

論文 低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究

松坂 裕介*1・宮崎 健治*2・横井 克則*3・上田 隆雄*4

要旨: 廃棄コンクリートから得られる低度処理再生骨材は、骨材表面に付着している脆弱なモルタルやセメントペーストの影響により、一般に低密度、高吸水率である。本研究では、低度処理再生コンクリートの性能を向上させるための簡易な手法として、コンクリートミキサーによる再生骨材の空練り処理を試みるとともに、フライアッシュを混和した再生コンクリートの諸特性を併せて検討した。この結果、空練り処理を行った再生コンクリートにフライアッシュを混和すると、強度や塩害抵抗性の向上が期待できることが分かった。ただし、フライアッシュを混和することで空気量が低下すると、凍結融解抵抗性は低下した。

キーワード: 再生骨材, 空練り, フライアッシュ, 凍結融解抵抗性, 塩害抵抗性

1. はじめに

廃棄コンクリートを破砕処理して得られる低度処理再生骨材は、骨材表面に脆弱なモルタルやセメントペーストが付着しているため、その品質は一般に低密度、高吸水率である。低度処理再生骨材は、高度処理再生骨材に比べて低コスト・低エネルギーで製造可能であるが、この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や乾燥収縮、凍結融解抵抗性などの性質が劣るとされており¹⁾、現状では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。このため、現在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²⁾。今後も廃棄コンクリート排出量の増加が予想される中、路盤材等の需要には限界があり、低度処理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。

そこで本研究では、骨材への付着モルタルの除去により、低度処理再生コンクリートの性能を向上させるための簡易な手法として、コンクリートミキサーによる再生骨材の空練り処理を試みるとともに、フライアッシュを混和した再生コンクリートの諸特性を併せて検討した。再生コンクリートの基礎的性質として、圧縮強度、動弾性係数、乾燥収縮、凍結融解抵抗性に関する試験を行うとともに、塩水噴霧試験によって塩化物イオン（以下CIとする）の浸透抵抗性を確認した。また、塩水噴霧を実施した鉄筋コンクリート供試体を作製し、電気化学的モニタリングによってコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握も行った。さらに、空練り処理による再生骨材の品質向上程度を把握するために、再生骨材の簡易凍結融解試験も行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料の概要を表-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PC既存杭(打設後27年経過)を破砕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の品質に該当し、粒径が5-15mmのものを

表-1 使用材料と主な特性

セメント	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3290cm ² /g	
普通骨材	細骨材	徳島県阿波市産： 密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 1.72%
	粗骨材	徳島県鳴門市撫養町産： 密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 2.16%
再生骨材	細骨材	徳島県鳴門市産： 密度 2.05g/cm ³ , 吸水率 11.28%
	粗骨材	徳島県鳴門市産： 密度 2.25g/cm ³ , 吸水率 7.03%
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剤：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤	
	SP剤：ポリカルボン酸エーテル系の化合物	
混和材	フライアッシュII種： 密度 2.30g/cm ³ , 比表面積 3510cm ² /g	

表-2 空練り後の再生骨材の性質

	空練り	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
再生粗骨材	なし	2.41	2.25	7.03
	5分	2.43	2.30	5.89
再生細骨材	なし	2.25	2.05	11.28
	5分	2.21	1.95	13.26

*1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (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 工博(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-3 コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合名	空気量 (%)	水セメント比 (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	空気量 (%)		
					水	普通セメント	フライアッシュ	細骨材 N: 普通 R: 再生	粗骨材 N: 普通 R: 再生	AE減水剤	AE剤			SP剤	
1. NS	5	55	50	15	175	318	-	759	813	1.273	0.0127	-	17.1	4.5	
2. NFS							155	607					10.0	2.8	
3. RS							-	759					3.182	16.0	4.0
4. RL							-	-					-	14.0	6.0
5. RFS							155	607					2.864	9.5	2.5
6. RFL							-	-					-	9.0	2.3

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。再生骨材の粒度分布は、JISの再生骨材Lの標準粒度範囲内におさまっている。比較対象として、普通骨材も使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材としてフライアッシュII種を使用した。

2.2 再生骨材の空練り処理

再生骨材表面に付着している脆弱なモルタルやセメントペーストを簡易的に除去することによる品質の改善を目的として、再生細骨材および再生粗骨材のみで60ℓ容量の二軸強制練りコンクリートミキサーによる空練りを5分間行った。本研究ではこの処理を空練りと称して扱う。再生骨材の物性変化の観点から、空練り処理時間は5分間とし、処理後の再生骨材はミキサーに付着した微粒分もはけで落として全量を試料とした。

空練りを行った再生骨材について骨材試験を行った結果を表-2に示す。再生粗骨材については空練りを行うことで密度が大きくなり、吸水率が小さくなる結果となった。これは空練りによって再生骨材表面から付着モルタルの一部が剥がれ落ちたことによるものと考えられる。一方、再生細骨材については密度が小さくなり、吸水率が大きくなった。これは、空練りによって再生骨材から剥がれ落ちた付着モルタルや微粒分が再生細骨材に混入したためと考えられる。なお、再生骨材の5分間の空練り処理によるミキサの電力負荷量の増分を測定したところ、0.0004kWh/kgであった。

2.3 コンクリートの配合

本研究で用いたコンクリートの配合を表-3に示す。本実験では再生骨材配合に加え、比較対象として普通骨材配合についても検討した。準備した配合は以下の6種類である。1.普通骨材(NS)、2.普通骨材、フライアッシュ外割り20%置換(NFS)、3.再生骨材(RS)、4.空練り再生骨材(RL)、5.再生骨材、フライアッシュ外割り20%置換(RFS)、6.空練り再生骨材、フライアッシュ外割り20%置換(RFL)。いずれの配合もW/Cは55%で一定とし、目標スランプを12±2.5cm、空気量5±1%として、AE減水剤、AE剤、SP剤によって所要のスランプと空気量に近づくように調整を行った。フライアッシュ混和

配合については表-3に示すように空気量が小さくなったが、今回使用した混和剤では調整が困難であったため、本研究においては空気量の違いもフライアッシュ混和の効果として考察を行うこととした。

2.4 試験方法

コンクリート製造時は、骨材、セメント、混和材の順に投入し、30秒間練混ぜてから所要の混和剤を混入した水を投入し、さらに90秒間練混ぜた。空練りによる練混ぜはあらかじめミキサに再生粗骨材および再生細骨材のみを投入して5分間練混ぜたあと、セメント、混和材の順に投入して30秒間練混ぜ、その後所要の混和剤を混入した水を投入し、90秒間練混ぜた。供試体はすべての配合でJIS A 1132に準じて圧縮強度試験用にφ100×200mm、長さ変化および凍結融解試験用に□100×100×400mm、塩水噴霧試験用に□100×100×100mmの立方体コンクリート供試体、鉄筋コンクリートモニタリング用にかぶり20mmで異型鉄筋D13を1本配置した□100×100×200mmの鉄筋コンクリート供試体を各3本ずつ作製した。

圧縮試験はJIS A 1108、長さ変化率はJIS A 1129のコンタクトゲージ法、動弾性係数試験は材齢91日のみJIS A 1127、凍結融解試験はJIS A 1148の水中凍結融解試験B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%を下回った後も破壊時の供試体観察のため試験を継続した。

塩水噴霧試験については、材齢14日が経過した鉄筋コンクリート供試体および立方体コンクリート供試体の塩水浸透面一面を除く残りの面をエポキシ樹脂で被覆し、試験機内の温度35℃で、5%塩化ナトリウム溶液を供試体側面に18時間噴霧後、同じ温度、湿度60%で6時間乾燥させるサイクルを2ヶ月間実施した。この間、1週間毎に以下に示す鉄筋腐食モニタリングを行い、2ヶ月間の塩水噴霧後は室温20℃の湿空環境に保管しながら測定を行った。

電気化学的鉄筋腐食モニタリング測定項目は自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗の3項目とし、自然電位の測定方法はJSCE-E601-2000に従って測定した。分

極抵抗およびコンクリート抵抗は矩形波分極法（周波数 800Hz および 0.1Hz, 付加電流 100 μ A）により測定した。照合電極は飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を, 対極にはチタンメッシュを用いた。

立方体コンクリート供試体については, 2 ヶ月間の塩水噴霧試験終了後に JIS A 1154 に準拠してコンクリート中の塩化物イオン量を測定した。

再生骨材の凍結融解試験については既往の研究^{3,4)}を参考に行った。試料と水を 1,000cm³ 程度のポリプロピレン容器に入れ, 1 日 1 サイクル（凍結 16~18 時間, 融解 6~8 時間）でスリースター以上の冷凍庫と 20℃ の水槽に交互に入れ, 10 サイクル終了後に試料の F.M.' の変化量を測定した。F.M.' については式(1)によって算出した。

$$F.M.' = \left[\frac{M_{10} + M_5}{100} \right] + 5.0 \quad (1)$$

ここに,

F.M.' : 粗粒率

M_{10} , M_5 : 10mm, 5mm ふるい上にとどまる試料の質量百分率 (%)

粒径 5-10mm, 10-15mm の再生骨材について試験を行い, 本実験においては 5-10mm の再生粗骨材を再生粗骨材小, 10-15mm の再生粗骨材を再生粗骨材大として扱った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

各配合コンクリートの材齢 28 日および 91 日における圧縮強度を図-1に示す。本研究では対象構造物をコンクリート擁壁に想定し, 材齢 28 日における目標強度を 21N/mm² とした。図-1によると, 普通コンクリート配合およびフライアッシュを混和した再生コンクリート配合については目標強度に達しており, RS および RL についても目標強度にほぼ達している。フライアッシュを混和した配合の強度が全体的に大きく, フライアッシュを混和した再生コンクリート配合 (RFL) については空練りによる強度向上が見られる。これは, 骨材の空練りによって骨材表面の中性化した脆弱な付着モルタル上層部が剥がれ落ち, 露出した付着モルタル中の水酸化カルシウムとフライアッシュが比較的早期に反応することによって, 再生骨材界面にポゾラン反応相が形成されたことが強度向上に寄与したものと推定される。

一方, フライアッシュ無混和の再生コンクリート (RFS) については空練り実施による強度向上効果が得られず, 長期強度は空練りを行っていない RS の方が大きい傾向を示した。これは, 空練り処理によって生成した微粒分の混入が, コンクリートの強度増進を阻害したものと考えられる。

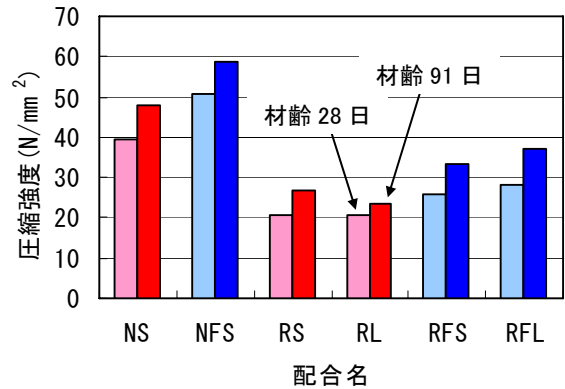


図-1 圧縮強度

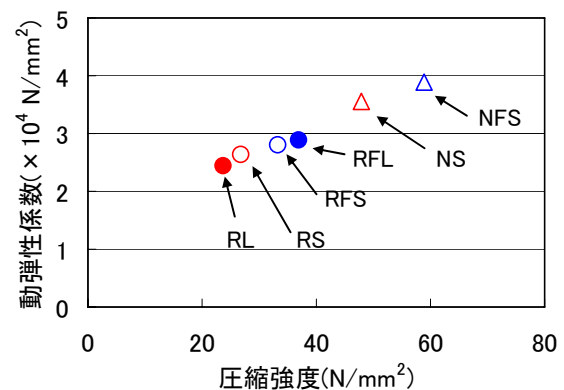


図-2 圧縮強度および動弾性係数の相関関係

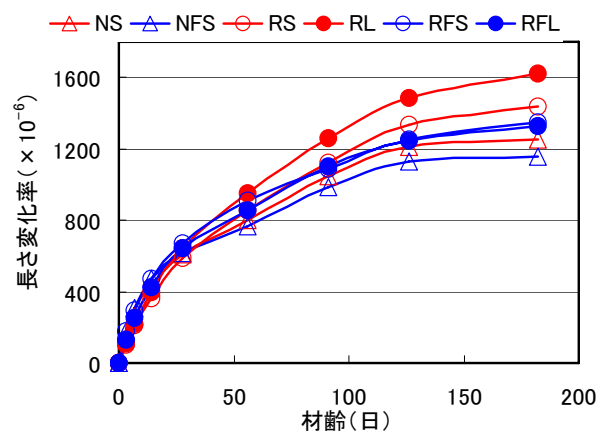


図-3 長さ変化率

材齢 91 日における圧縮強度および動弾性係数の関係を図-2に示す。図-2から骨材種類に関わらず, 動弾性係数が大きい配合は圧縮強度も大きくなり, 両者の間に相関関係がみられることが分かる。

3.2 長さ変化率

各配合供試体の長さ変化を図-3に示す。RL は測定日数 56 日から 91 日にかけて土木学会コンクリート標準示

方書の上限值である 1200μ を超えており、前述した微粒子の影響で乾燥収縮も大きくなった可能性がある。しかし、本実験では、再生コンクリートと普通コンクリートの乾燥収縮量に大きな差は見られなかった。また、フライアッシュ混和配合は全体的に収縮が抑制され、空練りを行った配合は特にその効果が大きくなっている。これは、圧縮強度と同様に空練り処理の効果によるものと考えられる。

3.3 再生骨材の凍結融解

空練りの有無が再生骨材の凍結融解試験を行ったときの粗粒率の変化に与える影響を図-4に示す。図-4によると、再生粗骨材大は空練りを行うことで試験前の粗粒率が小さくなっている。これは、空練りによる付着モルタルの除去によって平均粒径が小さくなったためと考えられる。また、一部の粗骨材がすりもみ作用によって割れたことも粗粒率低下の一因と考えられる。一方で、再生粗骨材小は空練りによって粗粒率が大きくなっていることから、空練り時のすりもみ作用を受けて割れた粗骨材が混入したものと考えられる。

試験を行った結果、図-4から分かるように、再生粗骨材大は空練りを行うことで凍結融解試験後の粗粒率の変化が小さくなっているのに対し、再生粗骨材小は空練りの有無に関わらず粗粒率の変化が大きいがわかる。骨材または付着モルタル層が水分を吸収し、吸収した水分が凍結によって体積膨張を起し、さらに凍結融解作用を繰り返すことで骨材が徐々に劣化するものと考えられる。本実験結果より、空練りを行うことで再生粗骨材大は空練りなしの骨材に比べて粗粒率の変化が抑制でき、骨材品質が改善できたと言える。

3.4 コンクリートの凍結融解 (B法)

各配合コンクリートの凍結融解試験結果を図-5に示す。再生コンクリートにフライアッシュを混和した配合は100サイクル以降低下傾向を示しており、160サイクル以降はJISに示す基準値である60%を下回る結果となった。180サイクル終了時のRFL供試体の様子を写真-1に示す。写真-1から、供試体表面に剥離はみられないものの、亀甲上のひび割れから端部が破壊していることが分かる。その他の配合については再生コンクリート配合の相対動弾性係数が徐々に低下傾向を示しているものの、概ね普通コンクリートと同様の値で推移している。本実験においては、フライアッシュを混和した再生コンクリート配合の空気量を確保できなかったことが凍結融解抵抗性低下の卓越要因になったと言える。

3.5 全Cl⁻濃度分布

塩水噴霧供試体の表面から10mm幅でコンクリートをスライスし、各配合のコンクリート中の全Cl⁻濃度分布を測定した結果を図-6に示す。図-6より、フライアッ

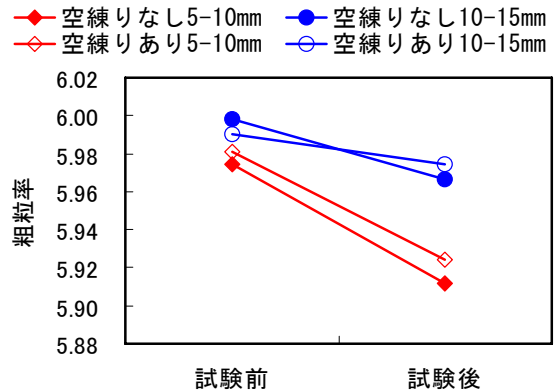


図-4 再生骨材の凍結融解に伴う粗粒率の変化

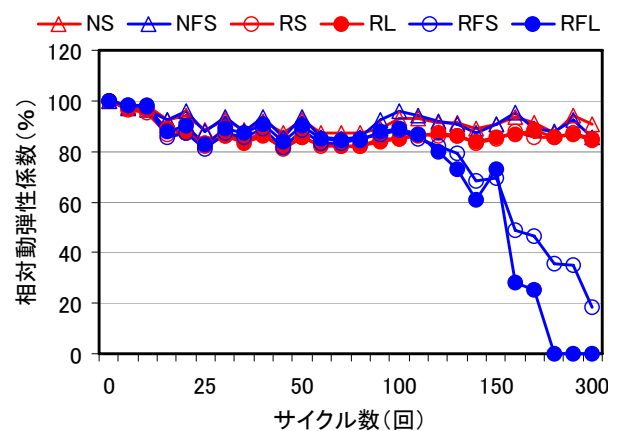


図-5 凍結融解試験時の相対動弾性係数経時変化



写真-1 凍結融解 180 サイクル終了後の RFL 供試体

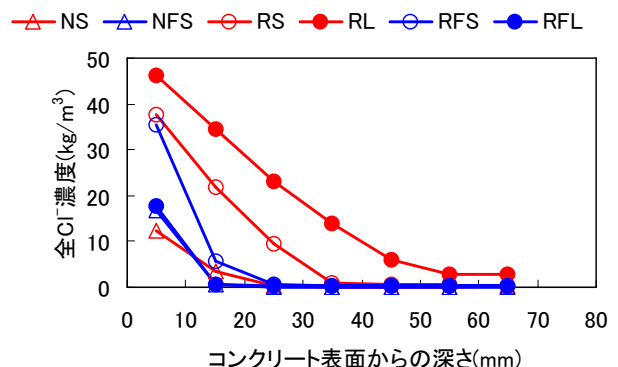


図-6 塩水噴霧供試体のコンクリート中 Cl⁻濃度分布

無混和の再生コンクリート中の全 Cl濃度が最も大きく、浸透深さも大きくなっている。これに対して、フライアッシュを混和した配合はコンクリートの表層部分でClの浸透を顕著に抑制している。フライアッシュ無混和の普通コンクリートにおいても Clの浸透深さおよび浸透量が小さいことから、再生骨材は普通骨材よりも骨材界面からの塩分浸透量が大きかったものと思われる。

空練りを行った場合は、フライアッシュ無混和の供試体ではClの浸透が大きくなったのに対して、フライアッシュを混和した場合には大幅な Cl浸透抑制効果がみられた。

3.6 塩水噴霧供試体中の鉄筋腐食に関する

電気化学的指標

(1)自然電位

自然電位は鉄筋が腐食することによって変化する鉄筋表面の電位から鋼材腐食を診断しようとする電気化学的手法である。コンクリート中鉄筋の自然電位経時変化を図-7に示す。塩水噴霧期間中は乾湿繰返しの影響で全配合において電位の変動が大きいものの、湿空環境に移動してからは値が安定し、フライアッシュ無混和の再生コンクリートについては空練りの有無に関係なく卑な電位を示している。ASTM C876の腐食判定基準およびClの浸透状況から、フライアッシュ無混和の再生コンクリートについては鉄筋腐食が進行している可能性が高い。一方で、フライアッシュを混和した再生コンクリート配合については普通コンクリートと同程度の値を示していることから、フライアッシュ混和による防食効果が得られていると言える。

(2)分極抵抗

分極抵抗はコンクリート中の鋼材の腐食速度を推定する指標である。各供試体中鉄筋の分極抵抗経時変化を図-8に示す。これより、フライアッシュを混和した普通コンクリートの分極抵抗値が他の場合よりも顕著に大きくなっている。また、再生コンクリート配合についてもフライアッシュを混和したコンクリートの分極抵抗値が大きいことから、フライアッシュの混和によって鉄筋腐食速度が抑制されていると言える。さらに、再生コンクリート配合については RFL の値が最も大きいことから、空練り再生コンクリートはフライアッシュを混和することで鉄筋腐食速度抑制効果が得られる可能性がある。このような傾向は、図-6に示した Cl濃度分布および図-7に示した自然電位の経時変化の傾向とよく整合している。

(3)コンクリート抵抗

コンクリート抵抗の経時変化を図-9に示す。これによると、フライアッシュを混和した配合の抵抗値が全体的に大きい傾向を示している。一方で、フライアッシュ

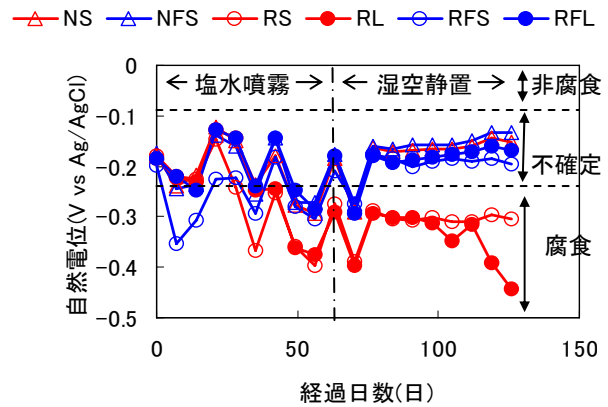


図-7 自然電位の経時変化

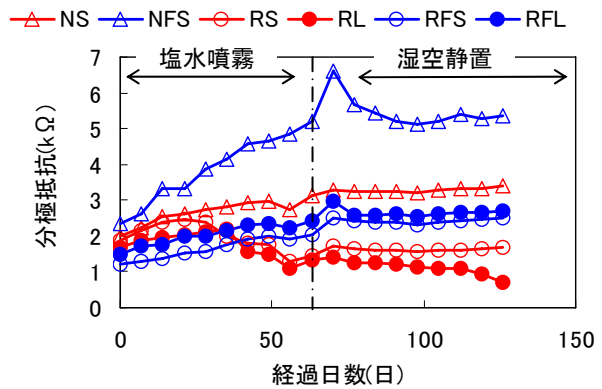


図-8 分極抵抗の経時変化

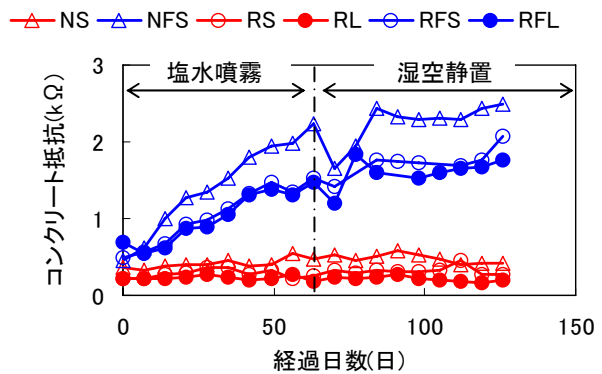


図-9 コンクリート抵抗の経時変化

無混和の配合については骨材の種類に関係なく抵抗値が小さい傾向を示していることから、コンクリート抵抗は骨材品質よりフライアッシュ混和による影響を受けやすいことが考えられる。また、塩水噴霧期間から湿空養生へ環境を変えてから、徐々に値が上昇していることから、フライアッシュを混和することで、ポゾラン反応の進展により、コンクリート内部の組織が緻密化するこ

とによって抵抗値が向上したものと考えられる。さらに、本研究においてはセメント量を確保し、細骨材代替でフライアッシュを混和したことから、その影響がより顕著にみられているものと考えられる。

4. まとめ

本研究結果をまとめると以下ようになる。

(1) 使用骨材に空練りという簡易的な処理を施すことで、粗骨材の密度を大きく、吸水率を小さくすることができた。一方で、細骨材については骨材から剥がれ落ちた付着モルタルが混入することによって骨材品質が若干低下した。

(2) 本実験で作成した再生コンクリートは、材齢 28 日における圧縮強度が概ね目標強度 21N/mm^2 以上となった。さらにフライアッシュを外割混和することで強度が向上した。材齢 91 日における強度と動弾性係数を比較すると、動弾性係数が大きいものほど高い強度を示した。

(3) 空練りを行った骨材を用いたフライアッシュ無混和の再生コンクリート配合 (RL) の乾燥収縮は、測定日数 91 日において 1200μ に達した。ただし、その他の再生コンクリートは普通コンクリートとほぼ同程度の収縮量となり、フライアッシュを混和した配合については若干の収縮低減効果がみられた。

(4) 空気量が小さくなったフライアッシュ混和再生コンクリートの凍結融解抵抗性は小さくなった。一方で、空気量を確保できたフライアッシュ無混和再生コンクリートについては空練りの有無に関わらず、普通コンクリートと同程度の凍結融解抵抗性を示した。

(5) フライアッシュを混和したコンクリートは全体的に CI 浸透に対する抵抗性が高く、特に空練り再生骨材を用いたコンクリートはフライアッシュを混和することで CI の浸透が顕著に抑制された。また、電気化学的鉄筋腐食指標からも、フライアッシュ混和による防食効果が確認された。

謝辞

本研究の実験進行に関して、徳島大学大学院 小栗晶子氏、化学分析に関して、電気化学工業 (株) 七澤章氏に協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

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) 土木学会：資源有効利用の現状と課題，コンクリートライブラリー No. 96, p. 90, p. 101, pp. 102-104, 1999
- 3) 片平博，渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.1351-1356, 2005
- 4) 片平博，渡辺博志：再生骨材の耐凍害性評価手法の研究，コンクリート工学論文集，第 21 巻第 1 号，pp.25-33, 2010.1