

通常の 10 倍の耐硫酸性を有するコンクリートの開発と下水道施設の防食被覆工への適用

大成建設 (株)	宮原茂禎	大脇英司
宇部興産 (株)	佐々木彰	藤野由隆
東京都下水道サービス (株)	林悦朗	内田智文
東京都下水道局	武元貴裕	岡田吉人

1. はじめに

下水道施設では微生物活動で生成される硫酸によりコンクリート構造物が通常よりも早期に劣化することが知られている。図 1 に示すように、水中で生成した硫化水素が気中部で酸化されて硫酸になるため、下水道施設では気中部、特に水位線付近や天井面において激しい劣化を生じる。この対策として、躯体コンクリートの表面を樹脂等で被覆して硫酸との接触を遮断する防食被覆工が主に用いられているが、僅かなキズやピンホールまたは、躯体のひび割れを通じた背面からの漏水などにより被覆に膨れや剥れが生じるため、10～15 年程度の間隔で塗り替えが行われる。著者らは優れた耐硫酸性を有するコンクリートの開発と実用化に取り組んでいる¹⁾。表面被覆を必要とせずに長期間のメンテナンスフリーを実現できるため、下水道施設の維持管理の省力化とライフサイクルコストの低減に貢献することを期待している。本報では、耐硫酸コンクリートの硫酸および下水環境における耐硫酸性および、劣化した下水道施設に防食被覆工法として適用した事例について報告する。

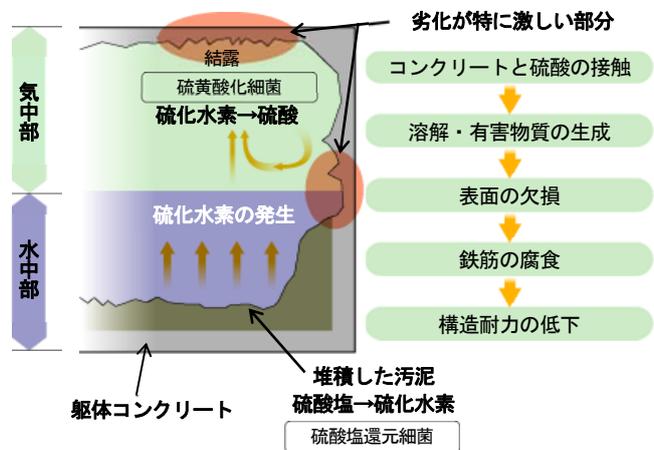


図 1 下水道処理施設の硫酸によるコンクリートの劣化

2. 耐硫酸コンクリートの概要と性能

2.1 材料および配合

耐硫酸コンクリートの配合の例を表 1 に示す。呼び強度 24 程度 (実強度約 35N/mm²) の自己充填コンクリートであり、耐硫酸性を高めるために耐硫酸性付与剤と石灰石骨材、石灰石微粉末を使用することを特徴とする。配合例は現場打ちによる躯体の構築を想定したコンクリートのものであるが、用途に合わせて粗骨材の寸法や単位粉体量などを調整することで、厚さ数 cm の表面防食工や防食パネルなどの二次製品にも使用できる。

2.2 硫酸浸せきおよび下水環境における耐硫酸性

表 1 の耐硫酸コンクリートの性能を硫酸浸せき試験および下水道施設への曝露試験により評価した。比較のために普通ポルトランドセメントを用いた同一強度のコンクリート (以降、通常のコンクリート) もあわせて試験した。硫酸浸せき試験に用いた試験体は 10 cm 立方とし、曝露面を除く 5 面を樹脂でシールして 5% の硫酸に最長 26 週間浸せきした。所定の期間浸せきしたのちに割裂してフェノールフタレイン溶液を噴霧し、非中性化領域 (呈色領域) の長さを測定した。浸せき期間 26 週における試験体の腐食状況を図 2 に示

表 1 耐硫酸コンクリートの配合例 (躯体用コンクリート)

スランプ フロー (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)					耐硫酸性 付与剤
			水	セメ ント	石灰石 微粉末	石灰石 細骨材	石灰石 粗骨材	
70±5	55	52.3	170	310	231	822	770	24

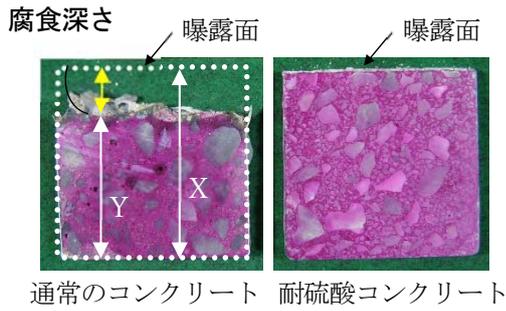


図2 硫酸浸漬試験後の試験体の状況
(浸せき期間 26 週, 硫酸濃度 5%)

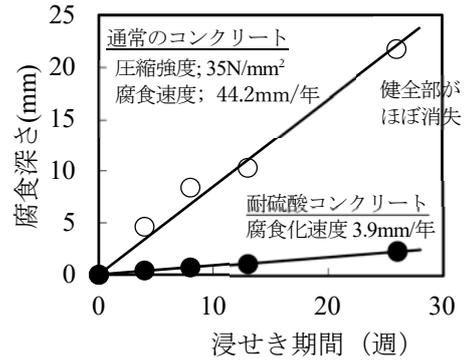


図3 5%硫酸への浸せき試験による腐食深さ

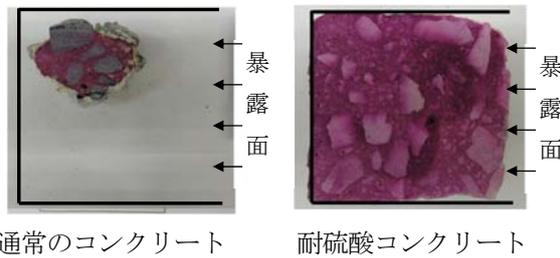


図4 曝露 4.4 年後の試験体の状況

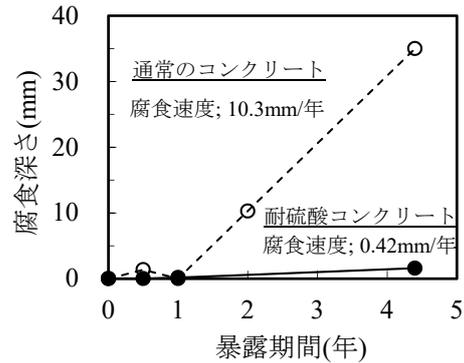


図5 着水井への曝露試験における腐食深さ

す。耐硫酸コンクリートは通常のコンクリートと比較して腐食が大きく抑制されていることがわかる。浸せき期間 26 週までの腐食深さを図 3 に示す。ここで、腐食深さは浸せき前の試験体寸法 (図 2 中, X) と呈色領域の長さ (図 2 中, Y) の差とした。したがって、腐食深さは表面の欠損 (消失) 深さと残存したコンクリートの表面部の中酸化深さの和となる。腐食深さは浸せき時間に対して直線的に増加し、耐硫酸コンクリートの腐食速度 (近似線の傾き) は通常のコンクリートの 1/10 以下となった。すなわち、10 倍以上の耐硫酸性を有しているといえる。

下水道施設の着水井にて曝露試験を行った。曝露期間 4.4 年における試験体の腐食状況を図 4 に示す。試験体は 70mm 立方としたが、厳しい腐食環境のため通常のコンクリートはほとんどが消失した。これに対し、耐硫酸コンクリートは表面の一部が腐食したのみであった。曝露期間 4.4 年までの腐食深さの変化を図 5 に示す。通常のコンクリートは曝露開始から 1 年を経過したのちに腐食速度が急激に増加したが、耐硫酸コンクリートは 4.4 年間で 1.6mm とわずかであった。1 年以降の腐食深さから腐食速度を求めると、耐硫酸コンクリートは通常のコンクリートの 1/25 であり、実際の下水環境においても 10 倍以上の耐硫酸性をもちことが確認できた。

硫酸へ浸せきしたあとのコンクリート表面の SEM 像を図 6 に示す²⁾。コンクリートは硫酸と反応してせっこうを生成するが、耐硫酸コンクリートは、通常のコンクリートと比較して、生成したせっこうが表面を隙間なく覆っていることがわかる。耐硫酸性が向上するメカニズムは、耐硫酸性付与剤の効果により表面に緻密なせっこう層が形成され、これがバリアとなってその後の反応を大きく抑制するためと考えられている²⁾。

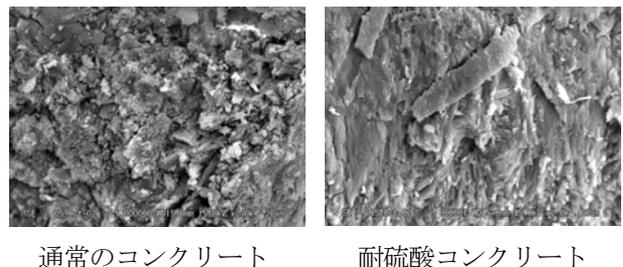


図6 硫酸劣化後の表面の SEM 像²⁾

3. 耐硫酸コンクリートの補修工事への適用

3.1 施工方法

東京都内の水再生センターの第一沈殿池において、劣化した壁面および天井面の一部を耐硫酸コンクリートを用いて補修・防食した。硫化水素濃度計により通年で測定した現地の H₂S 濃度は、季節による変動が大きいのが 0~442 ppm であり、年平均値は 44 ppm であった³⁾。

施工は図 7 に示す現場打ちの充填工法および二次製品化したパネルを用いたパネル工法により行った。充填工法では、劣化部位をウォータージェットではつり取ってプライマーを塗布したのちに、アンカーと型枠を設置して耐硫酸コンクリートをポンプにより充填した。充填厚さは 35 mm とした。これは今後 30 年以上のメンテナンスフリーを想定して設定したものである。耐硫酸コンクリートの配合を表 2 に示す。35mm の空間に充填するために粗骨材最大寸法を 10 mm とした。収縮ひび割れの防止のために膨張材を添加し、剥落防止を目的としてポリプロピレンの短繊維を 0.15 vol.% 混合した。また、資源の有効促進のため、セメント質量の 5% および 10% の粒度調整灰を石灰石微粉末に置換して使用した。粒度調整灰とは下水汚泥の焼却灰を分級（ふるい分け）・粉碎処理により粒径を調整したものである。施工においては、図 8 に示すように配合毎に施工範囲を区切り、各区画に充填口を設けて耐硫酸コンクリートを充填した。充填には吐出口径 50 mm のモルタルポンプを用い、0.6~0.7 m³/hour の吐出速度で施工した。型枠を木槌でたたきながら確実に充填させ、区画の上端部に設置した空気抜きからコンクリートが排出されたのを確認して充填を完了した。施工においてポンプの閉塞等は生じず、脱型後は欠陥なく充填されていることが確認できた（図 8）。

パネル工法では、工場で製作した耐硫酸コンクリートのパネルを躯体表面から約 10 mm の空間を設けて設置し、躯体とパネルの間を耐硫酸性のグラウトで充填して一体化した。パネルは縦 330~550mm、横 500~800mm、厚さ 25mm とした。パネルの材料は粗骨材を除いたモルタルとし、輸送や施工の過程で欠けが生じないように有機繊維を 1.5 vol.% 添加した

（表 2）。グラウトには手押しポンプを用いた。木槌により未充填箇所がないこととパネルの端部に設置した空気抜き口からグラウトが排出されたことを確認して充填を完了した。完成後のパネルには施工によるひび割れ等はみられず、グラウトが隅々まで充填されていることを打音検査で確認した。なお、両工法において、セパレータ孔や充填口、区画間の施工目地等は耐硫

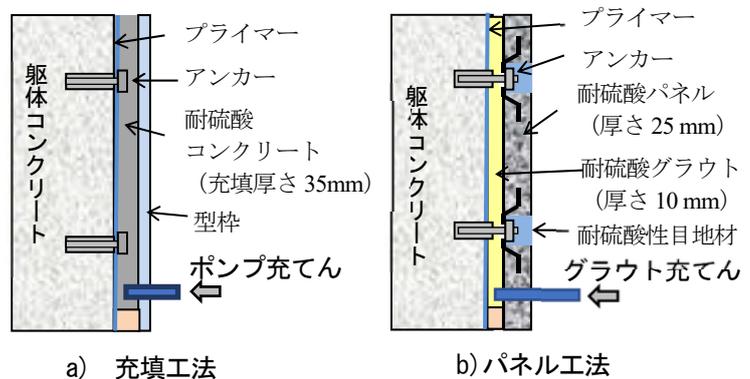


図 7 防食工法の概要

表 2 防食工に用いた耐硫酸コンクリートの配合

配合種別	配合名※1	繊維 (vol%)	W/C	単用量(kg/m ³)									
				水	セメント	膨張材	石灰石微粉末	粒度調整灰	石灰石細骨材	砕砂	石灰石粗骨材※2	砕石	耐硫酸性付与剤
充填工法	充填-0	0.15	55	175	320	30	352	—	873	—	581	—	13.1
	充填-5						307	16	917	—		—	
	充填-10						262	32	961	—		—	
パネル工法	パネル	1.5	59	276	464	—	386	—	1063	—	—	—	20.3
	グラウト	—	60	230	384	30	366	—	557	—	—	—	23.0
普通コン (比較用の曝露試験体に使用)	比較-27	—	55.0	163	297	—	—	—	—	799	—	1057	—
	比較-40	—	48.0	174	420	—	—	—	—	645	—	1085	—
	比較-60	—	32.9	170	517	—	—	—	—	811	—	888	—

※1 充填工法の配合名の後の数字 (0, 5, 10) は粒度調整灰の添加率

※2 粗骨材最大寸法: 10 mm

酸性の樹脂で処理した。

3.2 施工後の評価

施設は施工完了から約1ヶ月後に運転を再開し、下水処理を行いながら3.3年後までの経過を目視により確認した。また、施工後はコアを採取できないため、各配合の試験体(10×10×10cm)を開口部から吊り下げて気中部に曝露し、劣化速度を評価した。ここでは比較のため、呼び強度27, 40, 60の通常のコンクリート試験体もあわせて曝露した(配合は表2参照)。図9に運転再開後1年および2年で撮影した天井面の状況を示す。耐硫酸コンクリートは供用開始から10ヶ月程度で充填工法、パネル工法ともに表面に白い析出物が確認された。分析の結果、析出物はせっこうであり、上述の通り、硫酸との接触により生成してバリア層として機能しているものと推察された。曝露期間3.3年で回収し、表面の脆弱部をブラシで除去したあとの試験体の腐食状況を図10に示す。通常のコンクリートでは、試験体の中央部には腐食がみられないが周縁部では粗骨材が露出しはじめており、今後、腐食範囲が拡大すると予測された。一方、耐硫酸コンクリートでは周縁部にも腐食はみられず、健全な状態を保っていた。腐食深さの測定値を図11に示す。耐硫酸コンクリートの腐食深さは粒度調整灰の添加量に関わらず、3.3年間まで約1mmに留まっており、良好な耐硫酸性を示した。今後、通常のコンクリートの腐食の進行により、顕著な差が現れると考えられる。

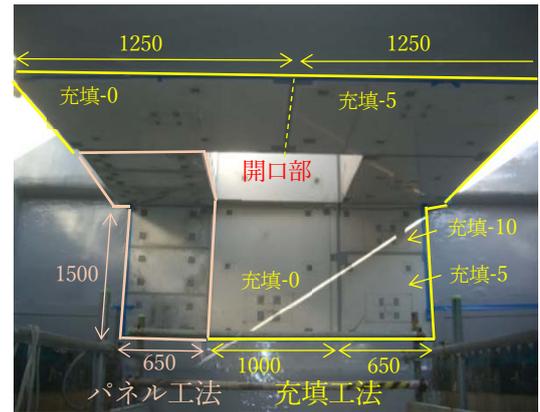
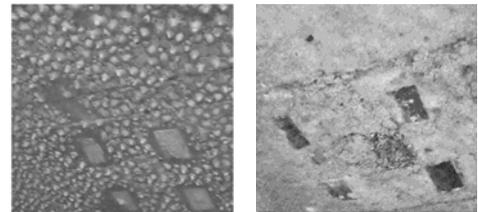


図8 防食施工完了時の状況



約1年 約2年

図9 供用後天井面の状況



充填-0 パネル 比較-27

図10 供用後3.3年における曝露用試験体の腐食状況

4. まとめ

本研究では耐硫酸コンクリートの耐硫酸性の検証と劣化した下水道施設における防食施工を実施した。

- ・硫酸浸せきと下水環境での曝露を通して、通常のコンクリートの10倍以上の耐硫酸性を有することを確認した。
- ・充填工法やパネル工法として下水道施設の防食が可能であり、施工後3.3年間の観察により優れた耐久性を有することを確認した。現状では、10%程度の粒度調整灰を添加しても性能は低下せず、3Rの推進への貢献も期待できる。今後、実用化に向けて更なる検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 大脇英司ほか：耐硫酸コンクリートを活用した下水道施設の整備と再生，コンクリート工学テクニカルレポート，vol. 54, no. 12, pp. 1169-1177, 2016. 12.
- 2) 小西和夫ほか：下水道施設用コンクリートの耐硫酸性に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.57, pp.315-320, 2003.
- 3) 上野宏志ほか：下水道施設の腐食環境評価手法の提案と耐硫酸コンクリートの曝露試験の経過，土木学会第71回年次学術講演会，V-224, 2016.

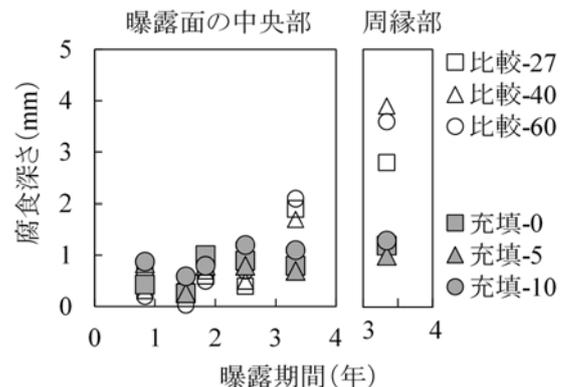


図11 曝露試験体の腐食深さ