

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889013

研究課題名(和文)地震被害を受けた建物群の詳細な検討に基づく建築物の倒壊限界評価法の妥当性検証

研究課題名(英文) Verification of Collapse Assessment Method through Analysis for Structures Damaged due to Past Earthquakes

研究代表者

松川 和人 (MATSUKAWA, Kazuto)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：50709186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者が開発した倒壊限界評価法を用い、倒壊確率を部材損傷から求める手法を開発した。その後、実被害建築物の分析を行い、実際に倒壊した建築物の部材損傷と比較し、その妥当性を検証した。その結果、倒壊確率5%程度までの範囲であれば提案した手法は妥当であるとの結果が得られたが、倒壊確率が大きくなり、かつ部材損傷がより大きくなるとその妥当性は低下した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, a collapse assessment method was verified through analysis of building structures damaged in past earthquakes. The method was developed to calculate probability of collapse using structural damage. Through analysis of real damaged structures, the method was verified in specified ranges of less than 5% of collapse probability.

研究分野：耐震工学

キーワード：建築構造・材料 自然災害

### 1. 研究開始当初の背景

我が国において近い将来発生することが予想されている首都直下地震、東海・東南海・南海地震などの巨大地震は、東京・大阪・名古屋などの大都市に震源が比較的近いこともあり、甚大な被害を発生させることが予測される。特に、大都市部で建築物の倒壊が生じると、火災の延焼や交通網・インフラの寸断等、二次的な影響も含めその被害を大きく拡大させる可能性がある。したがって、適切な補強を行い被害を軽減させる必要があるが、そのためには建築物の倒壊可能性を評価することが重要である。

米国等においては、鉄筋コンクリート造建築物の Collapse Assessment が発達してきており、災害時の被害想定への応用など、倒壊現象への理解と研究並びにその応用が進んでいる。こうしたことを受けて、我が国においても巨大災害が危惧されていることもあり、人命・財産の保護の観点から、建築物の倒壊限界性能を評価する手法を開発する必要があった。

以上のような背景のもと、研究代表者は、実験的・解析的研究を通して、建築物の倒壊限界変形を評価する手法を提案してきた。研究代表者らが過去に提案した倒壊限界評価法は、概ね下記のようなものである。

- 1) 鉄筋コンクリート造部材を耐力低下域までモデル化し、それらを用いて骨組モデルを作成する。
- 2) 部材の耐力低下を考慮しうる解析プログラムを用いて静的増分解析を行い、一質点系に縮約して架構の耐力曲線を算定する。
- 3) 入力地震動として応答スペクトルを設定し、基準地震動と限界地震動の比率である保有耐震性能指標を各骨組解析ステップで算定する。
- 4) 算定された各解析ステップにおける保有耐震性能指標の値のうち、最大の値はその骨組が倒壊せずに耐えることができる最大の地震動倍率を意味するため、保有耐震性能指標最大値の時の応答変形を倒壊限界変形として採用する。

本手法は、従来 IDA (Incremental Dynamic Analysis) メソッドという動的解析をベースとした煩雑な手法を用いる以外に建築物の倒壊を評価する手法が存在しなかったが、それを応答スペクトルを用いた準静的解析に基づき算定可能とすることによりその簡便化を図ったものである。

しかしながら、その妥当性を担保するためには、実験室における実験的研究・コンピュータ上での解析的研究のみならず、実地震動により被害を受けた建築物への適用を通して、その妥当性を検証することが必須となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、実被害を受けた建築物に対し

て倒壊限界評価法を適用し、その妥当性検証を行うことを目的として設定した。尚、実被害を受けた建築物の倒壊限界を評価するにあたり、すべての建築物に対して精算（応答スペクトルに基づく倒壊限界評価法）を適用することが困難であったため、モデル建築物の解析を用いて部材損傷から倒壊限界を評価する手法を新たに開発する。加えて、第1章で提案した倒壊限界評価法を国際的に周知し利用されることを企図して、国際学会での発表を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実被害を受けた建築物のデータ収集

本研究では、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震時に大破以上の被害を受けた鉄筋コンクリート造学校建築物のデータを収集する。これらのデータには、建築物の規模・建設年・各部材の損傷度（～）が含まれている。

#### (2) 倒壊限界の簡易評価法

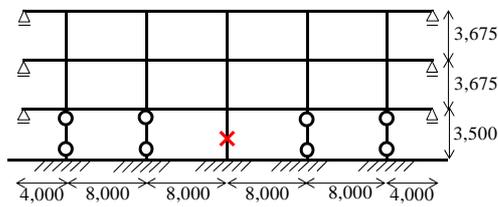
続いて、(1)でデータを収集した建築物に対して、それぞれの倒壊限界を簡易に評価する手法を開発する。具体的には、複数の一般的なモデル建築物に対して複数の地震波（応答スペクトル）に対する倒壊限界変形を算定し、その時の部材損傷を集計し倒壊確率分布を作成することにより、部材損傷から倒壊確率を推定することを可能にする。

モデル建築物は、図1に示すような、1層崩壊形を呈する無限均等ラーメンのうち4スパン分を切り取ったモデルである。このモデルに対し、図2に示した5種類の非線形復元力特性を、1層の5本の柱の曲げバネ、せん断バネへとさまざまな組み合わせで導入する。なお、詳細は割愛するが、図1に示した3層のモデル建築物のみならず、同種の検討を6層のモデル建築物に対しても行う。

これらの建築物モデルに対して、本研究にて開発する1次の振動モード形を逐次計算しそれと一致する変位を強制的に与える変位制御型の静的増分解析プログラムを用い、耐力低下域を含む層せん断力 - 層間変形角関係をj得る。

続いて、入力地震動（応答スペクトル）を設定して個々のモデルの、個々の地震波に対する倒壊限界を算定する。用いた地震波は、Elcentro波、Taft波、東北大1978波、八戸波、神戸波（いずれもNS、EW両方向）、告示波（第一種～第三種地盤）である。

続いて、個々のモデルのそれぞれの地震波に対する倒壊限界時の、部材損傷を集計する。その後、図3に示したように、損傷度以上の部材、すなわち耐力低下を生じた部材が、その層に占める割合を損傷指標と定義し、ある損傷指標のときに、何%の建築物が倒壊限界を超え倒壊しているかを表す確率分布を算定する。



3層4スパン(1層崩壊形)  
図1 対象とする骨組モデル

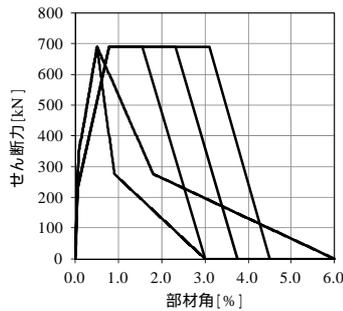


図2 反曲点中央仮定時の荷重 - 変形関係

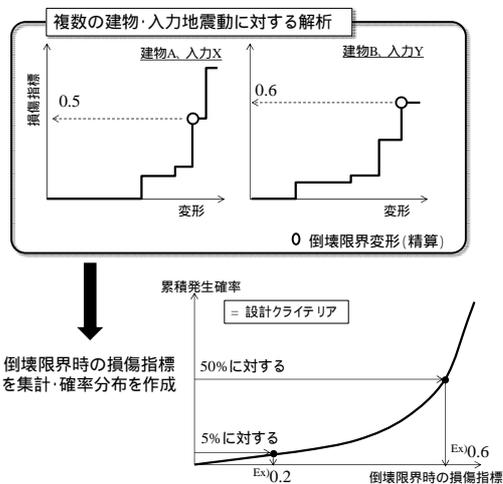


図3 倒壊確率と損傷指標

続いて、倒壊限界時の損傷指標と倒壊確率の関係から、倒壊確率5%（ここでは、倒壊防止の観点から倒壊確率が十分に低い場合を主対象とする。このため、仮の値として5%を設定した。）に対応する損傷指標を用いて、(3)にて実被害建築物に生じた損傷と倒壊/非倒壊の関係から、本項において算定された倒壊確率の妥当性を議論する。

(3) 倒壊限界時損傷指標の妥当性検証

実被害建築物に対して、被害調査時に収集された最大被害の階の損傷度を用いて、(2)でモデル建築物に行ったのと同様に、損傷指標を算定する。その後、(2)で算定したある損傷指標に対応する倒壊確率との比較を行い、その妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 実被害を受けた建築物のデータ収集

収集したデータは、図4にその割合を示し

たように、1971年以前の建築物が全体の7割を占める。加えて、本研究では大破以上の被害を受けた建築物を対象にしている関係で、耐震性能残存率60%以下の建築物が全体の90%以上を占めている。尚、損傷指標を算定する際の部材の重み付けは、被災度区分判定基準に準拠し、両側柱付壁：片側柱付壁：柱なし壁：せん断柱：曲げ柱 = 6:2:1:1:1とした。また、1995年兵庫県南部地震時に調査された建築物では、判定に旧指針が用いられているため、耐震壁等はすべて柱部材に読み替えられている。

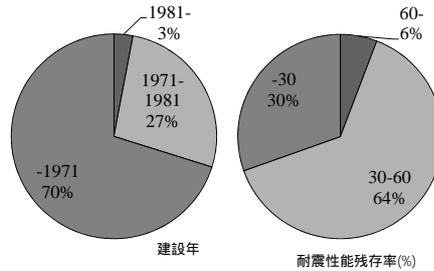


図4 収集した建築物データの諸元

(2) 倒壊限界の簡易評価法

骨組解析結果の一例として、あるモデル建築物の解析結果（静的解析によるせん断力係数 - 層間変形角関係）、精算による倒壊限界評価結果、損傷指標の評価結果を図5に示した。

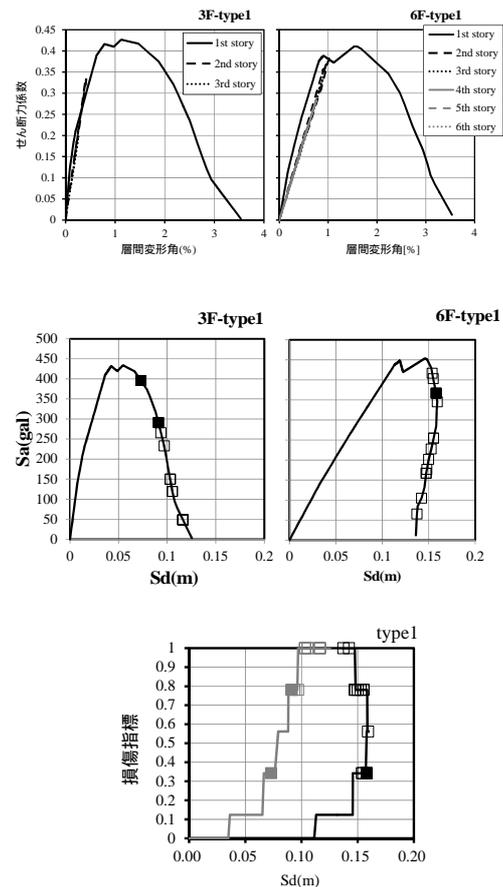


図5 建築物の解析結果の一例(図中の■及び□は、倒壊限界を意味する)

続いて、10 パターンの骨組に対する倒壊限界評価結果及び損傷指標評価結果を用いて、 $\beta$  分布により累積倒壊確率曲線を図 6 のように評価した。3 層モデル、6 層モデルの場合では、6 層モデルの方が小さい損傷指標で倒壊確率が高くなっていることが分かる。また、図 6 より、倒壊確率 5% に対応する損傷指標は、0.1-0.2 程度となっていることが分かる。建築物の倒壊確率の目標値を仮に 5% とするならば、入力地震動のレベルに対して建築物の損傷指標を 0.2 以下に抑える必要がある。

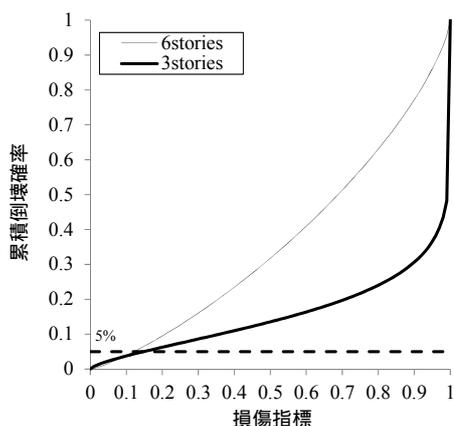


図 6 骨組解析結果を用いた倒壊確率曲線

### (3) 倒壊限界評価法の妥当性検証

続いて、収集した実被害建築物の損傷指標を算定し、図 7 に示した。図 7 の×は倒壊、▲は大破（倒壊を免れた）を意味する。図 7 より、(2)の骨組解析を用いた倒壊確率 5% に対応する損傷指標 0.2 以下では、倒壊した建築物は（倒壊建物全 21 棟のうち）1 棟も存在しない。実被害建築物では、損傷指標 0.3 程度から倒壊した建築物が現れはじめる。

以上より、倒壊確率 5% に対応する損傷指標は、概ね損傷指標 0.2 を目安と考えれば、倒壊防止の観点からは概ね妥当であり、安全側の判断を与えようと考えられる。続いて、図 8 に、実地震により倒壊した建築物の損傷指標を用いて算定した累積倒壊確率と、図 6 の 3 層、6 層建築物を合算し実観測地震動に対する結果のみを抜粋した倒壊確率曲線を示した。図 8 より、実被害建築物から算定した累積倒壊確率は、損傷指標・倒壊確率が小さいレベルではモデル建築物の解析結果と調和的であるが、一方で、損傷指標 0.3 を超えると両者の間の乖離が大きくなっていることが分かる。

この原因としては、解析モデルの精度や等価線形化による解析精度のほか、下記のような点が考えられ、今後の検討を要する。

- 1) 実被害建築物の側において、倒壊した建築物は兵庫県南部地震時に調査された建築物のみであり、入力地震動側にバイアスが存在しうること。
- 2) 実被害建築物の倒壊 / 非倒壊の判断には、調査者の工学的判断に依る部分が大き

く、その判断が、モデル建築物の解析に用いた倒壊限界評価と必ずしも対応しないこと。具体的には、モデル建築物の解析において、復元力が最大時の 1/3 程度となっても第 1 章で示した評価手法では倒壊とは判断されない場合がある。しかしながら、実際の被災現場では、見た目の状況・印象などからこうした建物は倒壊と判断される可能性がある。

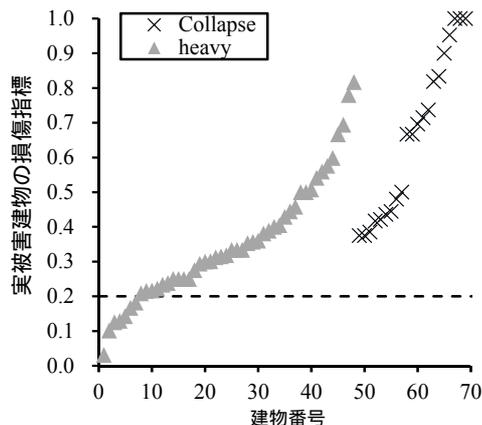


図 7 実被害建築物の損傷指標

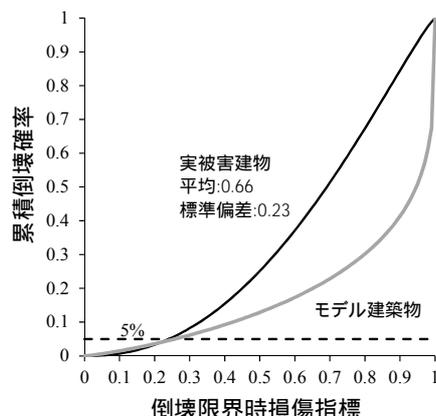


図 8 モデル建築物の解析による倒壊確率と実被害建築物の分析から算定した倒壊確率

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

Kazuto Matsukawa : Practical Collapse Assessment for Reinforced Concrete Structures Based on Seismic Response Spectrum, Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, DOI: 10.4231/D31R6N151, Anchorage(U.S.A), 2014.7.23

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松川 和人 (MATSUKAWA, Kazuto)  
 東京大学・生産技術研究所・助教  
 研究者番号: 50709186