

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へ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：田畑浩太郎、吉田行

【要旨】

中品質再生粗骨材である再生粗骨材Mの大型プレキャストコンクリート製品への利用拡大を目的として、平成23年度は、塩化物イオンの拡散抵抗性に優れる高炉セメントB種を使用した再生粗骨材コンクリートに、膨張材や乾燥収縮低減剤などの収縮低減混和材料を添加して製品工場と同様に蒸気養生を行い、室内試験により乾燥収縮特性とスケーリング抵抗性を検証した。その結果、再生粗骨材を用いると圧縮強度は低減し乾燥収縮量やスケーリング量は増加したが、収縮低減混和材料を適切に用いることで改善出来ることが確認された。

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

1. はじめに

資源の有効活用の観点から、再生骨材のコンクリート用骨材としての利用が求められている。コンクリート用再生骨材は、JIS規格においてH、M、Lの3種類に分類されるが、高品質である再生骨材Hは処理コスト等の面から普及が難しく、また低品質である再生骨材Lはコンクリートとしての耐久性の確保が困難であるため、中品質である再生骨材Mの利用拡大としてPCa（プレキャストコンクリート）製品への適用が図られつつある。しかし、再生粗骨材Mを鉄筋拘束率の高い大型PCa製品に使用する場合、乾燥収縮によってひび割れを生じて耐久性に影響を及ぼすことが懸念されることから、再生粗骨材Mの適用範囲は小型PCa製品に限定されている¹⁾。今後、再生粗骨材Mを大型PCa製品に適用拡大するためには、再生粗骨材Mを用いたコンクリートの乾燥収縮特性を明らかにする必要がある。さらに、再生粗骨材Mを用いたコンクリートを積雪寒冷地で適用する場合、凍害と塩害の複合劣化により生じるスケーリングの影響を確認する必要があるが、現段階では十分に検証されているとは言えない。

このため本研究では、再生粗骨材Mを用いたコンクリートの乾燥収縮特性およびスケーリング抵抗性を明らかにするとともに、再生粗骨材Mを用いた大型PCa製品の製造・施工時の課題を検証し、利用マニュアルとして提案することを目的としている。平成23年度は、膨張材や乾燥収縮低減剤などを添加した配合で蒸気養生を行い、圧縮強度試験や乾燥収縮試験、スケーリング量測定、自己収縮量測定により、再生粗骨材Mを用いたコンクリートの品質を検証した。

2. 再生骨材コンクリートの品質規格に関する検討

2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。既往の研究²⁾より、高炉セメントB種は再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散抵抗性に優れることが明らかになっている。大型PCa製品に再生粗骨材を適用する場合、鉄筋腐食抑制を図る必要があることから、本試験で使用するセメントは高炉セメントB種（密度 $3.05\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3,810\text{cm}^2/\text{g}$ ）を基本とした。また、普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3,420\text{cm}^2/\text{g}$ ）をコンクリート性能を確認するための比較用として用いた。粗骨材は再生粗骨材を基本とし、事前にJIS A 5022 附属書A に示される再生粗骨材Mの規格値を満足することを確認した。再生粗骨材の品質を表-2に示す。比較のため小樽市見晴産の安山岩砕石（表乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.78% 、最大寸法 25mm ）も使用した。細骨材は苫小牧市樽前産の海砂（表乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.87% 、粗粒率 2.85 ）を使用した。混和剤にはAE減水剤（リ

表-1 使用材料

種別	適合規格	使用材料
セメント	JIS R 5211	高炉セメントB種
	JIS R 5210	普通ポルトランドセメント
粗骨材	JIS A 5022	再生骨材M
	JIS A 5005	小樽市見晴産安山岩砕石
細骨材	JIS A 5005	苫小牧市樽前産海砂
混和剤	JIS A 6204	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
膨張材	JIS A 6202	石灰系 $30\text{kg}/\text{m}^3$ セメント置換
		CSA(カルシウムサルフォアルミネート)系 $30\text{kg}/\text{m}^3$ セメント置換
収縮低減剤	-	$6\text{kg}/\text{m}^3$ 単位水量置換

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。また、収縮低減混和材料が再生粗骨材コンクリートの品質に及ぼす影響を確認するために、膨張材と乾燥収縮低減剤を使用した。膨張材は、製品工場の使用実績を考慮して、石灰系とCSA(カルシウムサルフォアルミネート)系の2種類を用いた。それぞれの使用量は、製品工場への聞き取りや製品の推奨値を参考にして、膨張材は30kg/m³のセメント置換とし、乾燥収縮低減剤は6kg/m³の単位水量置換とした。

2.2 コンクリートの配合

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¹⁾に準拠して、再生粗骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するため、水セメント比は50%、目標空気量は5.0±1.5%に設定し、AE剤の添加量にて調整した。また、水セメント比が収縮低減混和材料の効果に与える影響を検証するため、比較用として水セメント比40%も設定した。目標スランブは8.0±2.5cmとした。

試験目的を考慮して材料を組合せた結果、10パターンの配合で試験を行うこととした。表-3にコンクリート配合表を示す。配合の内容と記号は以下の通りとした。

- ①粗骨材は碎石を用い、水セメント比は50%の配合で、高炉セメントB種を用いた(B50)と普通ポルトランドセメントを用いた(N50)
- ②B50、N50をベースに、粗骨材は再生粗骨材を使用した(BM50、NM50)
- ③BM50をベースに、石灰系膨張材を使用した(BML50)とCSA系膨張材を使用した(BMC50)
- ④BM50をベースに、乾燥収縮低減剤を使用した(BMS50)
- ⑤BMC50、BML50、BMS50をベースに、水セメント比を40%に設定した(BMC40、BML40、BMS40)

表-2 再生粗骨材の品質

項目	再生粗骨材Mの規格値	再生粗骨材の品質
絶乾密度 (g/cm ³)	2.3以上	2.4
表乾密度 (g/cm ³)	————	2.5
吸水率 (%)	5.0以下	4.73
微粒分量 (%)	1.5以下	0.24
実績率 (%)	55以上	61.1
ふるい通過率 (%)		
25mm	100-95	97.2
15mm	70-30	54.2
5mm	10-0	1.1



写真-1 蒸気養生状況

2.3 養生方法

製品工場では製品の出荷を早めるために蒸気養生を採用することが多いことから、本試験においても供試体の養生方法を蒸気養生とした。(写真-1)

蒸気養生方法は、コンクリート標準示方書³⁾に準拠し、前養生として20℃の室内で2~3時間静置した後、養生室内の温度が65℃になるまでボイラーで加温した。この時、温度の上昇速度は20℃/hを目標とした。養生室内の温度が65℃に達したら3時間保持し、その後ボイラーを止め、室温と大差がなくなるまで養生室内で自然徐冷した。

表-3 コンクリート配合表

配合名	セメント		骨材		膨張材		乾燥収縮低減剤	水セメント比 (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	粗骨材 G (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	
	普通ポルト	高炉B	碎石	再生骨材M	CSA系	石灰系										
B50		○	○					50	44	144	288	837	850	10.4	5.5	
N50	○		○				840					855	9.5	6.0		
BM50		○		○			837					318	10.0	5.5		
NM50	○			○			840					320	9.3	6.2		
BMC50		○		○	○		835				318	10.5	6.5			
BML50		○		○		○	836				318	11.2	6.3			
BMS50		○		○		○	288				837	318	8.2	4.8		
BMC40		○		○	○		40				146	335	803	306	6.7	6.0
BML40		○		○		○							804	306	8.6	6.2
BMS40		○		○		○							365	804	306	6.5

2.4 試験概要

(1) 圧縮強度試験

材齢の進行による強度の増加傾向を調べるために、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。供試体はφ10×20cmを使用し、蒸気養生終了後材齢1日で脱型し、恒温恒湿室（温度20℃、湿度60%）で気中養生した。圧縮強度試験は、製品工場での製品の管理材齢としている材齢14日で実施した。

(2) 乾燥収縮試験

試験は、JIS A 1129 長さ変化測定（コンパレータ法）に準拠した。供試体は□10×40cmを使用し、蒸気養生後材齢1日で脱型し、計測用ガラス板を接着して初期値を測定した。その後、所定の材齢まで恒温恒湿室に静置した。測定材齢は26週までとし、現在も継続中である。本報告書では4週までの結果を取りまとめた。

(3) スケーリング量測定

ASTM C 672 に準拠してスケーリング量測定を実施した。供試体は□22×10 cmとし、蒸気養生終了後材齢1日で脱型し、所定の材齢まで恒温恒湿室に静置した。測定面は、工場製品における暴露面を模して型枠底面（220×220 cm）とし、材齢7日で水を湛水するための土手を取り付けた。また、供試体中の水分の逸散を防ぐため、測定面以外の5面をエポキシ樹脂を用いてコーティングした。供試体形状を図-1に示す。測定は製品工場の管理材齢である14日から開始し、-18℃を16時間、23℃を8時間の1日1サイクルで凍結融解作用を与え、所定のサイクル毎に測定を行った。測定サイクルは100サイクルまでとし、現在も継続中である。本報告書では20サイクルまでの結果を取りまとめた。

(4) 自己収縮量測定

コンクリート標準示方書³⁾では、コンクリートの収縮は乾燥収縮に加えて自己収縮についても考慮する必要があると指摘されている。本報告のように、高炉セメントB種と再生粗骨材Mを用いて蒸気養生を実施した場合の自己収縮について検証した事例はほとんど無いことから、自己収縮量の測定を実施した。供試体はφ12.5×25 cmの円柱供試体を使用し、中心部に低弾性（約1.5N/mm²）のコンクリート埋込み型のひずみゲージを設置した。図-2に供試体形状を示す。ひずみゲージには熱電対が内蔵されており、供試体中心部の温度も併せて測定した。測定は、蒸気養生開始の1時間前から蒸気養生終了後までの24時間とした。測定のインターバルは5分間とした。

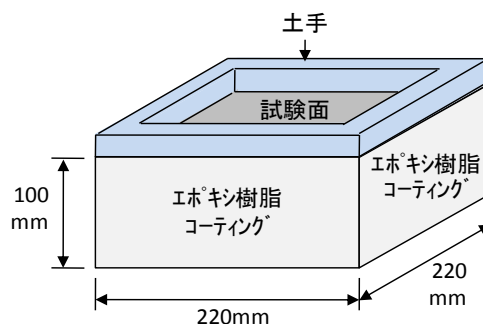


図-1 スケーリング量測定の供試体形状

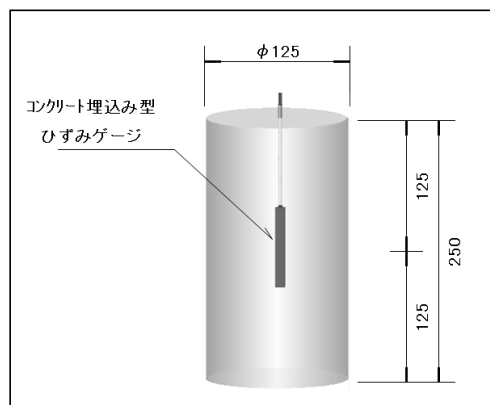


図-2 自己収縮量測定の供試体形状

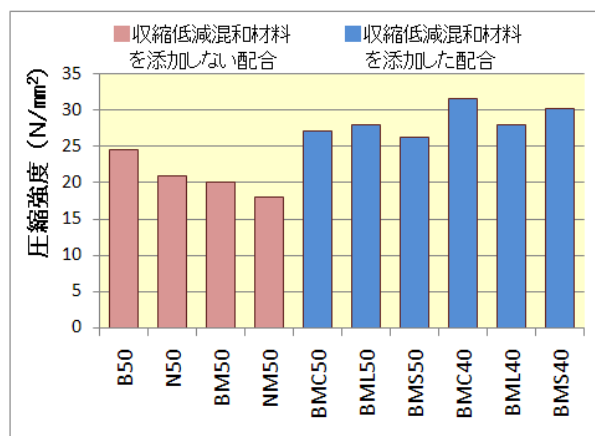


図-3 配合別の圧縮強度（材齢14日）

2.5 試験結果及び考察

(1) 圧縮強度

材齢14日における配合別の圧縮強度を図-3に示す。まず、B50とBM50、N50とNM50の測定値を比較すると、セメント種別に係わらず、再生粗骨材を使用した配合は砕石を使用した配合よりも圧縮強度が低くなった。これは、再生粗骨材に付着している残存モルタルが強

度上の弱点になったためと考えられる。次に、収縮低減混和材料が圧縮強度に与える影響を検証するために、収縮低減混和材料を添加していない配合 (BM50) と添加した配合 (BMC50、BML50、BMS50) とを比較すると、収縮低減混和材料の添加により圧縮強度が増加する傾向が見られた。同様の傾向は既往の報告⁴⁾でも示されている。さらに水セメント比50%の配合 (BMC50、BML50、BMS50) と水セメント比40%の配合 (BMC40、BML40、BMS40) の比較により、水セメントを小さくすると圧縮強度が大きくなる傾向を確認した。

収縮低減混和材料の添加により圧縮強度が増加した原因としては、例えば膨張材の場合、蒸気養生過程において急激に水和が進行し、エトリンタイトの生成による影響が考えられる。しかし、乾燥収縮低減剤については本研究の範囲内では原因が不明であり、再生粗

骨材や蒸気養生との関係についても十分に検証されていないため、今後も検証を行う必要がある。また、大型PCa製品として必要な圧縮強度は、製品によって異なるが24~35N/mm²程度である。本試験では収縮低減混和材料を添加した配合で24N/mm²を満足した。今後は適用が可能となる製品の拡大を図るため、圧縮強度35N/mm²を満足出来るよう、水セメント比をさらに小さくした配合で検証を続ける必要がある。

(2) 乾燥収縮

乾燥収縮特性を、乾燥収縮率と相対質量で検証する。乾燥収縮率とは、乾燥による長さ変化の割合のことで、値が大きいほど乾燥による長さ変化(収縮)が大きい。相対質量とは、乾燥による質量減少の割合のことで、値が小さいほど乾燥による質量減少が大きい。

再生粗骨材と乾燥収縮率の関係を図-4に、再生粗

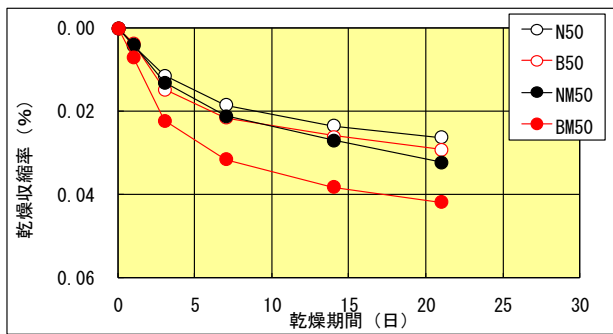


図-4 再生粗骨材と乾燥収縮率の関係

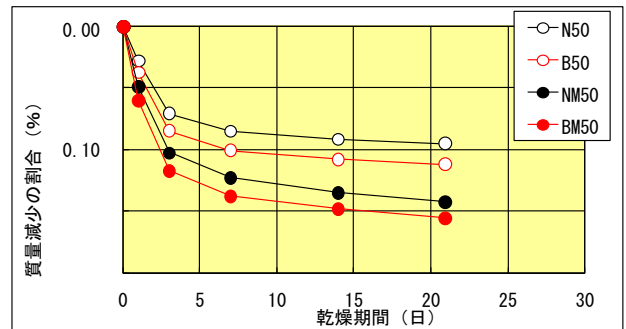


図-5 再生粗骨材と相対質量の関係

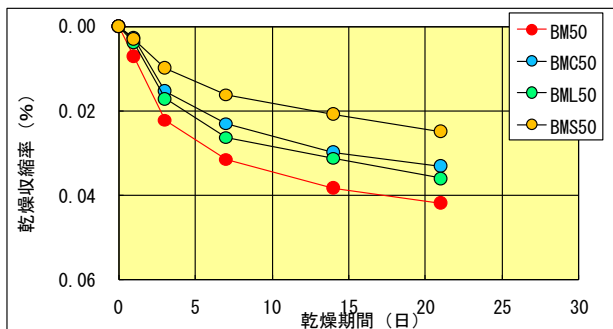


図-6 収縮低減混和材料と乾燥収縮率の関係 (W/C=50%)

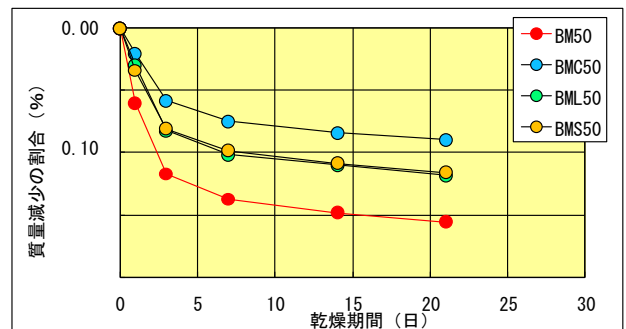


図-7 収縮低減混和材料と相対質量の関係 (W/C=50%)

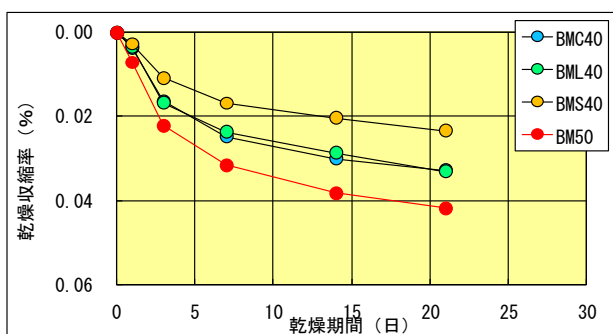


図-8 収縮低減混和材料と乾燥収縮率の関係 (W/C=40%)

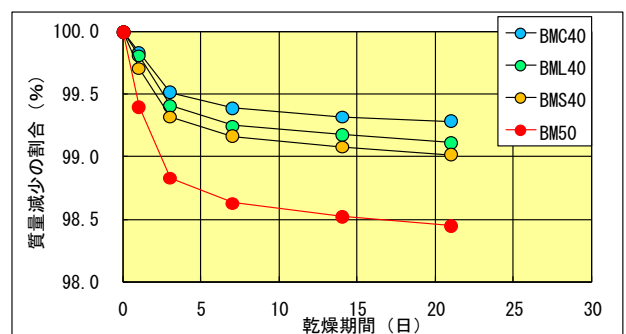


図-9 収縮低減混和材料と相対質量の関係 (W/C=40%)

骨材と相対質量の関係を図-5に示す。再生粗骨材を使用した配合と碎石を使用した配合を比較すると、再生粗骨材を使用した配合のほうが、乾燥収縮率は大きくなり、質量の減少割合も大きくなった。セメント種別で比較すると、高炉セメントB種を使用した配合のほうが、普通ポルトランドセメントを使用した配合よりも、乾燥収縮率は大きくなり、質量の減少割合も大きくなった。

次に、収縮低減混和材料添加による乾燥収縮への影響を確認する。収縮低減混和材料と乾燥収縮率の関係について、水セメント比50%の場合を図-6に、水セメント比40%の場合を図-8に示す。また、収縮低減混和材料と相対質量の関係について、水セメント比50%の場合を図-7に、水セメント比40%の場合を図-9に示す。収縮低減混和材料を添加しなかった配合（BM50）と比較すると、収縮低減混和材料を添加した配合は、乾燥収縮率、質量減少の割合ともに小さくなり、乾燥収縮の影響が小さくなる傾向を確認した。また、水セメント比別に見ると、収縮低減混和材料を使用した配合では、水セメント比が小さくなると質量減少の割合も小さくなる傾向を示したが、乾燥収縮率についてはほとんど変化が見られなかった。

これらの結果から、再生粗骨材を使用することで乾燥収縮は増加するが、収縮低減混和材料を添加することでその影響を低減することが出来ると考えられる。しかし、現時点では材齢も少なく、測定も継続中であることから、今後も検証を行う必要がある。

(3) スケーリング

図-10に凍結融解サイクルとスケーリング量の関係を、図-11に凍結融解サイクルとスケーリング深さの関係を示す。セメント種別では、普通ポルトランドセメントよりも高炉セメントB種のほうが、骨材種別では碎石よりも再生粗骨材のほうが、スケーリング量・深さともに測定結果は大きくなった。また、スケーリング量においては、収縮低減混和材料を使用することで、測定値が小さくなる傾向が見られた。しかし現段階では凍結融解サイクルも少なく、スケーリング量や深さは極めて小さい。実際に供試体の測定面を見ると、細骨材表面のモルタルが数カ所剥離しているだけで、スケーリングはほとんど見られない。従って、今後も試験を継続し、サイクル数の増加に伴うスケーリングの進行程度について、確認する必要がある。

(4) 自己収縮

自己収縮ひずみ量は、測定値からコンクリートとひずみゲージの線膨張を補正する必要がある。本試験で

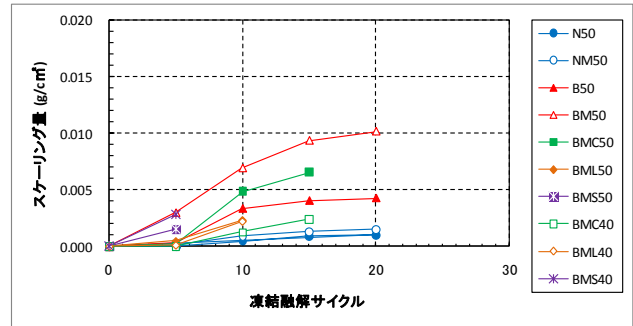


図-10 凍結融解サイクルとスケーリング量の関係

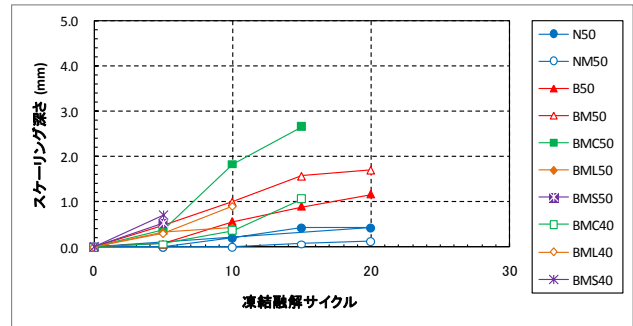


図-11 凍結融解サイクルとスケーリング深さの関係

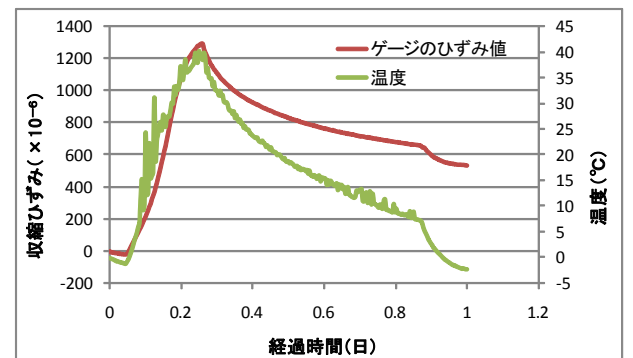


図-12 ひずみゲージ本体のひずみ量測定

用いたひずみゲージの線膨張係数はコンクリートと同等とされているが、蒸気養生のように急激に熱を加える場合の線膨張係数については既往の報告がない。そのため、本試験ではひずみゲージ本体の収縮ひずみを測定し、その測定結果を用いて補正を行うこととした。測定では、外力がひずみゲージに影響を与えないように、水に浮かせて蒸気養生室内に静置した。測定結果を図-12に示す。グラフを見ると、ゲージのひずみ値と温度は、ピークまではほぼ同じ挙動を示しているが、ピーク以降は温度の低下にゲージのひずみ量が追従していない。これは、ひずみゲージに残留ひずみが生じたためと考えられる。このため、ひずみゲージのひずみ量と温度の関係を求めるためには、ピーク以降の測定値は不适当と判断した。ピークまでのひずみ量と温度

の関係を図-13に示す。青線は測定開始からピークまでの測定値である。近似曲線を求めると、傾きは34.524になった。これにより、ひずみゲージの線膨張係数を $35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定した。コンクリートの線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ も考慮して、自己収縮量測定値を補正した。

図-14に、再生粗骨材と収縮ひずみの関係を示す。全体の傾向として、蒸気養生で加熱している経過日数0.3日までは収縮ひずみは増加し、その後、供試体内の温度の低下とともに収縮ひずみも減少した。粗骨材別で見ると、再生粗骨材を用いた配合は碎石を用いた配合よりも収縮ひずみは小さくなった。セメント種別による明確な傾向の差は確認出来なかった。

図-15に、収縮低減混和材料と収縮ひずみの関係を示す。乾燥収縮低減剤を添加した配合 (BMS) は、水セメント比に係わらず、図-12と同様の傾向を示し、収縮ひずみ量も収縮低減混和材料を添加しない配合 (BM50) とほぼ同じ測定値となり、本試験においてはひずみ量減少の効果は確認できなかった。一方、膨張材を使用した配合では、膨張量が収縮量を相殺した結果、全ての配合においてひずみは圧縮側となった。圧縮ひずみは、CSA系よりも石灰系が大きく、また水セメント比による比較では、水セメント比50%の測定値は水セメント比40%の測定値よりも大きくなった。

乾燥収縮におけるひずみ量は、収縮低減混和材料を使用した場合、図-6、図-8から $200 \sim 400 (\times 10^{-6})$ 程度と推測される。図-15から膨張材を使用した場合の自己収縮ひずみは、それ以上の値で膨張する傾向が確認されていることから、膨張材を添加することで、乾燥収縮と自己収縮による影響を抑えることが出来る可能性を確認した。

しかし、ひずみゲージの線膨張係数については、今回おこなったひずみゲージ本体の測定方法や、測定結果から得られた線膨張係数の算出方法など、その妥当性については、さらに検証する必要がある。

3.まとめ

- (1) 再生粗骨材を使用した配合は、碎石を使用した配合と比べて、圧縮強度が低くなった。これは、再生粗骨材に付着している残存モルタルが強度上の弱点になったためと考えられる。
- (2) 収縮低減混和材料を添加した配合は、圧縮強度が増加する傾向が見られた。また、水セメント比の比較では、40%の配合は50%の配合よりも圧縮強度が増加した。これらの結果から、再生粗骨材を使用した配合であっても、収縮低減混和材料を添加し、水セ

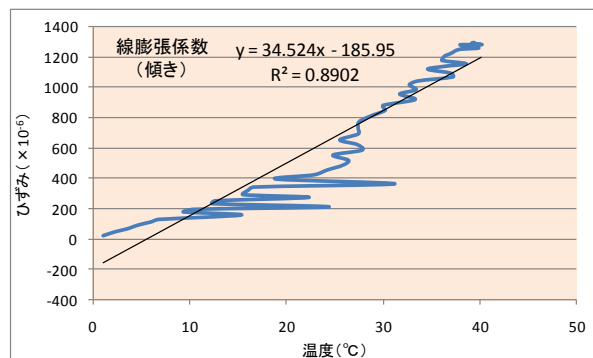


図-13 ひずみゲージの温度とひずみの関係

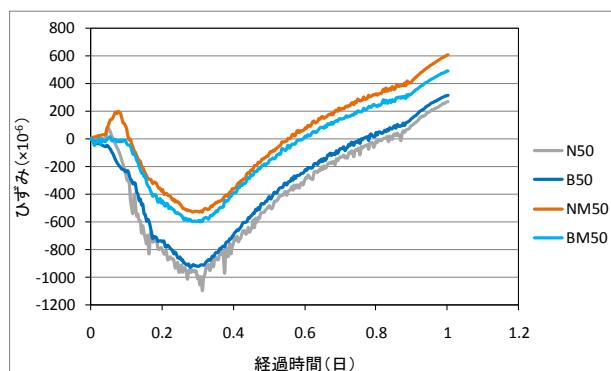


図-14 再生粗骨材と自己収縮ひずみの関係

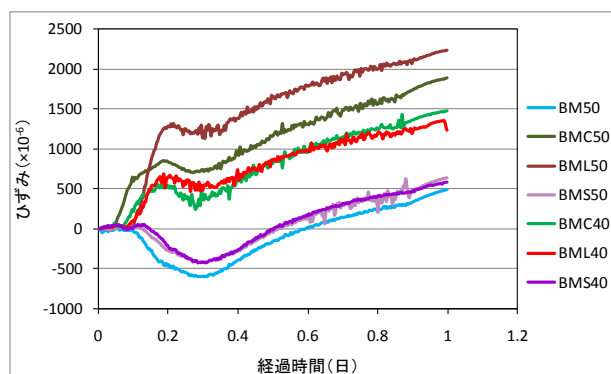


図-15 収縮低減混和材料と自己収縮ひずみの関係

メント比を小さくすることで、必要な圧縮強度を得ることが出来る可能性を確認した。

- (3) 高炉セメントB種を用いた配合や、再生粗骨材を用いた配合は、乾燥収縮率が大きくなり、質量の減少割合も大きくなるため、乾燥収縮の影響を大きく受ける傾向を確認した。
- (4) 収縮低減混和材料を添加した配合は、乾燥収縮率が小さくなり、質量減少割合も小さくなる傾向が見られた。これらの結果から、高炉セメントB種や再生粗骨材を使用した配合であっても、収縮低減混和材料を添加することで、乾燥収縮の影響を低減出来ることを確認した。

- (5) 高炉セメントB種を使用した配合や、再生粗骨材を使用した配合は、スケーリング量・深さともに大きくなる傾向が見られた。また、収縮低減混和材料を添加した配合は、スケーリング量を小さく押さえられることを確認した。
- (6) 自己収縮量については、砕石よりも再生粗骨材を使用した配合のほうが、収縮ひずみが小さいことを確認した。また、膨張材を添加すると、収縮によるひずみ量よりも膨張量が大きくなるため、自己収縮と乾燥収縮による影響を抑えることが出来る傾向が見られた。
- (7) 乾燥収縮試験やスケーリング量測定では、現段階では測定回数が少ないことから、今後も測定を継続し、検証を重ねる必要がある。また、自己収縮ひずみの測定についても、ひずみゲージの線膨張係数の妥当性について、さらに検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 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) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2008. 6
- 4) 西祐宜, 北辻政史：高炉セメントおよび再生骨材を使用したコンクリート製品への収縮低減材料の適用に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 VOL33, 2011

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 : TABATA Kotaro, YOSHIDA Susumu

Abstract : In FY2011, study was conducted to verify the drying shrinkage properties and scaling resistance of concrete containing recycled aggregate to support the extensive use of M-class medium-quality recycled coarse aggregate for large-scale precast concrete products. In laboratory test, shrinkage-reducing admixtures (such as agents to promote expansion and reduce drying shrinkage) were added to concrete made with Type-B blast furnace slag cement, which is highly resistant to chloride ion diffusion, and steam curing used in concrete product factories was conducted. The results showed that, while the use of recycled coarse aggregate reduced compressive strength and increased the extent of drying shrinkage and scaling, such properties could be improved through the use of shrinkage-reducing admixtures.

Keywords : recycled coarse aggregate, precast concrete, steam curing, drying shrinkage, scaling