三次元 FEM への非局所理論の導入に関する検討

名古屋大学大学院　学生会員　○松井　義雄
山梨大学大学院　正会員　檜貝　勇
名古屋大学大学院　正会員　中村　光

１．はじめに

RC 部材の FEM 解析では，圧縮側コンクリートの応力－ひずみ関係に圧縮破壊エネルギーを導入しても，載荷板に隣接するコンクリート要素の圧縮ひずみが過度に局所化し，耐荷力を過小評価する．また解の要素寸法依存性が問題となることが知られている．これらの問題を解決する目的で，本研究では，三次元 FEM に積分型非局所損傷理論 [1)]の導入を試みた．また押抜きせん断破壊する RC スラブの解析を行い，非局所理論を三次元 FEM に導入することの影響を検討した．

２．解析手法の概要

本解析に用いた有限要素は，8 節点のアイソパラメトリック六面体 1 次要素で，数値積分に用いる *Gauss* 点の数は 8 とした．ポストピーク領域までの挙動を捉えるため，変位制御の増分解析を行い，収束計算には *Newton－Raphson* 法を用いた．また、3 方向の主応力－主ひずみ関係として，基本的にはそれぞれ一軸応力下での構成則を用いた．局所理論に基づく解析では，構成則に *Nakamura・Higai*[2)]の研究による圧縮破壊エネルギー(G_{fc})，引張破壊エネルギー(G_{ft})を用いた．一方，非局所理論に基づく解析では，当然ながら，圧縮破壊エネルギーは用いていない．また，局所ひずみと非局所ひずみを扱う際，コンクリートのひび割れモデルとして，回転ひび割れモデルを用いた．

３．積分型非局所損傷理論

本研究では Bežant らが提案した積分型非局所損傷理論を用いたのであるが，非局所理論を圧縮のみに適用した点が特徴である．積分型理論において非局所ひずみ $\varepsilon_{nonlocal}$ は，局所ひずみ ε_{local} を式(1)に示すような重み関数を考慮してある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．

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

$$V_r(x)=\int_V \alpha(|x-s|)dV(s) \qquad (2)$$

$$\alpha(|x-s|)=\frac{15}{8\ell^*}\left(1-\left(\frac{|x-s|}{\ell^*/2}\right)^2\right)^2 \qquad |x-s|<\ell^*/2 \qquad (3)$$

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，$\alpha(|x-s|)$は重み関数(図 1)，ℓ^*は特性長さ(直径)である．また，応力は，損傷理論に基づき式(4)より求められる．

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

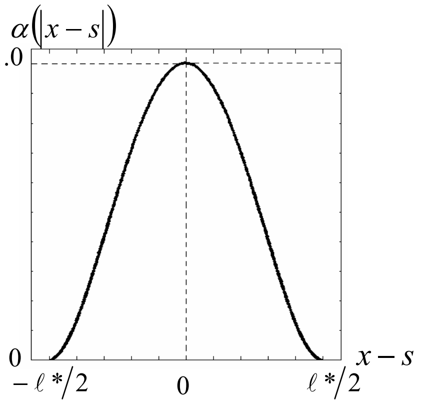


図 1　重み関数

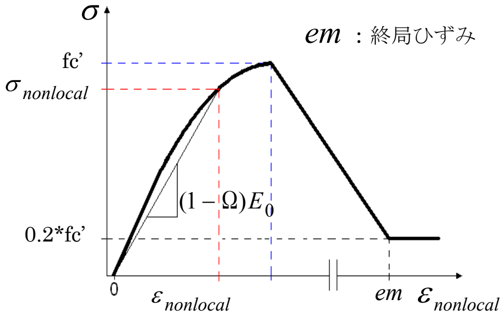


図 2　応力―非局所ひずみ関係

キーワード　積分型非局所損傷理論，三次元 FEM，RC スラブ，押抜きせん断破壊
連絡先　〒400-8511　山梨県甲府市武田 4-3-11　山梨大学工学部土木環境工学科　TEL 055-220-8530

ここで，E_0は初期剛性，Ωは損傷度パラメータ で$(0 \leq \Omega \leq 1)$の範囲での単調増加関数である．コンクリートの剛性$(1-\Omega)E_0$は，図 2 に示すように最大応力までは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%で一定の残留応力となるように決定した．

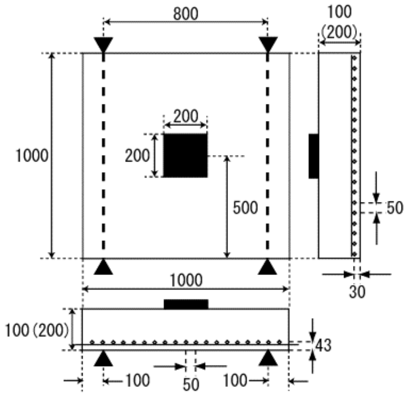


図 3　実験供試体の概要

４．供試体概要および解析モデル

厚さ 100mm，200mm，300mm の RC スラブを用いた押抜きせん断破壊実験結果を解析対象とした．実験供試体の概要を図 3 に示す．供試体は主鉄筋方向，配力鉄筋方向ともに D13 を配筋した．ただし，スラブ厚 300mm のみ図 3 の半分（ピッチ 100mm）の配筋とした．

本解析では，２方向の対称性を考慮した 1/4 モデルを用いて，供試体の要素分割モデルは図 4 のようにした．そして，鉄筋にはトラス要素を用い，コンクリートと鉄筋の付着は完全付着とした．

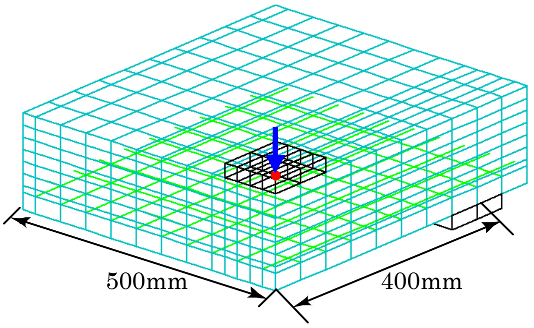
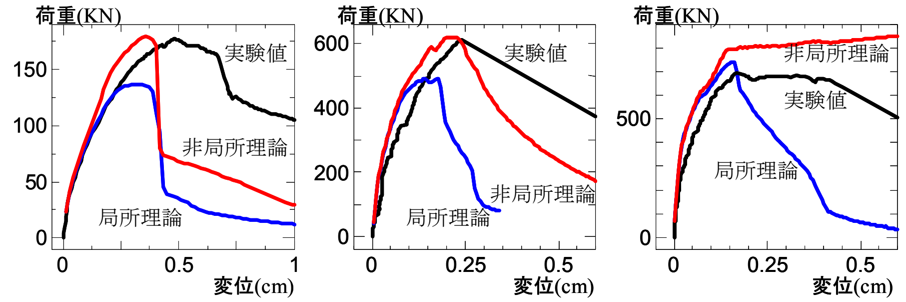


図 4　解析モデル(1/4 モデル)

５．解析結果

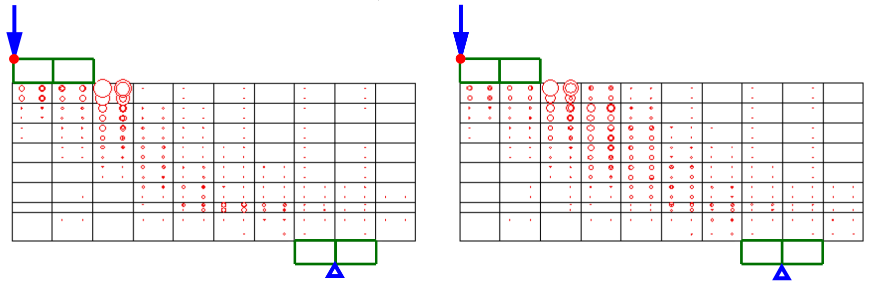
本解析では，特性長さℓ^*を 300mm，終局ひずみemを 0.018 とした．図 5 に解析および実験より得られた荷重，載荷点変位関係を示す．また，比較のため破壊エネルギーを考慮した局所理論に基づく解析結果も併せて示す．局所理論では耐荷力を実験値よりも過小に評価しているのに対して，非局所理論では実験値を精度よく評価できた．

図 6 に，スラブ厚 200mm の主鉄筋方向断面における，最大荷重後 90%での，局所理論ならびに非局所理論による圧縮ひずみの分布を示す．(a)局所理論では，載荷板となりの要素に局所ひずみが集中しているが，一方，(b)非局所理論では，局所ひずみがより広い範囲に分布していることが分かる．



(a) スラブ厚100mm　(b) スラブ厚200mm　(c) スラブ厚300mm

図 5　荷重，載荷点変位関係



(a) 局所理論に基づく解析　(b) 非局所理論に基づく解析

図 6　最大荷重後 90%における主鉄筋方向断面の圧縮ひずみ分布

６．結論

三次元 FEM へ積分型非局所損傷理論を導入することで，RC スラブの載荷板に隣接するコンクリート要素への過度なひずみの局所化を解消できることが分かった．今後，材料特性，解析条件の細部などについてさらに検討を進める予定である．

参考文献

1) Bažant, 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) 諏訪俊輔，權庸吉，中村光，田邉忠顕：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