

場所打ち覆工コンクリートの施工品質について THE QUALITY OF IN-SITU CONCRETE LINING

浦沢義彦* 大塚幸男** 藤井綱男** 木田博光***

Yoshihiko URASAWA, Sachio OHTSUKA, Tsunao FUJII and Hiromitsu KIDA

Complemental concrete lining is often required to maintain sufficient durability of a shield tunnel in high underground water pressure. However, in case of a long tunnel, it is quite difficult to achieve water-proof ability and pumpability of concrete simultaneously, because W/C ratio, which greatly affects pumpability, should be restrained small. To retain these two controversial functions, we executed several lining tests, changing the combination of concrete ingredients, and examining the workability as well as the looking of lining surface. As a result, we succeeded to select the best combination and completed the following regular lining without any visible defects.

Key words: concrete lining, pumpability of concrete, the looking of lining surface.

1. まえがき

東京電力㈱では、シールド工法で施工したトンネルの二次覆工の適用については、基本的に一次覆工の施工において鋼製セグメントを使用した箇所は全線実施し、RCセグメントを使用した箇所は全線実施しないこととしている。ただし、RCセグメントを使用する箇所についても、トンネルの浮上がり安全率の確保、防水防錆（水質等）、偏圧等の面で機能上、あるいは維持管理上必要と判断される場合は、二次覆工を施工することとしている。本稿は、このようなシールドトンネルの構造物の品質向上について、延長2,002 m区間に亘る二次覆工の施工実績を紹介するものです。

2. 工事概要

本工事は千葉県船橋市におけるシールドトンネルで、大深度（最大土被り41.8m, 平均土被り33.6m）、洪積成田砂層の高水圧下（最大水圧3.5 kgf/cm²）での施工であった。加えて、亘長が2,002 mと長距離のため近來類のない、コンクリートの長距離圧送（最大圧送長865m）の工事であった。

* 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所

** 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所 船橋工事事務所

*** 正会員 鹿島建設株式会社

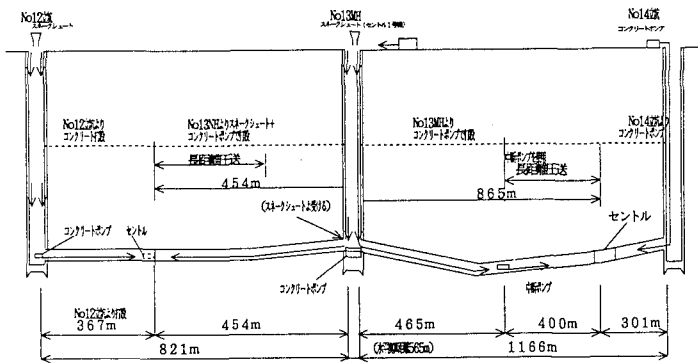


図-1 縦断面図

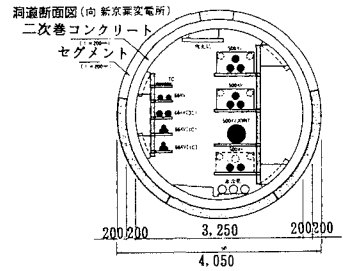
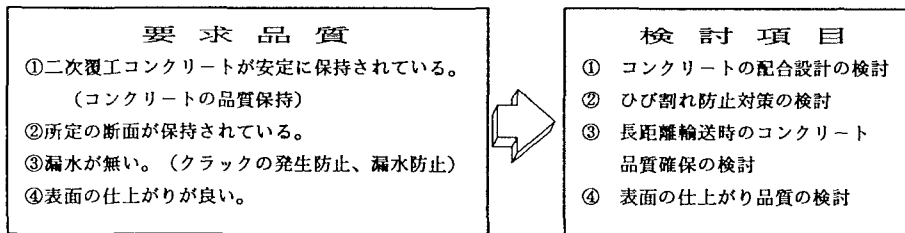


図-2 断面図

3. 二次覆工施工品質

二次覆工を施工するにあたり、事前に要求品質の機能の展開を行い、その結果、二次覆工の要求品質と検討事項を決定した。



4. コンクリートの配合設計の検討

コンクリート配合設計の検討は要求品質から「水密コンクリート」であることと、ひび割れの抑制及び、水和熱の低減による材料の選択等を考慮して下記の事項を決定した。

- (1) 単位セメント量はコンクリートの温度上昇量に最も大きな影響を与える。その為、コンクリートの所定の品質が確保される範囲内で、できるだけ少ないように定める必要がある。今回は『マスコンクリートのひび割れ制御指針』¹⁾等を参考にし、単位セメント量 $C = 300 \text{ kg/m}^3$ 以下とした。
- (2) 二次覆工に発生するひび割れとして、セメントの水和熱に起因するものがあり、電力中央研究所で行われた実験研究結果²⁾では、フライアッシュを混合する事により、ひび割れの程度を低減できることが報告されている。この結果に基づき、今回はフライアッシュセメントB種(10～20%分量)を使用した。
- (3) 設計基準強度は、東京電力の設計指針等³⁾により、28日強度を 210 kgf/cm^2 とした。ただし養生時間15時間で脱型を行うため、断面と構造上から15時間強度を 13.9 kgf/cm^2 とした。
- (4) W/C は二次覆工の要求品質より『水密コンクリート』であることから、 $W/C = 55\%$ 以下とした。

以上の事項に基づいてコンクリート配合設計を行い、試験練り、強度確認を実施し、配合設計を決定した。その結果を表-1、表-2に示す。

表-1 試験練り結果表

配合基準 kg f/cm ³	セメント の重量	骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の転落 (cm)	空気量の 転落 (%)	水セメント 比 (%)	粗骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)					圧縮強度試験結果 (kg f/cm ²)					判定
							水 W	セメント C	粗骨材 S	骨材 G	減粘剤	15H	24H	7 D	28D		
210	普通ポルト	20	15	4.5	55.0	46.6	164	299	843	986	1.196	50.6	81.3	233	325		
"	"	"	18	"	55.0	46.7	170	309	835	970	1.236	49.4	79.6	231	320		
"	フライBⅡ	20	15	"	60.0	48.5	160	267	890	962	1.068	23.0	48.0	165	266		
"	"	"	"	"	55.0	46.0	161	293	832	994	1.172	33.2	61.7	198	305	○	
"	"	"	"	"	50.0	45.2	162	324	804	994	1.296	42.6	78.7	231	348		
"	"	"	18	"	60.0	48.7	166	277	882	946	1.108	21.0	46.7	162	266		
"	"	"	"	"	55.0	46.2	167	304	825	978	1.216	32.5	60.3	199	303		
"	"	"	"	"	50.0	45.1	169	338	788	978	1.352	41.1	74.0	236	345		

表-2 配合表

W/C	セメント の重量	骨材の 最大寸法	スランプ	単位量 (kg f/m ³)				減粘剤
				W	C	S	G	
55%	フライ B	20mm	15.0	164	299	809	1007	3.229

5. ひび割れ防止対策の検討

完全にひび割れを防止することは難しく、あらかじめ予定した位置に発生させ、許容ひび割れ幅に抑えることによりひび割れを制御する誘発目地を設置した。

誘発目地の間隔については、BS5337の方法、A. Brandtzaegの方法、N. PETERの方法（DIN 1045を基礎）とACIの方法などがあるが、今回は他現場で良好な実績がある、ACI-207委員会の提案式にしたがって求めた。

ACI-207 委員会提案式

$$L = \frac{W}{18 (KR \cdot d \cdot T - ft/Ec)}$$

L = 平均ひび割れ間隔

W = ひび割れ幅：過去の実績より0.5 ~ 0.8mm

d = コンクリートの線膨張係数 = 1.8×10^{-5} (1/F°) ft = コンクリートの引張強度 = 298.7 (psi)

E_c = コンクリートの弾性係数 = 3.627×10^6 (psi)

KR = 拘束度 = 日比谷築地管路工事その他を参考に実績より0.5 ~ 0.6mm とする。

T = 換算温度降下量 = 32.5°C (乾燥収縮による温度降下量 + コンクリートの温度降下量)

以下に計算結果を示すが、セントル構造上、型枠間隔が1.8mであることと、平面線形R=70mの急曲線のためセントル長10.8mを5.4mに短縮して施工するなどの条件から、誘発目地間隔を3.6m間隔とした。

表-3 計算結果

拘束度 (KR)	平均ひび割れ間隔 (L)
0.5	4.15~6.65m
0.6	2.96~4.73m

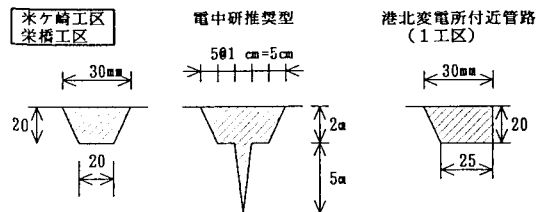


図-3 誘発目地図

誘発目地の形状は、電中研推奨型⁴⁾が理想であるが、先端の鋭角部の施工は誘発目地を型枠に固定することから型枠を撤去することが難いため、他現場での実績が多くこの形状にできるだけ近い物を採用した。

その他のひび割れ防止対策として、①坑口 (No12MH, No14MH)に木製の遮風壁を設置し坑内の通風を防止し②散水などにより急激な温度・湿度変化を抑制する等により、③坑内の温度・湿度管理 (目標温度20°C以下、湿度90%以上)を行った。

施工途中及び施工後のひび割れ調査結果を図-4に示す。ひび割れの発生は、誘発目地部に発生しており一般部の壁面にひび割れは発生していなかった。

それらのひび割れの発生時期は、年末休暇明けに発見されていることから、作業休止期間中の坑内温度・湿度の低下によるものと考えられる。

また、ひび割れ幅は発生後ほとんど変化がなく、0.1 ～ 0.2 mmでインパットを含め全周に発生している。

ひび割れの発生位置は坑口に近い場所が多く、断面的には照明設備のある右側からひび割れが多く確認された。

以上のようにひび割れ対策の誘発目地設置は、十分にその効果があったと判断できる。

6. 長距離圧送時のコンクリート品質確保の検討

(1) 長距離圧送の経緯

当初、No. 13MH（中間立坑）から、セントル2台により、それぞれNo. 14 立坑間1,166 m及びNo. 12 立坑間 821mの施工区間をスクリュークリートで運搬しコンクリートポンプで打設する計画であった。しかし、1回のコンクリート打設量26㎡を運搬するためには、線形上急勾配区間があるため、1回当たり 5㎡(2.5㎡×2両継)で6往復する必要がある。その時の所要時間は、運搬開始より打設終了まで約5時間必要であったその結果以下の問題点が懸念された。

- ①打継目のコールドジョイントの発生
- ②圧送途中の配管内のコンクリートの硬化
- ③生コンの品質（スランプ、空気量 etc.）の低下

したがって、今回は定置式コンクリートポンプ2台を中継して、連続圧送工法により施工した。

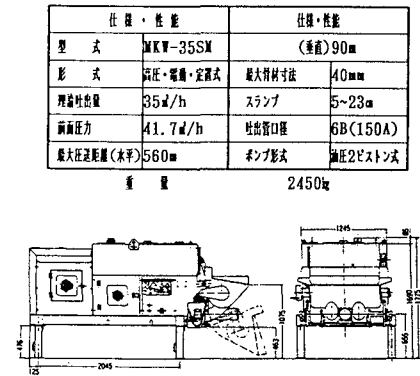


図-5 ホンプ図

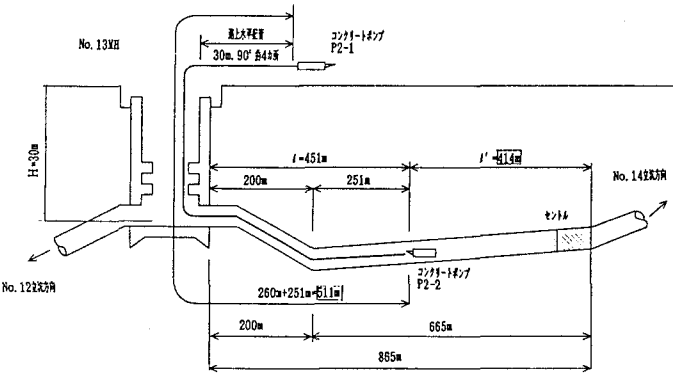


図-6 ポンプ配置図

(2) 長距離圧送時のコンクリート配合計画

長距離圧送の場合、コンクリートは、材料分離・スランプロスなどによるワーカビリチーの変化が少なく圧送性の高い配合が要求される。そのため、配合を下記のように変更した。

- ①スランプはロスを考慮し圧送距離に応じて18 cmを21cmに変更した。
 - ②細骨材率はs/a=47% を47.3 %に変更した。
 - ③単位セメント量は 300kgを 319kgに変更した。
- 試験施工時のデータを表-4 に示す。

表-4 配合表（長距離）

W/C	セメントの種類	S/a	スランプ	単位量 (kgf/m³)				
				W	C	S	G	混和剤
55%	フライB種	47.3	+2.5 18.0mm	175	319	827	941	3.445

(3) ポンプ圧送計画

最大圧送距離は865mになるがコンクリートポンプ2台の中継により圧送打設を実施した。各々の圧送距離は451mと414mとし、コンクリートポンプは電動定置式油圧2ピストン式の物を2台使用した。配管計画は垂直配管は管内圧力が高くなることを予想して管用炭素鋼管(SGP・5B)を使用した。シールド洞道内の圧送管は電縫管(ストレートシーム管5B)を使用し、ビクトリックジョイントにより連結した。配置図を図-6に示す。

(4) 施工実績

ポンプの最大圧送距離451mの施工実績を表-5、6に示す。ポンプの最大前面圧力能力41.7kgf/cm²に対してまだ十分に余裕があった。スランプロスも圧送後のセトル直前で2～3cmと予想より少なく、連続圧送打設が計画通りできた。

また、立坑が30mと深いため、垂直輸送での材料分離を考慮して、一部の施工区間でスネークシュートを使用して立坑下へコンクリートを鉛直輸送した。0.5%以下の空気量の減少が全体的に見られたが、コンクリートの品質に影響はなく、仕上がり面では逆に大きな空気アバタの発生が少ない好結果が得られた。施工時の危険作業であるエア抜きが不要であることから、安全面での利点は大きかった。

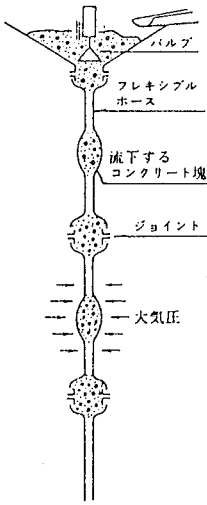


図-7 スネークシュート図

表-5 施工実績表 (コンクリート)

	スランプ			空気量			コンクリート温度		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
	cm	cm	cm	%	%	%	℃	℃	℃
搬入時	20.5	20.0	20.5	2.9	3.1	2.5	20.5	20.5	19.0
中継ポンプ	21.0	21.5	21.0	2.9	2.9	2.0	20.0	20.0	20.0
筒先	18.5	19.5	19.5	2.3	2.7	2.3	20.0	20.0	19.5
	1.5H		7D	2.8D		摘要			
圧縮強度	15.5 kgf/cm ²		172kgf/cm ²	276kgf/cm ²					

表-6 施工実績表 (ポンプ)

台目	施工実績表 (コンクリートポンプ)		
	吐出量 m ³ /h	油圧計 kgf/cm ²	前面圧力計 kgf/cm ²
1台目	2.7	21.0	37.5
2台目	2.5	20.5	34.2
3台目	2.8	21.0	35.7
4台目	3.0	20.0	33.3
5台目	2.2	20.0	33.3

7. 表面の仕上がり品質の検討

二次覆工コンクリートの要求品質として表面の見栄えがあるが、その評価として以下の事項がある。

表面評価表

- ①表面にコールドジョイントが無く、縞模様が無い。
- ②表面にジャンカ、水アバタが無い。
- ③表面にひび割れが無い。
- ④漏水が無い。
- ⑤打ち継目に目違いが無く、表面に艶がある。

検討要因

- ①打込みスランプ
- ②締固め方法
- ③剥離剤
- ④流動化剤
- ⑤セメントの種類
- ⑥スライディングフォーム
- ⑦コンクリートの打設方法

- (1) 打込みスランプと表面仕上げの関係は、目視による判定ではスランプ20cm前後が良い結果となった。
- (2) 締固め方法としては、①型枠バイブレータ（高周波）、②棒バイブレータ（高周波）、③箱形バイブレータ、④木槌を使用した。型枠、棒バイブレータだけではアバタの減少に効果が少ない。スプリングラインより下部のジャンカには棒バイブレータを直接掛ける方法が有効で、加えて、箱形バイブレータ、及び木槌等の打撃振動を打設状況に合わせ、空気泡、水泡を外に出す方向で丹念に使用することが効果的であった。
- (3) 剥離剤はアバタの発生には影響は無いが、表面の縞模様についてはその製品により大きな違いが見られた。これらの剥離剤の違いは粘性の違いによる型枠との付着力の違いによるもので、コンクリート打設時にコンクリートが型枠表面を剥離剤と一緒に流れ、そのため縞模様が発生していることが分かった。今回はその黒い縞模様がでにくい、白い表面仕上げのできる製品を使用することにした。また、剥離剤散布量も影響が考えられ、最少量で散布するように管理した。
- (4) 打設位置はスライディングフォームの構造上『流入口からの直接打設方法』が基本であるが『点検窓からY字管による均等打設（スプリングラインまで）』を併用した場合の2種類の方法で施工した。
- 『流入口からの直接打設方法』では、左右均等に流れない場合があり、その対策として『点検窓からY字管による均等打設方法』を採用した。この工法はインパート部のジャンカに対しては、有効であったがY字管から流入口に変更する場合に時間が掛かり、打継目が発生しやすい欠点があった。しかし、バイブレータを点検窓より直接掛けることと、工法変更時に型枠バイブレータ等を重点的に使用することにより、ジャンカも打継目もない表面仕上げができた。

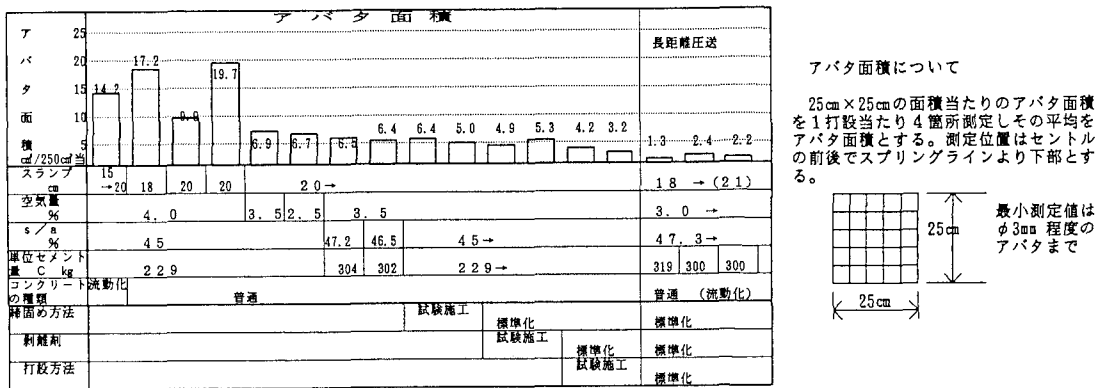


図-8 アバタ面積図

8. おわりに

以上、今回の二次覆工コンクリート施工実績について述べたが、今回の要求品質であるクラックの発生を最小限に抑制する事ができた。また、コンクリートの長距離圧送についても、コンクリートポンプを2台中継して打設することができ、その要求品質についても十分満足のできる結果であった。表面仕上げは、施工中に検討を行い、随時施工改良を行った結果、所定の要求品質をほぼ満足できる結果であった。

今後予想される長距離、大深度のシールド工事の二次覆工コンクリート打設の参考になれば幸いである。

《 参考文献 》

- 1) 日本コンクリート工学協会
- 2) 石嶋 新津 青柳 大沼：地中線シールド二次覆工コンクリートに関する技術検討について 電力土木N0177
- 3) 東京電力株式会社 地中線建設所：地中線土木構造物設計指針
- 4) 江藤、小野：マシナ壁土構築物におけるひび割れ誘発目地の形状効果に関する解析的検討 土木学会、第48回年次学術講演会（平成5年9月）