

## 鉄筋コンクリート造建物の損傷評価体系の構築とその応用

## Development of Damage Evaluation System for RC Buildings and Its Applications

○田嶋和樹<sup>1</sup>\*Kazuki Tajima<sup>1</sup>

Abstract: The goal of this study is to establish a seismic performance evaluation method of RC buildings. 1)Damage Evaluation, 2)Seismic performance evaluation of retrofitted building, 3)Restoration performance-based seismic Design and 4)Durability Evaluation are the four important subjects to carry out this study. Especially, Damage Evaluation is most important subject, and it belongs to the central core of this study. In this paper, an outline of numerical model which can simulate shear failure of RC column, some results of numerical analysis and test about influence of the damages of RC members on the seismic performance of RC building, and damage evaluation method on RC buildings group are explained. Furthermore, new damage evaluation system for RC buildings is proposed.

## 1. はじめに

19 世紀後半に鉄筋コンクリート（以下、RC）が発明されてから、間もなく 150 年が経過しようとしている。20 世紀初頭までの約 50 年間では、RC に関する基礎理論が確立され、それに基づく工法が開発されたことにより、RC 造建物がこの世に誕生するに至っている。その後の現在に至るまでの約 100 年間は、大局的には試行錯誤の時代であったと考えられる。特に、世界有数の地震国である我が国では、幾多の地震被害からの教訓に基づき、長い年月をかけて建物の耐震設計手法を発展させてきた。その結果、兵庫県南部地震（1995 年）の建物被害状況に基づき、1981 年に施行された新耐震設計法に対して一定の評価が示された。一方、旧基準で設計された建物に対する安全性の確認と耐震化の推進が新たな課題として表面化し、耐震診断・補強が全国的に進められていることは周知のとおりである。

現状を総括すると、取り組むべき課題はまだ残されているものの、RC 造建物に対する耐震設計法、耐震診断法ならびに耐震補強工法が確立され、地震に対する安全性を何らかの方法で確保可能な技術を獲得した状態であると考えられる。このような現状において、本研究では次なる目標として、RC 造建物に対する耐震性能評価手法の確立を目指している。具体的には、Fig.1 に示すような 4 つの課題を設定し、これらを総合した高度な耐震性能評価手法の構築を進めている。本報では、これらの課題に対する取り組みに関して、RC 造建物の損傷評価に関する研究に着目して現状の成果と今後の課題について報告する。

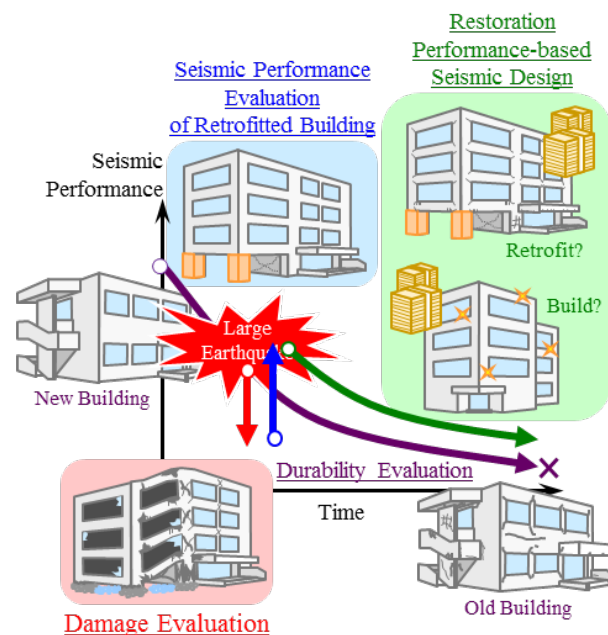


Figure 1 Subjects of This Study

## 2. 損傷評価の課題とそれに対する取り組み

## (1) 既往の損傷評価手法における諸問題

RC 造建物に対する損傷評価に関する研究の歴史は古く、Park ら<sup>[1]</sup>の手法に代表されるように、部材の塑性率やエネルギー吸収能力に基づいて建物全体の損傷状態を評価する。しかし、これらの手法に対しては、せん断破壊する部材ならびにそれを含む建物に対する検証 [課題①] や部材損傷（局所損傷）が建物全体の損傷（全体損傷）に及ぼす影響に対する検証 [課題②] が不十分であることが指摘されている。

1 : 日大理工・教員・建築

また、大地震時の被害想定を行う場合、RC 造建物群に対する損傷評価が必要となるが、国内における現行手法は極めて簡略的である。RC 造建物は「非木造」建物として鉄骨造等と同じカテゴリーとして扱われており、さらには過去の地震被害の統計に基づくため、地震動に対する考慮が不十分である。したがって、これらに対する検証と新たな提案[課題③]も必要である。

(2) せん断破壊を表現可能な数値解析モデルの開発  
 課題①に対して、RC 柱のせん断破壊を表現可能な数値解析モデルを開発し、せん断破壊した部材の挙動が骨組全体の応答に及ぼす影響を検討した。

本研究の数値解析モデルでは、Fig.2 に示すようにファイバーモデルをベースとして、せん断サブ要素および接合部サブ要素<sup>[2]</sup>を組み込むことにより柱の非弾性変形挙動をモデル化する。なお、解析には、数値解析コード OpenSees を用いている。

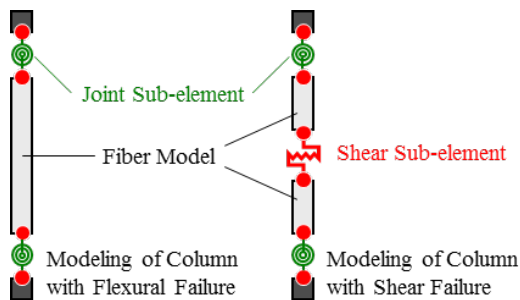


Figure 2 Numerical Model for RC Columns

本研究の数値解析モデルの特徴は、せん断サブ要素の特性を決定するための方法論にある。せん断サブ要素の特性は、最大耐力以降の軟化挙動も含めて、Fig.3 に示すようにせん断力(Q)–せん断変形( $\delta_s$ )関係をトリリニア型にモデル化して付与する。既往の研究においては、この Q– $\delta_s$  関係を実験から得られた知見から直接的に力と変形の関係として求めるのが一般的である。これに対し、本研究では、複雑なせん断破壊現象をモデル化するために、修正圧縮場理論<sup>[3]</sup>に基づいてせん断応力度( $\tau$ )–せん断ひずみ( $\gamma$ )関係を求めた後、せん断サブ要素がせん断挙動を表現する区間長さを乗じることにより求めている。なお、区間長さは、せん断破壊する柱 (S 柱) の場合、柱高さに等しく、曲げ降伏後にせん断破壊する柱 (FS 柱) の場合はヒンジ領域長さとして柱せいと等しい範囲を設定する。次に、最大強度点を示すせん断破壊点は、FS 柱の場合、せん断限界状態曲線<sup>[4]</sup>を利用して決定する。せん断限界状態曲線は、せん断力(Q)と水平変位( $\delta$ )の関係で定義され、

柱の応答値との交点によりせん断破壊点を与える。本手法では、これを Q– $\delta_s$  関係に変換する必要があるため、既往の柱の変形成分の計測記録<sup>[5]</sup>に基づいて  $\delta$  を  $\delta_s$  に変換する。一方、S 柱の場合は、水平変形が 1/250 に達した段階でせん断破壊すると設定し、同様に  $\delta$  を  $\delta_s$  に変換してせん断破壊点を求める。最後に、せん断破壊点到達後の軟化挙動を表現するために、柱の軸破壊点を軸限界状態曲線<sup>[4]</sup>から求め、軸破壊した段階で Q=0 となるような Q– $\delta_s$  関係の終点を仮定する。

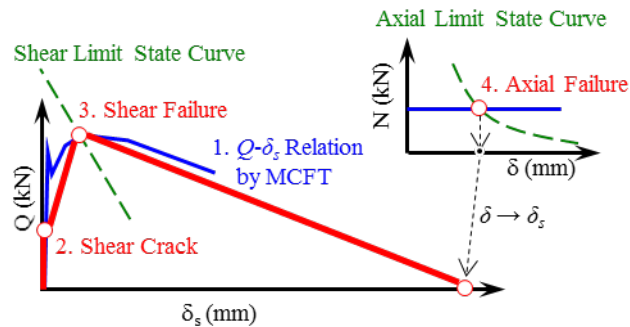


Figure 3 Q– $\delta_s$  Relation for Shear Sub Element

開発した数値解析モデルを用いた課題②に対する検証例として、Fig.4 に中央柱がせん断破壊 (S 柱および FS 柱) する 1 層 2 スパン骨組に対する地震応答解析結果を示す。なお、入力地震動は、El CentoroNS 波 ( $V_E 150\text{cm/sec}$  に基準化) である。層せん断力( $Q_{\text{story}}$ )–層間変形角(R)関係より、FS 柱を有する骨組に比べ、より脆性的な S 柱を有する骨組の方が応答変形が大きく、履歴面積も広いことが確認できる。これには 2 つの理由が考えられる。1 つは、S 柱が早期にせん断破壊して耐力・変形性能を喪失した後、骨組に残る 2 本の曲げ柱によって新たな抵抗機構が形成されたためである。もう 1 つは、S 柱の破壊によって骨組の固有周期が T=0.11sec から 0.31sec まで変化したことにより、骨組に対する入力エネルギーが増大したためである。このように、柱がせん断破壊した後の RC 造骨組の挙動は複雑であり、従来の耐震診断法では骨組の耐震性能を見誤る可能性も否定できない。

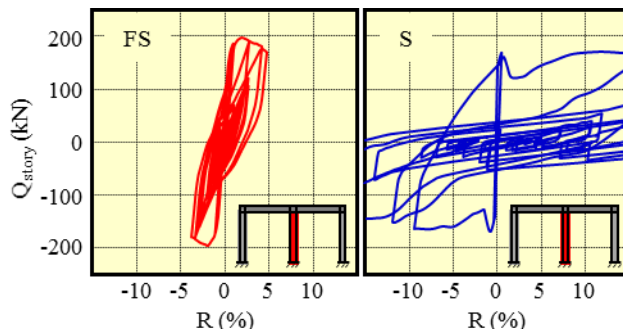


Figure 4 Different Resistance of Frames with Shear Column

(3) 局所損傷と全体損傷の関係

課題②に対して、前述の数値解析に基づく検証のほか、実験的に局所損傷と全体損傷の関係について検討した。はじめに、RC 造柱の破壊実験において、ひび割れを局所損傷として捉え、部材性能との対応を確認した。Fig.5 に S 柱のせん断ひび割れ幅と部材性能の関係を示す。せん断ひび割れ幅と柱の部材角との相関性が高いこともあり、剛性低下率や耐力低下率との相関性も高い。このようなひび割れ幅と部材性能の関係は、FS 柱においても確認できた。現行の被災度区分判定<sup>[6]</sup>においても、ひび割れ幅から部材損傷度を評価しているが、ひび割れ幅から部材の残余性能をより正確に把握できる可能性が高く、数値解析との連携について研究を進める必要がある。

続いて、RC 造十字型柱梁接合部の破壊実験を実施し、柱、梁および接合部パネルの損傷が接合部全体の性能に及ぼす影響を確認した。Fig.6 に柱梁接合部全体の損傷過程を示す。最終的には接合部パネルが顕著に破壊しているが、詳細な分析の結果、柱梁接合部全体に見られた耐力低下傾向は、梁端部の圧壊が原因であることが確認できた。このことは、部材損傷の累積和により建物全体の損傷を評価する現行手法の問題点を示しており、建物全体の性能に及ぼす有意な局所損傷を明確にすることが重要である。

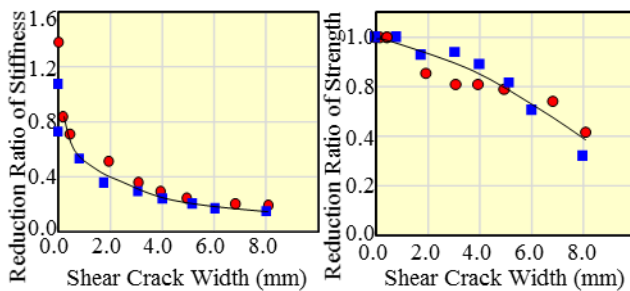


Figure 5 Shear Crack Width-Stiffness or Strength Relation

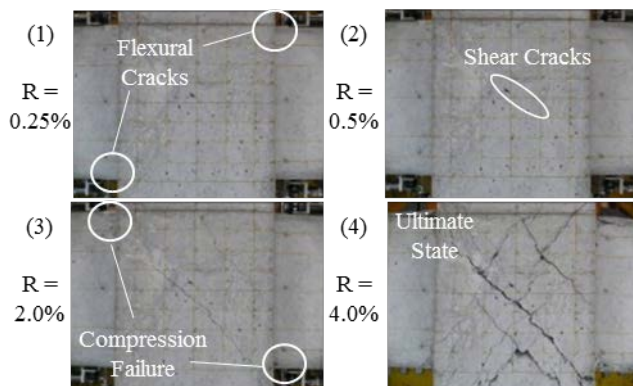


Figure 6 Failure Process of RC Beam-Column Joints

(4) 地震動の特性を考慮した建物群に対する損傷評価

課題③に対して、Bertero ら<sup>[7]</sup>によって提案された損傷スペクトルを活用した建物全体の損傷評価手法に着目した。Fig.7 に示すように、損傷スペクトルは建物の 1 次固有周期と建物全体の損傷指標 DI の関係をスペクトル表示したものであり、地震動の周期特性や地盤特性の影響が建物の損傷評価に反映される。したがって、任意の地点における観測波または想定される地震波に対して損傷スペクトルを作成すれば、建物の 1 次固有周期から当該地震動に対する建物の損傷程度を推定できる。

損傷スペクトルの妥当性ならびに国内基準で設計された建物への適用性を検証するため、防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動データから損傷スペクトルを作成し、観測点近傍の建物の被害状況を推定するとともに、実際の被害調査結果との比較検討を行った。その結果、設計用加速度応答スペクトルを国内基準に適合させ、さらに強度低減係数  $R$ 、建物の復元力特性、単調載荷時における終局塑性率  $\mu_{mon}$  に適切なパラメータを設定し、さらに強度上昇係数  $\Omega$  を考慮することで、損傷スペクトルにより実被害状況を推定できた。なお、Fig.8 に示すとおり、強度上昇係数とは設計上想定する降伏強度に対する実際の降伏強度の比として定義できる。

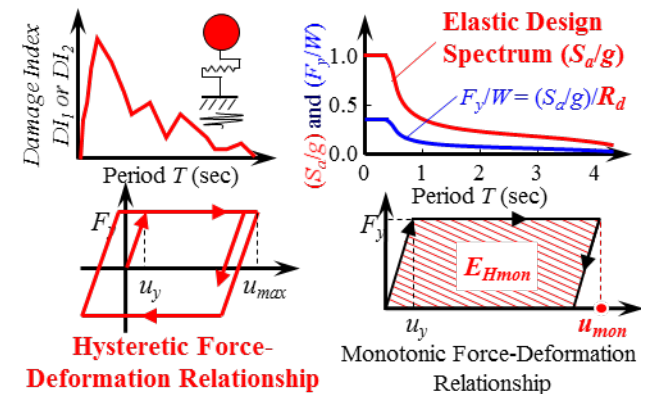


Figure 7 Damage Spectrum and Its Parameters

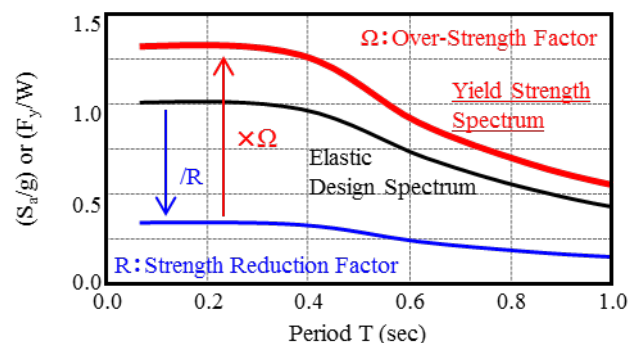


Figure 8 Over-Strength Factor



強度上昇係数の要因は、設計上の安全側の判断や材料の設計強度と実強度の差などが考えられる。また、現状では、記録波をそのまま建物への入力地震動として利用しているため、建物に対する地震動の実効入力の影響も含まれている。これらの諸要因について、今後検討を進めるとともに、本手法を被害想定に活用すべく、HAZUS<sup>[8]</sup>等の手法を参考にして確率論的手法の導入を進めている。

### 3. 損傷評価の体系化に向けて

損傷評価には、設計段階あるいは既存の建物に対する損傷予測と被災した建物に対する残余性能評価という2つの目的がある。また、その対象は建物群により構成される都市全体から個の建物に至るまで様々である。大地震に対する都市全体の継続的な安全性確保の実現に向けて、これらの損傷評価を統一的に実施する新たな損傷評価体系を提案する (Fig.9)。

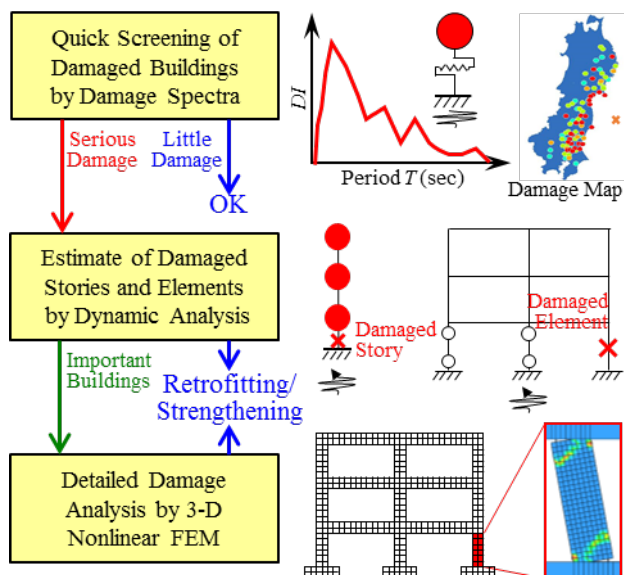


Figure 9 Proposed Damage Evaluation Procedure

提案する損傷評価体系の特徴は、積極的に数値解析を活用し、これまで簡略的に仮定されてきた局所損傷と全体損傷の関係を明確に考慮する点である。第1段階では、地域や建物分類（構造種別、高さ、年代等）毎に損傷スペクトルを作成し、地域レベルの安全性評価を実施する。大地震発生後には、即座に地震観測網からデータを取得して損傷スペクトルを作成することにより、被害が著しい地域と建物分類を迅速に特定する。第2段階では、第1段階の結果をもとに、危険度の高い地域の建物データベースから損傷が著しいと予想される建物を抽出し、骨組レベルの地震応答解析を実施して残存性能や崩壊形を確認する。第3段階では、

特に重要度の高い市庁舎や学校、病院など都市機能を維持するために必要な建物に対し、3次元FEM解析による詳細な損傷シミュレーションを実施するとともに、損傷原因を解明してより効果的な補強計画を立案する。現状においては、各段階における技術開発を進めており、これらの連携については今後の課題である。特に、本提案においては、各自治体との連携による建物データベースの整備が重要である。

### 4. まとめ

RC造建物の損傷評価体系の構築は、Fig.1に示した総合的な耐震性能評価手法の構築に向けた取り組みにおける1つの課題でしかない。しかし、全体的な取り組みの核として位置づけられる課題であり、その重要性は極めて高い。また、人々に対して大地震時のリスクを説明する有効な手段に成り得ると考えられる。今後、これらの研究を進展させ、大地震が発生しても人々が不幸にならない世の中の実現に貢献したい。

### 5. 参考文献

- [1] Park, Y. J., Ang, A.H. S. : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp722-739, 1985
- [2] Filippou F.C. : Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Subassemblages, UBC/EERC-92/8, 1992
- [3] Vecchio F. J., Collins M. P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, pp.219-231, 1986
- [4] Elwood K. J. and Moehle J. P. : Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, PEER-2003/01, 2003
- [5] K. Tajima, N. Shirai, E.Ozaki, K.Imai : FE Modeling and Fiber Modeling for RC Column failing in Shear after Flexural Yielding , Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of Euro-C 2010, pp. 737-748, 2010
- [6] 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
- [7] Bozorgnia, Y. and Bertero, V. V.: Damage Spectra: Characteristics and Applications to Seismic Risk Reduction, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.1330-1340, 2003
- [8] FEMA : HAZUS-MH MR5 Multi-hazard Loss Estimation Methodology Technical Manual, 2011