

論文 繰り返し荷重を受ける RC 部材への非局所構成則の適用

諏訪 俊輔^{*1}・権 庸吉^{*2}・中村 光^{*3}・国枝 稔^{*4}

要旨： RC 部材のファイバーモデル解析に、空間平均化された非局所ひずみを定義して非局所構成則を適用した解析を行った。繰り返し荷重を受ける RC 部材への適用性について検討した結果、要素寸法に依存しない変位ならびにひずみが得られるとともに、実験で観察される局所化領域を妥当に再現できることが明らかになった。また、局所理論解析により要素寸法依存性が発生している場合では、既往の等価塑性ヒンジ長で平均化することで局所化性状を妥当に評価できる可能性を示した。

キーワード： 非局所構成則, 特性長さ, 等価塑性ヒンジ長, ファイバーモデル

1. はじめに

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できる。しかしながら、ひずみの要素寸法依存性は依然として発生してしまうことから、著者らは、非局所構成則をファイバーモデルに適用して Pushover 解析を行い、ポストピーク領域の挙動評価の可能性について検討し、一定の知見を得た。¹⁾

本研究では、ポストピーク挙動の評価についてさらなる検討を行うため、非局所構成則を繰り返し解析に適用して、損傷度の評価指標に用いることができると考えられる変位やひずみ、曲率の局所化性状評価の可能性について検討した。また、通常用いられている局所量に基づく解析(以後、局所理論解析)結果による局所化性状評価の可能性についても検討した。

一般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。本研究では積分型非局所損傷理論を用いて非局所構成則に用いる非局所ひずみ $\epsilon_{nonlocal}$ を式(1)に従って求めた。

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

ここで、 η は平均化する領域内での座標、 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。 l^* は特性長さと呼ばれる材料パラメータであり、本研究では圧縮側の特性長さは一軸実験結果との比較により 250(mm)、引張側の特性長さは 30(mm) と仮定した。また、 $W(x, \eta)$ は重み関数であり、式(2)に示す Vermeer²⁾らが提案した式を用いた。

$$\begin{aligned} W(x, \eta) &= (1 - m)\delta + m \frac{\alpha(x, \eta)}{Vr(x)} \\ Vr(x) &= \int_L \alpha(x, \eta) d\eta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 δ は Dirac のデルタ関数、 $\alpha(x, \eta)$ は shape function であり、本研究では矩形分布とし

2. 積分型非局所損傷理論

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

た。また、 m は局所量と非局所量の割合に関係するパラメータであり、式(3)で示すように境界に近づくにつれて大きくなるような値を設定した。

$$m = \frac{V_\infty(x)}{V_r(x)} \quad V_\infty(x) = \int_{-2/l^*}^{2/l^*} \alpha(x, \eta) d\eta \quad (3)$$

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、非局所化は軸方向ひずみのみに対して行った。また、非局所化はコンクリートに対してのみ行い、鉄筋は通常の局所理論と同様に局所点の力学情報から局所応力を算出するものとした。

応力は、損傷理論に基づき式(4)より求めた。

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

ここで、 E_0 は初期弾性係数、 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 $\Omega_{nonlocal}$ を非局所ひずみの関数とし、非局所量として定義する。 $\Omega_{nonlocal}$ は、圧縮側の応力-非局所ひずみ関係は Saentz の式と、引張側は式(5)に示す tension stiffening model と等しくなるように求めた。

$$\sigma = \frac{f_t}{1 + 20\sqrt{200(\varepsilon_{local} - \varepsilon_t)}} \quad (5)$$

ここで、 f_t は引張強度、 ε_t は最大応力時のひずみである。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。

3. 一軸部材の繰返し解析

3.1 解析モデル

コンクリートと RC の一軸部材を対象とした繰返し解析を行い、非局所構成則の適用性について検証した。

解析モデルは長さ 1250(mm)、断面 90(mm)×90(mm)の正方形の一軸部材で、コンクリートの圧縮強度 30(MPa)、引張強度 3(MPa)とした。RC 部材は D10 の鉄筋を一本、断面中央に配置した。このときの鉄筋比は 0.99%である。解析は、一次元要素を 25 要素に等分割(要素寸法 50(mm))して行い、中央の要素の面積を 5%低下させることで局所化の起点とした。中央部分を起点とした理由は境界部分の問題³⁾を発生させないようにするためである。

3.2 解析結果

図-1 (a)および図-2 (a)にコンクリート部

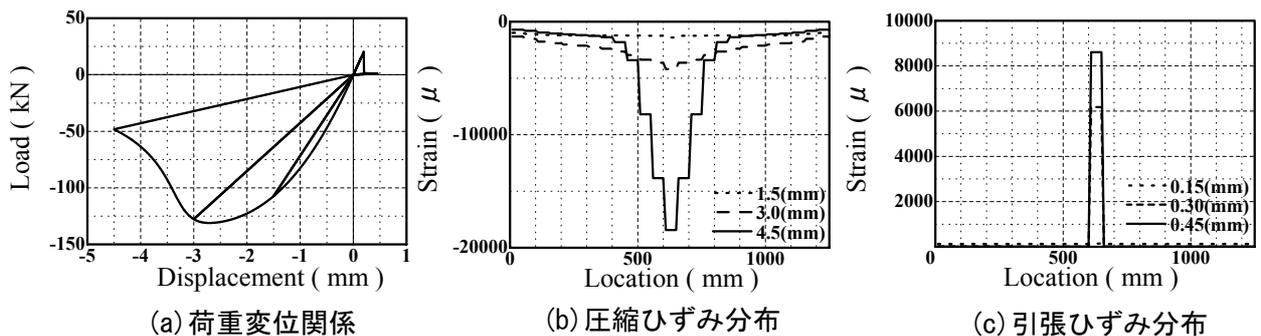


図-1 コンクリート部材の荷重変位関係ならびにひずみ分布

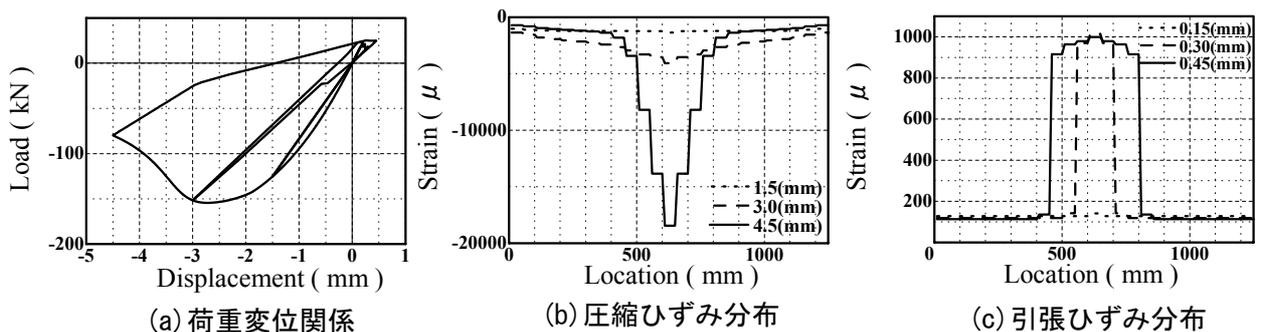


図-2 RC 部材の荷重変位関係ならびにひずみ分布

材, RC 部材それぞれの荷重変位関係を示す。コンクリート部材では, コンクリートの応力ひずみ関係に損傷理論を用いているため, 除荷経路が原点指向である。一方, RC 部材では鉄筋の塑性化の影響を受けた荷重変位関係が得られた。

図-1 (b), (c) および図-2 (b), (c) に圧縮側変位が 1.5, 3.0, 4.5(mm), 引張側変位が 0.15, 0.30, 0.45(mm) 時点での局所ひずみ分布を示す。

圧縮ひずみ分布は, コンクリート部材, RC 部材とも, ポストピーク領域で要素寸法とは無関係にひずみが局所化する挙動が示されている。その長さはおおよそ 300(mm) であり, コンクリート部材, RC 部材とも同様な値になった。

一方, 引張ひずみ分布は, コンクリート部材においては, 一要素でひずみが局所化していることが示された。引張側では圧縮側と異なり, 要素寸法より小さい特性長さを用いて非局所化を行っているためであると考えられる。一方, RC 部材では設定した弱点に局所化が発生した後, 徐々に周辺の要素にひずみが分散し, 局所化領域が広がる挙動が示された。

これらの結果から, 圧縮側では, ひずみ分布の拡がり鉄筋の有無に関わらずある一定の長さを有していることが示された。一方, 引張側ではコンクリート部材は非常に狭い範囲で局所化が進展するが, RC 部材ではひずみの分散性を示すことが明らかになった。これらの結果は実現象を評価できていると考えられるため, 非局所構成則を適用した繰り返し解析が可能であることが示されたといえる。

4. RC 橋脚部材の繰り返し解析

4.1 解析対象および解析モデル

解析対象とした実験は, 星隈らが行った曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の正負交番載荷実験⁴⁾である。解析は, 寸法の異なる 2 つの供試体について行った。供試体概要を図-3 に示す。実験では軸方向鉄筋のフォーミングからの伸び出し量ならびに橋脚基部から高さ 520(mm) までの断面に生じる曲率の高さ方向分布が計測されて

いる。

解析はファイバーモデルにより断面内を 40 等分割し, No.1 供試体については部材軸方向に 50(mm), 100(mm), 150(mm), 300(mm) の要素寸法で等分割した 4 通りで, No.5 供試体については 100(mm) の要素寸法で行った。また, 比較のために圧縮破壊エネルギー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も同様の要素分割数で行った。

4.2 600×600(mm) 断面の供試体 (No. 1 供試体)

図-4 (a), (b) に非局所構成則を適用した解析 (以後, 非局所理論解析) ならびに局所理論解析より得られた要素寸法 100(mm) と 300(mm) での荷重変位関係を示す。局所理論解析で, 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用いることにより, 要素寸法によらずほぼ同様な荷重変位曲線が得られた。一方, 非局所理論解析では, 唯一の応力-非局所ひずみ関係を用いても同様な荷重変位関係を得ることが示された。

図-5 および図-6 に異なる要素寸法に対して正側変位 80(mm) における圧縮最外縁でのひずみならびに曲率の高さ方向の分布を柱基部から高さ 500(mm) の位置まで示す。局所理論解析では, 図-5 に示すように圧縮ひずみは要素寸法が小さいほど顕著に局所化して非常に大きな値

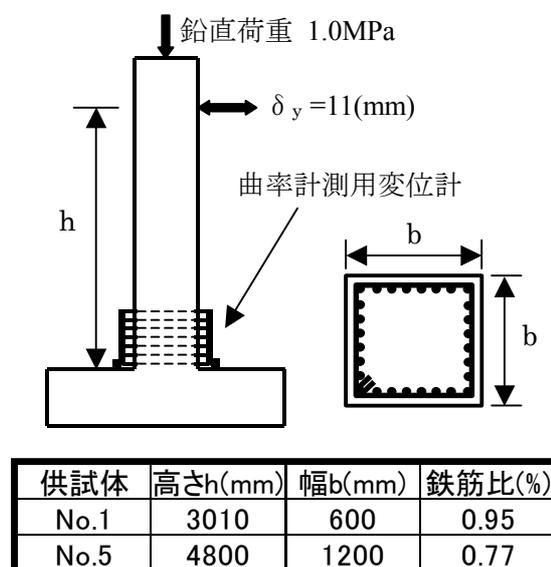
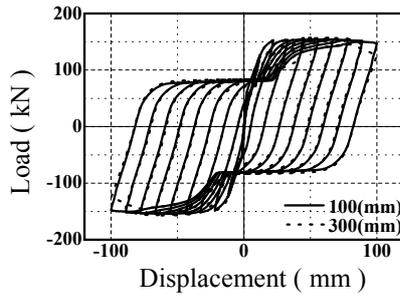
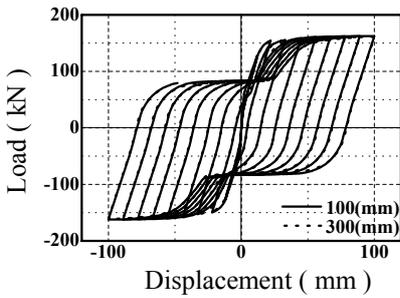


図-3 供試体概要



(a) 局所理論解析



(b) 非局所理論解析

図-4 荷重変位関係(No. 1)

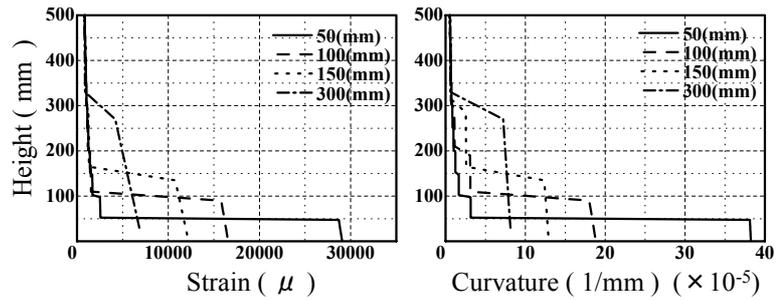


図-5 ひずみ分布ならびに曲率分布(局所理論解析)

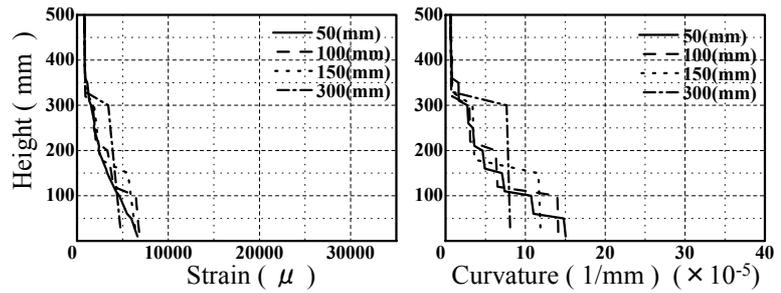


図-6 ひずみ分布ならびに曲率分布(非局所理論解析)

を示し、要素寸法依存性が発生していることが示された。また、曲率分布においても同様の傾向が見られる。一方、図-6に示すように非局所理論解析では、特性長さより短い要素寸法 50(mm), 100(mm), 150(mm)においてはほぼ同等な分布性状を示しており、ひずみならびに曲率の要素寸法依存性が低減されていることが分かる。一方、要素寸法 300(mm)においては局所理論解析とほぼ同一の分布性状となっている。これは要素寸法が特性長さよりも長くなっているために、非局所化の影響が発現しづらいためと考えられる。

図-7に要素寸法 100(mm)における曲率分布の進展を正側変位 20, 50, 80(mm)で示す。図中の実線は非局所理論解析の、点線は局所理論解析の結果である。局所理論解析では、曲率の高さ方向の進展はあまりみられず、基部に最も近い要素に集中して進展していることが示された。一方、非局所理論解析では、柱基部から 300 (mm)まで曲率が拡がりを持って進展していることが示された。この結果から、非局所構成則を適用することである長さの範囲で局所化が進展する挙動を再現できることが示された。

4.3 実験値との比較による曲率の評価

RC 部材では、塑性ヒンジが形成され、ある領域で局所化が集中、進展することが知られている。そこで、解析によって得られた局所化領域について実験結果との比較を行った。図-8 (a), (b)に異なる要素寸法での非局所理論解析、局所理論解析それぞれで得られた柱基部での曲率分布の実験値との比較を示す。図中の○は実験値である。実験値はかぶりコンクリート剥離時に対応する変位 $6\delta_y$ と $7\delta_y$ での曲率分布の平均値である。なお、本解析では、軸方向鉄筋の伸び出しを考慮していないため、実験値と同変位で比較をすることができない。そこで、実験結果では、 $6\delta_y$ 時に伸び出しによる変位が占める割合が約 30%と報告されていたことから、 $6\delta_y$ から 30%減少させた時点での結果を示した。図-8 (a)に示すように非局所理論解析では要素寸法 300(mm)では非局所化の影響が少なく一要素のみに拡がるが、短い要素寸法においては、要素寸法によらず拡がり 300(mm)となり、実験結果の範囲とほぼ同等な長さが示された。また、絶対値も実験値と概ね等しいものとなった。それに対して、図-8 (b)に示す局所理論解析で

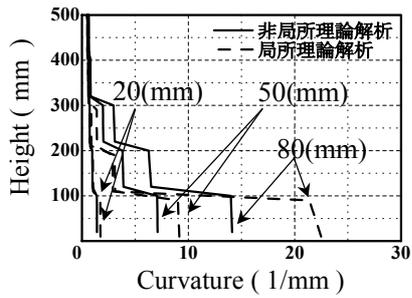
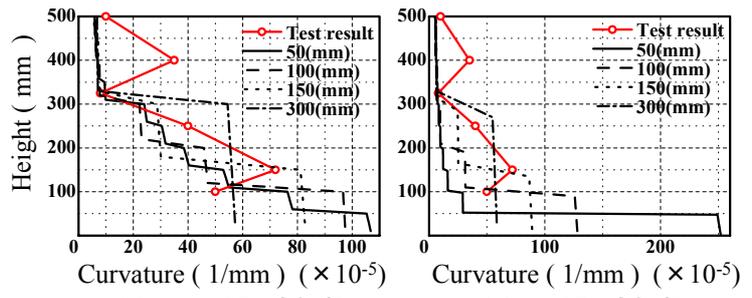


図-7 曲率分布の進展 (No. 1)



(a) 非局所理論解析 (b) 局所理論解析

図-8 曲率分布の実験値との比較

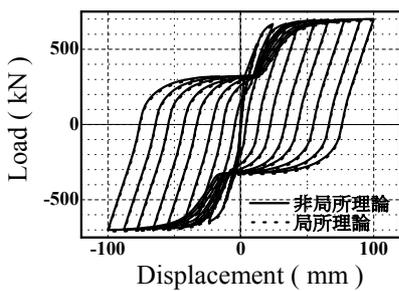


図-9 荷重変位関係 (No. 5)

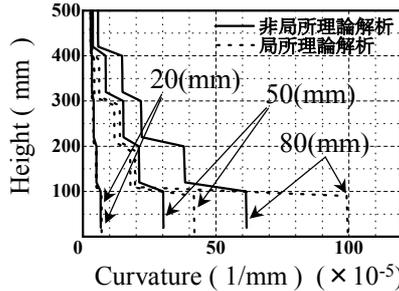


図-10 曲率分布の進展 (No. 5)

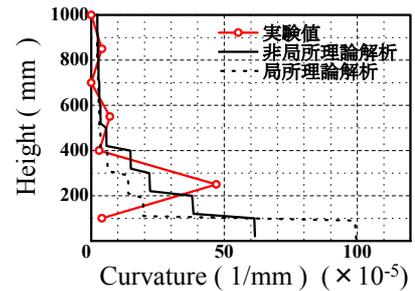


図-11 曲率分布の比較 (No. 5)

は、短い要素寸法では一要素で局所化が生じ、実験結果を妥当に評価するに至っていない。しかしながら、要素寸法 300(mm)では要素寸法と破壊領域がほぼ等しいため、実験と概ね同様の分布となった。このように従来の局所理論解析でも要素寸法を適切に設定すれば評価が可能になると考えられる。

4.4 1200×1200 (mm) 断面の供試体 (No. 5 供試体)

No.1 供試体より大型断面を有する No.5 供試体での荷重変位関係および曲率分布の進展を図-9 および図-10 に示す。曲率分布の進展は正側変位 20, 50, 80(mm)の時点を示している。図-9 より、局所理論解析、非局所理論解析とも同様の荷重変位関係が得られた。図-10 より、No.1 供試体での結果と同様に、局所理論解析では、曲率の高さ方向の進展は若干みられるものの基部に最も近い要素で局所化し曲率が著しく増加している。一方、非局所理論解析では、基部からおよそ 400(mm)の範囲で曲率が拡がりを持って進展していることが示された。

次に、図-11 に曲率分布の実験値との比較を示す。実験値はかぶりコンクリート剥離時における曲率分布で変位 $9\delta_y$ と $10\delta_y$ での曲率分布

の平均値である。解析では、No.1 供試体と同様に、伸び出しの影響を考慮して 30%減少させた変位時点での解析結果を示した。図中の実線は非局所理論解析、点線は局所理論解析の結果で○は実験値を示している。局所理論解析では、局所化が生じ、柱下端での曲率を過度に評価してしまっている。一方、非局所理論解析では、実験値をおおむね妥当に評価し、曲率の拡がりはおよそ 400(mm)であり、実験とほぼ同等の領域を有していることが示された。これらのことから、寸法の大きな供試体に対しても非局所構成則で同一の特性長さ(l^*)を用いれば、局所化領域の性状が評価できる可能性が示されたといえる。

4.5 局所理論解析による局所化性状の評価

非局所理論解析は局所理論解析に比べ解析が複雑となる。そこで、一般的に用いられる局所理論解析により便宜的に局所化性状が評価可能であるかの検討を行った。

局所理論解析より得られた曲率分布を平均化し、局所化性状の実験値との比較を行った。平均化は式(6)で示すように局所理論解析より得られた曲率 ϕ に重みをかけて行い、算出された平

均ひずみ $\bar{\phi}$ で局所化性状を評価することを試みた。ここで $\alpha(x, \eta)$ は矩形分布とした。

$$\bar{\phi}(x) = \int_L \phi(x) W(x, \eta) d\eta \quad (6)$$

$$W(x, \eta) = \frac{\alpha(x, \eta)}{Vr(x)} \quad Vr(x) = \int_L \alpha(x, \eta) d\eta$$

また、平均化する長さは式(7)で与えられる等価塑性ヒンジ長⁵⁾とした。

$$L = 0.5d + 0.05L_a \quad (7)$$

ここで、 d は有効高さ、 L_a はせん断スパンである。式(7)より求められる等価塑性ヒンジ長は No.1 供試体で 420(mm)、No.5 供試体で 815(mm) である。図-12 および図-13 に No.1 供試体および No.5 供試体の式(6)による平均曲率分布の実験値との比較を示す。No.1 供試体では、曲率が増加する領域が 250(mm) から 400(mm) 程度であり、平均化によって要素寸法依存性が低減されるとともに実験値と近い性状が示されている。

一方、No.5 供試体では曲率が増加する領域は約 500(mm) であり、こちらも実験とほぼ同等の性状を評価することが可能になることが示された。

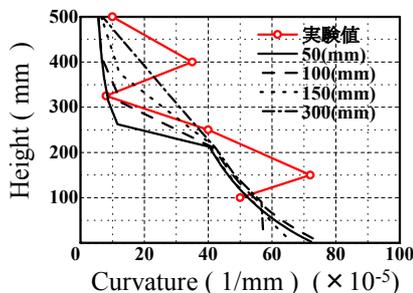


図-12 平均曲率分布 (No. 1)

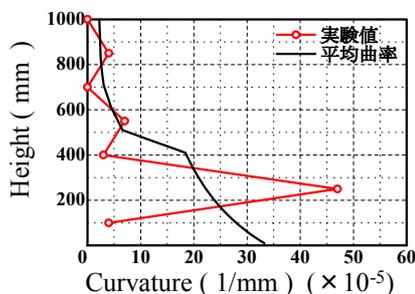


図-13 平均曲率分布 (No. 5)

5. まとめ

非局所構成則を適用し、RC 部材の繰り返し解析を行い、その適用性を検討した結果、以下の

結論が得られた。

- (1) RC 一軸部材の繰り返し解析を行い、ひずみ分布の進展が圧縮側と引張側で異なる挙動を示すことが明らかになった。圧縮側は鉄筋の有無に関わらずある一定の長さの局所化領域を示し、引張側は鉄筋によるひずみの分散性が認められた。
- (2) RC 橋脚部材の繰り返し解析を行い、非局所構成則の適用性を検討した結果、変位およびひずみの要素寸法依存性が低減されることが明らかになった。また、局所化領域の大きさおよび局所化領域内の曲率の値は比較的大型断面に対しても実験とほぼ同等の値となることが示された。
- (3) 局所理論解析より得られる要素寸法依存性が発生している曲率分布を、等価塑性ヒンジ長で平均化することによって、実験とほぼ同等な局所化性状を再現することが便宜的に可能となる。

参考文献

- 1) 諏訪俊輔, 権庸吉, 中村光, 田邊忠頭: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.73-78, 2004
- 2) Chambon, Desrues, Vaedoulakis: Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Balkema, pp.89-100, 1994
- 3) 権庸吉, 諏訪俊輔, 中村光, 田邊忠頭: 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集, Vol.26, No.2, pp.109-114, 2004
- 4) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 載荷繰り返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.877-888, 1998
- 5) コンクリート標準示法書耐震性能照査編, 2002