

論文 生物活性炭吸着池に適用する補修用モルタルの耐久性評価方法に関する検討

石垣 飛翔*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・上野 敦*4

要旨：高度浄水施設の生物活性炭吸着池の躯体コンクリートにおいて、劣化の進行が他の水利構造物と比較して大きいことが報告されており、補修の需要が高まっている。筆者らが試作した水噴射式摩耗試験装置および提案した試験方法を採用することで、配合により質量変化率に差が生じることが確認され、モルタル補修材の耐遊離炭酸性および耐摩耗性を評価できる可能性が示唆された。また、提案手法の一般化を目的として、使用する摩耗装置および供試体保護方法を変更し更なる合理化を検討した。

キーワード：生物活性炭吸着池、補修用モルタル、耐遊離炭酸性、耐摩耗性、水噴射式摩耗試験

1. はじめに

我が国において最初に高度浄水施設が導入されてから20年以上経過した現在では、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構成される高度浄水施設の躯体コンクリート健全性調査が実施されており、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表層部における早期劣化が報告されている^{1),2)}。東京都も同様に高度浄水施設を導入し、水質の向上に向けた取り組みを継続しているが、生物活性炭吸着池において写真-1に示すようにセメントペースト相の消失に伴う粗骨材の露出、さらには石灰石骨材の溶解が確認され、一般的な水利構造物よりも劣化が促進されていることが懸念されている^{3),4)}。生物活性炭吸着池の経年劣化の主要因は、一般的な水利構造物と同様にCaイオンの溶脱であると考えられるが、活性炭内の微生物代謝により発生する遊離炭酸により、通常の浄水施設と比較してCaイオンの溶脱が促進されると考えられる。Caイオンが溶脱し、コンクリート表面が脆弱化した後、活性炭のろ過抵抗回復のために4日に一度実施される活性炭の逆流洗浄に伴う摩耗作用および数年に一度実施されるコンクリート壁面の高圧水洗浄による摩耗作用がコンクリート表面に生じることにより、表層消失が加速度的に生じると考えられる^{3),4)}。

高度浄水施設の耐久性向上および施設の延命化が望まれ、特に生物活性炭吸着池における躯体コンクリート表層部の補修が急務である。補修には、生物活性炭吸着池特有の劣化現象に抵抗性を持ち、水質に影響を及ぼす可能性の低い無機系の補修材が適していると考えられ、吹付け施工による補修用モルタルを用いた補修が適すると考えられる。既往の研究^{4),5)}では、躯体コンクリートの化学的侵食を模擬した炭酸水による促進試験を実施し、

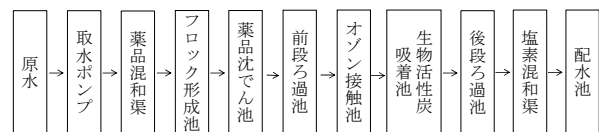


図-1 浄水場の浄水フロー例



(a) 全体図 (b) 壁面の劣化の様子

写真-1 生物活性炭吸着池の外観写真⁴⁾

モルタル供試体の変状、質量減少および表面高さ減少傾向から、試験方法の有効性を示した。また、摩耗作用においては、渡嘉敷ら⁶⁾によって開発された水噴射式摩耗試験方法を参考に、モルタル供試体の耐摩耗性を検討し⁷⁾、その妥当性を確認した。

本研究では既往の研究⁷⁾において検討した、補修用モルタルの遊離炭酸水への浸漬による劣化促進試験⁵⁾および水噴流によって摩耗作用を与える水噴射式摩耗促進試験⁷⁾を並行して実施し、遊離炭酸による化学的侵食への抵抗性および摩耗作用に対する物理的抵抗性を同時に評価するための試験方法を提案した。さらに、本試験方法の一般化および合理化を目指し、試験方法をより簡便かつ合理的に実施するための検討を行い、適用性を考察した。

2. 生物活性炭吸着池に適用する補修用モルタルの性能評価方法の検討

本章では、既往の研究⁷⁾で実施した補修用モルタルの性能評価方法を、Case1として概説する。

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

2.1 供試体概要

表-1, 表-2 にモルタル供試体の使用材料および配合を示す。吹付施工の観点から、水結合材比を 50%, 砂結合材比を 2 程度として設計した。また、15 打フロアの目標値を $170 \pm 10 \text{mm}$ として減水剤により制御した。ここで、配合 OPC, MPC, LPC は躯体コンクリートに使用実績のある結合材を選定し、そのモルタル部分相当と見立てた。一方、配合 B45-W は、結合材に耐遊離炭酸性が期待できる高炉スラグ微粉末を使用し^{5), 8)}、さらにひび割れ抵抗性向上を目的とした膨張材と、コテ仕上げ性の向上を目的に珪灰石 (WN) を混合し、生物活性炭吸着池に適用する補修モルタルの品質基準の設定を目的としたものである。

2.2 実験方法

図-2 に実験フローを示す。モルタル用ミキサで練り混ぜたフレッシュモルタルを $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ の鋼製型枠に打込み、翌日に脱型後、 20°C で水中養生した。材齢 28 日に、モルタル供試体を水中から取り出し、断面が $40 \times 40 \text{mm}$ 、長さが 80mm となるようにコンクリートカッターにて成形した。その後、型枠底面 (試験面) 以外の 5 面にエポキシ樹脂を塗布した (写真-2)。材齢 29 日および材齢 30 日においてエポキシ樹脂を塗布し、計 3 層の厚塗りを行った。その後、エポキシ樹脂の硬化を待ち、材齢 37 日から材齢 49 日までモルタル供試体を 20°C の水中に保管し、十分に吸水させることで質量の安定を図った。

劣化促進試験では、化学的作用を与えるモルタル供試体 (炭酸供試体) とこれを与えないモルタル供試体 (健全供試体) に分け、それぞれ 3 体ずつ用意した。炭酸供試体は常時二酸化炭素を散気した炭酸水 (濃度 1000ppm 以上 ($\text{pH}4.8$ 程度)、接触面積比 $50 \text{cm}^2/\text{L}$) に 6 日間浸漬し、健全供試体は、水道水中に 6 日間静置した。その後、以下に示す水噴射式摩耗試験を行い、これを 1 サイクルとして 6 サイクルまで継続して行った。

図-3 に水噴射式摩耗試験の概要を示す。水噴射式摩耗試験では遊離炭酸により変質した表層のみを摩耗によって取り除き、健全な部分は摩耗しない程度の摩耗環境が望ましいと考え、表-3 に示す条件で試験を行った。供試体試験面とノズルとの距離を 70mm とし、ノズルの移動速度を 20mm/s としてノズルを供試体長さ方向に移動させ、摩耗面に一様に水があたるようにした。なお、供試体への摩耗作用は、ノズルを供試体長さ方向に速度 20mm/s で移動させる行為を 1 回とし、この操作を 40 回繰り返した。また、使用したノズルは、開口部の形状が楕円であり、ノズルから出る水は扇形である。なお、試験では 40 回の水噴射摩耗終了後に、表面乾燥状態の供試体の質量を測定した。

圧縮強度試験用のモルタル供試体の作製は、JIS R 5201

表-1 使用材料

種別	記号	名称	密度 (g/cm^3)	備考
結合材	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16	
	MPC	中庸熱ポルトランドセメント	3.21	
	LPC	低熱ポルトランドセメント	3.22	
細骨材	BFS	高炉スラグ微粉末4000ブレン (石こう無添加)	2.91	比表面積 $3500 \sim 5000$
	S	三河産珪砂	2.60	
保水剤	WN	珪灰石	2.80	CaSiO_3
	MC	メチルセルロース	-	
減水剤	Ad	メラミンスルホン酸系減水剤	-	

表-2 モルタルの配合

配合記号	水結合材比 W/B	砂結合材比 S/B	単位量 (g/L)											
			水		細骨材			結合材				膨張材	保水剤	減水剤
			W	S	WN	OPC	MPC	LPC	BFS	材	MC	Ad		
OPC	0.5	2.23	298	1328	-	596	-	-	-	-	-	-	0.96	1.92
MPC		2.19	302	1324	-	604	-	-	-	-	-	-	0.96	-
LPC		2.19	302	1325	-	-	604	-	-	-	-	-	0.96	-
B45-W		2.12	294	1213	38	324	-	-	265	86	0.96	2.79		

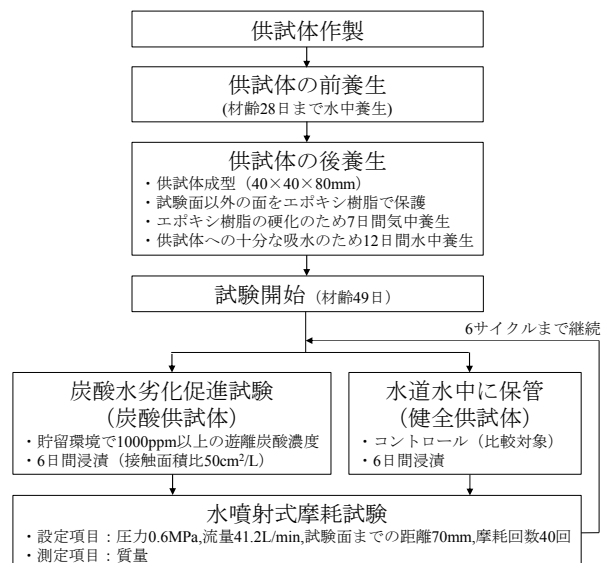


図-2 実験フロー



写真-2 エポキシ樹脂塗布の様子

に準拠し、一水準につき 3 体とした。翌日に脱型した後 20°C の水中にて養生し、材齢 28 日および 91 日にて試験を行った。

2.3 実験結果および考察

図-4 に各供試体の圧縮強度を示す。材齢に関わらず、躯体コンクリート相当のモルタルに見立てた配合 OPC, MPC, LPC と比較して、B45-W が最も高い圧縮強度を示した。

図-5 に、健全供試体および炭酸供試体の質量変化率の経時変化を示す。健全供試体では、全ての配合で質量が増加した。これは、図-4 に示した圧縮強度試験結果

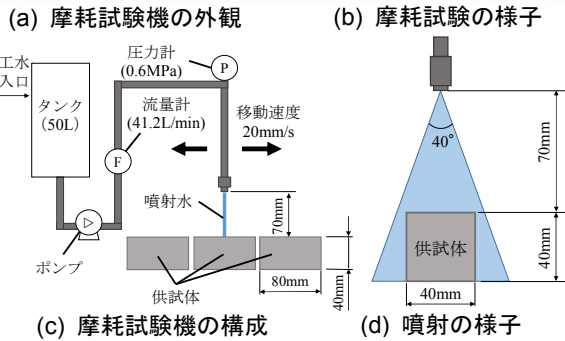


図-3 水噴射式摩耗試験概要

を含めて考察すると、水和反応が試験期間中にも継続していることが示唆される。よって、健全供試体では、摩耗による質量減少よりも、浸漬中での水和反応による質量増加の方が卓越したと考えられる。一方、炭酸供試体は、2 サイクル目 (14 日) までは質量の変化は小さく、やや増加傾向にある。これは、遊離炭酸による化学的侵食作用および水噴射による摩耗作用の影響よりも水和反応の継続あるいは吸水による影響がやや大きかったためと推察される。しかし、3 サイクル目 (21 日) 以降からは全ての配合で質量が減少傾向を示し、配合 OPC, MPC, LPC ではサイクル数の増加に伴い質量減少率が加速度的に大きくなり、配合 B45-W では緩やかな減少傾向を示した。B45-W は OPC, MPC, LPC と比較して耐遊離炭酸性を有しており、モルタル供試体表層部における脆弱層の形成が小さいと考えられる^{5), 8)}。健全供試体の摩耗作用による質量減少は小さく、ほぼ無視できることから、与えた摩耗作用は健全部を摩耗できるほどではない。よって炭酸供試体における質量変化率は、化学的侵食によって生じた脆弱層の消失によるものと考えられる。つまり、耐遊離炭酸性が大きいモルタル供試体ほど、脆弱層の形成が少なくなり、結果として耐摩耗性も大きくなると考えられる。本試験では、質量変化率を指標とすることで、耐遊離炭酸性および耐摩耗性を有する配合 B45-W と、有していない配合 OPC, MPC, LPC に明確な差が生じることを確認した。これより、耐遊離炭酸性および耐摩耗性を評価することが可能であると考えられる。よって、今回行った試験は、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表層部に適用する補修モルタル選定のための試験方法として妥当であることが示唆された。

3. 性能評価試験方法の合理化に関する検討

2 章で提案した性能評価試験方法の一般化と合理化を

表-3 摩耗試験条件

圧力 (MPa)	流量 (L/min)	噴射距離 (mm)	ノズル移動速度 (mm/s)	噴射角度 (°)	摩耗回数 (回)
0.60	41.2	70	20	40	40

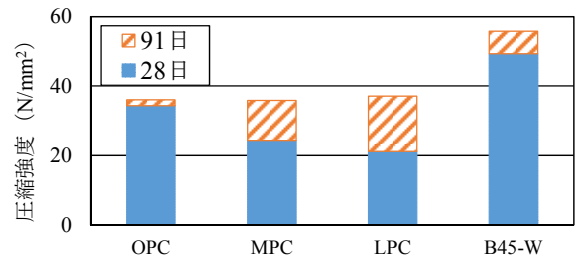
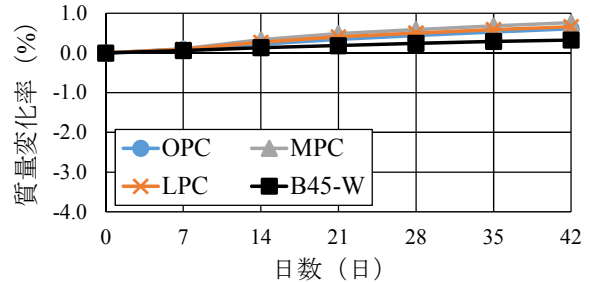
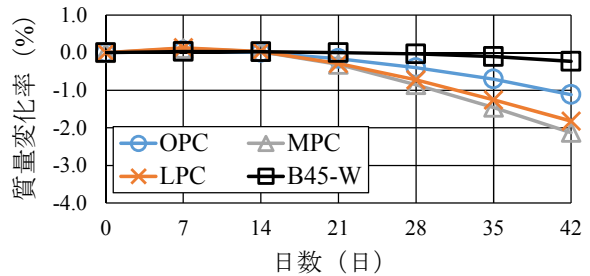


図-4 圧縮強度



(a) 健全供試体



(b) 炭酸供試体

図-5 Case1 の質量変化率の経時変化

目的として、以下に示す試験方法について検討した。まず、2 章で示した試験方法の課題と改善方法について述べる。なお、モルタル供試体の使用材料および配合は表-1、表-2 に示したものに統一した。

3.1 供試体の保護方法の変更

2 章で示した性能評価方法では、摩耗試験面を 1 面のみとするために、試験面を除く 5 面にエポキシ樹脂を塗布することで保護し、遊離炭酸による化学的侵食作用を与えないようにした。この時、エポキシ樹脂が硬化するまで 7 日間気中保管し、浸漬試験時の吸水による質量変化への影響を小さくするために 12 日間水道水中に供試体を静置した。この工程を短縮することができれば、試験日程の短縮が可能であるため、写真-3 に示すような内径が 37×77mm のステンレス製の中空角パイプを長さ 40mm に切断し、型枠として使用した。型枠をコンクリート用の合板に固定し、フレッシュモルタルを打込んだ。打込みから 3 時間後に型枠上面に厚さ 1.5mm のステンレス製の板を、接着剤を用いて取り付けた。翌日から材齢 28 日まで水中養生を行い、その後試験に供した。な

お、試験面は型枠底面とし、供試体寸法は 2.1 のものとほぼ同様の寸法とした。

3.2 摩耗装置の変更

試験方法の確立に際し、図-3(a)に示すような水噴射式摩耗試験機を試作した。つまり、現在、性能評価試験を行うためにはこの水噴射式摩耗試験機を使用することが前提となる。しかし、試験方法の普及に関して、この水噴射式摩耗試験機以外の水噴射装置を用いても同様の性能評価が可能であることが望ましい。そこで、この水噴射式摩耗試験機を、汎用性が高く入手が容易な機器に変更することが可能であれば、本試験方法普及の一助になると考えた。本検討では、従来の試験機と同様の噴射形状をしていること、入手が容易であることなどから、表-4 および写真-4 に示すような圧力および流量、噴射角度を有する家庭用の高圧洗浄機を使用して実験を行った。この機器を使用する際の摩耗条件として、健全な供試体が摩耗されない程度の作用力を与えるために予備実験を行い、噴射距離および摩耗回数を決定し、それをもとに試験を実施した。

(1) 予備実験概要

使用材料および配合は表-1、表-2 の配合 OPC とした。なお、材齢 28 日における圧縮強度は 29.9N/mm² であり、1 サイクルにおける試験方法は図-2 に示すとおりとした。摩耗試験は表-5 に示す条件にて行い、試験条件ごとに No.1~No.5 とした。噴射距離および摩耗回数を選定では、健全な供試体が摩耗されない程度かつ化学的作用を与えたモルタル供試体の質量減少ができるだけ大きくなるようにした。

(2) 予備実験結果

図-6 に噴射距離 90mm における 1 サイクル間の摩耗回数の影響について検討した結果を示す (No.1~No.3)。炭酸供試体は摩耗回数が増加するにつれて質量変化率が大きくなる傾向が確認された。一方、健全供試体は摩耗回数 40 回で質量変化率が-0.2%となり、目視観察による空隙径の増加および細骨材の露出を踏まえると、健全部分まで摩耗していると考えられた。また、塗布していたエポキシ樹脂片の飛散が確認され、質量変化率に影響を及ぼす可能性があると考えられたため、噴射距離 90mm としたこの試験条件は摩耗作用が大きすぎると判断した。

次に、供試体に作用する力を小さくするために、噴射距離を 90, 150, 180mm に変化させて検討した結果を図-7 に示す (No.3~No.5)。なお、摩耗回数は 10 回とした。炭酸供試体は、噴射距離が大きくなると、質量変化率が小さくなることが確認された。また、健全供試体は噴射距離 150mm, 180mm ともに質量変化率が小さく、摩耗試験後の目視観察においても、表面に骨材の露出は確認できなかったことから、摩耗されていないと判断した。

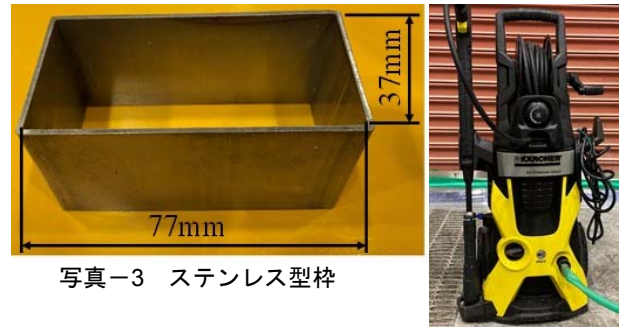


写真-3 ステンレス型枠

写真-4 家庭用の高圧洗浄機

表-4 摩耗装置の性能および摩耗試験条件

圧力 (MPa)	流量 (L/min)	噴射距離 (mm)	ノズル移動速度 (mm/s)	噴射角度 (°)	摩耗回数 (回)
12.0	7.2	150	20	24	10

表-5 予備実験における摩耗試験条件

摩耗条件	最大圧力 (MPa)	流量 (L/min)	ノズル移動速度 (mm/s)	噴射距離 (mm)	摩耗回数 (回)
No.1	12	7.2	20	90	40
No.2					25
No.3					10
No.4				150	
No.5				180	

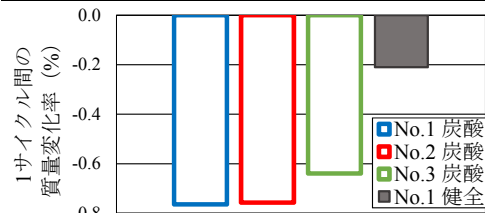


図-6 噴射距離 90mm の質量変化率

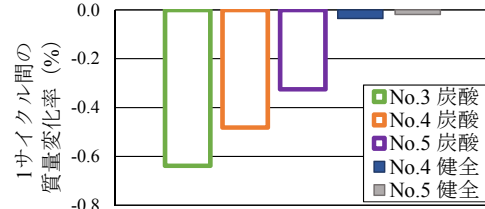


図-7 摩耗回数 10 回の質量変化率

以上より、予備実験の検討範囲内において、健全供試体がほぼ摩耗されず、炭酸供試体の質量変化率がより大きかった噴射距離 150mm、摩耗回数 10 回が適切であると考えられ、これを摩耗条件に選定した。

3.3 実験結果および考察

以下、実験結果の記号について、保護方法を変更したものを Case2、摩耗装置を変更したものを Case3 とする。

(1) 圧縮強度

図-8 に各配合の材齢 28 日における圧縮強度を示す。配合 MPC, LPC はほぼ同様の圧縮強度を示し、B45-W は最も高い圧縮強度を示した。また、図-4 と比較すると、配合 OPC, B45-W において圧縮強度が低くなっていることが確認できる。

(2) 遊離炭酸濃度

モルタル供試体を炭酸水中に浸漬した際の遊離炭酸濃度および水温の推移を図-9 に示す。なお、遊離炭酸

濃度はフェノールフタレイン溶液と水酸化ナトリウム溶液を使用した滴定により求めた。2 サイクル目終了時を除き、浸漬期間において遊離炭酸濃度が 1000ppm を上回っており、遊離炭酸濃度が高い状態を保ちながら浸漬できていることがわかる。また、Case2 および Case3 の場合では、遊離炭酸濃度の変動が Case1 よりも大きい、Case1 と比較して 3 サイクル (21 日) までは Case2 および Case3 の方が遊離炭酸濃度は低く、それ以降は高くなっている。3 サイクル以降の遊離炭酸濃度の上昇は、水温低下に伴う遊離炭酸濃度の上昇と考えられる。

(3) 質量変化率

図-10(a)に Case2 の質量変化率を示す。サイクルの増加に伴い、質量変化率が減少傾向を示し、配合 OPC, MPC, LPC の減少量が同程度であるのに対し、配合 B45-W はそれよりも緩やかな減少を示した。この変化の違いは 1 サイクル目から確認され、配合 B45-W は耐遊離炭酸性および耐摩耗性を有することが改めて確認された。

図-10(b)に Case3 の質量変化率を示す。3 サイクル目までは全配合で同様の質量減少となり、4 サイクル目以降に配合 OPC, MPC, LPC の質量減少量が増加し、配合 B45-W の質量減少量は小さくなった。

Case2 および Case3 を Case1 (図-5(b)) と比較すると、6 サイクル終了時の質量変化率は Case2, Case3, Case1 の順に大きくなる傾向を示し、Case2, Case3 は特に初期 (1, 2 サイクル) における質量変化率が大きいことがわかる。Case2 に関しては、モルタル供試体の圧縮強度の違いおよび試験開始材齢の違いが影響していると考えられる。前述のとおり、材齢 28 日における圧縮強度は OPC, B45-W において低くなっている。また、Case2 は試験開始材齢が Case1 よりも 21 日早いため、試験開始材齢における圧縮強度も低い。圧縮強度が低くなると耐遊離炭酸性が低下し、それにより耐摩耗性も低下すると考えられる。サイクル初期において、圧縮強度が低い Case2 は作用する遊離炭酸濃度が Case1 よりも低いが、化学的侵食の影響を Case1 よりやや受けやすい傾向があると考えられる。これにより、Case1 よりも試験面を覆っているセメントペースト部の変質領域が大きくなり、摩耗作用によって消失した結果、サイクル初期における質量変化率が大きくなったと考えられる。一方 Case3 は、前述した圧縮強度の違いによる影響のほかに、過大な摩耗作用が作用したことが影響していると考えられる。配合 B45-W は耐遊離炭酸性および耐摩耗性を有しているにも関わらず、Case3 の 1, 2 サイクルにおける質量変化率は全配合で同様の減少傾向を示した。つまり、予備実験では健全部は摩耗しないと判断したが、実際はセメントペースト相の変質領域だけでなく、健全な領域も摩耗するほどの力が作用したため、耐遊離炭酸性および耐摩耗性の程度によ

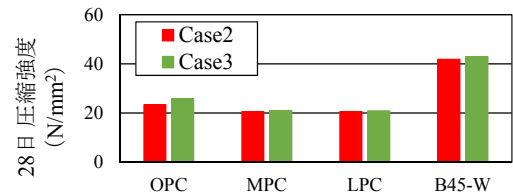


図-8 各配合の材齢 28 日における圧縮強度

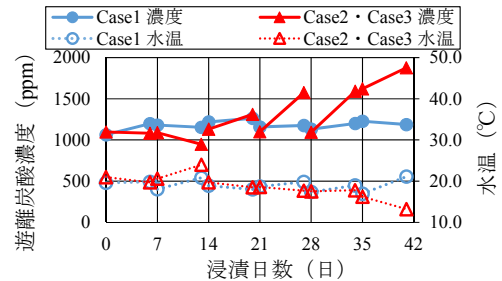
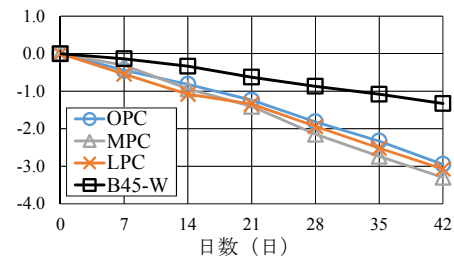
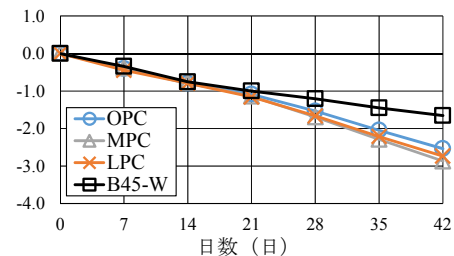


図-9 遊離炭酸濃度および水温の推移



(a) Case2 の質量変化率



(b) Case3 の質量変化率

図-10 質量変化率の経時変化

らずモルタル供試体が摩耗され、質量変化率が同様になったと考えられる。また、4 サイクル目以降は配合特性による差が生じているが、これは、浸漬試験中における水和反応の継続により、健全部が摩耗されない程度まで圧縮強度が増加したため、耐遊離炭酸性および耐摩耗性の影響が卓越したと考えられる。

以上より、摩耗装置や供試体の保護方法を変更することで、摩耗の傾向および程度は異なるが配合特性に応じた質量変化率が得られることを確認した。

(4) 適用性

ここまでの結果をもとに、Case2 および Case3 は Case1 と同様に性能評価試験として適切であるか検討する。まず Case2 では、試験日程の短縮を目的に供試体保護方法を変更して検討を行った。ここで、遊離炭酸水への浸漬による質量変化率を次の式(1)より算出した。

$$W_n = \frac{M_n - M_{n-1}}{M_{n-1}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 W_n : 試験 n サイクルにおける遊離炭酸水への浸

漬による質量変化率 (%), M_n : 試験 n サイクルにおける摩耗前の質量 (g), M_{n-1} : 試験 n-1 サイクルにおける摩耗後の質量 (g) である。ただし, $1 \leq n \leq 6$ とする。

結果を図-11 に示す。図より、配合間およびサイクル間で変動が大きく、非常に不安定な質量変化率となっている。これは、ステンレス製の型枠に接着剤を用いてステンレス製の板を取り付けたが、試験の進行とともにステンレス型枠と板の間に隙間が発生し、その隙間から浸漬水が出入りしたため、質量変化率が不安定になったと考えられる。よって、ステンレス製の板の接着方法を改善することで、更なる試験の安定性が期待できると考えられる。

一方、Case3 は予備実験で検討した摩耗条件が適切ではなかった可能性がある。その結果、質量減少の傾向および6サイクル終了時の質量変化率が Case1 と比べ異なる結果となった。よって、Case1 との比較をする際に同じ性能評価基準を用いることができず、新たな基準を設ける必要がある。本検討では、合理化を目指し摩耗装置を変更したが、試験個々に応じた基準を設定する必要があり、現段階では Case3 による評価は難しいと考えられる。しかしながら、摩耗作用を Case3 よりも小さくする、すなわち噴射距離を大きくするなどの工夫を施すことで改善できる可能性が高いと推察される。

以上より、本検討の範囲内では、Case2 および Case3 は代替案として適しているとは言えず、現段階では Case1 の試験方法を用いて生物活性炭吸着池に適用する補修用モルタルの性能評価をすべきであるが、Case2 および Case3 の改善が今後必要であると考えられる。

4. まとめ

本稿で取りまとめた研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 1000ppm程度の遊離炭酸による化学的作用および圧力0.6MPa、流量41.2L/minの水噴射による摩耗の物理的作用を交互に与えた試験を実施し、モルタル供試体の質量変化率を指標とした結果、配合特性による差が生じ、生物活性炭吸着池の補修用モルタルの耐遊離炭酸性および耐摩耗性を評価することが可能であると考えられる。よって、今回行った試験は、生物活性炭吸着池の躯体コンクリート表層部に適用する補修モルタル選定のための試験方法として妥当であることが示唆された。
- (2) 提案した性能評価試験方法の代替案として供試体の保護方法や摩耗装置を変更したが、更なる改良の余地があり、本検討の範囲内では既往の性能評価方法が最も性能評価を適切に行える試験方法であると考えられる。

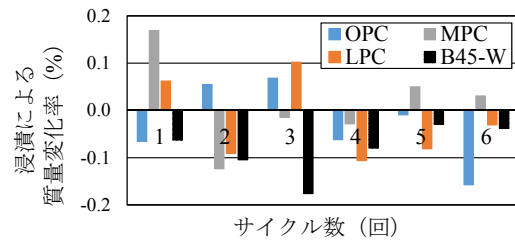


図-11 遊離炭酸水への浸漬による質量変化率

謝辞

本論文の研究成果の一部は東京都水道局との共同研究によるものである。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

- 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) 小倉達也, 大野健太郎, 宇治公隆, 北野守康: 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手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.667-672, 2017.
- 6) 渡嘉敷勝: 農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究, 農村工学研究所報告, No.52, pp.1-57, 2013.3
- 7) 石垣飛翔ほか: 高度浄水施設の生物活性炭吸着池に適用する補修用モルタルの性能評価方法に関する検討, 土木学会第 74 回年次学術講演論文集, V-144, 2019.
- 8) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.789-794, 2016.