

論文 セン断圧縮破壊するはりの局所ひずみ分布と積分型非局所構成則の適用

松井 義雄^{*1}・権 庸吉^{*2}・上田 尚史^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：本研究では、画像計測を用いてセン断圧縮破壊するはりの主ひずみ分布を測定するとともに、有限要素法により主ひずみ分布性状を再現する際の積分型非局所構成則の適用性を検討した。その結果、画像計測を行うことで、ポストピーク領域に至る主ひずみ分布を定量的に明らかにできること、著者らが提案している楕円積分領域を用いた積分型非局所構成則を用いることで、実験値に近い主ひずみ分布を解析的に得ることができる可能性を示した。

キーワード：積分型非局所損傷理論，空間積分領域，画像計測，主ひずみ分布

1. はじめに

RC 構造物のポストピーク領域では、ひび割れやコンクリートの圧壊により、ある領域でひずみが局所化する性状を示す¹⁾。ひずみの局所化挙動は構造物の終局挙動に大きな影響を与えるが、現状では実験的にも解析的にも必ずしも明らかになっていない。特に解析においては、ひずみ軟化材料を仮定し有限要素法などの離散化手法に局所理論を適用した場合には、ポストピーク領域において、ひずみがある特定の要素に局所化し、実験で見られるような局所化領域の拡がりを得ることができない。さらに、局所的な損傷と密接な関係があるひずみの値も局所化した要素では、過大な値を示す。このことが、変位ならびにひずみの要素寸法依存性の原因ともなっている。このうち変位の要素寸法依存性については、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で低減できることが知られている²⁾。一方、ひずみについては、要素寸法が小さいほどひずみの局所化が卓越し局所情報を妥当に評価できないのが現状である。

この問題を解決できる手法の 1 つとして、積分型非局所構成則³⁾が挙げられる。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)}。既往の研究においては、一軸圧縮応力下のコンクリート⁴⁾や曲げ破壊する RC はりへの適用⁵⁾が検討され、ひずみの要素寸法依存性が低減できるとともに、局所化したひずみの領域や進展状況を概ね妥当に再現できることが示されている。

そこで本研究では、セン断圧縮破壊する RC はりの主ひずみ分布を実験的に検討するとともに、格子等価連続体モデル⁶⁾に楕円積分領域を用いた積分型非局所損傷理論を適用した解析を行い、ポストピーク領域での主ひずみ分布性状を実験値と比較し、その適用性について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

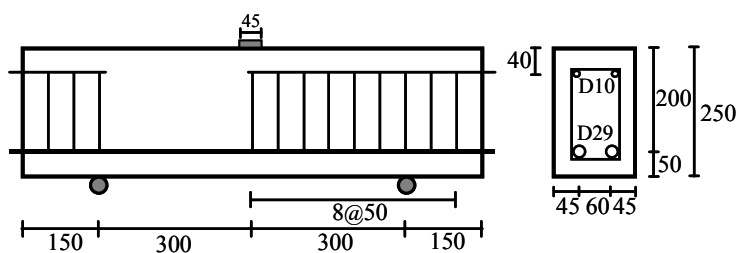
セン断圧縮破壊するセン断スパン比 1.5 のディーブーム部材を対象に実験を行った。供試体の概要を図-1 に示す。主鉄筋は D29(SD345)を 2 本配置した。セン断補強鉄筋は、セン断圧縮破壊を片側セン断スパン内のみで生じさせるために、片側に D10(SD345)を 50mm ピッチで配置した。使用したコンクリートの材料特性は、弾性係数が 25GPa、圧縮強度が 29.1MPa、引張強度が 2.1MPa であった。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 前期課程 (正会員)

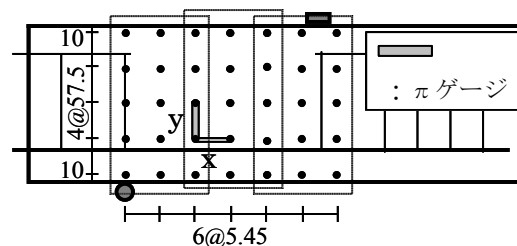
*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 後期課程 (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修(工) (正会員)

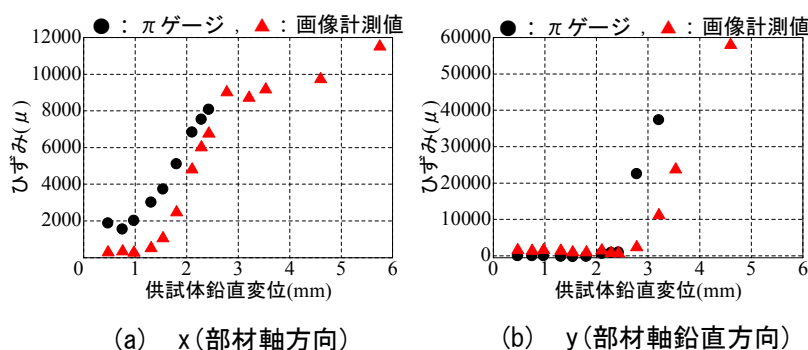
*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博(工) (正会員)



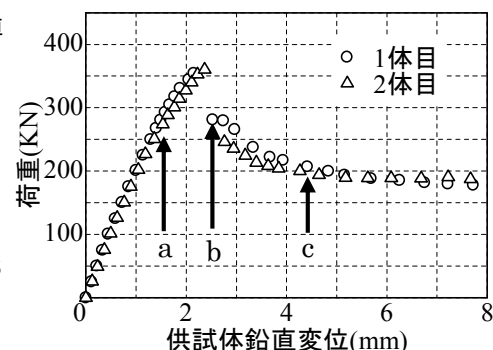
図－１ 供試体概要



図－２ ターゲットの配置



図－３ πゲージによる画像計測の確認



図－４ 実験の荷重変位関係

なお、実験は同条件で２体行った。

2.2 画像計測方法

本実験では、ポストピークにおけるひずみの局所化性状を画像計測により明らかにすることを試みた。破壊が生じるせん断スパン内に 55mm 四方の格子状に貼付したターゲットの動きをデジタルカメラ(2160×3840 pixel) 3 台で撮影し、画像処理によりターゲットの変形前後の位置を求め、変位・ひずみを算出した⁷⁾。画像撮影範囲とターゲットの配置を図－２に示す。また、ポストピーク領域までのコンクリート表面におけるひずみ分布測定のため、供試体に直径 3mm のドリルで深さ 30mm の穴を開け、頭付の棒材を供試体にしっかりと定着させ、その上に直径 8mm のシールをターゲットとして貼付した。今回は画像処理時に認識率の高い赤色をターゲットとした。

画像処理手順は、得られた画像に対し 2 値化処理を行うことによりターゲットのみを抽出し、その重心座標を求める。ひずみ算出にはターゲットの重心座標位置を節点とする四辺形要素を用いた有限要素モデルを適用した。

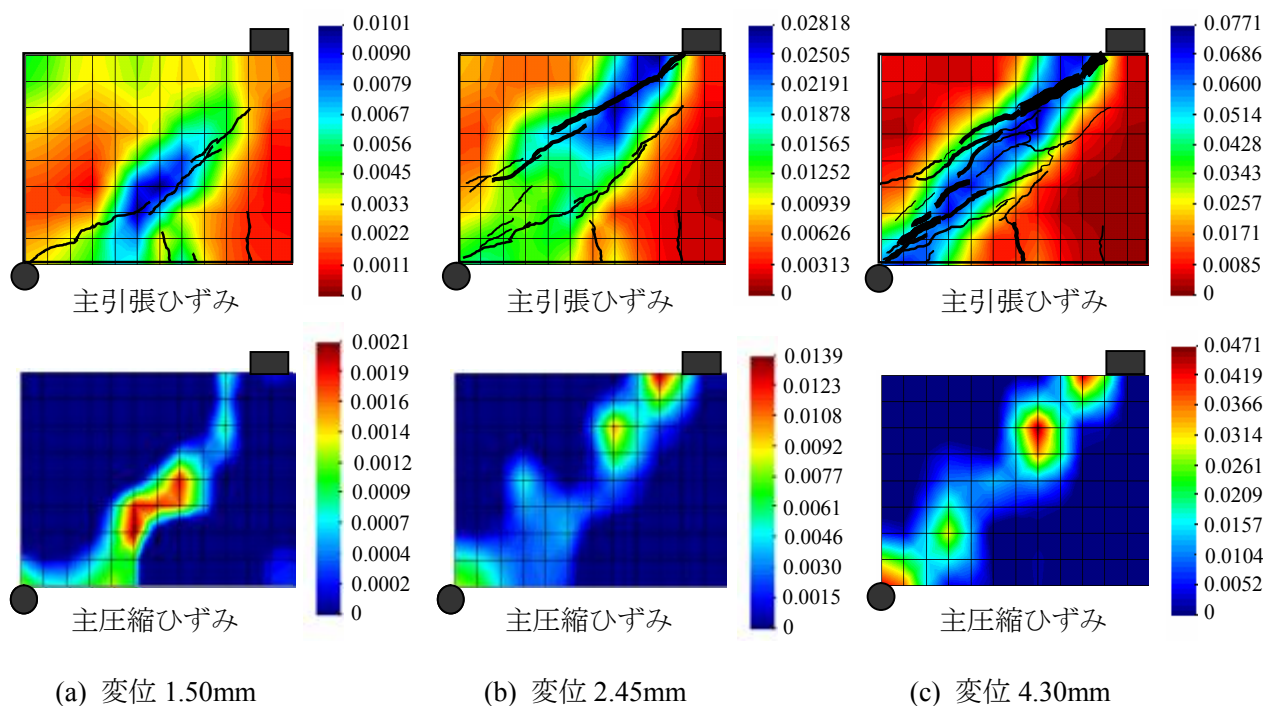
3. 画像計測から得られた主ひずみ分布の進展状況

画像計測値の妥当性の確認は、撮影する裏面に

設置したπゲージから得られたひずみと、同位置のターゲット間から求められたひずみを比較することで行った。図－２中の x (部材軸方向) ならびに y (部材軸直角方向) でのπゲージと画像処理の結果を図－３に示す。ひずみの進展挙動の傾向を概ね捉えているとともに、πゲージでは測定できない大ひずみ領域まで測定可能なことが分かる。

実験より得られた荷重変位関係を図－４に、図中 a～c 点での主引張ひずみと主圧縮ひずみの分布を図－５に示す。なお、主引張ひずみのコンター図中には、その時点のひび割れ図も重ねている。a 点は斜めひび割れ発生(160KN)後の最大荷重の約 80%の時点(変位 1.5mm), b 点は荷重が急激に低下した後の時点(変位 2.45mm), c 点はさらに損傷が進んだ時点(変位 4.3mm)に対応している。なお、2 体の供試体の主ひずみの分布性状の傾向は概ね一致していたことから、1 体のみの結果を示した。ここで、図中のコンターはそれぞれの最大値の範囲で示しており、スケールが異なることに注意が必要である。

まず、主引張ひずみ分布性状は、a 点では斜めひび割れの進展を明確に捉えている。b 点では荷重が急激に低下した際に発生した載荷板側近傍の斜めひび割れに、主ひずみ分布のピークが推移する。



図－５ 画像計測より得られた主引張ひずみ分布と主圧縮ひずみ分布

さらに損傷の進んだ c 点では、載荷板から支点へ向けてひずみレベルがほぼ等しい引張のひずみの帯が形成された。一方、主圧縮ひずみ分布性状は、斜めひび割れ発生後の a 点では支点から載荷板に向けて、圧縮のストラットが形成されていることが分かる。なお、最大荷重までは圧縮のストラットの拡がりはほとんど変わらず、絶対値が大きくなるのみであった。荷重が急激に低下した b 点では、主圧縮ひずみ分布が載荷板と支点近傍に局所化する。さらに、c 点では主圧縮ひずみが 10000 μ 程度の圧縮のストラットを形成しているが、載荷点と支点近傍およびストラット内に局所的にひずみが増大する領域があることが示された。

4. 解析方法

4.1 解析概要

本研究では構成則に格子等価連続体モデル⁶⁾を用いた 2 次元有限要素法により解析を行った。解析は、局所理論を用いた解析（以下、Local 解析）、破壊エネルギーを用いた解析（以下、Energy 解析）、積分型非局所構成則を用いた解析（以下、Nonlocal 解析）の 3 つの手法で行った。また、それぞれに対して要素寸法 25mm, 12.5mm の 2 通りの要素寸

法モデルで解析を行い、要素寸法の影響を検討した。圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係は、Local 解析、Nonlocal 解析では、Saenz の応力-ひずみ曲線を用いた。なお、軟化領域は Kent and Park モデルと近い性状を示すように、 $(\sigma_f, \varepsilon_f) = (0.4\sigma_c, 4.0\varepsilon_c)$ を通るように決定した。また、Energy 解析では最大荷重までは Saenz の応力-ひずみ曲線を用い、ポストピークでは圧縮破壊エネルギー²⁾を考慮したモデルを用いた。それぞれの応力-ひずみ関係を図－6 に示す。なお、Saenz の式を用いる際には、割線勾配から損傷パラメータ Ω を定義し、損傷理論に基づき応力を求めた⁵⁾。一方、引張側の構成則は Local 解析、Nonlocal 解析では、損傷パラメータを考慮したモデルを用い、Energy 解析では破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを用いた。

Nonlocal 解析における応力は損傷モデルに基づく、次式で求めた。

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

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 $\Omega_{nonlocal}$ を非局所ひずみ $\varepsilon_{nonlocal}$ の関数とし、非局所量として定義する。Energy 解析の等価長さは、

コンクリート要素の面積の二乗根とした。ここで、Local 解析、Nonlocal 解析では要素寸法によらず唯一の関係を、Energy 解析では要素寸法により軟化勾配が変化する関係を与える点に違いがある。

鉄筋は RC 要素でモデル化した。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後は、剛性を弾性剛性の 1/100 とした。

4.2 非局所解析手法

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(2)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 $A_r(x)$ (面積)で平均化(非局所化)することで求めることができる³⁾。

$$\begin{aligned}\bar{f}(x) &= \frac{1}{A_r(x)} \int_A \alpha_0(x, \xi) f(\xi) dA(\xi) \\ &= \int_A \alpha(x, \xi) f(\xi) dA(\xi)\end{aligned}\quad (2)$$

積分型非局所構成則を適用するに際し、以下の仮定⁵⁾を用いた。局所変数 $f(x)$ は、ひび割れ発生前は、主引張ひずみと主圧縮ひずみとし、ひび割れ発生後は、ひび割れ座標系での最大引張ひずみと最大圧縮ひずみとした。重み関数 $\alpha(x, \xi)$ は積分領域内で一定とした。空間積分領域 $A_r(x)$ は、一般には円形が用いられるが、コンクリートのひずみ局所化領域は、引張応力下と圧縮応力下では大きさが異なる。これに対し著者らは、図-7 の概念図で示すように応力状態によって、その領域を変化させることで、引張・圧縮の両者を統一的に扱える楕円形積分領域を提案していることから、そのモデルを適用した。なお、今回の解析では、一軸圧縮試験および曲げ破壊するはりに積分型非局所構成則を適用した場合と同様に⁵⁾、圧縮応力下の特性長さ ℓ_c を 250mm、引張応力下の特性長さ ℓ_t を 50mm とした。

5. 解析結果

5.1 荷重変位関係

図-8 に、実験値と解析値の荷重変位関係を示す。図中、○と△が実験値を、赤線が Local 解析を、黒線が Energy 解析を、青線が Nonlocal 解析を示し

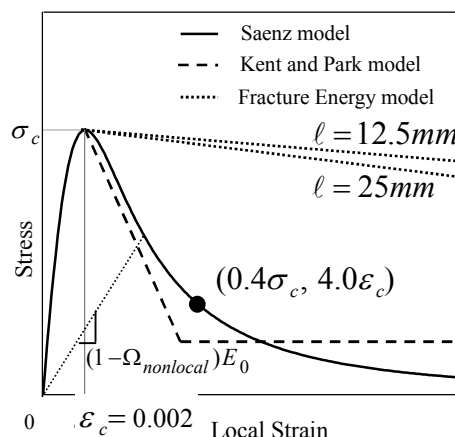


図-6 応力-ひずみ関係

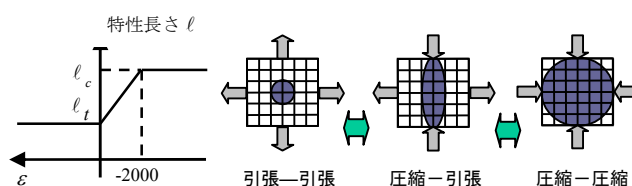


図-7 応力状態に応じた積分領域の概念

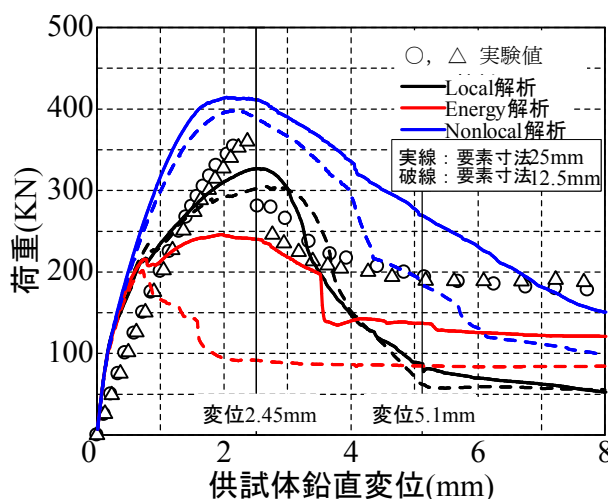
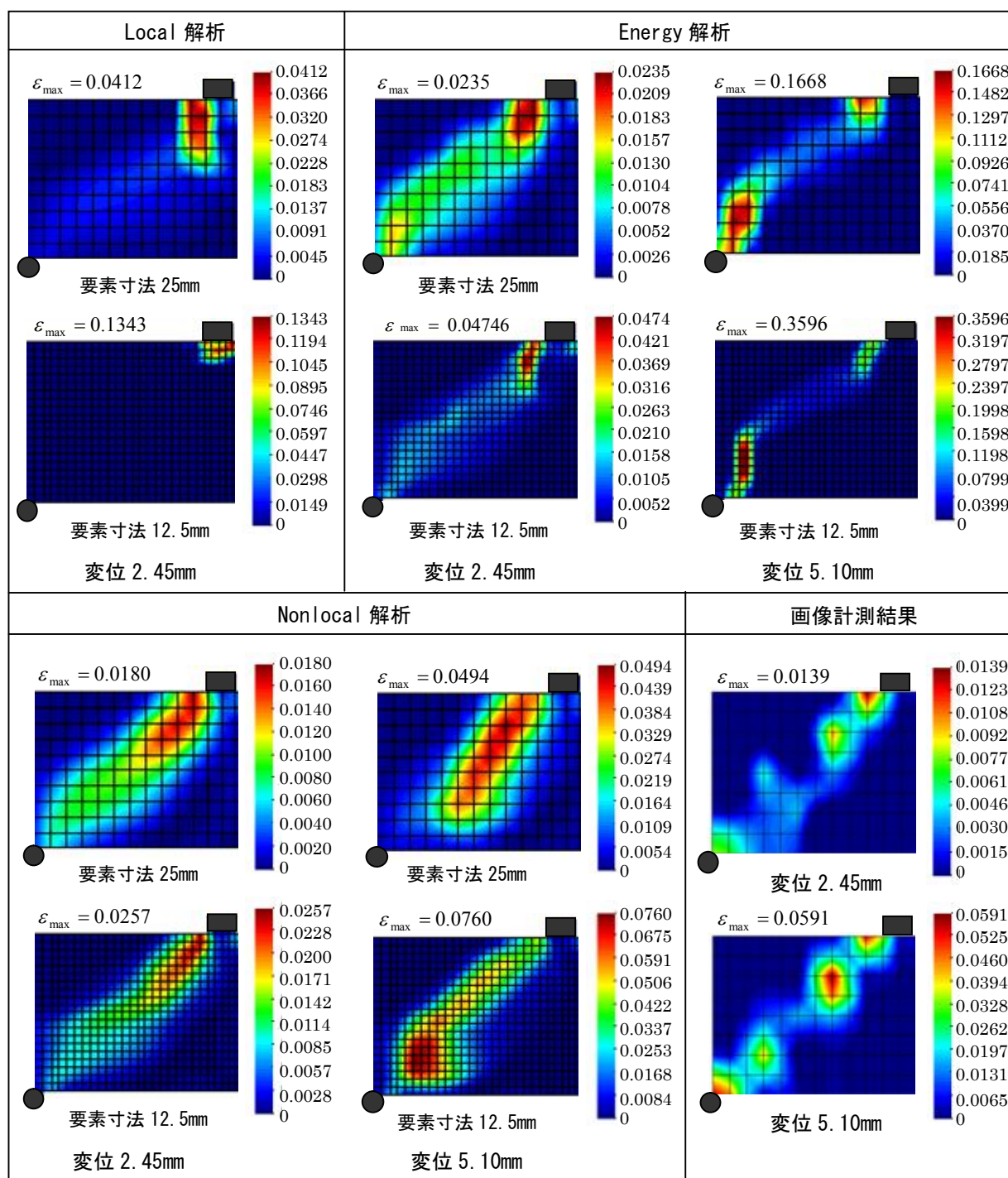


図-8 荷重変位関係

ている。また、実線と破線は要素寸法の違いを示している。なお、最大荷重以前の実験値と解析値の勾配が異なるが、これは実験において支点の変位も含んだ計測をしたためと思われる。

Local 解析においてはプレピークから載荷板近傍で圧縮ひずみが局所化し、荷重が低下した。また要素寸法が小さいほど早期に荷重が低下し、明らかに要素寸法依存性を生じている。一方、Energy 解析と Nonlocal 解析は要素寸法の影響が低減できていることが分かる。Energy 解析では最大荷重を小さめに評価し、Nonlocal では大きめに評価してい



図－9 解析および画像計測より得られた主ひずみ分布

るが、実験での荷重変位関係の傾向を概ね捉えている。

5.2 主ひずみ分布

実験と解析より得られた最大荷重後の変位 (2.45mm, 5.10mm) での主圧縮ひずみ分布を図－9 に示す。変位 2.45mm では、実験値、Local 解析、Energy 解析、Nonlocal 解析の結果を示し、さらに損傷が進んだ変位 5.1mm では実験値、Energy 解析、Nonlocal 解析の結果を示す。ここで、図中のコンタ

ーはそれぞれの最大値の範囲で示しており、スケールが異なることに注意が必要である。

変位 2.45mm, 5.10mm において、要素寸法 25mm, 12.5mm の場合と各解析における主ひずみ分布性状の違いについて考察を行う。まず、Local 解析では、変位 2.45mm で要素寸法が 25mm, 12.5mm とともに、載荷板近傍にひずみが局所化している。また、要素寸法が小さいほど局所化領域は小さくなっている。その時のひずみの最大値は、 0.041μ 、 0.134μ

であり、明らかに要素寸法に依存していることがわかる。次に Energy 解析では、主ひずみ分布はある程度の広がりをもつが、載荷板と支点の近傍では局所化する傾向にある。また、その局所化傾向は、要素寸法が小さいほど顕著になる。ひずみの最大値については、変位 2.45mm の時は要素寸法 25mm, 12.5mm に対しそれぞれ、 0.023μ , 0.047μ , 変位 5.1mm の時はそれぞれ 0.16μ , 0.35μ となり、要素寸法が半分になると約 2 倍のひずみの大きさになり、要素寸法に依存していることが分かる。

一方、Nonlocal 解析では、要素寸法 25mm, 12.5mm とともに、広がりのある主ひずみ分布を示すことができている。ひずみの最大値については、変位 2.45mm の時は要素寸法 25mm, 12.5mm に対しそれぞれ、 0.018μ , 0.025μ , 変位 5.1mm の時はそれぞれ 0.05μ , 0.075μ となり、Energy 解析よりも明らかに要素寸法依存性を低減することができていることが分かる。

また、本解析結果を画像計測より得られた主ひずみ分布と比較すると、要素寸法によらず、ある広がりを表すことができる Nonlocal 解析が Local 解析ならびに Energy 解析よりも実験値に近い傾向を示すことがわかる。以上のことから、Nonlocal 解析を用いることで、せん断圧縮するはりの損傷度のある程度評価可能であると考えられる。

6. まとめ

せん断圧縮破壊するはりの実験および画像計測と、積分型非局所損傷理論を適用した解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 画像計測を用いることでポストピーク領域における RC 部材の主ひずみ分布性状を明確に捉えることができる。
- (2) せん断圧縮破壊するはりの解析を行い、非局所構成則を適用した解析を行うことで、変位ならびにひずみの要素寸法依存性が低減されるとともに、ポストピークにおいて実験のような主ひずみの広がりを表現可能であることが示された。
- (3) 今回用いた Nonlocal 解析の主ひずみ分布は

Local 解析や Energy 解析より、実験値に近い傾向を示すことができるが、必ずしも実験から得られた主ひずみ分布とは一致しないため、今後、非局所理論のせん断ひずみへの適用、非局所パラメータや積分領域の詳細な検討が必要であることが分かった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Bazant, Z. P., Planas, J. : FRACTURE AND SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, pp.489-525, 1998.
- 4) 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.
- 5) 権庸吉, 上田尚史, 中村光, 田辺忠顕: 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, 応用力学論文集, vol.8, pp.413-422, 2005.
- 6) 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.
- 7) 酒井理哉ほか: 画像計測を利用した鉄筋コンクリートのひずみ計測の試み, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS3-002, pp.164-165, 2001.