

論文 廃瓦骨材と塩分を併用したコンクリートの圧縮強度に及ぼす早期脱型の影響

山中 翔太*1・半井 健一郎*2

要旨: 近年, 循環型社会の構築の重要性が高まっている。これまで, 廃瓦骨材を粗骨材の一部に使用し, 練混ぜ水に塩水を使用したコンクリートの材料特性を検討し, 圧縮強度の増大などの良好な結果を確認してきた。本研究では, 特に初期強度の増進が大きかったという過去の成果に着目し, コンクリートを早期脱型した場合の物性について検討した。その結果, 廃瓦骨材と塩分を併用したコンクリートでは, 標準的な養生を行った普通コンクリート(廃瓦骨材無置換かつ水道水練り)より, 水和反応が促進されることで空隙構造が緻密化した。これにより, 最大で, 普通コンクリートの1.5倍の圧縮強度を得ることができた。

キーワード: 養生, 早期脱型, 初期強度, 廃瓦骨材, 塩分

1. はじめに

コンクリート構造物の品質確保には, 一般に, 土木学会コンクリート標準示方書¹⁾等の基準を満たす十分な養生が必要とされているが, 十分な養生期間を確保すると, 工期や費用が増えることが問題となる。そのため, 養生期間を短縮しても品質を確保できるコンクリート材料が開発されれば, これらの問題を解決することができると考えられる。この新しいコンクリート材料のひとつとして, 廃瓦と塩分を併用したコンクリートを検討することとした。

廃瓦は, その再利用法のひとつとして, コンクリート用骨材の一部としての活用が提案され, これまでに, コンクリートの内部養生効果の観点からの研究が進められてきた。例えば重松ら²⁾は, 高炉セメントを結合材とし, 廃瓦骨材(以下PCA)を粗骨材の一部として用いたコンクリートで, 内部養生効果により強度の増進や収縮の低減という良好な結果が得られることを報告している。最近では, PCAを使用したコンクリートを用いた, ボックスカルバートが施工された³⁾。

一方で近年, 高炉セメントやフライアッシュセメントといった, 副産物を添加した混合セメントと豊富な水資源である海水を練混ぜ水として使用したコンクリートの研究が行われており, 竹田ら⁴⁾により, 初期強度および長期強度の向上が報告されている。さらに, 前述した2研究を融合した研究として, 濱本ら⁵⁾により, 塩分を含有したPCAをコンクリート用骨材として用いる研究が行われた。両者の併用による強度の増進および収縮の低減という効果が確認されており, 特に高炉セメントを結合材とした際に, 普通ポルトランドセメント(OPC)を結合材としたものよりも, 効果が大き

くなることを報告している。

さらに, 著者らは, PCAと塩分を併用する塩分量を変化させた検討を行い, 塩分量が大きい場合に, 特に初期強度の向上と収縮ひずみの低減の効果が大きくなることを報告した⁶⁾。これは, 早期脱型しても品質を低下させることのないコンクリートの実現を示唆するものである。ただし, これまでのPCAと塩分を併用したコンクリートに関する検討は, 材齢7日まで封緘養生後, 気中曝露したコンクリートについてのみであった。すなわち, 材齢1日といった, ごく若材齢にて早期脱型したコンクリートの材料特性に関する検討は行われていない。

そこで本研究では, 早期脱型したコンクリートの材料特性に及ぼすPCAと塩分の複合効果を, 特に圧縮強度に着目して検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

コンクリートの使用材料および配合を, 表-1および表-2にそれぞれ示す。高炉セメントB種(BB)を使用し, 水セメント比は50%に統一した。骨材の一部として使用する廃瓦骨材(PCA)は, 既往の研究⁷⁾と同じく, 瓦製造工程時に形状等で不良品として廃棄されたものである。7日間吸水させた後, 表乾状態にしたものを使用した。PCAの影響を検討するため, PCAを普通粗骨材(碎石)の全容量に対し40vol%置換したもの(Gp)と, 無置換のもの(Gn)を設定した。また, 塩分は練混ぜ水中から混合するもの(Ws)を基本の実験条件とし, 練混ぜ水の塩水の濃度は, コンクリート中の塩分量が0kg/m³, 0.15kg/m³, 0.42kg/m³, 7.52kg/m³となる

*1 広島大学 大学院工学研究科 社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

*2 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 准教授 博士(工学) (正会員)

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	BB
		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%	
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
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%	PCA
混和剤	AE減水剤 標準型（I種）	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AD
	AE剤（I種）		AE
塩分	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 コンクリートの配合表

骨材置換方法	配合名	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)					添加量	添加量	
				水 W	セメント BB	粗骨材		細骨材	kg/m ³	C×%	
						G	PCA	S	塩分 Salt	混和剤	
廃瓦骨材無置換	GnWn	50	45	170	340	968	0	782	0	0.4	0.003
	GnWs(0.15)					968	0	782	0.15	0.5	0.0035
	GnWs(7.52)					968	0	782	7.52	0.5	0.003
廃瓦粗骨材置換	GpWn	50	45	170	340	581	336	782	0	0.5	0.0035
	GpWs(0.15)					581	336	782	0.15	0.4	0.0035
	GpWs(0.42)					581	336	782	0.42	0.4	0
	GsWn					582	336	782	7.52	0.4	0
	GpWs(7.52)					581	336	782	7.52	0.4	0

ように定めた。また、塩分の混合方法の検討を行うため、コンクリート中の塩分量が、7.52 kg/m³となるように、PCAの内部に濃度14%の塩水を事前に吸水させたもの(Gs)を設定した。さらに、配合名において、Wnは塩分が0kg/m³を示し、塩分を混合させたものはWsの後に塩分量を記した。JIS A 5308では、コンクリート中の塩分量の総量は、Cl換算で0.30kg/m³以下にするよう規定されており、骨材中の塩分量を加味して規制値内となるように塩分量が0.15kg/m³のものも設定した。これ以外の高濃度の配合については、無筋コンクリートへの適用を想定した。なお、フレッシュ性状の目標値は、スランプを8.0±2.0cm、空気量を4.5±1.5%とした。

2.2 練混ぜおよび養生条件

練混ぜには一軸式強制練りミキサーを使用し、練混ぜ時間は合計6分30秒とした。練混ぜ後、スランプ、空気量および練り上がり温度を測定し、フレッシュ性状を確認した。

打込んだコンクリートは、打込み面をラップフィルム、濡れウェスで封緘し、材齢1日または7日まで室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室にて養生した。その後同室内で気中曝露（以下1日脱型[1A]または7日脱型[7A]）し、所定材齢まで静置した。また、一部の供試体は、材齢1日で脱型後、20℃にて水中養生（[W]）を行った。以後養生について、特に記載のない場合は、1日脱型[1A]を示す。

2.3 実験概要

(1) 圧縮強度試験

JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠し、φ100mm×200mmの円柱供試体を用いて、材齢1日、7日、28日（一部の供試体では12時間、3日を追加で）で圧縮強度試験を行った。

(2) 水銀圧入試験

1) サンプル採取

圧縮強度試験後のφ100mm×200mmの供試体の表面および破壊の著しい箇所を除いた箇所のコンクリート供試体の底面から1cm付近を粉砕し、粉砕したものから、粗骨材およびPCAを除去し、モルタル部のみを抽出した。採取したモルタルは、ふるいの目開きが5.0mmのふるいを通過し、2.5mmのふるいに残ったものをサンプルとし、アセトンに1日浸けて水和反応を止めた。その後脱気槽にて24時間の真空脱気を行い、デシケーター内に保存した。試料採取時のマイクロクラックの発生や破砕した粗骨材の混入などが測定結果に影響を及ぼした可能性もあるが、本研究では無視した。

2) 水銀圧入

水銀圧入式ポロシメーターを用いて、採取したサンプル1.4~1.5g中の4nm~200μmの範囲の細孔径分布を測定した。

(3) 示差熱・熱重量同時分析（TG-DTA）

(2)1)で採取したサンプルを遊星式ボールミキサーで粉砕し、示差熱・熱重量同時分析装置で結合水量と水

酸化カルシウム含有量を測定した。また、コンクリート中の骨材量を、セメント協会コンクリート専門委員会報告(F-18法)に準拠して測定し、正味のセメントペースト中の結合水量と水酸化カルシウム含有量を計算した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-3に示す。スランプは目標値よりも大きなものがあったが、打込み時に支障はなく、硬化物性への影響も小さいと判断した。

3.2 圧縮強度試験

3.2.1 高炉セメントを用いたコンクリートにおける養生の影響

各養生条件における、水道水練り PCA 無置換コンクリート (GnWn) の圧縮強度変化を図-1に示す。材齢1日で脱型した場合、材齢28日での圧縮強度は、同材齢の7日脱型 [7A] の約 80% 程度、水中養生したもの[W]の約 60%にとどまる結果となった。佐藤ら⁸⁾や壇ら⁹⁾などの既往の研究結果と同様の傾向であり、特に BB を使用したコンクリートでは十分な養生を行う必要があることを意味する。

3.2.2 PCA や塩分が圧縮強度に及ぼす影響

PCA もしくは塩分を混合し、1日脱型したコンクリートの圧縮強度を図-2に示す。まず、材齢1日での圧縮強度は、PCA と塩分を併用した場合を無置換 (GnWn) と比較すると、塩分量が小さい場合 (Ws(0.15), Ws(0.42)) には、やや小さく、塩分量が 7.52kg/m³である3配合 (GsW, GnWs(7.52), GpWs(7.52)) は、やや大きくなった。材齢1日における塩分混合による水和反応促進効果は明確ではなかった。次に、材齢7日以降の圧縮強度は、PCA 置換したもの (Gp) と無置換のもの (Gn) および塩分を混合したもの (Ws) と塩分量が 0kg/m³のもの (Wn) によって、圧縮強度の発現が大きく変わることが確認できた。これをそれぞれの場合に分けて検討する。

(1) PCA 置換のみを行った場合

PCA で置換したもの (GpWn) の材齢7日および材齢28日での圧縮強度は、無置換のもの (GnWn) と比較した場合、ともに約 1.1 倍となった。これは PCA の内部養生効果²⁾によるものである。すなわち、セメントペーストの乾燥により、セメントペーストと PCA 間に湿度勾配が発生し、PCA の内部水が PCA 周辺に染み出し、PCA 周辺の未水とセメントが水和反応したためと考えられる。

(2) 塩分混合のみをした場合

PCA 無置換で塩分を混合したもの (GnWs(7.52)) と無置換の GnWn を比較すると、材齢7日および28日における圧縮強度はともに約 1.5 倍となった。これは、塩分を混合したことにより塩化物イオンが水和反応を促進するためであり、高温養生において、セメントの水和反応が材齢初期

表-3 フレッシュ性状

	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
目標	8.0±2.0	4.5±1.5	
GnWn	8.0	4.0	21.3
GnWs_0.15	10.5	4.3	15.4
GnWs_7.52	9.5	4.5	25.5
GpWn	7.5	4.7	24.9
GpWs_0.15	8.5	3.4	15.8
GpWs_0.42	7.5	3.5	16.2
GpWs_7.52	8.5	4.0	17.2
GsW	7.0	4.2	17.6

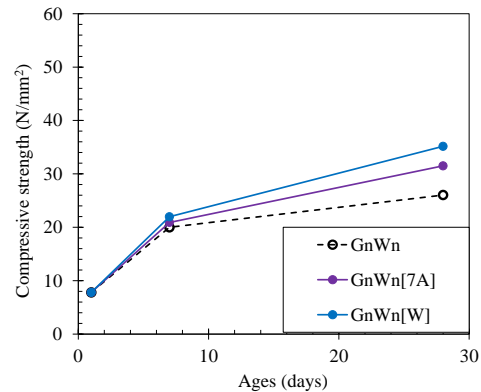


図-1 圧縮強度の経時変化 (無置換コンクリート)

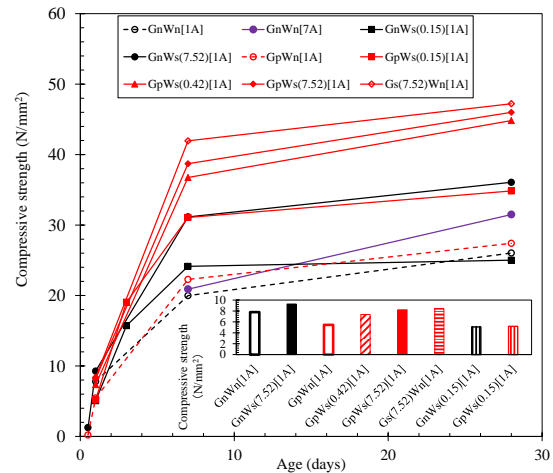


図-2 廃瓦や塩分が圧縮強度に及ぼす影響

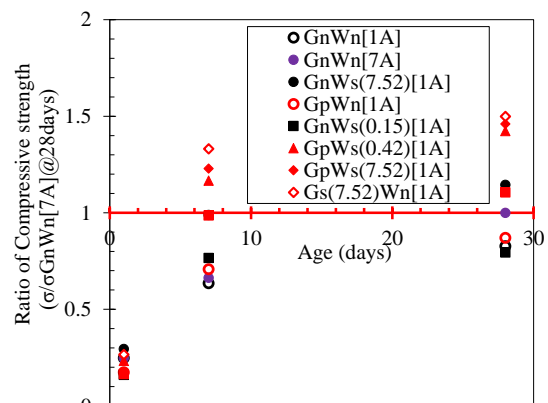


図-3 無置換コンクリート (7日脱型, 28日強度) との強度比

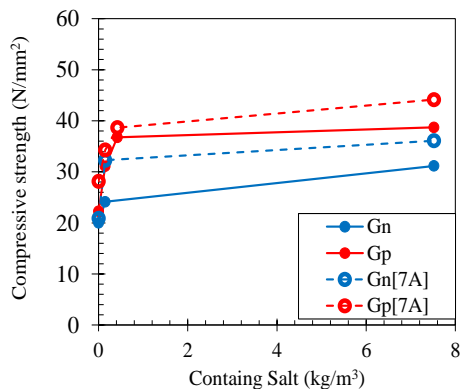


図-4 塩分量が圧縮強度に及ぼす影響（材齢 7 日）

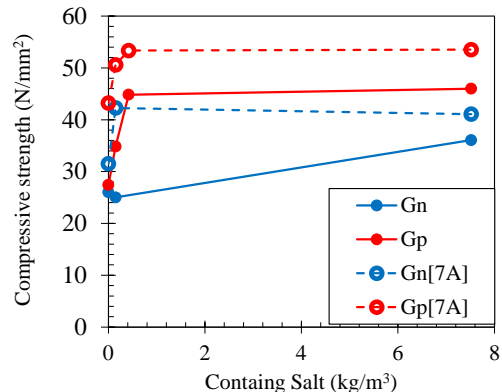


図-5 塩分量が圧縮強度に及ぼす影響（材齢 28 日）

に促進されることに類似している¹⁰⁾。この結果、組織が緻密になったと考えられる。さらに、塩化物イオンが内部水中に溶解し、蒸気圧降下が発生し、水分の逸散が妨げられたと推察される。以上より、塩分を混合した場合に、圧縮強度が増大したと考えられる。

(3) PCA 置換および塩分混合を行った場合

次に、PCA 置換および塩分の混合を併用したものの (GpWs(0.42), GpWs(7.52), GsWn) と GnWn とを比較すると、材齢 7 日および材齢 28 日での圧縮強度はそれぞれ平均で 1.7 倍程度になった。これは、(1)および(2)に示した、PCA または塩分の効果の単純な組合せよりも大きく、以下のような、両者の相乗効果によるものと考えられる。まず、塩分により、水和反応が促進され、組織が緻密になるとともに、内部水に溶けた塩分により、蒸気圧効果が発生し、水分が逸散しにくくなる。さらに、PCA の内部養生効果が起こることで、滞りなく、水和反応が進行する。以上の現象により、圧縮強度が大きく増加したと考えた。一方、練混ぜ水または廃瓦中という塩分混合方法による差は、ほとんどなかった。

3.2.3 養生期間と PCA と塩分の併用が圧縮強度に及ぼす影響

材齢 7 日までを封緘とした、GnWn (以下 GnWn[7A]) の材齢 28 日における圧縮強度を基準としたときの、そのほかの 1 日脱型したコンクリートの各材齢における圧縮強度比を図-3 に示す。材齢 1 日での圧縮強度比は、塩分量が 0kg/m³、もしくは 0.15kg/m³ 配合では強度は 15% 程度であるのに対し、塩分量が 7.52kg/m³ (Ws(7.52)) のものでは 40% 程度であった。横室ら¹¹⁾の研究では塩分量が大きいほど、カルシウムシリケート水和物の生成を促進することにより、反応速度が大きくなることが報告されている。これは、塩分量が大きい場合は、早期脱型でも圧縮強度が発現することを示唆している。本研究でも同様のことが言え、材齢初期での強度発現には PCA ではなく、塩分量が大きく寄

与していることが確認できた。

次に材齢 7 日以降について検討する。GpWn では材齢 28 日での圧縮強度は GnWn[7A] の 90% に過ぎない。これは、材齢 1 日で脱型した場合には、PCA の内部養生効果が良好でないことが示唆される。また、GnWs(7.52) の圧縮強度は、GnWn[7A] の 1.1 倍に向上した。さらに PCA 置換し、塩分を混合した場合の圧縮強度は、GnWn[7A] の最大で 1.6 倍となった。これは、PCA の内部養生効果と塩分による水和反応の促進により、圧縮強度が大幅に増加したと考えられる。これにより、塩分と PCA を併用した場合には、養生期間を短縮しても、GnWn[7A] の圧縮強度を確保することが確認できた。

3.2.4 塩分量が圧縮強度に及ぼす影響

材齢 7 日および材齢 28 日における圧縮強度と塩分量の関係を図-4、図-5 にそれぞれ示す。まず、塩分量が 0kg/m³ の場合、1 日脱型したものでは、無置換に対する PCA 置換の強度増加は確認できない。一方で 7 日脱型したものでは、無置換に対する圧縮強度の増加は材齢 7 日、28 日ではいずれの材齢においても 1.5 倍近くになった。

次に塩分を混合した場合について検討する。材齢 7 日および 28 日のいずれの材齢でも塩分量を 0.15kg/m³ 程度混合した段階から、圧縮強度が増加しているのが確認された。塩分量と圧縮強度の関係は、材齢 7 日以降は、塩分量が少量であった場合でも、圧縮強度が増加することが確認できた。PCA 置換しない場合は、塩分を混合しても無置換かつ水道水練りコンクリートよりも強度が小さくなったが、PCA との併用により、無置換かつ水道水練りコンクリートよりも高い圧縮強度を得ることが可能になった。

一方で、塩分量が 0.15kg/m³ よりも大きくなると、塩分量による、圧縮強度の増加は、塩分量が 0.15kg/m³ より小さい場合に比べ、材齢 7 日では鈍くなり、材齢 28 日では、増加はほぼ頭打ちになっていることが確認できる。さらに、いずれの材齢においても、圧縮強度は、

大きいものから順に、Gp[7A], Gp, Gn[7A], Gnの順となり、塩分量が0kg/m³の場合と順序が入れ替わる結果となった。以上をまとめると、7日脱型した、無置換かつ水道水練りコンクリートの圧縮強度と比較して、1日脱型したPCAと塩分を併用したコンクリートの圧縮強度は、材齢7日では、1.0倍~1.3倍、材齢28日では、1.1倍~1.5倍となる。このことから、養生期間が短い場合でも、PCAと塩分を併用すれば、7日脱型と同等もしくはそれ以上の圧縮強度を得ることができることが確認できた。

3.3 水銀圧入試験

1日脱型したコンクリートの水銀圧入試験の結果を材齢ごとに図-6~図-8に示す。すべての材齢において、PCA置換と塩分混合を併用した配合(GpWs, GsWn)においては、2μm以上の粗大な空隙の累積量が少なくなる一方で、50nm以下の緻密な空隙の累積量が多くなることが確認できる。しかしながら、PCA置換のみ塩分混合を併用しない配合では、上記のような緻密化の傾向は顕著ではなかった。よって、PCAと塩分を併用することではじめて、無置換のGnWn[7A]よりも空隙構造が密になるといえる。

次に、圧縮強度と最も相関が強いとの報告がある50nm~2μmにおける累積細孔量¹²⁾と圧縮強度の関係を図-9に示す。全体として、累積細孔量が多くなるほど強度が低下する傾向が確認された。各種要因に関しては、まず、塩分混合もしくはPCA置換のいずれかのみを行った場合、累積細孔量が多くなると共に、圧縮強度が小さくなっている。一方でPCAと塩分を併用した場合、累積細孔量が多くなっており、PCAの内部養生効果と塩分の水和反応促進に伴い、空隙構造が密になり、圧縮強度の増大に寄与したと考えられる。なお、塩分含有PCA(GsWn)と塩水練り(GpWs(7.52))では、いずれの材齢においても、空隙構造および圧縮強度には大きな差は見受けられない。よって、塩分混合方法が空隙構造に及ぼす影響は、確認できなかった。

3.4 熱分析

TG-DTAにより得られた材齢と結合水率および水酸化カルシウム含有率の関係を図-10、図-11にそれぞれ示す。これによると、材齢1日では、結合水率は、いずれも10%未満と小さく、塩分およびPCAによる水和反応促進を確認することはできなかった。

次に材齢7日になると、無置換で塩分を混合しない場合は、材齢1日からの結合水率および水酸化カルシウム含有率の増加は小さく、気中暴露後の水和反応の進行が小さいことが確認できる。一方、PCAと塩分を併用した場合、気中暴露後の水和反応が促進され、結合水率が大きくなっていることが確認できる。一方、

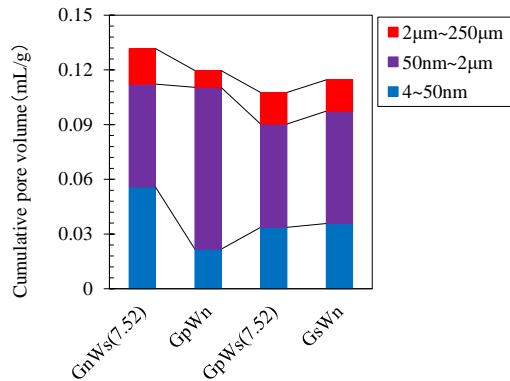


図-6 累積細孔量の変化 (材齢 1日)

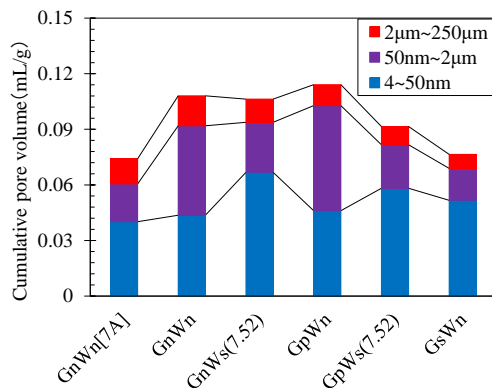


図-7 累積細孔量の変化 (材齢 7日)

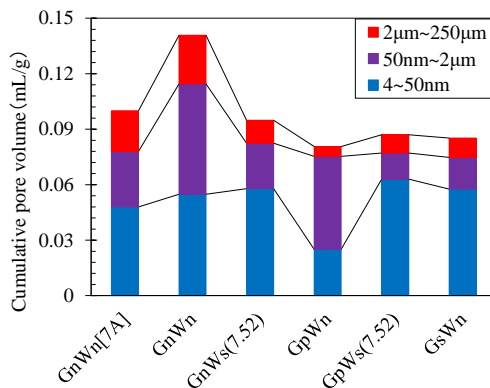


図-8 累積細孔量の変化 (材齢 28日)

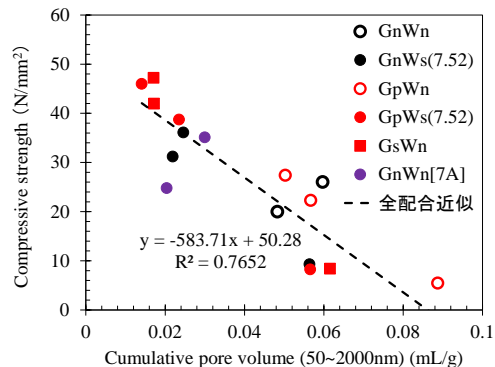


図-9 圧縮強度と累積細孔量の関係

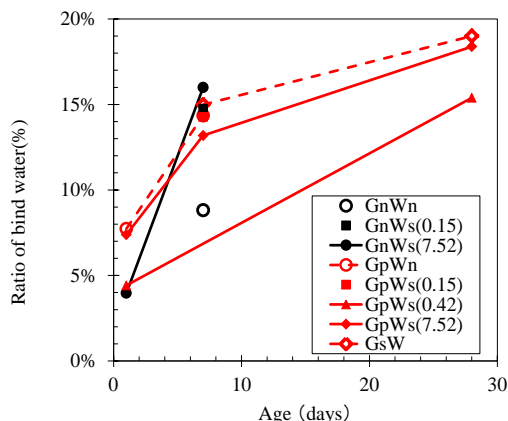


図-10 結合水率の経時変化

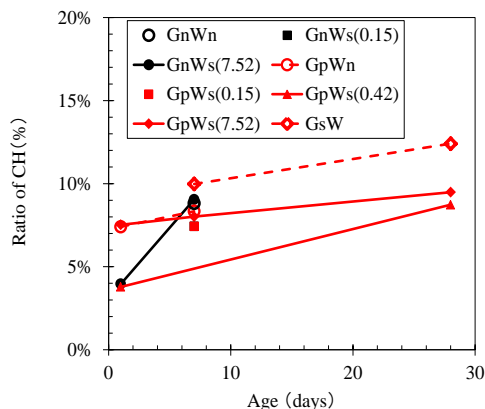


図-11 水酸化カルシウム含有率の経時変化

水酸化カルシウムの含有率の増加は、結合水の含有率の増加と比較明らかに小さいことが確認された。米澤ら¹³⁾によると、コンクリート中の塩分は水酸化カルシウムを消費し、フリーデル氏塩 $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$ を生成させると報告しており、本実験結果とも合致する。

4. 結論

本研究より、早期脱型した塩水練り廃瓦コンクリートの物性について、以下の知見が得られた。

(1) 圧縮強度

廃瓦骨材に粗骨材の一部を置換することで、廃瓦の内部養生効果が起こり、圧縮強度が増大する。さらに、塩分を混合することで、セメントの水和が促進される。廃瓦骨材と塩分を併用した場合には、両者の相乗効果により、圧縮強度がさらに増大する。これにより、早期脱型した場合でも、廃瓦骨材と塩分を併用すれば、塩分量規制値内の混合量でも、7日脱型した無置換かつ水道水練りコンクリートよりも高い強度を得ることができた。

(2) 空隙構造

空隙構造と圧縮強度には、廃瓦や塩分を混合した場合でも高い相関があり、両者を併用した場合には、空隙構造が密になって圧縮強度が向上したものと説明できた。

(3) 生成水和物

廃瓦骨材と塩分を併用すると、気中暴露後であっても水和が継続的に進行し、結合水率が増加した。また、フリーデル氏塩として塩分が固定される可能性が示された。

謝辞

本研究は、科学研究費（基盤研究(B)25289134）の補助を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 土木学会，コンクリート標準示方書〔施工編〕，2012
- 2) 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
- 3) 中国地方整備局浜田河川国道事務所，報道資料，2013.12.06
- 4) 竹田 宣典ほか：海水および海砂を使用したコンクリート（人工岩塩層）の開発，コンクリート工学，Vol.49，No.12，pp.1-6，2011
- 5) 濱本 夏美ほか：塩分含有 PCA 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
- 6) 山中 翔太，半井 健一郎：廃瓦と塩分の併用によるコンクリートの初期強度増進と収縮低減，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，V-321，pp.641-642，2014
- 7) 阿部 公平ほか：瓦粉砕物を骨材とした高炉セメントコンクリートの製造並びに評価試験，島根県産業技術センター研究報告 Vol.48，pp.34-38，2012
- 8) 佐藤 幸恵，丸山 一平，梶田 佳寛：脱型時期がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学会年次論文集，Vol.29，No.1，pp.795-800，2007
- 9) 壇 康弘ほか，高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E，Vol.65，No.4，pp.431-441，2009
- 10) 栗村 友貴，名和 豊春： $CaCl_2$ の添加がエーライトの水和反応に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.67，No.1，pp.71-78，2013
- 11) 横室 隆，依田 彰彦：塩分濃度の異なるコンクリートの基本的性質について，コンクリート工学会年次論文集，Vol. 27，No.1，pp.607-612，2005
- 12) 羽原 俊祐，沢木 大介：硬化コンクリートの空隙構造とその特性，石膏と石灰，無機マテリアル学会，No.240，pp.314-323，1992
- 13) 米澤 敏男ほか：セメント水和物によるモルタル細孔溶液中の Cl^- 固定のメカニズム，コンクリート工学会年次論文集，Vol.10，No.2，pp.475-480，1988