

論文 材料非線形 FEM による実大 6 層鉄筋コンクリート建物の倒壊リスク評価法の検討

船山 真里*¹・小松 怜史*²・細田 暁*³・杉本 訓祥*³

要旨：建築 RC 建物の地震による転倒リスク評価法の構築を最終目標に，本研究では，まず材料非線形 FEM プログラムを用いて実大 6 層鉄筋コンクリート建物をモデル化し，振動台実験における当該建物の地震応答解析を行った。そのうえで，部材内の相対変形量に着目した限界値指標を適用し，建物の倒壊リスク評価を試みた。その結果，当該建物の柱部材および壁部材がせん断破壊するポストピーク挙動をおおよそ再現することができた。また，柱部材内の相対変形量に着目することで，地震動による部材損傷での建物の倒壊リスクを合理的に評価できる可能性が示された。

キーワード：地震応答解析，鉄筋コンクリート，材料非線形有限要素法，相対変形量，限界値指標

1. はじめに

日本は世界と比べても地震発生頻度が多い国であり，その被害の大きさも甚大である。文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会¹⁾は，将来地震による強い揺れに見舞われる可能性を確率的に表した地震動予測地図を 2005 年から公表し，更新してきた。最新の地震動予測地図によると，2020 年から今後 30 年間に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率が太平洋側や首都圏で特に高く，その発生確率は 26% から 100% である。太平洋側の沖合には，千島海溝，日本海溝，南海トラフといった，海溝型地震を起こす陸と海のプレートの境界があり，海溝型地震の発生間隔が数十年から 100 年程度と短いため，太平洋岸の地域の確率が高くなっている。

このような背景を受け，例えば地震時の緊急輸送路の建物倒壊による閉塞リスクを評価したマップ²⁾を作製している自治体がある。閉塞リスクとは，建物が倒壊した場合その前面道路が通行可能かを判断する指標である。耐震性が低い建物が一つでも路線にあると，路線全体が通行不可能になってしまうリスクがあり課題となっている。ところが当該自治体の建物の耐震化率は一定水準に達した後，停滞している。その理由として，建物利用者（住民やテナントなど）の合意形成が進まないというのが一因としてあげられる。現行の評価法では，耐震診断で倒壊する危険性が高いと診断された建物の高さや前面道路の残存車線および中央分離帯の有無から転倒による緊急輸送路の通行可否を判断している。倒壊した建物が前面道路を完全に閉塞してしまう場合，もしくは車線が残存しているものの，中央分離帯によって通行が阻害される場合は，閉塞リスクが高いと判断される。一方，倒壊した建物の前面道路に 1 車線以上の通行可能な車線

が残存し，かつ中央分離帯の途切れた部分を通じて車両の行き来が可能である場合，閉塞リスクは中程度と判断される。図-1 に，建物の前面道路に中央分離帯がない場合の緊急輸送路通行可否評価法³⁾を示す。L が建物の前面道路，A が建物と前面道路までの距離，H が建物高さである。簡易な評価手法ではあるが，耐震化を進めるには，より合理性や説明性の高い手法が望まれる。

そこで，最終的には数値シミュレーションにより建物の道路側への転倒による緊急輸送路の閉塞リスク評価手法を整備することを目標に掲げた。手法が構築できれば，建物の耐震補強をする合意形成の一助となり，通行可能な緊急輸送路の拡大につながる事が期待される。

そのために本研究では材料非線形 FEM プログラムを用いて建築建物の地震応答解析結果への適用性を確認した。さらに，部材内の相対変形量に着目し，壁部材および柱部材の損傷による建物の倒壊リスクを合理的に評価法する手法の提案を試みた。なお本手法は，柱の軸力低下による建物転倒を意図したものであり，基礎の損傷や地盤沈下⁴⁾をきっかけとした建物の倒壊は対象としていない。

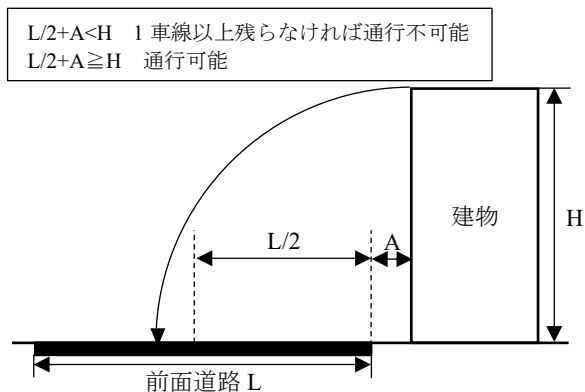


図-1 緊急輸送路の通行可否評価

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院准教授 工博 (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院教授 工博 (正会員)

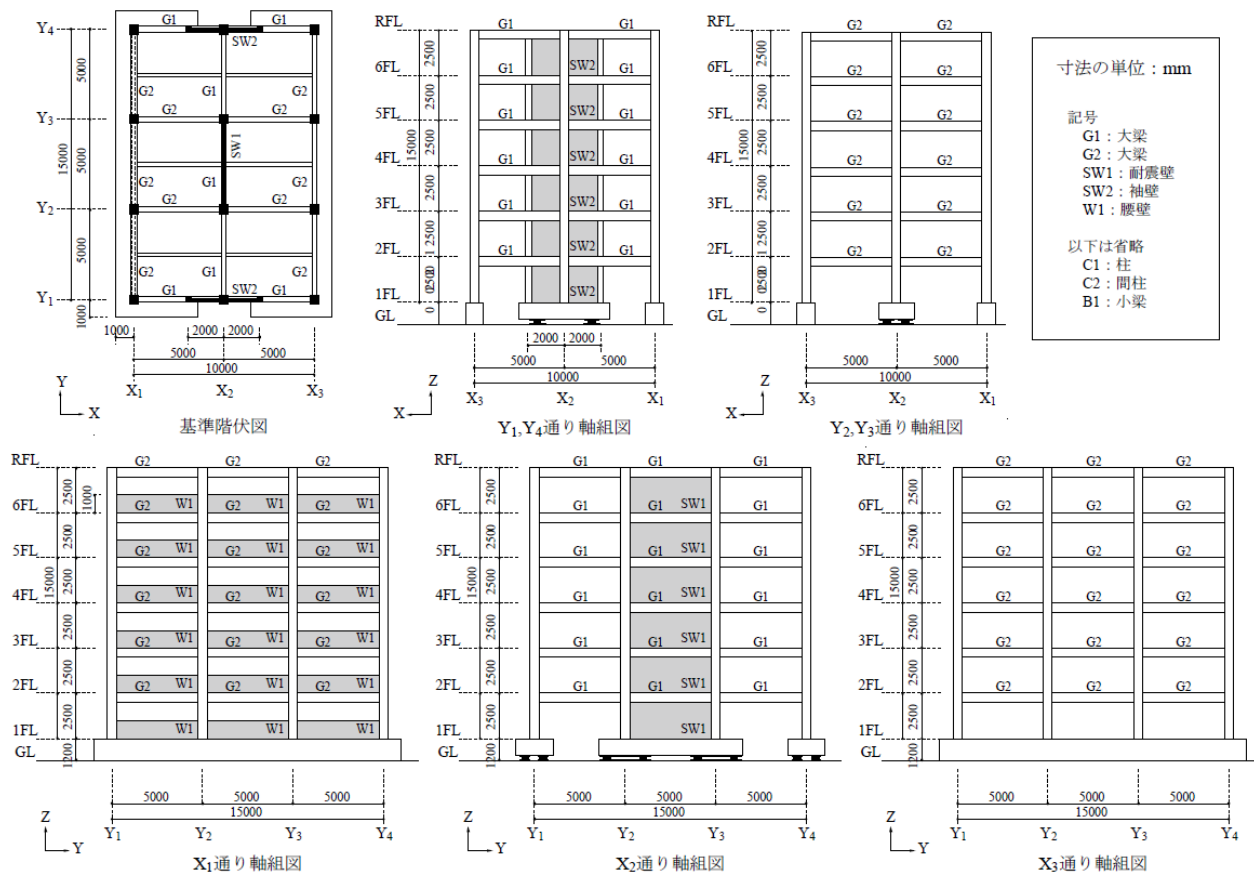


図-2 試験体の基準階伏図および軸組図

2. 実大6層鉄筋コンクリート建物の震動台実験の概要

文部科学省による「大都市大震災軽減化特別プロジェクトII 震動台活用による構造物の耐震性向上研究」では、独立行政法人防災科学技術研究所の「実大三次元震動破壊実験施設」を用い、実大6層鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の震動台実験を実施した⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

当該建物試験体（以下、試験体）の基準階伏図と軸組図を図-2に示す。長手方向（Y方向）3スパン、その直交方向（X方向）2スパンの6階建て鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造である。X、Y方向ともに各スパンは5000mm、階高は各階ともに2500mmで総高さ16200mmである。部材断面サイズは各階同一で、主柱500×500mm、間柱300×300mm、大梁300×500mm、小梁200×400mmである。各部材の配筋状況は、各階の柱の主筋を8-D19、帯筋2-D10@100、耐震壁は150mm厚、タテ、ヨコともにD10@300ダブル、一部を除いて大梁は、上筋3-D19、下筋2-D19、あばら筋2-D10@200mmとしている。コンクリートは設計基準強度 f_c を18N/mm²としたが、文献によると現場水中養生したコンクリート供試体の加振当日の圧縮強度は、1階から6階までそれぞれ31.7、30.7、28.2、27.3、25.2、22.8MPaであった。鉄筋の降伏強度は、D19は398MPa、D10は369MPaである。各階の重量は約1.25MNで、1階柱の中央高さより上部の

合計重量は7.50MNである。

入力地震動は、阪神・淡路大震災時の気象庁神戸海洋気象台観測波を用いて、振幅倍率を5、10、25、50、100%と順次増大させて入力し、最後に余震を模擬した60%の波形を入力した。振幅倍率60%の加振で建物は倒壊に至っている。加振方向は、X、Yの水平2方向と鉛直方向の3方向で、原波を45度回転させ、N45W方向を試験体のY方向に、N45EをX方向に入力した。最終的に建物の倒壊がY方向で生じるように設計した。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

2.で示した実験を対象に、解析コードCOM3⁸⁾を用いて材料非線形FEM解析を実施した。コンクリートの力学構成則は、一次元の圧縮、引張、ひび割れ面のせん断伝達モデルから構成されており、それぞれに対して時間依存性が考慮されている。本研究では有限要素モデルとして要素の非線形性に支配的な影響を及ぼすひび割れ面の変形を考慮する多方向非直交固定ひび割れモデルを選択した。また、実大建物の全体的な応答を効率良くかつ精度高く求めるために分散ひび割れモデルと分散鉄筋モデルを用いた。鉄筋が各要素の中央に配筋されるよう要素寸法を決定することでかぶりを考慮し、柱・梁の主鉄

筋およびせん断補強鉄筋は鉄筋比として各要素に設定した。モデル規模は、総要素数は 88573 要素、総節点数は 131024 節点である。

ひび割れ発生後に関しては、鉄筋コンクリートの引張領域に鉄筋の付着作用を空間平均的に考慮したテンションスティフニングモデルが式(1)⁹⁾により与えられている。

$$\sigma = R_f f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon} \right)^c \quad (1)$$

σ : 引張応力 R_f : 引張強度低減係数

ε : 引張ひずみ ε_{tu} : ひび割れ発生ひずみ c : 付着性状

解析に用いる材料の各諸元は実験値を採用した。鉄筋径は D19, D10 を使用し、実験と同様に配筋した。圧縮強度は実験で得られた各階の値を採用した。なお、ヤング係数と引張強度は乾燥収縮を考慮するため、既往研究¹⁰⁾をもとにコンクリート標準示方書¹¹⁾の式(2)、式(3)、式(4)を用いて計算したのち、それぞれ 20%、40%低減させた。なお、紙面の都合で割愛するがヤング係数と引張強度をコンクリート標準示方書から計算した値をそのまま使用した解析も実施した。しかし、ヤング係数と引張強度を上記の割合で低減させた解析のほうがより実験の損傷状況や変位に近い結果が得られたことを確認している。また、実験におけるコンクリートの設計基準強度と加振当日のコンクリートの圧縮強度に大きく差異があったため、式(3)の f'_{ck} にはコンクリートの圧縮強度を入力した。

$$E_c = \left(2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right) \times 10^4 \quad (f'_c < 30 \text{ N/mm}^2) \quad (2)$$

$$E_c = \left(2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right) \times 10^4 \quad (30 \leq f'_c < 40 \text{ N/mm}^2) \quad (3)$$

$$f'_{tk} = 0.23 f'_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

E_c : コンクリートのヤング係数[N/mm²]

f'_c : コンクリートの圧縮強度[N/mm²]

f'_{tk} : コンクリートの引張強度[N/mm²]

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度[N/mm²]

3.2 解析条件

解析モデルに実験と同様の地震波である気象庁神戸海洋気象台観測波を強制加速度入力した。振幅倍率 5%は影響が小さいと考え省略し、10、25、50、100%と順次増大させて入力した。X、Y 方向には、実験で出力された N45N 成分、N45W 成分の実測波を解析モデルに加振した。Z 方向は既往研究¹²⁾に基づき、観測波 UD 成分の地震波を入力した。

3.3 解析結果

地震波入力後の試験体の 1 階柱の最大主ひずみの結果を図-3、図-4、図-5 に、試験体全体の最大主ひずみの結果を図-6 にそれぞれ示す。実験と同様に損傷は 1 階に集中しており、鉄筋が座屈する様子は解析では捉えられていないものの、実験における柱の損傷傾向を概ね捉えることができた。実験では腰壁のある X₁通りの Y₂、

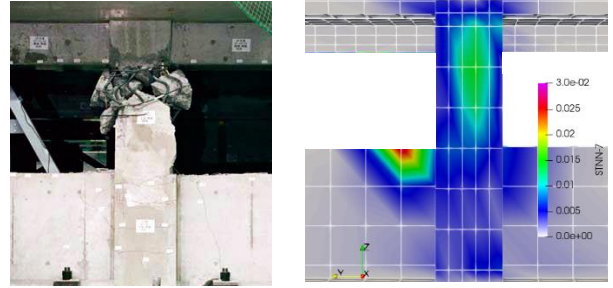


図-3 試験体 1 階柱の損傷状況 (X₁Y₃)

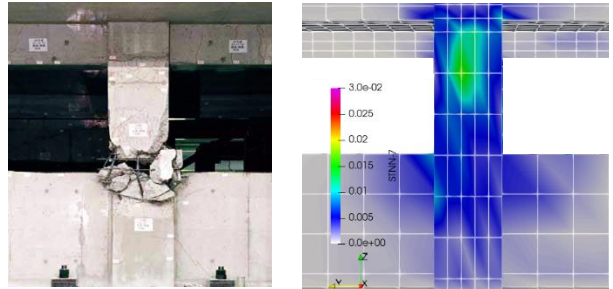


図-4 試験体 1 階柱の損傷状況 (X₁Y₂)

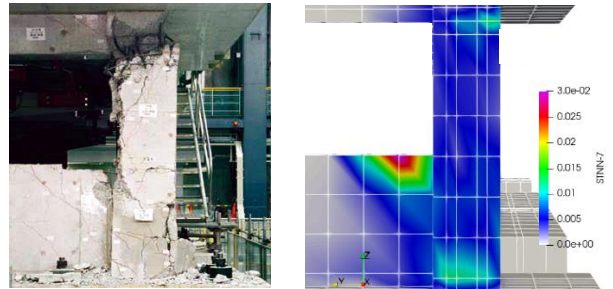


図-5 試験体 1 階柱の損傷状況 (X₁Y₁)

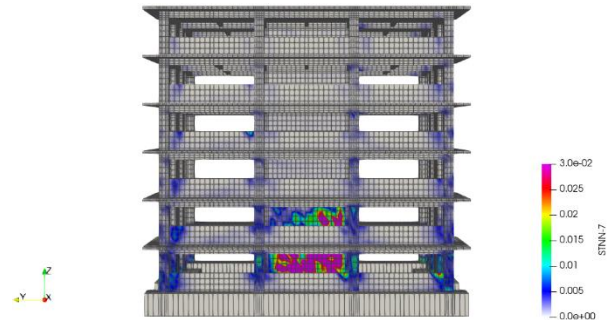


図-6 試験体全体の損傷状況

Y₃ の 1 階柱がせん断破壊したが、解析でも X₁Y₂、X₁Y₃ の 1 階柱に大きく損傷が確認された。X₁通りは腰壁があるため X₃通りの柱より拘束力が強くなり、また Y₁、Y₄ は柱の片側のみに腰壁があるが Y₂、Y₃ は柱の両側に腰壁があるため拘束力が大きい。したがって X₁通りの Y₂、Y₃ の損傷が大きくなったと考えられる。

実験と解析における振幅倍率 50%、100%のときの X₂Y₁における X-Y および Y-Z の 2 階床層間変位をそれぞれ図-7、図-8、図-9、図-10 に示す。振幅倍率 100%において、Y 方向で 50mm 程度小さく、Z 方向で 30mm 程度大きい変位となった。Z 方向は損傷後に負側に転じなかったが、おおよそ実験と同様の層間変位の履歴が得

られ、部材の損傷傾向を概ね捉えることができた。Z 方向が負側に転じなかったのは、かぶりの剥離による拘束力の低下、それに伴う鉄筋の座屈等のモデル⁸⁾が精度よく再現できないことが一因と考える。

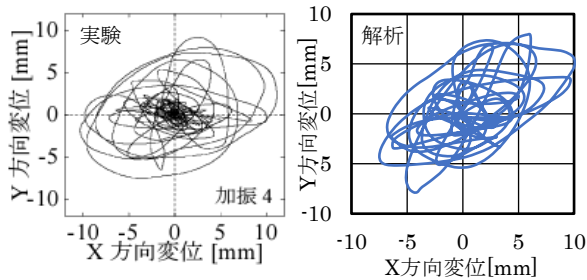


図-7 X-Y 方向の 2 階床層間変位 (振幅倍率 50%)

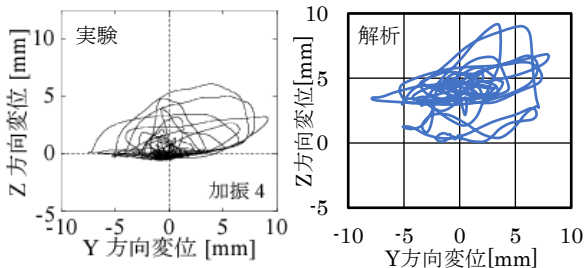


図-8 Y-Z 方向の 2 階床層間変位 (振幅倍率 50%)

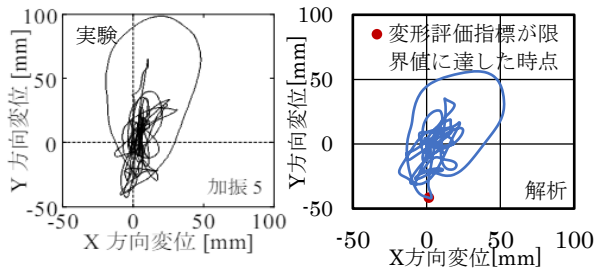


図-9 X-Y 方向の 2 階床層間変位 (振幅倍率 100%)

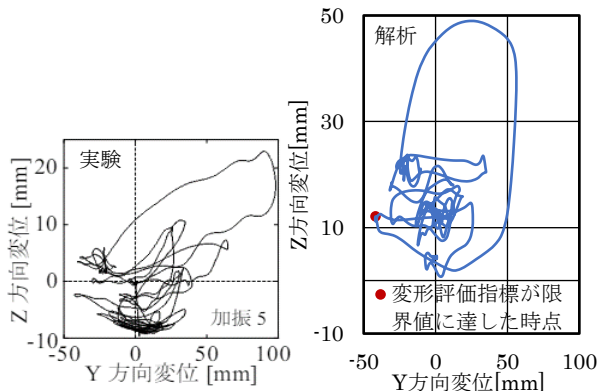


図-10 Y-Z 方向の 2 階床層間変位 (振幅倍率 100%)

4. 柱部材の損傷度評価

4.1 評価方法

現行の指標と比較してより定量的に建物の倒壊の可能性を判定する指標の利用を試みた。本研究では原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針¹³⁾に示されているボックスカルバートを想定した構造健全性の評価方法として採用されている指標を建物に適用できるか

を検証した。本指針は地震により構造物全体が崩壊しないことが前提であるため本研究の目的と一致すると考え、適用を検討した。指標は圧縮縁変位差¹⁴⁾と部材厚増分¹⁵⁾の 2 つで、いずれも部材内の相対変形量に着目している。

圧縮縁変位差とは、コンクリート材料の一軸圧縮破壊現象から導出した指標であり、面外曲げ破壊や面内せん断破壊の判定指標として有効とされている。この指標による照査は、部材耐力はやや低下しているものの不静定構造物全体としての水平耐力がおおよそ維持されている状態を限界としている。必要条件は、部材の平均的な軸力比が 0.1 以下、局所的に見ても 0.2 以下、最小部材厚が 0.4m であり、本対象は適用範囲内 (柱幅 500mm、軸力比 0.034) である。本指標は式(5)による値以下とする。

$$\Delta l_{lim}' = 2 \quad (5)$$

$\Delta l_{lim}'$: 圧縮縁変位差の限界値[mm]

ただし、照査に用いる節点は材料端 (ハンチなどの剛域がある場合は除く) から 200mm 以上離れている必要がある。限界値の設定は以下のような背景に基づく。コンクリートの一軸圧縮応力状態では材料の破壊領域は局所化することが知られている¹⁶⁾。一軸圧縮応力下のコンクリートの断面積が 10,000mm² 以上の場合、塑性化領域は 200mm を下回ることが実験的に示されている。実構造物の圧縮応力下のコンクリート断面積は 10,000mm² を超えることが多いと考えられるため、200mm が照査対象の目安となる。一方、有限要素法による数値シミュレーションでは要素長がひずみの値に影響する。実構造物で一般的に使われるコンクリート強度の場合、現行の指針では要素長が 200mm では主圧縮ひずみ限界値が 0.01 を下回ることではない。つまり、主圧縮ひずみによる指標より安全側に評価できる要素長 200mm と主圧縮ひずみの積の 2mm が圧縮損傷の目安の変形量となる。

一方、部材厚増分とは、斜めひび割れや付着割裂ひび割れの開きが主成分であり、それらの開きの厚さ方向性分の合計に対応する。曲げひび割れの開きは検知せず、せん断ひび割れの開きのみを検知するため、面外せん断破壊の判定指標として有効である。この指標による照査は、圧縮縁変位差と同様に、部材耐力はやや低下しているものの不静定構造物全体としての水平耐力がおおよそ維持されている状態を限界としている。必要条件は圧縮編変位差と同様で、先述の通り適用範囲内での検討である。本指標は式(6)による値以下とする。

$$\Delta D_{lim} = \max\{5, 2.5p_w D\} \quad (6)$$

ΔD_{lim} : 部材厚増分の限界値[mm]

p_w : せん断補強筋比 D : 部材厚[mm]

限界値の設定は以下のような背景に基づく。第 1 項の 5mm は、面外せん断補強筋の無い部材に着目している。既往実験によると、5mm の膨張があるときの部材

軸直交方向耐力の残留率は60%～95%である。5mmの膨張量は部材単体で見ると水平耐力は低下しているが、1層1連ラーメン程度の不静定性を有する構造物では水平耐力の低下が十分小さい状態に対応することがわかっている¹⁷⁾。第2項の $2.5p_w D$ は、面外せん断補強筋を有する部材に着目している。面外せん断補強筋が引張強度点に達するときの伸び変位を想定し、解析的検討¹⁸⁾により導出されている。

これら両指標を組み合わせることで、表-1に示すように、壁部材もしくは柱部材に対して、面内もしくは面外、曲げ破壊もしくはせん断破壊、すべてのケースに対して適用可能な指標であること、部材の最大荷重が90%程度以上の保持された状態で評価できること、要素長の影響を受けにくいこと等が確認されている¹⁹⁾。

4.2 評価指標の有用性に関する検討結果

この2つの判定指標を用いて、2.に示した実験により地震動を受けた試験体の1階の柱の構造健全性を評価した。その結果、判定を行ったすべての柱において、圧縮縁変位差が先に限界値を超えた。圧縮縁変位差が限界値を超えたときを図-7、図-8上に赤丸でプロットした。全ステップ60.32秒のうち、振幅倍率100%の50.30秒で圧縮縁変位差は限界値を超えた。これらの図から、振幅倍率100%でY方向の変位が最も負側に振れたときに圧縮縁変位差が限界値に達していることが読み取れる。実験では、振幅倍率100%のときに安全限界となり、60%で倒壊に至った。よって、本指標が限界状態を合理的に評価できていると考えられる。

図-9に圧縮縁変位差が限界値を超えたあとと最も大きい値を示したときの試験体1階の最小主ひずみのコンター、図-10に圧縮縁変位差が限界値に達した場所の最小主ひずみコンターを示す。図-10を見ると、評価指標で圧縮縁変位差が限界値に達した柱で、比較的大きな圧縮ひずみが生じていることが分かる。腰壁があるためにせん断スパン比(a/d)が実質1.67程度と小さくなったためと考えられる。一方で部材厚増分も遅れて限界値を超えており、その場所は X_3Y_1 の1階柱の2か所および X_3Y_4 の1階柱の1か所であった。図-11に部材厚増分が限界値を超えた柱のコンターを示す。柱下端の曲げひび割れ発生位置では限界値を示さず、斜めひび割れの進展が柱上端から始まり限界値に至ったと推測できる。

以上より、本指標を使えば破壊モードを適切に推定できることが分かった。なお、載荷後にはすべての柱で圧縮縁変位差が限界値を上回った。特に X_1 通りの方が X_3 通りよりも圧縮縁変位差が10mm以上となった箇所が多く、 X_1Y_2 、 X_1Y_3 に集中していることから、腰壁による拘束が柱の損傷に大きく影響を与えることを本指標も示していることが分かった。

表-1 各種破壊モードと評価指標

対象	ひび割れ種類	破壊モード	評価項目
面外	せん断	斜め引張	部材厚増分
面内		せん断圧縮	圧縮縁変位差
面外	曲げ	曲げ圧縮	

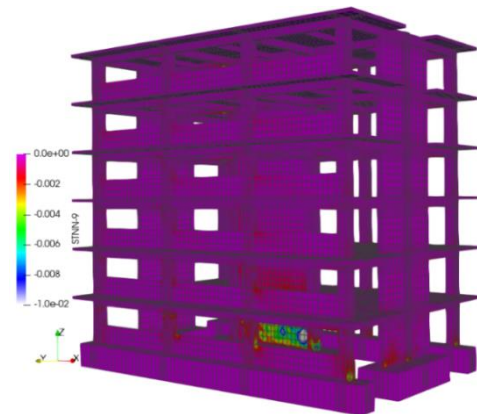


図-9 試験体の最小主ひずみの分布

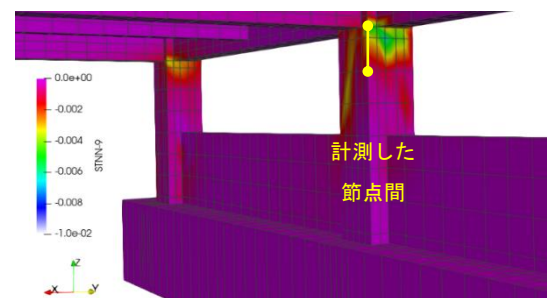


図-10 柱 X_1Y_2 の最小主ひずみの分布

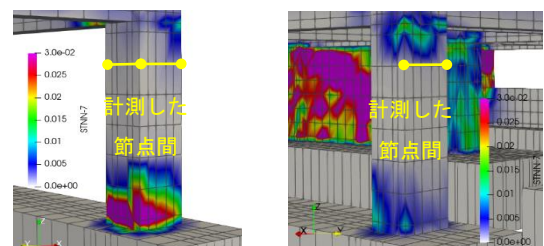


図-11 最大主ひずみの分布（左： X_3Y_1 右： X_3Y_4 ）

5. まとめ

材料非線形FEM解析による実大6層鉄筋コンクリート建物のシミュレーション解析を実施し、建物の倒壊リスクを評価する枠組みの構築を目指した。結果、以下のような結論を得た。

- (1) 実大建物の地震応答解析の精度向上には乾燥収縮の影響を適切に考慮する必要がある。本研究では、ヤング係数および引張強度をコンクリート標準示方書の式をもとに計算した値からそれぞれ20%、40%低減させて解析を行ったところ実験結果と同様の損傷状況および層間変位が得られた。
- (2) 振幅倍率100%において、Z方向は壁および柱の損傷後に負側(建物が沈み込む側)に転じなかったが、

せん断破壊が生じた後の建物の水平方向の変形はほぼ実験に準じた結果が得られた。より精度よく損傷状況を評価するためには、かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈がモデル上で精度よく再現できるよう考慮する必要があると考える。

- (3) 部材内の相対変形量に着目した指標は、現行の評価法と比べて建物の倒壊リスクを合理的に評価でき、建物の冗長的な破壊挙動を考慮した判定指標であることが確認された。また、当該指標を用いることで部材の損傷箇所、程度、破壊モードを推定できた。

謝辞

本研究に使用した解析モデルの作成はStanislav 博士(横浜国立大学)、千々和伸浩教授(東京科学大学)にご協力いただきました。また本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期「スマート防災ネットワークの構築」JPJ012289(研究推進法人:国立研究開発法人 防災科学技術研究所)によって実施されました。感謝いたします。

参考文献

- 1) 文部科学省地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図 2020 年版，2021.3
- 2) 横浜市：第3期横浜市耐震改修促進計画〔令和4年～7年度〕，2024.4
- 3) 建築基準法：建築物の耐震改修の促進に関する法律施行令，第四条（通行障害建築物の要件）
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所：令和6年(2024年)能登半島地震による建築物の基礎・地盤被害に関する現地調査報告（速報），pp.1-26，2024.2
- 5) 防災科学技術研究所：平成17年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト実大6層RC建物実験報告書，2008.3
- 6) 文部科学省：「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成17年度成果報告書 II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究，3.2 鉄筋コンクリート建物実験，3.2.1 実大鉄筋コンクリート建物の三次元振動破壊実験
- 7) 文部科学省：「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成18年度成果報告書（案） II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究，3.2 鉄筋コンクリート建物実験，3.2.2 実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的解析システムの開発
- 8) R.P. Dhakal, K. Maekawa, Modeling for postyield buckling of reinforcement, J. Struct. Eng. 128 (2002) 1139–1147, <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452002128:91139>.
- 9) Koichi Maekawa, Amorn Pimanmas, Hajime Okamura : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.3
- 10) Koichi Maekawa, Nobuhiro Chijiwa : Thermo-hygral case-study on full scale RC building under corrosive environment and seismic actions, Journal of Advanced Concrete Technology, volume13, 2015, pp. 465-478
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017，pp.39, 43
- 12) 山下拓三，磯部大吾郎，宮村倫司，大崎純：有限要素法による10階建て鉄筋コンクリート造建物と家内家具の地震応答解析，計算工学講演会論文集，Vol26，2021.5
- 13) 土木学会原子力土木委員会・地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 2021，pp.118-119，2021.10
- 14) 小松怜史，松尾豊史：コンクリートの圧縮破壊挙動に着目したRC部材の変形指標と限界値に関する検討，第76回年次学術講演会集，CS11-33
- 15) 土木学会原子力土木委員会・地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 2021，pp.149-152，2021.10
- 16) Torsak Lertrissakulrat, Ken Watanabe, Maki Matsuo and Junichiro Niwa : Experimental study on parameters in localization of concrete subjected to compression, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.669/V-50, pp.309-321, 2001.2
- 17) 土木学会原子力土木委員会・地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針＜技術資料＞Ⅷ，2021，pp.392-394，2021.10
- 18) 土木学会原子力土木委員会・地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針＜技術資料＞Ⅷ，2021，pp.298-302，2021.10
- 19) Satoshi Komatsu Yoshinori Miyagawa, Toyofumi Matsuo, Akihito Hata, Tsugushiro Shimabata and Hikaru Nakamura : Applicability of Deformation Indices Reasonably Evaluating Load Carrying Capacity and Failure Mode of Full-Scale RC Members Subjected to Bilateral Loads, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 21, pp.421-435, 2023.5