

鋼枠と高充填性コンクリートを用いた場所打ち覆工工法の実証実験報告

REPORT ABOUT VERIFICATION TEST OF ECL USING H-SHAPED STEEL FRAME AND SUPERPLASTICIZED CONCRETE

園田徹士*, 谷口裕史**, 萩原 勉**, 山上 清***, 伊勢亀悦男***

Tetushi SONODA, Hiroshi TANIGUCHI, Tsutomu HAGIWARA, Kiyoshi YAMAGAMI, Etsuo ISEGAME

Labor saving and high-speed of the execution in the ECL system have been tried by using H-shaped steel frames and superplasticized concrete in it. This concrete is superior in flow ability (slump-flow: 65 ± 5 cm) and compressive strength ($\sigma_1 \geq 100 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_{28} = 550 \sim 800 \text{ kgf/cm}^2$). H-shaped steel frame is high-rigidity structure and easy to built-up for using the mechanical joint. The Verification test of this method had been implemented using a real shield tunnel machine ($\phi 2480$ mm). The situation of execution was considered similar to ordinary shield tunnel one, the constructed lining was stable structure, and ground displacement by construction of lining were very little.

Keywords: shield driving tunnel, lining, ECL, H-shaped steel frame, superplasticized concrete

1. はじめに

シールドトンネルの覆工としてプレキャストセグメントのかわりに、トンネル坑内で組み立てた内型枠にフレッシュコンクリートを打設して覆工を構築する掘削・覆工併進工法（以下、ECL工法とする）が、地山の安定性や経済性などの点から、近年注目されている。今回、ECL工法のさらなる省力化、高速化および作業性の向上を目指し、「鋼枠」と「高充填性コンクリート」を覆工材として用いるECL工法を開発した。この工法の開発にあたり、実証実験等を行ったのでその報告をする。

2. 工法の概要

本工法は、型枠と支保部材としての機能を備えた鋼枠と、締固めが不要で初期強度発現性に優れた高充填性コンクリートを覆工材として使用する。鋼枠の一つのピースは図-1に示すように、その4辺が特殊なH形状をした鋼製部材からなり、トンネル内面側は鋼製プレートで覆われ、組立は隣接し

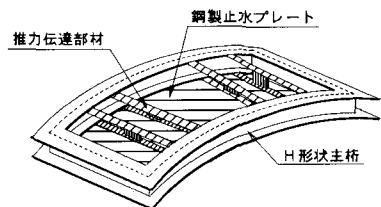


図-1 鋼枠概要

- * ハザマ 土木統括本部 技術・設計第1部
** 正会員 ハザマ 技術本部 技術研究所
*** 西武建設(株) 東京支社 土木設計部

たH形状鋼製部材どうしの嵌合により行う。
この鋼枠をシールド機テール部でリング状に
組み立て、この中に高充填性コンクリートを
充填・加圧することで、覆工体を形成する。
施工手順を図-2に示す。なお、本工法は地
盤に応じて開放型から密閉型シールド工法に
まで適用でき、テール部を除き従来のシールド
機と同じ機構を基本としている。また、推進
反力は鋼枠からとっている。

3. 工法の特長

鋼枠と高充填性コンクリートの使用により、
以下に示す特長が従来のECL工法の特長に
付加される。

- ・断面性能に優れているため覆工厚を薄く
することができる。
- ・止水性に優れた覆工が構築できる。
- ・鋼枠の使用で狭い坑内での煩雑な作業が不要になり、施工性に優れる。
- ・鋼枠の組立はボルトレス方式であるため組立が容易で、かつ組立の省力化・高速化が可能である。
- ・打設コンクリートの妻部養生時間が不要である。

4. 高充填性コンクリート室内試験

4.1 要求品質と試験項目

本工法に用いるコンクリートは、表-1に示すような性能が要求され、これらの条件を満たすため表-2
に示す試験を行いその開発を行った。

表-1 要求性能

項 目	要 求 性 能	備 考
品質の確保	・充填性に優れ、材料分離が少ないこと ・水圧、泥水の影響を受けても品質の低下 が少なくこと ・充填・加圧時に品質の変化が少ないこと	スランパ70- 65±5cm ブリージング率：2 %
作業性の向上	・スランパロスが少なく、所要の時間内での 作業性がよいこと	スランパ70- (60cm)の保 持時間：1.5時間以上
強度の確保	・初期強度の発現性に優れること ・長期強度および耐久性に優れること	$\sigma_1 \geq 100\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{28} \geq 480\text{kgf/cm}^2$

表-2 試験項目

試 験 項 目	
硬 化 前	① フレッシュコンクリート試験(スランパ70-、空気量、温度)
	② 充填性試験
	③ ブリージング試験
	④ 加圧ブリージング試験
	⑤ 凝結試験
硬 化 後	⑥ 圧縮強度、割裂引張強度測定
	⑦ 静弾性係数測定
	⑧ 単位容積重量測定

4.2 試験結果

一連の試験の中で得られた代表的な試験配合を表-3
に、試験結果を図-3、図-4に示す。ただし、各図表
中の配合1は比較のため超流動コンクリートを示し、配合
2~5は今回試験を実施した高充填性コンクリートの配合
を示す。開発した高充填性コンクリートの試験結果を以

表-3 試験配合表

配合 No.	使用 セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤	
				W	C	LS	S	G		C+LS %	② (g/m³)
1	低発熱	30.7	50.7	160	521	—	814	816		1.3	20
2	普 通	42.0	50.7	169	402	146	814	816		1.4	20
3	普 通	49.6	50.7	170	343	195	814	816		1.4	20
4	早 強	41.9	50.7	168	401	146	814	816		1.4	20
5	早 強	49.0	50.7	168	343	195	814	816		1.4	20

下に示す。

- ・スランプフローは $65 \pm 5 \text{ cm}$ の範囲内であり、流動性に優れている。
- ・スランプフローの保持時間(20℃)は1.5時間以上であり、作業性に優れている。
- ・ブリージング率は2%程度と少ない。
- ・材令1日で 100 kgf/cm^2 以上、28日で $550 \sim 800 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の圧縮強度が得られる。

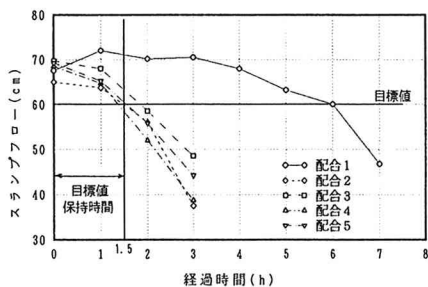


図-3 スランプフロー経時変化

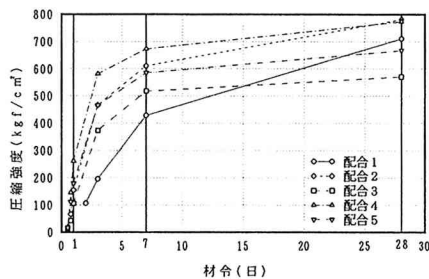


図-4 圧縮強度試験結果



写真-1 スランプフローの状況

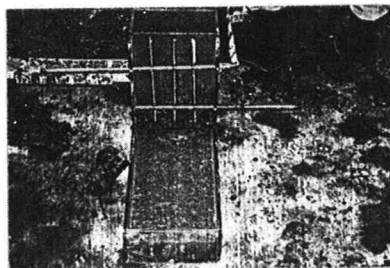


写真-2 充填性試験

5. 実証実験

5.1 実験概要

実証実験は本工法の有効性を確認すると同時にその課題を抽出することを目的として実際のシールド機を用いて行った。使用したシールド機は掘削外径 $\phi 2,480 \text{ mm}$ 、機長 $4,730 \text{ mm}$ の密閉型泥水シールド機で、ジャッキスプレッダーおよびテール部を除き、本工法のための改造は行わなかった。シールド掘削部の土質は粘土質細砂～砂質粘土で、土被りは 5.6 m 、地下水位は $\text{GL}-4.9 \text{ m}$ の位置にある。図-5に本実験の概要図を示す。また、覆工に用いた鋼枠は外径 $\phi 2,400 \text{ mm}$ 、幅 750 mm 、厚さ 132 mm で、分割数は6分割である。図-6に覆工断面図を示す。

5.2 実験の結果

(a) 鋼枠の製作・組立

今回の実証実験に先がけ、鋼枠に要求さ

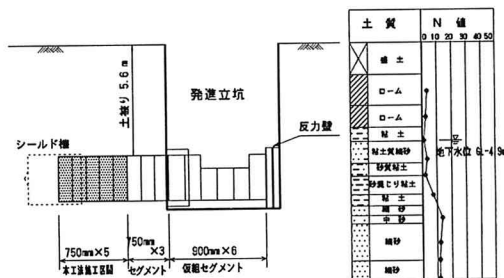


図-5 実証実験概要図



図-6 覆工断面図

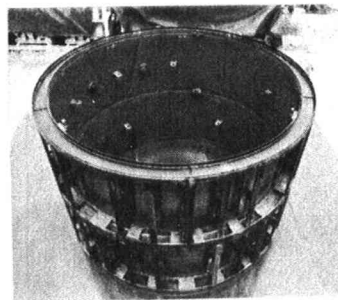


写真-3 仮組状況

れる諸条件に基づき設計検討を行い、鋼枠の仕様を決定した。鋼枠は現場で2リングの仮組試験を行い、その組立精度を確認し、あわせてその組立が容易であることも確認した。写真－3に地上における鋼枠の仮組状況を示す。

(b)コンクリート品質

コンクリートの製造は室内試験で得られた配合をもとにして、強制2軸練りミキサーを使用し、現場プラントで行った。製造したコンクリートの品質は、暑中の現場実験であったにもかかわらず、スランプフロー、空気量、流動性等の目標品質を確保することができた。また、材令強度でも1日で100kgf/cm²以上、28日で600～900kgf/cm²と十分な圧縮強度を得た。表－4に各リング番号に相当したコンクリートの品質試験結果を示す。

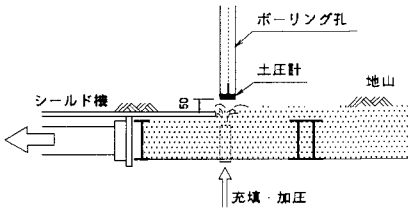
表－4 コンクリート品質管理試験結果

打設 リング番号	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	圧縮強度(kgf/cm ²)		
				1 日	7 日	2 8 日
No. 1	63.0×63.0	1.8	25.0	213	716	887
No. 2	65.0×62.5	2.1	31.0	188	582	732
No. 3	67.0×65.5	2.0	30.0	162	648	793
No. 4	62.0×59.0	1.8	32.0	129	571	718
No. 5	1) 68.0×67.0	1.4	29.0	190	515	625
	2) 68.0×68.0	1.4	31.0			

注) No. 1～No. 4は実験現場で製造、No. 5はプラント工場で製造したものである。
No. 5はプラントでの品質管理試験1)と実験現場での試験2)の結果を示している。

(c)コンクリートの打設、充填性・加圧性

コンクリートの充填・加圧状況を図－7に示すように、覆工体近傍の地山の土圧を測定することによって間接的に確認した。測定結果を図－8に示す。この結果より、地山に密着した覆工が構築されていると推測できる。また、実験終了後、覆工内部よりコアを採取し、直接的な充填性も確認した(写真－4)。



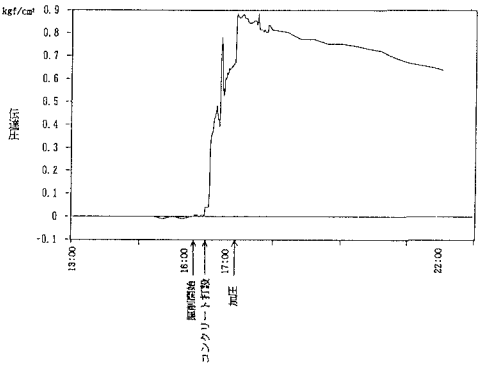
図－7 コンクリート圧測定方法

(d)シールドの掘進状況

掘進においてはコンクリート打設による泥水の劣化や、掘進時の鋼枠とシールド機テールプレートとのせり合いもなく、通常のシールド掘進と同程度の掘進ができることが確認できた。



写真－4 採取コア



図－8 圧力伝達状況

(e) 施工性

鋼枠はローラコンベアによって1ピースずつ搬入したため、その搬入に手間取ったが、実質的な鋼枠組立とコンクリート打設に要した時間は20分弱と短く、本工法が施工性に優れていることが確認できた。なお本実証試験での1サイクル（掘削から鋼枠組立、コンクリート充填・加圧まで）は100分弱であった。

(f) コンクリート応力

図-9に打設したコンクリートの応力発生状況を示す。図が示すように発生応力は許容応力度を下回っており、覆工が十分に構造的な安定性を有していることが確認できた。

(g) コンクリート温度

鋼枠内に取り付けた熱電対により、打設したコンクリートの温度計測を行った。計測結果を図-10に示す。25～30℃程度で打設されたコンクリートの温度は1日後に最大35℃程度まで上昇した後、22℃程度まで低下するが、次リングのコンクリート打設による影響を受け、打設後20日程度で平衡状態になっている。平衡時の温度と最高温度との差は15℃程度であり、また部材厚も薄く、型枠脱型もないため、覆工の温度ひび割れ発生はないと考えられる。

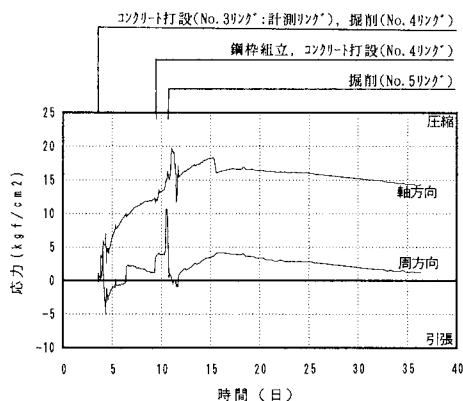


図-9 コンクリート発生応力

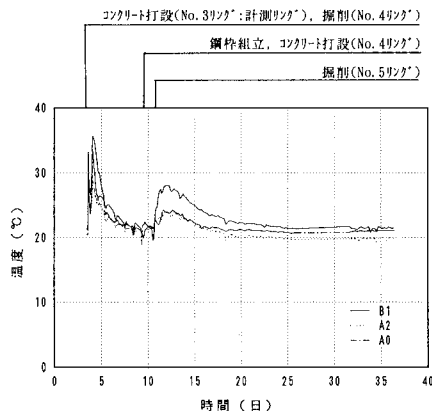


図-10 コンクリート温度変化

(h) 推力伝達部材

図-11に示すように、ジャッキ推力がコンクリート打設直後の鋼枠に作用することで、一時的に推力伝達部材の圧縮応力が上昇する。しかし、発生した応力の最大値は1450kgf/cm²程度で鋼材(S S 4 0 0)の短期許容応力(1400×1.5=2100kgf/cm²)以下に収まっている。また、打設されたコンクリートがいったん硬化すると、鋼枠とコンクリートがジャッキ推力に抵抗する構造に移行することから、推力伝達部材に発生する応力の増加はかなり少なくなることがわかる。

(i) 止水プレート

本実験では図-12に示す計測結果からわかるように、コンクリート打設に伴う止水プレートの過大な応力発生はみられず、適切な打設圧管理下で施工が行われたと考える。

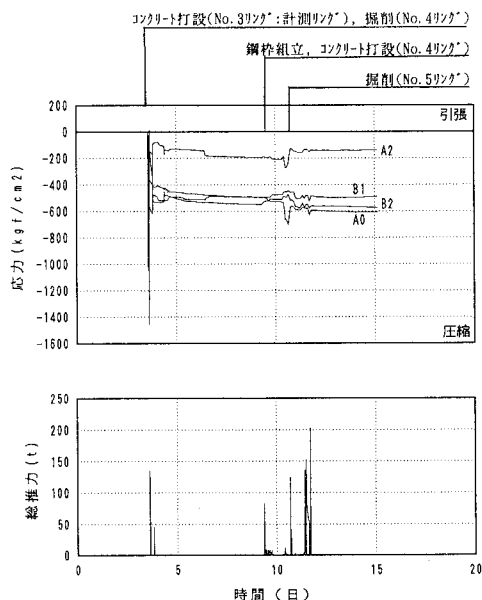


図-11 推力伝達部材応力

(j)地盤変状

シールド通過による地表面変位の状況を図-13に示す。シールド天端付近で最大5mm程度の沈下が見られるが、テール部通過後に生じた沈下量が少ないことから、沈下の主な原因はシールド推進に伴う地山の乱れであると考えられる。また、シールド機から50cm離れた位置で計測した地中側方変位の計測結果をみると(図-14)、最大で0.3mm変位する程度で、側方変位がほとんど生じていないことがわかる。これらより、テールボイドの空隙による過大な沈下やコンクリートの過剰な充填・加圧による隆起といった現象は生じず、覆工構築による地山への悪影響はほとんどなかったと考えられる。

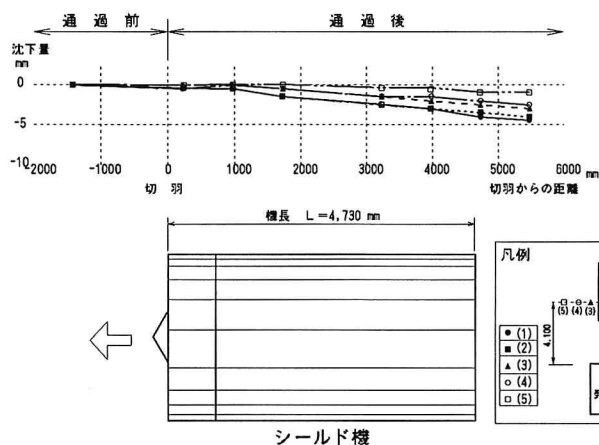


図-13 地表面変位状況

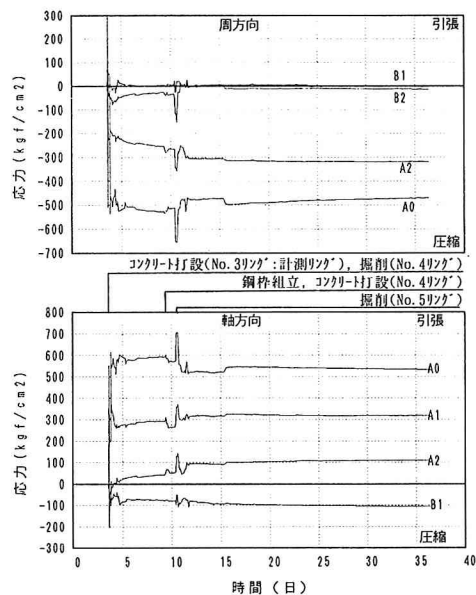


図-12 止水プレート応力

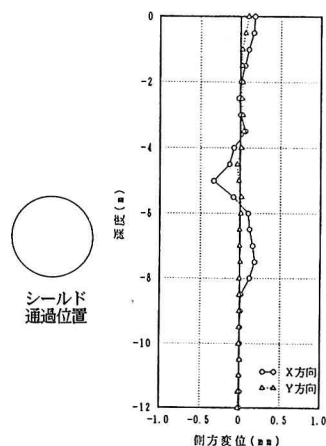


図-14 地中側方変位

6. おわりに

開発した高充填性コンクリートはECL施工に要求されるコンクリートの品質を十分満足する結果が得られた。また、実証実験においても鋼樁の製作・組立性、覆工コンクリートの製造、打設、充填・加圧性、シールド機の掘削状況、覆工の応力状況や地山の挙動、および工法全体の施工性といった各項目で満足のいく結果が得られた。これらのことから、本工法の有効性を確認することができ、実施工が十分可能である工法と考える。今後は、より高い施工時の止水性能を図る技術の確立、効率的な施工設備、経済的な鋼樁について検討を進めていきたいと考えている。

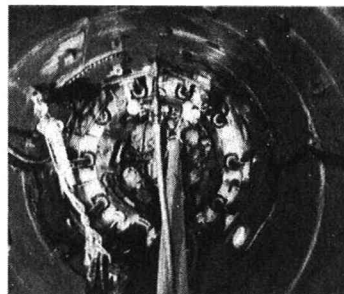


写真-5 覆工状況