伴う周辺地盤への影響は、時代ともに沈下量が減少する傾向を示しており、特に洪積地盤ではその傾向が顕著である。沖積地盤においても大深度施工に伴い沈下量が減少する傾向は示すものの、データにはばらつきが多く、未だに20mm以上の大きな沈下を示す現場計測データも見られる。今後の再構築事業においては、近接施工の現場が増加されることが予想され、事前予測解析による近接施工の影響判定が重要な要素となる。テールボイド沈下に着目した応力解放率を用いた二次元有限要素法による数値解析検討では、近年の裏込め注入の即時性や施工精度の向上を考慮すると、裏込め充填率から応力解放率を求める手法が合理的であると提案できる。今後の課題としては、近年の施工技術に見合った地盤別の裏込め充填率の実績調査、ならびに地盤変状計測、数値解析検討を実施することで、地盤別、施工条件に見合った裏込め充填率や応力解放率の設定方法を分析し、事前予測解析の精度を高めることが望まれる。

【参考文献】

- 1) 最新トンネル工法・機材便覧，建設産業調査会
- 2) 竹山，小野，高野：講座：シールド工法と土質，土と基礎，1978
- 3) 吉田：シールド掘進に伴う地盤及び構造物挙動と近接施工に関する研究，学位論文，1994
- 4) 伊東，會田：Q&Aシールド工事に伴う近接施工について，下水道協会誌，1996
- 5) 間片，神戸，高橋，山田，杉山，田中：有限要素法によるシールド掘進に伴う地盤沈下解析(その2)，第15回土質工学研究発表会，pp.1553-1556，1980
- 6) 古山，吉井，上野，小山：シールド工事における地盤変状測定，第15回土質工学研究発表会，pp.1549-1552，1980
- 7) JTA都市トンネル小委員会 裏込め注入幹事会：「裏込め注入」に関する実態調査報告(1)，トンネルと地下26-6，1995