

論文 RBSM (剛体ばねモデル) による混合骨材コンクリートの力学的性質の検討

村西 信哉^{*1}・佐伯 竜彦^{*2}

要旨:近年の骨材事情の悪化から,低品質骨材の有効利用や,最近 JIS 化されたスラグ骨材,再生骨材の利用促進が望まれている。しかしこれらの骨材は,コンクリートの所要性能の確保の観点から,単独使用せず混合骨材としての使用が予想される。本研究では混合骨材コンクリートの力学的性質の事前検討手法として,RBSM(剛体ばねモデル)の適用を試みた。各骨材の品質を考慮することで,実験結果と定性的には合致する解析結果が得られ,本手法の有効性を確認した。また,骨材品質のばらつきを把握することが,混合骨材コンクリートの力学的性質の評価には重要であると考えられた。

キーワード:混合骨材,スラグ骨材,低品質骨材,再生骨材,RBSM

1. はじめに

近年の骨材事情の悪化から,現行の品質規格から外れる低品質骨材の有効利用や,最近JIS化されたスラグ骨材(JIS A 5011)や再生骨材(JIS A 5021, JIS A 5023)の利用促進が望まれている。ここで言う低品質骨材とは,低密度・高吸水率あるいは安定性損失質量の大きいものである。これらの骨材の単独使用は,コンクリートの力学的性能および耐久性能の低下をもたらすと懸念されるため,他種骨材と混合使用することが現実的な対応と考えられる。骨材の品質がコンクリートの力学的性質に与える影響について多くの研究事例¹⁾がある一方,混合骨材コンクリートについては,必ずしも十分な知見が得られていない。

本研究の目的は,混合骨材コンクリートの力学的性質について,配合段階における簡易な事前検討手法を構築することである。各種骨材を組み合わせた混合骨材コンクリート供試体を作製し,ヤング係数試験および圧縮強度試験を実施した。また,事前検討手法の一つとしてRBSMの適用を試みその有効性を検討した。さらに,骨材品質のばらつきが混合骨材コンクリートの

力学特性に及ぼす影響について,RBSMを用いた解析的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で用いたセメントは,普通ポルトラン

表 - 1 骨材の物理的性質

	骨材名称(記号)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 損失質量 (%)
本 産 産	川砂(VS)	2.56	2.63	4.7
	電気炉徐冷酸化 スラグ細骨材(ES)	3.81	0.76	1.0
	再生細骨材(RS)	2.09	9.86	4.4
	ダム堆砂(LS)	2.36	4.89	0.7
本 産 産	砕石(VC)	2.56	0.84	9.4
	電気炉徐冷酸化 スラグ粗骨材(EG)	3.84	0.65	0.8
	再生粗骨材(RG)	2.28	5.42	36.5
	風化岩(WG)	2.62	2.89	23.8

表 - 2 骨材の組合せと混合率

	細骨材		粗骨材	スラグ骨材混合率
混合細骨材 コンクリート	ES	RS	VC	0, 25, 50, 75, 100%
		LS		
混合粗骨材 コンクリート	VS	EG	RG	0, 12.5, 25, 50, 75, 100%
			WG	

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 環境共生科学専攻 (正会員)

*2 新潟大学 工学部建設学科助教授 博士(工学) (正会員)

ドセメントである。細骨材は川砂(VS), 電気炉徐冷酸化スラグ細骨材(ES), 再生細骨材(RS), ダム堆砂(LS)を使用した。粗骨材には青梅産砕石(VC), 電気炉徐冷酸化スラグ粗骨材(EG), 再生細骨材と同一の原コンクリートから製造された再生粗骨材(RG), 骨材採取現場表層の風化岩(WG)を使用した。以後, 各骨材を ()内の記号で表記する。各骨材の物理的性質を, 表 - 1 に示す。ES, EG は鉄を多く含むため, 使用骨材の中でも特に密度が大きい。本研究では, RS, LS, RG, WG を低品質骨材と位置付け, それらと密度が大きく硬質な粒子を持つ ES, EG を混合したコンクリートの力学的性質について, 検討を行う。

2.2 配合

骨材の混合率は容積率とし, 混合比率が変化しても混合骨材の粒度が変化しないように粒度分布を調整した。即ち, 全ての細骨材は RS, 全ての粗骨材は VC に粒度分布を合わせた。骨材の組合せを表 - 2 に示す。以後, 各骨材の組合せたコンクリートを, RS/ES のように表記する。水セメント比は 55% とし, 目標空気量 $4 \pm 0.5\%$, 目標スランプを $8 \pm 1\text{cm}$ とした。

2.3 試験方法

打設後 24 時間で脱型し, 材齢 28 日まで 20 の水中養生を行った後, JIS A 1108 に従って圧縮強度およびヤング係数を測定した。また, 粗骨材粒子を無作為に 100 個取り出し, 各骨材の密度の分布を測定した。

3. 実験結果

3.1 ヤング係数

図 - 1 に, スラグ骨材混合率とヤング係数の関係を示す。スラグ骨材を混合することでヤング係数が増加し, EG100% が最もヤング係数が高い結果が得られた。また, 細骨材混合系および WG/EG では比較的単調増加しているのに対し, RG/EG は必ずしも同様ではない。これは, 再生骨材の付着モルタルが影響していると考えられる。本研究で用いた再生粗骨材は, 同一の

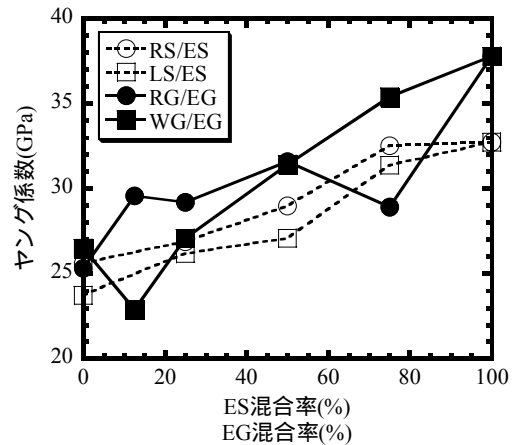


図 - 1 スラグ骨材混合率とヤング係数

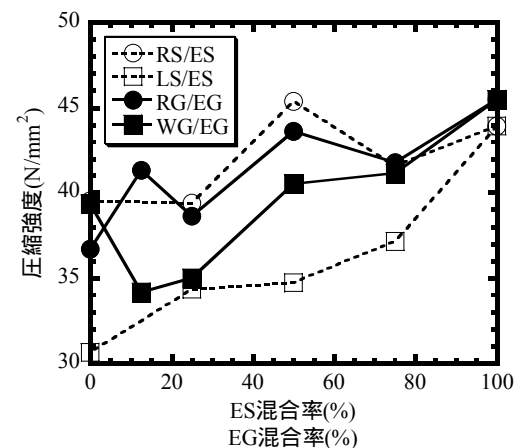


図 - 2 スラグ骨材混合率と圧縮強度

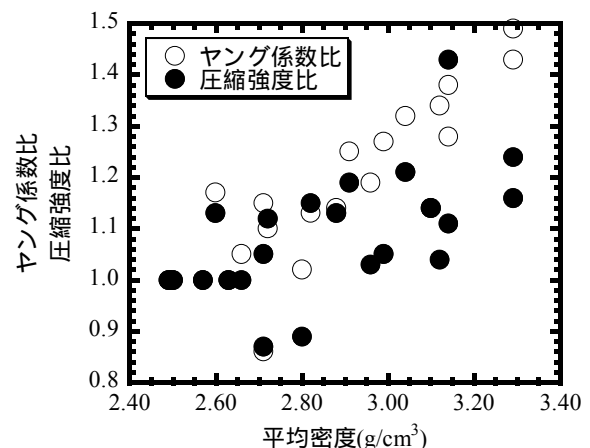


図 - 3 平均密度と圧縮強度比およびヤング係数比

コンクリートから製造されたものであるが, 付着モルタルの量は粒子毎に異なるため, 再生骨材個々の品質は広範囲にわたると予想される。このことが, 影響していると思われる。

3.2 圧縮強度

図 - 2 に, スラグ骨材混合率と圧縮強度の関

係を示す。ヤング係数同様，EG100%が最も圧縮強度が大きかった。ヤング係数も全配合中で最大であったことから，本研究で扱う骨材の中で，EG が最も力学的性質に優れた骨材と思われる。なお，EG100%はES100%に対し，ヤング係数の場合ほど圧縮強度が改善されない。粗骨材とモルタルの剥離が圧縮強度の増加を阻んだと思われる。また，RG/EG では混合率毎のばらつきが大きい。この理由は，ヤング係数での考察と同様に，品質が広範囲にわたる再生骨材中の低品質な粒子が影響したと考えられる。

3.3 平均密度と力学特性の関係

図 - 3 に，混合骨材の平均密度とヤング係数比および圧縮強度比の関係を示す。強度比は，低品質側の骨材を単独使用したコンクリートを基準としたものである。また平均密度は，骨材の混合比率を重みにした重み付き平均値である。図より，ヤング係数比は平均密度と高い相関が見られた。従って，ヤング係数は使用骨材の種類によらず，平均密度により配合の段階である程度の評価が可能と考えられる。一方，圧縮強度比については，ヤング係数比ほどの相関は見られなかった。骨材の品質は一般に，粒子毎に一定ではない。混在する低品質な粒子の存在がコンクリートの強度を左右することが考えられ，平均的物性で強度を評価することは難しいと考えられる。

3.4 骨材の密度の分布

骨材品質のばらつきを確認するため，骨材粒子個々の密度を求めた。結果を図 - 4 に示す。本研究で扱った混合骨材は，品質が大きく異なることが分かる。また，同一骨材においても粒子毎に品質が異なり，特に EG，RG は広く分布していることがわかる。従って，骨材品質に大きなばらつきがあると予想されるものは平均的物性だけでなく，品質の分布も考慮する必要があると考えられる。特に，粗骨材は細骨材に比べ粒径の大きさと個数の少なさから，品質のばらつきの影響が大きくなることが予想される。

4. RBSM による混合骨材コンクリートの力学的性質の検討

4.1 解析モデル

混合骨材コンクリートの製造において，骨材の種類と組合せは無限に存在するものであり，毎回実験的検討を行うには多くの労力を要する。事前に最適な骨材の組合せと混合率を把握することができれば，材料選定と配合設計の作業を大幅に省力化できる。

RBSMは要素毎に材料定数を設定することで，材料の不均質性を容易に表現できる数値解析手法である²⁾。本研究ではこの特徴に着目し，混合骨材コンクリートの事前検討手法として，RBSMの適用を試みた。

3.4の考察から，混合骨材コンクリートの解析対象を粗骨材混合系とする。そのため，コンクリートをモルタル，粗骨材，粗骨材 - モルタル境界相の 3 相複合材料とした。以後，粗骨材を単に骨材と表記する。要素分割例を，図 - 5 に

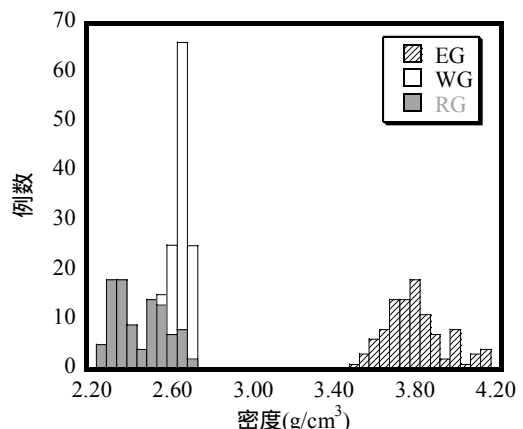


図 - 4 密度の分布

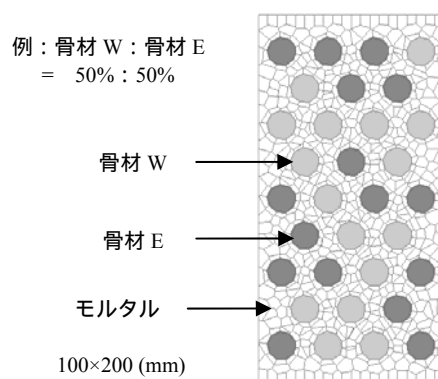


図 - 5 要素分割例

示す。EG, WG, RG を想定した骨材 E, W, R の物性を仮定し、実験と同条件のコンクリートを対象として検討を行った。骨材の粒径および個数は一定とした。骨材の位置は規則的に配置し、設定する混合比率に基づき骨材種類をランダムに決定した。

4.2 材料定数の設定

各骨材を単独使用したコンクリートから得た情報を基に、異なる混合比率のコンクリートの力学的性質が推定できれば、それは有用な検討手法となる。骨材自体の力学的性質を実験的に求めるのは困難であることから、本研究では各骨材を単独使用したコンクリートの圧縮強度から、各骨材の強度を逆推定した。骨材のヤング係数は、Hashin-Hansenモデル³⁾(以下、複合則とする)を用いて各骨材を単独使用したコンクリートのヤング係数から逆算した。式を以下に示す。

$$E_c = \frac{V_m E_m + (1 + V_a) E_a}{(1 + V_a) E_m + V_m E_a} E_m \quad (1)$$

ここで、 E_c : コンクリートのヤング係数(GPa)

E_m : モルタルのヤング係数(GPa)

E_a : 骨材のヤング係数(GPa)

V_m : モルタルの容積率(%)

V_a : 骨材の容積率(%)

(ただし、 $V_m + V_a = 100(\%)$)

さらに、骨材品質のばらつきを再現するため、上記の方法で材料定数を定めた後、粒子毎の品質の変動を仮定した。材料定数の分布形状は密度の分布形状と同様と仮定し、骨材のヤング係数と強度のばらつきは連動するものとした。骨材の材料定数を、表 - 3 に示す。表の各値は平均値を表している。なお、本研究の範囲ではEGは力学的性質に優れた骨材と考えられたため、骨材Eは破壊しないものとした。また、骨材の材料定数の分布の一例として、骨材Wの例を図 - 6 に示す。ばらつきの大きさは「大」・「小」の2段階を設定した。ばらつきの大きさは仮定した

表 - 3 骨材の材料定数

	ヤング係数(GPa)	圧縮強度(N/mm ²)
骨材 W	32	35
骨材 R	28	32
骨材 E	165	—

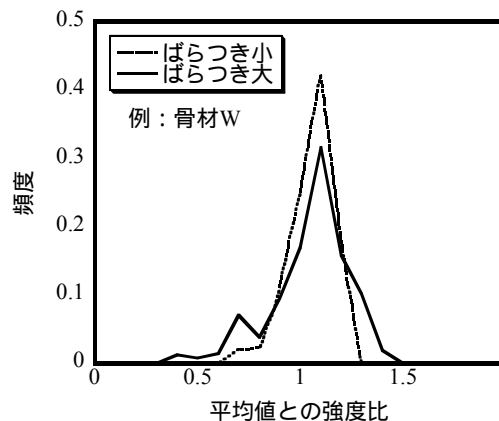


図 - 6 骨材の材料定数の分布

ものであり、物理的意味は持たない。モルタルのヤング係数は、以下の式から定める⁴⁾。

$$E_m = 7.7 \log(F_{cm}) - 5.5 \quad (2)$$

ここで、 E_m : モルタルのヤング係数(GPa)

F_{cm} : モルタルの圧縮強度(N/mm²)

4.3 では、仮定した条件で実現象の再現が可能か、検討を行った。なお、骨材の平均強度は $F_a = 40(\text{N/mm}^2)$ とした。材料定数の分布形状は図 - 6 の骨材W(ばらつき「小」と同様とした。4.4 では、材料定数のばらつきは「小」とし、混合骨材コンクリートのヤング係数、圧縮強度の検討を行った。また、骨材品質の分布が混合骨材コンクリートの力学的性質に及ぼす影響を検討するため、ばらつき「大」・「小」の2ケースの解析結果を比較し、検討を行った。

4.3 骨材とコンクリートの力学的性質の関係

モルタルの圧縮強度(入力値)とコンクリートの圧縮強度およびヤング係数(解析結果)の関係を、図 - 7 に示す。また、モルタルのヤング係数(入力値)を複合則に代入して求めたコンクリートのヤング係数も、併せて示す。骨材の材料定数をランダムに変更した計算を12回行い、平均値を解析結果とした。

コンクリートの圧縮強度は、骨材強度付近に達した後、傾きが小さくなっている。谷川ら⁵⁾によれば、モルタルマトリックスの強度が骨材の強度を上回ると、コンクリートの強度は骨材に支配されるとしている。本モデルでは、この現象を再現できているものと思われる。また、ヤング係数は複合則から求めたものと一致しており、複合則に従っていることが分かる。以上のことから、本モデルはコンクリートの力学的性質を再現できるものと思われる。

4.4 混合骨材コンクリート

本節では骨材種類と材料定数をランダムに変更した計算を 20 回行い、平均値を解析結果とした。各骨材を組み合わせたコンクリートを、骨材 W/E のように表記する。

(1) 解析結果

図 - 8, 図 - 9 は、骨材 E の混合率とコンクリートの圧縮強度およびヤング係数の解析結果を示したものである。併せて、実験結果も示す。解析の結果、ヤング係数は直線的に増加した。一方、圧縮強度は高強度の骨材 E を混合しても改善効果が現れにくい。圧縮強度は必ずしも骨材の混合比率に単純比例せず、この点については実験結果とも一致する。これは、混在する低品質な骨材粒子の存在が、コンクリートの力学的性質に大きく影響を及ぼしているためと考えられる。また、材料定数を実験値から逆推定したにも関わらず、骨材 E 混合率 0% において実験値と解析値が一致していない。これは、骨材の材料定数を逆推定により定めた後にばらつきを与え、平均強度を下回る骨材粒子が圧縮強度を低下させたためである。解析結果は必ずしも実験結果を忠実に再現できていないが、スラグ骨材の使用によりコンクリートの力学的性質が変化する傾向は、定性的には再現しているものと思われる。従って、4.2 で述べた材料定数の決定法も、本研究の範囲では有効と思われる。

(2) 骨材のばらつきの影響

粒子毎の骨材品質のばらつきの大きさが混合骨材コンクリートの力学的性質に与える影響を

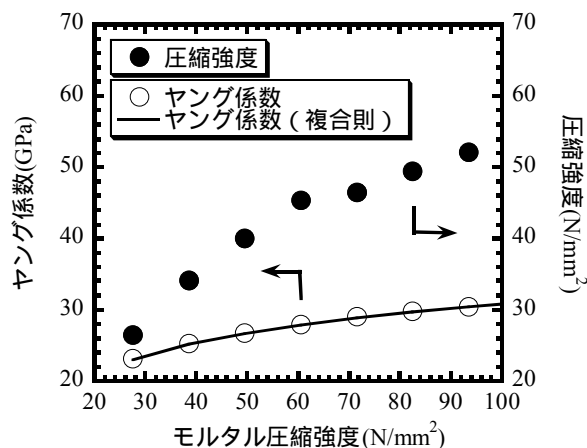


図 - 7 モルタルの圧縮強度とコンクリートの力学的性質

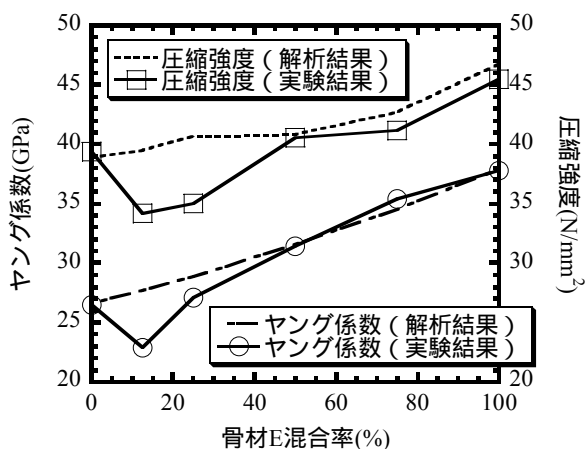


図 - 8 骨材 W/E の圧縮強度とヤング係数

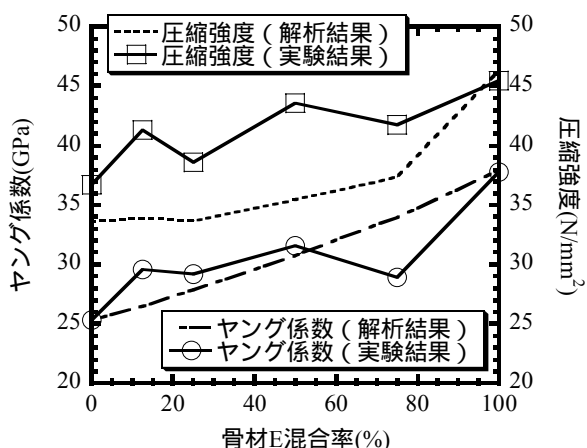


図 - 9 骨材 R/E の圧縮強度とヤング係数

検討するため、骨材の材料定数のばらつき「大」・「小」の 2 ケースを比較した解析結果を図 - 10 に示す。骨材 W/E, 骨材 R/E のいずれも、ばらつきを大きくすることで圧縮強度が低下した。また、骨材 E の混合率の増加に伴い、圧縮強度の差が小さくなっている。このことは、力

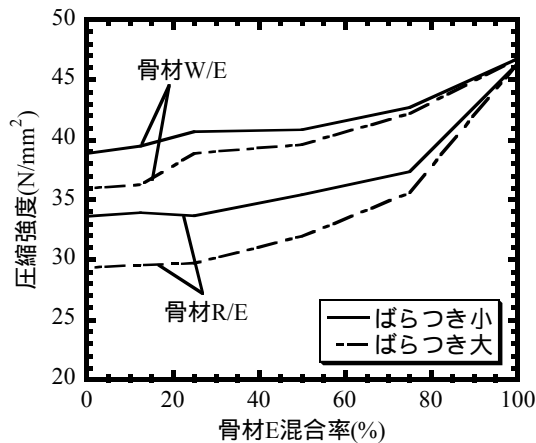


図 - 10 ばらつきの比較

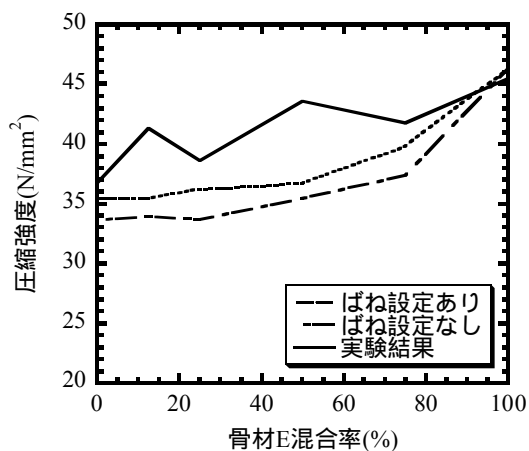


図 - 11 付着モルタルの設定による解析結果

学的に優れた骨材ほど、品質のばらつきの影響が小さくなることを表している。逆に、低品質な骨材ほどばらつきの影響が大きくなるため、その分布の把握が重要になることを示している。

(3) 付着モルタルを考慮した解析

3.1, 3.2 において, RG を混合使用したコンクリートのヤング係数および圧縮強度のばらつきは, 付着モルタルの存在によるものと考察した。本節(1)では, この付着モルタルの影響を適切に再現していなかった可能性がある。そこで, モルタル - 骨材 R の境界相のばねを付着モルタルの物性を仮定したばねに置換した。また, 骨材 R の材料定数は原骨材の物性を仮定したものとした。解析結果を, 図 - 11 に示す。骨材 E の混合率とコンクリートの圧縮強度において, 特別な傾向は確認できなかった。骨材境界相を表すばねの性質を変えるだけでは, 混合率毎のばらつき現象は再現できないと思われる。骨材自

身の強度および付着モルタルの適切な設定が, 重要だと思われる。

5. まとめ

本研究で得た結果を, 以下にまとめる。

- (1) 混合骨材コンクリートのヤング係数は, 骨材の平均密度によってある程度の事前評価が可能である。
- (2) 圧縮強度は骨材の平均的性質では十分な評価が難しく, 使用骨材それぞれの品質の把握が重要と考えられる。
- (3) 混合骨材コンクリートの圧縮強度は, 必ずしも高強度な骨材の混合率に単純比例しない。
- (4) 骨材を単独使用したコンクリートの力学的性質を基に RBSM の材料定数を設定することで, 定性的には混合骨材コンクリートの力学的性質を評価できるものと思われる。
- (5) 混合骨材コンクリートの力学的性質の評価には, 低品質側の骨材の品質分布の把握が重要になるとと思われる。

参考文献

- 1) 鶴田浩章：高強度コンクリートの圧縮強度・静弾性係数に及ぼす粗骨材物性の影響に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol.43, No.2, pp.76-83, 2005.2
- 2) 竹内則雄ほか：鉄筋コンクリート構造の離散化極限解析法, 丸善, 2005
- 3) Hansen. T. C.: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of ACI, Vol.62, No.2, pp.193-216, February, 1965
- 4) Nagai. K, et al.: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, October, 2004
- 5) 谷川恭雄ほか：高強度・超高強度コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす粗骨材品質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.209-214, 1991