

# 積分型非局所損傷理論を適用したファイバーモデルによる RC 部材解析

名古屋大学大学院 学生会員 ○諏訪俊輔  
 名古屋大学大学院 権庸吉  
 名古屋大学大学院 正会員 中村光  
 名古屋大学大学院 フォロー会員 田邊忠顕

## 1. はじめに

RC 構造物の性能照査の際には、ポストピーク挙動ならびにポストピーク領域で生じる損傷度を適切に評価することが可能な信頼できる非線形解析手法が要求される。しかし、軟化勾配を有する応力ひずみ関係を適用した RC 構造物の解析では、ポストピーク領域において、局所化が生じ、変位ならびにひずみが要素寸法に依存する問題が生じることが知られている。そこで本研究では、ファイバーモデルに積分型非局所損傷理論を適用して一軸圧縮解析および曲げ解析を行い、非局所理論に基づく解析によるポストピーク挙動の評価の可能性について検討した。

## 2. 積分型非局所損傷理論

非局所理論としては積分型理論、勾配理論、Cosserat 理論などが知られているが、本研究では Bazant らが提案した積分型非局所損傷理論<sup>1)</sup>を適用した。積分型理論においては非局所ひずみ  $\varepsilon_{nonlocal}$  は、局所ひずみ  $\varepsilon_{local}$  を式(1)に示すように重み関数を考慮して空間積分領域で平均化(非局所化)することで求めることができる。

$$\varepsilon_{nonlocal}(x) = \frac{1}{V_r(x)} \int_V \alpha(|x-s|) \varepsilon_{local}(s) dV(s) \quad V_r(x) = \int_V \alpha(|x-s|) dV(s) \quad (1)$$

ここで、 $V_r(x)$ は空間平均化領域、 $s$ は平均化する領域内での座標、 $\alpha(|x-s|)$ は式(2)で表される重み関数である。

$$\alpha(|x-s|) = \frac{15}{8\ell^*} \left( 1 - \left( \frac{|x-s|}{\ell^*/2} \right)^2 \right)^2 \quad |x-s| < \ell^*/2 \quad (2)$$

ここで、 $\ell^*$ は特性長さを表す。ファイバーモデルにおいては、ひずみは軸ひずみのみが対象となるので、式(3)のように非局所ひずみは書き直される。

$$\varepsilon_{nonlocal}(x) = \frac{1}{L_r(x)} \int_L \alpha(|x-s|) \varepsilon_{local}(s) ds \quad L_r(x) = \int_L \alpha(|x-s|) ds \quad (3)$$

また、応力は、損傷理論に基づき式(4)より求められる。

$$\sigma = (1-\Omega)E_0\varepsilon_{local} \quad (4)$$

ここで、 $E_0$ は初期剛性、 $\Omega$ は非局所ひずみの関数で表される損傷度パラメータで、0 から 1 の値をとる単調増加関数である。本研究では、 $\Omega$ の関数は応力—非局所ひずみ関係が図 1 に示すように、最大応力までは応力が二次放物線で増加し、最大応力以降は直線で減少し最大応力の 20%で一定となるように決定した。

## 3. 一軸圧縮解析

材料の固有寸法である特性長さ  $\ell^*$  および軟化勾配を決定する限界ひずみ  $\varepsilon_{cu}$  を変化させたパラメトリック解析を行い、直径 100(mm)、高さ 500(mm)のコンクリート円柱の一軸圧縮実験結果<sup>2)</sup>と比較することで  $\ell^*$  および  $\varepsilon_{cu}$  の同定を行った。一軸圧縮解析は部材軸方向に 40 等分に要素分割(要素寸法 12.5mm)して行った。図 2 にパラメトリック解析を行った結果として、 $\ell^* = 450(\text{mm})$ 、 $\varepsilon_{cu} = 7000(\mu)$ での応力変位関係と局所ひずみ

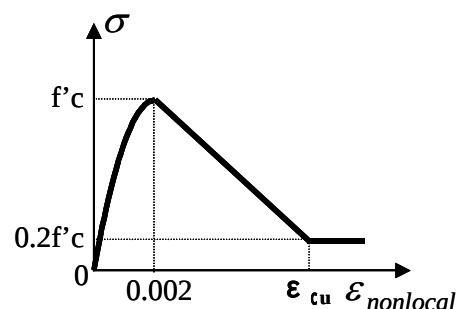


図 1 応力—非局所ひずみ関係

キーワード 積分型非局所理論、損傷理論、特性長さ、ファイバーモデル

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL 052-789-5478

分布の実験値との比較を示す．

図2の応力変位関係ならびにひずみ分布は式(2)の重み関数に依存したものではあるが，実験値とほぼ同等の結果が得られたことより，今回の仮定に対して，図1の $\varepsilon_{cu}$ はKent and Parkモデルと同程度の値となり，一軸圧縮応力に対する特性長さは450(mm)程度であることが示された．

#### 4. 曲げ解析

一軸圧縮解析結果より同定された応力—非局所ひずみ関係および特性長さをを用いて図3に示す曲げ圧縮破壊するはり供試体<sup>3)</sup>の解析を行った．解析は断面を40等分割，部材軸方向を要素寸法 $L$ を25(mm)，50(mm)，100(mm)として等分割した3通りで行った．

図4に解析および実験より得られた荷重変位関係を示す．また，圧縮破壊エネルギー<sup>2)</sup>を考慮した局所理論に基づいた解析結果も併せて示す．局所理論に基づく解析では，圧縮破壊エネルギーを考慮しているため，要素寸法に依存しない曲線になった．一方，非局所理論を用いた解析では，唯一の応力—非局所ひずみ関係を用いても要素寸法によらない結果が得られることが分かる．

図5にコンクリート圧縮縁上端より25mmの位置における，最大荷重後70%での実験値，非局所理論ならびに局所理論に基づく解析で得られた局所軸ひずみ分布を示す．局所理論に基づく解析ではポストピーク領域に入ると局所化が生じ，ひずみの要素寸法依存性が発生し，その分布性状も実験値と明らかに異なることが分かる．一方，非局所理論を用いた解析ではひずみの要素寸法依存性が低減され，ひずみ分布性状も実験値を妥当に評価できることが分かる．

#### 5. 結論

積分型非局所損傷理論に基づき，一軸圧縮応力下の応力—非局所ひずみ関係ならびに特性長さの同定を行った．また，曲げ圧縮破壊するはりに適用し，ポストピーク領域においても変位ならびにひずみの要素寸法依存性を低減でき，実験値を妥当に評価できることを明らかにした．

#### 参考文献

- 1) Bazant, Z.P・Planas, J : FRACTURE AND SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, pp.489-525,1998
- 2) Nakamura, H・Higai, T : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE,2001
- 3) 立松ら : 柱基部におけるコンクリートの圧縮破壊領域に関する実験的研究 , コンクリート工学年次論文集 , 第19巻第2号 , pp.897-902,1997

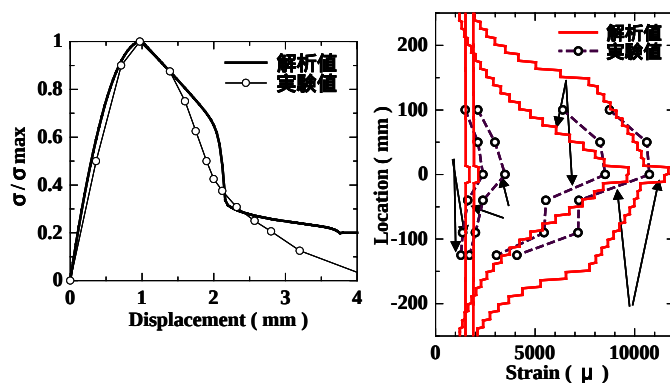


図2 一軸圧縮解析結果

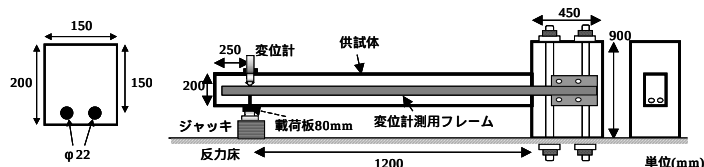


図3 曲げ圧縮破壊供試体およびその断面

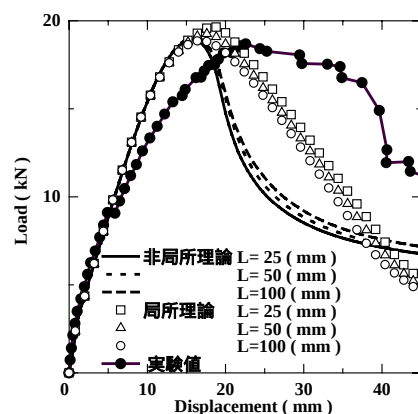
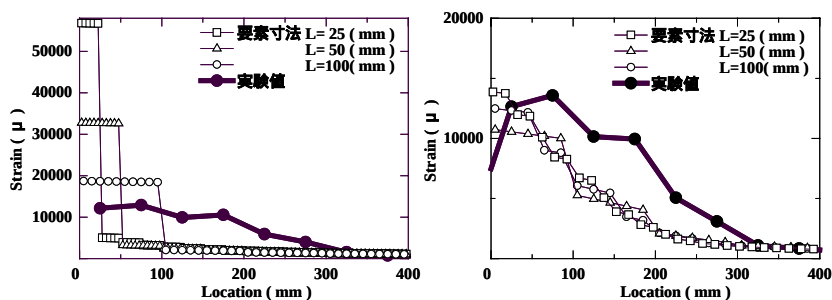


図4 荷重変位関係



局所理論に基づく解析

非局所理論に基づく解析

図5 最大荷重後70%における部材軸方向のひずみ分布