1995年兵庫県南部地震における RC 造建物の被害と最大地動速度の 樹形モデルによる相関評価

EVALUATION OF CORRELATION BETWEEN DAMAGE LEVELS OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS AND PEAK GROUND VELOCITIES DURING THE 1995 HYGOKEN-NANBU EARTHQUAKE BASED ON TREE-BASED MODEL

藤原 悌三*, 鈴木 祥之**, 林 康裕***

Teizo FUJIWARA, Yoshiyuki SUZUKI and Yasuhiro HAYASHI

This paper studies the relation between structural damage of reinforced concrete buildings and ground motion intensity during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. We have used two surveyed data for damaged schools and mid-to-high-rise buildings which list description of buildings, structural damage degree, and seismic performance indices. Buildings are classified and their damage are regressed by construction years, seismic performance indices, number of floors, and peak ground velocities based on tree based model. Obtained regression and classification trees show how the effects of ground motion intensity on building damage vary with the seismic performance of the building, damage degree, and peak ground velocities.

Keywords : Peak ground velocity, Hyogoken-Nanbu earthquake, Reinforced concrete building, Structural damage, Seismic performance index, Tree-based model

最大地動速度、兵庫県南部地震、鉄筋コンクリート造建物、被害、構造耐震指標値、樹形モデル

1. はじめに

兵庫県南部地震における震災経験を今後の耐震設計に役立てるために、建物被害データの詳細な分析を行うことの重要性は疑う余地がないであろう。RC造建物被害に関する統計データは様々な研究機関によってまとめられている(例えば、文献1)~8))。建物の被害棟数や被害率などは、兵庫県南部地震相当の地震に対する被害規模の推定や統計的な被害要因の分析に役立つものと考えられる。また、より直接的に、最大地動速度と被害率の関係を表す被害関数という形でまとめている例もある⁹⁾。ここで、最大地動速度は、主として木造建物の被害率を換算して推定されたものであるが^{10)~12)}、観測記録と概ね定量的に整合したものである。従って、被害関数によって地震動強さと建物実被害の平均的な関係が定量的におさえられたことになる。しかし、建物の特性(強度や変形性能など)を介して、地震動強さと建物被害の関係が把握されたわけではない。

地震動強さ、建物特性、建物被害の3者の関係に対する検討は、多くの個別建物のシミュレーション解析によって行われているとも言える。しかし、震災の帯の中で観測された地震動記録が極めて限られたこともあり、周辺被害が比較的少なかった神戸海洋気象台における観測記録を建物への入力地震動として用いたものが多い。従って、激震地における被災建物のシミュレーション解析に用いられている入力地震動レベルは、多くの場合、当該地点で推定される地震動レベルに対して過小評価となっている可能性が高い。そのような場合の解析結果の解釈としては、用いた入力地震動レベルが仮定した建物モデルや損傷のクライテリアに整合したと考えるべきであり、必ずしも地震時挙

動がシミュレーションできたとは言えない。従って、地震動強さ、建物特性、建物被害の3者の関係に対する検討は未だ十分ではない。

本論文では、RC造建物に関する実被害データに基づいて、建物特性と建物被害や地震動強さのマクロな関係についての分析を行う。用いた建物被害データベースは、文献2,3)および文献4,5)の2種類のデータであり、前者は構造耐震指標 I_s 値が調査された学校建物に対する被災度調査・耐震診断結果であり、後者は一般建物に対して壁率や柱率などの耐震性指標を調べた結果である。本研究では、建物被害程度を反応変量、建物立地地点で推定された最大地動速度や建物の特性(1次の I_s 値や終局せん断力係数、建築年、階数)を予測変量として樹形モデル^{14,15)}を用いた分析を行うことにより、建物の被害程度が地震動強さや建物特性とどのように関係していたのかについて考察する。

2. 最大地動速度と建物被害データ

2.1 推定最大地動速度

林等は、神戸市三宮地域で推定した地震動の最大速度¹⁰⁾と木造建物の被害率の関係¹¹⁾を求め、これを基にして、神戸市須磨区より尼崎市、宝塚市に至る広域で得られた低層独立住宅の被害率から最大地動速度分布を推定している¹²⁾。さらに、低層独立住宅以外の建物被害も考慮することにより、最大地動速度の推定精度の向上を試みている¹³⁾。得られた最大地動速度の分布は、液状化が生じていない地域での観測記録や墓石の転倒率と定量的に整合したものであり、さらに、観測記録と深い基盤・堆積地盤構造・表層地盤の非線形性を考慮した推定地震動の最大速度分布とも定量的に良い対応を示した。ただし、地震動

* 滋賀県立大学環境科学部 環境計画学科 工博

** 京大大学防災研究所 工博

*** 清水建設株式会社和泉研究室 工博

Department of Environmental Planning, School of Environmental Science, the University of Shiga Prefecture, Dr. Eng.
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.
Izumi Research Institute, Shimizu Corp., Dr. Eng.

レベルの急変するような地域で推定誤差が大きくなり、また、液状化が生じたような臨海部では推定地動速度を2/3程度に過小評価してしまう傾向にあった。液状化が生じたような地域では、液状化層で地震動の短周期成分が遮断され、地表最大加速度や建物に入力されたエネルギーが低下し、建物の被害が低減されたため、建物被害率より推定した最大地動速度が過小評価されたものと考えられる。しかし、本論文における検討では、建物の被害に結びつける地震動強さ指標として、林等の推定最大地動速度¹³⁾を液状化地域・非液状化地域を区別せずを用いることとする。

2.2 RC造建物被害データ

用いたRC造建物被害データは、以下の2種類である。

2.2.1 学校建物データ (Data-S)

日本建築学会は、RC造学校建物について被害調査を行い、その内被害の比較的大きかった建物を中心として耐震診断を行なっている^{2,3)}。この内、林等によって最大地動速度が推定されている神戸市須磨区から

西宮市、宝塚市に至る地域には99棟が立地している。被害調査では原則として日本建築防災協会編「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針」¹⁶⁾にしたがって被災度が判定され、「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準同解説(1990年版)」¹⁷⁾によって耐震診断された結果がデータベースとして構築されている。本論文では、このうち文献3)で公表されているデータを基にして、被害レベルを、建設年代 Y_s 、階数 Fr 、桁行方向の I_s 値に加えて最大地動速度 V を用いて解釈を試みる。なお、学校建物の場合、わずかな例外を除き被害は壁率の小さな桁行き方向で生じていたとされている。被害レベルを表す指標としては、被災度判定者による被害レベルである無被害、軽微、小破、中破、大破、崩壊をそれぞれ1~6に番号付けた値(以下、 R_d 値と呼ぶ)を用いることとする。文献3)では、桁行方向の I_s 値として1次と2次の I_s 値が示されているが、1次の I_s 値でも2次の I_s 値と同程度に被害レベルを説明できること、また2次の I_s 値が得られている建物数は50棟に減少してしまうことから、1次の I_s 値 I_{s1} を用いて検討することとする。建設年代 Y_s は文献3)に基づいて、建設年が

図1 建設年(竣工年)別棟数分布

(a) Data-S

(b) Data-J

図2 最大地動速度レベル別(年代・被害区分別)棟数

(a) $Y_s=1$

(b) $Y_s=2$

(c) $Y_s=3$

図3 最大地動速度レベル別(年代・被害レベル別)棟数 (Data-J)

図4 RC造建物の被害関数

(a) Data-S

(b) Data-J

図5 階数別(年代別)被害棟数

1971年以前の場合に $Y_s=1$ 、1972～1981年までを $Y_s=2$ 、1982年以降のものを $Y_s=3$ と区分した。

2.2.2 一般建物データ (Data-J)

今一方は、日本建築学会近畿支部耐震研究部会が日本建築構造技術者協会関西支部耐震部会の協力を得て作成したデータベースである⁴⁾。調査対象は主として阪神地域の震度VII地域に建つ7階以下のRC造建物である。調査建物のうち最大地動速度 V が推定されている地域に立地している建物は234棟で、その約半数は西宮地域に立地する。建物名称、用途はマスクされているが、共同住宅と事務所建物が多い。建物の被害レベル R_d 値は、無被害、軽微、小破、中破、大破、倒壊の6ランクで、それぞれに1から6の番号をふっている(R_d 値)。

被害レベル R_d の予測変数としては、推定最大地動速度 V の他に、調査建物の竣工年よりData-Sと同様に区分した年代区分 Y_s 、階数 Fr 、建物1階(1棟のみ層崩壊が生じた2階)の弱軸方向の壁終局せん断力係数 C と柱の終局せん断力係数 C_b とした。 C 及び C_b は、それぞれ $C=(25Aw+7Ac)/W$ 、 $C_b=10Ac/W$ として算定されたものである。ここで、 Ac 、 Aw はそれぞれ日本建築防災協会「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準同解説」¹⁷⁾の一次診断の強度算定指標に基づく1階柱断面面積の総和(cm^2)、1階壁断面面積の総和(cm^2)で、 W は2階床以上の建物重量(kgf)である。Data-Jの場合には被害の方向は明らかではないが、共同住宅が多いこともあり、被害と関係づけるせん断力係数 C 、 C_b は弱軸方向の値で代表させることとした。

2.2.3 2つの被害データベースの特徴

まず、図1に建設年・竣工年 Y 別の棟数を示す。Data-Sは、Data-Jに比べて新耐震設計法施行以降に相当する年代区分 $Y_s=3$ の建物が少ないことが分かる。

図2は、最大地動速度レベル別の棟数を示したものであり、年代区分 Y_s 別に小破以下の建物と中破以上の建物に区分して集計して示している。さらに、Data-Jについては、各被害レベルの内訳を図3に示す。

図2, 3から指摘できることを以下に列挙する。

- ・既に多くの報告書が指摘しているように、Data-S,Jともに建設年代が新しくなるにつれて被害率が小さくなり、特に建設年代 $Y_s=3$ の建物に被害は少ない(図2)。
- ・Data-Jの最大地動速度レベル別サンプル棟数を見ると(図2)、最大地動速度レベル別に比較的偏りなく分布しているが、Data-Sでは60～90kineが少なく、120kine以上が多くなっている。

- ・Data-Jの中破以上の建物は対象建物234棟のうち約17%であり、Data-Sの約60%との比較して少ない(図2)。
- ・Data-Sについて最大地動速度レベルと被害レベルの関係をみると(図2(a))、年代区分 $Y_s=1$ の建物は90kine以上ですべて中破以上の被害となっているのに対して、年代区分 $Y_s=3$ の建物では120kine以上の地域で中破が2棟含まれるだけで、120kine以下では全て小破以下となっている。しかし、 $Y_s=2$ の建物については、最大地動速度との明瞭な相関は見られない。
- ・Data-Jについて最大地動速度と被害レベルの関係をみると、年代区分 $Y_s=3$ の建物について、120kine以下では中破以上の被害が生じていないこと以外は、明瞭な傾向が読みとれない(図3)。むしろ、建設年代 Y_s と被害との相関が際だっている。

ここで、図4に最大地動速度と被害率の関係を⁹⁾を示す。図中のシンボル付き太実線は、日本建築学会近畿支部調べによる東灘区・灘区のRC造建物の中破以上の建物の割合と最大地動速度の関係(被害関数)を、建設年代 Y_s 別に示したものである。最大地動速度 $V=100kine$ における中破以上の割合は、 $Y_s=1,2$ で5%前後、 $Y_s=3$ ではほぼ0、 $V=150kine$ では $Y_s=1,2$ で約10～15%、 $Y_s=3$ で約7%となっている。従って、図3との比較から、 $Y_s=1$ および $Y_s=2$ の60kine以下のレベルの中破以上の被害率は、東灘区・灘区の平均的な被害率を大きく上回っていると言えよう。すなわち、中破以上の建物が多く含まれている。

次に、図5に階数 Fr に対するサンプル建物の棟数分布を示す。図5では、階数別・年代区分別の建物棟数を中破以上と小破以下に分けて示している。まず階数 Fr は、Data-Sでは3,4階のものが殆どであるのに対して、Data-Jでは5階以上の建物も半数近く含まれている。図5(a)に示

図6 桁行方向の1次の Is 値と建物被害 (Data-S)

図7 壁の終局せん断力係数 C と柱のせん断力係数 C_b (Data-J: $C>2, C_b>2$ のサンプルは除く)

したData-Sについて見ると、2階建てと5階建ての建物は、 $Y_s=3$ の場合を除きすべて中破以上の被害となっている。また、3階建てと4階建てを比較すると、全年代区分を通じて、4階建ての方が中破以上の建物の割合が大きくなっている。図5(b)のData-Jについて見ると、 $Y_s=3$ の場合には中破以上の建物が2棟しかないために階数による傾向は見えないが、 $Y_s=1,2$ の場合には5階建て以上から中破以上の被害率が大きくなっているように見える。

図6にはData-Sについて桁行方向の Is_1 と建設年 Y および被害レベル R_d の関係を階数 Fr を区分して示している。図6からは、中破以上の建物は、1980年以前、 $Is_1 < 0.4$ の場合に多いように見える。一方、図7(a),(b)には、Data-Jについて壁の終局せん断力係数 C と柱の終局せん断力係数 C_b の平均値を建設年代 Y_s ・階数 Fr を区分して示す。 C, C_b は、いずれも階数 Fr の増加に伴って減少する傾向にある。しかし、建設年代による差は顕著ではなく、 C や C_b からだけでは建設年代による被害率の差を説明できない。さらに、 C と C_b の差は1,2階建てを除けば大きくない。これは、対象としている建物に壁式構造の建物が少ないためである。実際、弱軸方向壁率が $50\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下のものが多い。このためか、既往の壁の終局せん断力係数を調べた調査結果と比較しても小さい値となっている(例えば文献18))。一方、図7(c)には、小破以上の建物と全建物を C, C_b の平均値で比較して示す。図より明らかなように、やはり両者の違いは明瞭ではない。

以上では、クロス集計により2つRC造被害建物データベースの特徴と被害要因の抽出を行った。RC造建物の被害は、建物の建設年代と明瞭な相関性を有するほか、建物の1次の Is 値や階数、最大地動速度などとも関係している。そして、建設年代によって建物被害と最大地動速度の関係が異なる等、建物被害に対する地震動レベルや建物特性等の要因は相互に関係していることを示したが、その関係が明らかになったとは言えない。

3 樹形モデルによる分析

3.1 樹形モデルの概要

本章では、被害レベルと最大地動速度や建物特性との関連づけを樹形モデルを用いて行う。

樹形モデル^{14,15)}は、対象とする集合をできる限り均質とみなせるような部分集合へと2分割を繰り返していくことによって作られるモデルである。本論文では、兵庫県南部地震におけるRC造被害建物データベースData-S,Jを対象として、これを同程度の被害レベルを有する建物部分集合に分割するのに用いる。数学的には、RC造建物の被害レベルを反応変数 y 、最大地動速度 V や建物特性値を予測変数 x とした時、予測変数 x の値を与えたときの反応変数 y の条件付き確率を階段関数で推定することになる。そして、分割された部分集合と分割条件を分析することによって、どのような条件によって建物被害レベルに差が生じたのかを推定することが可能となる。例えば、RC造建物の被害レベルが小破以下($R_d \leq 3$)であるか中破以上($R_d \geq 4$)であるか(因子変数)を反応変数とすれば、樹形モデルの分割条件より小破の建物特性や最大地動速度の条件を推定することが可能となる。また、建物の被害レベル R_d 値を(数値)反応変数とみなして適用すれば、RC造建物被害レベルを回帰でき、被害レベルを特徴づける建物特性値や最大地動速度値の条件も同時に導き出される。

樹形モデルは、反応変数を持たないクラスター分析と混同されやす

く、建築では馴染みがうすいと考えられるため、文献15)を参考に、分割方法について簡単に説明しておく。

樹形モデルでは、対象建物集合を1つの節点で表し、これを2つの節点に再帰的に分割していくことにより樹を形成する。対象とする全建物集合を示す節点は特に根元と呼ばれる。節点の均質度を表す尺度としては後で定義されるような尤離度を用いる。この尤離度が小さい程均質であり、尤離度が最も小さくなるよう分割が行われる。例えば、被害レベルが中破以上($R_d \geq 4$)である場合を1、そうでない場合を0として、2水準の反応変数を考える場合には、反応変数は因子変数となり、樹形モデルは小破以下と中破以上とを分類する分類樹となる。この時、反応変数の分布モデルは二項分布に従うものとし、 $R_d \geq 4$ となる確率を p とすれば、ある反応変数 y_i に対する尤離度 $D(\mu; y_i)$ は、

$$D(\mu; y_i) = -2 \{y_i \log(p) + (1-y_i) \log(1-p)\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\mu = (p, 1-p)$ である。

一方、反応変数を数値変数である R_d 値とする場合には、樹形モデルは回帰樹となる。この時、反応変数の分布を平均値 μ 、標準偏差 σ の正規分布と仮定すれば、尤離度は

$$D(\mu; y_i) = (y_i - \mu)^2 \quad (2)$$

で与えられる。 μ の最小尤離度推定量 μ^* は、分類樹の場合には各水準の相対出現度数のベクトル $\mu^* = (p^*, 1-p^*)$ 、回帰樹の場合には y_i の平均値となる。そこで、各節点の尤離度を

$$D(\mu^*; y) = \sum_i D(\mu^*; y_i) \quad (3)$$

として定義する。この尤離度は反応変数がすべて同じであれば0で、ばらつきが大きくなるにつれて増大する。このことから、分割前の節点の尤離度に比べて分割後の2つの節点の尤離度の和が最も小さくなるように分割を行う。本論文では予測変数を全て数値変数として取り扱っている。この時、各予測変数(数値変数)を大きさの順番に並べ、隣り合う数値の平均値に対しての大小を条件として、尤離度の和が最小となるような条件を探索・選択して分割を行う。なお、樹形図の成長は分割後のばらつきが最も小さくなるような分割条件が順番に選択されることによって行われることとなるから、根元に近い分割条件、およびそれに用いられた予測変数ほど反応変数を説明する上で重要であると言える。

一方、分割の停止は、節点の尤離度が根元の尤離度のある一定値以下になるか、節点に含まれる観測数があらかじめ定めた数より少なくなった時に行われる。実際には、樹の成長(観測データの分割)は特に制限せずに行い、成長が終わった後で各節点の尤離度などを参考にし、樹の剪定を行い、樹形モデルの性質が簡明になるように加工する。以下においては、剪定した結果を示すが、さらに、ある節点からの2分割が同一の予測変数で続けて行われた場合には、簡単のために、樹形図の分岐を縮合して図示する。また、通常分割条件は不等号のみを用いて表されることとなるが、予測変数が整数値となる場合には、理解が容易となるように等号を用いて示すこととする。

3.2 Data-S

建物の被害レベル R_d 値を、年代区分 Y_s 、最大地動速度 V 、桁行方向の1次の Is 値 Is_1 、階数 Fr を予測変数として回帰した結果を図8に示す。図8中の節点(□印)や葉(○印)の中には、含まれるサンプル建物の R_d 値の平均値 μ^* 、 R_d 値の標準偏差、サンプル建物棟数 N を記入している。なお、 R_d 値の標準偏差は $(D(\mu^*; y)/(N-1))^{0.5}$ として算定し

たものである。また、図9には、被害が中破以上($Rd \geq 4$)の場合の条件を、 Y_s , V , $Is1$, Fr を予測変量として推定した結果を示す。図9中の節点や葉には、中破以上の被害率 p^* とサンプル建物棟数の値を記入している。

まず、図8,9による樹形モデルによる分析では、階数 Fr によっては被害レベルに顕著な差が見いだせなかった。これは、学校建物のほとんどが3,4階建てであり、3階建てと4階建ての被害には差が見られるものの、その差が年代区分と Is 値によって概ね説明できたためと考えられる(図6)。次に、新耐震設計法施行以降に設計された年代区分 $Y_s=3$ の建物には、18棟中2棟を除き中破以上の被害が生じていない(図2(a), 図9)。また、図8より最大地動速度 V が $V < 127$ kineの地域ではほとんど無被害であり、 $127 < V$ の激震地域でも被害は概ね軽微から小破程度におさまっていることが分かる。一方、図9より、新耐震設計法施行以前の年代区分 $Y_s \leq 2$ の場合でも、1次の Is 値 $Is1$ が約0.4以上あれば、小破以下にとどまる割合が半数近くになり、また50kine以下の最大地動速度 V では中破以上の被害が生じていない。ただし、 $Is1$ が約0.4を下

図8 Rd を反応変量、 $Is1$, Y_s , V , Fr を予測変量とした樹形図(Data-S)

図9 $Rd \geq 4$ (中破以上)を反応変量、 $Is1$, Y_s , V , Fr を予測変量とした樹形図 (Data-S)

回る場合には多くの建物が中破以上の被害となっている。

一方、建設年代 Y_s や1次の Is 値 $Is1$ といった建物特性に関わる変量の方が最大地動速度 V に比べて、樹形図の根元に近い分割条件に使われている。これは、被害を説明する上で、建物特性に関わる変量の方が最大地動速度 V に比べて影響が大きいことを意味しているように見える。しかし、図9の年代区分 $Y_s=1$ について見ると、 $Is1 < 0.375$ の場合には $V > 64$ kineの地点で全て中破以上の被害となっているのに対して、 $Is1 > 0.375$ の場合に全て中破以上の被害となるのは約100kine以上のいわゆる震災の帯内の建物となっている。このことは、地震動レベルと被害との関係が建物特性によって異なることを意味し、このため、まず建物特性の分類が行われたと考えることができよう。

これに対して、 $Is1 > 0.375$ で $Y_s=2$ の場合について見ると、最大地動速度 $V=128$ kineを境として、最大地動速度が大きいと推定されている地点の建物が中破以上の被害となったものではなく、小さい地点で中破以上の被害が生じている。これは、分割が重ねられるにつれてサンプル建物棟数が十分でなくなるため、必ずしも合理的な分割とならないためとも考えられる。そこで、128kine以上の最大地動速度に対して小破以下の被害にとどまった5棟について分析を進めてみた。5棟の建物は、神戸市東灘区のいわゆる震災の帯の中に立地する校舎建物で、 $Is1$ はいずれも0.38~0.42で決して大きくはない。しかも、桁行方向が南北方向の建物も3棟含まれ、決して地震動の方向性の影響とは考えにくい。5建物の共通点としては、建設年が1977年および1980年であること、2次の桁行方向の Is 値が全て0.7以上で大きいことが関係している可能性がある。図10には、 $Y_s=2$ の学校建物について、1975年以前と1976年以降にさらに区分して、被害レベル別の棟数分布を示した。わずかな例外を除いて、1976年以降の建物の被害レベルが小さいことがわかる。なお、文献3)によれば、1975年頃に、兵庫県の高등학교のための標準仕様が帯筋、スラブ筋、壁筋をSR24からSD30に変更しているとされている。一方、 $Is2$ については、 $Is2$ が0.7以上でも中破以上の被害が見られたのは、西宮市北部地域に建つ数棟の建物である。ちなみに、それらの建物立地地点の推定地動速度は50~70kine程度で小さいが、 $Is1$ はいずれも0.38以下で小さく、また1棟を除き1975年以前の竣工である。文献3)においては、被害が大きかった理由として、桁行方向が東西方向で西宮地域の地震動の卓越方向と一致した可能性があること、比較的靱性指標は高いが強度が小さかったこと等を挙げている。本論の分析からは結論を出すまでにはいたらないため、地震動特性と建物特性の両面から、被害レベルを区分した原因につい

図10 $Y_s=2$ の建物の被災レベルの変化(Data-S)

動速度の影響が異なることは、図4に示した被害関数の性質を考えれば理解しやすい。RC造建物が殆どであると考えられる中高層(3階建て以上)集合住宅の半壊は、被害の定義^{3,19)}の比較より考えて構造的には小破程度に対応すると考えられる。そして、図4中の細い破線で示した中高層集合住宅の全半壊率(小破以上の被害率)は、最大地動速度の増加に伴って明瞭な増加を示しており、最大地動速度の影響が大きかったことが理解できる。これに対して、中破以上の被害率は、最大地動速度が100kine程度でも10%以下と小さく、また、最大地動速度値の変化にも比較的鈍感で、被害が進展しやすい建物特性を持った建物の存在に影響されやすいと考えられる。

以上をまとめると、建物の被害に及ぼす最大地動速度の影響は、対象とする建物群の耐震性、被害の定義、地震動レベルに応じて異なると言える。これは当然の結論ではあるが、本論文においては、樹形モデルを実建物被害データベースに適用することにより、その具体的構造を分析できたものとする。なお、樹形モデル中に示された被害率やRd値の平均値等の数値については、サンプル建物数が必ずしも十分ではなく、また被害が比較的大きな建物の割合が大きいこと、地震動の卓越方向や建物被害方向について考慮していないこと等、今後残された課題も多く、定量的に精度を要求される議論には用いることが出来ないと考えている。

4.まとめ

本論文では、1995年兵庫県南部地震で被災したRC造建物の実被害調査データベースを基にして、樹形モデルを用いた分析を行い、建物の被害程度が地震動強さや建物特性とどのように関係していたのかについて検討・考察を行った。用いた建物被害データベースは、学校建物群を対象とした被災度調査・耐震診断結果と、一般被災建物群に対して壁率や柱率などの耐震性指標を調べた結果の2種類である。地震動強さとしては、主として木造建物の被害率を基に推定された最大地動速度を用いている。樹形モデルを用いた分析により、クロス集計による分析からだけでは評価が困難であった、建物被害と最大地動速度や建物特性との以下のような関係を抽出できた。

樹形モデルは、多くの報告書が指摘しているように、兵庫県南部地震における中破以上の建物被害に対しては、建設年代区分による影響が大きいことを示す。次に、桁行方向の1次のIs値や壁・柱の終局せん断力係数などにより耐震性能をさらに区分するが、その区分のし方は建設年代によって異なる。そして最後に、最大地動速度レベルによって建物被害が区分される。このような樹形図の構造は、建物の耐震性能の違いに応じて、最大地動速度が建物被害に及ぼす影響度合いが異なることを示したに過ぎないが、耐震性能や被害を区分する条件や被害の程度を具体的に示すことができたことに意義がある。

一方、建物の被害に及ぼす最大地動速度の影響は、建物の耐震性能ばかりでなく、対象とする被害の程度によって異なるという傾向が示された。例えば、5階建て以下の一般建物を対象とした場合、小破以上の被害率には、中破以上の被害率と異なり、建物特性よりも最大地動速度の方が大きな影響を及ぼしていたことが示された。

謝辞

本論文においては、RC造建物の被害と耐震性能に関する2つの貴重なデータベースを使用させていただき検討を行ったものです。一方

は、日本建築学会がとりまとめた学校建築に関するデータベース、今一方は、日本建築学会近畿支部耐震研究部会より日本建築構造技術者協会関西支部耐震部会に協力依頼して作成された一般建物に関するデータベースです。データベース作成に携わられた方々、協力いただいた方々、他の関係者各位の大変な労力に敬意を表するとともに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震 コンクリート系建物被害調査報告書，近畿支部鉄筋コンクリート構造部会，1996。
- 2) 日本建築学会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書，学校建築委員会耐震性能小委員会，1996。
- 3) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震 鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告書，第II編学校建築，構造委員会鉄筋コンクリート構造運営委員会・兵庫県南部地震災害調査小委員会学校建築WG，1997。
- 4) 京大防災研究所：阪神・淡路大震災－防災研究への取り組み－，5.5 コンクリート系建物の被害，pp.424-442，1996。
- 5) 藤原悌三：中低層鉄筋コンクリート造建物の耐力と被害 JSCA 関西支部の協力による兵庫県南部地震被害調査，Structure，No.60，pp.69-73，1996。
- 6) 藤原悌三(研究代表者)：平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証、文部省科研費研究成果報告書(総合研究A)，pp.5-68-91，1996。
- 7) 建築震災調査委員会：平成7年阪神・淡路大震災建築震災調査委員会中間報告、1995。
- 8) 建設省建築研究所：平成七年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，1996。
- 9) 宮腰淳一，林康裕，渡辺宏一，田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価，構造工学論文集，Vol.43B，pp.269-276，1997。
- 10) 林康裕，川瀬博：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価，日本建築学会構造系論文集，No.481，pp.37-46，1996。
- 11) 鈴木祥之，藤原悌三：神戸市中央区における木造建物の被害，1995年兵庫県南部地震-木造建物の被害-，日本建築学会近畿支部，pp.41-48，1995。
- 12) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫，川瀬博：1995年兵庫県南部地震の低層建物被害に基づく最大地動速度の推定，日本建築学会構造系論文集，No.494，pp.59-66，1997。
- 13) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫，：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.502，pp.61-68，1997。
- 14) Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R., and Stone, C. J. : Classification and Regression Trees. Wadsworth International Group, Belmont, California, 1984.
- 15) J.M.チェンバース，T.J.ヘイスティ編：Sと統計モデル～データ科学の新しい波～，共立出版株式会社，1994。
- 16) 日本建築防災協会：「震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針，1991。
- 17) 日本建築防災協会：「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，1990(改訂版)。
- 18) 久野雅祥，鈴木有：釧路市内のRC造建物・木造建物の耐震性と被害に関する検討，日本建築学会地震災害委員会，1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム，pp.103-112，1994。
- 19) 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(縮尺5000分の1)，1995。

(1997年10月9日原稿受理，1998年2月20日採用決定)