

非線形 FEM 解析による RC 部材の損傷評価

(その 3) コンクリートの損傷指標の改良および鋼材の損傷指標の提案

Damage Evaluation of RC Members by Non-Linear Finite Element Analysis

(Part 3) Improvement of Damage Index of Concrete and Proposal of Damage Index of Steel

○ 植田智加来¹, 赤井冬来², 田嶋和樹³, 長沼一洋³, 佐藤裕一⁴*Chikara Ueta¹, Fuyuki Akai², Kazuki Tajima³, Yuichi Sato⁴

Abstract: In Part 3, the damage index of concrete proposed in the previous report is improved and new damage index of steel material is proposed. Non-linear finite element analysis was performed on reinforced concrete column, and damage indices were calculated. Results show that the damage indices of concrete and steel material are almost 1.0 when the specimen reaches the maximum load.

1. はじめに

筆者らはこれまでに非線形 FEM 解析による損傷評価を行ってきた^[1]。主にコンクリートのひずみエネルギーに基づき、鉄筋コンクリート造部材を対象として検討していたが、繰返し載荷において損傷指標が減少したり、設定した限界値の物理的意味が不明といった問題点があった。本研究ではそれらの問題点を解決するため、コンクリートの損傷指標の改良を行い、鋼材の損傷指標を新たに提案する。

2. コンクリートの損傷指標の修正

従来の指標からの変更点は二つで、一つは除荷時に損傷指標が減少しないようにするため、要素のひずみエネルギーから弾性ひずみエネルギーを引いた塑性ひずみエネルギー W_{epc} を次式により定義する。

$$W_{epc} = \sum_{k=1}^n \left(\sigma_{ij(k)} \cdot d\varepsilon_{ij(k)} \right) - \sigma_{ij(n)}^2 / 2E_{ij(n)} \quad (1)$$

ここで、右辺第 1 項の σ_{ij} と $d\varepsilon_{ij}$ はそれぞれ増分解析の各ステップにおける要素の応力とひずみ増分で、 E_{ij} は弾性係数である。 ij はテンソル成分を表す。 n は増分ステップ数で、1 から n までの総和がその要素に蓄積された全ひずみエネルギーに相当する。右辺第 2 項がステップ n における要素の弾性ひずみエネルギーである。

もう一つは部材の最大耐力到達時に損傷指標が 1.0 になるように Fig.1(a)で示される一軸圧縮強度時の塑性ひずみエネルギー W_{c0} で基準化した点である(次式)。なお、 W_{c0} はコンクリートの圧縮強度到達までの応力～ひずみ曲線から求められる。

$$Di(c)_{elm} = \frac{W_{epc}}{W_{c0}} \quad (2)$$

部材あるいは構造物として一つの指標となるよう重

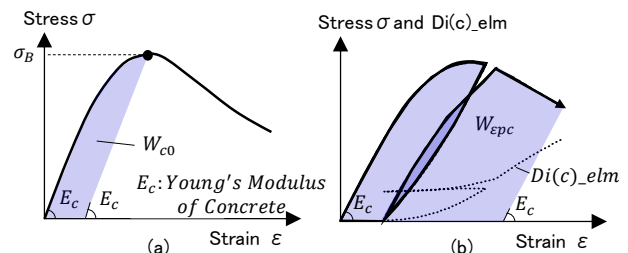


Fig.1 Definition of Plastic Strain Energy of Concrete

み付けした損傷指標 $Di(c)$ を式(3)に示す。

$$Di(c) = \frac{\sum (Di(c)_{elm} \cdot \varepsilon_{cmin} \cdot V_{elm})}{\sum (\varepsilon_{cmin} \cdot V_{elm})} \quad (3)$$

ここで、 V_{elm} は要素の体積である。

Fig.1(b)にコンクリート要素に一軸圧縮を加えた場合の応力～ひずみ曲線と塑性ひずみエネルギー W_{epc} および圧縮損傷指標 $Di(c)_{elm}$ の関係を示す。 $Di(c)_{elm}$ は圧縮応力の増大に伴って徐々に大きくなり、圧縮強度に到達すると 1.0 となる。軟化域に入ると $Di(c)_{elm}$ は増加を続けるが、除荷時にはほとんど値は変わらず、再び載荷すると増加し始める。

3. 鋼材の損傷指標の提案

鉄筋等の鋼材の損傷の度合いは降伏に伴う塑性ひずみの進展と対応するものと考え、コンクリートと同様の考えに基づき、鋼材についても式(4)により鋼材要素の塑性ひずみエネルギー W_{eps} を求める。

$$W_{eps} = \sum_{k=1}^n \left(\sigma_{eq(k)} \cdot d\varepsilon_{eq(k)} \right) \quad (4)$$

ここで、 σ_{eq} は相当応力、 $d\varepsilon_{eq}$ は相当塑性ひずみ増分、 n は増分ステップ数である。コンクリートと異なり、直接、塑性ひずみエネルギーを求めている。鋼材要素

の損傷指標 $Di(s)_{elm}$ は, W_{eps} を相当塑性ひずみが 1.0% に到達する時の塑性ひずみエネルギー W_{s0} で除したものととして次式で定義する。

$$Di(s)_{elm} = \frac{W_{eps}}{W_{s0}} \quad (5)$$

W_{s0} の概念を Fig.2(a) に示す。この基準化により、損傷指標が 1.0 を超えると要素の相当塑性ひずみが 1.0% に到達したことを意味する。

コンクリートと同様に、各鋼材要素の損傷指標に対して重み付け平均化処理を行うことで、部材あるいは構造物として 1 つの損傷指標を定義する。重み付け平均化を行う際は、コンクリートの場合の最小主ひずみ ϵ_{cmin} に代わり、式(6)に示すように偏差ひずみの第二不変量 J_2' で重み付けし、鋼材の損傷指標 $Di(s)$ を求めた。

$$Di(s) = \frac{\sum(Di(s)_{elm} \cdot J_2' \cdot V_{elm})}{\sum(J_2' \cdot V_{elm})} \quad (6)$$

Fig.2(b) に鋼材要素の応力～ひずみ曲線と塑性ひずみエネルギー W_{eps} 及び損傷指標 $Di(s)_{elm}$ の関係を示す。 $Di(s)_{elm}$ は降伏後に線形的に値が増加し、相当塑性ひずみが 1.0% に到達すると 1.0 となる。除荷時には $Di(s)_{elm}$ の値はほとんど変わらず、逆方向で降伏すると再び増加し始める。

4. RC 柱部材の解析への適用

4. 1. 対象試験体および解析モデル

Fig.3(a) に試験体寸法を示す。対象試験体および解析モデルは(その 2)で使用したものと同一である。

4. 2. 解析結果

Fig.3(b) に $Di(c)=1.0$ 時の破壊性状図を示す。柱端部に生じた圧壊により急激に耐力が低下した。Fig.3(c) に $Di(c)1.0=1.0$ 時の $Di(c)_{elm}$ 分布図を示す。損傷指標において、柱端部の局所的な破壊が支配的である。

Fig.4 に荷重および損傷指標と変形角の関係上にイベント発生点をプロットしたものを示す。荷重～変形角関係では解析結果は変形角 1.3% 程度まで概ね模擬した。ひび割れの発生および圧壊により剛性が低下し、引張側鉄筋降伏により、耐力が一定となった。その後は圧縮側鉄筋や帯筋の降伏が発生し、圧壊の進展により急激に耐力が低下した。

$Di(c)$ は $Di(s)$ に先行して増大し、ひび割れ発生後増大し始め、変形角 0.9% において限界値 1.0 に到達した。 $Di(c)$ が先行したことは圧壊が卓越したことに対応している。 $Di(s)$ は引張側鉄筋の降伏により増大し始め、変形角 1.0% において限界値 1.0 に到達した。

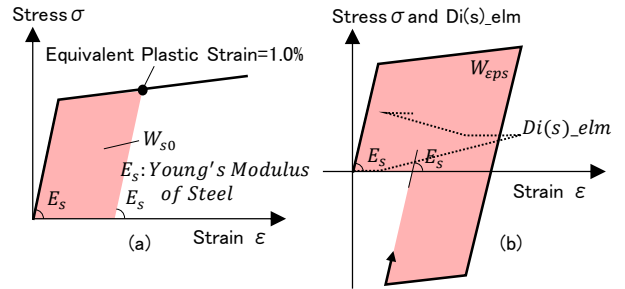


Fig. 2 Definition of Plastic Strain Energy of Steel

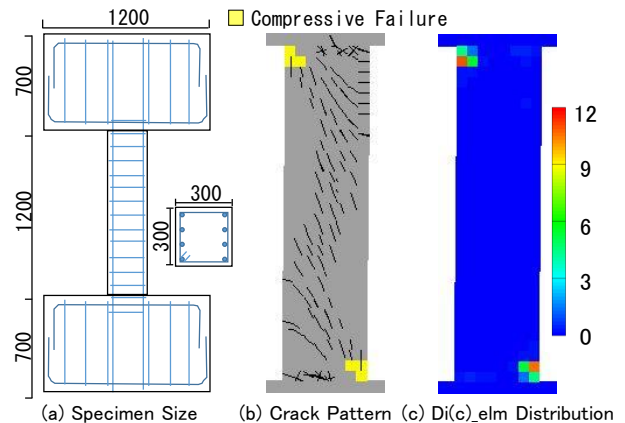


Fig. 3 Specimen and Analysis Results

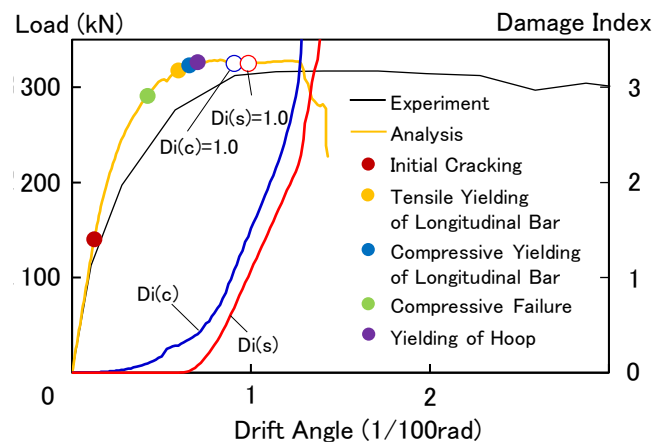


Fig. 4 Load and Damage Indices - Drift Angle Relationships

5. まとめ

(その 2) のコンクリートの損傷指標の改良と新たに鋼材の損傷指標を提案し、鉄筋コンクリート造柱部材に対して適用した結果、どちらの指標も限界値 1.0 により最大耐力点を評価できる可能性を示した。

6. 参考文献

[1] 早坂香苗ら：「非線形 FEM 解析による RC 部材の損傷指標(その 1),(その 2)」, 第 60 回日本大学理工学部学術講演会, 2016