

シールド工法における掘進停止時 裏込め圧保持システムの開発および基礎実験

中山 卓人¹・加島 豊²・近藤 紀夫³・平原 直樹⁴

¹正会員 戸田建設株式会社 土木工事技術部 (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

E-mail: takuto.nakayama@toda.co.jp

²日本ビックコンサルタント株式会社 技術統括本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

E-mail: yutakakashima@gmail.com

³正会員 日本ビックコンサルタント株式会社 海外コンサルタント部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

E-mail: kondou.n@nccnet.co.jp

⁴株式会社タック 東京事務所 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋3-9-10)

E-mail: hirahara@tac-co.com

近年、軟弱地盤で小土被りや近接施工のシールドトンネルが計画され、地盤の沈下や近接構造物への影響を最小限にすることが求められている。これまでのテールボイドへの裏込め注入工は、掘進停止時に注入した裏込め注入材の圧力が低下し、それに伴う地盤の沈下は避けられなかった。今回開発したシステムは、複数の同時裏込め注入管を装備したシールドの掘進停止中において、加圧保持装置を駆動し、裏込め注入材あるいはその主材（A液）を自動注入することで既に注入された裏込め注入材を加圧保持して、掘進停止時の沈下を抑制するものである。本開発では、その有効性を確認するための実証実験を実施し、砂質土、粘性土の両地盤において、裏込め注入圧を適正に調整することで地盤の沈下を抑制できることを確認した。

Key Words : shield tunneling, backfill grouting, soft ground, shallow cover, suppression of settlement

1. はじめに

近年、軟弱地盤で小土被りや近接施工のシールドトンネルが計画されていることも多く、地盤の沈下や近接構造物への影響を最小限にすることが求められている。これまでの裏込め注入工は、掘進停止時に裏込め注入材の圧力が低下し地山と同等の圧力となるため、地山の緩みによる沈下は避けられなかった^{1,2)}。

そこで、新たに掘進停止時裏込め圧保持システム（以下、本システムと記述）を開発した。本システムは、複数の同時裏込め注入管を装備したシールドの掘進停止中において、加圧保持装置を駆動し、裏込め注入材あるいはその主材（A液）を自動注入することで既に注入された裏込め注入材を加圧保持して、掘進停止時の沈下を抑制するものである。

本稿では、本システムの概要について説明するとともに、本システムの有効性を確認するための実証実験を実施したので、実験の概要と結果について報告する。

2. システムの概要

本システムは、複数の同時裏込め注入管を装備し、掘進および裏込め注入完了と同時に洗浄ラインに切り替えるとともに、一方の注入管から裏込め注入材の主材（A液）を自動注入可能にすることで掘進停止時でも充填した裏込め注入材に最適な圧力をかけ続けることのできる裏込め注入システムである（図-1、図-2）。

本システムの活用により裏込め注入材の圧力を掘進時、停止時ともに適切に保持することが可能になり、地盤変状を最小限に抑えるとともに、裏込め注入材の品質も確実に保つことができることを開発目的とした。

図-3に本システムの作業フローを示す。本システムは、少なくとも一対の甲乙同時裏込め注入ラインから構成される。

- 掘進①と同時に、甲ラインで裏込め注入①が行われる。
- セグメント組立①の時、甲ラインから裏込め注

入材あるいは主材によりテールボイドに注入された裏込め材加圧①を行い、それと同時に乙ラインはセグメント組立①が終わるまでに洗浄①を終える。

- 掘進②では、乙ラインにおいて裏込め注入②を行い、甲ラインはその次の掘進③が始まるまでに洗浄②を終える。そして、セグメント組立②の時、乙ラインで裏込め材加圧②を行う。
- 掘進③では、掘進①と同様に甲ラインにより裏込め注入③を行い、乙ラインでは次の掘進が行われるまで洗浄③を行う。

裏込め注入圧を計測しながらこの手順を繰り返すことにより、注入された裏込め注入材を常に一定の圧力以上に保持・加圧することが可能となる。

3. システムの有効性を確認するための実証実験

(1) 実験の目的

本システムの有効性を確認するために、シールドテール部と地盤を模擬した実験装置を製作し、砂質土と粘性土の模擬地盤において、掘進時のシールド機からの同時裏込め注入と掘進停止状態を再現した。

実験ケースは、本システムの使用なし、ありの2ケースで、模擬地盤内に設置した沈下板の変位と実験装置内の裏込め注入圧などを計測し、実験結果を比較することで、本システムの有効性を確認することとした。図-4にシステムなし、図-5にシステムありの沈下概念図を示す。

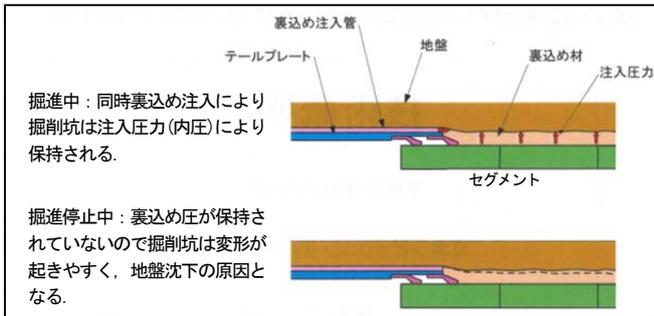


図-1 従来の裏込め注入

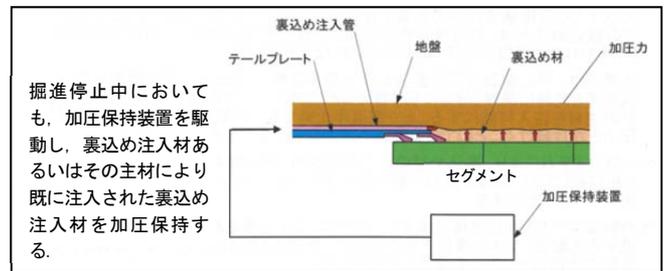


図-2 裏込め圧保持システム

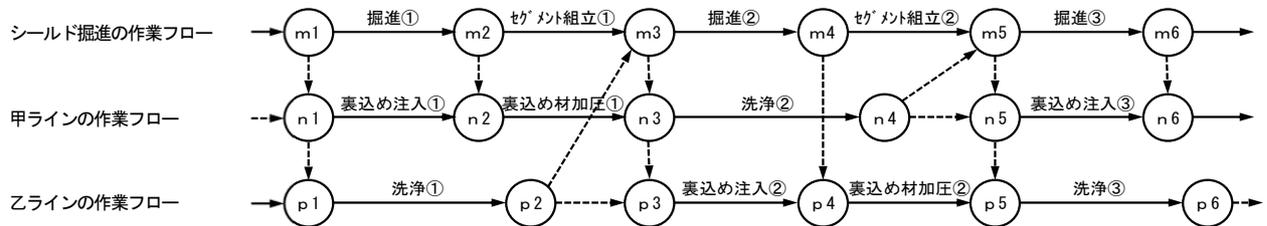


図-3 裏込め圧保持システム作業フロー

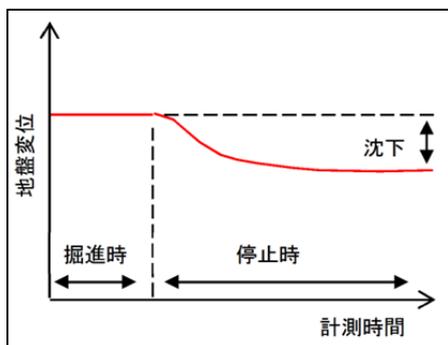


図-4 システムなし概念図

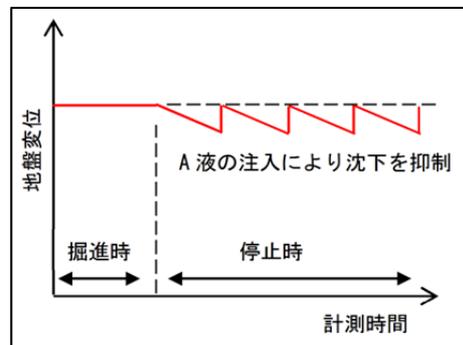


図-5 システムあり概念図

(2) 実験の概要

a) 実験装置

写真-1, 写真-2, 写真-3に実験装置, 図-6に実験装置全体図を示す. 寸法800mm×800mm×1650mmで, 側面片側にアクリル板を設置し, 実際の裏込め注入状況が目視できる実験土槽を製作した. ジャッキでシールドテール部に相当するスキンプレートを850mm引き抜き, テール部から同時注入が実施できる機構とした. スキンプレートから200mmの高さに100mm×100mmの沈下板を2か所設置し, 地盤内の変位を計測した. 試験装置に3か所, 裏込め注入管近傍に1か所の計4か所に圧力計を設置し, 装置内, 裏込め層内の圧力を計測できるようにした.



写真-1 実験装置全景

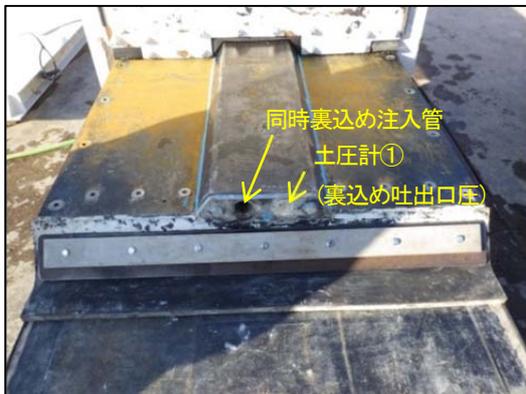


写真-2 同時裏込め注入管



写真-3 テールシールゴム

b) 実験用模擬土

砂質土用模擬土として, 粒径が0.15~5mm程度の砂・礫分を含むコンクリート用細砂を使用した. 粘性土用模擬土として, 硬化しないシールド用可塑状充填材(クレーショック)を使用した. 表-1に砂質土用模擬土, 表-2に粘性土用模擬土の物性値を示す.

c) 実験用裏込め注入材

表-3に裏込め注入材の配合を示す. シールド工事で使用される一般的な裏込め注入材を使用した. ゲルタイムを15秒以内, 1時間後の一軸圧縮強度が0.05N/mm², 28日後の一軸圧縮強度が2.00N/mm²となるものを使用した.

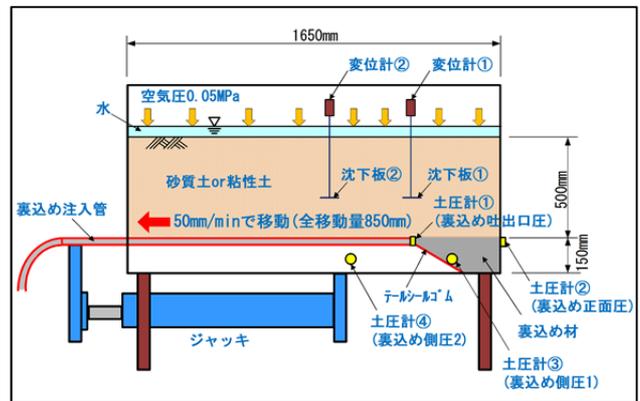


図-6 実験装置全体図

表-1 砂質土の物性値

単位体積重量	21.0kN/m ³
含水比	25.4%
コーン指数	150kN/m ²
推定N値	コーン指数からの推定で2程度

表-2 粘性土の物性値

単位体積重量	13.2kN/m ³
含水比	164%
粘着力	2.0kPa
一軸圧縮強度	4.0kPa
推定N値	0.3

表-3 裏込め注入材の配合

材料名	A液(945L)						B液(55L)
	硬化材	助材	起泡剤	安定剤	水	空気	塑強調整剤
品名	タックメント	TAC-α	TAC-2号	TAC-Re	清水	—	TAC-3G
真比重	3.15	2.60	1.00	1.27	1.00	—	1.37
1m ³ 当り	250kg	30kg	0.5kg	2.5kg	710L	142L	55L

一軸圧縮強度: $\sigma_{1t}=0.05\text{N/mm}^2$ A液比重: 1.05

一軸圧縮強度: $\sigma_{28}=2.00\text{N/mm}^2$ ゲルタイム: 15秒以内

(3) 実験の手順

表-4に実験ケース、表-5に実験条件を示す。ジャッキストローク 850mmのうち、0~450mmの区間を本システム使用なし、450~850mmの区間を本システムの使用ありの条件とした。試験装置内の飽和土に空気圧0.04~0.05MPaを加圧して実験を行った。ジャッキ速度は、50mm/minとした。裏込め注入条件として、裏込め注入率は、実験装置内への注入となるため地山への浸透はないと判断し、テールボイド体積の100%とした。裏込め注入圧は、砂質土では装置内に作用する空気圧0.04MPaと模擬土の重量を考慮すると0.05MPa程度、粘性土では装置内に作用する空気圧0.05MPaと模擬土の重量を考慮すると0.06MPa程度となると想定とした。

本システムのシステム設定圧として、裏込め注入圧の下限値と上限値を設定した。本システムは装置内の圧力の変動により裏込め注入材が自動注入されるものであり、下限値を下回ると注入が開始され、上限値に達すると注入が停止する。下限値は掘進停止直後の裏込め圧（裏込め吐出口圧）、上限値は掘進停止直後の裏込め圧+0.003MPaとした。

表-4 実験ケース

	ストローク	砂質土	粘性土
①本システムなし	0~450mm	ケース1	ケース3
②本システムあり	450~850mm	ケース2	ケース4

表-5 実験条件 (計画時)

ケース	装置内圧力	ジャッキ速度	注入率	注入圧
1,2	0.04MPa	50mm/min	100%	0.05MPa
3,4	0.05MPa	50mm/min	100%	0.06MPa

表-6 各種計測結果 (ケース1, ケース2)

ケース	ジャッキ平均速度	裏込め注入率	システム設定圧	
			下限	上限
1	46.6mm/min	102%	0.055MPa	0.058MPa
2	49.9mm/min	103%	0.055MPa	0.058MPa

各区間掘進後、沈下板の変位が安定するまで掘進停止時間を設け、掘進中、掘進停止後の沈下板の変位、各種圧力を計測した。

(4) 実験結果【砂質土 (ケース1, ケース2)】

写真-4, 写真-5に実験状況、表-6に各種計測結果を示す。

a) 裏込め注入率

裏込め注入率は、計画値の100%に対し、ケース1 (本システムなし) では102%, ケース2 (本システムあり) では103%となった。

b) 沈下板の変位

図-7, 図-8にジャッキストローク、裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化を示す。沈下板の変位について、ケース1では掘進時に-10.8mm変位した。掘進停止後さらに計測終了までに-8.8mm変位し、合わせて-19.6mmまで変位した。ケース2では掘進時に-16.0mm変位した。掘進停止後は、システムを作動させ裏込め注入材A液の注入により圧力の保持が行われ、階段状に変位が8.6mm戻り実験終了時で-7.4mmの変位となった。

c) 裏込め吐出口圧 (装置内裏込め圧)

図-9, 図-10に裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化を示す。裏込め吐出口圧について、ケース1では掘進停止後、波状の変化を示しているが、なだらかに圧力が低下し0.053MPaまで低下した。ケース2では掘進停止後システムの作動により圧力の上昇と降下が交互に繰り返されているが、システム設定圧の下限値である0.055MPa以上を維持していることが確認できる。

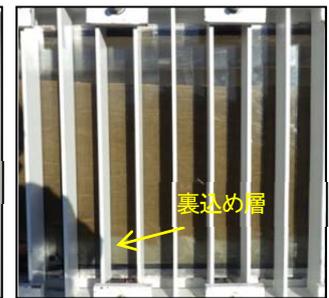


写真-4 実験前 (砂質土)

写真-5 実験中 (砂質土)

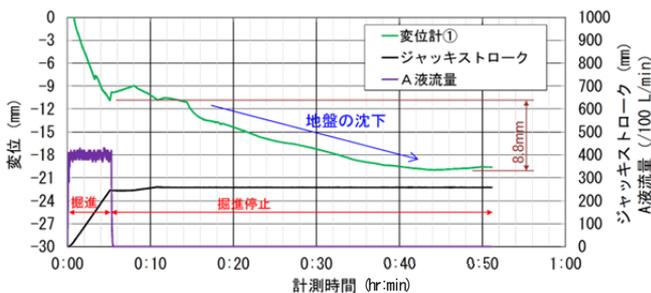


図-7 ジャッキストローク、裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化 (ケース1: システムなし)

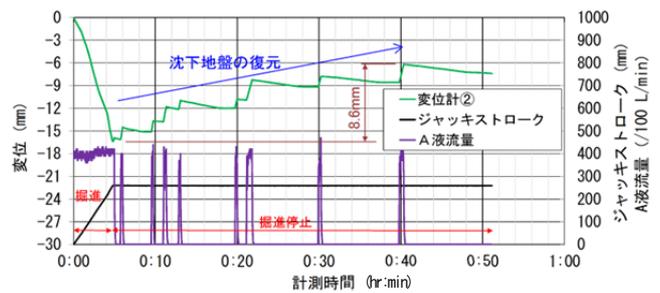


図-8 ジャッキストローク、裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化 (ケース2: システムあり)

(5) 実験結果【粘性土（ケース3, ケース4）】

写真-6, 写真-7に実験状況, 表-7に各種計測結果を示す。

a) 裏込め注入率

裏込め注入率は, ケース3 (本システムなし) では101%, ケース4 (本システムあり) では123%となった。ケース3では粘性土にひび割れと沈下を生じたことから, 裏込め注入量が不足していると判断し, ケース4では裏込め注入量を120%まで増加させた。

b) 沈下板の変位

図-11, 図-12にジャッキストローク, 裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化を示す。沈下板の変位について, ケース3 では掘進時-18.1mmまで変位した。掘進停止後は, さらに-10.4mm変位し, 合わせて-28.5mmまで変位した。ケース4では掘進時に-5.4mm変位した。掘進停止後は, システムを作動させ裏込め注入材A液の注入により圧力の保持が行われ, 階段状に3.6mm変位が戻り実験終了時で-1.8mmの変位となった。

c) 裏込め吐出口圧 (装置内裏込め圧)

図-13, 図-14に裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化を示す。裏込め吐出口圧について, ケース3では掘進停止後0.074~0.079MPaの範囲で波状に一定に変化しており, 圧力の低下が見られない。ケース4では掘進停止後のシステムの作動により圧力の上昇と降下が交互に繰り返されているが, システム設定圧の下限値である0.075MPa程度を維持していることが確認できる。

(6) 考察

砂質土および粘性土による本システムの有効性を確認する実証実験の結果を次のように考察する。

a) 砂質土

本システムを使用しない場合, 掘進停止後に-8.8mmの変位を生じた。実験装置のテールボイド厚 (90mm) の10%程度の変位量であり, 掘進停止後の45分程度の間で生じた。また, 掘進停止時に装置内裏込め圧の低下がみられた。これは, 掘進停止後の裏込め圧の低下により地

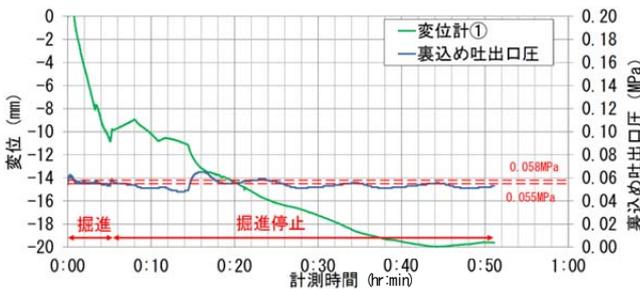


図-9 裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化 (ケース1: システムなし)

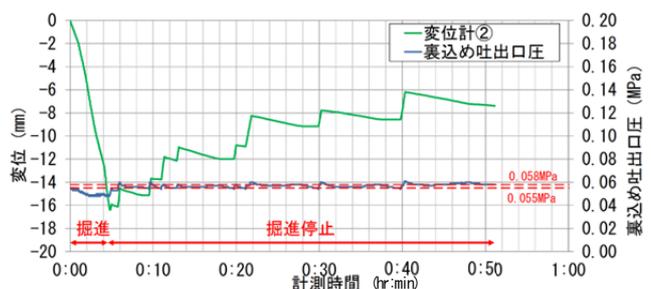


図-10 裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化 (ケース2: システムあり)

表-7 各種計測結果 (ケース3, ケース4)

ケース	ジャッキ平均速度	裏込め注入率	システム設定圧	
			下限	上限
3	48.9mm/min	101%	0.075MPa	0.078MPa
4	49.4mm/min	123%	0.075MPa	0.078MPa



写真-6 実験前 (粘性土)



写真-7 実験中 (粘性土)

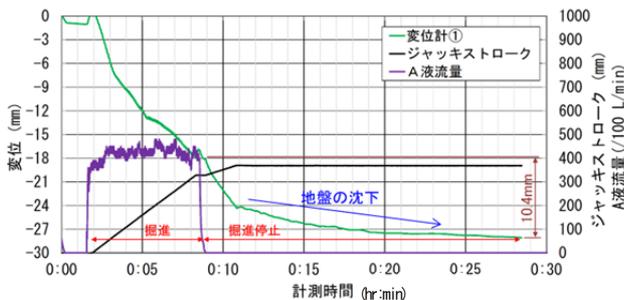


図-11 ジャッキストローク, 裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化 (ケース3: システムなし)

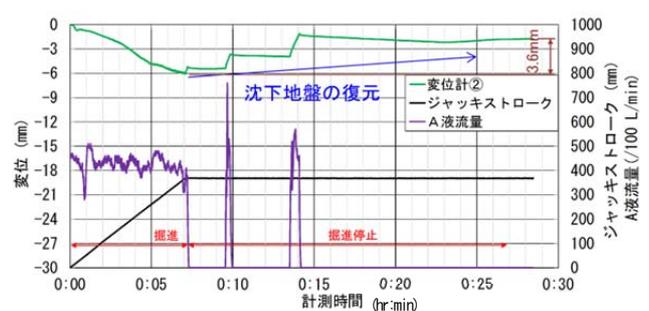


図-12 ジャッキストローク, 裏込め注入材流量と地盤変位の経時変化 (ケース4: システムあり)

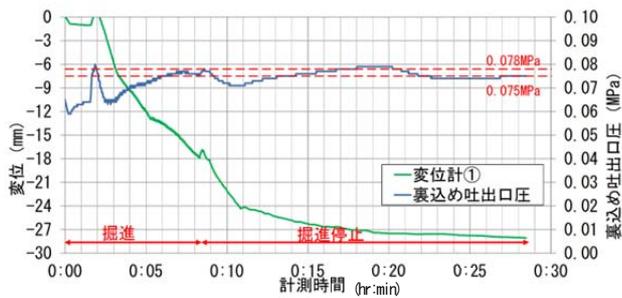


図-13 裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化
(ケース3：システムなし)

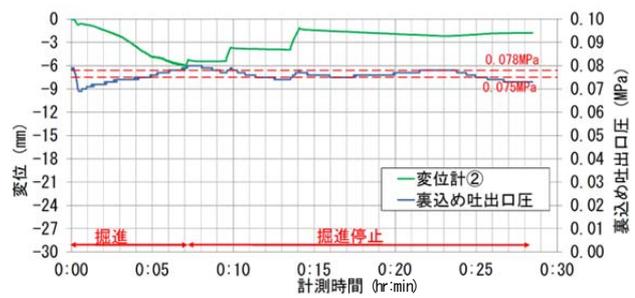


図-14 裏込め吐出口圧と地盤変位の経時変化
(ケース4：システムあり)

盤内で緩みが生じ、8.8mm沈下したと考えられる。

本システムを使用した場合、掘進停止時に8.6mmの変位を生じた。本システムの作動により裏込め注入材の主材は、合計8回注入された。本実験条件では、土被りが小さく上載荷重が小さいため、裏込め注入圧に地盤が敏感に反応し隆起する結果となった。しかし、実現場では土被りも大きく、設定圧を適正に調整するため地盤の隆起は生じないと考える。

b) 粘性土

本システムを使用しない場合、掘進停止後に-10.4mmの変位を生じた。実験装置のテールボイド厚 (90mm) の12%程度の変位量であり、掘進停止後の20分程度で生じた。また、本システムを使用しないで装置内裏込め圧が保持された。これは今回の実験装置の構造、実験に用いた模擬土の特性によるものと考えられる。よって、今回の10.4mmの沈下は、地盤の緩みと考えられる。

本システムを使用した場合、掘進時に-5.4mmの変位を生じ、掘進停止時に3.6mmの変位を生じた。本システムの作動により裏込め注入材の主材は、合計2回注入された。本実験条件では、土被りが小さく上載荷重が小さいため、裏込め注入圧に地盤が敏感に反応し隆起する結果となった。しかし、実現場では土被りも大きく、設定圧を適正に調整するため地盤の隆起は生じないと考える。

したがって、砂質土および粘性土地盤において、本システムの設定圧力を適正に調整することで地盤の沈下や変位を抑制できると考える。

4. おわりに

実証実験により、本システムの有効性が確認できた。今後は、実際のシールド工事において本システムを活用し、本システムの有効性をさらに検証する予定である。

謝辞：本システムの開発および実証実験にあたり、小山幸則立命館大学客員教授に貴重なご意見、ご指導をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 矢萩秀一：硬質地盤中に構築されるシールドトンネルの覆工の設計荷重に関する研究，博士学位論文，東北大学，2008.
- 2) 杉本光隆，佐藤豊，入内島克明：シールドトンネルに用いる可塑状裏込め注入材の圧密挙動に関する研究，土木学会論文集 No.788, pp.127-137, 2005.5

(2018.8.10 受付)

DEVELOPMENT AND DEMONSTRATION EXPERIMENT OF THE RETAINING SYSTEM FOR BACKFILL GROUTING PRESSURE DURING SUSPENSION OF SHIELD DRIVING

Yutaka KASHIMA, Norio KONDOU, Takuto NAKAYAMA and Naoki HIRAHARA

Shield tunnels with shallow cover and vicinity construction are planned with soft ground, and necessary to minimize ground settlement and its influence on adjacent structures. So far, in the back fill grouting process to the tail voids, the backfill grouting pressure was reduced during suspension of shield driving, so ground settlement was inevitable. In the system developed this time, it is held the backfill grouting pressure to suppress ground settlement during suspension of shield driving by operated the pressurizing holding device to inject the backfill grouting material or its main material (liquid A) while the shield equipped with a plurality of simultaneous grouting pipes is stopped. In this development, we confirmed that ground settlement can be suppressed by carrying out demonstration experiments to confirm its effectiveness, by appropriately adjusting backfill grouting pressure in both sandy soil and cohesive soil.