

# 論文 微小構造単位要素を用いたコンクリートの破壊特性のシミュレーション・モデル

椿 龍哉\*1

要旨： 高強度・高靱性の力学特性をもつ高性能なコンクリートの、与えられた荷重条件に対する変形挙動を把握するためには、そのメゾスコピック構造の挙動を適切に理解す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、脆性的な複合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、その数値解析モデルの適用性と妥当性を検討・確認した。本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、ある要素が破壊した場合の周辺要素への影響を考慮した。

キーワード： コンクリート, 破壊, 数値解析, シミュレーション, モデル化

## 1. はじめに

コンクリートの力学的特性は、コンクリート内部の粗骨材の寸法で代表される寸法の準微視的構造、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(図-1参照)。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、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思われる。高強度化、高靱性化するコンクリートの力学的特性の内部機構を適切に把握することは、コンクリートが幅広く用いられる材料であるため、工学的に重要なことである。したがって、本研究では、脆性的な複合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コンクリート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切な数値シミュレーション手法を検討することを目的とする。

以下で数値シミュレーションに用いられる数値モデルは、剛体ブロックと非線形ばねを組み合

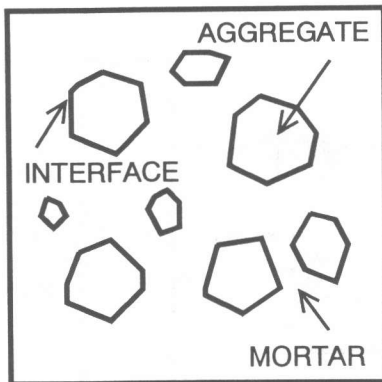


図-1 コンクリートの内部構造

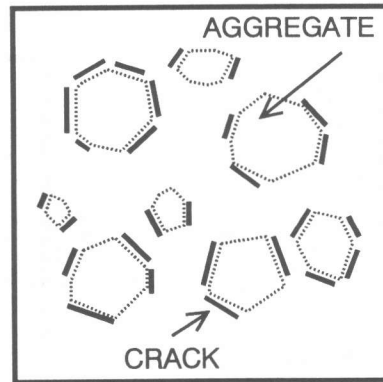


図-2 コンクリート内部の微細ひび割れ

\*1 横浜国立大学助教授 工学部建設学科, Ph.D. (正会員)

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、2 個の剛体ブロックの間に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。また、はり要素を用いた格子モデル [2,3] や円形や多角形の粒状体要素を用いたモデル [4,5,6] とも異なる。一方、コンクリートの巨視的変形挙動を表す構成モデルとしてのマイクロプレーンモデル [7] では、1 点で種々の向きの界面を設定していると考えられるが、本モデルでは種々の向きの界面を空間的に分布させている。本モデルでは、用いる要素の形状特性の効果により、2 個の剛体ブロックを結合するばねの非線形力学特性を適切にモデル化することで、コンクリートのような材料の非線形な変形挙動をより柔軟に表現することが可能と思われる。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引張と圧縮の一軸荷重を受けるコンクリートの変形挙動を扱い、本解析手法の妥当性と適用性を検討する。

## 2. 微小構造単位要素を用いたシミュレーション・モデル

荷重を受けたコンクリートには、コンクリート内部の不均一性から (図-1 参照)、粗骨材周辺等に微細なひび割れが発生する (図-2 参照)。この微細ひび割れの発生とそれらの連結によるひび割れがコンクリートの非線形な変形挙動を支配すると考えられる。本研究では、材料の不均一さを精度よく表現し、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、このような微細ひび割れを表す界面を要素内に含む、図-3 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 本の非線形集中ばねで結合したものである。これらのばねの非線形力学特性を適切にモデル化することにより、コンクリート全体の変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 (図-3(a) 参照) 仮想仕事の定理より以下のように表わされる。

$$F = KU; \quad K = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{nt} \\ k_{tn} & k_{tt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

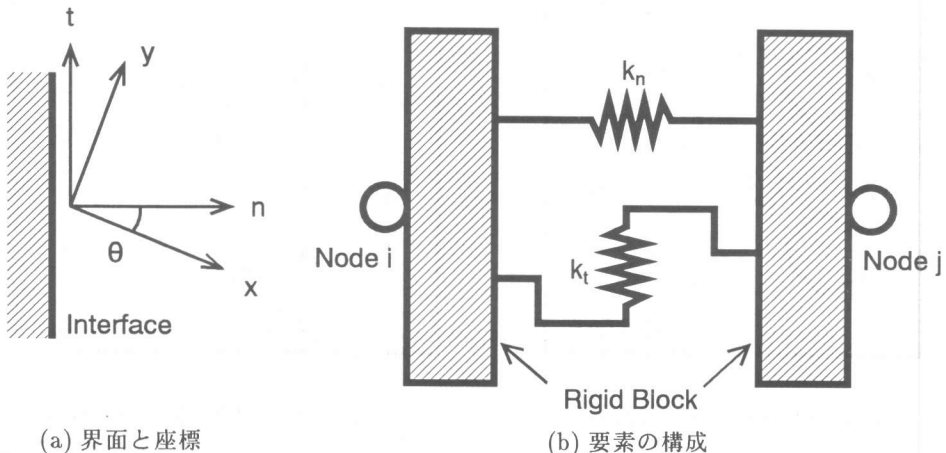


図-3 微小構造単位要素

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ばねの割線特性を表わす。 一般に  $K$  は非対称になるが、本研究では簡単のため、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。

これらの非線形ばねは、各々に作用する応力が限界値を超えると破壊する。 引張あるいはせん断で破壊した要素の周辺の要素は、その破壊の影響を受けると考えられる。 したがって、本研究では、ある要素が引張またはせん断で破壊した場合は、破壊した要素の界面方向の延長上にある 2 個の要素の界面方向を破壊した要素の界面方向と一致させる。 以下のシミュレーションでは微小構造単位要素を正方形の格子状に配置するため、これらの方向は上下、左右、および  $\pm 45^\circ$  の対角線方向となる。 図-4 に垂直要素が破壊した場合および水平要素が破壊した場合の、破壊の影響を受ける周辺要素を示す。

### 3. 材料のモデル化

コンクリート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ばねの材料特性を図-5 に示す。 法線方向のばねの特性は、圧縮に対しては応力が圧縮強度  $\sigma_c$  に達するまでは線形の一軸応力ひずみ関係式を用いる。 圧縮強度到達後は塑性的に挙動し、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。 接線方向のばねの特性は、ば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的になり、ひずみが  $\gamma_u$  に達すると応力が解

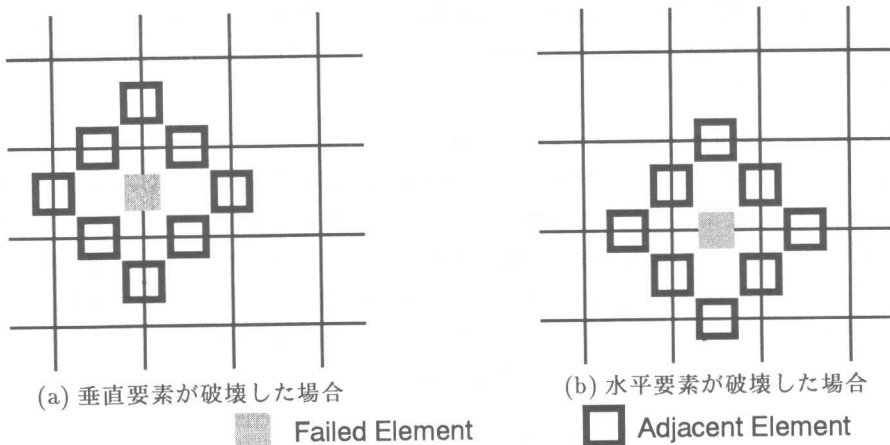


図-4 破壊した要素の影響

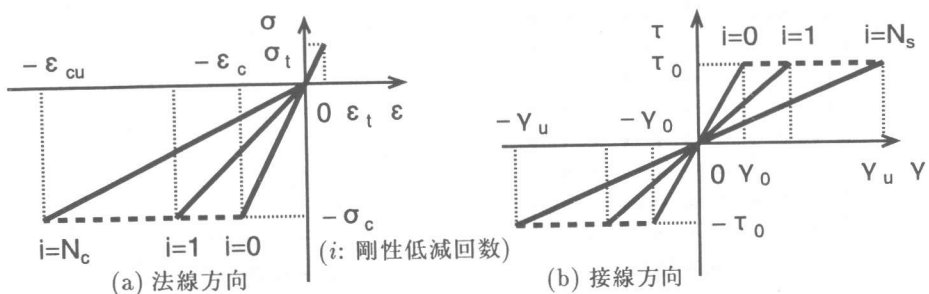


図-5 材料のモデル化

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。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、除荷が起こる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) シミュレーションの手順

以下の一軸荷重に対する数値シミュレーション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°の幅で一様乱数を発生させて与えている。各要素の界面方向は、隣接する要素が引張あるいはせん断によって破壊した場合は、破壊の方向に応じて変更される。

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。すなわち、低減率を $\alpha$ 、初期剛性を $k_{nn}^0, k_{tt}^0$ とすると、 $i$ 回目の低減では剛性は $k_{nn}^i = \alpha^i k_{nn}^0, k_{tt}^i = \alpha^i k_{tt}^0$ となる。ここでは、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1要素の剛性を修正し、さらに周辺要素の界面方向を破壊の方向に変更した後、次の荷重段階のための強制変位を与える。以上の割線係数法に基づく手順を所定の変形に到達するまで繰り返す。なお、以下の解析では上下の載荷面の水平方向と左右の側面の変位の拘束はないと仮定する。

##### (2) モデル・コンクリートのシミュレーション

図-6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-6(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2cm、モデル供試体の全体の寸法は20cmである。要素内界面の方向は図-6(b)に示され、粗骨材周辺や内部に発生するひび割れを表す。材料特性の値は均質な高強度コンクリートを想定し、 $k_{nn}^0 = 1.50 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $k_{tt}^0 = k_{nn}^0 / 2.4$ 、 $\sigma_c = 1000 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_t = 100 \text{ Kgf/cm}^2$ 、 $\tau_0 = 500 \text{ Kgf/cm}^2$ である。

垂直方向に引張荷重を載荷した場合の解析結果を図-7に示す。供試体全体の平均的な応力ひ

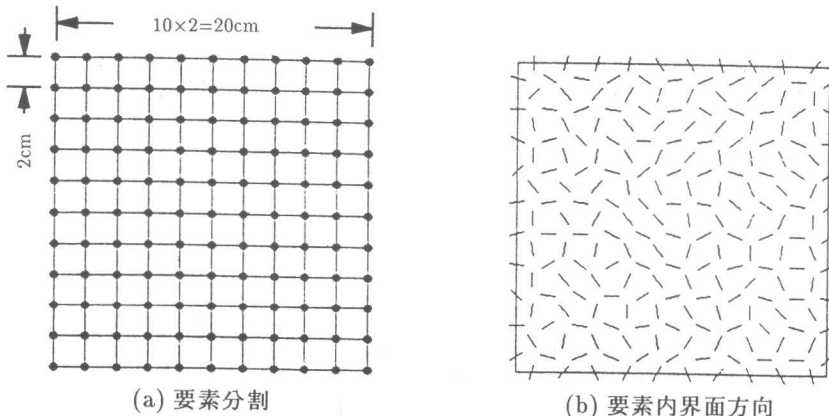
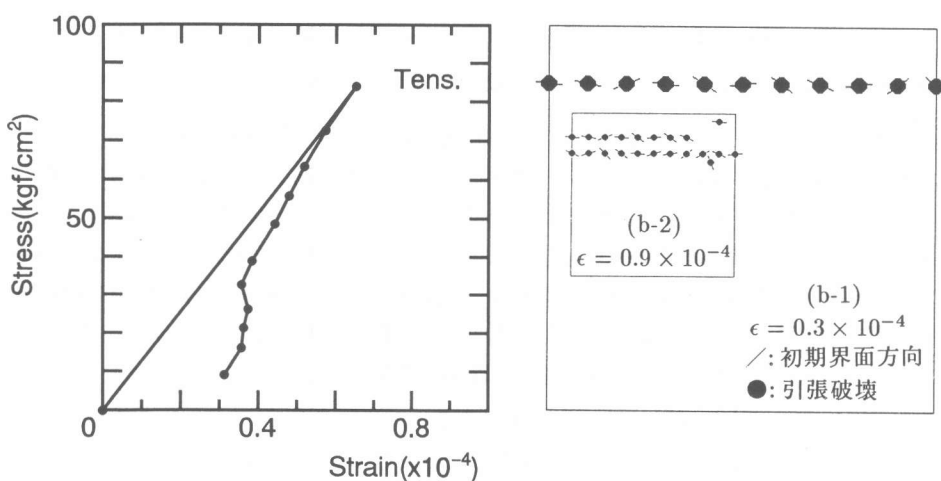


図-6 コンクリートの数値モデル化

ずみ曲線は図-7(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。最大引張応力に達すると、内部のひび割れの進展にともない、脆性的な変形挙動を示すことが確認される。また、コンクリート内部の最終破壊状況は図-7(b-1)に示される。要素内界面のランダムな配置から、この場合、最初に引張破壊する要素はモデル供試体の上部中央部にあり、その後、その要素から左右にひび割れが進展し、最終的にひび割れが貫通した段階で全体的な破壊となった。引張破壊した要素の周辺の要素界面方向を変更しない場合[1]は、引張破壊する要素が水平の帯状に発生したが(図-7(b-2)参照)、本研究のように破壊方向に応じて界面方向を変更することでひび割れが局所的に発生することがわかる。

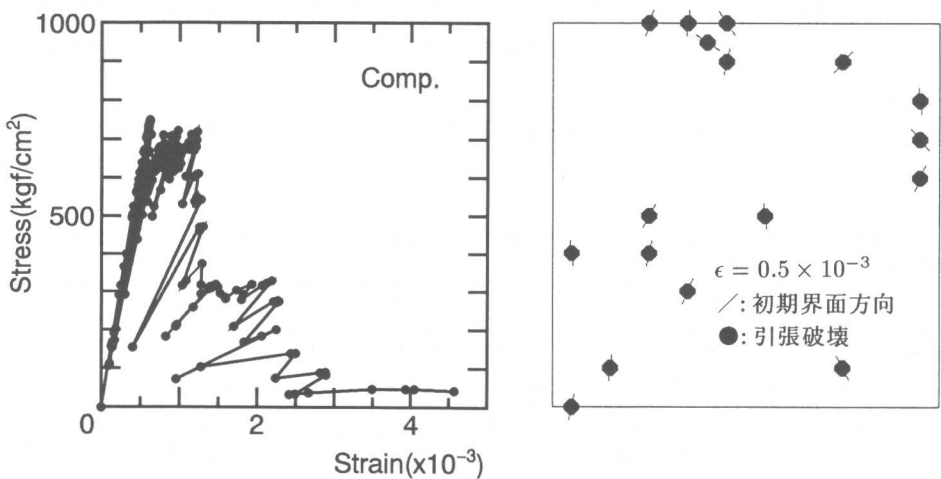
垂直方向に圧縮荷重を載荷した場合の解析結果を図-8に示す。供試体全体の平均的な応力ひずみ曲線は図-8(a)に示す。圧縮荷重では、最大応力に達するまでの非線形挙動と最大応力到達後



(a) 応力ひずみ関係

(b) 最終内部破壊状態

図-7 引張を受けるコンクリートの変形挙動



(a) 応力ひずみ関係

(b) 内部破壊状態

図-8 圧縮を受けるコンクリートの変形挙動

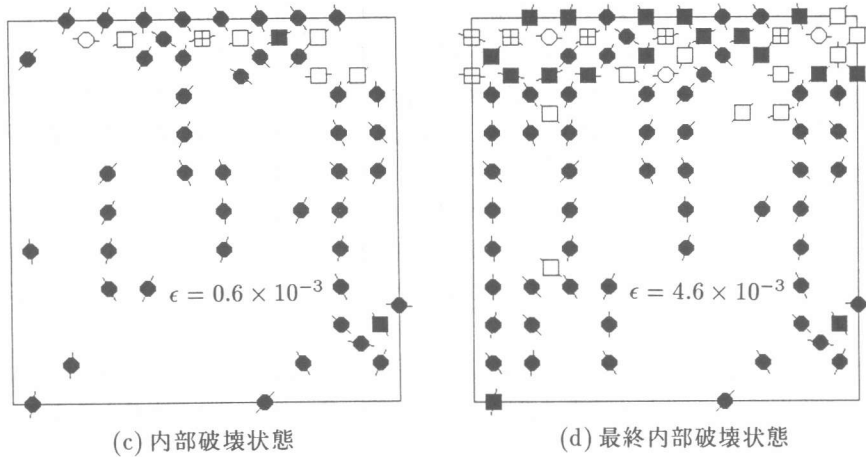


図-8 圧縮を受けるコンクリートの変形挙動 (続)

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

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線形的挙動を示したが、圧縮載荷の場合は載荷初期から次第に全体の剛性が低減する傾向が現れている。要素内の破壊状況は図8-(b,c,d)に示す。図8(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。図8(c)はさらに載荷が進んだ段階の内部破壊状態を示す。微細ひび割れが圧縮荷重方向に縦に連なるものが数箇所で見られる。また45°に近い方向の界面でせん断破壊も発生している。図8(d)は最終段階の内部破壊状態を示す。荷重方向に連なる微細ひび割れがさらに進展していること、また、供試体上部でせん断破壊と圧縮破壊が進行していることが確認される。なお、内部破壊状態は各要素の法線方向と接線方向、および両方向に発生した破壊を示している。

## 5. まとめ

コンクリートの微細ひび割れの発生とその進展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、コンクリートの引張および圧縮に対する変形挙動を表現できることが確認された。

謝辞: 本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究C)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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, 1995, pp.1241-1246.
- [2] Schlangen, E. and Van Mier, J.G.M.: Simple Lattice Model for Numerical Simulation of Fracture of Concrete Materials and Structures, Materials and Structures, No.25, 1992, pp.534-542.
- [3] Vervuurt, A., Van Vliet, M.R.A., Van Mier, J.G.M. and Schlangen, E.: Simulation of Tensile Fracture in Concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Ed. by F.H. Wittmann, AEDIFICATIO Publishers, 1995, pp.353-362.
- [4] Zubelewicz, A. and Bažant, Z.P.: Interface Element Modeling of Fracture in Aggregate Composites, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.113, No.11, 1987, pp.1619-1630.
- [5] Liu, Y.-Q., Hikosaka, H. and Bolander, J.E.: Modelling Compressive Failure Using Rigid Particle Systems, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Ed. by F.H. Wittmann, AEDIFICATIO Publishers, 1995, pp.375-382.
- [6] Abdeen, M.A.M. and Tsubaki, T.: Simulation of Failure Behavior of High Strength Concrete under Compression, Proc. of Cairo First International Conference on Concrete Structures, 1996, pp.3-44-3-55.
- [7] Bažant, Z.P.: Microplane Model for Strain-Controlled Inelastic Behavior, Mechanics of Engineering Materials, C.S. Desai and R.H. Gallagher, eds., Chap.3, John Wiley & Sons, London, 1984, pp.45-59.