

高炉スラグを高含有した下水シールド二次覆工コンクリートの耐腐食性評価

吉田 吉孝*

椎名 貴快**

Yoshitaka Yoshida

Takayoshi Shiina

1. はじめに

シンガポール共和国国内で施工中の大深度下水幹線トンネル T10 工区工事（図-1）では、企業先の Public Utility Board（以下、PUB）からシールド二次覆工コンクリートに対する要求性能として、下水環境下（硫化水素濃度 100 ppm 以上）で 100 年以上の耐用年数が求められた。

本稿では、二次覆工コンクリートの耐腐食性評価に係る各種試験結果について報告する。

2. 覆工配合の要求仕様および配合案

二次覆工配合に対する PUB の要求事項は、a) 透水性低減剤（以下、PB）を結合材重量比 1.2% 以上添加、b) 普通ポルトランドセメント（以下、OPC）の 80% 以上を高炉スラグ（以下、GGBS）で置換、c) OPC の 15% 以上をシリカフュームで置換、の 3 条件のいずれかを満足することであった。そこで本工事では b) の配合方針を選択した。また施工上の要求性能は、a) フロー値 600 ± 100 mm（製造から 4 時間後）、b) 脱型強度 10 N/mm^2 以上（打込み完了から 18 時間後）、c) 圧縮強度 60 N/mm^2 以上（材齢 28 日）とした。

上記の条件を考慮し、かつ耐腐食性を加味した 5 配合案（M1～M5）を設計し、各種試験を実施した。表-1 に使用材料および配合を示す。試験因子は、1) 水結合材比（W/B）、2) GGBS の置換率（GGBS/B）、3) シリカフュームの添加有無、4) PB 添加量、の 4 項目である。

図-2 に 5 配合の粉体中 3 成分（CaO, SiO_2 , Al_2O_3 ）を OPC と比較して示す。本配合案の粉体は、OPC に比べて、CaO が 6 割程度と少なく、 SiO_2 が約 1.5 倍多い。これにより、CH 生成量が抑えられて硫酸による二水石膏の生成が抑制され、硫酸劣化抵抗性が向上すると推察した。

3. 二次覆工コンクリートの品質評価

表-2 に二次覆工コンクリートに要求される品質評価項目の全 7 項目を示す。この内、⑦は硫化水素濃度 100 ppm 以上、温度 30°C 、相対湿度 100% RH の腐食条件下で試験し、設計耐用年数 100 年を満足する覆工厚を決定

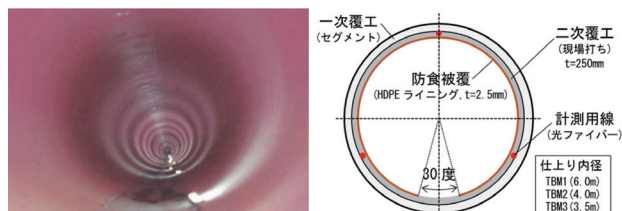


図-1 トンネル内仕上りイメージ、標準断面図

表-1 使用材料と二次覆工コンクリート配合案

配合名	W/B (%)	s/a (%)	GGBS 置換 (%)	SF 置換 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (l/m ³)	
					W	B			S	G		
						OPC	GGBS	SF			SP	PB
M1	29.0	43	80	0	145	100	400	0	726	970	7.5	2.0
M2				4	145	96	384	20	730	960	7.5	2.0
M3	90		0	145	50	450	0	722	970	7.5	2.0	
M4			4	140	48	432	20	726	960	7.5	2.0	
M5	28.0		80	0	140	100	400	0	726	970	10.3	1.5

[使用材料]

OPC（普通ポルトランドセメント、密度 3.02 g/cm^3 、 SO_3 含有量 4.0% 以下）、GGBS（高炉スラグ微粉末、密度 2.91 g/cm^3 、比表面積 $4,250 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、 SO_3 1.9%）、SF（シリカフューム、比表面積 $191,438 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、密度 2.2 g/cm^3 、 SiO_2 94.4%）、S（細骨材、表乾密度 2.61 g/cm^3 ）、G（粗骨材、表乾密度 2.62 g/cm^3 ）、SP（高性能 AE 減水剤）、PB（透水性低減剤）

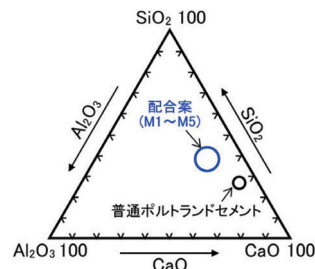


図-2 粉体中の化学 3 成分の比較

表-2 二次覆工コンクリートの要求性能

項目	試験内容	要求性能	規格
①	浸透性空隙率	10% 未満	ASTM C642
②	吸水率	1.0% 未満	BS 1881 : Part122
③	水分浸透深さ	10 mm 未満	BS EN 12390-8
④	透水係数	$5 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 未満	HDB permeability test
⑤	急速 Cl^- イオン透過性試験	1,000 C 未満	ASTM C1202
⑥	自己収縮ひずみ	350μ 以下	ASTM C1698
⑦	腐食深度（100 年想定）	覆工厚の決定	腐食促進試験（実環境）

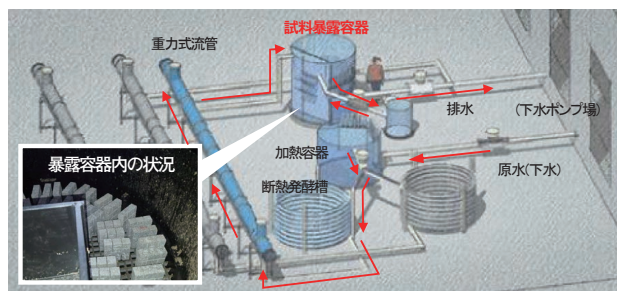


図-3 下水ポンプ場での腐食促進試験

するものである。本試験は、図-3 のドイツ KIWA 社が保有する下水ポンプ場内に設けられた試験装置で実施した。試験体 $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ から切り出した試料 ($150 \times 100 \times 40 \text{ mm}$) を暴露容器内に配置し、3 ヶ月ごとに計 4 回の 12 ヶ月まで、立体顕微鏡による表面の腐食深さ (t1) および偏光顕微鏡による石膏化領域 (t2) を加えた

* シンガポール営業所クイーンズタウン（出）
（現：タンピネス（工）兼土木統括部設計課）

** 技術研究所

腐食量 (t_1+t_2) を測定した。試験の結果、例えば M1 配合では、写真-1 のように、1 年暴露での腐食量 3.15 mm ($t_1=2.4$ mm, $t_2=0.75$ mm) であった。また EPMA (写真-2) による SO_3 の面分析結果から、硫黄腐食域は 2.9 mm で、概ね等しい結果を得た。なお、各配合での 1 年暴露の腐食量は 3~5 mm 程度であった。100 年後の腐食量は、3 ヶ月毎に計測した腐食量を基にカーブフィッティング手法で 34~46 mm と推定した。

ここで既往の腐食量推定式¹⁾によれば、硫化水素ガス濃度 100 ppm 環境下で供用年数 100 年とした場合、普通コンクリート (補正係数 $\alpha=1.0$) の腐食量は 133 mm となる。

$$d = \alpha \times 1.33 \cdot \sqrt{C \times T}$$

d: コンクリート腐食量 (腐食深さ+劣化深さ) (mm)
 α : コンクリート材質に対する補正係数 (普通コンクリートの場合は 1.0)
 C: 平均硫化水素ガス濃度 (ppm)
 T: 供用年数 (年)

同式より逆算された α 値は 0.26~0.35 の範囲で、普通コンクリートのおよそ 3~4 倍の耐腐食性能を有していた。また、東京都下水道局で採用されている二次覆工一体型セグメントに使用されているコンクリート (28 日圧縮強度 54.5 N/mm², 高炉セメント B 種) を対象に実施した暴露試験 (1 年間, 100 ppm) の結果²⁾によれば、腐食量が平均 6.1 mm であったことから、100 年後の腐食量が 60 mm 程度 ($\alpha=0.46$) と推定でき、当該値と比較しても今回のコンクリートは 1.5~2 倍ほどの耐腐食性を有していた。試験項目①~⑦の結果は表-3 に示したとおりで、すべての配合案で基準を満たしており、この内、最も良好な結果を得られた M5 配合を工事用として選定した。

4. 硫酸浸漬試験

硫酸劣化抵抗性を確認するため、選定した M5 配合で試験体 (15×15×15 cm) を採取し、材齢 28 日まで 20℃ で水中養生後、5% 硫酸溶液 (pH 2.0) に浸漬して質量変化率を測定した。この時、同程度の圧縮強度を有する高炉セメント B 種を用いた配合 (W/C=32%, GGBS 置換率 42~43%, $\sigma_{28}=71.2$ N/mm²) と比較した。試験の結果、M5 配合は BB 配合よりも初期の硫酸抵抗性が高く、硫酸による質量変化率が $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定した時、劣化進行速度は BB 配合よりも 23% 改善していた (図-4)。

また写真-3 に EPMA によるカルシウムと硫黄のモル比 (S/Ca) を面分布で示す。両配合ともに露出面から最大 2~3 mm ほどの深さまで石膏化領域 (赤色) が進行しているが、それよりも以深では健全域となっており、硫酸によるダメージはごく表面部にのみ集中していた。

5. まとめ

試験の結果、計画した 5 配合すべてで所要の性能を満足していた。この内、良好な品質データを得られた M5 配合 (W/B=28%, GGBS 置換率 80%, シリカフューム

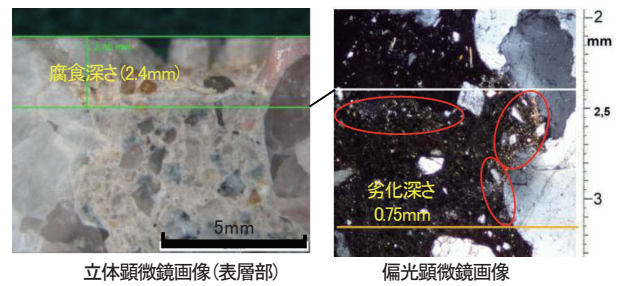


写真-1 腐食促進試験による腐食量 (例: M1 配合)

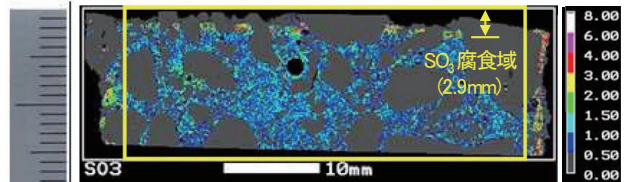


写真-2 EPMA 面分析 (SO_3) (例: M1 配合)

表-3 品質評価試験結果

評価項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
判定基準	<10%	<1.0%	<10 mm	<5×10 ⁻¹³ m/s	<1,000 C	≤350 μ	≤150 mm	
配合名	M1	2.1	0.3	3	4.3×10 ⁻¹³	445	80	44
	M2	4.3	0.3	3	4.3×10 ⁻¹³	329	250	45
	M3	4.7	0.3	3	4.3×10 ⁻¹³	428	110	41
	M4	3.1	0.3	7	4.3×10 ⁻¹³	494	190	46
	M5	5.9	0.3	3	4.3×10 ⁻¹³	143	200	34

備考) 網掛けの値は各試験項目で最も良好な結果を示す

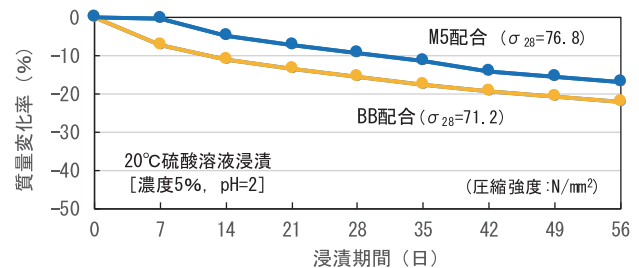
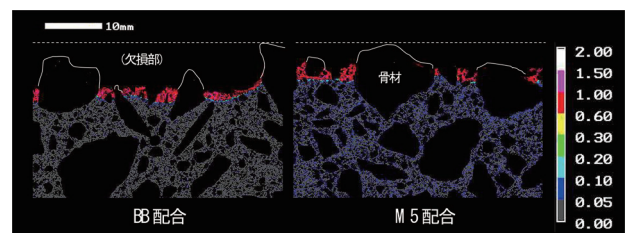


図-4 硫酸浸漬による質量変化率の推移



S/Ca<0.10	0.10≤S/Ca<0.50	S/Ca≥0.50
健全域	硫酸侵入領域	石膏化領域

写真-3 EPMA 面分析 (S/Ca)

無, PB: 1.5 l/m³) を工事用として選定した。今後、製造や施工面など適宜検証する計画である。

参考文献

- 吉本国春, 北川三夫: 猪名川流域下水道施設の防食設計に関する調査, 日本下水道事業団技術開発部報, pp. 389-390, 1990.
- 松浦将行他: 二次覆工一体型セグメントの実用化に関する研究, 土木学会論文集, F Vol. 63 No. 4, pp. 482-493, 2007.