

建物の簡易動的耐震評価方法の検証解析

Verification Analysis of Earthquake Resistance Diagnosis for Buildings Using Capacity Spectrum Method

永田 茂 池田 芳樹¹⁾ 日下 彰宏²⁾
鳥澤 一晃 中嶋 洋介³⁾

要 約

筆者らは、震災BCPの策定支援などを目的として、建物基本情報から構造耐力を推定し、1自由度系にモデル化した建物の限界耐力計算によって建築構造、非構造部材、建築設備の被害予測を行う簡易動的耐震評価方法を提案してきたが、被害予測精度に関する検証などの課題が残されていた。近年、東日本大震災に関する各種報告書の発刊や建物の地震観測記録の公開によって、施設情報・地震観測記録・被害情報などをセットで利用できる環境が整ってきたことから、約28棟の建物を対象として簡易動的耐震評価方法による被害予測精度の検証を行った。この結果、簡易動的耐震評価方法は応答をやや大きめに評価する場合があるものの、被害判定ではほぼ妥当な結果が得られており、複数の既往建物の耐震性調査や地震対策の計画段階などにおけるスクリーニング評価としては有効な方法となることが確認できた。

目 次

- I. はじめに
- II. 被害予測精度検証用データの収集・整理
- III. 被害予測精度の検証解析
- IV. おわりに

I. はじめに

震災BCPの策定支援では、建築構造、非構造部材、建築設備などの被害を把握することは重要であり、被害予測に関する多くの研究開発が行われている。特に、既存建物の地震被害予測を目的として、応答解析方法¹⁾、応答解析結果に基づく被害判定方法²⁾などに加え、構造の耐力評価などに関する検討³⁾も行われている。

上記のような背景を踏まえ、筆者らは低層から高層の整形な建物で利用可能な情報が建物基本情報に限定される場合を想定して、限界耐力法による地震応答解析、応答解析結果に基づく被害判定を行うための簡易動的耐震評価方法を検討してきたが、被害予測精度や適用限界に関する検討が課題となっていた。

一方で、近年、自然災害関連学会による東日本大震災合同調査報告書や日本建築学会の各種報告書が発刊されるとともに、地震観測記録が公開されるなど^{4)~8)}、建物基本情報、地震観測記録、被害情報をセットで利用して、上記の簡易評価方法の精度検証や適用限界を検討する環境が整ってきた。

本報告では、利用可能な情報が建物基本情報に限定される場合を想定して、構造の耐力評価から、1自由度系にモデル化した建物の限界耐力法による応答解析、応答解析結果に基づく被害判定までを行う簡易動的耐震評価方法の概要を示すとともに、東日本大震災で得られた地震観測記録などを用いて提案手法の被害予測精度などを検討した。具体的には、日本建築学会・東北支部・災害調査連絡会による「東北地方で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集(2013年6月)」⁹⁾をもとに、検討対象の28棟を決定し、建物構造諸元、地震観測記録、被害情報を整理し、建築構造・非構造部材・建築設備に関する検証用データを作成した。次に、28棟に関して限界耐力法による応答計算、応答計算結果と観測記録に基づく応答値との比較、応答計算結果に基づく建築構造・非構造部材・建築設備の被害予測と被害状況記述の比較検討を行うことにより被害予測精度の検証と提案方法の課題の抽出を行った。

II. 被害予測精度検証用データの収集・整理

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、建物に甚大な被害を及ぼしたが、当時は一般建物の振動計測が普及しておらず、建物(特に上部構造物)の振動記録はほとんど得られなかった。その後、情報技術の発展に裏付けられて建物の振動計測は推進され、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、建物上部の振動記録が以前に比較すれば多数得られた。公開されている記録は、市

1) 京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University
2) ㈱小堀鐸二研究所 KOBORI RESEARCH COMPLEX Inc.
3) ㈱イー・アール・エス Engineering & Risk Services Corp.

キーワード: 地震被害予測, 動的耐震診断, 限界耐力法, 構造, 非構造部材, 建築設備

Keywords: earthquake damage estimation, earthquake resistance diagnosis for buildings using dynamic response analysis, capacity spectrum method, building structure, nonstructural elements, building utilities

庁舎といった公共建物にほぼ限られているが、国立研究開発法人建築研究所のホームページで本震の加速度波形が公開される⁴⁾とともに、それらの建物の記録を分析した報告書も刊行されている⁵⁾。この地震による主要な被害は津波によるものであり、海洋型の地震であるため震源が遠く、振動記録は激震には相当しないが、建物の耐震性を記録から評価するための貴重な資料になっている。

東北地方太平洋沖地震の建物被害状況は、学協会を通じて報告されている。日本建築学会から刊行されている「2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報」は、建物被害の概略を理解する有用な資料である⁶⁾。また、同学会の東北支部は「2011年東日本大震災災害調査報告」で東北地方の建物被害をより詳細に報告しており⁷⁾、さらにほぼ同時に建物と地盤の強震データ集を公開している⁸⁾。

本章では、これらの資料に基づいて建物の構造諸元、地震観測記録、被害情報を整理し、後述する建物地震被害の簡易評価法の検証用データを作成した。整理した建物数は28棟である。簡易評価法が免震建物を対象としていないことから、データ公開建物のうち免震建物は除外した。建物上下部の加速度記録が公開されている建物に関しては、システム同定⁹⁾を実施して、1次固有周期や減衰定数など基本的動特性の公表値に関する確認を行った。

Table 1には、被害予測精度検証用データの収集・整理の対象となった28棟の建物の基本情報、地震観測記録から求めた建物頂部の最大応答加速度、最大応答変位、層間変形角等の一覧表を示した。なお、以下では鉄筋コンクリート構造をRC造、鉄骨鉄筋コンクリート構造をSRC造、鉄骨構造をS造と記述した。

Table 2には、構造部材、非構造部材、建築設備の被害状況を整理して示した。なお、被害情報が得られなかった建物は「被害情報不

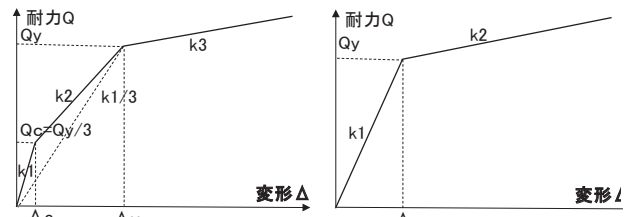
明」と記載し、そのうち観測記録による層間変形角が約1/1000以下で構造部材は被害なしと考えられるものはその旨を記載した。

III. 被害予測精度の検証解析

1. 検証解析方法

検証解析対象の28棟の建物を1自由度系にモデル化し、限界耐力法によって最大加速度応答、最大変位応答、層間変形角の計算を行った。応答解析結果と観測記録による応答値、応答解析及び観測記録から判定した被害状況と実際の被害状況を比較検討することによって、簡易評価方法の検証を行った。

以下には、1次固有周期や限界耐力計算で使用する構造種別の荷重-変形関係 (Fig.1) の各種指標など応答特性の設定方法を示した。



(a) RC, SRC造の場合 (b) S造の場合

Fig.1 限界耐力計算で用いる建物の代表荷重-変形関係 (Load-Deformation Characteristics of Buildings Used in Capacity Spectrum Method)

Table 1 被害予測精度検証用の建物 (28棟) の基本データ、観測記録を用いた建物応答 (Basic Information on 28 Buildings Subject to Verification Analysis)

| (1) 建物 No. | (2) 建物名 | (3) 構造種別 | (4) 主用途 | (5) 竣工年 (改修年) | (6) 基準階平面 (m) | | (8) 階数 N | (9) 重量 m (t) | (10) 計算高さ h(m) [(8) × 3.5m] | (11) 耐力係数 Cs | (12) 耐力 Qy (kN) | (13) 1次固有周期 T1 (s) | (14) 観測記録から求めた1次固有周期(s) | | (16) 減衰定数η | (17) 観測記録による頂部最大加速度 (cm/s ²) | | (19) 観測記録による頂部最大変位 (cm) | | (21) 観測記録による層間変形角 (rad) | |
|------------|---------------|----------|---------|---------------|---------------|-------|----------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------|--------------------|-------------------------|------|------------|--|-------|-------------------------|-------|-------------------------|--------|
| | | | | | 短辺 | 長辺 | | | | | | | 短辺 | 長辺 | | 短辺 | 長辺 | 短辺 | 長辺 | 短辺 | 長辺 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | いわき市庁舎 | SRC | 事務所 | 1973 | 30.0 | 58.5 | 8 | 16,848 | 28 | 0.28 | 46,231 | 0.56 | 0.88 | 0.60 | 5% | 578 | 449 | 10.67 | 4.11 | 1/295 | 1/766 |
| 2 | 三郷市庁舎 | SRC | 事務所 | 1983 | 42.0 | 57.0 | 7 | 20,110 | 24.5 | 0.48 | 94,596 | 0.49 | 0.44 | 0.54 | 5% | 190 | 219 | 0.84 | 1.62 | 1/2500 | 1/1296 |
| 3 | 仙台第二合同庁舎 | S | 事務所 | 1973 | 22.5 | 22.5 | 15 | 6,075 | 52.5 | 0.26 | 15,479 | 1.58 | 2.00 | 2.00 | 2% | 360.9 | 346.4 | 29.57 | 27.24 | 1/189 | 1/206 |
| 4 | 仙台高専専攻科棟 | RC | 校舎・研究 | 1999 | 14.8 | 19.5 | 4 | 1,385 | 14 | 0.52 | 12,354 | 0.28 | 0.25 | 0.33 | 5% | 652 | 717.2 | 1.28 | 1.96 | 1/820 | 1/536 |
| 5 | 八千代市庁舎新館 | RC | 事務所 | 1980 | 22.0 | 41.5 | 6 | 6,574 | 21 | 0.28 | 18,038 | 0.42 | 0.58 | 0.42 | 5% | 486 | 359 | 3.28 | 1.72 | 1/747 | 1/1424 |
| 6 | 八戸市庁舎本館 | RC | 事務所 | 1981 | 42.0 | 60.0 | 6 | 18,144 | 21 | 0.28 | 49,787 | 0.42 | 0.41 | 0.43 | 5% | 348 | 335 | 1.3 | 1.65 | 1/1615 | 1/1273 |
| 7 | 北区赤羽会館 | SRC | 事務所 | 1961 | 40.0 | 55.0 | 7 | 18,480 | 24.5 | 0.28 | 50,709 | 0.49 | 0.46 | 0.30 | 5% | 250 | 180 | 0.98 | 0.67 | 1/2143 | 1/3134 |
| 8 | 千葉第二地方合同庁舎 | SRC | 事務所 | 不明 | 23.0 | 73.0 | 8 | 16,118 | 28 | 0.47 | 74,241 | 0.56 | 0.70 | 0.60 | 5% | 375 | 283 | 4.12 | 1.85 | 1/680 | 1/1514 |
| 9 | 国土交通大学校 | RC | 事務所 | 不明 | 20.0 | 95.0 | 3 | 6,840 | 10.5 | 0.53 | 62,172 | 0.21 | 0.26 | 0.13 | 5% | 329 | 129 | 0.54 | 0.09 | 1/1296 | 1/7778 |
| 10 | 宮古市庁舎 | RC | 事務所 | 1971 | 24.5 | 46.0 | 7 | 9,467 | 24.5 | 0.29 | 26,905 | 0.49 | 0.59 | 0.45 | 5% | 197 | 246 | 1.48 | 1.26 | 1/1419 | 1/1667 |
| 11 | 川崎南労働基準監督署 | S | 事務所 | 不明 | 11.0 | 15.0 | 7 | 924 | 24.5 | 0.41 | 3,713 | 0.74 | 1.00 | 0.90 | 2% | 366 | 304 | 7.89 | 5.88 | 1/266 | 1/357 |
| 12 | 市川市行徳図書館 | RC | 図書館 | 1989 | 23.0 | 34.0 | 5 | 4,692 | 17.5 | 0.5 | 22,991 | 0.35 | 0.39 | 0.43 | 5% | 240 | 300 | 3.3 | 1.47 | 1/424 | 1/952 |
| 13 | 建築研究所(本館) | SRC | 事務所 | 1979 | 27.0 | 64.8 | 7 | 14,697 | 24.5 | 0.28 | 40,328 | 0.49 | 0.67 | 0.91 | 5% | 682 | 585 | 10.3 | 3.75 | 1/272 | 1/747 |
| 14 | 建築研究所(新館) | SRC | 事務所 | 1998 | 21.0 | 26.0 | 8 | 5,242 | 28 | 0.47 | 24,143 | 0.56 | 1.00 | 1.00 | 5% | 539.5 | 688.5 | 10.23 | 12.52 | 1/274 | 1/224 |
| 15 | 戸田市庁舎 | SRC | 事務所 | 1970(2014) | 33.0 | 100.0 | 8 | 31,680 | 28 | 0.28 | 86,930 | 0.56 | 0.65 | 0.65 | 5% | 425 | 531 | 5.57 | 5.1 | 1/503 | 1/549 |
| 16 | 教員研修センター | RC | 宿泊施設 | 2002 | 9.6 | 54.7 | 8 | 5,041 | 28 | 0.46 | 22,726 | 0.56 | 0.25 | 0.50 | 5% | 593 | 798 | 記録なし | 記録なし | 記録なし | 記録なし |
| 17 | 日本工大建築デザイン学群棟 | RC | 校舎・研究 | 1980 | 27.0 | 75.0 | 6 | 14,580 | 21 | 0.28 | 40,008 | 0.42 | 0.40 | 0.45 | 5% | 322 | 283 | 記録なし | 記録なし | 記録なし | 記録なし |
| 18 | 東京法務局中野出張所 | RC | 事務所 | 不明 | 22.5 | 47.5 | 5 | 6,413 | 17.5 | 0.5 | 31,421 | 0.35 | 0.40 | 0.20 | 5% | 375.4 | 172 | 0.93 | 0.32 | 1/1882 | 1/5469 |
| 19 | 東京海洋大学交流会館 | SRC | 宿泊 | 1973 | 18.0 | 50.0 | 7 | 7,560 | 24.5 | 0.28 | 20,745 | 0.49 | 0.36 | 0.27 | 5% | 316 | 223 | 1.18 | 0.37 | 1/1780 | 1/5676 |
| 20 | 東北大学人間・環境系研究棟 | SRC | 校舎・研究 | 1969(2001) | 17.2 | 40.0 | 9 | 7,430 | 31.5 | 0.45 | 32,768 | 0.63 | 1.25 | 1.25 | 5% | 908.2 | 728.4 | 31.94 | 18.4 | 1/88 | 1/152 |
| 21 | 東北工大1号館 | S | 校舎・研究 | 2004 | 20.0 | 65.0 | 4 | 4,160 | 14 | 0.47 | 33,532 | 0.42 | 0.57 | 0.43 | 2% | 1192 | 783 | 8.83 | 3.69 | 1/285 | 1/119 |
| 22 | 東北工大3号館 | RC | 校舎・研究 | 1980(2009) | 19.1 | 33.4 | 6 | 4,593 | 21 | 0.49 | 22,056 | 0.42 | 0.50 | 0.60 | 5% | 1419 | 846 | 記録なし | 記録なし | 記録なし | 記録なし |
| 23 | 東工大学部11号館 | SRC | 校舎・研究 | 1968(2006) | 13.0 | 50.0 | 9 | 7,020 | 31.5 | 0.45 | 30,958 | 0.63 | 0.60 | 0.50 | 5% | 212 | 181 | 記録なし | 記録なし | 記録なし | 記録なし |
| 24 | 江戸川区庁舎 | SRC | 事務所 | 1962 | 20.0 | 80.0 | 5 | 9,600 | 17.5 | 0.52 | 48,922 | 0.35 | 0.22 | 0.27 | 5% | 256 | 299 | 0.48 | 0.64 | 1/2917 | 1/2188 |
| 25 | 杜鹿総合支所 | RC | 事務所 | 1975 | 16.8 | 42.0 | 3 | 2,540 | 10.5 | 0.28 | 12,198 | 0.21 | 0.30 | 0.30 | 5% | 1056 | 852.9 | 1.33 | 2.25 | 1/526 | 1/311 |
| 26 | 船橋市総合教育センター | RC | 事務所 | 1987 | 24.0 | 45.0 | 8 | 10,368 | 28 | 0.46 | 46,739 | 0.56 | 0.50 | 0.50 | 5% | 359 | 339 | 2.44 | 2.07 | 1/1004 | 1/1184 |
| 27 | 足立地方合同庁舎 | RC | 事務所 | 1993 | 29.0 | 37.0 | 5 | 6,438 | 17.5 | 0.5 | 31,546 | 0.35 | 0.35 | 0.29 | 5% | 266 | 146 | 0.9 | 0.32 | 1/1167 | 1/3281 |
| 28 | 鹿島東北支店 | RC | 事務所 | 1971 | 22.5 | 26.8 | 9 | 6,512 | 31.5 | 0.3 | 19,146 | 0.63 | 0.50 | 0.83 | 5% | 501 | 492 | 3.78 | 12.68 | 1/833 | 1/248 |

Table 2 被害予測精度検証用の建物 (28 棟) の被害状況
(Damage Status of 28 Buildings Subject to Verification Analysis)

| (1) 建物ID | (2) 建物名 | (23) 被害調査報告書における被害の記述 |
|-------------|---------------|--|
| 1 | いわき市庁舎 | 構造体: RC壁の亀裂・剥離, その他: 仕上げ材の剥離・損傷(階不明), エキスパンジョイント部の損傷 |
| 2 | 三郷市庁舎 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 3 | 仙台第二合同庁舎 | 外壁: ガラスの破損, 天井: 天井材の落下, その他: EVシャフト耐火材の落下, 事務室内書架の転倒(写真あり, 階不明) |
| 4 | 仙台高専専攻棟 | 構造体: 構造被害なし, 外壁: 外壁タイルの浮き, その他: 内壁の大理石が一部剥落(2階廊下), 書架転倒, PC本体とモニターの机からの落下(3~4階) |
| 5 | 八千代市庁舎新館 | 被害情報不明 |
| 6 | 八戸市庁舎本館 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 7 | 北区赤羽会館 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 8 | 千葉第二地方合同庁舎 | 被害情報不明 |
| 9 | 国土交通大学校 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 10 | 宮古市庁舎 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 11 | 川崎南労働基準監督署 | 被害情報不明 |
| 12 | 市川市行徳図書館 | 被害情報不明 |
| 13 | 建築研究所(本館) | 構造体: 一部柱の損傷(階不明), 外壁: 階段室周りの壁の亀裂, RC非構造壁に亀裂(階不明), 天井: 天井の落下(渡り廊下) その他: エキスパンジョイント部の損傷(渡り廊下) |
| 14 | 建築研究所(新館) | 天井: 天井の落下(渡り廊下), その他: 仕上げ材の亀裂・剥離(新館, 階不明), エキスパンジョイント部の損傷(渡り廊下) |
| 15 | 戸田市庁舎 | 被害情報不明 |
| 16 | 教員研修センター | 被害情報不明 |
| 17 | 日本工大建築デザイン学群棟 | 被害情報不明 |
| 18 | 東京法務局中野出張所 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 19 | 東京海洋大学交流会館 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 20 | 東北大学人間・環境系研究棟 | 構造体: セットバックした3階の4隅のすべての外柱が大破, 東西の妻壁(連層耐震壁)の曲げによる変動軸力により柱脚部が大破し, 鉄筋が抜け出し座屈, 主筋の破断と座屈 |
| 21 | 東北工大1号館 | 構造体: 梁端部・フレス・トラス柱・梁降伏(4階), 天井: 教室天井の落下(3階), 空調設備: 屋上階空調屋外機のアンカーボルトの破損, 冷却水配管変形(5階), 電気設備: ケーブルラックの支柱転倒 |
| 22 | 東北工大3号館 | 構造体: 構造体に肉眼で見えるひび割れあり(1~6階), その他: 垂壁の一部にひび割れ |
| 23 | 東大工学部11号館 | 被害情報不明 |
| 24 | 江戸川区庁舎 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 25 | 社展総合支所 | 被害情報不明 |
| 26 | 船橋市総合教育センター | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 27 | 足立地方合同庁舎 | 構造体: 層間変形角(観測記録)から被害なしと考えられる |
| 28 | 鹿島東北支店 | 階段室周りの壁の亀裂 |

(1) 1次固有周期及び減衰定数の設定

建物の1次固有周期 $T(s)$ は, 建物高さ $H(m)$ を入力とする国土交通省告示の式 (1) ¹⁰⁾ で求められる。

$$T = \begin{cases} H \cdot 0.02 & (RC \cdot SRC造) \\ H \cdot 0.03 & (S造) \end{cases} \dots \dots \dots (1)$$

$$H = 3.5 \cdot N \dots \dots \dots (2)$$

ここで, N は建物階数である。

上記の計算式で求めた1次固有周期と観測記録から求めた1次固有周期 (一部は建物基本情報に記載された1次固有周期を使用) の関係を整理した。この結果は, Fig.2 に示すとおりであり, 観測記録による1次固有周期が建物高さから求めた1次固有周期に比べ20%ほど大きな値を示すことが明らかになった。このため, 検証解析では, 式(1)~式(2)の建物高さから求めた1次固有周期を1.2倍した値を用いることとした。

減衰定数 h は, RC造とSRC造が5%, S造が2%とした。

(2) 弾性剛性の設定

弾性剛性 $k_I(kN/m)$ は, 1次固有周期 $T(s)$ と建物重量 $m(t)$, 全体剛性 $k(kN/m)$ について解いた式 (3) ~ 式 (5) によって設定した。

$$k_1 = m \cdot (2\pi/T)^2 \dots \dots \dots (3)$$

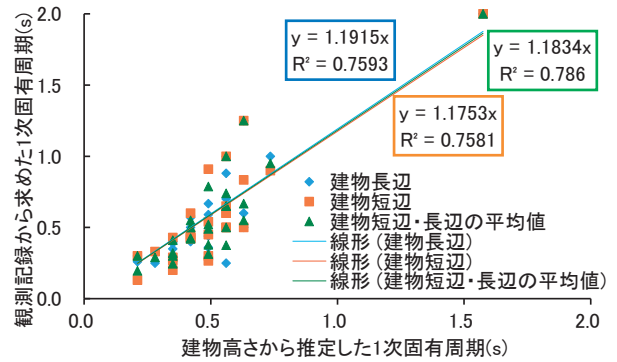


Fig.2 観測記録及び建物高さから求めた1次固有周期の比較
(Comparison of Primary Natural Period by Observation Record and Primary Natural Period Calculated from Building Height)

$$m = m_0 \cdot L_x \cdot L_y \cdot N \dots \dots \dots (4)$$

$$T = \begin{cases} H \cdot 0.02 \cdot 1.2 & (RC \cdot SRC造) \\ H \cdot 0.03 \cdot 1.2 & (S造) \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

ここで, m_0 は建物の単位面積重量 (t/m^2), L_x は建物の長辺長さ (m), L_y は建物の短辺長さ (m) である。また, 1次固有周期 T の計算式 (5) の係数 1.2 は, 上述したように, 建物高さ H から求めた1次固有周期 (一部は建物基本情報に記載された1次固有周期) と観測記録から求めた1次固有周期の差異を解消するために導入した経験的補正係数である。

(3) 降伏耐力 (第2折れ点) の設定

降伏耐力 $Q_y(kN)$ は, 式 (6) によって設定した。

$$Q_y = m \cdot C_B \cdot 9.8 \dots \dots \dots (6)$$

ここで, C_B は耐力係数である。

耐力係数の簡易評価方法に関しては, これまでも様々な検討が行われているが, 本報告では, 利用可能な情報が建物基本情報である場合を想定して, 下記に詳述するように, 建物階数ごとの新耐震建物及び旧耐震建物の耐力係数 C_B の設定方法を示した。なお, 上記の耐力係数 C_B を用いて建物応答解析を試行したところ, 4階以下の低層のRC建物で最大応答加速度が小さく, 最大応答変位が大きな値を示し, 耐力係数が過小評価となっていることが確認できたため, 既往の研究成果 ¹¹⁾ を基に低層RC建物の耐力係数に関しては, 下記 (a), (b) の値をさらに1.75倍して使用することとした。

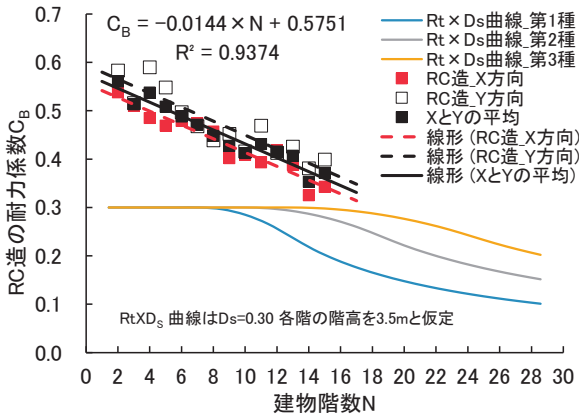
(a) 新耐震基準以降の耐力係数評価式

新耐震以降の耐力係数 C_B は, 当社関連会社が保有する建物構造特性データベースより, 構造設計の過程で算出する保有水平耐力を用いて設定を行った。具体的には, 建物構造特性データベースより, 構造種別 (RC造・SRC造・S造) と階数及び計算方向別で建物データを抽出し, 1階の保有水平耐力を地震力算定用の1階建物重量で除した値を C_B と仮定して, C_B の平均値を算出した。最終的に, 構造種別ごとに階と C_B の関係式を提案した。

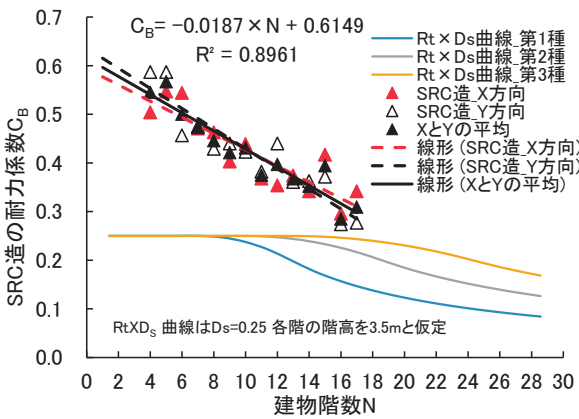
Fig.3 に新耐震建物の構造種別ごと、階数ごとの耐力係数 C_B の関係図を示し、式(7)に評価式を示した。Fig.3には、新耐震基準の地盤種別ごとに規定される振動特性係数(Rt 曲線)に構造特性係数 D_s (RC造は0.3, SRC及びS造は0.25を仮定)を乗じた曲線を示した。建物構造特性データベースより構築した耐力係数の平均値は、おおむね $Rt \times D_s$ 曲線の第3種地盤の頭打ち部分を外挿した特徴

を示していることが分かる。

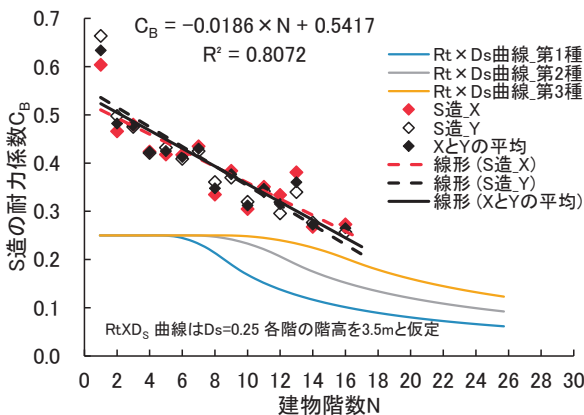
$$C_B = \begin{cases} -0.0144 \cdot N + 0.5751 & (RC造) \\ -0.0187 \cdot N + 0.6149 & (SRC造) \dots \dots \dots (7) \\ -0.0186 \cdot N + 0.5417 & (S造) \end{cases}$$



(a) RC造



(b) SRC造



(c) S造

Fig.3 新耐震建物の建物階数 N と耐力係数 C_B の関係
(Relationships between the Number of Building Floors N and Load Capacity Coefficient C_B for the Buildings Designed to Meet the New Earthquake-Proof Standard)

(b) 旧耐震設計基準 (1971年以前の建物は除く)の耐力係数評価式
旧耐震設計基準では、震度階を用いた許容応力度設計が行われていた。一般的に20mまでは、各階震度0.2に各階の重量を乗じた地震力を設計用地震力とし、20m以上になると階数が1階増えるごとあるいは4m増えるごとに震度0.01を加えた震度に各階の重量を乗じた地震力としていた。そのため、1階に換算した地震力係数は建物階数により異なることとなる。今回の検討では、各階重量は均等であると仮定して、式(8)で建物階数 N に応じた1階の換算地震力係数 C_0 を求め、結果をTable 3 ((2)カラム)に示した。

$$C_0 = \begin{cases} 0.2 & (N \leq 5) \\ 0.2 \times 5 + \sum_{n=6}^N (0.2 + 0.01 \cdot (n-5)) / N & (N \geq 6) \end{cases} \dots \dots (8)$$

Table 3 旧耐震建物の建物階数 N と耐力係数 C_B の関係
(Relationship between the Number of Building Floors and Load Capacity Coefficient for the Buildings Designed to Meet the Old Earthquake-Proof Standard Before the Year 1981)

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
|-----|---|---------------------|---------------------------------|--------------------|
| 階数 | 1階部における地震力係数 | 旧耐震建物の平均耐力係数 | | |
| | | RC造 ((2) × 1.41) | SRC造 ((3) × 0.6 + (5) × 0.4) | S造 ((2) × 1.26) |
| 1 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| 2 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| 3 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| 4 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| 5 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| 6 | 0.20 | 0.28 | 0.27 | 0.26 |
| 7 | 0.20 | 0.29 | 0.28 | 0.26 |
| 8 | 0.21 | 0.29 | 0.28 | 0.26 |
| 9 | 0.21 | 0.30 | 0.29 | 0.27 |
| 10 | 0.22 | 評価* | 0.29 | 認定* |
| 11 | 0.22 | | 0.30 | |
| 12 | 0.22 | | 0.30 | |
| 13 | 0.23 | | 0.31 | |
| 14 | 0.23 | 0.31 | | |
| 15 | 評価対象外 | 不可 | 認定* | 認定* |
| 16 | | | | |
| 17 | | | | |
| 18 | | | | |
| 19 | | | | |
| 20 | | | | |
| 備考 | *)評価認定用ベースシャ係数の平均値を使用(建設省建築研究所:総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告書 新耐震設計法(案),建築研究報告書, No.79, 1977.) | | | |

次に、構造種別ごとに許容応力度設計式と終局耐力式による耐力比の概算値を算出し、震度階による1階地震力係数に乘じた結果を耐力係数と設定した。なお、許容応力度設計式と終局耐力式による耐力比を求める際には、梁崩壊形の損傷が先行し、梁のせん断破壊は発生しないこと、鉄骨に関しては部材の終局耐力前に横座屈・局部座屈(幅厚比)・接合部破断が発生しないことなどを仮定し、RC

造に関しては約 1.4, S 造に関しては約 1.3, SRC 造に関しては RC と S の加重平均値である約 1.35 の耐力比を設定した。上記の検討から、構造種別及び建物階数別の一般建物の耐力係数 C_B を Table 3 (カラム(3)に RC 造, カラム(4)に SRC 造, カラム(5)に S 造) に示した。また、旧耐震建物のうち評価及び認定建物に関しては、旧建設省の調査結果¹²⁾を引用して、構造種別及び建物階数別に設計時に採用されている耐力係数の平均値を Table 4 に示した。

Table 4 評価認定建物の耐力係数の平均値¹²⁾
(Average Value of Load Capacity Coefficient of Certified Buildings by MLIT)

| 構造種別 | 階数種別 | | 15階以下 | | 16~25階 | | 26~35階 | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-----|
| | 弾性 | 弾塑性 | 弾性 | 弾塑性 | 弾性 | 弾塑性 | 弾性 | 弾塑性 |
| 鉄骨造純ラーメン | 0.129 | 0.261 | 0.090 | 0.216 | — | — | — | — |
| 鉄骨造+耐震壁/ブレース | 0.109 | 0.245 | 0.106 | 0.180 | 0.108 | 0.203 | — | — |
| 鉄骨鉄筋コンクリート造 | 0.112 | 0.236 | — | — | — | — | — | — |
| 鉄骨鉄筋コンクリート造+耐震壁/ブレース | 0.151 | 0.290 | 0.086 | 0.204 | — | — | — | — |

建設省建築研究所:総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告 新耐震設計法(案), 建築研究報告, NO.79, 1977. を引用して作成

上記に示すように、建物階数を指標とする新耐震建物及び旧耐震建物の耐力係数 C_B の設定方法に従って算出した 28 棟の対象建物の耐力係数 C_B を Table 1 (カラム(11)) に示した。

(4) RC 造のひび割れ耐力 (第 1 折れ点) の設定

RC 造のひび割れ耐力 Q_c (kN)は、式 (9) によって設定した。

$$Q_c = Q_y/3 \quad (RC \cdot SRC \text{造}) \dots \dots \dots (9)$$

(5) RC 造の第 2 剛性・第 3 剛性の設定

第 2 剛性 k_2 (kN/m), 第 3 剛性 k_3 (kN/m)は、以下の式 (10), 式 (11) を用いて設定した。

$$k_2 = \begin{cases} 0.222 \cdot k_1 & (RC \cdot SRC \text{造}) \\ 0.01 \cdot k_1 & (S \text{造}) \end{cases} \dots \dots \dots (10)$$

$$k_3 = 0.01 \cdot k_1 \quad (RC \cdot SRC \text{造}) \dots \dots \dots (11)$$

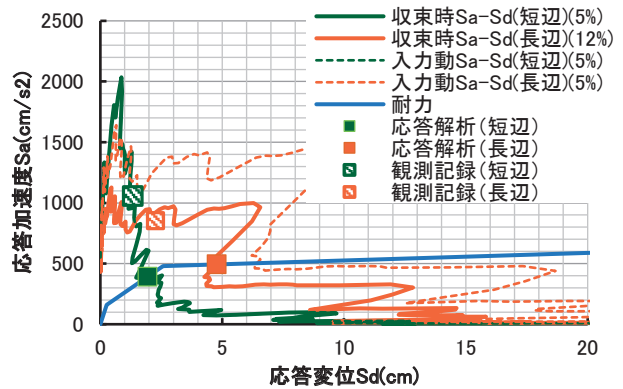
2. 応答解析の検証結果

1 自由度系に仮定した 28 棟の建物の入力値を上記の方法によって設定し、限界耐力法による応答解析を行った。具体的には、各建物の荷重-変位関係と観測された入力地震動の応答変位 S_d ~応答加速度 S_a の関係から、繰り返し計算によって両者が交わる点の最大応答加速度と最大応答変位を求めた。この限界耐力法による応答解析と観測記録から求めた最大応答変位及び最大応答加速度の比較検討を行った。Fig.4 には、RC 造, SRC 造及び S 造について応答値の大きな建物を事例として抽出して、設定した荷重-変位関係, 観測された入力地震動の S_d ~ S_a 曲線, 繰り返し計算収束時の等価減衰における S_d ~ S_a 曲線, 応答解析結果及び観測値を示した。

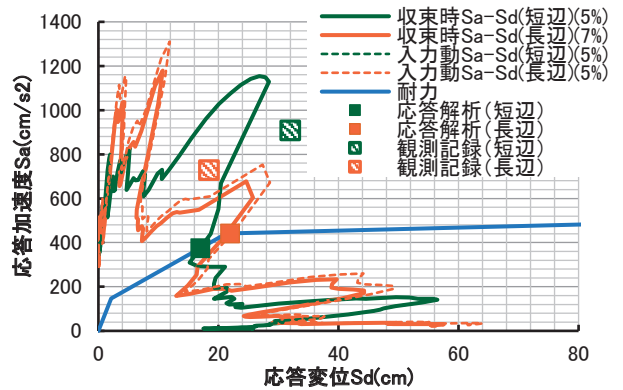
Fig.5 には検証対象の 28 棟の応答解析及び観測記録から求めた建物頂部の応答加速度, 応答変位, 層間変形角について、長辺と短辺の最大値の比較結果を示した。

Fig.4 及び Fig.5 から 28 棟の建物を対象にした検証解析結果を考

察すると以下ようになる。

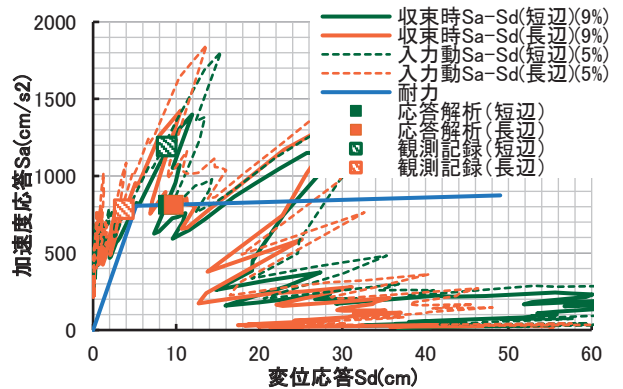


(a) 建物 No. 25 (RC 造) (牡鹿総合支所)



(b) 建物 No. 20 (SRC 造)

(東北大学 人間・環境系研究棟)



(c) 建物 No. 21 (S 造) (東北工業大学 1 号館)

Fig.4 限界耐力法の応答解析結果と観測記録の比較

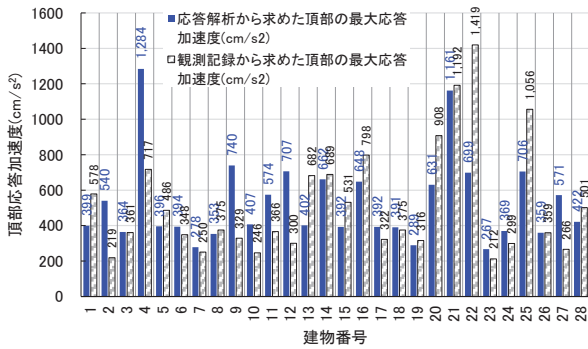
(Comparisons of Structural Response between Response Analysis Results of Capacity Spectrum Method and Observed Records)

a. 最大応答加速度に関しては、観測記録が 800cm/s^2 以下では応答解析結果がやや大きく、 800cm/s^2 以上では観測記録が大きな値を示す傾向が見られた。また、最大応答変位、層間変形角に関しては、一般的に応答解析結果が大きな値となる傾向となった。

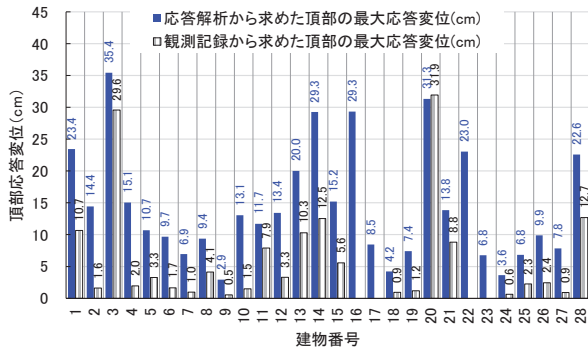
b. RC 造及び SRC 造の (応答解析結果/観測記録) の全建物平均値を調べたところ、最大応答加速度は約 1.2 倍、最大応答変位は約 4.7 倍、層間変形角は約 3.0 倍となり、応答解析結果が大きな

応答値を示すことが確認された。建物数は少ないが、S造の各平均値は、約1.2倍、約1.4倍、約1.2倍となり、応答解析結果と観測記録がほぼ一致することが確認できた。

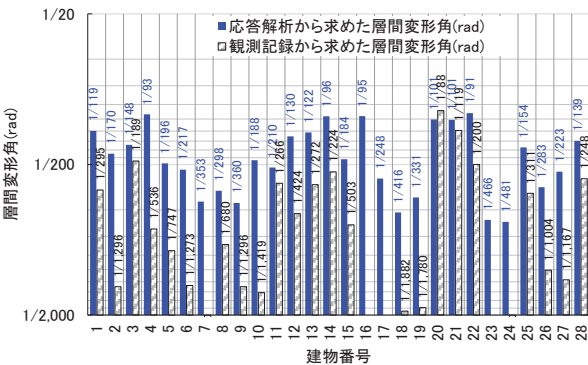
c. 多くの建物で、観測記録から求めた耐力が設定した耐力を超えている。耐力係数 C_0 をさらに大きく見込むと応答解析結果を観測記録に合わせる可以考虑。また、対象建物を線形構造と仮定して弾性応答解析を行ったところ、トリリニアやバイリニアの荷重-変位関係を仮定した今回の解析結果に比べて、応答変位に関しては観測記録から求めた応答との対応関係が大幅に改善されることが確認できた。今後、耐力係数設定方法とともに第一折れ点のひび割れ耐力についても再考する必要があると考える。



(a) 建物頂部の最大応答加速度 (長辺と短辺の最大値)



(b) 建物頂部の最大応答変位 (長辺と短辺の最大値)



(c) 層間変形角 (長辺と短辺の最大値)

Fig.5 応答解析による予測値と観測値の比較

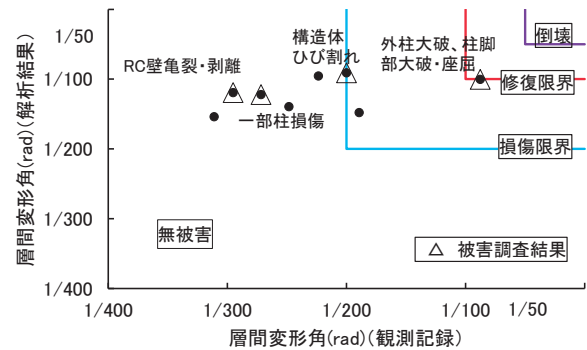
(Comparisons of Structural Response between Response Analysis Results of Capacity Spectrum Method and Observed Records)

3. 被害判定の検証結果

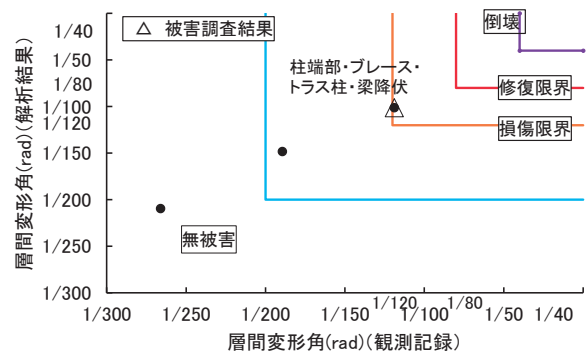
建築構造・非構造部材・建築設備の被害判定精度の検証を行うため、まず、II. で整理した実際の被害状況と、観測記録から得られた最大加速度及び層間変形角に基づく被害予測結果、III. 2. の応答解析で得られた最大応答加速度及び層間変形角に基づく被害予測結果の三者を比較した。なお、最大応答加速度及び層間変形角を用いた被害判定基準としては、被害判定基準に関する既往の調査検討結果を用いた^{13), 14)}。

これら三者の比較結果のうち、建物構造に関して実際の被害状況、観測記録に基づく層間変形角による被害判定、応答解析による層間変形角による被害判定の比較結果を Fig.6 に示した。同様に、非構造部材の被害判定の比較結果を Fig.7、建築設備の被害判定の比較結果を Fig.8 に示した。なお、これらの図では、応答解析及び観測記録で被害が発生すると予測された建物、実際に被害が発生した建物を中心に比較したため、応答解析及び観測記録に基づく被害判定結果が無被害の一部の建物に関しては表示を省略している。

まず、Fig.6 に示した構造被害の判定結果を見た場合、RC造、SRC造に関しては、前述のように応答解析に基づく層間変形角は観測記録から求めた層間変形角に対して大きな値を示す傾向が見られるが、一部の建物に関しては応答解析に基づく被害判定結果が実態と整合しており、簡易方法として妥当な精度を有していることが確認できた。S造の建物に関しては、応答解析及び観測記録に基づく



(a) RC・SRC造



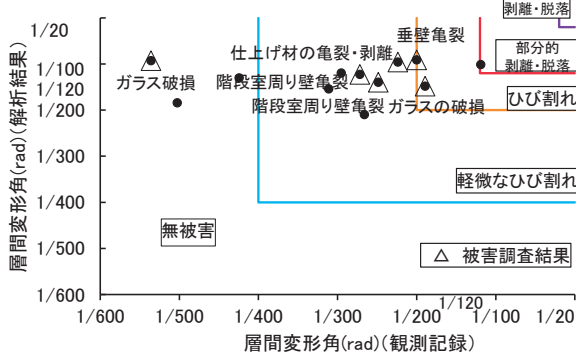
(b) S造

Fig.6 建物構造の被害判定結果の比較

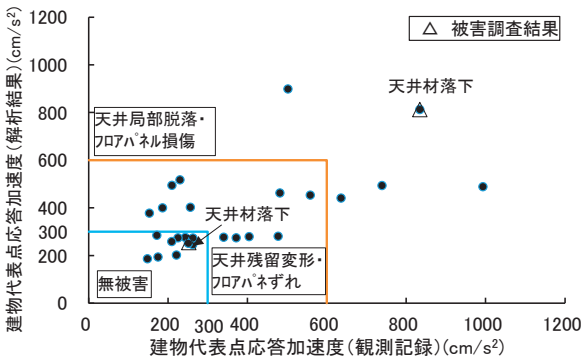
(Comparisons of Structural Damage Evaluation Results between Response Analysis, Observed Records and Visual Inspection)

被害判定結果と被害実態が一致する傾向が見られ、これに関しても、ほぼ妥当な精度を有していることが確認できた。

Fig.7 に示した非構造部材の被害判定結果を見た場合、層間変形角を指標とする外壁・サッシなどに関しては、一部の建物で応答解析に基づく層間変形角が観測記録から求めた層間変形角より大きな値となることから、被害判定結果も一段階大きな被害を示している。また、最大応答加速度を指標とする天井・床パネルについては、応



(a) 外壁・サッシなど



(b) 天井・床パネルなど

Fig.7 非構造部材の被害判定結果の比較

(Comparisons of Damage Evaluation of Non Structural Members Results between Response Analysis, Observed Records and Visual Inspection)

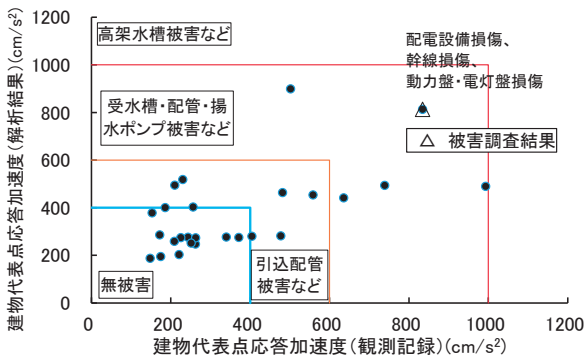


Fig.8 建築設備の被害判定結果の比較

(Comparison of Damage Evaluation of Building Equipment Results between Response Analysis, Observed Records and Visual Inspection)

答解析と観測記録の値がほぼ整合していることから被害判定結果もほぼ整合する結果となった。なお、一部の建物では、応答解析と観測記録の最大応答加速度が小さいにもかかわらず、被害実況として天井材が落下している事例があり、詳細を確認する必要がある。

Fig.8 に示した建築設備の被害判定結果を見た場合、被害実況を確認できる建物が少ないため、今後さらに検証を進める必要があるが、応答解析及び観測記録の最大応答加速度が大きく被害発生が予測される建物では、被害実況も整合する結果となった。

IV. おわりに

東日本大震災合同調査報告書、日本建築学会の各種報告書が発刊されるなど、地震動情報、施設の情報、被害情報がセットで利用可能な基礎データが増えてきたことから、本研究では、利用可能な情報が建物基本情報に限定される場合を想定し、対象建物を1自由度系にモデル化し、限界耐力法によって求めた最大応答加速度、最大応答変位などから建物構造、非構造部材、建築設備の被害予測を行う簡易方法の被害予測精度の検証を行った。得られた結果を整理すると以下ようになる。

(1) 建築構造・非構造部材・建築設備の被害予測精度検証用データの収集・整理

「東北地方で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集」(日本建築学会・東北支部・災害調査連絡会, 2013年6月), 「2011年東日本大震災災害調査報告」(日本建築学会東北支部, 2013年5月)をもとに、建築構造・非構造部材、建築設備に関する検証データとして28棟の建物構造諸元、地震観測記録、被害情報を整理し、検証用データを作成した。

(2) 建築構造・非構造部材・建築設備の被害予測精度検証解析の実施

上記(1)で取りまとめた建築構造、非構造部材、建築設備に関するデータを対象として、構造の耐力評価から、1自由度系にモデル化された建物の限界耐力法による応答解析、応答解析結果に基づく被害判定までを行う簡易的な動的耐震評価方法の被害予測精度の検証解析を行った。簡易的な動的耐震評価方法は、利用可能な情報が建物基本情報に限定される場合も想定しているため、現有の建物構造特性データベースなどを用いて構造種別・建物階数と構造設計過程で算出される保有水平耐力(耐力係数)の関係を新たに提案した。設計過程で算出される耐力係数を使用していることなどから、応答解析結果は観測記録から求めた応答値よりも大きめの値を推定する結果となった。一方、建物応答と被害の関係を表す閾値が一定の幅を有していることから、応答解析に基づく被害評価に関しては、建物調査の結果とほぼ一致することが確認された。

建物全体を詳細な構造要素でモデル化する動的耐震診断方法と比較して、検討に要する時間やコストが低く抑えられるため、特に既存建造物の各種地震対策を検討する際の初期段階の検討ツールなどとして活用することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 例えば奈良岡浩二, 渡辺泰志, 神原浩, 田中鉄也, 奥村俊彦, 黒瀬行信; 超高層建物を対象とした地震被害予測手法の開発(その1)(その2)地震被害予測手法の概要, 日本建築学会大

- 会学術講演梗概集（近畿），B-2分冊，2014，pp.193-196.
- 2) 例えば日本建築防災協会；2015年改訂版 再使用の可能性を判定し，復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016.
 - 3) 例えば文部科学省研究開発局；文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅢ 1. 震災総合シミュレーションシステムの開発 総括報告書，防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー 震災総合シミュレーション開発グループ，2007.
 - 4) 建築研究所の強震観測；2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（M=9.0, h=24 km），
<http://smo.kenken.go.jp/ja/smreport/201103111446/>.
 - 5) 鹿嶋俊英，小山信，大川出；平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録，建築研究資料，建築研究所，No.135，2012.
 - 6) 日本建築学会；2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，日本建築学会，2011.
 - 7) 日本建築学会東北支部；2011年東日本大震災災害調査報告，日本建築学会東北支部，2013.
 - 8) 日本建築学会東北支部・災害調査連絡委員会；東北地方で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の建物・地盤系強震データ集，日本建築学会東北支部，2013.
 - 9) 例えば池田芳樹，久田嘉章；限られた階の地震観測記録を利用した建物全階の応答推定，日本地震工学会論文集，第13巻，第4号，2013，pp.38-54.
 - 10) 国土交通省；建設省告示 昭和55年11月27日 建設省告示第1793号 「Zの数值，Rt及びAiを算出する方法並びに地盤が著しく軟弱な区域として特定行政庁が指定する基準を定める件」，1980.
 - 11) 鈴木芳隆，小鹿紀英，岡野創；低層RC構造物の強度-被災度関係から推定される耐力余裕度について，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），B-2分冊，2007，pp.307-308.
 - 12) 建設省建築研究所；総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告 新耐震設計法（案），建築研究報告，No.79，1977.
 - 13) 例えば日本建築学会；鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針・同解説，2004.
 - 14) 例えば日本建築学会；□構造部材の耐震設計施□指針・同解説および耐震設計施□要領，2003.

Verification Analysis of Earthquake Resistance Diagnosis for Buildings Using Capacity Spectrum Method

Shigeru Nagata, Yoshiki Ikeda¹⁾, Akihiro Kusaka²⁾, Kazuaki Torisawa and Yosuke Nakajima³⁾

In order to support earthquake disaster BCP, the authors proposed a simple dynamic earthquake resistance evaluation method using basic information of the building, which consists of a method of estimating the load capacity coefficient and a method of predicting the damage to the building structure from the capacity spectrum method for the one-degree-of-freedom building model. However, problems such as verification of the damage prediction accuracy of a simple dynamic seismic evaluation method remained unsolved.

In recent years, environments for verification analysis that include, for example, facility information, earthquake observation records, and damage information have been prepared by publishing various building damage reports and earthquake observation records for buildings affected by the 2011 Great East Japan Earthquake. For this reason, the accuracy of damage prediction by a simple dynamic earthquake resistance evaluation method was verified using public information on 28 buildings. Although the simple dynamic earthquake resistance evaluation method sometimes gives a slightly higher response value, the resultant damage assessment was for the most part reasonable. It was therefore confirmed that this method is effective as a screening evaluation method in seismic resistance surveys of multiple existing buildings and at the planning stage for earthquake countermeasures.