

規格外石州瓦により内部養生したコンクリートの表層品質と物質透過性

小川 由布子¹

¹広島大学 大学院先進理工系科学研究科.

本課題では、高耐久コンクリート構造物の開発を目的とし、規格外石州瓦を内部養生材として活用したコンクリートの表層品質と物質透過性を実験的に検討した。高炉セメントB種を用いた普通強度レベルのコンクリートを対象とし、厳しい養生条件を含む養生条件において検討した。この結果、材齢経過に伴うコンクリート表面の乾燥が廃瓦粗骨材置換した場合に抑制され、表面部の水分保持能力が向上する可能性が示唆された。封かん養生日数の短縮に伴う促進中性化速度係数の増大は、廃瓦細骨材置換によって抑制できる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：高炉セメントB種コンクリート、規格外瓦による内部養生、養生期間、表層品質、中性化抵抗性

1. はじめに

石州瓦は、主に島根県において生産されており、製造時に約10%の不良品が排出される¹⁾。一般的に、これらは破碎され廃棄物として処理されるが、循環型社会の構築の観点から再利用が望まれ、一部路盤材や敷石などに利用されている。一方、コンクリート構造物を作製する際に最も重要な工程のひとつである養生は、散水養生や湿布養生など基本的に部材の外側から水分を供給する。これに対し、吸水性能をもつ材料をコンクリートに混入して内側から水分を供給して養生するという手法（内部養生）が検討されており、コンクリートの収縮低減効果や強度増進効果が示されている^{2) 3)など}。従来の内部養生材は、人工軽量骨材や吸水性ポリマーなどの工業製品であり、製造過程を要するため環境に負荷を与えるとともにコストアップとなる。規格外石州瓦は、廃棄物であるにもかかわらず、この多孔性から適度な吸水率をもち、かつ従来の内部養生材よりも硬く、近年内部養生材として研究が進められてきた。これまでの検討では、コンクリートの自己収縮の低減、強度増進の効果が報告されており、鉄筋コンクリート梁を対象とした構造特性に対しての影響も検討されている^{4) 5) 6)など}。

高炉スラグ微粉末がプレミックスされている高炉セメントは実構造物に広く利用されており、生産量は全セメント生産量の約2割を占めている⁷⁾。しかし、高炉セメントを使用した場合には、初期の養生が重要であることも明らかにされており、土木学会コンクリート標準示方書では普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも、

長い初期養生が必要であると示されている⁸⁾。

鉄筋の外側にあるコンクリート（かぶりコンクリート）の品質は鉄筋コンクリート構造物の耐久性に大きく影響する。近年、このかぶりコンクリートの品質（表層品質）が注目を浴びており、表層透気試験（トレント法）などの非破壊試験により品質を評価する手法の提案が多くなされている。内部養生は、一般にコンクリート組織を緻密にするため、表層品質の向上が期待される。一方で、石州瓦自体が通常の骨材と比較して多孔質であるため、物質透過性を高めてしまう可能性も有する。しかし、コンクリート構造物の耐久性を担うコンクリートの表層品質に対する規格外石州瓦の影響は検討されていない。

そこで本課題では、規格外石州瓦を内部養生材として活用した高耐久コンクリート構造物の開発を目的とし、コンクリートの表層品質と物質透過性を検討した。

2. 実験方法

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには高炉セメントB種（密度：3.04 g/cm³，比表面積：3860-3870 cm²/g）を使用した。通常の骨材には、砕砂（表乾密度2.61 g/cm³，吸水率1.06%）および砕石（2.62 g/cm³，0.67%）を細骨材および粗骨材にそれぞれ使用した。規格外石州瓦は、島根県江津産の製造過程でJIS規格外のため回収され破碎されたものを使用した。寸法が1 mmから5 mmのもの（2.28 g/cm³，9.75%）を細骨材に、5 mmから13 mmのもの（2.26 g/cm³，9.08%）を粗

骨材に置換して内部養生材として用いた。

コンクリートの配合は表-1に示すとおり、廃瓦骨材を置換していない配合（BBC）、廃瓦粗骨材を30vol%置換した配合（G30）、廃瓦細骨材を34.7%置換した配合（S35）の3配合とした。いずれの配合も普通強度レベルのコンクリートを想定し、水セメント比W/Cを0.50として、単位水量Wは170 kg/m³、細骨材率s/aは0.403に設定して設計した。目標スランプは10±2.0 cm、空気量は4.5±0.5%として、AE減水剤およびAE剤の添加により調整を行った。なお、G30およびS35の廃瓦骨材置換率は、両配合の内部養生水量（廃瓦骨材の吸水量）が等しくなるように設定した。また、廃瓦骨材は7日以上水に漬けて十分に吸水させたものを表乾状態にして用いた。

(2) コンクリートの練混ぜ方法および養生方法

コンクリートの練混ぜは、強制練りパン型ミキサを用いて実施した。まず通常の細骨材およびセメントを投入して空練りを行い、注水後、練り混ぜる。その後粗骨材を投入して練り混ぜた。内部養生材として用いる廃瓦細骨材は、注水後の粗骨材投入時に投入した。

養生条件は脱型材齢の異なる3条件とした。材齢1日で脱型し気中暴露するものを1d、材齢3日で脱型し気中暴露するものを3d、材齢7日で脱型し気中暴露するものを7dと表記する。土木学会のコンクリート標準示方書において、コンクリート打設後の湿潤養生期間の標準が示されており、高炉セメントを用いる場合には、日平均気温15℃以上の環境における湿潤養生期間は7日以上が適切であるとされている⁹⁾。本研究では、7dを標準的な養生条件とし、封かん養生期間がより短い1d、3dの養生条件を早期脱型した厳しい養生条件として設定した。いずれの供試体も打設後、仕上げ面からの乾燥を防ぐために、打設面をアルミ粘着テープ、湿布、ラップフィルムの順で覆うことで封かん養生とし、各脱型材齢まで温湿度制御のない屋内に静置した。脱型後、暴露面以外の面からの水分逸散を防ぐために速やかにアルミ粘着テープを貼り付けた。その後、各測定材齢まで脱型前と同様に温湿度制御のない屋内に静置した。

(3) 促進試験の方法

100×100×400 mmの角柱供試体を作製し、所定の期間まで封かん養生した。脱型後は、打込み面に対する

×400 mm側面1面を暴露面として、その他の面にアルミ粘着テープを貼りつけ、暴露面以外の面から水分が逸散するのを防いだ。

試験項目は、含水状態の把握として質量変化および表面含水率、促進中性化抵抗性として促進中性化試験、表層品質の評価として表層透気試験とした。

質量変化は、脱型後アルミ粘着テープを貼り付けた直後に供試体質量測定を行い、その後材齢7、14、21、28、35、59、98、110、182日において質量を測定した。また、質量測定時にコンクリート水分計を用いて、暴露面の表面含水率を測定した。

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に準拠して実施した。所定の材齢まで封かん養生しその後気中暴露した角柱供試体を、材齢35日から20±0.2℃、60±5.0%RH、CO₂濃度5±0.5%の促進中性化槽内に静置した。試験は気中暴露時と同様に暴露面1面以外にアルミ粘着テープを貼りつけた状態で行った。所定の促進中性化期間において供試体を端部から約50mmの位置で割裂した。割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色に呈色した部分までの10点の中性化深さを測定した。

表層透気試験は、トレント法（ダブルチャンバー法）により行い、表層透気係数kTを測定した。なお、透気係数の算出に用いるコンクリートの空隙率は従来、0.15m³/m³と想定され⁹⁾、通常の骨材中の空隙において空気の流入は生じないと考えられている。一方、廃瓦骨材は通常の骨材よりも空隙を多く有し、廃瓦骨材置換した配合ではコンクリート1m³あたりに用いた廃瓦が有する空隙量は、G30およびS35では約0.021m³/m³である。したがって、廃瓦骨材が有する空隙量を考慮したεは0.171m³/m³と想定することができ、これを用いて透気係数kTを算出した。測定は材齢28日および112日に行った。

(3) 実環境暴露試験の方法

200×300×1200 mm供試体を作製し、前述のとおり所定の期間まで封かん養生した。脱型後は、打込み面に対する側面300×1200 mmの2面を暴露面として、その他の面にはアルミ粘着テープを貼付し暴露面以外からの乾燥を防いだ。

試験項目は、含水状態の把握として表面含水率、中性化抵抗性として中性化試験、表層品質の評価として表層

表-1 コンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)								
	W	C	細骨材			粗骨材			廃瓦粗骨材
			計	S	廃瓦細骨材	計	G2010	G1505	
BBC	170	340	783	783	0	977	537	440	0
G30			783	783	0	937	537	147	253
S35			749	512	237	977	537	440	0

透気試験とした。

表面含水率は、促進試験と同様にコンクリート水分計を用いて脱型直後および材齢7, 14, 21, 28, 35, 59, 98, 110日において試験体暴露面の表面含水率を測定した。測定は、各暴露面上にて2点ずつの計4点行い、平均値を算出した。

実環境における中性化深さを測定し、中性化速度係数を算出した。試験体暴露面上の高さ方向中央部の5点において直径12 mmドリルを用いて削孔し、削孔部に直接フェノールフタレイン溶液を噴霧した。ノギスを用いて1つの削孔部において5点の中性化深さを測定し、最大値および最小値を除く3点の結果を平均した値を中性化深さとした。中性化深さを脱型後経過材齢（中性化材齢）の平方根で除した値を中性化速度係数として算出した。測定は、材齢5-6か月で行った。

表層透気試験は、促進試験と同様にトレント法により実施した。試験体の各暴露面の高さ方向中央部にて3点ずつ計6点において表層透気係数 kT を測定し、幾何平均を求めた。測定は材齢28日および112日にて行った。

3. 促進中性化試験による中性化抵抗性と規格外石州瓦の影響

(1) 気中暴露中の含水状態の変化

廃瓦骨材置換の有無によって練混ぜ当初にコンクリートが有する水分量が異なることから、すべての条件における質量変化を相対的に比較するために、単位水量と表乾状態における各骨材の含水量の和を練混ぜ時水分量の理論値（配合設計上の水分量）として算出した。これを用いて水分残量比を下式により算出した。

水分残量比＝

$$\frac{\text{各配合の配合設計上の水分量} - \text{各配合の質量減少量}}{\text{BBCの配合設計上の水分量}}$$

図-1に各コンクリートの水分残量比を示す。廃瓦骨材無置換のBBCの練混ぜ時水分量を1として、各コンクリートが測定時に有する水分量の比を示している。廃瓦骨材置換したG30およびS35は、打設時にはBBCよりも約10%多く水分を有している。廃瓦骨材置換するとコンクリートの質量減少率は大きくなるものの、図-2において、G30およびS35の水分残量比はすべての養生条件においてBBCの水分残量比を下回っていない。すなわち、廃瓦骨材置換することでBBCよりも水分逸散量は大きくなるものの、硬化後の水分量はより多く保持されているといえる。なお、この時保持された水分として、水和反応に消費され水和物として存在しているものと、コンクリート内部の緻密な細孔組織内に残存しているものが含まれていると考えられる。

(2) 促進中性化抵抗性

促進中性化速度係数を図-2に示す。BBCについては養生期間が短いほど促進中性化速度係数が大きい。これは、封かん養生期間が短く養生が不十分なコンクリートほど、中性化が進みやすい状態になることを示している。これに対して、廃瓦骨材置換すると、G30-1d以外の促進中性化速度係数はBBCよりも大きく、廃瓦骨材置換することで中性化が進みやすい状態となっている。

養生条件ごとにBBCの促進中性化速度係数を1とした比を図-3に示す。封かん養生日数が1日の場合には配合

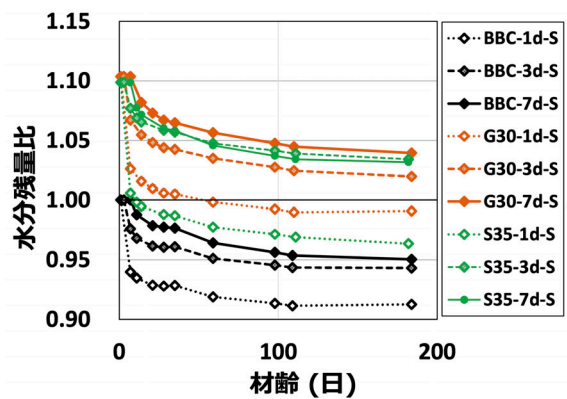


図-1 水分残量比

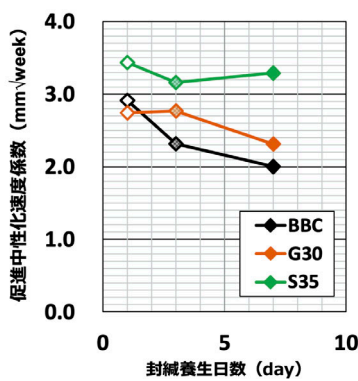


図-2 促進中性化速度係数

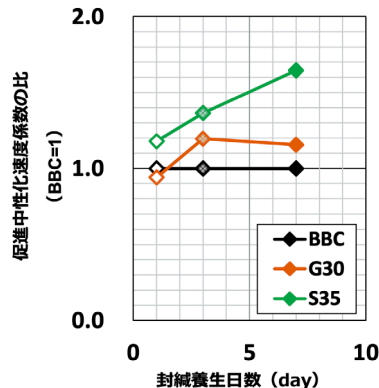


図-3 BBCを基準とした促進中性化速度係数の比 (BBC=1)

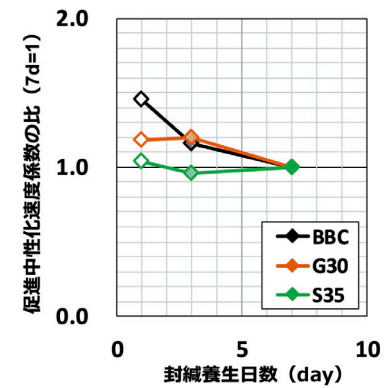


図-4 7dを基準とした促進中性化速度係数の比 (7d=1)

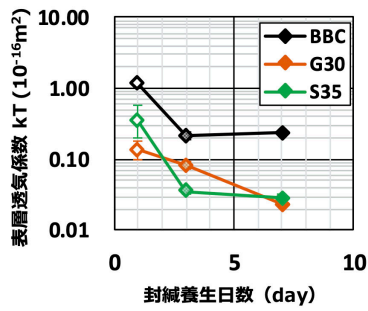


図-5 表層透気係数(材齢112日)に対する封かん養生期間の影響

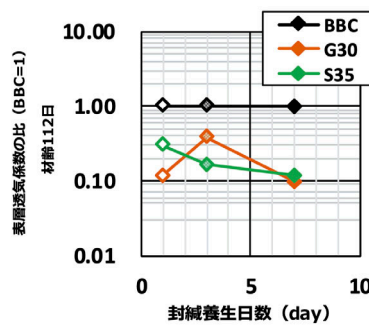


図-6 BBCを基準とした表層透気係数(材齢112日)の比(BBC=1)

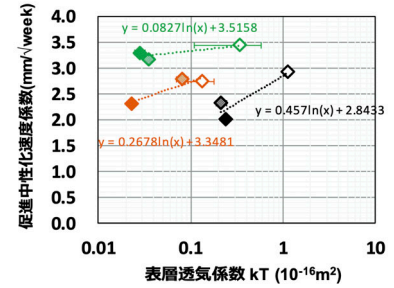


図-7 表層透気係数(材齢112日)表層透気係数と促進中性化速度係数との関係

による中性化速度係数の違いは比較的小さいが、封かん養生期間が長いほど、特にS35のBBCに対する比は大きくなった。これは、封かん養生日数が長い場合に中性化抵抗性が上がっていることに起因しており、封かん養生による中性化抵抗性向上効果が廃瓦骨材置換することで抑制される可能性が考えられる。

封かん養生日数7日の場合(7d)に対する比を用いて検討すると、図-4に示すとおり、特にS35の比は養生日数に影響されることなく同程度であった。封かん養生日数を短縮することで中性化が進行しやすくなるという本来の性質に対して、廃瓦細骨材置換により養生日数の影響を低減し、封かん養生日数の短縮による促進中性化速度係数の低下を防ぐことができると考えられる。

(3) 表層透気係数

表面含水率がより安定状態にあると考えられる材齢112日における表層透気係数 kT と封かん養生期間との関係を図-5に、BBCに対する比を図-6に示す。各配合において、封かん養生期間が短いほど kT が大きい、すなわち養生が不十分であるほど透気性が大きくなっており、養生条件による表層品質への影響が想定通り表れていることが確認できる。これに対して、G30およびS35の表層透気係数 kT はいずれの養生条件においてもBBCより小さくなった。廃瓦骨材置換することで表面含水率が保持されやすくなり、封かん養生期間が短いことによる表層透気性の増大を抑制し、封かん養生期間が十分な場合にも表層透気性を小さくすることができると考えられる。

促進中性化速度係数との関係を図-7に示す。各配合において表層透気係数が高いほど促進中性化速度係数が大きくなる傾向があり、養生条件の違いに影響を受け表層部の透気性が大きいほど中性化が促進しやすくなるという、既往の研究¹⁰⁾と同様の傾向が確認できる。また、各配合の対数近似線の傾きは、BBC、G30、S35の順に大きく、廃瓦粗骨材置換、廃瓦細骨材置換すると、表層透気係数の変化に対する促進中性化速度係数の変化が小さいといえる。

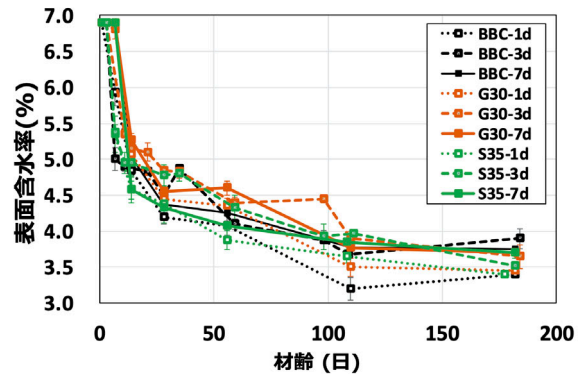


図-8 実環境に暴露した供試体の表面含水率の変化

4. 実環境暴露試験による中性化抵抗性と規格外瓦の影響

(1) 実環境に暴露した供試体の表面含水率の変化

図-8に表面含水率の変化を示す。いずれのコンクリートも、脱型後の水分逸散に伴い、表面含水率が小さくなった。また、いずれの養生条件においてもG30の表面含水率が他の配合と比べて大きく、小型供試体と同様であった。

材齢の対数関数で近似し、この対数近似曲線から算出した所定の材齢での表面含水率を近似表面含水率とした。材齢182日における近似表面含水率の算出結果およびこのBBCに対する比を分析した。封かん養生日数3日(3d)のコンクリートは養生環境の温度が高かったことが影響し、表面の水分逸散が他の条件よりも早く進行したと考えられ、封かん養生日数1日および7日の場合の近似表面含水率よりも大きかった。しかしいずれの養生条件においても、廃瓦粗骨材置換したG30の近似表面含水率は他配合より大きく、特に封かん養生日数1日(1d)とした場合において約10%大きかった。廃瓦粗骨材置換することによって、高炉セメントコンクリートの養生日数を短縮した場合の暴露面表面からの水分逸散を進みにくくさせることができると考えられる。

(2) 実環境に暴露した供試体の中性化速度係数

図-9に中性化速度係数の算出結果を示す。廃瓦骨材置換した配合の中性化速度係数は、封かん養生日数が1日

または3日と短い場合に無置換の配合よりも小さくなっており、中性化抵抗性が向上した。一方、封かん養生日数が7日と比較的長い場合には、特に廃瓦細骨材置換すると中性化速度係数が無置換の場合を上回り、中性化抵抗性が小さい結果となった。

中性化速度係数のBBCに対する比を示している図-10からも、廃瓦細骨材置換は封かん養生日数が長くなると中性化速度係数を大きくする方向に影響していることがわかる。また図-11より、各配合の中性化速度係数に対する養生条件の影響を比較すると、廃瓦細骨材置換したS35の結果が封かん養生日数に関わらず横ばいであり、封かん養生日数の短縮に伴う中性化速度係数の増大を、廃瓦細骨材置換することで抑制することができたといえる。

(3) 実環境に暴露した供試体の表層透気係数

図-12に、表面含水率がより安定したと考えられる材齢112日における表層透気係数 kT を示し、BBCに対する比を図-13に、封かん養生日数7日の場合に対する比を図-14にそれぞれ示す。いずれの配合においても、封かん養生日数が長いほど表層透気係数が小さくなり、廃瓦骨材置換することでさらに小さくなったことが分かる。図-13において、廃瓦骨材置換による影響度はいずれの養生

条件においても同程度であった。図-14においては、養生期間が短縮されると廃瓦置換の有無にかかわらず同程度表層透気係数が増大しており、養生期間の短縮による表層品質の低下に対する廃瓦骨材置換による低減効果は見られなかった。

5. おわりに

本課題では、規格外石州瓦を内部養生材として活用したコンクリートの表層品質と物質透過性を検討し、高耐久コンクリート構造物の開発を目的とし、促進試験環境および実環境における各種試験を行った。高炉セメントB種を用いた普通強度レベルのコンクリートを対象とし、厳しい養生条件を含む養生条件において検討した結果、脱型後の材齢経過に伴うコンクリートの質量減少について、練混ぜ時に有していた水分量に対する水分残量を相対的に比較すると、廃瓦骨材置換することでより多く水分が保持されることが明らかとなった。また、材齢経過に伴うコンクリート表面の乾燥が廃瓦粗骨材置換した場合に抑制され、表面部の水分保持能力が向上する可能性が示唆された。

中性化抵抗性について、封かん養生日数の短縮に伴う促進中性化速度係数の増大は、廃瓦細骨材置換によって

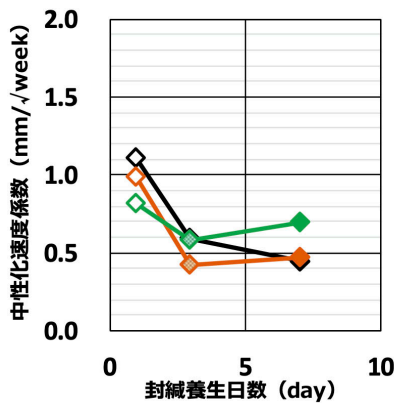


図-26 中性化速度係数

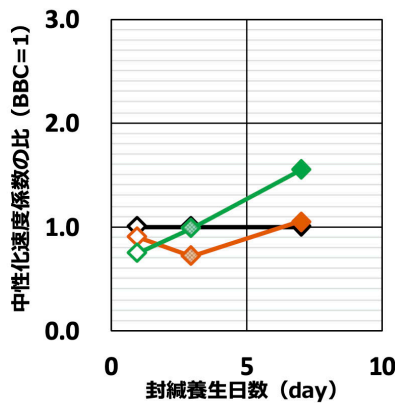


図-27 BBCを基準とした中性化速度係数の比 (BBC=1)

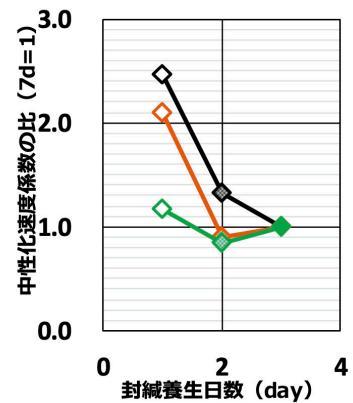


図-28 7dを基準とした中性化速度係数の比 (7d=1)

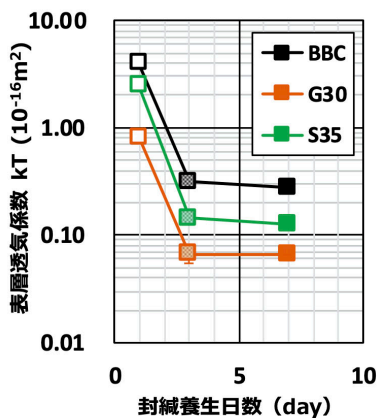


図-31 材齢112日の表層透気係数

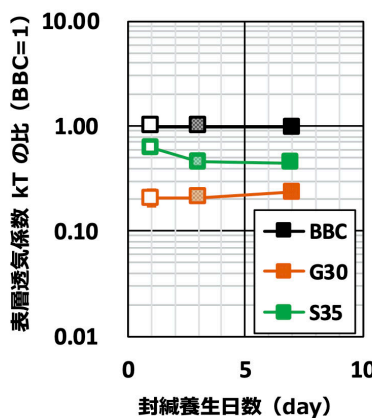


図-32 BBCを基準とした表層透気係数 (材齢112日) の比 (BBC=1)

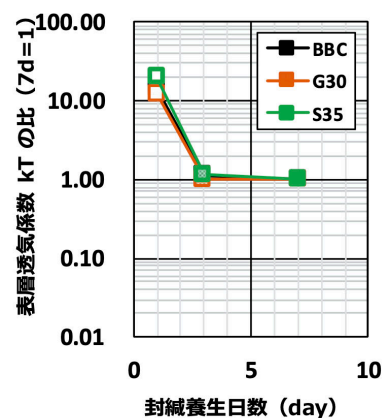


図-33 7dを基準とした表層透気係数 (材齢112日) の比 (7d=1)

抑制できる可能性がある。一方で、封かん養生期間が長いほど、廃瓦細骨材置換した場合に促進中性化速度係数が相対的に大きくなったことから、廃瓦細骨材置換により中性化が進行しやすくなる可能性がある。促進中性化試験のみならず、実環境における検討においても同様の傾向が確認された。

廃瓦骨材無置換および粗骨材置換したコンクリートの封かん養生期間を1日に短縮した場合、促進環境下および実環境における中性化抵抗性に違いが見られた。

表層透気性は廃瓦骨材置換により小さくなり、促進中性化速度係数は配合ごとに表層透気係数に相関があることを確認した。

今後は、多孔質である内部養生材のコンクリートの物質透過性に対する影響を明確にするためには、中性化抵抗性と透気性および吸水性との関係性を明らかにする必要がある。両指標の測定方法および測定領域を統一するために、より長期間中性化を行うことで暴露面からの検討範囲を広げるなど、さらなる検討が必要である。

謝辞：本課題について、広島大学大学院先進理工系科学研究科の河合研至教授および半井健一郎教授に有益なご助言をいただきました。また、本課題の実験の遂行および結果のとりまとめについて、広島大学大学院工学研究科博士課程前期を修了された重田あずさ氏に多大なご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。また、一般社団法人中国建設弘済会2020年度技術開発支援事業の支援を受けて実施しました。

参考文献

1) 建材試験センター：粉碎規格外瓦を骨材として使用する構造用コンクリートの製造と供給に関する調査研究，建

材試験センター調査研究報告，pp.14-19，2015

- 2) Amon Bentur, Shinichi Igarashi, Konstantin Kovler: Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregate, *Cement and Concrete Research* 31, pp.1587-1591, 2001.
- 3) Ryan Henkensiefken, Dale Bentz, Tommy Nantung, Jason Weiss: Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions, *Cement and Concrete Composites* 31, pp.427-437, 2009.
- 4) Masahiro Suzuki, Mohammed Seddik Meddah, Ryoichi Sato: Use of porous ceramic waste aggregate for internal curing of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research* 39, pp.373-381, 2009.
- 5) Ryoichi Sato, Akira Shigematsu, Tatsuya Nukushina, Mamoru Kimura: Improvement of Properties of Portland Blast Furnace Cement Type B Concrete by Internal Curing Using Ceramic Roof Material Waste, *Journal of Material in Civil Engineering, ASCE*, Vol.23(6), 2010.
- 6) Mwangi M. Macharia, 小川由布子, 山口克己, 佐藤良一：廃瓦骨材を活用したRCはりのせん断強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.481-486，2014.
- 7) セメント協会：2022年会計年度セメント国内販売高，セメント需給実績2023年3月度，p.4，2023
- 8) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施行編〕，p.122，2013
- 9) Roberto J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, 25, pp.358-365, 1992
- 10) 蔵重勲，廣永道彦：脱型材齢や暴露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, 2010.