

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

(独)土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○田畑 浩太郎
(独)土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 田口 史雄
(独)土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 吉田 行

資源の循環活用の観点から、再生粗骨材Mのコンクリート用骨材への利用促進が求められている。本論文では、大型プレキャストコンクリート製品への適用を目的として、再生粗骨材Mコンクリートに収縮低減混和材料を添加した配合で乾燥収縮特性を検証した。さらに、2012年のJIS改訂に伴い、凍結融解作用の影響を受ける箇所においても再生粗骨材Mコンクリートの適用が可能になったことから、今後積雪寒冷地において適用拡大が図られることを考慮して、スケーリング抵抗性についての検証も行った。

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

1. はじめに

コンクリート解体材をリサイクルして造られる再生粗骨材は、日本工業規格（以下、JISと記す）において、H（高品質）・M（中品質）・L（低品質）の3品質に分類される。このうち再生粗骨材Hは製造コストが高く、再生粗骨材Lは耐久性を要求されないコンクリートが対象で適用範囲が狭い。このため、資源の循環活用の観点から、再生粗骨材Mの利用促進が期待されている。

なかでも特にプレキャストコンクリート（以下PCaと記す）製品は、再生粗骨材Mの有効活用が期待される分野である。再生粗骨材Mを用いたコンクリートは、乾燥収縮の影響を受けにくい部位に適用が限定されているが、小型PCa製品の場合、部材寸法が小さいため乾燥収縮による不具合を生じにくいこと、また、不具合が生じた場合でも交換等の対処が容易などの利点があるなどから、平成21年度には「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」¹⁾（以下、ガイドライン試案と記す）が発行され、再生粗骨材MのPCa製品への適用が図られてきている。

今後は、大型PCa製品に適用拡大を図る必要があるが、大型PCa製品は鉄筋拘束率が高いため、乾燥収縮によるひび割れ等が耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。さらに、2012年に改訂されたJISにおいて、今まで利用が出来なかった凍結融解作用の影響を受ける箇所、すなわち凍害の恐れがある箇所に再生粗骨材Mコンクリートを適用するための規定が設けられたことから、今後積雪寒冷地において適用拡大していくと考えられる。しかし積雪寒冷地に多い、凍害と塩害の複合作用により生じるスケーリングの影響に関しては検討が不十分なことから、

これについて検証する必要がある。

このため、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ことを目的として、室内試験を行った。

2. 試験概要

(1) 使用材料

表-1に使用材料を示す。既往の研究²⁾より再生粗骨材を鉄筋コンクリートに用いる場合、鉄筋腐食抑制を目的として塩化物イオンの拡散抵抗性に優れたセメントの使用が提案されている。これに従い本試験では高炉セメントB種（密度 3.05g/cm^3 、比表面積 $3,810\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。粗骨材は再生粗骨材Mとし、比較用に小樽市見晴産の安山岩砕石（表乾密度 2.67g/cm^3 、吸水率 1.78% 、最大寸法 25mm ）を用いた。再生粗骨材の品質を表-2に示す。細骨材は苫小牧市樽前産の海砂（表乾密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.87% 、粗粒率 2.85 ）、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。また、再生粗骨材コンクリートに乾燥収縮対

表-1 使用材料

種別	適合規格	使用材量
セメント	JIS R 5211	高炉セメントB種
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系
		AE剤 変性ロジン酸化合物系
膨張材	JIS A 6202	30kg/m^3 セメント置換
収縮低減剤	—	6kg/m^3 単位水量置換

策として収縮低減混和材料を使用した場合の影響を確認するため、膨張材と収縮低減剤を使用したコンクリートに関して試験を行った。それぞれの使用量は、製品の推奨値や製品工場への聞き取りを参考に決定した。

(2) コンクリートの配合

ガイドライン試案に準拠して、水結合材比は50%、目標空気量は $5.0 \pm 1.5\%$ に設定し、AE剤で調整した。また、目標スランプは $8.0 \pm 2.5\text{cm}$ とし、試験練りによって配合を決定した。表-3にコンクリートの配合を示す。

(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。このため本試験においても早期強度発現をさせるため供試体の養生方法を蒸気養生とした。写真-1に蒸気養生状況を示す。

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。

(4) 試験概要

a) 圧縮強度試験

JIS A 1108に準拠して試験を行った。蒸気養生後、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。試験は、製品工場の管理材齢を考慮して、1日（脱型材齢）と14日（出荷材齢）に行った。

b) 乾燥収縮試験

試験はJIS A 1129（コンパレータ法）に準拠し、供試体は $10 \times 40\text{cm}$ を使用した。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、恒温恒湿室に静置して所定のサイクルで18週まで測定を行った。

c) 自己収縮量測定

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ため、自己収縮量測定も行った。供試体は $\phi 12.5 \times 25\text{cm}$ の円柱供試体を使用し、中心部に低弾性（約 1.5N/mm^2 ）のコンクリート埋込み型のひずみゲージを設置した。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。

d) スケーリング試験

試験は、米国材料試験協会の基準 ASTM C 672⁴⁾に準拠した。供試体は $22 \times 10\text{cm}$ とし、蒸気養生後、材齢1日で脱型し、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（ $220 \times 220\text{cm}$ ）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

表-2 再生粗骨材の品質

項目	再生粗骨材Mの規格値(JIS)	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

表-3 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	膨張材 (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	粗骨材 G (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	
	普通骨材	50	44	144	288	—	837	850	10.4	5.5
再生粗骨材	—					837	318	10.0	5.5	
再生粗骨材 + 膨張材	258					30	835	318	10.5	6.5
再生粗骨材 + 収縮低減剤	288					—	837	318	8.2	4.8



写真-1 蒸気養生状況

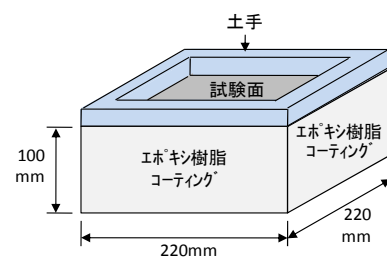


図-1 スケーリング量測定の供試体形状

3. 試験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2に示す。橙色と黄色の棒グラフは収縮低減混和材料を添加しない配合で、普通粗骨材を用いた場合と再生粗骨材を用いた場合の測定結果である。また、青色と赤色の棒グラフは再生粗骨材に収縮低減混和材料として膨張材と収縮低減剤を使用した配合

の測定結果である。それぞれ、左手前が材齢1日、右奥が材齢14日を示している。

まず、材齢1日の圧縮強度を見ると、全ての配合において脱型時に必要な 12N/mm^2 を満足した。

次に、材齢14日の圧縮強度について、各配合で比較した。まず、普通粗骨材と再生粗骨材を比較すると、再生粗骨材を用いた配合の圧縮強度は普通粗骨材より値が小さくなった。一般的に、再生粗骨材に付着している残存モルタルは吸水率が大きく硬化組織が粗いことから、圧縮強度が低下したと考えられる。次に、再生粗骨材に膨張材や収縮低減剤を使用した配合を見ると、圧縮強度が増加した。再生粗骨材に収縮低減混和材料を使用することで圧縮強度が改善された原因としては、例えば膨張材の場合、蒸気養生過程において急激に水和水が進行し、エトリンガイトが生成され、プレストレスにより微細空隙が緻密化したことが考えられる。しかし、収縮低減剤による強度増加は本試験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。

なお、大型PCa製品として出荷材齢時に必要な圧縮強度は、製品によって異なるが、 $24\sim 35\text{N/mm}^2$ 程度である。本試験において、再生粗骨材に収縮低減混和材料を使用した配合は、 24N/mm^2 を満足した。今後は適用可能な大型PCa製品の拡大を図るため、圧縮強度 35N/mm^2 を満足出来るような配合についても検証を続ける必要がある。

(2) 乾燥収縮試験

再生粗骨材と乾燥収縮率の関係を図-3に示す。乾燥収縮率とは、乾燥収縮により生じる長さ変化の割合のことで、乾燥収縮率が大きいほど長さ変化（収縮）が大きいと判断出来る。

まず、再生粗骨材と普通粗骨材を比較すると、再生粗骨材を使用した配合のほうが、乾燥収縮率が大きくなった。これは、残存モルタルによって再生粗骨材の吸水率が高かったことなどが影響したと考えられる。

次に、再生粗骨材に収縮低減混和材料を使用することで、乾燥乾燥収縮率を改善出来るかどうか確認した。再生粗骨材に収縮低減剤を使用した配合では、普通粗骨材を用いた配合と同程度まで乾燥収縮率の低下が見られた。一方、膨張材を使用した配合では、乾燥収縮率の低下は小さかった。しかし、膨張材は初期硬化時のプレストレスにより乾燥収縮を低減させることから、図-4の自己収縮ひずみを見ると、膨張材を使用した配合は圧縮側のひずみとなっており、この値が図-3の乾燥収縮率よりも大きいことが確認された。これらの結果から、再生粗骨材に膨張材や収縮低減剤を使用することにより、乾燥収縮率を改善出来ることを確認した。

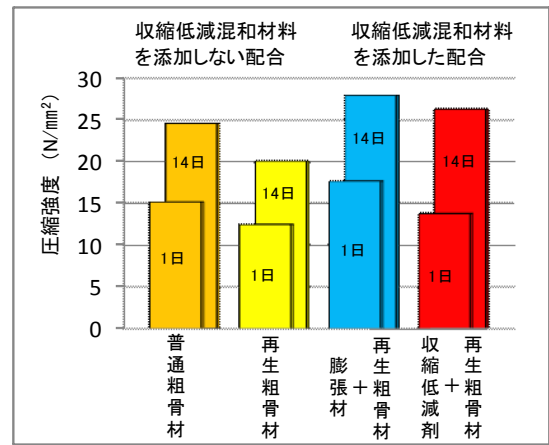


図-2 圧縮強度

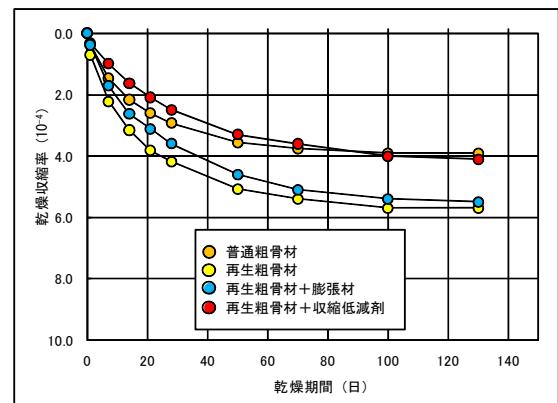


図-3 乾燥収縮率

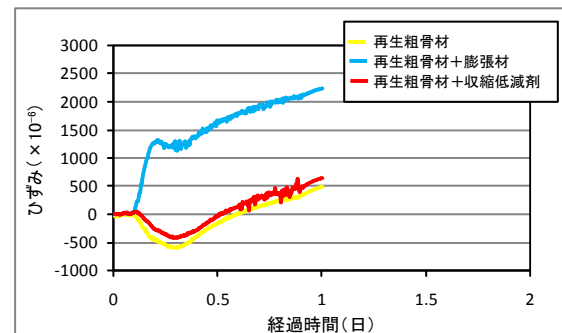


図-4 自己収縮ひずみ

(3) スケーリング試験

凍結融解サイクルとスケーリング量の関係を図-5に、凍結融解サイクルとスケーリング深さの関係を図-6に示す。スケーリング量は、凍結融解作用により剥離したモルタルの 1cm^2 あたりの質量 (g) で表される。また、スケーリング深さとは、剥離により生じた欠損深さのうち最大のものを示す。

まず、スケーリング量について普通粗骨材と再生粗骨材を比較すると、再生粗骨材のスケーリング量のほうが大きくなった。次に、再生粗骨材に膨張材を使用した配合と収縮低減剤を使用した配合を見ると、膨張材を使用した配合のスケーリング量は普通粗骨材程度に減少したが、収縮低減剤を使用した配合では、逆にスケーリング量が大きくなった。スケーリング深さについてもほぼ同

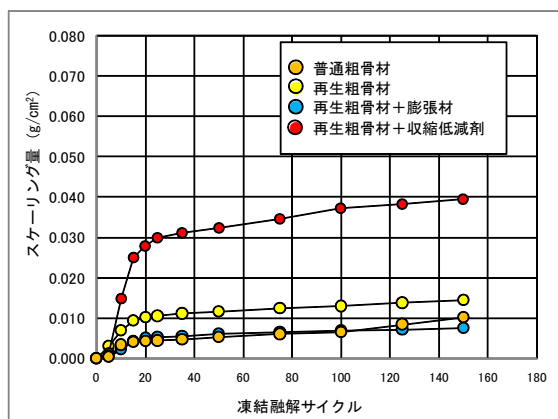


図-5 スケーリング量

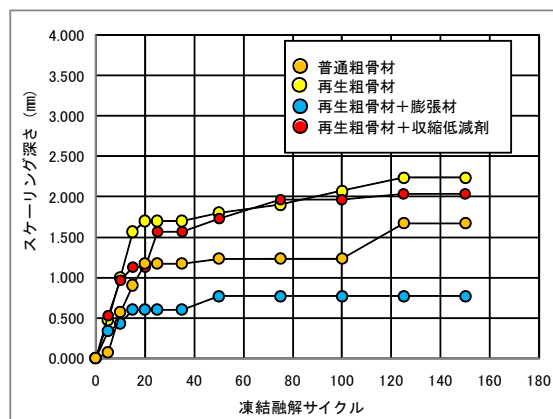


図-6 スケーリング深さ

様の傾向が見られ、再生粗骨材を使用することで測定値は大きくなったが、膨張材を使用した配合ではスケージングが小さくなった。これは、膨張材の使用により初期硬化時に発生したプレストレスによって、微細組織が緻密化したためと考えられる。

いずれにしても、全ての配合においてスケージング深さは2.5mm以下であり、これは本スケージング試験における6段階の評価基準(0~5)⁴⁾のうち、軽微な基準1の「最大スケージング深さ3mm以下」に該当することから、現段階ではスケージング量や深さは極めて小さいと考えられる。スケージングの進行については更に検証を続ける必要がある。

4. まとめ

- (1) 再生粗骨材を使用した配合は、普通粗骨材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は吸水率が大きく硬化組織が粗いことが影響したためと考えられる。また、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使用することで、必要な圧縮強度を得ることが出来る可能性を確認した。
- (2) 再生粗骨材を使用した配合は、乾燥収縮率が大きくなる傾向を確認した。これは、再生粗骨材に付着している残存モルタルにより吸水率が上がったことが影響したと考えられる。また、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使用することで、乾燥収縮の影響を低減出来ることを確認した。

(3) 再生粗骨材を使用した配合は、スケージング量・深さともに大きくなる傾向が見られた。また、再生粗骨材を使用した配合であっても、膨張材を使用することでスケージングの影響が小さくなった。

(4) 自己収縮量については、膨張材を使用すると、収縮量よりも膨張量が大きくなることから、自己収縮により乾燥収縮による影響を抑えることが出来ることを確認した。

(5) 再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮やスケージングの改善に膨張材や収縮低減剤が有意である傾向は確認出来たが、より効果的かつ適切な配合について、今後も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) ASTM C672, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals