

再生骨材がコンクリートの透気性と中性化に及ぼす影響

Effect of the Mixing of Recycled Aggregate on an Air Permeability and Carbonation of the Concrete

山崎 順二*

立松 和彦*

要 旨

再生骨材を普通粗骨材と混合して使用することが、コンクリートの透気性と中性化抵抗性にどのような影響を与えるかについて調査するために実験を行った。実験の結果、再生細骨材を用いた場合に、中性化抵抗性と透気性は再生粗骨材の混合率が增大するのに伴い徐々に低下した。しかし、水セメント比を55%以下とし、かつ再生粗骨材混合率を50%以下とすれば、高耐久性コンクリートの判断基準である促進中性化深さ25mm以下を満足した。また、簡易透気速度と中性化深さには正の相関が見受けられ、簡易透気試験の結果から中性化抵抗性が推定できる可能性を示した。

キーワード：再生骨材コンクリート／骨材混合率／中性化深さ／透気性／簡易透気試験

1. はじめに

近年、天然資源からの骨材供給源は漸減しており、近い将来、天然資源のみに頼った骨材調達には限界がくる。また、瀬戸内海の手砂採取禁止など、特に関西地区での細骨材の不足に対処すべく、細骨材として中国産の川砂を輸入しているレディーミクストコンクリートJIS工場もある。このような状況下において、解体構造物から発生するコンクリート塊を破砕することによってコンクリート用骨材を製造し、再利用することは、循環型社会の形成、資源の有効利用といった観点から極めて重要なことである。

再生骨材については、比重選別¹⁾、偏心ローター²⁾、加熱すりもみ法³⁾によるものなど、高品質な再生骨材を製造する技術が近年になって開発されている。これらの手法で製造された再生骨材は、一般のコンクリート構造物に適用できる程度の高品質のものである。しかし、製造される再生粗骨材が高品質になるほど、副産物として発生する微粉の量や再生細骨材の量が增大することになる。これらの副産物の利用には有効な方策が現時点ではあまりなく、高品質の再生骨材を製造することが再生骨材の有効利用にとって必ずしも最良の方法とはなり得ないことを示している。それ故、高品質の再生粗骨材（旧建設省暫定基準(案)⁴⁾でⅠ種に区分される骨材）に加えて、それ以下の品質の再生骨材をも有効に利用してゆくことを考案することが、本来の再生資源の有効利用にとって必要なことである。

現在、再生骨材コンクリートの利用がなかなか拡大し

ない理由の1つには、再生骨材コンクリートの耐久性能が不明確であることが挙げられる。耐久性を表現する指標として一般的なものに中性化抵抗性があるが、その評価には約6ヶ月の長い期間を要する。しかし、コンクリートの中性化抵抗性と透気性との間には密接な関連性があると推察できるので、それをあらかじめ把握しておくことができれば、透気試験を行うことによってコンクリートの中性化抵抗性を早期にかつ迅速に評価することが可能となる。さらに、透気試験を用いたコンクリートの耐久性評価手法が確立されれば、この手法は構造物の寿命予測や健全性評価にも応用できる技術となる。

そこで本報では、吸水率が4.5%程度の中品質の再生粗骨材を碎石と混合して使用する場合や、再生細骨材を用いることが、コンクリートの透気性と中性化抵抗性にどの程度の影響を与えるかについて、実験を行った結果について報告する。さらに、これらの実験結果から、コンクリートの透気性と中性化抵抗性の関連性を評価し、コンクリートの耐久性能を早期にかつ迅速に推定する手法についても検討を加える。

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、骨材は、再生細骨材Ⅱ種、再生粗骨材Ⅱ種（旧建設省暫定基準案⁴⁾）、碎石および砕砂とし、水は上水道水を使用した。実験に使用した骨材とそれらの品質を表-1に示す。再生骨材は、実稼働している再生骨材製造工場¹⁾で不特定多数の

*建築研究グループ

コンクリート塊から製造したものである。この工場では、通常、湿式の比重選別により吸水率3%以下の高品質再生粗骨材を製造している¹⁾が、本実験に用いた再生粗骨材は、吸水率がⅡ種⁴⁾程度となるように調整して製造したものである。

2.2 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表－2に示す。細骨材の違いおよび再生粗骨材の混合割合が、再生骨材コンクリートの透気性と中性化抵抗性に及ぼす影響について検討するため、細骨材は砕砂もしくは再生細骨材とし、砕石に再生粗骨材Ⅱ種を0%, 30%, 50%, 70%, 100%の5水準で混合したものを粗骨材として使用した。コンクリート供試体は、砕砂と混合粗骨材を用いたシリーズ（NSRGシリーズ）と、再生細骨材と混合粗骨材を用いたシリーズ（RSRGシリーズ）をそれぞれ作製した。水セメント比は45%, 55%, 65%の3水準とした。供試体は合計30種類である。

2.3 再生骨材コンクリートの調査

再生骨材コンクリートの製造は以下の手順で行った。まず、各水セメント比のコンクリートに使用するモルタルを、フロー値が210±5となるように単位水量と細骨材量を調整しながらシリーズごとに作製した。次に、粗骨材容積の違いによる透気性や中性化抵抗性への影響を取り除くため、絶対容積を368L/m³の一定量とした混合粗骨材を上記のモルタルに加え、ブリーディングなどによるコンクリートの分離が生じないように調査した。再生骨材コンクリートの計画調査の概要を表－3に示す。

2.4 供試体の作製および養生

供試体は10×10×40cmの角柱供試体とした。コンクリート打設後、温度20℃で湿布養生し、材齢1日で脱型して材齢4週まで標準水中養生を行った。その後、材齢8週まで温度20℃、相対湿度60%の環境下で気中養生を行った。

促進中性化試験用供試体は、気中養生の最後の1週の間、供試体の長手両側面以外の面にエポキシ樹脂を塗布した。

簡易透気試験用供試体は、材齢8週まで促進中性化試験用供試体と同様の養生を行い、その後、供試体をビニールで包み封かん状態とし、温度20℃、相対湿度60%の環境下で、促進中性化試験が終了する(材齢26週)まで養生した。封かん状態のまま養生したのは、中性化によってコンクリートの透気性が変化するのを防ぐためと、建物竣工時に構造体の健全性評価を行う場合や中性化抵抗性の予測を行う場合は、中性化が進行していない状態での試験となることに配慮したためである。

表－1 実験に使用した骨材とその品質

使用材料	記号	表乾密度 (g/cm ³)	実積率 (%)	吸水率 (%)	付着率 (% ^{注)})
再生粗骨材Ⅱ種	RGⅡ	2.53	64.3	4.32	15.6
砕石	NG	2.60	60.3	1.07	—
再生細骨材	RSⅡ	2.43	73.1	7.10	24.2
砕砂	NS	2.56	53.6	2.25	—

注) モルタル、ペースト付着率は塩酸溶解法による

表－2 実験の要因と水準

要 因	水 準
水 セ メ ン ト 比	45%, 55%, 65%
細 骨 材	再生細骨材, 砕砂
NGに対するRGⅡ混合率	0%, 30%, 50%, 70%, 100%

表－3 コンクリートの計画調査の概要

W/C	RGⅡ 混合率 (vol %)	W (kg/m ³)	絶対容積 (L/m ³)			
			C	NS・RS	NG	RGⅡ
45	0	196	138	298	368	0
	30	196	138	298	258	110
	50	196	138	298	184	184
	70	196	138	298	110	258
	100	196	138	298	0	368
55	0	188	109	335	368	0
	30	188	109	335	258	110
	50	188	109	335	184	184
	70	188	109	335	110	258
	100	188	109	335	0	368
65	0	198	97	338	368	0
	30	198	97	338	258	110
	50	198	97	338	184	184
	70	198	97	338	110	258
	100	198	97	338	0	368

2.5 試験項目および試験方法

再生骨材コンクリートの試験項目は、促進中性化深さおよび簡易透気試験とした。

中性化深さの測定は、日本建築学会の「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の促進中性化試験法に準じ、温度20±2℃、相対湿度60±5%、炭酸ガス濃度5±0.2%の条件で行った。中性化深さは、促進材齢1,4,8,13,26週で約60mm間隔で供試体を割裂し、1%フェノールフタレインエタノール溶液を割裂面に噴霧し、発色しない外端からの深さを測定した。

簡易透気試験は、笠井・松井・湯浅らによって提案されているドリル削孔を用いた方法に基づいて行った。この方法は、コンクリート表面に直径10mm、深さ50mmの孔をコンクリートドリルで削孔し、その孔をシリコン栓で完全に密封状態にする。その後、この栓に注射針を通し、真空ポンプを用いて削孔内部を減圧する。減圧を開始して、ある圧力 $X1$ (kPa)に達した後に減圧を停止すると、孔の周壁からの空気の流入によって削孔内の圧力が復圧してくる。この時、 $X1$ (kPa)からある圧力 $X2$ (kPa)、(ただし $X1 < X2$)まで復圧するのに要した時間を T (sec)とすると、簡易透気速 K (kPa/sec)は、

$$K = \{(X2 - X1) / T\} \quad (\text{kPa/sec}) \quad (1)$$

として計算される⁵⁾。本実験では、 $X1$ を21.3kPa、 $X2$ を25.3kPa（一部の供試体については $X1$ を13.3kPa、 $X2$ を33.3kPa）として試験を行った。(1)式の $X1$ および $X2$ は、笠井らの研究⁵⁾に準じ、圧力の単位を(mmHg)から(kPa)に変更して適用した。簡易透気試験用の供試体は、1供試体につきドリル孔を2カ所あけ、1つの孔について4回測定し、1回目以外の3回の測定値の平均をその孔の簡易透気速度として、2カ所の孔の平均を供試体の簡易透気速度 K とした。

3. 実験結果および考察

3.1 促進中性化試験結果

細骨材に砕砂を用いたNSRGシリーズの中性化深さを図-1に、再生細骨材を用いたRSRGシリーズの中性化深さを図-2に示す。促進材齢は26週である。

図-1に示したNSRGシリーズの中性化深さは、W/C45%および55%の場合は、再生粗骨材混合率の増大に伴い若干大きくなる傾向にあるが、W/C65%の場合は、粗骨材混合率の大小に関わらずほぼ同等の中性化深さを示したが、他のW/Cに比べて中性化深さが大きくなる傾向にあった。これは、W/C65%では、モルタルマトリックスが再生粗骨材の付着モルタルと同程度にポーラスになったことにより、再生粗骨材の混合による粗骨材品質の変化にはほとんど影響を受けなかったためと考えられる。

図-2に示したRSRGシリーズにおいては、いずれのW/Cにおいても、再生粗骨材混合率の増大に伴い中性化深さが緩やかではあるが大きくなり、再生粗骨材を混合することが中性化抵抗性に影響を及ぼしていることがわかる。また、細骨材の違いが中性化深さに及ぼす影響について、吸水率が7%程度の再生細骨材を使用した場合

(RSRG)の中性化抵抗性は、W/C45%では砕砂(NSRG)の場合とほぼ同等であり、促進材齢26週における中性化深さが両者とも約20mmであった。しかし、W/Cが大きくなるほど再生細骨材による影響が顕著となり、W/C55%においてはNSRGシリーズの24~25mmに対してRSRGでは26~29mm、同様に、W/C65%においてはNSRGの32~36mmに対してRSRGでは38~44mmと、再生細骨材を用いることによって中性化深さが大きくなった。

以上のことから、再生細骨材を用いた場合は砕砂を用いた場合よりもモルタルマトリックスがポーラス化することにより中性化深さが一般に大きくなる傾向にあるので、再生細骨材を使用する場合には、砕砂などの普通細骨材の場合よりもW/Cを5%程度小さく設定することによって、砕砂などを用いたコンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保できると考えられる。

一方、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)」における高耐久性コンクリートの目標品質のうち、中性化については、促進材齢26週の時点で中性化深さが25mm以下としている。本実験の結果からは、NSRGシリーズではW/C55%以下の全ての調合において、RSRGシリーズではW/C55%で再生粗骨材混合率が50%以下の調合において、促進試験による中性化深さが25mm以下となり、これらは全て高耐久性指針の目標値を満足する高い中性化抵抗性を有するコンクリートであると判断できる。

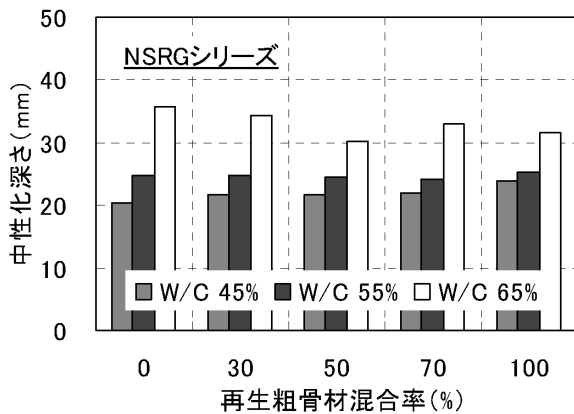
3.2 簡易透気試験結果

細骨材に砕砂を用いたNSRGシリーズの簡易透気速度を図-3に、再生細骨材を用いたRSRGシリーズの簡易透気速度を図-4に示す。いずれも乾燥材齢26週での測定結果である。

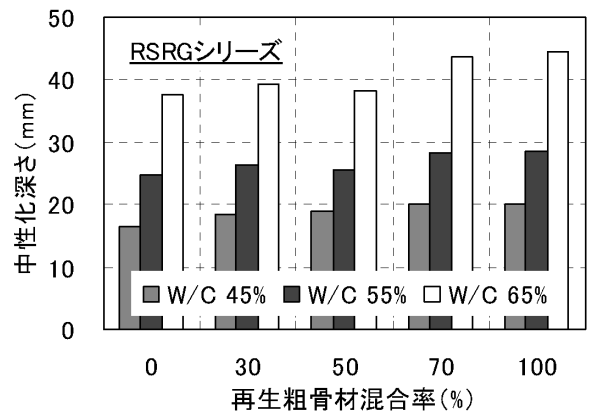
図-3に示したNSRGシリーズの簡易透気速度は、再生粗骨材の混合率にほとんど影響を受けず、W/C45%とW/C55%ではほぼ同等の簡易透気速度であり、W/C65%の場合にのみやや大きくなった。

図-4に示したRSRGシリーズについて、W/C45%の場合は再生粗骨材の混合率に関わらず0.2kPa/sec程度であったが、W/C55%およびW/C65%では、再生粗骨材混合率の増大かつW/Cの増大に伴って簡易透気速度が大きくなる傾向にあった。

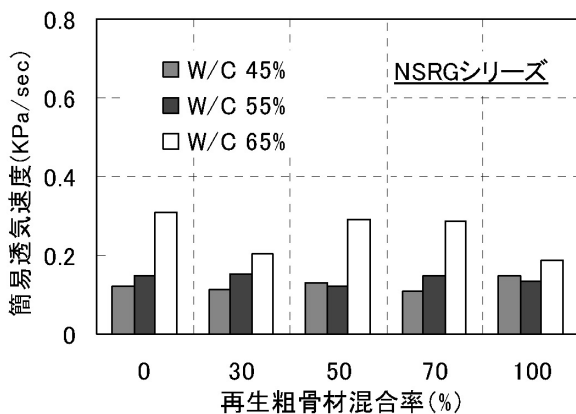
また、細骨材の違いが簡易透気速度に及ぼす影響については、W/C45%においては、NSRGの0.11~0.15kPa/secに対してRSRGでは0.21~0.25kPa/sec、W/C55%ではNSRGが0.12~0.15kPa/secに対してRSRGでは0.35~0.46kPa/sec、同様に、W/C65%では0.19~0.31kPa/secに対して0.46



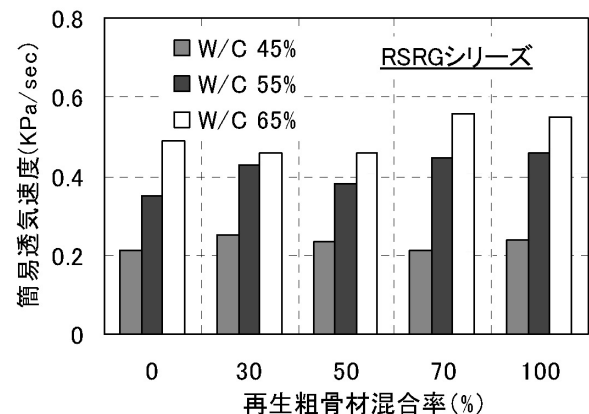
図－1 NSRGシリーズの中性化深さ



図－2 RSRGシリーズの中性化深さ



図－3 NSRGシリーズの簡易透気速度



図－4 RSRGシリーズの簡易透気速度

～0.56kPa/secとなった。中性化深さの結果と同様に、再生細骨材の使用およびW/Cの増大によって、モルタルマトリックスがポーラス化していることが顕著な傾向として認められる。

本実験の結果から、NSRGシリーズのようにマトリックスが比較的ち密な場合は、再生粗骨材の混合率にあまり影響を受けていない。しかし、RSRGシリーズにおいては、再生粗骨材混合率が増大するのに伴って簡易透気速度が大きくなり、中性化抵抗性が低下していくことが認められた。これは、既往の研究⁹⁾等にもみられるように、再生粗骨材を混合使用すると、モルタルマトリックス中に付着モルタルやモルタル塊などのポーラスな部分が多く存在することになり、その部分で気体の浸透・拡散が加速されるという現象が、再生細骨材の使用でモルタルマトリックスがポーラスになったことによって、より顕著に現れたためと考えられる。

3.3 コンクリートの簡易透気速度と含水率

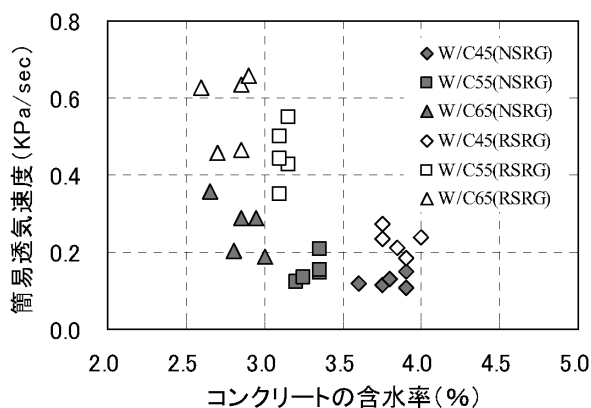
コンクリートの透気性は、コンクリートの含水率の大

小によって大きく左右される。そのため、透気性を評価する場合はコンクリートの含水率を十分に考慮して行う必要がある。そこで本実験では、高周波容量式の水分計を用い、測定厚さを40mmとして、簡易透気試験直前にコンクリートの含水率を測定した。

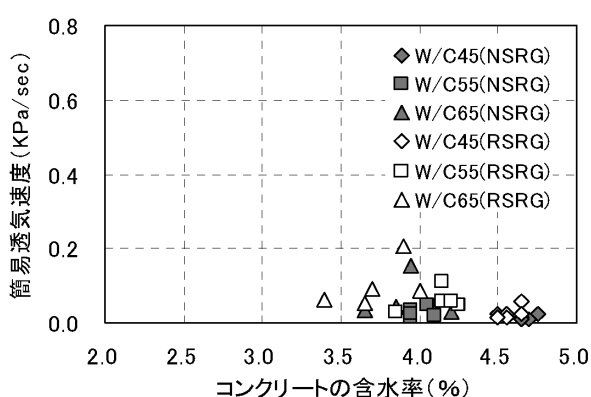
図－5に簡易透気試験を行う時点でのコンクリート供試体の含水率と簡易透気速度との関係を示す。

今回簡易透気試験を行った全供試体の含水率は2.6%～4.0%であり、同一W/CごとのNSRGシリーズの供試体とRSRGシリーズの供試体との含水率の差は、最大でも0.3%程度と極めて小さかった。これより、本実験における簡易透気速度の測定値は、含水率の影響を受けていないものとして検討を進める。

一方、図－5に示したのと同じ供試体を用いて、コンクリートの含水率のみを変化させて行った簡易透気速度と含水率の関係を図－6に示す。簡易透気試験方法およびその他の試験条件は全て同じであるにも関わらず、含水率が4%を超えると簡易透気速度が0～0.1kPa/sec程



図－5 簡易透気速度と含水率の関係(試験直前)



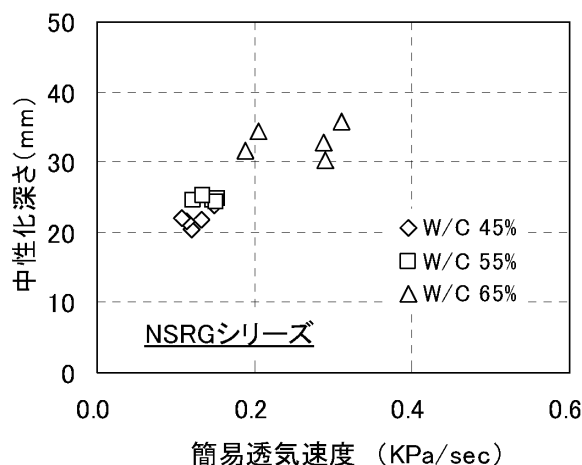
図－6 簡易透気速度と含水率の関係(吸水後)

度に収束していることが分かる。実際の構造体コンクリートを透気性によって評価しようとする場合は、含水率の影響によって透気速度を補正するなど、含水率の影響を考慮した評価手法を、今後、検討することが必要である。

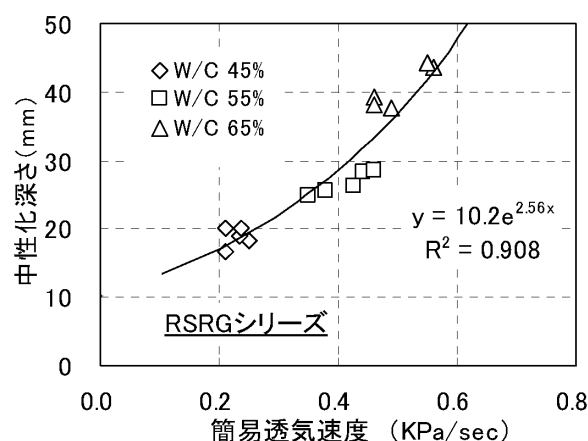
3.4 透気性と中性化抵抗性の関係

細骨材に砕砂を用いたNSRGシリーズの中性化深さと簡易透気速度の関係を図－7に、再生細骨材を用いたRSRGシリーズの中性化深さと簡易透気速度の関係を図－8に示す。

今回の実験の結果、図－7のNSRGシリーズでは中性化抵抗性と簡易透気速度の間に明確な相関は認められなかったが、図－8に示したRSRGシリーズにおいては、W/Cや再生粗骨材混合率に関わらず、両者の間に相関係数 $R=0.95$ の高い相関が認められた。これより、今後さらにデータを蓄積することが必要であるが、両者の関係を用いて、簡易透気試験結果から再生骨材コンクリートの中性化抵抗性を推定することに対する可能性を示すことができた。



図－7 中性化深さと簡易透気速度(NSRG)



図－8 中性化深さと簡易透気速度(RSRG)

4. まとめ

再生骨材を使用することがコンクリートの透気性と中性化抵抗性に及ぼす影響について評価し、両者の関連性について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1)再生骨材コンクリートの透気性および中性化抵抗性は、再生細骨材を用いた場合に再生粗骨材の混合率が多くなるのに伴い徐々に低下する。しかし、水セメント比を55%以下とし、Ⅱ種程度の中品質の再生粗骨材混合率を50%以下とすれば、高耐久性コンクリートの目標品質を満足する高い中性化抵抗性を有するコンクリートとなる。
- (2)簡易透気試験を行うことによって、再生骨材コンクリートの中性化抵抗性を早期にかつ迅速に評価できる可能性がある。

以上、コンクリートの簡易透気試験によって、コンクリートの中性化抵抗性(耐久性能)を推定する手法について

て検討した。さまざまな品質の再生骨材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を推定しようとする場合には、さらにデータを収集して両者の関連性を見いだすことが必要となるが、コンクリートの含水率に関する考慮も含めた耐久性評価手法が確立できれば、著者らの既往の研究目的である骨材性能指標を用いて再生骨材コンクリートの性能を事前に予測するものに加えて、骨材性能評価システム^{6)~8)}に基づいて設計、打設されたコンクリートの耐久性能を、早期にかつ迅速に評価できる手法が見いだせることになる。

[参考文献]

- 1)伊藤信孝, 柴谷啓一, 立松和彦, 山崎順二:「比重選別による高品質再生骨材の製造および再生骨材コンクリートの物性」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.1-4.1999.
- 2)柳橋邦生, 米澤敏男, 神山行男, 井上孝之:「高品質再生粗骨材の研究」, コンクリート工学年次論文報告集第21巻第1号, pp.205-211, 1999.
- 3)立屋敷久志, 島裕和, 松本義弘, 古賀康男:「加熱すりもみ法により回収した高品質再生骨材コンクリートの性状」, コンクリート工学年次論文報告集第23巻第2号, pp.61-66, 2001.
- 4)建設省(財)国土開発研究センター/建設省総合技術開発プロジェクト:「建設副産物の発生抑制・再利用技術の開発」概要報告書, 1997.3
- 5)笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 野中英:「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法その1.簡易透気試験方法(案)の提案」, 日本建築学会学術講演梗概集(中国) pp.45-46(1350), 1999.
- 6)山崎順二, 二村誠二:「再生細骨材モルタルによる骨材の性能評価システムに関する研究」, 材料, 第49巻第10号, pp.1085-1090, 2000.10
- 7)山崎順二, 二村誠二:「骨材性能評価システムによる再生骨材コンクリートの力学特性」, コンクリート工学年次論文報告集, 第23巻第1号, pp.253-258, 2001.
- 8)山崎順二, 二村誠二:「骨材性能評価システムによる再生骨材コンクリートの乾燥収縮特性」, コンクリート工学年次論文報告集, 第24巻第1号, pp.1239-1244, 2002.
- 9)中村成春, 榊田佳寛, 押谷式子, 阿部道彦:「再生細骨材コンクリートの中性化及び耐凍害性」, コンクリート工学論文集, 第9巻第1号, pp.87-97, 1998.