

## 論文 メソスケール解析によるコンクリートの圧縮破壊性状の予測

鈴木 孝典<sup>\*1</sup>・斉藤 成彦<sup>\*2</sup>・檜貝 勇<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、コンクリートを骨材、モルタル、および界面からなる複合材料として考えたメソスケールの概念を適用し、3次元剛体バネモデルを用いてコンクリートの一軸圧縮試験の解析を行った。解析では、供試体高さと同供試体幅の比、コンクリート供試体と載荷板間の摩擦による拘束力、および横拘束筋による拘束力が、最大応力および破壊性状に及ぼす影響について検討を行った。また、軸方向ひずみ分布より、ひずみ局所化領域（圧縮破壊領域）長さの評価も試みた。

**キーワード**：メソスケール、剛体バネモデル、一軸圧縮試験、拘束効果、圧縮破壊領域

### 1. はじめに

コンクリート構造物が耐力を完全に失う終局状態に至るまでの挙動を正確に把握するためには、コンクリートの圧縮軟化特性を十分に把握することが重要である。圧縮力が作用したコンクリート部材は、破壊がある領域内で局所的に生じ、その破壊性状は供試体寸法、材料構成、材料強度、拘束圧の有無など、様々な影響を受ける。部材の耐力低下挙動や損傷状態を評価し、より合理的な設計を行うには、これらの要因がコンクリートの軟化特性と局所化領域に及ぼす影響を十分に理解しておく必要がある。

構造解析に利用されるコンクリートの力学モデルは、一般にコンクリートを等方均質なものとして扱う場合が多いが、コンクリートそのものの力学特性を解析的に評価したい場合には、着目するスケールを少し下げて、コンクリートを骨材、モルタル、およびその界面からなる複合材料として扱う手法が有効である。このような手法はメソスケール解析と呼ばれ、コンクリートのマクロな引張、圧縮、せん断等の複雑な破壊挙動を、一つ下のスケール（メソスケール）における3種の構成材料の単純なモデルの組み合わせにより表現しようとするものである。

本研究では、メソスケール解析により種々の要因を受けるコンクリートの圧縮破壊性状の予測を試みた。解析手法には、ひび割れ等の不連続現象を比較的容易に表現できる剛体バネモデル（以下 RBSM）を用い、コンクリートの一軸圧縮試験の解析を通して、供試体高さ（ $H$ ）と同供試体幅（ $D$ ）の比（ $H/D$ ）、供試体と載荷板間の摩擦による拘束力の有無が、破壊性状に及ぼす影響について検討を行った。また、横拘束筋による拘束力の影響についても検討を行った。

### 2. 解析手法

#### 2.1 3次元 RBSM

##### (1) コンクリートのモデル化

本研究では、コンクリートを骨材、モルタル、および界面からなる3相材料として扱い、解析手法には、材料を離散的に扱う手法の一つである RBSM を用いた。RBSM は、図-1のように対象物を有限個の要素に分割し、要素自身を剛体と仮定し、要素間に分布するバネのエネルギーを評価することで、材料の力学挙動を追跡する方法である。各要素には3次元剛体変位の6自由度を配置し、要素境界面上に垂直バネ、せん断バネおよび回転バネからなるバネ系を設け、

\*1 山梨大学大学院 医学工学総合教育部（正会員）

\*2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部助教授 博(工)（正会員）

\*3 山梨大学大学院 医学工学総合研究部教授 工博（正会員）

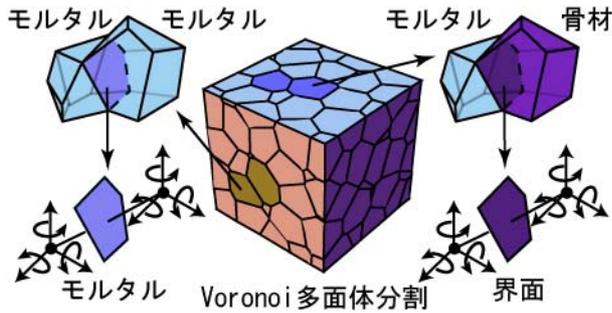


図-1 3次元剛体バネモデル

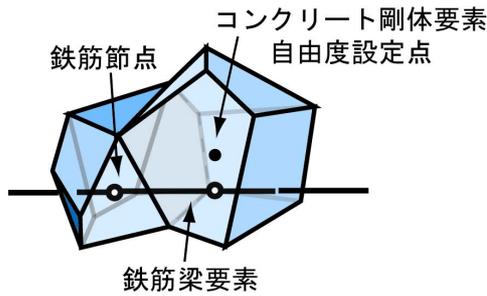


図-2 鉄筋モデル

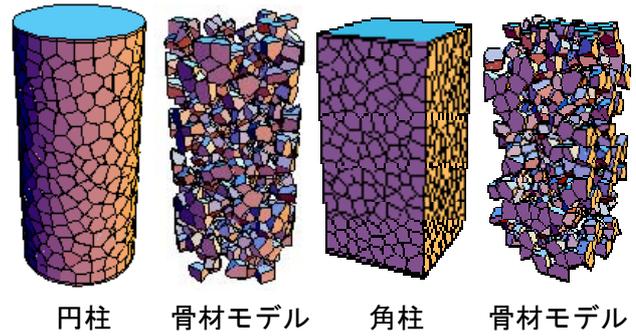


図-3 解析モデル

表-1 材料特性

|      | 弾性係数<br>(GPa)         | 引張強度<br>(MPa) | 破壊エネルギー<br>(N/m) |
|------|-----------------------|---------------|------------------|
| モルタル | $E_m=20.0$            | 3.5           | 100.0            |
| 骨材   | $E_a=60.0$            | —             | —                |
| 界面   | $E_m$ と $E_a$ の<br>平均 | 1.75          | 10.0             |

対象とする材料の特性を導入し、このバネに蓄えられるエネルギーを評価することによって材料の挙動を予測する。RBSM は、要素間のすべりやひび割れ等の不連続現象を比較的容易に表現できるが、ひび割れは要素境界面に沿って発生するため、ひび割れの発生や進展が要素分割に大きく依存する。そこで、計算幾何学の概念である Voronoi 多面体を用いてランダムな要素分割を施し、ひび割れの要素依存性を低減した。

## (2) 鉄筋のモデル化

横拘束筋のモデル化には、Saito と Hikosaka<sup>1)</sup> によって開発された離散鉄筋要素を用いた。図-2に示すように、それぞれの鉄筋は、一連の梁要素によって構成され、梁要素の節点においてリンク要素を介してコンクリート剛体要素に結合される。このモデルでは、鉄筋をコンクリート剛体内の任意の位置に配置することができるため、コンクリートの要素分割に依存しない。したがって、Voronoi 分割を利用した任意多面体からなるランダムな要素分割に対しても適用することが可能である。

## 2.2 コンクリートのメソスケールモデル

コンクリート供試体は、図-3のように、ほ

ぼ一様な要素寸法（平均寸法約 9mm）で要素分割した後、体積比 30%を粗骨材要素としてランダムに抽出し、残りをモルタル要素とすることでモデル化した。隣接する要素がモルタル同士の場合には、バネにモルタルの材料特性を導入し、モルタルと骨材の場合には、界面の特性を導入した。なお、界面の弾性係数は、モルタルおよび骨材の弾性係数を要素長さで重みつき平均して用いた。表-1に、解析に用いた材料特性を示す。界面の材料特性に関する情報は少ないため、本研究では単純に、引張強度はモルタルの半分、破壊エネルギーはモルタルの 1/10 とした。

垂直バネには、破壊エネルギーを用いて引張軟化 1/4 モデルを導入し、圧縮応力下では破壊は生じないものとした。せん断バネにはモール・クーロン型の破壊規準<sup>1)</sup>を導入し、せん断すべり破壊を考慮した。

本解析手法の妥当性を検証するため、図-3に示す直径  $D=100\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$  の円柱供試体、および一辺  $D=100\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$  の角柱供試体の一軸圧縮試験の解析を行った。要素分割の影響を調べるために、要素分割を変えた 3 種類の

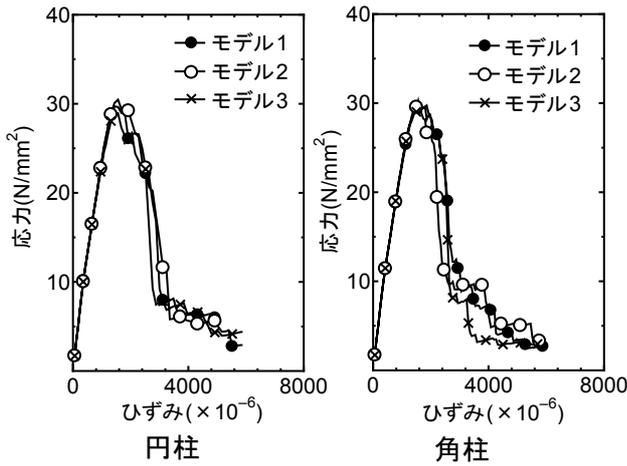


図-4 応力-ひずみ関係 (H/D=2)

解析モデルを円柱、角柱それぞれに用いた。

図-4に、解析により得られた応力-ひずみ関係を示す。ここで、応力は荷重を供試体断面積で除した値であり、ひずみは載荷板変位を供試体高さで除したものである。それぞれの応力-ひずみ関係は概ね一致し、これにより本解析手法における要素分割の影響は小さく、また仮定した材料モデルによってコンクリートの圧縮破壊挙動を表現できることが確認された。

### 3. 無筋コンクリートの一軸圧縮試験の解析

#### 3.1 解析概要

供試体高さ ( $H$ ) がコンクリートの圧縮破壊領域に及ぼす影響を検討するために、供試体幅  $D=100\text{mm}$  (円柱では直径  $D=100\text{mm}$ ) を固定して、円柱、角柱それぞれで  $H/D$  が 0.5, 1, 2, 4 の 4 種類の無筋コンクリートの一軸圧縮試験解析を行った。供試体軸方向のひずみ分布を観察するために、全ての供試体の中央に、載荷軸方向にはり要素を設置した。はり要素がコンクリートの圧縮破壊に影響を及ぼさないように、はり要素の剛性は十分小さく設定した。また、供試体と載荷板間の摩擦による拘束力の影響を検討するために、それぞれの供試体において摩擦の有無を設定した。載荷板の摩擦による拘束力のモデル化は、既往の研究<sup>2)</sup>を参考に、コンクリート供試体と載荷板間のバネにおいて、せん断応力が垂直応力の 0.2 倍に達したとき、せん断剛

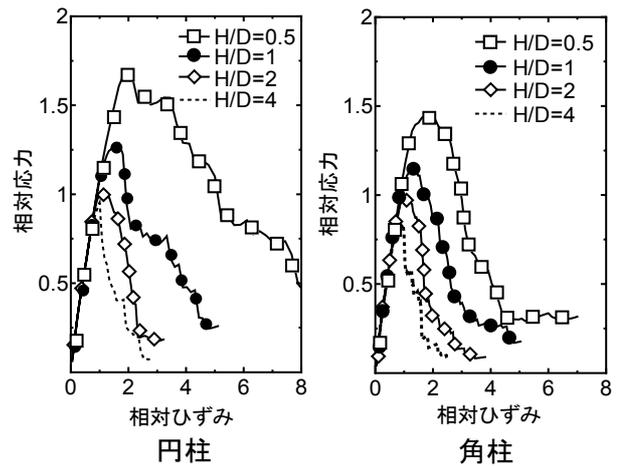


図-5 相対応力-相対ひずみ関係 (摩擦あり)

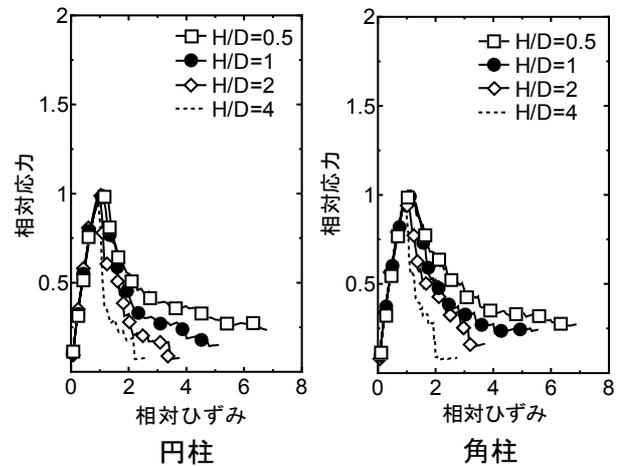


図-6 相対応力-相対ひずみ関係 (摩擦なし)

性が 0 となるように設定した。

#### 3.2 供試体の形状寸法の影響

図-5に、解析により得られた摩擦のある場合の各  $H/D$  における相対応力-相対ひずみ関係を示す。ここで相対応力、相対ひずみとは、円柱、角柱のそれぞれの  $H/D=2$  における最大応力、最大ひずみで、各  $H/D$  の応力、ひずみを除したものである。全体的に、円柱の方が角柱よりも、最大応力が大きいことが分かる。また、円柱、角柱の両方で、 $H/D$  が小さくなるにつれて最大応力が増大しているのが確認できる。これは、 $H/D$  が小さくなると、載荷板と供試体間の摩擦による拘束力の影響を大きく受けるためだと考えられる。ピーク後の軟化挙動に着目すると、 $H/D$  が大きくなるにつれて、軟化勾配が急になる傾向を示している。これらの傾向は、既往の実験結果<sup>3)</sup>においても認められている。

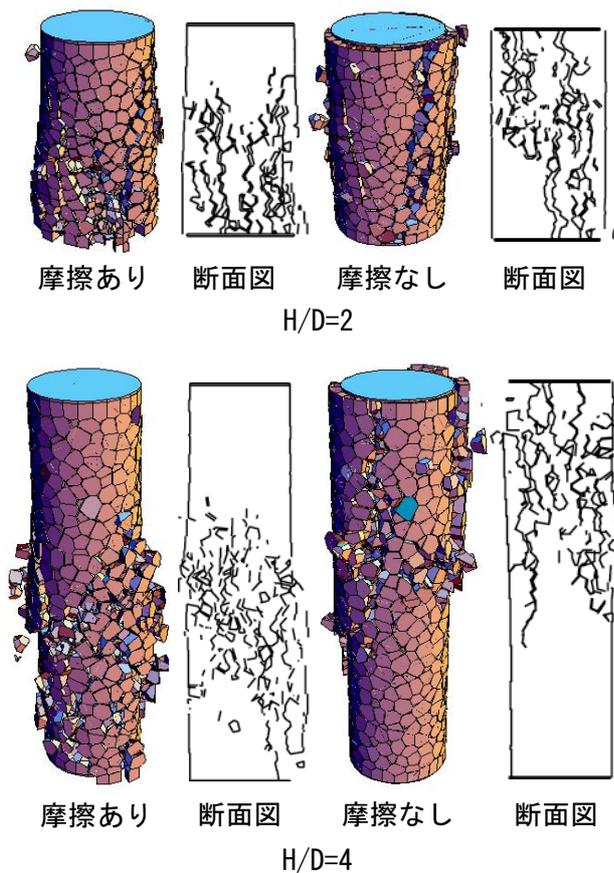


図-7 ひび割れ性状

### 3.3 載荷板の摩擦の影響

コンクリート供試体と載荷板間の摩擦がない場合のモデル化は、コンクリート供試体と載荷板間のせん断剛性を0としてモデル化した。解析によって得られた摩擦のない各 $H/D$ における相対応力-相対ひずみ関係を図-6に示す。円柱、角柱ともに、 $H/D$ の違いによる強度変化はほぼ無くなったと言える。 $H/D=2,4$ に着目してみると、摩擦のある場合と最大耐力はほとんど変わらなかった。これは $H/D$ が2以上のときは摩擦による拘束力の影響がほぼないためであると考えられる。円柱供試体( $H/D=2,4$ )について、摩擦のある場合とない場合の耐力低下後の3次元ひび割れ性状と、供試体中央における切断面を図-7に示す。摩擦のない場合は、ひび割れが割裂状に進展しているのが確認できる。また、ピーク後の軟化挙動を見てみると、摩擦のある場合と同様、 $H/D$ が大きくなるにつれて軟化勾配が急になる傾向が見られた。

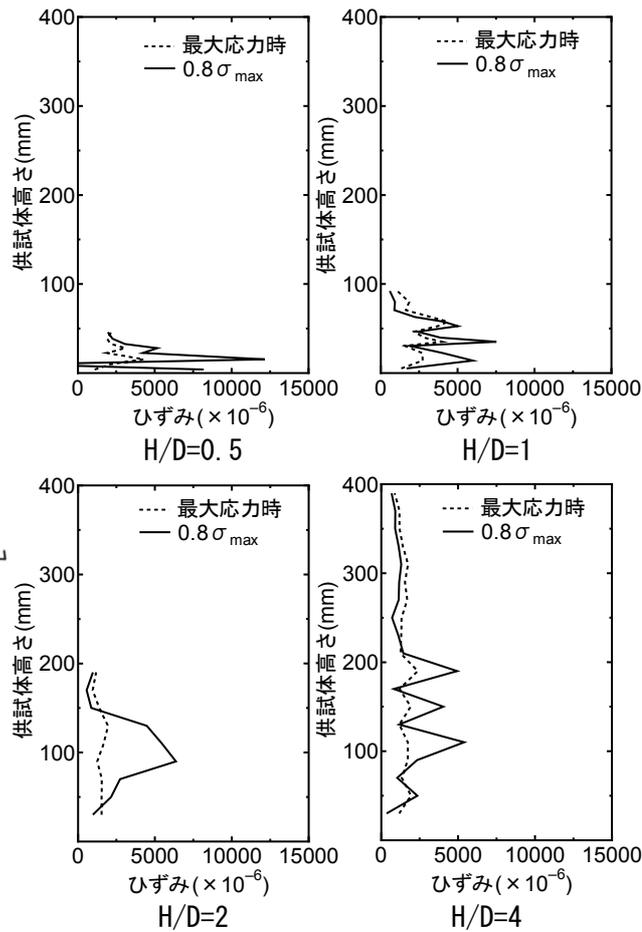


図-8 軸方向ひずみ分布(円柱)

### 3.4 圧縮破壊領域の評価

円柱モデルの各 $H/D$ について、最大応力時( $\sigma_{max}$ )および、最大応力以降の $0.8\sigma_{max}$ における軸方向ひずみ分布の変化を図-8に示す。既往の研究<sup>4)</sup>では、無拘束コンクリートの局所化領域長さは、最大応力以降もひずみの増加する領域の長さとして定義されている。 $H/D=0.5,1,2$ の供試体では、最大応力以降もほぼ供試体全体でひずみの増加が見られる。これに対し $H/D=4$ のモデルでは、最大応力以降にひずみの増加している領域は、概ね140mm程度となり、ある領域に局所化する傾向が見られる。これは、既往の研究<sup>4),5)</sup>において実験で観察された圧縮破壊領域長さに、ほぼ対応している。なお、角柱においても同様の傾向が見られた。

## 4. 横拘束筋を配置した一軸圧縮試験の解析

### 4.1 解析概要

既往の研究<sup>6)</sup>を参考に、横拘束筋を配置した角

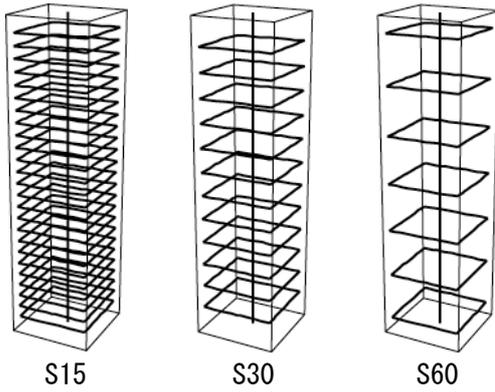


図-9 横拘束筋配置図

表-2 横拘束筋の材料諸元

| 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(GPa) | 降伏強度<br>(MPa) |
|---------------------------|---------------|---------------|
| 7.1                       | 162           | 333           |

柱供試体の一軸圧縮試験の解析を行った。解析は、 $H/D=4$ の角柱について、横拘束筋の間隔 $S$ を15mm, 30mm, 60mmと変化させた3種類(S15, S30, S60)に対して行った(図-9)。横拘束筋は一辺95mmの正方形断面であり、材料諸元を表-2に示す。骨材要素を供試体体積の30%導入し、軸方向ひずみ分布を観察するために、全ての供試体の中央にはり要素を設置した。供試体と載荷板間の摩擦は有るものとし、摩擦の影響は3章と同様の取り扱いとした。

#### 4.2 横拘束筋が最大応力に及ぼす影響

解析によって得られた相対応力-ひずみ関係を図-10に示す。ここでの相対応力とは、 $H/D=4$ の無筋コンクリート角柱の最大応力で各応力を除したものである。横拘束筋間隔が狭くなるにつれて横拘束筋による受動拘束力が大きくなり、最大応力と最大応力時のひずみが増加し、軟化勾配が緩やかになっていることが分かる。これは、円柱供試体を用いた同様の実験<sup>6)</sup>で観察された挙動とよく対応している。最大応力時と最大応力以降の $0.8\sigma_{max}$ における横拘束筋の軸方向ひずみ分布を図-11に示す。図中の破線は横拘束筋の降伏ひずみを示している。最大応力時のひずみを比較してみると、横拘束筋間隔が狭くなるにつれてひずみレベル

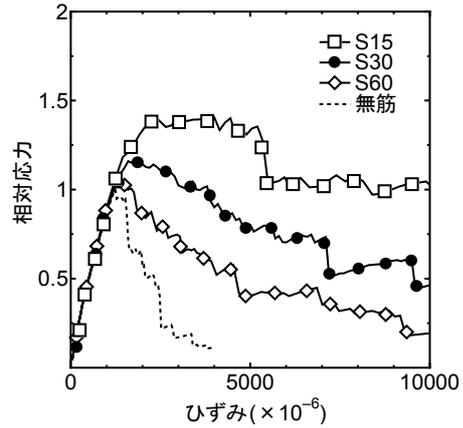


図-10 相対応力-ひずみ関係

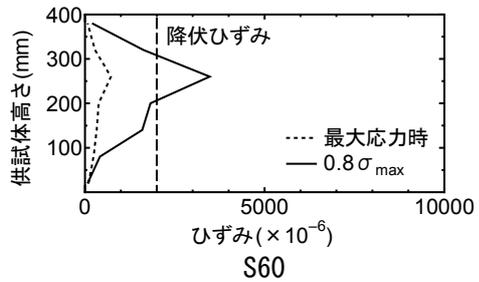
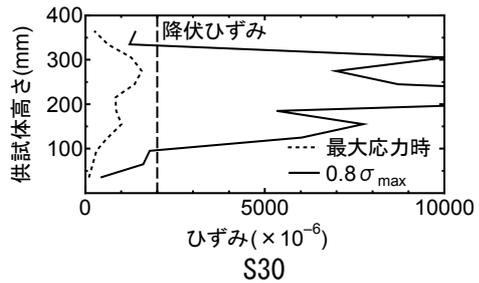
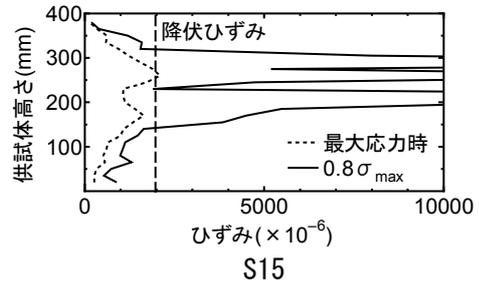


図-11 横拘束筋ひずみ分布

が大きくなり、S15では降伏ひずみを超えているのが分かる。これは横拘束筋間隔が狭いため、降伏後も拘束力を保ち、最大応力に至ったものと思われる。

#### 4.3 圧縮破壊領域の評価

最大応力時と最大応力以降の $0.8\sigma_{max}$ における軸方向ひずみ分布を図-12に示す。各供試体ともに、最大応力時でほぼ一樣のひずみ分布を示しているが、 $0.8\sigma_{max}$ 時にはひずみが急激に増

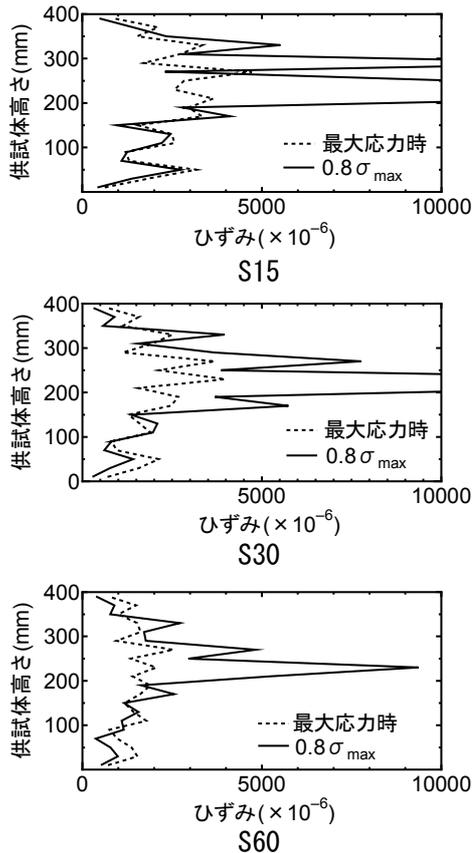


図-12 軸方向ひずみ分布

加する領域と増加しない領域にはっきりと分かれているのが確認できた。ひずみが局所化している領域の長さは、150mm から 200mm 程度であり、横拘束筋間隔による影響は判別しにくい。横拘束筋ひずみ分布と比較してみたところ、横拘束筋のひずみが降伏ひずみを超えた領域と、軸方向ひずみの局所化領域とがほぼ対応していることが確認できた。これにより、横拘束筋が降伏した部分で、破壊の局所化が起こったものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、3次元 RBSM によるコンクリートの一軸圧縮試験のメソスケール解析を行ったところ、以下のような結論を得た。

- (1) 比較的簡易なモデルを用いたメソスケール解析により、 $H/D$  を変化させた無筋コンクリートの応力-ひずみ関係を概ねよく表現することができた。
- (2) 既往の実験<sup>3)</sup>で確認されたように、 $H/D$  が

2 以下のときに摩擦による拘束力の影響を顕著に受け、摩擦のない場合には、 $H/D$  による強度変化は見られないことが、本解析によっても確認できた。

- (3)  $H/D$  が 2 以下の場合、最大応力以降ほぼ供試体全域でひずみの増加が見られ、 $H/D$  が 4 の場合にはひずみの増加がある領域に局所化する傾向を捉えることができた。
- (4) 横拘束筋の配置された供試体の解析では、応力-ひずみ関係に実験と同様の傾向が見られ、横拘束筋ひずみ分布と圧縮破壊領域とが対応していることが確認された。

## 参考文献

- 1) Saito, S. and Hikosaka, H. : Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, JSCE, No.627, V-44, pp.289-303, 1999
- 2) Cusatis, G., Bazant, Z. P. and Cedolin, L. : Confinement-shear lattice model for concrete damage in tension and compression: II, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.129, No.12, pp.1449-1458, 2003
- 3) van Vliet, M. R. A. and van Mier, J. G. M. : Softening behaviour of concrete under uniaxial compression, FRAMCOS-2, pp.383-396, 1995
- 4) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 5) 渡辺 健, 二羽淳一郎, 横田 弘, 岩波光保 : 圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.725, V-58, pp.197-211, 2003
- 6) 平野貴規, 中村 光, 斉藤成彦, 檜貝 勇 : 一軸圧縮応力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.145-150, 2002