

論文 再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造および強度・中性化に関する研究

石橋 昌史^{*1}・松下 博通^{*2}・佐川 康貴^{*3}・川端 雄一郎^{*4}

要旨: 本研究は、再生細骨材と新セメントペースト間に存在する遷移帯の細孔構造に着目し、再生細骨材の使用がモルタルの強度及び中性化抵抗性に与える影響について検討したものである。その結果、吸水率の高い再生細骨材ほど、強度が低下し、中性化速度係数が大きくなること、両者は単位水量に骨材の含水量を加味することにより評価できることを示した。さらに、再生細骨材を用いた場合には、新セメントペースト部の細孔量、特に 50nm~2 μ m の量が多くなること、また、強度および中性化速度係数と相関があることを明らかにした。

キーワード: 再生細骨材, 吸水率, 細孔構造, 圧縮強度, 中性化抵抗性, 遷移帯

1. はじめに

近年、国内では循環型社会形成に向けた取り組みが行われている。このような社会情勢の中、コンクリート塊のリサイクルに対する動向も活発化している。しかしながら現状では、コンクリート塊の再利用分の多くは、道路用路盤材や埋め戻し材などとして使用されているに過ぎない。今後、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更新時期を迎え、コンクリート塊の増加、さらには最終処分場の急速な容量不足などが懸念される。

また、西日本地域においては、海砂の採取規制が進んでおり、現在のように高い強度や高い耐久性を要求されない部材や部位に対してのみ再生コンクリートを使用しているだけでは、用途が限定され、有効利用が実現できない。したがって、大量のコンクリート塊を有効利用するためには、再生骨材の利用範囲を拡大し、再生骨材を普通強度領域のコンクリート構造物にも利用していく必要がある。

再生骨材はコンクリート構造物を解体したコンクリート塊を破碎、分級して製造する。これ

までに再生骨材をコンクリート用骨材として用いた研究は多数行われており、再生コンクリートの強度および耐久性は低下し、その低下の程度は再生細骨材の使用による影響が大きい¹⁾とする研究結果が多く見られる。しかしながら、強度および耐久性の低下メカニズムについて検討した研究事例は少ない。

一般的に、コンクリートの強度は骨材とセメントペーストの界面部分に存在する遷移帯に依存する。遷移帯は粗大な空隙に富む不連続な領域で、硬化コンクリートの強度および物質透過性に大きな影響を及ぼす²⁾。再生コンクリートの細孔構造は普通コンクリートと比べポーラスであると考えられることから、再生コンクリートの強度・耐久性がセメントペースト部の細孔構造に大きな影響を受けるものと考えられる。

本研究では、3種類の細骨材を用い、モルタルの強度および耐久性に及ぼす再生骨材使用の影響について、細骨材に新たに付着するセメントペースト部の 50nm~2 μ m の細孔容積に着目し、モルタルの圧縮強度および中性化に及ぼす影響について検討した。

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (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 工学研究院建設デザイン部門 助手 修士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3220\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。また，本研究では再生細骨材の使用がモルタルの性状に及ぼす影響を検討するため，RP と RI の 2 種類の再生細骨材と海砂（N）を表乾状態で使用した。表-1 に本研究で使用した細骨材の物理的性質を示す。

2.2 再生細骨材の製造方法

再生細骨材 RP は廃コンクリート電柱（水セメント比 30~35%程度）を原コンクリートとしたものであり，その製造方法は，破碎重機により一次破碎した後，インパクトクラッシャで二次破碎し，粒度調整したものである。また，再生細骨材 RI は，材齢 6 ヶ月の PC 版（水セメント比 41%，圧縮強度 42.4N/mm^2 ，静弾性係数 30.3kN/mm^2 ）をブレーカで 250mm 程度に一次破碎，インパクトクラッシャで二次破碎を行ったものであり，5mm ふるい通過分を全量用いた。

図-1 に 3 種類の細骨材の細孔径分布測定結果を示す。再生細骨材の細孔容積は海砂と比較して大きく，また，2 種類の再生細骨材のうち吸水率の高い RI の方が細孔容積が大きくなった。

2.2 配合および供試体の作製

モルタルの配合は水セメント比 $W/C=0.4, 0.5, 0.6$ とし，砂セメント比 $S/C=3$ で一定とした。配合名は，使用した骨材の種類および W/C の組み合わせで表す。すなわち，RI50 は骨材 RI を使用し， $W/C=0.5$ の配合である。

供試体は強度試験および細孔径分布測定用に $40\times 40\times 160\text{mm}$ の角柱供試体を，促進中性化試験用に $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。供試体は打設後 24 時間で脱型し，所定の材齢まで温度 20°C にて水中養生した。

2.3 曲げ強度および圧縮強度試験

JIS A 5201 に準じて，材齢 7，28，91 日に曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

2.4 促進中性化試験

供試体は脱型後，温度 20°C 中で材齢 28 日まで

表-1 細骨材の物理的性質

記号	細骨材	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	原コンクリート
N	海砂	2.55	2.70	—
RP	再生細骨材	2.47	6.05	廃コンクリート電柱
RI	再生細骨材	2.00	11.05	PC版

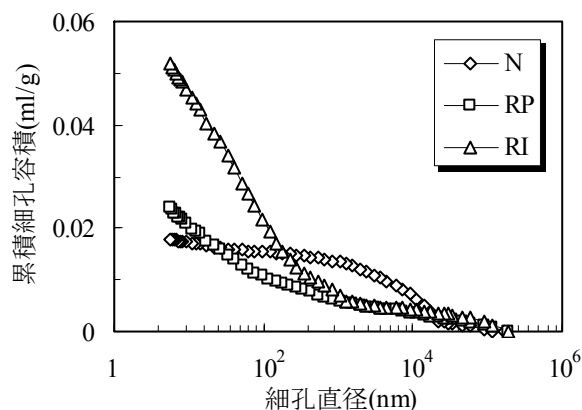


図-1 細骨材の細孔径分布

水中養生した。その後，温度 20°C ，湿度 60% R.H. の恒温恒湿室に 7 日間静置した。また，その間に打設時の側面を除く 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。促進環境は JIS A 1153 に示される，温度 20°C ，湿度 60%R.H.，二酸化炭素濃度 5%の環境下で行った。

中性化深さの測定は，供試体を試験装置から取り出し，5cm の厚さに割裂した後，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を中心に中性化部として中性化深さの測定を行った。なお，測定は促進期間 2，4，8，13 週に行った。

2.5 細孔径分布測定

細孔径分布測定用の供試体を，材齢 7，28，91 日において，コンクリートカッターにより供試体中心部の $20\times 20\times 140\text{mm}$ 部分を切り出し，約 5mm 角のモルタル片を採取して試料とした。試料はアセトンに浸漬させ水和を停止させた後，真空乾燥し水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-2に再生モルタルおよび海砂モルタルのセメント水比 C/W と圧縮強度の関係を示す。図より、細骨材の種類に関係なく、C/W と圧縮強度との間には右上がりの直線関係があるものの、再生モルタルの圧縮強度は海砂モルタルに比べ低下していることが分かる。吸水率が高い RI を用いた場合には、海砂を用いた場合に比べ 30～50%程度の強度低下となった。

一般的に、モルタルの強度はセメントペースト、細骨材および遷移帯の強度に支配されている。細骨材とセメントペースト間に存在する遷移帯は、空隙や不連続部分が散在する弱い組織となっており、供試体に荷重が加えられた場合には、遷移帯からひび割れが発生し破壊が伝播する。遷移帯の強度は細骨材の種類により異なることから、再生モルタルの強度低下の原因として、遷移帯の細孔構造の粗大化が影響しているものと考えられる。

3.2 促進中性化試験結果

図-3は、再生モルタルおよび海砂モルタルの中性化深さの経時変化を示したものである。再生モルタルは海砂モルタルに比べ中性化速度が大きく、中性化深さは促進期間の平方根に従い直線的に増加し、いわゆるルート t 則が成立する結果となった。

また、図-4は C/W と中性化速度係数の関係を示しているが、同一 C/W で比較すると再生細骨材を用いた場合、中性化速度係数が大きくなり、中性化抵抗性が低下していることが分かる。

3.3 総水量 TW^3 による評価

以上より、再生細骨材のように高い吸水率の細骨材を使用する場合、モルタルの圧縮強度および中性化抵抗性が低下することが明らかとなった。麓らは再生コンクリートの圧縮強度および耐久性は、単位セメント量 C と骨材の全含水量を考慮したコンクリート中の総水量 TW の比である C/TW と相関が強いことを明らかにしている³⁾。本研究では、モルタル中の総水量 TW を、

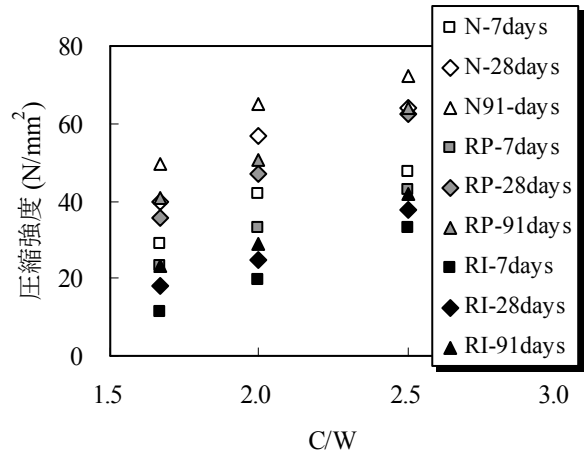


図-2 C/W と圧縮強度の関係

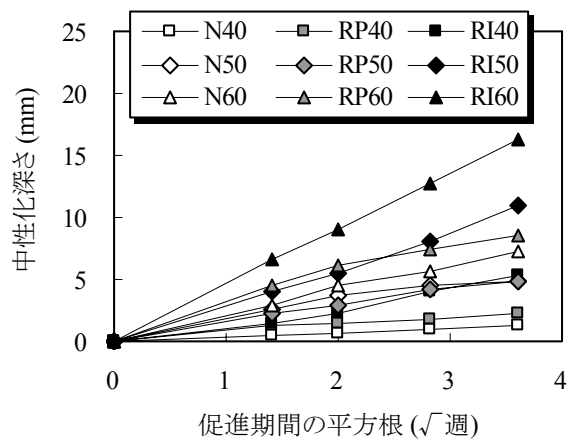


図-3 中性化深さの経時変化

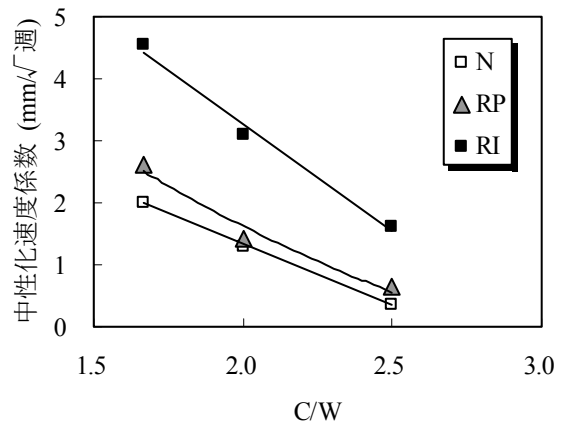


図-4 C/W と中性化速度係数の関係

下記の式(1)により求め、検討した。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s \quad (1)$$

ここに、TW: 総水量 (kg/m³)

W: 単位水量 (kg/m³)

s: 単位細骨材体積 (l/m³)

γ_{ds} : 細骨材絶乾密度 (kg/l)

w_s : 細骨材の吸水率 (%)

図-5に C/TW と圧縮強度の関係を示す。骨材中の全含水量を考慮した C/TW を導入することで、細骨材の種類に関係なく、モルタルの圧縮強度を統一的に評価できること、細骨材中に含まれている水分がモルタルの圧縮強度に影響を及ぼしていることが分かる。

図-6は C/TW と中性化速度係数の関係を示しているが、細骨材の種類に関わらず C/TW と中性化速度係数の間には直線的な関係が確認できる。これより、中性化に関しても細骨材中の水分が影響を及ぼしていることが分かる。

以上より、細骨材中に含まれる水分がセメントペースト部に移動し、細孔構造が粗になり、モルタルの強度および中性化抵抗性の低下が生じたものと考えられる。

3.4 再生モルタルの細孔構造

図-7に材齢28日における RI50, セメントペーストおよび再生細骨材 RI の細孔径分布測定結果を示す。図中のセメントペースト、再生骨材はそれぞれ別途に測定したものを再生モルタル中の質量割合に換算したものである。図より、セメントペーストでは 50nm 以上の径の細孔がほとんど存在しないのに対して、モルタルには 50nm~2 μ m の細孔が多く存在する。このような粗大な空隙は細骨材とセメントペーストの界面に多く存在し、モルタルの強度や物質透過性に大きく関与する^{2),4)}。

しかし、再生モルタルの場合は再生細骨材に付着している旧セメントペーストおよび旧モルタルにも同様の空隙が含まれていると考えられることから、下記の式(2)に従い、モルタルの細孔容積から細骨材中の細孔容積を差し引いて、細骨材と新たに付着する新セメントペースト部の間に存在する遷移帯の 50nm~2 μ m の細孔容積で評価を行った⁵⁾。

$$V_{itz} = V_m - V_a \times s \quad (2)$$

ここに、 V_{itz} : 新セメントペースト部の 50nm~2 μ m の細孔容積 (ml/g)

V_m : モルタルの 50nm~2 μ m の細孔容積 (ml/g)

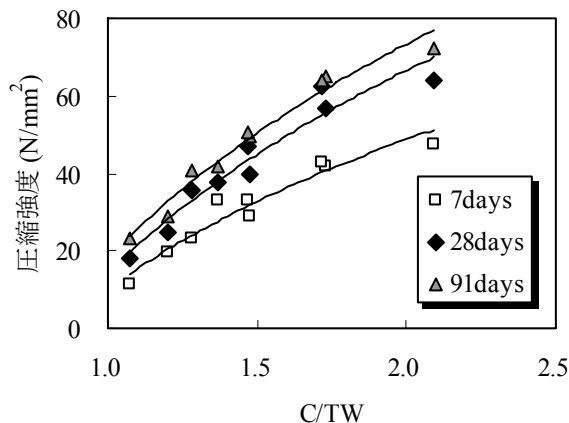


図-5 C/TW と圧縮強度の関係

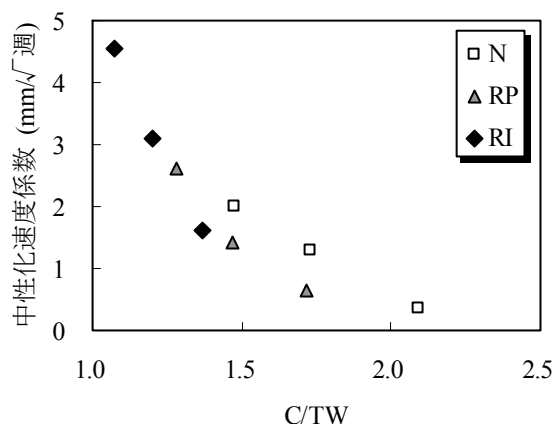


図-6 C/TW と中性化速度係数の関係

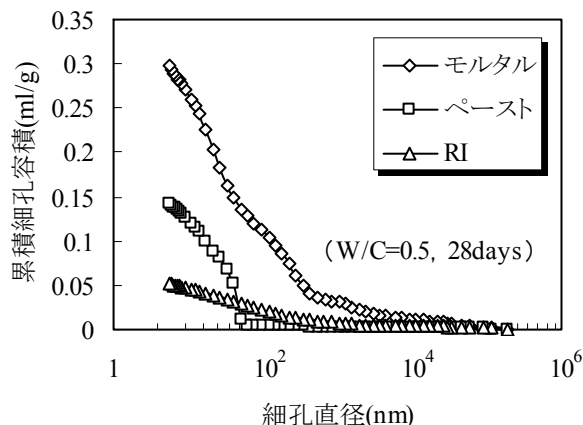


図-7 モルタル、ペーストおよび細骨材の細孔径分布(再生細骨材 RI)

V_a : 細骨材中の 50nm~2 μ m の細孔容積 (ml/g)

s : 単位細骨材体積 (m^3/m^3)

なお、以降の細孔径分布の測定結果は全てこのデータ処理を行った。

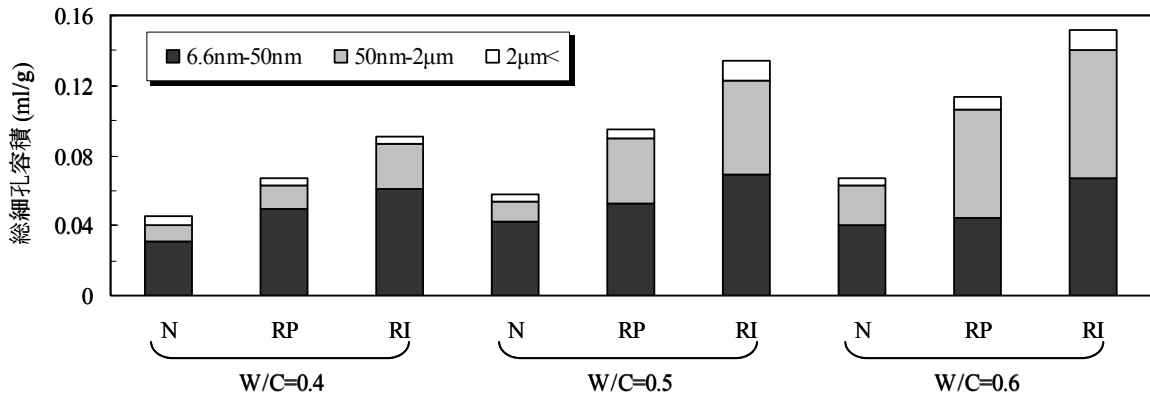


図-8 細孔容積測定結果(材齢 28 日)

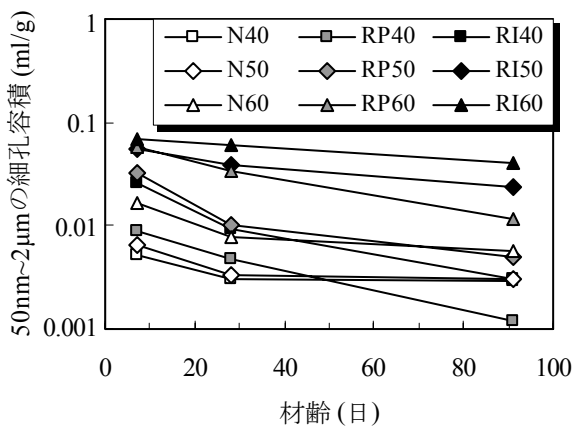


図-9 細孔容積の経時変化

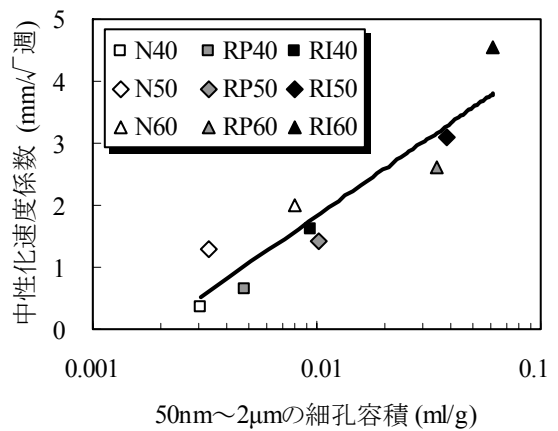


図-11 細孔容積と中性化速度係数の関係

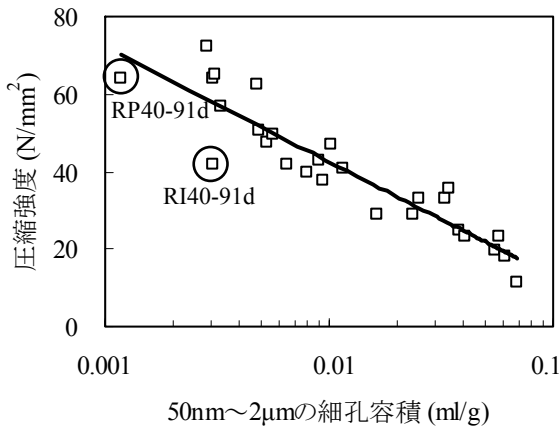


図-10 細孔容積と圧縮強度の関係

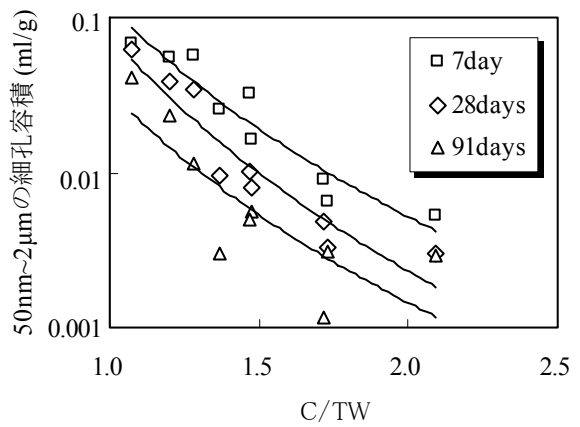


図-12 C/TW と細孔容積の関係

図-8に材齢28日における各W/Cの再生モルタルおよび海砂モルタルの細孔径分布測定結果を示す。W/C が大きいほど、また、細骨材の吸水率が大きいほど、総細孔容積は増加していることが分かる。さらに、遷移帯に多く存在し、モルタルの強度に大きく関与するとされる50nm～2µmの細孔容積が、W/Cが大きくなるほど、

細骨材の吸水率が大きくなるほど、増加していることが分かる。

よって、再生モルタルにおいて新セメントペースト部の実質的な水セメント比が増加していることを示唆される。また、細骨材中の水分が硬化過程で新セメントペースト部に滲出し、細孔構造をポーラスにしていると考えられる。

図-9に材齢に伴う50nm~2 μ mの細孔容積の変化を示す。材齢7日において再生モルタルの50nm~2 μ mの細孔容積は海砂モルタルよりも大きいことから、既に再生骨材中に含まれる水分が滲出し始めているものと考えられる。なお、細骨材の種類により、細孔容積の低下速度が異なっているが、その原因については今後の検討課題である。

3.5 50nm~2 μ mの細孔容積による評価

図-10は50nm~2 μ mの細孔容積の対数と圧縮強度の関係を示している。図より、細骨材の種類に関係なく50nm~2 μ mの細孔容積の増加に従いモルタルの圧縮強度が低下していることが分かる。また、材齢91日におけるRP40およびRI40の圧縮強度が他のプロットから外れているのは、遷移帯の強度が細骨材の強度を上回り細骨材から破壊が進展したためと推察される。

また、図-11にモルタルの材齢28日における50nm~2 μ mの細孔容積の対数と中性化速度係数の関係を示したものであるが、細骨材の種類に関係なく、新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積の増加に従い、中性化速度係数が大きくなっている。

図-12は各材齢におけるC/TWと新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積の関係を示している。新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積とC/TWは相関があり、C/TWの増加に伴い細孔容積は減少している。

以上より、細骨材の種類に関係なく新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積により、再生モルタルの強度および中性化を評価できる。また、実用上はC/TWを指標として用いることができると考えられる。

4. 結論

本研究は、細孔構造の観点からモルタルの強度及び中性化抵抗性について検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 再生モルタルの圧縮強度は同一水セメント比の海砂モルタルと比較して低く、吸水率の

高い細骨材を用いたものほど強度が低くなる。また、再生モルタルの中性化速度は海砂モルタルに比べて大きい。

- (2) 単位セメント量Cとコンクリート中の総水量TWの比(C/TW)は、モルタルの圧縮強度および中性化速度係数と相関がある。
- (3) 新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積がC/TWの増加に伴い特に増加し、モルタルの圧縮強度および中性化速度係数と高い相関がある。
- (4) 新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積とC/TWは相関があり、実用上はC/TWにより強度および中性化速度係数を簡便に評価できると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州高圧コンクリート工業(株)および太平工業(株)に再生骨材を製造・提供頂きました。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、笠井芳夫ほか：再生骨材コンクリートの諸物性に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.50，1996.12
- 2) 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.1-12，2001.5
- 3) 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，No.767/V-64，pp.61-73，2004.8
- 4) 加藤佳孝，魚本健人：遷移帯の特性に着目した硬化体の物質移動特性のモデル化，土木学会論文集，No.655/V-48，pp.13-21，2000.8
- 5) 松下博通，佐川康貴，川端雄一郎：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.230-242，2006.2