

論文 凍結融解処理によりコンクリート塊および残コン・戻りコンから抽出した再生粗骨材の物性評価

井下 千尋*1・兵頭 正浩*2・緒方 英彦*3

要旨：本研究では、コンクリート塊および残コン・戻りコンから再生粗骨材を製造する技術として、凍結融解作用を利用した方法について検討した。この方法は、材料間における線膨張係数の差と水の凍結膨張圧を利用することから、試験は対象試料の水セメント比および含水状態（絶乾、気乾、湿潤、浸漬）を調整して実施した。その結果、処理効果が最も大きかった含水状態は浸漬状態であり、試料作製時に水セメント比を大きくすることで骨材とモルタルが剥離しやすくなることを確認した。さらに、凍結融解処理とすりもみ処理を組み合わせることで、より効率的に再生粗骨材を製造することが可能であることを明らかにした。

キーワード：再生粗骨材、凍結融解、線膨張係数、コンクリート塊、残コン・戻りコン

1. はじめに

全国の建設工事現場では、製造されたフレッシュコンクリートの余り（以下、残コン・戻りコン）が必ず発生する。国土交通省によると、残コン・戻りコンの発生量は出荷量の約 1.6%であり、全国では年間に 150～200 万 m³にも及ぶと報告がある¹⁾。発生した残コン・戻りコンの一部は、骨材を回収・再利用するために洗浄処理がされている。しかし洗浄処理のコストが高いことから、その多くは硬化させた後に廃棄、もしくは需要の少ない再生路盤材等として再利用されており、円滑な資源循環には至っていないのが現状である。残コン・戻りコンに洗浄処理を施して骨材を回収する場合や、ホップ・配管に残るコンクリートを洗浄する際に発生するスラッジにおいて、加圧、脱水によりケーキ状に固化した上で 8N/mm²以上を有するものについては、コンクリートくずとして処理することが可能である。しかし 8N/mm²に満たないものは、汚泥としての処理をしなければならない。コンクリートくずの処理単価は 1,000～3,000 円/t となる場合が約 6 割を占めているのに対し、汚泥の処理単価は 5,000 円/t 以上となる場合が約半数を占めており、コンクリートくずとしての処理費よりもかなり高いと言える²⁾。したがって今後は、洗浄処理よりも低コストかつ簡易的に残コン・戻りコンから骨材を回収する技術の開発が求められる。

一方、再生骨材に関する JIS 規格は、再生骨材 H, M, L として基準を定めており、品質ごとの利用方法（例えば一般的なコンクリートや杭、基礎梁など）を示している³⁾。この一連に関する規格は 1994～2007 年に整備されたが、いまだに再生骨材を用いたコンクリートの施工実績は少ないことが現状となっている⁴⁾。その理由として

は、再生骨材の製造時における品質の安定性を確保することが困難であることや、骨材に付着しているモルタル・セメントペースト部の処理コストが原因で、最終的に再生骨材の製造コストが高くなることが挙げられている⁵⁾。また、現在においては、良質な天然骨材の枯渇化が問題視されているが、いまだに実感を得ていないことも、再生骨材の一般的な利用へ結びつかない要因となっている。しかし、近い将来には、コンクリート塊の余剰問題⁶⁾と骨材資源の枯渇⁷⁾は避けることのできない問題であることから、今後はコストが低く、かつ安定した品質を得ることができる再生骨材の製造技術が必要であると言える。

そこで本研究では、コンクリート塊および残コン・戻りコンに含まれる骨材を安価で効率的に再利用するための技術開発を目的に、再生方法として凍結融解処理を取り上げ、セメントと粗骨材の線膨張係数の差および水の凍結膨張圧を利用することで抽出した再生粗骨材の物性を評価した。

2. 実験概要

2.1 凍結融解処理時の含水状態の決定および適当なサイクル数の検討

凍結融解処理には、セメントと粗骨材の線膨張係数の差（セメント硬化体：17.0×10⁻⁶/℃、粗骨材（安山岩）：8.0×10⁻⁶/℃）を利用する。凍結融解処理では、試料に温度変化を与えることで、セメントと粗骨材の線膨張係数の差によって両者の界面を脆弱させ、剥離しやすきさせる。また、処理効果に特に大きく影響すると思われるのは、水が凍結する際の体積膨張である。コンクリート中の水分は、凍結する際に 9%の体積膨張が生じる。その

*1 鳥取大学大学院 農学研究科フィールド生産科学専攻 (学生会員)

*2 鳥取大学 農学部生物資源環境学科助教 (正会員)

*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 (正会員)

表－1 製造時の各材料の重量とフレッシュコンクリートの特性

試料	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C※1	S※2	G※3	混和剤 (g/m ³)		
コンクリート塊	55	165	300	696	1,103	2,700	16.5	6.0
戻りコン (W.S)							—	—
戻りコン	70	165+45※4	300	696	1,103	2,700	11.5	3.1
	85	165+90※4					5.5	3.0
	100	165+135※4					—	1.3

※1 普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³），※2 鳥取県産標準砂（絶乾密度：2.53g/cm³，吸水率：1.26%），※3 山口県産安山岩（絶乾密度：2.71g/cm³，吸水率：0.61%，最大骨材寸法：20mm）※4 戻りコン 3 種類においては，追加水量を＋で表記している



写真－1 W.Sの様子



写真－2 湿潤試料



写真－3 浸漬試料



写真－4 コンクリートミキサー

ため，試料に凍結融解を繰り返し作用させることで，モルタルは疲労破壊が生じ，モルタルや，粗骨材とモルタルの界面を脆弱させることが可能であると考えられる。したがって凍結融解処理効果には，処理時の試料の含水状態が大きく影響すると考えられる。なお，残コン・戻りコンにおいては，フレッシュコンクリートの時点で水を加えることにより，水セメント比を調整することが可能である。

そこで本項目では，実験試料としてコンクリート塊と戻りコンを作製し，異なる含水状態のもとで凍結融解処理を施すことで，処理を施す際の試料の適当な含水状態および水セメント比を明らかにした。さらには，一定の品質の再生粗骨材を得ることが可能となる凍結融解サイクル数の検討も併せて実施した。

(1) 試料の作製方法

作製した試料に用いた各材料の重量およびフレッシュコンクリートの特性を表－1に示す。本項目で使用する試料としては，コンクリート塊を想定したものと残コン・戻りコンを想定したものを作製した。コンクリート塊を作製する際には，水セメント比を55%に調整したコンクリートの打設を実施した。また，残コン・戻りコンには，2通りの作製方法を設けた。まず1つ目の方法では，フレッシュコンクリートに水を加えて，水セメント比を70，85，100%の3種類に調整してから打設を実施した。2つ目の方法では，写真－1に示すように，5mmふるいを用いてフレッシュコンクリート（W/C=55%）をモルタルが断続的に落下しなくなるまでウェットスクリ

ーニング処理（以下、W.S）し，付着モルタルをある程度除去したものを硬化させた。全ての試料は，試料ごとに練り板等に流し込み，硬化させた。その際，厚さは100mm～150mm程度とし，打設後は材齢28日まで標準水中養生を行った。養生後は，チッパーおよびハンマーを用いて粗骨材の最小寸法以上である5mm～50mmに破砕した。

試料は，5種類とも200kg程度作製し，凍結融解処理前に密度・吸水率試験を実施した後，それぞれ50kgずつの4セットに区分した。

(2) 低温実験槽を用いた凍結融解処理方法

試料は，それぞれ50kgずつコンテナに入れ，低温実験槽を用いて凍結融解処理を実施した。

処理時の試料の含水状態は，絶対乾燥状態，空气中乾燥状態，湿潤状態，浸漬状態の4種類とした。絶対乾燥状態の試料は，凍結融解処理前に110℃の炉乾燥機で一定質量になるまで乾燥させた。空气中乾燥状態の試料は，処理前に空气中で24時間以上乾燥させた。湿潤状態の試料は，24時間以上吸水させた試料に，写真－2に示すように，湿布を被せて水の蒸発を防いだ。また，浸漬状態の試料は，24時間以上吸水させた試料が写真－3に示すように常に水面下にあるよう水量を調整したものとした。一般的に，コンクリート中に存在する水分が凍結するための温度条件としては-2℃以下であることが挙げられるが，本項目では確実に凍結融解を行うため，低温実験槽内の温度は，凍結時に-30℃，融解時に30℃となるよう設定した。凍結，融解にかかる時間は，各12時間ずつと

し、合計 60 サイクル凍結融解処理を実施した。サイクル数によるモルタルの脆弱度の違いを継時的に確認するため、密度・吸水率試験は、凍結融解処理を 15 サイクル行うごとに全ての試料を採取して実施した。

(3) すりもみ処理方法

すりもみ処理は、凍結融解後の密度・吸水率試験結果において、最も処理効果が高い試料を用いた。すりもみ処理を施す試料は、処理前に粒度試験を行い 5mm 以下の試料の除去を実施した。すりもみ処理には写真-4 に示すコンクリートミキサー（タンク容量：140L、回転数：26rpm、タンク口径：370mm）を用い、各試料の処理量は 7kg 程度として 500 回転させた。このとき、コンクリートミキサーには、試料のみを投入した。すりもみ処理後には、再度粒度試験を行い、5mm 以下の試料を除去した後に密度・吸水率試験を実施した。

3. 結果と考察

3.1 低温実験槽を用いた凍結融解処理の効果

(1) 含水状態による処理効果の相違

凍結融解処理前後の各試料の密度・吸水率試験の結果を図-1 から図-8 に示す。再生骨材は、品質が高い順番に再生骨材 H、M、L とランク分けがされている。高品質な再生骨材 H は、一般用途のコンクリートに用いることが可能である。中品質な再生骨材 M は、凍結融解や乾

燥収縮の影響を受けにくい杭や基礎梁に用いることが可能である。低品質な再生骨材 L は、高い強度や耐久性が必要とされない捨コンや均しコンに使用用途が限定される。グラフ目盛上の赤ライン、黄ライン、紫ラインは、再生粗骨材 H、M、L の規格値である。

図-1 から図-4 に示すように、絶乾状態および気乾状態で処理を施した全ての試料において、凍結融解サイクル数の増加による品質の向上は確認できなかった。気乾状態で 15 サイクル処理を施した水セメント比 70% の試料に関しては、再生粗骨材 L の規格さえ満たさなかった。一方で、W.S を施した試料は、いずれの含水状態においても、凍結融解処理を施す前から高品質な再生粗骨材 H の規格を満たした。その他の試料は、全て再生粗骨材 L の規格を満たした。

図-5 および図-6 に示すように、湿潤状態で処理を施した試料において、15、30 サイクル処理を施した水セメント比 70% の試料は、再生粗骨材 L の規格を満たさなかった。しかし、水セメント比 70% から 100% の試料は、凍結融解サイクル数の増加に伴い絶乾密度は増加し、吸水率は低下する傾向が確認できた。一方で、W.S を施した試料は処理前から再生粗骨材 H の規格を満たしていることから、サイクル数の増加による品質の向上はデータ上確認できなかった。また、再生粗骨材 L の規格を満たす水セメント比 55% の試料においても、凍結融解サイク

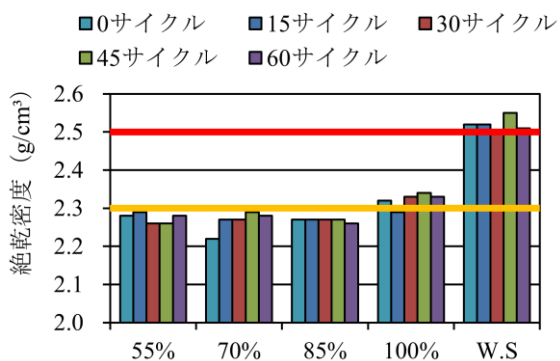


図-1 絶乾試料の絶乾密度

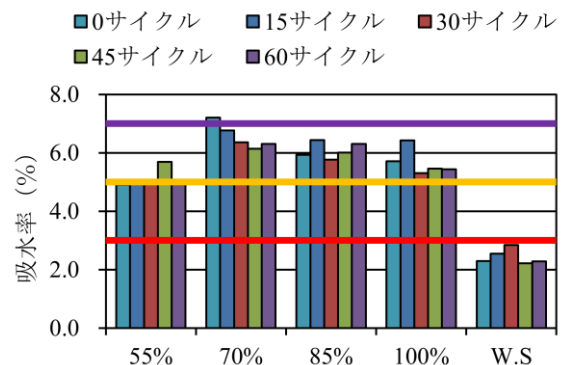


図-2 絶乾試料の吸水率

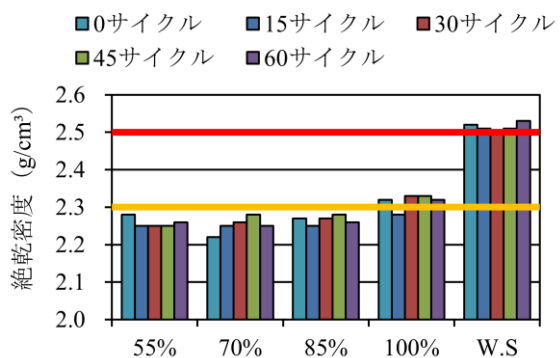


図-3 気乾試料の絶乾密度

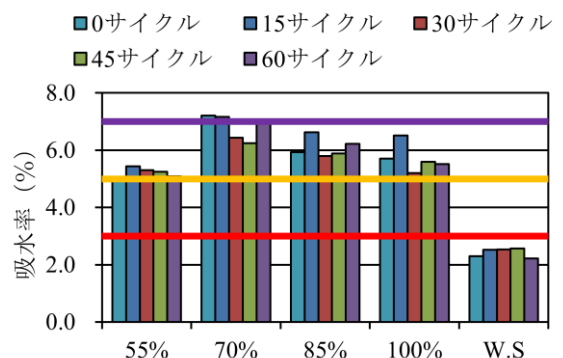


図-4 気乾試料の吸水率

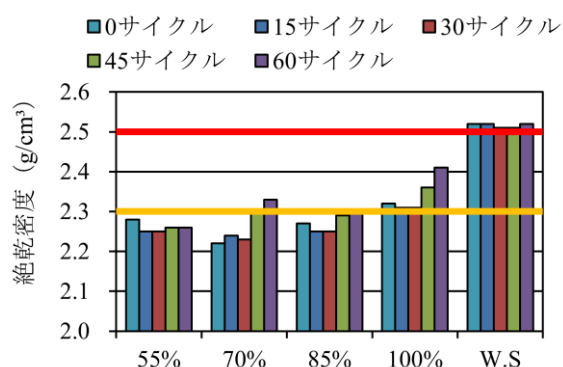


図-5 湿潤試料の絶乾密度

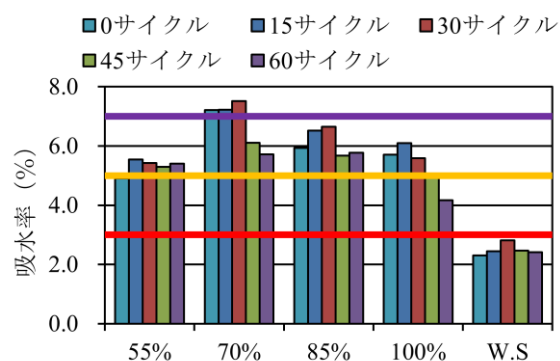


図-6 湿潤試料の吸水率

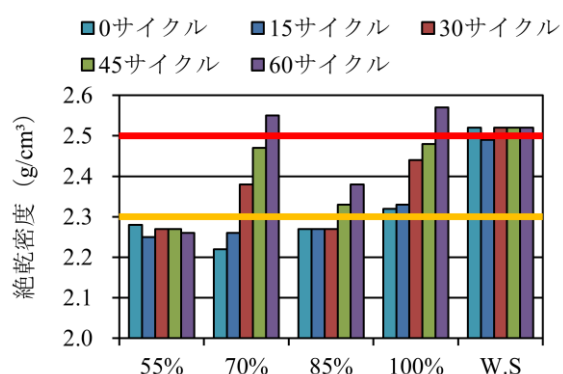


図-7 浸漬試料の絶乾密度

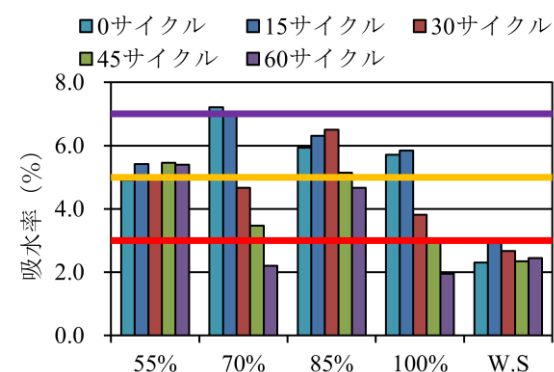


図-8 浸漬試料の吸水率

ル数の増加に伴う品質の向上は、確認できなかった。この原因として、水セメント比 55% の試料は他の試料と比較して元々の含水量が少なく、W.S を施した試料は付着モルタル量が少ないため、凍結融解処理時における水の凍結膨張圧の影響が他の試料よりも小さかったことが考えられる。

図-7 および図-8 に示すように、浸漬状態で処理を施した試料において、水セメント比 55% の試料は、他の含水状態で処理を施した場合と同様に、再生粗骨材 L の規格を満たした。一方で W.S 処理を施した試料は、15 サイクル目に若干品質が低下したが、その他では高品質な再生粗骨材 H の品質を有することが確認できた。水セメント比 70% から 100% の試料は、凍結融解サイクル数の増加に伴い、品質が大幅に向上することが確認できた。この結果より、凍結融解処理によって抽出される再生粗骨材の品質の向上を図るためには、水分状態が重要なファクターとなり、浸漬状態での処理が最も効果が高くなることを確認した。

(2) 水セメント比による処理効果の相違

図-7 および図-8 に示すように、水セメント比 70% の試料においては、浸漬状態で処理を施すことにより、15 サイクル後は再生粗骨材 L の規格であったが、30 サイクル後は再生粗骨材 M、さらに 60 サイクル後は再生粗骨材 H の規格まで向上することが確認できた。こ

のように、凍結融解サイクル数の増加に伴って、絶乾密度と吸水率の品質は大幅に向上した。

水セメント比 85% の試料においても、浸漬状態で処理を施すことにより凍結融解サイクル数の増加に伴う品質の向上が確認でき、60 サイクル後には、再生粗骨材 M の規格まで向上することが確認できた。

水セメント比 100% の試料においては、湿潤および浸漬状態で凍結融解処理を施すことにより、凍結融解サイクル数の増加に伴う大幅な品質の向上が確認でき、湿潤状態で 60 サイクル、浸漬状態で 30 サイクル処理を施すと、その品質は再生粗骨材 M の規格まで向上することが確認できた。さらに、浸漬状態で 45 サイクル処理を施すと、その品質は、再生粗骨材 H の規格まで向上することが確認できた。

W.S を施した試料においては、含水状態および凍結融解サイクル数の違いによる品質の差はほとんど見られなかったが、全ての試料において、凍結融解処理を施す前から高品質な再生粗骨材 H、またはそれに近い品質をもつことが確認できた。

(3) すりもみ処理効果

低温実験槽を用いた凍結融解試験の結果から、凍結融解処理の効果が最も得られる含水状態は、浸漬状態であることが確認できた。したがって本項目では、浸漬状態で凍結融解処理を施した試料にすりもみ処理を施し、そ

の効果を確認した。

すりもみ処理前後の試料の密度・吸水率試験の結果を図-9および図-10に示す。ほとんどの試料において、すりもみ処理後は、絶乾密度が増加し、吸水率が低下することが確認できた。特に、凍結融解処理を15サイクル施した水セメント比70%および100%の試料は、すりもみ処理を施すことで品質が大きく向上した。また、凍結融解処理では品質の大きな向上が見られなかったW.S.を施した試料についても、すりもみ処理後は品質が向上し、安定して再生粗骨材Hの規格を満たすことが確認できた。

全試料のすりもみ処理後の損失量(5mmふるいを通過した試料の質量)を図-11に示す。水セメント比70%から100%の試料において、凍結融解処理を30サイクル施した試料の損失量は最も大きくなり、凍結融解サイクル数が増加するにしたがって、すりもみ処理後の損失量は減少することが確認できた。これは、凍結融解処理を30サイクル施すことでモルタルが脆弱化し、その後のすりもみ処理の効果が上がったが、凍結融解サイクル数を増加させると、その時点でモルタルが粗骨材から剥離し、すりもみ処理時には既に付着モルタル量が少なくなっていたためであると考えられる。

凍結融解処理を45サイクル施した水セメント比70%の試料と、凍結融解処理を30サイクル施した水セメント比100%の試料、凍結融解処理を15サイクル施したW.S.

の試料の粒径加積曲線を図-12~14に示す。各試料は、すりもみ処理前後の粒径加積曲線の差が大きかったものである。

水セメント比70%の試料の粗粒率は、すりもみ処理前が6.93であったのに対し、すりもみ処理後は6.77まで低下した。一方で水セメント比100%の試料の粗粒率は、すりもみ処理前が7.10であったのに対し、すりもみ処理後は6.85まで低下した。図-11から図-13に示すように、水セメント比100%の試料のうち、すりもみ処理前後の粒径加積曲線の差が最も大きかった試料は、損失量が最も大きかった凍結融解処理30サイクル施した試料と同一であったのに対し、水セメント比70%の試料において粒径加積曲線の差が大きかった試料は、凍結融解処理45サイクル施した試料であった。この理由として、凍結融解処理を30サイクル施した水セメント比100%の試料は、すり減り効果に加えてモルタルと粗骨材の剥離効果も得られたのに対し、水セメント比70%の試料は、すりもみ処理を施すことによって主にすり減り効果のみしか得られなかったことが考えられる。

凍結融解処理を15サイクル施したW.S.の試料は、すりもみ処理前後における粒径加積曲線の変化が全試料の中で最も大きく、粗粒率はすりもみ処理前の7.18からすりもみ処理後は6.89まで低下した。図-11に示すように、凍結融解サイクル数の違いによるすりもみ後の損失量に

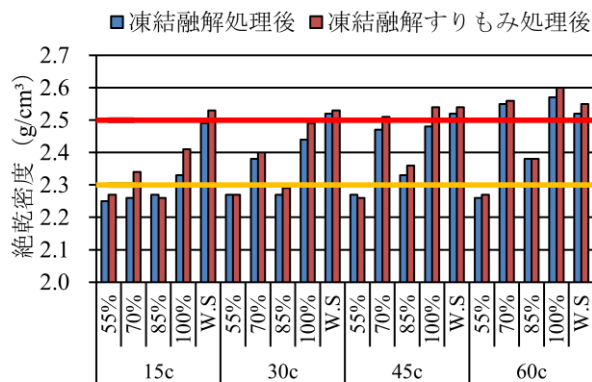


図-9 すりもみ前後の試料の絶乾密度

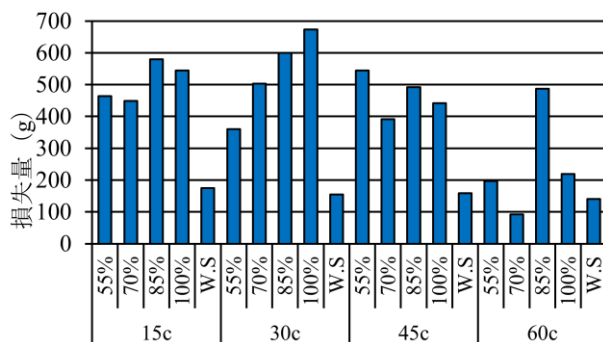


図-11 すりもみ後の各試料の損失量

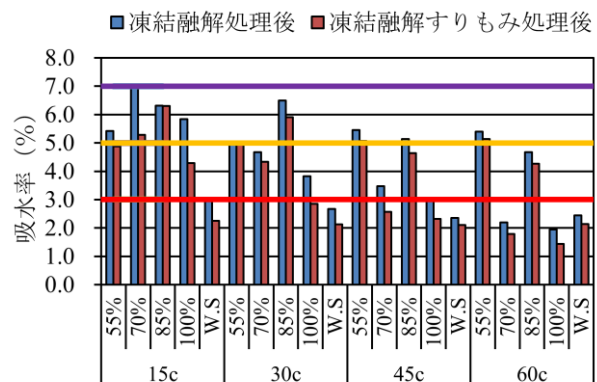


図-10 すりもみ前後の試料の吸水率

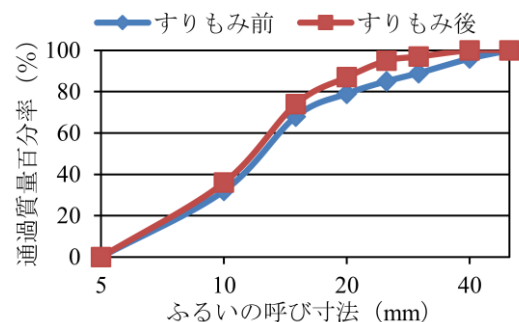


図-12 水セメント比70%の試料(45サイクル後)の粒径加積曲線

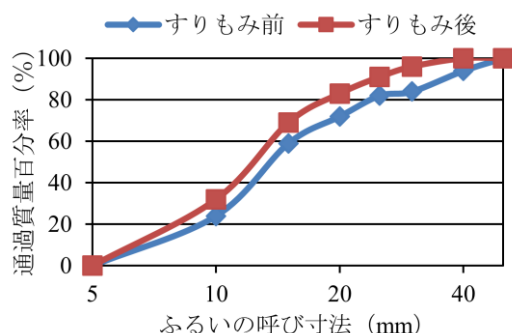


図-13 水セメント比 100%の試料(30 サイクル後)の粒径加積曲線

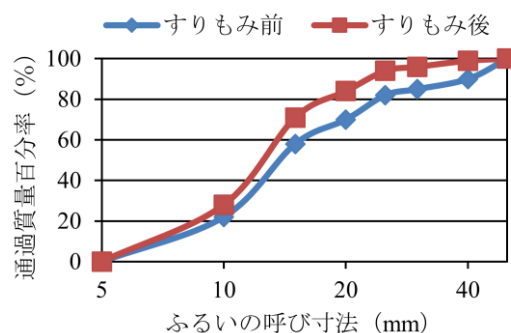


図-14 W.Sを施した試料(15 サイクル後)の粒径加積曲線

ほとんど差が見られない一方で、図-14に示すように凍結融解処理を15サイクル施した試料にのみ粒径加積曲線の変化が見られた理由としては、薄いモルタル層で結合していた粗骨材が、すりもみの衝撃により分離したことが考えられる。また、W.Sを施した試料において、凍結融解処理を30サイクル以上施した試料のすりもみ処理前の粒径加積曲線は、凍結融解処理を15サイクル施した試料のすりもみ処理後と同程度であった。これは、凍結融解処理によって粗骨材が分離されたためであると考えられる。

本研究では、室内における環境制御装置を利用して凍結融解処理を施したが、気温変動を利用して自然環境で凍結融解処理を施す際には、処理地の気象条件を考慮した上で、凍結融解回数に応じて凍結融解処理とすりもみ処理を適切に組み合わせることで、安定した品質および粒度をもつ再生粗骨材を製造することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、次のような結果が得られた。

- (1) 残コン・戻りコンに凍結融解処理を施す際には、事前処理として、フレッシュコンクリートに水セメント比が70%以上になるよう加水することで、処理効果が得られやすくなる。
- (2) 処理時の試料の含水状態は、コンクリート内外の水分の凍結膨張圧の影響を受けやすい浸漬状態が適当であることが確認できた。
- (3) 良質な粗骨材（本研究では、絶乾密度 2.71g/cm^3 、吸水率 0.61% の安山岩）を用いた場合、W.Sを施した試料は、凍結融解処理なしでも再生粗骨材 H に近い品質を得られることが確認できた。また、凍結融解サイクル数が多いほど、モルタルによって結合している粗骨材が分離し、粒径加積曲線は小さくなった。
- (4) すりもみ処理を施すことにより、ほとんどの試料の品質が向上することが確認できた。

- (5) 自然環境で気温変動を利用して凍結融解処理を施す際、より効率的に高品質な再生粗骨材を得るためには、処理地の気象条件を考慮した上で、凍結融解処理とすりもみ処理を組み合わせることが有効であると考えられる。

本研究における凍結融解処理では、水セメント比が55%の試料の品質の大幅な向上は見られなかったが、処理後の試料の中には、モルタル部分のひび割れや粗骨材とモルタルの剥離など、処理効果が見られる試料も多数存在した。よって今後は、凍結融解処理の効果を長期的に確認していく必要がある。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金（基盤B）（研究課題番号：24380132、代表：緒方英彦）の助成を受けたものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：残コンを減らす工夫
- 2) 公益社団法人日本コンクリート工学会：「残コン・戻りコンの発生抑制と有効利用」に関するシンポジウム，論文報告集，委員会中間報告，2010.2
- 3) 耐寒材料チーム：コンクリート用再生骨材の品質基準・規格について、寒地土木研究所月報、2006.11
- 4) 公益社団法人土木学会：コンクリート構造物の補修・解体・再利用における CO_2 削減を目指して、2012.5
- 5) 秋吉善忠：低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの耐久性に関する基礎的研究、大分大学大学院工学研究科博士論文、2012.3
- 6) 独立行政法人土木研究所：再生骨材の最近の動向について、北海道開発土木研究所月報，No.632，29-33，2006.1
- 7) 片平博：天然骨材資源の低品質化の現状と課題，コンクリート工学 Vol.46，No.5，20-23，2008.5