

積分型非局所構成則の 2 次元 RC 部材への適用に関する基礎的研究

A Fundamental Study on Application to 2D RC Members of Integral Type Nonlocal Constitutive Law

権庸吉*, 上田尚史**, 中村光***, 国枝稔****

Yong-gil Kwon, Naoshi Ueda, Hikaru Nakamura, Minoru Kunieda

* 学生会員 修 (工), 名古屋大学大学院生, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

** 正会員 修 (工), 名古屋大学大学院生, 社会環境工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

*** 正会員 博 (工), 名古屋大学大学院教授, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

**** 正会員 博 (工), 名古屋大学大学院助教授, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)

The application of integral type non-local constitutive model to 2D RC members was investigated. The investigation is to aim at the nonlocal variable, the treatment of nonlocal variable as well as the integral region which are available to apply to the general stress field by computing the uniaxial compressive concrete member and the compression flexure failure RC beam. As the results, the nonlocal variable was suitable using the strain with the local coordinate direction to evaluate uniaxial stress. Moreover, the conventional circle integral region was not appropriate. The concept of ellipse integral region which is varied the shape and size with the state of stresses was proposed. It showed that the proposed method could evaluate the behavior of RC members approximately.

Key Words: Nonlocal theory, Nonlocal variable, Ellipse integral region, RC beam

1. はじめに

RC 構造物の合理的な設計を行うためには, 最大耐力以降のポストピーク挙動を正確に評価することが必要となる¹⁾. また, 性能照査型設計法への移行に伴い, 非線形解析によりポストピーク挙動まで精度よく評価することが望まれている²⁾. その際には, 終局に至るまでにコンクリート構造物に生じる特徴的な損傷に関する限界値を適切に評価することが要求される. これらの限界値に関する損傷は, 多くの場合, 塑性ヒンジのような局所化した領域で生じるため, 局所化領域ならびに局所位置での物理量であるひずみ量を妥当に評価することが必要となる.

離散化手法である有限要素解析にひずみ軟化材料を適用した場合, 変位ならびにひずみが要素寸法に依存する問題が発生することが知られている. この問題を改善するひとつの手法として, 破壊エネルギーを考慮した応力ひずみ関係を用いることが提案されており, これにより変位の要素寸法依存性を低減することが可能となっている³⁾. しかしながら, ひずみの局所化は要素寸法幅で生じるため, 要素寸法によって異なる分布性状を示す. そのため, 要素寸法が小さいほど局所化が進展する問題が発生し, 局所化領域ならびに局所化領域内での局所情報を妥当に評価できないのが現状である. したがって, 解析に一般性を持たせ,

損傷度の評価を可能にするためには, ひずみの要素寸法依存性をも低減させる必要がある.

この問題を解決できる手法の一つとして, 積分型非局所構成則⁴⁾が挙げられる. 材料の局所化現象を解析する場合, 古典的な連続体理論に基づくとは非合理的な応答が現れるため, このような応答を解決するためには Localization limiter が必要である⁵⁾. そのため, 積分型非局所構成則では, Localization limiter として長さスケールを持っている特性長さを導入し, 局所ひずみを要素寸法とは別に設定した空間積分領域で平均化 (非局所化) することで, 物理的に合理的な応答を求め, 局所理論に基づく従来の解析で問題となる要素寸法依存性を回避できるようになる^{4,5,6)}. ただし, コンクリートに対する非局所構成則の適用は, 従来, 主に引張応力下のひび割れ進展解析に適用されるのがほとんどであった⁶⁾. それに対し, 著者らは, 一軸圧縮応力下への適用を試み, 引張応力下とは特性長さが異なることなどの知見を得ている⁷⁾. しかしながら, コンクリート構造物への適用を考えた場合は, より複雑な応力状態での適用性を検討する必要がある.

そこで本研究では, 積分型非局所構成則を 2 次元 RC 部材へ適用するための基礎的な検討を行った. すなわち, 2 次元格子等価連続体モデル (LECOM)⁸⁾に積分型非局所構成則⁴⁾を導入し, 一軸圧縮コンクリート部材ならびに曲げ

圧縮破壊する RC 部材を対象とし、実験値と比較することでその適用性に関する検討を行った。まず 2 軸応力場で妥当と思われる非局所変数ならびに非局所変数の取り扱いについて検討した。次に、空間積分領域は引張応力下と圧縮応力下では異なる寸法が提案されていることから、部材内の複雑な応力場でも一般的に適用できる空間積分領域について検討した。

2. 解析理論

2.1 格子等価連続体モデル (LECOM)⁸⁾

格子等価連続体モデルは、ひび割れた RC 要素の耐荷機構を、コンクリートおよび補強筋を格子成分に置き換えることにより、等価な連続体構成式を導く方法である。格子等価連続体モデルの特徴は、格子成分応力と全体応力場の関連に、kinematics 型の micro-plane を用いることにより、RC 要素の耐荷機構を形成するコンクリートおよび補強筋の局所座標方向を、破壊の進行に応じて自由に与えることを可能とし、複雑な理論を必要としない点である。また、その構成式は、ひび割れが発生した RC 要素の複雑な特性に及ぼす要因を、コンクリートおよび補強筋格子成分を用いると共に、それらの方向角を破壊の進行に応じて操作することや、格子成分の応力-ひずみ関係を適切に評価することで、自由に表現することが可能となる。なお、格子等価連続体モデルによる RC 要素構成式は、補強筋とコンクリートの耐荷機構をモデル化する Main lattice と、ひび割れ面におけるせん断伝達挙動をモデル化する Shear lattice の各格子成分を想定すると共に、各格子成分に適切な一軸応力-ひずみ関係を仮定することにより構築される。

2.2 積分型非局所構成則

2 次元応力場における積分型非局所化手法では、非局所変数 $\bar{f}(x)$ は、式(1)に示すように重み関数 $\alpha(x, \xi)$ を考慮して、局所変数 $f(x)$ を空間積分領域(面積)で平均化(非局所化)することで求めることができる⁹⁾。

$$\begin{aligned}\bar{f}(x) &= \frac{1}{A_r(x)} \int_A \alpha_0(x, \xi) f(\xi) dA(\xi) \\ &= \int_A \alpha(x, \xi) f(\xi) dA(\xi)\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $A_r(x)$ は空間積分領域で式(2)より求められる。

$$A_r(x) = \int_A \alpha_0(x - \xi) dA(\xi) \quad (2)$$

また、 $\alpha(x, \xi)$ は、重み関数(平均化関数)であり、式(3)より求められる。

$$\alpha(x, \xi) = \frac{\alpha_0(x, \xi)}{A_r(x)} \quad (3)$$

$\alpha_0(x, \xi)$ は、 $\xi = x$ で最大値を持っている対称形の正の関

数である。

一方、式(1)は式(4)のように離散化できる。ここで、 $\Delta A_{el,j}$ は 2 次元解析では要素の面積である。N は局所化領域内に含まれる有限要素の Gauss 点の総数、 x_i と x_j は Gauss 点の位置である。

$$\bar{f}(x_i) = \frac{1}{A_r(x_i)} \sum_{j=1}^N \alpha_0(x_i - x_j) \Delta A_{el,j} f(x_j) \quad (4)$$

また、局所化領域($A_r(x)$)は式(2)より求められ、式(5)となる。

$$A_r(x_i) = \sum_{j=1}^N \alpha_0(x_i - x_j) \Delta A_{el,j} \quad (5)$$

添字 ij は 1, 2, 3, $\dots$, N で、N は Gauss 点の総数である。

積分型非局所構成則を適用するに際し、重み関数 $\alpha_0(x, \xi)$ および空間積分領域 $A_r(x)$ を定義する必要がある。本研究では、重み関数は簡単のため図-1 に示すように積分領域内で一定の値と仮定した。一方、空間積分領域は、一般に特性長さ ℓ^* を関数とした円形積分領域が用いられる。ここで ℓ^* は、ひび割れ進展解析のような引張応力下に対してはフラクチャープロセスゾーンの大きさを考慮して最大骨材寸法の 2~3 倍の値が用いられる⁴⁾。また圧縮応力下に対しては、著者らは既往の研究から 200mm~300mm の範囲が適当としている⁷⁾。このように特性長さは応力状態によって異なる可能性があることに注意をする必要がある。なお、本研究では、2 次元応力下での積分領域の形状ならびに特性長さについて、3 章以降で検討する。

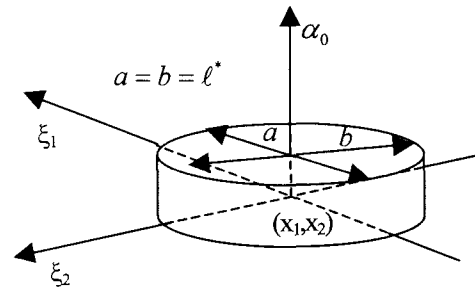


図-1 重み関数の概形

2.3 材料モデル

コンクリートの応力は、損傷理論に基づき式(6)により求めた⁴⁾。

$$\sigma = (1 - \Omega_{nonlocal}) E_0 \varepsilon_{local} \quad (6)$$

ここで、 $\Omega_{nonlocal}$ は、0 から 1 の値を持つ非局所損傷パラメータであり、単調増加関数である。本研究では $\Omega_{nonlocal}$ を式(1)から求められた非局所ひずみ ($\varepsilon_{nonlocal}$) の関数とし、非局所量として定義する。 E_0 は初期弾性係数である。非局所構成則では、局所量 (ε_{local}) のみではなく、非局所量を構

成則に含むことが特徴である。

コンクリートの圧縮応力の算定は、応力-非局所ひずみ関係が図-2に示す Saenz の応力-ひずみ曲線と等しくなるように損傷パラメータ $\Omega_{nonlocal}$ を定義することで行った。その時の、圧縮応力下での非局所損傷パラメータ $\Omega_{nonlocal}$ は式(7)で表される。

$$\Omega_{nonlocal} = \frac{1}{1 + a \frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} - b \left(\frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} \right) + c \left(\frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} \right)^3}$$

$$a = \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right), \quad b = (2R - 1), \quad c = R$$

$$R = \frac{E_0(\sigma_c/\sigma_f - 1)}{E_s(\varepsilon_f/\varepsilon_c - 1)^2} - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_f} \quad (7)$$

ここで、 σ_c は最大応力、 ε_c は最大応力時のひずみ、 σ_f 、 ε_f は最大応力以降の曲線上の任意点の座標で、 $(\sigma_f, \varepsilon_f) = (0.4\sigma_c, 4.0\varepsilon_c)$ と仮定した。なお、今回用いた応力-非局所ひずみ関係は、Kent and Park モデルに近い性状を示すものである。

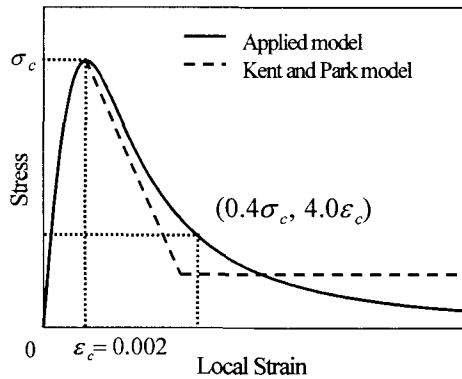


図-2 圧縮応力-ひずみ関係

一方、引張側は式(8)に示した tension stiffening model に基づき損傷パラメータ $\Omega_{nonlocal}$ を定義した。応力-非局所ひずみ関係が式(8)と等しくなるように仮定すると、引張応力下での $\Omega_{nonlocal}$ は式(9)で表される。

$$\sigma = \frac{f_t}{1 + 20\sqrt{200(\varepsilon - \varepsilon_t)}} \quad (8)$$

$$\Omega_{nonlocal} = 1 - \frac{f_t}{E_0 \varepsilon_{nonlocal} (1 + 20\sqrt{200(\varepsilon_{nonlocal} - \varepsilon_t)})} \quad (9)$$

なお、 $\Omega_{nonlocal}$ は圧縮、引張でそれぞれ独立な値を持つものとした。

一方、鉄筋の応力は、局所ひずみ量 (ε_{local}) により算定し、応力-ひずみ関係は引張側、圧縮側とも降伏強度 f_y に達するまでは弾性体とし、降伏後は初期勾配 E_s の 1/100 の傾きで応力が増加するものとした。

3. 一軸圧縮応力を受けるコンクリート部材の解析

3.1 解析モデル

単純な応力状態である一軸圧縮応力下のコンクリート部材を対象に、積分型非局所構成則の適用性を検討した。解析は、直径 100(mm) 高さ 500(mm) の円柱供試体実験を対象として行った。この供試体は、断面内部にアクリル棒を設置することでコンクリートの局所ひずみ分布の進展が測定されたものである³⁾。解析は、要素寸法を 25(mm) × 25(mm)、50(mm) × 50(mm) の 2 通りに変化させ、要素寸法の影響についても検討した。図-3に解析モデルを示す。なお、解析においては、実験においてひずみが最も局所化した高さにある要素の断面積を 5% 減少させて弱点とすることで局所化の起点となるようにした。

3.2 局所理論に基づく解析

局所理論解析による問題点を明らかにするために、要素寸法の異なるモデルに対し、一般に用いられる局所理論に基づく解析を行った。解析は、式(7)で $\varepsilon_{nonlocal}$ を ε_{local} に置き換え唯一の応力ひずみ関係を用いた場合と、最大応力以降を式(10)に示す圧縮破壊エネルギー³⁾を考慮した直線に置き換え、要素寸法に応じて軟化勾配を変化させる応力ひずみ関係を用いた場合に対して行った。

$$G_f = 8.8\sqrt{f'_c} \quad (10)$$

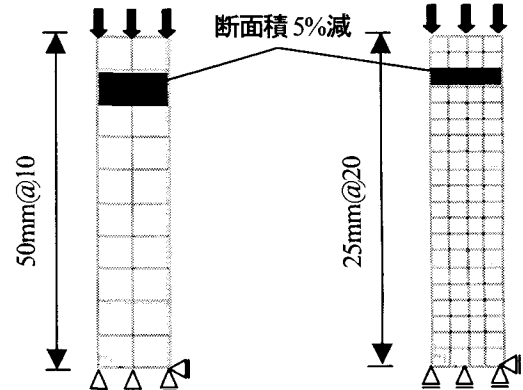


図-3 解析モデル

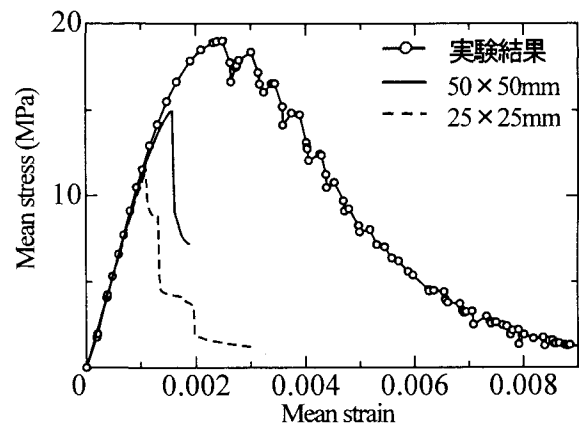


図-4 平均応力-平均ひずみ関係 (局所解析)

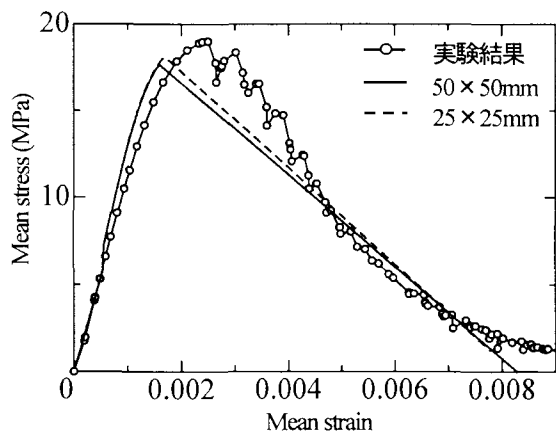


図-5 平均応力-平均ひずみ関係 (破壊エネルギーを考慮)

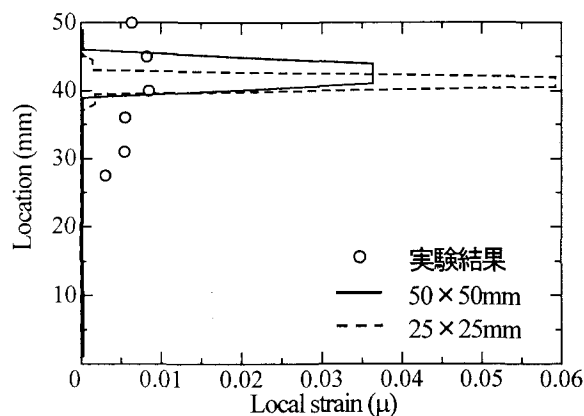
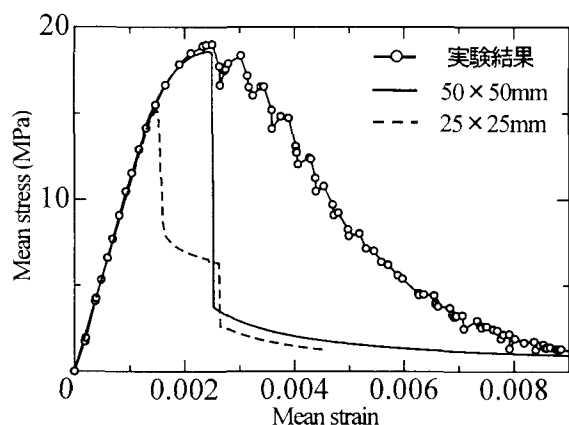
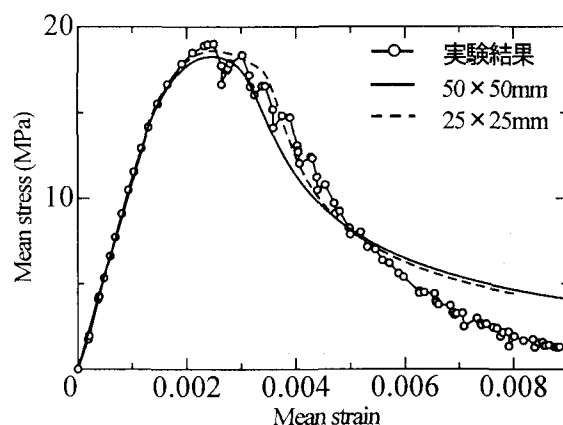


図-6 ひずみ分布図 (平均ひずみ 4000 μ)



(a) 特性長さ 50mm



(b) 特性長さ 250mm

図-7 平均応力-平均ひずみ関係

図-4に唯一の応力ひずみ関係を用いた場合の平均応力-平均ひずみ関係の解析値と実験値を示す。図によれば、最大応力以前で急激に応力が低下し、明らかに実験値と異なる挙動を示す。また、要素寸法が小さいほど応力が早期に低下する。これは、軟化域を有する材料モデルを用いた有限要素解析では、ひずみが一要素に集中する局所化が生じ、要素寸法が小さくなるほど局所化する要素で吸収されるエネルギーが小さくなるためである。

図-5に圧縮破壊エネルギーを考慮し要素寸法に応じた軟化勾配を有する応力ひずみ関係を用いた場合の平均応力-平均ひずみ関係の実験値と解析値を示す。破壊エネルギーを導入することで、要素寸法によらない関係を得ることが出来、また実験値も妥当に評価できる事が示されている。これは、ひずみが一要素に集中する局所化が生じて、応力ひずみ関係の軟化勾配を変化させることで要素寸法によらず局所化する要素で吸収される最大応力以降のエネルギーを等しくしているためである。図-6に平均ひずみが 4000 μ のときの供試体中央位置の高さ方向のひずみ分布の実験値と解析値を示す。ひずみ分布は、要素寸法が小さくなるほど局所化して大きな値を示すことが分かり、荷重変位関係が等しくてもひずみの要素寸法依存性が現れ、コンクリートの局所の変形挙動を妥当に評価していない事が分かる。

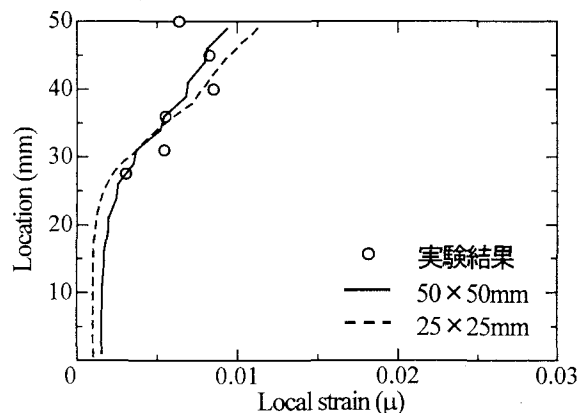


図-8 ひずみ分布図 (平均ひずみ 4000 μ)

3.3 積分型非局所構成則に基づく解析

図-7(a)と図-7(b)にひび割れ解析で一般に用いられている骨材寸法の2~3倍の特性長さを考慮して特性長さを50mmとした場合と、圧縮応力下のコンクリートの特性長さは200mm~300mmが適当であるとの著者らの既往の知見を考慮して特性長さを250mmとした場合の、2通りの特性長さに対し、円形積分領域を仮定して積分型非局所構成則を適用した場合の平均応力-平均ひずみ関係の解析値と実験値を示す。なお、非局所変数としては、主応力方向の軸方向ひずみとした。特性長さが50mmの場合は、最大応力以前に応力が急激に低下し、積分型非局所構成則

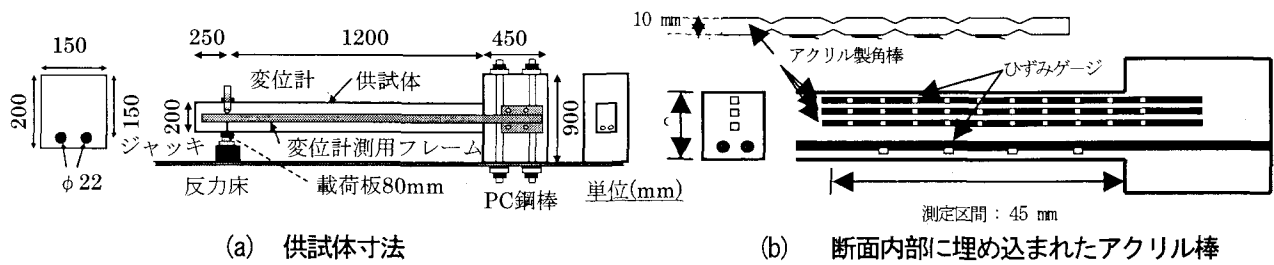


図-9 部材の諸元ならびに実験概要

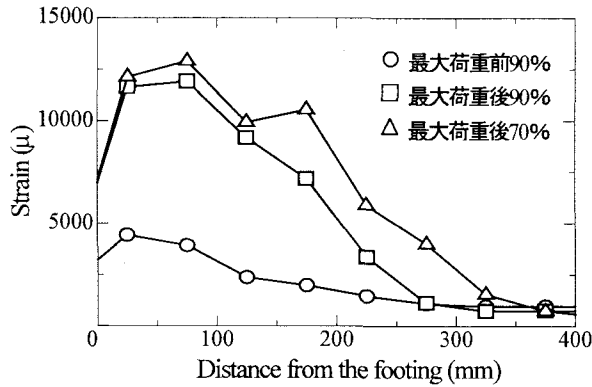


図-10 軸ひずみの進展の様子 (実験結果)

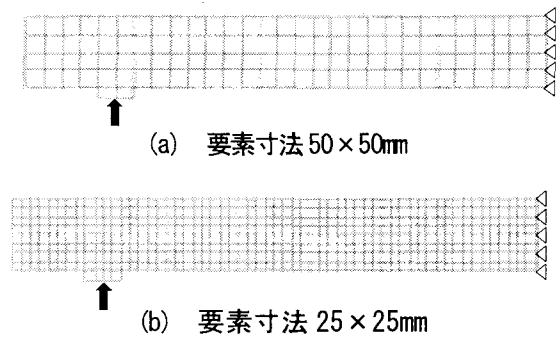


図-11 解析モデル

を用いても実験値を妥当に評価出来ないことが分かる。一方、特性長さが 250mm の場合は、要素寸法によらない平均応力 - 平均ひずみ関係を得ることが出来、また実験値も妥当に評価できる事が示されている。なお、6000 μ 以降の解析値は実験値より低い値となるが、これは式(7)の saenz の式の軟化曲線の形状と実験結果の傾向が相違するためである。積分型非局所構成則を用いる場合は、特性長さは最も重要な解析パラメータであり、圧縮応力下では従来用いられている骨材寸法の 2~3 倍の特性長さは妥当ではなく、著者らの提案のようなより大きな特性長さをを用いる必要があることが分かる。また、積分型非局所構成則を用いた場合の局所ひずみの性状を検討するため、特性長さ 250mm の場合に対し平均ひずみが 4000 μ のときの供試体中央位置の高さ方向のひずみ分布の実験値と解析値を図-8 に示す。局所ひずみは要素寸法に依存せず、ある特定の長さを持って分布し、また実験値と近い挙動を示すことが分かり、積分型非局所構成則を用いることで、荷重変位関係だけでなくひずみ挙動も妥当に評価できることが分かる。なお、局所ひずみがモデル上端で最大値となり、弱点を与えた要素位置と異なるが、これは境界の影響を受けたためである⁷⁾。

4. 曲げ圧縮破壊する RC 部材に対する非局所変数ならびに特性長さの検討

4.1 曲げ圧縮破壊する RC 部材⁹⁾

解析の対象とした RC 部材の諸元を図-9 に示す。この部材は、長さ 1200(mm)、150(mm)×200(mm)の矩形断面を有し、鉄筋に PC 鋼材を用いた曲げ圧縮破壊するように設

計された片持ちはりである。PC 鋼材のヤング係数は 1.93×10^5 (MPa)、降伏強度は 1044.4(MPa)で、コンクリートの圧縮強度は 17.8(MPa)である。また、実験では荷重変位関係だけでなく、断面内部にアクリル棒を埋め込み、コンクリートひずみを断面上端から 25(mm)、60(mm)、90(mm)の高さ位置で、固定端から 450(mm) までの区間で 50(mm)間隔で計測している。図-10 にフーチング位置を原点として実験で得られた 25(mm)位置での最大荷重前 90%、最大荷重後 90%、70%の軸方向ひずみ分布を示す。最大荷重以降ひずみの局所化が、フーチングから 200~300mm の拡がりを持って進展していることが分かる。図-11 に解析モデルを示す。解析は要素寸法を 25(mm)×25(mm)、50(mm)×50(mm)の 2 パターンに変化させ、要素寸法の影響についても検討した。

4.2 局所理論に基づく解析

前章で示した一軸圧縮部材と同様に、唯一の応力ひずみ関係を用いた場合と、圧縮破壊エネルギーを考慮し要素寸法に応じた軟化勾配を有する応力ひずみ関係を用いた場合の局所理論解析を行った。唯一の応力ひずみ関係を用いた場合の荷重 - 変位関係の解析値と実験値を図-12 に示す。図によれば、いずれの要素寸法に対しても最大荷重以前に急激に荷重低下し、明らかに実験値と異なる挙動を示す。また、要素寸法が小さいほど早期に荷重が低下しより脆性的な挙動を示すことが分かる。

図-13 に圧縮破壊エネルギーを考慮し要素寸法に応じた軟化勾配を有する応力ひずみ関係を用いた場合の荷重 - 変位関係の解析値と実験値を示す。破壊エネルギーを導入することで、実験値に近い挙動を示すようになることが

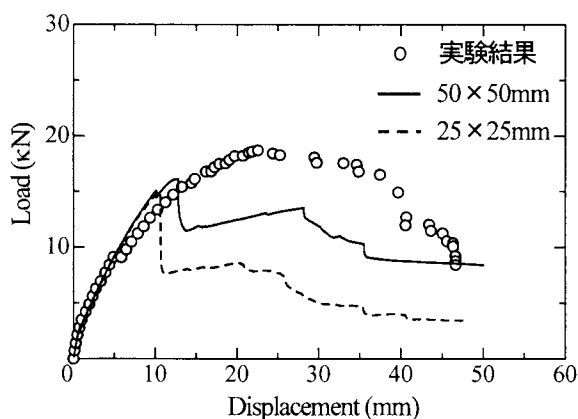


図-12 荷重-変位関係 (局所解析)

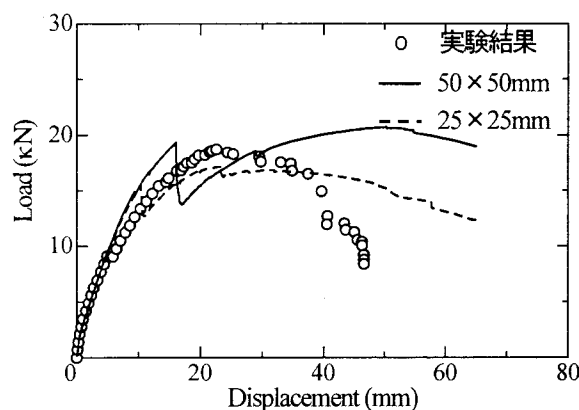


図-13 荷重-変位関係 (破壊エネルギーを考慮)

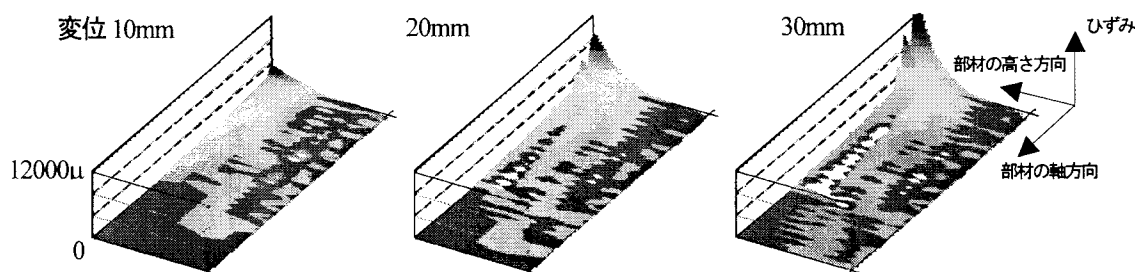


図-14 ひずみ分布 (破壊エネルギーを考慮した解析)

分かる。要素寸法 50(mm)×50(mm)の場合の局所ひずみ分布の進展状況を図-14 に示す。最大荷重以降は圧縮側上縁のフーチング付近のみで局所的なひずみの進展が見られ、図-10 で示したような実験で観察されたひずみの拡がりは再現することが出来ず、コンクリートの局所の変形挙動を妥当に評価していない事が分かる。

4.3 積分型非局所構成則に用いる非局所変数と非局所変数の取り扱いに対する検討

複雑な応力状態を生じる RC 部材を対象とした場合、非局所変数の取り扱いが問題となる。すなわち、コンクリートの非線形解析を行う場合は、全体座標系ではなくひび割れ面や主応力方向に局所座標系を規定し、その座標系で応力を算出するのが一般的であるため、ひずみを非局所変数とする場合には、参照する座標系の定義が必要となる。なお、3章で示した一軸応力下では全体座標系と局所座標系が一致していたため、非局所変数としてのひずみの座標系に注意を払う必要はなかった。そこで本節では、非局所変数として全体座標系の軸方向ひずみと局所座標系の軸方向ひずみを取り上げ、それぞれの適用性ならびにその取り扱いについて検討する。

(1) 全体座標系ひずみを非局所変数とする場合の適用性

全体座標系(x-y 座標系)での軸方向ひずみ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$)を非局所変数として、積分型非局所構成則の適用性を検討した。図-15(a)および図-15(b)に特性長さを 50mm ならびに 250mm とした場合の荷重変位関係の解析値と実験値を示す。

す。特性長さ 50mm の時は、いずれの要素寸法に対しても最大荷重以前で急激に荷重が低下する挙動を示していることが分かる。一方、特性長さ 250mm の場合は、剛性が大きく実験値と異なり実験値を妥当に評価できていない。

コンクリートの応力はひび割れ面での局所座標系あるいは主応力方向で評価するが、全体座標系での軸方向ひずみを非局所化することは、応力を算定するためのひずみと直接的に関係しない量を非局所化するため、変形の適合条件を満足する力の釣合状態を求めることが困難なためと考えられる。したがって、全体座標系での軸方向ひずみを非局所変数として用いることは不適切であると言える。

(2) 局所座標系ひずみを非局所変数とする場合の適用性

ひび割れ面での局所座標系あるいは主応力方向の軸方向ひずみを非局所変数として、積分型非局所構成則の適用性を検討した。図-16(a)および図-16(b)に特性長さを 50mm ならびに 250mm とした場合の荷重変位関係の解析値と実験値を示す。特性長さ 50mm の時は、いずれの要素寸法に対しても最大荷重以前で急激に荷重が低下する挙動を示していることが分かる。一方、特性長さ 250mm の場合は、要素寸法が 25mm の場合は、最大荷重以前で急激に荷重が低下し、要素寸法が 50mm の場合は、最大荷重を過大に評価する結果になった。ただし、全体座標系での軸方向ひずみを非局所変数とした場合と比べ、剛性は実験値と近い値を示しており、適用性の改善が見られる。

軸方向ひずみを単に積分領域内で非局所化する場合、RC 部材のような複雑な応力状態では、積分領域が大きく

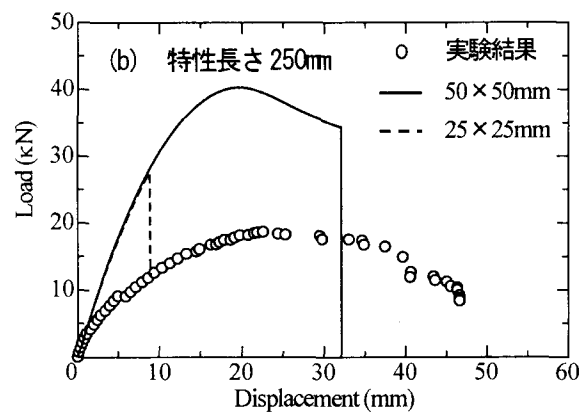
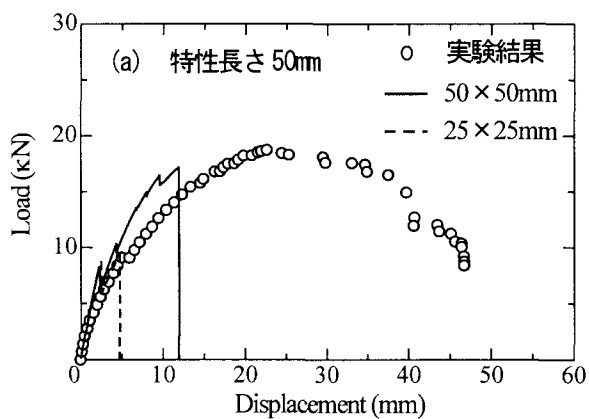


図-15 荷重-変位関係（非局所解析，全体座標系ひずみを非局所化）

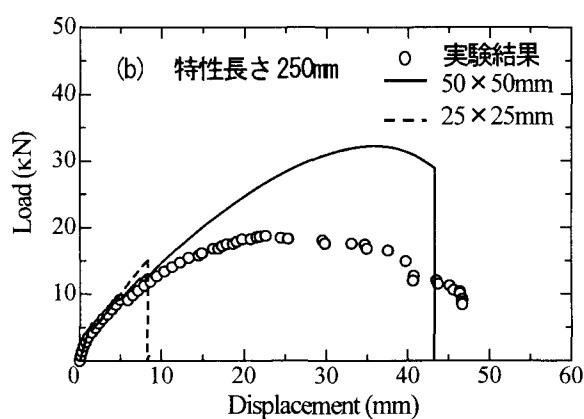
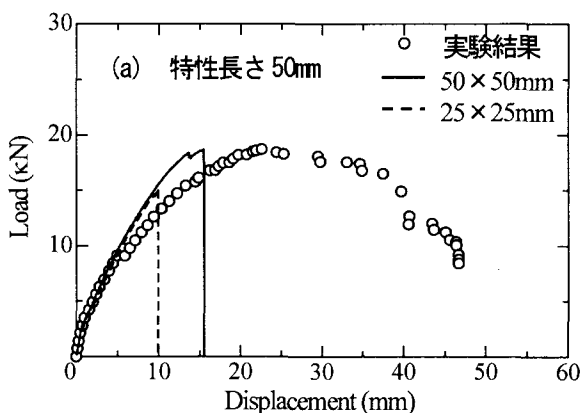


図-16 荷重-変位関係（非局所解析，局所座標系ひずみを非局所化）

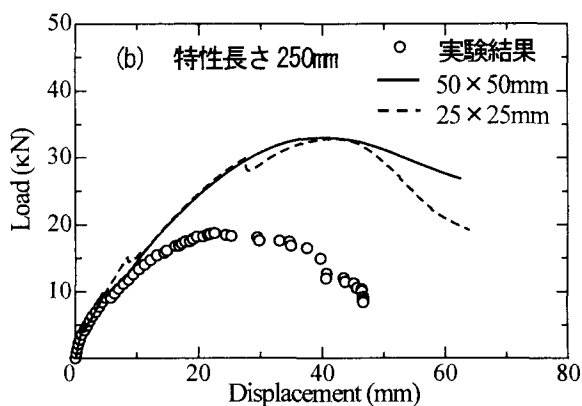
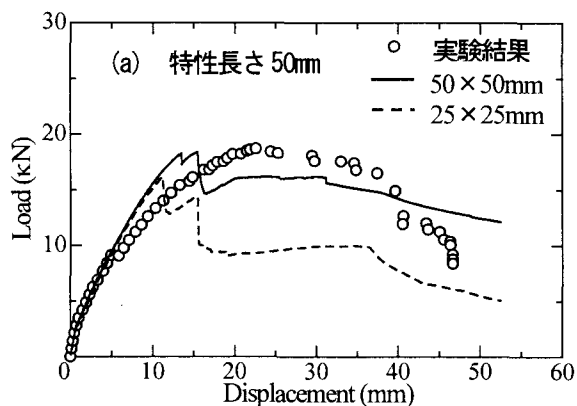


図-17 荷重-変位関係（非局所解析，局所座標系ひずみを非局所化）

なるほど引張ひずみと圧縮ひずみを同時に扱う可能性が高くなる。その場合、応力ひずみ関係の特性上、引張ひずみは圧縮ひずみに比べて絶対値が大きくなり、着目点で圧縮ひずみが生じていても、近傍点で引張ひずみが存在する場合は、非局所化することで着目点の非局所ひずみが正になる可能性が生じる。このような状況が生じれば、圧縮応力を算出すべき着目点で引張応力が算定されるため、適用性の低下が生じると考えられる。したがって、局所座標系での軸方向ひずみをそのまま非局所変数として用いることは不適切であると言える。

(3) 応力状態で分離した局所座標系ひずみを非局所変数とする場合の適用性

前述の非局所変数の検討結果に基づき、非局所化するひずみ量は局所座標系ひずみが適当であるが、平均化領域内における応力状態の混在について、適切に処理する必要があると考えられる。そこで、本研究では着目点の応力状態に応じて、平均化領域内に混在している圧縮応力領域と引張応力領域を分離し、それぞれについて平均化することとした。すなわち、着目点の局所座標系の軸方向ひずみが圧縮ひずみの場合は、積分領域内の引張ひずみの値を零とし着目点の局所座標系の軸方向ひずみが引張ひずみの場合、

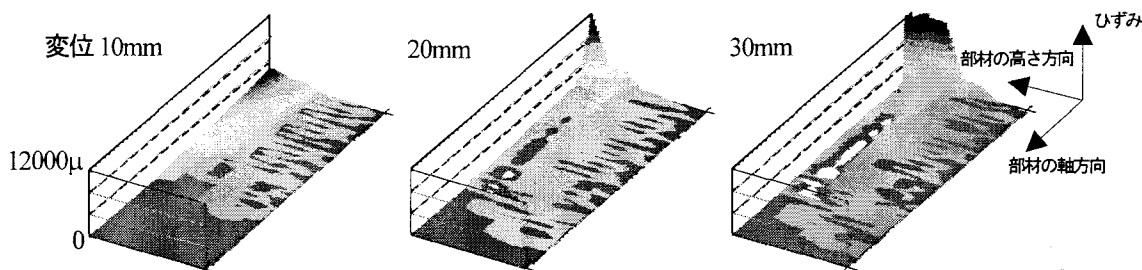


図-18 ひずみ分布（非局所構成則を適用した解析，特性長さ 50mm）

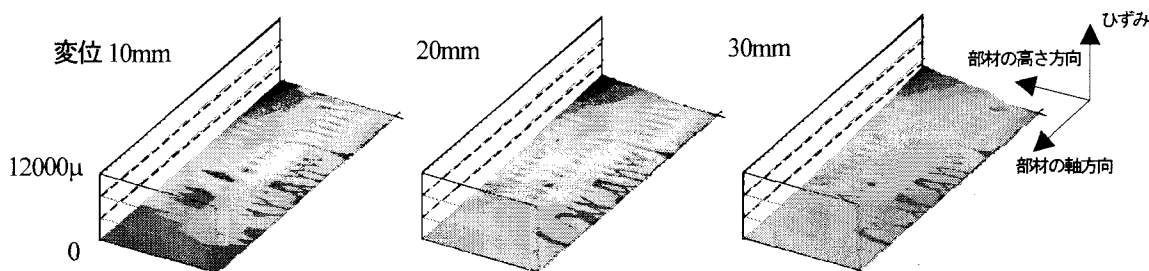


図-19 ひずみ分布（非局所構成則を適用した解析，特性長さ 250mm）

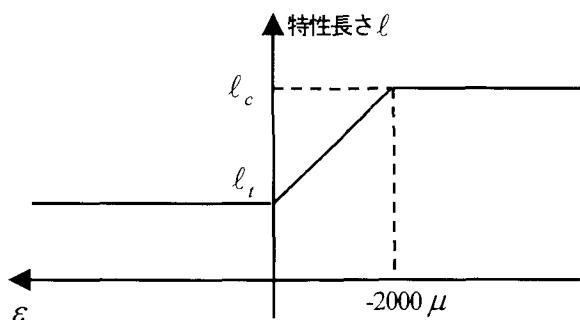


図-20 応力状態に応じた特性長さの変化

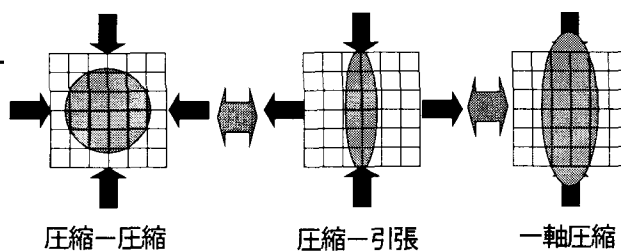


図-21 応力状態に応じた積分領域の概念

積分領域内の圧縮ひずみの値を零とした。

図-17(a)および図-17(b)に特性長さを 50mm ならびに 250mm とした場合の荷重変位関係の解析値と実験値を示す。特性長さが 50mm の場合、前述の結果よりも改善され、比較的实验値と近い挙動を示すようになることが分かる。図-18 に要素寸法 50mm の場合の局所座標系での圧縮ひずみの分布を示す。最大荷重以降はフーチング付近のみで局所的なひずみの進展が顕著になるが、積分領域が要素寸法と同様であるので、図-10 で示したような実験で観察されたひずみの拡がりは再現することが出来ず、コンクリートの局所の変形挙動を妥当に評価していない事が分かる。一方、特性長さが 250mm とした場合は、解析結果は実験値をかなり過大に評価する結果となったが、要素寸法の影響が表れず応力状態でひずみを分離することで前述の結果に比べ改善されることが分かる。図-19 に要素寸法 50mm の場合の局所座標系に対する圧縮ひずみの分布を示す。圧縮側上縁のフーチング付近で実験値と同様にひずみが拡がりを持って局所化していく挙動が生じている。しかしながら、局所的なひずみ分布は平均化されたが、平均化される領域が大きいので、部材全体には

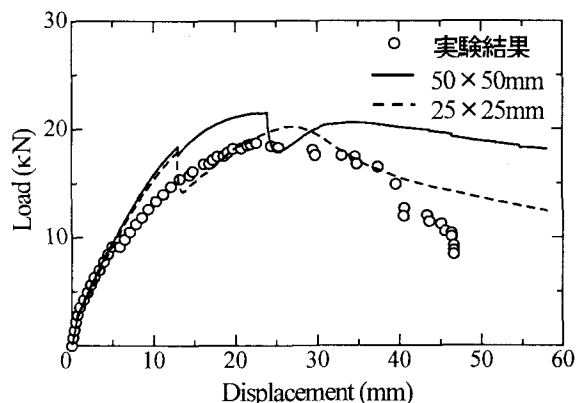


図-22 荷重-変位関係（楕円型領域による非局所化）

たつてひずみが平均化されており、この結果部材が吸収するエネルギーを過大に評価し荷重が大きくなることが推測される。以上の結果より、平均化される積分領域を適切に評価するため、応力状態に応じて平均化される領域の形状や大きさ、すなわち特性長さを変化させる必要があることが考えられる。

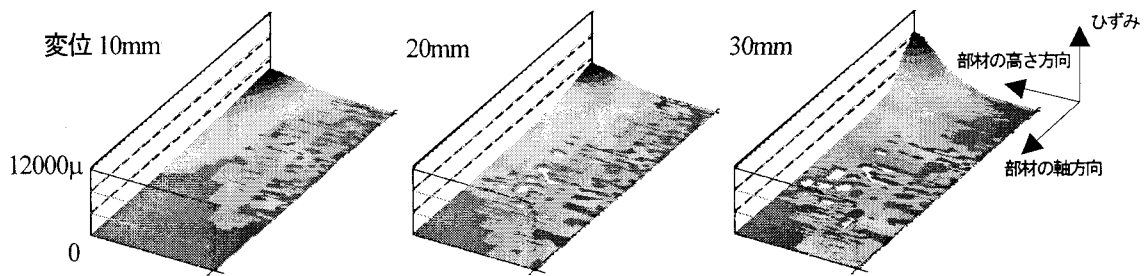


図-23 ひずみ分布（楕円形積分領域を適用した解析，要素寸法 25×25mm）

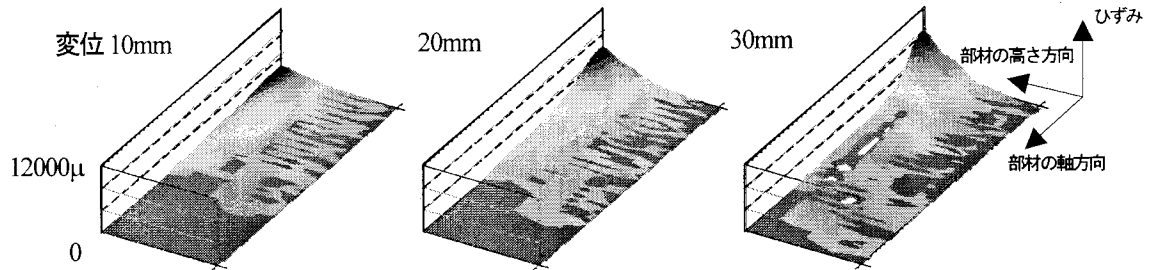
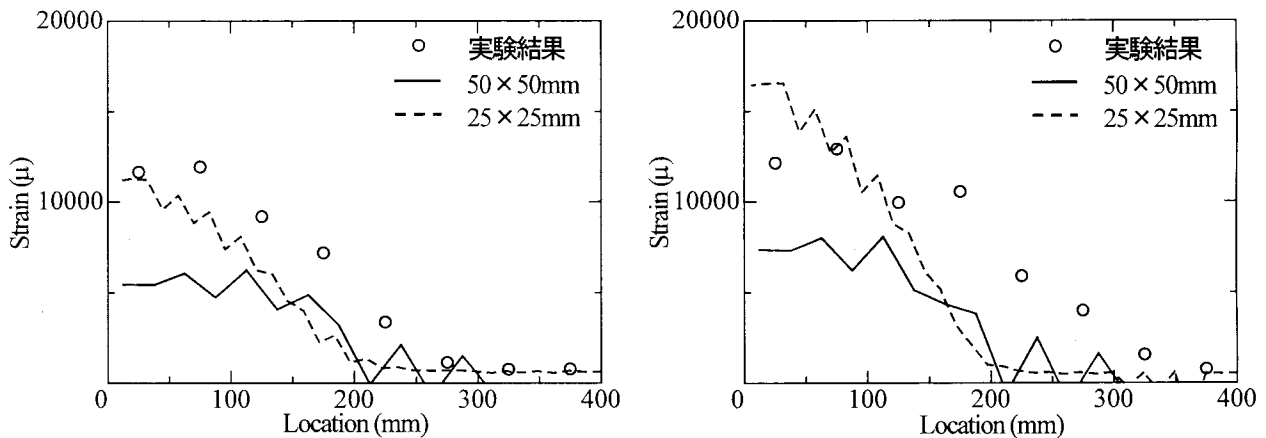


図-24 ひずみ分布（楕円形積分領域を適用した解析，要素寸法 50×50mm）



(a) 最大荷重後 90%（変位 30mm に相当）

(b) 最大荷重後 70%（変位 40mm に相当）

図-25 はり上縁より 25mm におけるひずみ分布の比較

5. 楕円形積分領域の提案とその適用性に対する検討

5.1 楕円形積分領域の提案

4 章での検討結果から，非局所変数としては，応力状態で分離した局所座標系ひずみを用いればよいと推測された．さらに，圧縮・引張応力が混在する場合には積分領域を適切に評価する必要があることも明らかになった．そこで，本研究では，特性長さが図-20 に示しているように，圧縮応力下の特性長さ l_c と，引張応力下の特性長さ l_t を範囲とし，着目点のひずみの大きさにより変化すると仮定した楕円形積分領域を提案する．図-21 に各応力状態における積分領域の概念を示す．積分領域は応力状態によって変化し，圧縮 - 圧縮，圧縮 - 引張，一軸圧縮のような異なる応力状態に対し，図-20 に示した関係により長径・短径が変化する楕円形となる．

5.2 曲げ圧縮破壊する RC 部材への楕円形積分領域の適用性

図-22 に本研究で提案する楕円形積分領域を適用した場合の荷重変位関係の解析値と実験値を示す．なお，圧縮応力下の特性長さは 250mm，引張応力下の特性長さは 50mm を仮定した．解析結果は要素寸法の影響を低減出来るとされる図-13 で示した圧縮破壊エネルギーを考慮し要素寸法に応じた軟化勾配を有する応力ひずみ関係を用いた場合⁹⁾と同様な傾向を示すことが分かる．図-23 および図-24 に異なる要素寸法に対する局所座標系の圧縮ひずみ分布を示す．ひずみは，要素寸法が異なる場合もほぼ同じ領域で，実験値と同様に圧縮側上縁のフーチング付近で広がりを帯びて局所化していく様子が再現されており，コンクリート部材内の局所の変形挙動までも妥当に評価していることが分かる．図-25 に断面上端から 25mm の位置における最大荷重後 90%，70% 時点の軸方向ひずみ分布の実験値と解析値の比較を示す．要素寸法によらず，ひずみ

の局所化領域だけでなく、局所ひずみの大きさも妥当に評価できていることが分かる。

6. 結論

本研究では、2次元RC部材への積分型非局所構成則の適用に関する基礎的研究を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 2軸応力場の空間積分領域で平均化すべき非局所変数について検討し、全体座標系(x-y座標系)での軸方向ひずみは不適切であり、局所座標系での軸方向ひずみを用いることが適切であることが分かった。
- (2) コンクリート構造物内で、ひずみ勾配が大きく空間積分領域内に引張・圧縮ひずみが混在する場合、引張ひずみと圧縮ひずみの絶対値は大きく異なるため、両者を同時に非局所化することは不適切であることが分かった。非局所化する際には、同応力状態のひずみのみを非局所化することが適切であることが示された。
- (3) 従来、空間積分領域は着目点から同距離の領域(円形積分領域)が用いられているが、引張・圧縮応力下では、独立に適用する特性長さが異なるため、円形積分領域を用いることは適切でないことが分かった。
- (4) コンクリートの引張・圧縮応力下の挙動は大きく異なり、その結果積分領域も応力状態により異なることより、応力状態に応じて引張・圧縮の特性長さを変化させ、その形状・大きさが逐次変化する楕円積分領域による手法を提案した。提案した手法を用いれば、今回対象とした曲げ圧縮破壊するRC部材に対し、要素寸法によらず局所ひずみ分布を概ね妥当に評価可能であり、圧縮破壊エネルギーを考慮し要素寸法に応じた軟化勾配を有する応力ひずみ関係を用いた場合と同様な荷重変位関係を得ることが可能なことを示された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会(2003): コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 日本コンクリート工学協会, 2003.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕, 2002.
- 3) Hikaru NAKAMURA and Takeshi HIGAI: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001.
- 4) Bazant, Z. P., Planas, J.: FRACTURE AND SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, pp.489-525, 1998.
- 5) Jirasek, Milan: Nonlocal models for damage and fracture comparison of approaches, Int. J. Solids and Struct. Vol.35, pp. 4133-, 1998.
- 6) Bazant, Z. P. and Lin, F.B.: Nonlocal Smeared Cracking Model for Concrete Fracture, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No.11, pp.2493-2510, 1988.
- 7) 権庸吉, 諏訪俊輔, 中村光, 田辺忠顕: 積分型非局所手法による圧縮応力を受けるコンクリートの特性長さの推定, コンクリート工学年次論文報告集, 第26巻第2号, pp.109-114, 2004.
- 8) 田辺忠顕編: 初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析方法とプログラム, 技報堂出版, 2004.
- 9) 立松博, 中村光, 檜貝勇: 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報告集, 第19巻第2号, pp.897-902, 1997.

(2005年4月15日 受付)