

## 論文 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

山崎 順二<sup>\*1</sup>・二村 誠二<sup>\*2</sup>

要旨：再生骨材の性能を評価するための試験として、骨材の破碎試験を行って得られる骨材破碎値および骨材強さ係数を骨材性能指標として適用し、試験結果から得られた骨材性能指標を用いて、再生骨材コンクリートの乾燥収縮率を推定した。また、理論式を用いて骨材弾性係数および骨材収縮率を算出する手法を示し、推定された値が絶対値として扱えるかについて検討した。その結果、骨材破碎値および骨材強さ係数を骨材性能指標として再生骨材コンクリートの乾燥収縮率が推定できること、また、理論式を用いて算出された骨材収縮率は、コンクリートの乾燥収縮率との間に高い相関があることがわかった。

キーワード：再生骨材，乾燥収縮率，骨材破碎試験，骨材性能指標，骨材収縮率

## 1. はじめに

近年、建設副産物のリサイクル率の向上が強く求められている。その対応策として、建物の解体時に発生するコンクリート塊を再生路盤材やコンクリート用骨材として再利用するなど、再生資源の有効利用が図られている。しかし再生骨材については骨材品質や供給体制などの問題があり、あまり有効利用されていないのが現状である。再生骨材については、吸水率および安定性を指標とした品質基準(案)<sup>1)</sup>が旧建設省(現在の国土交通省)より提示されているが、それを用いて再生骨材コンクリートの性能を予測することは困難と思われる。再生骨材を有効に利用するためには、再生骨材の品質を的確に評価し、それに基づいて再生骨材コンクリートの性能を推定できるシステムの確立が望まれる。

品質の異なる骨材を単味もしくは混合して使用する場合には、その骨材を用いて製造したコンクリートの特性を把握しておくことが必要となるが、現時点では、実際に試験をして確かめるしかコンクリートの性能を把握する方法はない。そこで本研究は、骨材性能を指標化し、品質の異なる骨材を混合使用した場合のコンクリ

ートの物性を、骨材性能や調合条件などを指標として推定できる手法を確立することを目標としている。

本論文では、前報<sup>2)</sup>に引き続き、骨材の性能を指標化するための試験として骨材破碎試験を適用し、得られた骨材性能指標を用いて再生骨材と碎石を混合使用した再生骨材コンクリートおよび再生細骨材モルタルの乾燥収縮率を推定する手法について検討した。また、実測が困難である骨材収縮率および骨材弾性係数を、理論式を用いて推定する手法についても検討した。

## 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、練混ぜ水には水道水を使用した。実験に使用した骨材およびその品質を表 1 に示す。粗骨材には、品質基準(案)の 1 種相当および 2 種相当の再生粗骨材および碎石を使用し、細骨材には 2 種相当の再生細骨材および砕砂を使用した。本実験に用いた再生骨材は、湿式の比重選別によって製造されたもの<sup>3)</sup>である。なお、モルタル付着率は塩酸溶解法によって求めた。

\*1 (株)浅沼組技術研究所 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)

## 2.2 実験の要因と水準

再生細骨材モルタル(RS)および再生粗骨材コンクリート(NR)の水セメント比と骨材の組み合わせを表 2 に示す。モルタル供試体およびコンクリート供試体の作製には、骨材の品質を変化させるために、モルタルには砕砂に再生細骨材 2 種を、またコンクリートには砕石に再生粗骨材 2 種を 0%・20%・40%・60%・80%・100% の割合で混合したものを骨材として用いた。

水セメント比は 45%・55%・65% の 3 水準とし、砕砂と再生細骨材を上記の割合で混合した再生細骨材モルタル(RS)と、同様に、細骨材を砕砂とし、砕石と再生粗骨材 2 種を混合した再生粗骨材コンクリート(NR)をそれぞれ作製した。実験の組み合わせ数は合計 36 種類である。

### 2.3 コンクリートの調合計画

再生細骨材モルタルの調合は、砕砂および再生細骨材をそれぞれ単味で用いてフロー値が  $210 \pm 5$  となるように骨材容積を決定した。その後、骨材容積を一定とし、かつフロー値が  $210 \pm 5$  となるように、細骨材を混合使用したモルタルの調合を決定した。再生粗骨材コンクリートの調合は、各水セメント比ともフロー値が  $210 \pm 5$  となるモルタルに、粗骨材容積による影響を取り除くために全ての調合において粗骨材量を  $362L/m^3$  とした。フロー値を 210 としたのは、コンクリートのコンシステンシーやブリーディングを考慮して適当と判断したためである。

### 2.4 供試体の作製および養生

モルタルの練混ぜには JIS A 5201 に示されたモルタルミキサーを、コンクリートの練混ぜには容量 30(L)のオムニミキサーを用いた。

乾燥収縮率測定用供試体には、再生細骨材モルタルには  $4 \times 4 \times 16\text{cm}$  の供試体を、再生粗骨材コンクリートには  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  の供試体を 1 調合につき 3 本ずつ用いた。

打込み後、温度  $20 \pm 2$ ℃・相対湿度 95%以上の恒温恒湿室に静置し、材齢 24 時間で脱型した。その後、材齢 7 日まで標準水中養生を行った後、乾燥収縮率の測定に供した。

表 - 1 使用骨材の品質

使用骨材	表乾密度 g/cm <sup>3</sup>	実積率 %	吸水率 %	珪灰付着率 %
再生粗骨材1種	2.60	64.2	2.43	13.1
再生粗骨材2種	2.53	64.3	4.32	15.6
砕石	2.60	60.3	1.07	-
再生細骨材2種	2.43	73.1	7.10	24.2
砕砂	2.56	53.6	2.25	-

表 - 2 実験に用いた供試体の種類

要因	水準						
W/C	45%, 55%, 65%						
再生細骨材 モルタル 供試体	細骨材	砕砂, 再生細骨材 (2種相当)					
		細骨材混合率 (%)					
	砕砂	0	20	40	60	80	100
	再生細	100	80	60	40	20	0
再生粗骨材 コンクリート 供試体	細骨材	砕砂					
	粗骨材	砕石, 再生粗骨材 (2種相当)					
		粗骨材混合率 (%)					
	砕石	0	20	40	60	80	100
	再生粗	100	80	60	40	20	0

### 2.5 試験項目および試験方法

細骨材および粗骨材の試験には、砕砂に再生細骨材を、また砕石に再生粗骨材を表 - 2 に示す割合で混合したものをそれぞれ用いた。

本報では、骨材の性能を評価するための試験として、BS 812<sup>4)</sup>法に準じて骨材破碎試験を行った。破碎試験と同時に、載荷によって生じるプランジャーの沈下量を、変位計を用いて連続的に測定した。骨材性能を評価するための試験として骨材破碎試験を採用したのは、前報<sup>2)</sup>に示したように、骨材破碎試験によって得られる骨材破碎値と骨材強さ係数が、骨材の性能を評価する指標として有効であるためである。

再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの長さ変化率の測定は、温度  $20 \pm 2$ ℃、相対湿度 60%の環境下で JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ方法) に準じて行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 モルタル・コンクリートの乾燥収縮率

再生細骨材モルタル(RS)および再生粗骨材コ

ンクリート(NR)の乾燥収縮率と再生骨材混合率との関係を図 - 1 に示す。乾燥収縮率と骨材混合率の間には、モルタルおよびコンクリート供試体とも水セメント比ごとに良好な相関があり、かつ再生骨材混合率が增大するのにもなって乾燥収縮率が大きくなった。なおコンクリートに分離は認められず、スランブはRSが8~12cm、NRが12~15cmの範囲であった。

### 3.2 再生骨材の骨材性能指標

骨材性能指標は、単純な試験を行うことによって指標が導き出せ、骨材の特性を的確に表現でき、かつコンクリートの特性と関連のあるものであることが必要である。前報<sup>2)</sup>において、コンクリートの物性と骨材自体の強度との関連性、試験の簡便性および結果の迅速性などを考慮した場合、骨材破砕値および骨材強さ係数<sup>5)</sup>が、骨材性能指標として適用できることを示した。「骨材強さ係数」とは、図 - 2 のように、骨材破砕試験における骨材沈下量 - 応力度曲線の原点と最大沈下量の 1/2 の点を結んだ割線と、最大沈下量における応力度軸に平行な直線との交点の応力度で表される値である。

再生細骨材 2 種、再生粗骨材 2 種および再生粗骨材 1 種の骨材破砕試験から得られた骨材破砕値と骨材強さ係数を図 - 3 および図 - 4 に示す。骨材を混合して使用した場合、混合後の骨材の骨材破砕値および骨材強さ係数は、混合率の増減に対して直線的に変化しているため、いずれも骨材自体の強度の違いを的確に表現していると考えられる。

一方、再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率は、骨材破砕値および骨材強さ係数と同様に、いずれも再生骨材混合率の増大とともに直線的に変化していることから、骨材破砕値および骨材強さ係数は、コンクリートの乾燥収縮率を推定するための指標として、さらにはコンクリートの性能を推定するための指標として有効であると考えられる。

### 3.3 骨材性能指標の定義

骨材の種類によっても骨材の性能が異なる

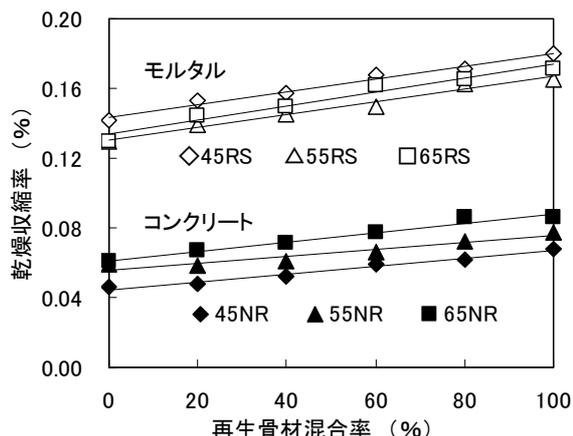


図 - 1 乾燥収縮率と再生骨材混合率の関係

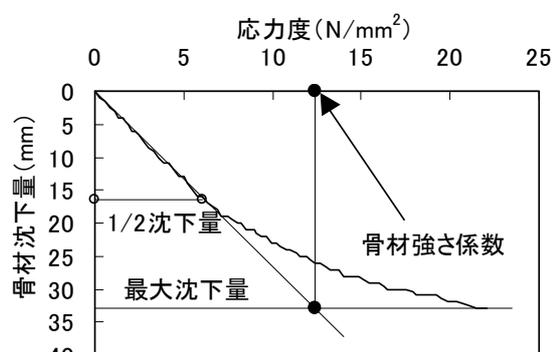


図 - 2 骨材強さ係数の求め方

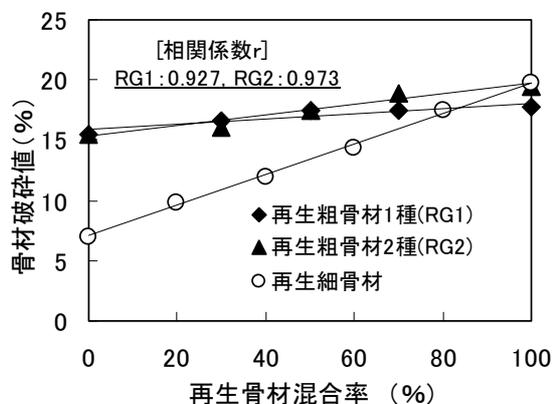


図 - 3 骨材破砕値と再生骨材混合率

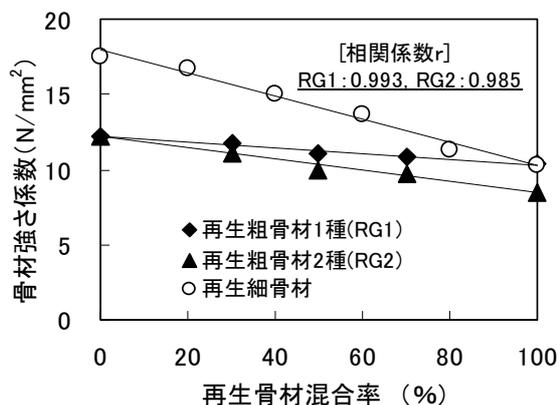


図 - 4 骨材強さ係数と再生骨材混合率

ことを考慮して、本論文では砕石のみを用いたコンクリートをそれぞれの水セメント比ごとの基準コンクリートと定義し、基準コンクリートと再生粗骨材を混合使用したコンクリートとの特性の差に着目して検討を行う。なお、再生細骨材モルタルについても、砕砂のみを用いたモルタルをそれぞれの水セメント比ごとの基準モルタルとし、前述のコンクリートの場合と同様の考え方で検討を行う。

粗骨材の骨材性能指標としては、基準コンクリートに使用した砕石（基準骨材とする）と、再生粗骨材 2 種と砕石とを混合した骨材の破砕値を用いて「骨材破砕指標  $I_c$ 」を、同様の考え方で両者の骨材強さ係数を用いて「骨材強度指標  $I_s$ 」を、式(1)および式(2)のように無次元化した指標として定義する。細骨材についても、粗骨材の場合と同じように式(1)および式(2)を用いて指標化する。

$$I_c = (H_r - H_s) / H_s \quad (1)$$

ここに、

$I_c$  : 骨材破砕指標

$H_r$  : 再生粗骨材と砕石、もしくは再生細骨材と砕砂を混合した骨材の破砕値(%)

$H_s$  : 基準骨材(砕石または砕砂)の破砕値(%)

また、

$$I_s = (S_r - S_s) / S_s \quad (2)$$

ここに、

$I_s$  : 骨材強度指標

$S_r$  : 再生粗骨材と砕石、もしくは再生細骨材と砕砂を混合した骨材の骨材強さ係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$S_s$  : 基準骨材(砕石または砕砂)の骨材強さ係数 (N/mm<sup>2</sup>)

### 3.4 骨材性能指標による乾燥収縮率の推定

一般に、骨材の強度や弾性係数が低いと、セメントペーストの収縮応力を骨材が拘束しきれず、複合材(コンクリートまたはモルタル)の

自己収縮ひずみや乾燥収縮ひずみが大きくなる。図 - 1 および図 - 3、図 - 4 に示したように、乾燥収縮率は骨材強度との関連性が高いと考えられるため、骨材自体の強度の違いを的確に表現している骨材破砕値もしくは骨材強さ係数を、(1)式および(2)式に定義した指標として用い、再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリート(両者をあわせて「複合材」とする)の乾燥収縮率の推定を試みる。

まず、基準骨材と再生骨材を混合することによって生じる乾燥収縮率の変化を、基準複合材からの収縮変化率  $DS$  とし、骨材性能指標を用いて(3)式または(4)式のように表現する。

$$DS = (1 - dsc \times I_c \times (1 - g)) \quad (3)$$

$$DS = (1 - dss \times I_s \times (1 - g)) \quad (4)$$

ここに、

$DS$  : 収縮変化率

$I_c$  : 骨材破砕指標

$I_s$  : 骨材強度指標

$g$  : 複合材容積に対する骨材の容積比

$dsc$ ,  $dss$  : 実験定数

$$dsc(mortar) = 0.314, \quad dsc(conc.) = 2.09$$

$$dss(mortar) = -1.39, \quad dss(conc.) = -1.98$$

以上より、基準複合材の乾燥収縮率、骨材性能指標、骨材容積比などを含めた乾燥収縮率の推定式として(5)式を提案する。

$$S_e = S_0 \times DS \quad (5)$$

ここに、

$S_e$  : 乾燥収縮率の推定値(%)

$S_0$  : 基準複合材(砕石のみを用いたコンクリートもしくは砕砂のみを用いたモルタル)の乾燥収縮率(%)

骨材強度指標を性能指標として用い、(2)式、(4)式および(5)式により推定した複合材の乾燥収縮率の推定値と測定値との関係を図 - 5 に示す。骨材性能指標として骨材強度指標を用いた

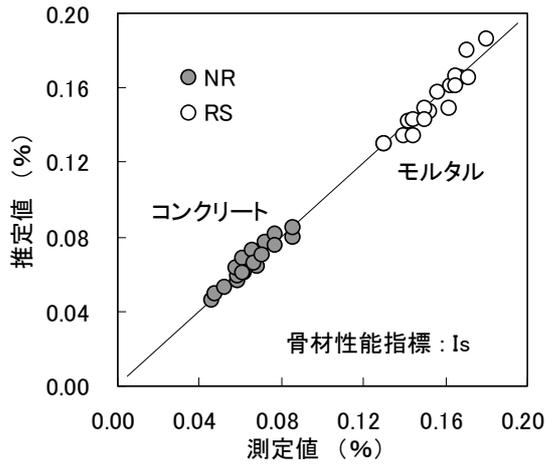


図 - 5 乾燥収縮率の推定値と測定値の関係

場合、乾燥収縮率の推定値の標準誤差は、再生細骨材モルタル(RS)では 0.0053%，再生粗骨材コンクリート(NR)では 0.0029%，同様に骨材破砕値を用いた場合には RS で 0.0046%，NR で 0.0029%と、いずれも高い推定精度が得られた。

これより、再生骨材コンクリートの乾燥収縮率の推定に、骨材破砕指標または骨材強度指標を性能指標として適用することは有効であることが確認できた。

### 3.5 理論式による骨材収縮率と骨材弾性係数

複合材の乾燥収縮率に影響を及ぼす要因としては、一般に単位水量や単位骨材量があげられるが、骨材性能指標として前述した骨材強度のほか、骨材自体の収縮率や弾性係数も重要な要因である。

そこで、実測値との適合性が高いとして二村によって提案されている、骨材および複合材の収縮率、骨材と複合材の弾性係数比および骨材容積比を含めた乾燥収縮率に関する理論式((6)式)<sup>6)</sup>を用い、骨材自体の弾性係数と収縮率を推定する。なお、モルタルの場合は、(6)式の「複合材」を「モルタル」として、また、「モルタル」を「ペースト」として適用すればよい。

$$\frac{S}{Sm} = \left(1 - \frac{Sg}{Sm}\right) \left[1 - g\right] \left[1 - \frac{m-1}{m+1}g\right] + \frac{Sg}{Sm} \quad (6)$$

ここに、

$S, Sm, Sg$  : 複合材,モルタル,骨材の収縮率

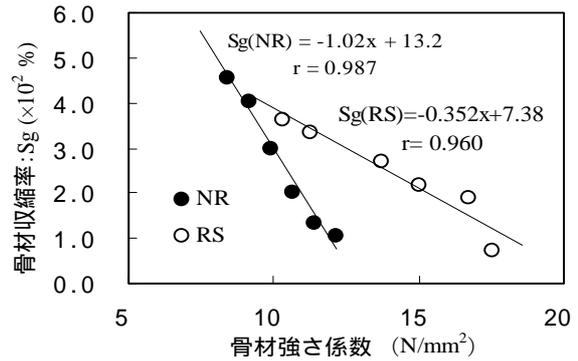


図 - 6 骨材収縮率と骨材強さ係数

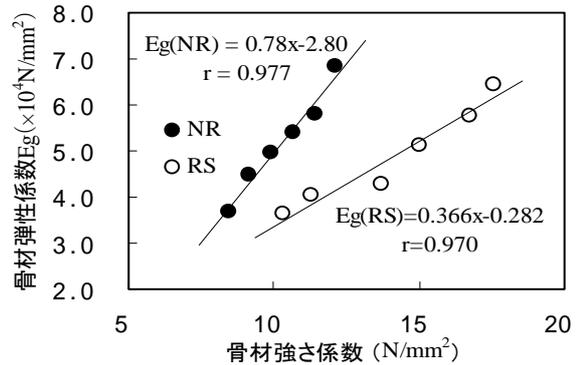


図 - 7 骨材弾性係数と骨材強さ係数

$g$  : 複合材容積に対する骨材の容積比 (%)

$m$  : 骨材とモルタルの弾性係数比

$$(m = Eg / Em)$$

$Eg, Em$  : 骨材,モルタルの弾性係数

ただし、骨材弾性係数  $Eg$  については、広範囲に適合する Hashin-Hansen 式((7)式)<sup>7)</sup>を用いた。

$$E = \frac{(1-g)Em + (1+g)Eg}{(1+g)Em + (1-g)Eg} Em \quad (7)$$

(6)式および(7)式によって推定された骨材収縮率  $Sg$  と骨材弾性係数  $Eg$  の有効性を確認するため、骨材強さ係数と  $Sg$  および  $Eg$  との関係を図 - 6 および図 - 7 に示す。理論式を用いて推定した骨材弾性係数と骨材収縮率は、骨材破砕試験によって得られる骨材性能指標との間に高い相関があった。

また、図 - 8 に再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率と骨材収縮率の関係を、図 - 9 にそれらの乾燥収縮率と骨

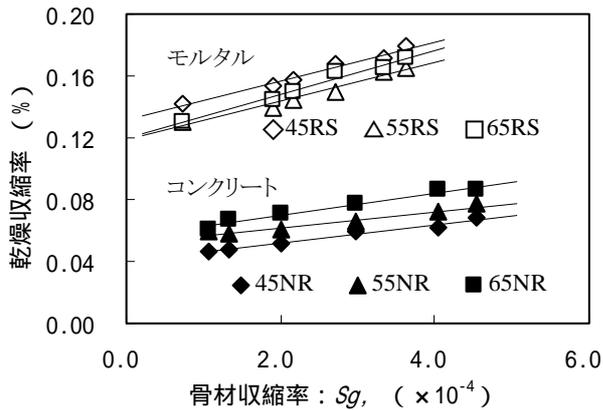


図 - 8 乾燥収縮率と骨材収縮率

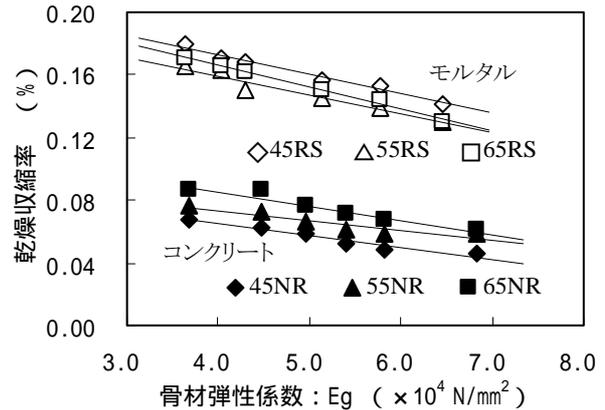


図 - 9 乾燥収縮率と骨材弾性係数

材弾性係数の関係を示す。再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率は、骨材収縮率および骨材弾性係数との間に関連性があり、骨材収縮率が大きく骨材弾性係数が小さい骨材を用いた場合に複合材の乾燥収縮率が大きくなるのがわかる。これより、理論式によって得られた骨材収縮率と骨材弾性係数は、実測することが難しく検証することは困難であるが、骨材強さ係数との相関が高いことや、モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮率との間に明快な関連性があることを考慮すれば、これらの値を絶対値として扱える可能性がある。

#### 4. まとめ

再生粗骨材コンクリートおよび再生細骨材モルタルの乾燥収縮率の推定手法、理論式を用いた骨材収縮率および骨材弾性係数の推定手法について検討し、以下のことを示した。

- (1) 骨材破砕試験から得られる骨材破砕値および骨材強さ係数を骨材性能指標として、再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率を推定する手法について示した。
- (2) 理論式から推定された骨材収縮率と骨材弾性係数の推定値は、再生細骨材モルタルおよび再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率との間に明確な関連性があり、これらの推定値を絶対値として扱える可能性があることを示した。

今後は、これらの骨材性能指標を用いた再生骨材コンクリートの中酸化抵抗性や透気性の推定手法など、主として再生骨材コンクリートの耐久性に関する検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土開発技術センター：再生コンクリートの利用技術の開発,1996(H8)年度報告書
- 2) 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集,Vol.23, No.1, 2001
- 3) 立松和彦・山崎順二・伊藤信孝・柴谷敬一：比重選別による高品質再生骨材の製造とコンクリートの性質,セメント・コンクリート, No.634, p.8, 1999
- 4) British Standard 812, Section 6.
- 5) 二村誠二・福島正人：各種の骨材を使用したコンクリートについて,その 1.各種の骨材の強度指標に関する予備的実験,日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.17-20, 1968.5.
- 6) 二村誠二：各種の骨材を使用したコンクリートについて,日本建築学会近畿支部研究報告集, pp1-6, 1975
- 7) Hansen,T.C. : Influence of aggregate and voids on modulus of elasticity of concrete, cement mortar, and cement paste, ACI Journal, Feb.1965.