

論文 塩分含有廃瓦粗骨材によるコンクリートの内部養生効果

濱本 夏美^{*1}・半井 健一郎^{*2}・小川 由布子^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨: 本研究では、津波被害で廃棄物となった瓦や沿岸域で供用された瓦のような塩分含有廃瓦を、内部養生効果を有するコンクリート用骨材として活用するための基礎的検討を行った。廃瓦を粗骨材の 40%置換したコンクリートにおいて、塩分含有やセメント種類の影響を検討する実験を行った。その結果、塩分含有廃瓦を用いたものは、普通骨材や塩分非含有瓦を使用したものよりも強度が増加し、その程度は高炉セメントを使用したもので特に大きくなった。さらに、塩分含有廃瓦と高炉セメントを併用したコンクリートは、収縮ひずみ低減や中性化の抑制、水密性の向上など、コンクリートとしての性能を向上させる効果があった。

キーワード: 塩分, 廃瓦, 内部養生, 高炉セメント, 圧縮強度, 吸水性

1. はじめに

2011 年に発生した東日本大震災による津波により、多くの災害廃棄物が発生した。同年 5 月、環境省により公布された災害廃棄物の処理指針には、廃棄物は出来る限り再資源化することが望ましいと記されている。これにより、多くの廃棄物は再利用や再資源化の計画が進んでいるが、レンガ・瓦に関しては利用の目途が立っていない。これらのコンクリート用骨材としての活用は、廃棄物利用のための有力な候補と考えられる。

現在、骨材の一部を廃瓦に置換したコンクリートの研究が行われている。廃瓦を骨材の一部に置換することによって構造が緻密化し、強度が増加するという内部養生効果が確認されており¹⁾、その効果は、廃瓦の粗骨材置換率が 40vol% までの範囲で得られている²⁾。

コンクリート材料として海水や海砂と高炉セメントを合わせた研究が行われており、特殊混和剤を合わせたときに高い緻密性を得ることができるという報告がされている³⁾。

以上の知見より、塩分を含んだ瓦等をコンクリート用骨材とし、結合材として高炉セメントを利用することで、コンクリートとしての性能を向上できる可能性がある。これにより、津波による災害廃棄物や沿岸域で供用された瓦の再利用の促進に応用可能と考えられる。

そこで本研究では、まずは基礎実験として、製造工場から廃棄され安定した品質を得られる廃瓦に人為的に塩分を含ませ、強度や収縮などのコンクリートの基礎物性への影響を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類を用いた。粗骨材の一部に置換して使用する廃瓦は、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。実際に屋根瓦に使用されたものの廃棄物とは異なり、安定した品質を得られる。塩分の含有がコンクリートに与える影響を調べるために、廃瓦は塩分非含有(WP)と塩分含有(WS)の 2 種類を用意した。廃瓦の前処理として、105±5°C の乾燥炉で 1 日乾燥し絶乾状態にしたものを、吸水量がほぼ一定となり、それ以上吸水されなくなる 7 日間を吸水期間とした。なお、表-1 に示した廃瓦の物性値も 7 日間吸水させたものを示している。吸水させた水は、WP は水道水、WS は NaCl 溶液(14%)である。その後、表乾状態にして使用した。NaCl の濃度は、高濃度の塩水を含んでいることを想定し、石州瓦に用いられている塩害試験⁴⁾を参考にして定めた。混和剤の主剤(AD)は、コンクリートの水セメント比によって変えており、W/C=50%のコンクリートには高性能 AE 減水剤、W/C=35%のコンクリートには高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 供試体概要

コンクリートの配合を表-2 に示す。表中における配合名の記述は、【セメント種類(水セメント比)-粗骨材種類】で示している。セメントは高炉セメント B 種(BB)と普通ポルトランドセメント(NC)の 2 種類、粗骨材には塩分非含有廃瓦(WP)または塩分含有廃瓦(WS)を置換したもの、廃瓦置換なし(G0)の 3 種類、水セメント比(W/C)は 50%と 35%の 2 水準を用意した。G0 は W/C=50%のみを作製した。以上の合計 10 配合で実

*1 広島大学 工学部社会基盤環境工学科 (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)

*3 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門助教 博士(工学) (正会員)

*4 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門特任教授 工博(正会員)

験を行った。廃瓦を置換している全ての配合において
 廃瓦の粗骨材体積置換率は、既往の研究²⁾で最大の強
 度を示した 40vol% で一定とした。

練混ぜには一軸強制練りミキサを使用し、まずセメ
 ントと細骨材を投入し練混ぜ後、練混ぜ水を投入し練
 混ぜ、その後粗骨材を投入してコンクリートを作製し

表-1 使用材料

| 使用材料 | 種類 | 特性 | 記号 |
|------|-----------------|---|----|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3350cm ² /g | NC |
| | 高炉セメントB種 | 密度 3.04g/cm ³ , 比表面積 3790cm ² /g | BB |
| 細骨材 | 砕砂 (広島県東広島市黒瀬産) | 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.16% | S |
| 粗骨材 | 碎石 (黒瀬産) | 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.64%, 寸法 5-20mm | G1 |
| | 廃瓦 (島根県江津産) | 表乾密度(7日間吸水)2.26g/cm ³ 吸水率(7日間吸水)9.00% 寸法 5-20mm, 破砕値 21% | G2 |
| 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複合体 | AD |
| | 高性能 AE 減水剤 | ポリカルボン酸系化合物 | |
| | AE 剤 | 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 | AE |

表-2 示方配合

| 配合記号 | W/C (%) | s/a | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | 添加量 (B × %) | | フレッシュ性状 | | |
|-----------|---------|------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|------|-------------|-----------|---------|
| | | | W | NC | BB | S | G1 | G2 | AD | AE | 練上がり温度 (°C) | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
| NC(50)-G0 | 50 | 0.45 | 170 | 340 | 0 | 793 | 976 | 0 | 0.35 | 0.4 | 11.0 | 7.0 | 5.0 |
| BB(50)-G0 | | | | 0 | 340 | 788 | 970 | 0 | 0.35 | 0.4 | 12.0 | 5.5 | 4.5 |
| NC(50)-WP | | | | 340 | 0 | 793 | 586 | 337 | 0.38 | 0.4 | 22.0 | 6.5 | 4.0 |
| NC(50)-WS | | | | 340 | 0 | 793 | 586 | 337 | 0.38 | 0.4 | 19.5 | 6.0 | 5.0 |
| BB(50)-WP | | | | 0 | 340 | 788 | 582 | 335 | 0.38 | 0.4 | 22.0 | 6.0 | 4.5 |
| BB(50)-WS | | | | 0 | 340 | 788 | 582 | 335 | 0.38 | 0.4 | 20.0 | 5.0 | 5.0 |
| NC(35)-WP | 35 | 0.45 | 170 | 486 | 0 | 739 | 546 | 314 | 1.2 | 0.28 | 20.0 | 19.0 | 4.5 |
| NC(35)-WS | | | | 486 | 0 | 739 | 546 | 314 | 1.18 | 0.22 | 20.0 | 17.5 | 4.0 |
| BB(35)-WP | | | | 0 | 486 | 732 | 541 | 311 | 1.2 | 0.32 | 21.0 | 19.0 | 4.0 |
| BB(35)-WS | | | | 0 | 486 | 732 | 541 | 311 | 1.2 | 0.4 | 22.0 | 20.0 | 5.0 |

表-3 実験項目

| 配合記号 | 圧縮強度試験 | | 長さ変化試験 | 促進中性化試験 | 吸水試験 |
|-----------|--------|---------|----------|---------|---------|
| | 材齢 7 日 | 材齢 28 日 | 材齢 1 日以降 | 材齢 28 日 | 材齢 28 日 |
| NC(50)-G0 | ○ | ○ | | | |
| BB(50)-G0 | ○ | ○ | | | |
| NC(50)-WP | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| NC(50)-WS | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| BB(50)-WP | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| BB(50)-WS | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| NC(35)-WP | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| NC(35)-WS | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| BB(35)-WP | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| BB(35)-WS | ○ | ○ | ○ | | ○ |

た。練混ぜ時間は合計 6min でおこなった。

2.3 実験方法

粗骨材の違いが強度、収縮、中性化および水密性へ及ぼす影響を検討するため、表-3 に示す実験を行った。全ての試験に対し、1 配合につき 3 体の試験を行い、その平均値を求めた。なお、以降に示す供試体の養生は、恒温恒湿室（温度 20℃、相対湿度 60%）にて行った。

(1)圧縮強度試験

強度の検討のために、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠し、材齢 7 日と 28 日において圧縮強度試験を行った。養生方法は、打込み後材齢 7 日まで封緘養生を行い、7 日以降は気中曝露したものと封緘養生の 2 種類とした。

(2)長さ変化試験

収縮は JIS A 1129-2(モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法—コンタクトゲージ法)に準拠し、測定を行った。養生方法は材齢 7 日まで封緘養生、その後気中曝露とした。材齢 1 日の供試体を脱型、アルミ粘着テープで密封し封緘にして、材齢 7 日でアルミ粘着テープを剥がし、気中曝露とした。収縮量の測定は、供試体にコンタクトチップを張り付けた材齢 1 日から行い、質量減少率の測定は気中曝露開始の材齢 7 日から行った。

(3)促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153（コンクリートの促進中性化試験方法）と JIS A 1152（コンクリートの中性化深さの測定方法）に準拠して行った。材齢 7 日まで封緘し、その後材齢 28 日まで気中曝露した円柱供試体（φ100×200mm）をコンクリートカッターで半分に切断して高さを 100 mm にした。切断後、上面と底面をアルミ粘着テープでシールして、促進中性化槽（温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度 5%）に静置し、促進 4 週後に側面からの中性化深さを測定した。

(4)吸水試験

吸水試験は RILEM 暫定基準の【毛細管現象による水の吸水試験方法】⁵⁾ を参考に行った。材齢 7 日まで封緘し、その後気中曝露した材齢 28 日の円柱供試体（φ100×200 mm）を乾燥炉（40±5℃）で 14 日間乾燥させた後、側面と上面にアルミ粘着テープでシールして空気中との水分のやり取りがないように密封した。また、吸水面となる底面では、供試体側面とアルミテープの隙間から水が入らないようにテープで境界部をシールした。吸水面から水分が十分吸水されるようにウェスを敷き、水位は供試体の底面から 15 mm の高さで、常に一定となるようにした。計測時間は吸水開始から

3, 6, 24, 48 時間後とし、供試体質量を測定し、質量増加率を求めた。48 時間吸水後、試験体を割裂し、吸水高さが供試体中央部と側面部で同程度であり、均一に吸水されていることを確認した。

3.実験結果

3.1 圧縮強度試験結果

材齢 7 日および 28 日での塩分含有廃瓦および塩分含有廃瓦が圧縮強度に及ぼす影響を図-1～図-3 に示す。

まず図-1 の材齢 7 日における G0 と WP の強度は、セメント種類ごとに、ほぼ同じ値となった。本実験では廃瓦使用による明確な強度増加は見られなかったものの、一般的な碎石に比べて破砕値が小さく、強度が弱い廃瓦を 40% も置換したのにもかかわらず同等の強度が得られたことは、廃瓦の内部養生効果によるためだと考えられる。

また、材齢 7 日時点での廃瓦の塩分含有の影響を比較すると、いずれのセメント種類や W/C においても、塩分含有廃瓦の使用による強度低減はみられず、全ての配合で同等もしくは増加している。強度増加の程度はセメント種類や W/C により異なり、セメント種類では BB、W/C は 50% のものが、WP に対する WS の強度増加率が高くなった。最も強度が増加した配合は BB(50)-WS であり、BB(50)-WP の約 1.4 倍となった。

廃瓦への塩分含有の影響によるコンクリートの強度増加効果は、NaCl が間隙水中でイオン化し、その塩化物イオンがフリーデル氏塩として固定化され、コンクリート中での陰イオン濃度が低下することで、水酸化物イオンの溶出増加⁶⁾ を促し、結果的に水和反応を促進したと考えられる。水酸化物イオンは高炉スラグに対するアルカリ刺激となるので、特に BB の強度増加が大きくなったと考えられる。

W/C が大きい場合に塩分含有による強度増加が大きくなる理由としては、セメントあたりの WS の量が多いこと、つまりセメントに対する塩分量が多いことが原因だと考えられる。W/C=50% のときのセメントは、W/C=35% のものと比べ約 1.5 倍の塩の影響を受けることになるため、強度増加が大きくなったと考えられる。

次に、図-2 と図-3 に示した材齢 28 日の結果に関しては、材齢 7 日と同様、BB の強度増加が大きいことが分かる。また、BB(35)-WS を除き、全ての配合で、養生方法による強度の違いは見られない。強度の違いが見られない理由は、気中曝露の場合でも廃瓦から供給される水分により封緘と同程度の水がセメントに供給されているためと考えられ、十分に廃瓦の内部養生効果が発揮されていることがわかる。また、全ての配合、養生方法において、WP に比べて WS の強度は高

い、もしくは同等であり、廃瓦に含有させた塩分がコンクリートの圧縮強度に与える影響は初期だけでなく、長期的にも影響している。ただし、強度増加率を材齢7日と28日で比較すると、材齢7日ときのほうが大きく、水和反応が活発である材齢初期に塩分がセメントに影響を与えていると思われる。BB(35)-WSに関しては、他の配合と傾向が異なり、封緘養生した場合の強度が高くなっている。その原因については今後検討が必要である。

3.2 長さ変化試験結果

材齢1日から28日までの収縮ひずみの経時変化を図-4、図-5に示す。

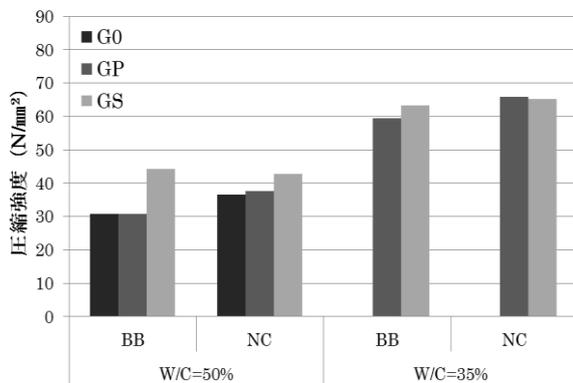


図-1 材齢7日圧縮強度(封緘)

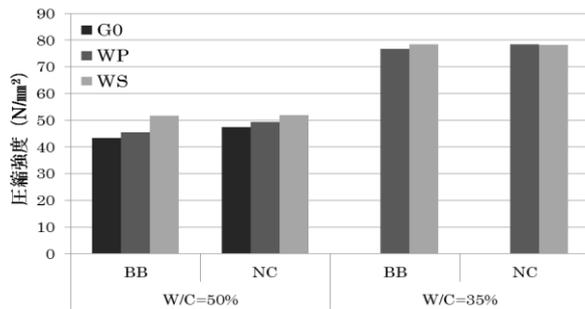


図-2 材齢28日圧縮強度(材齢7日封緘後気中曝露)

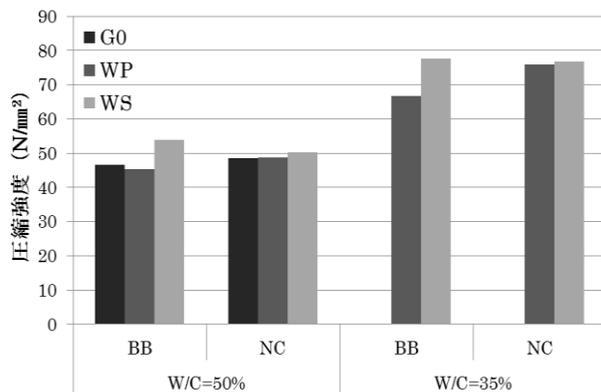


図-3 材齢28日圧縮強度(封緘)

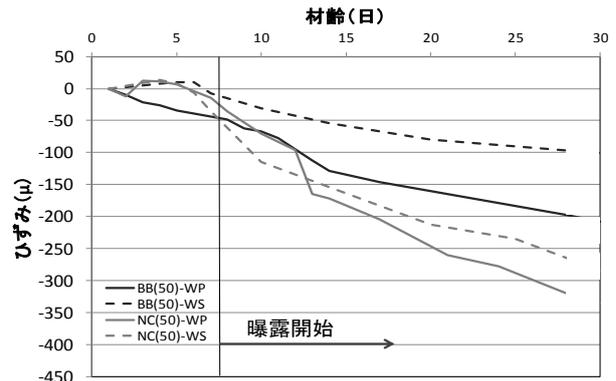


図-4 ひずみの経時変化 (W/C=50%)

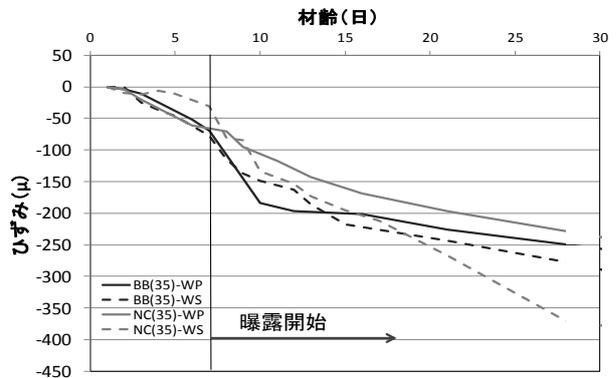


図-5 ひずみの経時変化 (W/C=35%)

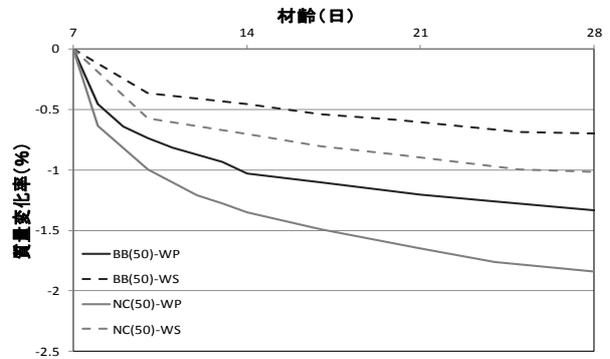


図-6 質量の経時変化 (W/C=50%)

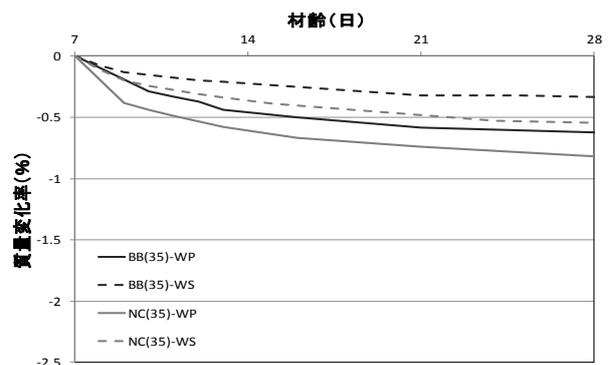


図-7 質量の経時変化 (W/C=35%)

W/C=50%の場合、セメント種類で見るとBBの収縮が小さく、廃瓦の種類ではWSを使用したものの収縮が低減した。BB(50)-WSの収縮が最も小さく、材齢28日における収縮量は100 μ 程度であり、その他の配合の1/2~1/3程度の収縮となった。WSを使用することにより、コンクリート内部の液相が塩水となり、表面張力が低下したために収縮が低減されたと考えられる。しかし、W/C=35%の場合、WSの使用による収縮低減はみられない。

乾燥開始の材齢7日を起点として、材齢28日までの質量減少率の経時変化を図-6、図-7に示す。質量減少が小さい配合はWSを使用したものであり、そのな

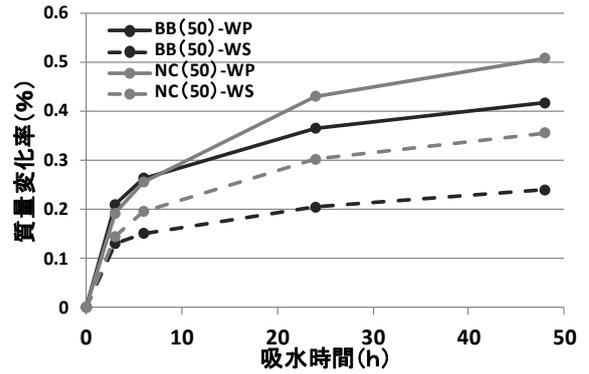


図-11 吸水試験結果 (W/C=50%)

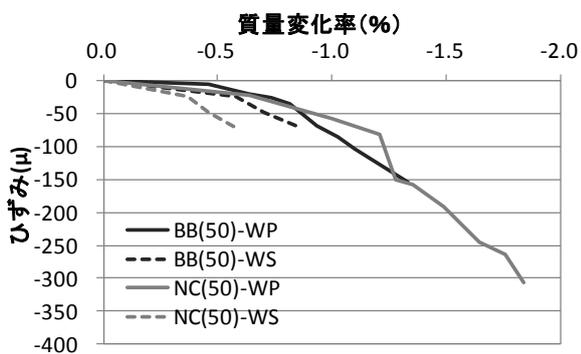


図-8 質量変化-ひずみ関係 (W/C=50%)

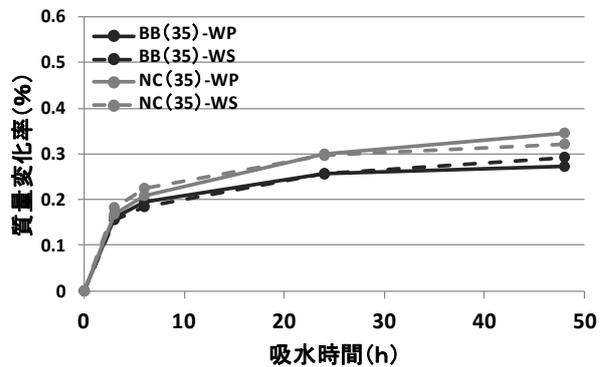


図-12 吸水試験結果 (W/C=35%)

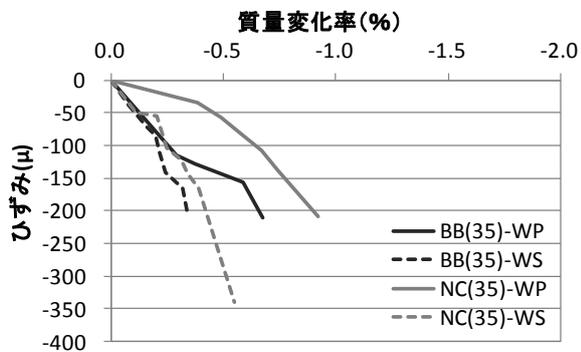


図-9 質量変化-ひずみ関係 (W/C=35%)

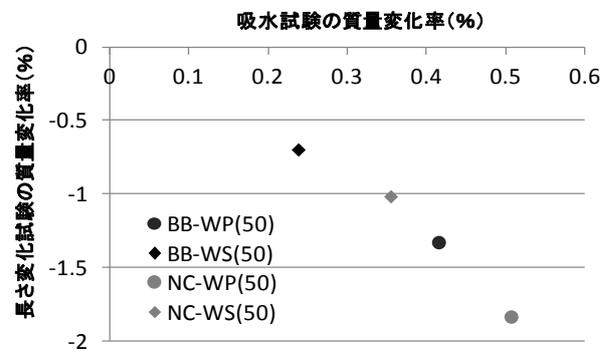


図-13 水分の吸水・逸散関係

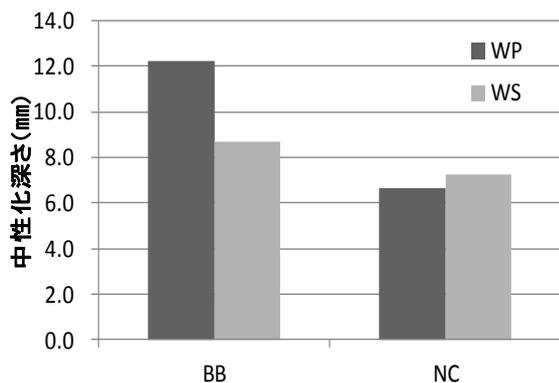


図-10 中性化深さ

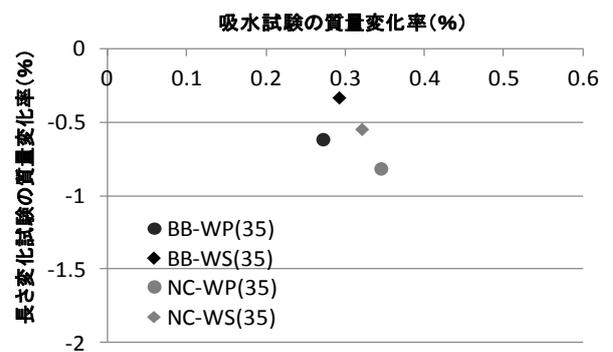


図-14 水分の吸水・逸散関係

かでも BB を使用したものが小さく、水分逸散が少ないということがわかる。これは、構造が緻密になることにより水分が抜けにくくなったことや、液相が塩水のため、蒸気圧降下が起こったこと、また水和反応が促進され自由水が減少したためだと考えられる。

質量変化と収縮の関係を図-8、図-9 に示す。WS を使用することで質量減少は小さくなるものの収縮量が顕著に大きくなった。これは前でも述べているように、液相が塩水であるため、表面張力の低下や蒸気圧降下、さらに細孔構造の緻密化が原因だと考えられる。

3.4 促進中性化試験結果

塩分含有廃瓦の中性化深さに与える影響を図-10 に示す。まず、セメント種類の影響に関しては、一般の知見と同様に、NC に比べて BB の中性化深さが大きくなった。次に廃瓦の塩混入による影響は、NC の場合は見られないが、BB の場合は WS を使用することにより中性化深さが小さくなった。これは、圧縮強度の増加と同様に、塩分含有廃瓦を使用することにより高炉スラグ微粉末の反応が促進され、構造が緻密化したためだと考えられる。

3.5 吸水試験結果

吸水による質量変化率を図-11、図-12 に示す。

W/C=50% の場合、WS を使用したコンクリートは吸水量が少なく、構造が緻密化していると考えられる。特に BB(50)-WS は吸水量が少なく、W/C=35% の各配合と同程度もしくは少ない。

W/C=35% の場合、全ての配合において吸水量は同程度であり、WS 使用による影響は見られないものの、W/C=50% の場合と同様に、BB の構造が緻密化していることがこの実験からわかる。

吸水試験(48 時間吸水)と長さ変化試験(材齢 28 日時点での測定値)の供試体の質量変化率の関係を図-13、図-14 に示す。吸水試験の質量変化率から水の入りやすさ、長さ変化試験の質量変化から水の発散しやすさを評価することができる。この図より、BB(35)-WP の点が少し外れているものの、水の入りやすさと逸散しやすさは線形的に増加するということがわかる。これまでの実験結果の考察と同様、セメント種類では BB を使用したものの、内部養生材は WS を使用したものが、供試体内部と外部の水分移動が少ない。BB-WS がもっとも水分の出入が少ないため、収縮低減効果や瓦の内部養生効果が最も大きくなったと考えられる。

4. まとめ

塩分含有廃瓦をコンクリート用骨材として利用するための基礎試験として、塩分含有瓦 (WS) を粗骨材の一部に置換したコンクリートの圧縮強度、収縮ひずみ

および中性化速度と水密性についての検討を行い、以下のことが明らかとなった。

(1) 材齢 7 日と 28 日の圧縮強度は、WS を粗骨材として利用することにより、増加した。WS 使用による強度増加率はセメント種類や W/C によって異なり、本研究では高炉セメントを使用した W/C=50% のときに最も大きくなった。また、普通骨材のみを用いた G0 と比較する場合、封緘養生したものよりも気中曝露したもののほうが強度増加が顕著である。

(2) WS による収縮低減効果は W/C=50% のときにはみられたが、W/C=35% のときには確認されなかった。気中曝露中の水分逸散は、塩分含有廃瓦使用により低減された。このことより、乾燥収縮低減効果があると考えられる。

(3) 中性化深さは、高炉セメントを使用した場合に大きいものの、WS を使用することで抑制された。

(4) WS 使用による水密化は W/C=50% のときにみられ、特に高炉セメントを併用したときに吸水量が少なくなっている。しかし、W/C=35% のときは WS 使用やセメントの種類による吸水量の差はあまりなかった。

今後は、塩分がどのようにコンクリートの諸性状に影響を及ぼしているのかを検討するとともに、塩分含有廃瓦粗骨材を使用したコンクリートの RC 部材への適用性を検討していく。

参考文献

- 1) 大西裕士, 重松明, 木村守, 佐藤良一: 廃瓦骨材の内部養生による高炉 B 種コンクリートの性能向上, 中国地方整備局管内技術研究会論文集, 61st, pp.253-257, 2010
- 2) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.651-569, 2007
- 3) 竹田宣典, 石関嘉一, 青木茂, 入矢桂史郎: 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, 2011
- 4) 江木俊雄, 原田達也, 中島剛: 粘土瓦の耐凍害性と耐塩害性, 島根県産業技術センター研究報告, 第 48 号, 2012
- 5) RILEM RECOMMENDATION CPC11.2, ABSORPTION OF WATER BY CAPILLARITY, 1987
- 6) 宇野祐一, 小林一輔: 塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 12—1, pp.465~470, 1990