# 論文　再生骨材の混合がコンクリートの透気性と中性化に及ぼす影響

山崎　順二*1・二村　誠二*2・村上　順一*3

**要旨：**再生粗骨材を混合使用することが，コンクリートの中性化抵抗性と透気性にどの程度の影響を与えるのかを，実験を行い評価した。透気性の評価には，試験の簡便性と広範な適用性を考慮してドリル孔を用いた簡易透気試験を適用した。本実験の結果，中性化抵抗性と透気性は，再生細骨材を用いた場合に，再生粗骨材の混合率が増大するのに伴い徐々に低下したが，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，促進中性化深さが 25mm 以下となった。また，簡易透気速度と中性化深さには関連性があるため，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

現在，天然資源からの骨材供給源は枯渇状態にあり，近い将来，天然資源のみに頼った骨材調達には限界がある。また，瀬戸内海の海砂採取禁止など，特に関西地区での細骨材の不足に対処すべく，最近では，細骨材として中国産の川砂を輸入し，レディーミクストコンクリートの製造に使用している JIS 工場が数社ある。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増大することになる。これらの副産物の利用には現時点では有効な方策があまりなく，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。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と考える。

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最も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ヶ月間が必要となり，長期間を要する。

一方，コンクリートの透気性を測定する方法は，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簡易透気試験[5)]がある。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考えられるので，それをあらかじめ把握しておくことができれば，簡易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迅速に評価することが可能とな

*1 ㈱淺沼組技術研究所　建築工法・材料研究室主任　工修（正会員）
*2 大阪工業大学　工学部建築学科　工修（正会員）
*3 大阪工業大学大学院　工学研究科建築学専攻（会員外）

る。この評価手法を応用すれば，構造物の健全性の評価を，構造物の竣工直前に実施することも可能となる。

以上のことより，本報では，吸水率が4.5%程度の中品質の再生粗骨材を砕石と混合使用した場合や，細骨材に再生細骨材を使用することが，コンクリートの中性化抵抗性と透気性に及ぼす影響について実験を行い評価する。さらに，透気性と中性化抵抗性の関連性を把握し，その関連性を用いて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。

これらの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]を用いて打設された再生骨材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。

## 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 種および再生粗骨材 II 種（旧建設省暫定基準案[4]），砕石および砕砂とし，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]で不特定多数のコンクリート塊から製造したものである。この工場[1]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。

### 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，細骨材を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。それぞれの細骨材との組み合わせにより，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）のコンクリート供試体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。

**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% |

### 2.3 再生骨材コンクリートの調合

再生骨材コンクリートの調合は，まず，各水セメント比のモルタルを，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/m$^3$ 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合を計画した。再生骨材コンクリートの計画調合の概要を**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。打設後，温度 20℃で湿布養生し，材齢 1 日で脱型後，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 週の間に，供試体の長手両側面以外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。

### 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，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した。その後，この栓に静脈注射用の注射針を通し，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，簡易透気速度 $K$(kPa/sec)は,

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

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。

**表－3 コンクリートの計画調合の概要**

| W/C (%) | RGⅡ 混合率 | 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 |

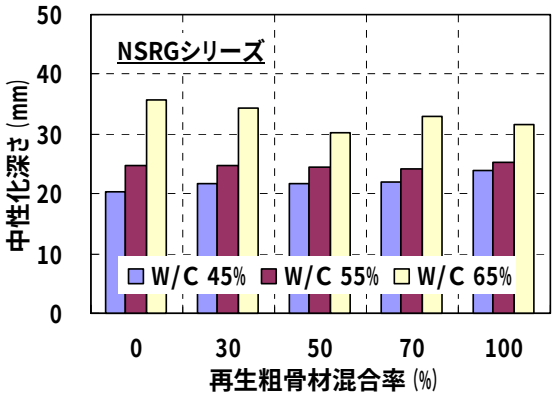
(1)式の $X1$ および $X2$ は，笠井らの研究[5]に準じ，圧力の単位のみ(mmHg)から(kPa)に変更して適用した。簡易透気試験用の供試体は，１供試体につきドリル孔を 2 カ所あけ，1 つの孔について 4 回測定し，1 回目以外の 3 回の測定値の平均をその孔の簡易透気速度とし，2 カ所の孔の平均を供試体の簡易透気速度 $K$とした。測定結果から得られる簡易透気速度 $K$（kPa/sec）は，コンクリートの透気性の指標として扱われており，構造体コンクリートの耐久性評価に用いられるものである。

## 3. 実験結果および考察

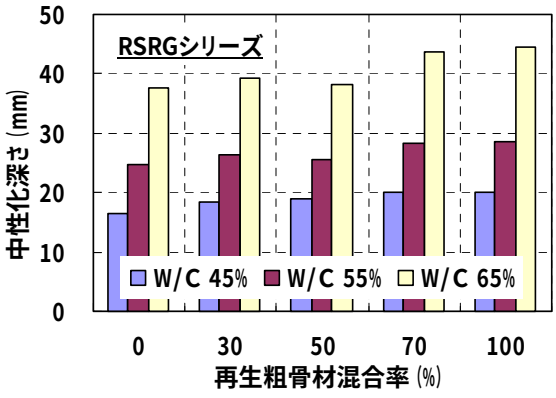
### 3.1 促進中性化試験結果

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。いずれも促進材齢 26 週での結果である。

**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増大に関わらずほぼ同等の中性化深さを示した。これは，W/C65%では，マトリックス自体が付着モルタ




**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**

ルと同程度にポーラスであるためと推察できる。

**図－2**に示した RSRG シリーズにおいては，いずれの水セメント比においても，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。両シリーズとも水セメント比が大きくなるほど中性化深さが増大しているが，この傾向は RSRG シリーズの方が顕著であり，RSRG シリーズの W/C65%の場合に最も中性化深さが大きく，中性化抵抗性の低下が大きくなった。

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の中性化抵抗性は，W/C45%では砕砂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，中性化深さに及ぼす再生細骨材の影響は水セメント比が大きくなるほど顕著となり，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 となった。

以上のことから，再生細骨材を使用する場合には，砕砂などの一般細骨材の場合よりも水セメント比を 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等以上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 週において中性化深さが 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。

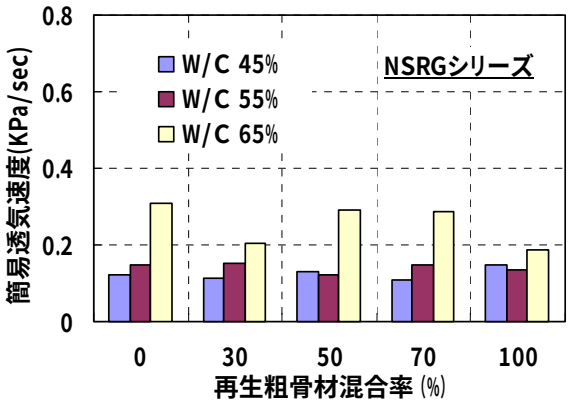
### 3.2 簡易透気試験結果

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。

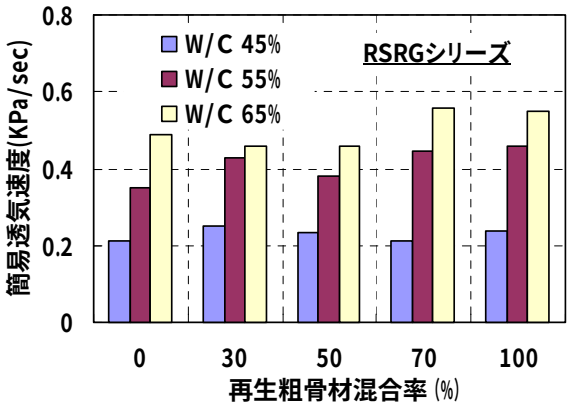
**図－3**に示した NSRG シリーズの簡易透気速度は，再生粗骨材混合率に関わらず，W/C45%と W/C55%でほぼ同等の簡易透気速度であり，W/C65%の場合にのみやや大きくなった。

一方，**図－4**に示した RSRG シリーズについて，W/C45%においては粗骨材混合率に関わらず 0.2KPa/sec 程度であるが，W/C55%および W/C65%では，再生粗骨材混合率の増大かつ水セメント比の増大に伴い簡易透気速度が大きくなる傾向にあり，これらの要因でマトリックスがポーラス化することが認められる。

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，中性化深さの場合よりも顕著であった。簡易透気速度は，W/C45%においては，NSRG の 0.11～0.15KPa/sec に対して RSRG




**図－3　NSRG シリーズの簡易透気速度**

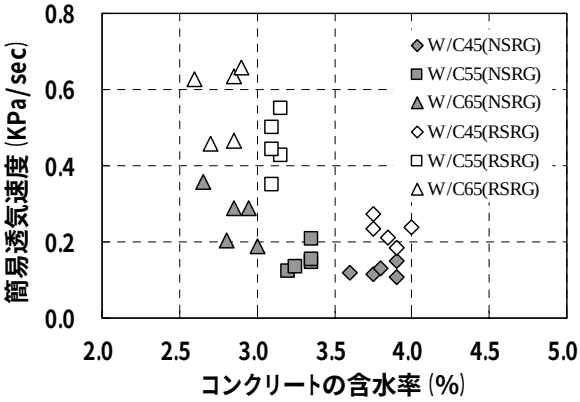



**図－4　RSRG シリーズの簡易透気速度**

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 0.46～0.56KPa/sec となり，再生細骨材を用いることによっても，マトリックスがポーラス化することが認められる。

さらに，既往の研究[9]から，再生粗骨材混合率が増加することによってマトリックス中に付着モルタルやモルタル塊などポーラスな部分が多くなり，その部分で気体の浸透が加速されるために中性化抵抗性が低下すると考えられている。本実験の結果からも，NSRG シリーズのようにマトリックスが比較的ち密なものは再生粗骨材の混合率にあまり影響を受けていないが，NSRG シリーズよりもマトリックスがポーラスであると推察される 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。

一方，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と考えられる。**図－5**に，簡易透気試験時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。コンクリートの含水率の測定は，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行った。全供試体の含水率は，2.6%～4.0%であり，同一水セメント比ごとの含水率の差は 0.3%程度と小さかった。これより，本実験において含水率の差が簡易透



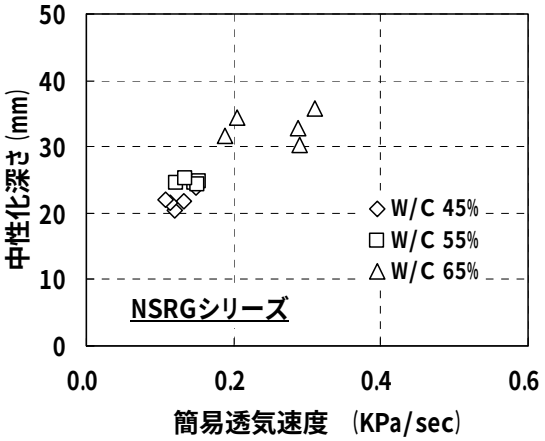

**図－5　簡易透気速度とコンクリートの含水率**

気速度に与える影響はほぼないと考えられる。

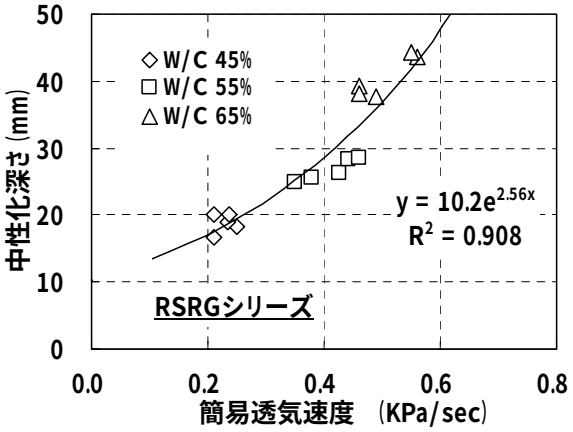
### 3.3　透気性と中性化抵抗性の関係

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－6**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－7**に示す。

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。今回の実験の結果，**図－6**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－7**に示した RSRG シリーズにおいては，水セメント比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




**図－6 中性化深さと簡易透気速度**(NSRG)




**図－7 中性化深さと簡易透気速度**(RSRG)

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。

## 4. まとめ

骨材を混合すること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したが，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，高い中性化抵抗性を有するコンクリートとなることがわかった。

(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迅速に評価できる可能性があることを示した。

## 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，桝田佳寛，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.