

# 下水道構造物に対する コンクリート腐食抑制技術及び防食技術 の評価に関する報告書

- 硫酸によるコンクリート腐食の機構と総合的対策の方針 -

平成 13 年 3 月 21 日

日本下水道事業団 技術評価委員会

## 下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術 の評価について

我が国の平成 11 年度末の下水道処理人口普及率は 60% となり、下水道事業は、維持管理の時代を迎えている。下水道施設におけるコンクリート腐食・劣化が問題となつて久しいが、密閉された施設内でコンクリート腐食が進行するため、施設保全という観点からは、ほとんど、日常点検の対象とはなつてこなかった。

施設の耐用年数をできるだけ長くするためには、対症療法ではない、総合的なコンクリート腐食対策が不可欠となつており、また、適正なコンクリート腐食対策が施されなかった既設構造物の腐食状況診断手法と補修方法の確立も望まれている。

これらの理由から、平成 11 年 3 月 10 日に、日本下水道事業団理事長から「下水道構造物に対するコンクリート防食技術」について諮問があり、日本下水道事業団技術評価委員会では、硫酸によるコンクリート腐食機構及び腐食現象を明らかにするとともに、コンクリート腐食環境に応じた最適な総合的対策の評価と選定のために必要な基本方針を報告書としてとりまとめた。

本報告に基づいて、コンクリート腐食が発生することが予想される箇所とコンクリート腐食環境を明らかにした上で、施設の計画・設計、コンクリート防食工の施工管理と施設供用後の維持管理を総合した適切なコンクリート腐食対策が行われることを期待するものである。

平成 13 年 3 月 21 日

日本下水道事業団技術評価委員会

会長 柏谷 衛

## 審議の経過

平成 11 年 3 月 10 日 第 38 回技術評価委員会

平成 11 年 7 月 23 日 第 1 回防食専門委員会

平成 11 年 11 月 12 日 第 39 回技術評価委員会

平成 12 年 2 月 29 日 第 2 回防食専門委員会

平成 12 年 3 月 15 日 第 40 回技術評価委員会

平成 12 年 8 月 30 日 第 3 回防食専門委員会

平成 12 年 11 月 2 日 第 41 回技術評価委員会

平成 13 年 2 月 20 日 第 4 回防食専門委員会

平成 13 年 3 月 15 日 第 42 回技術評価委員会

## 委員の構成

(平成13年3月15日現在)

### 技術評価委員会

|     |        |                      |
|-----|--------|----------------------|
| 会 長 | 柏谷 衛   | 東京理科大学理工学部土木工学科教授    |
| 委 員 | 藤田 正憲  | 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻教授 |
| 委 員 | 松尾 友矩  | 東洋大学工学部環境建設学科教授      |
| 委 員 | 田中 和博  | 日本大学理工学部土木工学科教授      |
| 委 員 | 楠田 哲也  | 九州大学大学院工学研究院都市環境部門教授 |
| 委 員 | 曾小川 久貴 | 国土交通省都市・地域整備局下水道部長   |
| 委 員 | 中村 栄一  | 国土交通省土木研究所下水道部長      |
| 委 員 | 後藤 健三  | 仙台市下水道局長             |
| 委 員 | 横山 博一  | 東京都下水道局長             |
| 委 員 | 中村 芳之  | 横浜市技監(兼)下水道局長        |
| 委 員 | 赤井 仁孝  | 大阪市下水道局長             |
| 委 員 | 西口 勇   | 社団法人日本下水道協会理事(兼)技術部長 |
| 委 員 | 安久津 赳  | 日本下水道事業団理事           |

## 防食専門委員会

|     |        |                             |
|-----|--------|-----------------------------|
| 委員長 | 楠田 哲也  | 九州大学大学院工学研究院都市環境部門教授        |
| 委員  | 野中 資博  | 島根大学生物資源科学部地域開発科学科教授        |
| 委員  | 河合 研至  | 広島大学工学部第四類（建設系）助教授          |
| 委員  | 船水 尚行  | 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻助教授    |
| 委員  | 岡本 誠一郎 | 国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道企画課課長補佐 |
| 委員  | 井上 弥九郎 | 国土交通省土木研究所下水道部下水道研究室長       |
| 委員  | 明嵐 政司  | 国土交通省土木研究所材料施工部化学研究室長       |
| 委員  | 竹島 正   | 東京都下水道局計画部技術開発課長            |
| 委員  | 伊藤 十九二 | 長崎県佐世保市水道局下水道建設課長           |
| 委員  | 三神 景信  | 日本下水道事業団計画部設計役              |
| 委員  | 岩本 日出雄 | 日本下水道事業団工務部次長               |
| 委員  | 大嶋 吉雄  | 日本下水道事業団技術開発研修本部技術開発部長      |
| 旧委員 | 山中 信義  | 東京都下水道局計画部技術開発課長            |
| 旧委員 | 宇田川 孝之 | 日本下水道事業団計画部設計役              |
| 旧委員 | 中村 栄一  | 日本下水道事業団技術開発研修本部技術開発部長      |

（旧委員の所属職名は委員委嘱当時のもの）

## 目 次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ( 技術評価の経緯 ) .....               | 1  |
| ( 評価の対象技術と範囲 ) .....            | 2  |
| ( 下水道施設におけるコンクリート腐食機構 ) .....   | 3  |
| ( 下水道施設のコンクリート腐食現象 ) .....      | 7  |
| ( コンクリート腐食抑制技術及び防食技術の種類 ) ..... | 9  |
| ( 総合的なコンクリート腐食対策 ) .....        | 10 |
| ( 補修技術 腐食調査・劣化診断・工法の選定 ) .....  | 14 |
| ( 経済性に関する留意事項 ) .....           | 16 |

## (技術評価の経緯)

近年、下水道施設において、硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌が関与する硫酸による進行が著しく速いコンクリート腐食、構造物の劣化等が問題となっている。コンクリート腐食の発端となる硫化水素は、臭気問題とも非常に深い関わりがあり、コンクリート腐食問題と臭気問題は、その対策等について類似点が多い。

硫化水素に起因するコンクリートの腐食・劣化現象は、海外では古くから知られていた。最初の報告は、1900年の米国ロサンゼルス市における下水管きよの劣化であり、その後も引続き雨量が少なく年間を通して気温が高いエジプトのカイロ市、南アフリカのケープタウン市、米国のオレンジ郡、オーストラリアのメルボルン市等で下水管きよのコンクリート腐食・劣化が問題となった。当時は、下水管きよのコンクリート腐食は、化学反応だけで進行すると考えられており、初めて硫黄酸化細菌が関与していることが報告されたのは1945年である。この問題に対しては、米国環境保護庁が1985年に「下水道施設の臭気と腐食対策に関する設計マニュアル」を刊行し、今日に至っている。

日本下水道事業団では、供用開始後、数年から十数年経過したポンプ場・処理場施設の改築の他、新規建設施設へのコンクリート防食対応に急務を要した背景から、試験研究、実態調査等をもとに、昭和62年の「コンクリート防食塗装指針(案)」をはじめとして、平成3年に「コンクリート防食指針(案)」を作成し、その後の試験研究、施工実績等を勘案して平成5年そして平成9年と随時、改訂を行い、設計、施工の一助としてきた。

しかしながら、ポンプ場や処理場におけるコンクリート被覆工法の施工実績の増加に伴い、コンクリート腐食環境の違い、使用資材、原材料、施工環境、施工方法等によっては、必ずしも所期の効果を発揮できないものや、採用された新技術の中には、施工実績が少なく機能評価が未定なものが現れてきた。加えて、この間、圧送管やビルピットの吐出口以降の管路施設における臭気やコンクリート腐食に関しても多くの報告が追加されている。

下水道施設内では、他の土木コンクリート構造物と同様に、硫酸以外の様々な要因によりコンクリート構造物が腐食・劣化する可能性があるが、化学的侵食に位置づけられる硫酸による腐食が最も対象範囲が広く劣化速度も大きいいため、早急で適切な対応が求められている。

下水道事業は維持管理の時代を迎えており、施設の耐用年数をできるだけ長くするためには、対症療法ではない、総合的なコンクリート腐食対策が不可欠となっている。さらに、適正な腐食対策が施されてこなかった既設構造物の腐食状況診断手法と補修方法の確立も望まれている。

このような背景から、本技術評価では、下水道施設において微生物の関与により生成する硫酸によるコンクリート構造物の腐食防止を対象として、日本下水道事業団の調査結果や研究成果等に基づいて、下水道施設における硫酸によるコンクリートの腐食機構及び腐食現象を明らかにした。また、現在までに開発・採用されている各種コンクリート腐食対

策技術の機能を評価するとともに採用に当たっての留意事項を整理し、コンクリート腐食環境に応じた最適な総合的対策の評価と選定のために必要な基本方針を体系的に技術評価としてとりまとめた。

( 評価の対象技術と範囲 )

本評価の対象とする技術は、管路施設を含む下水道施設内で起こっている硫酸塩還元細菌と硫酸化細菌が関与する硫酸によるコンクリート腐食を前提とした 1) 硫化水素の発生抑制と発生硫化水素の低減、2) 硫酸化細菌の増殖抑制、3) コンクリートの耐硫酸性の向上、4) コンクリート被覆工法 等のコンクリート腐食対策と既設下水道構造物のコンクリート腐食の調査・診断手法と補修技術である。

本評価では、硫化水素の発生抑制と発生硫化水素の低減や硫酸化細菌の増殖抑制に関する技術を腐食抑制技術と定義し、その他のコンクリート自身の耐硫酸性向上やコンクリート被覆に関する技術を防食技術と定義する。

評価の範囲は、主としてポンプ場・処理場で採用されているコンクリート腐食抑制技術及び防食技術と調査・診断手法であり、管路施設において採用されているコンクリート腐食抑制技術も含むものとする。



(下水道施設におけるコンクリート腐食機構)

コンクリート腐食に重要な役割を果たしている物質は硫黄であり、硫黄の存在形態には、酸化数+6の硫酸イオン、酸化数+2のチオ硫酸イオン、酸化数0の元素硫黄、酸化数-2の硫化物等の様々なものがある。

硫酸塩還元細菌、硫黄酸化細菌の活動や植物・動物による食物連鎖、化石燃料の燃焼、降雨等が関与する自然界の硫黄循環のうち、下水道施設内という特殊な環境条件において、硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌の活動が卓越した場合に、コンクリート腐食が発生する。

硫黄酸化細菌 (*Thiobacillus* 属等) が生成する硫酸による下水道施設に特有なコンクリート腐食は、

- (1) 嫌気性状態の下水中及び汚泥中での硫酸塩還元細菌による硫酸塩( $\text{SO}_4^{2-}$ )からの硫化物( $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ )の生成(生物学的作用)
- (2) 液相から気相への硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )ガスの放散(物理学的作用)
- (3) 密閉されたコンクリート構造物気相部内面の結露水中での好気性の硫黄酸化細菌等による硫化水素からの硫酸の生成(生物学的作用・化学的作用)
- (4) 硫酸とコンクリート中の成分との反応によるコンクリートの劣化(化学的作用・物理学的作用)

の順に進行する生物反応、化学反応、物理作用が複合した現象である。このため、水温、下水中の硫酸イオン濃度や施設の構造等の地域性に大きく影響を受け、気相部の硫化水素濃度、湿度、気温等の腐食環境により、コンクリートの腐食速度が大幅に異なる。

硫酸によるコンクリート腐食の機構を段階的にまとめると、以下の5つの過程に区分できる。

#### 1. 下水中への硫酸塩の混入

下水中の硫酸イオンは、上水、し尿、洗剤等に起因し、このうち、上水中の硫酸イオン濃度は、原水の特性と、浄水場での硫酸バンド等の薬品添加に影響を受ける。一般的な家庭からの排水中の硫酸イオン濃度は、30~80mg/L程度(Sとして10~27mg/L)と言われている。下水中への海水( $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が2,700mg/L程度)の浸入がある場合や特定の排水(工場排水、温泉排水等)を下水道に受け入れている場合には、下水中の硫酸イオン濃度が300mg/Lを超えるようなかなり高い値を示すことがある。

#### 2. 硫酸塩からの硫化物の生成

下水あるいは汚泥中では、主に嫌気性条件下での無機性硫黄化合物の生物化学的還元(微生物による無機性硫黄の同化、たんぱく質分解細菌によるアミノ酸の加水分解、硫酸塩還元細菌による硫酸塩の水素受容体としての利用)により硫化物が生成される。このうち、下水道施設のコンクリート腐食に大きな影響を与えるものは、硫酸塩還元細菌の活動であ

る。水温により硫酸塩還元細菌の活動が制約されるため、同一施設内では、下水あるいは汚泥の水温が高くなる夏季に硫化物の生成が多くなり、地域的あるいは施設の、平均水温が高い場所でより多くの硫化物が生成される。

絶対嫌気性細菌である硫酸塩還元細菌は、硫酸塩を電子（水素）受容体とし、アミノ酸、炭水化物及び有機酸等の有機物を電子（水素）供与体として利用している。このため、硫酸塩還元細菌による下水あるいは汚泥中の硫化物生成速度は、下水・汚泥の性状や環境条件で異なり、溶存酸素（DO）濃度、酸化還元電位（ORP）、有機物濃度及び栄養塩類濃度、硫酸イオン濃度、pH、水温、下水や汚泥の滞留時間に影響を受ける。

管路施設の場合、下水中の DO 濃度が低下し嫌気性状態になりやすい下水の滞留箇所や、処理場や中継ポンプ場への流入量を均一化するために管内貯留を行っている箇所、気相部がないため嫌気性化しやすい圧送管内・伏越し管内、ビルピット排水が排出される箇所や硫酸イオンを多量に含む工場排水が排出される箇所は硫化物が生成しやすい。

ポンプ場・処理場の場合、供用開始当初等の流入下水量が少ない時期には、着水井・ポンプ井・吐き出し井等で下水の滞留時間が長くなり、下水が嫌気性となって硫化物が生成されやすい。処理場の汚泥処理施設（濃縮槽、貯留槽、消化槽等）では、汚泥の嫌気性化は避けられず、硫化物が生成される。沈砂池や最初沈殿池で下水の滞留が生じた場合は、下水の嫌気性化が進み硫化物が生成する。また、嫌気性処理を前段に組み入れた水処理プロセスを採用した場合には、嫌気性処理段階で硫化物の生成は避けられない。

### 3．硫化水素の気相中への放散

下水あるいは汚泥中の硫化物（酸化数 - 2 の硫黄）は、不溶性の金属塩（FeS、ZnS 等）と、溶解性のイオン態（ $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ ）及び硫化水素（分子態の  $\text{H}_2\text{S}$ ）の形態で存在する。このうち、金属塩の硫化物は、生物学的にも化学的にも比較的安定で、コンクリートの腐食にほとんど関与しない。イオン態の硫化物は、大気中に放散されず、水溶液中では、硫化水素分子（ $\text{H}_2\text{S}$ ）と可逆的な平衡関係にある。pH 7 付近では、イオン態の  $\text{HS}^-$  と分子態の  $\text{H}_2\text{S}$  が約 50% ずつ存在している。

液相中の分子態の  $\text{H}_2\text{S}$  は、下水あるいは汚泥の流れの乱れや攪拌等により気液接触面積が大きくなると、液相から気相への放散量が増加する。気相中へ放散される  $\text{H}_2\text{S}$  ガスの量は、液相の硫化物濃度、pH、温度及び気相部の条件等により異なる。下水道施設の場合、 $\text{H}_2\text{S}$  の気相中への放散量は、まず、下水あるいは汚泥中の硫化物濃度に依存し、次に、流れの乱れや攪拌の影響が大きい。

前述した下水あるいは汚泥中の硫化物濃度が高い箇所において、構造的な流れの乱れや攪拌（気液混合）が激しい場合には、多量の硫化水素が気相中へ放散し、密閉構造の場合、気相部の  $\text{H}_2\text{S}$  ガス濃度が上昇する。

構造的に流れの乱れによる激しい気液混合が生じる箇所は、管路施設では、段差・落差の大きい部位、伏越し管の上流側・下流吐き出し部、ビルピット排水管の接合部、圧送管

の吐き出し部等であり、ポンプ場施設では、下水の流入部及びポンプアップ後の吐き出し部である。処理場の水処理施設では、着水井等の下水の流入や汚泥処理系からの返流水を受け入れている部位、分配槽、最初沈殿池越流せき部とそれに続く流出水路、反応タンク流入部等であり、汚泥処理施設では、汚泥濃縮槽、汚泥貯留槽、汚泥消化槽からの分離液（脱離液）の流出せき部、ピット部、返流水管等である。

#### 4 . 硫化水素からの硫酸生成

密閉されたコンクリート構造物気相部の  $H_2S$  ガス濃度が上昇すると、内面の天井や側壁コンクリート表面結露水中で好気性の硫黄酸化細菌により硫化水素から硫酸が生成される。

気相中の硫化水素は、化学的に元素硫黄 ( $S^0$ ) やチオ硫酸イオン ( $S_2O_3^{2-}$ ) 等に酸化される。コンクリート腐食が進行し始めた施設では、 $H_2S$  ガスに伴う臭気の発生とコンクリート表面への硫黄結晶の付着が一般に観察される。

一方、硫黄酸化細菌は、硫化水素、元素硫黄、チオ硫酸イオン等を酸化することによりエネルギーを獲得し、亜硫酸を経て最終的に硫酸を生成する。

硫黄酸化細菌の活動には、栄養源、温度、湿度等のコンクリート腐食環境が密接に関わっており、また、利用できるエネルギー源、生育 pH 範囲、生育温度等により様々な種が存在する。栄養源が多いと、硫黄酸化細菌の活動は促進されるが、活動に伴い生成される硫酸が多くその pH が低下すると、生育できない硫黄酸化細菌も存在する。硫黄酸化細菌の生育温度は 10~35 の間であるが、30 前後に至適温度を持つ細菌が多い。したがって、季節的には、温度の高い夏季、地域的には気温の高い箇所で、硫黄酸化細菌の活動に起因するコンクリート腐食が生じやすい。また、硫黄酸化細菌は乾燥に弱く、湿度に関してはコンクリート表面に結露が生じているところで活発に活動することが知られている。

施工直後のコンクリート表面は、pH12~13 の強アルカリ性であり、pH10 以上のとき、全ての硫黄酸化細菌は生育できない。

供用後の下水道施設のコンクリートは、二酸化炭素によりコンクリートの中性化が進行すると、表面の pH は 8~9 の弱アルカリ性になる。また、硫化水素の化学的酸化あるいは硫黄酸化細菌による生物学的酸化により生成した硫黄結晶や汚泥等がコンクリート表面に付着すると、表面の pH は中性領域になる。この pH 領域では、*Thiobacillus versutus*、*Thiobacillus novellus* 等に代表される硫黄酸化細菌が、下水中で硫酸塩還元細菌により生産され気相中へ放散した硫化水素を硫酸に変化させる。

pH が 5 以下に低下すると、pH 1 まで活動できる *Thiobacillus thiooxidans* が優先的に増殖し、硫化水素から硫酸を生成する。

すなわち、腐食環境下に置かれたコンクリート表面では、コンクリート表面 pH の低下とともに、経年（月）的に、順次、硫黄酸化細菌の優先種が遷移する。

## 5. コンクリート中の成分と硫酸の反応

コンクリートは、硬化に伴って水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) を遊離し、 $\text{pH}12\sim13$  の高アルカリ性になっている。コンクリート表面で硫酸イオン濃度が増加すると、局所的にコンクリート中のアルカリ成分である水酸化カルシウムが硫酸イオンと反応し、二水石膏 ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) が生成する。生成した二水石膏は、コンクリート細孔溶液中ではカルシウムイオンと硫酸イオンに解離し、このフリーになった硫酸イオンは、セメント水和物の一つであるモノサルフェート ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) や未反応のアルミン酸カルシウム ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) と反応し、コンクリートの表面領域でエトリンガイト ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) を生じる。

エトリンガイトはアルカリ性の環境では安定しているが、コンクリート表面からの硫酸化細菌による硫酸の供給が増加すると、コンクリート中の硫酸イオン濃度が上昇しつつコンクリート表面部の  $\text{pH}$  が低下し、中性域あるいは酸性域になると、エトリンガイトから二水石膏が再生成される。

$\text{pH}1\sim 2$  の領域では、二水石膏はパテ状になり、下水の飛沫等の衝撃でも容易に剥離する。コンクリート腐食がかなり進行している箇所では、表面にパテ状になった二水石膏が容易に観察される。したがって、表面からの硫酸の供給によるコンクリート腐食の進行とともに、表面の二水石膏層とその内部のエトリンガイトの層はより深部へと移動する。

下水道施設内での硫酸化細菌の増殖に伴うコンクリート腐食は、硫酸のコンクリート内面への侵入により特徴づけられる。

(下水道施設のコンクリート腐食現象)

## 1. コンクリート腐食環境

下水道施設内での硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌の代謝を理解することにより、硫酸によるコンクリート腐食が生じやすい環境(コンクリート腐食環境)を特定することができる。腐食環境が厳しい箇所とは、次のすべての条件を満足する下水あるいは汚泥が存在するところである。このため、コンクリート腐食環境は、地域性や日間変化・季節変化の影響を大きく受けるので、継続的な把握が必要である。

(1) 硫酸塩還元細菌の活動により下水あるいは汚泥中で硫化物が生成されやすい環境

- 1) 硫酸イオン濃度が高い。
- 2) 気相部からの酸素供給が少ないため嫌気性条件になりやすく、滞留時間が長い。
- 3) 水温が硫酸塩還元細菌の増殖に適している(一般に 30~35 で最も盛んに増殖し、15 以下及び 45 以上で活性が著しく低下する。)

(2) 液相部から気相部へ硫化水素が放散されやすく、気相部が密閉されている構造

(3)  $H_2S$  ガス濃度、気温、湿度、栄養塩類の供給等に関して、硫黄酸化細菌が活動しやすい環境

コンクリート腐食環境を観察・診断する場合、対象箇所における下水あるいは汚泥中の水温、硫酸イオン濃度、硫化物濃度、DO 濃度、ORP 等の測定、ならびに気相部の  $H_2S$  ガス濃度、温度、湿度等の測定が必要となるが、臭気の程度、コンクリート表面の硫黄結晶の析出状況、pH、劣化の程度という簡易的な判断指標を用いて観察することによりコンクリート腐食環境を把握できる。なお、コンクリート腐食・劣化は経年的に進行するので、施設の履歴を十分に把握しておく必要がある。

## 2. コンクリート腐食速度・劣化状況の定量化

硫黄酸化細菌は、20 以下では、その活動が抑制され、30 前後に至適温度を持つものが多い。また、湿度が高い(コンクリート表面の結露が多い)ほど、 $H_2S$  ガス濃度が高いほど、硫黄酸化細菌の活動が活発である。

対象箇所の気相部  $H_2S$  ガス濃度、気温、湿度等のコンクリート腐食環境を把握あるいは予測することにより、コンクリート被覆工法等の対策を行わない場合の経年的なコンクリート腐食・劣化の進行を過去の知見から経験的に予測することは可能である。

なお、硫黄酸化細菌による硫酸の生成量は、まず施設内の  $H_2S$  ガス濃度に最も影響を受け、至適温度や至適湿度をピークに減少傾向が予想される。また、対象箇所の気相部  $H_2S$  ガス濃度が季節的に、また、日間で大幅に変化することや、 $H_2S$  ガスからの硫酸の生成量は硫黄酸化細菌の活動に伴うこと、硫酸によるコンクリート構造物の腐食・劣化の進行はコンクリートの特性に影響を受けることに留意する必要がある。

### 3. コンクリート腐食の発生しやすい施設

各施設の H<sub>2</sub>S ガス濃度は、0 ppm から 1,000 ppm 以上（たとえば、汚泥消化槽脱離液ピット）まで幅広く分布しており、コンクリート腐食環境の因子のうち、最も条件が変化するものは H<sub>2</sub>S ガス濃度である。下水道施設のコンクリート腐食・劣化事例から判断すると、硫酸によるコンクリート腐食の発生しやすい施設は、以下のとおりである。

表1 硫酸によるコンクリート腐食が発生しやすい施設・部位

| 施設                 | 腐食が発生しやすい部位   |
|--------------------|---|
| 管路施設               | 段差・落差の大きい箇所の気相部<br>伏越し管の上流部・下流吐き出し部の気相部<br>ビルピット排水管の接合部の気相部<br>圧送管の吐き出し部の気相部  |
| ポンプ場               | 下水の流入部の気相部<br>ポンプアップ後の吐き出し部の気相部   |
| 処理場<br>(特に覆蓋された施設) | 着水井と連絡水路の気相部<br>分配槽と連絡水路の気相部<br>最初沈殿池越流せき部と流出水路の気相部<br>反応タンク流入部の気相部<br>汚泥濃縮槽の越流せき・ピットの気相部<br>汚泥貯留槽の気相部<br>嫌気性汚泥消化槽からの脱離液のピットの気相部<br>汚泥処理施設からの返流水管 |

(コンクリート腐食抑制技術及び防食技術の種類)

硫酸によるコンクリート腐食の主な対策技術は、その腐食機構の段階毎に、以下のよう  
に分類できる。

表2 硫酸によるコンクリート腐食の主な対策技術

| 対策技術の分類                            | 技術の分類                               | 対象施設                  | 原理と対策   |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|
| コンクリート腐食<br>の抑制技術<br>(硫酸生成の抑制)     | 下水中の硫酸イ<br>オン濃度低下                   | 主として<br>管路施設          | 硫化水素生成ポテンシャルの低下：<br>工場排水・温泉排水等の規制、<br>海水浸入の防止   |
|                                    | 下水あるいは汚<br>泥中の硫化物生<br>成抑制           | 管路施設                  | 嫌気性化防止：<br>圧送管への空気注入、酸素注入、<br>硝酸塩注入等<br>伏越し管の構造変更<br>自然流下の管きよでの再曝気、<br>沈殿物の排除、コンクリート表面<br>の洗浄、フラッシング      |
|                                    |                                     | ポンプ場<br>・処理場          | 嫌気性化防止：<br>揚水ポンプの適正運転<br>処理場の適正運転   |
|                                    | 溶存硫化物の固<br>定と硫化水素の<br>気相中への放散<br>防止 | 管路施設<br>ポンプ場<br>・処理場  | 液相中の硫化物の酸化・固定化：<br>塩化第二鉄注入、<br>ポリ硫酸第二鉄注入  |
|                                    |                                     |                       | 硫化水素の放散を抑制する構造：<br>合流部の攪乱防止<br>段差・落差の解消   |
|                                    | 硫酸を生成する<br>硫黄酸化細菌の<br>活動抑制          | 管路施設、<br>ポンプ場<br>・処理場 | 気相中 H <sub>2</sub> S ガス濃度の希釈・除去：<br>換気・脱臭<br>コンクリート表面の乾燥：<br>換気<br>硫黄酸化細菌の代謝抑制：<br>コンクリートへの防菌剤・抗菌剤<br>の混入 |
| コンクリート防食<br>技術<br>(コンクリートへ<br>の対策) | コンクリートの<br>耐硫酸性向上及<br>び表面被覆         | 管路施設、<br>ポンプ場<br>・処理場 | コンクリート自身の耐硫酸性向上：<br>耐硫酸性コンクリート<br>コンクリート表面の被覆：<br>塗布型ライニング工法<br>シートライニング工法                                |

## （総合的なコンクリート腐食対策）

硫酸によるコンクリート腐食の対策を確実にし、下水道施設のライフサイクルコストを低減するためには、維持管理を含む総合的な対策が必要である。施設をコンクリート腐食環境から適正に保護するためには、コンクリート腐食箇所・腐食環境の特定、コンクリート腐食環境の改善、最適なコンクリート腐食抑制技術と防食技術の選定及び組合せ、適切なコンクリート被覆工法等の施工、採用したコンクリート腐食対策の効果を最大限に引き出すための供用開始後の適正な日常管理・定期管理が重要なポイントである。

なお、評価の対象技術ではないが、管路施設やポンプ場・処理場における流入きょ、共通水路のように1系列あるいは1槽しかない施設でコンクリート腐食環境が厳しいと想定される場合には、将来の補修工事等の困難さを考慮し、耐硫酸性に優れたシートライニング工法等の採用や複数系列化を施設の計画・設計上で検討する必要がある。また、管路施設では、硫酸による著しいコンクリート腐食が発生することが確実な区間には、施設の計画・設計段階で、コンクリート腐食抑制技術の採用とともに、鉄筋コンクリート製ではない耐硫酸性に優れた代替製品の採用も検討する必要がある。

### 1. コンクリート腐食箇所・腐食環境の特定

経済的なコンクリート腐食対策を検討するためには、まず、個々の下水道施設が置かれているコンクリート腐食環境を特定しなければならない。腐食環境を把握し間違えると、腐食対策を施しても耐硫酸性が劣る施設となったり、腐食対策が過大な仕様になることがあるため、以下の点に留意する。

- （1）新設施設の場合には、地域特性、季節変化、日間変化を考慮して、過去の知見に基づいて各施設のコンクリート腐食環境（温度、 $H_2S$  ガス濃度及び湿度）を予測する。
- （2）既存施設では、 $H_2S$  ガス濃度等を継続的に測定することにより、コンクリート腐食環境を適正に把握する。

### 2. コンクリート腐食環境の改善（コンクリート腐食抑制技術）

下水道施設の設計にあたっては、コンクリート防食技術の前に、以下のコンクリート腐食抑制技術を検討する。

- （1）コンクリート腐食環境が厳しいと想定される箇所で下水あるいは汚泥中に硫化物が生成しにくい施設の配置・構造を検討する。
- （2）運転管理上の対応を含む密閉されたコンクリート構造物内の気相中  $H_2S$  ガス濃度を低減するために必要な硫化物生成と硫化水素の放散の抑制対策（嫌気性化防止、溶存硫化物の酸化・固定化、硫化水素の放散を抑制する構造）を検討する。
- （3）硫黄酸化細菌の活動を抑制するために有効な湿度低下対策も兼ねた換気・脱臭



設備を検討する。

### 3. コンクリート防食技術の選定と施工における留意点

各種コンクリート防食技術の機能・効果を最大限に発揮するためには、対象施設のコンクリート腐食環境をできるだけ改善する努力をした上で、その場の腐食環境に適したコンクリート防食技術を検討・採用する必要がある。

#### (1) コンクリート表面での硫黄酸化細菌の代謝抑制

近年、コンクリート防食技術の一つとして、原理的にはコンクリート腐食抑制技術に位置づけられる防菌剤あるいは抗菌剤をコンクリートや既存施設改修に用いられる断面修復材に混入する方法が開発・採用されている。この技術は、コンクリート表面で付着・増殖する硫黄酸化細菌の代謝・増殖を抑制して、コンクリート腐食環境下でも硫酸の生成を低減する方法であり、腐食環境が厳しくなく、 $H_2S$  ガス濃度が低い条件では、単独使用で施設の耐久性を伸ばすことが可能である。

この技術は、 $H_2S$  ガス濃度が高い腐食環境下で、コンクリート表面に硫黄結晶が析出している場合や汚泥などが付着している場合、硫酸の生成とコンクリート中への侵入を効果的に防ぐことができない。また、 $H_2S$  ガス濃度が 10～50 ppm 程度の腐食環境でコンクリート腐食の進行を遅延させる効果が期待されているが、その長期的な効果に関しては、更に実績を重ねて単独使用での適用範囲とともに今後明確化する必要がある。

#### (2) コンクリートの耐硫酸性の向上

硫黄酸化細菌が生成する硫酸のコンクリート表面からの侵入を前提とする場合、下水道施設のような普通ポルトランドセメントや高炉セメントを用いたコンクリート構造物では、十分な耐硫酸性を期待することはできない。

現在まで、最も信頼できるコンクリート腐食対策としてコンクリート被覆工法が主として採用されてきたが、コンクリート被覆工法を必要としないレベルまでコンクリートの耐硫酸性を向上して十分な耐久性を確保できれば、単独使用で費用が安価で有効なコンクリート腐食対策となりえるため、今後の研究開発が期待される。一つの試みとして、耐硫酸性を有する下水汚泥溶融スラグ粉末と珪酸ソーダを主構成材料とした耐酸セメントを用いた耐硫酸性のコンクリート等が開発されているが、現場打ちコンクリートとしての利用については課題が残されている。

#### (3) コンクリート被覆工法

従来、コンクリート構造物をコンクリート腐食環境から遮断する目的で、処理場（ポンプ施設、水処理施設、汚泥処理施設等）に適用するために作成された「コンクリート防食指針(案)」(平成9年6月 日本下水道事業団)に基づき、主に有機防食被覆材料により防

食被覆層を形成させる防食工法（コンクリート被覆工法）が有効なコンクリート腐食対策として採用されてきた。また、被覆層の耐用年数を高めるために、材料自体の耐硫酸性の向上やコンクリート躯体のクラックに対する追従性を高めるための開発が進められてきている。

コンクリート被覆工法は、一般に、定期的な点検と補修・更新が必要で、工事の施工上の安全管理や被覆層廃棄時の対応に配慮が必要である。

コンクリート被覆工法には、コンクリート表面への塗布型ライニング工法、工場製作等による耐硫酸性成形シートをコンクリートに接着させるアンカー付きシート工法や埋設型枠工法のようなシートライニング工法がある。現在のところ、塗布型ライニング工法の実績が最も多いが、コンクリート腐食環境が著しく厳しく、将来の補修等が非常に困難な施設・部位に関しては、シートライニング工法が採用されてきている。

コンクリート被覆工法により、効果的なコンクリート腐食対策を行うためには、以下の課題を解決する必要がある。

- 1) コンクリート腐食が発生する箇所を正確に特定する。
- 2) コンクリート被覆工法だけではない総合的な対応を前提とし、経済性を考慮して最適な技術の選択・組合せを行う。
- 3) 様々な特徴を待つ有機防食被覆材料が提案・採用されているため、実施設のコンクリート腐食環境を正確に予測・把握し、施工する箇所・位置を特定した上で、使用材料の適正な品質規格・品質試験結果に基づいてコンクリート被覆工法を選定する。なお、コンクリート被覆工法に求められる性能には、被覆材料が耐硫酸性を有することだけではなく、コンクリートと一体化した防食被覆層を形成すること（コンクリートとの接着安定性）、クラック追従性を有すること、耐久性を有すること、防水性を有すること、優れた施工性を有すること等があげられる。したがって、使用材料の品質規格・品質試験方法を定める上で、これらを考慮すべきである。
- 4) それぞれのコンクリート被覆工法に適した施工環境、施工時期・工期を確保し、必要な検査を行う。
- 5) 工法の選択、施工方法、定期的な点検等に関して、発注者（設計者）、元請け業者（施工業者）、下請け業者（施工業者）、施設管理者の間の責任範囲をはっきりさせる。

#### 4. 維持管理上の留意点

下水道施設のコンクリート構造物は、標準耐用年数が50年と長く、また、硫酸によるコンクリート腐食の現象が十分に理解されていなかったため、施設の保全という観点からは、ほとんど、日常点検の対象とはなっていなかった。また、下水道施設は、他のコンクリート構造物と同様に、中性化、塩害、アルカリ骨材反応等による耐久性の低下や、オゾ

ン、塩素等を用いる反応槽での劣化も受けている。

下水道施設内で見られる硫酸によるコンクリート腐食の第一の原因は、管路施設内の圧送管、伏越し管、下水が滞留する箇所等で下水が嫌気性化することや、処理場内で下水あるいは汚泥が滞留し嫌気性化することであり、硫酸によるコンクリート腐食が発生する施設は、従来、臭気の発生する箇所として密閉化・覆蓋化により防臭と脱臭の対象とされてきたところで、気相部（天井及び側壁下部）でコンクリート腐食が観測される。これらの箇所は、一般に、日常点検（目視） 定期点検等が行われておらず、過去に施工したコンクリート被覆工法など腐食対策の施工後の実態調査があまり行われてこなかった。

施設の耐用年数を長く維持し、ライフサイクルコストを低減するためには、下水道施設全体での硫黄のサイクルを念頭において、施設内のコンクリート腐食環境を定期的に観測するとともに、腐食環境に応じた頻度で定期的な点検を行うことが重要である。

( 補修技術 - 腐食調査・劣化診断・工法の選定 )

## 1 . 腐食調査・劣化診断

硫酸による腐食のある既設コンクリート構造物の補修を検討する場合、適正な 腐食状況調査・診断、 補修工の設計・施工が必要となる。

腐食状況調査においては、まず、現地調査（予備調査）により、コンクリート腐食環境とコンクリート表面の外観、腐食程度、表面強度等を調べることにより、腐食範囲の特定を行い、次に、採取したコンクリートのコアにより詳細調査を行い腐食深さを判定する必要がある。

コンクリート表面からの腐食深さの定義には、

- ( 1 ) フェノールフタレイン法により変色しない範囲 ( pH が 8 以下 )
- ( 2 ) 硫酸イオンの発色試薬による簡易測定法による硫酸イオン侵入範囲
- ( 3 ) EPMA ( 電子線マイクロアナライザー ) 等を用いた深さ方向の硫黄とカルシウム等の成分濃度分布の測定による中性化範囲と硫黄侵入範囲

等が提案されているが、現場の状況と経済性を考慮して最適な判定手法を選択する必要がある。

はつり深さの判断基準としては、

- ( 1 ) 中性化領域
- ( 2 ) 硫酸イオンの侵入領域を考慮して、中性化領域 + の領域
- ( 3 ) 硫酸イオン ( 硫黄 ) 侵入領域

等が考えられるが、劣化したコンクリート領域は、表面から 脆弱な腐食部 ( 二水石膏部 ) エトリンガイトが多い部分 ( の領域から 1 ~ 2 cm 程度の領域 ) 健全部に区分される。このため、はつりの方法と経済性、ならびにコンクリート被覆工法との組合せによる総合的な耐硫酸性を考慮して、はつり深さを適正に決定する必要がある。

## 2 . 補修技術

コンクリート腐食部分を補修するためには、コンクリート腐食部分の確実な除去、健全部露出の確認、 施工性に優れた断面修復工法、 耐硫酸性に優れたコンクリート被覆工法 の検討が重要である。

コンクリート腐食部分のはつりを行う場合、脆弱な部分 ( 二水石膏 ) は、一般的な高圧水洗浄 ( 吐出圧力 20 ~ 30 MPa 程度 ) 等により容易に剥離する。一方、硫酸イオンの侵入によりエトリンガイトが多く形成されている部分は強度が残存し、高圧水洗浄でははつりが困難で、手はつりでは効率も悪く不経済である。このため、超高压水 ( たとえば吐出圧力 200 MPa 程度 ) を用いた工法が提案されている。超高压水を利用したはつり工法の場合、施工時の噴射水圧、噴射ノズルとコンクリートの間隔、ノズルの移動速度により、はつり深さに影響があるので留意する。

はつり後の健全部露出の確認方法として、はつり深さ判定の考え方に応じてフェノールフタレイン法、硫酸イオンの発色試薬による簡易測定法等を選択する。

コンクリート腐食部分のはつり後の断面修復は、施工性、防食被覆層とコンクリート断面との一体性・付着強度、耐硫酸性等を考慮して、最適な工法を選定する。なお、劣化領域に鉄筋が存在する場合や鉄筋の腐食が確認された場合には、鉄筋の処理や補強が必要となる。

補修を行う箇所はコンクリート腐食環境が厳しい状態であるため、断面修復後のコンクリート被覆工法には、個々の腐食環境に適した工法を選定する。また、補修工は、供用している施設を一時的に休止して施工しなければならないので、より高品位のコンクリート腐食対策を担保するためには、適正な施工環境、施工時期・工期の確保と適正な品質管理が重要である。

( 経済性に関する留意事項 )

下水道施設のコンクリート構造物の耐用年数をできるだけ長くするためには、硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌が関与する硫酸によるコンクリート腐食の機構と現象を十分に把握し、施設内のコンクリート腐食が発生することが予想される箇所とコンクリート腐食環境を明らかにした上で、施設の計画・設計、コンクリート防食工の施工管理と施設供用後の維持管理を総合した適切なコンクリート腐食対策が不可欠である。

個々の腐食環境を反映して最適なコンクリート腐食対策技術の組合せを選定する上でライフサイクルコストに基づいた経済性の比較を行う場合には、以下の点に留意する必要がある。

- ( 1 ) コンクリート腐食対策の対象箇所は、コンクリート腐食環境を適正に予測・把握することにより過大にならないようにする。
- ( 2 ) 単独のコンクリート防食技術により対症療法的に対応するのでは、結果として建設コストが高くなるため、コンクリート腐食抑制技術とコンクリート防食技術の組合せを検討する。また、適正な維持管理が不可欠である。
- ( 3 ) コンクリート腐食対策を選定する場合、まず、対象箇所のコンクリート腐食環境を改善する方策(コンクリート腐食抑制技術)を検討・選定し、その後、想定される腐食環境に応じて、最適な技術(コンクリート表面での硫黄酸化細菌の代謝抑制、コンクリートの耐硫酸性向上、コンクリート被覆工法)を選定する。
- ( 4 ) コンクリート腐食抑制技術の採用によりコンクリート腐食環境が改善されれば、コンクリート防食技術に対して求められる性能規定や性能保証の水準は低くなり、コンクリート防食技術のコストが低減できる。
- ( 5 ) コスト比較に際しては、建設コスト(イニシャルコスト)、運転コスト(ランニングコスト)、補修等の維持管理コスト、ならびに耐用年数に応じた更新コストも含めた総合的なコンクリート腐食対策としてのライフサイクルコストに基づいた総合評価が必要である。
- ( 6 ) 現時点で実績が最も多く信頼性が高いコンクリート被覆工法について最適技術を選定する場合には、各工法の必要工期、耐硫酸性、接着安定性、コスト、耐用年数(性能保証期間)が異なることに留意する。
- ( 7 ) 供用している既存施設の補修工は、仮設工、はつり工、断面修復工等が追加されるため、新規建設施設へのコンクリート防食工のコストに比べ、そのコストが高くなる。