

高炉スラグを高混合した下水道シールド二次覆工の耐硫酸性評価

西松建設(株) シンガポール営業所 正会員 ○吉田 吉孝
西松建設(株) 技術研究所 正会員 椎名 貴快

1. はじめに

シンガポール共和国国内での大深度下水幹線トンネル工事(図-1)において、二次覆工コンクリートの要求性能として、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に対する要求性能および耐久性試験の結果について述べる。

2. 二次覆工コンクリートの配合仕様

二次覆工コンクリートの配合設計は、企業先からの要求事項として、下記3条件の内のいずれか1つを満足することが求められた。a) Pore-Blocker(透水性低減効果を有する界面活性剤、以下PB)を結合材重量比1.2%以上、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%以上をシリカフェーム(以下、SF)で置換、の3条件に対して、本工事ではb)の配合方針を選択した。また、工事条件を考慮した施工者側の要求性能は、a) フロー値 600 ± 100 mm(製造から4時間後)、b) 脱型強度 10N/mm^2 以上(打込み完了から18時間後)、c) 圧縮強度 60N/mm^2 以上(材齢28日)、d) 供用開始後100年間の腐食深度150mm以内、の4性能がある。

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。普通ポルトランドセメントは日本からの輸入品でBS規格、高炉スラグ微粉末も日本輸入品でマレーシアにて無水石膏を添加加工した。試験因子は、1) 水結合材比、2) 高炉スラグ微粉末の置換率、3) シリカフェームの有無、4) PB添加量の4項目とした。



図-1 工事全体平面図、標準断面図

図-2 に粉体中の化学3成分(CaO, SiO₂, Al₂O₃)をOPCと比較して示す。

本試験の各配合案で用いる粉体は、OPCに比べて、CaOが6割程度と少なく、SiO₂が1.5倍ほど多い。これにより、水和生成物のCH生成量が抑えられる

ことで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される。

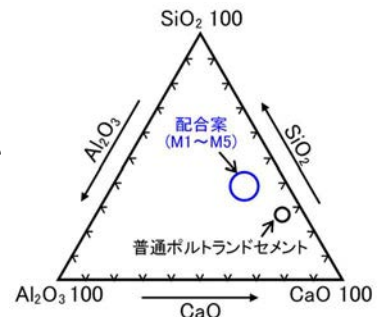


図-2 粉体中の化学3成分の比較

表-1 使用材料と二次覆工コンクリート配合案

配合名	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	GGBS置換率 GGBS/B (%)	SF置換率 SF/B (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (l/m ³)	
					水 W	結合材 B			細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 SP	透水性 低減剤 PB
						普通ポルトランドセメント OPC	高炉スラグ微粉末 GGBS	シリカフェーム SF				
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				0	145	50	450	0	722	970	7.5	2.0
M4	28.0	43	90	4	140	48	432	20	726	960	7.5	2.0
M5				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 3.02g/cm^3 、 SO_3 含有量 4.0% 以下、全アルカリ 0.56%)、GGBS (高炉スラグ微粉末、密度 2.91g/cm^3 、比表面積 $4,300\text{cm}^2/\text{g}$ 、 MgO : 6.4% 、 SO_3 : 1.8%)、SF (シリカフェーム、比表面積 $191,438\text{cm}^2/\text{g}$ 、密度 2.2g/cm^3 、 SiO_2 : 94.4%)、S (細骨材、表乾密度 2.61g/cm^3)、G (粗骨材、表乾密度 2.62g/cm^3)、SP (高性能 AE 減水剤)、PB (透水性低減剤)

キーワード 下水道、二次覆工コンクリート、硫酸劣化、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム

連絡先 〒105-6310 東京都港区虎ノ門1-17-1 虎ノ門ヒルズビジネスタワー 西松建設(株)国際事業本部 TEL03-3502-7693

3. 二次覆工コンクリートの品質評価

二次覆工コンクリートの耐食性に要求される品質評価項目は、表-2の全7項目である。この内、⑦はバクテリア微生物を用いた実際の腐食過程を再現した腐食促進試験であり、硫化水素濃度 100ppm 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することが求められた。本試験は、ドイツの KIWA 社の試験所で実施した。

腐食促進試験は、図-3の下水ポンプ場内に設けられた装置で実施した。試験体 150×150×150mm から切り出した試料(150×100×40mm)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)を加えた腐食量 (t1+t2) 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年暴露での腐食量は 3.15mm (t1=2.4mm, t2=0.75mm) であった。また、EPMA 分析 (写真-2) による SO₃ 腐食量は 2.9mm 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 3~5mm 程度であった。100年後の腐食量は、3か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にて 34~46mm と推定した。

ここで既往の腐食量推定式²⁾によれば、硫化水素ガス濃度 100ppm 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 α=1.0)の腐食量は 133mm と計算できる。

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

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(σ₂₈=54.5N/mm², 高炉セメント B 種)を対象に実施した暴露試験 (1 年間, 100ppm) の結果²⁾によれば、腐食量が平均 6.1mm であったことから、100 年後の腐食量が 60mm 程度 (α=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いた。

4. まとめ

試験の結果、すべての配合で所要の性能を満足した。特に、品質面で良好な性能が得られた M5 配合(W/B=28%, GGBS 置換率 80%, シリカフューム無, PB:1.5l/m³)を選定した。今

表-2 覆工コンクリートの要求性能

No.	試験項目	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	10mm 未満	BS EN 12390-8
④	透水係数	5 × 10 ⁻¹³ m/s 未満	HDB permeability test
⑤	急速塩化物イオン透過性試験	1,000 クーロン未満	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)

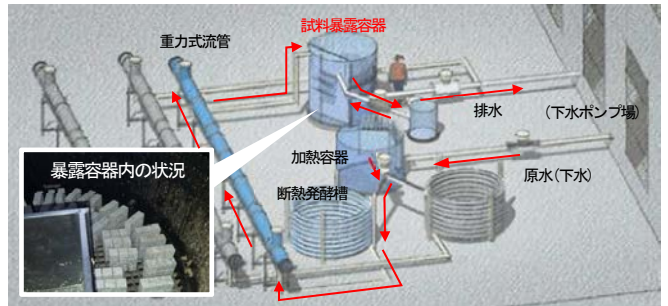


図-3 下水ポンプ場での腐食促進試験 (ドイツ)

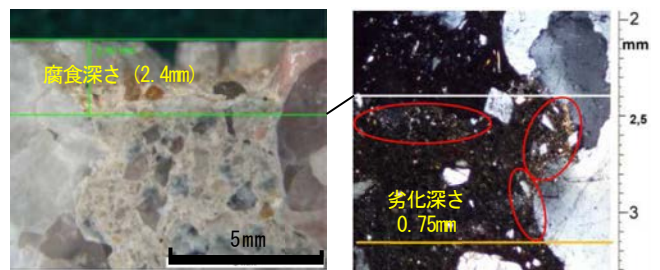


写真-1 腐食促進試験による腐食量 (例: M1 配合)

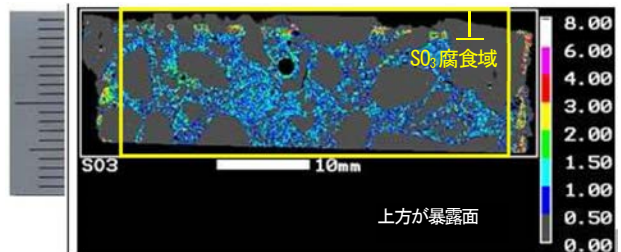


写真-2 EPMA 分析結果 (SO₃) (例: M1 配合)

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%	<10mm	<5 × 10 ⁻¹³ m/s	<1,000C	≤350μ	≤150mm
配合名	M1	2.1	0.3	3	4.3 × 10 ⁻¹³	445	80
	M2	4.3	0.3	3	4.3 × 10 ⁻¹³	329	250
	M3	4.7	0.3	3	4.3 × 10 ⁻¹³	428	110
	M4	3.1	0.3	7	4.3 × 10 ⁻¹³	494	190
	M5	5.9	0.3	3	4.3 × 10 ⁻¹³	143	200

備考) 網掛部の値は各試験項目で最も良好な結果を示す

後、製造や施工面など適宜検証する計画である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 松浦他: 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