

積雪寒冷地における再生粗骨材のプレキャストコンクリートの利用拡大に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：田口史雄、島多昭典、三原慎弘、吉田行、
田畑浩太郎

【要旨】

大規模災害で発生したコンクリート殻を原材料とする再生粗骨材の積雪寒冷地における PCa（プレキャストコンクリート）製品への適用のため、平成 25 年度は、積雪寒冷期における PCa 製品製造時の配合・養生についての検討と、中品質基準外の再生粗骨材がコンクリート性能に及ぼす影響の検証を行った。

前者は、耐寒剤を用いた配合では、0℃に保たれる「雪中養生」と、更に厳しい低温環境を想定した「-5℃養生」の供試体で、圧縮強度、スケーリング量等の試験を行い、雪中養生では養生日数を多く要するものの、必要な圧縮強度を得ることが出来た。一方、打設終了直後から-5℃養生を行った供試体では、必要な圧縮強度を得ることが出来なかった。このことから、被災地において低温環境であっても養生温度を 0℃程度に保つことが必要であることがわかった。

後者は、塩化物イオン量が JIS 基準を越えた再生粗骨材コンクリート供試体を蒸気養生で作成し、圧縮強度、スケーリング試験等を行った。その結果、圧縮強度は PCa 製品としての必要な強度を満足したが、スケーリング量については、塩化物イオン量が大きくなると顕著なスケーリングが認められ、塩化物イオン量が大きくなると予想される場合はスケーリングに対する十分な検討が必要であることがわかった。

また、凍・塩害環境下における中品質再生粗骨材の大型 PCa 製品への適用に関しては、平成 24 年度まで膨張材の使用により乾燥収縮低減効果、スケーリング抑制効果が認められたため、膨張材を混入した配合で大型暴露供試体を作成し、増毛の暴露試験場に設置した。

キーワード：再生粗骨材、プレキャストコンクリート、乾燥収縮、スケーリング、耐寒剤

1. はじめに

大規模災害の被災地では、大量の廃棄物の発生や復興用資材の不足など、早期復興を妨げる様々な問題が生じる。本研究では、災害時に発生する廃棄物の一つであるコンクリート殻を再生粗骨材にリサイクルし、その再生粗骨材を復興用資材に活用することで、廃棄物の処理と復興用資材不足の解消を図ることを目指して研究を進めている。

平成25年度は、被災地において不十分な設備環境の中での復興用資材の製造を想定し、低温環境下で耐寒剤を用いた配合での養生温度の影響を検証した。平成24年度の試験結果では、温度を概ね0℃に保つことができる雪の中では、養生日数を多くすることで強度も期待出来ることが確認されたため、本年度は更に厳しい養生温度環境として-5℃の養生を実施し、圧縮強度や乾燥収縮量、スケーリング量を比較した。試験詳細と結果については第2章第1節で報告する。

また、JIS基準で定められた品質規格のうち、塩化物量の基準値を超えJIS規格品としてPCa製品に適用出来なくなった再生粗骨材を活用し、規格外再生骨材に

よるPCa製品の利用範囲を検証するため、塩化物量を変えた配合で圧縮強度や乾燥収縮量、スケーリング量を比較した。その詳細と結果については第2章第2節で報告する。

再生粗骨材の大型PCa製品への適用については、乾燥収縮やスケーリングへの対応が必要であるため、平成23年度と平成24年度の室内試験において、膨張材の添加量と水結合材比を変えてPCa製品への適用性を検討した。平成25年度は、過年度の研究で求められた最適な膨張材の添加量と水結合材比を用いた配合で、PCa製品工場で大規模供試体を製作し、増毛暴露試験場に設置した。工場の製作状況や暴露試験場での設置状況、更に大規模供試体を製作した時の配合による圧縮強度試験結果を第3章で報告する。

2. 大規模災害で発生したコンクリート殻を原材料とする再生粗骨材の積雪寒冷地におけるPCa製品への適用に関する研究

2.1 積雪寒冷期におけるPCa製品製造時の配合・養生方法についての検討

2.1.1 研究概要

大規模災害の被災地では、生コンクリートや骨材などが不足し、早期復旧に影響することがある。また、PCa製品工場が被災して復旧用資材の製造に支障をきたす場合もある。本研究は、災害により発生したコンクリート殻の活用と、骨材不足解消のため再生粗骨材を用いたPCa製品の製造と適用範囲を明らかにする。なお、災害によりPCa製品工場で行われる蒸気養生が出来なくなった場合を想定し、低温環境下での養生について検証し、積雪寒冷期において大規模災害で発生したコンクリート殻を原材料とする再生粗骨材をPCa製品に適用し、復旧用資材として供給することで、早期復旧・復興に寄与することを目的としている。

平成24年度は、再生粗骨材Mに耐寒剤を用いた配合と天然砕石に耐寒剤を用いた配合で低温環境を考慮した雪中養生及び標準養生を行い、積算温度と圧縮強度の関係を比較検証した。その結果、積算温度と圧縮強度の関係において雪中養生と標準養生は同傾向を示すことを確認し、雪中養生を行った供試体であっても、養生期間を長くすることでPCa製品として必要な強度を得ることが出来ることを明らかにした。

平成25年度は、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、再生粗骨材Mに耐寒剤を用いた配合で水結材比を変えて供試体を作製し、雪中養生(0℃)と、より厳しい条件として-5℃養生を行い、圧縮強度試験、乾燥収縮試験による長さ変化測定、スケールリング試験によるスケールリング量測定を行った。

2.1.2 使用材料及び配合

表-1に使用材料を示す。粗骨材は東日本大震災で発生したコンクリート殻をリサイクルして造られた再生粗骨材Mを用いた。比較対象の天然砕石は小樽市見晴産、細骨材は苫小牧市樽前産のものを使用した。また、耐寒剤使用時は普通ポルトランドセメントが標準となっている¹⁾が、本試験においては既往の研究²⁾により再生粗骨材に含まれる塩化物イオンの拡散抵抗性に優れた高炉セメントB種を用いた。耐寒剤は、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を主成分とし、無アルカリ・無塩化タイプのものを用いた。使用量は、製品の推奨値を参考にして単位セメ

ント量100kg当たり40とし、単位水量置換とした。耐寒剤の物性を表-2に示す。

コンクリートの配合を表-3に示す。骨材は再生粗骨材Mと天然砕石とし、それぞれの配合において水結材比を40%、45%、50%と変えた。再生粗骨材使用供試体はNFと、天然骨材使用はNFVと記し、その後ろの数字は水結材比を示している。目標空気量と目標スランプは「耐寒剤運用マニュアル(案)」¹⁾を準用して、5.0±1.0%と8.0±2.5cmとした。

表-1 使用材料

種別	使用材量
セメント	高炉セメントB種 (密度3.05g/cm ³ 、比表面積3.75cm ² /g)
粗骨材	再生粗骨材M (絶乾密度2.52g/cm ³ 、吸水率4.27%、実積率62.80%)
	小樽市見晴産安山岩砕石 (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 単位水量置換

表-2 耐寒剤物性

外 観	密 度 (g/cm ³ 、20℃)	全アルカリ量* (%)	塩化物イオン量* (%)
淡褐色液体	1.380~1.420	0.2	0.01

*全アルカリ量・塩化物イオン量は分析値例

表-3 コンクリート配合表

配合 記号	セメント種類		粗骨材種類	耐寒剤 (^g /C100kg)	配 合				配合結果				
	W/B (%)	目 標 (%)			単 位 量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)			
		Air			s/a	W	B	S			G		
NF40	高炉 セメン ト B種	再生 粗骨 材M	4.0	5.0	44	40.0		130	325	838	1006	10.5	5.3
NF45						45.0		133	296	846	1016	9.5	6.0
NF50						50.0		135	270	853	1025	8.6	5.5
NFV40						40.0		131	328	835	1065	5.9	5.0
NFV45						45.0		137	304	838	1067	9.5	6.5
NFV50		砕石	50.0			140	280	844	1047	9.1	6.0		

2.1.3 試験概要

(1) 養生方法

雪中養生とは、上面をラップフィルムで覆っ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³⁾。平成24年度の実験では雪中養生の適用性が確認出来たので、本試験ではより厳しい低温環境下での適用性を確認する目的から、雪中養生(0℃養生)と、低温恒温装置による-5℃養生を実施した。なお、コンクリート打設直後に養生を開始している。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。-5℃養生の場合、雪の中に埋めないが、雪中養生と条件を揃えるために、



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

上面をラップフィルムで覆っている。

(2) 圧縮強度試験

PCa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 $\phi 10 \times 20$ cm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「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠して長さ変化量を測定した。供試体は $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱供試体とし、製品工場の一般的な出荷管理材齢である材齢14日に脱型して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日に測定を行った。

(4) スケーリング試験

供試体のスケーリング抵抗性を確認するため、北米のスケーリング評価法の規格である ASTM C 672⁴⁾ に準拠してスケーリング量の測定を行った。供試体は $22 \times 22 \times 10$ cmの角柱供試体とし、材齢14日に脱型し、測定面に水を湛水するための土手を取り付けた。測定面以外の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。その後、供試体の表面に塩水(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40日目まで測定を行った。

2.1.4 試験結果

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-1に示す。再生粗骨材Mを使用した配合と砕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、養生温度が0℃、-5℃どちらの場合でも、いずれの水結合材比においても、骨材の違いによる圧縮強度の差は見られなかった。これは平成24年度に得られた結果と同様であり、このことから、耐寒剤を用いた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、養生温度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、骨材の別にかかわらず、全ての水結合材比において28日強度が 30 N/mm^2 を超えた。一方、-5℃で養生した供試体は、全てにおいて28日強度が 10 N/mm^2 程度までとなり、PCa製品としての強度発現に至らない結果となった。

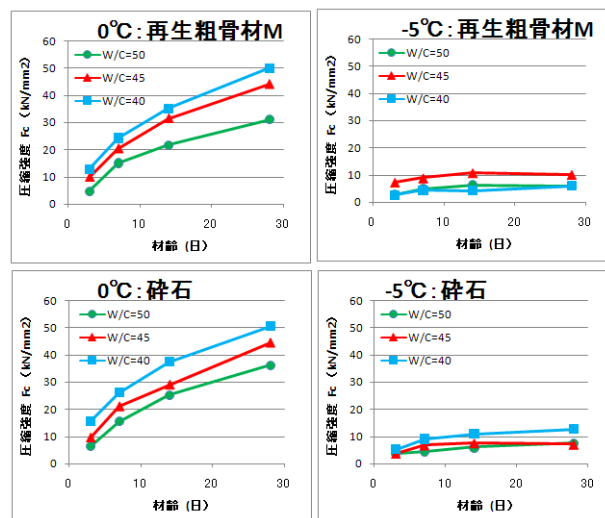


図-1 圧縮強度試験結果

養生方法別の積算温度表を表-4に、再生粗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図-2に示す。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。また、平成24年度に得た標準養生時の積算温度と圧縮強度の関係を表・グラフに加えた。

まず、雪中養生した場合を見ると、水結合材比に関わらず標準養生とほぼ同じ傾きになり、養生日数を長くすることで標準養生と同等の圧縮強度が得られることを確認した。更に、標準養生では圧縮強度の増加割合がやや鈍化しているが、雪中養生を行った供試体では鈍化しなかった。この傾向は平成24年度にも確認されているが、コンクリートは初期硬化時の養生温度を低く保持することで長期強度の伸びが大きくなるという一般的な傾向と一致した結果となった。

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。

これらのことから、養生温度を0℃に保つことで強度の発現が期待出来るが、養生温度が-5℃まで下がってしまうとコンクリートとして適用できない懸念があることが示唆された。

(2) 乾燥収縮試験

-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(0℃)のPCa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砕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-3に示す。横軸は脱型後の初期値測定日を0日とした経過期間を、縦軸はそれぞれの変化割合を百分率で表している。

全ての水結合材比において、再生粗骨材を用いた配合の長さ変化率が、天然砕石を用いた配合より若干大きくなった。これは、本研究における過去の試験結果と同傾向である。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、この吸水率の差が結果に影響したと考えられる。なお、乾燥収縮試験は180日を目標としているが、試験は経過期間が短く、また、再生粗骨材と砕石の長さ変化率の差は0.01%と小さいことから、最終的な結論は今後の経過を観察して判断する必要がある。

(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-4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。

40サイクル目に着目すると、水結合材比45%をのぞ

き、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。天然骨材使用ではその全てで量の伸びが鈍化しているが、再生骨材使用では鈍化していないため、水結合材比45%についても今後の経過観察が必要と考える。また、水結合材比とスケーリング量については、水結合材比が大きくなるほどスケーリング量も大きくなった。スケーリング試験は100サイクルを目標にしているが、スケーリング量は、NFV-40を除いた全てにおいて40サイクル目で0.15g/cm²を超えている。試験方法は違うがRILEM CDF試験でのスケーリング許容値は0.15g/cm²であり、この数値をほとんどの配合で超える結果となった。40サイクル目のスケーリング表面を観察(写真-3参照)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露出しており、スケーリングが顕著に認められる。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いる。日数が少ない中で顕著なスケーリングが認められるため、雪中養生を行う場合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。

表-4 積算温度表

養生方法	コンクリート温度 T(°C)	積算温度 M(°C・日)			
		3日	7日	14日	28日
雪中養生	0	30	70	140	280
-5℃養生	-5	15	35	70	140
標準養生	20	90	210	420	840

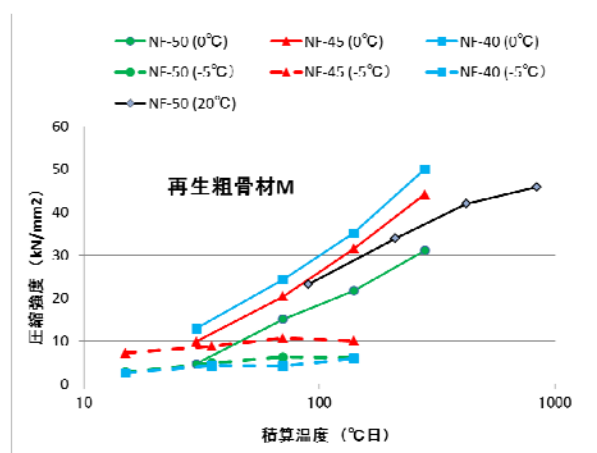


図-2 積算温度と圧縮強度の関係

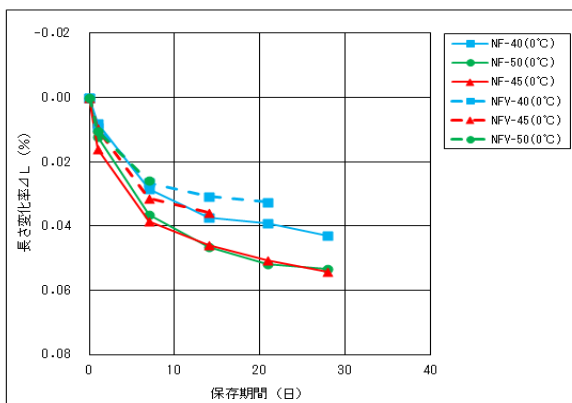


図-3 長さ変化率

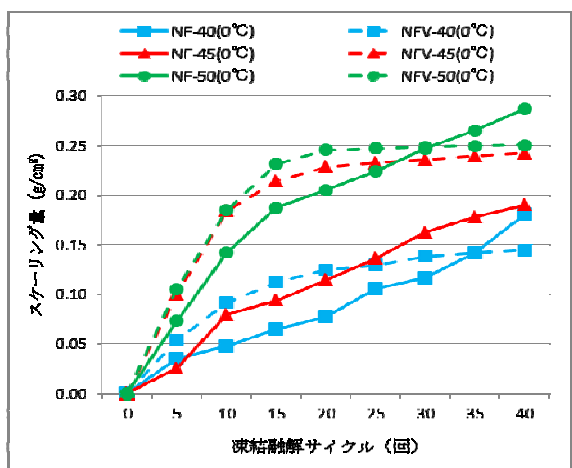


図-4 スケーリング量

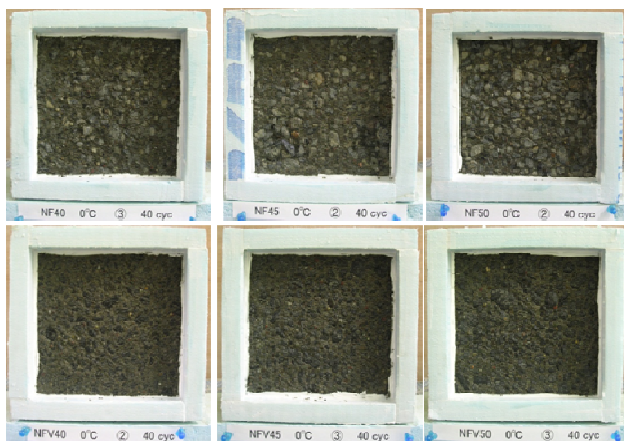


写真-3 スケーリング状況 (40 サイクル時点)
上段が再生骨材、下段が天然骨材使用
左から水結合材比 40%、45%、50%

2.1.5 まとめ

(1) 再生粗骨材と耐寒剤を用いた配合で、養生温度を0°Cに保つ雪中養生を行った場合、積算温度が同等となる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、すべての水混合材比で0°C養生の場合は28日強度が30N/mm²を超えたが、-5°C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骨材を用いた配合が天然骨材を用いた配合より大きくなった。

(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は、粗骨材が露出して顕著なスケーリングが認められたため、雪中養生を行う場合はその影響を十分に考慮する必要がある。

2.2 中品質基準外の再生粗骨材がコンクリート性能 (スケーリング抵抗性等) に及ぼす影響の検証

2.2.1 研究概要

大規模災害で発生した大量のコンクリート殻は、被災地の早期復旧の妨げとなるため、早急な処理が望まれる。また、管理された環境下で解体されたコンクリート殻とは異なり、災害で発生したコンクリート殻は様々な品質が混在するため、これらコンクリート殻を原材料として製造した再生粗骨材は、塩化物量をはじめとする再生粗骨材MのJIS基準を満足出来ない(以下、基準外再生粗骨材と記述)ことが想定される。さらに、被災地では水道水の供給が絶たれ、早急にコンクリート製品を作製するためには、海水による練り混ぜを余儀なくされる可能性もある。したがって、早急にコンクリート殻を処理し、海水(塩分混入)による練り混ぜを想定して生成されたコンクリートの強度等を把握しておく必要がある。

平成24年度は、吸水率を変えた基準外再生粗骨材と高炉セメントB種を用いた配合で、PCa製品製造と同様に蒸気養生を用いて供試体を作成し、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、スケーリング量測定を実施した。その結果、吸水率が大きくなると圧縮強度は低下するもののPCa製品としての適用性は確保出来ることを確認した。しかし、乾燥収縮量やスケーリング量の増大を想定し、PCa製品への適用方法について検討する必要があることも判った。

平成25年度は、再生粗骨材を用いて、塩化物イオン量の大きい供試体を作製し、圧縮強度試験や乾燥収縮試験、スケーリング量測定を行い、基準を超えた塩化

物量がこれら試験の結果に及ぼす影響について検証した。

2.2.2 試験概要

(1) 塩化物イオン量の設定

JIS基準では、再生粗骨材Mに含まれる塩化物量を0.04%以下、再生粗骨材Mを用いたコンクリートに含まれる塩化物イオン量を 0.3kg/m^3 以下と定めている。本試験では、災害時に作製される基準外再生粗骨材の使用を想定し、また、練り混ぜ水に海水を用いるのを強いられることも想定し、再生粗骨材コンクリートの配合に塩化ナトリウムを直接添加して、塩化物イオン量が 0.3kg/m^3 以上となるコンクリートで試験を行い、強度特性や耐久性を確認した。塩化ナトリウムは、再生粗骨材コンクリートの塩化物イオン量が 1.0kg/m^3 と 3.0kg/m^3 になるように調整して添加した。

表-5 使用材料表

種別	使用材量
セメント	高炉セメントB種 (密度 3.05g/cm^3 、比表面積 $3.75\text{cm}^2/\text{g}$)
粗骨材	再生骨材M
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)
混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物
	AE剤 変性ロジン酸化合物系

表-6 配合表

配合 記号	セメント 種類	粗骨材 種類	配合		W/B (%)	単位量(kg/m^3)				配合結果	
			塩化ナトリウム 添加量(kg/m^3)	塩化物イオン量 (kg/m^3)		W	S	S	G	スラブ 寸法 (cm)	空気量 (%)
CL(1)-45	高炉 セメント B種	再生 粗骨材 M	0.49	1.0	45	155	344	801	962	9.1	5.9
CL(3)-45			1.75	3.0		155	344	801	962	8.5	5.0
N-45			—	0.3以下		155	344	801	962	9.4	6.0
CL(1)-50			0.19	1.0	50	153	306	819	984	10.5	6.0
CL(3)-50			1.75	3.0		153	306	819	984	8.6	5.7
N-50			—	0.3以下		153	306	819	984	7.9	6.4

(2) 使用材料及び配合

表-5に使用材料表を示す。粗骨材は、東日本大震災で発生したコンクリート殻をリサイクルして造られた再生粗骨材Mを用いた。細骨材は苫小牧市樽前産のものを使用した。セメントは塩化物イオンの拡散抵抗性に優れた高炉セメントB種を、混和剤にはAE減水剤（リグニンスルホン酸塩系）とAE剤（変性ロジン酸化合物系）を用いた。

コンクリートの配合を表-6に示す。PCa 製品への適用を目的としていることから、目標空気量は、「再生粗骨材Mを用いたプレキャストコンクリート製品のガイドライン試案」⁵⁾に準拠して $5.0\pm 1.5\%$ とし、AE剤の添加量にて調整した。目標スラブは $8.0\pm 2.5\text{cm}$

とした。塩化物イオン量は 1.0kg/m^3 、 3.0kg/m^3 とし、比較対象として塩化ナトリウムを添加せず塩化物イオン量が 0.3kg/m^3 以下の配合も設定した。水結合材比は45%と50%に設定した。

(3) 養生方法

塩化物量が基準外であること以外は実際のPCa製品製造と同じ条件にするため、供試体の養生方法はコンクリート製品工場で行われている蒸気養生を採用した。

蒸気養生の方法は、コンクリート標準示方書に準拠し、前養生として 20°C の室内で2~3時間静置した後、蒸気養生を開始し、室内温度の上昇目標を 20°C/h として養生室内の温度が約2時間15分で 65°C になるまでボイラーで加温した。同時にスチームヒーターにより加湿し、室内の湿度が85%を下回らないように注意した。養生室内の温度が 65°C に達したらボイラーを調整してそのまま3時間保持し、その後ボイラーを止め、養生室内温度が 20°C になるまで自然徐冷した。蒸気養生の概念を図-5に示す。

(4) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。前節と同様に供試体は $\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱供試体とした。前節とは違い蒸気養生となるため、蒸気養生の翌日（材齢1日）には脱型し、その後恒温恒湿室（ 20°C 、60%）で気中養生を行った。圧縮強度は、材齢1、7、14、28日に測定した。

(5) 乾燥収縮試験

JIS A 1129 に準拠して乾燥収縮試験を行った。前節と同様、供試体は、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体とし、蒸気養生の翌日に脱型し、計測用ガラス板を接着して初期値を測定した。その後、恒温恒湿室に静置した。乾燥収縮ひずみと供試体の質量変化は、最大6ヶ月（180日）測定することとした。

(6) スケーリング量測定

ASTM C 672 に準拠してスケーリング量の測定を行った。供試体寸法は前節同様 $22\times 22\times 10\text{cm}$ の角柱供試体とし、蒸気養生の翌日に脱型し、材齢14日まで恒温恒湿室に静置した。測定面と測定面以外の処理方法、また、1サイクルの凍結融解サイクルについては前節と同様とし、スケーリング量は5サイクル毎に測定を行った。

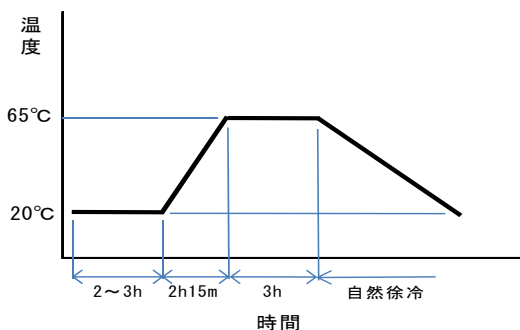


図-5 蒸気養生の概念

2.2.3 試験結果

(1) 圧縮強度試験

水結合材比が45%の時の試験結果を図-6に、水結合材比が50%の時の試験結果を図-7に示す。

どちらの水結合材比においても塩化物イオン量と圧縮強度の関連性は確認できなかった。混合セメントに海水用特殊混和剤を用いた海水練りコンクリートにおいて圧縮強度が大きくなる試験結果⁶⁾が示されており、再生粗骨材を用いて蒸気養生を行うなど試験条件は異なるが、本試験においても海水に一番近いと考えられる塩化物イオン量を最多としたCL(3)においてその傾向が示されたと考えている。

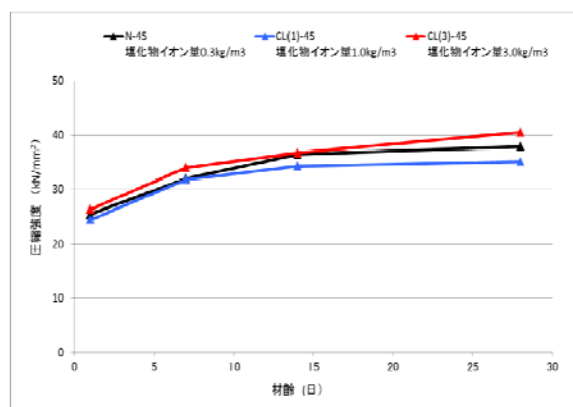


図-6 圧縮強度試験結果 (水結合材比 45%)

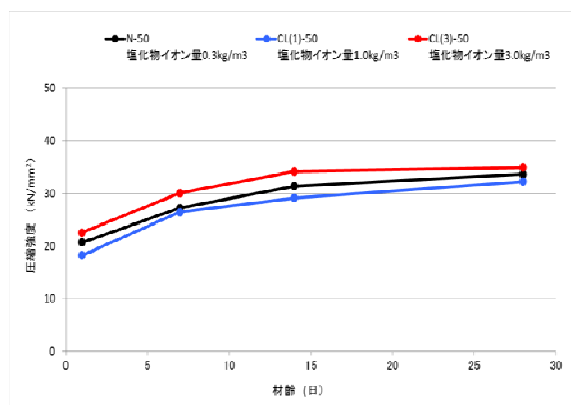


図-7 圧縮強度試験結果 (水結合材比 50%)

また、現時点ではコンクリートに含まれる塩化物イオン量がJIS基準を越えた配合であっても、どの配合も材齢7日の圧縮強度が24N/mm²を超えている。

しかし、一般的にコンクリート内の塩化物イオンは、セメントに含まれるケイ酸カルシウムと反応して中性化を促進させ、コンクリート性状を劣化させることから、本試験においては長期的に観察し判断する必要がある。

(2) 乾燥収縮試験

水結合材比が45%の時の試験結果を図-8に、水結合材比が50%の時の試験結果を図-9に示す。横軸は脱型後の初期値測定日を0日とした経過期間を、縦軸はそれぞれの変化割合を百分率で表している。

まず、水結合材比が45%の結果を見ると、全ての塩化物イオン量の配合においてほぼ等しい測定結果となった。また、水結合材比が50%の配合においても同様の結果となった。この結果から、コンクリートに含まれる塩化物イオン量の増加により、長さ変化率は大きく変化しないと判断出来る。ただし、乾燥収縮試験は180日を目標としているが、本試験においては未だ28日であり、今後の経過を観察して判断する必要がある。

(3) スケーリング量測定

図-10にスケーリング量測定結果を示す。水結合比45%、50%いずれの場合も、塩化物イオン量とスケーリング量の関係は、塩化物イオン量が大きいほどスケーリング量も大きくなる傾向を確認した。また、水結合材比が大きいほど、スケーリング量も大きいことがわかる。特に、水結合比50%の塩化物イオン量が3.0kg/m³の場合のスケーリング量は大きな値となった。ただし、その量に着目すると、サイクルは100であるものの、絶対量的には未だ小さいと言える。

写真-4に40サイクル時点のスケーリングの状況を示す。左から、塩化物イオン量が0.3kg/m³以下、1.0kg/m³、3.0kg/m³の供試体である。水結合材比に関わらず、塩化物イオン量が大きくなるとスケーリングも大きくなることが確認出来る。また、本試験が準拠しているASTM C 672 による目視でのスケーリング評価では、水結合材比が50%、塩化物イオン量が3.0kg/m³の配合は、粗骨材の露出状況から、スケーリングが顕著に認められるという評価になる。

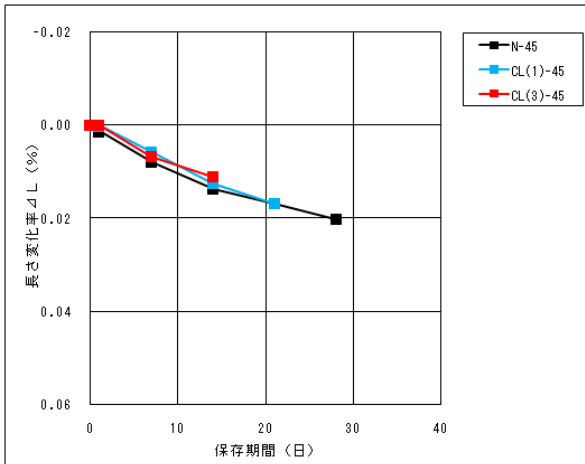


図-8 乾燥収縮試験結果 (水結合材比 45%)

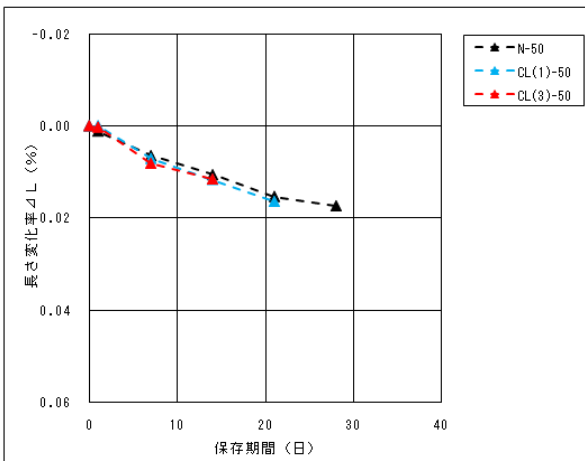


図-9 乾燥収縮試験結果 (水結合材比 50%)

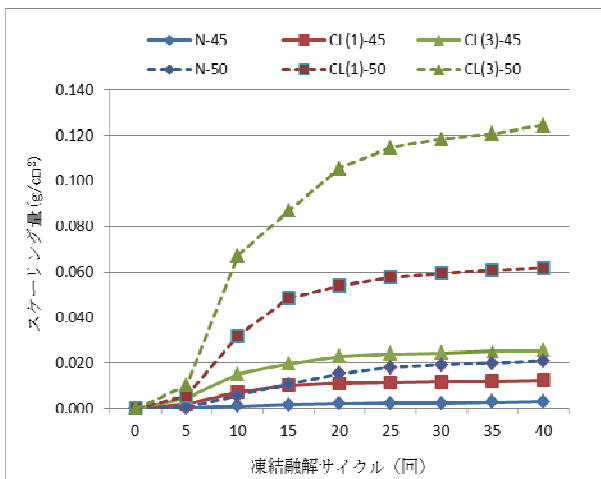


図-10 スケーリング試験結果

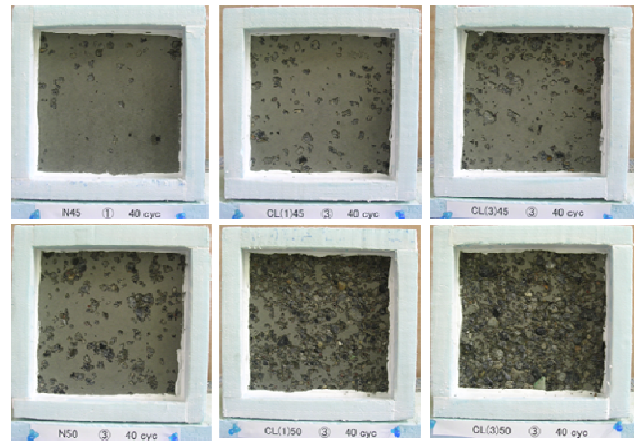


写真-4 スケーリング状況 (40サイクル時点)

上段が水結合材比45%、下段が水結合材比50%
塩化物イオン量は左から0.3kg/m³以下、
1.0kg/m³、3.0kg/m³

塩化物イオン量の増加に伴いスケージング量が増加しており、かつ水結合材比50%で塩化物イオン量が3.0kg/m³の供試体ではスケージングが顕著と評されること、さらに水結合材比が大きいほどスケージング量が多いことから、塩化物量が基準外となる再生粗骨材を用い、塩水による練り混ぜをする場合は、スケージングに対する検討が不可欠であると考えられる。

2.2.4 まとめ

(1) 再生粗骨材に高炉セメントB種を用いて蒸気養生を行った場合、水結合材比45%、50%どちらにおいても塩化物イオン量と圧縮強度の関連性は確認できなかった。また、現時点ではコンクリートに含まれる塩化物イオン量がJIS基準を越えた配合であっても、どの配合も材齢7日の圧縮強度が24N/mm²を超えている。しかし、一般的にコンクリート内の塩化物イオンは、セメントに含まれるケイ酸カルシウムと反応して中性化を促進させ、コンクリート性状を劣化させることから、長期的な視点で強度特性を見極める必要がある。

(2) 再生粗骨材に高炉セメントB種を用いて蒸気養生を行った場合、含まれる塩化物イオン量に関わらず長さ変化率はほぼ同じ値となった。ただし、乾燥収縮試験は180日を目標としているが、本試験においては未だ28日であり、今後の経過を観察して判断する必要がある。

(3) 再生粗骨材に高炉セメントB種を用いて蒸気養生を行った場合のスケージング量は、塩化物イオン量が大きくなるほど、水結合材比が大きいほど大きくなる

傾向を確認した。特に、水結合材比が50%で塩化物イオン量が 3.0kg/m^3 の配合は、粗骨材の露出状況では、ASTM C 672 のスケーリング評価において、サイクル数が少ないにもかかわらずスケーリングが顕著に認められる結果となった。このことから、塩化物イオン量が大きくなると予想される場合はスケーリングに対する検討が必要である。

3. 凍・塩害環境下における中品質再生粗骨材の大型PCa製品への適用に関する研究

3.1 暴露試験等による中品質再生粗骨材を使用した大型PCa製品の製造・施工時の課題と対策に関する検討

3.1.1 研究概要

鉄筋拘束率が高い大型PCa製品に中品質再生粗骨材である再生粗骨材Mを使用した場合、乾燥収縮により発生するひび割れが製品の耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。また、積雪寒冷地において再生粗骨材Mコンクリートを用いる場合には、凍害と塩害の複合劣化であるスケーリングの影響を考慮する必要がある。

このため本研究では、乾燥収縮量の低減を目的として膨張材を添加した配合で圧縮強度やスケーリングについても適用性を検討し、平成24年度までの研究成果において、再生粗骨材Mを大型PCa製品に適用拡大するための最適な膨張材の添加量と水結合材比を検討した。

平成25年度は、膨張材の有無で圧縮強度試験を行い、また、暴露試験を行うため、実際にPCa製品工場でL型擁壁の大型供試体を製造した。

3.1.2 使用材料

コンクリートの使用材料として、セメントは高炉セメントB種（密度 3.05g/cm^3 、比表面積 $3760\text{cm}^2/\text{g}$ ）、細骨材は苫小牧市錦多峰産の陸砂（表乾密度 2.69 、吸水率 1.55% 、粗粒率 2.74 ）とした。粗骨材は、東日本大震災で発生したコンクリート殻をリサイクルして造られた再生粗骨材M（表乾密度 2.52 、絶乾密度 2.42 、吸水率 4.27% ）を使用した。膨張材は石灰系のものを用い、混和剤は、減水剤とAE剤を用いた。

3.1.3 コンクリートの配合

膨張材の添加量は 30kg/m^3 のセメント置換とした。

なお、乾燥収縮によるひび割れなどの特性を把握するために、膨張材を添加した配合としない配合の2区分とした。水結合材比は、PCa製品工場における取り扱い易さを確認するため、40%と50%の2区分とし、それぞれを組み合わせて4つの大型供試体を製造した。目標空気量は $5.0\pm 1.5\%$ とし、AE剤の添加量にて調整した。目標スランプは、室内試験時は $8.0\pm 2.5\text{cm}$ としていたが、製品工場においてPCa製品の製造を想定すると堅めであり、流動性が懸念された。このため、ワーカビリティの確保を目的として目標スランプは $15.0\pm 2.5\text{cm}$ とし、減水材の添加量と細骨材率の増減により調整した。

配合については、PCa製品工場で数回トライアルした結果、表-7のように決定した。

3.1.4 圧縮強度試験

今回用いた膨張材の添加量や水結合材比は、平成24年度までの室内試験により、再生粗骨材をPCa製品に適用するために必要な圧縮強度が確保出来ることが確認されていたが、PCa製品工場で製造されたコンクリートにおいても同様な結果が得られるかを確認した。

圧縮強度試験結果を図-11に示す。PCa製品は、脱型・吊り上げ時にひび割れや破損の防止のために、脱型日（1日目）において $8\sim 12\text{N/mm}^2$ 程度の圧縮強度が必要とされる。試験結果を見ると、全ての配合において1日目の強度が 12N/mm^2 を越えていた。また、大型PCa製品として必要な圧縮強度は製品により異なるがおおよそ 24N/mm^2 である。一般的に製品工場においては出荷管理材齢で製品としての強度管理が行われることから、出荷管理材齢14日の圧縮強度をみると、全ての配合において 24N/mm^2 を超えていた。

3.1.5 大型供試体作製

製作する大型供試体は、乾燥収縮に関する現地調査が行いやすいL型擁壁（H-2000タイプ）とした。なお、製作直後の目視では初期ひび割れは認められなかった。図-12にL型擁壁の詳細図を、写真-5に工場での製作状況を、写真-6に暴露試験場への設置状況を示す。今後は定期的に乾燥収縮とスケーリング試験を実施する予定である。

表-7 コンクリート配合

試験体名	W/B (%)	細骨材率 (%)	単 位 量					
			水 (kg/m^3)	セメント (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	再生粗骨材 (kg/m^3)	膨張材 (kg/m^3)	減水剤 (kg/m^3)
N40	40.0	47.0	154	385	847	895	0	3.27
EX30-40	40.0	47.0	154	355	847	895	30	3.27
N50	50.0	50.0	150	300	944	885	0	3.00
EX30-50	50.0	50.0	150	270	944	882	30	3.00

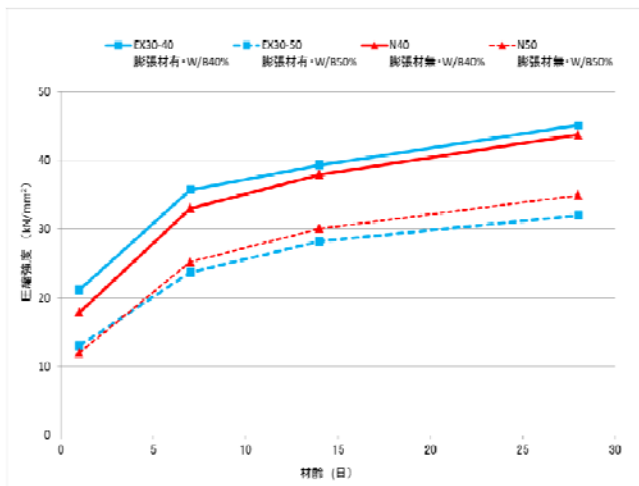


図-11 圧縮強度試験結果



写真-6 暴露試験場への設置状況

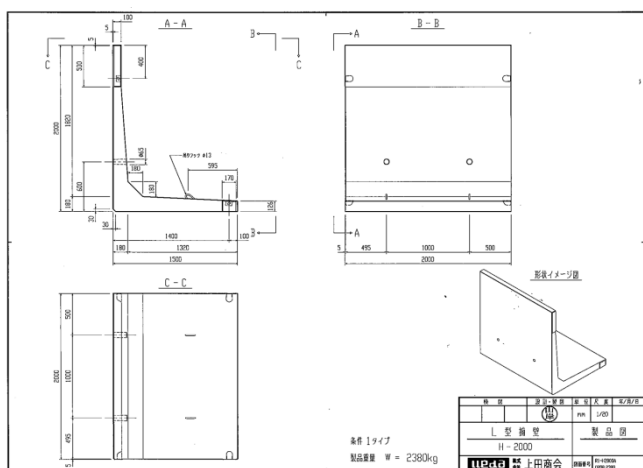


図-12 L型擁壁詳細図



写真-5 大型供試体製作状況

3.1.6 まとめ

- (1) 室内試験結果により決定した膨張材の添加量と水結合材比の異なった配合で、PCa製品工場で大規模供試体を製作した。その際製作した供試体で圧縮強度試験を行った結果、PCa製品として必要な強度を満足した。
- (2) 大規模供試体の乾燥収縮量とスケーリング量については、今後暴露試験により確認していく。

参考文献

- 1) 通年施工推進協議会:耐寒剤運用マニュアル(案)、平成17年3月
- 2) 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、2010
- 3) 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、2013.9
- 4) American Society for Testing and Materials、Designation: C 672/C 672M-98、Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- 5) 日本コンクリート協会:プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会 報告書、2009.8
- 6) 竹田宣典、片野啓三郎、久田真、大即伸明:コンクリートがらと海水を使用した港湾構造物の築造技術、震災がれきと産業副産物のアロケーション最適化コンソーシアム

A STUDY ON INCREASING THE USE OF RECYCLED COARSE AGGREGATE FOR PRE-CAST CONCRETE IN COLD SNOWY AREAS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Maintenance

Engineering Research Group

(Materials Research Team)

Author : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori,

MIHARA Norihiro, YOSHIDA Susumu and

TABATA Kotaro

Abstract : In FY 2013, we researched mix proportions and curing methods applicable to the production of precast concrete products during the cold months, and we researched the effects of using non-standard mid-quality recycled coarse aggregate on the performance of concrete. The aim of these studies was to apply recycled coarse aggregate produced from concrete debris taken from disaster-stricken areas to the production of precast concrete products in snowy cold regions.

In the research of mix proportions and curing methods applicable to the production of precast concrete products during the cold months, we adopted a mix that included an antifreezing admixture. And we conducted several tests such as compressive strength and scaling. For these tests, we used snow-cured specimens whose curing temperature was kept at 0 °C, and we used -5 °C specimens whose temperature was kept at -5 °C for the test in low-temperature conditions. It took a greater number of days for the snow-cured specimen to develop the necessary compressive strength that it took for the specimens cured using the other methods. However, we were unable to achieve the necessary compressive strength for the specimen that had started curing immediately after concrete placement in the -5 °C condition. These results confirmed that it is necessary to keep the curing temperature at about 0 °C even in the low-temperature environment of the areas affected by the disaster.

In the research on the performance of concrete made using non-standard mid-quality recycled coarse aggregate, we prepared concrete recycled coarse aggregate specimens by steam curing. The specimens were found to have chloride ion concentrations that exceeded the JIS standard. We conducted several tests, such as at test of compressive strength and a scaling test. It was found that the required compressive strength for precast concrete products was achieved. However, with respect to scaling, we found notable scaling when the chloride ion concentration was high. Hence, it is necessary to have thorough study about scaling when the chloride ion concentration is expected to be high.

Also, when using mid-quality recycled coarse aggregates for large precast products under conditions of freezing and salt damage, drying shrinkage cutback effect and anti-scaling effect had been confirmed as of the 2012 fiscal year using expansive admixture. So, we prepared a large-scale exposed specimen whose mix included expansive admixture, and we placed it at the exposure test site in Mashike.

Key words : recycled coarse aggregate, precast concrete, drying shrinkage, scaling, anti-freezing admixture