

論文 浄水施設における躯体コンクリートの外観調査および水質調査

間々田 憲哉^{*1}・大野 健太郎^{*2}・宇治 公隆^{*3}・細谷 昌平^{*4}

要旨: 本研究では、高度浄水施設の劣化要因把握の基礎検討として、浄水場における躯体コンクリートの外観調査および水質調査を実施した。外観調査の結果、施設によりコンクリート表面状態が異なり、生物活性炭吸着池および後段ろ過池では、石灰石骨材が溶解していた。水質調査の結果、生物活性炭吸着池において、活性炭層の深度増加に伴い pH が低下することを確認し、微生物代謝に起因する酸性物質がコンクリートの劣化要因であると推察した。さらに、浄水施設は、逆洗浄および壁面の高圧水洗浄に伴う摩耗などの物理的作用とセメント水和物の溶脱および酸性物質などの化学的作用の複合作用により劣化が生じると示唆された。

キーワード: 浄水施設, 生物活性炭吸着池, 溶脱, 微生物代謝, 石灰石骨材, 摩耗

1. はじめに

高度経済成長期に建設された社会基盤施設の老朽化が課題となっており、水道施設においても例外ではない。水道施設は、昭和 30~40 年代に集中的に整備され、間もなく一斉更新の時期を迎える。将来にわたって水道水の安定供給を続けるためには、今後、急増する更新需要に対応し、ライフサイクルコストの低減と更新時期の平準化に取り組まなければならない、施設延命化は大きな課題である。

水道施設のコンクリート経年劣化に関する報告は多くないものの、その主要因はセメント成分の溶脱とされている^{1)~3)}。溶脱の進行は、他の一般的コンクリート構造物の劣化進行と比較して緩やかであり、供用開始直後から施設のコンクリート状態を調査しているデータは少ないのが現状である。また、水道施設に関わるコンクリート構造物は、浄水場、配水池、給水所などそれぞれにおいて水量、塩素系薬品注入の有無などの環境が異なり、一概に劣化を評価できない問題もある。さらには、オゾン接触池や生物活性炭吸着池の高度浄水施設における躯体コンクリートの劣化速度が上記の水道施設と比較して大きいとの報告^{4), 5)}もある。特に、高度浄水施設のコンクリート劣化現象について、その劣化原因およびメカニズムは未だ解明されていない現状にある。

本研究では、高度浄水施設におけるコンクリートの劣化要因およびメカニズム解明を念頭に、基礎情報を収集するため、施設の外観調査および水質調査を実施した。調査対象は、通常浄水施設と高度浄水施設とした。外観調査では、供用年数の異なる 5 つの浄水場を対象とし、水質調査では、外観調査対象施設のうち、2 つの浄水場を対象として実施した。

2. 外観調査

2.1 調査対象施設の概要

本研究では、東京都水道局の浄水場を対象とし、外観調査を実施した。調査対象施設の主な浄水フローを図-1 に示す。河川から取水された原水は、着水井を通過後、硫酸等による pH 調整が実施され、フロック形成池にて凝集剤が投入された後、沈でん池にて浮遊物が沈殿させられる。その後、オゾン接触池にて流入水中に存在する分子量の大きい有機物はオゾンとの接触により低分子量の有機物へと分解される。オゾン接触池は、図-2 に示すように 3 つのオゾン接触槽と滞留槽から構成されている。その後、オゾン処理水は、生物活性炭吸着池に送られる。生物活性炭吸着池では、図-3 に示すように、2.5m の厚さに活性炭が充填されており、その活性炭で有機物が吸着され、微生物代謝により分解される。吸着能力維持のため、4 日に 1 回、空気と水によって活性炭の逆洗浄が実施されている。ここで逆洗浄とは、表層部に蓄積した泥状物質等を洗浄するため、通常の流下方向とは逆方向に水や空気を送り込むことである。生物活性炭吸着池にて処理された水は、後段ろ過池にてろ過され、配水池へ送られる。後段ろ過池では、砂層により水がろ過され、砂層も水によって逆洗浄が行われる。なお、図-1

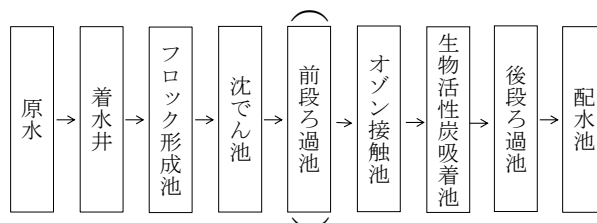


図-1 浄水フロー

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 博士前期課程 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東京都水道局 研修・開発センター (非会員)

表-1 外観調査対象施設の概要

浄水場		A浄水場			
対象施設	沈でん池	\	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
供用年数 ^{※1}	44年		21年	21年	44年
線速度 (m/日)	—		2160 ^{※2}	250	150
石灰石骨材	無				
浄水場		B浄水場			
対象施設	沈でん池	前段ろ過池	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
供用年数 ^{※1}	—	42年	9年	9年	9年
線速度 (m/日)		180	—	250	150
石灰石骨材		無	有		
浄水場		C浄水場			
対象施設	沈でん池	\	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
供用年数 ^{※1}	28年		14年	14年	28年
線速度 (m/日)	—		2160 ^{※2}	250	180
石灰石骨材	無				
浄水場		D浄水場			
対象施設	沈でん池	前段ろ過池	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
供用年数 ^{※1}	—	38年	6年	6年	38年
線速度 (m/日)		180	—	300	180
石灰石骨材		無	有		
浄水場		E浄水場			
対象施設	沈でん池	\	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
供用年数 ^{※1}	51年		4年	4年	—
線速度 (m/日)	—		—	300	
石灰石骨材	無	有			

※1：2014年3月現在

※2：オゾン接触池の線速度はオゾン接触時間および槽の形状より算出した。

※3：「\」は施設無し、「—」は調査未実施

中の前段ろ過池は浄水場により設置の有無が異なる。

外観調査対象施設の概要を表-1に示す。ここで、表-1に示す線速度とは、流量を処理池の断面積で除したものであり、通過する水の水速である。本研究では、調査対象施設のうち、沈でん池、前段ろ過池および後段ろ過池を通常の浄水施設、オゾン接触池、生物活性炭吸着池を高度浄水施設として扱う。コンクリートの調査対象箇所はいずれも水中部であり、沈でん池、オゾン接触池では、底版から高さ1mの壁面とした。なお、生物活性炭吸着池では、活性炭と接触している壁面を調査し、ポーラスコンクリート版から高さ1mの位置とした。また、前段ろ過池および後段ろ過池では、砂層の上端から高さ約1.5m位置の壁面を調査した。

2.2 外観調査項目

調査項目は、外観調査、脆弱深さ、中性化深さとした。外観調査では、目視および写真撮影により、躯体コンクリートの変状を確認した。中性化深さ測定は、躯体コンクリートをはつり、はつり面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、呈色深さを測定した。脆弱深さは、躯体コンクリートをケレンし、容易に削れた深さから躯体コンクリート表面までを測定した。

2.3 外観調査結果

(1) 沈でん池および前段ろ過池

図-4に沈でん池のコンクリート壁面写真を示す。沈でん池の供用年数は28年～51年であり、コンクリート壁面は軟化していた。また、セメントペースト相が消失し、骨材が露出している箇所が認められた。セメントペ

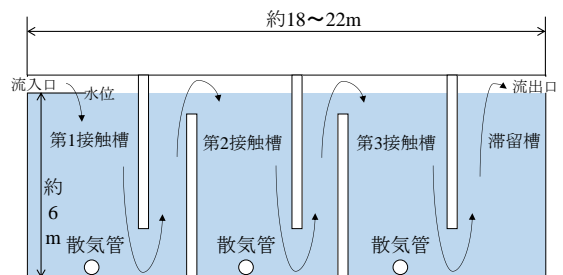


図-2 オゾン接触池

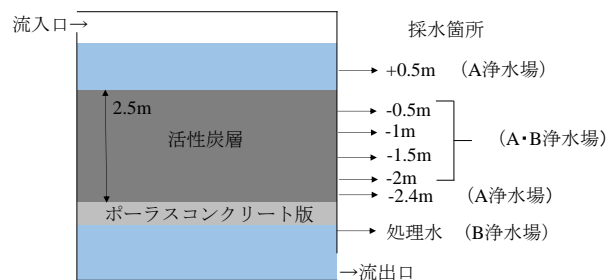


図-3 生物活性炭吸着池

ースト相が残存している箇所においては、ワイヤブラシでケレンすると、脆弱層が容易に掻き取れた。脆弱深さは浄水場によって異なるものの、概ね2～6mm程度であった。

前段ろ過池は供用から38～42年経過しており、コンクリート表面は、茶褐色を呈し、骨材が露出していた。脆弱深さは沈でん池と同様に概ね2～6mm程度であった。

(2) オゾン接触池

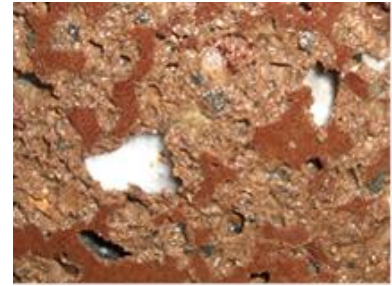
オゾン接触池は、2浄水場を調査し、そのうち1浄水



(a) A 浄水場



(a) A 浄水場



(a) B 浄水場



(b) C 浄水場

図-4 沈でん池



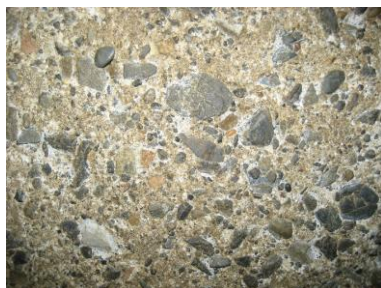
(b) C 浄水場(防水塗装有)

図-5 オゾン接触池



(b) D 浄水場

図-7 後段ろ過池



(a) A 浄水場



(b) B 浄水場

図-6 生物活性炭吸着池



(c) D 浄水場

場では、コンクリート表面に防水塗装が施されていた。防水塗装無しの施設は、供用から21年経過しており、調査対象は第3接触槽および滞留槽である。また、防水塗装が施された施設は、供用から14年が経過しており、第1接触槽から滞留槽までを調査した。防水塗装の有無によらず、壁面の色は、図-5に示すように黒色あるいは暗褐色であり、骨材の露出は認められなかった。

また、供用年数が長いほど黒色を呈しており、さらに供用年数が比較的短い施設(C浄水場)の滞留槽では、その色は肌色に近い状態であった。コンクリート表面の黒色付着物は、ケレンにより3mm程度削れ、その下からコンクリート表面、あるいは防水塗装面が現れた。ここで、黒色付着物は、原水に含まれる金属イオンがオゾンの酸化作用により沈積したものと推察されている⁹⁾。ワイヤブラシおよびスクレーパーによるケレンの結果、コンクリート表面の脆弱深さは3mm程度であった。防水塗装が施されている施設において、塗装表面をはつた結果、その厚さは5mm程度であり、その下のコンクリートは健全性を保っているようであった。

(3) 生物活性炭吸着池

生物活性炭吸着池の供用年数は、4年～21年であり、供用年数の違いにより、使用されている結合材、水結合材および骨材が異なる。供用年数が長い施設では、中庸熱ポルトランドセメントが結合材に使用され、水結合材比は55%以下である。一方、供用年数が短い施設(10年以下)では、低熱ポルトランドセメントが使用され、水結合材比は45%以下となっている。また、生物活性炭吸着池とオゾン接触池に使用されたコンクリートは、同一浄水場において同一である。

生物活性炭吸着池では、活性炭の入れ替え時に高圧水による壁面洗浄が実施されている。したがって、コンクリート表面の脆弱層は削り落とされていると考えられる。コンクリート壁面の状態は、図-6に示すように、セメントペースト相が消失しており、粗骨材が露出していた。脆弱深さは概ね1.5～4mm程度であり、骨材が露出しているにも関わらず、その深さは小さいことがわかる。また、供用期間が短い施設では図-6(b)に示すように、白色骨材の凹部が確認された。白色骨材を取り出し、粉末

X線回折分析に供したところ、炭酸カルシウムが95.8%含まれていたことから、この骨材は石灰石骨材であることがわかった。つまり、生物活性炭吸着池の石灰石骨材は、セメントペースト相より溶解が進み、窪んでいると考えられる。

(4) 後段ろ過池

後段ろ過池の供用年数は、9~44年であり、9年目の施設がある浄水場では、生物活性炭吸着池の稼働に合わせて、同時期に造られた施設である。さらに、後段ろ過池においても生物活性炭吸着池と同様に、コンクリート表面の高圧水洗浄が実施されている。図-7にコンクリート表面の写真を示す。コンクリート表面の色は、全体的に褐色を呈しており、供用年数が長い施設ほどセメントペースト相が消失し、粗骨材の露出が確認された。さらに、石灰石骨材の溶解も確認された。図-7(b)は、高圧水洗浄前(左)と後(右)の写真であり、高圧水洗浄により茶褐色の表層が消失する可能性が明らかとなった。

2.4 中性化深さ測定結果と外観調査のまとめ

図-8に中性化深さ測定結果および処理池別の中性化速度係数を示す。なお、中性化深さは後述する表-2に示すように、池ごとに数mmの範囲を有するため、中性化深さの平均値を図-8中にプロットし、この値から中性化速度係数を算出した。通常の浄水施設と位置付けられる沈でん池、前段ろ過池および後段ろ過池と比較して、高度浄水施設のオゾン接触池および生物活性炭吸着池において、中性化の進行が早いことがわかる。ただし、オゾン接触池を除く施設において、供用初期のコンクリート表面位置が不明なため、初期表面からの中性化深さはさらに大きな値となると考えられる。

以上の外観調査結果より、表-2に示すように施設によってコンクリート表面状態、脆弱深さおよび中性化深さなどが異なるが、コンクリートの変質の主要な要因は、置換性の高い水に曝されることによる、セメント水和物の溶脱と考えられる。さらに、生物活性炭吸着池および

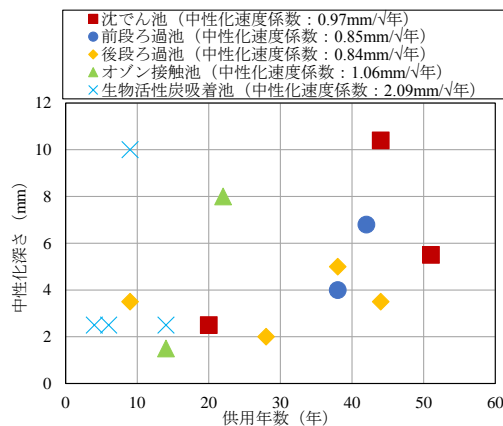


図-8 中性化深さ測定結果

後段ろ過池においては、石灰石骨材の溶解が確認されたことから、活性炭内の微生物代謝に伴う酸性物質のコンクリートへの影響が考えられる。また、オゾン接触池においては、他の施設と比較して、表-1に示したように処理水の線速度が大きく、中性化深さが大きいことから、溶脱が促進される環境にあると推察される。なお、尾崎ら⁷⁾は、オゾン接触池の第1接触槽において、供用開始から約2年で既に脆弱化が進行していると報告している。

3. 浄水場における水質調査

3.1 調査対象施設と調査項目

水質調査対象施設は、高度浄水施設を有する浄水場のうち、前段ろ過池の有無を考慮してAおよびB浄水場とした。水質調査箇所、調査項目および調査時期を表-3に示す。水質調査対象の浄水場では、原水を河川から取水していることから、原水の水質変動や水温変動に伴い、投入される薬品種(硫酸、次亜塩素酸ナトリウムおよび水酸化ナトリウム)やその量、さらにはオゾン発生量、活性炭内の微生物代謝等が変化すると考えられる。本研究では、原水の水温変動を考慮して、年4回(四季)の水質調査を実施し、年間の水質変動傾向を把握することで、コンクリートの劣化要因の検討を行った。

表-2 外観調査のまとめ

浄水場名	池名	沈でん池	前段ろ過池	オゾン接触池	生物活性炭吸着池	後段ろ過池
A浄水場	供用年数(年)	44	/	21	21	44
	中性化深さ(mm)	8.7~11.6		8	5~7	3~5
	脆弱深さ(mm)	5		3	3~4	0
	骨材の露出	○		×	○	○
B浄水場	供用年数(年)	-	42	9	9	9
	中性化深さ(mm)	-	4~9.5	-	10	3~4
	脆弱深さ(mm)	-	2~3	-	0	2
	骨材の露出	-	○	-	○(溶解有)	○(溶解有)
C浄水場	供用年数(年)	28	/	14	14	28
	中性化深さ(mm)	2~3		1(防水塗装)	2~3	2
	脆弱深さ(mm)	2~3		0	2~3	2
	骨材の露出	△(一部露出)		×	×	○
D浄水場	供用年数(年)	-	38	6	6	38
	中性化深さ(mm)	-	4	-	2~3	4~6
	脆弱深さ(mm)	-	0	-	2	3
	骨材の露出	-	○	-	○(溶解有)	○
E浄水場	供用年数(年)	51	/	4	4	-
	中性化深さ(mm)	5~6		-	1.5~3	-
	脆弱深さ(mm)	0		-	1.5~3	-
	骨材の露出	○		-	○(溶解有)	-

表-3 水質調査概要

	A浄水場	B浄水場
調査箇所	原水, 沈でん水, オゾン接触池第1接触槽, 第2接触槽, 第3接触槽, オゾン処理水, 生物活性炭表面から+0.5m, -0.5m, -1m, -1.5m, -2m, -2.4m, ろ過水	原水, 沈でん水, 前段ろ過水, オゾン処理水, 生物活性炭表面から-0.5m, -1m, -1.5m, -2m, 生物活性炭処理水, 後段ろ過水, 送水
調査項目	pH, 水温, Ca ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	
調査時期	春(5月), 夏(8月), 秋(11月), 冬(2月)	
測定方法	pH: ガラス電極法 イオン: イオンクロマトグラフ法	

表-4 原水の水温

季節	水温 (°C)	季節	水温 (°C)
春	21	秋	12
夏	28	冬	5

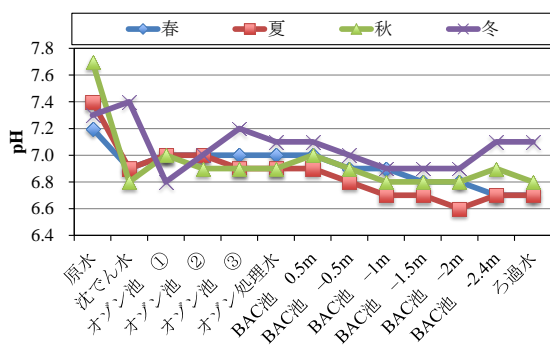


図-9 pH

調査項目は、水温、pHに加え、コンクリートから溶出すると考えられるカルシウムイオン、および薬品注入の影響を考慮して塩化物イオン、硫酸イオンとした。なお、pH測定には、ガラス電極法を用い、各種イオンについてはイオンクロマトグラフ法を使用した。

3.2 水質調査結果

2つの浄水場の水質調査結果が類似していたため、ここではA浄水場のみの結果を示す。表-4に水質調査を実施した日の原水の水温を示す。最も水温が高い夏季と低い冬季の水温差は23°Cであり、季節変動に伴う水温変動が大きいことがわかる。図-9に工程水のpHを示す。

全ての測定において原水のpHは7.0を超えているが、沈でん水にて7.0を下回る傾向にある。これは、沈でん池直前において浮遊物の凝集効果を高める目的で投入される硫酸等によるものと考えられる。すなわち、沈でん池では凝集剤のポリ塩化アルミニウム([Al₂(OH)_nCl_{6-n}]_m, PACと称する)を投入することで浮遊物を凝集沈殿させている。PACはpH6.8~7.0程度で最適な凝集効果を発揮するため、前述の硫酸によってpHを下げているのである。その後の工程水は、オゾン処理まで、冬季を除きpHは6.8~7.0を維持し、生物活性炭吸着池(BAC池)では、活性炭層表面からの深度が増すに伴い、低下傾向にある。図-10に生物活性炭吸着池における活性炭層表面からのpH低下量を示す。いずれの季節においても活性炭層表面からの深度増加により、pHが0.2~0.3程度低下していることがわかる。特に、春季および夏季において低下

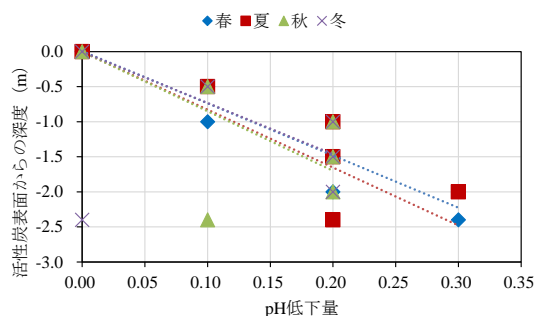


図-10 pHの低下量(生物活性炭吸着池内)

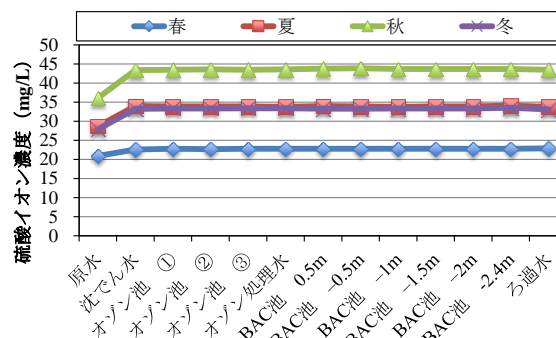


図-11 硫酸イオン濃度

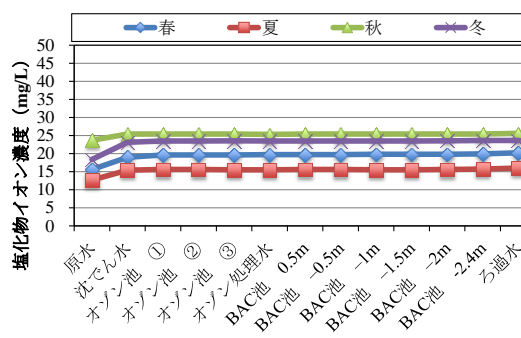


図-12 塩化物イオン濃度

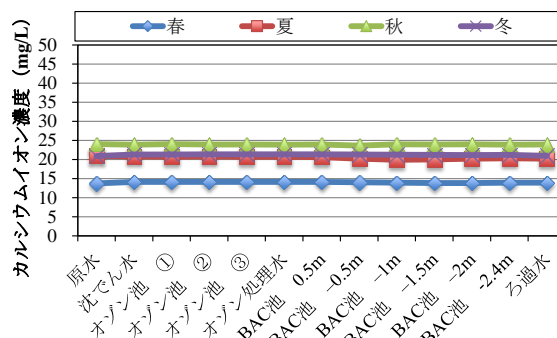


図-13 カルシウムイオン濃度

量が大きくなっており、これは、水温上昇に伴い活性炭表面および内部の微生物代謝が活発となり、酸性物質が生成していることを示唆するものと考えられる。

図-11, 12に硫酸イオン濃度および塩化物イオン濃度を示す。水温の変動により絶対値に違いはあるものの、工程中の変動傾向は両者同様である。硫酸イオンや塩化物イオンが原水から沈でん水において上昇する傾向は、前述のPACなどの薬品の影響と考えられる。

図-13にカルシウムイオン濃度を示す。図より、カルシウムイオン濃度の変化は浄水処理工程で確認されず、原水の濃度を維持している。ゆえに、カルシウムイオン濃度の変化から、施設特有の現象は把握できなかった。

4. 浄水施設におけるコンクリートの劣化要因

浄水場の外観調査、水質調査結果および施設の機能や特性を考慮すると、躯体コンクリートの劣化要因は、施設ごとに異なると考えられる。これらは、接触水の流速や逆洗浄および壁面の高圧水洗浄に伴う摩耗などによる物理的作用と活性炭内の微生物代謝に起因する酸性物質などの化学的作用が複合的に影響していると考えられる。つまり、浄水場におけるコンクリートの劣化要因は図-14に示すような模式図で表すことができる。沈でん池では、摩耗などの物理的作用はなく、供用年数が比較の長いにも関わらずセメントペースト相は比較的残存していることから、セメント成分の溶脱が主要因と考えられる。オゾン接触池は、他の施設と比較して線速度が7~14倍であるため、置換性の高い水の影響により溶脱に伴う中性化の進行は早いと考えられるが、表層のセメントペースト相の消失などの物理的変質は小さいといえる。生物活性炭吸着池は、微生物代謝由来の酸性雰囲気の水に常時接し、さらに逆洗浄や高圧水洗浄による物理的作用を受け、劣化進行が大きいと推察される。後段ろ過池では、生物活性炭吸着池から流入する酸性雰囲気の水に曝され、高圧水洗浄に伴う物理的作用を受けていることが劣化の要因と考えられる。

以上のことから、それぞれの施設に応じた劣化要因およびメカニズム解明、さらには劣化予測を実施することで、施設の延命化対策が可能となる。

5. まとめ

本研究では、浄水施設における躯体コンクリートの劣化調査として、外観調査および水質調査を実施した。その結果、施設によって、劣化要因は大きく異なることがわかった。すなわち、流水、逆洗浄および高圧水壁面洗浄に伴う物理的作用とセメント水和物の溶脱および活性炭内の微生物由来の酸性物質などの化学的作用の複合作用により劣化が生じると示唆された。これらの結果から、

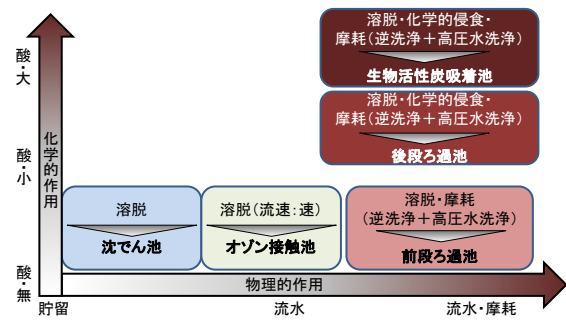


図-14 劣化要因の模式図

浄水施設の延命化のためには、劣化要因に応じた劣化予測および対策が重要であるといえる。また、生物活性炭吸着池および後段ろ過池の石灰石骨材の溶解、pHの低下現象は、酸性物質の存在を裏付ける結果となった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、首都大学東京の上野敦准教授に多くの意見を頂戴した。また、シンエイマスター株式会社の庭林雄二氏および根本徹氏、首都大学東京大学院、博士前期課程2年の新津祐樹氏には、調査においてご尽力いただいた。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 眞島光保, 野田純嗣, 木原義孝, 宮本浩治: 水道施設におけるコンクリートの劣化現象, 材料, Vol.40, No.456, pp.1171-1177, 1991.9
- 2) 牛尾亮太, 松田康孝, 森川英典: 90余年経過した配水池におけるコンクリート表面劣化の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.683-688, 2011.
- 3) 関健吾, 横関康祐, 取違剛, 木村彩永佳: 建設から約100年経過して配水池におけるコンクリートの溶脱評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.757-762, 2013.
- 4) 大脇英司, 花元隆司, 橋本利明, 岡本礼子: 活性炭を用いた浄水施設のコンクリートの劣化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.903-908, 1996.
- 5) 大脇英司, 岡本礼子, 長塩大司: 高度浄水施設におけるオゾン接触反応槽のコンクリート劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.979-984, 1997.
- 6) 宮原茂禎, 大脇英司, 岡本知久, 花本隆司: 高度浄水施設のオゾン接触槽および活性炭吸着槽におけるコンクリート劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.707-712, 2010.
- 7) 尾崎勝ほか: オゾン接触池のコンクリート劣化に関する研究, 水道協会雑誌, 第80巻, 第2号, pp.3-14, 2011.2.