論文 非線形 FEM 解析による RC 部材の損傷評価

赤井 冬来*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3・佐藤 裕一*4

要旨:非線形 FEM 解析を用いて,鉄筋コンクリート造部材に対する既往の損傷指標の適用性の確認を行った 結果,コンクリート強度に依らず,最大耐力点を概ね良好に評価することが確認された。しかし,局所的な破 壊の影響を排除するため.既往の損傷指標の概念を基本としつつ,部材全体で1つの指標が求まるような方 法を考え,その指標による部材耐力の評価精度について検討した。圧縮破壊およびせん断破壊する部材に対 しては,いずれも最大耐力点を概ね良好に評価した。さらに,引張破壊する部材の損傷評価を目的として,ひ び割れ幅およびひび割れ体積を算出し,部材の変形角との相関性を調べた。 キーワード:最大耐力,圧縮破壊,ひずみエネルギー,ひび割れ幅,ひび割れ体積

1. はじめに

現在,日本建築防災協会の被災度区分判定基準¹⁾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,近年では材料レベルにおけ る損傷状態を把握することを目的とし,FEM 解析より得 られる局所ひずみに基づいた損傷指標²⁾が提案されてい る。しかし,評価点ごとに一定の距離による平均化を行 っており,それが開口や異なる断面を有する構造に対し て有効であるかどうか,また,近年の建築構造物のよう 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である。

そこで、本研究ではまず、既往研究で提案された損傷 指標の適用性を様々な条件下で検討する。さらに、既往 の損傷指標の概念を基本としつつ、部材全体で1つの指 標が求まるような方法を考え、その指標による部材耐力 の評価精度を調べる。

2. 既往の損傷指標

牧ら²⁾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。

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

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

ここに、fはコンクリートの一軸圧縮強度、nは計算ス

*1日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)
*2日本大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)
*3日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)
*4京都大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

テップ数である。 σ_{ij} および ε_{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 $\overline{W_n}$ 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 値)を設定している。

3. 既往の損傷指標の適用性

3.1 解析対象試験体

図-1(a)に試験体寸法を示す。これは南口ら³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 象試験体はシアスパン比 2.0, コンクリート強度 40.6MPa, 軸力比 0.0 および 0.3, 主筋比 1.77%,帯筋比 0.57%であ る。いずれも変形角 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 解析モデル

図-1(b)に要素分割図を示す。また、図-2に各種材 料構成則を示す。解析は平面応力状態を仮定した。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⁴⁾とした。引張側は引張強度ま で線形とし、テンションスティフニングには出雲らのモ デル⁵⁾を採用した。ひび割れ後のせん断伝達特性は Al-Mahaidi モデル⁶⁾とした。かぶり部分およびコア部分は同 一の構成則とした。主筋はトラス要素でモデル化し、面 内方向の帯筋はコアコンクリート部分を分散型埋込み 鉄筋とし、再現した。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニ ア型とし、降伏後の剛性を初期剛性の 1/1000 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。既往の研究⁷⁾を参考に付着強度は 4.5MPa,付着強度時のすべり量は 1.0mm とした。



3.3 解析結果

図-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。後述するパラメータを変化 させたモデルにおいても急激な耐力低下はコンクリー トの圧壊により発生した。

図-3にせん断力Qと損傷指標Wnおよび水平変形角R 関係を示す。図中には、実験の骨格曲線とW15値を併せ 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、面外方 向の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、今回は最大耐力までを検討範 囲とする。W15値は最大耐力点を概ね良好に評価した。

3.4 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。 図-4 に $\overline{W_n}$ -R 関係を示す。 @-5 に Q-R 関係上に W15 値に達し た点をプロットしたものを示す。 60MPa を超える場合, かぶりコンクリートの圧壊により耐力が低下し, さらに コアコンクリートの圧壊により再び耐力が低下した。 W15 値は 60MPa までは最大耐力点を概ね良好に評価し. 60MPa を超える場合は 2 度目の耐力低下点を評価した。 この原因として, @-6に示すように 60MPa に比べ 80MPa では,最大耐力時の最小主ひずみが広く均されることや, 基準化係数fが過大であることが考えられる。

3.5 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ηを変化させた解析を実施した。図-7にWn-R関係を示す。図-8にQ-R関係上にW15値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。実験結果は変形角3.0% まで急激な耐力低下を示さなった。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0.0では変形角3.0%近傍においてW15値に達していない。



4. 圧縮破壊する部材の損傷評価

4.1 損傷指標の定義

前節において RC 造柱の解析モデルに対して検討した 結果,既往の損傷指標は高強度コンクリートに対しても 適用性が有することが確認された。しかし,損傷指標は ある要素の最大値ではなく,部材全体で1つの指標とし て定義した方が,局所的な損傷の影響を排除できるもの と考えらえる。そこで,負担応力が大きく耐荷機構を形 成している要素の影響を反映させるため,式(3)で定義す る各要素の塑性ひずみエネルギーWepを要素の体積と最 小主応力で重み付けした損傷指標を考えた。しかし,最 小主応力で重み付けした場合,最大耐力後において破壊 は進展しているにも関わらず損傷指標が低下し,破壊の 進展と損傷指標が対応しないことが分かった。そこで, 式(4)に示すように最小主応力に代わり最小主ひずみで 重み付けした損傷指標Di(c)とした。

$$W_{\varepsilon p} = \sum_{k=1}^{n} \left(\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} - \sigma_{ij}^2 / E_c \right)$$
(3)

$$Di(c) = \frac{\sum_{V} W_{\varepsilon p} / \alpha \cdot \varepsilon_{cmin} \cdot dV}{\sum_{V} \varepsilon_{cmin} \cdot dV}$$
(4)

ここに、 *ε_{cmin}*は各要素の最小主ひずみ、*V*は要素の体 積、*E_c*はコンクリートのヤング係数である。αは基準化係 数で、図-2に示すようにコンクリートの一軸圧縮強度時 の塑性ひずみエネルギーとした。本研究では第一段階と して、圧縮損傷に着目するため、最小主ひずみが圧縮と なる要素に関してのみ計算する。

図-9に前述のモデルより得られたDi(c)および実験・ 解析のせん断力(Q)と水平部材角(R)の関係を示す。最大 耐力に近づくにつれて, Di(c)が顕著に増大していること が分かる。限界値の設定には今後さらなる検討が必要で あるが,本検討では重み付けした塑性ひずみエネルギー が一軸圧縮強度時の塑性ひずみエネルギーに達する点 Di(c)=1.0 を最大耐力点を評価するための仮の限界値と して設定する。

4.2 コンクリート強度を変化させた検討

同様に前述のモデルに対して、軸力比を 0.3 で一定と し、コンクリート強度を 20~100MPa まで変化させた解 析を実施した。図-10 に得られた*Di(c)*-R 関係を示す。 図-11 に Q-R 関係上に*Di(c)*=1.0 に達した点をプロット したものを示す。本損傷指標ではコンクリート強度に依 らず、最大耐力点を概ね良好に評価した。

4.3 軸力比を変化させた検討

同様に前述のモデルに対して、コンクリート強度を 40.6MPa で一定として、軸力比を変化させた解析を実施 した。図-12 に*Di*(*c*)-R 関係を示す。



図-13 に Q-R 関係上にDi(c)=1.0 に達した点をプロットしたものを示す。図中には、実験結果の包絡線を点線で示す。いずれも最大耐力点を概ね良好に評価したが、軸力比 0.3 では最大耐力時の変形性能をやや過小評価した。軸力比が高くなるにつれ、最大耐力点に対してより早期にDi(c)=1.0 に達する傾向がある。この点に関しては今後の検討課題である。

4.4 要素寸法を変化させた検討

コンクリート強度 40.6MPa, 軸力比 0.3 で一定とし, 要素寸法を変化させた解析を実施した。基準寸法をそれ ぞれ 18.75mm(細かい), 37.5mm(基準), 56.25mm(粗い)と した。図-14にDi(c)-R 関係を示す。図-15に Q-R 関係 上にDi(c)=1.0 に達した点をプロットしたものを示す。 Di(c)=1.0 は最大耐力点を良好に評価した。ただし, Q-R 関係の最大耐力近傍では要素寸法依存性が現れており, 粗い要素分割では耐力を過大評価した。要素寸法の選定 には注意が必要である。

4.5 シアスパン比を変化させた検討

コンクリート強度 40.6MPa, 軸力比 0.3 で一定とし, シアスパン比を変化させた解析を実施した。図-16 に Di(c)-R 関係および要素分割を示す。図-17 に Q-R 関係 上にDi(c)=1.0 に達した点をプロットしたものを示す。 Di(c)=1.0 は最大耐力点を概ね良好に評価した。

5. せん断破壊する部材に対する適用性

5.1 解析対象試験体

本節ではせん断破壊する部材に対して、本損傷指標の 適用性を確認する。図-18に解析対象とした試験体寸法 図を示す。また、表-1に材料諸元を示す。これは、山邊 ら[®]によって行われた RC 造梁部材の単調載荷実験であ る。せん断補強筋の強度および断面積および断面形状を パラメータとしている。いずれの試験体も主筋は降伏せ ず、曲げひび割れ発生後、せん断ひび割れが徐々に進展 し最大耐力に至った。試験体 B は付着割裂破壊した可能 性があるため、本検討からは除外し、3 体の内 2 体を対 象とする。





5.2 解析モデル

図-19に要素分割を示す。コンクリートを四辺形要素で、鉄筋をトラス要素でモデル化した。主筋とコン クリート間に接合要素を配置することで付着すべりを 考慮した。材料構成則は前述のモデルと同様のものを 採用した。

5.3 解析結果

図-20 に最大耐力時の破壊性状を示す。いずれも実験 と同様に曲げひび割れが発生後、せん断ひび割れおよび 圧壊が発生し、それらが進展することで耐力が低下した。

図-21 に試験体 A のモデル(以下,モデル A および同様にモデル C とする)におけるせん断力(Q)および損傷指標Di(c)と変形角 R との関係を示す。図中には,Di(c)=1.0 到達点をプロットした。Q-R 関係では解析は最大耐力まで良好に模擬したが,ポストピーク挙動が実験と異なった。変形角 18/1000rad 近傍において圧縮ストラットの破壊の進展により耐力が低下した。Di(c)-R 関係では限界値は最大耐力点を概ね良好に評価した。

図-22 にモデル C におけるせん断力(Q)および損傷指 標Di(c)と変形角 R との関係を示す。図中には、限界値到 達点をプロットする。Q-R 関係では解析は最大耐力時の 変形性能を過小評価した。脚部のコンクリートの圧壊が 進展することで耐力が低下した。

5.4 ひび割れ幅とひび割れ体積

引張損傷に関しては最小主ひずみで重み付けした損 傷指標では評価できない。そこで、ひび割れ幅と、それ にひび割れ長さ(面積)を乗じたものをひび割れ体積と定 義し、それらによる引張損傷の評価を目的とし、その推 移を調べた。本検討では筆者らの一部⁹が提案する手法 により算出したひび割れ幅に長さと部材の奥行きを乗 じることでひび割れ体積を求めた。なお、ひび割れはす べて貫通していると仮定した。

図-23 にせん断応力τと平均ひび割れ幅_{cr}W_{ave}の関係 を示す。crW_{ave}が 0.05mm 以下において.解析結果は crW_{ave}を過大評価した。この原因として,実験ではクラ ックスケールを用い,目視により計測しているため,発 生しているひび割れを計測できなかったことが考えら れる。crW_{ave}が 0.05mm 以上において.モデル A では実 験の crW_{ave}の増大傾向を良好に表現したが,モデル C で は過小評価した。この原因として,モデル C では最大耐 力時の変形性能を過小評価していることや柱脚の要素 のみ圧壊しており,実験と比較して曲げ変形が卓越した と考えられる。高強度せん断補強筋を用いた部材に対し てはさらなる検討が必要である。

図-24 にせん断応力τおよび合計ひび割れ体積V_{cv}と変 形角 R の関係を示す。モデル A ではひび割れ体積は変形 角 1/1000rad 近傍において曲げひび割れの進展およびせ



ん断ひび割れの発生により増大し、変形角 5/1000rad 近 傍においてせん断補強筋の降伏に伴いさらに増大した。 モデル C ではひび割れ体積はほぼ線形に増大した。ひび 割れ体積は地震後の補修の要否の判断やエポキシ樹脂 注入量の見積りに活用できる可能性がある。

6. まとめ

- (1) 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、コンクリート強度に依らず、最大耐力点を評価できることを確認した。
- (2) 各要素の塑性ひずみエネルギーを要素の体積および最小主ひずみで重み付けし、部材として一つの値とする損傷指標は、コンクリート強度や軸力比に依らず、最大耐力点を概ね評価できる可能性を示した。
- (3) 引張損傷により耐力が決定する部材の損傷度を評価するための第一段階として、ひび割れ幅および体積を算出し、その推移を調べた。

本検討では限られた試験体のみを対象として損傷指 標の適用性を調べたが,今後は繰り返し載荷を含めて 様々な部材に対する適用性を検討する予定である。

謝辞

研究の遂行にあたり,白井伸明日本大学名誉教授より 多くのご助言を戴きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基 準および復旧技術指針,2001
- 牧 剛史,他: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
- 南口真一,他: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
- 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係,日本建築学会構造系論文集,第474号, pp.163-170,1995.8
- 5) 出雲淳一,他:面内力を受ける鉄筋コンクリート板 要素の解析モデル,コンクリート工学論文, No. 87.9-1, pp. 107-120, 1987.9
- Al-Mahaidi, R. S. H. :Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979
- 飯塚敬一,他:かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係,土木学会論文集 E2,



Vol67, No. 2, 280-296, 2011

- 8) 山邊周志,他:高強度せん断補強筋を用いたはり部 材のせん断ひび割れ特性、コンクリート工学年次論 文報告集, Vol. 18, No. 2, 1996
- 佐藤裕一,他:分散ひび割れモデルによる鉄筋コン クリートのひび割れ幅の予測,構造工学論文集, Vol. 61B, pp. 111-123, 2015 年 3 月