廃瓦骨材と塩分を混合使用したコンクリートの力学的特性

広島大学大学院	学生会員	○山中　翔太
広島大学大学院	正会員	半井健一郎
広島大学大学院	学生会員	Macharia.M.Mwangi
広島大学大学院	正会員	小川由布子
広島大学大学院	フェロー会員	佐藤　良一

1. はじめに

近年，持続的発展可能な社会の構築のため，廃棄物の再資源化の重要性が高まっている．例えば日本の屋根瓦は，20年から30年で交換する必要があり[1)]，建て替えやふき替えの際に，大量の廃棄物となる．そのほとんどが埋め立て処分されており，その量は年間15,000tにも上る．しかしながら，特有の形状から埋め立て効率が悪く，再資源化が必要とされている[2),3)]．

重松ら[4)]は，高炉セメントB種（BB）を結合材として廃瓦骨材（PCA）を内部養生材として使用したコンクリートにおいて，強度増進および収縮低減といった良好な結果を報告している．最近では，島根県において， PCAを使用したコンクリートによって，ボックスカルバートが施工された[5)]．

一方で，大規模な災害によっても大量の廃棄物が発生する．2011年に発生した東日本大震災により大量のがれきが排出されたことで環境省は，同年，極力リサイクルすることを盛り込んだマスタープランを掲げた[6)]．これ以降，震災で発生したがれきは2014年3月現在，ほぼ処理が完了しており，宮城県では，がれきの処理は終了している[7)]．このがれき処理において，瓦は不燃物に分別され，薬剤処理およびセメント固化した上で粉砕し，再生砕石として利用されたものもあるが，塩混じりの瓦など，最終処分されたものも少なくない．

そこで濵本ら[8)]は，BBを結合材に用い，塩分を含有した廃瓦粗骨材（PCCA）を置換したコンクリートにおいて強度増進および収縮低減を報告している．しかしながら，これらの効果に対するPCAの骨材寸法やPCAに供給する塩分量の影響は明らかになっていない．

本研究では，BBを結合材とし，PCAの寸法および塩分量を変化させ，コンクリートの力学的特性を検討した．なお，塩害を回避するため，無筋コンクリートへの使用に供するものとする．

2. 実験概要

2.1　配合

表－1 に使用材料を示す．セメントには高炉セメントB種（BB）を用いた．PCAは下準備として，水道水に7日間吸水させた．塩分を含有したPCAは，105℃の乾燥炉で1日間の乾燥を行い，絶乾状態とした．その後，14%の塩水に7日間吸水させた．塩水の濃度は，石州瓦の塩害試験（オーストラリア　ニュージーランド規格 AS NZ 4456）を参考に定めた．配合を**表－2**に示す．水セメント比はすべて50%に統一した．PCCAの置換率は粗骨材に対し 40vol.%置換し，廃瓦細骨材（PCFA）に置換する場合は，粗骨材に置換した場合と吸水量が等しくなるよう，48vol%置換とした．PCAは塩分を含有したPCCAおよびPCFA（GPs，SPs）と塩分を含有しないPCCAおよびPCFA（GP，SP）を用意した．塩分量の違いを比較するため， 練混ぜ水は，塩分を含まないもの（W），濃度の薄いもの（Wsw），PCAに吸水させた塩分量と同量の塩水（Wsm），および濃度の濃いもの（Wss）の4水準とした．さらにPCAの効果を検討するためにPCAを使用しないもの（0）を用意した．配合名は，**表－2** に示すように，【高炉セメントB種（水セメント比50）-骨材種類-練混ぜ水種類】となっており，太字は塩分含有を示す．

供試体は打ち込み後，20℃，恒温室にて材齢7日まで封緘し，その後20℃，相対湿度60%の恒温恒湿室にて気中曝露した．

表－1　使用材料

使用材料	種類	特性	記号
セメント	高炉B種セメント	密度：3.04g/cm^3，比表面積：3780cm^2/g 酸化マグネシウム：3.41%，三酸化硫黄：2.06%，強熱減量1.98%，塩化物イオン：0.010%	BB
細骨材	砕砂（広島県東広島市黒瀬産）	密度：2.58g/cm^3，吸水率：1.63%	S
	廃瓦（島根県産石州瓦）	密度：2.26g/cm^3，吸水率：8.97%	PCFA
粗骨材	砕石（広島県東広島市黒瀬産）	密度：2.61g/cm^3，吸水率：0.64%	G
	廃瓦（島根県産石州瓦）	密度：2.27g/cm^3，吸水率：9.08%	PCCA
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体	AD
	空気連行剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE
塩化ナトリウム	天日塩（香川県産・徳島県産）	塩化ナトリウム　99%以上	Salt
水	水道水（広島県東広島市上水道）		W

表－2　配合表

配合記号	W/C	s/a	単位量(kg/m^3)						添加量(C×%)		添加量(kg/m^3)
			セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤		塩化ナトリウム
	%	%	BB	W	PCFA	S	PCCA	G	AD	AE	Salt
BB(50)-0-W	50	45	340	170	0	781	0	967	0.2	0.04	0
BB(50)-0-Wsm				170	0	781	0	967	0.3	0.4	24.6
BB(50)-0-Wss				**170**	0	781	0	967	0.2	0.06	23.8
BB(50)-GP-W				170	0	781	336	580	0.4	0.1	0
BB(50)-GPs-W				170	0	781	**336**	580	0.4	0	7.52
BB(50)-GP-Wsm				**170**	0	781	336	580	0.1	0.2	7.52
BB(50)-GP-Wss				**170**	0	781	336	580	0.4	0	23.8
BB(50)-GP-Wsw				**170**	0	781	336	580	0.4	0.1	0.42
BB(50)-SP-W				170	328	406	0	967	0.3	0.05	0
BB(50)-SPs-W				170	**328**	406	0	967	0.4	0.05	9.42
BB(50)-SP-Wsm				**170**	328	406	0	967	0.4	0.05	9.42

試験は，圧縮強度試験，水銀圧入試験，長さ変化試験，水分逸散量試験，の4種類を実施した．なお，質量減少率は，以下の式(1)のように定義した．

$$\Delta W = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \qquad (1)$$

ここで，ΔW：質量減少率，W：任意の材齢における質量，W_0：材齢 7 日における質量を表す．

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

図－1 に，材齢 7 日における塩分量と圧縮強度の関係を示す．塩分を供給しない場合，PCA の内部養生効果により，無置換と比較して圧縮強度が増加した．一方で，塩分を廃瓦あるいは練混ぜ水によって供給した場合，いずれの配合においても，圧縮強度が増加し，増加の程度は塩分量が多くなるほど大きくなった．この塩分供給による初期強度の増加は，既往の研究 [9]で報告されている，塩化ナトリウムによる凝結および硬化の促進作用が要因と考えられる．すなわち，C_3S の加水分解を促進し，その後の反応により，カルシウムイオンの過飽和度が高まり，C-S-H の水和物の結晶核の析出と結晶の成長が進むことで，凝結が促進されることが原因であると考えられる [9]．また，C_3A もしくはモノサルフェートとの反応により，フリーデル氏塩が生成される．さらに，C-S-H を主とした水和物に塩分が固定され，空隙が充填されたこと [10]などによると考えられる．

PCA の種類の影響に関しては，PCFA に置換した場合よりも PCCA に置換した場合に，圧縮強度が増加した．これは，PCCA から内部養生水がセメントペーストに供給されることで，特に粗骨材周辺部での水和反応が促進され，普通コンクリートの弱点となる遷移帯が改質されたためと推察される．骨材周りの遷移帯は骨材寸法が大きくなるほど厚くなるために粗骨材界面の影響が大きく [11]，PCFA の置換の効果が顕著にならなかったものと考えられる．

3.2 細孔径分布

累積細孔容量と材齢 7 日の圧縮強度の関係を**図－2** に示す．50nm 以上の空隙量が多いほど，圧縮強度が低下する傾向が確認された．特に PCA 内から塩分を供給した場合に，50nm 以上の空隙量が少なくなっていることから，コンクリート内部が緻密になっていることがわかった．

3.3 長さ変化

(1) 骨材寸法が長さ変化に及ぼす影響

廃瓦骨材の置換および骨材寸法がコンクリートの長さ変化に及ぼす影響を**図－3** に示す．ただし，膨張を正，収縮を負としている．PCA に置換した場合には，PCA 無置換に比べ，収縮が大幅に低減している．これは，PCA からの内部養生水の供給に加え，内部養生水から塩水が供給されたために蒸気圧降下が起こり，水分の蒸発が妨げられたことが一因であると考えられる．また，廃瓦骨材の種類の影響を，材齢 60 日程度の段階での収縮ひずみで比較すると，無置換と比較し，PCCA に置換した場合では約 70%，PCFA に置換した場合では約 40%の収縮が低減していることがわかった．

(2) 塩分量が長さ変化に及ぼす影響

塩分量が長さ変化に及ぼす影響の経時変化を**図－4** に示す．**図－3** と同様に，膨張を正，収縮を負としている．少量の塩分ではほとんど影響がないが，塩分量が多い場合には，収縮ひずみが顕著に低減されることがわかった．

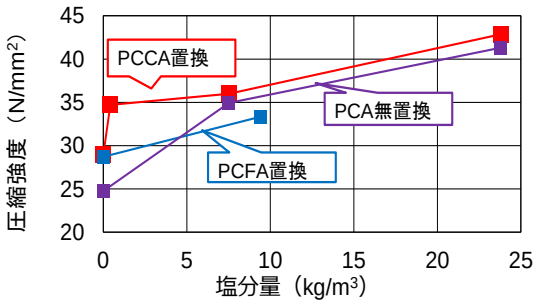
3.4 水分逸散

(1) 骨材寸法が水分逸散に及ぼす影響

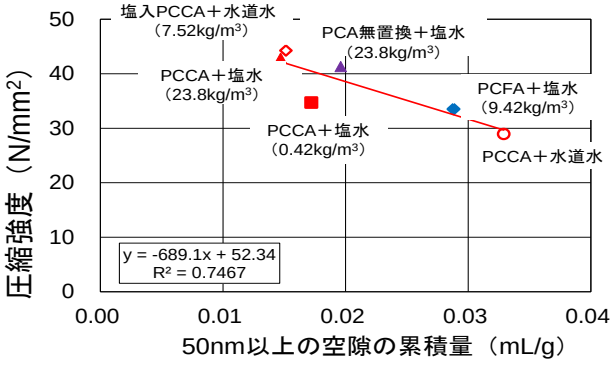
PCA の置換あるいは骨材寸法の違いに関し，水分逸散を示す質量減少率の経時変化を**図－5** に示す．PCA を置換することで質量減少率は大きくなった．これは，コンクリート質量の約 1%を占める PCA の内部養生水の一部が逸散したためであると考えられる．

(2) 塩分量が水分逸散に及ぼす影響

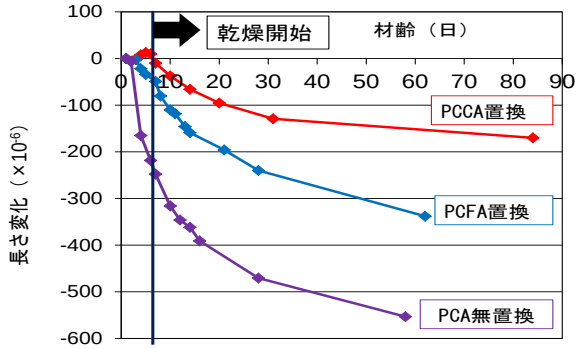
塩分量が水分逸散の経時変化に及ぼす影響を**図－6** に示す．質量減少率はコンクリート中の塩分量の多さに依存することがわかり，材齢 50 日では，最も塩分量の多い GPWss は，塩分を含有しない GPW を比較した場合，約 15%の水分逸散を低減していることがわかった． これは，蒸気圧降下により，水分の蒸発が妨げられたためである．さらに，蒸気圧降下は溶質の質量 mol 濃度に比例して大きくなる．ゆえに，塩分量が多くなるにしたがい，水分逸散が妨げられたと考えられる．



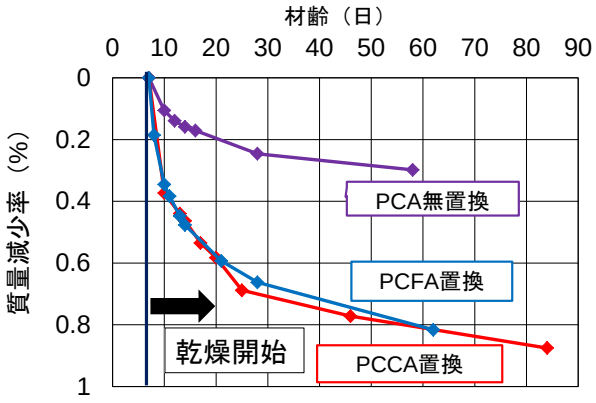
図－1　塩分量が圧縮強度に及ぼす影響（材齢 7 日）



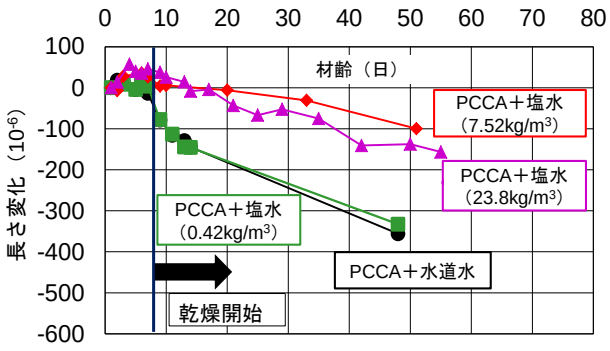
図－2　累積細孔容量と圧縮強度の関係（材齢 7 日）



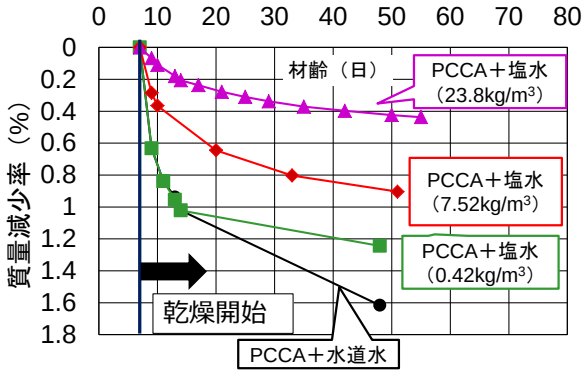
図－3　骨材寸法が及ぼす長さ変化の経時変化
（含有塩分量 7kg/m^3 程度）



図－5　水分逸散の経時変化
（含有塩分量 7kg/m^3 程度）



図－4　長さ変化の経時変化
（廃瓦粗骨材（PCCA）使用時）



図－6　塩分量が及ぼす水分逸散の経時変化
（廃瓦粗骨材（PCCA）使用時）

結論

本研究の結果，以下の知見が得られた．

(1) 圧縮強度は，塩分量が多くなるにつれて増加し，増加の割合は PCCA に置換した際に顕著であった．

(2) 細孔径分布は，塩分を供給した場合に 50nm 以上の空隙量が少なくなり，それに伴って強度が増加した．

(3) 材齢 60 日における収縮ひずみは，PCCA に置換した場合，無置換に比べ約 70%低減した．PCFA に置換した場合は，約 40%低減した．また，塩分量が多い場合に収縮ひずみおよび水分逸散は低減された．

5.　参考文献

1) 国土交通省：中古住宅に係る建物評価手法の改善のあり方検討委員会，配布資料－2，期待耐用年数の導出及び内外装・設備の更新による価値向上について，2013.08

2) 瓦粉砕物を骨材とした被覆ブロックの試作，島根県，産業技術センター，研究報告，第 43 号，pp.34~41，2013

3) 兵庫県瓦工事事業組合（http://www.hyogo-yane.com/）

4) 重松 明ほか：高炉 B 種コンクリートに関する廃瓦粗骨材による内部養生効果の検討，コンクリート工学会年次論文集，Vol.31，No.1，pp.205~210，2009

5) 日経コンストラクション：「廃瓦骨材」使用でコンクリートの強度向上，2014.01.14

6) 環境省：東日本大震災に係る災害廃棄物の処理方針（マスタープラン） 2012.12.14 発表

7) 環境省：災害廃棄物処理の進捗状況（3 県沿岸市町村（避難地域を除く）），2014.02.21 更新

8) 濵本 夏美ほか：塩分含有廃瓦骨材によるコンクリートの内部養生効果，コンクリート工学会年次論文集，Vol.35，No.1，pp.643~648，2013

9) 大川 裕：セメント・コンクリートの凝結コントロール　技術の確立とその応用研究，鳥取大学，博士論文，1998

10) 石田 剛朗ほか：コンクリート中における塩化物イオンの反応・移動のモデル化，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.861~866，2004

11) 内川 浩ほか：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討：コンクリート工学論文集，第 4 巻第 2 号，pp.1~8，1993.7