

論文

[1081] ミクロ的アプローチによるコンクリート破壊挙動の実験的研究

山田浩司^{*1}・川上正史^{*2}・Farahat A.M.^{*3}・二羽淳一郎^{*4}

1. はじめに

コンクリート等の非均質材料では、ミクロ的な挙動の解明がその構造物全体の挙動（マクロ挙動）を研究する上で重要な意味を持つ。従来のミクロモデル [1][2][3] においては、ミクロひずみ—マクロひずみ関係、ミクロ応力—ミクロひずみ関係を仮定して解析している。前報 [4] では、鋼を粗骨材に見立てた実験結果を報告したが、ミクロのポストピーク挙動を完全にとらえることができなかった。

そこで本研究では、一般的にコンクリートの粗骨材として使用される材料により近い材料として、花崗岩を用いた。さらに、コンクリートを水、セメント、細骨材からなるモルタル層と粗骨材で構成されていると理想化した供試体を作成、圧縮試験を行った。そして、これまでの研究 [4] で得られなかったミクロのポストピーク挙動を得、従来のミクロモデルの仮定を検証した。また、得られたミクロ挙動からミクロのパラメータ（ヤング係数 E_n 、最大応力時ひずみ ε_o ）を測定した。

2. 従来の解析的研究における仮定

2.1 ミクロの応力 σ_n —ひずみ ε_n 関係

従来の解析においては、ミクロの応力 σ_n —ひずみ ε_n 関係を、線形弾性 [1]、非線形弾塑性 [2] などさまざまな関数で仮定してきた。Farahat, 呉, 田辺 [3] は、Bazant らのように、ひずみの増大とともにあるピーク値に応力が漸近する関係以外に、次式で示すようなポストピーク領域で軟化挙動を示す応答が必要だとしている（図-1）。

$$\sigma_n = E_n \varepsilon_n \exp [-K |\varepsilon_n|^p] \quad (1)$$

ここで、

$$K = \left| \frac{1}{\varepsilon_o} \right|^p \quad (2)$$

E_n : ミクロのヤング係数

ε_o : ミクロのピーク応力に対応するひずみ,

p : 軟化曲線を支配する材料パラメータ、である。

本研究では、上述の構成則（式(1)）を実験値と比較し検証しようと試みた。

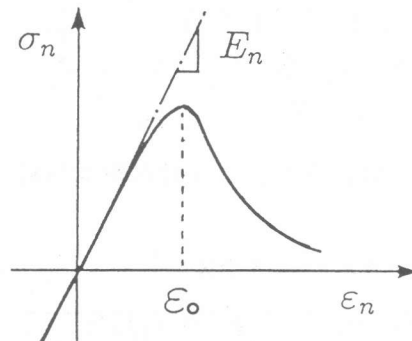


図-1 ミクロの応力—ひずみ関係の仮定

2.2 ミクロひずみ ε_n —マクロひずみ $\bar{\varepsilon}_{ij}$ 関係

従来のミクロ的アプローチによる解析 [1][2][3] では、粗骨材間のミクロひずみ ε_n と供試体全体のマクロひずみ $\bar{\varepsilon}_{ij}$ とを、次式で関連づけて解析を行ってきた。

本研究では、このような仮定が実際のコンクリートの挙動においても成り立っているかどうかの検証から始めて、Microplane モデルの妥当性の検討を行った。

^{*1}名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

^{*2}（株）鴻池組技術研究所、工博（正会員）

^{*3}名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

^{*4}名古屋大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

$$\varepsilon_n = \bar{\varepsilon}_{ij} n_i n_j \quad (3)$$

ここに、 n_i 、 n_j : 骨材間の接触面の法線と鉛直方向との方向余弦である。

3. 実験概要

3.1 実験供試体

水、セメント、細骨材からなるモルタル層と粗骨材とで構成されているコンクリートをシミュレートするため、本実験では図-2、3に示すようなモルタル層の中に粗骨材に見立てた円柱状花崗岩を等間隔に埋め込んだ供試体を用いた。本研究では、一般的にコンクリートの粗骨材として用いられる材料により近い材料として、花崗岩を粗骨材として採用した。そして、粗骨材間のモルタル層の厚さがマイクロ挙動に及ぼす影響を知るために、粗骨材間の距離が5mmと10mmの二種類の供試体について実験を行った。実験供試体は、図-2、3に示すような高さ164mmと182mm、幅140mm、奥行き40mmのコンクリートプレートである。

実験供試体に用いたモルタルの配合を、表-1に示す。

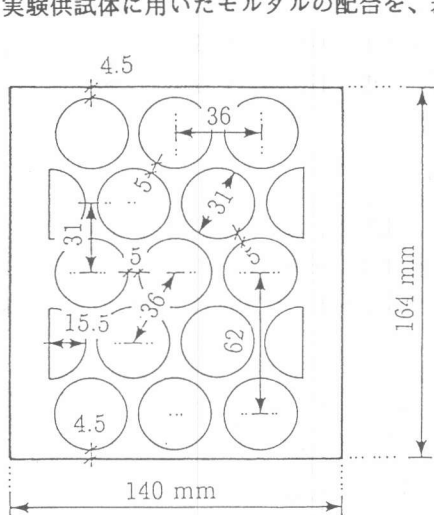


図-2 供試体寸法 (骨材間距離5mm)

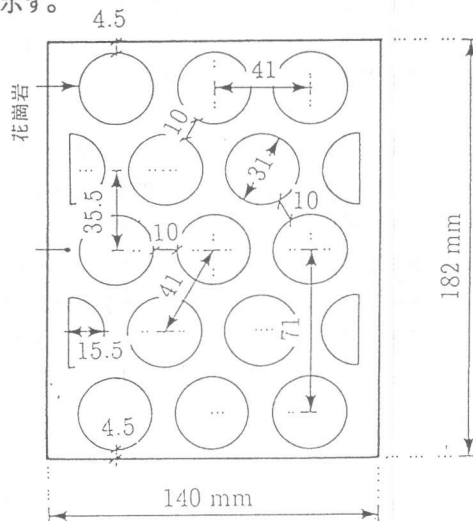


図-3 供試体寸法 (骨材間距離10mm)

表-1 モルタルの配合表

圧縮強度 (MPa)	単位量 (kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
44	304	552	1380

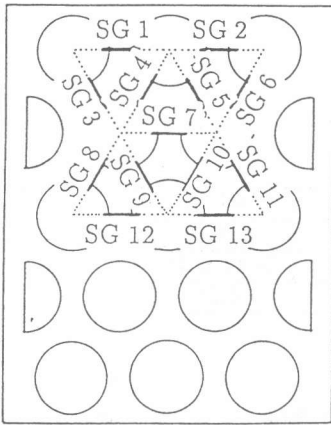
3.2 ミクロひずみ、ミクロ応力の測定

本実験では、コンクリートの各粗骨材間のひずみをマイクロひずみ、各粗骨材間の応力をマイクロ応力と定義し、測定を行った。

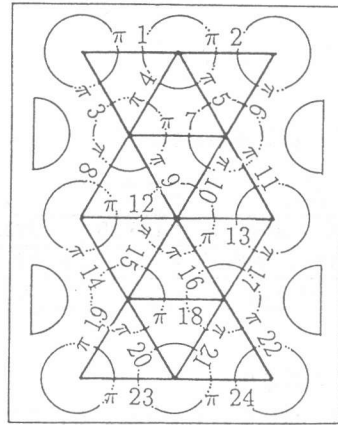
(1) ミクロひずみ

マイクロひずみは、粗骨材間のモルタル部分上に設置した5mm及び10mmのひずみゲージと粗骨材の中心間に設置した π ゲージ (メカニカルゲージ) より測定した (図-4、5)。マイクロひずみは、その隣接する粗骨材の配置により、3つに分類される。すなわち、各マイクロひずみの存在す

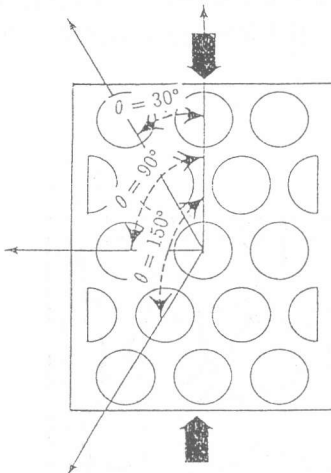
る粗骨材間のマイクロ平面の法線ベクトルが鉛直方向とのなす角度 θ によって、 $\theta = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ の三方向のマイクロひずみが存在するということである（図－6）。



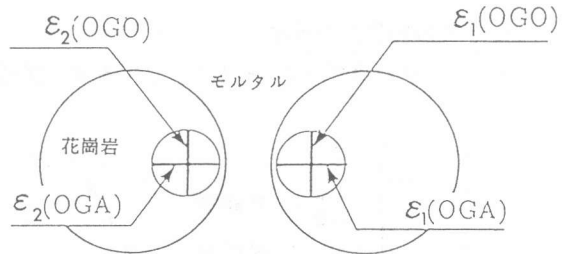
図－4 ひずみゲージの配置



図－5 π ゲージの配置



図－6 接触の角度



図－7 ミクロ応力の測定方法

(2) ミクロ応力

ミクロ応力を直接測定することは出来ないので、次のような方法により計算した値をミクロ応力とした。すなわち、骨材間のマイクロプレーンに作用する力は、作用反作用の原理から、骨材に作用している力に等しいとして、骨材の応力を測定することにした。まず、マイクロひずみ測定用のひずみゲージに隣接する円柱状花崗岩の表面に、垂直な二方向に長さ 2mm のひずみゲージを設置した（図－7）。表－2 に示すように花崗岩は、モルタルに比べて高強度、高剛性である。従って、このコンクリート供試体の破壊挙動においては、花崗岩は弾性的挙動を示すと思われる。よって、円柱状花崗岩に貼付されたひずみゲージにおいて、粗骨材間のマイクロ平面に垂直な方向のひずみの値を $\epsilon_{(OGA)}$ ，マイクロ平面の接線方向のひずみを $\epsilon_{(OGO)}$ とすると、その点における応力の値が次式のように表される。

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu^2} \{ \epsilon_i(OGA) + \nu \epsilon_i(OGO) \} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

ここで、 E ：花崗岩のヤング係数、 ν ：花崗岩のポアソン比である。

式(4)の σ_i について、マイクロひずみの両端の円柱状花崗岩上の値の平均をとることで、3.2(1)で測定したマイクロひずみに対応するマイクロ応力が次のように得られる。

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \{ \sigma_1 + \sigma_2 \} \quad (5)$$

表-2 花崗岩の材料定数

No.	1	2	3	平均
圧縮強度 (MPa)	163.20	123.10	115.10	134.00
ヤング係数 (MPa)	-	61.70×10^3	58.00×10^3	59.90×10^3
ポアソン比	-	0.24	0.16	0.20

3.3 実験方法

本研究では、ポストピークにおけるひずみ軟化域を正確に測定するために、高剛性試験機を用いて、変位制御(0.0015mm/sec)による圧縮試験を行った。

また、3.2のマイクロ挙動を実験供試体全体のマクロ挙動と比較するために、供試体側面に縦方向に設置したひずみゲージからマクロの鉛直方向ひずみ ε_{11} を、横方向に設置した変位計よりマクロの横方向ひずみ ε_{22} を測定した。

4. 実験結果及び考察

4.1 ミクロひずみ ε_n －マクロひずみ ε_{ij} 関係

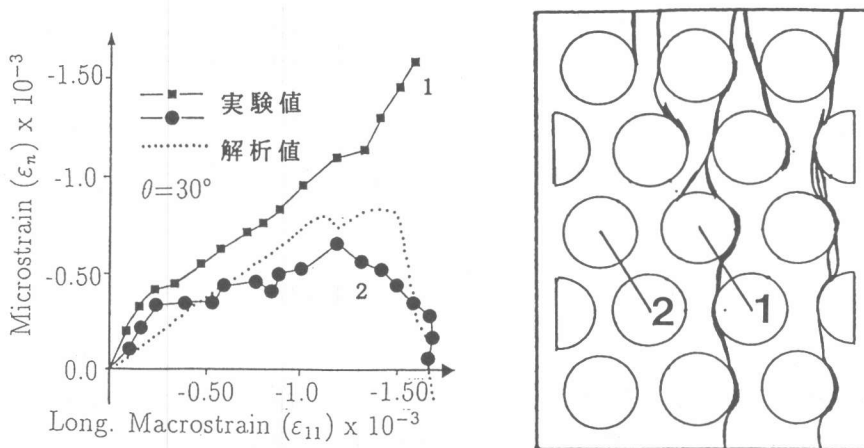


図-8 ミクロひずみ－マクロひずみ関係 (骨材間距離 10mm, $\theta = 30^\circ$)

ε_{ij} は供試体全体の変形から定義されるマクロひずみであり、 n_i, n_j は対象とするマイクロプレーンによって一義的に規定される量であるので、マイクロひずみとマクロひずみには式(3)に示される1対1の対応がなければならない。しかし実験の結果、図-8に示したように、ピークまでは確かに1対1の対応をなしているが、ピーク以降はひずみが分岐し、除荷側のひずみと載荷側のひずみが存在することが示された。これは、コンクリート内部において局所化が起こっていることを示している。一方解析値(式(3))は、各測定値の平均の値を表していると思われる。即ち、この事実は、従来のMicroplaneモデルの仮定が、ピーク以降は適合しないことを示している。

4.2 ミクロの応力 σ_n - ひずみ ϵ_n 関係

ミクロ応力 σ_n - ミクロひずみ ϵ_n 関係の代表例を図-9, 10に示した。この図の特徴は、以前の研究[4]で得られなかったミクロのポストピーク挙動が得られたことを示しており、これによってミクロ挙動のほぼ全容が明らかになった。

骨材間のモルタル層の厚さに関わらず、ミクロモデル[3]の解析値と実験値は良好な一致をみた。なお、骨材間のモルタルの厚さが異なると、初期勾配、ピーク荷重時のひずみ、ひずみ軟化域の挙動が多少影響されるようである(表-3)。

以上の結果から、マイクロブレンモデルの構成則としてひずみ軟化領域を含む式(1)の妥当性が確かめられた。

式(1)による計算値が、図-9, 10に解析値として示されている。

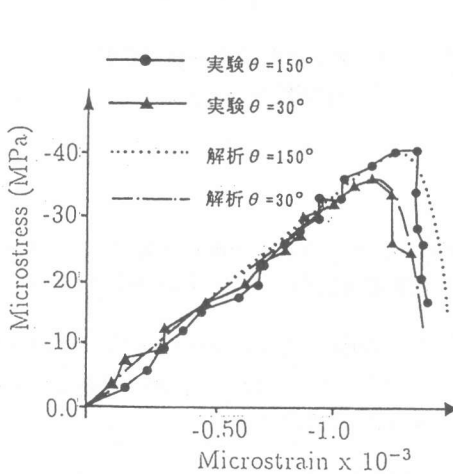


図-9 ミクロの応力-ひずみ関係
(骨材間距離 5mm)

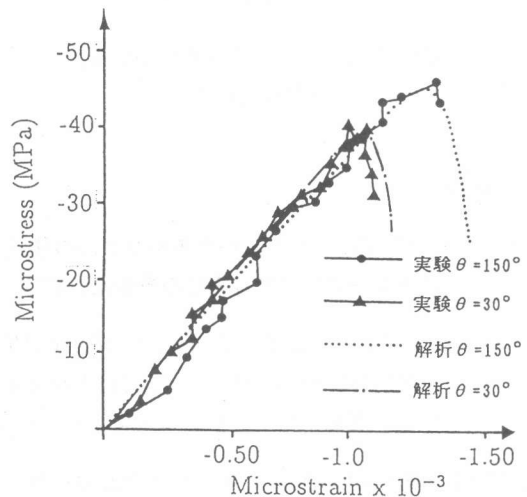


図-10 ミクロの応力-ひずみ関係
(骨材間距離 10mm)

表-3 ミクロパラメータ

骨材間距離, 角度	E_n (MPa)	p	ϵ_o
5mm, $\theta = 30^\circ$	32.0×10^3	20	-1.24×10^{-3}
5mm, $\theta = 150^\circ$	32.0×10^3	20	-1.32×10^{-3}
10mm, $\theta = 30^\circ$	38.0×10^3	20	-1.10×10^{-3}
10mm, $\theta = 150^\circ$	37.0×10^3	20	-1.30×10^{-3}

4.3 マクロの応力 σ_{ij} - ひずみ ϵ_{ij} 関係

マクロの応力 σ_{ij} - ひずみ ϵ_{ij} 関係を、図-11, 12に示した。縦軸がマクロの応力(圧縮)、横軸が縦方向ひずみ(圧縮)と横方向ひずみ(引張)である。

図-9と11あるいは図-10と12を比較することにより、ミクロ挙動とマクロ挙動は単純には一致しないが、ある関数によって関連付けられると推測される。よって、ミクロの材料パラメータは、マクロのパラメータによって支配されると思われる。

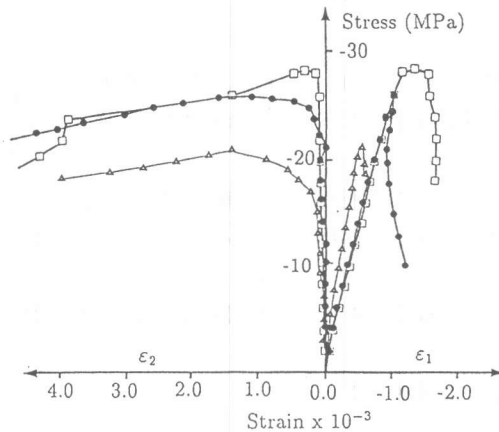


図-1 1 マクロの応力-ひずみ関係
(骨材間距離 5mm)

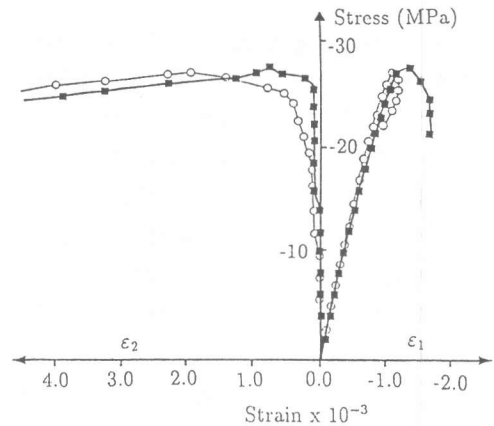


図-1 2 マクロの応力-ひずみ関係
(骨材間距離 10mm)

5. 結論

- (1) ミクロひずみはマクロひずみテンソルの構成要素である、ということが確かめられた。しかし、ポストピーク領域では実際の挙動は分岐しており、解析値(式(3))はその平均を示している。
- (2) ミクロの応力-ひずみ関係における初期勾配、ピーク荷重時のひずみ、ひずみ軟化域などのミクロ材料特性を示す構成則(式(1))の必要性が確かめられた。これらは、骨材間のモルタルの厚さの関数になっているように考えられるが、今後の検討課題である。
- (3) 構成則(式(1))によるミクロの応力-ひずみ関係の初期勾配、ピーク荷重時のひずみ、ひずみ軟化域を示すミクロのパラメータの値は、マクロのパラメータの関数になると思われる。

参考文献

- [1] Bazant, Z. P. and Oh, A. M.: Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, No.4, pp.559-582, Apr. 1985
- [2] Bazant, Z. P. and Gambaroba, P. G.: Crack Shear in Concrete : Crack Band Microplane Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, pp.2015-2035, Sep. 1984
- [3] Farahat, A. M., Wu, Z. S., and Tanabe, T.: Development of Microplane Model of Concrete with Plural Types of Granular Particles, Proceeding of JSCE, Vol.15, No.433, pp.231-238, Aug. 1991
- [4] 二羽淳一郎・Farahat, A. M.・山田浩司: Microscopic Experimental Observation of Concrete, コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.1041-1046, 1992
- [5] Farahat, A. M.: Development of Concrete Models Based on the Micromechanics of Granular Material, A Thesis Submitted to Nagoya University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Engineering, pp.49-74