

論文 コンクリート材料に対する粒子モデルの開発ならびに その圧縮破壊解析への応用

水野 英二^{*1}・伊藤 睦^{*2}・久保田 浩^{*3}・青木 健^{*4}

要旨：本研究では、コンクリートを構成するモルタルおよび骨材の応力 - ひずみ関係を表現するための二次元粒子モデルの開発を試みた。ここでは、粒子モデルを 6 本のトラス部材により構成し、トラス部材の圧縮・引張破壊の進展に伴うユニットモデルの破壊形態の検証を行った。続いて、材料の巨視的な材料強度を再現できるようにユニットモデルを構成するトラス部材の仮想的な材料定数を設定した。さらに、コンクリートを構成するモルタルおよび骨材に対して本粒子モデルを応用して、骨材率の変動がコンクリートの圧縮強度ならびに弾性定数に与える影響に関する FEM 圧縮破壊解析を実施した。

キーワード：粒子モデル，モルタル，骨材，応力 - ひずみ関係，骨材率，有限要素解析

1. はじめに

コンクリート構造物ならびに構造部材の非線形解析においては、二次元問題から三次元問題へとその解析対象が広がり、高度な数値解析手法によりコンクリート構造内部の詳細な破壊進展挙動（すなわち、実験レベルでは得ることができないミクロ的な挙動）などがある程度の精度でシミュレートできる段階にまで至っている。

しかし、コンクリート構造解析における大きな問題点の一つとして、解析に採り入れる構成モデルの選択がある。適用する構成モデルによっては、コンクリートのひび割れ発生ならびに圧縮軟化などにより数値計算の収斂性が低下し、解析が不能となるケースがある¹⁾。このような数値解析上の不安定性をなくし、ポストピーク領域に至るまで精度の良い解を得ることが可能な解析モデルならびに構成モデルを構築することが重要となる。

本研究では、ひび割れなどが原因となる数値計算上の収斂性の問題に関係なく、コンクリート構造の圧縮破壊、曲げ破壊およびせん断破壊解析において安定した解を得るために、コンクリート材料を構成するモルタルおよび骨材の

「応力 - ひずみ関係」を表現するための粒子モデルの構築を試みた。ここでは、モルタルおよび骨材といった材料の二次元粒子モデル（1 ユニット）を 6 本のトラス部材により構成し、材料の基本的な「圧縮破壊」、「引張破壊」、および「せん断破壊」挙動を表現できるように、トラス部材の微視（仮想）的な断面積，材料強度，ならびに弾性定数を同定し、それらユニットモデルの破壊形態の検討を行った。

さらに、構築した二次元粒子モデルをコンクリート供試体の FEM 圧縮破壊解析に応用して、骨材率の要因がコンクリートの圧縮強度ならびに弾性定数に与える影響に関する解析的研究を行うことにより、粒子モデルの有効性について検討した。

2. 二次元粒子モデルの構築

2.1 二次元粒子モデルの概要

コンクリート材料を構成するモルタルおよび骨材に対するユニットモデルの概要を図 - 1 に示す。本研究で提案するユニットモデルは、水平材，鉛直材ならびに斜材を含む 6 本のトラス部材から構成されており、その大きさ（縦，横

*1 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*2 中部大学 工学部都市建設工学科 講師 博士(工学)(正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

*4 岐阜大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

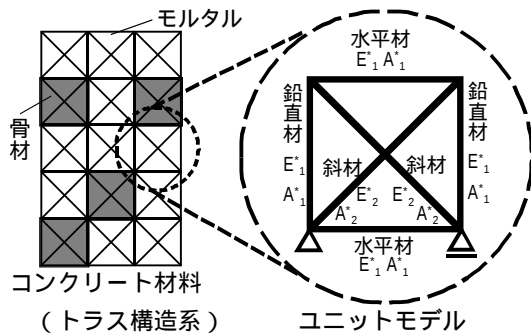


図 - 1 粒子モデルの概略

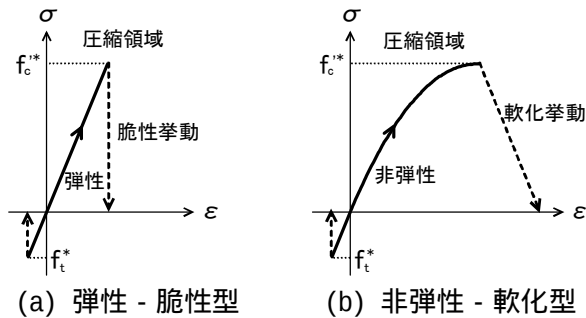


図 - 2 トラス部材の圧縮・引張挙動

および奥行き)は単位長さ 1 を基本とする。Jirasek ら²⁾により開発された二次元粒子モデルを三次元モデルへと拡張することにより、白井ら³⁾は切り欠きを有する三点曲げコンクリート供試体の引張軟化解析などに粒子モデルを応用している。これらの粒子モデルでは、粒子モデルを構成するトラス部材の応力 - ひずみ関係は引張軸力下では引張軟化挙動、圧縮軸力下では線形弾性挙動と仮定されているが、「圧縮」、「引張」および「せん断」を受ける粒子モデル自体の応力 - ひずみ挙動については明確な記述

がなされていない。

一方、本研究にて提案する粒子モデルでは、後述するように、ユニットモデルを構成するトラス部材(6本)の圧縮破壊および引張破壊の進展に関する検討を行うことにより、ユニットモデルの「引張破壊」に加え、「圧縮破壊」および「せん断破壊」を含めた3種類の破壊モードの再現が可能となる。

2.2 粒子モデル構築上の仮定

本研究の粒子モデルを構成するトラス部材の力学的性質は、以下のような仮定に基づく。

- (1) 部材は、軸方向力(引張力および圧縮力)のみを負担する。
- (2) 部材の圧縮および引張挙動は、図 - 2 に示すような2種類の応力 - ひずみ関係に基づく。すなわち、引張側では弾性 - 脆性挙動を、圧縮側では弾性 - 脆性挙動または非弾性 - 軟化挙動を呈する。

2.3 破壊モードの定義

図 - 3(a) ~ (c)に示すように、ユニットモデルの「圧縮」、「引張」および「せん断」に対して、以下のような3種類の破壊モードを定義する。この場合、ユニットモデルの下部節点(図中のトラス部材の両節点)では、それぞれヒンジ支持およびローラ支持と仮定している。なお、図中の f_c' , f_t , および τ はそれぞれ単位長さ 1 のユニットモデルの圧縮強度、引張強度お

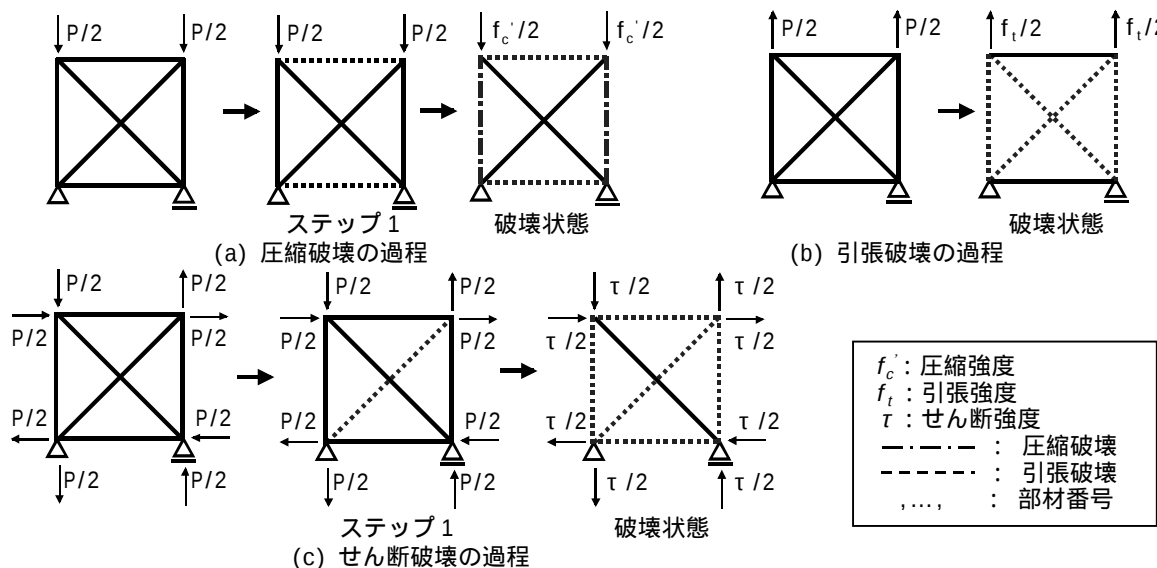


図 - 3 三種類の破壊モード

表 - 1 トラス部材の仮想的な諸元

仮定の諸元	水平材・鉛直材		斜材	
断面積 A^*	A_1^*	$\frac{(E-2G)+\sqrt{E^2+4G^2}}{4[(E+2G)+\sqrt{E^2+4G^2}]}$	A_2^*	$\frac{\sqrt{2}G}{(E+2G)+\sqrt{E^2+4G^2}}$
弾性定数 E^*	E_1^*	$E+2G+\sqrt{E^2+4G^2}$	E_2^*	$E+2G+\sqrt{E^2+4G^2}$
圧縮強度 f_c^*	f_{c1}^*	$\frac{f_c^*}{2A_1^*}$	f_{c2}^*	$\frac{2\sqrt{2}A_1^*+A_2^*}{A_2^*} \times \frac{f_t}{2A_2^*}$ $\sim \frac{f_c^*}{\sqrt{2}(2A_1^*+A_2^*)}$
引張強度 f_t^*	f_{t1}^*	$\frac{2\sqrt{2}A_1^*+A_2^*}{2\sqrt{2}A_1^*+2A_2^*} \times \frac{f_t}{2A_1^*}$	f_{t2}^*	$\frac{f_t}{4A_1^*+2\sqrt{2}A_2^*}$

注) E : 材料の巨視的な弾性定数 G : 材料の巨視的なせん断弾性定数
 f_c^* : 材料の巨視的な圧縮強度 f_t : 材料の巨視的な引張強度
 E_1^* : 水平・鉛直材の仮定の弾性定数 E_2^* : 斜材の仮定の弾性定数
 A_1^* : 水平・鉛直材の仮定の断面積 A_2^* : 斜材の仮定の断面積
 f_{c1}^* : 水平・鉛直材の仮定の圧縮強度 f_{c2}^* : 斜材の仮定の圧縮強度
 f_{t1}^* : 水平・鉛直材の仮定の引張強度 f_{t2}^* : 斜材の仮定の引張強度

表 - 2 材料定数

	モルタル	骨材
E (GPa)	30.0	60.0
G (GPa)	12.5	25.0
f_c (MPa)	50.0	180.0
f_t (MPa)	5.0	18.0

表 - 3 ユニットモデルの諸元

	モルタル	骨材
A_1^* (cm ²)	0.117	0.117
E_1^* (GPa)	94.05	188.10
f_{c1}^* (MPa)	213.5	768.6
f_{t1}^* (MPa)	15.68	56.43
A_2^* (cm ²)	0.188	0.188
E_2^* (GPa)	94.05	188.10
f_{c2}^* (MPa)	60.24	216.90
f_{t2}^* (MPa)	5.00	18.00

およびせん断強度である。

- ・「圧縮破壊モード」: ユニットモデルの破壊進展において、第一段階として上下 2 本の「水平材が引張破壊」し、次いで「鉛直材が圧縮破壊」する形態を「圧縮破壊モード」と定義する(図 - 3(a)参照)。
- ・「引張破壊モード」: ユニットモデルの破壊進展において、「全ての鉛直材および斜材が同時に引張破壊」する形態を「引張破壊モード」と定義する(図 - 3(b)参照)。
- ・「せん断破壊モード」: ユニットモデルの破壊進展において、第一段階として「斜材(部材番号)が引張破壊」し、次いで「全ての水平・鉛直材が同時に引張破壊」する形態を「せん断破壊モード」と定義する(図 - 3(c)参照)。

2.4 ユニットモデル構成部材の材料定数ならびに諸元

ユニットモデルを構成する 6 本のトラス部材の材料定数ならびに諸元に関しては、2.2 節ならびに 2.3 節に従い、各々の破壊モードにおいて実際の巨視的な材料強度を再現できるように、水平材、鉛直材ならびに斜材にはいずれも仮定の弾性定数 E^* 、断面積 A^* 、圧縮強度 f_c^* ならびに引張強度 f_t^* を設定した。ユニットモデルを構成する各トラス部材の仮定の弾性定数、断面積、および圧縮・引張強度を表 - 1 に示す。

2.5 ユニットモデルによるモルタルおよび骨材の応力 - ひずみ関係の検討

本モデルを検討するため、2.4 節で示したトラス部材の仮定の材料定数ならびに諸元を用いて、モルタルおよび骨材に対するユニットモデルの FEM 破壊解析を行い、3 種類の破壊モードに至るまでの応力 - ひずみ関係を求めた。解析に用いた材料定数(引張強度 f_t は圧縮強度 f_c の 1/10 と設定した)を表 - 2 に、ユニットモデルの諸元を表 - 3 に示す。ここでは、ユニットモデルの水平材、鉛直材および奥行きの大さを単位長さ 1 cm とし、斜材の長さを $\sqrt{2}$ cm として解析を実施した。本解析では、部材の応力 - ひずみ関係としては、図 - 2(a)に示す弾性 - 脆性破壊型のものを採用した。

これら解析結果を図 - 4 および図 - 5 に示す。なお、図中の挿し絵に示す線種はユニットモデル構成部材の破壊(引張または圧縮破壊)を意味する。圧縮破壊解析結果から分かるように、モルタルおよび骨材の応力 - ひずみ関係は、水平トラス部材の引張破壊に起因する縦ひび割れがユニットモデルに生ずる段階(おおよそ圧縮強度の 20 % ~ 30 %)まで初期弾性勾配(E_m および E_a)で線形挙動を、続いて鉛直材が圧縮破壊する最大圧縮強度までやや低い勾配で線形挙動を示す(図 - 4(a)および図 - 5(a)参照)。

一方、引張破壊解析では、応力 - ひずみ関係は、鉛直材ならびに斜材の同時引張破壊に起因するユニットモデル全体の横ひび割れ破壊が生ずる段階(引張強度)まで初期弾性勾配(E_m

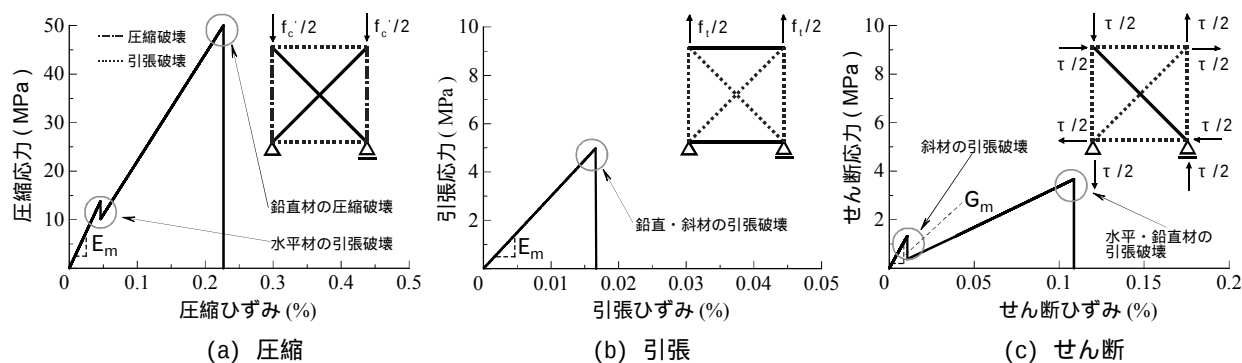


図 - 4 「圧縮」, 「引張」, および「せん断」の載荷状態における応力 - ひずみ関係 (モルタル)

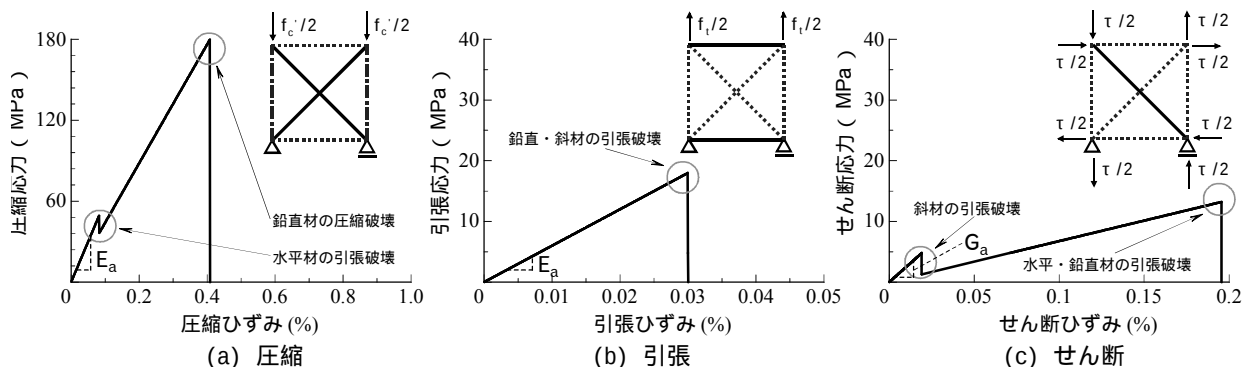


図 - 5 「圧縮」, 「引張」, および「せん断」の載荷状態における応力 - ひずみ関係 (骨材)

および E_a で線形挙動を示す (図 - 4(b) および図 - 5(b) 参照)。

また, せん断破壊解析における応力 - ひずみ関係は, 斜めトラス部材 (右上がりの斜材) の引張破壊に起因する斜めひび割れがユニットモデルに生ずる段階まで初期せん断弾性勾配 (G_m および G_a) で線形挙動を, 続いて鉛直材および水平材が同時引張破壊する段階まで低い勾配で線形挙動を示す (図 - 4(c) および図 - 5(c) 参照)。本解析から得られるせん断破壊強度は, モール・クーロンによる理論値と比較して, おおよそ 80 % の強度を示した。

3 ユニットモデルのコンクリート圧縮破壊解析への応用

3.1 解析の概要

本研究で提案した二次元粒子モデルをコンクリート供試体の圧縮破壊解析に応用する。ここでは, コンクリートを構成するモルタルおよび骨材の粒子モデル (1 ユニット) を組み合わせることにより, 異なる骨材率 (0 % ~ 100 %) を有するコンクリート供試体の FEM 圧縮破壊解

表 - 4 材料定数と材料強度

	弾性定数 E (GPa)	圧縮強度 f_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)
モルタル	23.30	54.3	5.43
骨材率 (10 %)	55.89	180.0	18.00
骨材率 (20 %)	54.93	180.0	18.00
骨材率 (30 %)	55.42	180.0	18.00
骨材率 (40 %)	54.98	180.0	18.00
平均	55.30	180.0	18.00

析を実施し, 解析結果と実験結果とを比較し, 圧縮強度ならびに弾性定数の検討を行った。

3.2 コンクリート供試体の概要ならびに材料定数

コンクリート供試体の寸法を縦 20 cm × 横 10 cm, ユニットモデルの単位長さを 1 cm (奥行き 1 cm) とした。また, 表 - 4 に示すようなモルタルおよび骨材の弾性定数, 圧縮強度ならびに引張強度を設定した。ここでは, モルタルならびに骨材 (骨材率 10 % ~ 40 %) の弾性定数およびモルタルの圧縮強度は川上⁴⁾の実験値を用い, 骨材率 50 % 以上の供試体に対する各弾性定数は骨材率が 10 % ~ 40 % までの供試体の各弾性定数の平均値とした。なお, 骨材粒径は 1 cm (均一), 骨材の圧縮強度は 180 MPa, 各材料の引張強度は各々の圧縮強度の 1/10 とした。

3.3 解析モデル

図 - 6 に示すように、本解析モデルは計 200 のユニットモデルにより構成され、軸圧縮力（強制変位）を作用させた際、均一材料の供試体では変形が左右対称に生ずるように境界条件（この場合は、端面摩擦がない境界条件）を設定した。また、コンクリート供試体の分割例として、骨材率 20 %、40 %、60 % および 80 % を有する供試体の分割モデルを図 - 7 に示す。ここでは、ランダム発生原理を用いて、骨材の配置を設定した。

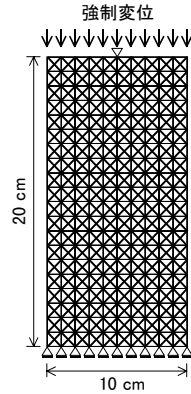


図 - 6 解析モデル

□: モルタル ■: 骨材

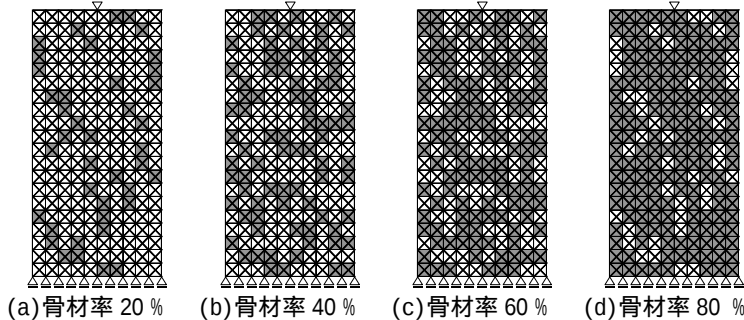


図 - 7 分割モデル（一例）

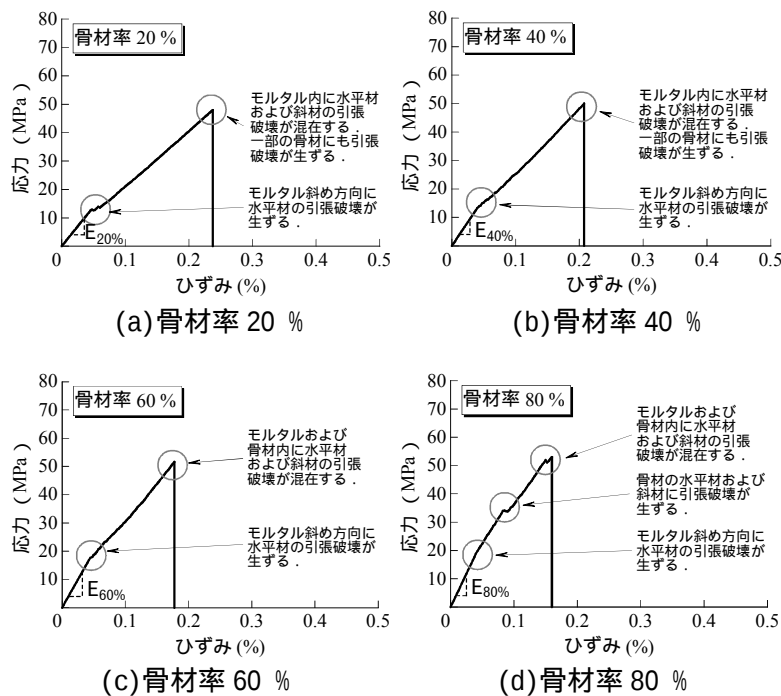


図 - 8 応力 - ひずみ関係（一例）

3.4 解析ケース

骨材率（0 %～100 %間で 10 %ごとに変化）を 11 水準、各骨材率ごとに骨材配置を 4 水準設定し、計 38 ケースの FEM 圧縮破壊解析を行い、骨材率の変動による圧縮強度ならびに弾性定数に与える影響について検証した。

3.5 解析結果および考察

(1) 応力 - ひずみ特性と破壊の進展

図 - 7 に示す骨材率 20 %、40 %、60 % および 80 % の分割モデルに対する応力 - ひずみ曲線を図 - 8 に示す。解析結果から、骨材率・配置に関係なく、圧縮強度の約 30 % 時点で骨材周辺のモルタルを構成する水平材がまず引張破壊し、その引張破壊（ひび割れ）がモルタル間を斜め方向に伝播することを確認した。なお、骨材率が 60 % および 80 % と高い場合には、骨材の水平材および斜材にも引張破壊が生ずる。続いて、最大圧縮応力時ではモルタル（骨材率が高い場合には骨材にも）にて水平材および斜材の引張破壊が混在する状態となり、最終的にはモルタルの鉛直材の圧縮破壊が生じて供試体全体が破壊することが分かった。

(2) 骨材率と圧縮強度

図 - 9 から分かるように、骨材率が 80 % までは、解析結果はモルタルの圧縮強度よりも低い強度を示す傾向にある。本解析結果（端面摩擦を考慮していない）は川上⁴⁾による実験結果と良い一致を示した。また、モルタルおよび骨材など異種の強度を有する材料を組み合わせると、複合材料の圧縮強度は図 - 9 に示すような変動を呈することが分かった。

(3) 骨材率と弾性定数

複合材料の弾性定数の評価に対しては、いくつかの複合モデルが提案されている。その中で精緻と

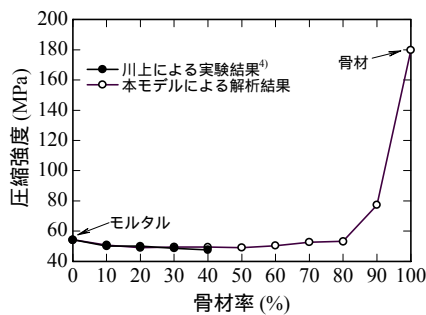


図 - 9 骨材率と圧縮強度の関係

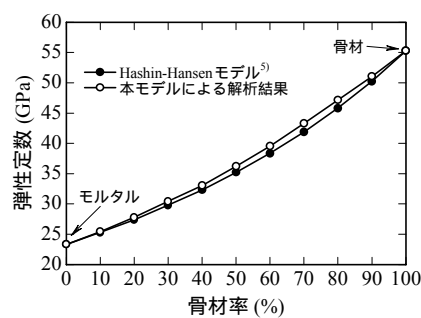
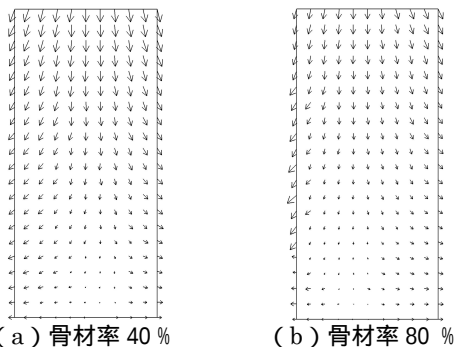


図 - 10 骨材率と弾性定数の関係



(a) 骨材率 40 % (b) 骨材率 80 %
図 - 11 最大荷重時の変形図 (一例)

される Hashin - Hansen モデル式⁵⁾を比較の対象として用いた。図 - 10 より分かるように、解析による弾性定数 (○印) は、骨材率の増加に伴いほぼ一定の曲率で緩やかに増加する傾向にある。この傾向は複合理論値 (●印) と一致し、本モデルの有効性を確認することができた。

(4) 最大荷重時の変形図

解析結果の一例として、骨材率 40 %および 80 %を有する供試体に対する最大荷重時の変形図 (解析で得られた変位を 20 倍に拡大) を図 - 11 に示す。ここでは、骨材率に関係なく側方への変形による破壊状況が観察できる。

4. まとめ

本研究をまとめると以下のようなものである。

- 1) コンクリート材料を構成する「モルタル」および「骨材」に対する粒子モデル (ユニットモデル) の構築を試みた。
- 2) ここでは、材料の基本的な「圧縮破壊」、「引張破壊」および「せん断破壊」挙動を再現するため、ユニットモデルを構成するトラス部材の微視的な材料定数を設定し、各種破壊モードに至るまでのモルタルおよび骨材モデルの応力 - ひずみ挙動を検証した。

3) モルタルおよび骨材に粒子モデルを用いたコンクリートの FEM 圧縮破壊解析において、「骨材率と圧縮強度」との関係は川上による実験結果と良い一致を示した。

4) また、「骨材率と弾性定数」との関係は Hashin - Hansen モデル式による複合理論値とほぼ一致した。

5) これらの解析結果より二次元粒子モデルの有効性を確認することができた。

謝辞：本研究は、平成 16 年度日本私立学校振興・共済事業団の学術研究振興資金ならびに平成 16 年度土木学会中部支部調査研究委員会ワークショップ助成金により行ったことを記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉田幸夫, 畑中重光, 水野英二: Drucker-Prager 型構成則を用いた円柱コンファインドコンクリート供試体の圧縮破壊 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, No.587, pp.155-162. 2005.1
- 2) Jirasek, M and Bazant, Z. P. : Macroscopic fracture characteristics of random particle systems, International Journal of Fracture, Vol. 69, pp. 201-228, 1994/1995
- 3) 田嶋和樹, 白井信明, 森泉和人: コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響に関する引張軟化解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No.2, pp.175-180, 2003
- 4) 川上英男: 碎石コンクリートの弾性係数評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.303-308, 2002
- 5) Hansen, T. C. : Theories of multi-phase materials applied to concrete, cement mortar and cement paste. "The Structure of Concrete," Proceedings of an International Conference, London, Sept., 1965