

論文

[1167] 直打ちライニング工法で構築された覆工コンクリートの品質

鬼頭 誠 (鉄道建設公団・設計室)

正会員 青景平昌 (フジタ工業技術研究所)

正会員○笹谷輝勝 (フジタ工業技術研究所)

林 英雄 (フジタ工業・土木本部)

1. はじめに

地下空間の有効利用の観点から、シールド工法の果たす役割はますます重要となり、最近の技術開発には目覚ましいものがある。なかでも、直打ちコンクリートライニング工法 (ECL 工法) は、従来のセグメント工法に対して、テールボイドへコンクリートを充填することにより地盤沈下を抑制できること、工程を短縮できること、さらに、セグメントを使用しないことによる経済的効果が期待できること等の特徴を有する工法として注目されている。しかしながら、シールド工法の本来持つ特徴を生かしつつ、我が国特有の高水圧でかつ軟弱な地盤においても対応可能な施工システムを構築するためには、検討すべき課題もいくつか残されている。そこで、コンクリートの加圧脱水性を抑えた『粘性コンクリート』と『ジャッキ自動制御システム』の組み合わせを特徴とした施工システムを開発し、大型実験土槽に滞水砂層のモデル地盤を造成し、実物大施工実験を実施してきた^{1) - 11)}。本報告は、 2.0kgf/cm^2 (天端)の水圧下における鋼繊維を混入した粘性コンクリートの施工性と製作したファイバーコンクリート覆工とRC覆工の強度特性等の品質に関する試験結果をまとめたものである。

2. 施工システムの概要

コンクリート打設の手順は、図-1に示す無筋コンクリートあるいはファイバーコンクリート覆工を連続的に構築する連続施工方式を想定して実施した。この方式は、配筋を必要としないコンクリート覆工を妻型枠の役割をするプレスリングを除去することなく、連続的にコンクリート

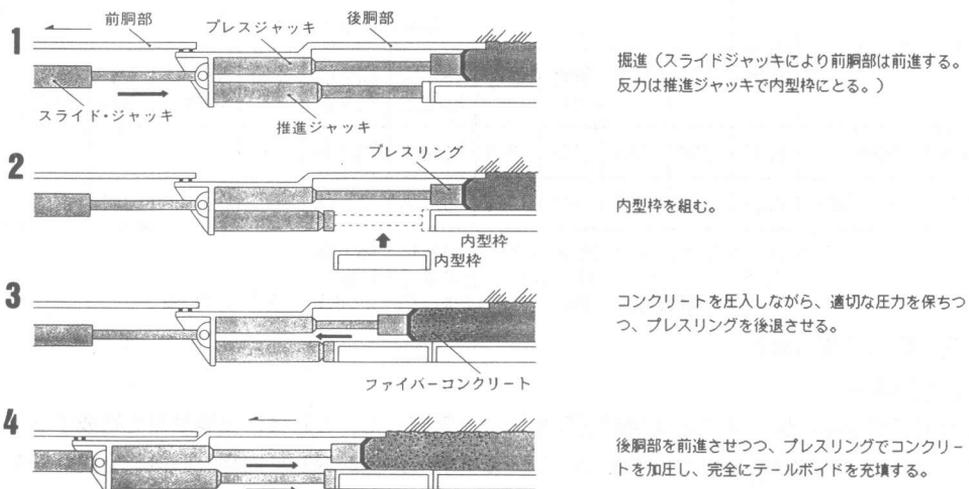


図-1 ファイバーコンクリート覆工の施工手順

を打設することが可能なシステムであるため、安定した止水性と施工速度を確保することができ、高水圧下での施工に有利な施工法である。また、鉄筋コンクリート覆工を構築する場合には、鉄筋を組むために、急硬材によって止水と自立に必要な初期強度を確保して一時的にプレスリングを除去する施工方式によった。これは、重ね継手方式で鉄筋をつなぐことにより、軸方向にも構造的に連続した構造とすることができる。何れの方式も、テールボイドへの完全な充填性と水中下での品質を確保するために、加圧脱水速度を抑制した粘性コンクリートを使用している。

3. 使用コンクリート

本工法に用いられるコンクリートは、土水圧の作用を受けながら地山に接して打設しても品質が確保できること、このような状況下でテールボイドを完全に充填するための高い流動性と分離抵抗性があることなど、従来の一般的なコンクリート施工にはない厳しい条件下での性能が要求される。特に、施工時のフレッシュな状態では、①鉄筋等の流動を阻害する障害物があっても、加圧によって充填でき締固めを必要としないこと、②コンクリートを加圧充填する時に鉄筋に悪影響を及ぼさないこと、③高水圧に晒されても材料分離および硬化後の品質低下が小さいこと、④作業中のスランプロスが小さく、ジャッキ制御を阻害する品質変動が小さいこと等が必要となる。また、強度面では、プレスリングあるいは内型枠を除去する時の初期材令での強度も必要である。配合設計上の対応として、加圧時の脱水による流動性の変動と地下水の浸透を抑制するためのセルロース系特殊混和剤の使用、特に初期強度が必要な場合の急硬材の使用、ワーカビリティを改善し耐久性を向上させるためのフライアッシュの使用、連続施工方式に対応するための鋼繊維の使用等を特徴とした『粘性コンクリート』を開発し、加圧脱水特性、水圧下での充填性、耐水性、ポンプ圧送性、強度特性等の性能を把握するための試験を実施してきた^{11) - 11)}。実大施工実験に使用した粘性コンクリートの配合を表-1に示す。

表-1 使用コンクリートの配合表

配合名	細骨材率	単位量 (kg/m ³)									
		水	セメント	細骨材	粗骨材	特殊混和剤	高性能減水剤	急硬材	凝結調整剤	フライアッシュ	スチールファイバー
鉄筋コンクリート覆工	0.45	200	328	783	960	1.089	9.075	36	3.6		
ファイバーコンクリート覆工	0.55	180	327	802	824	0.655	13.08			171	78

*水セメント比=水/(セメント+急硬材) : 55 (%)
 スランプフロー: 50±5 (cm) 空気量: 2±1 (%)
 粗骨材の最大寸法: 20mm スチールファイバー : 0.5 x 0.5 x 30 mm

4. 実大施工実験の概要

(1) 実験装置

実大施工実験は、図-2に示す実験装置を用いて実施した。これは、実験地盤を造成する大型土槽(内寸法 4,000×4,400×3,350 mm)、シールド機(外径2,644mm、内径2,600mm 全長4,250mm)内型枠(セグメント方式、外径2,000mm)、プレスジャッキ、推進ジャッキ、スライドジャッキ、エレクター等から成る装置である。この土槽内に、最大水圧2.5kgf/cm²の滞水砂層を造成し、このなかで覆工コンクリート(内寸法2,000mm、覆工厚300mm、単位リング長900mm)を3リング連続

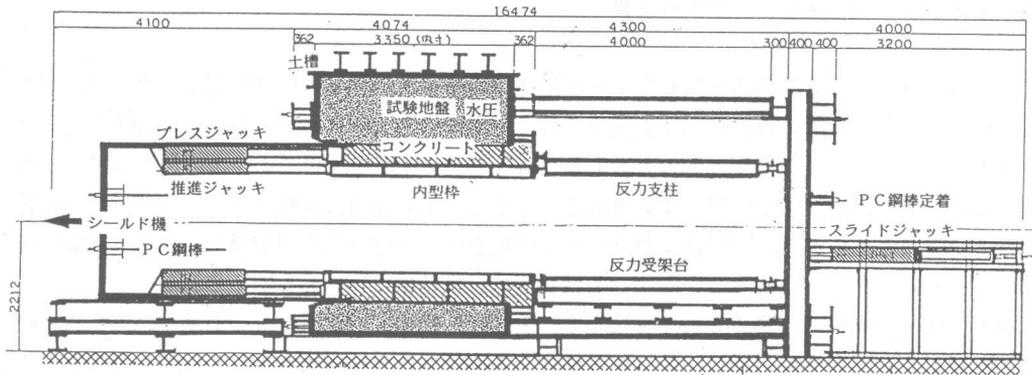


図-2 実大施工実験装置

的に施工する実験を繰返し行ない、製作した覆工供試体は土槽内から搬出し、出来形寸法、コア採取供試体による強度試験、リング切断供試体の載荷試験等によって覆工品質を確認した。尚、実験地盤には、砂（粘土シルト分12%、比重 2.74、乾燥密度 $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、締固め度90%）を用いた。

(2) ジャッキ自動制御システム

シールド前面圧あるいは周辺摩擦が作用するシールド機を掘進させつつ、周辺地盤の沈下あるいは隆起を起こすことなく、テールポイドにコンクリートを充填するためには、ジャッキの制御が極めて重要となる。本工法で使用されるジャッキは、コンクリートをテールポイドに充填するためのプレスジャッキ、シールド機全体を前進させるときの推進反力を保持する推進ジャッキ、さらに、シールド機が前胴部と後胴部に分割される場合には、両者間の力の伝達をするスライドジャッキの3種類が含まれる。これらの多くのジャッキを限られた時間内に調和させながら制御するためには、コンピュータを用いた自動制御システムが不可欠である。本実験では、プレスリング上端部における圧力設定値として、理論上載圧（土圧・水圧）を下限値とし、 $+0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力範囲を管理値として設定して、開発した自動制御システムによって充填作業を行なった。

5. 覆工コンクリートの出来形寸法

地盤を型枠としてコンクリートを充填するので、軟弱な地盤においては、充填圧が小さすぎると地盤が沈下して覆工厚さが設定値よりも小さくなり、逆に大きすぎると地盤を隆起させ覆工厚さが大きくなる傾向を示す。したがって覆工厚さは、周辺地盤の変形・強度特性と同時にジャッキによる充填圧の影響を受けることになる。上記ジャッキ制御の管理範囲で施工した覆工リングの厚さの実測値を図-3に示す。理論上載圧を下限値とし、 $+0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力範囲をジャッキ制御の許容範囲とした施工によって、所定の巻き厚を確保していることが分かる。覆工リングの下端では、コンクリートの自重による圧力増分の影響により上端よりも厚くなっている。いずれにせよ、所要の覆工厚さを確保するためには、上載圧以上のプレス圧を維持することが必要であること、またファイバーコンクリートであっても所定の流動性を確保すれば、同様の充填管理値で施工できることが示された。

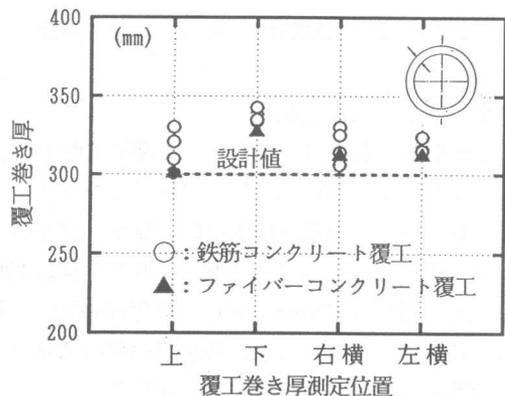


図-3 覆工巻き厚

6. ファイバーコンクリート覆工の品質

(1) 強度分布

φ10×20のコア採取供試体（採取点1～4）による圧縮強度試験および分割切断した曲げ供試体（P1～P4）の曲げ強度試験の結果を供試体の採取位置別に図-4に示す。高さ2.6mの覆工リング供試体で、施工時のコンクリートの自重および外圧増分の影響を受けて、下部の圧縮強度が上部より高くなる一般的な傾向が若干認められる。しかし、その傾向は非常に小さく、ほぼ均一な強度分布が確保されており、粘性コンクリートの分離抵抗性が均一な品質の覆工の構築に有効であることを示している。これらの傾向は、曲げ強度の試験結果についても認められる。

曲げ強度と圧縮強度の関係を図-5に示す。図には、標準曲げ供試体（JCI基準：JCI-SFに準拠）と覆工リングを分割切断した曲げ供試体による曲げ強度試験結果を示している。覆工リングから採取した供試体の結果は、標準曲げ供試体のそれよりも若干低い強度となっている。これは、標準曲げ供試体の製作時と覆工リングの施工時との鋼繊維の配向性の違いによる影響と考えられる。鋼繊維補強コンクリートのような不連続繊維を混入した場合の強度特性は、試験体中における繊維の配向と分散の影響を受けるため、打込み・締め固め方法、部材寸法、繊維の形状寸法、配合等の影響を受けることが報告されている¹²⁾。本実験では内型枠側からコンクリートを打設したが、軸方向となるプレスリング側からの打設によれば、円周方向の補強に効果的な配向性が得られるとの実験結果もあり、コンクリートの打設方法と配向性の関連を有効に反映した施工法が望まれる。いずれにせよ、本実験での施工法によっても、曲げ強度特性が、鋼繊維によって大幅に改善されることが確認された。

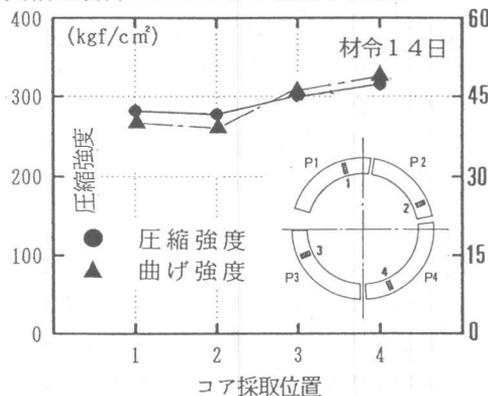


図-4 コア採取供試体の圧縮および曲げ強度

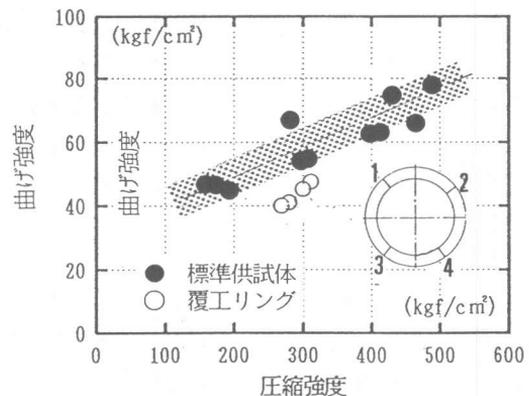


図-5 曲げ強度と圧縮強度の関係

(2) リング載荷試験

本試験は、覆工コンクリートの構造的耐力、変形能力の確認を目的として行なった。試験方法は、JIS A 5302、JIS A 5303 の鉄筋コンクリート管、遠心力鉄筋コンクリート管の外圧試験法に従った。リング載荷試験用の供試体は、連続的に構築した全長 3.5m の覆工管体からワイヤーソーイング工法によって L=60cm のリング状に切断したものである。載荷試験体の寸法は、内径 2.0 m、覆工厚約 33cm である。載荷試験体は、覆工管体を構築するときの天端から上下方向に加力するようにセットした。載荷点の荷重はロードセルにて、鉛直方向と水平方向の変位は、供試体両面セットした変位計にて計測した。

図-6に、曲げモーメントが最大となるリング下端部の支持点における見掛けの曲げ応力と加

力点間の鉛直変位の関係を示す。ひびわれの発生は、まず下部の支持点に、見掛けの曲げ応力が39kg/cm²の時に発生し、次に、上部の加力点に、さらに最大荷重時に達する直前にスプリング部の順に発生した。見掛けの曲げ応力が48kg/cm²の時に最大荷重に達し、その時点の加力点間の鉛直変位は約2mm、最大ひびわれ幅は1.4mmを示した。図-6に、ファイバーを用いない場合を『ノンファイバー』として示し、両者を比較すると、変位の増加に伴って曲げ応力は低下するが、ファイバーを用いることによって変形能力が大幅に改善され、急激な破壊には至らないことが確められ、覆工材としての優れた特性を持っていることが確認された。

7. 鉄筋コンクリート覆工の品質

(1) 強度分布

鉄筋コンクリート覆工リングから採取したφ10×20の供試体による圧縮強度試験の結果を図-7に示す。高さ方向で多少の変動があるがほぼ均一な圧縮強度を得られている。これは他の強度特性値である静弾性係数においても同様であった。鉄筋等のコンクリートの流動を阻害する障害物があっても、粘性コンクリートを加圧充填することでバラツキの少ない高品質なコンクリートが得られており、特に振動機を用いた締め固めは必要でないことが確認できた。また、鉄筋のかぶり測定の結果から、所定のかぶりを満足し、かつ重ね継手の乱れもないことからコンクリートを加圧充填する時に鉄筋に悪影響を及ぼさないことを確認できた。これらは、直打コンクリート工法を確立するための基本的な要件であり、粘性コンクリートの有効性を示している。

(2) リング載荷試験

RC覆工リングの載荷試験は、ファイバーコンクリートの場合と同様に、施工した連続覆工管体から3体の供試体(L=80cm)をリング切断により作成し、実施した。試験方法及び加力試験装置はファイバーコンクリート覆工載荷試験に準じた。試験結果の一覧を表-2に、また、典型的な荷重-変位曲線として、No.3供試体の結

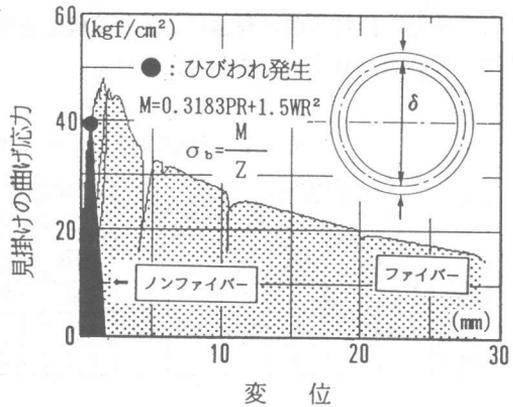


図-6 ファイバーコンクリート覆工リングの見掛けの曲げ応力と鉛直変位の関係

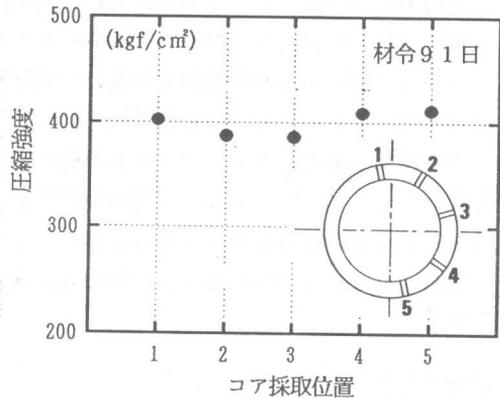


図-7 コア採取供試体の圧縮強度

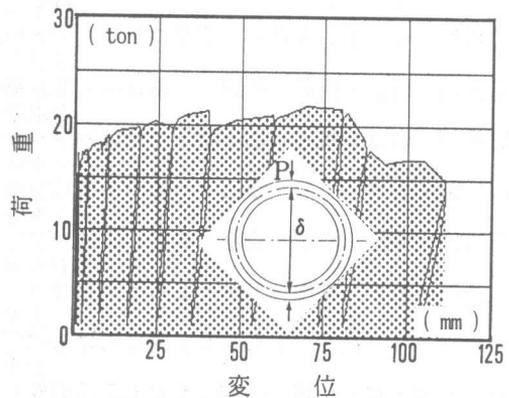


図-8 RCリングの荷重と鉛直変位の関係

果を図-8に示す。本工法によって製作された覆工は、変形能力のある靱性の高い構造となっており、また、通常の曲げ理論による計算値と実験値がほぼ一致することから、構造耐力の面からみても良好な品質を有すると考えられる。

表-2 鉄筋コンクリート覆工リングの載荷試験結果

応力の単位: (kgf/cm²) 曲げモーメントの単位: (t・m) (曲げモーメントは L=0.8m 当たり)

	コンクリート		鉄筋			ひびわれ発生時の曲げモーメント		ひびわれ幅0.25mmのときの曲げモーメント		最大荷重時の曲げモーメント		
	σc	σt	鉄筋比 (%)	σsy	σsu	実験値	計算値	実験値	実験値	計算値	実験/計算	
NO.1	400	34.4	0.0984	3790	5200	6.31	7.79	6.31	4.81	4.42	1.09	
NO.2			0.1476			6.05	7.85	7.13	6.84	6.55	1.04	
NO.3			0.1476			7.05	7.85	7.64	7.28	6.55	1.11	

8. まとめ

高水圧でかつ軟弱な地盤においても対応可能な直打ちコンクリートライニング工法（ECL工法）として、加圧脱水性を抑えた『粘性コンクリート』と『ジャッキ自動制御システム』の組み合わせを特徴とした施工システムを開発し、大型実験土槽を用いた水圧下における施工実験を実施し、製作したRC覆工リングとファイバーコンクリート覆工リングの品質を、採取した供試体あるいはリング切断した載荷供試体を用いて実験的に検討した。

その結果、高水圧下でのECL工法には、セルロース系の特殊混和剤により加圧脱水と外部からの水の侵入を抑制したコンクリートが極めて有効であること、また、さらにスチールファイバーを混入したコンクリートは、所定の流動性を確保すれば十分な施工性があり、硬化後においても覆工材としての優れた特性を持っていること、鉄筋コンクリート覆工についても、特殊な施工法で構築されたにもかかわらず、一般のRC構造物と同等以上の品質を確保していること等が認められた。

【参考文献】

- 1) 青景・渡辺・神田・井野：ECL工法におけるコンクリートの充填性とテール部の止水性に関する実験研究、ECL研究発表会論文集、日本トンネル技術協会、1987、pp.36-39
- 2) 林・和久：高水圧対応シールド工法、地下空間利用に関する建設技術研究発表会論文集、日本トンネル技術協会、1989、
- 3) 青景・その他：ECL工法用コンクリートの開発、
フジタ工業技術研究所報、第24号、1988、
- 4) 上西・青景・伊藤・井野：セルロース系粘稠剤と急硬材を用いたコンクリートの強度特性、
土木学会、第43回年次学術講演会講演概要集、1988
- 5) 神田・青景・鎌田：加圧脱水を受けるフレッシュコンクリートの充填性、
土木学会、第43回年次学術講演会講演概要集、1988
- 6) 伊藤・青景・上西・鎌田：セルロース系粘稠剤がコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響、
土木学会、第43回年次学術講演会講演概要集、1988
- 7) 青景・中山・渡辺・鎌田：ECL工法におけるテール部止水性に関する実験研究、
土木学会、第43回年次学術講演会講演概要集、1988
- 8) 伊藤・青景・神田・宮本：ECL用粘性コンクリートのポンプ圧送性、
土木学会、第44回年次学術講演会講演概要集、1989
- 9) 青景・林・松岡：ECL工法における内型枠の付着強度特性、
土木学会、第44回年次学術講演会講演概要集、1989
- 10) 宮澤・林・小貫・高橋：ECL工法のジャッキ制御システムの開発、
土木学会、第44回年次学術講演会講演概要集、1989
- 11) 松岡・林：ECL工法のコンクリート充填圧の最適制御条件についての研究、
土木学会、第44回年次学術講演会講演概要集、1989、
- 12) 小林・魚本・趙：繊維補強コンクリートの力学的諸性質の試験方法に関する研究、
東京大学生産技術研究所報告、第31巻、第1号、1984、pp.5 - 13