

# 技術展望

## TECHNICAL OVERVIEW

## 技術展望

# 下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化

STUDY ON THE CHEMICAL CORROSION OF CONCRETE STRUCTURE IN SEWERAGE FACILITIES

中本 至

Itaru NAKAMOTO

正会員 工博 日本下水道事業団 副理事長  
(〒105 東京都港区虎ノ門2-3-13)

**Key Words**: *corrosion of concrete, sulfate-reducing bacteria, corrosion resistant material*

### 1. はじめに

わが国における平成4年度末現在の下水道人口普及率は約47%になり、また全国で約900箇所の下水処理場と延長約20万kmの管きよを有している。

将来、さらにわが国の下水道整備に対する国民の要請に応えるとするならば、21世紀初頭には人口普及率は約70%になり、下水処理場数は約1700箇所に広がり、管きよ延長30数万kmに達することが予測される。

ところが、このように加速的に増え続ける膨大な下水道施設は、他の公共施設に比べてかなり苛酷な環境下において、全国各地の一部の施設においては、使用に耐えられないものも見られ、改築や補修を必要とするものが顕在化してきた。

すなわち、下水道施設はコンクリート構造物を主体としているが、これまでコンクリートの中酸化、塩害、凍害、疲労、降水などによる経年的な劣化は、他の公共施設と同様であるが、それ以外にも下水自体に起因する腐食性廃水による腐食、遊離炭酸による侵食などの化学的劣化や、硫酸塩還元菌・硫酸化細菌など生物反応を伴う硫化水素腐食のような生物化学的な劣化が著しい。

特に、下水道施設はコンクリート構造物の大半が地中にあり、また覆蓋下という閉塞的環境にあるために、これらのコンクリートの劣化現象を適確に把握することが困難であったために、事例の報告が実態より過少となっていた。

しかしながら、この生物化学的なコンクリートの劣化現象が、地域的にみて予想以上に早期に進んでいることとあいまって、構造物の損傷が重大な事故につながることを考慮して、建設省土木研究所、日本下水道事業団、各地方公共団体、各企業などの技術関係者が一体となって、その劣化機構、劣化の診断方法および防止対策に取

組んできたのである。

これまでも筆者は、世界のいわゆる下水道先進国における下水道施設のコンクリートの劣化現象をつぶさに見聞してきたが、とくにドイツのハンブルグ市においては、早くから「コンクリートの微生物腐食」に対する解明が行われており、またアメリカのロサンゼルス郡衛生区においても「下水性状の変化とコンクリート腐食速度」の報告がなされていることを把握してきた。

このように、いまや下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化の現象は、世界的に関心の持たれる問題となっているのである。

本文では、まず国内外におけるコンクリートの腐食について、そのメカニズムの解明状況について整理して説明し、次にわが国における下水道施設の腐食の進行の実態調査の結果を解析報告する。そして、腐食に対する対策を各所で試みたので、その研究経過について述べることにした。

しかしながら、下水道施設のコンクリート劣化に対する修復・更新技術は極めて遅れているために、他分野の技術も取り入れながら、措置していかなければならない。

### 2. 国内外のコンクリート腐食の既往の研究

コンクリートの腐食問題は、以前から国外において、特に温暖な地域の下水管について報告されてきた。

オーストラリアのParker<sup>1)</sup>は、メルボルン市の下水管路について、微生物学的腐食のメカニズムを報告しており、この学説はその後の研究によっても確認されている。

その後、1970年代にドイツ(当時西ドイツ)のハンブルグ市で発見された下水管路の腐食により、通常の気候のもとでも生物学的に生成された硫酸によって、コンクリートの腐食が生じることが明らかになった。

表一 コンクリート腐食のメカニズム

① 硫化物の生成 (硫酸イオンの還元)	下水中に含まれる硫酸イオンは、下水が滞留するような箇所では嫌気性の状態に置かれると、硫酸塩還元菌の働きにより還元されて硫化物が生成される。 $SO_4^{2-} + 2C + H_2O \rightarrow H_2S + 2HCO_3^-$
② 硫化水素の空気中への放散	硫化水素を多量に含む下水が落下や攪拌等で急激に乱されると、溶解している硫化水素が一挙に気相中に放出される。 $2H^+ + S^{2-} \rightleftharpoons H^+ + HS^- \rightleftharpoons H_2S \uparrow$
③ コンクリート表面での硫酸の生成 (硫化水素の酸化)	これらの硫化水素は、密閉あるいは換気の悪いコンクリート施設では、外部へ放散することなく壁面の結露中に溶け込んだりして、そこで好気性の硫酸酸化菌により酸化されて硫酸が生成される。 $H_2S + 2O_2 \rightarrow H_2SO_4$
④ 硫酸によるコンクリートの浸食 (腐食, 劣化)	③の反応が進むと、コンクリート表面は硫酸に常時接しているのと同様の条件下に置かれることになり、コンクリート中の水酸化カルシウム $\{Ca(OH)_2\}$ が硫酸と反応して硫酸カルシウム (=水石膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) が生成される。 $Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 硫酸カルシウムは、さらにセメント硬化体中のアルミン酸三カルシウム ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) と反応してエトリンガイトを生成する。 $3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 3CaO \cdot Al_2O_3 + 26H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ エトリンガイト ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) は生成の際、結合水を取込み、大きく膨張する。この膨化によりコンクリートが劣化し、崩壊する。

この下水管路のコンクリート腐食について、ハンブルグ市の技師 R. Bielecki<sup>2)</sup> らが、その原因として微生物腐食を挙げ、それに対する防護手法を報告している。

また、その他のヨーロッパ各国の研究者達は、コンクリートの腐食は T. Thiooxidans という硫酸酸化菌の量と相関があることを報告したり、また対策として、ヨード、ナフタリン等の添加剤が硫酸酸化菌などに及ぼす殺菌効果があることを実証してきている。

わが国では比較的近年になって、下水道施設のコンクリートの微生物腐食が重要視されてきたのであり、1982年に静岡県富士市の岳南排水路では、管路、マンホール等の内部の水面より上部において、この種の腐食が見られ損傷が極めて顕著であったために、検討の結果、長い管路の更築を行ってきている。

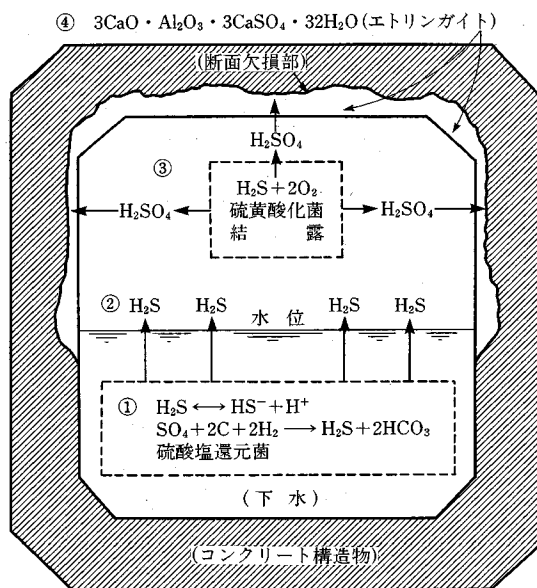
この報告によると、腐食の激しい部分では供用開始後6年でコンクリート表面が剥離し、鉄筋の露出・発錆が認められており、硫化水素ガスが多く発生している地点での管壁からは、硫酸酸化細菌の生息が確認されている。

日本下水道事業団や建設省土木研究所においては、下水管路のみならず、水処理施設や汚泥処理施設においても、腐食部コンクリートの溶出試験および組成分析から、腐食の原因が硫酸であることを確認し、硫酸生成のメカニズムを微生物活動により説明しているのである。

また、下水道事業団では硫酸塩還元菌の制御方法開発を目指して、硫化水素の発生機構の検討を行っているし、さらに硫酸化合物から生成する硫化水素量によるコンクリートの腐食速度の予測法を示したのである。

### 3. コンクリートの腐食の解明

これまで、下水道施設のコンクリート腐食の研究に関して述べてきたが、これまでの研究などの結果より、コンクリート腐食から損傷に至るメカニズムを解りやすく説明しておく。



図一 コンクリート腐食のメカニズム図

図一、表一を見るとわかるように、コンクリートの腐食は4つの過程から成っている。

このように、健全なコンクリートが外部から化学的作用を受けると、その種類、程度により表層から順に存在するセメント水和物が変化していくことが解る。

写真一は、明らかに硫化水素の濃度が高い下水が流下する下水管路のマンホール気相部のコンクリートの腐食状況を示す。

写真二は、下水処理場内の最初沈殿池の気相部のコンクリート腐食状況であるが、腐食対策として一度タールエポキシ塗布の対策を施したが、腐食の程度が激しくて、塗布材が剥離したものである。

次の写真三、写真四は、わが国で初めて撮影された硫酸塩還元菌と硫酸酸化菌である。この写真は、筆者



写真一 下水管路から下水処理場へ流れ込む直前のマンホールのコンクリート腐食状況



写真二 下水処理場の最初沈殿池のコンクリート腐食状況

のコンクリート腐食研究の資料であり、極めて硫化水素の濃度が高い下水道施設で、すでに腐食の進んでいるコンクリート表面から集収し、集積培養したものを走査型電子顕微鏡で写した（島根大学森忠洋教授撮影）ものである。

なお、この硫酸塩還元菌と硫酸化菌の形状については、先述のドイツのハンブルグ市技師の R. Bielecki らの撮影したものと同形状であることが判明している。

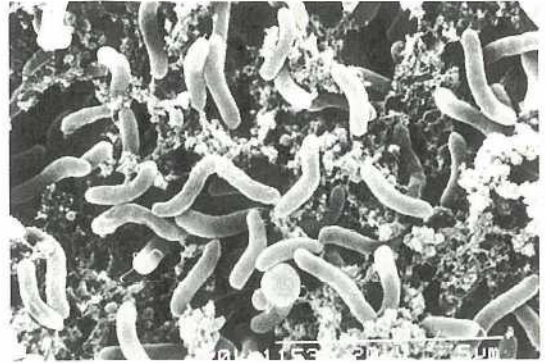
一方、硫酸化菌による硫酸生成の過程を二つの下水処理場の試料を基に実験してみた。この実験は、汚泥貯留槽内上部の腐食箇所表面から、2 l 程度採取したスライム状付着汚泥 300 g を採取して培地を作り、20°C で 7 日間攪拌した状態で継続的に試料を採って、測定を実施したものである。

その結果、一つの処理場の方は、 $\text{SO}_4$  が最初 750 mg/l だったものが、7 日目には 6 220 mg/l に、また別の処理場の方は最初 2 000 mg/l だったものが 16 000 mg/l と、硫酸化菌による硫酸が生成されていく過程が解明された<sup>3)</sup>。

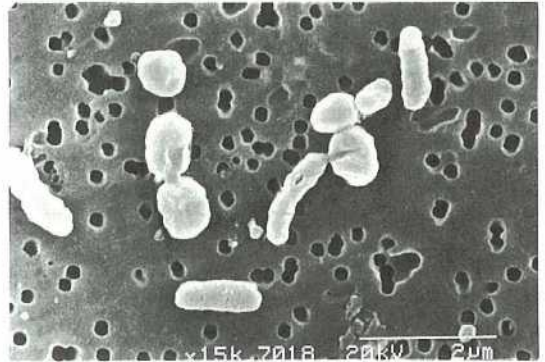
#### 4. 下水道施設のコンクリート腐食の実態

##### (1) 下水処理場の実態

全国の硫域下水道及び公共下水道の終末処理場につい



写真三 硫酸塩還元菌 (1/10 000 白線の長さ 3 μ)



写真四 硫酸化菌 ((1/15 000 白線の長さ 2 μ)

て、下水処理施設等の硫化水素によるコンクリート腐食状況を把握するために、建設省土木研究所が調査を行っているのを、これを纏めてみる。

このアンケート調査は、1988 年度以前に供用開始した下水処理場を有する 200 自治体を選定し、その自治体で主要な処理場を 1 箇所選択して、それぞれ水処理施設と汚泥処理施設についての回答を取纏めたものである<sup>4)</sup>。なお、図-2 に処理場の系統と腐食の度合を示す。

その結果、水処理施設で 95 箇所 (50.3%)、汚泥処理施設で 114 箇所 (60.3%) のコンクリート腐食がみられた。

水処理施設の中で各施設別にコンクリート腐食発見件数を示したのが図-3 である。この図を見てもわかるように、最初沈殿池が最も多く、次いで生物反応槽（エアレーションタンクなど）となっている。

次に汚泥処理施設では、図-4 のように圧倒的に重力濃縮槽が多く、次いで消化タンク、濃縮汚泥貯留槽の順になっている。

この各施設のコンクリート腐食の状況を解明すると、

① まず最初沈殿池での気相部の腐食は、管路施設で生成した硫化物に起因すると考えられる。ここで、最初沈殿池の覆蓋の有無による影響を調べてみたが、図-5 のように明らかに覆蓋の有る場合の腐食の度合いが高い

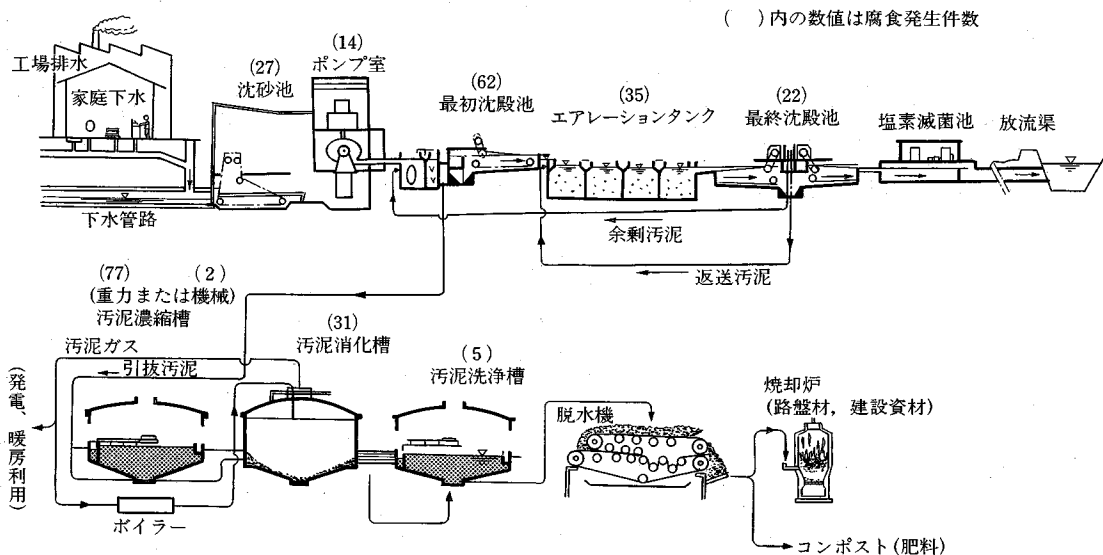


図-2 処理場処理系統図 [( )内の数字は腐食発生件数]

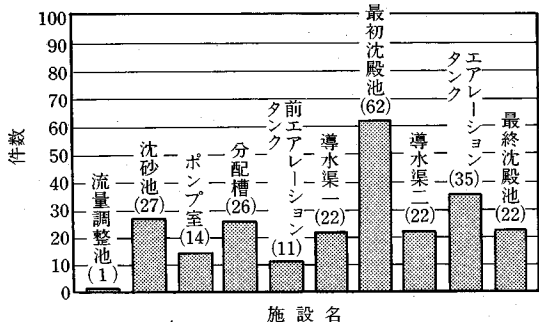


図-3 水処理施設における腐食発生件数

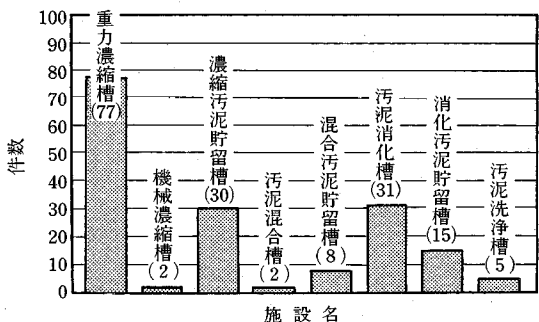


図-4 汚泥処理施設における腐食発生件数

事がわかった。

② 重力濃縮槽での気相部のコンクリート腐食は、汚泥の滞留に伴い処理施設内部で生成した硫化物に起因すると考えられるが、やはり図-5のように、覆蓋の有る場合の腐食の割合が高いことが判明している。

③ 汚泥の性状からみると、硫化水素は最終沈殿池からの余剰汚泥よりも、最初沈殿池からの引抜き汚泥の方

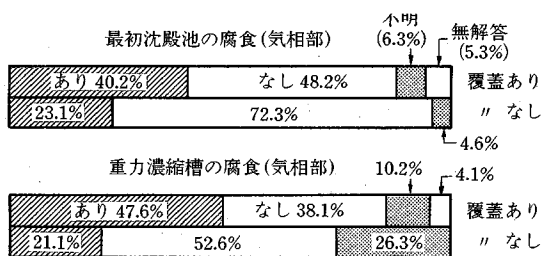


図-5 施設の覆蓋の有無による腐食の発生

が多く発生することが解かった。

④ 汚泥貯留槽の汚泥の硫化水素は、十分な消化が行われていると考えられる消化汚泥からはほとんど発生しないが、無加温消化汚泥からは発生し、とくに消化が不十分と思われる冬期に高濃度になっていた。

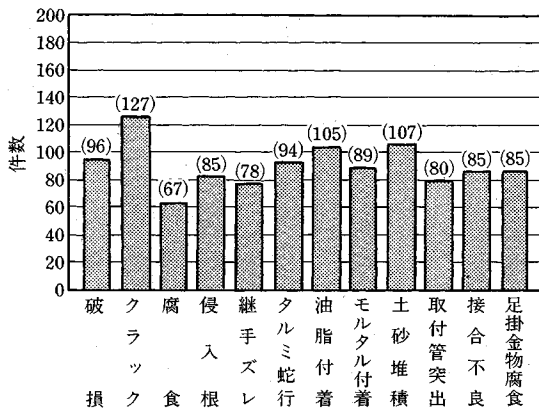
⑤ 消石灰と塩化第二鉄で調質された脱水汚泥では硫化水素の発生は無く、硫酸塩還元菌も生息していなかったが、高分子凝集剤で調質された脱水汚泥からは硫化水素の発生が見られた。

(2) 下水管路の実態

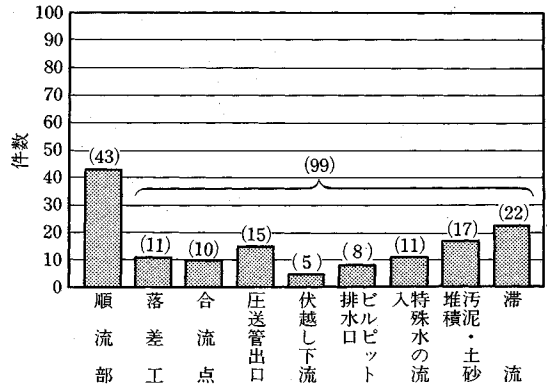
わが国の下水管路は、すでに約20万kmの延長にわたって設置されてきたが、その1割の約2万kmがすでに30年近くの年月を経過しており、また約8万kmが10年間で済んでいる。

下水管路の劣化診断は、目視またはTVカメラによる管内視覚調査、水密性試験等によって個々の管路毎に行われているが、今後も増大する膨大な量の管路施設の全ての区間に有効な頻度で直接的な劣化診断を行うことは不可能と考えられる。

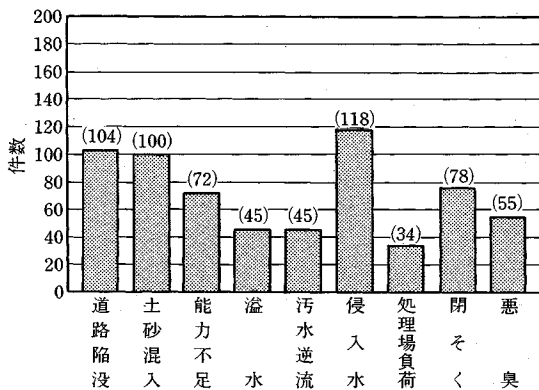
このため、流入水質のDO、pH、硫化物濃度等をモ



図—6 管路施設の劣化・損傷の種類



図—8 腐食発生箇所の状況



図—7 劣化・損傷により発生した異常事態

ニターすれば、硫化水素腐食の管理も可能となる。  
さて、全国の地方自治体の下水道施設についてのアンケートの中で、まず管路施設の腐食を含めて、劣化・損傷を種類別に件数を纏めたものが図—6である。

この図を見てもわかるように、劣化・損傷の中で最も多いのは下水管路のクラックが127件であり、順次土砂堆積、油脂付着、破損、たるみ・蛇行等があり、コンクリート面の腐食は件数からみれば67件にとどまっている。

しかしながら、これらの中で土砂堆積、油脂付着、モルタル付着などは、維持管理上、軽微な損傷であるが、大きなクラック、破損、腐食等は、さらに進行する場合は考えられて、地下水の大量浸入とか、通水能力の大幅低下、地表面の陥没などの重大な事態を招くことになるのである(図—7参照)。

特に、下水管路のコンクリート面の腐食については、先述のように世界各国の共通の問題として研究が続けられているのであるが、この調査においては、コンクリート腐食の発生箇所から、解析を行ったものである。

図—8をみてもわかるように、順流部43件とその他

の部分と比較してみると、はるかに非順流部99件と件数が多いことがわかる。

これは、下水管路の中で合流点、落差工、圧送管出口及びビルピット排水流入口などのように水流が乱れ、硫化水素が揮散しやすい状況下にある場合や、下水の滞留及び汚泥の堆積場所のように嫌気性になりやすく、硫酸塩還元菌が生息しやすい状況のなかでコンクリート面の腐食が発生したと考えられる。

### 5. 下水処理場におけるコンクリート腐食の検証<sup>5)</sup>

#### (1) 調査構造物の概要

特性調査を実施したのは、熱海市の第一処理場(A処理場)の他に3処理場である。

#### (2) 劣化・腐食の状況

各下水処理場の各施設におけるフェノールフタレインによる中性化深さ(劣化度)の測定結果を調査実施してみた(表—2参照)

##### ① ポンプ室の着水井

ポンプ井が処理場建屋内に位置しているA処理場では、表面の腐食が相当に進んで壁面全体が膨脹・軟化しており、表面部分が簡単にかき取れる状態になっていた。このかき取った試料はXRDの結果、二水石膏と同定された。

A処理場のポンプ井内部の天井は、壁面と同様に表面が腐食して鉄筋が露出している部分があり、露出した鉄筋は相当に腐食していた。ただし、採取したコアの状況は表層部分のみ腐食して剝離しているものの、その内部は非常に健全であると判断された。これらの腐食の傾向からA処理場では明らかに硫酸酸性腐食環境による劣化であると考えられた。これに対し海浜近くの屋外にポンプ井が位置しているC処理場では、常時水面より上部の壁面表面部分が多少ポーラスな状態になってザラついている。

表一 特性調査処理場の劣化度 (中性化深さ)

	立地条件	供用後年数	流入下水	使用材料
A	海浜	約22年	海水を含む温泉水+生活排水	N
A'	〃	3年	〃	B+L
B	〃	3年	生活排水	N
C	〃	14年	海水を含む温泉水+生活排水	N

注) Nは普通骨材コンクリート, Lは高炉セメント  
Bは軽量骨材コンクリート

単位: mm

		中性化深さ				
		A 処理場	A' 処理場	B 処理場	C 処理場 <sup>注)</sup>	
処	ポンプ井 または 着水井	+8.7	1.0 } 2.2	0.7	10.0	
	最初沈殿池	常時水面 より 上部	0	-	-	+0.8 } +2.0
常時水面 より 下部		0	-	-		
理	曝気槽	常時水面 より 上部	-	0.5 } 0.7	6.3 } 11.7	4.7 } 14.3
		常時水面 より 下部	-	1.3 } 2.2	2.0 } 4.5	1.3 } 2.0
槽	汚泥貯留槽 または 濃縮槽	常時水面 より 上部	+0 } +3.3	+0.3 } +1.3	4.3 } 7.3	14.3 } 14.7 } または +13.0
		常時水面 より 下部	2.0 } 3.7	+0.8 } +1.8	0.5 } 0.7	7.3

- 注1) 表中、中性化深さの+は劣化部脱落後の境界面からの中性化深さを示す。また、表中の範囲で示した値は数本のコアのうちの最大、最少を示す。  
2) A処理場の最初沈殿池は表面に約1.0 cmのモルタル層が存在。  
3) C処理場の最初沈殿池の値は、最初沈殿池からの流出路における値。

ポーラスな部分はXRDの結果から二水石膏であると判断され、表面より10ミリ以深ではエトリンガイドが検出された。

### ② 最初沈殿池

最初沈殿池では“特性調査”において硫酸塩の還元が確認されていることから、硫酸酸性環境による腐食が進行していると考えられるが、A処理場ではコンクリート表面にモルタルの保護層が施しており腐食は確認されなかった。しかし、C処理場では内部コンクリートの腐食が確認された。特に最初沈殿池からの流出路の水面より上部において腐食が顕著に見られ、壁面表層部は、表面から剥がれるような層状を呈して腐食が進行していた。この腐食部分は完全に中性化しており、XRDの結果、存在する鉱物は二水石膏であることが確認された。

C処理場での使用セメントが普通ポルトランドセメントであることを考え合わせると、“SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンの先行浸透によりエトリンガイドが生成され、その膨張圧により境界面の裏面で微細なクラックを生じながら、硫酸によるコンクリートの腐食が進行した”ことが確認される。

硫酸による分解が進行すると、最初のクラックの背面にも二水石膏の層が形成されて、硫酸の腐食は再び硫酸イオンの浸透が反応律速になる。さらに二水石膏層内部の反応境界面裏面への硫酸イオンの先行浸透により、エトリンガイドが生成し、その膨張圧で第2のクラックを生じる。このような現象を繰り返して、層状の二水石膏層が形成されると考えられる。また、季節による硫酸化細菌に活性の差も層状の二水石膏形成に関与しているものと考えられる。

### ③ エアレーションタンク (曝気槽)

エアレーションタンク内では、一般にエアレーションの好気条件のために酸化還元電位Ehが高く硫酸塩の還元が起こらず、硫酸酸性環境にはならない(硫酸の生成がされないと考えられる)。ただし、各処理場ともに常時覆蓋がされていることから有機物分解時に発生する二酸化炭素が放散され難く、コンクリートの炭酸化が進行すると考えられる。A処理場、B処理場、C処理場ではXRDの結果からもコンクリートの炭酸化進行が確認されたが、A'処理場ではコンクリートの炭酸化以上に二水石膏の生成が認められた。これは炭酸化により、モノサルフェート等のカルシウムサルフォアルミネートが分解して二水石膏が生成した可能性も考えられるが、A'処理場では1~10 mmの範囲(二水石膏が存在する下層)にエトリンガイドが生成されている。

常時水面より上部の中性化深さを比較すると、A'処理場のみが1ミリ以下の小さな値になっているのに対し、供用年数がA'処理場と同等のB処理場ではエアレーションタンクの中性化深さが6~11ミリと大きくなっており、供用年数の長いC処理場と同等の値になっていた。

### ④ 汚泥貯留槽 (又は濃縮槽)

汚泥貯留槽内部の状況は、各処理場ともに常時水面より上部のコンクリート面に顕著な膨張・軟化が見られた。特にA処理場では供用年数が長いことから、コンクリート表面の軟化・膨張が著しかった。しかし、常時水面より下部のコンクリートは目視観察の範囲では健全で、コンクリート表面も平滑な状態を保っていた。常時水面より下部の平滑なコンクリート面と比較して常時水面上部の腐食深さを概略に測定した結果、腐食深さは膨張後の厚さで20~30ミリであった。天井部分はかぶりコンクリートの膨張・剥落が生じており、鉄筋が露出して発錆していた。膨張部分の生成鉱物はコア供試体の

XRDの結果から、二水石膏であることが確認された。

C処理場では、汚泥濃縮槽表面にタールエポキシコーティングによる表面保護層が施されていたが、処理水の越流部より上部では、ほとんどの保護層が剝離しており、剝離した部分のコンクリートにはXRDの結果から白色の二水石膏の生成が確認された。

短期間の供用にもかかわらず、既にかかなりの腐食が進行していることから、A'処理場とB処理場は、下水処理場の汚泥貯留（濃縮）槽のように高濃度の硫酸が生成される部位に使用するコンクリートは、酸の分解作用に耐える配合の改良または耐久的な表面保護策が必要であると考えられる。

### (3) 軽量骨材コンクリートの耐久性

熱海市のA'処理場においては、地域の問題を解決するために、船型の処理場とした。そのために軽くすることを必要としたので、コンクリートに軽量骨材を用いたのであり、この軽量骨材の耐久性を確認してみたのである。

A'処理場では中性化し易い高炉セメントを使用したにもかかわらず、B処理場と比較して中性化深さが浅いことから、“水セメント比を45%と低く管理すれば、高炉セメントを使用した軽量コンクリートの炭酸化に対する耐久性は、通常のコンクリートよりも向上（人工軽量骨材も有利に作用）する。”という促進試験の結果が確認された。

以上のように実構造物の劣化・腐食に関する調査結果からも、A'処理場で使用された軽量コンクリートに関する下記の促進試験結果が確認された。

① 炭酸化に対しては通常のコンクリートと比較して耐久性が高い。

②  $\text{SO}_4^{2-}$  イオン等の浸透は通常のコンクリートと比較して少ない。

③ 汚泥処理系統施設における硫酸による腐食・分解はコンクリートの配合によらず無視できないほど進行する。

従って、汚泥貯留（濃縮）槽等の高い濃度の硫酸が生成される施設に使用するコンクリートは、硫酸の分解作用に対して耐久性な配合の改良または表面保護策が必要である。

## 6. コンクリート構造物の化学的劣化対策

これまで述べたように、各処理場ごとにそれぞれの特徴を持ち、また各施設によってコンクリートの劣化、腐食環境や耐久性も異なっているが、中には劣化、腐食防止対策を早急に実施しなければならないケースが多くある。しかしながら、わが国における下水処理場のコンクリート構造物の硫酸等による劣化が腐食を防止する対策（補修工法を含む）等は一部には見られるものの、総合

的な対策としては確立されるまでには至っていない。そのため、下水処理場のコンクリート構造物等に関する総合的な管理保全を図るために必要な指針等を早急に創設する方針である。

ここでは、下水処理場におけるコンクリートの劣化、腐食の状況とその対策の実態をふまえて、現在の研究範囲内で材料面からの劣化、腐食防止対策について検討し、ケーススタディ等により今後のあるべき方向性についてとりまとめた。

### (1) 下水処理場におけるコンクリート腐食対策

下水処理場における劣化、腐食の実態と対策について総合的に調査した事例は、本研究以外には数少ないが、酸素活性汚泥法を採用した下水処理場での調査事例等<sup>9)</sup>と、標準活性汚泥法の下水処理場で得られた知見、さらにはコンクリートの劣化、腐食のメカニズム等から総合的に判断して、下水処理場における劣化、腐食防止対策の必要箇所と対策の水準を次のように設定した。

#### ① 酸素活性汚泥法の下水処理場の場合

##### (a) 水処理施設の気相部

密閉系、とくにエアレーションタンクでは硫化水素に対して重度の水準の対策を実施する。また、二酸化炭素の濃度が高まるので、二酸化炭素による中性化対策もあわせて実施する。

なお、エアレーションタンクより後の施設では、下水中の硫化物濃度が大きく減少しているため、カバー付きの施設であっても劣化、腐食対策は不要もしくは軽微な水準の対策とする。

##### (b) 水処理施設の液相部

エアレーションタンクより前の施設での劣化、腐食は主として下水中の硫酸塩によるもので、その量が著しく多くない場合の劣化、腐食は軽度であると考えられる。したがって、劣化、腐食防止対策としては軽度の水準の対策とする。

エアレーションタンクは、下水中の炭酸による劣化対策として、中程度の水準の対策とする。

##### (c) 汚泥処理施設

貯留槽や濃縮槽等のカバーされた密閉系のコンクリート施設では、硫化水素に起因する腐食に対して、気相部では重度の対策、また液相部でも劣化、腐食が見られるところから、中程度の水準の対策とする。

#### ② 標準活性汚泥法の下水処理場の場合

標準活性汚泥法の下水処理場の場合には、管内貯留やポンプ圧送の下水を受けたり、また供用開始の当初といった、処理能力に大幅な余裕がある場合等の特殊な事例を除いて、水処理施設のコンクリートが劣化、腐食するような事例は考えられないが、安全性を考慮してつぎのように設定した。

##### (a) 水処理施設の気相部と液相部



表一三 各施設における腐食防止対策の必要箇所と腐食防止対策の水準

下水の水質	処理方式	流入きよ・沈砂池等		初沈・流量調整槽		曝気槽 (エアレーションタンク)		終沈・塩素混和池・ 放流きよ		汚泥貯留槽・ 汚泥濃縮槽	
		気相	液相	気相	液相	気相	液相	気相	液相	気相	液相
硫化物を含む下水	酸素活性汚泥法(酸素法)対策	重度の腐食 ビニルエステル樹脂 (H <sub>2</sub> S)	軽度の腐食 タールエポキシ樹脂 (硫酸塩)	重度の腐食 ビニルエステル樹脂 (H <sub>2</sub> S)	軽度の腐食 タールエポキシ樹脂 (硫酸塩)	重度の腐食・劣化 ビニルエステル樹脂 (H <sub>2</sub> S による腐食およびCO <sub>2</sub> による中性化)	中程度の腐食・劣化 エポキシ樹脂 (硫酸塩, 炭酸)	ゼロ～軽微	中程度の腐食・劣化 エポキシ樹脂 (硫酸塩, 炭酸)	重度の腐食 ビニルエステル樹脂 (H <sub>2</sub> S)	中程度の腐食 エポキシ樹脂 (硫酸塩)

水処理施設の液相部と気相部についての対策は、一般的には不要、もしくは軽微な水準の対策とする。

(b) 汚泥処理施設

酸素活性汚泥法の場合とはほぼ同じである。

以上の①および②を総括し、一般的な下水処理場を想定して、施設ごとに劣化、腐食防止対策の必要箇所と対策の水準を表一三のように設定した。

なお、流入きよ、沈砂池からポンプ井、着水井にいたる間は、下水が滞留したりして一般的に非常に劣化、腐食しやすい環境にあること、また一端劣化、腐食すると補修工事が非常にやりにくい箇所であること等のために、安全性の観点から、当初から気相部は重度の、また液相部は軽度の対策を設定した。

(a) 重度の対策：硫化水素から生成した硫酸によって激しい腐食を受ける箇所(主に気相部)に対する対策

(b) 中程度の対策：炭酸によって中程度の劣化を受ける箇所(液相部)に対する対策

(c) 軽度の対策：下水中の硫酸塩による腐食(液相部)や気相中の二酸化炭素による中性化に対する対策

(d) 軽微な対策：劣化、腐食についてほとんど問題のない箇所での安全性の確保のために行う対策

(2) 腐食防止対策の種類と特徴<sup>7)</sup>

① 腐食防止対策の基本的な考え方

下水処理場のコンクリートの硫化水素による劣化、腐食防止対策の基本的な考え方は、次の5つに整理することができる。

(a) 硫化水素を発生する硫酸塩還元細菌の生育を抑制すること。

(b) 発生した硫化水素の気相中への放散を防止すること、もしくは速やかに排除すること。

(c) 気相中に放散された硫化水素は速やかに排除すること。またコンクリート腐食の原因となる硫酸を発生する硫酸化細菌の生育を抑制すること。

(d) 水密性および耐食性の高い品質のコンクリート

を打設すること。

(e) 耐食性材料を使用して、劣化、腐食を受けるコンクリートの表面にコーティングやライニング等を行うこと。

また、硫酸塩、炭酸、および二酸化炭素による下水処理場のコンクリートの腐食は、硫化水素の場合とは基本的に異なる面も有しているが、防止対策については、コーティングやライニング、コンクリートの品質等で対応するのが適切と考えられる。

そこで、本章では材料面からの防食対策について述べる。

(3) 耐食性材料の種類と特徴<sup>8)</sup>

① コンクリート自体

ポルトランドセメントを使用したコンクリートは、硫酸によって腐食するので、コンクリートそれ自体だけでは腐食を防止するには限界がある。しかし、腐食の進行速度はセメントの種類、コンクリートの配合等によってかなり違っている。比較的弱い酸や硫酸塩などの塩類にさらされる構造物では、コンクリートの配合を適切に選択することによって、腐食の進行をかなり食い止めることができる。

現在、コンクリートの耐食性の向上を図るために種々のセメントが開発されている。このなかで耐硫酸塩ポルトランドセメントは、硫酸塩と反応して腐食の原因となるエトリンガイトの生成を抑えるために、普通セメント等に比べてセメント中のアルミン酸三カルシウム(3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の含有率を4%以下と低くしている。

耐硫酸塩ポルトランドセメントは、酸性地盤における基礎杭の材料や酸性の強い温泉排水の影響を受けるコンクリート構造物といった用途に効果があるが、国内ではあまり使用されていない。耐酸性の面で最もすぐれているのはアルミナセメントであるが、国内ではほとんど使用されていない。一般的にポルトランドセメントや混合系のセメントを使用したコンクリートの耐酸性の限度はpH 4～5程度であり、この値より低いpH領域に対しては徐々に劣化、腐食される。

② 耐食被覆材料

表-4 主な耐食被覆材

区分	材 料	
セメント系	ポリマーセメント	
	アルミナセメント	
	水ガラス系耐酸セメント	
合成樹脂系	熱可塑性樹脂	ポリ塩化ビニル
		ポリエチレン
		ポリプロピレン
	熱硬化性樹脂 タール変成樹脂	エポキシ
		不飽和ポリエステル
		ビニルエステル
	タールエポキシ	

表-5 主な熱硬化性樹脂の特性

樹脂の種類		樹脂の特性	一般的特色
不飽和 ポリエステル樹脂	ビスフェノール系	<ul style="list-style-type: none"> <li>ポリエステル中エステル基濃度が最も小さく耐薬品性に優れる</li> <li>耐アルカリ性は現在のFRP樹脂中、最高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐酸、耐アルカリ性に優れる(超高耐食用樹脂)</li> <li>伸び率はポリエステルより大</li> <li>耐クラック追随性が良好</li> </ul>
	ヘット酸	<ul style="list-style-type: none"> <li>酸化性酸に対する耐食性大</li> <li>高温、高濃度の酸に対する耐食性大</li> <li>耐アルカリ性はイソ系、オルソ系並</li> </ul>	
ビニル エステル 樹脂	ビスフェノール型	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐酸、耐アルカリ性に優れる(超高耐食用樹脂)</li> <li>伸び率はポリエステルより大</li> <li>耐クラック追随性が良好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>難燃性、耐酸、耐アルカリ性に優れる</li> </ul>
	ノボラック型	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビスフェノール型に比べて耐熱性、耐有機、溶剤性に優れる</li> <li>高温での特性保持率良好</li> </ul>	
	臭素化 ビスフェノール型	<ul style="list-style-type: none"> <li>難燃性、耐酸、耐アルカリ性に優れる</li> </ul>	

コンクリート構造物の防食対策として広く採用されているのは、コンクリート構造物の表面を耐食性の材料で被覆する方法である。主な被覆材料を表-4および熱硬化性樹脂の特性を表-5に示す。

(a) コーティング工法

ライニングとコーティングとの定義・区分<sup>9)</sup>は人によって異なるが、厚膜(大体1mm以上)のものをライニング、薄膜(大体0.5mm以下)のものをコーティングと呼ぶこととする。コーティング工法の塗料としては、下地コンクリートとの接着性が良く、補強材を必要としないエポキシ樹脂やタールエポキシ樹脂が使用されている。

コーティングの耐久性は、下地のコンクリートの調整が不適当であると、被覆材と下地の間に接着不良をおこしたり、塗膜にふくれやピンホールを生じたり、また樹脂自体の硬化不良を生じたりするので注意を要する。下

表-6 ライニング工法の種類

工 法	使用樹脂	補強材等
フレック ライニング	エポキシ 不飽和ポリエステル ビニルエステル	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガラスフレック 厚さ: 2~10 μm</li> <li>大きさ: 200~400 μm</li> <li>混合比 樹脂: フレック =1:1</li> </ul>
FRP ライニング	タールエポキシ エポキシ 不飽和ポリエステル ビニルエステル	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガラスマット</li> <li>ガラスサーフェイ スマット</li> <li>ガラスクロス</li> </ul>
レジンモルタル ライニング	エポキシ 不飽和ポリエステル ビニルエステル 無機系材料 ポリマーセメント モルタル	<ul style="list-style-type: none"> <li>骨材、珪砂(2mm以下)</li> <li>混合比 樹脂: 骨材 =1:1~1:6</li> </ul>
セラミック ライニング	エポキシ	<ul style="list-style-type: none"> <li>陶器粉末</li> <li>混合比 樹脂: 粉末=3:7</li> </ul>
シートライニン グ	硬質または半硬質ポ リ塩ビシート	-
併用タイプ	モルタル部: 不飽和 ポリエステル FRP部 ビニルエステル	<ul style="list-style-type: none"> <li>レジンモルタル ……骨材(珪砂)</li> <li>FRP部 ……ガラスマット sf マット</li> </ul>

地調整に当って注意すべき点は、コンクリート表面の脆弱層の除去、表面の異物の除去および下地コンクリート中の水分管理である。

一般に、樹脂コーティングの場合、下地コンクリートの含水率は8%以下にする必要があるとされている。

(b) ライニング工法

コーティング工法は通常は3回塗りにて0.5mm程度以下に仕上げる方法であり、コンクリートのように下地の表面が粗い場合にはピンホールが生じやすくなったり、また塗膜の厚さが薄いために、衝撃や摩耗等により塗膜が破壊されたり、温度変化の激しいところでは塗膜にひび割れ等が生じやすい。したがって、確実な耐薬品性を期待する場合には、塗膜を厚くするライニング工法が適している(表-6参照)。

7. 腐食防止対策のケーススタディー

ケーススタディーの対象とした下水処理場の概要は次のとおりである。

- ① 計画処理水量 100 000 m<sup>3</sup>/日
- ② 排除方式 分流式
- ③ 処理方式 酸素活性汚泥法と標準活性汚泥法
- ④ 汚泥処理方式 濃縮一脱水

(1) 腐食防止対策の対象面積

先の検討結果により、劣化、腐食防止対策の対象箇所は次のとおり区分した。

- ① 流入きよ、沈砂池、ポンプ井、着水井、プリア

表一 試験に供した樹脂ライニング仕様

防食対象箇所	供試ライニング	工法区分	使用樹脂名	補強材	プライマー硬化材等	層厚(mm)
気相部	A-1	FRP ライニング	ビスフェノール系不飽和ポリエステル	ガラスマット1枚 ガラスサーフェイス マット1枚	プライマー：ビニルエステル (親水性ビニルエステル)	1.5
	A-2	FRP ライニング フレックライニング 併用工法	ビスフェノール系 ビニルエステル	ガラスマット1枚 ガラスフレック	プライマー：ビニルエステル (親水性ビニルエステル)	1.5
	B-1	FRP ライニング	ビスフェノール系不飽和ポリエステル	ガラスマット1枚 ガラスサーフェイス マット1枚	プライマー：ウレタン (湿気硬化型ウレタン)	1.5
	B-2	FRP ライニング	ビスフェノール系 ビニルエステル	ガラスマット1枚 ガラスサーフェイス マット1枚	プライマー：ウレタン (湿気硬化型ウレタン)	1.5
	C	FRP ライニング	ビスフェノール系 ビニルエステル	ガラスフレック (含有量：25%)	プライマー：コンクリート用プライマー (ウレタン系)	0.6
液相部	D	FRP ライニング	エポキシ (水系エポキシ)	ガラスクロス1枚	プライマー：下塗ハイドロモルタル (レジンモルタル)	1.2
	E	フレックライニング	エポキシ (微溶剤型)	ガラスフレック	プライマー：プライマー S	0.8
	F	FRP ライニング	エポキシ (無溶剤型)	ガラスクロス1枚	プライマー：コンクリート用プライマー	0.6

表一 試験に供した樹脂ライニングの総合評価

項目	試料								
	A-1	A-2	B-1	B-2	C	D	E	F	
腐食試験	外観変化	○	○	△	△	×	◎	×	○
	寸法・重量変化	○	○	○	○	×	◎	×	○
	浸透探傷・表面検査	◎	△	○	◎	×	△	×	△
	耐摩耗性	○	○	○	○	×	△	△	○
	ペーコル硬度	○	○	○	○	×	△	△	○
	H <sub>2</sub> S ガス透過性	○	○	△	○	×	○	○	○
	塗膜透水性	○	○	○	○	○	○	○	○
膜厚適正性	◎	○	◎	○	○	○	△	△	
耐剥離性	付着強度：背面乾燥	◎	○	◎	△	×	◎	○	◎
	湿潤曲げ強さ：背面乾燥	△	○	△	×	×	○	○	◎
	湿潤半水浸：風乾塗工養生	◎	◎	◎	◎	×	◎	△	◎
	過剰内部水分：塗工密封	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎
総合判定	○	○	○	△	×	○	×	○	

注) 総合判定基準 ○：×を含まないもの ×：多数の×を含むもの △：その中間

レーションタンク

- ② 最初沈殿池，流量調整池
- ③ エアレーションタンク
- ④ 最終沈殿池，塩素混和池，放流きよ
- ⑤ 汚泥の貯留槽，濃縮槽，返流水水路

(2) 腐食防止対策工法の設定

腐食防止対策としては，防食対策として信頼性が高いライニング工法を採用することとした。

下水処理場において長年実施してきた耐酸材料の試験研究と，それらに基づいて総合評価した結果を表一，表一に示す。

これによると耐酸性を目的とする防食工法としては，不飽和ポリエステル樹脂系およびビニルエステル樹脂系のライニング工法が優れていることが分かった。

そこで，ケーススタディにおける劣化，腐食防止対策として，

- ① タールエポキシ樹脂 FRP ライニング工法
  - ② エポキシ樹脂 FRP ライニング工法
  - ③ ビニルエステル樹脂 FRP ライニング工法または不飽和ポリエステル樹脂 FRP ライニング工法
- を選定した。

そして，

- ① ケース1：水質が比較的良好な場合（硫化物を含まない場合）
  - ② ケース2：水質が悪い場合（硫化物を含む場合）
- の2ケースとし，防食対策工事を行うこととした。

(3) 腐食防止対策工事費と土木・建築工事費に占める割合

腐食防止対策工事費が土木・建築工事費に占める割合を，全体計画（処理能力—100 000 m<sup>3</sup>/日）と，全体計画の1/4（処理能力—25 000 m<sup>3</sup>/日）について求めた。

ケース1：全体計画においては，腐食防止対策工事費は，土木・建築工事費の8.3%程度となった。また，全体計画の1/4の場合の腐食防止対策工事費は，土木・建築工事費の4.3%程度となった。

従って，ケース2の条件の悪い場合においても，この

割合はさして変わらないので、建設時に防腐対策を取入れた方が望ましい場合が多い。

## 8. む す び

本文は、下水道施設に対する「微生物によるコンクリート腐食」という極めて難しい問題の発生が、世界的に惹起されており、これを放置すると危険な事態が予測されることから、その事実と対策について述べてきたものである。

特に、土木研究所の調査報告によれば、わが国の67自治体において、下水処理場のコンクリート壁が一部崩れたり、地中の下水管に穴があき道路が陥没したり、有毒ガスが発生している事を懸念している。

これまで記述したように、早急にこのコンクリート腐食のメカニズムを更に深く掘りさげ、事前防止、事故修復を行わなければならない。

本文の纏めは、

① 現段階における微生物によるコンクリート腐食について、わが国で初めて「硫酸還元菌、硫黄酸化菌」の写真を撮影することに成功して、メカニズムをはっきりさせた。

② 下水処理場、管路等の施設の中で、微生物による腐食が、どのような環境で発生するのかを経験的に解明した。

③ コンクリートの腐食に対する対策として、いろん

なケースを試み、合理的、経済的に措置する一つの基準を設けたこと。

④ 下水道施設を建設する場合、当初より防止対策を取り入れることの技術的、経済的境界を見つけ出したこと。

などを記述してみた。

最近になって、これらの事態の重要性に鑑み、上下水道関係の間で、急速にコンクリート管更生法及びコンクリート防食工法が陸続と開発されてきている。

しかしながら、これらの現象解明と対策はまだ初期の段階であり、極めて地味な技術になるが、あらゆる分野の技術を結集して、早くこの問題に取り組まなければ将来に大きな禍根を残すことになるだろうと予測される。

## 参 考 文 献

- 1) C.D. Parker (オーストラリア) : Aust. J. Exp. Biol. Med. Sci., Vol. 23, 1945.
- 2) R. Bielecki (ドイツ) : ハンブルグ市によるBSAに関する研究成果.
- 3) 中本至・谷戸善彦 : 下水処理場におけるコンクリートの劣化に関する調査研究, 土木学会論文集, No. 403, 1989.
- 4) 宮原茂・笹部薫・桜井真一 : 下水処理施設の補修・更新方法に関する研究調査, 土木研究所報告書, 1991.
- 5)~9) 中本至 : 下水処理場における軽量骨材コンクリートの応用とコンクリートの劣化に関する研究, 1990.

(1993. 7. 19 受付)