

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侵食に関する研究

間々田 憲哉*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・佐藤 嘉英*4

要旨：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早期劣化が報告されており、著者らの既往の研究より、劣化要因は、成分溶出に加え、活性炭内の微生物呼吸に由来する遊離炭酸による化学的侵食と活性炭の逆洗浄や壁面の高圧水洗浄による物理的作用であると推察した。本研究では、遊離炭酸による化学的侵食に着目し、モルタル供試体の劣化促進実験を行った。その結果、供試体の質量変化率および表面高さの減少は、供試体表面に接触する総遊離炭酸量に依存することを明らかにした。さらに、本成果を用いて躯体コンクリートの化学的侵食による劣化予測を行い、実施設の外観調査結果と比較した。

キーワード：高度浄水施設, 生物活性炭吸着池, 微生物代謝, 化学的侵食, 遊離炭酸

1. はじめに

高度浄水施設は通常の浄水施設では対処できないトリハロメタンなどの除去を目的に導入されており、**図-1**に示すように通常の浄水施設に加え、オゾン接触池および生物活性炭吸着池から構成される。オゾン接触池では、オゾンの酸化力で、分子量の大きい有機物を分子量の小さい有機物に分解し、生物活性炭吸着池の活性炭では、有機物を吸着し、活性炭内の微生物によって有機物は分解される。近年、これらの高度浄水施設において、躯体コンクリート表層部の早期劣化が報告されている^{1), 2)}。著者らは、生物活性炭吸着池の外観調査を実施し³⁾、生物活性炭吸着池の躯体コンクリートの劣化は表層のみであり、鉄筋までは達していないため、構造的に問題はないと考えられる。また、水質調査結果より、生物活性炭吸着池において、活性炭層表面からの深度が増すに伴い、遊離炭酸濃度が7ppmから16ppmに上昇し、pHが7.33から6.88に低下することを確認し、活性炭内の微生物の代謝活動により、炭酸が生成していることを明らかにした⁴⁾。生物活性炭吸着池では、活性炭の吸着能力維持のため、4日に1度空気と水により活性炭の逆洗浄が実施され、数年に1度の活性炭の入れ替え時には、コンクリート壁面の高圧水洗浄が実施されている。ここで逆洗浄とは、活性炭に蓄積した物質を洗浄するため、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。

以上のことから、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート

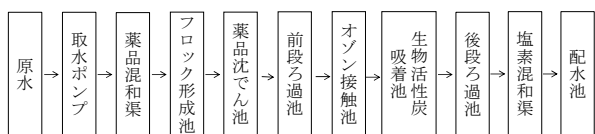


図-1 A 浄水場の浄水フロー

ト表層では、水の置換性による成分溶出に加え、微生物の呼吸や代謝活動に起因する炭酸等の酸性物質による化学的作用と、逆洗浄による摩耗の物理的作用が劣化の要因として考えられる。

本研究では、著者らの既往の研究^{3), 4)}を受けて、生物活性炭吸着池における躯体コンクリートの化学的劣化に着目し、既往の研究⁴⁾に加え、線速度を変えたモルタル供試体の劣化促進実験を行い、両者の結果を比較することで、線速度および遊離炭酸濃度がモルタル供試体に与える影響を検討した。既往の研究の劣化促進実験⁴⁾では、線速度を生物活性炭吸着池の2倍速程度で行い、遊離炭酸濃度の上昇に伴い、モルタル供試体の質量および表面高さが減少することを明らかにした。ここで線速度とは、流量を処理池の断面積で除したものであり、通過する水の速度である。さらに、本研究では、生物活性炭吸着池の活性炭内で生成される酸を、炭酸のみと仮定し、化学的侵食による躯体コンクリートの劣化予測を試みた。

2. 生物活性炭吸着池、後段ろ過池の躯体コンクリートの表層状況

図-1より後段ろ過池は、生物活性炭吸着池後に設置されている処理池のため、生物活性炭吸着池で微生物代謝により生成された酸性物質が流入する。そのため、後段ろ過池のpHは生物活性炭吸着池の処理水と同様であり³⁾、後段ろ過池の躯体コンクリートも生物活性炭吸着池と同様に、化学的侵食を受けていると考えられる。**図-2**および**図-3**にA浄水場の生物活性炭吸着池と後段ろ過池の躯体コンクリートの壁面状態を示す。A浄水場の生物活性炭吸着池と後段ろ過池の供用年数は2014年

*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 (非会員)



(a) 全体図 (b) 壁面
図-2 A 浄水場の生物活性炭吸着池の外観写真⁴⁾



(a) 全体図 (b) 逆洗浄を受けない部位
図-3 A 浄水場の後段ろ過池の外観写真

3月現在で共に9年と同一である。ここで、図-2, 3に示す生物活性炭吸着池と後段ろ過池における環境条件の違いは、摩耗による物理的作用にある。生物活性炭吸着池の壁面ではセメントペースト相が消失しており、後段ろ過池のセメントペースト相は脆弱化しているが、残存していることが分かる。また、生物活性炭吸着池および後段ろ過池で石灰石骨材の溶解が確認されている。したがって、摩耗等の物理的作用が生じていない後段ろ過池の部位は、化学的侵食のみの影響が確認できる施設である。

3. 生物活性炭吸着池を模擬したモルタル供試体の劣化促進実験

3.1 実験概要

既往の研究⁴⁾より、生物活性炭吸着池の躯体コンクリートにおける劣化要因の1つを微生物の呼吸により生成する炭酸とし、実験では、線速度、遊離炭酸濃度の異なる流水環境下にモルタル供試体を126日間浸漬した。

3.2 浸漬環境

実験条件および試験装置を表-1、図-4に示す。試験槽は、酸の濃度を変えた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)の3槽とした。遊離炭酸濃度は既往の研究⁴⁾と同様に、A槽は水道水のみ2ppm程度、B槽は実施設での最大濃度相当の20ppm、C槽は劣化促進環境の100ppmである。ここで、本研究では1ppmを1mg/Lと同義として扱う。また、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を参考に、既往の研究⁴⁾では劣化促進させるために全槽で生物活性炭吸着池の2倍速程度(550m/日 \approx 12L/min)とし、本実験では、生物活性炭吸着池相当(275m/日 \approx 6L/min)とした。

表-1 実験条件

遊離炭酸濃度	A槽 : 2ppm pH : 7.0程度	B槽 : 20ppm pH : 6.7程度	C槽 : 100ppm pH : 6.0程度
流量(線速度)	既往の研究 ⁴⁾ 12.0L/min (550m/日)	本実験 6.0L/min (275m/日)	

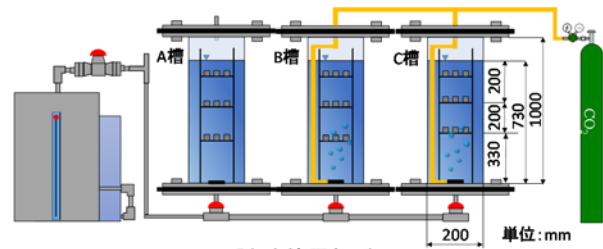


図-4 試験装置概略図

表-2 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-3 モルタル供試体の配合

配合 (置換率)	W/B (%)	B/S (%)	単位量 (g/L)						
			W	S	Ls	B			
						OPC	LPC	MPC	BFS
OPC	55	33	273	1504	—	496	—	—	—
LPC			274	1509	—	—	498	—	—
MPC			274	1508	—	—	—	498	—
B (45%)			271	1495	—	271	—	—	222
L_Ls			276	—	1519	—	501	—	—

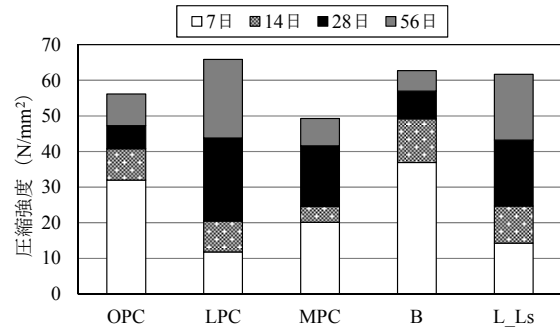


図-5 モルタル供試体の圧縮強度

3.3 供試体概要

表-2、表-3にモルタル供試体の使用材料、配合を示す。モルタル供試体に使用した材料、配合は既往の研究⁴⁾と同一である。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。供試体は各槽に5配合 \times 3段浸漬した。モルタル供試体は ϕ 50 \times 100mmの円柱型枠の中心部に ϕ 2 \times 100mmのス

ステンレス棒を配置して打設し、ダイヤモンドカッターを用いて供試体の両端部を切り出し、 $\phi 50 \times 40\text{mm}$ に成型したものを材齢 28 日から浸漬実験に供した。

図-5 にモルタル供試体の圧縮強度を示す。浸漬実験を開始した材齢 28 日において、全ての配合において既往の研究⁴⁾と概ね同等の圧縮強度であることから、浸漬時のモルタル供試体の組織は概ね同様であると考えられる。

3.4 測定項目および試験方法

表-4 に測定項目、試験方法を示す。質量変化率には、槽別に各配合 3 つの供試体における平均値を使用した。供試体表面高さの測定は、図-6 に示すように埋設したステンレス棒を初期表面高さとして、浸漬材齢 t 日におけるモルタル供試体の残存表面高さを測定し、ステンレス棒の高さとの差から算出した。表面高さの測定には、非接触三次元形状測定機（高さ分解能 $0.1 \mu\text{m}$ ）を使用した。表面高さの算出に際しては、図-6 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 供試体の平均値として求めた。

3.5 実験結果および考察

(1) 質量変化率、表面高さ

図-7 および図-8 に線速度 275m/日の質量変化率および表面高さの経時変化を示す。生物活性炭吸着池模擬 (B 槽) および劣化促進環境 (C 槽) において、質量および表面高さの減少が $L_Ls > OPC, LPC, MPC > B$ の順で大きく、配合間において既往の研究⁴⁾ (線速度 550m/日) と同様の傾向を示した。線速度 550m/日の場合、通常浄水環境下 (A 槽: 2ppm) において、浸漬材齢 56 日以降で質量変化率が横ばいもしくは減少傾向を示しており、浸漬材齢 56 日前後で、水和の進行による増加とカルシウムイオンの溶脱による質量減少が同等もしくは溶脱

の影響が卓越し始めたと推察されている⁴⁾。本実験の線速度 275m/日では、浸漬材齢 91 日前後で質量変化率が横ばいもしくは減少傾向となっていることから、水の置換性による溶脱は線速度の影響を受けると考えられる。ここで、図-9、図-10 に線速度 550m/日と線速度 275m/日の 126 日浸漬終了時の質量変化率および表面高さを示す。図-9、図-10 より、線速度 275m/日より 550m/日で質量減少および表面高さの減少が大きい。ここで、流水環境にある水を、遊離炭酸を運搬するものとする、線速度が大きくなるに伴い、モルタル供試体が接触する総遊離炭酸量が多くなる。また、図-9、10 より配合 L_Ls において、他の配合より線速度の影響が大きい。これは、石

表-4 測定項目および試験方法

測定項目	試験方法
質量変化率	浸漬材齢: 0, 7, 14, 28, 56, 70, 91, 105, 126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, 56, 91, 126日
中性化深さ	JIS A 1152に準拠 浸漬材齢: 126日

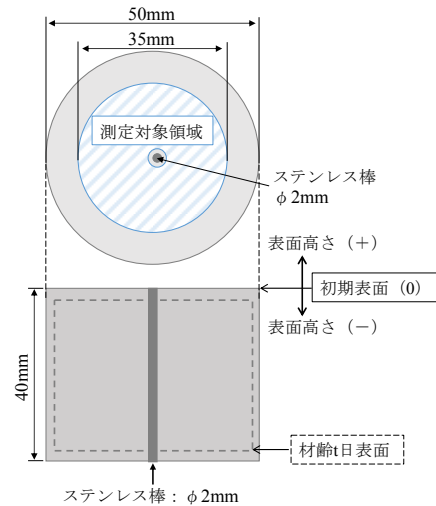


図-6 表面高さ測定

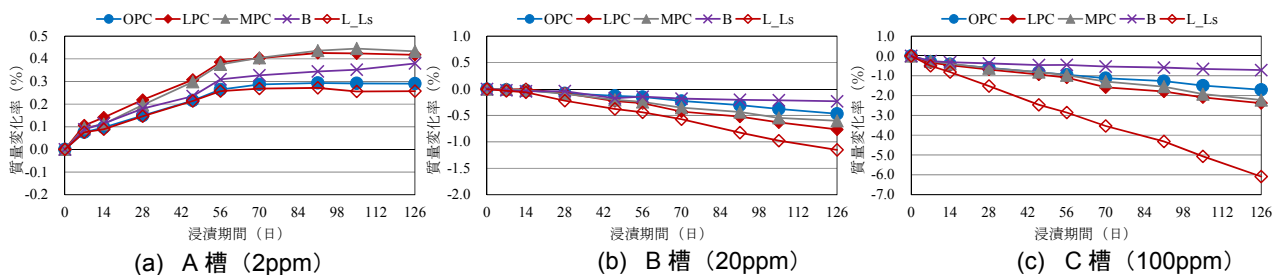


図-7 質量変化率の経時変化 (線速度 275m/日)

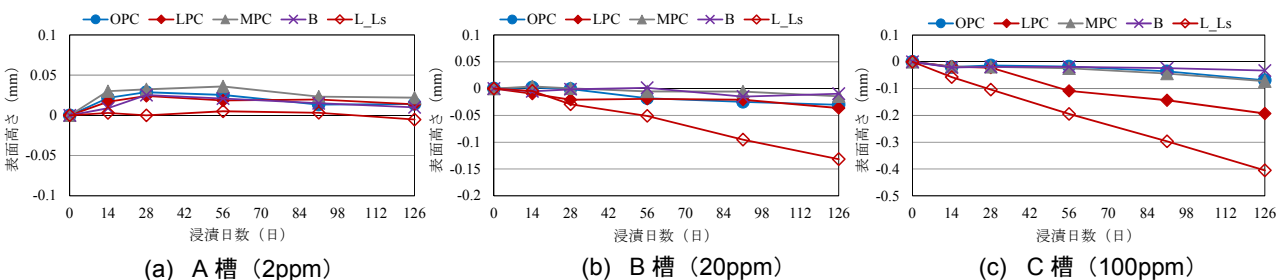


図-8 表面高さの経時変化 (線速度 275m/日)

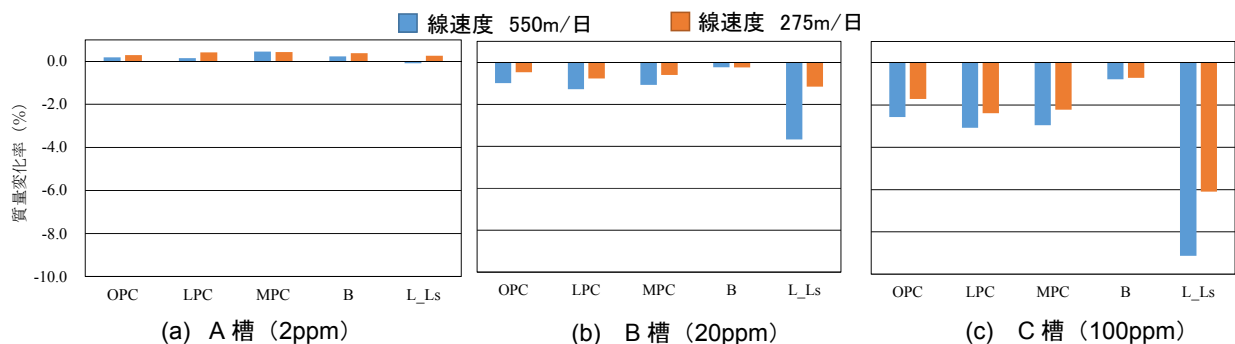


図-9 126日浸漬終了時の質量変化率

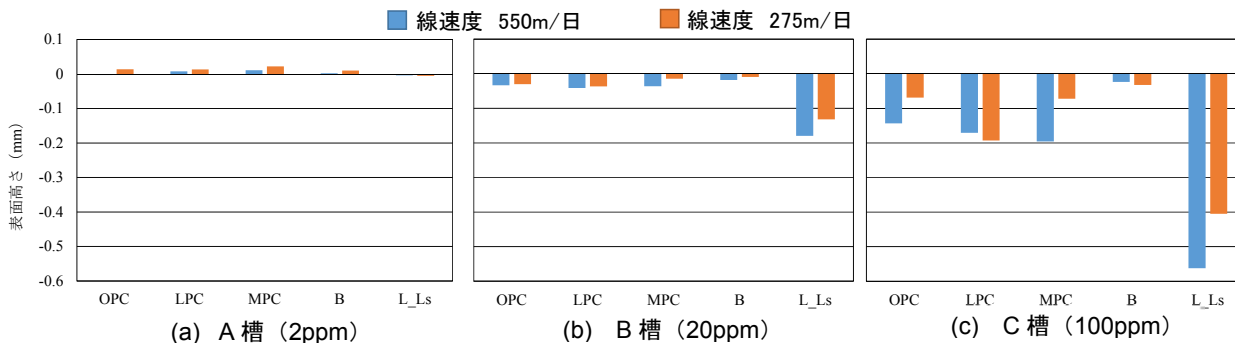


図-10 126日浸漬終了時の表面高さ

灰石骨材が溶解したことによるものと考えられ、石灰石骨材は遊離炭酸により溶解することが推察されている⁴⁾。

以上のことから、線速度550m/日と275m/日において、同一濃度における質量および表面高さの減少は、水の置換性による溶脱より、実験期間中に槽内を通過した総遊離炭酸量の大小が支配的であると考えられる。これにより、モルタル供試体が接触する遊離炭酸量が多くなることで、質量および表面高さが減少すると推察される。

(2) 中性化深さ

表-5に中性化深さ測定の結果を示す。中性化深さは配合Bを除き、線速度の大小によらず550m/日と275m/日で同様の結果となった。配合L_Lsにおいては、表面高さが0.4~0.55mm程度減少していることから、中性化部分が消失したと考えられる。このことから、表面高さの減少分だけ、線速度の大きいほうが初期表面からの中性化深さは大きくなるといえる。

(3) 供試体の外観

図-11に本実験における配合L_LsのC槽(100ppm)に浸漬した供試体の外観を示す。配合Bを除くモルタル供試体では共通して脆弱層が確認され、また、配合L_Lsでは石灰石骨材の溶解が確認された。供試体表面は生物活性炭吸着池および後段ろ過池の躯体コンクリート表面(図-2、図-3)に類似した茶褐色を呈している。

3.6 遊離炭酸の総量による質量変化率、表面高さの検討

ここでは、線速度の違いにより運搬される総遊離炭酸量をパラメータとして、質量変化率および表面高さ減少量の検討を行う。ここで、運搬される総遊離炭酸量は、

表-5 中性化深さ

配合	中性化深さ (mm)					
	既往の研究 ¹⁾ :線速度 550m/日			本実験:線速度 275m/日		
	A槽(2ppm)	B槽(20ppm)	C槽(100ppm)	A槽(2ppm)	B槽(20ppm)	C槽(100ppm)
OPC	0	0	0.5	0	0	0.5
LPC	0	0	0.5	0	0	0.5
MPC	0	0	0.5	0	0	0.5
B	0	0	0.5	0	0.5	0.5
L_Ls	0	0	0	0	0	0



図-11 配合L_Ls : C槽(100ppm)の外観写真

試験槽中にある水の単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量として取り扱う。これは、供試体の単位面積当たりの総遊離炭酸量が評価可能となるためである。

表-6に単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量、図-12および図-13に単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量と質量変化率および表面高さの関係を示す。単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量は、各槽の濃度に流量、浸漬日数を乗し、槽内の水中部分の体積で除することで求めた。

質量変化率および表面高さともに、各配合において良好な相関が得られた。SiO₂を主成分とする細骨材を用いた配合では、対数近似が良好な相関を示し、細骨材に石灰石骨材を用いた配合L_Lsでは、線形近似が良好な相関となった。この傾向の違いは、石灰石骨材の溶解が生

じたためである。

以上のことから、供試体が受ける総遊離炭酸量を指標とすることで、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が評価でき、配合によって劣化程度が異なることを表現できたといえる。

4. 生物活性炭吸着池の躯体コンクリートに対する化学的侵食の劣化予測における一考察

既往の研究⁴⁾および本実験は、生物活性炭吸着池の水質調査から得られた結果に基づいた劣化促進実験を行い、これらの結果が躯体コンクリート表層における化学的劣化を模擬していると考えられる。また、単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量はモルタル供試体の質量減少および表面高さの減少に寄与していることが示された。このことから、生物活性炭吸着池の遊離炭酸による化学的侵食の劣化予測が可能であると考えた。そこで、A浄水場の生物活性炭吸着池の劣化予測を試みる。

4.1 A浄水場の生物活性炭吸着池の概要

A浄水場の生物活性炭吸着池の模式図を図-14に示す。A浄水場の生物活性炭吸着池の躯体コンクリートは、低熱ポルトランドセメントが使用されており（W/C=55%）、また、粗骨材として石灰石骨材が使用されている。生物活性炭吸着池は活性炭層の部分躯体コンクリートが遊離炭酸と接触する部分とみなす。A浄水場の生物活性炭吸着池は、供用年数9年（2014年3月現在）、有効ろ過面積105m²、活性炭層2.5m、線速度250m/日である。

実施設にて測定した遊離炭酸濃度および供用開始時からの単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量を表-7に示す。遊離炭酸濃度においては、既往の研究³⁾より季節を考慮して、春（4～6月）を12ppm、夏（7～9月）を16ppm、秋（10～12月）を8.5ppm、冬（1～3月）を5ppmとして、A浄水場の生物活性炭吸着池の単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量を算出し、図-13における配合L_Lsの近似式に代入することにより生物活性炭吸着池の躯体コンクリート壁面の表面高さ減少量を求めた。

4.2 生物活性炭吸着池の化学的侵食による劣化予測結果と劣化メカニズム

実施設における総遊離炭酸量から求めた表面高さの予測結果を図-15に示す。図より実施設の表面高さの減少の予測値は0.3mm程度となった。この結果より、本研究のC槽（遊離炭酸濃度：100ppm）の劣化促進環境は実施設の化学的侵食において、線速度275m/日で12年、線速度550m/日で25年分に相当すると考えられる。ここで、生物活性炭吸着池のコンクリート表層部では、骨材が露出していることから（図-2）、表面高さの減少は予測値より大きいと考えられる。これは、実施設において逆洗浄や高圧水洗浄が実施されていることから、摩耗による

表-6 単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量

単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量 (g/L)	A槽 (2ppm)	B槽 (20ppm)	C槽 (100ppm)
既往の研究 ⁴⁾ 線速度550m/日	190	1899	9494
本実験 線速度275m/日	95	949	4747

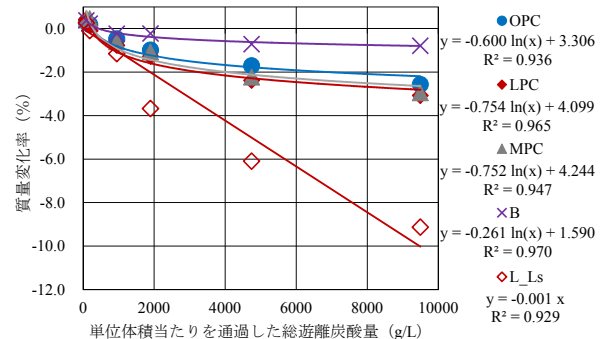


図-12 総遊離炭酸量と質量変化率の関係

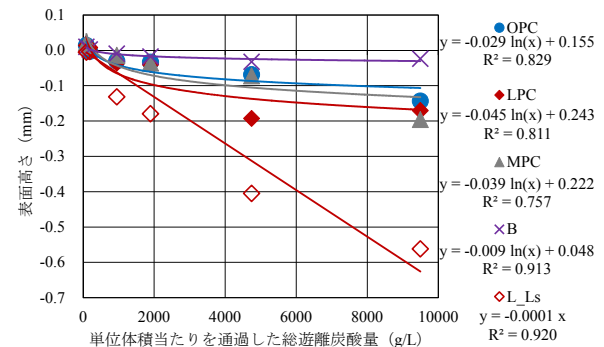


図-13 総遊離炭酸量と表面高さの関係

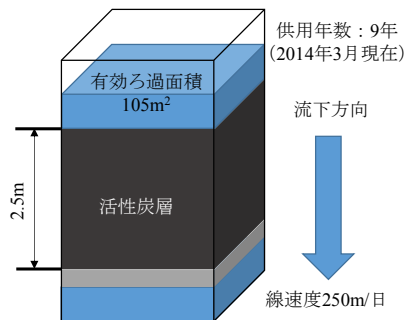


図-14 A浄水場の生物活性炭吸着池模式図

表-7 A浄水場の単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量

A浄水場	春 (4～6月) 水温：19.3℃	夏 (7～9月) 水温：25.1℃	秋 (10～12月) 水温：21.7℃	冬 (1～3月) 水温：4.4℃
遊離炭酸濃度 (ppm)	12	16	8.5	5
供用9年で単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量 (g/L)	3416.4			

物理的作用の影響により生じた差であると考えられる。一方、摩耗の物理的作用を受けていない部分の後段ろ過池（図-3）では、セメントペースト相は残存しているものの、一部では骨材の露出も見受けられることから、表層は減少している。本実験は劣化要因のうち、化学的侵食を対象としているが、後段ろ過池の表層状況を踏まえれば、実現象を十分に模擬しており、実験結果は妥当性を有すると考えられる。ここで、渡嘉敷ら⁵⁾は、電気的

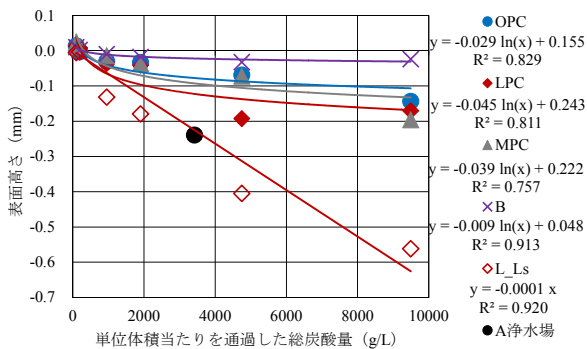


図-15 A 浄水場の化学的侵食の劣化予測値

促進法でカルシウムイオンを溶脱させたセメントペースト硬化体、健全な硬化体で水噴流摩耗試験を実施している。ここでは、カルシウム溶脱試験体の表層付近の摩耗速度は、未溶脱領域の最大19.4~27.6倍であり、溶脱作用により耐摩耗性の低下が著しいことを明らかにしている。このことから、生物活性炭吸着池の躯体コンクリートにおいては、図-16に示すように、表層が遊離炭酸により化学的侵食を受け脆弱化し、その後逆洗浄や高圧水洗浄の摩耗作用により脆弱層の剥落が繰り返すことで、躯体コンクリートの壁面が断面減少すると考えられる。

以上のことから、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表層は遊離炭酸の化学的侵食により耐摩耗性が低下している可能性が考えられる。さらに、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表層の劣化予測の精度向上のためには、本実験のデータの蓄積および摩耗の定量的検討が必要である。

5. 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化学的侵食に関して、劣化要因を炭酸とした劣化促進実験を実施し、実施設の化学的侵食による劣化予測を試みた。

- (1) 既往の研究⁴⁾および本実験は生物活性炭吸着池の化学的侵食を十分に模擬していた。また、供試体に接触する遊離炭酸量を、単位体積当たりを通過した総遊離炭酸量とすることで、水の置換性による溶脱より、総遊離炭酸量が供試体の質量、表面高さの減少に寄与していることを明らかにした。
- (2) 本研究における、遊離炭酸による化学的侵食の劣化予測値は、実施設より小さい。このことから、生物活性炭吸着池の躯体コンクリートの劣化メカニズムは、化学的侵食により表層が脆弱化し、脆弱化層を物理的作用である摩耗で掻きとることの繰り返しと推察される。今後、劣化予測の向上のためには、本実験のデータの蓄積および摩耗の定量的検討を行う必要がある。

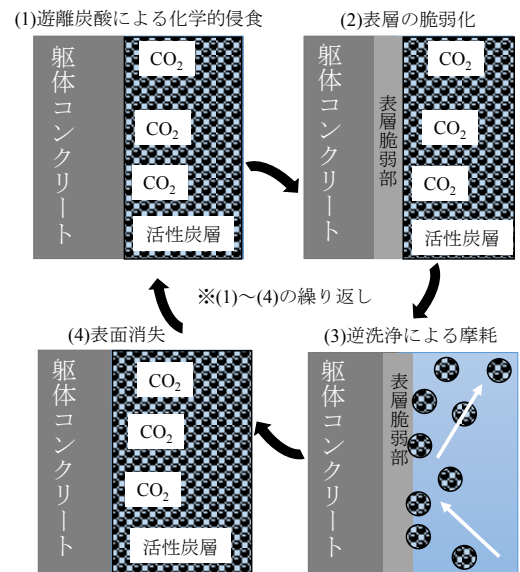


図-16 生物活性炭吸着池の躯体コンクリートの劣化メカニズム

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、東京都水道局の石田直洋氏、榎田崇文氏、戸張岳史氏に様々な助言をいただいた。シンエイマスター株式会社の根本徹氏、庭林雄二氏には、多くのご協力をいただいた。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, pp903-908, 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 渡嘉敷勝, 森充広, 中矢哲郎, 森丈久: カルシウム溶脱したペースト硬化体の耐摩耗特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.719-724, 2010.