

建物の地震被害の予測とその軽減への展望

川 瀬 博*

Earthquake Damage Prediction for Buildings and the Future Direction for Damage Reduction

Hiroshi KASASE *

Abstract

The real cause of heavy damage on buildings during the Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake of 1995 is presented and the future direction for disaster mitigation is discussed.

First a seismological approach for strong motion prediction is shown and the simulated strong motions for the Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake are presented. It is found that the most important feature of the near-fault motion is the occurrence of high-amplitude velocity pulses with a peak ground velocity more than 100 cm/sec and a peak ground acceleration more than 800 cm/sec². To predict the amplitude and period of such a velocity pulse we need to predict the size of an asperity (a patch with a large slip) and the slip velocity within it.

Once we obtain ground motions simulated in the whole Kobe area, we use them as input to our theoretical models that are capable of simulating the damage to buildings. When we use ultimate strengths for design, the estimated damage is much larger than the observed. We estimate the actual ultimate strengths of buildings so that we can obtain the same damage ratios in Kobe for different building heights and for different construction ages.

Then we apply the established building models to the near-fault ground motions observed during the Tottori-ken Seibu earthquake of 2000 in order to verify their applicability. We found that the models do not show any heavy damage except for one site where soft surface soil strongly amplified the ground motion. This corresponds to the fact that we did not observe any heavy damage in the area.

Finally we discuss the problems of the current anti-seismic design practices and countermeasures for earthquake disaster based on the facts described above. Basic consensus in the structural engineering community on the seismic safety of our buildings is that they are sufficiently safe as long as we design buildings based on the current seismic code that was enforced after 1982. It is true that the buildings constructed after 1982 performed quite well, but we have shown that it was due to their additional strengths not considered in the original design. It is apparent that we have a big gap between theoretical models for design and the actual buildings we have constructed. Unless we do quantify the gap, we cannot take any

* 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

* Faculty of Human-Environment Studies, Division of Architecture and Urban Design, Kyushu University

effective countermeasures for future destructive earthquakes.

Key words: building damage ,strong motion ,vulnerability function ,Hyogo-ken Nanbu(Kobe) earthquake , nonlinear response analysis , edge effect , 3-D basin structure

キーワード: 建物被害, 強震動, 被害関数, 兵庫県南部地震, 非線形応答解析, エッジ効果, 三次元盆地構造

I. はじめに

「地震は人を殺さない。人の作った物が人を殺すのである」とはよくいわれることである。兵庫県南部地震の際にも 6432 人の震災犠牲者のうち大半は崩壊した建物が直接的な原因で亡くなっており、地震による人的被害を低減するためには、地震による地盤の揺れ=強震動の評価と予測もさることながら、それによる建物被害の評価と予測が極めて重要である。しかし、10 万棟以上の大破・崩壊建物が生じたにもかかわらず兵庫県南部地震では 1 棟たりとも大破・崩壊建物における地震観測記録は得られなかった。震源域では中層建物 1 棟と高層建物 3 棟で観測記録が得られたがいずれもその被害は中破かそれ以下である。したがって建物被害の実態評価という観点からは、不謹慎な言い方ではあるが、兵庫県南部地震は壮大な実大実験であったにもかかわらずその犠牲に値するだけの実観測データを得ることはできなかった。しかし、強震動の記録は震源域だけでも 10 数地点で、周辺を含めれば 300 地点以上で得られたので、まずその震源像を求め、さらに地盤の影響を考慮し任意の地点の強震動を評価・再構成することが可能であった。一方、構造物の被害についても被害率等そのグロスの情報は詳しく調査され整理されている。将来の被害を予測する上でこの強震動と被害調査結果との対応を明らかにすることが第一義的に重要である。

本稿ではまず、著者を中心とした研究グループがここ数年にわたる一連の研究により確立した、兵庫県南部地震の強震動の再現と、それに基づいた建物被害予測モデルの構築について概説する。次にそのモデルを最近発生した地震に適用し、被

害予測度を検証した事例を紹介する。最後に、こうした一連の予測モデル開発の結果得られた知見と昨今の建築物の耐震設計分野での新たな動きを踏まえ、将来の震災軽減に向けての展望について見解を述べる。

II. 兵庫県南部地震の強震動の再現

ここではまず、地震学的アプローチにより、震源から地盤までをすべて理論的にモデル化した複数アスペリティと三次元盆地構造を用いた強震動シミュレーション結果(松島・川瀬, 2000)を解説し、それから推定される兵庫県南部地震における震源域強震動について重要な知見をまとめる。

1995 年兵庫県南部地震により多大な被害を生じた帯状の被害集中域、いわゆる「震災の帯」は、神戸市須磨区から西宮市にかけて幅 1 km、長さ 20 km にわたって盆地端部から約 1 km 離れた盆地内側に生じた。著者らはその原因について、六甲断層系により形成される神戸市地下の段差構造において、盆地端部で発生し水平に伝播するエッジ生成波と鉛直下方から上昇してくる直達 S 波が増幅的に干渉する「エッジ効果」により、周期 1 秒前後の速度パルスが増幅されたことを明らかにした(川瀬・林, 1996; Kawase, 1996)。図 1 上部には盆地端部直下にある純横ずれ震源からの S 波の波面とエッジ生成波の波面の干渉の仕方を模式的に示した。入射波の卓越周期や盆地の速度構造によってその特性は変わると考えられるが、神戸市地下の段差構造の場合にはエッジ生成波は速度の異なる 2 種類の波が認められ、それぞれエッジ生成波 とエッジ生成波 と名付けられている(川瀬ほか, 1998)。エッジ効果は入射波場が鉛直下方からの実体 S 波である限り震源タイプの影響

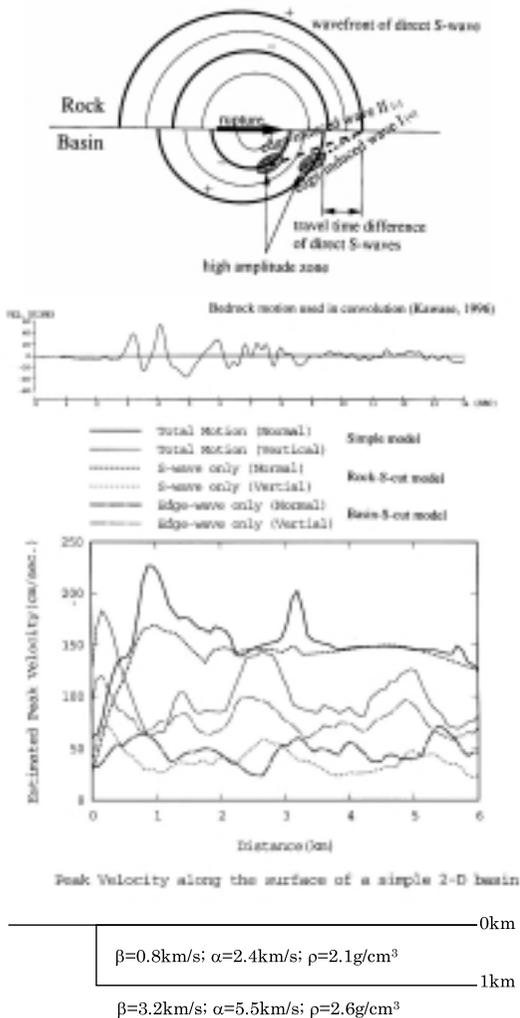


図 1 JMA 神戸海洋気象台における逆算基盤波 (Kawase, 1996) に対する単純な二次元矩形盆地端部での最大応答値の分布 (川瀬ほか, 1998)。

Fig. 1 Peak amplitude distribution along the surface of a 2-dimensional rectangular basin edge for an input S-wave with the shape of a 1 Hz Ricker wavelet (Kawase et al., 1998).

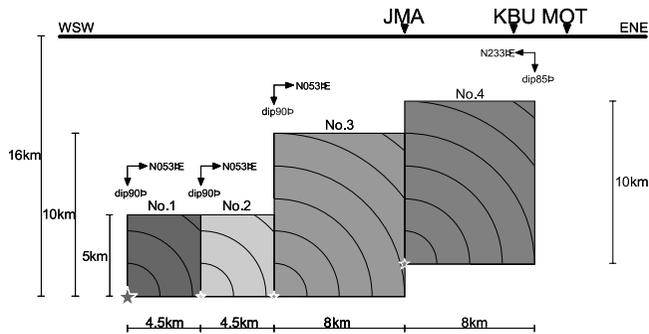
をほとんど受けず、二次元盆地の場合、その端部近傍への周期 1 秒の入射速度パルスの振幅を約 1.5 倍に増幅させる。図 1 下部には中ほどに示した JMA 神戸海洋気象台での逆算基盤波 (川瀬・林, 1996; Kawase, 1996) に対する単純な二次元盆

地 (最下部にその形状を示す) の最大速度応答値の地表面分布を示した。ここで実線は地表面の全応答の最大値, 点線は S 波だけを抽出した時の最大値, 破線はエッジ生成波だけを抽出した時の最大値を表わしている (それぞれ太い線は水平動, 細い線は上下動)。

しかし震災の帯が形成された地下の構造は、大局的には二次元的とはいってもかなり複雑で三次元的に変化しており、それが地震動の強度分布に影響していることは間違いない。実際に、取りまとめられた震災の帯内の被害率は一様でなく、被害関数を構築する上で三次元構造の影響を評価することは極めて重要である。

松島・川瀬 (2000) は、以上のことを踏まえ、まず JMA での逆算基盤波 (川瀬・林, 1996; Kawase, 1996) を再現できる複数アスペリティ (すべりの大きな領域) からなる震源モデルを推定した。次に、地下探査結果 (例えば、遠藤ほか, 1996; 岩田, 1996) をもとに三次元盆地構造モデルを構築し、三次元有限差分法により神戸地域における地動速度波形を計算し、観測と比較してその再現性を検証するとともに、神戸地域での最大速度分布を被害 (震度) 分布と比較した。

松島・川瀬 (2000) では、まず既往の震源プロセスインバージョンでは震源域における速度パルス波が再現できない (川瀬・松島, 1998) として、兵庫県南部地震の震源近傍で得られた観測波を説明できる独自の震源モデルを推定した。そこでは、観測波に見られる顕著な速度パルスが 1 つのアスペリティから発生すると仮定し、複数のアスペリティからなる断層モデルを考え、そのサイズ・位置・すべり速度関数形を同定している。推定された震源モデルは図 2 に示したように 4 つのアスペリティからなり、西から東へ順番に破壊する。地震モーメント (せん断剛性 \times すべり量 \times 面積) ははじめの 2 つが 7% と 12%, あとの 2 つが 28% と 53% である。はじめの 2 つは地震モーメントが小さいのに生じたパルスの最大地動速度は小さくない。これはその最大すべり速度が非常に大きい (急激にすべった) からである。また、個々のパルスの幅は対応するアスペリティの大きさに比例し



No.	M_0 $\times 10^{18}$ [Nm]	size LxW [km ²]	start of rupture [sec]	total slip [m]	slip velocity function
1	0.62	4.5 x 5	0.00	0.85	400kine 0.42s
2	1.07	4.5 x 5	1.79	1.47	815kine 0.66s
3	2.59	8 x 10	3.70	1.00	210kine 1.20s
4	4.83	8 x 10	6.25	1.90	330kine 1.50s
total	9.11	205			

図 2 松島・川瀬（2000）が同定した 4 つのアスペリティ（すべりの大きい領域）からなる震源モデルとすべり速度関数。

Fig. 2 A source model with four asperities and slip velocity functions derived by Matsushima and Kawase (2000).

ている。このように震源域の強震動の評価にはアスペリティのサイズと最大すべり速度が重要である。

次に、得られた 4 アスペリティモデルを用いて、時間領域の三次元有限差分法 (Graves, 1996) により大阪盆地北縁部の応答を求めた。解析領域と三次元地盤モデルを図 3 に示す。この図に示した震源域の観測地点で計算された再現波を観測波と比較して図 4 に示す。観測に見られる顕著な 3 つの速度パルスの振幅と幅（卓越周期の半分）がよく再現できることがわかる。ただし KKJ（港湾技術研究所所有の神戸港事務所観測点）では地盤の液状化による非線形性の影響が非常に強く、この影響を考慮していない再現波では 2・3 番目のパルスが観測波よりも早く出現する結果となっている。また神戸市の中心部から東西にやや離れた

TKT（JR 鷹取駅）と TKZ（JR 宝塚）では、3 番目のパルスが充分再現されないという課題が残されている。

松島・川瀬モデルによる再現波の最大速度値は大阪層群上面（S 波速度で 400 m/sec）で 123 cm/sec となり、図 5 に示したように、気象庁が調査した震度の領域に対応する最大速度領域はおおむね 90 ~ 100 cm/sec 以上の領域として抽出される。この大阪層群上面での最大速度は、含まれている短周期成分が 1 秒程度までであることと地表面までの表層地盤による増幅があることを考えると 30 ~ 50% 程度過小評価されたものと考えられるので、震災の帯内の地表面最大速度はその広い範囲で 130 cm/sec 以上に達していたものと考えられる。つまり、この結果は、TKT（JR 鷹取駅）や FKA（大阪ガス葺合）における観測速度レ

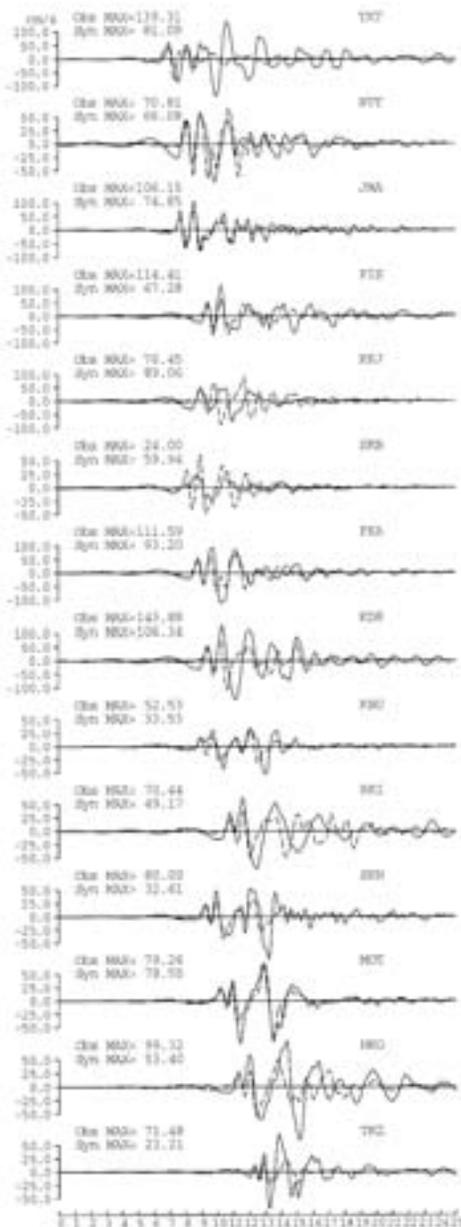


図 4 三次元有限差分法により計算された震源域内の各観測点での再現速度波形（破線）と観測波形（実線）の比較。

Fig. 4 Comparison of the observed velocity waveforms (solid lines) in a near-source region with those simulated by a 3-dimensional finite difference method (broken lines).

に対する破壊能が最大なのである。逆に、最大加速度は大きい最大速度は大きくない観測波では、破壊するのに必要なエネルギーが不十分であるため、木造構造物から中層RC構造物まで広い周期範囲の構造物に深刻な被害を与えることはできないのである。

ところで、これまでの建物の被害予測手法では、観測地動の強度指標（例えば最大加速度や最大速度）をまず選択し、その観測地動強度とその観測点周辺の被災度（例えば大破・崩壊率や大破 + 1/2 中破率）との相対関係を同定した、いわゆる被害関数を用いることが多かった。しかし実際には、被害率の高いところでは観測地動がなかなか得られず精度の高い被害関数を同定することが難しいという問題がある。また地動強度を代表する指標として何が適切か、被害率を求める領域のサイズはどの程度が適切か、など実際は容易に確定できない前提条件のもとでこれらの被害関数は評価されている。

そこで著者らは、より定量的に被害を再現でき、被害予測に用いることのできる構造物モデルを構築するため、松島・川瀬（2000）の求めた再現波を用いて、神戸市灘区・東灘区の階数別・年代別RC造建物の観測被害率を再現するような構造物モデル群を策定した（長戸・川瀬，2001a）。以下にそのプロセスを概説する。

はじめに構造物モデルの終局耐力の推定手法について記述し、次に用いた建物被害調査データとそれに基づき算定した被害率（以下、観測被害率）について述べる。さらに非線形応答解析に用いる建物モデルの概要を記述した後、これらに基づいた建物耐力の推定結果を示す。最後に推定した耐力を用いて解析領域の被害分布を算定し、兵庫県南部地震の実被害との比較を行う。

長戸・川瀬（2001a）では既存RC造建物の耐力を以下のような手順で推定している。

- 1) 兵庫県南部地震のRC造建物の被害調査結果（日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会，1996）に基づき、観測被害率を求める。
- 2) 設計基準に基づき建物モデルを設定する。本

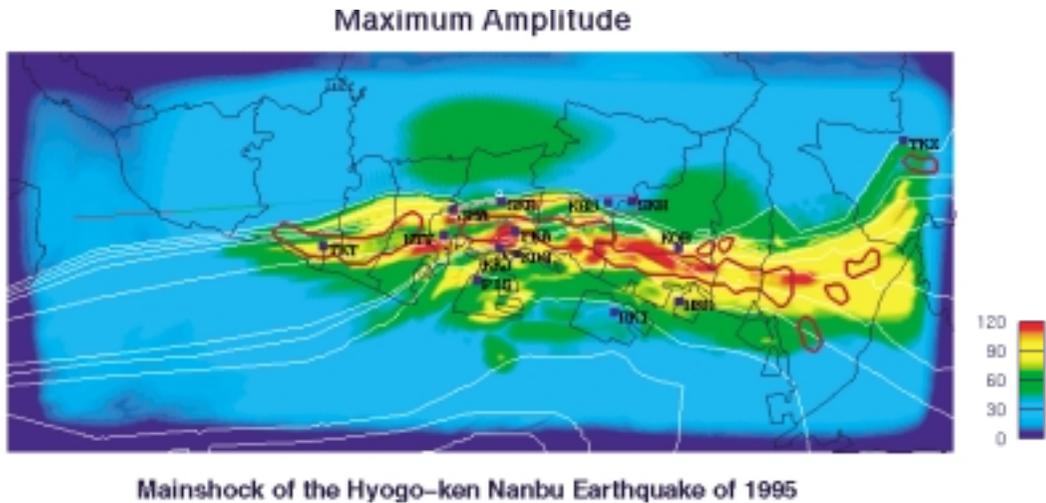


図 5 計算された大阪層群上面（S波速度 400m/sec）での再現波の最大速度（cm/sec）分布．赤線内は震度Ⅶの領域．

Fig. 5 Peak velocity distribution of strong motions calculated at the surface of the Osaka Group Formation with S-wave velocity of 400m/sec. Red lines an represent areas with the JMA seismic intensity of VII.

論では、これを標準建物モデルと定義し、耐力推定の基準とする。

- 3) 標準建物モデルの地震応答解析を行い、設定した破壊クライテリアに基づきモデルの被害の有無を決定し、被害率を求める（以下、解析被害率）。
- 4) 観測被害率と解析被害率を比較し、有意な差があれば、モデルの耐力を変更して地震応答解析を行い、新たな解析被害率を得る。これを解析被害率と観測被害率が一致するまで繰り返す。

観測被害率の算定には日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会の兵庫県南部地震でのRC造建築物の全数調査の結果を用いた。調査は神戸市灘区・東灘区での震度Ⅶの区域内に建つRC造建築物、全3911棟（3534棟は一般建物、377棟はピロティ形式建物）について行われており、階数別、建設年代別のデータとなっている。まずその特性が一般建物とは異なるピロティ形式建物は除外する。この一般建物データについて大破および倒壊と判定された棟数を被害棟数とし、それを全棟数で割ったものを観測被害率と定義する。こ

こで、1階建および14階建以上の建物、建設年代区分・建物階数等が不明なデータは除外し、最終的に3341棟のデータを用いた。その際1981年の改正建築基準法施行を踏まえて、建設年代で1981年以前（以後、旧耐震）と1982年以降（以後、新耐震）の2つに分けて被害率を算定した。また、後のモデル化に合わせ3・6・9・12階建を代表とした4種類の建物群の観測被害率を算定する。具体的にはn階建のモデルはn階建および(n±1)階建の建物被害率を代表するものとする。図6にこうして算定した観測被害率を示す。従来からいわれているように中層建物（6・9階建）の被害率が比較的高く、また新・旧耐震で有意な差があることがわかる。なお、12階建モデルに関しては、新耐震の方が旧耐震より被害率が大きくなっているが、これは母数が少ないためで有意なものではない。なお建物数でいうと3・6階建モデルで全体の9割以上を占めている。

解析には3・6・9・12階建に対応した4種類のモデルを用いる。モデルは1本棒多質点せん断型モデルで、各層の復元力特性はD-tri型とし、減衰は瞬間剛性比例型（その時々々の復元力の傾きに

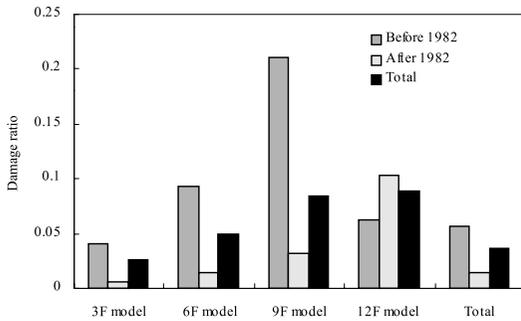


図 6 瀬・東瀬区における RC 造建築物の被害調査結果から算定した階数別・建築年代別観測被害率。

Fig. 6 Observed damage ratios for different numbers of floors and different construction ages calculated from the damage survey conducted in Nada and Higashinada Wards.

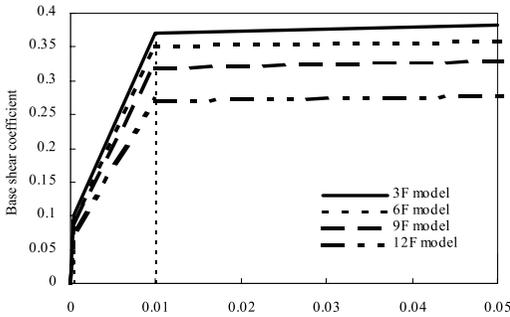


図 7 仮定した標準建物モデル（3・6・9・12 階建）の D-tri 型復元力特性。横軸は層間の相対変形角，縦軸は最下層の層せん断力係数 = 最下層の水平せん断力を建物重量で基準化した値。

Fig. 7 Assumed nonlinear restoring-force characteristics of a degrading tri-linear type for the standard building models with 3, 6, 9, and 12 floors.

The horizontal axis shows the relative drift angle in the lowest floor while the vertical axis shows the base-shear coefficient, that is, the shear force normalized by the building weight.

比例するタイプ)で5%とした。モデルの設定にあたっては、3階建 RC 造建物・12階建 RC 造建物の設計例(日本建築学会, 1992)を参考にした。

D-tri 型の第 2 降伏点の耐力を終局耐力と考える。標準建物モデルの復元力特性を図 7 に示す。解析の詳細については省略する。このモデルに対する入力地震動は前述の松島・川瀬(2000)の再現強震動である。

解析被害率の算定にあたっては、以下のような仮定を用いる。

- 1) 建物群の耐力にばらつきを与え、同一レベルの地震動でも、被害の有無が生じるとする。その建物耐力のばらつき(確率密度)関数として Shibata(1980)が求めた対数正規分布を用いる。
- 2) RC 柱の実験結果に基づき、最大層間変形角が $1/30\text{rad}$ 以上(階高を 3m とすれば 10cm 以上の変形)になったモデルが大破以上の被害を受けたものとする。N33°W 成分・N57°E 成分どちらかの結果がこの条件を満たせばよい。
- 3) ある再現波について被害を受けたと判定された弱いモデルの存在比率を合計したものをその地点での解析被害率とする(各建物階数・建設年代別)。
- 4) 実建物データに基づき各計算地点での建物存在比率を求め、それを重み関数として各再現波毎に得られた解析被害率を合計したものをそのモデル(建物階数・建設年代別)の解析被害率とする。

以上の仮定のもとで、はじめに標準設計耐力を与えたモデルの被害率を求め観測被害率と比較した。その結果、解析被害率の方がかなり高く、既存 RC 造建物群は標準設計耐力よりも大きな耐力をもっていることがわかった。そこで標準設計耐力と実建物耐力の比を α とし、 α を変えながら解析被害率が観測被害率にほぼ一致するまで解析を繰り返した。その結果最適な α が図 8 のように得られた。図 9 にはその時の各モデルの解析被害率を観測被害率と比較して示す。両者はよくフィットしている。ここで推定された α は旧耐震の 9 階建モデルを除き 1.0 よりも大きく、既存 RC 造建物は設計値よりも実際には大きな耐力をもつことがわかる。低層モデルほど α の値は大きい

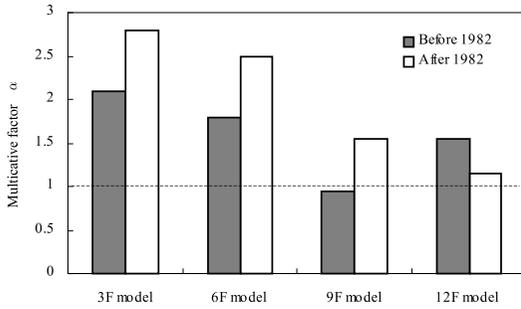


図 8 解析被害率が観測被害率に一致するように求めた標準建物耐力と実建物耐力の比。

Fig. 8 Ratios of the actual ultimate strengths with respect to the standard (design) ultimate strengths determined by fitting the theoretical prediction of damage to the observed damage.

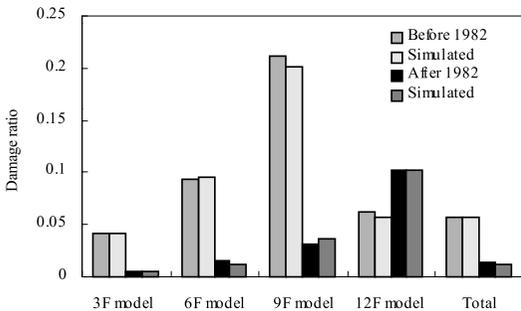


図 9 推定された実建物耐力を用いて求めた解析被害率と観測被害率の比較。

Fig. 9 Comparison of the observed damage ratios with those obtained from building models with the estimated ultimate strengths.

これは、低層建物ほど耐力算定には考慮されていない非構造壁の寄与が大きいためと推察される。

最後に、ここで推定された建物モデル群による平面的な解析被害分布を示し、その妥当性を検証する。ここでは、町丁目データから計算メッシュ (160 m × 80 m) に建物棟数データを与え、それに基づきメッシュ毎に各モデルの存在比率を求め、この比率をその地点で求めた各モデルの解析被害率に掛け合計したものがそのメッシュの全解析被害率であるとした。この全解析被害率分布を観測

被害率分布と比較して建設年代別に図 10 に示した。(a) は旧耐震の被害率分布で、いわゆる震災の帯の形成が見られる。観測被害率分布と比べ解析被害率分布の方が広い範囲で被害がでているものの、全体的な傾向はよく再現できている。(b) は新耐震の場合であるが、その被害率は小さく全体としては観測事実と対応している。しかし(a)同様観測に比べ広範囲に被害がでている傾向にある。これは、観測被害率では際だって被害率の大きな地区が存在することによる。これには社会的な要因が考えられよう。

以上の建物モデルによる被害率計算の結果、設計上の標準的な建物耐力を考えると、観測被害率よりもはるかに高い被害率が計算されてしまうこと、しかしその耐力を相当量増大することにより、階数別・建設年代別の観測被害率を再現することができることがわかった。なお 9 階建以上の構造物については観測被害率も低く必要な耐力の割増率も小さかった。シミュレーション結果の被害率の空間分布は観測結果とほぼ対応し、図 5 と図 10 を比較すると建物被害が顕著な領域は推定地動 (大阪層群上面) の最大速度レベルでやはり 90 ~ 100 cm/sec 以上の領域に対応することがわかる。この構造物モデル群は兵庫県南部地震における神戸市の構造物の強度特性をモデル化したもので、強震動の構造物破壊能を計る尺度となり得るものである。この構造物モデル群を地震動の評価や被害予測に用いる利点は、地震動の個々の特徴を反映した被害予測が可能なこと、建物の特性がわかっているならばそれを反映させた予測が可能なこと、被害関数構築の際に問題となる諸々の仮定に依存しないことなどである。以下ではその検証結果の一例を示す。

IV. 建物被害予測モデルの検証

本章では、前章で構築した建物被害予測モデルの検証の一例として、2000 年 10 月 6 日鳥取県西部で発生した鳥取県西部地震 ($M_{JMA}7.3$) で得られた震源域強震動を用いた検討結果を示す (川瀬・長戸, 2000b)。この地震はマグニチュードが兵庫県南部地震と同等であるにもかかわらず、震源域

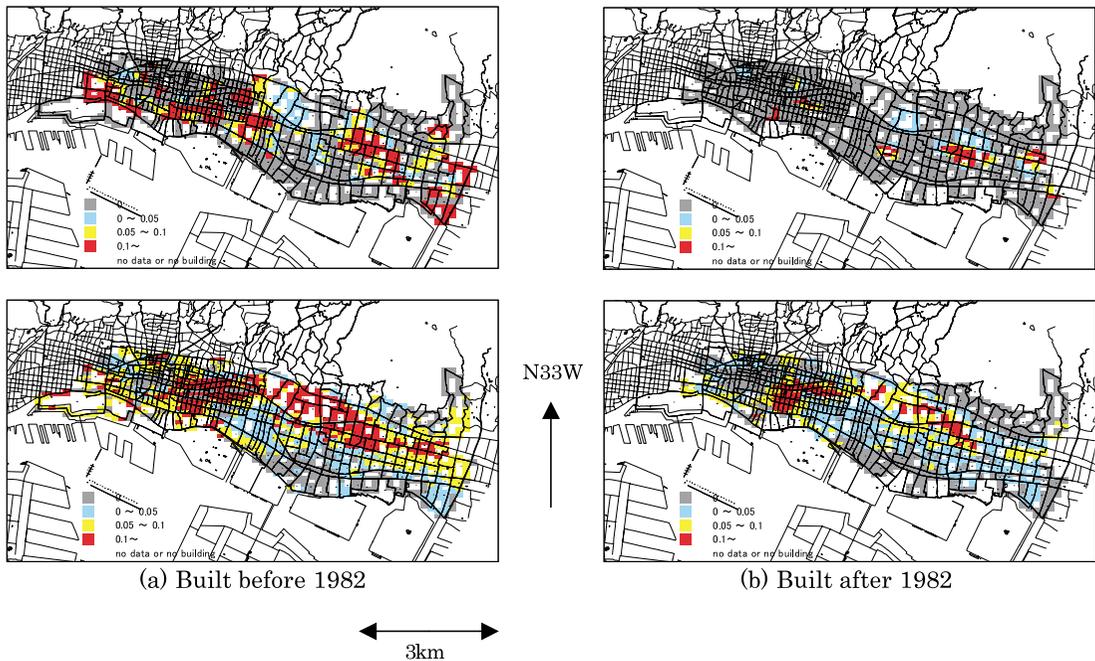


図 10 推定された建物モデル群による平面的な解析被害分布（上）と観測被害率分布（下）の比較（モデルは 1981 年以前と 1982 年以降）。

Fig. 10 Comparison of the observed damage distributions (upper panel) with those obtained from building models with the estimated ultimate strengths (lower panel) for buildings built before 1982 and after 1982.

において二百数十棟程度の木造家屋を大破・崩壊させたにとどまり、建築構造物に対しては大きなインパクトは生じなかったことで着目されている。

鳥取県西部地震では防災科学技術研究所の強震観測ネットワーク、K-Net および基盤強震観測ネットワーク KiK-Net により多数の強震記録が観測された。そのうち震源域での観測記録を入力としてモデル構造物群の非線形応答解析を行い、その被害率を評価した。図 11 に解析に用いた観測点を示す。図 12 にはそのうち代表的な 3 点における加速度波形を示す。図 13 にはその波形を周期 20 秒でローカットして積分した速度波形を示す。いずれも上から NS 成分、EW 成分、UD 成分である。その最大加速度は 300 ~ 930 Gal、最大速度は 20 ~ 110 cm/sec の範囲に分布している。強震部分の継続時間は主破壊域が比較的小さいことを反映して全体に短く、多くの観測点ではコー

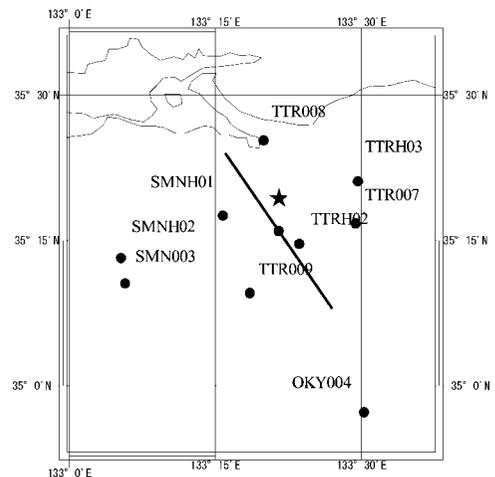


図 11 鳥取県西部地震の観測強震動の構造物破壊力評価に用いた震源域の観測点。

Fig. 11 Strong motion observation sites in the near-source region of the Tottori-ken Seibu earthquake used for their damage potential analysis.

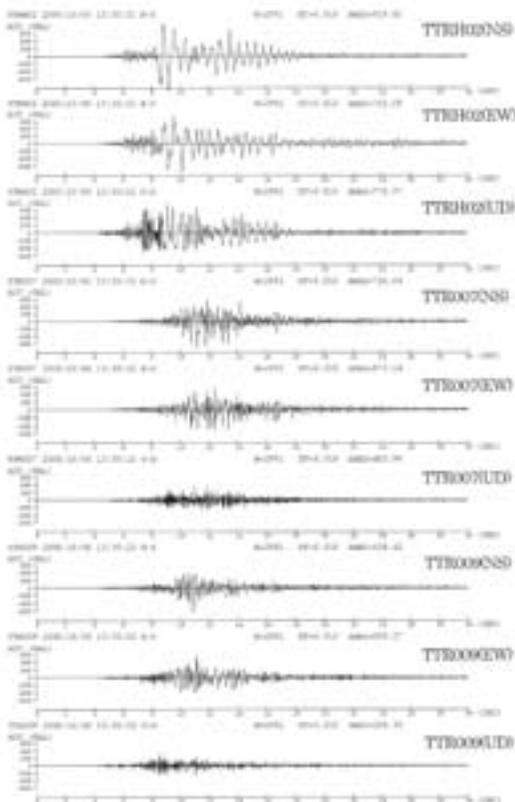


図 12 震源域の代表的な 3 地点 (TTRH02, TTR-007, TTR009) における観測加速度波形 (NS・EW・UD 各成分)。

Fig. 12 Accelerograms observed at three representative stations in the near-source region (NS-, EW-, and UD-components)

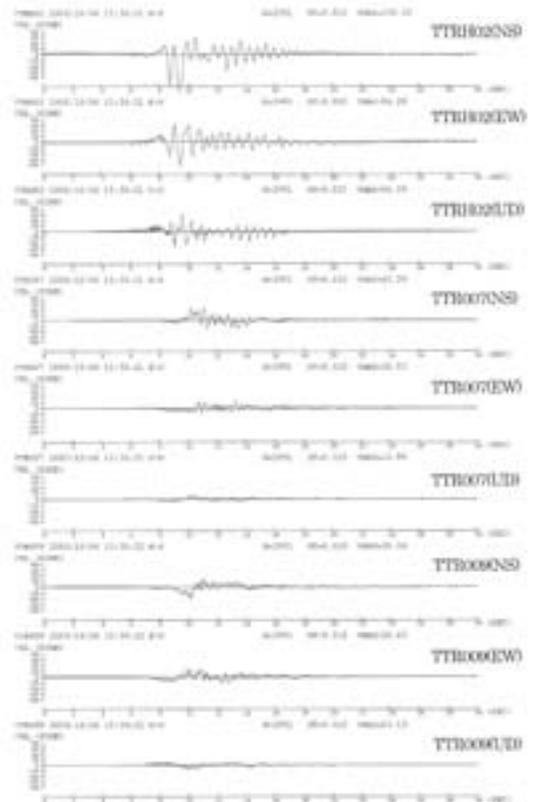


図 13 震源域の代表的な 3 地点での観測加速度波形 (図 12) を周期 20 秒でローカットして積分して得た速度波形 (NS・EW・UD 各成分)。

Fig. 13 Velocity waveforms calculated by integrating the accelerograms shown in Fig.12 with a low-cut filter at 0.05 Hz (NS-, EW-, and UD-components)

ダを含め 10 ~ 15 秒である。図を一見して明らかなのは短周期成分に富むことであり、速度波形になおしてもなお、かなり短周期成分の卓越が目立つ。

これら観測された震源域の強震動がどの程度の構造物破壊能をもっているかを把握するため、前章で述べた RC 造モデル構造物群を用いて、非線型応答解析を行った。図 14 には震源域の代表的な記録 9 地点の加速度波形 (NS・EW) を、耐力の頻度分布を考慮したモデル構造物群に入力した場合の大破以上の被害率を兵庫県南部地震の再現波を用いた計算結果と比較して示す。図から、鳥取

県西部地震の場合トータルの被害率で見るとほぼ兵庫県南部地震の灘・東灘での被害率に相当する被害が予測されている。しかし、この鳥取県西部地震の推定被害率はすべて TTRH02 (日野) の地表記録によるものである。この記録は図 13 を見ればわかるように周期 1 秒付近の地動が著しく卓越しており、その周期域では兵庫県南部地震の再現地動に匹敵する応答スペクトルを有している。この周期 1 秒のスペクトルは、公開されている地下構造から、この地点固有の軟弱な表層地盤による増幅で生じたものと推定されている (川瀬, 2001)。TTRH02 以外の震源域の記録は構造物を大破せし

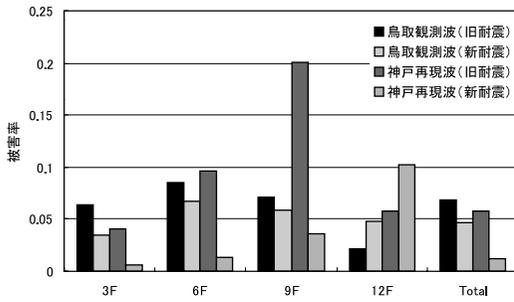


図 14 兵庫県南部地震の灘区・東灘区での再現波をモデル構造物群に入力した場合の解析被害率 (= ほぼ観測被害率) と鳥取県西部地震の震源域での記録 9 波を入力した場合の計算被害率の比較(モデルは 1981 年以前と 1982 年以降)。

Fig. 14 Comparison of the estimated damage ratios for the Tottori-ken Seibu earthquake for 9 observed strong motion data and those for the Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake for simulated strong motion data in Nada and Higashinda Wards, which is nearly equal to the observed damage ratios (built before 1982 and after 1982).

める破壊力はなく、実質的に震源域で大破した RC 造構造物がなかったことと対応している。なお TTRH02 は山間のキャンプ場に設置されており周辺に人家はほとんど存在していなかった。

同様な強震動の構造物破壊力の検討は 1999 年の台湾集集地震に対しても行っている(川瀬・長戸, 2000a)。また、著者らの研究グループは予測への応用として、この RC 造建物被害予測モデルを仮想福岡地震による強震動予測結果(伊藤・川瀬, 2001)に適用し、その被害を予測している(長戸・川瀬, 2001b)ので参照されたい。

V. 被害軽減へ向けた展望

以上のような内陸地震の震源域の強震動特性と、それによる一般構造物への大被害の生成原因について重要な知見をまとめると以下ようになる。

- 1)被害に直結する震源域の強震動は 1 秒を中心としたやや短周期(0.5 秒 ~ 2 秒)が卓越した大振幅速度パルスで特徴づけられる。
- 2)定量的被害予測のためには、この大振幅速度

パルスを増幅するような地下構造、特にやや深い地下構造の影響を的確に評価する必要がある。

- 3)震源域において一般構造物に大被害を生成するレベルは最大加速度 800 cm/sec^2 以上、かつ最大速度 100 cm/sec 以上と考えられる。
- 4)日本の耐震設計された建物が実際に保有している耐力は計算上の耐力を大きく上回っている。そのおかげで設計で考慮しているよりもはるかに大きなレベルの入力があっても被害はあの程度ですんだと考えられる。

では、兵庫県南部地震以降の建築物の耐震設計はどのような方向に向かおうとしているのであろうか。まず基本理解として、1981 年以降のいわゆる新耐震と称される規定で耐震設計されている建物については、総被害率が 1 % 程度にとどまったことから、「現行の規定は問題なし」というのが公式見解であることを指摘しておきたい。すべてはそこからスタートしている。しかしながら、この結果オーライの見解は大きな問題を包含している。それについては後で論じる。

上記公式見解の論理的帰結として、「あの大被害は大部分が既存不適格 = 新耐震以前の建物に生じたものである」とされることになる。したがって今後の建築物被害の軽減策としては、もっぱら既存不適格建築物をどう補強して現行規定レベルまで向上させるかという施策が講じられる。そのため耐震診断を促進し、補強できるものは耐震補強を行い、不可能ならば建替えるといった方向で対策が考えられ、実施されている。しかし、学校や公共施設については予算的な手当てもあって、着実に補強・建替えが進行中であるが、民間所有の建物についてはほとんど進んでいない。特に危険だとすぐにわかる建物ほどそれを明るみに出たくないという力が働くので、何のインセンティブもない自主的な改善には大きな限界があることは明らかである。最近では政府が個人の耐震補強費用を補助する予算を考慮中と報道されているが 10% 程度の補助でどの程度の効果があるか疑問であらう。

木造家屋を含む我が国の建物ストックのうち既

存不適格の建物が依然として大多数を占めており、その耐震補強が極めて困難であるにもかかわらず、防災対策上は極めて重要であることは論を待たない。しかし、先に述べたように、この既存不適格の診断と補強のパラダイムはすべて現行の耐震規定が正しいとして構築されている。ここに大きな問題がある。

上述のように、兵庫県南部地震は震源域の大被害は大振幅速度パルスによって生じることを教えてくれている。これは近代建築にかなりの被害をもたらしたカリフォルニアのノースリッジ地震でも同じように指摘されている。しかるに現行の規定では入力地震動としてはそのようなパルス状の波は想定されておらず、比較的震源から離れた地点で観測された波形の平均的な加速度応答スペクトル特性をモデル化したものとなっている。このスペクトル特性から全周期帯域でランダムな位相特性を与えて波形を作ると、兵庫県南部地震の震源域のような速度も加速度も大きなパルス状の波形にはならず、加速度は大きい（といっても地動で 400 cm/sec^2 程度）が速度は小さな波形にしかない。そのような波形ではここで示した長戸・川瀬（2001a）の建物モデル群に被害を与えることはできない。

長戸・川瀬モデルが現実にて建てられている構造物の実耐力を的確に表わしているとする、これはつまり、設計に用いている地震入力は震源域での現実の入力と比べるとずっと非力であるにもかかわらず、そういう地震入力に対して耐震設計すると、現実の建物としてはそれよりもずっと強力な震源域の地震入力に対しても大丈夫なものができてしまうということを意味している。いいかえると設計時のお約束とその結果出来上がる建物の実力との間に乖離があるということである。

どんな設計だろうが結果として丈夫な建物ができれば安全で結構じゃないか、と思われるかも知れない。しかし、こういう現状から派生する重大な問題が2つある。第一に、上述のように大振幅速度パルスは全国至るところで同じように生じるわけではなく、震源域になり得る場所がかつ地盤がそれを増幅するような場所に限定される。した

がって直下に大きな震源がありそうになく、地盤が良好な場所で兵庫県南部地震の震源域と同じレベルの地震動を想定する必然性は全くない。しかるに現行規定ではそもそも、こういう強力な破壊力を有する地震動に対して設計しているのではないから、この極めて明白で顕著な地域性を取り入れるようにはなっていない。なお、これは入力レベルを大きくする必要のある場合だけが問題ではなく、より低い入力しか考えなくてもいい場合も同様に問題であることに注意されたい。それは事の表裏に過ぎない。むしろ地域的にいえば現状では過大評価となっている地域の方が広く全国を覆っているといえる。

既存不適格の建築物についても現行の耐震診断・耐震補強の方法論では「新耐震なみ」が目標であるから、その中にここで示したような震源域に特徴的な大振幅速度パルスに対する対策をどうするかといった考えはない。同様にそういう危険性のない地域では新耐震なみでは過大であるという考えもない。すなわち、今日全国的にいわば不要不急の耐震補強が税金を使って多数進行中なのである。上述のように、「余分に丈夫ならいいではないか」という意見は当然有り得よう。しかし本当に危険な地震動が襲うかも知れない地域が現行の耐震補強で充分である保証もないのである。

第二に、現行と同じ設計プラクティス・施工プラクティスを永遠に継続する限りは同じ安全性が保証されるといってもよいが、逆に実態と異なる入力（＝設計用地震力）でも結果（＝現実の建物）が何故か安全となるような設計・施工をしている以上、つまり理念と現実の論理的対応が切れてしまっている以上、規定に対するいかなる変更もどういう効果をもたらすが全く予期できないので、実質的に同一品質を保証していくことが困難である。いいかえると、このようなモデルと現実の乖離を放置しておく限り、規定を改定した場合、次の内陸大地震で同じような実大確認試験を経るまでは安全性が確認できないということである。この第二の点は、今年度より施行された改正建築基準法において特に大きな問題となる。何故ならその改正は「現行規定はOK」という前提でなされ

たものであるにもかかわらず、建前の耐震計算結果さえ規定を満足すれば、現行で複雑に規定されていた最低基準の類（少なくともこれだけは鉄筋を入れなければならない等、仕様規定と呼ばれるもの）は一切考慮する必要がなくなったからである。

日本はその経済力にものをいわせて世界中から資源を集め、使いたいだけの資本を投下してその建築ストックを蓄積してきた。建築物の耐震規定もその右上りの成長神話とともに発展してきたといつてよい。結果としてそれは兵庫県南部地震でも1%以下の大破・崩壊率として妥当性を証明したかに見える。しかしここで見てきたように、それは設計パラダイムとしての妥当性が証明されたのではなく、結果的にそういう耐力が与えられていることが証明されたに過ぎない。したがって、本当の意味で優れた耐震設計を行うためには、自然のリアリティに即した設計パラダイムに変換していくことが必要だと考えられる。それは結局、これから経済的に斜陽化していくしかない日本において、効率的に資本を活用するという正しい方向に一致するものであろう。現状では結果オーライに安住して既存パラダイムを守ることに終始し、構造工学のすべてを結集してその震源域強震動に立ち向かおうとする動きには全くなっていない。

VI. まとめ

以上、1995年兵庫県南部地震を対象とした強震動の再現とそれに立脚した被害予測モデル構築およびその検証結果を概観し、さらにそれを踏まえた建築構造物の被害軽減に向けての将来展望について著者の見解を述べた。主な知見をまとめると以下のとおり。

- 1) 兵庫県南部地震の震源は複数個のアスペリティで特徴づけられ、それから発生した速度パルスが三次元盆地構造で増幅されて、特徴的な大振幅速度パルスとなったものと考えられる。表層の増幅を考慮すると、震源域内の地表面最大速度は130 cm/sec以上、最大加速度は800 ~ 1000 cm/sec²以上と推定された。
- 2) 構造物の被害をモデル化するため、再現され

た強震動を用いて神戸地域での構造物群を模擬した非線型応答解析を実施した結果、標準的な建物強度では観測被害率よりも高い被害率が得られるが、その耐力を割増することにより観測被害率を再現することが可能であった。その場合の被害率の空間分布は観測結果とほぼ対応し、被害集中域は推定地動レベルで90 ~ 100 cm/secの領域に対応していた。

- 3) この構造物モデル群を用いて鳥取県西部地震での観測波形を用いて被害を推定したところ、1地点を除きほとんど被害が生じないことがわかった。これは実被害の少なさを説明している。
- 4) これらの推定結果を踏まえ、さらに耐震設計の現状と建物ストックの現状を考慮すると、今後の建築物の被害低減に向けての方策については、本質的な解決が望まれる状況であることを示した。

以上のことから、極論すれば我々は阪神・淡路大震災以降も依然として次の大震災が起こるのを待っている状況にあり、ほとんど有効な対策は立てられていないといつてよい。地震調査推進本部が平成16年度作成をめぐりに推進している全国を概観する強震動予測地図を活用して、被災危険度の高い地域を対象に、もう一度震災低減戦略を立て直し、実効性のある施策を実施していく必要がある。そのための重要な第1歩として「構造物破壊挙動観測全国ネットワークの敷設」を提案したい。これをK-Netに対応してBuildingの頭文字からB-Netと名付けよう。その目的は構造物が破壊に至るまでの動的崩壊挙動を定量的に把握することである。したがって、大きな震源域地震動が予測される地域の耐震性の劣る建物を重点的に選定することが重要である。また挙動は極めて大きな非線形問題となるので、少なくとも各階に1点を置くような多点観測が必須である。これまでの耐震設計の妥当性を検証し、性能保証設計を確立するためには、実大構造物による経験が欠かせない。実地震による被害建物の発生はある意味で壮大な実大実験である。しかるに、そのデータは定量化されることなく、みすみす捨てられているのが現状である。K-Net、KiK-Netのデータで強

震動地震学が急速に発展していることから見ても、B-Net のデータによって建物被害軽減に向けた新たな展望が開かれることは間違いない。

文 献

- 遠藤秀典・渡部史朗・牧野雅彦・卜部厚志・阿蘇弘生・是石康則・江尻寿延(1996) 兵庫県芦屋市における芦屋川測線の反射法弾性波探査。地質調査所月報, **47**, 79-94.
- Graves, R.W. (1996) Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 1091-1106.
- 伊藤茂郎・川瀬 博(2001) 統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用。日本建築学会構造系論文集, No. 540, 57-64.
- 岩田知孝(1996) 大阪盆地の地下構造と地震動。第24回地震震動シンポジウム, 日本建築学会地盤震動小委員会, 5-20.
- Kawase, H. (1996) The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect", constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves. *Seismo. Res. Lett.*, **67**, 5, 25-34.
- 川瀬 博(2000) 兵庫県南部地震の強震動。地震荷重内陸直下地震による強震動と建築物の応答。日本建築学会地震荷重小委員会限界状態WG, 319p.
- 川瀬 博(2001) 鳥取県西部地震の強震動特性とその構造物破壊能。2000年10月鳥取県西部地震による災害に関する調査研究。平成12年度科学研究費補助金研究成果報告書(課題番号12800013, 研究代表者 梅田康弘), 165-180.
- 川瀬 博・林 康裕(1996) 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション。日本建築学会構造系論文集, No. 480, 67-76.
- 川瀬 博・松島信一(1998) 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション。日本建築学会構造系論文集, No. 514, 111-118.
- 川瀬 博・長戸健一郎(2000a) 1999年9月台湾集集地震の強震動特性と構造物破壊能。日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造, 195-196.
- 川瀬 博・長戸健一郎(2000b) 鳥取県西部地震の震源域で観測された強震動とその構造物破壊能。日本建築学会九州支部研究報告, 第40号・1 構造系, 221-224.
- 川瀬 博・松島信一・Graves, R.W.・Somerville, P.G. (1998) 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析。兵庫県南部地震の際の震災帯の成因。地震2, **50**, 431-449.
- 松島信一・川瀬 博(2000) 1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション。日本建築学会構造系論文集, No. 534, 33-40.
- 長戸健一郎・川瀬 博(2001a) 建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル。日本建築学会論文報告集, No. 544, 31-37.
- 長戸健一郎・川瀬 博(2001b) 被害予測用動的構造物群モデルと福岡市の被害予測。2001年度日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, 構造, 21068.
- 日本建築学会(1992) 地震荷重 地震動の予測と建築物の応答。日本建築学会。
- 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会(1996) 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。日本建築学会近畿支部, 245p.
- Shibata, A. (1980) Prediction of the probability of earthquake damage to reinforced concrete building groups in a city. *Proceedings of 7th WCEE, Istanbul*, **4**, 395-402.

(2001年9月3日受付, 2001年10月15日受理)