

論文 再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性状に関する研究

佐川 康貴^{*1}・松下 博通^{*2}・川端 雄一郎^{*3}

要旨：筆者らは再生骨材を使用したコンクリートの強度低下の原因は細孔構造の粗大化であり、強度は 50nm～2μm の空隙量に依存することを明らかにしている。再生骨材を普通強度のコンクリートへ適用するには、さらに耐久性の低下メカニズムを明らかにする必要がある。そこで、本研究では再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性状について検討した。その結果、再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性状は再生細骨材の使用の影響を大きく受けることを明らかにし、その原因は強度の場合と同様に細孔構造の粗大化であることを示した。

キーワード：再生コンクリート, 中酸化, 塩分浸透, 細孔構造

1. はじめに

2000年に制定された TR A 0006「再生骨材を用いたコンクリート」では、再生コンクリートは、高い強度や高い耐久性を要求されない部位に限定するのが望ましい、とされており、基本的に再生骨材は呼び強度 12（特注品では呼び強度 18 以下）という低強度コンクリートへの利用に制限されている。しかし、1970年代の高度経済成長期に製造された大量のコンクリート構造物が今後寿命を迎え、コンクリート塊の発生量が加速度的に増大することが予想されており、再生骨材の普通強度コンクリートへの適用について検討する必要がある。そのためには、再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性状について検討を行う必要がある。

筆者らはこれまでに再生コンクリートの強度低下は、再生骨材から水分が滲出することによりセメントペーストの細孔構造がポーラスになるためであることを明らかにした¹⁾。また、麓らは吸水率の大きな再生細骨材を使用したコンクリートの強度や中酸化性状は、骨材の吸水率との相関が高く、単位水量と骨材の総吸水量の和と単位セメント量との質量比 (C/TW) と相関が高いと報告している²⁾。これらのことを考慮すると、再生コンクリートの細孔構造の粗大化は中

酸化及び塩分浸透性状についても影響を及ぼしているものと考えられる。

そこで、本研究は再生コンクリートの中酸化及び塩分浸透性状について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 再生骨材

本研究で使用した再生骨材は材齢 6 ヶ月のプレストレストコンクリート版をブレーカで 250mm 程度に粗砕後、インパクトクラッシャを 1 回通過させたもの全量を試料とした。原コンクリートの示方配合を表 1 に示す。原コンクリートは粗骨材の最大寸法 20mm, 目標スランプ 6.5±1.5cm, 目標空気量 4.5±1.5% であり、原コンクリートから採取したコア供試体 (φ 10×20cm) より再生骨材製造時における圧縮強度及び静弾性係数を求めたところ、それぞれ 42.2N/mm², 30.5kN/mm² であった。

本研究で使用した再生骨材の物理的性質をそれぞれ表 2 に示す。表中のモルタル付着率及びペースト付着率は、7 倍希釈 (約 5%) の塩酸に再生骨材を浸漬した後、水洗いの際に 5mm ふるいを通過したものの割合をモルタル付着率、0.075mm ふるいを通過したものの割合をペースト付着率として表したものである。また、比較

*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助手 修士 (工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

対象として海砂（絶乾密度 2.47g/cm³，吸水率 2.70%）と碎石（絶乾密度 2.88g/cm³，吸水率 1.02%）を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートは水セメント比 50%で細骨材，粗骨材いずれかに再生骨材を使用したものと，細骨材，粗骨材ともに再生骨材を使用したもの，再生骨材を使用しない普通コンクリートの 4 通りである。コンクリートの配合は，目標スランブが 8±1cm，目標空気量 4.5±0.5%となるよう，単位水量を変化させて求めた。混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤をセメント質量に対して 0.25%一定の添加量とし，必要に応じてアルキルアリルスルホン酸系の空気連行剤を使用した。また，セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を使用した。配合を表 3 に示す。図中の括弧中の N は天然骨材，R は再生骨材を使用したことを示し，（細骨材の種類，粗骨材の種類）として表している。

2.3 供試体の作製及び養生

供試体は 10×10×40cm の角柱供試体を使用し，材齢 28 日まで水中養生を行った。その後，材齢 28～35 日に打設時に型枠側面に接していた 2 面以外の 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。

2.4 試験方法及び測定項目

(1) 圧縮強度及び静弾性係数試験

φ10×20cm の円柱供試体を用い，打設後 24 時間で脱型し，水温 20℃で所定の材齢まで水中養生を行った。材齢 7 日，28 日，91 日において圧縮強度試験及び静弾性係数をそれぞれ JIS A 1108，JIS A 1149 に準じて測定した。

(2) 促進中性化試験

促進中性化試験は，材齢 35 日より温度 30℃，相対湿度 60%，CO₂ 濃度 5%の環境下で行った。中性化深さは，フェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧して未着色の部分とした。

(3) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は，材齢 35 日から温度 20℃，NaCl 濃度 10%の塩水に浸漬した。塩分浸透深さは 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し，白色に呈色した部分とした。また，JIS A 1154 に準じて塩化物イオン濃度を測定した。

(4) 細孔径分布

中性化による硬化体組織の変化を調べるため，水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定した。コンクリートからカッターで切り出した後，5mm 角の立方体状の試料片をアセトンにより水和を停止させ，真空乾燥を行った後に 3 度測定を行った。測定試料は各配合について供試体表面から 0～5mm 部分と 45～50mm の部分の全 8 要因とした。

表 1 原コンクリートの示方配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE 減水剤
40.7	41	171	420	674	1124	2.52

表 2 再生骨材の物理的性質

	再生細骨材	再生粗骨材
絶乾密度 (g/cm ³)	2.00	2.47
吸水率 (%)	11.05	5.12
単位容積質量 (kg/l)	1.46	1.40
実積率(%)	69.9	56.6
400kN破砕値	-	19
モルタル付着率 (%)	-	44.1
ペースト付着率(%)	37.7	21.5

表 3 コンクリートの示方配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G		
					海砂	再生骨材	碎石	再生骨材	
(N,N)	50	46	175	350	797	0	1050	0	1.09
(N,R)		44	177	355	773	0	0	938	1.11
(R,N)		45	181	361	0	621	1106	0	1.13
(R,R)		43	178	356	0	653	0	974	1.11

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度及び静弾性係数

図-1に再生骨材の置換方法を変化させたコンクリートの材齢7, 28, 91日における圧縮強度を示す。普通コンクリートと比較して再生コンクリートの強度が低下しており、再生コンクリートは長期材齢における強度の伸びが小さいことが分かる。また、強度低下は再生細骨材の影響が大きい傾向となった。次に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2に示す。なお、表-4に示す通り、各供試体の単位体積質量は2.2~2.4t/m³と異なるため、図-2中には単位容積質量を考慮した建築学会式による予測式を破線で示している³⁾。図より、圧縮強度が大きいほど静弾性係数も大きいこと、また、同一強度で比較した場合、(R,R)が最も静弾性係数が小さくなっている。さらに、(N,R)と(R,N)を比較すると、単位容積質量が同程度であるにも関わらず、後者の方が静弾性係数が小さくなっている。以上より、再生細骨材の使用によりコンクリートの静弾性係数の低下が大きくなることが示された。

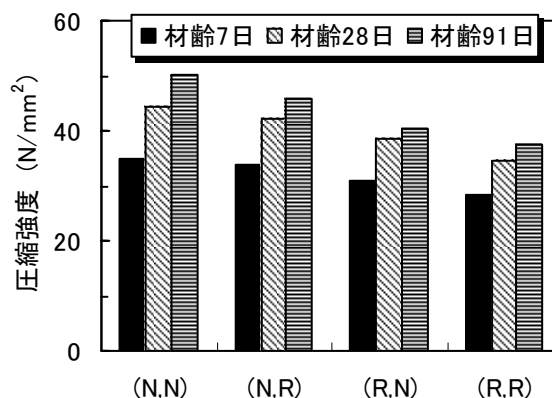


図-1 再生コンクリートの圧縮強度

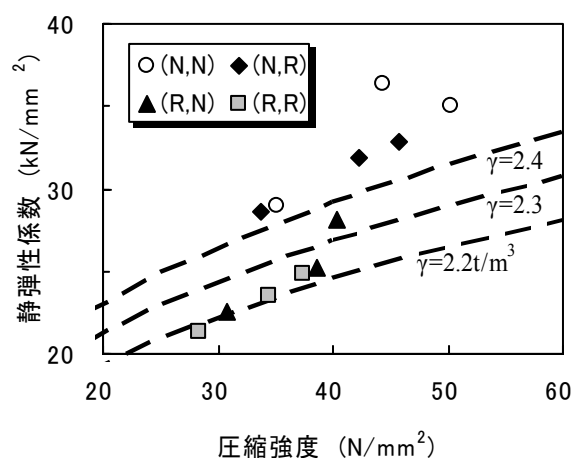


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-4 再生コンクリートの単位容積質量

	単位容積質量(t/m ³)		
	材齢7日	材齢28日	材齢91日
(N,N)	2.39	2.42	2.40
(N,R)	2.29	2.30	2.28
(R,N)	2.34	2.34	2.33
(R,R)	2.19	2.20	2.20

本研究で使用した再生骨材は吸水率が大きいことから、骨材の吸水量がコンクリートの強度に影響を及ぼしていると考えられる。(N,N)と(R,R)を比較すると、(R,R)は(N,N)より全水量が約93kg/m³多い。このことから、麓らにより提案されたセメント総水量比の概念²⁾を導入した。コンクリート中の総水量と単位セメント量の比であるセメント総水量比 C/TW と圧縮強度の関係を図-3に示す。図より、各材齢においてセメント単位総水量比と圧縮強度には相関関係が認められる。これは、再生骨材中の水分がセメントペーストに滲出し、硬化体組織がポラスになったためであると考えられる。

3.2 促進中性化試験結果

(1) 再生コンクリートの中性化

図-4に再生骨材の置換方法を変化させたコンクリートの中性化深さの経時変化を示す。(N,N)と(N,R)は中性化深さの経時変化がほとんど

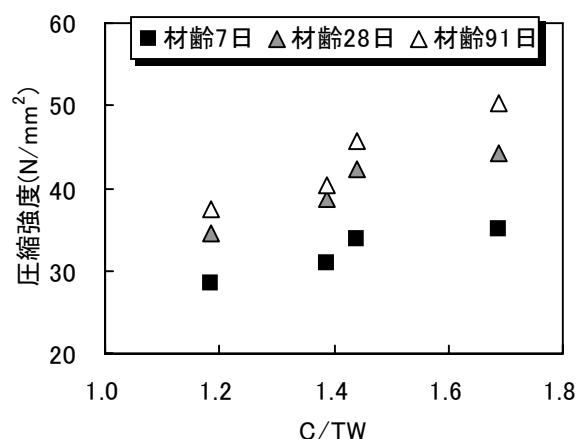


図-3 C/TW と圧縮強度の関係

ど同様であるのに対し、再生細骨材を使用した(R,N)と(R,R)の中性化深さが(N,N)の約2倍となっている。この傾向は既往の研究と一致している⁴⁾。以上から、再生細骨材の使用が中性化に及ぼす影響が大きいことが分かる。なお、各材齢において測定した20点のデータから求めた標準偏差は約2mm以下であり、再生骨材の使用によるばらつきの程度の差は認められなかった。

次に、セメント総水量比 C/TW と中性化速度係数の関係を図-5に示す。図より、再生コンクリートの中性化速度係数はコンクリート中の総水量が増加するに従い、大きくなる傾向にある。麓らは数種類の再生細骨材を使用したコンクリートの C/TW と中性化深さに相関関係があるとしている²⁾。しかし、(N,R)と(R,N)の C/TW はあまり変わらないのに対して中性化速度係数は大きく異なっていることが分かる。このことから、再生コンクリートの中性化については、C/TW のみでは十分には説明できないものと考えられ、再生細骨材と再生粗骨材の水分滲出挙動は異なるものと考えられる。

(2) 再生コンクリートの細孔容積

図-6に中性化測定材齢26週後のコンクリート中の総細孔容積を示す。図を見ると、細孔直径が200nm以上の量はほとんど変化が無いのに対して、200nm以下において使用骨材による差が生じていることが分かる。特に再生細骨材を使用した(R,N)と(R,R)の総細孔容積が大きい。これは、上述したように再生細骨材の水分がセメ

ントペースト部に滲出することで硬化体組織がポーラスになったためと考えられる。また、各要因の中性化領域である0~5mm部と未中性化部の45~50mm部を比較すると、中性化により硬化体組織が緻密になっていることが分かる。これは、普通コンクリートと同様の傾向であり、炭酸化の際の体積膨張によるものである⁵⁾。

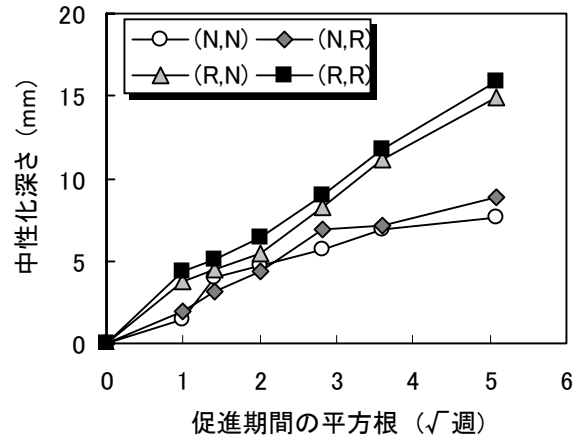


図-4 中性化深さの経時変化

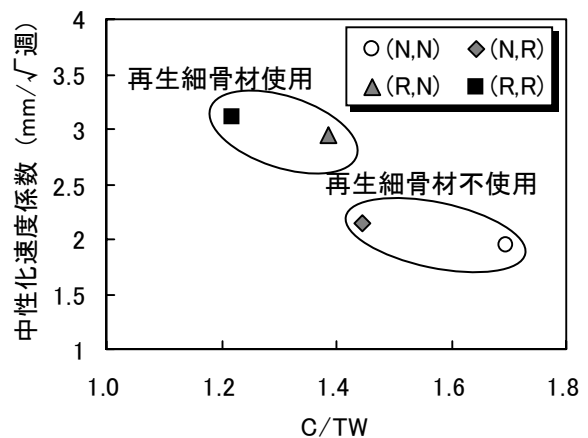


図-5 C/TW と中性化速度係数の関係

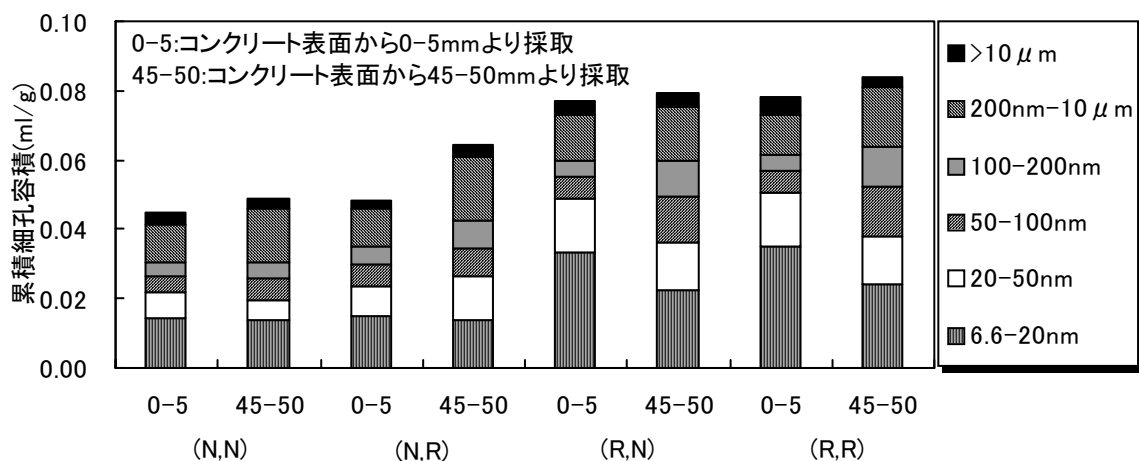


図-6 中性化促進材齢26週における再生コンクリートの細孔容積

3.3 塩水浸漬試験結果

図-7に再生骨材の置換方法を変化させたコンクリートの塩分浸透深さの経時変化を示す。再生コンクリートの塩分浸透性状についても中性化と同様、(N,N)と(N,R)は塩分浸透深さの経時変化がほとんど同様であるのに対し、再生細骨材を使用した(R,N)と(R,R)の塩分浸透深さが(N,N)よりも大きくなっていることが分かる。このことから、塩分浸透性状についても再生細骨材の影響が大きいことが分かる。なお、中性化と同様に、測定した20点のデータから求めた標準偏差は2mm以下であり、再生骨材使用によるばらつき程度の差は認められなかった。

次に、セメント総水量比 C/TW と塩分浸透深さの関係を図-8に示す。図より、試験開始後材齢26週における再生コンクリートの塩分浸透深さはコンクリート中の総水量が増加するに従い、小さくなる傾向にある。この傾向についても、上述したようにコンクリートの細孔構造の粗大化によるものと考えられる。

図-9に試験開始後26週における再生骨材の置換方法を変化させたコンクリートの全塩化物イオン濃度を示す。天然骨材コンクリートと比較して再生骨材を使用したコンクリートはコンクリート表面の全塩化物イオン濃度が高いことが分かる。しかし、(N,R)については10~20mmから全塩化物イオン濃度が(N,N)と同様になっており、図-7の塩分浸透深さと一致する。また、(R,N)、(R,R)は表面から内部にかけて全塩化物イオン濃度が高く、再生細骨材を使用したコンクリートの塩分浸透抵抗性が低いことが分かる。

再生骨材は骨材に付着ペースト等が存在するため、塩分の固定化にも影響を及ぼすものと考えられる。そこで、全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の関係について検討した。なお、骨材に付着したペーストの固定化性状は炭酸化による影響を受けるものと考えられるが、本研究で使用した再生骨材には炭酸化は見られなかった。また、再生骨材中に塩化物は含有されていなかった。図-10に試験開始後26週にお

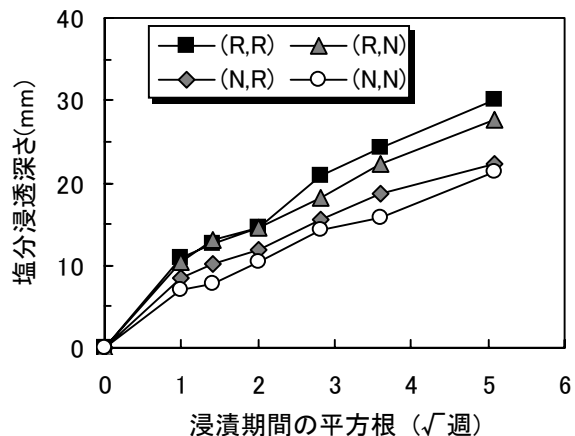


図-7 塩分浸透深さの経時変化

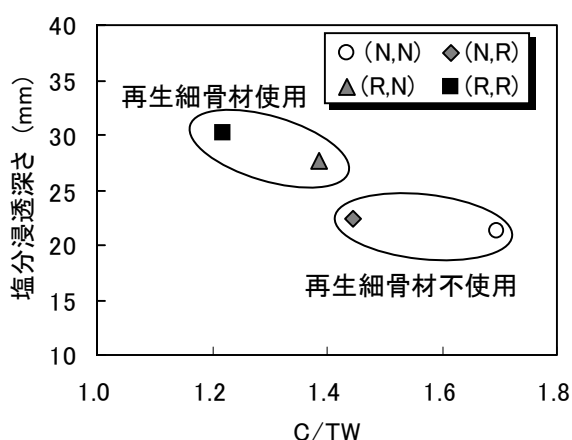


図-8 C/TW と塩分浸透深さの関係

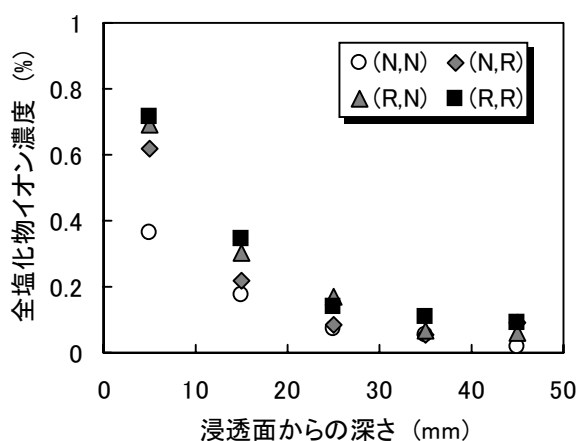


図-9 試験開始後26週における塩化物イオン濃度

ける全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の関係を示す。再生骨材の使用の有無に関わらず、コンクリートの全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の関係には相関関係が見られた。このことから、再生骨材の付着ペー

ストは塩分の固定化にはほとんど寄与せず、示方配合における単位セメント量に依存すると言える。よって、再生コンクリートにおける塩分浸透性状は硬化体組織のポーラス化に起因した塩分の拡散による影響が卓越しており、再生骨材の付着ペーストによる塩分の固定化は期待できないものと考えられる。

3.4 細孔構造と強度及び物質透過性の関係

以上から、再生コンクリートの強度や中性化及び塩分浸透性状の低下原因について以下のように考えることが出来る。再生骨材を表乾状態で使用した場合、骨材の含有する水分がセメントペースト部に滲出することにより硬化体組織がポーラスになり、強度の低下や、劣化因子の侵入を容易にするものと考えられる。大即らはビッカース硬さにより再生コンクリート中の境界相を把握し、再生コンクリートの物質透過性は境界相のビッカース硬さと相関関係があることを示している⁹⁾。この境界相は、本研究における再生骨材から滲出した水分によりポーラスになった粗大な空隙領域に相当するものと考えられる。よって、再生コンクリートの細孔構造を緻密化させることが強度及び耐久性を向上させる対策の一つになるものと考えられる。

4. 結論

本研究は、再生骨材を使用したコンクリートの中性化及び塩分浸透性状について検討を行った。本研究で使用した再生骨材に対して得られた知見を以下に示す。

- (1) 再生コンクリートの圧縮強度や中性化及び塩分浸透性状は天然骨材を使用したコンクリートに比べて低下する。また、その低下割合は再生細骨材の影響が大きい。
- (2) 再生コンクリートの圧縮強度や中性化及び塩分浸透性状は、単位水量と骨材の吸水率の和と単位セメント量の質量比であるセメント総水量比とある程度の相関関係がある。
- (3) 再生骨材に付着するペーストは、塩分の固定化にはほとんど寄与しない。

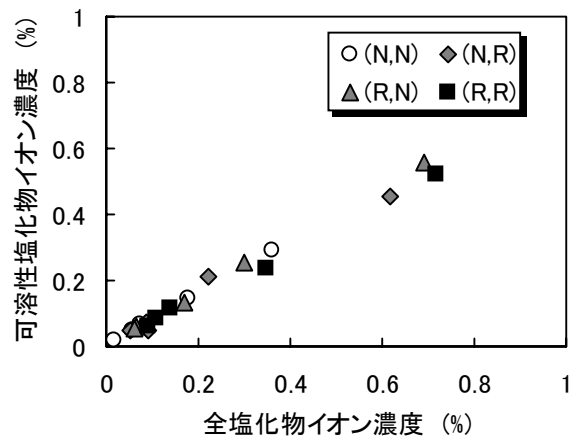


図-10 全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の関係

- (4) 再生コンクリートの中性化及び塩分浸透性状の低下原因は、吸水率の高い再生骨材から水分が滲出することにより硬化体組織がポーラスになり、劣化因子の侵入を容易にしたためである。

参考文献

- 1) 川端雄一郎ほか：再生モルタルの細孔構造と強度の関係, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, pp.375-376, 2004
- 2) 麓隆行, 山田優：再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について, 土木学会論文集, Vol.64, No.767, pp.61-73, 2004
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説鉄筋コンクリート工事, p.170, 2003
- 4) 中本純次ほか：再生骨材の品質がコンクリートの諸特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, pp.1129-1134, 1998
- 5) 佐伯竜彦ほか：中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, Vol.13, No.420, pp.99-108, 1990
- 6) 大即信明ほか：再生骨材コンクリートの物質透過性および強度の評価とその結果に基づく改善方法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.1-12, 2001