# 非線形 FEM 解析による RC 部材の損傷評価 (その1)既往の損傷指標の適用性

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

(Part1) Applicability of Existing Damage Index

○早坂香苗1,赤井冬来2,田嶋和樹3,長沼一洋3

\*Kanae Hayasaka<sup>1</sup>, Fuyuki Akai<sup>2</sup>, Kazuki Tajima<sup>3</sup>, Kazuhiro Naganuma<sup>3</sup>

Abstract: Applicability of the existing damage index for reinforced concrete structure is investigated through finite element nonlinear analyses of column members subjected to axial and horizontal loads. It is found that the damage index overestimates the drift angle at the maximum load for columns with concrete strength of 80 MPa or higher and it fails to evaluate the maximum load of the column with no axial compression load.

## 1. はじめに

現在,日本建築防災協会の耐震診断基準<sup>[1]</sup>では,既 往の鉄筋コンクリート造(以下,RC造)建築物の残留ひ び割れ幅のみを基に,部材および構造物の損傷指標を 算定しており,鉄筋の降伏やコンクリートの圧壊とい った内部応力状態を直接反映したものではない.

このような背景において,近年では FEM 解析より得 られる局所ひずみに基づいた損傷指標<sup>[2]</sup>が提案されて いる.しかし,主に土木構造物を対象としており,建 築構造物のようにコンクリート強度が高いものや,断 面寸法が小さく,鉄筋量が多いものに対する適用性は 不明な点が多いのが現状である.

そこで、本報(その1)では既往の損傷指標の適用性を 様々な条件下で検討した結果について述べる.

#### 2. 既往の損傷指標

牧ら<sup>[2]</sup>は FEM 解析で得られる局所ひずみに基づいた 損傷指標を提案しており, RC 部材の損傷度を引張損傷 と圧縮損傷に分けて求めている.引張損傷は偏差ひず みの第2不変量 $J'_2$ により, 圧縮損傷は正規化した累加 ひずみエネルギー $W_n$ で, それぞれ次式で定義している.

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \tag{1}$$

$$W_n = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij})$$
(2)

ここで、fはコンクリートの一軸圧縮強度、nは計算 ステップ数である. $\sigma_{ij}$ および $\varepsilon_{ij}$ は2次元テンソル量で ある.さらに、要素寸法依存性を低減するために基準 となる積分点からの距離によって重み付けした損傷指 標 $\sqrt{J_2}$ および $W_n$ を提案している.これらは各積分点に おいて算出し、そのうちの最大値を代表値としている. また,最大耐力に達していないことを評価する限界値 として $\overline{W_n}$ =0.0015(以下,w15)を設定している.

### 3. 既往の損傷指標の適用性の確認

#### 3. 1. 対象試験体

Fig.1(a)に解析対象試験体図を示す. これは岸本ら<sup>[3]</sup> によって行われた RC 造柱の静的繰り返し載荷実験で ある. 対象試験体は, コンクリート強度 40.6MPa, 軸力 比 0.3, 主筋比 1.77%, 帯筋比 0.57%である. 変形角 3.0% まで急激な耐力低下は見られず, 曲げ変形が卓越した 試験体である.

#### 3. 2. 解析概要

Fig.1(b)に要素分割図を示す.解析は2次元平面応力 状態を仮定する. コンクリートは四辺形要素でモデル 化し,圧縮側応力-ひずみ関係は修正 Ahmad モデルと した.引張側は引張強度まで線形とし,ひび割れ後の 軟化域は破壊エネルギーを0.147(N/mm)とした土木学 会コンクリート標準指標書の式を採用した.主筋はト ラス要素でモデル化し,帯筋は分散型埋込み鉄筋とし た.主筋とコンクリート間には接合要素を配置するこ とで付着すべりを考慮した.付着強度は4.5MPa,付 着強度時のすべり量は1.0mmとした.



1:日大理工・学部・建築 2:日大理工・院(前)・建築 3:日大理工・教員・建築

## 3.3.解析結果

Fig.1(c)に最大耐力時の破壊状況を示す.解析では曲 げひび割れに加えて,せん断ひび割れが生じた.また, かぶりコンクリートとその内側の要素が圧壊すること で,急激に耐力が低下した.

Fig.2 にせん断力(Q)-水平変形角(R)関係を示す. 図中 には、実験の骨格曲線と限界値 W15 を併せて示す. 解 析結果は初期剛性および最大耐力,その時の変形を良 好に模擬したが,最大耐力後の挙動が実験結果と異な る. この原因は 2 次元解析であるために,帯筋による 拘束効果の影響を十分考慮できないためと考えられる. よって,本研究では最大耐力までを検討範囲とする.

4. コンクリート強度を変化させた検討

前述のモデルに対して、軸力比は 0.3 で一定として コンクリート強度を変化させた解析を実施した. Fig.3 に $\overline{W_n}$ -R 関係を示す. 図中には、W15を併せて示す.

Fig.4 に Q-R 関係上に W15 に達した点をプロットしたものを示す. 20MPa から 60MPa では最大耐力点を良好に評価できているが, 60MPa を超えると最大耐力後において限界値に達しており, 危険側の判定となった.

5. 軸力比を変化させた検討

同様に前述のモデルに対して、コンクリート強度は 40.6MPa で一定として、軸力比  $\eta$  を変化させた解析を 実施した. Fig.5 に $W_n$ -R 関係を示す. 図中には、W15 を 併せて示す. Fig.6 に Q-R 関係上に W15 に達した点を プロットしたものを示す. 図中には、実験の包絡線を 点線で示す. 軸力比 0.3 および 0.6 では最大耐力点を良 好に評価できているが、軸力比 0 では最大耐力後にお いて W15 に達しており、危険側の判定となった.

#### 6. まとめ

既往の損傷指標に関して、コンクリート強度および 軸力比を変化させた解析を実施した結果、危険側の判 定となる場合があることが確認された.

#### 7. 参考文献

- [1] 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築 物の耐震診断基準・同解説,2001
- [2] 牧 剛史ら:正負交番載荷を受ける RC 骨組構造物の非線形有限要素解析による損傷評価,土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.33-52, 2013
- [3] 岸本一蔵ら:曲げとせん断を受ける RC 造柱のひび割れ幅算定式,日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.681, pp.1709-1716, 2012



Fig.6 Q- R Relationship