論文 高度浄水施設の生物活性炭吸着池における躯体コンクリート表層部 の化学的劣化に関する評価方法の検討

小倉 達也*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・北野 守康*4

要旨:高度浄水施設の生物活性炭吸着池において,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,貯留環境下において遊離炭酸濃度がモルタル供試体に与える影響について検討を行った。 その結果,遊離炭酸濃度1000pmの溶液にモルタル供試体を浸漬させることで,生物活性炭吸着池の化学的 作用を模擬できることが示唆された。また,モルタル供試体に作用する水の単位体積当たりの総遊離炭酸量 を指標とすることで,貯留環境のみでなく流水環境においても,モルタル供試体の質量変化率が整理でき, 遊離炭酸による化学的侵食に対する抵抗性が評価できることを示した。

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,化学的劣化促進試験

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、図-1 に示すように通常の浄水施設に加え、オゾ ン接触池と生物活性炭吸着池から成る高度浄水施設を導 入している。高度浄水施設導入から 20 年以上経過した 現在では、浄水場の更新や施設延命化を目的として、躯 体コンクリートの調査が実施されている。著者らの既往 の研究では、高度浄水施設を含めた全浄水施設を対象と し、躯体コンクリート表層部の外観目視調査および水質 調査を行った^{1),2}。その結果、生物活性炭吸着池の躯体 コンクリート表層部は、図-2 に示すようにセメントペ ースト相の消失および石灰石骨材の溶解が確認され、他 の浄水施設よりも劣化速度が大きいことが明らかになっ た。そのため、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表 層部を保護する対策が今後必要であると考えられ、著者 らはこれまでに劣化要因の検討を行ってきた。

ここで,生物活性炭吸着池の劣化要因は,既往の研究 成果^{1)~4)}より,化学的作用と物理的作用の2つに大別 できる。化学的作用とは,置換性の水に接することで生 じるセメント水和物の成分溶出に加え,活性炭内の微生 物代謝に由来する遊離炭酸による化学的侵食である。ま た,物理的作用とは,活性炭のろ過抵抗回復のために数 日に1回実施される空気と水を併用した活性炭の逆洗浄 に伴う摩耗作用および数年に1回実施される活性炭の入 れ替えに伴うコンクリート壁面の高圧水洗浄による摩耗 作用である。これらの劣化要因が複合的に作用すること で生物活性炭吸着池は通常の浄水施設よりコンクリート 表層部が早期に劣化すると考えられる。そこで,化学的 侵食のみに着目した既往の研究^{2),3}において,遊離炭酸





() 王本凶 (b) 日前の拡大子兵 図ー2 生物活性炭吸着池の外観写真²⁾

濃度の異なる流水環境下に配合の異なるモルタル供試体 を浸漬し、実施設の化学的侵食を模擬した劣化促進試験 方法を提案した。その結果、提案した劣化促進試験方法 が実施設の化学的侵食を十分に模擬し、水の単位体積当 たりを通過した総遊離炭酸量を評価指標とすることで、 モルタル供試体の遊離炭酸による化学的侵食の抵抗性を 評価できることを明らかにした³⁾。

本研究では、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表 層部を保護する補修モルタルの検討にあたり、その基礎 検討として耐遊離炭酸性を評価できる簡易試験方法につ いて検討した。実験では、遊離炭酸濃度の異なる貯留水 中に配合の異なるモルタル供試体を浸漬し、既往の流水 環境における実験結果^{2),3)}と貯留水での実験結果を比較 することで、貯留水試験の妥当性を検討し、さらに、化 学的侵食作用における評価指標を考察した。

*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 開発課 貯留環境下の炭酸水に浸漬したモルタル供試体の劣 化過程の把握

2.1 浸漬環境

表-1に示すように遊離炭酸濃度を3水準とし、図-3に示す実験装置のA,B,C槽内にモルタル供試体をそ れぞれ浸漬した。遊離炭酸濃度は、A槽では既往の研究 ^{2),3)}における最高遊離炭酸濃度である100ppmとし、ま た遊離炭酸濃度が高濃度で維持可能と判断した1000 ppm(C槽),およびB槽では500ppmとした。ここで、 表-2に示すように実施設での最大遊離炭酸濃度は 20ppm程度であり、実験での濃度は実施設の5~50倍で ある。炭酸ガスは、浸漬期間中は散気せず、供試体浸漬 直前に所定の遊離炭酸濃度に設定し、浸漬後は7日に1 度溶液を交換した。なお、本研究では水の比重を1.0と 仮定し、1ppmを1mg/Lと同義として扱う。また、溶液 の体積は、日本水道協会規格水道用資機材一浸出試験方 法(JWWAZ108)を参考に、モルタル供試体と水との接 触面積比を50 cm²/Lとして、24.5 Lとした。

2.2 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),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4配 合とした。水結合材比は実施設の躯体コンクリートを想 定し、W/B=55%とした。

モルタル供試体は、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の円柱型枠の中心 部に $\phi 2 \times 100 \text{ mm}$ 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 26 日にてダイヤモ ンドカッターを用いて供試体両端部を切り出し、 $\phi 50 \times$ 40 mm に成型した。その後、全ての配合において材齢 28 日まで水中養生を実施し、各槽に4配合を3段配置し、 浸漬実験に供した。

図-4 に圧縮強度試験の結果を示す。浸漬開始時であ る材齢28日では、石灰石砕砂を用いた L_Ls が最も低い 強度を示し、標準砂を用いた OPC および LPC は同等の 強度を示した。また、B は他の配合に比べ、約10 N/mm² 高い強度であった。なお、モルタル供試体の使用材料お よび配合は既往の研究^{2),3)} と同一であり、圧縮強度の傾 向も類似しているため、本実験結果は既往の研究結果^{2),} ³⁾ と比較可能であると考えられる。

2.3 測定項目

表-5 に測定項目および試験方法を示す。質量変化率の算出方法は,槽別に各配合3つの供試体の平均値とした。モルタル供試体の表面高さの測定は,図-5 に示す



A浄水場	春(4~6月)	夏(7~9月)	春(10~12月)	春(1~3月)
遊離炭酸濃度(ppm)	12	16	8.5	5

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		I
低熱ポルトランドセメント LPC	3.22	3380	-	-
高炉スラグ微粉末BFS	2.91	8590	_	-
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

			単位量(g/L)													
配合	W/B (%)	B/S(%)	W	V S	Ls	В										
						OPC	LPC	BFS								
OPC	55	33	273	1504	1	496	1	1								
LPC			274	1508	-	-	498	-								
B(45%)			33	33	33	33	33	33	33	33	271	1495	-	271	1	222
L-Ls			276	-	1519	-	501	-								



表--5 測定項目

測定項目	試験方法			
圧縮強度	JSCE-G 505に準拠, φ50×100mm 試験材齢:7, 14, 28, 56日			
質量変化率	浸漬材齢:0,7,14,28,35,42日			
表面高さ	非接触三次元形状測定機を使用 浸漬材齢:0,14,28,35,42日			
中性化深さ	JIS A 1152に準拠 浸漬材齢:42日			
細孔径分布試験	水銀圧入法 浸漬材齢:42日			

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7日ごとに残存表面までの高さを測定し た。表面高さの測定には、非接触三次元形状測定機(高 さ方向分解能 0.1 µm) を使用した。表面高さの算出に際 しては、図-5 に示す測定対象領域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つ の供試体の平均値として求めた。中性化深さの測定では, 浸漬終了時の侵食を受けた表面から測定した。細孔径分 布の測定では、遊離炭酸による化学的侵食を受けること で表層部と内部において細孔構造が異なることが考えら れたため、図-6 に示すように供試体断面の表層から 5 mm までを「外」, それ以外の内部を「内」として試料を 分けて測定した。

2.4 測定結果および考察

3. Sm

-4.0

(1) 質量変化率

図-7, 図-8 に浸漬材齢 42 日までの質量変化率およ び表面高さ変化量の経時変化を示す。全ての遊離炭酸濃 度において、質量の減少が L Ls>LPC>OPC, B の順に 大きくなる傾向を示した。一方,表面高さ変化量では, L Ls が OPC, LPC, B よりも減少量が大きくなる傾向を 示し, OPC, LPC, Bでは, 表面高さの変化量に明確な差 は認められなかった。また、L Ls では遊離炭酸濃度の増 加に伴い質量および表面高さの減少が大きくなることが 確認された。また,配合 L_Ls において遊離炭酸濃度に 関わらず,配合LPCとの間に明確な差が確認された。こ れは、遊離炭酸が作用することにより石灰石骨材の溶解 が生じたためであり、配合 L Ls は耐遊離炭酸性が低い





42 日終了時の質量変化率 図-9

■1000ppm (C槽)

C槽

(1000ppm)

0.5

1.0

1.0

1.0



ことが再確認された。

ここで、図-9に貯留環境での42日浸漬終了時の質量 変化率を示す。図より、配合 B は遊離炭酸濃度 500ppm 以上において質量減少に明確な差は確認されなかった。 一方、配合 B を除いた全ての配合において、遊離炭酸濃 度の増加に伴い、質量減少が大きくなる結果が確認され た。

以上のことから、短期間でモルタルの耐遊離炭酸性を 評価する方法として、遊離炭酸濃度を最大濃度で維持可 能な 1000 ppm とした溶液に浸漬し、評価項目を質量変 化率とすることが有効な試験方法であると考えられる。

(2) 中性化深さおよび供試体の外観

表-6 に中性化深さ測定結果を示す。中性化深さは, 配合に関わらず,遊離炭酸濃度が高くなるに伴い,大き くなる傾向を示した。また,最大でも中性化深さは 1.0 mm であることから,中性化深さから判断される遊離炭 酸による化学的侵食はごく表層部に影響を及ぼすと推察 される。ここで,モルタル供試体の外観は,既往の研究 結果^{2),3)}と類似しており,Bを除く供試体では脆弱層が 表面に形成されており,また,L_Lsでは,石灰石骨材の 溶解が確認され,図-2 に示した生物活性炭吸着池の躯 体コンクリートと類似した茶褐色を呈した。

(3) 細孔径分布

図-10に細孔径分布の測定結果を示す。図より,配合 に関わらず,表層部の全細孔容積が内部と比較して増加 し,さらに,各細孔直径の細孔容積が増加していること が確認できる。これらのことから,遊離炭酸を含む貯留 水に浸漬したモルタル供試体は,水和反応が進むと同時 に,遊離炭酸による化学的侵食を受けることで表層部に おいて空隙が増加し,疎な細孔構造になると考えられる。 したがって,遊離炭酸による化学的侵食を受けることで 表層の細孔容積が増加し,活性炭の逆洗浄や高圧水によ る壁面洗浄による摩耗作用に対して抵抗性が低下するこ とが改めて示唆された。

流水環境と貯留環境を統一したモルタル供試体に作 用する化学的侵食の抵抗性評価

3.1 概説

著者らは、モルタル供試体の遊離炭酸による化学的侵 食に対する抵抗性を検討するために劣化促進試験を実施 してきた。既往の研究では^{2),3)}、流水環境として比較的 長期間(126日浸漬)の試験を行い、一方、本研究では貯 留環境下で比較的短期間(42日浸漬)の試験を行った。 ここで、貯留環境と流水環境において、モルタル供試体 の劣化を統一指標を用いて表現できれば、比較的簡便で 短期間で行える貯留環境の劣化促進試験が実施設環境 (流水環境)に対してどの程度の促進倍率であるかを論 じることが可能と考えられる。

したがって,流水環境と貯留環境において,両試験結 果を一律に表現できる評価指標を検討し,モルタル供試 体の遊離炭酸による化学的侵食性の評価を試みる。

3.2 貯留環境下での化学的侵食による抵抗性評価

本実験では、供試体浸漬前および浸漬水交換時の7日目 に遊離炭酸濃度を測定した。なお、溶液の遊離炭酸濃度 の測定では、0.5L程度の溶液を必要とするため、7日間 の浸漬期間中に繰り返し濃度測定を実施すると接触面積 比が変化してしまうため、浸漬前と浸漬後の2回の測定 とした。図-11にC槽(1000 ppm)における遊離炭酸濃

度の推移を示す。遊離炭酸濃度は、供試体の浸漬期間中 に低下し、初期の7日間では、1000 ppm から800 ppm に 低下したが、浸漬最終サイクルでは 1000 ppm から 900 ppm に低下し、浸漬サイクルの増加に伴い遊離炭酸濃度 の低下程度は小さくなった (pHは,各サイクルにおいて 4.8 程度から 6.0 程度に上昇した)。これは、遊離炭酸が モルタル供試体に作用することで濃度が低下し、表層の 劣化が進行するに伴い濃度の低下傾向が緩やかになるた めと推察される。このことから、溶液中の遊離炭酸量は モルタル供試体の質量減少率、すなわち劣化に影響を与 えるパラメータと考えられる。そのため、モルタル供試 体に作用する水の単位体積当たりの総遊離炭酸量を式 (1)から算出し、化学的侵食の抵抗性に関する評価指標と した。

$$S_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left(C_{n,0} + C_{n,t} \right) \cdot t \cdot \frac{1}{2} \right\}$$
(1)

ここに、Sco2:作用水の単位体積当たりの総遊離炭酸 量 $(mg/(L day)), n: サイクル数(回), C_{n,0}: n サイク$ ル初期の遊離炭酸濃度 (mg/L), $C_{n,t}: n$ サイクル終了時 の遊離炭酸濃度 (mg/L), t:1 サイクルの日数 (day)

なお,予備試験結果において,遊離炭酸濃度は炭酸水 のみを数時間静置するだけで低下する傾向が確認された ため,測定値の積算値を作用とみなすことで総遊離炭酸 量の算出を行った。

表-7 に各浸漬槽における浸漬期間0日から42日終 了時までの作用水の単位体積当たりの総遊離炭酸量,図 -12 に作用水の単位体積当たりの総遊離炭酸量と質量 変化率の関係を示す。図より、単位体積当たりの総遊離

1,100

600

0.0

-1.0

-2.0

-5.0

-2.0 掛-3.0 樹山-4.0

%

炭酸量の平方根を取ることで、全ての配合で線形近似が 良好な相関を示し, 貯留環境下にあるモルタル供試体に 対して,配合による劣化程度の違いを表現できたといえ る。このことから、本実験の範囲内では、単位体積当た りの総遊離炭酸量を指標とすることで、3 水準の遊離炭 酸濃度の違いに関わらず、貯留環境下にあるモルタル供 試体の遊離炭酸による化学的侵食が評価できるといえる。 3.3 流水環境下も含めた化学的侵食に対する抵抗性評価

次に, 貯留環境と流水環境の試験結果を比較すること で、本指標の妥当性を検討した。表-8 に流水環境とし た既往の研究^{2),3)}におけるモルタル供試体に作用する水 の単位体積当たりの総遊離炭酸量,図-13に貯留環境下 でのモルタル供試体の質量変化率および流水環境下での モルタル供試体の質量変化率2),3)をモルタル供試体に作 用する水の単位体積当たりの総遊離炭酸量で整理した結 果を示す。図より流水環境および貯留環境いずれにおい ても同様に、全ての配合で線形近似が良好な相関となっ た。このことから、本試験条件以外においても作用水の 単位体積当たりの総遊離炭酸量を用いて、モルタル供試 体の遊離炭酸による化学的侵食が評価できるといえる。 また,表-9に図-13における近似直線の傾きを示す。 表より,本研究の範囲内において,モルタル供試体に作

表-7 各浸漬槽に浸漬期間0日から42日終了時ま での作用水の単位体積当たりの総遊離炭酸量

A槽 (100ppm)

B槽 (500ppm) C槽 (1000ppm)

単位体積当たりの



用する水の単位体積当たりの総遊離炭酸量を指標とした 場合,貯留環境における劣化速度が流水環境に比べ,約 13~26倍大きいことがわかる。これは,貯留環境下では,水中の単位体積当たりに存在する遊離炭酸とモルタル供 試体のセメント水和物中に存在する Ca イオンとの反応 が,供試体表面付近において流水環境下よりも十分な時 間をかけて行われることで,より劣化が進行したためと 考えられる。一方,流水環境下では,遊離炭酸がセメン ト水和物中の Ca イオンと濃度平衡に至るまでの十分な 反応時間を与えられないため,劣化速度に差がみられた と考えられるが,この詳細なメカニズムについては研究 課題としたい。

以上のことから,モルタル供試体に作用する水の単位 体積当たりの総遊離炭酸量を指標とすることで,貯留環 境下および流水環境下にあるモルタル供試体の遊離炭酸 による化学的侵食に対する抵抗性が評価可能であると考 えられる。また,耐遊離炭酸性に着目し,簡易かつ短期 間で劣化促進試験を行う場合,流水環境に比べ貯留環境 で実験を行う方が,遊離炭酸による化学的侵食に対する 評価が厳しい条件である可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表 層部における遊離炭酸の影響について、比較的簡便で短 期間で実験が行える試験方法を提案し、また貯留環境下 および流水環境下でモルタル供試体の質量減少率を評価 できる指標について検討を行った。その結果、以下の事 項が明らかになった。

- (1) 生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表層部の劣 化評価方法を比較的簡便に短期間で評価できる劣 化促進実験方法について検討した。その結果,貯留 環境で接触面積比を 50 cm²/L とした場合,短期間 でモルタルの耐遊離炭酸性を評価する方法として, 遊離炭酸濃度を 1000 ppm とした溶液に浸漬し,評 価項目を質量変化率とすることが有効な試験方法 であると考えられる。また,遊離炭酸による化学的 侵食の作用を受けることで躯体コンクリート表層 部では,細孔構造が疎になるため耐摩耗性が低下す ることが示唆された。
- (2) モルタル供試体に作用する水の単位体積当たりの 総遊離炭酸量を評価指標とすることで, 貯留環境の

表-8 単位体積当たりの総遊離炭酸量(流水環境)

単位体積当たりの 総遊離炭酸量 (mg/L・day)		A槽(2ppm)	B槽(20ppm)	C槽 (100ppm)	
	流水環境下 (275m/day)	6.93×10 ⁵	6.93×10 ⁶	3.47×10 ⁷	
	流水環境下 (550m/day)	1.39×10 ⁶	1.39×10 ⁷	6.93×10 ⁷	

表-9 各ケースにおける遊離炭酸による劣化速度

近似直線の傾き	OPC	LPC	В	L_Ls
貯留環境	4.67×10 ⁻³	8.32×10 ⁻³	3.59×10 ⁻³	1.93×10 ⁻²
流水環境	3.51×10 ⁻⁴	4.35×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁴	1.19×10 ⁻³
貯留環境/流水環境	13.3	19.1	26.7	16.2

みでなく流水環境においても, 遊離炭酸による化学 的侵食に対する抵抗性が評価できることが確認さ れた。また,本研究の範囲内において,流水環境よ り貯留環境の方がより厳しい条件の実験である可 能性が示唆された。

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,東京都水道局の吉川正浩氏,石田直洋氏,櫛田崇 文氏,戸張岳史氏,鈴木彩加氏に様々な助言をいただい た。また,シンエイマスター株式会社の庭林雄二氏には, 実験において多くのご協力をいただいた。ここに記して 謝意を表します。

参考文献

- 間々田憲哉,大野健太郎,宇治公隆,細谷昌平: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.37, No.1, pp.625-630, 2015.
- 2) 新津祐樹、大野健太郎、宇治公隆、細谷昌平: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、コンクリート工学 年次論文集, Vol.37, No.1, pp.685-690, 2015.
- 3) 間々田憲哉,大野健太郎,宇治公隆,佐藤嘉英:高 度浄水施設の生物活性炭吸着池における躯体コン クリートの劣化評価法に関する研究,コンクリート 工学会年次論文集, Vol.38, No.1, pp.789-794, 2016.
- 小倉達也ほか: 生物活性炭吸着池における摩耗作用 が躯体コンクリート表層部に及ぼす影響, 土木学会 第71回年次学術講演会講演概要集, V-291, pp.581-582, 2016.