

# 論文 微小構造単位要素を用いたコンクリートの変形特性の数値シミュレーション

椿 龍哉<sup>\*1</sup>

**要旨：**高強度あるいは高性能化したコンクリートの、与えられた応力条件に対する変形挙動を的確に把握するためには、そのメゾスコピック内部構造の挙動を調べることが重要である。本研究では、圧縮または引張を受けるコンクリートの応力ひずみ関係等の力学的挙動を、脆性塑性的材料の内部微小領域の変形特性をモデル化するのに適した数値解析モデルを用いてシミュレーションし、その数値解析手法の適用性と妥当性を検討・確認した。本研究で用いた数値解析モデルは剛体ブロックを2方向の非線形ばねにより結合した2次元モデルであり、脆性塑性的材料の基本的特性を表現することが可能である。

**キーワード：**コンクリート、メゾスコピック構造、変形特性、数値シミュレーション

## 1.はじめに

コンクリートの力学的特性は、粗骨材の寸法で代表される寸法の中間微視的構造、すなわちメゾスコピック構造の力学的挙動の影響を受けると考えられる。コンクリートの力学的特性を求める場合には、比較的小さい寸法の供試体を用いるために、コンクリートの内部構造の不均一さの影響が現れるものと考えられる。高強度化、高性能化するコンクリートの力学的特性は、そのようなコンクリートが幅広い方面で大量に用いられる材料のため、その内部機構を適切に把握することは工学的に必要なことと思われる。本研究は、脆性塑性的な材料であるコンクリートを対象にして、内部構造の不均一さがその材料の非線形な力学的特性におよぼす影響を明らかにするための適当な数値シミュレーションの手法を検討することを目的とするものである。

以下で数値シミュレーション用に検討される数値モデルは、剛体ブロックとばねを組み合わせた微小構造単位要素[1]と呼ばれるものである。これは、剛体ブロック間界面を要素内に設定しており、従来の剛体ばねモデルとは異なる。2個の剛体ブロックを結合するばねの力学的特性を適切にモデル化することにより、コンクリートのような材料の非線形な変形挙動を表現することが可能である。この微小構造単位要素の寸法を粗骨材で代表されるコンクリートの不均一さの寸法よりも小さくすることにより、不均一な構造部分の周辺の非線形な特性を精度よく表現できる。具体的な数値シミュレーションでは圧縮と引張の一軸荷重を受けるコンクリートの非線形変形挙動を扱い、本解析手法の妥当性と適用性を検討する。

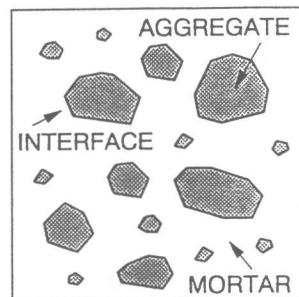


図-1 コンクリートの内部構造

\*1 横浜国立大学助教授 工学部建設学科、Ph.D.（正会員）

## 2. 微小構造単位要素のモデル化

材料の内部構造の不均一さを数値モデル化した例としては、コンクリートの骨材とモルタル、およびそれらの界面を一つの複合要素としてモデル化した「コンクリート要素」があげられる[2]。本研究では、材料の不均一さをより精度よく表現し、材料の微細領域における破壊や材料非線形性を適切にモデル化するために、図-2に示すような2次元解析用の微小構造単位要素を用いる。この微小構造単位要素は、 $x$ 、 $y$ 方向の変位を自由度とする2個の節点を持ち、両端の2個の剛体ブロックをその界面に対して法線方向と接線方向の2本の集中ばねで結合したものである。これらのはねの力学的特性を適切にモデル化することにより、材料全体の非線形挙動を表現することが可能である。微小構造単位要素の剛体ブロック間の界面における表面力と相対変位の間の関係は、界面の法線方向  $n$  と接線方向  $t$  に座標軸を持つ座標系において仮想仕事の定理より以下のように表わされる。

$$F = KU \quad (1)$$

ここに、 $F = [f_n, f_t]^T$ 、 $U = [u_n, u_t]^T$ は界面における表面力と相対変位を表わす。 $K$ は界面の法線方向と接線方向のはねの割線特性を表わす。一般に $K$ は非対称になるが、ここでは簡単のため、非対角項  $k_{nt}$ 、 $k_{tn}$ はゼロとし、対角項  $k_{nn}$ 、 $k_{tt}$ のみを材料のモデル化の対象とする。

## 3. 材料のモデル化

モルタルに用いられる微小構造単位要素の法線方向と接線方向のはねの材料特性を図-3に示す。法線方向のはねの特性は、圧縮に対しては応力が圧縮強度  $\sigma_c$  に達するまでは Popovics の一軸応力ひずみ関係式を用い、その材料定数はモルタルの場合  $n = 1.92$  とする。圧縮強度到達後は塑的に挙動し、ひずみが  $\epsilon_{cu}$  に達すると応力が解放されるとする。引張に対しては、引張強度  $\sigma_t$  に達するまでは線形的に挙動し、引張強度に達すると応力が解放されると仮定する。接線方向のはねの特性は、はねの応力がせん断強度  $\tau_0$  に達するまでは線形的に挙動し、せん断強度到達後は塑性になり、ひずみが  $\gamma_u$  に達すると応力が解放されるとする。コンクリートでは、圧縮や引張を受けて最大応力に到達した後、軟化現象が起こるが、ここでは微小構造単位要素の特性として軟化特性を考慮せず、所定のひずみに達した時点で応力が全て解放されるという簡単なモデルとする。

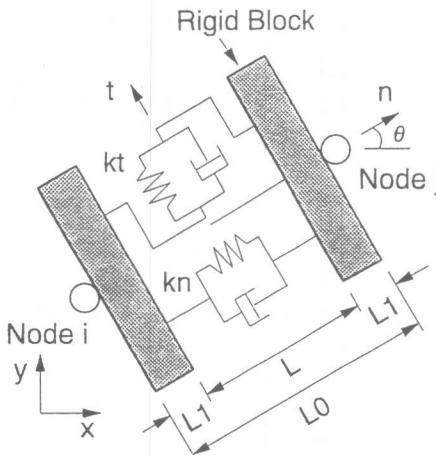


図-2 微小構造単位要素

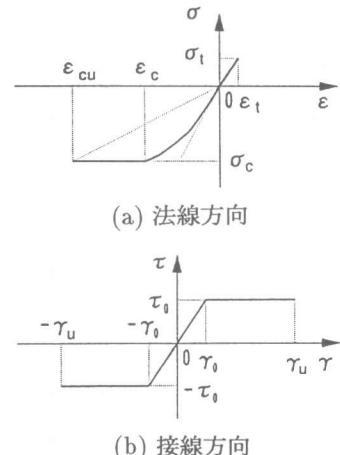


図-3 材料のモデル化

せん断破壊についても、せん断ひずみの増加による剛性の低下や、せん断強度到達後の軟化現象などは、簡単化のために無視する。また、除荷の場合は全て原点指向型の経路を仮定する。

#### 4. 数値シミュレーション

##### (1) 解析の手順

以下の数値シミュレーション例では水平方向と垂直方向の微小構造単位要素を正方形の格子状に組み合わせて材料全体を表現する。各要素の界面の方向は水平方向、垂直方向を中心に  $90^\circ$  の幅で一様乱数を発生させて決めている。各要素の界面方向は荷重を受けている間変わらないとする。

荷重は載荷面における強制変位で与えられ、各要素の界面の法線方向と接線方向のばねに発生する応力を計算し、最初に法線方向あるいは接線方向の強度に達する要素を求め、その要素の剛性を低減させる。低減率は 50% で、低減回数は圧縮の場合  $N_c = 3$  回、せん断の場合  $N_s = 5$  回、引張の場合は  $N_t = 0$  回とし、それ以降は剛性を初期の値の  $10^{-5}$  倍とする。このように破壊した要素の剛性を修正した後、次の強制変位を与える。以上の割線係数法の手順を所定の変形に到達するまで繰り返す。

##### (2) モルタルの解析

図-4 にモルタルの挙動をシミュレーションするための正方形のモデル供試体を示す。要素分割は図-4(a) に示され、要素数は 220、節点数は 121 である。1 要素の長さは  $0.2\text{cm}$ 、モデル供試体の全体の寸法は  $2\text{cm}$  である。要素内界面の方向は図-4(b) に示される。材料特性の値は高強度コンクリートを想定し、 $k_{nn} = 1.50 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $k_{tt} = k_{nn}/2.4$ 、 $-\sigma_c = 1000 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_t = 100 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $\tau_0 = 500 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $N_c = 3$  である。

垂直方向に圧縮または引張荷

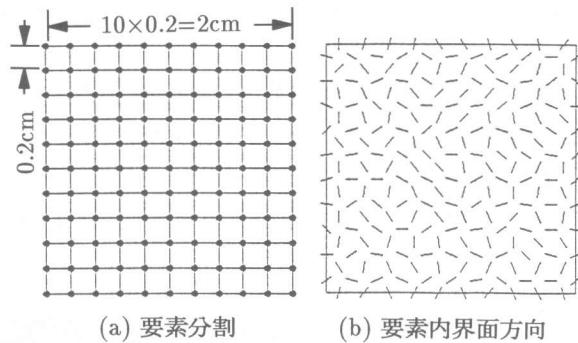


図-4 モルタルの数値モデル化

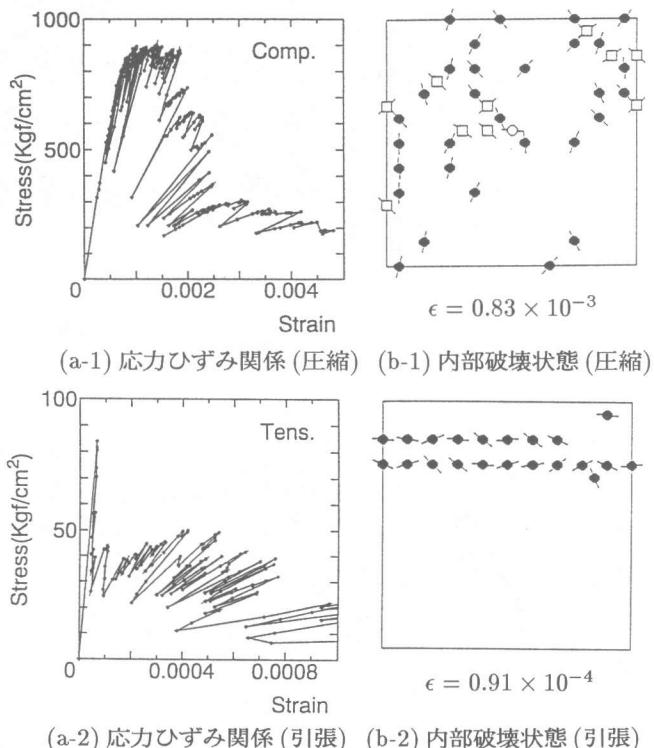


図-5 モルタルの変形挙動

●:引張破壊; ○:圧縮破壊; □:せん断破壊;

重を載荷した場合の解析結果を図-5に示す。供試体全体の平均的な応力ひずみ曲線は図-5(a)に示す。平均応力は強制変位を与えた供試体上辺の反力を供試体断面積で、また平均ひずみは強制変位を供試体の辺長で各々除して求めている。圧縮載荷では、最大応力に達するまでの非線形挙動と最大応力到達後の軟化挙動が表現されている。引張載荷では、最大応力に達するまではほぼ線形的挙動を示し、最大応力到達後はひずみ軟化現象を示している。図-5(b)は載荷初期における内部の破壊状態を示す。圧縮載荷では、垂直方向に近い方向の界面を持つ要素で引張破壊が発生し、それらが連なる場合も見られる。また $45^\circ$ に近い方向の界面でせん断破壊も発生している。引張載荷では、供試体の荷重に垂直な方向である水平方向に引張破壊が発生している。なお、これらの解析では載荷面の水平方向の拘束はないと仮定している。

### (3) コンクリートの解析

コンクリートの粗骨材の構造レベルで内部の変形挙動を解析するためには、図-6に示すように供試体を粗骨材、モルタル、およびそれらの界面の3つの領域に分けてモデル化する必要がある。

ここでは、図-6(a)に示すようなモデル化されたコンクリート供試体を考える。供試体全体の寸法は $20cm \times 10cm$ とし、対称性を仮定して右上の $1/4$ の領域のみを解析の対象としている。

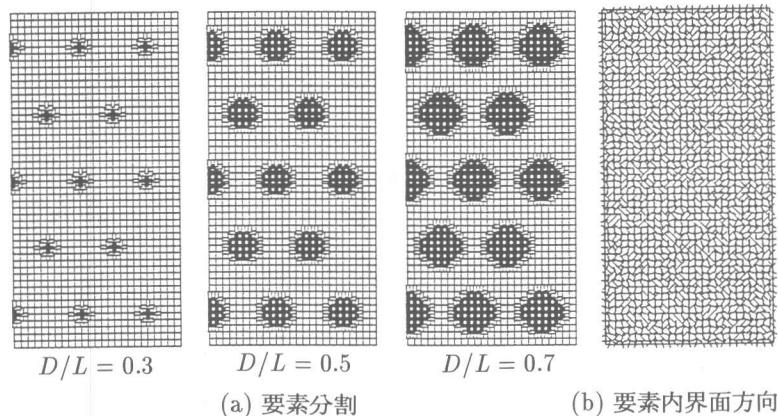


図-6 コンクリートの数値モデル化

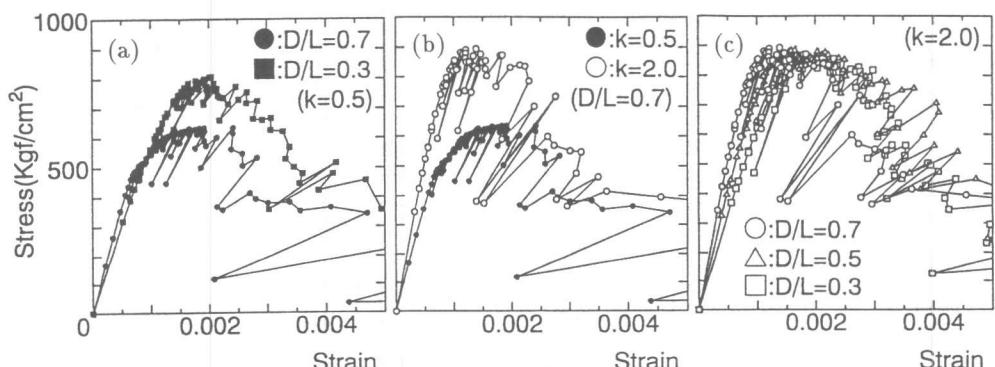
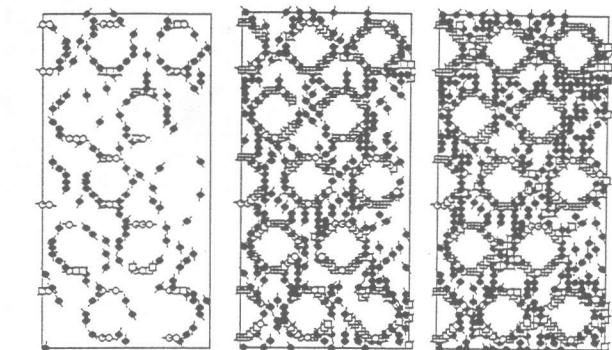


図-7 コンクリートの応力ひずみ関係

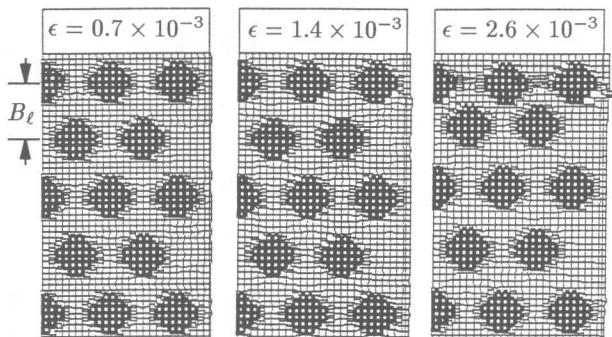
図-6(a)に示す要素分割では、円形粗骨材を中心を持つ辺長  $L$  の正方形領域を組み合わせており、要素数は 2575、節点数は 1326 である。骨材直径  $D$  と辺長  $L$  の比は 0.3、0.5、0.7 である。微小構造単位要素の長さは 0.2cm である。モルタル部分の材料特性はモルタルの解析で用いた値と同一である。ただし、 $k_{nn} = 0.75 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $N_c = 8$  とする。骨材の剛性はモルタルの剛性の 10 倍とし、弾性体とする。骨材とモルタルの間には界面領域を設け、微小構造単位要素 1 要素分の層により表わす。界面領域の剛性と強度は、モルタル部分の値の  $k = 0.5$  倍または  $k = 2.0$  倍とする。微小構造単位要素の要素内界面の方向は一様乱数によりランダムに設定し、分布は図-6(b)に示す。

モデル供試体の上辺に一様な強制変位により圧縮荷重を載荷し、その時の平均的な応力ひずみ曲線を求めた結果を図-7 に示す。なお、載荷面の水平方向の拘束はないと仮定する。図-7 に示されるように、粗骨材の寸法が大きく、界面の強度が弱いほど、最大応力は低下する。界面強度が強い場合は、骨材寸法の影響は小さい。

図-8 と図-9 には界面が弱い場合 ( $k = 0.5$ ) と強い場合 ( $k = 2.0$ ) の内部破壊状態と変形を示す。界面が弱い場合は、載荷初期では骨材側面を中心に引張破壊が進行し、また、骨材上下部で圧縮破壊も発生している。さらに、骨材側面から発生した引張破壊領域がモルタル部分に引張破壊を発生させて連結する様子が見られる。圧縮載荷が大きくなつた状態では、骨材周辺のせん断破壊も進行して、引張破壊とせん断破壊、あるいは圧縮破壊とせん断破壊がともに起こっている要素が多くなっている。これらの破壊状態図に対応する変形図より、圧縮変形が大きくなるにつれて変形が特定の破壊領域に局所化することが確認される。また、界面が強い場合は、骨材周辺のモルタルから破壊が進行している。



(a) 内部破壊状態



(b) 変形

図-8 コンクリートの変形挙動 ( $D/L = 0.7, k = 0.5$ )

●:引張破壊; ○:圧縮破壊; □:せん断破壊;  
■:せん断・引張破壊; ▨:せん断・圧縮破壊

変形の局所化にともなうひずみエネルギー  $W$  の変化を図-10 に示す。図-8 と図-9 に示す変形図より、変形が局所化する領域を含めた粗骨材 1 個分の幅の水平な帯状領域  $B_\ell$  を考えると、そのひずみエネルギー  $W_{local}$  はコンクリート全体がひずみ軟化を示す付近から全領域のひずみエネルギー  $W_{total}$  に対する比率が増大し、次第に集中化することが確認される。

## 5.まとめ

コンクリートの内部構造の不均一性を考慮した数値シミュレーション手法として、微小構造単位要素を用いた解析方法を検討した。要素内界面の法線方向と接線方向のばねを適切にモデル化することにより、コンクリートの変形挙動を表現できることが確認された。

**謝辞:** 本研究は文部省科学研究費補助金(一般研究 C、No.05650429)を受けて行われた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 椿 龍哉：微小構造単位要素のモデル化と材料特性のシミュレーション、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、Vol.18、1994、pp.465-470。
- [2] Tsubaki, T., Shitaba, K. and Das, M.K.: Numerical Simulation of the Deformation and Stresses of Concrete Due to Drying, Trans. of the JCI, Vol.13, 1991, pp.101-108.

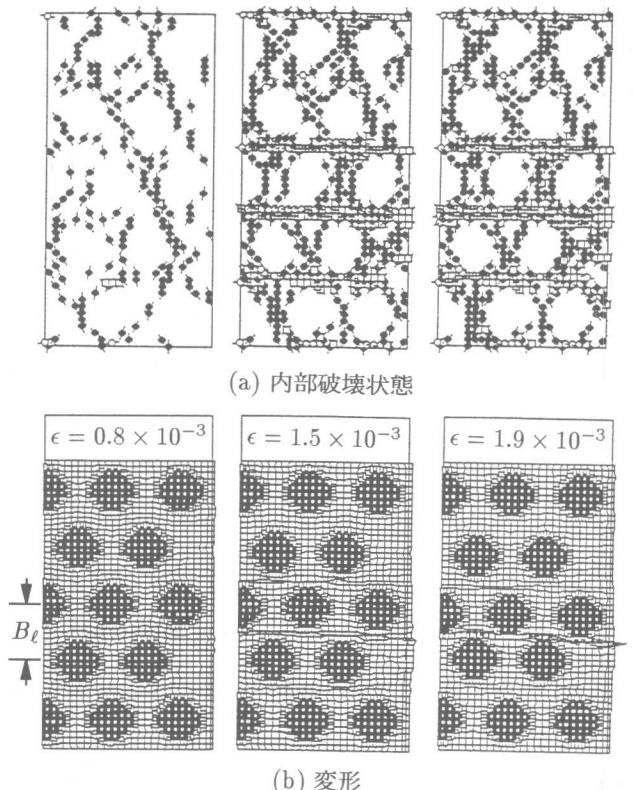


図-9 コンクリートの変形挙動 ( $D/L = 0.7, k = 2.0$ )

●:引張破壊; ○:圧縮破壊; □:せん断破壊;  
■:せん断・引張破壊; ▨:せん断・圧縮破壊

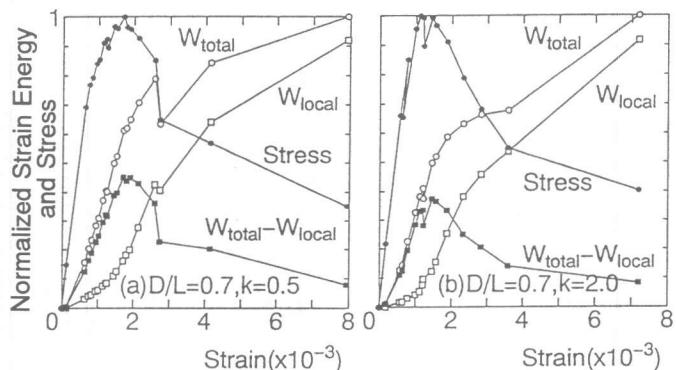


図-10 変形の局所化とひずみエネルギーの変化