

論文 再生コンクリートの品質に及ぼす SEC 法の影響

小栗 晶子*1・宮崎 健治*2・横井 克則*3・水口 裕之*4

要旨: 廃棄コンクリートを破砕処理して得られる再生骨材は一般に低密度、高吸水率であるため、構造物用コンクリートとしての利用は困難な面があり、路盤材や埋戻し材としての利用がほとんどである。今後も大量の廃棄コンクリートの排出が予想されており、一方路盤材としての需要にも限界があり、再生骨材を用いたコンクリートの用途拡大が求められている。本研究では、再生コンクリートの強度および耐久性を向上させるため、SEC法を用い、更に収縮低減剤や膨張材を用いて再生コンクリートを作製し、その硬化特性を調べた。その結果、圧縮強度の向上および長さ変化の低減を図ることはできなかったが、凍結融解抵抗性は若干の向上が見られた。

キーワード: 再生骨材, SEC法, 圧縮強度, 乾燥収縮, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

廃棄コンクリートから得られる再生骨材は一般に低密度、高吸水率であるため、一般的な構造物用コンクリートに適用することは困難である。現在では路盤材や埋戻し材としての利用がほとんどであり、一部は埋め立て処分が行われている。今後も廃棄コンクリートの排出量の増加が問題視されているなか、路盤材等の需要に限界があり再生骨材を用いたコンクリートの用途拡大が求められている。再生骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートに比べて圧縮強度、乾燥収縮、凍結融解抵抗性などの性質が劣ることが報告されている¹⁾。

昨年度、著者らは再生骨材を用いたコンクリートを擁壁に適用することを目的とし、目標強度 21N/mm²を確保し、かつ乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性を高めた再生コンクリートを作製するため、再生骨材に収縮低減剤や廃石膏ボードから回収した植物繊維を混入した配合について調査した²⁾。その結果、すべての配合で目標強度以上が得られ、長さ変化の低減効果も確認できたが、凍結融解抵抗性を向上させることができず、なかでも収縮低減剤を用いた配合が最も著しい劣化傾向を示した。

本年度は、昨年度と同様に再生骨材を用いたコンクリートを擁壁に適用することを目標とし、圧縮強度の増大を目的として練混ぜ方法に SEC法を適用した。SECは、sand enveloped with cementの頭文字をとったもので、一定の表面水を持った砂にセメントを投入して一次混練(造殻)し、次いで残りの材料を投入して練混ぜる方法である³⁾。SEC法の適用により、ブリーディングや材料分離のほか、圧縮強度等の点で優れたコンクリートが得ら

れることが報告されている⁴⁾。また、乾燥収縮の低減および凍結融解抵抗性の向上を図るため、収縮低減剤や膨張材を用いた配合を設定し、検討を行った。収縮低減剤は硬化後の供試体表面に塗布する方法で使用する事とした。なお、目標強度は 21N/mm²とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1、再生骨材の粒度分布を図-1、再生骨材の物理的性質を表-2に示す。再生骨材は、構造物の解体に伴って引抜いた既存杭(打設後 27年経過)を低度処理して得たものである。使用再生骨材の品質は JIS A 5023 の再生骨材 L の品質に該当することがわかった。粒径が 5-20mm のものを再生粗骨材とし、5mm 以下のものを再生細骨材として使用した。再生粗骨

表-1 使用材料と主な特性

セメント	高炉セメント B 種： 密度 3.04g/cm ³ , 比表面積 3810cm ² /g
再生細骨材	徳島県鳴門市産： 密度 2.27g/cm ³ , 吸水率 9.96%
再生粗骨材	徳島県鳴門市産： 密度 2.45g/cm ³ , 吸水率 5.65%
混和剤	AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE 調整剤：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	収縮低減剤：ポリオキシエチレンポリオキシプロピレンモノブチルエーテル
混和材	膨張材：石灰・石膏・ポーキサイトを主成分とする焼成化合物

*1 徳島大学大学院 (正会員)

*2 宮崎基礎建設 (株) (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科准教授 博 (工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部教授 工博 (正会員)

表-2 再生骨材の物理的性質

骨材の種類		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	微粒分量 (%)
再生粗骨材		2.45	2.32	5.65	1.31	1.36
再生細骨材		2.27	2.06	9.96	1.37	7.41
JIS A 5021	再生粗骨材 H	—	2.5 以上	3.0 以下	—	1.0 以下
	再生細骨材 H		2.5 以上	3.5 以下		7.0 以下
JIS A 5022	再生粗骨材 M	—	2.3 以上	5.0 以下	—	1.5 以下
	再生細骨材 M		2.2 以上	7.0 以下		7.0 以下
JIS A 5023	再生粗骨材 L	—	—	7.0 以下	—	2.0 以下
	再生細骨材 L			13.0 以下		10.0 以下



写真-1 再生粗骨材

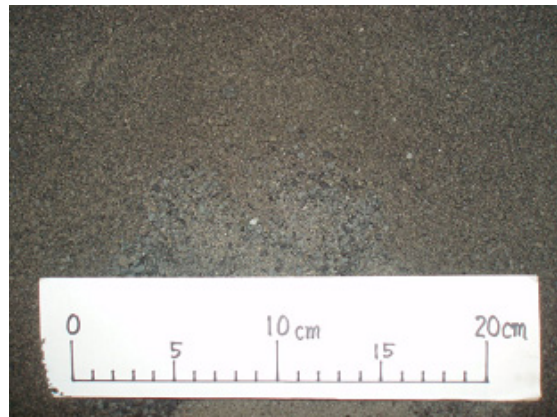


写真-2 再生細骨材

材の粒度分布は JIS の再生粗骨材 L の標準粒度範囲内にほぼ対応しているものの、再生細骨材については標準粒度内におさまらず、比較的粒度が大きいものとなっている。本実験では、資源の有効利用の観点から、現場で発生した廃棄コンクリートを全量用いることとし、標準粒度外のものではあるが、この再生細骨材をそのまま使用した。セメントは高炉セメント B 種を使用し、混和剤は AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)および AE 調整剤(アルキエーテル系陰イオン界面活性剤)を使用した。また、乾燥収縮の低減および凍結融解抵抗性の向上を図るため、収縮低減剤(ポリオキシエチレンポリオキシプロピレンモノブチルエーテル)または膨張材を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3、SEC 法適用のための最適一次水量の選定に実施したブリーディング試験結果を図-2 に示す。本実験では、練混ぜ方法の違いによる圧縮強度等の影響を評価するため、通常の練混ぜ方法(以下、基と称す)と SEC 法による練混ぜ方法(以下、セ基と称す)によって供試体を作製し、比較を行うこととした。SEC 法における最適一次水量 W1 はブリーディング試験(JIS A 1123)によって決定した。一次水セメント比を変化

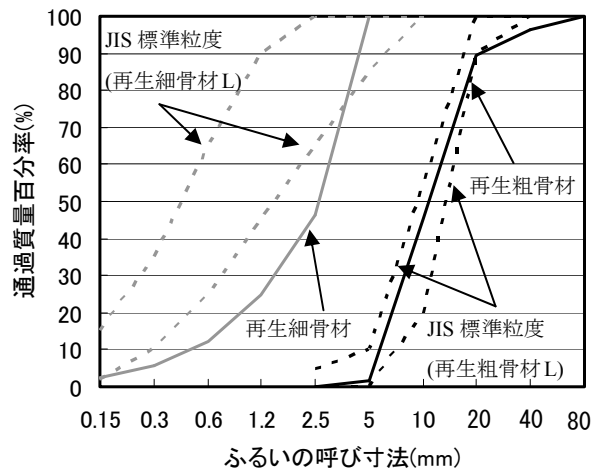


図-1 再生骨材の粒度分布

させ、最大ブリーディング率が最も小さい水セメント比を最適一次水セメント比とした。既往の研究³⁾によると、普通骨材、普通セメントを用いたコンクリートでブリーディング率を測定した結果、最大ブリーディング率が最も小さい一次水セメント比は20%であるとの報告がある。本実験では、一次水セメント比を15、20、25%の3種類に変化させて実験を行った。本実験においては一次水セメント比が20%のときの最大ブリーディング率が最小と

表-3 コンクリートの配合

配合名	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	高炉セメント C	再生細骨材 S	再生粗骨材 G	膨張材	AE減水剤	AE調整剤
基	55	52	175	318	785	795	-	1.591	1.591
セ基									
セ収				288			30	1.909	2.227
セ膨									

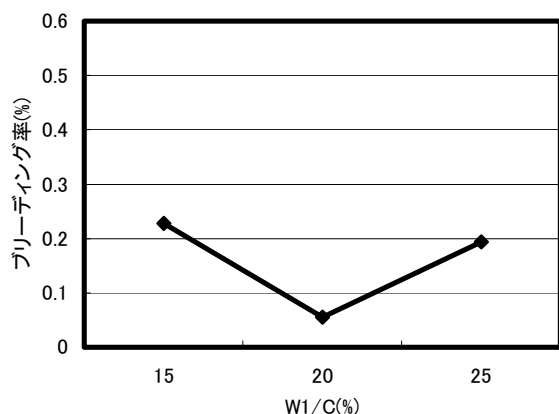


図-2 ブリーディング試験による W1/C の決定

なったため、W1/C を 20% とした最適一次水量とした。更に、乾燥収縮および凍結融解抵抗性を高めるため、SEC 法によって作製した供試体表面に収縮低減剤を塗布したもの(以下、セ収と称す)と膨張材を混入した配合(以下、セ膨と称す)の 4 配合を設定した。いずれの配合も目標スランプを 8±2.5cm、空気量 5±1% とし、AE 減水剤および AE 調整剤により所要のスランプと空気量が得られるように調整した。

2.3 試験方法

一括練りおよび SEC 法による練混ぜ工程を図-3 および図-4 にそれぞれ示す。コンクリートの練混ぜは、強制 2 軸練りミキサを使用し、合計 90 秒間練混ぜた。一括練りの場合、ミキサに骨材、セメントの順に入れて練混ぜ、30 秒後に水を加えて 60 秒間練混ぜた。SEC 法による練混ぜについては既往の文献に準じて行った⁵⁾。ミキサに骨材、一次水を入れて練混ぜ、15 秒後にセメントを加え、更に 30 秒後に二次水を加えて残り 45 秒間練混ぜた。供試体は、圧縮強度試験用に φ100×200mm、長さ変化および凍結融解試験用に □100×100×400mm を作製した。脱型後、水温 20℃、湿度 60% の環境下で水中養生を行った。収縮低減剤を使用する供試体については脱型後 5 日間水中養生を行ったあとに供試体全面に霧吹きを用いて収縮低減剤を塗布し、その後室温 20℃、湿

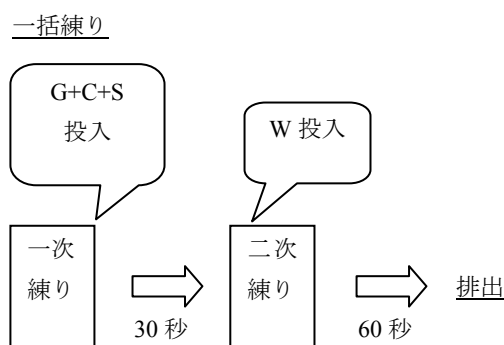


図-3 一括練混ぜ工程

SEC 法による練混ぜ

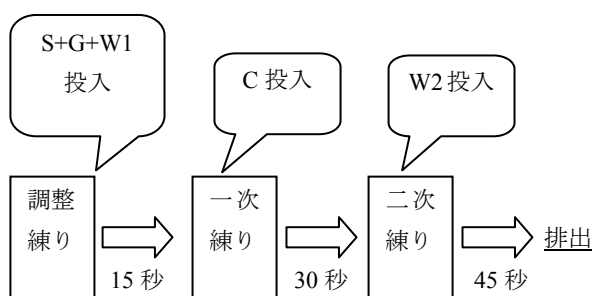


図-4 SEC 法練混ぜ工程

表-4 フレッシュ性状

配合名	スランプ(cm)	空気量(%)
基	5.8	5.7
セ基	5.6	5.3
セ収	5.8	5.7
セ膨	5.5	4.0

度 60% の環境下で気中養生を行った。

圧縮試験は JIS A 1108 に準じて行い、長さ変化率は JIS A 1129 のコンタクトゲージ方法に準じて測定した。凍結融解試験は JIS A 1148 水中凍結融解試験 A 法に準じて実施した。凍結融解については、相対動弾性係数が 60% を下回ったあとも破壊時の供試体観察のため試験を継続した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表-4に示す。すべての配合で所要のスランブおよび空気量が得られているが、スランブは全体的に小さめの6cm程度となっている。再生細骨材の粒度分布が標準粒度外であるため、コンクリートがやや荒々しくなり、スランブが小さめになったと考えられる。

3.2 圧縮試験

圧縮強度を図-5に示す。すべての配合で材齢28日における強度が目標強度 21N/mm^2 を満足している。一括練りとSEC法による練混ぜ方法の違いを比較すると、材齢28日における圧縮強度は一括練りによって作製した配合が大きかったものの、材齢7日から28日までの強度の増加を比較すると、SEC法による練混ぜを行ったものの方が大きくなっている。コンクリートの硬化過程においてセメントペーストと骨材の付着強度が徐々に増大し、材齢28日での強度が大きくなったものと考えられる。SEC法を適用し、更に硬化後の供試体表面に収縮低減剤を塗布した配合については最も大きい強度となっている。硬化後の供試体表面に収縮低減剤を塗布することで、供試体内部の水分の蒸発を低減し、水和反応に必要な養生水を保持させることで強度が増進したものと考えられる。膨張材を用いた配合の圧縮強度は材齢28日において基本配合とほぼ同等の値となったものの、材齢91日における強度の伸びは最も小さい結果となっている。

3.3 長さ変化

長さ変化を図-6に示す。測定日数126日までの結果であるが、実験要因の違いによる大きな差は現在見られていない。一括練りによる配合とSEC法により練混ぜた配合を比較すると、SEC法により練混ぜた配合の長さ変化が全体的に大きい傾向を示している。SEC法による練混ぜを行った配合のうち、最も低減効果が得られたものは収縮低減剤を塗布したものであるが、基本配合とほぼ同等の値となっている。供試体表面に収縮低減剤を塗布したものは試験開始直後に低減効果は見られなかったものの、他の配合に比べて長さ変化の進行を徐々に抑える傾向を示している。塗布型収縮低減剤の使用によって、供試体表面を不溶水の膜で包むことによってコンクリート内部の毛細管空隙中に存在する水分の蒸発を抑えることで長さ変化を低減できたものと考えられる。

膨張材を用いた配合については現時点で長さ変化が基本配合よりも大きい値を示している。使用した膨張材はコンクリートの硬化過程において水和反応によりエトリンタイトの針状結晶を生成して膨張し、乾燥収縮を抑える働きをするが、本実験において低減効果が見られていない。今後の長さ変化を調査するとともに測定開始

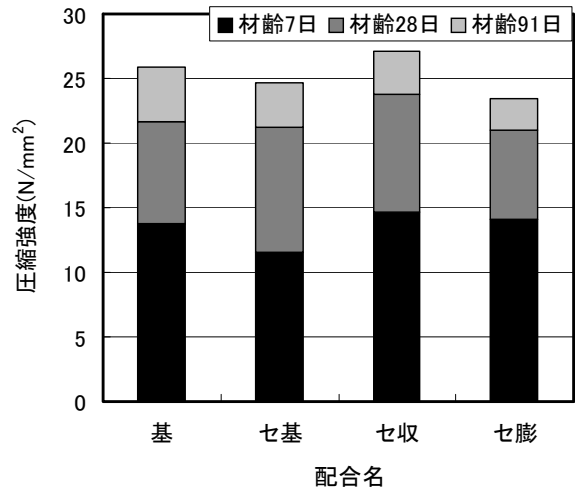


図-5 圧縮強度試験結果

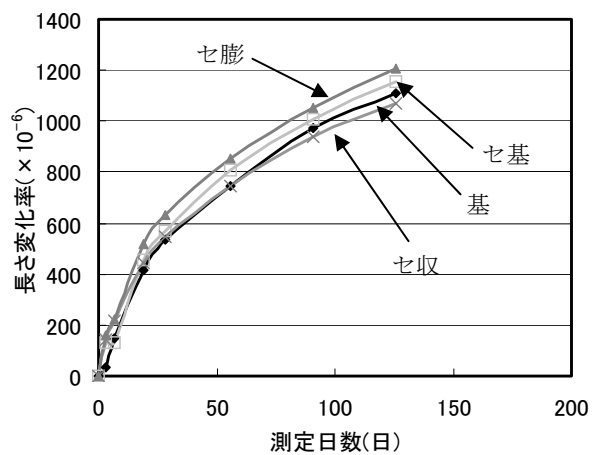


図-6 長さ変化率試験結果

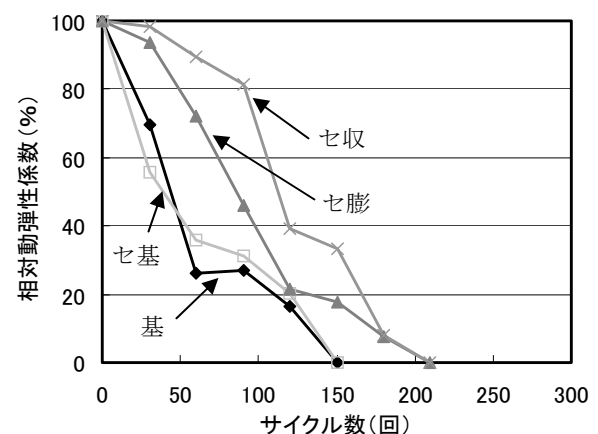


図-7 凍結融解試験結果

直後に収縮低減効果が得られていないことについては今後の検討課題である。

3.4 凍結融解

凍結融解を図-7, 質量減少率を図-8, 試験サイク

ル 150 回で破壊した基本配合の供試体の様子を写真-3 に示す。試験サイクル 300 回で相対動弾性係数が 60% 以上の値を得ることができれば耐凍害性が得られたと判定することができるが、本実験ではすべての配合で早期に低下傾向が見られ、試験サイクル 210 回ですべての供試体が破壊した。なかでも、基本配合の供試体が最も著しい低下傾向を示し、供試体表面のモルタルが剥がれて骨材がむき出しの状態となり、非常に大きな劣化を示している。

4 配合のうち収縮低減剤を塗布した配合が凍結融解に対して比較的安定したことについては不溶水の収縮低減剤で供試体表面を覆うことで供試体内部の水分の蒸発を防ぎ、外部からの水分の侵入をある程度遮断することによって凍結による水の体積膨張を低減できたことが考えられる。一般に、収縮低減剤を混入して作製したコンクリートは乾燥収縮低減効果が得られるものの、耐凍害性を損なわせる性質をもつことを既往の研究で得ているが²⁾、収縮低減剤を塗布する手法は乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性を高める新たな手段として有用であると考えられる。

膨張材を用いた配合については試験サイクル 90 回で基準値以下の値となったものの、基本配合に比べて凍結融解抵抗性が大きくなっている。これは SEC 法を適用することで、通常の練混ぜによって作製したコンクリートよりも骨材表面に膨張材を含んだセメントペーストがより密に付着したことが考えられる。膨張材を混入させると、水和反応によりエトリンガイトの針状結晶を生成し、内部の空隙が減少することによってコンクリート中の水分の凍結による体積膨張を抑えることができたものと考えられる。しかし、本実験結果では、圧縮強度および乾燥収縮においては膨張材の混入による大きな効果が見られないことより、膨張材の効果が直接的に影響する結果とはなっていない。

質量減少率は SEC 法を適用した基本配合が最も高い値を示している。SEC 法の適用により、再生骨材の表面に水セメント比の小さいセメントペーストが造殻されることによって一括練りに比べて付着強度が大きくなるため、質量減少率は一括練りによる基本配合よりも小さくなることが予想されたが、SEC 法を適用した基本配合は他の性質においてもこの効果が示されていないことから、本実験で使用した再生骨材の品質に対してコンクリートの練混ぜにおける時間設定が適切でなかったことが考えられる。付着強度は SEC 法による練混ぜ時の調整練りおよび一次練りの時間設定が影響するものと思われる。造殻するための最適練混ぜ時間を試し練りによって設定することで、付着強度を高めるとともに圧縮強度の向上させる可能性があると考えられる。

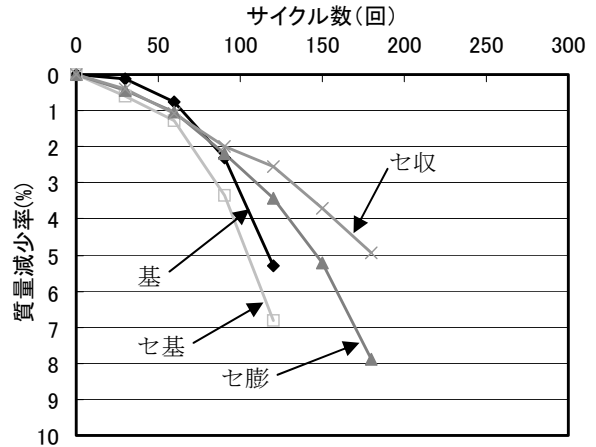


図-8 質量減少率



写真-3 基本配合 試験サイクル 150 回

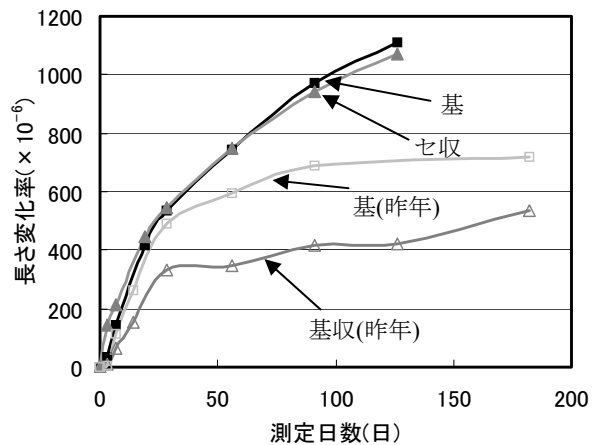


図-9 収縮低減剤の種類を変えた場合の長さ変化率試験結果

3.5 SEC 工法の効果

SEC 法による練混ぜで作製したコンクリートは、骨材とセメントペーストとの付着強度が高まり、圧縮強度が高くなる傾向にある。また、骨材の分離や沈降が少ないため品質の変動の少ないコンクリートが得られることが報告されている⁴⁾。本実験では、再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の向上を目的として SEC 法による練混ぜを実施したが、材齢 28 日における圧縮強度は SEC 法の適用による強度の増加を確認することができなかった。フレッシュコンクリートの性状は砂の表面水率

や混練方法の違いが影響するため、練混ぜ時の骨材の表面水率をほぼ一定の状態とすることが求められる⁹⁾。本実験では設備上の都合でサンドコントローラー等による骨材管理を実施できなかったため、使用した再生骨材の表面水が一定でなかったことが影響したものと考えられる。また、SEC法による練混ぜ時間は骨材状態や練混ぜ環境等によって設定時間がさまざまである現状にあるため、本実験で使用した再生骨材に適した練混ぜ時間の設定を調査する必要がある。

3.6 収縮低減剤の利用効果

混入型収縮低減剤を用いた供試体および塗布型収縮低減剤を用いた供試体による長さ変化を図-9に示す。乾燥収縮を低減させるために収縮低減剤が用いられ、一般的にコンクリートの練混ぜ時に混入する手法がとられる。著者らは、これまでに発生場所は異なるものの、同じく低度処理で製造した再生骨材を用いて、混和型収縮低減剤(ポリエーテル系)を添加した配合を設定し、長さ変化および凍結融解の測定を行った²⁾。その結果、長さ変化においては材齢182日において長さ変化率が 500×10^{-6} 程度であり、終始安定した値を得ることができたが、凍結融解抵抗性は十分なものが得られず、同じ再生骨材で作製した基本配合に比べて最も著しい低下傾向を示した。

本実験で、塗布型収縮低減剤を使用する配合については基本配合と同じ配合で供試体を作製し、材齢5日後に供試体表面に収縮低減剤を塗布し、長さ変化および凍結融解試験を実施した。現時点で長さ変化は混入型収縮低減剤を使用した昨年度の結果ほど大幅な低減効果が得られていない。ところが、凍結融解抵抗性は塗布型収縮低減剤を用いた配合が若干の耐凍害性を得ることができたが、試験サイクル120回で60%を下回ったため、更なる検討が必要と考えられる。もっと長い材齢における塗布型収縮低減剤を使用した配合の長さ変化が基本配合よりも小さく、かつ凍結融解においても耐凍害性が得られれば、気象条件の厳しい地域においても施工が可能となり、更に施工法も比較的簡易であることから実用性を高めることができると考えられる。

3.7 膨張材の利用効果

膨張材を用いたコンクリートの圧縮強度は材齢28日において基本配合とほぼ同等の値が得られたが、材齢91日において長期強度の向上が見られなかった。長さ変化においては現時点で基本配合よりも収縮幅が大きく、低減効果が得られていない。コンクリート内部の水和反応が十分に達成できていないことが考えられる。凍結融解抵抗性は試験サイクル90回で相対動弾性係数が基準値以下となったものの、基本配合に比べて抵抗性を高めることができた。本実験において乾燥収縮の低減を図るに

は、膨張材の使用よりも塗布型収縮低減剤を用いた配合の効果が高いことがわかった。また、塗布型収縮低減剤を用いた配合は凍結融解抵抗性においても膨張材の使用に比べて向上効果が見られた。現時点で寒冷地における使用は望ましくないが、ある程度の収縮低減効果を得る目的で使用するには適切であると考えられる。

4. まとめ

本実験では、既存杭を低度処理して得られた再生骨材を用いたコンクリートを擁壁に適用することを目標とし、再生骨材の低密度、高吸水率等の品質に起因する強度低下、乾燥収縮の増大および凍結融解の影響を受けやすい性質を改善するため、強度の向上を目的としてSEC法による練混ぜを行い、乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性を高めるため収縮低減剤または膨張材を使用した配合を設定し、実験を行った。

本実験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 材齢28日における圧縮強度はすべての配合で目標強度である 21N/mm^2 を得ることができた。
- (2) SEC法の適用によって圧縮強度の向上および長さ変化の低減を図ることはできなかったが、凍結融解抵抗性は若干の向上が見られた。
- (3) 塗布型収縮低減剤の使用によって圧縮強度が若干大きくなった。長さ変化の大幅な低減は見られていないが、凍結融解抵抗性は向上している。
- (4) 膨張材を用いたコンクリートの圧縮強度は、材齢28日において基本配合とほぼ同等の値を得ることができた。長さ変化においては現時点で効果は見られないものの、耐凍害性は若干大きくなった。

参考文献

- 1) 棚野博之：再生コンクリートの物性，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp.77-81，2008
- 2) 小栗晶子，宮崎健治，横井克則：杭頭処理により発生した再生骨材を用いたコンクリートの特性，第64回年次学術講演会論文集，第V部，pp.751-752，2009
- 3) 田澤栄一編：コンクリート工学，朝倉書店，p.127，2002
- 4) 伊東靖郎，辻正哲，加賀秀治，山本康弘：S.E.C.コンクリートの特性と展望，セメント・コンクリート，No.410，pp.20-29，1981
- 5) 細見素康，渡辺健，伊達重之，橋本親典：AE法を用いた分割練混ぜ工法による再生コンクリートの品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.649-654，2007
- 6) 田澤栄一，宮沢伸吾：新しい練りませ方法がコンクリートの性質に及ぼす影響，セメント・コンクリート，No.466，pp.40-48，19