

論文 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

諏訪 俊輔^{*1}・権 庸吉^{*2}・中村 光^{*3}・田邊 忠顕^{*4}

要旨：RC 部材のファイバーモデル解析において，変位ならびにひずみの要素寸法依存性を低減させるために，空間平均化された非局所ひずみを定義する積分型非局所損傷理論を適用した。一軸圧縮解析を行い，材料固有の解析パラメータの同定を試みた。次に，そのパラメータを用いて，曲げ圧縮破壊実験結果との比較によりその適用性について検討した。その結果，要素寸法に依存しない変位ならびにひずみが再現されることが明らかになった。

キーワード：積分型非局所理論，特性長さ，損傷理論，ファイバーモデル

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，ひずみ軟化材料を仮定し離散化手法を用いた RC 構造の解析では，ポストピーク領域においてひずみの局所化が生じ，変位ならびにひずみが要素寸法に依存する問題が発生する。このことが実用的にポストピーク領域の解析を行う際の大きな問題点となっている。一方，RC 構造物の非線形解析手法としては，簡便性と利便性を兼ね備えていることから，性能照査手法としてファイバーモデルの幅広い活用が期待されている。

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¹⁾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。

一般的に用いられている局所理論においては，局所応力は局所点の力学的情報によって規定されている。それに対し，非局所理論は，局所応力が局所点だけでなく周囲の点の力学的情報にも依存することが特徴である。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，本研究では積分型非局所理論を用い，その適用性を検討した。積分型理論において，非局所ひずみ $\varepsilon_{nonlocal}$ は，材料固有定数である特性長さ l^* を定義し，局所ひずみ ε_{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。なお，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，非局所化は軸方向のみに対して行った。

$$\varepsilon_{nonlocal}(x) = \int_L \beta(x, \eta) \varepsilon_{local}(\eta) d\eta \quad (1)$$

ここで， L は平均化領域で，平均化する領域が解析領域内の場合は l^* となる。 β は平均化する領域内での座標， (x, η) は重み関数であり，本研究では double nonlocal operator²⁾と呼ばれる式(2)により定義した。

2. 解析理論

2.1 積分型非局所損傷理論

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 *3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助教授 博(工) (正会員)
 *4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

$$\alpha(x, \xi) = \frac{15}{8l^*} \left(1 - \frac{|x - \xi|^2}{(l^*/2)^2} \right)^2 \quad (2)$$

$$\beta(x, \eta) = \int_V \alpha(\xi, x) \alpha(\xi, \eta) d\xi$$

また、応力は、損傷理論に基づき式(3)より求められる。

$$\sigma = (1 - \Omega_{nonlocal}) E_0 \varepsilon_{local} \quad (3)$$

ここで、 Ω は、0 から 1 の値を持つ損傷パラメータであり、単調増加関数である。本研究では非局所量として定義する。 E_0 は初期弾性係数である。

2.2 材料モデル

コンクリートの圧縮応力の算定は Saenz の応力ひずみ曲線に基づき損傷パラメータを定義することで行った。Saenz の式を式(4)で示す。

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon_{local}}{1 + a \frac{\varepsilon_{local}}{\varepsilon_c} - b \left(\frac{\varepsilon_{local}}{\varepsilon_c} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_{local}}{\varepsilon_c} \right)^3}$$

$$a = \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right), b = (2R - 1), c = R \quad (4)$$

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

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ある。

応力ひずみ非局所関係が式(4)と等しくなるように仮定すると、非局所損傷パラメータは

式(5)で表される。

$$\Omega = \frac{1}{1 + a \frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} - b \left(\frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} \right)^2 + c \left(\frac{\varepsilon_{nonlocal}}{\varepsilon_c} \right)^3} \quad (5)$$

3. 一軸圧縮解析および材料固有定数の同定

3.1 解析概要

非局所理論に用いる特性長さおよび応力ひずみ非局所関係は、材料固有の値として与える必要がある。引張応力下のコンクリートに対しては、特性長さは骨材寸法の約 3 倍で与えるなどの提案³⁾がある。一方、圧縮応力下に対してはひずみの局所化領域がかなりの広がりを持つなど、引張応力下よりメカニズムが複雑と考えられるため、現在まで特性長さは明らかにされず、また応力ひずみ非局所関係も明らかになっていないのが現状である。そこで、本研究ではパラメトリック解析を行い、一軸圧縮試験結果⁴⁾との比較から材料固有定数である特性長さ、応力ひずみ非局所関係を同定した。なお、応力ひずみ非局所関係の同定は、軟化挙動を定義する(σ_f , ε_f)を変化させることで行った。

比較の対象とした一軸圧縮試験は、図 - 1 に示す円柱供試体の断面内部に著者らが提案したアクリル棒を用いる方法でコンクリートの局所ひずみ分布の進展を測定したものであり、今回は表 1 に示す形状、寸法が異なる 2 通りの供試体で解析を行った。なお、解析は次元要素を 40 要素に等分割して行い、実験でひずみが最も進展する位置の要素の剛性を 5% 減少させて

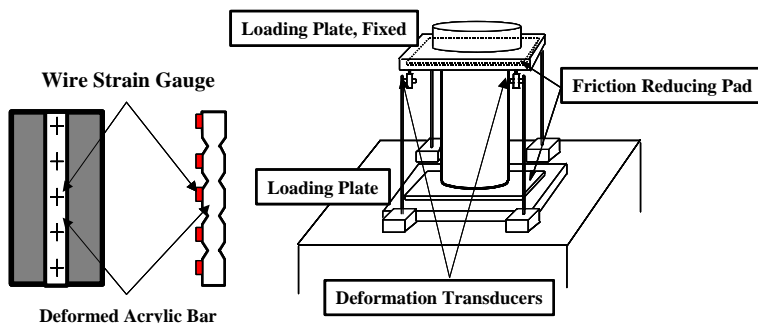


図 - 1 一軸圧縮試験載荷装置および断面内部のアクリル棒

表 - 1 材料諸元

	圧縮強度 (MPa)	直径 (mm)	高さ (mm)
Case 1.	20.0	100	500
Case 2.	20.0	150	300

弱点とすることで局所化の起点となるようにした。

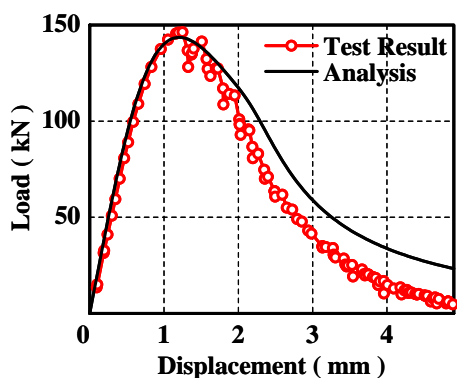
3.2 解析結果

パラメトリック解析を行った結果として、特性長さ $l^* = 450(\text{mm})$ 、 $(\epsilon_f, \epsilon_t) = (0.008, 0.3)$ を仮定したときの Case1, Case2 それぞれにおける荷重変位関係および局所ひずみ分布の進展を図 - 2 に示す。局所ひずみ分布は荷重ピーク時および変位が 2(mm), 3(mm), 4(mm) 時について示した。

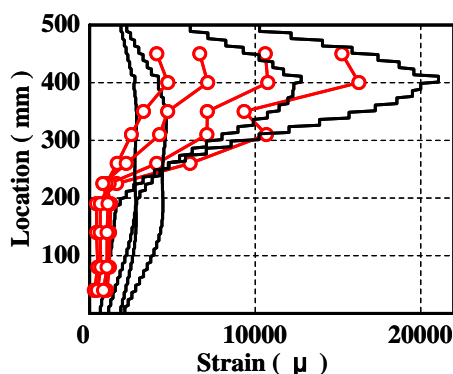
図 - 2 (a) より、Case 1 の局所ひずみ分布においてポストピークでの局所化領域の広がりが確認され、実験値とほぼ同等の分布性状が示された。また、局所ひずみが増加していく領域長さはおよそ 250(mm) ということが示され、実験と同様の結果となった。このことから、今回の解析ではひずみの局所化領域は特性長さより短い

区間として現れると考えられる。一方、Case 2 においては、局所化の起点となる要素を上端部に設定したが、局所ひずみ分布は図 - 2 (b) に示すように供試体中央位置に移動する結果となった。他の位置に弱点を設定した解析も行ったが、いずれも同じ結果となり、これは供試体の高さが特性長さよりも短いことが原因と考えられる。しかし、局所ひずみの値としては実験値とほぼ同等の結果が得られた。

荷重変位関係については Case 1, Case 2 とともにポストピーク領域における実験値の挙動をおおよそ捉えている。以上のことより、圧縮応力下での特性長さおよび応力ひずみ関係が同定されたといえる。なお、同定された (ϵ_f, ϵ_t) を用いた応力 - 局所ひずみ関係および Kent and Park モデルを図 - 3 に示す。図 - 3 より、同定された関

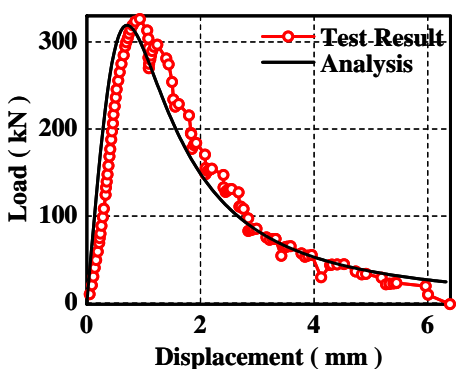


荷重変位関係

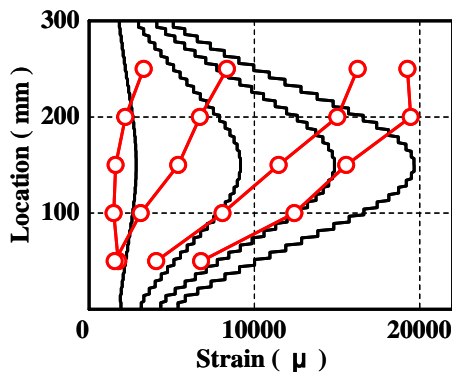


局所ひずみ分布の進展

(a) Case 1



荷重変位関係



局所ひずみ分布の進展

(b) Case 2

図 - 2 荷重変位関係および局所ひずみ分布の進展

係は既往の応力 ひずみ関係とほぼ同様のもの
である。

4. 曲げ破壊する RC はりの解析

4.1 実験概要

3章で同定されたパラメータを用いて RC 部材への適用を試みた。解析は図 - 4 に示す諸元を有する曲げ圧縮破壊する RC 片持ちはり⁵⁾を対象とした。この実験での計測データは荷重変位関係だけでなく、図 - 5 のように一軸圧縮試験と同様にアクリル棒を用いる方法で、コンクリートの圧縮ひずみの進展を断面上端から 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。

4.2 解析結果

解析は、ファイバーモデルにより断面を 40 等分割し、部材軸方向に 25(mm), 50(mm), 100(mm) の要素寸法で等分割した 3 通りで行った。また、圧縮破壊エネルギー⁴⁾を考慮した応力ひずみ関係を用いた局所理論に基づく解析(以後、破壊エネルギー解析)および式(4)に 3 章で同定した定数 $(\epsilon_f, \epsilon_c) = (0.008, 0.3)$ を用いた局所理論に基づく解析(以後、局所理論解析)の結果も併せて示す。

図 - 6 に解析および実験より得られた荷重変

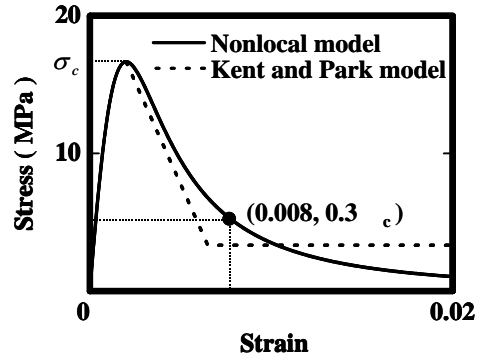


図 - 3 同定された応力ひずみ関係

位関係を示す。局所理論解析では、要素寸法が小さくなるほど最大荷重時の変位の値が小さくなり、ポストピーク挙動に急激な低下が見られた。一般に軟化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る。本解析結果においても同様に局所化が発生し、要素寸法が小さい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り、荷重変位曲線は脆性的挙動を示し、実験値を評価できないとともに要素寸法依存性が現れている。一方、圧縮破壊エネルギーを考慮して要素寸法に応じた応力ひずみ関係を適用する破壊エネルギー解析においては、要素寸法によらずほぼ同様な荷重変位曲線が得られた。このことから圧縮破壊エネルギーを考慮することにより、

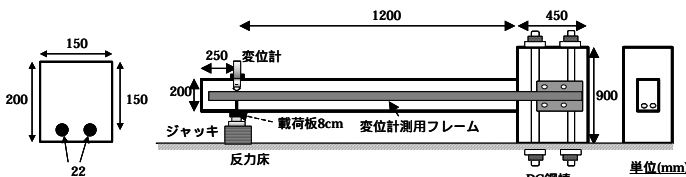


図 - 4 曲げ圧縮破壊試験供試体およびその断面

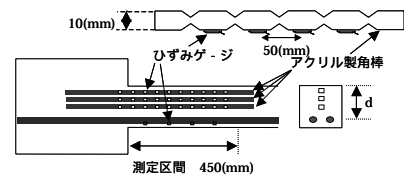
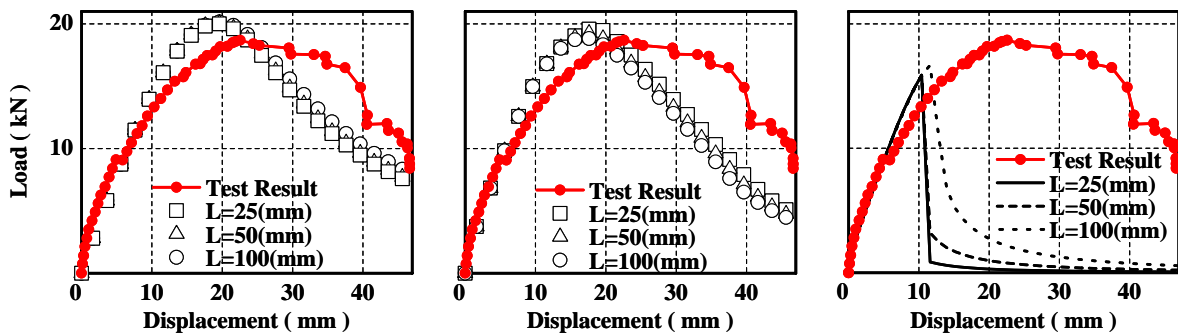


図 - 5 断面内部に埋め込まれたアクリル棒



(a) 非局所理論解析

(b) 破壊エネルギー解析

(c) 局所理論解析

図 - 6 荷重変位関係

変位の要素寸法依存性が低減されていることが分かる。それに対し、非局所理論解析では、要素寸法によらない唯一の応力 非局所ひずみ関係を用いてもほぼ同様の荷重変位関係が得られることが示された。

図 - 7 および図 - 8 にコンクリート圧縮縁上端より 25(mm)の位置における、最大荷重前 90%

および最大荷重後 90%、70%での実験値、非局所理論解析ならびに破壊エネルギー解析で得られた局所ひずみ分布を示す。破壊エネルギー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、その分布形状は実験値と明らかに異なることが分かる。このことは、破壊エネルギー解析においては、荷

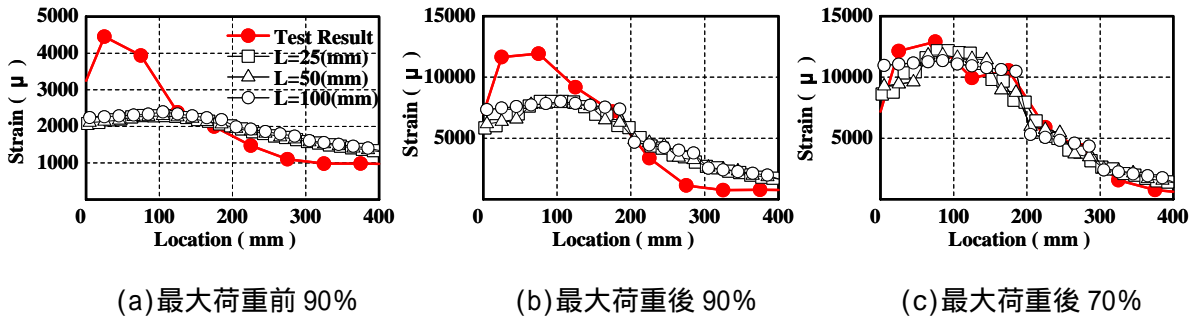


図 - 7 非局所理論解析における各荷重段階の局所ひずみ分布

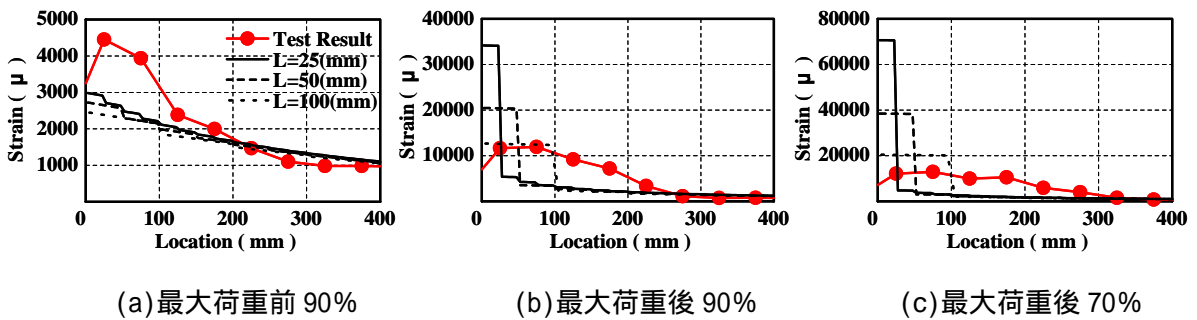


図 - 8 破壊エネルギー解析における各荷重段階の局所ひずみ分布

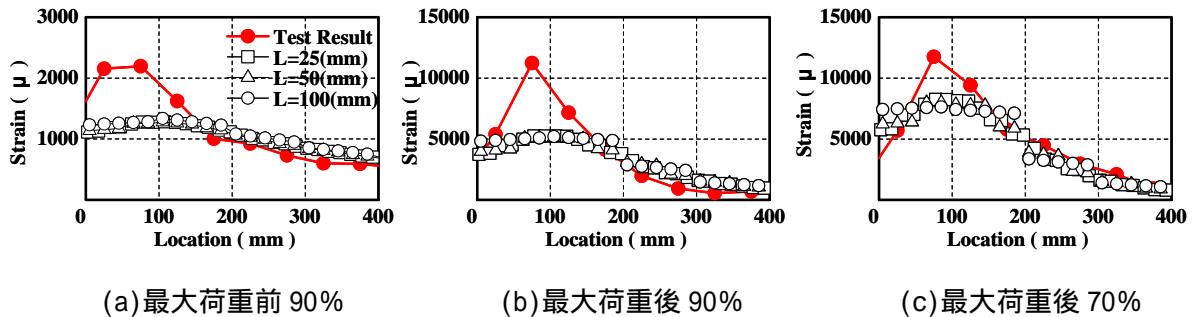


図 - 9 コンクリート圧縮縁上端から 60(mm)の位置での局所ひずみ分布

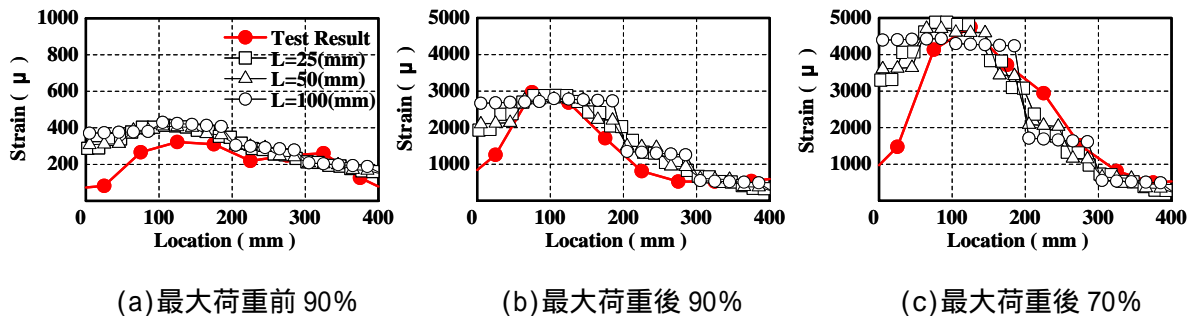


図 - 10 コンクリート圧縮縁上端から 90(mm)の位置での局所ひずみ分布

重変位関係については要素寸法に依存しない解が求められるが、ひずみは要素寸法に依存するため、ひずみによる損傷度評価がポストピーク領域にまで及ぶ場合には不可能なことを意味する。

一方、非局所理論解析ではひずみの要素寸法依存性が低減され、ポストピーク領域においても実験値と同等の分布性状が示された。また、図 - 9, 10 に圧縮縁上端から 60(mm)および 90(mm)の位置における局所ひずみ分布を示す。上端から 25(mm)の位置での解析結果と同様に要素寸法に依存せず、実験値を妥当に評価できるひずみ分布性状が示された。これらの結果から断面内部のひずみ分布を部材軸方向だけでなく、高さ方向においてもおおよそ捉えていることが示された。

次に、図 - 11 に要素寸法 50(mm)での圧縮縁上端から 25(mm)の位置における局所ひずみ分布の進展を、最大荷重前 90%、最大荷重時、最大荷重後 90%、80%、70%で示す。図 - 10 より、ひずみが増加していく領域が、用いた特性長さ(450mm)よりも短い 300(mm)前後であることが示され、実験とほぼ同等の破壊領域が示された。

5. 結論

積分型非局所損傷理論を適用し、一軸圧縮解析および曲げ解析を行い、その適用性を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1)一軸圧縮解析を行うことで、材料定数である特性長さならびに応力 - 非局所ひずみ関係を同定した。局所化領域は実験とほぼ同じ範囲で現れ、特性長さより短い区間であった。また、実験値とほぼ同等なひずみの値を求めることができた。

(2)一軸圧縮解析で同定されたパラメータを用いて RC はりへの適用を検討した結果、変位およびひずみの要素寸法依存性が低減され、実験値を妥当に評価できるひずみ分布性状を示すことが明らかになった。このことは、ひずみによる損傷度評価は局所理論では困難であり、非局

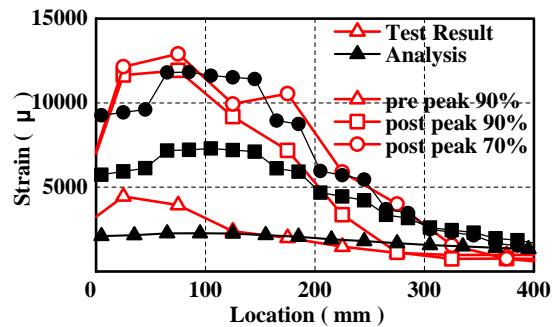


図 - 11 局所ひずみ分布の進展

所理論の適用が必要であることを意味する。また、ひずみが増加していく領域を表現することができた。

参考文献

- 1) Bazant, Z. P. and Planas, J. : FRACTURE AND SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, pp.489-525, 1998
- 2) Jirasek, M. and Rolshoven, S. : Comparison of integral-type nonlocal plasticity models for strain-softening materials, International Journal of Engineering Science, Vol.41, pp.1553-1602, 2003
- 3) Bazant, Z. P. and Pijaudier - Cabot, G. : Measurement of Characteristic Length of Nonlocal Continuum, J. Eng. Mech. ASCE, Vol.115, pp.755-767, 1989
- 4) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structure under Seismic Loads, ASCE, 2001
- 5) 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集, Vol.19, NO.2, pp.897-902, 1997