

## 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力学特性

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、骨材の破碎試験およびすり減り試験を行い、骨材破碎値、骨材沈下量、骨材強さ係数およびすりへり減量が、骨材性能指標として適用できるかを検討した。さらに、実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圧縮強度および動弾性係数の推定を試みた。その結果、骨材破碎値および骨材強さ係数が骨材性能指標として適用できること、また、これらの指標を用いて圧縮強度と動弾性係数がほぼ推定できることがわかった。

**キーワード:** 再生骨材、骨材破碎値、骨材強さ係数、骨材性能指標、圧縮強度、動弾性係数

## 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。更に骨材資源が枯渇化してくると、将来的には様々な種類の骨材を構造物に適用することが余儀なくされることになる。

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方法によってしかコンクリートの性能評価ができない。現在、再生骨材の吸水率および安定性を指標とした品質基準(案)<sup>1)</sup>が建設省(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を確立することが望まれる。

そこで本研究は、まず骨材の性能を評価する手法を見だし、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指している。

本論文では、まず、骨材に関する試験として一般に知られている骨材破碎試験およびすりへり試験が、骨材の性能を評価するための指標として適用できるかについて検討した。次に、再生粗骨材と碎石を混合した再生骨材コンクリートの圧縮強度および動弾性係数を、骨材試験によって得られた骨材性能指標を用いて推定する手法について検討した。

## 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>2)</sup>である。なお、モルタル付着

\*1 (株)浅沼組技術研究所 建築工法・材料研究室 工修(正会員)

\*2 大阪工業大学講師 工学部建築学科 工修(正会員)

率は塩酸溶解法によって求めた。

## 2.2 実験の要因と水準

再生骨材コンクリートの水セメント比と骨材の組み合わせを表—2に示す。コンクリート供試体の作製には、粗骨材の品質を変化させるために、碎石に再生粗骨材2種を0%・20%・40%・60%・80%・100%の割合で混合したものを用いた。水セメント比は45%・50%・55%・60%・65%の5水準とし、碎石と再生粗骨材2種を上記の割合で混合した粗骨材と砕砂を組み合わせたコンクリート(NR)、同様に、混合した粗骨材と再生細骨材を組み合わせたコンクリート(RR)をそれぞれ作製した。供試体数は合計60種類である。

## 2.3 コンクリートの調合計画

再生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、粗骨材の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 $362\text{L}/\text{m}^3$ の一定とし、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計画した。

## 2.4 供試体の作製および養生

コンクリートの練混ぜは、容量30(L)のオムニミキサーを用いて行った。圧縮強度試験用供試体は、打込み後、温度 $20^\circ\text{C}$ ・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、試験材齢(4週)まで標準養生を行った。

## 2.5 試験項目および試験方法

粗骨材および細骨材の試験には、碎石に再生粗骨材を、また、砕砂に再生細骨材を、0%～100%の所定の割合で混合したものをそれぞれ使用した。

骨材の性能評価試験項目は、骨材破碎試験およびロサンゼルス試験機によるすりへり試験とした。骨材破碎値は、BS 812<sup>3)</sup>法に準じて行った。骨材破碎試験と同時に、載荷に伴うプランジャーの沈下量(以下「骨材沈下量」とする)を、変位計を用いて連続的に測定した。すりへり減量は、JIS A 1121に準じて測定した。

表—1 使用骨材の品質

使用骨材	表乾密度 $\text{g}/\text{cm}^3$	実積率 %	吸水率 %	モルタル付着率 %
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
碎石	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 再生骨材コンクリートの種類

W/C	45%・50%・55%・60%・65%
NR	砕砂(N) + 再生粗骨材2種(R) 混合率: 0%・20%・40%・60%・80%・100%
RR	再生細骨材(R) + 再生粗骨材2種(R) 混合率: 0%・20%・40%・60%・80%・100%

コンクリート供試体の試験項目は、圧縮強度、質量変化率および動弾性係数とし、それぞれ該当するJISに準じて試験を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 再生骨材コンクリートの圧縮強度および動弾性係数

細骨材を砕砂として、碎石に再生粗骨材2種を混合したコンクリート(NR)の材齢4週圧縮強度と再生粗骨材混合率の関係を図—1に、細骨材を再生細骨材として、碎石に再生粗骨材2種を混合したコンクリート(RR)の圧縮強度と再生粗骨材混合率の関係を図—2に示す。同様に、動弾性係数と再生粗骨材混合率の関係を図—3および図—4に示す。

圧縮強度と再生粗骨材混合率の間には、NR、RRとも各水セメント比ごとにほぼ良好な相関関係が認められた。また、動弾性係数と再生粗骨材混合率の間にも、各水セメント比ごとに良好な相関関係が認められた。いずれの場合も、再生粗骨材混合率が増大するほど圧縮強度や動弾性係数が低下した。

### 3.2 骨材性能試験

骨材性能指標は、単純な試験を行うことにより指標が導き出せ、骨材の特性を的確に表現できるものであることが必要である。また、コンクリートの特性と関連するものでなければなら

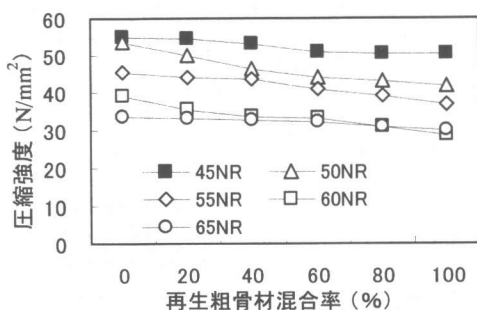


図-1 圧縮強度と再生粗骨材混合率の関係  
(砕砂)

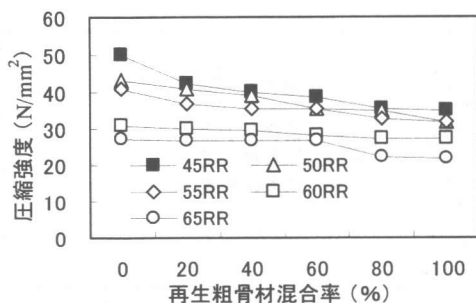


図-2 圧縮強度と再生粗骨材混合率の関係  
(再生細骨材)

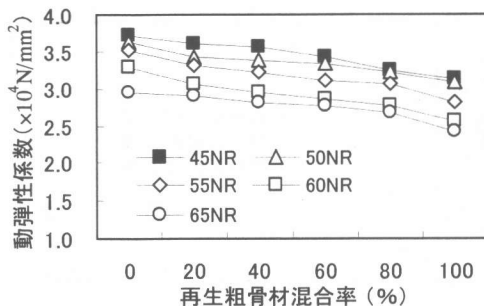


図-3 動弾性係数と再生粗骨材混合率の関係  
(砕砂)

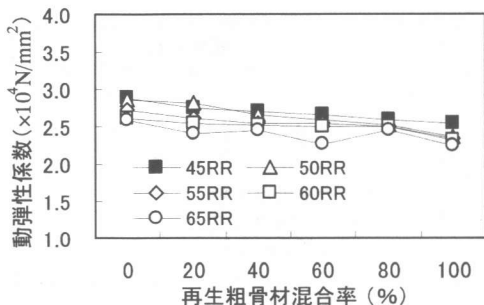


図-4 動弾性係数と再生粗骨材混合率の関係  
(再生細骨材)

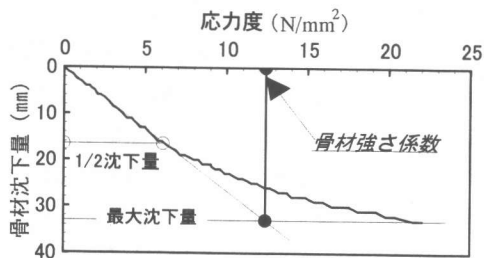
ない。これより、本実験では、コンクリートの物性と骨材自体の強度との関連性、試験の簡便性および結果の迅速性を考慮して、骨材破砕値、骨材沈下量およびすりへり減量について検討した。これらに加えて、既往の研究において骨材強度を表現する指標として有効とされる骨材の強さ係数<sup>4)</sup>についても検討した。本報での「骨材強さ係数」とは、図-5のように、破砕試験における骨材沈下量-応力度曲線の原点と最大沈下量の1/2の点を結んだ割線と、最大沈下量における応力度軸に平行な直線との交点の応力度で表される値とする。

図-6から図-9に、骨材性能指標と再生骨材混合率の関係を示す。各図には細骨材の場合の関係<sup>5)</sup>も併せて示した。

図-6に示す骨材破砕値は、細骨材、粗骨材とも再生骨材混合率との間に高い相関が得られた。図-9の骨材強さ係数においても骨材破砕値と同様であり、図中に示すように再生骨材混合率との相関が最も高くなった。

一方、図-7に示す骨材沈下量は、細骨材では高い相関が得られたが、粗骨材では骨材混合率との間に明確な関係を示さなかった。この理由としては、破砕試験においては、粗骨材は細骨材よりも実積率の影響を強く受け、砕石と比べて実積率の大きい再生粗骨材が多く混合された時に、骨材沈下量が小さくなる場合があるためと考えられる。また、図-8のすりへり減量は、粗骨材よりも細骨材の方が顕著ではあるが、骨材混合率が60～70%付近で極大値を示した。これは、骨材強度の高い砕石が再生粗骨材に対して鋼球と同じ役割を担い、砕石が再生粗骨材の脆弱部を粉砕したためと考えられる。

以上の結果から、異種の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、骨材自体の強度の違いを的確に表現しており、骨材性能を評価するための指標として優れたものであるといえる。また、再生骨材コンクリートの圧縮強度および動弾性係数は、骨材自体の強度に比例して増減している



図—5 骨材強さ係数の求め方

ことから、骨材破砕値と骨材強さ係数は、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

細骨材の種類によっても骨材の性能が異なることを考慮して、本論文では碎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力学特性の差に着目して検討を行うこととする。

これより、骨材性能指標としては、基準コンクリートに使用した碎石（基準粗骨材とする）と、再生粗骨材 2 種と碎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て定義する。

$$I_c = (Hr - Hs) / Hs \quad (1)$$

ここに、

$I_c$  : 骨材破砕指標

$Hr$  : 再生粗骨材と碎石を混合した骨材の破砕値(%)

$Hs$  : 基準粗骨材(碎石)の破砕値(%)

また、

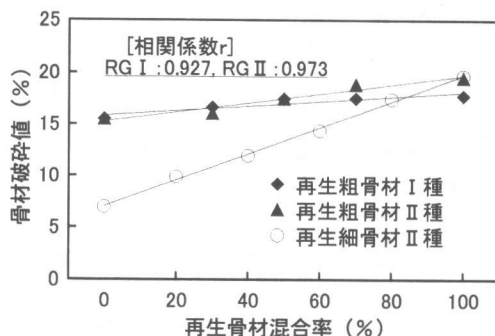
$$I_s = (Sr - Ss) / Ss \quad (2)$$

ここに、

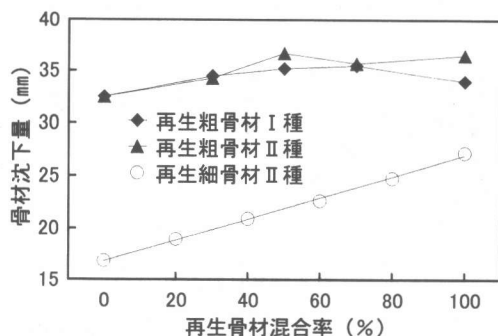
$I_s$  : 骨材強度指標

$Sr$  : 再生粗骨材と碎石を混合した骨材の骨材強さ係数(N/mm²)

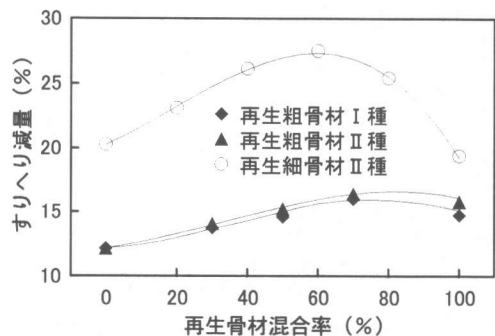
$Ss$  : 基準粗骨材(碎石)の骨材強さ係数(N/mm²)



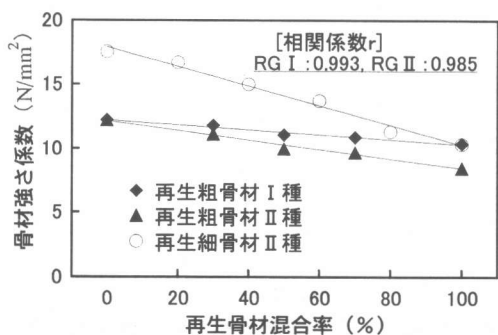
図—6 骨材破砕値



図—7 骨材沈下量



図—8 すりへり減量



図—9 骨材強さ係数

### 3.4 圧縮強度の推定

コンクリートの圧縮強度は、セメントペーストおよびモルタルの強度と粗骨材の強度に依存している。ここでは、図—6 および図—9 に示すように、骨材自体の強度の違いを表現していると考えられる骨材破碎値と骨材強さ係数を、式(1)および式(2)に定義した指標として用い、再生骨材コンクリートの圧縮強度の推定を試みる。一般に、コンクリートの圧縮強度はセメント水比との間に高い相関関係が認められる。本実験においても、碎石のみを用いた基準コンクリートの材齢 4 週における圧縮強度  $F_s(\text{N/mm}^2)$  は、砕砂を用いたコンクリート(NR)、再生細骨材を用いたコンクリート(RR)ごとに、セメント水比を用いて式(3)および式(4)によりほぼ正確に推定できる。

$$F_s(\text{NR}) = 33.3C/W - 16.2 \quad (3)$$

$$F_s(\text{RR}) = 33.8C/W - 23.9 \quad (4)$$

次に、再生粗骨材を碎石と混合することによって生じる圧縮強度の変化を、基準コンクリートからの強度変化率  $\Delta F$  とし、骨材性能指標を用いて式(5)または式(6)のように表現する。

$$\Delta F = (1 - \alpha_{fc} \times I_c \times g) \quad (5)$$

または、

$$\Delta F = (1 - \alpha_{fs} \times I_s \times g) \quad (6)$$

ここに、

$I_c$  : 骨材破碎指標

$I_s$  : 骨材強度指標

$g$  : 複合材(コンクリート)容積に対する  
粗骨材の容積比

$\alpha_{fc}, \alpha_{fs}$  : 実験定数

$$\alpha_{fc} : \text{NR}=1.69, \text{RR}=2.15$$

$$\alpha_{fs} : \text{NR}= -1.60, \text{RR}= -2.04$$

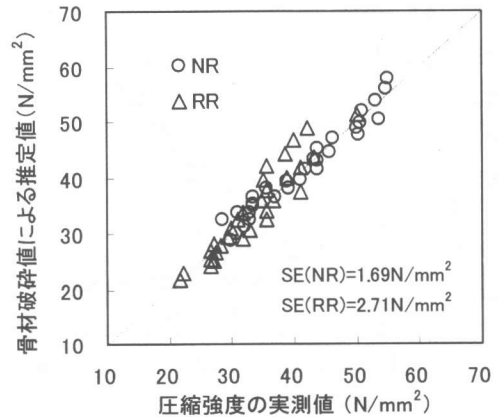
以上より、骨材性能指標、骨材容積比、水セメント比を含めた圧縮強度  $F_e$  の推定式として、式(7)を提案する。

$$F_e = F_s \times \Delta F \quad (7)$$

ここに、

$F_e$  : 圧縮強度の推定値 ( $\text{N/mm}^2$ )

$F_s$  : 基準コンクリートの圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )



図—10 骨材破碎指標による圧縮強度の推定値と実測値との関係

$\Delta F$  : 強度変化率 (式(5), 式(6))

図—10 に、骨材破碎指標を性能指標として用いて推定した再生粗骨材コンクリートの圧縮強度の推定値と実測値との関係を示す。

骨材性能指標として骨材破碎指標を用いた場合、圧縮強度の推定値の標準誤差は、NR で  $1.69 \text{ N/mm}^2$ 、RR で  $2.71 \text{ N/mm}^2$  であり NR の方が推定精度が若干高くなった。また、骨材強度指標を性能指標として用いて推定した場合でも、ほぼ同等の推定精度が得られた。これより、再生骨材コンクリートの圧縮強度の推定に、骨材破碎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 動弾性係数の推定

圧縮強度の場合と同様の考え方を適用し、碎石のみを用いた基準コンクリートの動弾性係数  $E_s (\times 10^4 \text{ N/mm}^2)$  は、セメント水比との間に良好な相関関係が認められたため、砕砂を用いたコンクリート(NR)、再生細骨材を用いたコンクリート(RR)ごとに、セメント水比を用いて式(8)および式(9)により推定できる。

$$E_s(\text{NR}) = 1.07C/W + 1.45 \quad (8)$$

$$E_s(\text{RR}) = 0.511C/W + 1.79 \quad (9)$$

次に、再生粗骨材を碎石と混合することによって生じる動弾性係数の変化を、基準コンクリートからの動弾性係数変化率  $\Delta E$  とし、骨材性

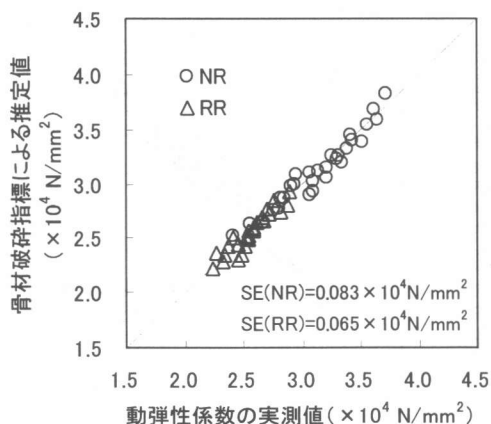


図-11 骨材破砕指標による動弾性係数の推定値と実測値との関係

能指標を用いて式(10)または式(11)のように表現する。

$$\Delta E = (1 - \alpha_{ec} \times I_c \times g) \quad (10)$$

または,

$$\Delta E = (1 - \alpha_{es} \times I_s \times g) \quad (11)$$

ここに,

$I_c$ : 骨材破砕指標

$I_s$ : 骨材強度指標

$g$ : 複合材(コンクリート)容積に対する粗骨材の容積比

$\alpha_{ec}, \alpha_{es}$ : 実験定数

$\alpha_{ec}$ : NR=1.74, RR=1.30

$\alpha_{es}$ : NR= -1.62, RR= -1.23

以上より, 骨材性能指標, 骨材容積比, 水セメント比を含めた動弾性係数  $E_e$  の推定式として式(12)を提案する。

$$E_e = E_s \times \Delta E \quad (12)$$

ここに,

$E_e$ : 動弾性係数の推定値 ( $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$ )

$E_s$ : 基準コンクリートの動弾性係数 ( $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$ )

$\Delta E$ : 動弾性係数変化率 (式(10), 式(11))

図-11に, 骨材破砕指標を性能指標として用いて推定した再生粗骨材コンクリートの動弾性係数の推定値と実測値との関係を示す。

骨材の性能指標として, 骨材破砕指標を用い

た場合, 動弾性係数の推定値の標準誤差は, NR で  $0.0827 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ , RR で  $0.0646 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  であり, 両者とも推定精度が高くなった。骨材強度指標を用いた場合も, 同等の推定精度が得られた。これより, 再生骨材コンクリートの動弾性係数の推定に, 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が有効であることが分かった。

#### 4. まとめ

再生骨材の性能を, 簡便な骨材試験を行うことによって指標化し, 得られた指標を基に再生骨材コンクリートの圧縮強度および動弾性係数を推定する手法について検討した結果, 以下のことが分かった。

1)粗骨材の性能を評価するための指標として, 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が有効であった。

2)骨材破砕指標および骨材強度指標を用いて, 再生骨材コンクリートの圧縮強度と動弾性係数を推定することが可能であった。

今後は, これらの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や耐久性などの推定手法について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) (財)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) 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
- 3) British Standard 812, Section 6.
- 4) 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.
- 5) 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, Vol.49, NO.10, pp.1085-1090, 2000.10.