

1995年兵庫県南部地震の建物被害率による 地震動分布の推定

山口 直也¹・山崎 文雄²

¹学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

1995年1月17日発生した兵庫県南部地震は、阪神・淡路地域に甚大な被害をもたらした。この地域での構造物被害を評価するためには、地震動の強さの面的な分布を推定することが重要である。しかしこの地震では、被害の激しかった地域で強震記録がほとんど得られておらず、観測値のみからの分布推定は困難であり、他の方法が必要となってくる。そこで本研究では、被災地域全域にわたって同一基準で被災度判定を行っている建物被害調査結果を用いて、低層建物と最大加速度、最大速度などの地震動強さとの関係を調べ、地震動強さに対する低層建物の被害推定式を構築し、建物被害率による地震動強さの面的分布の逆推定を試みた。

Key Words: *the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, building damage, strong ground motion, fragility curve, geographic information system*

1. はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震は阪神・淡路地域に過去に経験したことがないほどの被害をもたらした。地震による構造物被害を評価していくためには、被災地域での地震動の強さの面的な分布を推定することが重要である。しかし、この地震では様々な機関により多数の強震記録が得られているが、被害の甚大な地域では強震記録はほとんど得られていない。このような場合、これらの計器観測の結果のみからその地域の地震動分布を求めることは非常に困難である。

兵庫県南部地震の被災地域における地震動強さの分布の推定に関しては、これまでに、翠川・藤本¹⁾が地形条件と墓石の転倒率との関係に基づいて被災地域での墓石の転倒率の分布を求め、これを用いて神戸市およびその周辺での最大速度分布を推定している。また、藤本・翠川²⁾は各種被害データを重合して阪神・淡路地域での震度6の分布を推定している。太田ら³⁾は被災地域におけるアンケート調査結果を用いて、兵庫県南部地震の計測震度分布を推定している。林ら^{4,5)}は地盤モデルのFEM解析による再現地震動と低層建物の被害調査結果を用いて、最大地動速度と低層建物被害との関係式を構築し、これに基づいて建築物の被害率から兵庫県南部地震の被

害地域全域での最大地動速度分布を推定している。

本研究では、これらの研究と同様に兵庫県南部地震の被災地域における建物被害と地震動の強さ(最大加速度(PGA), 最大速度(PGV), SI値, 計測震度)の関係を調べ、地震動強さに対する低層建物の被害推定式を構築し、低層建物被害率による地震動強さの面的な分布の推定を行い、観測記録と比較検討を行う。また中高層建物に関して同様の手法で構築した被害推定式を用いて、地震動強さを推定し低層建物による結果と比較検討する。なお本研究で用いている建物被害調査結果には、建物の構造形式や建築年代などの情報が含まれていないことから、被災地域において建物強度の分布は一樣であると暗に仮定した議論を行っている。今後、本研究結果と自治体による建物被害調査結果を用いて、構造形式や建築年代を考慮した被害推定式を構築する予定であるが、その結果を用いて本研究の地震動分布の補正を行うことを考えている。

2. 低層建物の被害推定式

(1) 使用したデータ

兵庫県南部地震では、関西地震動観測研究協議会、気象庁、建設省、運輸省、JR、大阪ガス、関西電力など

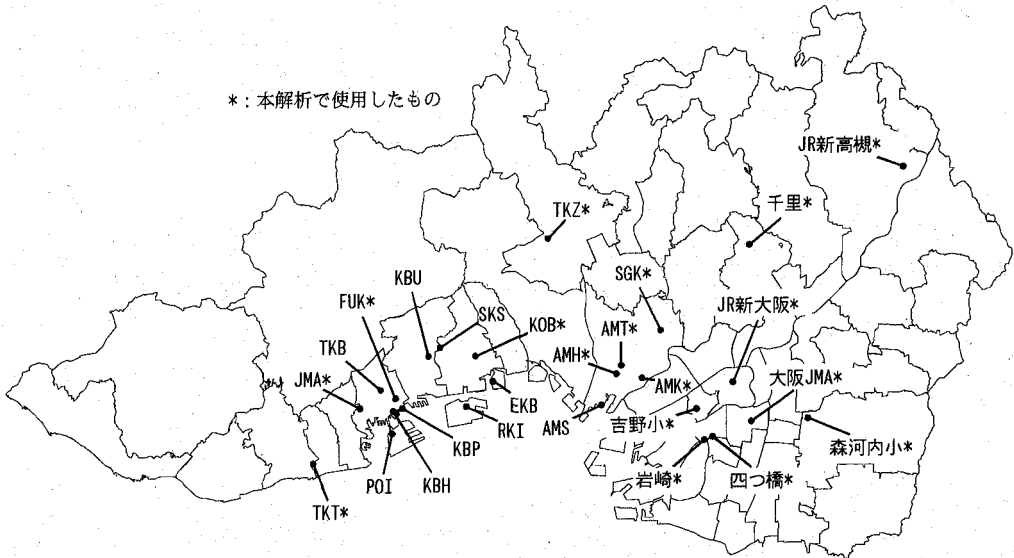


図-1 解析に用いた地震記録の観測位置

多数の機関により貴重な強震記録が得られているが、本研究では被害推定式を構築するための地震動強さの値として、ここで公表されている地盤上での記録を用いている。振り切れた記録についても、復元⁹⁾によって最大値が予測されているものは含めている。

また兵庫県南部地震の建物被害の調査は、様々な機関によって行われている。本研究では、建物被害から阪神地域全域にわたる地震動強さを推定するため、この地域を統一された評価基準を用いて被災度の調査をしている結果を使う必要がある。震災復興都市づくり特別委員会（日本都市計画学会関西支部、日本建築学会近畿支部都市計画部会）⁹⁾および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果を、建設省建築研究所が数値化したデータ¹⁰⁾（以下、建築研究所データ）は、神戸市から宝塚市・尼崎市に至る阪神地域の建物について、統一された評価基準を用いて被災度調査しているので、これを用いることにする。建築研究所の被害分類は、全壊または大破、中程度の損傷、軽微な損傷となっているが、本研究ではこれを、全壊、半壊、一部損壊として扱っている。また本研究では、被害の小さい箇所地震動強さを推定式に反映させるために、建築研究所のデータにない地域の強震記録も使っているが、その地域の建物被害は自治体の調査結果^{11),12)}を使っている。

(2) 地震動強さと建物被害

今回、強震記録として、17地点の記録を使用している。図-1に本研究で地震動分布を推定するために使用した強震記録が得られた点を示す。この中には今回使用



図-2 地震計により代表される周辺の町丁目の選び方の例
(神戸海洋気象台と葺合供給所の周辺)

していない点も含まれているが、除外した理由としては、地表面における記録でなかったり、建築研究所のデータにおける建物棟数が少ないなどがあげられる。この結果、液化状の発生した臨海地域の地震動データは使用していない。

建物の被害推定式を構築するにあたり、地震計設置地点の周辺における建物被害を計算する必要がある。建築研究所データによる場合は、対象とする地震計のある町丁目を中心としてその地域の被害の状況をよく表すような範囲を町丁目単位で選んだ。その際、地盤条件が同じになるようにし、さらに震源断層からの距離についても考慮した。地域の選び方の例を図-2に示す。神戸海洋気象台(JMA)は、その位置する町丁目ですべての棟数が300棟以上あること、また地形が小高い丘となっており、周

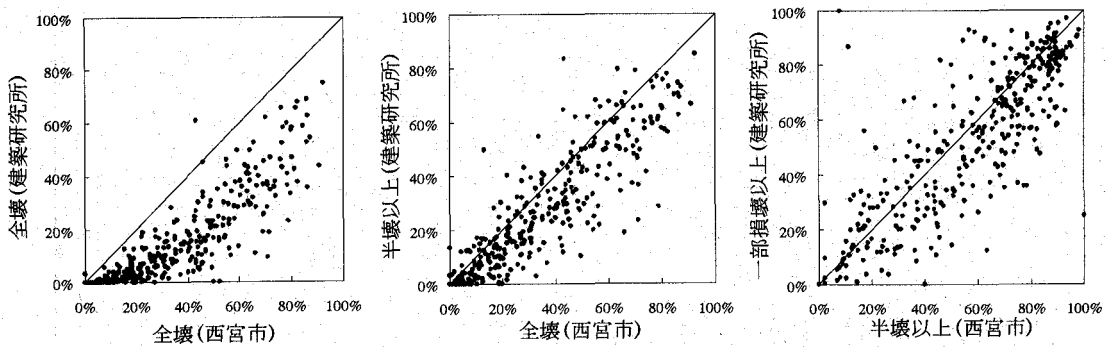


図-3 異なる被災度調査間の被害率の比較 (西宮市, 町丁目単位)

辺地域を広げると地形条件が異なってくることから1つの町丁目だけの建物データを用いた。一方、葺合供給所(FUK)は、近くに低層・独立住宅が少ないことと周囲の町丁目の面積が小さく、地形的にも変化していないことから周囲の町丁目の建物データも加えることにした。建築研究所データの範囲外の地震計に関しては、建物被害調査結果が市ならびに区(大阪市について)単位であり、また被害件数が少なく有意な被害率を求めるためにも、その地震計がある、市ならびに区を被害を計算する際の地域とした。

次に上記の方法で決めた地域について建物被害を出すわけだが、ある地域の建物被害を考えた場合、木造建物は棟数が多いのでその被害率は建物全体の被害率と似た傾向を示す。建築研究所データは、建物の階数とその用途による分類になっており構造種別は不明であるが、本研究では、低層建物(2階建て以下)の独立住宅の多くが木造建物であると仮定し、これの被害率を求めて木造建物の被害率としている。なお、火災による焼失建物データは、建物数から除外している。自治体による調査結果を用いる地域については、建築研究所と自治体とで被害の評価基準が異なるので、自治体の調査結果による被害率を建築研究所のデータ相当の数値に換算するために、以下のような操作を行っている。

まずこれらの地域では地震動の大きさが小さいので、被害が出ている建物は全て木造建物であるとする。その自治体の木造建物総数は、自治体の住宅総数¹³⁾に建築研究所データにおける低層・独立住宅の割合、すなわち、建築研究所データの低層・独立住宅総数をその調査対象建物データ総数で除した率を乗じたものとする。このようにして算出した数値を使って木造建物の被害率(全壊、半壊以上)を計算する。次に、西宮市^{14,15)}について町丁目ごとに、建築研究所データにおける低層・独立住宅被害率(木造建物被害率に相当するもの)と自治体の固定資産税減免のための調査結果における木造建物被害率を

比較する。比較したのは、

- ①建築研究所データの全壊率と市による全壊率
- ②建築研究所データの半壊以上の割合と市による全壊率
- ③建築研究所データの一部損壊以上の割合と市による半壊以上の割合

である。その結果を図-3に示す。その結果を見ると、①の被害率が20%くらいまでの範囲では、建築研究所の被害率は市の被害率の3分の1ほどになっており、この範囲では回帰直線の勾配はおおよそ0.3であった。同様の検討を周辺の自治体について行ったところ、回帰直線の勾配は0.3~0.6の範囲にあり、0.3と0.5の場合について被害推定式を構築して結果を比較したが、両者の差はほとんど見られなかった。また、②、③では建築研究所の被害率と市の被害率がほぼ同じであると言える。これらより、

- ・建築研究所データの全壊率=市による全壊率×0.5
- ・建築研究所データの半壊以上の割合=市による全壊率
- ・建築研究所データの一部損壊以上の割合=市による半壊以上の割合

と見なし、この式により自治体の調査結果による各被害率を建築研究所のデータ相当の数値に換算する。以上のような手順によって算出した地震計周辺の木造建物被害率と、その地震計の地震動の観測値を表-1に示す。なお、本研究は、地震計による水平2方向の観測値のうち大きい方の値¹⁶⁾を用いている。

(3) 低層・独立住宅の被害推定式

前節で求めた地震動強さと被害率の関係から、低層・独立住宅の被害推定式(フラジリティーカーブ)を求める。ある地震動 x のときに全壊、半壊以上、一部損壊以上の各被害が発生する確率 $P(x)$ は、標準正規分布の累積確率 $\Phi(x)$ を用いて、対数正規分布(x が計測震

表-1 建物被害推定に用いた地震計と強震記録および周囲の低層・独立住宅被害率

略称/ 市区名	観測点	観測機関	PGA	PGV	SI	Intensity	全棟数 (低・独) (棟)	全壊 (%)	半壊以上 (%)	一部損壊 以上 (%)
			(gal)	(cm/s)	(cm/s)					
AMH	尼崎港	運輸省港湾技術研究所	507	56	63	5.7	442	0.714	5.95	26.9
AMK	尼崎高架橋	建設省土木研究所	294	49	56	5.7	496	3.33	4.76	25.0
AMT	尼崎市立竹谷小学校	関西地震動協議会	321	50	58	5.7	939	1.49	11.0	49.8
SGK	総合技術研究所	関西電力	652	49	72	6	1,407	0.273	9.27	45.1
TKT	JR鷹取駅	鉄道総合技術研究所	655	119	139	6.5	660	57.4	85.7	95.3
FUK	糺合供給部	大阪ガス	806	119	150	6.5	122	17.7	25.7	48.7
JMA	神戸海洋気象台	気象庁	818	91	115	6.4	308	5.79	18.5	71.0
KOB	本山第1小学校	関西地震動協議会	770	78	74	6.1	641	18.4	33.4	63.9
TKZ	JR宝塚駅	鉄道総合技術研究所	685	85	92	6.2	416	11.6	21.3	42.8
北区	JR新大阪駅在来線	鉄道総合技術研究所	216	41	48	-	22,696	0	0	6.17E-02
福島区	吉野小学校	関西地震動協議会	211	31	37	5.4	14,505	6.89E-03	1.38E-02	0.834
中央区	大阪管区気象台	気象庁	81	19	16	4.5	17,232	0	0	5.80E-03
西区	環状線四つ橋	建設省土木研究所	270	30	27	5.1	16,153	9.29E-03	1.86E-02	8.05E-02
西区	岩崎供給部	大阪ガス	172	24	29	5.1	16,153	9.29E-03	1.86E-02	8.05E-02
吹田市	千里供給部	大阪ガス	299	29	37	5.4	72,288	6.92E-03	1.38E-02	0.44
高槻市	JR新高槻変電所	鉄道総合技術研究所	297	-	-	-	69,063	0	0	1.74E-02
東大阪市	森河内小学校	関西地震動協議会	212	27	33	5.3	112,557	2.22E-03	4.44E-03	1.51E-02

表-2 低層・独立住宅の被害推定式の係数

Rank	PGA (cm/s ²)			PGV (cm/s)			SI (cm/s)			計測震度		
	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²	λ	ζ	R ²
全壊	7.23	0.511	0.659	4.95	0.429	0.912	5.18	0.461	0.827	6.74	0.403	0.821
半壊以上	6.82	0.429	0.722	4.65	0.382	0.885	4.84	0.400	0.844	6.44	0.351	0.835
一部損壊以上	6.50	0.431	0.719	4.34	0.358	0.826	4.52	0.392	0.810	6.14	0.361	0.843

度 I の場合は正規分布) で表せると仮定した。
すなわち次式となる。

$$P(PGA) = \Phi((\ln PGA - \lambda) / \zeta) \quad (1)$$

$$P(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \quad (2)$$

$$P(SI) = \Phi((\ln SI - \lambda) / \zeta) \quad (3)$$

$$P(I) = \Phi((I - \lambda) / \zeta) \quad (4)$$

ここで λ , ζ は, $\ln PGA$, $\ln PGV$, $\ln SI$, I それぞれの平均値および標準偏差であり, 図-4 に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果を表-2 に示す。また, 全壊, 半壊以上, 一部損壊以上の各被害に対する被害推定式を図-5 に示す。図-5(a)は最大加速度, 図-5(b)は最大速度, 図-5(c)はSI値, 図-5(d)は計測震度に関するものである。この4つの地震動指標を比較すると最大加速度の決定係数 (R^2) が他の指標に比べて小さな値となっている。これは JR 鷹取駅周辺の被害率が最大加速度の値の割には(火災による被害は除いているが) 大きいことなど, 観測点のローカルな地点特性や波形のスペクトル特性の影響が大きいものと思われる。建物被害と地震動強度指標の関係については, 最

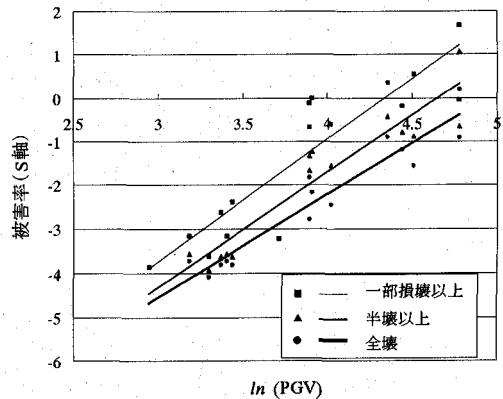
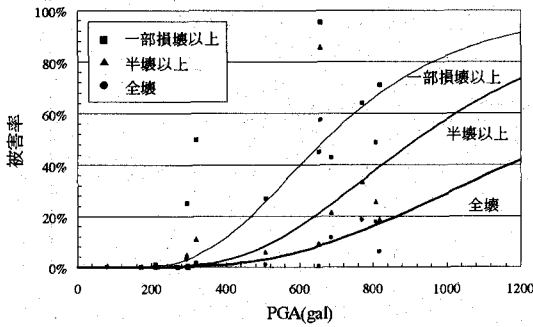
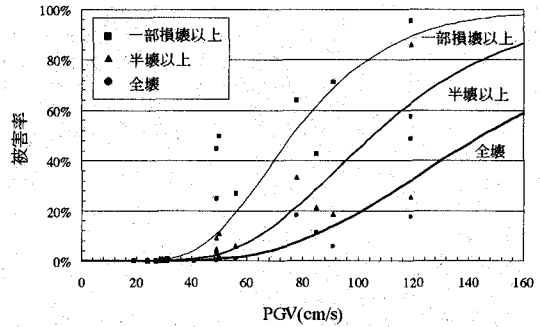


図-4 最大速度と低層・独立住宅被害率の関係の確率紙表示

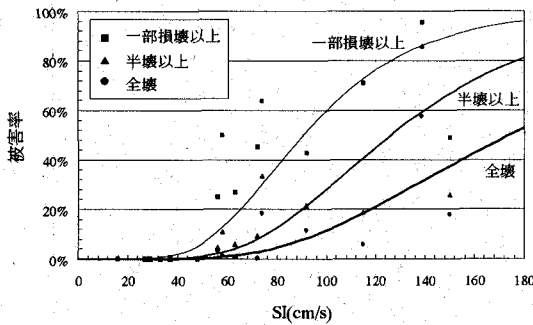
大速度や SI 値が最も被害との相関が良いとの研究もあるが^{17), 18), 19)}, 今回の結果のみから判断するのはやや難しいと思われる。



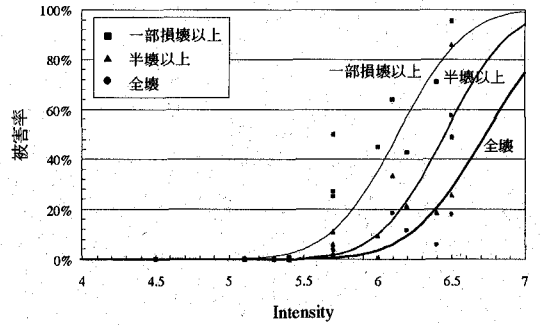
(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) SI値



(d) 計測震度

図-5 低層・独立住宅の被害推定式

(4) 他の方法との比較

文献 6)において林らは、建築研究所のデータと独自に推定した最大速度分布より、最大速度について建物の用途別・階数別の被害関数(被害推定式)を構築している。ここでは、その中の低層・独立住宅に関する被害推定式と前節で求めた被害推定式の中の最大速度に関するものを比較する。図-6に前節で求めた被害推定式と林らの被害推定式を実線と点線で示す。これを見ると、どの被害に対する被害推定式も立ち上がりは林らの方が早くなっており、逆に最大速度が大きいところに対する被害は、本研究の方が大きくなっている。これは、本研究の被害推定式では大阪市内等の被害の小さい地点のデータも考慮しているため、その点の値が式に反映されているものと思われる。また、林らの式は神戸市中央区の三宮周辺の地盤モデルによる応答解析結果の地震動分布と被害データを用いて構築しているのに対して、本研究では観測地震動とその周辺の被害データを用いて構築しているため、その違いが現れているものと思われる。

また、岡田・鏡味²⁾は、建築物・屋内収容物・屋外構築物など56項目の被害発生累積率および被害程度を表すバルナラピリティ関数を震度について構築している。

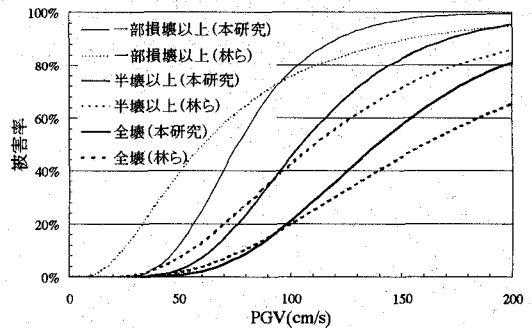


図-6 既往の低層・独立住宅に対する被害推定式との比較

その中には、木造建物についての関数があるが、これは現行の計測震度ではなく1978年の気象庁震度階に基づいたものであること、および、木造建物全般ではなく古い木造建物と新しい木造建物にわけて構築しているので、本研究のものと比較することは出来ない。これについては、今後、構造別・建築年代別の被害推定式を構築する際、比較を行いたいと考えている。

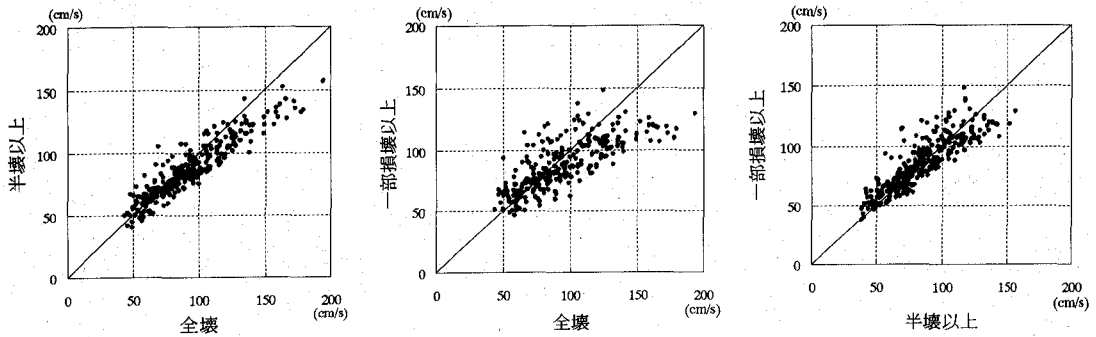


図-7 各被害率により推定した最大速度値の比較（西宮市の町丁目単位）

3. 兵庫県南部地震における地震動分布

(1) 低層・独立住宅の被害率による地震動分布

前章で各被害に対する低層・独立住宅の被害推定式を構築した。本章ではその結果と建築研究所の被災データを用いて阪神地域の地震動強さの面的な分布の推定を行う。前章で求めた推定式は木造建物に相当する建物の被害推定式であるので、建築研究所データのうち、木造建物に相当すると思われる低層・独立住宅の被害を使って地震動分布の推定を行う。はじめに町丁目ごとに低層・独立住宅について全壊率、半壊以上の比率、一部損壊以上の比率を計算する。この際、町丁目における低層・独立住宅総数から、火災によって損傷した建物数と被害が未調査・不明の建物数を引いた値が10棟未満の町丁目は推定の対象から外す。また、神戸市域は各町丁目の面積が狭く、建物数が推定の対象となる棟数に到達しない町丁目が多くなるので大字単位（丁目を無視した町単位）で推定を行う。このようにして計算した3つのレベルに対する被害率より、各地震動の指標について3つの推定値が得られる。

まず、町丁目ごとに得られた3つの地震動推定値を

- ①全壊によるものと半壊以上によるもの
- ②全壊によるものと一部損壊以上によるもの
- ③半壊以上によるものと一部損壊以上によるもの

について比較する。図-7に西宮市のPGVに関するものを示す。この図から、①より全壊と半壊以上の被害率からの値、③より半壊以上と一部損壊以上の被害率からの値は、それぞれほぼ等しく、②より全壊と一部損壊以上の被害率からの値にはばらつきが大きいことがわかる。この傾向は他の地震動指標や他市においても同様に見られた。ここで①において、全壊率から求めた最大速度値の方が130cm/s程度以上の範囲で大きくなっている。この理由としては、回帰に用いた最大速度の最大値が119cm/sであるので、それ以上の範囲は外挿になるため推定精度が落ちることが考えられる。全壊率と半壊率の

関係が図-5(b)の関係と異なる場合には、差を生ずることはやむを得ず、どちらの推定結果が精度が高いとも言えないであろう。

以上の考察より建物被害率に応じて、信頼性が高いと思われる複数の推定値を組み合わせ、その町丁目に対する推定地震動の値を得ることとする。

- Case1: 全壊および半壊以上の建物数=0の時、一部損壊以上による推定値を用いる。
- Case2: 全壊建物数=0、半壊以上の建物数≠0の時、半壊以上と一部損壊以上による推定値の平均を用いる。
- Case3: 全壊建物数≠0の時、全壊と半壊以上による推定値の平均を用いる。

このようにして推定した地震動強さの面分布を図-8に示す。図-8(a)は最大速度、図-8(b)は計測震度に関するものである。図-8(b)による震度7の地域は、気象庁が発表した震度7の帯²⁾(図-9)と比較的よく似た分布の傾向を示している。多少見られる差異は、被害調査そのものが気象庁と震災復興都市づくり特別委員会では異なること、また気象庁は被害率のみから震度を推定しているのに対し、本研究では地震記録と建物被害率の対比で推定している違いなどが原因と考えられる。どの地震動強さの推定においても、海岸地域など建物数が少ないため空白になっているところがあるが、このような地域については、地盤条件や断層からの距離を考慮しながら、周辺の町丁目の値から推定したり、低層・独立住宅以外の建物の被害を用いて推定したり、とくに埋め立て地など海岸近くの液状化を起こしていると思われる地域については、観測値をそのまま適用するなどの操作が今後の課題としてあげられよう。

また文献1)で翠川・藤本は墓石の転倒率を用いて最大速度分布を、文献3)で太田らはアンケート結果を用いて計測震度分布を推定しているが、これらの推定結果と比較したところ、全体的に同じような分布をしているが、その中でもとくに最大速度や計測震度の大きな地域

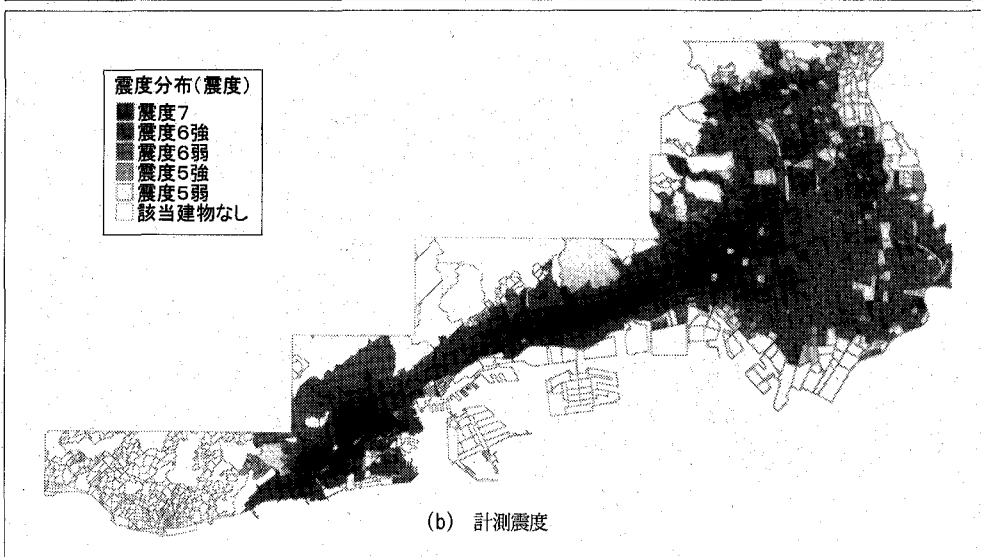
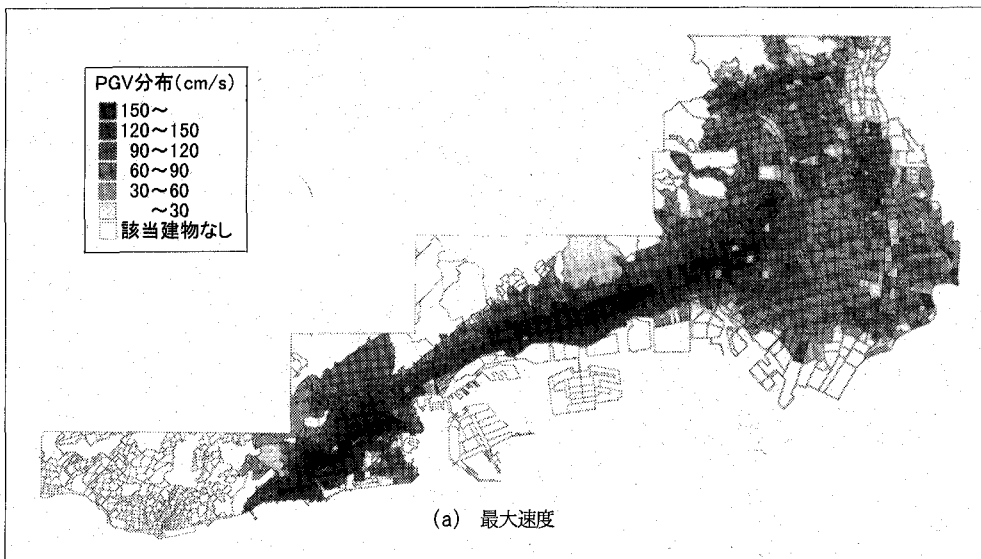


図-8 低層・独立住宅被害から推定された地震動分布

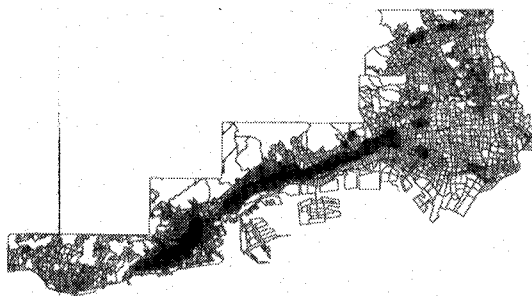


図-9 気象庁発表の震度7の帯²⁾

の分布がよく一致していた。

(2) 他の建物の被害率による地震動分布

前節で低層・独立住宅の被害率による地震動強さの面的な分布の推定を行ったが、そのとき建物棟数の不足のために推定できない地域が存在した。ここではその地域の地震動の値を補うために建築研究所データにおける他の建物の被害を用いて低層・独立住宅と同様の方法で地震動の推定を行い、前節の推定結果と比較検討を行う。

まず、独立住宅以外の用途も含めた低層建物全体の被害率を用いて推定を行う。建物被害を計算する範囲は低層・独立住宅と同じものを用い、自治体の調査結果を用

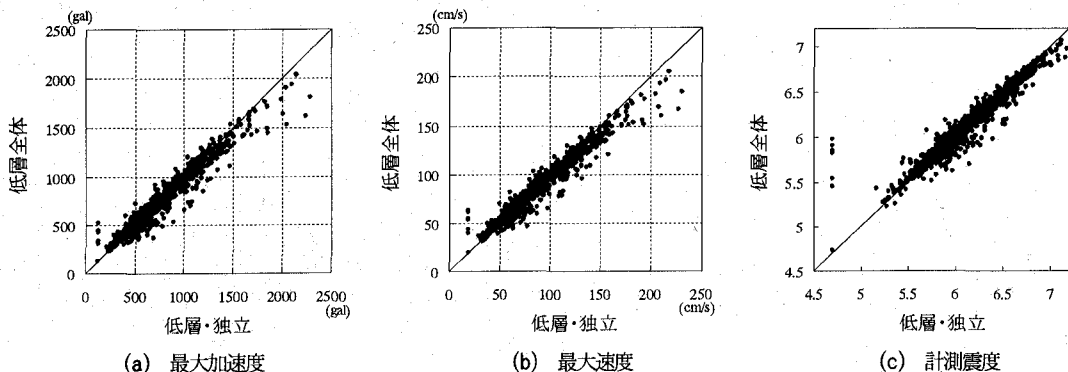


図-10 低層・独立住宅と低層建物全体による地震動推定値の比較

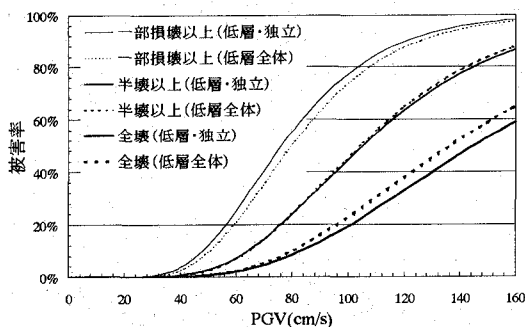


図-11 低層・独立住宅と低層建物全体による被害推定式の比較(最大速度)

いている地域に関しては、建物総数を求める際に自治体の住宅総数に低層建物の割合を乗じ被害数は低層・独立住宅の場合と変わらないものとして計算している。図-10は低層・独立住宅による地震動推定値と低層建物全体によるものを各地震動の指標について比較したものである。これを見ると両者の地震動の推定値はほぼ一致している。これは主として低層・独立住宅の棟数が多いためとも考えられる。しかしながら、建物被害率を計算する対象を低層建物全体とすることで建物棟数はかなり増加しており、低層建物全体の被害率には低層・独立住宅以外の建物の影響が多分に現れていると考えることが出来る。そして本研究では、同じような建物属性を集めるということで、はじめ建築研究所データにおける低層・独立住宅を用いて被害推定式を構築し、地震動値の推定を行った。しかし、対象建物棟数不足で推定地震動値を得ることが出来ない地域が存在するため、これらの地域の地震動値を補う目的で、建築研究所データの低層建物全体を用いて低層・独立住宅と同様の方法で被害推定式の構築を行ってみた。その結果、図-11のように両者の被害推定式はほぼ同じようなものとなった。このことより、低層・

独立住宅による地震動推定値と低層建物全体によるものがほぼ一致するのは、低層・独立住宅が割合として多いことの影響だけではないと考えることが出来る。またどの指標においても地震動の大きい方で低層建物全体による推定値が小さくなっているが、これは対象建物を増やしたことで被害数、母数とも増えたが、母数の増加の比率の方が大きいので低層・独立住宅だけでは被害率が大きかった地域の値が少し小さくなったためと思われる。以上より建築研究所データの範囲全域において、低層・独立住宅被害を用いたときに推定できなかった地域の地震動を低層建物全体による値によって代替できるものと考え、低層・独立住宅の値に低層建物全体の値を追加したものが図-12である。低層建物全体の被害率を用いることで新たに推定された地域は神戸市域の港湾部や垂水区などである。図-8(a)と図-12(a)、図-8(b)と図-12(b)を比較すると新たに推定された地域の値は周辺の町丁目と比較してもほぼ妥当な値と考えられるが、港湾部については液状化の影響もあるので必ずしも良い推定結果とも言えない。

次に中高層建物(3階建て以上)全体の被害率を用いて推定を行う。その際、対象とした地震計は建築研究所データの範囲内のものにしぼり、その中で建物被害データ数に関して、低層建物での推定で用いた計算範囲と大幅に異ならず、対象建物棟数が50棟を越えるように建物被害の計算範囲を決定し推定を行っている。図-13は中高層建物の被害率で推定した地震動強さの値と低層・独立住宅の被害率によるものを比較したものである。どの指標を見てもばらつきが大きくなっているのがわかる。最大加速度については示していないが、ここで示している指標よりもさらにばらつきが大きくなるに比較することが出来なかった。ばらつき要因として、中高層建物は3階建て以上ということで鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物に相当するものと考えることが出来るが、これ

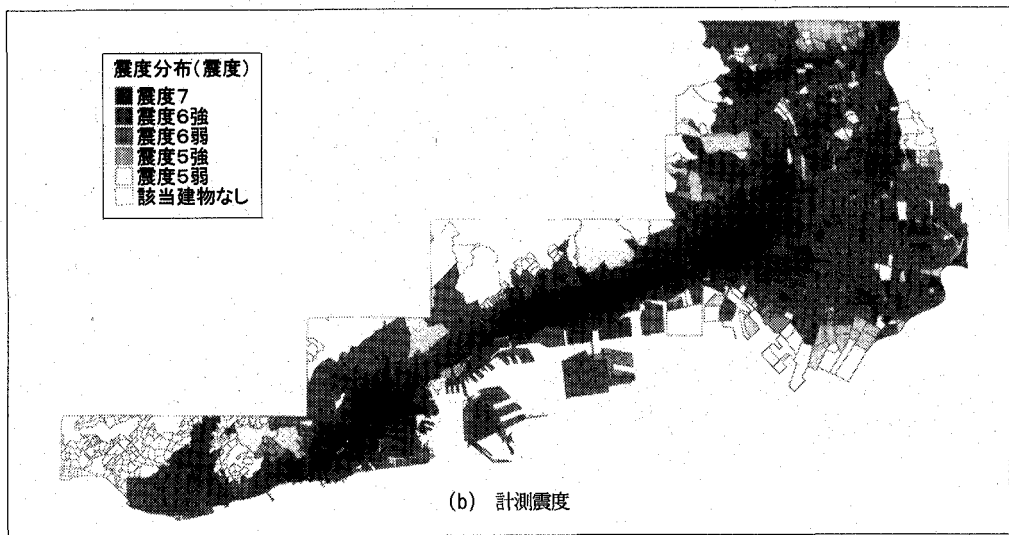
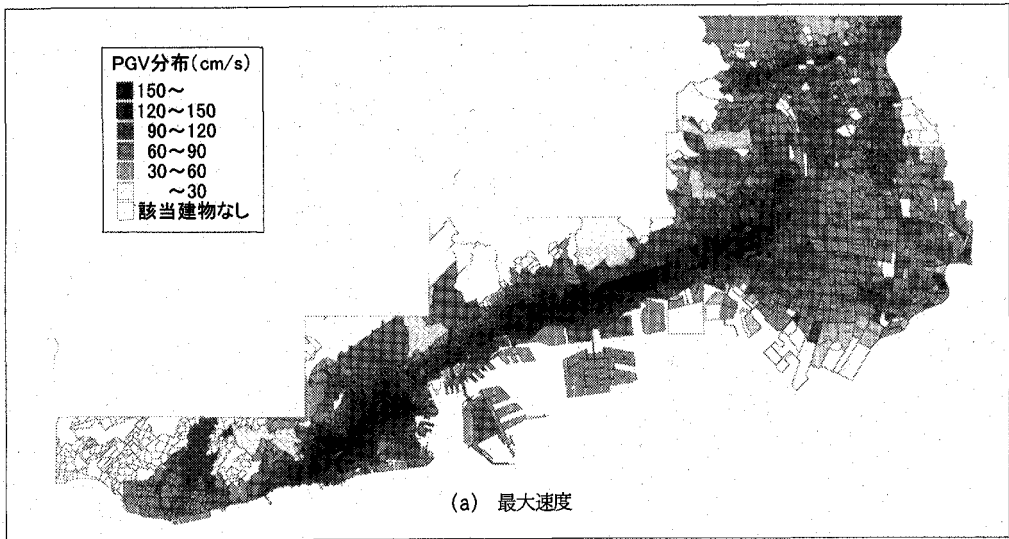


図-12 低層建物全体のデータを用いて低層・独立住宅データでは求まらなかった地域を追加した推定地震動分布

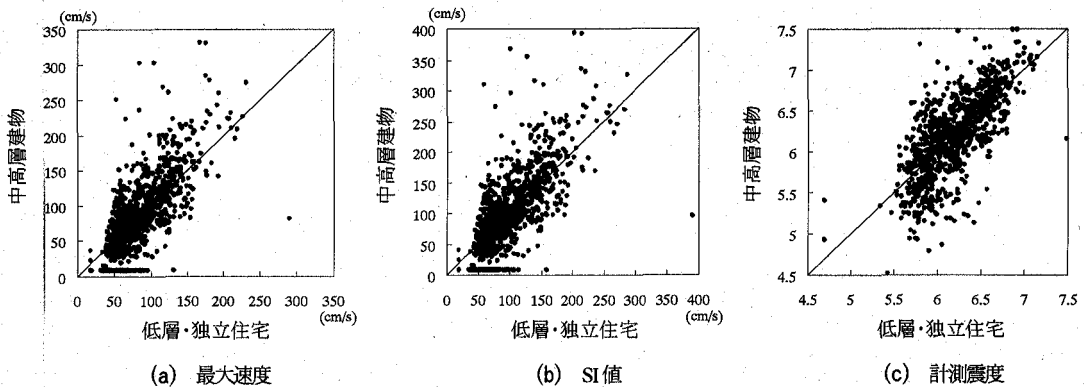
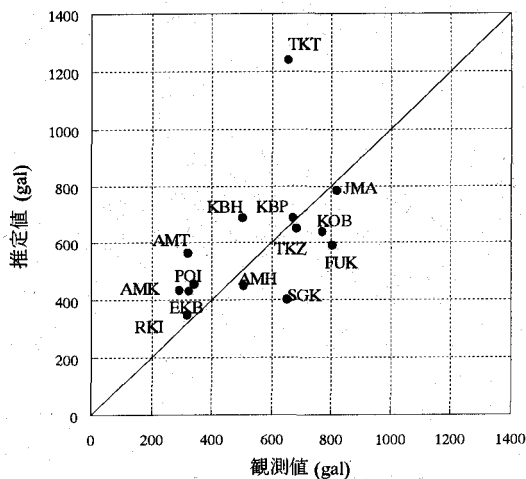
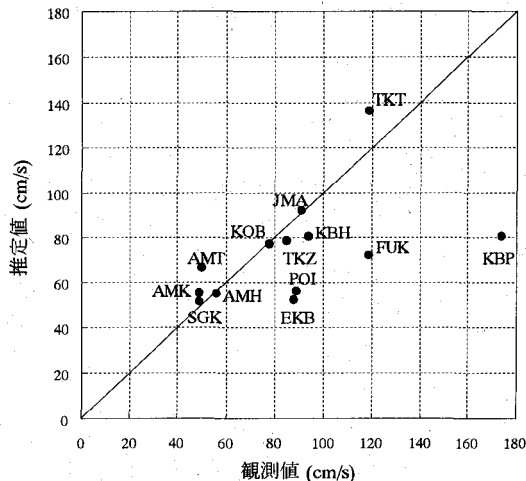


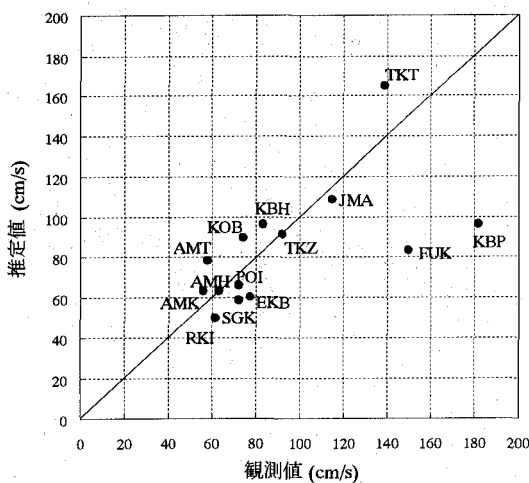
図-13 低層・独立住宅と中高層建物による地震動推定値の比較



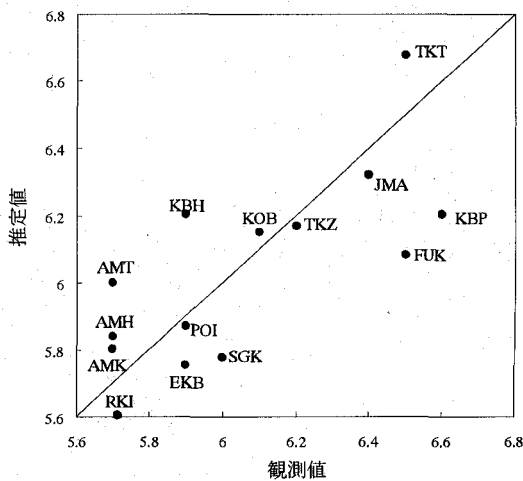
(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) SI値



(d) 計測震度

図-14 各地震動強度指標の観測値と推定値の比較

らの建物は木造建物ほど地震動の大きさによる被害の違いが顕著には表れず、ここで構築した被害推定式では建物被害と地震動の大きさの関係が表せていないためであろう。また大阪府域のように小さい地震動(被害率)のデータが反映されていないことも原因の1つと考えられる。このため、被害率から地震動の逆推定を行うのは困難であると思われる。最大加速度が他の指標よりもばらつきが大きくなっているが、これは最大加速度は短周期成分の影響を大きく受けるので、建物被害と地震動強さの関係通りにならない場合も多いと思われる。

(3) 観測値と推定値の比較

ここでは、推定された地震動強さの値を観測記録と比

較する(図-14)。推定値は低層・独立住宅の被害率より算出したものをベースに低層建物全体の被害率から出したもので一部追加したものをを用いている。また、比較した点は表-3に示した点である。ここに示した対象棟数は地震計が設置してある町丁目(神戸市域に関しては町単位)の低層・独立住宅数(KBH, KBP, POI, EKB, RKIは低層建物全体の棟数)である。比較した結果を見ると、JR 鷹取駅(TKT)と葦合供給所(FUK)はどの指標においても推定値と観測値のずれが大きくなっており、その他の点でも神戸港工事事務所(KBH)や神戸港第8突堤(KBP)など、指標によってずれが大きくなっているものがあるが、それら以外の点は推定値と観測値が比較的良好に対応している。JR 鷹取駅や葦合供給所

表-3 地震動の推定値と観測値を比較した地点

略称	観測点	観測機関	PGA (gal)	PGV (cm/s)	SI (cm/s)	Intensity	対象棟数 (棟)
AMH	尼崎港	運輸省港湾技術研究所	507	56	63	5.7	34
AMK	尼崎高架橋	建設省土木研究所	294	49	56	5.7	88
AMT	尼崎市立竹谷小学校	関西地震動協議会	321	50	58	5.7	57
SGK	総合技術研究所	関西電力	652	49	72	6	213
TKT	JR鷹取駅	鉄道総合技術研究所	655	119	139	6.5	11
FUK	葺合供給部	大阪ガス	806	119	150	6.5	23
JMA	神戸海洋気象台	気象庁	818	91	115	6.4	654
KOB	本山第1小学校	関西地震動協議会	770	78	74	6.1	939
TKZ	JR宝塚駅	鉄道総合技術研究所	685	85	92	6.2	209
KBH	神戸港工事事務所	運輸省港湾技術研究所	503	94	83	5.9	82
KBP	神戸港第8突堤	運輸省港湾技術研究所	672	174	182	6.6	82
POI	ポートアイランド	神戸市	341	89	72	5.9	177
EKB	東神戸大橋	建設省土木研究所	326	88	77	5.9	266
RKI	六甲アイランド	積水ハウス	320	-	61	5.7	239

で推定値と観測値のずれが大きくなるのは、地域的な建物特性の違いや木造建物数が少ないことなどが推定値に大きく影響してくるためと思われる。神戸港工事事務所や神戸港第8突堤の値がずれているのは、建物数が少ないのに加え、これらが埋め立て地域で液状化の影響を受け地震動の値が特異であるためと考えられる。また、最大加速度が他の3つの指標に比べてばらつきが大きくなっているが、これは最大加速度が被害との相関が低い短周期成分の影響を大きく受けるためもある。

4. まとめ

地震による構造物被害を評価するためには被災地域における地震動強さの面的分布の推定が必要であるが、強震記録数が不足している場合の推定法として、建物被害率による逆推定法を検討した。1995年兵庫県南部地震について、被災地域における低層・独立住宅の被害と地震動の強さの関係を調べて、最大加速度、最大速度、SI値、計測震度それぞれについて被害推定式を構築し、他の被害推定式と比較した。この推定式を用いて阪神地域の地震動強さの面的分布の推定を行った。その結果、木造建物の被害率に基づく地震動分布の推定は、建物が無い地域の扱いや被害率が大きい地域の推定値の取り扱いなど今後の課題となるべき点もあるが、全体的な分布を把握するのに有効であると思われる。また、低層建物全体および中高層建物について同様に被害推定式を構築し地震動分布の推定を行い、低層・独立住宅での推定値と比較検討した。これより、低層建物全体の被害を用いることで低層・独立住宅だけでは母数が不足して推定できない地域についても同程度の精度で推定できたが、中高

層建物については同様の方法での逆推定は困難であった。

このように、建物被害率からの地震動分布の逆推定は、兵庫県南部地震による木造建物被害のように母数が多く被害率が高い場合には有効な方法といえよう。

謝辞：本論文では日本都市計画学会、日本建築学会近畿支部都市計画部会および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災調査結果を、建設省建築研究所が数値化したデータをはじめとして、西宮市が行った固定資産税減免のための被災調査結果など、貴重な調査結果を利用させていただいた。また、本論文で使用している数値地図は、建設省建築研究所が建設省国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図 10000（総合）を複製したCD-ROM データに基づいて作成したものである（承認番号 平8総複，第26号）。

参考文献

- 1) 翠川三郎，藤本一雄：墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布，日本建築学会構造系論文報告集，第490号，pp.111-118，1996。
- 2) 藤本一雄，翠川三郎：被害分布から推定した兵庫県南部地震の震度分布とその解釈，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.97-100，1997。
- 3) 太田裕，小山真紀，中川康一：アンケート震度算定法の改訂—高震度領域—，自然災害科学，Vol.16，No.4，pp.307-323，1998。
- 4) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫，渡辺宏一：兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価，第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.89-92，1996。
- 5) 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率に基づく最大地動速度の推定，日本建築学会構造系論文報告集，第494号，pp.59-66，1997。

- 6) 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報告集, 第502号, pp.61-68, 1997.
- 7) 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会: 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996.
- 8) Kagawa, T., Irikura, K. and Yokoi, I.: Restoring clipped records of near-field strong ground motion during the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.18, No.1, pp.43-57, 1996.
- 9) 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.
- 10) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.
- 11) 大阪市消防局: 阪神・淡路大震災大阪消防活動記録, 1996.
- 12) 大阪府: 平成7年1月17日阪神・淡路大震災の記録, 1997.
- 13) 総務庁統計局: 平成5年住宅統計調査報告第3巻その27大阪府, 1995.
- 14) 山口直也, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の被害分析—その4西宮市における建築物被害のマクロ分析—, 生産研究, 第49巻7号, pp.28-31, 1997.
- 15) 山口直也, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の被害分析—その7GISを用いた西宮市の建物被害分析—, 生産研究, 第49巻11号, pp.7-10, 1997.
- 16) Ansary, M. A., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Statistical Analysis of Peaks and Directivity of Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, No.11, pp.1527-1539, 1995.
- 17) 安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄: 地震動の強さ指標による構造物損傷の評価, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.715-720, 1990.
- 18) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2299-2304, 1994.
- 19) Molas, G. L. and Yamazaki, F.: Neural Networks for Quick Earthquake Damage Estimation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, No.4, pp.505-516, 1995.
- 20) 岡田成幸, 鏡味洋史: 震度による地震被害系統評価のためのバルナラピリティ関数群の構成, 地震, 第2輯第44巻, pp.93-108, 1991.
- 21) 気象庁: 震度を知る—基礎知識とその活用—, 1996.

(1998. 5. 29 受付)

ESTIMATION OF STRONG GROUND MOTION IN THE 1995 HYGOKEN-NANBU EARTHQUAKE BASED ON BUILDING DAMAGE DATA

Naoya YAMAGUCHI and Fumio YAMAZAKI

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused unprecedented damage in Hanshin-Awaji area. In order to evaluate the damage of structures in this area, it is important to estimate the distribution of earthquake ground motion. However, since the number of strong ground motion records is not enough, it is necessary to estimate the distribution using other data sources. In this study, the relationships between the building damage and the ground motion indices (PGA, PGV, SI and JMA intensity) were constructed using the building damage data compiled by the Building Research Institute and the recorded motions. The fragility curves obtained for residential buildings were then employed to estimate ground motion distributions in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.