

論文 再生骨材コンクリートの積雪期の養生条件に関する研究

島多 昭典*1・清野 昌貴*2・吉田 行*3

要旨: プレキャストコンクリート製品の製造は、通常、蒸気養生が行われているが、CO₂ 排出により環境に負荷を与えている。近年、即時脱型方式による環境負荷低減も提案されているが、再生骨材を用いた場合、一般に普通コンクリートよりも強度が小さく、特に低温環境下ではその性能差が大きくなることが懸念される。そこで、本研究では、雪中環境におけるコンクリートの養生について基礎的な検討を行った。その結果、再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合で雪中養生を行った場合、積算温度を考慮して養生日数を確保することにより、圧縮強度を確保できること等を確認した。

キーワード: 再生骨材, プレキャストコンクリート製品, 雪中環境, 養生

1. はじめに

社会資本のメンテナンスサイクル構築に向けた取り組みが急速に進む中で、従前は主に道路の路盤材や構造物の基礎材として利用されてきたコンクリート再生骨材のコンクリート材料への利用拡大が求められる。コンクリート再生粗骨材は、JIS で3クラスが規定されており、Hクラスは砕石と同等の性能での使用が可能となるものの、製造コストや品質確保が課題となっており、今後は使用箇所の要求性能に応じて M クラスを利活用していく取り組みが求められ、特に、工場製作による品質確保が容易で補修にも活用し易いプレキャストコンクリート製品への利用が期待されている。

しかし、プレキャストコンクリート製品の多くは、効率的に製品を製造するため、強度が早期に得られる蒸気養生が採用されており、養生時に CO₂ を排出するため、環境に少なからず負荷を与えている。近年、低水セメント比の硬練りのコンクリートを振動と圧縮力により成形締固めを行う即時脱型方式の製品が普及しており、この製品は蒸気養生を行わずに製品としての性能を確保できる。このように、コンクリートの配合や製造方法を工夫することで、養生時に排出する CO₂ の抑制が可能となるが、再生粗骨材を用いたコンクリートは、普通コンクリートよりも強度が小さく、特に低温環境下ではその性能差が大きくなることが懸念されることから、冬期に給熱養生なしには性能確保が困難であり、環境負荷低減策が必要である。

そこで、本研究では、再生骨材コンクリートを用いたプレキャストコンクリート製品製造時の環境負荷低減を強く意識し、低温環境下でも配合と養生方法の工夫により、製品としての性能を満足できるか確認する基礎的な検討を行った。具体的には、コンクリート養生時の CO₂

排出量削減を念頭に、雪中環境で養生を行うことを考えた。雪には保温効果があり、農業や食品加工の分野では、概ね 0℃に保たれる雪中環境を野菜の保存や低温醸造に利用していることから、本研究ではこれをコンクリートの養生に応用し、同時に耐寒剤を利用して、材齢初期の強度発現を高める工夫を行った。

2. 試験方法

2.1 使用材料及び配合

(1) 使用材料

使用材料を表-1 に示す。コンクリートに使用する粗骨材には利用拡大の観点から M クラスの再生粗骨材を用い、比較のため天然砕石も使用した。また、雪中での養生における初期強度発現を高めるために耐寒剤を加えた。

セメントは、コンクリート殻にアルカリシリカ反応 (ASR) が発生する原骨材が含まれている懸念や、塩分が含まれている可能性¹⁾があるため、ASR の抑制効果や塩化物イオンの拡散抵抗性が期待される高炉セメント B 種を使用した。

表-1 使用材料

種別	使用材料
セメント	高炉セメントB種 (密度3.05g/cm ³ 、比表面積3750cm ² /g)
粗骨材	再生粗骨材M(最大寸法20mm) (絶乾密度2.52g/cm ³ 、吸水率4.27%、実績率62.8%)
	小樽市見晴産安山岩砕石(最大寸法25mm) (表乾密度2.67g/cm ³ 、吸水率1.54%)
細骨材	苫小牧市樽前産海砂 (表乾密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.87%、粗粒率2.85)
耐寒剤	主成分:ポリカルボン酸エーテル系化合物と無機系窒素化合物の複合体

*1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所耐寒材料チーム上席研究員 (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所耐寒材料チーム研究員

*3 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所耐寒材料チーム主任研究員 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

記号	セメント種類	粗骨材種類	耐寒剤添加量	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				実測値	
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スランプ (cm)	空気量 (%)
NF40	高炉セメント B種	再生粗骨材 M	セメント 100kgあたり 4リットル 添加	40.0	44	130	325	838	1006	10.5	5.3
NF45				45.0		133	296	846	1016	9.5	6.2
NF50				50.0		135	270	853	1025	9.8	6.0
NFV40		碎石		40.0		135	338	827	1054	10.5	4.4
NFV45				45.0		137	304	838	1067	9.5	6.5
NFV50				50.0		140	280	843	1074	10.8	5.9

(2) 配合

コンクリートの配合を表-2に示す。配合は「耐寒剤運用マニュアル(案)」²⁾を準用して、目標空気量は 5.0±1.0%、目標スランプは 8.0±2.5cm に設定し、水セメント比は 40%、45%、50%で比較した。

2.2 試験概要

(1) 養生方法

本研究で行った雪中養生とは、型枠に打ち込んだコンクリートの打設面を、打込み後直ぐにラップフィルムで覆い、型枠ごとビニール袋に入れて封緘した供試体を雪の中に並べて、上から50cmの厚さの雪で覆い養生する方法である。雪の熱伝導率は土の1/10程度であるため、雪で覆うことにより外気温の影響を受けずに内部は0℃前後に保たれると考えられる。実際に雪下50cm位置の温度を確認した結果(外気温変化-5℃から10℃)、平均1.08℃(標準偏差0.23)と1℃前後を保持していることを確認した。本試験では、この雪中養生と併せて、より厳しい低温環境下での適用性を確認するために、雪中養生と同様に作製、封緘した供試体を低温恒温装置に入れて-5℃養生を実施した。なお、養生は、コンクリート打設・封緘直後に開始している。雪中養生の実施状況を写真-1に、-5℃養生の実施状況を写真-2に示す。

(2) 圧縮強度試験

プレキャストコンクリート製品として必要な強度を得るための低温環境下における養生温度の適用範囲を検証するため、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度試験を行った。供試体はφ10×20cmの円柱供試体とし、試験材齢は3日、7日、14日、28日とした。

(3) 乾燥収縮試験

再生粗骨材Mに耐寒剤を用いた配合で低温養生を行った供試体の乾燥収縮による長さ変化を確認するため、JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」(コンパレータ方法)に準拠して長さ変化量を測定した。供試体は10×10×40cmの角柱供試体とし、製品工場の



写真-1 雪中養生の状況 (養生中は雪で覆う)



写真-2 低温恒温装置による-5℃養生の状況

一般的な出荷管理材齢である材齢14日に脱型して供試体側面に標線用ガラス板を貼り付け初期値を測定した。その後、恒温恒湿室(温度20℃、湿度60%)に静置しながら、1日、7日、14日、21日、28日、42日、56日、91日、140日に測定を行った。測定状況を写真-3に示す。

(4) スケーリング試験

積雪寒冷地での利用を考慮し、供試体のスケーリング



写真-3 乾燥収縮試験の状況

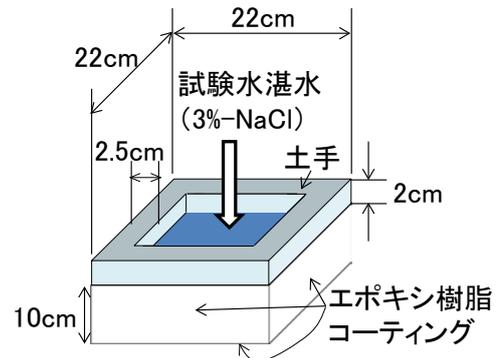


図-1 スケーリング試験供試体

抵抗性を確認するため ASTM C 672 に準拠してスケーリング量の測定を行った。供試体は 22×22×10cm の角柱供試体とし、材齢 14 日に脱型し、試験面に湛水するための土手を取り付けた (図-1)。試験面以外の 5 面には、供試体中の水分の逸散を防ぐ目的でエポキシ樹脂コーティングを行った。なお、試験面はプレキャストコンクリート製品の暴露面に相当する型枠底面とした。その後、供試体の試験面に塩水 (NaCl 濃度 3%) を張り、凍結融解試験室で -18℃を 16 時間、23℃を 8 時間の 24 時間 1 サイクルで凍結融解作用を与えながら、5 日毎に 50 日目まで、その後は 25 日毎に 150 日目までスケーリング片の質量測定を行った (写真-4)。



写真-4 スケーリング片の採取状況

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-2に示す。再生粗骨材Mを使用した配合と碎石を使用した配合の圧縮強度発現の傾向を比べてみると、雪中養生、-5℃養生どちらの場合でも、いずれの水セメント比においても、骨材の違いによる圧縮強度の差は見られなかった。このことから、低温養生を行う場合、骨材に再生粗骨材Mを使用することによる圧縮強度への影響は小さいと考えられる。

次に、養生の違いによる圧縮強度を比較すると、雪中養生した供試体は、骨材種別にかかわらず、全ての水セメント比において28日強度が30N/mm²を超えた。一方、-5℃で養生した供試体は、全てにおいて10N/mm²程度までとなり、プレキャストコンクリート製品に求められる強度を満足しない結果となった。

コンクリート標準示方書³⁾には、養生温度から強度発現を推定するため次の式が示されている。

$$M = \sum(\theta + A)\Delta t \quad (1)$$

ここに、 M : 積算温度 (°C・日または°C・時)

θ : Δt 時間中のコンクリート温度 (°C)

A : 定数で一般に10°Cが用いられる

Δt : 時間 (日または時)

この式により養生方法別の積算温度を算出し、再生粗

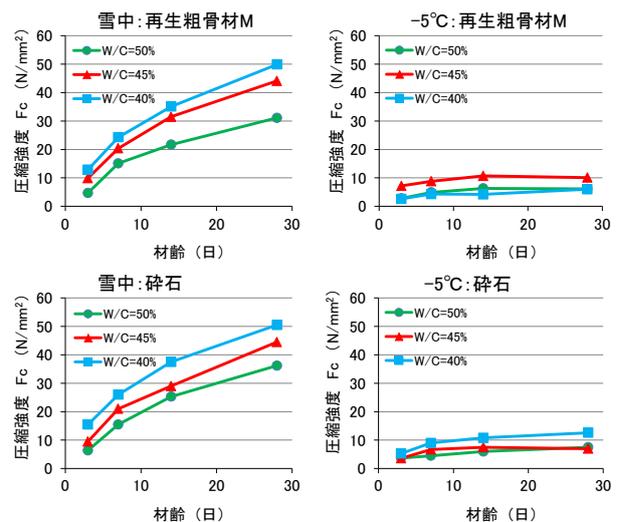


図-2 圧縮強度試験結果

骨材を用いた配合における積算温度と圧縮強度の関係を示したのが図-3である。雪中養生した場合の結果を実線で、-5℃で養生した場合の結果を破線で示した。なお、雪中養生時の積算温度は実測平均値の1℃で計算した。

雪中養生した場合を見ると、いずれの水セメント比においても積算温度の増加とともに圧縮強度は増大し、水セメント比が小さいほど積算温度あたりの強度発現が大きくなることが確認できる。

一方、-5℃で養生した供試体は、積算温度が増加しても圧縮強度の増加はほとんど見られなかった。本研究では、最も厳しい状況を想定し、打設直後から前養生なしに-5℃養生を行っているが、通常、耐寒剤を用いた場合は、製品にもよるが6~12時間程度5℃以上を保つこととされていることから、初期凍害を受けた可能性がある。

これらのことから、雪中養生により温度を1℃程度に保つことで強度の発現が期待出来るが、養生温度を-5℃まで下げた場合には、硬化が始まるまで1℃以上を数時間保つなどの前養生を行う必要があると考えられる。

図-4に、既往の研究⁴⁾で得た、再生粗骨材を用いたコンクリート(W/C=50%)の雪中養生における積算温度と圧縮強度の関係と、本研究における測定結果との比較を示す。なお、図には、既往の研究で得た20℃封緘養生の測定結果も示している。併せて、表-3に既往研究におけるコンクリートの配合を示す。既往研究での使用材料は、セメントおよび細骨材は本研究と同じだが、再生粗骨材は同一製造会社から入手しているものの絶乾密度2.50g/cm³、吸水率4.62%、粗骨材最大寸法25mmと異なっている。

雪中養生したコンクリートの積算強度と圧縮強度の関係は、既往研究と本研究では再生粗骨材の物性や配合が異なるものの、水セメント比が同じであれば同等であることが確認できる。また、20℃封緘養生と雪中養生を比べると、積算温度に対する圧縮強度の増加割合(グラフの傾き)はほぼ同程度であるが、積算温度あたりの強度は20℃封緘養生の方が大きかった。このことから、低温養生を行う場合には、温度管理を含めた品質管理の影響を受けやすいことが想定されるため、今後詳細に検討する必要がある。

3.2 乾燥収縮

-5℃養生はコンクリートとしての適用が難しいことから、雪中養生のプレキャストコンクリート製品への適用性確認を目的として、再生粗骨材を用いた配合と天然碎石を用いた配合における乾燥収縮試験を行った。その結果を図-5に示す。横軸は脱型後の初期値測定日を0日とした乾燥期間を、縦軸はそれぞれの長さ変化割合を百分率で表している。

全ての水セメント比において、再生粗骨材を用いた配

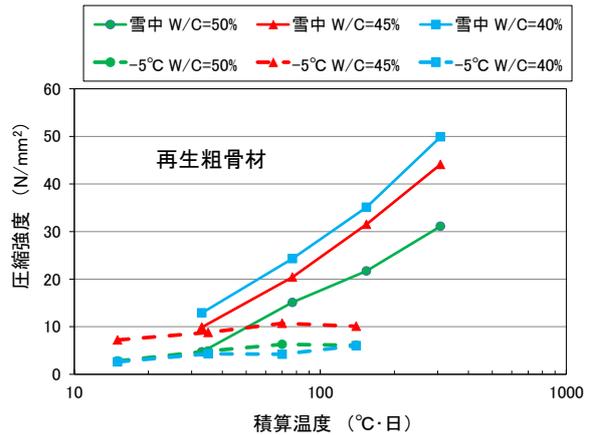


図-3 積算温度と圧縮強度の関係

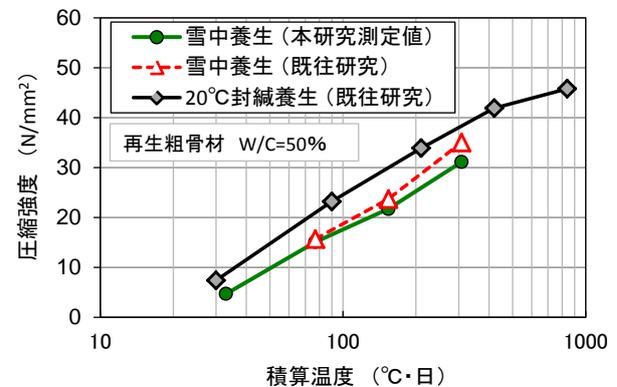


図-4 既往研究⁴⁾の積算温度と圧縮強度の関係との比較

表-3 既往研究⁴⁾の配合

セメント種類	粗骨材種類	耐寒剤添加量	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				実測値	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スランブ (cm)	空気量 (%)
高炉セメントB種	再生粗骨材M	セメント100kgあたり4リットル添加	50	44	122	244	879	1049	5.7	6.3

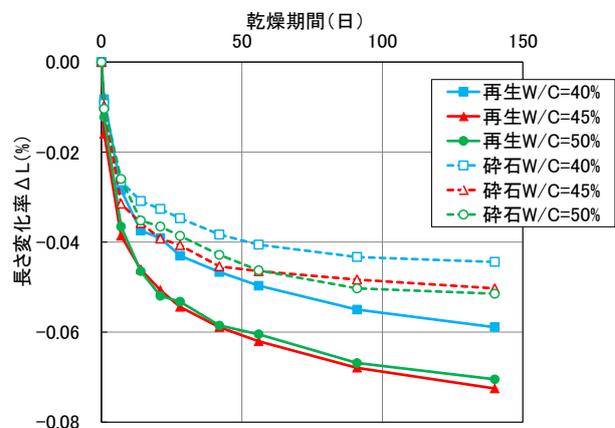


図-5 長さ変化率

合の長さ変化率が、天然砕石を用いた配合より大きくなった。これは、過去の試験結果⁵⁾と同傾向である。理由として、本試験で使用した再生粗骨材の吸水率は4.27%で、天然砕石の吸水率1.54%よりも大きく、吸水率の大きい再生骨材コンクリートの方が収縮が大きくなったと考えられる。

3.3 スケーリング量

再生粗骨材を用いた配合と天然砕石を用いた配合におけるスケーリング試験結果を図-6に示す。横軸は凍結融解サイクルを、縦軸はスケーリング量を表している。

75サイクルまでに全ての水セメント比において、再生粗骨材を用いた配合のスケーリング量が天然砕石を用いた配合のスケーリング量よりも大きくなった。天然砕石使用では量の伸びが鈍化傾向にあるが、再生粗骨材使用では継続して増加傾向にある。

水セメント比とスケーリング量については、50サイクル程度までは水セメント比が小さい方ほどスケーリング量が少なくなっているが、その後は明確な傾向はみられなかった。

スケーリング量は、試験方法は異なるが、定量的評価指標としてRILEM CDF試験でのスケーリング許容値は28サイクル時0.15g/cm²であり、これと比較すると、W/C=50およびW/C=45の配合でこの数値を超える結果となった。しかし、ASTM C672法によるスケーリング試験とRILEM CDF試験では、試験溶液の供給方法や凍結融解条件等が異なり、既往の研究では、配合によりASTM C672法の方がRILEM CDF試験よりスケーリング量が1.5から2倍大きくなると報告⁶⁾するものや、逆にASTM法の法がCDF試験よりスケーリング量が小さく、CDF試験の法が促進されやすいとの報告⁷⁾もある。このため、定量的な評価を行うには、より詳細な検討が必要である。

一方、ASTM C672では、定性的ではあるが、凍結融解50サイクル時点において、表-4に示す6段階の目視レイティングにより評価することが規定されている。そこで、凍結融解50サイクル目のスケーリング劣化状況を写真-5に示す。

50サイクル目のスケーリング表面を観察すると、再生粗骨材使用のすべての配合において粗骨材が全面に露出しており、表-4に示した評価基準によれば評価5に相当する。しかし、骨材の色の違いから再生粗骨材を用いた供試体ほど目立たないものの、天然骨材使用の供試体についても、粗骨材がかなり露出しており、表-4に示した評価基準によれば評価4から評価5に相当すると判断できる。これについて、本研究では、ASRや塩害抑制の観点から高炉セメントB種を使用した方が、一方で高炉セメントは普通セメントに比べてスケーリングが大きくなることが報告されており⁸⁾、積雪寒冷地で適用するにはセメント

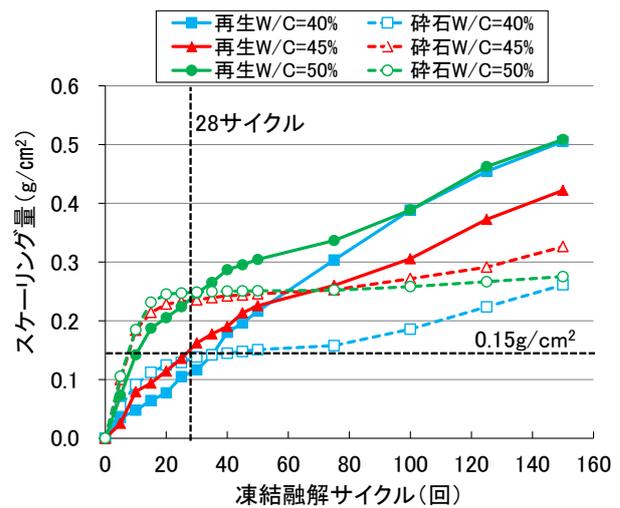


図-6 スケーリング量

表-4 ASTM 法に規定される目視評価基準

評価	試験面の劣化状況
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	評価1と評価3の中間程度の劣化性能
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価3と評価5の中間程度の劣化性能
5	粗骨材が全面に露出する程の激しい剥離

の選定も考慮する必要があると考えられる。

いずれにしても、本研究においては、凍結融解サイクル数が少ない状況において顕著なスケーリングが認められるため、雪中養生に際してはスケーリングに対する十分な検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

一連の研究から以下の結論を得た。

- (1) 再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合で、雪中養生を行った場合、積算温度を考慮して養生日数を確保することにより、標準養生と同等の圧縮強度を得ることが出来ることを確認した。
- (2) 再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合では、すべての水セメント比で雪中養生の場合は28日強度が30N/mm²を超えたが、-5℃まで養生温度を下げた場合、28日強度でも10N/mm²程度にとどまり、圧縮強度を得ることが難しいことを確認した。
- (3) 雪中養生で得られる圧縮強度は、再生粗骨材と天然砕石の差は小さいことを確認した。
- (4) 再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合で雪中養生を行った場合の乾燥収縮率は、経過期間が短い再生粗骨材を用いた配合が天然砕石を用いた配合より大きくなった。

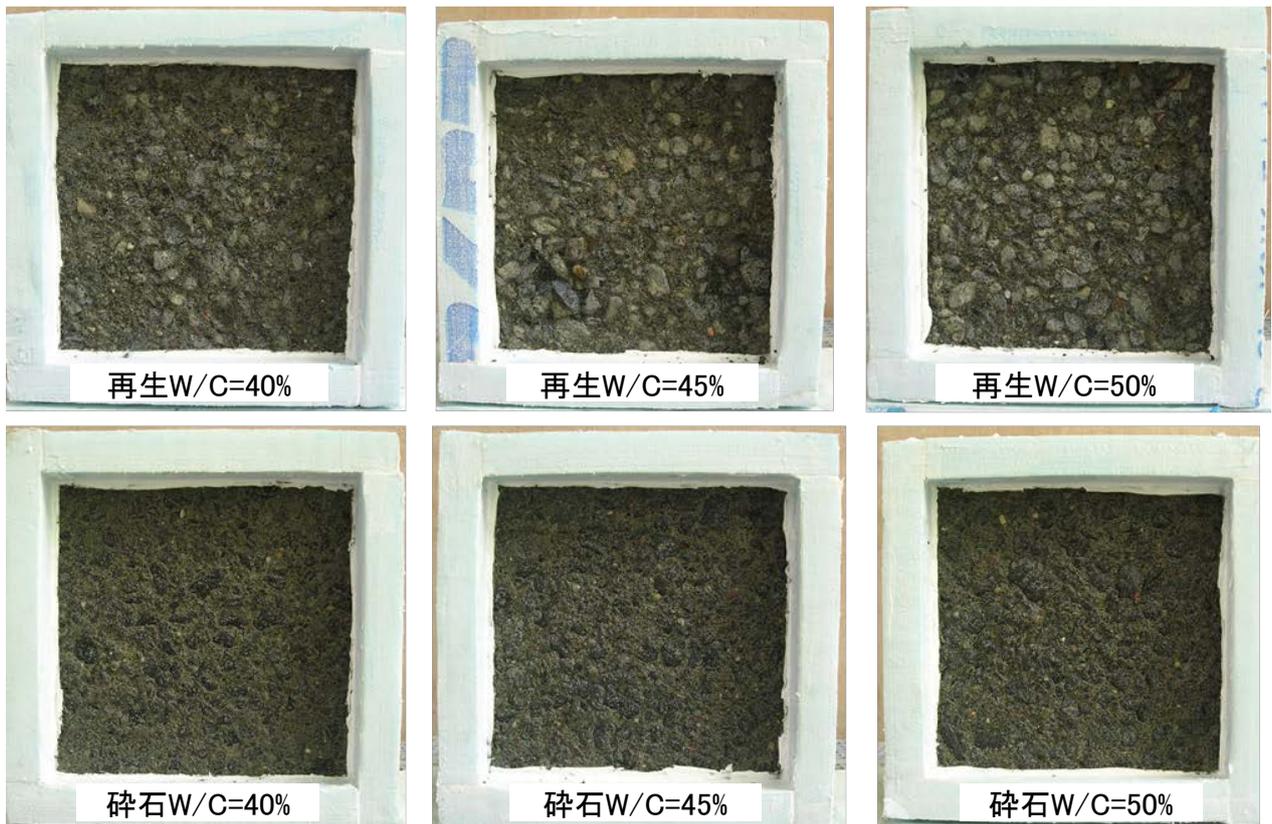


写真-5 スケーリング劣化状況 (50 サイクル時点)

(5) 再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合で雪中養生を行った場合、碎石を用いた場合よりも粗骨材が露出して顕著なスケーリングが認められ、特に高炉セメントB種を用いる場合にはスケーリングが増加する可能性が高くなるため、雪中養生を行う場合は、骨材の影響とともにセメントの選定を含めて十分に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 下谷裕司, 吉田行, 田口史雄: 再生粗骨材中の塩化物イオンが鉄筋腐食に及ぼす影響と鉄筋腐食の抑制対策に関する検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-411, pp.821-822, 2010.9
- 2) 通年施工推進協議会: 耐寒剤運用マニュアル (案), 2005.3
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書施工編・施工標準, pp.162-163, 2013.3
- 4) 島多昭典, 田畑浩太郎, 田口史雄, 吉田行: 積雪寒冷期のプレキャストコンクリート製品製造時の養生方法に関する研究—雪中養生の試行—, 雪氷研究大会 (2013・北見) 講演要旨集, p93, 2013.9
- 5) 田畑浩太郎, 田口史雄, 吉田行: 再生骨材Mコンクリートの乾燥収縮特性とスケーリング抵抗性に関する研究, 第 56 回北海道開発技術研究発表会, 2013.2
- 6) 権代由範, 庄谷征美, 月永洋一, 子田康弘: 塩化物環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第 20 巻第 1 号, pp.59-70, 2009.1
- 7) 遠藤裕丈, 吾田洋一, 伊藤憲章: 道路設計要領の目安を満足するシラン系表面含浸材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性の評価, 第 52 回北海道開発技術研究発表会, コー14, 2009.2
- 8) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊: 高炉セメントを用いたコンクリートのスケーリング抵抗性低下要因について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 61 号, 2005.2