

論文 再生細骨材の品質が細孔容積と強度の关系到及ぼす影響

佐川 康貴^{*1}・松下 博通^{*2}・川端 雄一郎^{*3}

要旨：再生骨材コンクリートおよびモルタルの強度を表す指標には、単位セメント量 C と単位水量に細骨材の吸水量を加えた TW との比 (C/TW) が有効であるとされている。しかし、コンクリートおよびモルタルの強度が骨材強度に依存する低水セメント比では、強度が頭打ちとなり、 C/TW のみでは十分に評価が行えない可能性がある。本研究は、再生細骨材およびそれを取り巻く新セメントペーストの細孔容積を用い、再生細骨材を使用したモルタルの強度を評価した。その結果、新セメントペーストに存在する細孔容積が再生細骨材の細孔容積を下回った場合に、再生モルタルの強度が頭打ちとなることを明らかにした。

キーワード：再生細骨材，再生モルタル，細孔容積，圧縮強度，遷移帯

1. はじめに

コンクリート構造物の解体現場から発生するコンクリート塊の多くは、道路用路盤材などとして有効利用されてはいるものの、公共投資額の減少やスラグ骨材の利用量増加などに伴い、今後も再生骨材を道路用路盤材として継続して大量に利用できる可能性は低いと考えられる。また、環境保全意識の高まりから、海砂などの天然骨材の採取規制が強化されつつあり、特に海砂への依存度が高い西日本では細骨材の不足が懸念されることから、積極的にコンクリート用骨材として利用していく必要がある。

このような中、2005年3月にはJIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」が、2006年3月にはJIS A 5023「再生骨材 L を用いたコンクリート」が制定されるなど、近年、再生骨材のコンクリート構造物への有効利用に関する取り組みが活発に行われている。

再生骨材コンクリートに関する研究はこれまで多数行われている。麓ら¹⁾により、再生骨材コンクリートの強度および耐久性はセメント総水量比 C/TW によってほぼ評価できることが明らか

にされているが、強度や耐久性の低下メカニズムについては十分解明されていない。また、長瀧ら²⁾は、強度が異なる原コンクリートから製造した再生粗骨材を用いたコンクリートの強度について検討し、原コンクリートの強度が小さい場合には、強度の頭打ち傾向が顕著になると報告している。さらに、大即ら³⁾は、旧境界相である付着モルタルのビッカース硬さが、新境界相である新モルタル部のビッカース硬さより大きい場合、コンクリートの強度は骨材の種類や品質の影響を受けないと報告している。

著者ら^{4,5)}はこれまでに、再生細骨材を使用したモルタル（再生モルタル）の強度および耐久性の低下メカニズムについて細孔構造の観点から検討し、再生モルタルの強度および耐久性は再生細骨材の品質や混和材の混入によらず、新セメントペースト部の $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積により評価可能であることを明らかにした。

本研究では、再生モルタルの細孔容積と強度の関糸について更なる検討を加えるとともに、再生細骨材自身の細孔容積に着目して再生モルタルの強度が頭打ちとなる条件を明らかにした。

*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 修士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 再生細骨材

再生細骨材 RP は遠心締固めにより製造した二次製品（水セメント比 30～35%程度）を原コンクリートとし、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、粒度調整をしたものである。また、再生細骨材 RI, RC, RJ は材齢 6 ヶ月の PC 舗装版（水セメント比 41%，圧縮強度 42.4N/mm^2 ，静弾性係数 30.3kN/mm^2 ）をブレーカで一次破碎した後、それぞれインパクトクラッシャ，コーンクラッシャ，ジョークラッシャで二次破碎したものであり，5mm ふり通過分を全量使用した。

表－1 に本研究で使用した細骨材の密度および吸水率試験結果を示す。本研究で使用した再生細骨材を密度および吸水率のみで JIS 規格及び JIS 規格原案⁶⁾（表－2）により区分すると，RP は再生細骨材 M に，RI, RC, RJ は再生細骨材 L に該当する。

図－1 に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 V_a は海砂と比較して大きく，また，低品質に区分される再生細骨材ほど細孔容積が大きくなっていることが分かる。

2.2 使用材料およびモルタルの配合

セメントに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。再生細骨材および海砂は表乾状態で使用し，再生モルタルでは細骨材全てに再生細骨材を使用した。以下では，海砂を使用したモルタルを「標準モルタル」，再生細骨材を使用したモルタルを「再生モルタル」と称する。

2.3 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 $W/C=40, 50, 60\%$ とし，砂セメント比 $S/C=3.0$ 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， $W/C=50\%$ とした配合である。

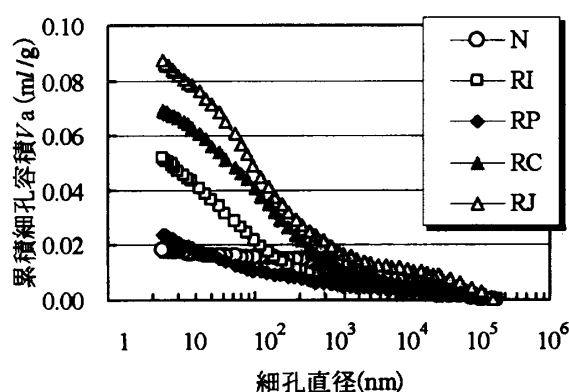
供試体は $40\times40\times160\text{mm}$ の角柱供試体とした。供試体は打設後 24 時間で脱型し，強度試験の材齢まで温度 20°C にて水中養生した。

表－1 細骨材の物理的性質

記号	細骨材の種類	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
N	海砂	2.55	2.70
RP	再生細骨材	2.47	6.05
RI		2.00	11.05
RC		2.26	13.40
RJ		2.23	15.20

表－2 再生骨材の物理的性質に関する JIS 規格および JIS 規格原案

区分	絶乾密度	吸水率	微粒分量
再生骨材H	2.5g/cm^3 以上	3.5% 以下	7.0% 以下
再生骨材M	2.3g/cm^3 以上	7.0% 以下	7.0% 以下
再生骨材L		13.0% 以下	10.0% 以下



図－1 細骨材の細孔径分布

2.4 試験項目および試験方法

(1) 曲げ強度および圧縮強度試験

モルタルは材齢 7, 28, 91 日において，JIS R 5201 の方法に従い，曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

(2) 細孔径分布測定及びデータの処理方法

強度試験の材齢において，細孔径分布測定用の供試体をコンクリートカッターにより中心部を切り出し，一辺の長さが約 5mm の立方体状のモルタル片を採取して試料とした。試料は大量のアセトンにより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。

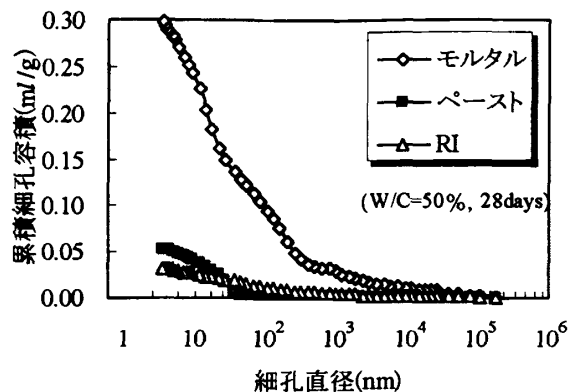


図-2 モルタル、ペーストおよび細骨材の細孔径分布（再生細骨材 RI）

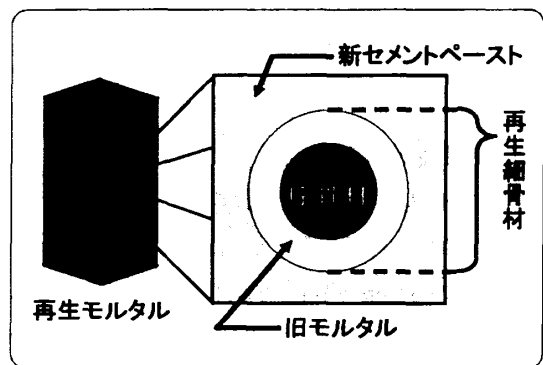


図-3 再生モルタルのモデル

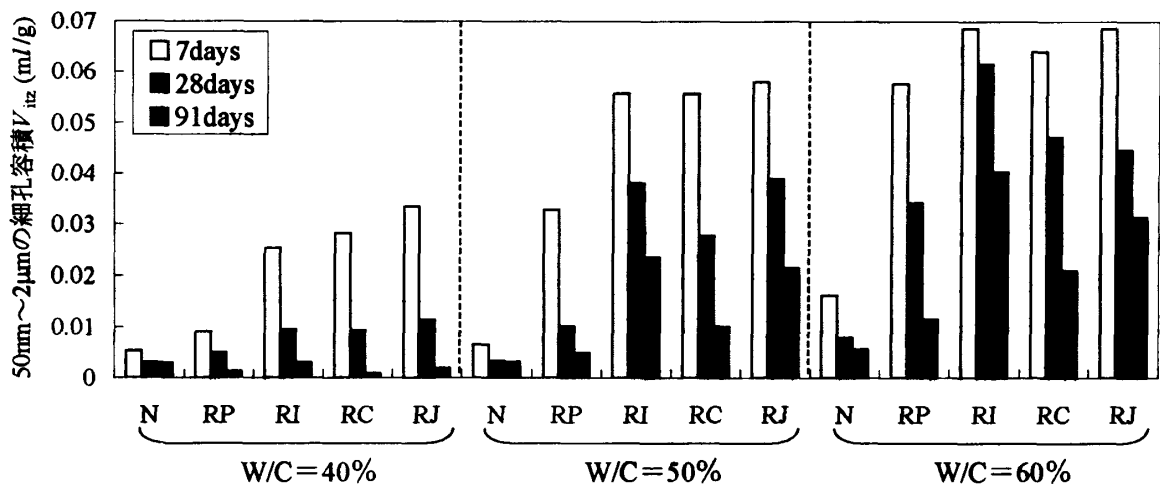


図-4 新セメントペースト部の細孔容積

図-2に材齢28日における再生モルタル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。なお、図中のセメントペースト、再生細骨材はそれぞれ別途に測定したものを $W/C=50\%$ の再生モルタル中の質量割合に換算して示したものである。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 以上の細孔が多数存在する。このような粗大な空隙は細骨材とセメントペーストの境界相 (itz) である遷移帯に存在し、モルタルの強度や物質透過性に大きく関与するとされている^{7),8)}。

再生モルタルは図-3に示すように、原骨材に旧モルタルが付着した状態の再生細骨材を新セメントペーストが取り巻く形で構成されている。よって、強度や物質透過性と密接な関係にある 50nm 以上の空隙は旧モルタル部と新セメ

ントペースト部の両方に含まれていると考えられる。

そこで、本研究では、旧モルタル部に含まれる細孔容積による影響を取り除くため、式(1)を用い、新セメントペースト部の細孔容積を算出し、評価を行った。すなわち、モルタルの細孔容積 V_m から細骨材の細孔容積 V_a を配合により求めた質量割合に換算したものを差し引いて、再生モルタル中で新たに付着する新セメントペースト部分における $50\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積 V_{itz} とした。

$$V_{itz} = V_m - V_a \times s \quad (1)$$

ここに、 V_{itz} : 新セメントペースト部の細孔容積 (ml/g)

V_m : モルタルの細孔容積 (ml/g)

V_a : 細骨材中の細孔容積 (ml/g)

s : 単位細骨材容積 (m^3/m^3)

なお、以下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。

3. 試験結果および考察

3.1 再生モルタルの細孔構造

図-4は、全ての配合における新セメントペースト部の $50\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積を示したものである。図より、同一のW/Cで比較した場合、再生モルタルにおける細孔容積は標準モルタルの場合と比較して大きいことが分かる。また、材齢7日の材齢初期の段階で既に差が生じていることが分かる。さらに、W/Cが高いほど、また、吸水率の高い再生細骨材を用いた再生モルタルほど細孔容積が大きくなる傾向にある。

セメントペースト部の細孔容積の差は、W/Cの違いによる影響が大きいと考えられることから、再生モルタルにおいては内部で新セメントペースト部のW/Cが増加していることが考えられる。これらの結果より、再生モルタルでは、硬化過程において、表乾状態で使用した再生細骨材中に含まれている水分により再生細骨材付近の新セメントペースト部のW/Cが局所的に高くなり、空隙が粗大化するものと推察される。

3.2 総水量 $TW^{1)}$ による強度の評価

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、コンクリート強度は低下し、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 と相関が強いことが麓ら¹⁾によって明らかにされている。本研究では、モルタル中の総水量 TW を下記の式(2)により求め、検討を行った。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s \quad (2)$$

ここに、 TW ：総水量 (kg/m^3)

W ：単位水量 (kg/m^3)

s ：単位細骨材容積 (l/m^3)

γ_{ds} ：細骨材絶乾密度 (kg/l)

w_s ：細骨材の吸水率 (%)

図-5、図-6にセメント総水量比 C/TW と圧縮強度および曲げ強度との関係を示す。図より、 C/TW と強度の間には相関関係が認められる。

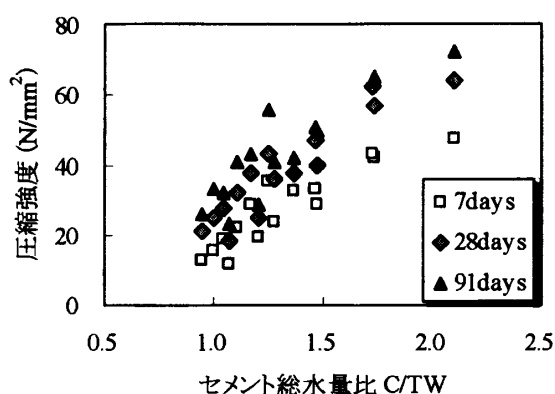


図-5 C/TW と圧縮強度の関係

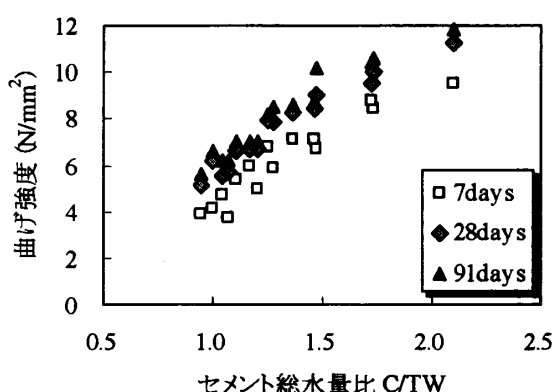


図-6 C/TW と曲げ強度の関係

また、 C/TW が1.5以上の領域では若干強度が頭打ちとなる傾向がある。

3.3 新セメントペースト部における $50\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積による強度の評価

図-7および図-8に $50\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積の対数と圧縮強度および曲げ強度の関係を示す。図より、再生細骨材の品質が異なる場合であっても、 $50\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積の対数と強度との間には高い相関があることが分かる。

以上のことから、再生モルタルの強度低下の原因と考えられる、再生細骨材中に含まれる水分により新セメントペースト部のW/Cが増大し空隙が粗大になる現象は、再生細骨材の品質の違いによらず生じていると考えられる。さらに、再生モルタルの強度は、新セメントペースト部の $50\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ の細孔容積により一義的に評価できることが明らかとなった。

しかし、長期材齢の低水セメント比の配合では、細孔容積が減少しても強度が伸びず頭打ち

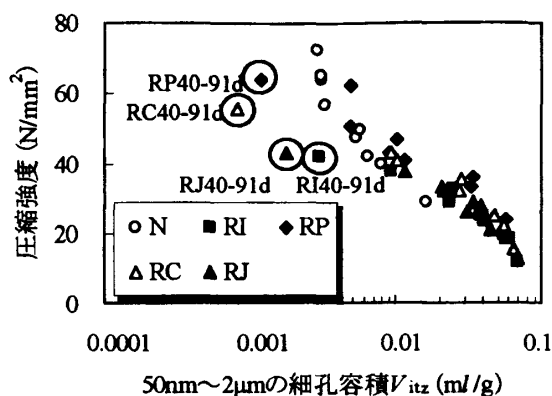


図-7 細孔容積と圧縮強度の関係

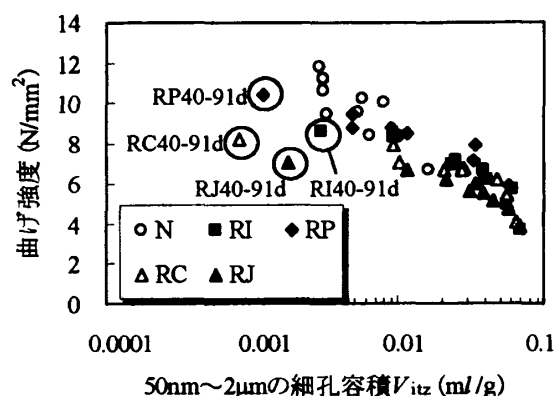
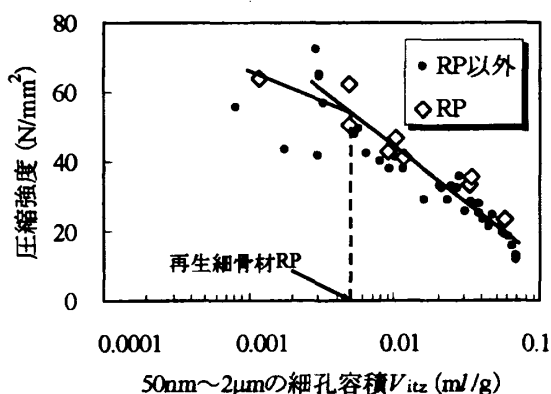
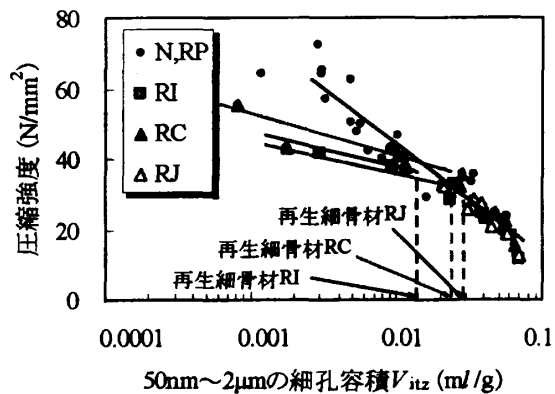


図-8 細孔容積と曲げ強度の関係



(a) 再生細骨材 M



(b) 再生細骨材 L

図-9 細骨材の細孔容積と圧縮強度の関係

になっていることが分かる。これは、新セメントペーストの強度が細骨材自身の強度を上回ったことが原因と考えられる。

3.4 新セメントペースト部と再生細骨材の細孔容積の比較による強度の評価

図-9は、図-8に再生細骨材自身が有する50nm～2μmの細孔容積の値を破線で示したものである。図より、新セメントペースト部の細孔容積が旧モルタルの細孔容積よりも小さくなると、 V_{itz} と圧縮強度の関係が表す勾配が小さくなっていることが分かる。

本研究で使用した再生細骨材の50nm～2μmの細孔容積はそれぞれ、W/C=50%の再生モルタル中の質量割合に換算して、RPで0.005ml/g、RIで0.015ml/g、RCで0.024ml/g、RJで0.027ml/gである。本研究では、この値をしきい値として再生モルタルの強度は頭打ちになるという結果が得られた。よって、新セメントペースト部の細孔容積が細骨材自身の細孔容積より大きい状

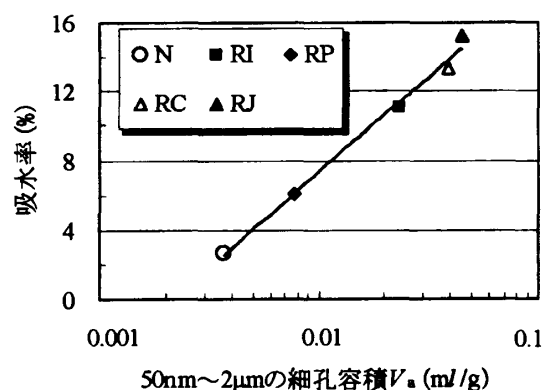


図-10 細骨材の細孔容積と吸水率の関係

態では、新セメントペースト部の遷移帯を起点とした破壊形態になり、一方、新セメントペーストの細孔容積が非常に小さくなった場合には、再生細骨材自身の脆弱部が起点となった破壊形態になるものと考えられる。

人工軽量骨材を用いた場合、川砂等と比較して小さいC/Wで強度が頭打ちになることが確認されており⁹⁾、中品質～低品質の範囲の再生細骨材を用いた場合にも、強度が頭打ちとなる現象

が比較的高い W/C で生じたものと考えられる。

以上より、再生細骨材自身の細孔容積を測定することにより、頭打ちとなる再生モルタルの強度を高 W/C～低 W/C にわたる領域において横断的に、予測することが可能と考えられる。

なお、本研究の範囲内では、細骨材の細孔容積は吸水率と密接な関係がある（図-10）ことから、実用的には吸水率を用いて頭打ちとなる強度を簡易に予測可能になると考えられる。

4. 結論

本研究では、再生細骨材およびそれを取り巻く新セメントペースト部の細孔容積を用いた再生モルタルの強度の評価手法について検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 再生細骨材を用いたモルタルの新セメントペースト部に存在する 50nm～2μm の細孔容積は、海砂を用いたモルタルよりも大きくなる。また、再生細骨材の吸水率が高いほど、細孔容積は大きくなる。
- (2) 中品質から低品質にわたる範囲の再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強度および曲げ強度を、新セメントペースト部に存在する 50nm～2μm の細孔容積により評価可能である。
- (3) 新セメントペースト部の 50nm～2μm の細孔容積が再生細骨材の 50nm～2μm の細孔容積を下回った場合は、再生モルタルの強度が頭打ちとなる。
- (4) 再生細骨材の細孔容積は吸水率と高い相関関係にあり、実用的には吸水率から頭打ちとなる強度を予測することができる可能性がある。

謝辞

本研究では、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) 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
- 2) 長瀧重義, 佐伯竜彦, 飯田一彦: 再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.462-467, 1998
- 3) 大即信明, 宮里心一, 原法生, Yodsudjai Wanchai: 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, 2001.5
- 4) 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および耐久性の低下, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.230-242, 2006.2
- 5) 石橋昌史, 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および強度・中性化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.1487-1492, 2006
- 6) 日本コンクリート工学協会: 再生骨材コンクリートの現状と将来展望-JIS 概要と普及促進に向けて-, JCI-C70, 2006.11
- 7) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物性, わかりやすいセメント科学, セメント協会, pp.78-104, 1995
- 8) 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
- 9) 村田二郎: 人工軽量骨材コンクリート, コンクリートパンフレット, セメント協会, pp.47-55, 1967