論文 高度浄水施設における生物活性炭吸着池の躯体コンクリートに及ぼ す遊離炭酸の影響

新津 祐樹*1·大野 健太郎*2·宇治 公隆*3·細谷 昌平*4

要旨:高度浄水施設の生物活性炭吸着池を対象に、コンクリートの外観調査および水質調査を実施した。外 観調査結果より、コンクリート表面では、骨材の露出や石灰石骨材の溶解が確認され、水質調査結果より、活 性炭層表面からの深度が増すに伴い、遊離炭酸濃度が上昇および pH が低下することを確認した。これらよ り、活性炭内の微生物代謝に起因する炭酸が劣化要因の1 つであると仮定し、流水環境下の炭酸水中に配合 および骨材の異なるモルタル供試体を曝露し、実施設に近い環境で実験を行った。実験結果から、珪砂骨材 よりも石灰石骨材を使用した供試体において著しい質量減少を示すことを明らかにした。 キーワード:高度浄水施設、生物活性炭吸着池、遊離炭酸、微生物代謝、石灰石骨材

1. はじめに

東京都水道局では、より安全でおいしい水を実現する ために、通常の浄水処理に加え、オゾン処理と生物活性 炭処理を併用した高度浄水処理を導入している。平成 25 年 10 月には、利根川水系の全浄水場で高度浄水処理 100%を達成している。一方、我が国では最初に高度浄水 処理が採用されてから 20 年以上経過し、高度浄水施設 におけるオゾン接触池および生物活性炭吸着池の躯体コ ンクリートの耐久性に関する調査報告が行われている^{D,} ²⁾。これらの報告では、供用開始6年後に、コンクリート 表層部の空隙率が大きく疎な構造となっており、供用か ら 18 年経過後の調査では劣化の進行は緩やかになって いるとされている³⁾。水道施設のコンクリート経年劣化 の主要因はセメント成分の溶脱と考えられており⁴⁾、生 物活性炭吸着池では活性炭中の微生物の代謝活動により、 他の施設と比較して溶脱が促進されている可能性がある。

本研究では、生物活性炭吸着池における躯体コンクリ ートの劣化に着目し、コンクリートの劣化要因を解明す るため、実施設の外観調査および水質調査を実施した。 これらの調査結果から、劣化要因の1つを活性炭内の微 生物代謝に起因する炭酸と仮定し、遊離炭酸濃度を変化 させたモルタル供試体の劣化促進実験を実施した。

2. 生物活性炭吸着池の躯体コンクリート外観調査および水質調査

2.1 施設の概要

本研究では,2 つの浄水場の生物活性炭吸着池を対象 として外観調査および水質調査を実施した。図-1,図-2 に対象施設の水処理フローを示す。対象とした生物活



図-3 採水箇所

性炭吸着池は、それぞれ供用から 21 年(A 浄水場),10 年(B 浄水場)経過しており、図-3 に示すようにポー ラスコンクリート版の上に厚さ 2.5m の活性炭が配置さ れている。生物活性炭吸着池における処理水の線速度は 250m/日であり、4 日に1度、空気と水を併用した逆洗浄 が実施され、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。外観調査の対象は壁面であり、結 合材は A 浄水場では中庸熱ポルトランドセメント、B 浄

*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) 水場では低熱ポルトランドセメントが使用されている。

2.2 外観調査結果

写真-1 に生物活性炭吸着池の全体および壁面の写真 を示す。どちらの浄水場も,全体的に褐色を呈しており, セメントペースト相が消失し,供用初期の表面位置は不 明であった。また,脆弱深さは3~5mm 程度であり,は つりにより中性化深さを測定した結果,5~10mm 程度で あった。さらに,写真-1(d)に示すように石灰石骨材部 分が周囲のセメントペースト相より凹んでいた。これら の結果より,生物活性炭吸着池では,酸がセメントペー スト相の変質や石灰石骨材の溶解を促進している可能性 が考えられる。

2.3 水質調査結果

既往の報告¹⁾では,生物活性炭吸着池の躯体コンクリ ート表面の剥離に至る一連の劣化現象には,活性炭がも たらす酸性雰囲気が関係していると推察されている。こ れを参考に,水質調査では,図-3に示すように活性炭 層表面から深さ方向に6箇所を採水箇所とし,季節(水 温)変動に伴うpHおよび酸度(総酸度)を測定し,遊離 炭酸濃度を算出した。なお,pHはガラス電極法,酸度は フェノールフタレイン溶液と水酸化ナトリウムを使用し た滴定により求め,遊離炭酸濃度は酸度から求めた。こ こで,水中の炭酸イオンの状態を正確に得ることはでき ないが,HCO₃が主であると考えられる。

表-1 に B 浄水場における採水日の原水温度,図-4 に夏季の pH,酸度および遊離炭酸濃度,図-5 に活性炭 表面から深度方向への遊離炭酸濃度上昇量,図-6 に活 性炭表面から深度方向への pH 低下量を示す。いずれの 季節も,活性炭表面からの深度が増すにつれ,遊離炭酸 濃度が上昇し,pH が低下している。また,遊離炭酸濃度 上昇量が,冬季に 2ppm 程度と最も低い一方で,夏季に 9ppm 程度と最も高くなることを確認した。A 浄水場に おいても,類似した傾向が得られ,遊離炭酸濃度の上昇 と pH の低下が認められた。

これらの結果より,水温の高い夏季に微生物の活動が 活発になり,微生物代謝により生成する遊離炭酸の濃度 が上昇し,躯体コンクリートからカルシウムイオンの溶



出が促進されていると推察できる。

3. 遊離炭酸によるモルタル供試体の劣化促進実験

3.1 実験概要

外観調査および水質分析の結果より,劣化要因の1つ として,微生物代謝により生成する炭酸が挙げられる。 本研究では,実施設に近い環境を想定し,流水環境下の 炭酸水中に,結合材と細骨材を変えたモルタル供試体を 浸漬し,実験を行った。



(a) 全体図(A 浄水場)

(b) 壁面(A 浄水場)





(c) 全体図(B浄水場)
(d) 壁面(B浄水場)
写真-1 生物活性炭吸着池の外観写真

表-1 B 浄水場における採水日の原水温度

季節	原水温度(℃)	季節	原水温度(℃)
春季 (5月)	19.3	秋季(11月)	21.7
夏季 (8月)	25.1	冬季 (2月)	4.4





表-2	浸漬	槽の条	件
		▲北曲	D

	A槽	B槽	C槽
流速(L/min)	12.0	12.0	12.0
遊離炭酸濃度の目標値 (ppm)	2	20	100
(実測値)	(2~3)	(10~30)	$(40 \sim 120)$

3.2 浸漬環境

図-7 に試験装置を示す。試験槽は、A 槽(通常の浄 水施設模擬),B 槽(生物活性炭吸着池模擬),C 槽(生 物活性炭吸着池の劣化促進環境模擬)の3 槽とし,室温 の制御は行っていない。表-2 に試験条件を示す。流量 は東京都水道局の生物活性炭吸着池における線速度 (250m/日)を参考に、カルシウムイオンの溶出を促進す

るために全槽で生物活性炭吸着池の 2 倍速程度(500m/ 日≒12L/min)とした。実験では、多量の浸漬水(36L/min) を必要とするため、浸漬水には水道水を使用し、遊離炭 酸濃度は、A 槽が水道水のみの 2ppm 程度、B 槽が図-4 の結果から夏季を想定した 20ppm、C 槽が促進環境で 100ppm となるように炭酸ガスを散気した。水温は、水道 水の温度(本試験期間内では、16~25.5℃程度)である。

3.3 供試体概要

表-3, 表-4 にモルタル供試体の使用材料および配合 を示す。結合材には、普通ポルトランドセメント(OPC), 低熱ポルトランドセメント(LPC),中庸熱ポルトランド セメント(MPC),高炉スラグ微粉末混合セメント(B) を使用し、細骨材には、SiO2を主成分とするセメント強 さ試験用標準砂を用いた。また、LPCを結合材とした供 試体では、標準砂を用いた配合 LPC と石灰石砕砂を用い た配合 L Ls の 2 水準を作製し、計5 配合とした。

図-8 に試験槽内の供試体の配置を示す。供試体は, 各槽に5配合×3段浸漬した。なお,モルタル供試体は, φ50×100mmの円柱型枠の中心部にφ2×100mmのステ ンレス棒を配置して打設し,翌日に脱型後,水中養生を 行った。材齢 25 日にてコンクリートカッターを用いて 供試体両端部を切り出し,図-9 に示すようにφ50× 40mmに成型した。その後,材齢 28 日まで 20℃の水中 養生を実施し,浸漬実験に供した。

3.4 測定項目および試験方法

表-5 に測定項目および試験方法を示す。質量変化率 は,槽別に各配合3つの供試体の平均値とした。ここで, 実施設の外観調査における脆弱深さや中性化深さは,写 真-1 に示したようにすでに消失した初期表面を考慮す ることが不可能であるため,初期表面位置を考慮すると 2.2 で示した値はさらに大きくなる可能性がある。そのた め本検討では,図-9 に示すように埋設したステンレス 棒を初期表面位置として,浸漬材齢0日からt日におけ る残存表面までの高さを測定した。表面高さの測定には, K 社製ワンショット3D マイクロスコープ(高さ方向分



表-3 モルタル供試体の使用材料

			-	
使用材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	吸水率 (%)	F.M.
普通ポルトランドセメント OPC	3.16	3190	_	_
低熱ポルトランドセメント LPC	3.22	3380	-	-
中庸熱ポルトランドセメント MPC	3.21	3280	-	
高炉スラグ微粉末B	2.91	8480	—	
セメント強さ試験用標準砂S	2.64(絶乾)	_	0.42	1.07
石灰石砕砂Ls	2.67(表乾)	_	1.02	3.33

表-4 モルタル供試体の配合

而合	W/B	B/S			単位	量(g/L)		
(罟媧索)	(%)	(%)	W	ws	C La	В			
(直按平)	(/0)	(/0)		3	LS	OPC	LPC	MPC	BFS
OPC	55	33	273	1504	—	496	Ι	-	_
LPC			274	1509	_	Ι	498	-	_
MPC			274	1508	-	Ι	Ι	498	_
B (45%)			271	1495	_	271	-	-	222
L_Ls			276	-	1519	Ι	501	Ι	-



図-8 供試体の配置

表-5 測定項目および試験方法

測定項目	試験方法
圧縮強度	JSCE-G 505に準拠, φ 50×100mm 試験材齢: 7, 14, 28, 56日
質量変化率	浸漬材齡:0,7,14,28,56,70,91,105,126日
表面高さ	ワンショット3D測定マイクロスコープによる 浸漬材齢:0,14,28,56,91,126日
中性化深さ	JISA 1152に準拠,割裂面にて供試体側面から測定 浸漬材齢:126日

解能 0.1 μm)を使用した。表面高さの算出に際しては, 図-9 に示す測定対象範囲の平均高さからステンレス棒 までの高さを求め,上下面を対象として,3 供試体の平 均値として求めた。本検討では,生物活性炭吸着池にお ける化学的要因のみに着目し,2.1 で述べた活性炭や高 圧水による摩耗などの物理的要因は対象外としている。 これにより,炭酸のみを要因とした場合の消失深さが把 握可能であり,実施設における遊離炭酸濃度による劣化 速度の予測および推定が可能になると考えられる。

3.5 実験結果

(1) 圧縮強度

図-10 にモルタル供試体の材齢 56 日までの圧縮強度 を示す。石灰石砕砂を用いた配合 L_Ls は、標準砂を用 いた配合 LPC と同程度の強度を示した。一方,浸漬実験 を開始した材齢 28 日では、最も強度が低い配合 LPC に 対し,配合 B は 20N/mm²程度高い強度を示した。

(2) 質量変化率

図-11 に浸漬材齢 126 日までの浸漬環境別の質量変 化率の推移を示す。図-11(b)より,通常浄水施設環境下

(A槽:2ppm)において,配合 L_Ls では浸漬材齢 28 日, その他の配合では浸漬材齢 56 日まで質量が増加傾向と なった後,停滞もしくは減少傾向を示している。このこ とから,配合 L_Ls では浸漬材齢 28 日,その他の配合で は浸漬材齢 56 日前後で,水和反応の進行による質量増 加とカルシウムイオンの溶出による質量減少が同等もし くは溶出の影響が卓越し始めたと推察される。

図-12 に浸漬材齢 126 日時点の遊離炭酸濃度と質量 変化率の関係を示す。これより、全ての配合において、





遊離炭酸濃度が高くなるほど質量の減少が大きくなることがわかる。また、いずれの浸漬環境においても配合 L_Lsの質量減少が顕著となり、遊離炭酸がカルシウムイ オンの溶出に大きく関与していることが示された。

一方,配合 B では他の配合と比較して質量減少が小さい傾向となった。これは,他の配合より水酸化カルシウム量が少ないこと,浸漬開始時の圧縮強度が高いことから,組織が緻密でカルシウムイオンが溶出しにくかったためと推察される。

(3) 表面高さ

図-13 に浸漬材齢 126 日までの浸漬環境別の表面高 さの推移,図-14に浸漬材齢 126 日時点の表面高さを示 す。全ての配合において、遊離炭酸濃度が高くなるほど 表面高さの減少が大きくなっている。また、いずれの浸 漬環境においても配合 L_Ls の表面高さの減少が顕著と なり、劣化促進環境下(100ppm)においては約 0.6mmの 表面高さ減少を示した。図-14 に示した浸漬材齢 126 日 時点の表面高さと遊離炭酸濃度の関係は、図-12 に示し た質量変化と遊離炭酸濃度の関係と酷似している。

(4) 中性化深さ

図-15 に浸漬実験終了後の中性化深さの測定結果を 示す。遊離炭酸濃度 2,20ppm では中性化は確認されな かったが,100ppm では配合 L_Ls を除く全ての配合で 0.5mmの中性化を確認した。ただし、図-13(c)より,配 合 L_Ls は表面高さが 0.6mm 程度減少しているため、中 性化部分(残存していた供試体表面のセメントペースト 部分)が一部消失したことが推察される。生物活性炭吸 着池の躯体コンクリートの中性化深さと比較すると、中 性化深さが非常に小さい結果となった。これは、接水期 間、水圧などが異なるためと考えられる。

(5) 供試体の外観

写真-2 に浸漬初期と浸漬終了時の配合 L_Ls の外観 を示す。遊離炭酸濃度 20, 100ppm では,いずれの配合 も茶褐色に変色しており酸劣化に類似している。配合 OPC, LPC, MPC の供試体側面を触るとザラザラとした 砂の感触であるのに対し,配合 B, L_Ls は滑りがあった。 これは,配合 OPC, LPC, MPC ではセメントペースト相 が先行して消失した結果,細骨材が表面に現れたのに対







(a) 初期 A 槽 (2ppm)



(d) 浸漬 126 日後の A 槽(2ppm)

(b) 初期 B 槽 (20ppm)



写真-2 配合 L_Ls の外観

し、配合Bではセメントペースト相が残存したためであ る。さらに,配合 L_Ls ではセメントペースト相は消失 するが、その消失速度よりも石灰石骨材の溶解速度が大 きい結果を示していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、生物活性炭吸着池における躯体コンクリ ートの劣化要因を解明するため、微生物の代謝生成物を 想定した遊離炭酸がコンクリートに及ぼす影響について 検討を行った。

- 外観調査より, セメントペースト相の消失, 粗 (1)骨材の露出および石灰石骨材部分の溶解を確 認した。これらより、生物活性炭吸着池では、 酸がセメントペースト相の変質や石灰石骨材 の溶解を促進している可能性が考えられる。
- 水質調査より,活性炭表面からの深度が増すに (2)つれ, 遊離炭酸濃度が上昇し, pH が低下するこ とが確認された。また、水温が高いほど遊離炭 酸濃度の上昇量が大きいことが確認された。こ れらより,特に,水温の高い夏季に微生物の代 謝活動が活発となり,炭酸等の酸性物質が生成 していることを明らかにした。
- 劣化促進実験より, 遊離炭酸濃度が上昇すると (3) モルタル供試体は質量減少傾向を示し、特に石 灰石砕砂を用いた配合 L_Ls で質量減少が顕著 となることが明らかとなった。また、表面高さ



(c) 初期 C 槽 (100ppm)



(e) 浸漬 126 日後の B 槽(20ppm) (f)浸漬 126 日後の C 槽(100ppm)

においても同様の傾向を示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 首都大学東京の上野敦准教 授およびシンエイマスター株式会社の根本徹氏、庭林雄 二氏には、様々な助言をいただいた。また、2012年当時 首都大学東京博士前期課程2年の石田樹氏,2014年当時 首都大学東京博士前期課程1年の間々田憲哉氏にも多く の協力をいただいた。ここに銘記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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の劣化、コン クリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.979-984, 1997.
- 3) 宫原茂禎, 大脇英司, 岡本知久, 花元隆司: 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.
- 4) 真嶋光保,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