

震災総合シミュレーションシステムの開発 ー建物被害推定手法の精度検証ー

山口直也¹・末富岩雄²・後藤洋三³・岩崎智哉⁴・水越熏⁴・岡野創⁵・山崎文雄⁶

¹独立行政法人 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター 川崎ラボラトリー 研究員
(〒210-0006 神奈川県川崎市川崎区砂子2-6-2川崎三恵ビル10F)

E-mail:yamaguchi@kedm.bosai.go.jp

²独立行政法人防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター 川崎ラボラトリー 副チームリーダー
(〒210-0006 神奈川県川崎市川崎区砂子2-6-2川崎三恵ビル10F)

³独立行政法人防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター 川崎ラボラトリー 所長
(〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-2)

⁴株式会社イー・アール・エス (〒107-0052 東京都港区赤坂3-11-15)

⁵鹿島建設株式会社小堀研究室 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

⁶国立大学法人千葉大学工学部教授 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

震災総合シミュレーションシステムは、大地震が起こったとき迅速に被災地域の被害推定等を行い、災害対策本部が立ち上げられた際に意志決定のための情報を提供することを目的の一つとしている。そのシステムで用いる建物被害推定手法として、限界耐力設計法を用いて個々の建物ごとに地震被害を評価する手法を構築した。この手法では加速度応答スペクトルを用いるので、地震動および建物の周期特性を考慮した応答推定を短時間で行うことができる。また、兵庫県南部地震における建物被害調査結果等の実地震データを用いて、建物の耐震力を決定する限界変形角と降伏ベースシア係数の検証を行うなどして、本手法の推定精度の検証を行っている。

Key Words : *integrated earthquake disaster simulation system, building damage estimation, capacity spectrum method, the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake*

1. はじめに

地震被害推定システムは、大地震が起こった際に迅速に被害状況や影響の程度を推定して、人命の救助活動や対応行動などの計画を立てるのに利用したりする¹⁾もので、1995年兵庫県南部地震以降、多くの自治体で導入されてきている。その中にあって川崎ラボラトリーでは、文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクトに参加し、急速に発展しつつあるITを活用した次世代型地震防災情報システム「震災総合シミュレーションシステム」の開発を行っている²⁾。兵庫県南部地震は早朝、平成16年新潟県中越地震は土曜日の夕方、地震だったこともあるが、大地震直後には被災状況が自治体や政府になかなか伝わらない情報の空白期が生じてしまうので、このシステムではその空白期に対応行動の意志決定のための情報を提供することを目的の一つとしている。

建物被害を推定する方法には、PGA、PGV、計測

震度などの地震動インデックスを用いた被害関数によるものや、地震波形と建物モデルを用いた時刻歴解析によるものなどがある³⁾。一般に地震被害推定システムにおける建物被害推定手法は、過去の地震での建物被害データから構築された被害関数を用いたものである。現状では地震発生直後は地震動情報しか得られないので、その情報から被災地域の建物被害を被害率で推計できるこの手法は有用であるが、統計量のみでは具体的な災害対応行動につながらない。また、被害関数の構築に用いている地震の特性や地域ごとの建物特性の影響が含まれるので、推定結果に含まれる誤差は大きくなりやすい。開発中のシステムでは、安全な避難路選定や、建物強度向上による地域危険度の低減効果を検討する、等の事前対策にも活用できるものを目指しているので、建物一棟ごとに損傷度を精度よく推定する手法が望まれる。

そこで本研究では、限界耐力設計法⁴⁾を用いることで、短時間で被害推定を行うという要件を満たし

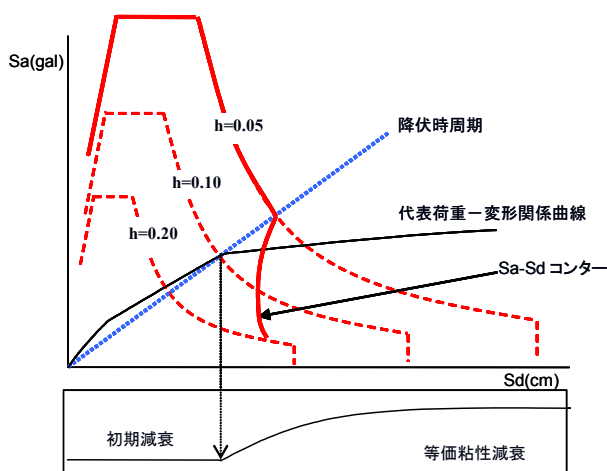


図-1 Sa-Sdコンター

つつ個々の建物ごとに被害を推定する手法を構築した。また、兵庫県南部地震後に行われた建物被害調査データを用いて、限界変形角と降伏ベースシア係数を同定した。そして新潟県中越地震の際に得られた地震動記録を用いて試算を行い、本手法の精度の検証と課題の抽出を行った。

2. 個別の建物を対象とした建物被害推定手法

本研究では、建物の地震被害を推定する手法として、地震被害推定システムで一般的に使用されている被害関数を用いた手法ではなく、耐震設計法の一つである、限界耐力設計法⁴⁾をベースとした手法を構築している。限界耐力設計法⁴⁾は、2000年に旧建設省によって規定された設計法⁴⁾で、ATC-40⁵⁾の考え方に基づいたものである。この方法における建物の耐震性能評価は、建物の構造特性を表す耐力曲線と、想定する地震動に対して建物の等価粘性減衰を考慮した応答スペクトルを重ね合わせることによって、建物の最大応答を推定する手順である。言い換えると、この手法での損傷度推定は、図-1に示すように、Sa-Sdコンターと代表荷重-変形関係曲線の交点を求めることで行う。ここでSa-Sdコンターとは、図-1に示すように横軸に変位応答スペクトルSd、縦軸に加速度応答スペクトルSaをとり、複数の減衰定数に対する応答スペクトル表示を行い、これらの複数スペクトルを利用して等価周期、等価粘性減衰に対する応答スペクトルのコンターを求めたものである。また代表荷重-変形関係曲線とは、建物を1質点系に縮約したあとの復元力特性を表す曲線である。

本研究でこの方法を採用した理由は、以下の通りである。

- ①地震動情報として5%減衰の加速度応答スペクトルのみを用意するだけでよく、時刻歴応答解析を行うよりも計算が容易である。

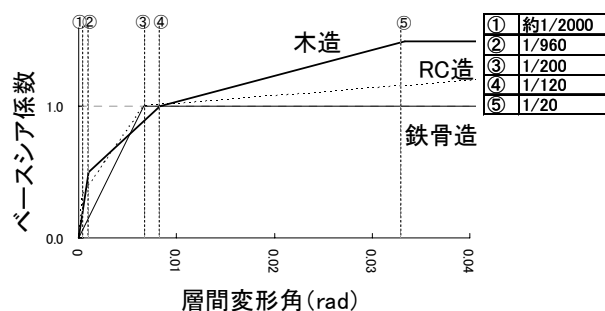


図-2 構造種別ごとの復元力特性

- ②計算にスペクトルを用いるので、地震動および建物の周期特性を考慮した応答解析を行うことができる。

- ③構造種別の違いを反映させるための基本的な枠組みができています。

本研究では建物の構造種別として、木造、RC造、鉄骨造建物を対象としている。それらの構造に対する耐力曲線（復元力特性）として、木造はポリニアモデルを、RC造はトリニアモデルを、鉄骨造はバイリニアモデルを使用している（図-2）。復元力特性は折点の変形角を固定し、各構造の年代ごとに降伏ベースシア係数を変化させて設定している。これらの値の設定は、実験などを基にした既往の研究⁶⁾⁻⁸⁾より行っている。

被害判定であるが、より詳細な被害程度の想定を行うために、大破・中破・小破あるいは全壊・半壊・一部損壊などの分類は用いないこととした。木造、RC造については岡田ら⁹⁾の提案を、同様に、鉄骨造については桑原ら¹⁰⁾の提案を参考とし、被害程度（ダメージグレード）に対応する変形角を設定して判定を行う。

この手法全体の考え方は、HAZUS99¹¹⁾での建物の地震被害推定手法と類似している。

3. 地震被害データを用いた降伏ベースシア係数の同定

(1) 同定手法の概要

構築した手法は、建物の耐震性能として降伏ベースシア係数と代表変形角-被害程度関係を用いている。これらの値を、耐震基準等から想定することも可能であるが、個々の建物についての実際の値は不明であり、ばらつきもあるため、推定精度を向上させ結果を実被害状況に近づけるためには、実被害データに基づくパラメータ同定を行う必要があると判断し、兵庫県南部地震時に実施された西宮市の建物被害調査結果¹²⁾を用いてパラメータ同定を行った。ただし、被害調査結果は、全壊・半壊・一部損壊に区分されているため、ここでは、無被害をダメージグレード0、一部損壊をダメージグレード1・2、半壊

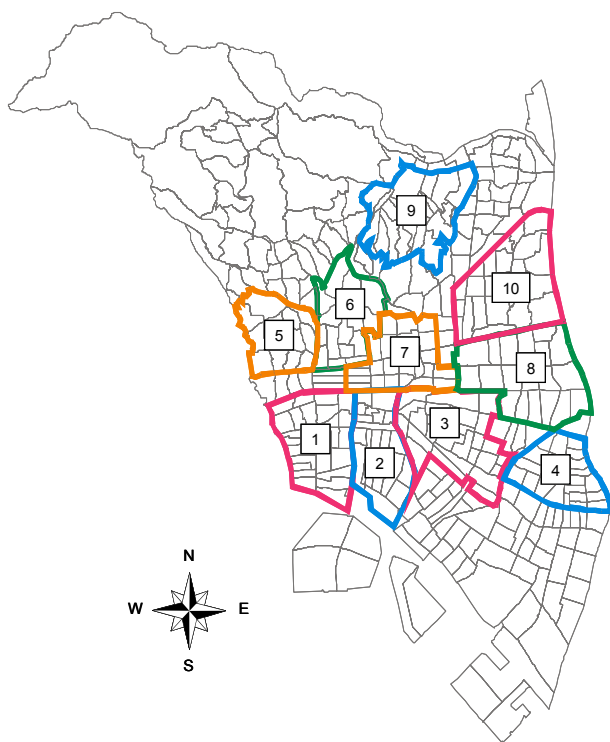


図-3 同定のために選んだ西宮市の10地域

をダメージグレード3, 全壊をダメージグレード4・5に対応づけている。またここでは、代表変形角-被害程度関係は確定値として設定し、降伏ベースシア係数のパラメトリックスタディを行って、降伏ベースシア係数の同定を行う。

具体的な方法は以下の通りである。

- ①対象とする建物種別の建物の降伏ベースシア係数の中央値をパラメータとする。
- ②中央値が、設定した降伏ベースシア係数の中央値で、対数標準偏差が0.4である対数正規分布に従うような値をランダムに500個生成し、その値を降伏ベースシア係数とする建物データを作成する。
- ③西宮市の中から検証を行う地域を選定して、その地域における入力地震動（推定応答スペクトル）を求める。
- ④生成した建物データを用いて、本研究で構築した解析手法で地域ごとに被害レベルを算定する。
- ⑤上の計算結果より、選んだ地域全域での対象とする建物種別の合計の被害率を計算する。
- ⑥計算した被害率と兵庫県南部地震時の建物被害調査データからの被害率を比較する。
- ⑦この操作を繰り返して、計算からの被害率と調査データからの被害率がよく合致する中央値を選定する。

(2) 観測被害データ

本研究での同定に用いる建物被害調査データの対象都市である西宮市は、兵庫県南部地震の震央から

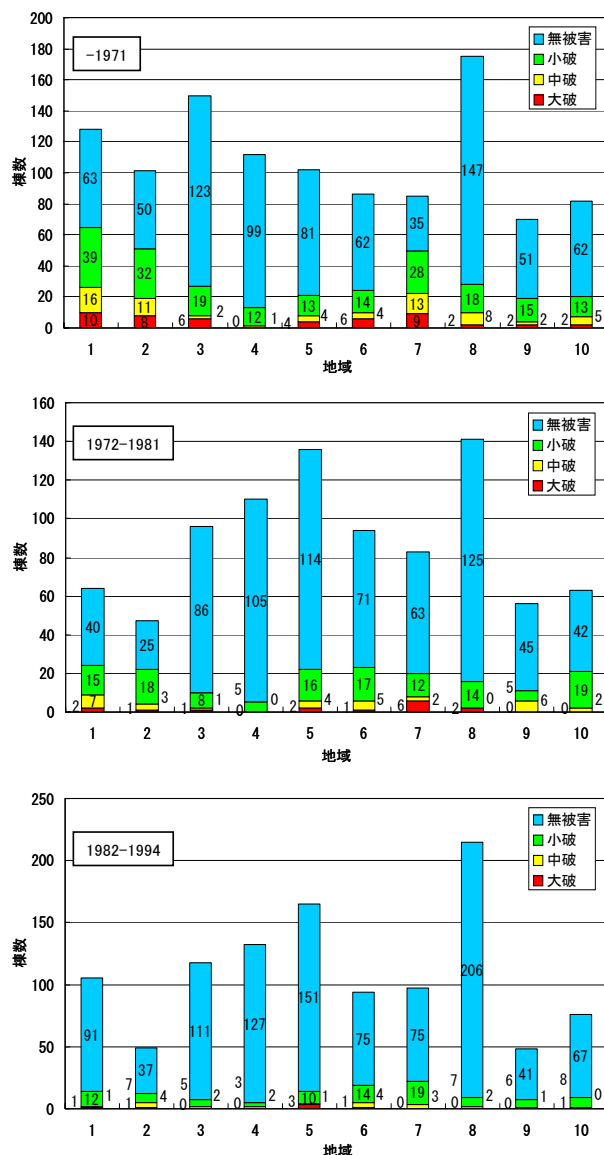


図-4 選んだ10地域におけるRC造低層建物の建築年代別被害状況

およそ40km北東に位置しており、震災の帯が市の南側を横切っている。この西宮市において、被害の大きかった南側から、地盤条件を考慮して10地域を選ぶ（図-3）。図-4は選んだ10地域におけるRC造の低層建物の建築年代別の棟数、被害状況である。なお、西宮市全域における建物被害調査は、市と震災特別委員会¹³⁾によって行われているが、市の調査は、税金の減免のための判定となっているので、ここでは、建物構造の損傷から被害判定を行っている震災特別委員会¹³⁾調査のデータを使用している。

入力地震動データは、西宮市では兵庫県南部地震のときに強震観測記録が得られていないので、佐藤ら¹⁴⁾の手法により地震動分布シミュレーションを行った結果を用いている。

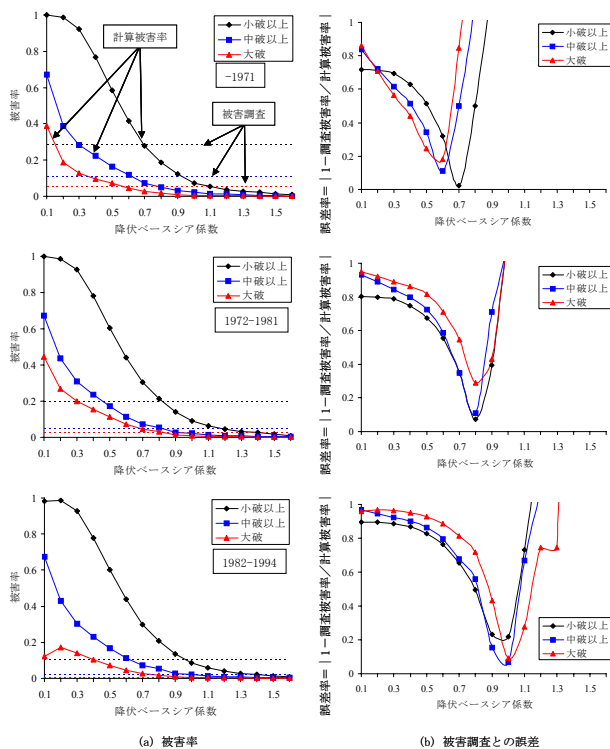


図-5 計算被害率と実被害率の比較

(3) 同定結果

上記のような方法で、木造、RC造、鉄骨造建物それぞれの降伏ベースシア係数の同定を行った。図-5は、低層RC造建物について計算による被害率と実被害率を比較したものである。この図より、降伏ベースシア係数の中央値は、1971年以前が0.6、1972～1981年が0.8、1982年以降が1.0に決定される。これらの値は宮腰ら⁶⁾など既往の研究とも整合しており妥当な数値であると考えられる。

木造建物の降伏ベースシア係数の中央値は、1950年以前と1951～1970年が0.2、1971～1981年と1982年以降が0.3と決定されている。この値は、実際の建物の値よりもかなり小さめになっている。その原因として考えられることは、解析に使用した推定応答スペクトルの値が小さすぎたため、西宮市の被害に合うような降伏ベースシア係数にするために現実よりも小さくなってしまったことが考えられる。また、同定に用いた被害調査結果の判定基準の影響とも考えられる。西宮市のデータは震災特別委員会¹³⁾調査のものであるが、この調査結果は被害が大きくなるような判定基準になっている。そのため、降伏ベースシア係数の中央値が小さくなる傾向があるものと思われる。

4. 新潟県中越地震における地震動での検証

本研究で構築した解析手法の精度を検証するために、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震の際

表-1 入力地震動の違いによる木造建物被害率の比較

(a) 降伏ベースシア係数修正前

	全壊	半壊	一部損壊	無被害
JMA小千谷(EW)	59.7%	39.6%	0.7%	0.0%
K-NET十日町(EW)	0.0%	0.0%	19.5%	80.5%
神戸海洋気象台(NS)	59.6%	39.9%	0.5%	0.0%
葦合供給所(NS)	95.5%	1.2%	2.6%	0.7%
ポートアイランド(NS)	74.1%	5.0%	3.1%	17.7%

(b) 降伏ベースシア係数修正後

	全壊	半壊	一部損壊	無被害
JMA小千谷(EW)	48.1%	34.4%	16.6%	0.8%
K-NET十日町(EW)	0.0%	0.0%	71.2%	28.8%
神戸海洋気象台(NS)	48.8%	37.3%	13.3%	0.6%
葦合供給所(NS)	51.5%	0.8%	25.8%	21.9%
ポートアイランド(NS)	13.4%	2.9%	3.8%	79.8%

に得られた地震記録を用いて建物被害の推定を行い、実被害との比較を行った。

検証に使用した地震動記録は、JMA小千谷とK-NET十日町で得られた地震波形記録とともにEW成分を用いている。その地震波形記録より作成した応答スペクトルを仮想建物群（降伏ベースシア係数が対数正規分布でばらついている）に対して入力して、そのときの建物被害を推定した。比較のため、兵庫県南部地震の際に得られた地震記録（神戸海洋気象台、葦合供給所、ポートアイランドでの記録とともにNS成分）でも同様の解析を行った。

表-1(a)は、入力地震動の違いによる建物被害率を比較したものである。これを見ると、JMA小千谷の被害率がかなり大きくなっているのがわかる。日本建築学会の速報調査¹⁵⁾により住宅の倒壊率が、小千谷市で7.3%、長岡市で9%、川口町で13%、川口町田麦山地区で42%であるので、本解析手法による結果は被害を過大に評価してしまっている。

建物強度から考えると、新潟県のような雪国では、冬季の積雪に耐えられるように開口部が少ないなど、神戸地域に比べ建物強度は相当高いと考えられる。表-1(a)における木造建物の計算は、降伏ベースシア係数を0.2に設定して行っているため、建物の耐力を上げてみることで、この値を0.4にして改めて推定を行った。その結果を表-1(b)に示す。その結果、いくらか被害率は小さくなったが、まだ実被害に比べてかなり大きな値となっている。

図-6は今回用いた地震動の加速度応答スペクトルを比較したもののだが、これを見るとJMA小千谷は地震動が十分大きいものの、0.5秒前後の短周期が卓越しており、建物の大きな被害を引き起こす1～2秒の周期帯では大きくない。つまり現在推定手法で用いている耐力曲線では、卓越周期が比較的短周期側であってもその値が十分に大きければ全壊に至ってしまうと考えられるので、周期1秒強の成分の大き

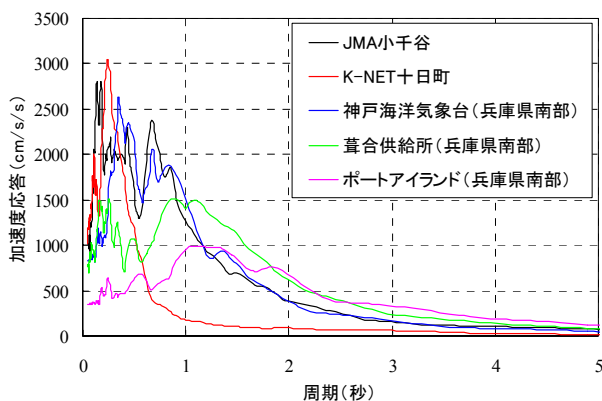


図-6 入力地震動の加速度応答スペクトルの比較

さが推定結果に強く反映されるように検討を行う必要があるものと思われる。

5. 建物被害推定シミュレータ

震災総合シミュレーションシステムは、地震発生直後の震源情報による即時被害推定から詳細被害推定、エージェントモデルによる対応行動シミュレーションなどを連携して行う一連のシステムである。本研究で構築した手法は、その中の一棟ごとの建物被害推定で用いられるものである。ここではそのシステムのうち、建物被害推定シミュレータが関係する部分を簡単に説明する。

現在、本システムは川崎市を開発のテストエリアとして構築を進めている。建物被害推定シミュレータに必要な入力地震動は、8,125本のボーリングデータを基に構築した詳細地盤データベースを用いて50mメッシュごとに求められる応答スペクトル¹⁶⁾を使用する。建物データは、個別建物に関して構造種別や階数、用途などが入ったもので、築年は約5年ごとに作成されている地形図で存在が確認された年を入れたものである。被害推定結果は、道路閉塞推定をはじめとする他のシミュレータの初期条件としても用いられる。図-7は建物被害推定結果を示したものである。

6. まとめ

地震被害推定システムに有用な建物被害推定手法は、個々の建物についての被害程度を推定する手法であるので、本研究では限界耐力設計法⁴⁾を用いた推定手法を構築した。この方法は応答スペクトルを用いるので、地震動と建物の周期特性を考慮した計算を短時間で行うことができる。兵庫県南部地震における西宮市の建物被害調査結果¹²⁾を用いて、限界変形角と降伏ベースシア係数の同定を行い、推定精度向上を図った。そして、新潟県中越地震における

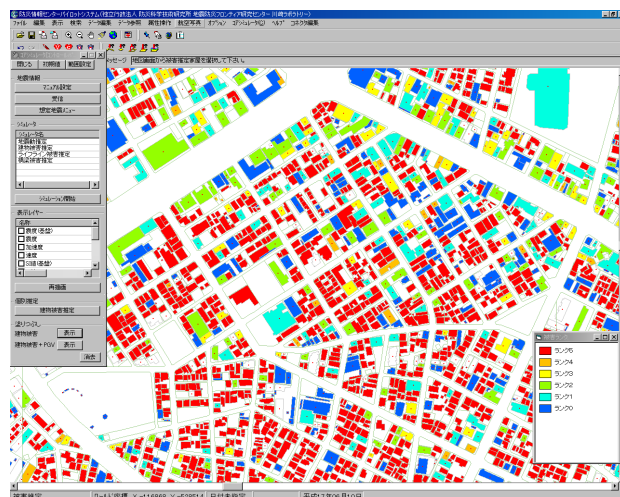


図-7 建物被害推定シミュレータの推定結果

観測地震動を用いて本手法の解析精度の検証を行い、改善すべき項目の検討を行った。今後は、建物の耐力曲線を変更するなどして周期1秒強の地震動の成分の大きさが推定結果に強く反映されるように解析手法を変更したり、建物耐力のばらつきを考慮する方法の検討、建物の地域特性を考慮するための方法の検討、耐震対策効果の取り込み、等を行う必要があるものと考えられる。

謝辞：本研究は、文部科学省が平成15年度より5か年の予定で実施している委託業務「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一部として実施しているものである。

参考文献

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577/I-41, pp. 1-16, 1997.
- 2) Goto Y, Takeuchi I and Kakumoto S: Integrated earthquake disaster simulation system for the highly-networked information society, Proceedings of the 13th World Conference of Earthquake Engineering, CD-ROM, 2004.
- 3) 佐伯琢磨，坪川博彰，汐見勝彦：兵庫県南部地震以後の自治体の地震被害想定に関する調査，地域安全学会論文集，No.1, pp. 165-172, 1999.
- 4) 建設省：建設省告示第1457号，2000.
- 5) Applied Technology Council (ATC): ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, 1996.
- 6) 宮腰淳一，林康裕，田村和夫：被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察，第10回日本地震工学シンポジウム，pp. 327-332, 1998.
- 7) 林康裕，宮腰淳一，田才晃，大野義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，第528号，pp. 135-142, 2000.
- 8) 岡野創，永野正行，宮本祐司：被害関数と再現地震動から推定される低層RC系建物群の耐力と変形性能，第11回日本地震工学シンポジウム，pp. 1603-1608, 2002.

- 9) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, pp. 65-72, 1999.
- 10) 桑村仁, 田中直樹, 杉本浩一, 向野聡彦: 鋼構造躯体の性能表示, 日本建築学会構造系論文集, 第562号, pp. 175-182, 2002.
- 11) Federal Emergency Management Agency: HAZUS99 Technical Manual, 1999.
- 12) 山口直也, 山崎文雄: 詳細な建物情報を含む被災度調査結果に基づく西宮市の地震動分布の再推定, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp. 203-214, 2000.
- 13) 震災復興都市づくり特別委員会: 阪神・淡路大震災被害実態緊急調査被災度別建物分布状況図集, 1995.
- 14) 佐藤忠信, 北勝利, 前田知就: 兵庫県南部地震における強震域での加速度応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp. 149-159, 1997.
- 15) 日本建築学会新潟県中越地震速報会, 日本建築学会北陸支部, 2004.
- 16) 末富岩雄, 石田栄介, 磯山龍二, 後藤洋三: 地盤の平均S波速度による地震動強度指標の非線形増幅度評価法について, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, CD-ROM, 2003.

(2005. 6. 13 受付)

DEVELOPMENT OF THE INTEGRATED EARTHQUAKE DISASTER SIMULATION SYSTEMS - PRECISION VERIFICATION OF BUILDING DAMAGE ESTIMATION METHOD

-

Naoya YAMAGUCHI, Iwao SUETOMI, Yozo GOTO, Tomoya IWASAKI,
Kaoru MIZUKOSHI, Hajime OKANO and Fumio YAMAZAKI

In this paper, for early earthquake damage assessment systems, the earthquake building damage estimation method is developed, using one of the seismic design methods of structures, the capacity spectrum method. This calculation method is simpler than the time history response analysis and the spectral characteristics of seismic ground motion and the natural period of a building can be considered because the response spectrum is used as an input ground motion. And the seismic performance of buildings is identified by using the building damage survey data from the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake and Niigataken-Chuetsu earthquake.