

酸素活性汚泥処理法を用いた下水施設における コンクリートの腐食メカニズム

川東龍夫¹・鈴木宏信²・宮川豊章³・藤井學⁴

¹正会員 工修 近畿大学助手 環境科学研究所 (〒577-0818 東大阪市小若江3-4-1)

²正会員 工修 (株)中研コンサルタント 技術第一部課長 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

³フェロー会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

下水処理施設の酸素活性汚泥処理システムにおいて、コンクリートの腐食および劣化メカニズムの検討を目的に、暴露試験を行った。供試体は経年とともに外観変状、質量減少、相対動弾性係数の減少が認められ、浸漬10年以上経過した非ライニング供試体の力学的性能の低下は大きい。細孔構造、化学分析から検討した物性変化は表面部において著しく、その割合はコンクリートの種類、ライニングの有無によって相違する。腐食と劣化は、硫酸などによる要因より侵食性遊離炭酸の影響が大きく、反応とイオンの移動メカニズムをともなって進行する。侵食性遊離炭酸の発生は、下水の水質とそれに伴う細菌・原生動物の活動の変化によって影響を受けるが、種々の実験と遊離炭酸の計算結果をもとに、腐食・劣化の推定法の提案を試みた。

Key Words: corrosion of concrete, sewage treatment facility, free carbon dioxide, mass loss, dynamic modulus of elasticity, pore distribution, chemical analysis

1. まえがき

下水施設のコンクリートの腐食メカニズムは、取水下水の水質の相違、特に下水中の微生物の種類と量、あるいはシステム環境の違いなどにより相違する。たとえば、下水管きょうの腐食の主な原因是、下水管中の液相部分での硫酸還元菌と気相部分での硫黄酸化菌の働きによって生じる酸性(硫酸)腐食と考えられ、細菌の働きと化学反応によって起こることが明らかとなってきた^{1), 2), 3)}。それにもない、維持・管理を含めた腐食対策の提言も行われるつつある^{4), 5)}。一方、下水処理場の特定の処理施設においてコンクリート表面に早期の腐食が生じたため、腐食コンクリートの分析および処理場の水質分析などの調査を行い、主たる原因が侵食性炭酸によるものと結論した報告^{6), 7)}もある。この点で、硫酸が主たる要因の下水管きょうの腐食例とは原因が異なっており、最近、細菌活動の代謝とコンクリートの劣化に関する基礎実験報告^{8), 9)}が行われている例もある。一方、下水量の増加、水質の

悪化などに起因する処理排水への質的および量的な向上の要求は、施設の負荷を増加させその重要性もさらに増すものと思われる。

本研究は、このようなコンクリート施設の増設、拡張、維持管理などにおける防食対策に必要と思われる基礎資料の収集を目的としている。このため、配合などを変化させて作成した13種類のコンクリート供試体を、腐食が発見された下水処理施設終末処理場内の3カ所に暴露し、これらの経年的な変化の約10年以上にわたる調査を行った。その結果に基づいて当該施設におけるコンクリート腐食・劣化メカニズムを検討した。

調査項目は、暴露場所の浸漬容積の制約と経年的劣化の程度を非破壊的に把握することを主目的としたため、約10年までは外観観察、質量、動弾性係数の各項目を行った。さらに、10年以上を経過した時点において、曲げ破壊、吸水率、中性化深さ、細孔径分布の物理試験、および表面微小部、蛍光X線、粉末X線回折などの化学的な機器分析を行った。

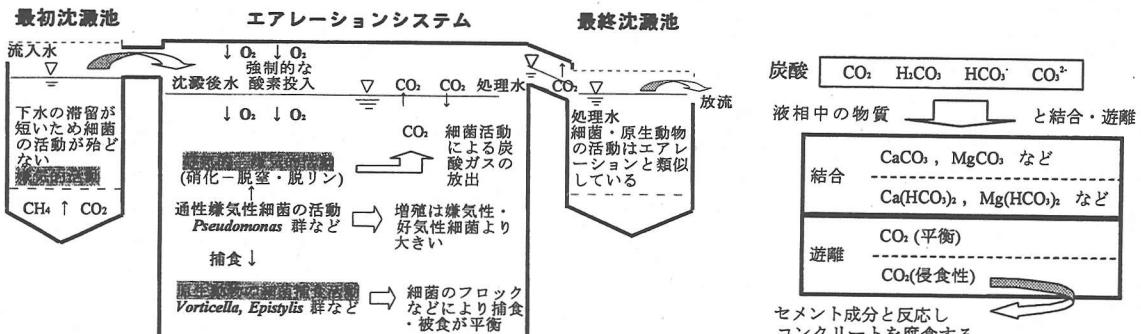


図-1 酸素活性汚泥処理システムの概要

2. 酸素活性汚泥法における侵食性炭酸の成因

地球規模的な酸素、二酸化炭素の循環と同様に、下水処理場の各施設におけるシステム場においても、それぞれ物質収支の反応系が成立している。物質収支は、各系によって分解・結合あるいは固定などの循環過程をたどるが、これらの系は複雑に連鎖している。収支に関わる種々の物質は、主として水素、酸素、炭素、窒素、イオウ、リンなどが最小単位としてあげられ、反応系が連鎖・交錯する中にあっては有機・無機の形態で下水中に存在している。また、収支に関する分解・固定は、下水中の細菌のエネルギー代謝によって大きく影響を受け、細菌の増殖・減少は原生動物による捕食メカニズム^⑧によってバランスが保たれている。

活性汚泥法では好気性・嫌気性処理法を目的に応じて併用する場合が多いが、各場における好気性細菌と嫌気性細菌あるいは通性嫌気性細菌の存在量は、有機物の濃度、溶存酸素の存在量、などにより影響を受ける。好気性処理法は細菌の代謝の酸化作用によって有機物を二酸化炭素、水、硝酸、オルトリリン酸、硫酸などの無機物に、一方、嫌気性処理法は細菌の代謝活性によって有機物をメタンと二酸化炭素にそれぞれ最終生成する^⑨。試験を行った施設は、純酸素を用いた酸素活性汚泥法（以下、酸素法）および標準活性汚泥法（以下、空気法）の両者を採用している。これらのシステムにおいては、最初沈殿池で嫌気性活動があると考えられるが、汚泥を滞留しないような操作であるため、最終生成物に至る過程での硫化水素などの発生およびこれによる腐食は少ない。加えて、エアレーションでは、硝化、脱窒素、脱リンを目的としているため通性嫌気性細菌の活動・増殖とも活発であり、硫化水素・硫酸生成の可能性は少ないものと考えられる。（図-1）

下水処理場のような複雑なシステムの場においては、腐食要因が一要因に限定できない場合を考えられるため、先に述べた硫化水素、硫酸の他に、発生が考えられる硝

酸、あるいは炭酸などの腐食要因の中から主たる要因を特定する必要がある。たとえば、これまで下水管などで発生した腐食メカニズムは、硫酸生成のプロセスが主因として大きく影響している。また、暴露試験を行った処理施設のシステム中の曝気槽などでも、嫌気性活動が行われ硫化水素や硫酸による腐食要因の可能性も考えられる。しかし、これまでの調査によると、浸漬場所であるエアレーションから最終沈殿池における場では、気・液相での二酸化炭素の発生がきわめて多いことが認められ、特に、腐食が問題とならなかった空気法と比較して顕著であった。一方、他の腐食要因は酸素法、空気法とともに有意な差が殆ど認められなかった。したがって、当システムの場においては、液相中の炭酸によって発生する遊離炭酸、特に侵食性遊離炭酸が、以下のようないくつかの成因で発生し、主たる要因として腐食が進んだものと考えられる。

細菌の代謝活動によって生成される二酸化炭素は、流入負荷と代謝活動に伴う酸素の消費量によって増減するが、下水中的有機物質が高濃度であれば負荷は高くなり、二酸化炭素が液相中に多く排出される。特に酸素法においては、空気法に比較して下水の負荷は高く、液相中の二酸化炭素の濃度は高い。また、液相から気相に拡散した二酸化炭素が再度液相に溶解することもあり、エアレーションシステムから最終沈殿池に至る各場において液相の二酸化炭素濃度は増加する。液相に溶存する全炭酸のうち、カルシウム、マグネシウムなどの陽イオンと結合したものと除いた残りの二酸化炭素を遊離炭酸と総称するが、平衡的に溶存するものを從属性遊離炭酸と呼び、遊離炭酸から從属性遊離炭酸を除いたものを侵食性遊離炭酸と称している^⑩。（図-2）

上述したように、水中の二酸化炭素濃度は分圧・水温によって影響を受けるが、溶解後の炭酸物質はCO₂、H₂CO₃、HCO₃⁻、CO₃²⁻の形態で存在し、その存在量はpHによって相互に交換される。

このような成因によって発生する遊離炭酸、特に侵食

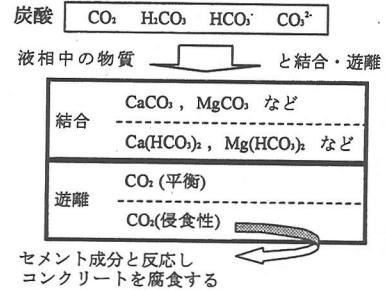


図-2 液相中の炭酸の形態と働き

表-1 使用材料

使用材料	備考
セメント	普通ポルトランド
骨材	粗骨材：砕石、細骨材：海砂
流動化剤	高縮合トリアジン系化合物
減水剤	グニンスルホン酸塩ポリオール複合体
AE剤	天然樹脂酸塩
ポリマー (セメント混和用)	SBR ラッテクス
エポキシ樹脂 タールエポキシ樹脂	ビスフェノールA-エピクロロヒドリン縮合化合物 エポキシ樹脂のタール変成

表-2 配合要因

供試体番号 No.	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位セメント量 C(kg/m³)	備考
基 本	1 2 3	50 55 60	44	300
	4	50		
	5 6	55 60		
ライ ニ ン グ	7(1) 7(3) 8(1) 8(3) 9	55	42	エポキシ(400-600 μm) エポキシ(600-1000 μm) タールエポキシ(400-600 μm) タールエポキシ(600-1000 μm) モルタル(10mm)
	10	55		
	11	51		
特 殊	10	48	42	流動化コンクリート ポリマーセメントコンクリート
	11	51		

性遊離炭酸は、流入負荷、細菌の代謝活動、液相のアルカリ度とpH、システム環境などの変化によって大きく影響を受ける。処理効率の大きい酸素法にあっては、下水管きょに比較して細菌の代謝量が大きいため、硫化水素や硫酸の生成より、二酸化炭素の生成によるコンクリート腐食に対する影響が大きいものと考えられる。

3. 実験概要

(1) 浸漬環境条件

供試体の浸漬場所は、実験の目的から酸素法システムにおける最終沈殿池の溢流水路〔水路の水位約13~32cm、流速0.96m/sec(水路中央底部より45mm位置)〕としたが、比較のため酸素法の最終沈殿池の沈殿槽、および空気法システムにおける最終沈殿地の溢流水路〔水位約14~21cm、流速0.80m/sec(水路中央水面より60mm位置)〕も加え3カ所とした¹²⁾。

(2) 供試体の要因

材料、配合要因を表-1、表-2に示す。セメントは普通ポルトランド、骨材は海砂(比重: 2.56、粗粒率: 2.79)および砕石(比重: 2.71、粗粒率: 6.92)を用いた。水セメント比の決定は、実験計画当時の土木学会標準示方書の「水密コンクリート」ならびに「配合」の章における耐久性をもととして、水セメント比を定める場合のAEコンクリートの最大の水セメント比を参考とした。その結果、水セメント比を50、55、60%の3種類、単位

セメント量を300、330kg/m³とした。この時のスランプは8±1cm、空気量は4±0.5%の一定値とした。これら6種類のコンクリートの他に、ライニング仕様、流動化、ポリマーセメントコンクリートのものを作成した。ライニング仕様のベースコンクリートは水セメント比55%、単位セメント量330kg/m³を基本配合としているが、流動化コンクリートについてはスランプ18±1cm、ポリマーセメントコンクリートはポリマーセメント比を10%、水セメント比を51%とした。

ライニング仕様は、樹脂2種類、モルタル1種類とした。使用した樹脂は、ビスフェノールAとエピクロロヒドリンとの縮合化合物に顔料等を配合し、変性脂肪族ポリアミンを硬化剤成分としたエポキシ樹脂、およびエポキシ樹脂に歯性質を混合し、タール変性したタールエポキシ樹脂を用いた。樹脂の厚さは、約400~600μm(1回塗布)および600~1000μm(3回塗布)の2種類とした。モルタルは、水セメント比を34%、砂:セメントを2:1、フロー値183のものを作成し、10mmの厚さで塗布した。これらの厚さは、ライニング塗布前後の供試体質量を測定し、ライニング材の単位体積質量と供試体表面積を用いて平均値として求めた。なお、ライニングのプライマーは、コンクリートに含浸し物性を変化させる可能性があるため、使用を行わなかった。

供試体は、50L可傾式ミキサーを用い、JIS A 1132にしたがって打設した。なお、供試体は水中養生と気中養生をそれぞれ2週間行った後、ライニング処理などを施し浸漬試験に供した。

(3) 実験項目

供試体寸法は、供試体据付けの利便性から、突水の変化、流失の危険性などが考えられる溢流水路に浸漬するものを5×10×40cmとし、沈殿槽のものを10×10×40cmとした。沈殿槽の供試体は網かごに入れて浸漬したが、溢流水路に浸漬する供試体は水流によって流失する可能性があるため、供試体に取付けた金具によって水路方向に張ったステンレスチェーンに固定した。測定は、各浸漬場所より引上げた供試体を洗浄し、その後に行った。なお、試験には一要因につき3本の供試体を作成した。

浸漬場所において、外観観察(表面荒れ、ライニングの膨れ・剥がれ、ひび割れ)、質量測定、たわみ振動の共鳴振動数測定(JIS A 1127)を行った。そのうち、各要因につき1供試体(樹脂の膨れ・剥がれの著しいものは複数体)については、曲げ試験(JIS A 1106)、断面観察(断面の変色による状況、フェノールフタレイン法による中性化試験)、吸水率測定、細孔径分布測定(水銀圧入法)、電子プローブ微小部分析、粉末X線回折分析、蛍光X線分析の各項目を適宜行った。なお、本研究の構成と流れを図-3に示す。

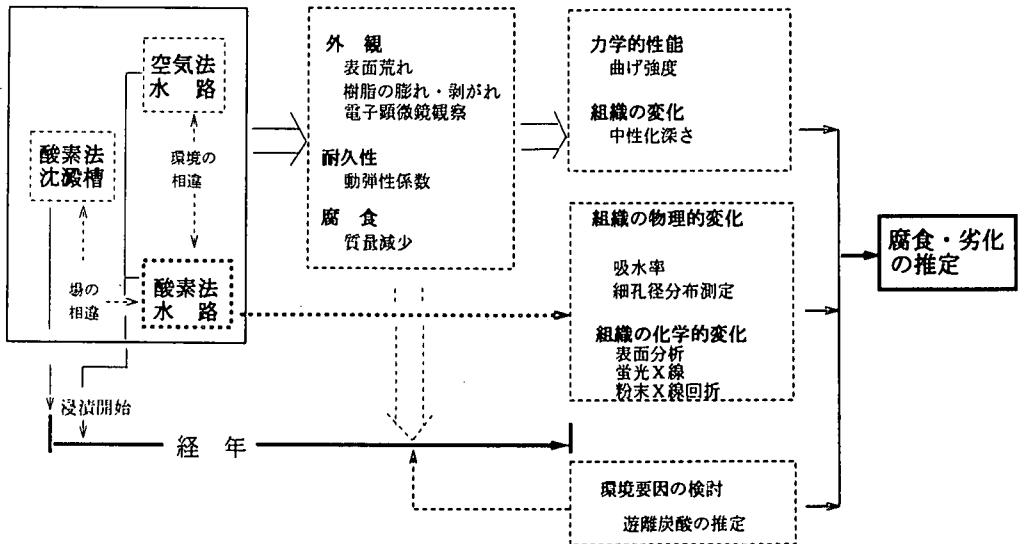


図-3 本研究の概要

4. 結果および考察

(1) 供試体の経年変化

a) 外観

ライニング処理を行っていない全ての供試体（以下、非ライニングと呼ぶ）においては、浸漬初期（3ヶ月）から変色（酸素法）あるいは水路に浸漬した水セメント比60%のものでは角落などの変化が認められた。このような侵食は長期にわたって徐々に進行し、10年以上経過した供試体の表面は、写真-1に見られるように粗骨材の露出した表面荒れの激しい状態であった。水セメント比が50%のものは表面の粗骨材間にモルタルが残っているものもあるが、55%あるいは60%のものでは表面のモルタルがほとんど流出し、粗骨材のみとなった。また、粗骨材が剥がれ落ちるものが多く、剥がれ落ちる粗骨材は水セメント比が55、60%のものに多い。したがって、水セメント比が大きくなると浸漬溶液の侵食を受けやすく、表面からのモルタル流出が多くなり、粗骨材とモルタルとの界面も侵食を受けていると判断された。

ライニング処理された供試体において、樹脂塗装されたものは浸漬初期（3ヶ月）では非ライニングに見られたような変色などの変化は認められなかったが、塗装に膨れが生じるものがあった。長期においてかなりの膨れ、剥がれが認められ、特にタールエポキシ樹脂は、剥がれが生じてコンクリートの表面荒れに至るもののがほとんどであった。エポキシ樹脂は、1回塗布（400-600μm）のものにほぼ全面にわたる膨れと部分的な樹脂のわれと剥がれが、また一部ではあるが3回塗布にも膨れが生じていた。モルタルの場合は、長期の浸漬によって角落と細骨

材の露出などが生じているが、低い水セメント比であることと塗布厚さが10mmと厚膜であるため、コンクリートの露出までには至っていない。

非ライニングの中で、流動化コンクリートやポリマーセメントコンクリート（以下、特殊と呼ぶ）は、他の非ライニングコンクリート（以下、基本と呼ぶ）と同程度の表面荒れが見られ、このような浸漬条件における基本コンクリートに対する特殊コンクリートの優位性は外観上認められなかった。

環境の違いによる影響は、空気法より酸素法浸漬供試体の表面に侵食の影響が大きく認められ、同じ酸素法でも沈殿槽浸漬供試体より水路浸漬のものに表面荒れが大きく、環境と設置場所により侵食の大きさも異なっている。したがって、酸素法水路が外観観察上最も侵食の激しい場所と考えられ、浸漬液の質の違いと水路の水流の機械的な作用が長年の間に影響したものと考えられる。また、いずれの環境においてもエポキシ1回塗布、タールエポキシ1回および3回塗布に比較して、エポキシ3回塗布とモルタル塗布の外観上の損傷は少なく、これらライニング仕様の耐食性上の優位性が認められた。

b) 樹脂の腐食

各環境に浸漬した樹脂ライニング供試体から樹脂をはがし、その断面、表面、裏面について電子顕微鏡観察を行った。写真-2は、それらの中から代表的なもの、酸素法水路に約13年間浸漬したエポキシ、タールエポキシ樹脂3回塗布のものについての観察結果である。

低倍像では、約100μmの気泡がエポキシに多く存在し、タールエポキシにはあまり存在していないことが認められる。しかし高倍像では、エポキシの組織が殆ど一様で

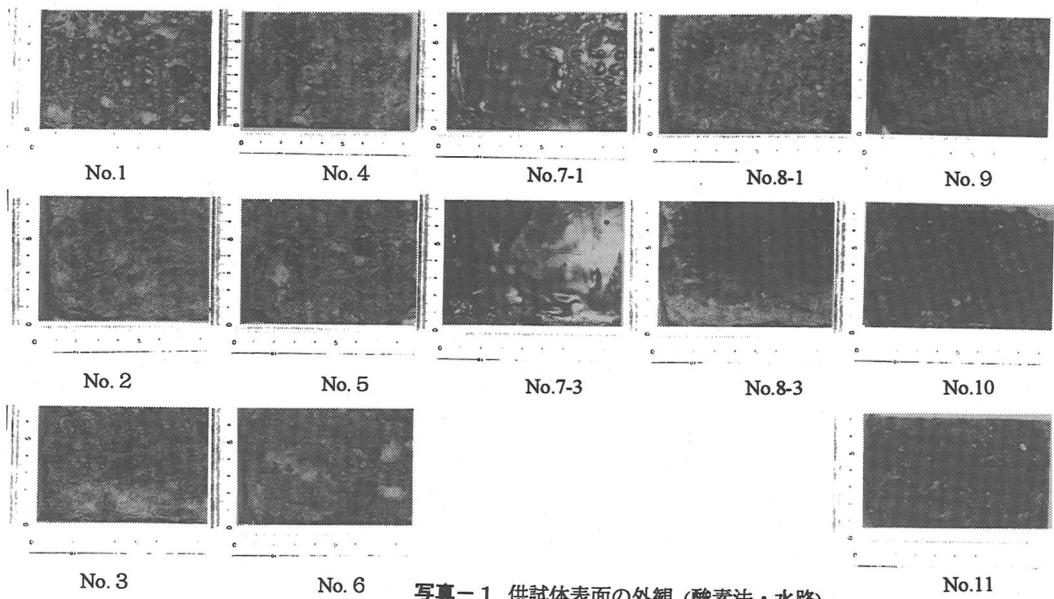
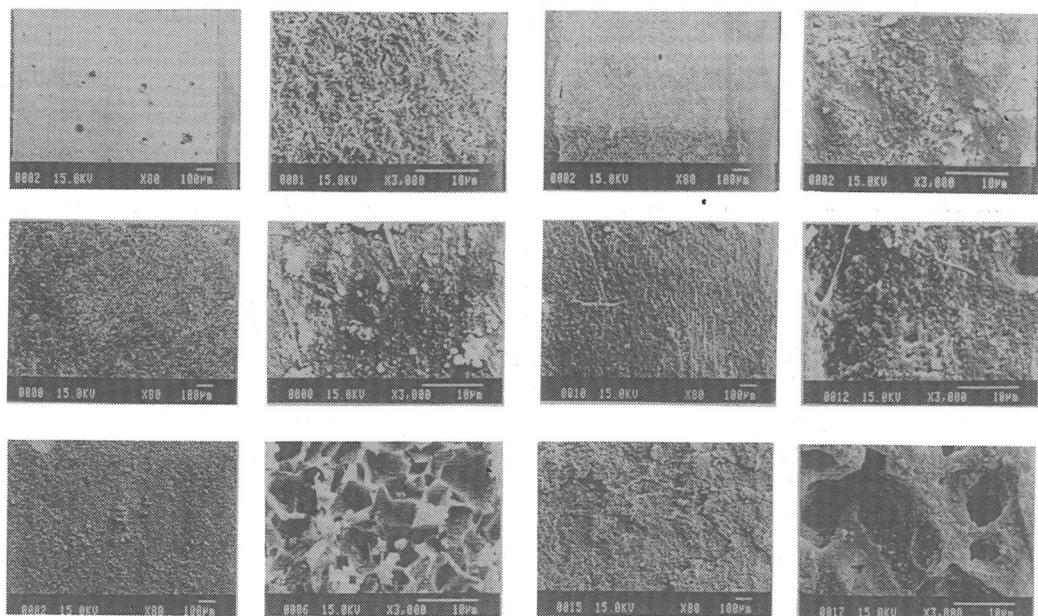


写真-1 供試体表面の外観(酸素法・水路)

No.11



エポキシ(左:低倍像、右:高倍像)

タールエポキシ(左:低倍像、右:高倍像)

写真-2 樹脂の電子顕微鏡観察(酸素法・水路浸漬、上段より断面、表面、裏面の順)

あるのに対し、タールエポキシでは写真に見られるような一様でない部分が隨所に認められた。

表面部分は、両樹脂とも処理水中の浮遊物などが付着したものが多く見られた。高倍像での表面性状は断面観察と同様にエポキシに欠陥部分が殆どないのに対し、タールエポキシでは $1\sim10\mu\text{m}$ 程度のピンホールが全面にわたって確認され、著しい差が認められる。

裏面は、エポキシの場合、コンクリート中のセメント

水和物の痕跡が明瞭に残っており、コンクリートと良好に付着していた状態が認められた。しかし、膨れ・はがれが隨所に認められたタールエポキシは、侵食液によってセメントの水和物あるいは樹脂そのものが溶解した痕跡が確認された。

これらは、コンクリートの物性に大きく影響する可能性を示すもので、特徴ある結果と考えられる。

c) 非破壊試験

相対動弾性係数の経年変化を図-4に示す。酸素法における沈殿槽の場合、浸漬経過1年までの相対動弾性係数は浸漬以前に比較して全て大きな値を示したが、酸素法溢流水路に浸漬されたものは、一部の樹脂ライニング供試体と非ライニングに減少が見られた。空気法の溢流水路に浸漬されたものは、ポリマーコンクリートを除いた非ライニングのほとんどで3ヶ月をピークに100%以上を示したが、これとは逆に樹脂ライニング供試体の中には100%以下の減少傾向にあるものが見られた。このように3環境における特徴が異なるのは、処理水の水質の相違、溢流水路の機械的な働き、浸漬コンクリート中のセメント水和の経時的な相違が原因として挙げられる。例えば、酸素法・沈殿槽と空気法溢流水路を比較すると、酸素法の処理水は空気法に比較してコンクリートに悪影響を与える割合が大きいと思われるが、酸素法の沈殿槽は空気法溢流水路のように機械的な働きでコンクリートを侵食することはほとんどない。また、空気法溢流水路に浸漬した場合の特性は、浸漬による水分の供給環境にあるもの（非ライニング供試体）と、塗装前の乾燥と塗装による水分の抑制環境にあるもの（樹脂ライニング供試体）との違いからくる水和の進行程度の相違が影響したためとも考えられる。したがって、浸漬期間が1年程度の供試体は、水和の進行による物性の向上と処理水による化学的作用あるいは水路の水流による物理的作用の影響が相殺する複雑な過程にあるものと考えられる。

1年以降において、酸素法・水路の基本コンクリートで、3年までに5%前後の減少が認められるものの、他のものはタールエポキシを除き殆どが100%以上を示した。また、単位セメント量およびW/Cの違いによる影響が認められるものもあった。経年的には、各環境における基本、特殊コンクリートの減少割合は比較的大きく、これに対し樹脂ライニング供試体は殆ど減少が認められなかった。

暴露期間のうち最終的には、空気法の基本、特殊コンクリートで減少が約10~30%に達するもの、ライニング仕様で10%程度減少するものもあるが、長期の暴露においても顕著な減少がみられない。酸素法に暴露したものは、表面荒れによって測定値が収束せず測定不能が多いため、沈殿槽と水路の比較が難しいが、沈殿槽のライニング仕様ではモルタルの約5%減少を除きほぼ減少0%に対し、水路では5~20%の減少が認められた。また、ライニング仕様でないものは、沈殿槽で約20(特殊)~25%(基本)、水路で約35%(特殊)および約25~40%(基本)と酸素法水路の影響は最も顕著であった。

全般的に、ライニング仕様と比較して、基本、特殊コンクリートの相対動弾性係数の減少は顕著である。各環境を比較すると、空気法の減少は酸素法沈殿槽と同程度

か若干大きく、酸素法水路の減少が最大であった。経年変化を全体的にみると、基本・特殊コンクリートは1年目以降から減少するのに対し、ライニング仕様のものは10年もしくはそれ以上暴露環境下にあってもほとんど減少しておらず、その性能を維持していると考えられる。

d) 質量変化

質量の経年変化を図-5に示す。浸漬3ヶ月では、角落などの変化があるにもかかわらず浸漬前に比較して質量は増加する傾向にあるが、これは浸漬前の質量を乾燥質量としたため、供試体の吸水による影響と考えられる。浸漬直後から浸漬液による侵食、水流による機械的侵食などに影響を受けると考えられるが、主として吸水と水和による現象が侵食の影響を上回ったため、質量損失が1年まで少ないような結果を示している。特に、空気法と酸素法・沈殿槽のものは、1年経過までいずれも質量減少が見られない。一方、酸素法・水路では、1年経過後にライニング仕様のものを除き全てに減少が見られ、他の2環境に比べて厳しい環境であることが1年の結果においても推測可能であった。

経年的な変化は、空気法の非ライニングのものが3年まで3%程度減少し、それ以降約3~7%の減少があった。単位セメント量の増加は若干ではあるが質量減少に対する抵抗性を示し、水セメント比50%のものは55, 60%の質量減少より少なく、非ライニングコンクリートにおいて、低水セメント比・高単位セメント量は耐食性上不可欠なものであることを示す結果となった。樹脂ライニングの供試体はほとんど質量減少が見られないが、モルタル塗布のもので約2~3%減少した。特殊コンクリートは基本コンクリートの減少範囲内にあり、同程度の減少であった。

暴露期間における最終的な減少は、概ね以下のようになった。空気法の非ライニング供試体は6~10%, ライニング系は0~2%(樹脂), 4%(モルタル)、また、酸素法沈殿槽の非ライニングは6~8%, ライニングは0(樹脂)~3.5%(モルタル)、さらに、酸素法・水路の非ライニングは9~16%, ライニングは0~5%(樹脂), 8%(モルタル)の各値であった。酸素法・水路の供試体は酸素法・沈殿槽のものに比べて比表面積が1.4倍程度大きいが、これを考慮しても酸素法・水路の非ライニング仕様の減少は最も大きい。単位セメント量では顕著な相違はないが、水セメント比の影響は経年的傾向と同様であり、耐久性上低水セメント比・高単位セメント量の必要性を示す結果となった。酸素法・水路において、非ライニングで15%以上の質量減少したものがあったこと、あるいはライニング仕様の減少が空気法や酸素法・沈殿槽の非ライニング仕様のものに近いことから、外観観察の結果と同様に、酸素法・水路は3環境のうち最も厳しい環境と考えられる。

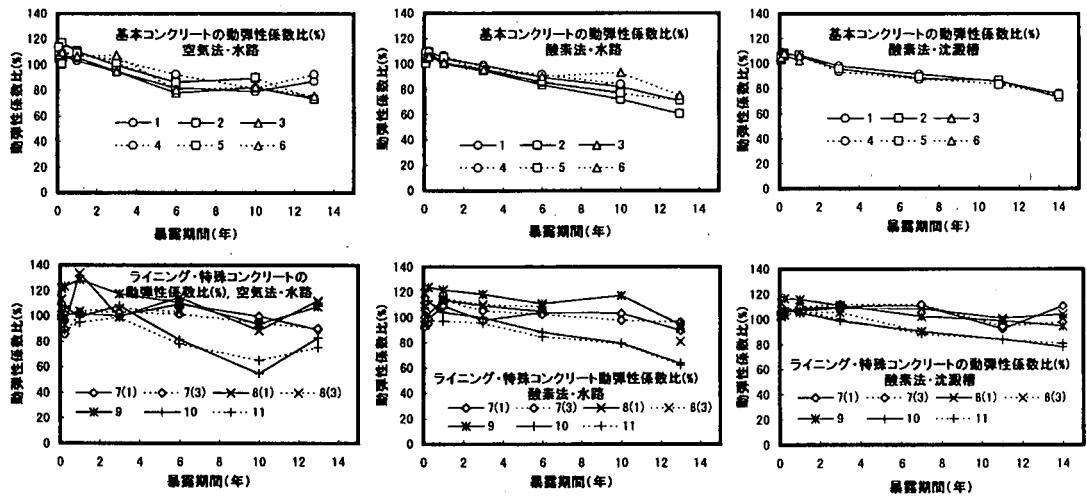


図-4 各システムにおける相対動弾性係数の経年変化

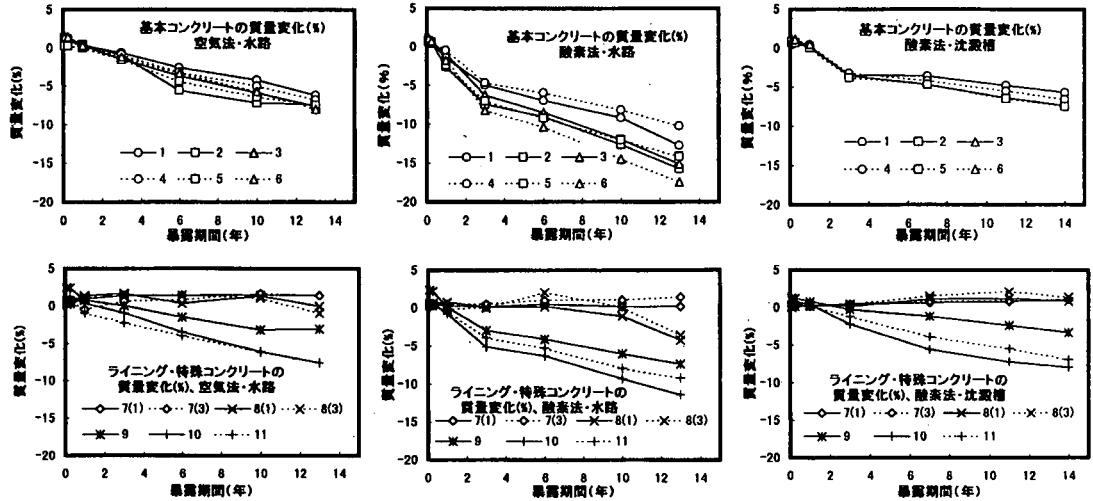


図-5 各システムにおける質量の経年変化

(2) 物理・化学的性質

a) 曲げ強度

曲げ強度試験は、JIS A 1106に準じて行った。水路浸漬供試体の曲げ断面は、幅10cm、高さ5cmとし、スパン30cmの3等分点載荷とした。なお、暴露供試体のうち、樹脂ライニング仕様でない基本、特殊およびモルタルライニングのものについては、同一要因の3本のうち、1-

供試体を測定に供した。また、空気法および酸素法水路におけるライニング仕様のものは、膨れ・剥がれの顕著なエポキシ1回塗布、タールエポキシの1・3回塗布の全て、沈澱槽におけるライニング仕様のものはモルタルを除いた全てについてそれぞれ3供試体を測定に供した。

なお、曲げ試験の載荷方向は、供試体作成時における打設方向とした。また、供試体表面の侵食は激しく強度

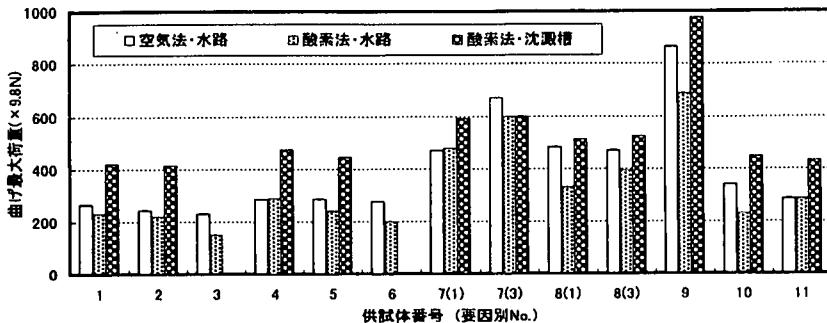


図-6 供試体の曲げ最大荷重

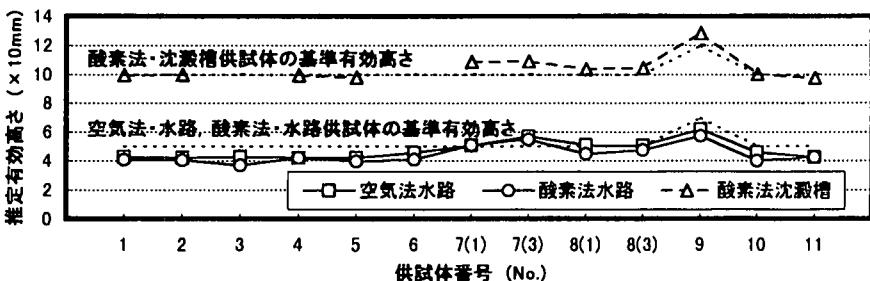


図-7 曲げ最大荷重から推定した有効断面高さ

で比較する際の正確な断面形状を得にくいと考えられたため、結果は最大荷重で比較することとした。

これらの結果は図-6に示したが、酸素法・沈殿槽の供試体の断面高さが他の2環境のものに対して2倍で最大荷重に積算すると4倍の値となるため、図中では1/4の値で示した。測定値のはほとんどは1供試体についてであり、ばらつきの影響が大きいと考えられるものの、全体として酸素法・水路における供試体は空気法より曲げ最大荷重の低下が大きく、空気法、酸素法・水路における環境の影響が測定値に現れていると考えられる。各環境における供試体の単位セメント量、水セメント比、ライニングの影響についても認められる。したがって、高単位セメント量、低水セメント比ほど最大荷重が大きく、ライニングの使用によってさらに耐久性向上の効果が期待できることを示すものである。全ての供試体は曲げスパンで破壊し、曲げ最大荷重は供試体の配合要因およびシステム環境の違いによって差が認められた。そこで暴露開始当時の圧縮試験結果から曲げ強度を求め、曲げ強度の算定式 $f_b = PL/bd^2$ でその有効断面を推定した。ここで、P:暴露供試体の最大荷重、L:スパン、b:破壊断面の幅、d:破壊断面の高さであるが、酸素法・沈殿槽に暴露した供試体は $d \approx b$ の関係が、また、酸素法・水路および空気法においては、 $d \approx b/2$ の関係があるものとした。全てのものは、供試体作成時における28日圧縮強度の1/7の値を用

いた。このような仮定の下に d を推定すると図-7に示される関係となり、エポキシ樹脂塗装供試体に比較して、非ライニングの有効断面減少が認められた。また、環境の相違において、酸素法の有効断面は空気法より減少していることが認められる。ここで、浸漬前の大きさ以上に見積もられた樹脂ライニングの有効断面を基準値と同一であると考えるならば、各供試体の有効断面の比は図-8に示す値となる。しかし、推定有効断面を算定した基準となるコンクリートの曲げ強度を材令28日の圧縮強度によって求めたため、推定有効断面は過大に算定された可能性がある。また、図-7で基準値より大きな値を示すライニング仕様供試体の d は、その特性が反映した可能性を考えられるが、厳密にはこの影響についても考慮する必要がある。

b) 中性化

曲げ破壊試験を行った供試体の断面に1%フェノールフタレン溶液を噴霧し、非変色部分の深さを観察した。フェノールフタレン溶液を噴霧する前の断面は、外側から内部にかけて色の違いにより3領域に分かれており、周辺の約数mm～10mm程度が薄い褐色、その内側の約1mmが白に変色し、さらに内側は灰色となっている。フェノールフタレンを噴霧すると、赤く変色する部分は最も内側の灰色の領域で、非変色部分はほぼ薄褐色と白の領域であった。したがって、薄褐色と白の領域が中性化領

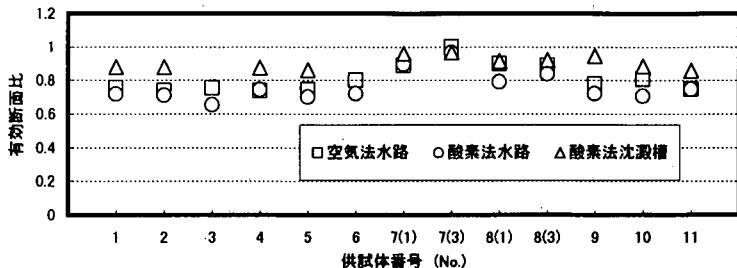


図-8 樹脂ライニング供試体の推定有効断面を基準値とした場合の各供試体の推定有効断面比

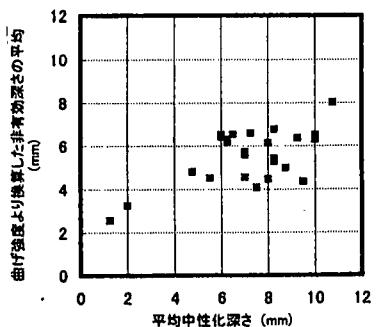


図-10 中性化深さと推定有効高さを除いた非有効深さとの関係

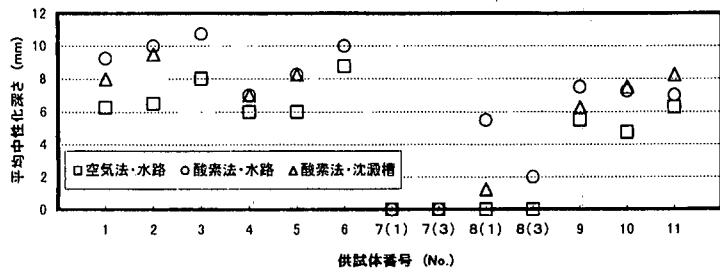


図-9 供試体断面の平均中性化深さ

域で、その内側が非中性化領域と考えられる。健全部と考えられる内部の灰色の領域に対して、外側の薄褐色の部分は外部からの侵食液による化学的な影響を受けたものと考えられる。なお、この外側と内部との間にある白色領域は、浸漬液の直接的な化学作用によるものか、外側と内部との化学的な平衡を保つために二次的に生じたものかは判断が困難である。中性化深さは断面欠損がない場合には相対比較が可能であるが、各供試体によって断面の侵食程度が異なっており、既存断面における中性化深さの相対比較は行い難い。そこで、侵食・流失した部分も中性化→分解→流出の過程を経ていると考え、浸漬前の面から中性化した部分の深さを検討した。図-9に示されるように、基本、特殊コンクリートとも約4mmから10mm程度の中性化を示し、ライニングのものでは殆ど中性化の進行が認められなかった。また、コンクリートの種類、環境の違いによって相違が認められた。

腐食前の断面（基準断面）の高さから図-7における推定有効断面を除いた長さの1/2を非有効深さとし、その値と中性化深さとを比較すると、図-10のように中性化深さは非有効深さより大きい値を示しているものが多い。この結果は、中性化領域の一部が有効断面として力学的性能に寄与しているように受けとれる。しかし、上述したように、樹脂ライニングの有効断面を基準として考えるならば、非ライニングの各供試体の有効断面は減少し、非有効深さは中性化深さと近似する。

c) 吸水性と細孔径分布

曲げ破壊を行った供試体において、供試体要因間の比較を行う目的で、最も腐食が激しいと考えられる酸素法水路のもの全て、環境要因間の比較のため酸素法沈殿槽と空気法の水セメント比55%，単位セメント量330kg/m³のものをそれぞれ用いた。切断形状は、図-11に示すように端面からの影響を避けるため、供試体の長軸方向に約100mm、短軸方向に50mmとし、表面から深さ方向へ約10mm毎に切断した。さらに試料板は、細孔径、化学分析、吸水用のそれぞれに分割した。なお、切断された全ての試料は、真空乾燥容器中で乾燥し直ちに測定を行った。

試料の吸水性は硬化体の物性と吸水時間に依存するが、ここでは、試料厚さが薄いため、深さ方向に浸透する場合の時間依存性および試料内部での水分分布はないものとした。図-12は、吸水率と時間の関係を示したものである。なお、吸水率の経時変化は、1日吸水の値を基準値(最終値)として比較した。吸水性と時間の関係は、初期の値が最終的な値に対して大きな割合を占めており、特に、表面部においてこの傾向は明確である。ほとんどの試料において、表面部の10分後の吸水率は基準値の約7/10～8/10となっている。一方、表面部の樹脂ライニング（タール1回塗りを除く）および内部の試料では10分後が基準値の約3/10～5/10であった。したがって、非ライニングの表面部の物性は、内部と比較して異なっているものと考えられる。

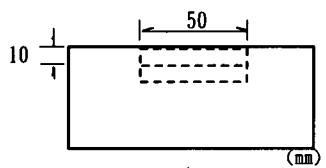


図-11 供試体の切断（断面）

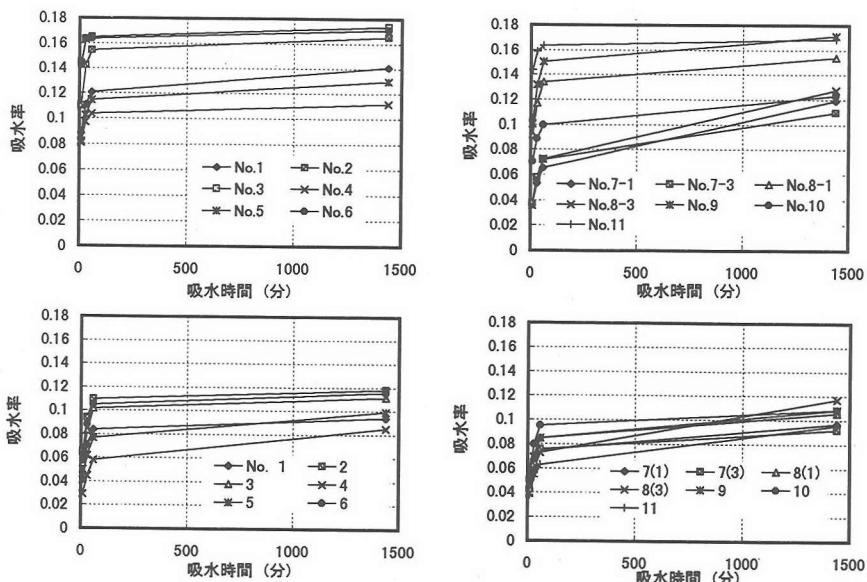


図-12 吸水率の経時変化(上:表面部, 下:内部)

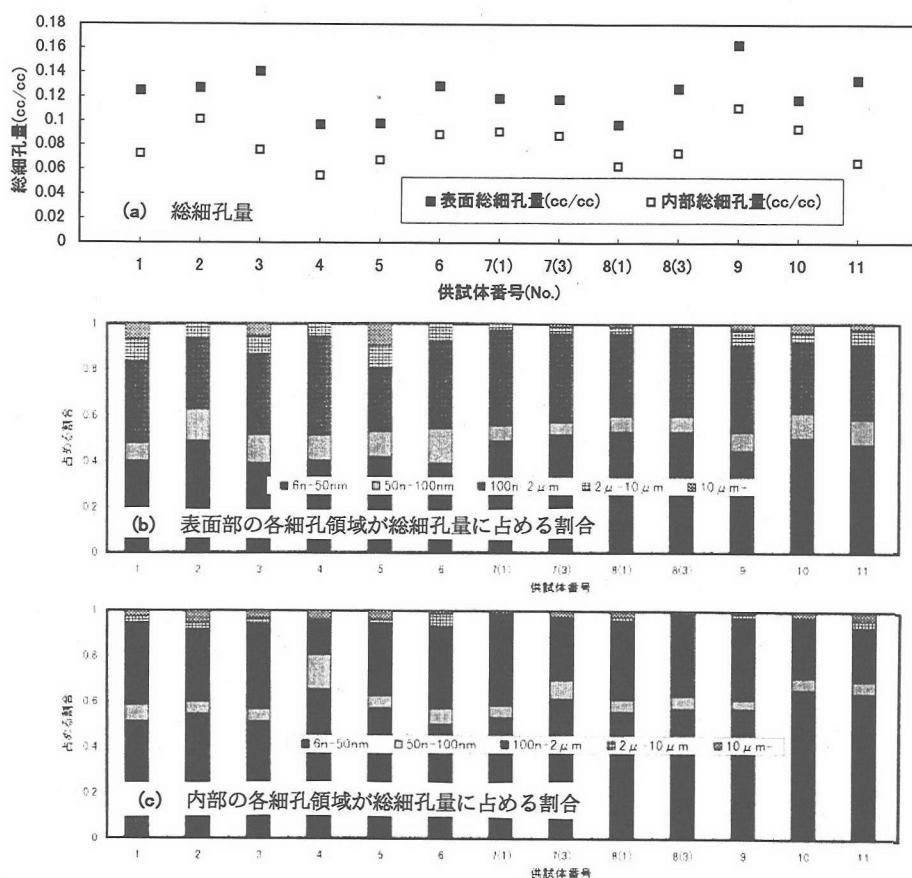
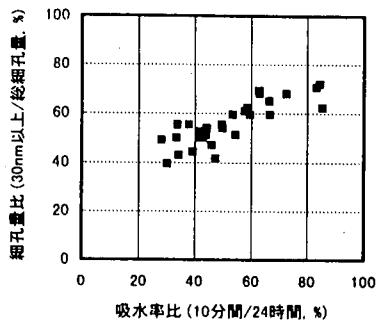
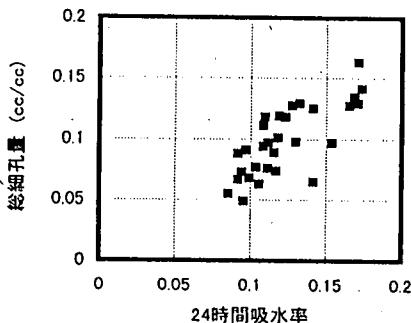


図-13 総細孔量と細孔領域が総細孔量に占める割合



(a) 吸水率比と細孔量比



(b) 24時間吸水率と総細孔量

図-14 吸水率と細孔量の関係

コンクリートは、ある一定の細孔のみで形成されたものと異なり、幅広い細孔領域を有している。コンクリートと接した水は、ごく表面においてはほぼ全ての細孔領域で飽和となるが、内部への浸透は大きな細孔に行き渡った後、その周辺のより細かい細孔へと進むと考えられる。このような点から、表面部における細孔は侵食液の影響により、大きな細孔が増大したものと考えられる。したがって、内部に見られるような本来の細孔構造が、表面部では侵食液によって吸水性に富んだ大きな細孔を形成し、その形成割合は水セメント比、単位セメント量によって影響を受ける。

細孔径分布測定は、6nmから200μmまでの領域を水銀圧入法で行った。図-13の(a)に表面部および内部の総細孔量を、また細孔の各領域が総細孔量に占める割合を図-13(b) (表面部) および(c) (内部) に示した。表面部と内部の総細孔量を比較すると、表面部の総細孔量が大きく、樹脂ライニングを除いたもので両者の差が大きいものが見られる。総細孔量を各配合要因で比較すると、単位セメント量、水セメント比の違いにおいて差が認められた。表面部の試料で、モルタルライニングの総細孔量は他より大きな値を示している。これは、表面部に存在するモルタル部分において、単位あたりの表面積の大きい細骨材粒子が多く、侵食液の影響を受ける界面の割合もコンクリート部分より大きいために生じたものと考えられる¹³⁾。なお、樹脂の表面部と内部の総細孔量に差が認められるのは、樹脂塗装前の乾燥養生が影響したためと考えられる。

各細孔領域の占める割合を比較すると、一般的のコンクリートにおいてその存在がほとんどないとされている2μ～10μmの細孔が表面部において認められる。内部においては、この領域の細孔はわずかに認められるだけで、表面部の腐食の影響が現れたものと考えられる。比較的小さな細孔領域を20nm～30nm以下とし、それ以上を大きな細孔とすると、図-14(a)のように、10分間吸水率が24時間吸水率に占める割合と、30nm以上の細孔量が全細

孔量に占める割合との間には相関性があり、24時間吸水率と総細孔量の間にも相関性が認められた(図-14(b))。試料の初期の吸水は骨材界面を含めた毛細管空隙が大きく影響しているものと考えられる。また、最終の吸水率は総細孔量を上回ったものが多くなっているが、この差は内部の試料ほど大きい。これは6nm以下の主としてゲル空隙が影響したもので、侵食液の影響を受けなかったゲル空隙が内部試料ほど大きいことを示すものである。

d) 表面分析 (EPMA)

供試体の軸方向に垂直な断面に関して元素分析を行った。なお、主要な測定条件は加速電圧：15kV、吸収電流： 2.5×10^{-7} A、プローブ径：10～200μmの各値で行った。また、腐食を受けた部分付近での点分析も併せて行った。図-15は、水路に浸漬した供試体について行った結果の一例を示したものである。図は、曲げ破断面中央の曲げ有効高さ部分を幅約20mmについて(写真-3)、プローブ径200μmで行ったものを示したものである。(図-15(a))

腐食を受けた部分での点分析結果((b))によれば、イオウも検出されているが、検出された元素のランクの高いものは炭素、カルシウム、ケイ素、などの元素であった。また、線分析において、炭素は主に腐食表面部に集中し深さ方向に減衰している場合が多く、カルシウムは表面部で少なく内部に多く存在している結果となった。このような結果は、腐食因子と考えられる炭素、あるいはセメントの主要成分であるカルシウムなどの元素が深さ方向に濃度勾配を生じていることを示すものである。特にカルシウムなどの濃度勾配は、面分析においても分布状態が明確に確認された。先に述べたカルシウムなどの濃度勾配は基本、特殊コンクリートに見られるもので、樹脂ライニング仕様のものは、カルシウムなどの濃度勾配が殆ど認められなかった。このことは、樹脂ライニングが外部からの侵食要因物質の遮断あるいは侵入の抑制を行っているものと考えられる。したがって、表面分析によれば、イオウの要因も考えられるものの、腐食因子は炭素に起因する侵食性炭酸の可能性が大きい。

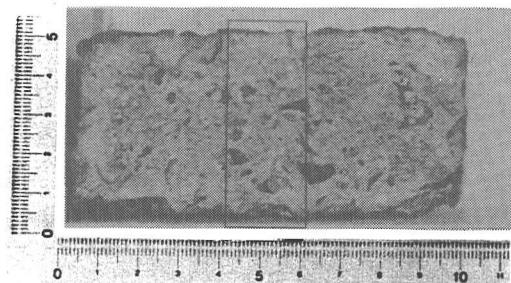
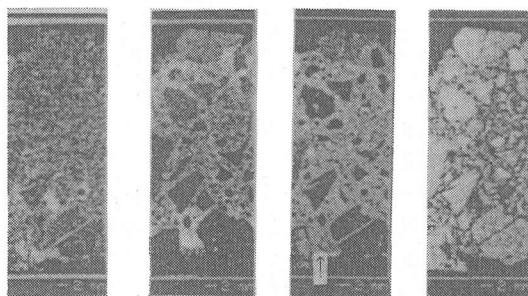
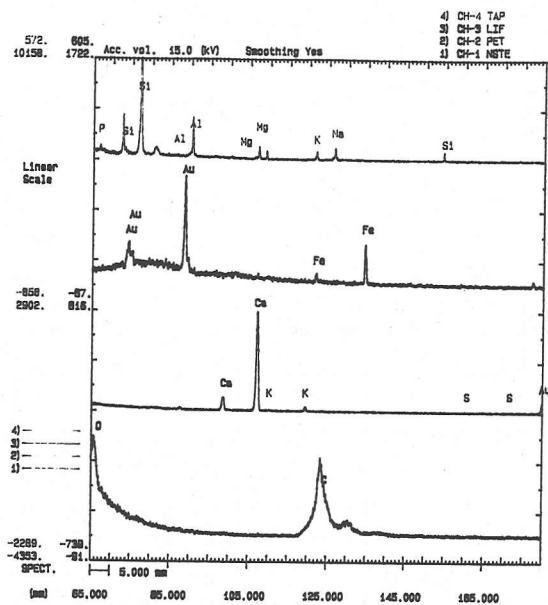


写真-3 面分析の測定範囲



(a) 面分析(左よりC, S, Ca, Siの順)



(b) 点分析(分析位置は、(a)のCa結果の矢印先端部分)

図-15 表面分析結果例 (酸素法・水路浸漬供試体 No.5)

e) 蛍光X線分析、粉末X線回折

蛍光、粉末X線回折は、c)に示した各試料において、表面の軟化した部分、表面部、内部の3点に関して行った。試料の調整にあたっては、粉碎過程で粗骨材および細骨材をふるいにより取り除いた。なお、蛍光X線分析の測定条件は、対陰極：Rh、印加電圧－電流：50kV－50mA、分光結晶：RX-60、TAP、GE、LiF、Detector：PC、SCとし、コンプトン散乱効果による測定誤差を少なくするため、一定質量の粉末試料を1mm以下の薄厚ディスクに成形した。粉末X線回折は、ターゲット：Cu-K α 、印加電圧－電流：40kV－80mA、スリット系：1° -1° -0.15mmとした。なお、測定に際しては、NBS(National Bureau of Standards)、Standard Reference Material、Portland Cementを標準試料として数種類使用した。

蛍光X線分析は、セメントの主成分の元素および炭素について行った。しかし、コンクリートに侵入した炭素はセメントの主成分に比べて軽元素で、軟化部、表面部分でも10カウント以下と他の元素に比較して良好な精度を得ることが困難であると判断された。また、測定試料には細骨材の混入を極力避けているが、使用細骨材の主成分の元素がセメントの主成分に比較して大きなものも省くこととした。したがって、ここではセメントに、含

まれる元素のうち、主としてカルシウム、マグネシウムについて追跡を行った。図-16は、各試料の軟化部、表面部、内部についてのカルシウム、マグネシウムのカウント比を示したものである。内部におけるカルシウムのカウント比はばらつきはあるものの、ほぼ0.8から1.0の間である。同様に軟化部における値は内部に比較してかなり低いが、配合要因に関係なく0.2に近い値を示している。これに比較して、表面部においてはライニングがほぼ1.0の値を示しているが、基本、特殊コンクリートにおいてはこれより低い値であり、軟化部、内部とは異なった特徴を示している。このことは、内部におけるセメントのカルシウム系水和物に比較して表面におけるものが少なくなったことを示すもので、分解しイオン化したカルシウムは軟化部においてあまり存在せず、試料外部に溶出したものと考えられ、表面分析によりカルシウムの濃度勾配が認められた結果と一致する。一方、マグネシウムは、各試料の内部に比較して表面部、軟化部で相対濃度が大きい。カルシウムとマグネシウムの間で存在程度が異なっているのは、腐食前のカルシウム濃度がマグネシウムに比べて大きいこと、溶解度積がカルシウム塩のものより小さい物質をマグネシウムが形成しているため溶出せず残存したことなどの理由が考えられる。

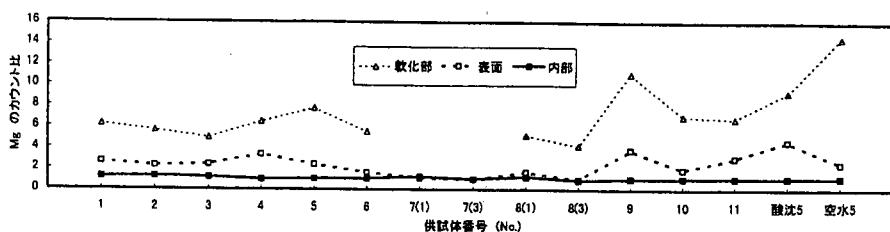
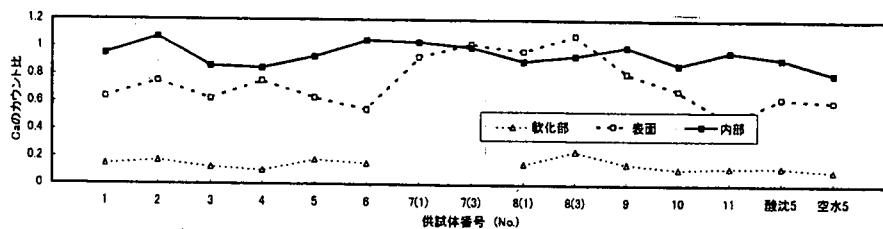


図-16 蛍光X線分析結果 (上:Ca, 下:Mg)

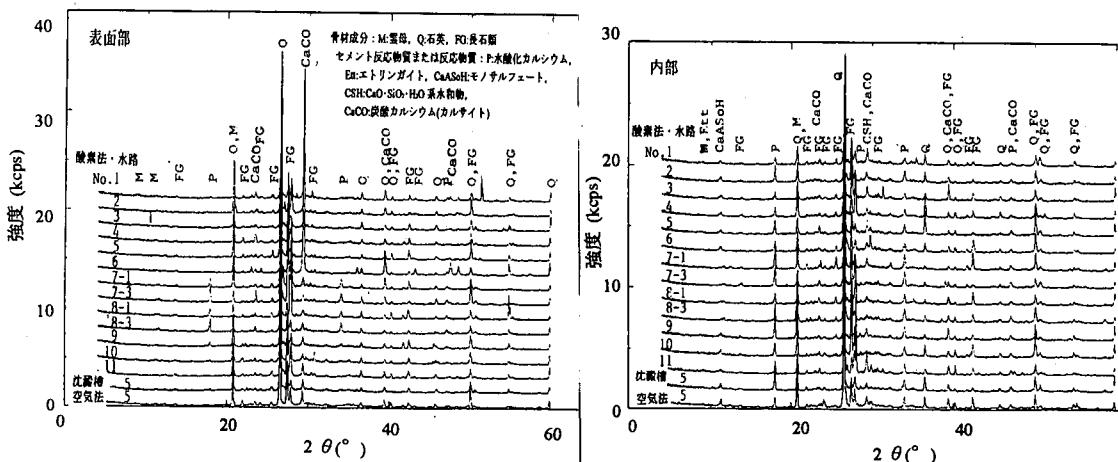


図-17 粉末X線回折結果

下水処理水に存在する腐食因子としては、硫酸、硝酸、炭酸などがあげられる。水和生成物と酸が接すると、酸の種類によって反応の激しさは異なるが、水和生成物では水酸化カルシウム、エトリンガイト、ケイ酸カルシウム水和物などが酸と反応し分解する。軟化した部分および表面部では、ライニング仕様の一部のものでわずかに水酸化カルシウムの存在が認められたが、他は認められなかった。一方、内部では水酸化カルシウムが明瞭に存在し、腐食を受けた表面部に比較してコンクリート内部では健全な状態であると考えられる。また、表面分析で試料表面部にイオウの存在が認められたが、粉末X線回折では軟化部、表面部における石膏の存在は認められず。

硫酸^[4]による腐食はほとんどないものと考えられる。同様な劣化事例において検討された報告^[5]も参考に、物質の同定を行った。その結果、先に述べた水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの主ピーク、および骨材に含まれる石英、長石群のピークなどが確認された。一方、マグネシウム塩に関しても行ったが、検索評価値は上記物質に比較して低い結果となった。しかし、存在を否定する値ではなく、想定した以外の塩で存在する可能性も残されている。結果を図-17に示す。なお、物質名は、JCPDS (JOINT COMMITTEE ON POWDER DIFFRACTION STANDARDS) を参考に得られた全試料の検索結果を示しているため、試料によって記述された物質が存在しない場合もある。

5. 腐食・劣化メカニズムの推定と予測

(1) 腐食・劣化メカニズム

本報告のこれまでの考察により、供試体外部から侵入した腐食要因は、主として侵食性の炭素によるものと考えられ、この侵食性の炭素は下水の処理水中において遊離炭酸の形態で存在している。コンクリート中に存在するカルシウムイオンは、遊離している炭酸のうち、侵食性遊離炭酸によって結合、消費される。この炭酸とセメント化合物あるいは水和生成物との反応に関する定量的な解析は、下水処理水の経時的な水質変動、水流などによって影響を受けるため難しいが、一般的な侵食性遊離炭酸の侵食メカニズムは次のように考えられる。

下水処理水の浸透は短期間で完了するが、コンクリート内部への侵食性遊離炭酸の浸透と、結果として生ずる腐食の程度は、コンクリートの種類によって異なるものと考えられる。処理水中の侵食性遊離炭酸は、表面でカルシウムイオンと結合するもの、骨材界面を介して浸入するものがあるが、浸入過程において界面に析出した水和生成物、主として水酸化カルシウムと反応し、炭酸カルシウムを生成する。さらに、界面以外の毛細管部分にも浸入し、水和生成物や未水和のセメント化合物と反応する。このような過程を経て中性化が生じ、水流の影響などによって最終的に腐食が起る。こうした腐食程度が、水セメント比あるいは単位セメント量によって異なったのは、処理水の浸透による反応速度が細孔量と反応面積によって影響を受けるためで、界面量を含めた細孔構造に支配される。たとえば、総細孔量が同一であっても、構成される細孔径によって細孔壁が形成する面積に違いが生じ、相対的に微小細孔の多いものほど総細孔面積は大きくなる。したがって、処理水の濃度が一定であると、W/Cの大きなものより小さい方が反応は活発で、反応は表面より深さ方向に急速に減衰し、また反応の減衰は反応総面積の大きいものほど大きくなるものと考えられる。

下水処理水中的侵食性遊離炭酸が多いと、反応の場では主に炭酸カルシウムが生成され、一時的に細孔が密になるが、さらに侵食性遊離炭酸の攻撃をうけると炭酸カルシウムが分解する。処理水中でイオン化されたカルシウムは、ふたたび侵食性遊離炭酸と結合状態を形成し、カルシウムイオンは溶出・消費される。このような反応過程で、カルシウムがイオン化し、構造が破壊された部分とほぼ健全な部分の境界において、カルシウム塩あるいはマグネシウム塩などのアルカリ塩が境界相として存在することは、(2)b) の断面の変色観察によって推察される。また、侵食の影響を受けたコンクリートの表面付近ではこのような反応が繰り返され、表面から内部にかけてカルシウムイオンの濃度勾配が生じることは、d) の表面分析によっても確認された。このことは、濃度勾配

による表面へのカルシウムの移動が生じ、健全と考えられる部分においても組織の変化は徐々に進行することを示すもので、二次的な内部組織の腐食→侵食→劣化につながる可能性を示すものと考えられる。

(2) 劣化の予測

当システムにおける暴露試験の場合、劣化の進行は主としてコンクリートの腐食速度に支配されている。しかし、部材レベルでの性能の低下は、かぶりコンクリートが腐食し鉄筋の腐食等が生じた場合に起こると考えられる。したがって、腐食因子が指標で示される以上に侵入する場合もあるが、主としてかぶりコンクリートの減少および中性化の進行が最も重要な劣化指標となるものと考えられる。筆者らは既報^{7), 15)}において、侵食性遊離炭酸の存在量が処理水のアルカリ度などを含めた処理状況の変動によって経年に異なることを報告した。先の2.項で述べたように、処理中の遊離炭酸は従属性遊離炭酸と侵食性遊離炭酸で、これらの関係は既往の報告¹⁰⁾の数値などからアルカリ度と従属性遊離炭酸などの間に一定の関係が存在することが認められる。

図-18は、当該施設における過去20年間の水質試験のうち、一般試験項目にあるpHおよびアルカリ度の値を用いて遊離炭酸を算出¹⁷⁾し、経年変化を示したものである。算出にあたっては、各月の値を平均化した年平均値を採用した。さらに、計算から求められた遊離炭酸と侵食性遊離炭酸の関係を図-19に示した。侵食性遊離炭酸と遊離炭酸との間には相関性があり、遊離炭酸の増加は侵食性遊離炭酸の増加の可能性を示している。

図-18における流入下水、沈殿後水、処理水の各システム場における遊離炭酸を比較すると、空気法では各システム間の変動は少ないが、酸素法の場合は、一部を除きほとんど処理中の遊離炭酸の値が著しく大きいことが特徴的である。これは、エアレーションの過程で、細菌活動により有機物質が分解される際に放出される二酸化炭素が酸素法において大きいことを示すものである。また、前半の10年間の平均値は、後半の10年間をやや上回ったものとなっている。一般に、水道施設設計などでは遊離炭酸が20mg/lを超える場合、侵食性遊離炭酸も多い可能性があるのでエアレーション処理、あるいはアルカリ処理が推奨されている¹¹⁾が、計算値の遊離炭酸はいずれもこの値以上である。また、コンクリートに対しては、侵食性遊離炭酸が60mg/l以上になると激しい侵食¹⁸⁾を考えられるが、計算上の侵食性遊離炭酸はいずれもこれを超えてはいない。しかし、この値以下であっても硬度が低い場合、侵食の程度が大きくなる可能性がある。

図-20は、酸素法・水路の処理水における算出遊離炭酸量と基本コンクリートの質量減少の平均値の関係を示したものである。遊離炭酸の値は質量を測定する前年ま

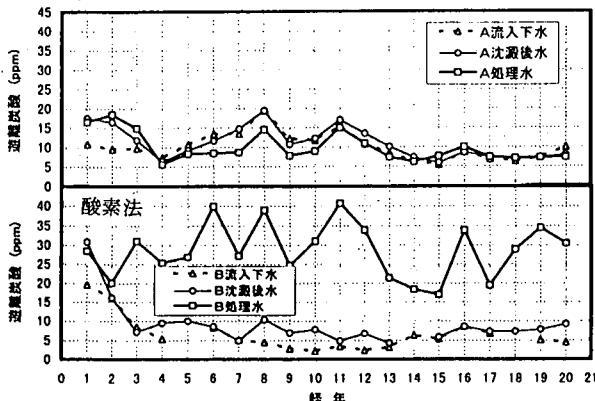


図-18 各システムにおける遊離炭酸の経年変化

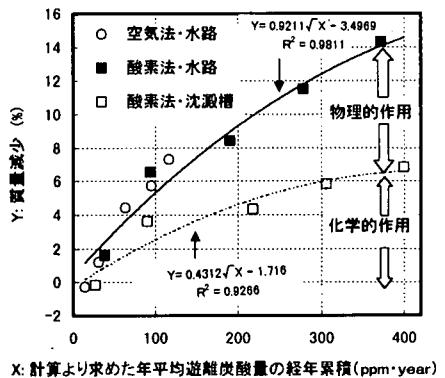


図-20 遊離炭酸の経年累積と質量減少

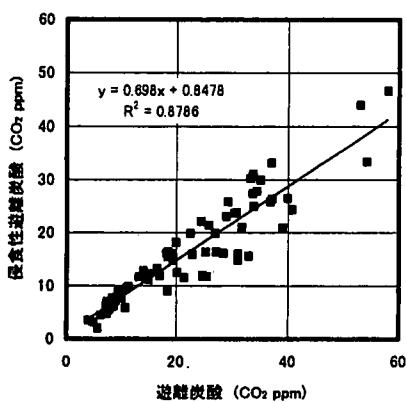


図-19 遊離炭酸と侵食性遊離炭酸の関係

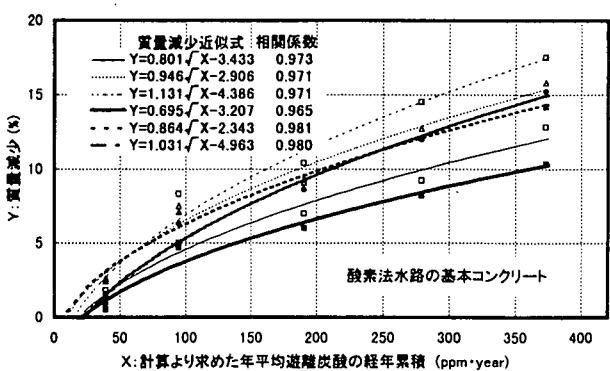


図-21 質量減少の推移と近似式による予測例(酸素法・水路の基本コンクリート)

での累積値を求めて行った。遊離炭酸の累積値に対して質量減少値は良好な相関関係を示し、基本コンクリートの質量減少は遊離炭酸に影響を受けるものと考えられる。ここで、水路環境にある供試体の質量減少は空気、酸素法とも遊離炭酸の経年累積値と同一曲線状にある関係を示しているが、酸素法・沈殿槽の供試体では同じ遊離炭酸環境にある酸素法・水路の回帰曲線とは異なった傾向を示している。このような特性は、処理システム環境の水質のみならず、水流の有無によっても侵食速度が異なることを示しており、化学的な侵食に加えて水路における水流の作用が侵食を助長することを示すものである。

図-21は、酸素法・水路における基本コンクリートの遊離炭酸累積値と質量減少の関係に近似曲線を適用させ、次式のように質量減少が遊離炭酸累積値の平方根によって関係づけられることを表したものである。

$$Y = \alpha' \sqrt{X} + \beta' \quad (1)$$

ここに、Y : 質量減少(%)、X : 遊離炭酸の年平均値

を質量測定の前年まで累積した値(ppm·year)、 α' 、 β' : 回帰曲線より求められた係数式(1)で求められた各近似式は、極めて高い相関性を示した。先に述べたように、劣化の予測に当たっては、かぶり減少の目安として質量減少、およびこれと密接に関連した中性化深さあるいは侵食深さの進行が最も重要な要因となる。そこで、水路における質量減少、中性化深さおよび侵食深さの関係を図-22に示した。一次式で回帰した結果にはばらつきはあるものの、中性化深さ、侵食深さとも質量減少と相関関係が認められた。これらの関係から、中性化深さおよび侵食深さは、式(1)と同様に遊離炭酸の経年累積値で表すことができる。

$$Y' = \alpha' \sqrt{X} + \beta' \quad (2)$$

ここに、Y' : 中性化深さあるいは侵食深さ(mm)、X : 遊離炭酸経年累積値(ppm·year)、 α' 、 β' : 係数劣化の予測において、図-18の20年間における遊離炭酸の変動から将来の経年変動を予測したが、遊離炭酸は

6. 結論

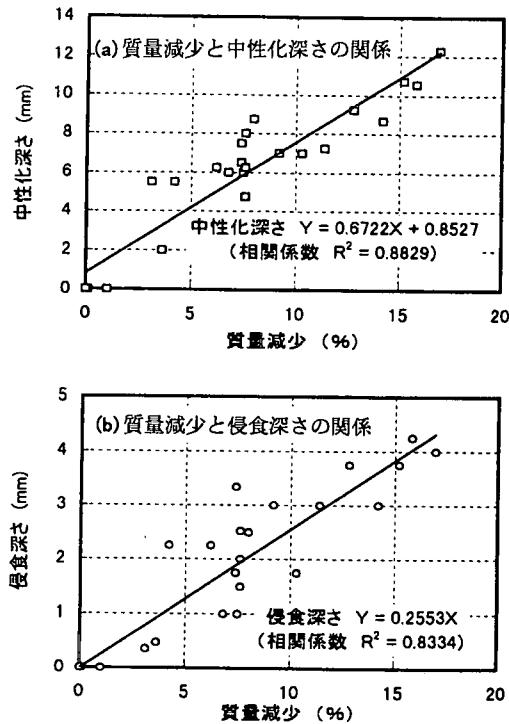


図-22 質量減少、中性化深さ、侵食深さの関係

長期的に大きな上昇・下降傾向は少ないと考えられ、経年的には移動平均から求められた年平均値の約30 ppmを劣化予測に適用させた。例えば、最も厳しい環境にある酸素法・水路のコンクリートで、暴露開始から約20年後の質量減少は最も大きいもので約20~25%と予測され、質量20%の減少から供試体面積を考慮した計算上の侵食深さを求めるとき、単位面積当たり約3 mmとなる。一方、式(2)をもとに得られた質量減少との関係から侵食深さは約5 mmとなり、供試体全表面を見込んで計算された侵食深さに比較して予測される侵食深さは約2倍近い値となる。

このように、質量減少の実測値と遊離炭酸の計算値によって、侵食深さあるいは中性化深さの経年変化を推定し、劣化予測と補修時期の予測を行うことは可能と考えられる。一方、腐食因子の劣化指標以上の侵入などによって予測より短期間で補修を必要とする場合もある。しかし、いずれにおいても当環境の場合、処理水の水質あるいは水流などの変動によって影響を受けるため、これらを含めた詳細な検討が必要となろう。したがって、細菌、原生動物の活動の変化、あるいは水流の変化などを考慮した定常的な水質制御システムが必要と考えられる。

下水処理場終末処理システムにおける10年以上にわたる暴露試験による結果によって、以下のような結論が得られた。

(1) 各種の供試体は、経年とともに外観変状、質量減少、相対動弾性係数の減少が認められた。環境の相違において、酸素法・水路のものが他のシステムのものより腐食が激しい。配合要因において、非ライニングコンクリートの質量減少は、水セメント比が50%より55, 60%が大きく、低水セメント比は腐食の抑制に効果的である。また、単位セメント量の増加も腐食抑制に効果的であることが認められた。さらに、ライニングは、腐食の抑制をより一層効果的にする。特にエポキシ樹脂仕様の供試体は、10年以上経過した時点においても腐食がほとんど認められなかった。

(2) 浸漬10年以上経過した供試体の曲げ強度の低下は大きく、特に酸素法・水路の非ライニング、高水セメント比のものは大きい。したがって、曲げ強度も質量減少、相対動弾性係数の特性と同様に、高水セメント比、非ライニングであると低下が大きく、反対に高単位セメント量、低水セメント比によって低下が防止でき、ライニングの使用は一層効果的である。

(3) 細孔構造などから検討したコンクリートの物性的低下は表面部において顕著であり、下水処理水の影響を大きく受けていることが認められた。その相違は、ライニングと非ライニングコンクリートとの間で顕著であり、ライニングの使用が当該処理水による長期的な侵攻に対しても十分効果的であることが認められた。

(4) 当処理システムにおける腐食要因は、主として侵食性遊離炭酸によるものと考えられる。侵食性遊離炭酸はコンクリート中の水和生成物の構造を中性化から最終的にイオンに分解し、さらにイオンが溶出するなどのメカニズムを経て徐々に破壊する。

(5) 遊離炭酸および侵食性遊離炭酸の推算と種々の実験結果から、質量減少、中性化深さおよび侵食深さが遊離炭酸の変化に相関関係があることが認められた。これらに近似式を適応させると良好な相関性が見いだせたが、特に遊離炭酸と質量減少の関係は極めて高い相関性が認められた。こうした結果から劣化の推定と補修時期の予測が可能となるが、劣化の進行は細菌、原生動物の活動の変化、水流などに影響を受けるため、これらが考慮された定常的な水質制御システムが必要と考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、当該下水処理場の場長をはじめ、関係各位のご援助を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中本至：下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化, 土木学会論文集, No. 472号/V-20, pp. 1-11, 1993.
- 2) 三品文雄：下水道施設における硫化水素の生成と制御に関する研究, 東北大学学位論文, 1990.
- 3) 森永力, 河合研至, 寺西修治, 堂園昭人: コンクリートの劣化に及ぼす微生物の影響, 第46回セメント技術大会講演集, pp. 568-573, 1992.
- 4) 田中修司, 北川三夫, 深谷涉, 越智孝敏: 下水道施設における硫化水素対策, 土木技術資料, 37-10, pp. 42-47, 1995.
- 5) 木下勲: 施設の耐久性を向上させるには, 月刊下水道, vol. 19, No. 5, pp. 7-11, 1996.
- 6) 田沢栄一, 金子誠二, 坂本全布, 安伸二: 酸素活性汚泥法施設用いたコンクリートの表面劣化, セメント技術年報, 37, pp. 374-377, 1983.
- 7) 岡田清, 宮川豊章, 吉村憲次: 酸素活性汚泥処理施設におけるコンクリートの腐食について, 第6回コンクリート工学年次学術講演会論文集, pp. 229-232, 1984.
- 8) 河合研至, 森永力, 田澤栄一: 好気性微生物の代謝量がコンクリート劣化に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No. 49, pp. 704-709, 1995.
- 9) 須藤隆一: 生物処理の管理 II, 水, Vol. 37-2(No. 517), pp. 10-40, pp. 61-108, 1995.
- 10) 荒木峻他編: 環境科学事典, 化学同人, 1991.
- 11) 日本水道協会: 水道施設設計指針・解説, 日本水道協会, pp. 311-313, 1990.
- 12) 岡田清: 酸素活性汚泥処理施設におけるコンクリート壁の腐食状況調査(その1), 日本材料学会, 1981.
- 13) 川東龍夫, 新宮康之, 宮川豊章, 服部篤史, 井上晋, 藤井學: コンクリートの骨材界面組織が物質移動に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No. 48, pp. 198-203, 1994.
- 14) 川東龍夫, 玉野達, 井上晋, 宮川豊章, 藤井學: コンクリートの塩害/酸性腐食の複合化に関する検討, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部門, pp. 334-335, 1992.
- 15) 川東龍夫, 井上晋, 宮川豊章, 藤井學, 長岡誠一, 小林茂広: 下水処理施設におけるコンクリート供試体の腐食に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No. 47, pp. 492-497, 1993.
- 16) 厚生省生活衛生局・水道環境部監修: 上水試験方法, pp. 222-223, 1985.
- 17) 厚生省生活衛生局・水道環境部監修: 上水試験方法, pp. 149-153, 1970.
- 18) CALLEJA, J.: Durability, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 1, VII-2/1~VII-2/48, 1980.

(1997.4.1 受付)

A CORROSION MECHANISM OF CONCRETE IN A SEWAGE TREATMENT FACILITY USING AN OXYGEN AERATION ACTIVATED SLUDGE PROCESS

Tatsuo KAWAHIGASHI, Hironobu SUZUKI, Toyoaki MIYAGAWA
and Manabu FUJII

Over the years, it was observed the changes of roughened surfaces, mass loss and decrease of relative dynamic modulus of elasticity. After more than 10 years, the bending performance of conventional concrete specimens immersed without lining decreased in comparison to specimens with lining. Based on microstructure and chemical analyses, the surface samples had more obvious changes than interior ones, with the degree of change depending on the concrete mixture and whether or not the surface had been coated with lining.