

実地震情報を考慮した建物被害推定式の更新手法の検討  
SUCCESSIVE UPDATE OF ESTIMATED BUILDING DAMAGE  
RATIOS BASED ON QUICK SURVEY DATA

星 幸江<sup>1)</sup>、丸山喜久<sup>2)</sup>、山崎文雄<sup>3)</sup>

Sachie HOSHI<sup>1)</sup>, Yoshihisa MARUYAMA<sup>2)</sup>, Fumio YAMAZAKI<sup>3)</sup>

1) 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻、博士前期課程

<sup>1</sup> Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba University

e-mail : s.hoshi@graduate.chiba-u.jp

2) 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻、准教授 博(工)

<sup>2</sup> Associate Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

e-mail : ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

3) 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻、教授 工博

<sup>3</sup> Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

e-mail : yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

**ABSTRACT:** After an earthquake occurrence, the building damage ratios are estimated using fragility curves constructed from the prior earthquake damage information. However, it should be noted that the fragility curves may sometimes provide less accurate estimations for recent earthquakes. In this study, a method for data synthesis to reconstruct fragility curves is proposed using the actual gathered damage information. Either the mean or the standard deviation of the prior fragility curve is updated based on collected building damage datasets.

**キーワード:** 被害推定式、実地震被害情報、リアルタイム地震防災システム、SI値

## 1. はじめに

地震発生後の被害分布の推定は、救命救助活動や復旧活動などに必要な情報として重要な役割を果たす。地震発生直後、地震観測ネットワークで得られた地震動指標値をもとに、対象建造物の被害程度は予測される<sup>1)</sup>。その際に、過去の地震被害の事例などをもとに構築された被害推定式を用いて、被害率が推定されることが多い。しかしながら、近年の地震においては、推定された被害率と実際の被害状況があまり一致していない場合もある。地震動指標値の取得に関しては、1995年兵庫県南部地震を契機に様々な機関が地震計ネットワークを整備している<sup>2),3)</sup>。その中には非常に高密度なものもあり、地震発生後に迅速に正確な指標値を得ることが可能となってきている。ゆえに、被害推定式が実際の被害をより正確に推定できれば、緊急対応体制の確立や二次被害拡大の防止などがさらに迅速に行えることが期待される。

一方で、情報通信関連の技術やコンピュータの性能が大幅に向上してきたことなどを踏まえて、地震発生直後に実際の被害情報を効率的に収集しようとする取り組みもなされている。インターネット、モバイル端末、GIS、GPSを組み合わせた情報収集システムが検討・運用されたり<sup>4)</sup>、リモートセンシング技術を用いて取得された画像から地震被害を把握することを目的とした研究<sup>5)</sup>も多数行われている。

る。

そこで、本研究では地震直後に被害情報が直接収集できたことを仮定して、地震動強さから推定される推定被害率を更新するための手法を構築することを目的とする。今回は、約4000箇所のSIセンサーを配備している防災システムSUPREME<sup>2)</sup>での運用を想定し、SI値での検討を行う。まず、被害推定の逐次更新手法に関する既往の研究に基づいて、数値シミュレーションを行う。次に、被害関数の平均値と標準偏差を更新する手法を提案する。1995年兵庫県南部地震後に構築された被害関数を、近年の実際の地震被害に基づいて更新し、被害推定式の精度向上について検討する。今回は2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震の5地震について試算し、本手法の適合性を検討する。

## 2. 既往の研究とその数値シミュレーション

能島ら<sup>6),7)</sup>は、地震動情報と実被害情報の統合処理を目指し、被害推定の逐次更新手法を提案している。全要素数 $M_T$ の構造物群において、被害が独立・一様・ランダムに発生すると仮定する。被害の程度が○、×の2段階で区別され、被害発生数 $n$ が被害確率 $p$ の二項分布に従うものと仮定する。さらに、地震直後にリアルタイムで得られる地震動強さ情報と被害推定式に基づいて被害確率 $p$ の即時推定が行われ、その平均値 $\mu_p$ 、標準偏差 $\sigma_p$ が与えられているとする。

いま、 $M_0$ 個の調査を実施し、 $n_0$ 個の被害が明らかになったものとする、被害確率 $p$ の事後平均値 $\mu'_p$ 、標準偏差 $\sigma'_p$ は、

$$\mu'_p = \frac{n_0 + n'_0 + 1}{M_0 + M'_0 + 2} \quad (1)$$

$$\sigma'_p = \sqrt{\frac{(M_0 + M'_0 - n_0 - n'_0 + 1)(n_0 + n'_0 + 1)}{(M_0 + M'_0 + 2)^2 (M_0 + M'_0 + 3)}} \quad (2)$$

ただし、

$$M'_0 = \frac{\mu_p(1 - \mu_p)}{\sigma_p^2} - 3 \quad (3)$$

$$n'_0 = \mu_p \left[ \frac{\mu_p(1 - \mu_p)}{\sigma_p^2} - 1 \right] - 1 \quad (4)$$

$M'_0$ と $n'_0$ は仮説的事前標本と呼ばれ、被害関数によって推定された被害確率の事前分布は $M'_0$ 個あたり $n'_0$ 個の被害が確認されたということと等価であると解釈される。

そこで実被害データが収集された際の被害率の逐次更新過程を数値シミュレーションにより検討する。使用する建物被害関数は、山口・山崎<sup>8)</sup>による式(5)を用いる。被害が発生する確率 $P(SI)$ は、標準正規分布の累積確率分布を用いて、対数正規分布で表せると仮定している。

$$P(SI) = \Phi((\ln SI - \lambda)/\zeta) \quad (5)$$

$P$ が半壊以上の被害が発生する確率のとき、 $\lambda=4.37$ 、 $\zeta=0.576$ と定められている。

まず、地震計により観測されたSI値が40cm/sであると仮定すると、被害関数から即時推定される被害率は0.119 ( $=\mu_p$ )となる。標準偏差は、ここでは能島らと同様に変動係数を0.6と仮定し、平均値に乗じて0.0711 ( $=\sigma_p$ )と算出した。このとき、仮説的事前標本は式(3)、(4)より、 $M'_0=17.66$ 、 $n'_0=1.33$ と定まる。対象とする建物群の全棟数 $M_T$ を1000、最終的な半壊以上の実被害率を0.3と仮定し、式(1)、(2)によって被害率が更新されていく様子を図1に示す。収集される被害棟数データ $M_0$ 、 $n_0$ はランダムサンプリングにより取得するものとしている。図1より、調査棟数が $M'_0$ に近い値に達すると、推定被害率が実被害率0.3程度の値を示すことが分かる。

次に、即時推定に用いる被害関数の標準偏差を前例よりも小さめに設定する。ここでは、変動係数を0.6から0.3に変更した。観測されたSI値が40cm/sのとき、即時推定される被害率は0.119 ( $=\mu_p$ )、標準

偏差は0.0356 ( $=\sigma_p$ )である。前例と同様、半壊以上の実被害率を0.3として数値シミュレーションを行う。なお、仮説的事前標本は式(3)、(4)より、 $M_0'=79.65$ 、 $n_0'=8.68$ と定まる。被害率の逐次更新過程を図2に示す。推定被害率が0.25に達するまで、200棟あまりの調査棟数が必要であり、図1の結果と比較して推定被害率が実被害率に収束しにくくなっている。即時推定に用いる被害関数の変動係数を小さく設定すると、被害関数から推定された被害率がより確からしいと判断され、 $M_0'$ 、 $n_0'$ の値が大きくなるのが影響していると考えられる。

また、被害区分を多段階とし、多項分布に拡張した数値シミュレーションを行った。このシミュレーションにおいても、二項分布と同様に、変動係数の違いが実被害率への収束に影響を及ぼす傾向が見られた。したがって、本手法を行うにあたっては変動係数の与え方について、さらなる検討が必要であると考えられる。

### 3. 実被害情報に基づく被害関数の平均値、標準偏差の更新

#### 3.1 既往の被害関数と2004年新潟県中越地震の比較

山口・山崎は、1995年兵庫県南部地震における西宮市の地震動強さと建物被害率の関係を評価し、被害関数を構築している<sup>8)</sup>。地震動指標値をSI値とすると、被害関数は式(5)のように表される。 $\lambda$ は $\ln SI$ の平均値、 $\zeta$ は標準偏差であり、確率紙を用いた最小二乗法により決定される。

図3に、山口・山崎の被害関数と2004年新潟県中越地震の建物被害率の比較を示す。すでに指摘されているように、木造建物の耐震性に地域差があることや、地震動の周期特性が異なることなどが影響して、兵庫県南部地震の被害データから構築された被害関数は、新潟県中越地震の被害状況を過大評価する傾向にある。また、近年発生した他の地震においても、この傾向がみられている。

よって、被害推定の際に用いられる既定のパラメータを実被害データに基づき再評価することで、実際の被害をより正確に推定することができると考えられる。被害

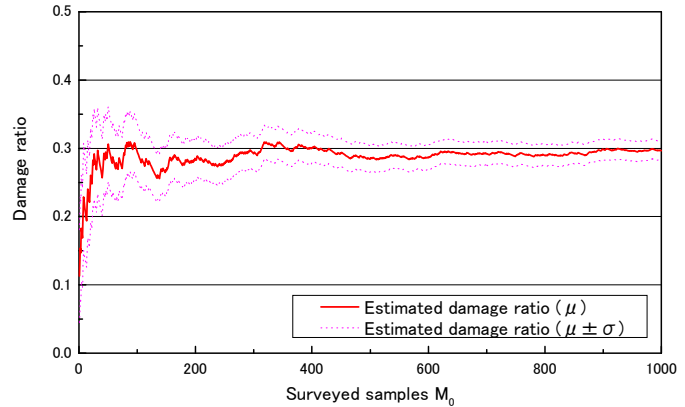


図1 推定被害率の逐次更新過程  
(即時被害率 0.119, 実被害率 0.3, 変動係数 0.6)

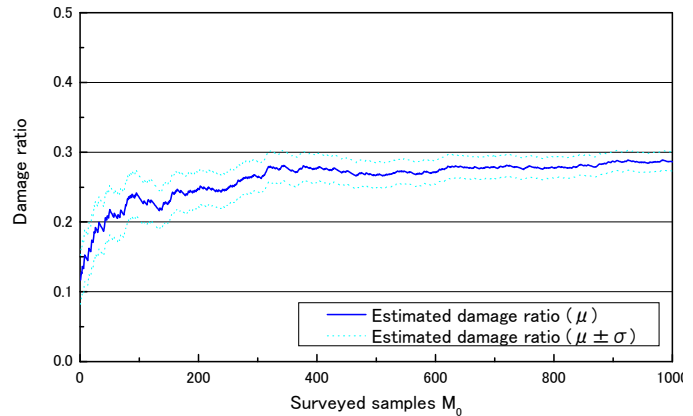


図2 推定被害率の逐次更新過程  
(即時被害率 0.119, 実被害率 0.3, 変動係数 0.3)

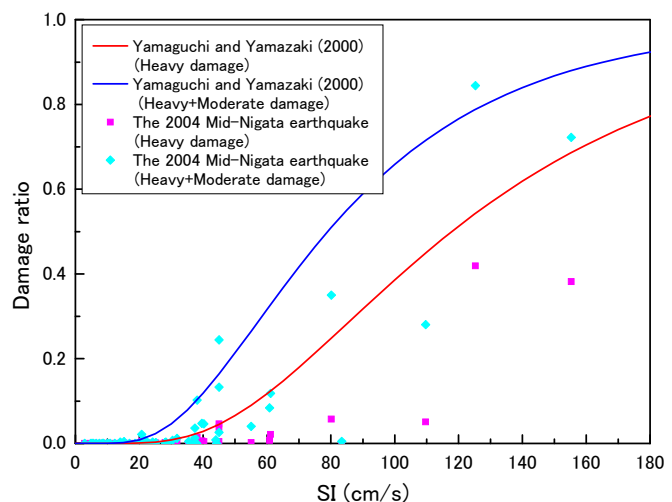


図3 山口・山崎の建物被害関数と新潟県中越地震の建物被害率の比較

表1 使用した各市町村の建物被害率と指標値（2004年新潟県中越地震）

市町村	計測震度	SI (cm/s)	全壊	半壊	全世帯数	全壊率 (%)	全半壊率 (%)	
長岡市	5.4	38.1	927	5969	67772	1.37	10.18	
長岡市	旧中之島町	5.4	44.0	0	26	3117	0.00	0.83
	旧越路町	5.6	45.0	152	835	4051	3.75	24.36
	旧三島町	5.5	37.4	3	25	2100	0.14	1.33
	旧山古志村	6.3	125.3	285	290	681	41.85	84.43
	旧小国町	6.0	80.1	125	644	2199	5.68	34.97
	旧栃尾市	5.5	39.6	45	300	7413	0.61	4.65
	旧与板町	5.3	28.3	0	7	2117	0.00	0.33
旧和島村	5.2	37.3	0	0	1311	0.00	0.00	
見附市	5.3	40.2	52	543	13066	0.40	4.55	
出雲崎町	4.7	15.2	0	7	1857	0.00	0.38	
小千谷市	6.3	109.7	635	2836	12375	5.13	28.05	
川口町	6.5	155.3	609	543	1595	38.18	72.23	
魚沼市	旧堀之内町	5.8	61.1	56	259	2675	2.09	11.78
	旧小出町	5.2	35.5	1	19	4106	0.02	0.49
	旧湯之谷村	4.6	14.4	0	0	2072	0.00	0.00
	旧広神村	5.5	37.4	12	76	2439	0.49	3.61
	旧守門村	5.7	45.0	6	33	1482	0.40	2.63
	旧入広瀬村	5.5	30.4	0	5	695	0.00	0.72
南魚沼市	旧六日町	5.2	38.0	3	1	8734	0.03	0.05
	旧大和町	5.2	25.2	4	3	4069	0.10	0.17
	旧塩沢町	5.2	28.5	0	0	5683	0.00	0.00
十日町市	5.9	60.8	100	1027	13360	0.75	8.44	
十日町市	旧川西町	5.7	55.0	5	87	2283	0.22	4.03
	旧中里村	5.9	83.4	0	9	1684	0.00	0.53
	旧松代町	5.0	22.4	0	3	1482	0.00	0.20
	旧松之山町	5.0	28.1	2	0	1094	0.18	0.18
津南町	5.1	44.2	0	1	3710	0.00	0.03	
柏崎市	4.9	31.8	27	322	30005	0.09	1.16	
柏崎市	旧高柳町	4.7	14.0	0	3	910	0.00	0.33
	旧西山町	4.9	20.7	12	34	2201	0.55	2.09
刈羽村	5.6	45.0	68	130	1488	4.57	13.31	
燕市	4.7	19.7	2	0	13540	0.01	0.01	
燕市	旧分水町	4.7	21.9	8	24	4466	0.18	0.72
	旧吉田町	4.4	16.9	0	0	7803	0.00	0.00
三条市	4.9	21.3	0	0	27165	0.00	0.00	
三条市	旧栄町	4.9	24.2	0	9	2847	0.00	0.32
加茂市	4.6	18.6	0	4	9908	0.00	0.04	
新潟市	4.1	7.5	0	0	205762	0.00	0.00	
新潟市	旧新津市	3.8	6.5	0	0	22135	0.00	0.00
	旧巻市	4.5	15.3	0	0	8926	0.00	0.00
新発田市	3.2	2.9	0	0	29000	0.00	0.00	
妙高市	旧新井市	3.9	5.2	0	0	8520	0.00	0.00
	旧妙高高原町	4.1	8.4	0	0	2178	0.00	0.00
佐渡市	3.8	5.6	0	0	25500	0.00	0.00	
弥彦村	4.8	24.0	0	0	2515	0.00	0.00	
阿賀町	旧津川町	4.3	10.8	0	0	1909	0.00	0.00
湯沢町	3.6	4.8	0	0	3183	0.00	0.00	
上越市	4.5	12.3	0	0	46782	0.00	0.00	
上越市	安塚町	5.3	22.9	0	0	1216	0.00	0.00
	浦川原村	4.5	8.8	0	0	1208	0.00	0.00
	旧牧村	4.5	10.0	0	0	959	0.00	0.00
	旧柿崎町	4.5	14.2	0	0	3579	0.00	0.00
	旧三和村	4.6	20.4	0	0	1701	0.00	0.00

表2 山口・山崎(2000)の被害関数の既定のパラメータ

建物被害率	平均 $\lambda$	標準偏差 $\zeta$
全壊率	4.77	0.568
全半壊率	4.37	0.576

推定式の形状は2つのパラメータ,  $\zeta$  によって決まるため, 例えば, 実際の被害率が被害関数による予測値よりも小さいことが明らかになった場合, 平均値を大きくするか, 標準偏差を小さくするなど再評価し, 被害関数を更新することが可能であると考えられる.

### 3.2 平均値, 標準偏差の更新手法

2004年新潟県中越地震を例として, この手法を適応する. 建物被害率は, 新潟県が取りまとめた各市町村の被害状況の最終報<sup>9)</sup>を使用した. 地震動指標値は, 気象庁や自治体, 防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netなどの設置位置をGoogle Earth等を用いて精査し, 建物被害の分布状況と地震計位置の関係が最も妥当と思われるものを選択した. 波形が入手できず計測震度しか公開されていないものは, 換算式<sup>10)</sup>を用いてSI値を算出した. 使用した建物被害率, 地震動指標値の一覧を表1に示す.

この被害データセットを確率紙上にプロットし, 最小二乗法による回帰分析により平均値, 標準偏差が決定される. しかしながら, このとき式(5)のように, 建物被害率は対数正規分布の累積確率に従うものと仮定しているため, 被害率に0を有するデータセットは好ましくない. そこで, 本研究ではSI値の区分を適切に設定し, 世帯数による重み付き平均値を用いて再集計したものを使用した. 本来ならば, データの取捨選択についてはより慎重に吟味することが望まれるが, 地震発生直後に正確な被害推定式を構築するための多量の精査された被害データを準備することは困難である. よって, 豊富な被害データに基づき構築された山口・山崎の被害関数の一方のパラメータのみを更新することで, 実被害率を精度良く表すことを試みる.

表1に示す建物被害率と再集計した地震動指標値を用いて, 確率紙上で最小二乗法による回帰分析を行う. その際, 一方のパラメータを山口・山崎の既定値(表2)に固定する. 建物被害率を全半壊率とした場合の回帰分析の様子を図4に示す. 標準偏差を固定したものについては, 再集計した点の世帯数による重み付き回帰分析も行った. 図4から, 実際の被害データによる再評価を行うことで, 山口・山崎の回帰直線が実被害と相関が高くなる様子が見てとれる. この結果を定量的に表すために, プロットされている実被害データと各回帰直線の決定係数を算出した(表3). この結果から, 標準偏差を固定し平均値を実際の被害データに基づき再評価すると, 良好な結果が得られることが分かる. 再評価して得られた各パラメータ値に基づき構築した被害推定式を図5に示す. 被害率を過大評価していた山口・山崎の被害推定式が, 本手法により実際の被害をより精度良く推定するよう更新されていることが示されている.

また, 2000年鳥取県西部地震, 2007年能登半島地震, 2007年新潟県中越沖地震, 2008年岩手・宮城内陸地震といった規模や発生地域の異なる4地震についても, 本手法で被害推定式の更新を行った. 建物被害率に関しては, 各県がまとめた自治体ごとの被害率を用いているが, 能登半島地震における石川県穴水町の建物被害率は, 石川県がとりまとめたもの<sup>11)</sup>ではなく, 境らがまとめた観測点の半径200m以内の建物被害率<sup>12)</sup>を使用した. これは, K-NET穴水周辺では, 地盤の不整形性の影響により建物被

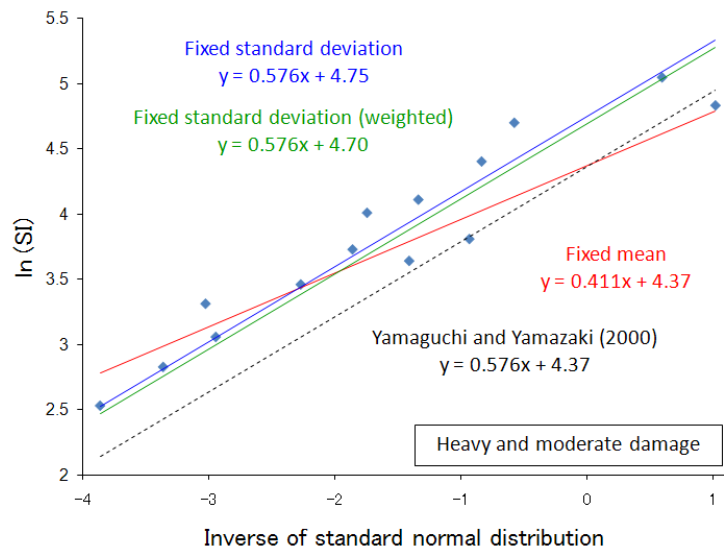


図4 新潟県中越地震の実被害データを用いた確率紙上の回帰分析 (全半壊)

表3 実被害データと各回帰直線の決定係数

	山口・山崎	平均固定	標準偏差固定	標準偏差固定 重み付き
全壊	0.230	0.746	0.823	0.772
全半壊	0.626	0.856	0.894	0.889

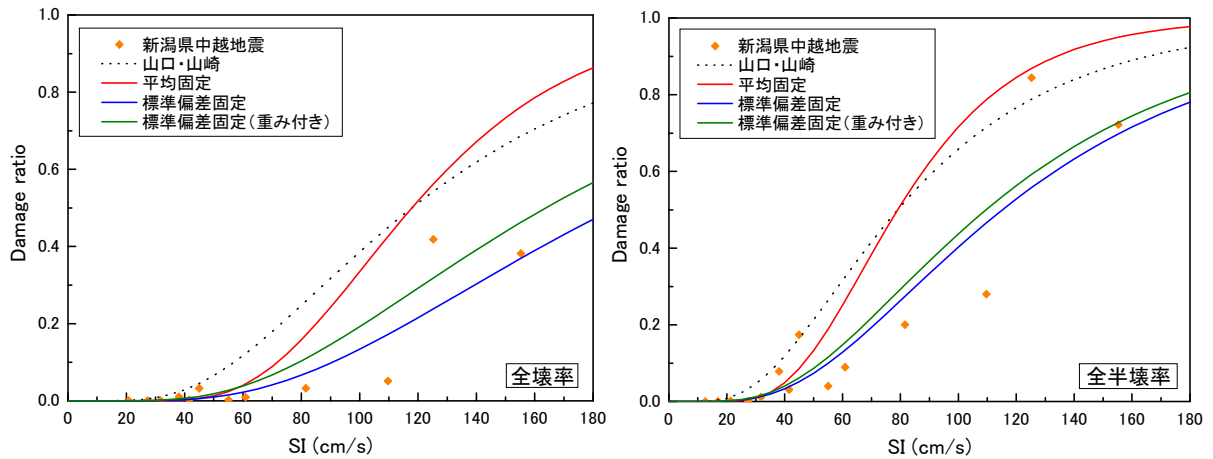


図5 新潟県中越地震の実被害データに基づいて更新された被害推定式  
(左：全壊，右：全半壊)

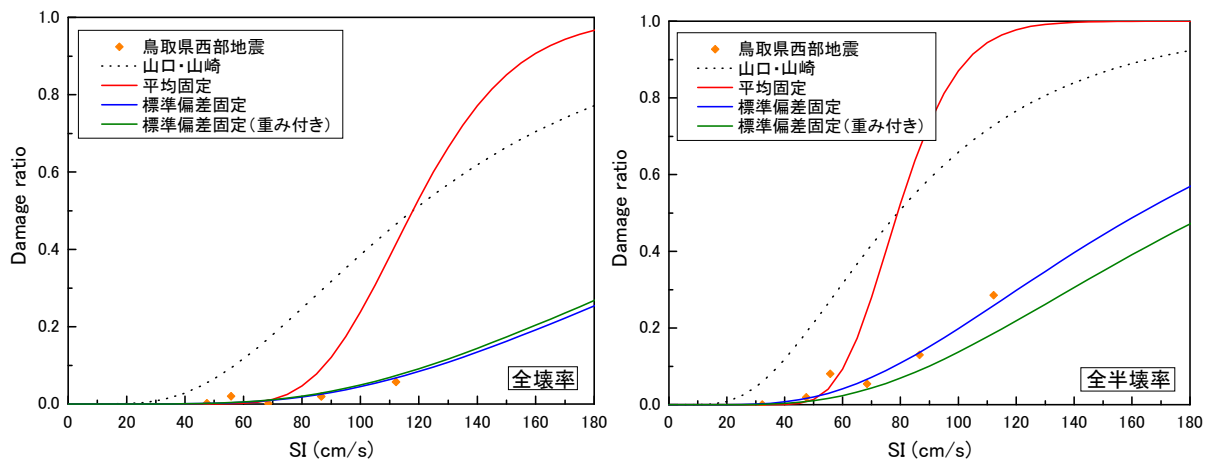


図6 鳥取県西部地震の実被害データに基づいて更新された被害推定式  
(左：全壊，右：全半壊)

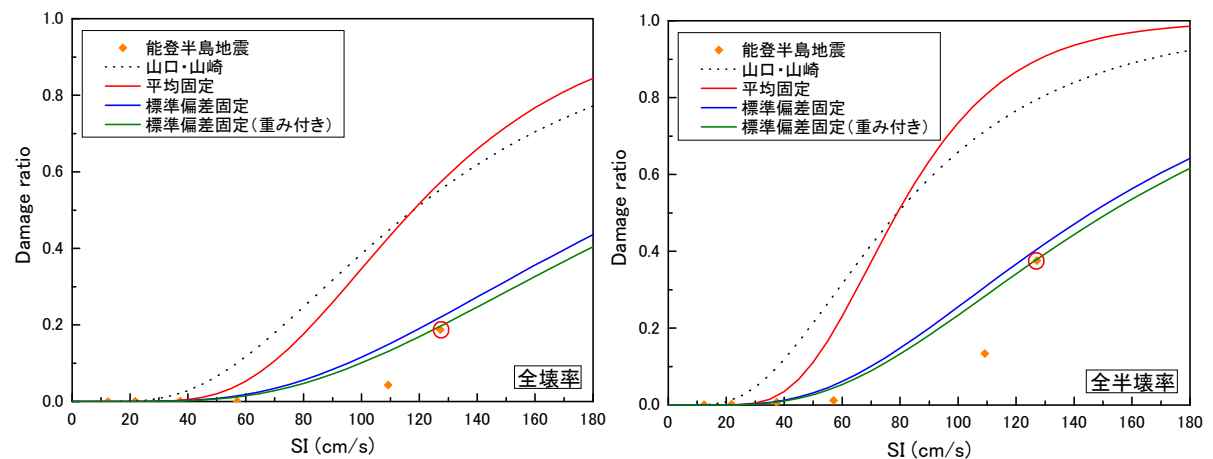


図7 能登半島地震の実被害データに基づいて更新された被害推定式  
(左：全壊，右：全半壊，赤丸が境<sup>12)</sup>の被害率を用いたK-NET 穴水)

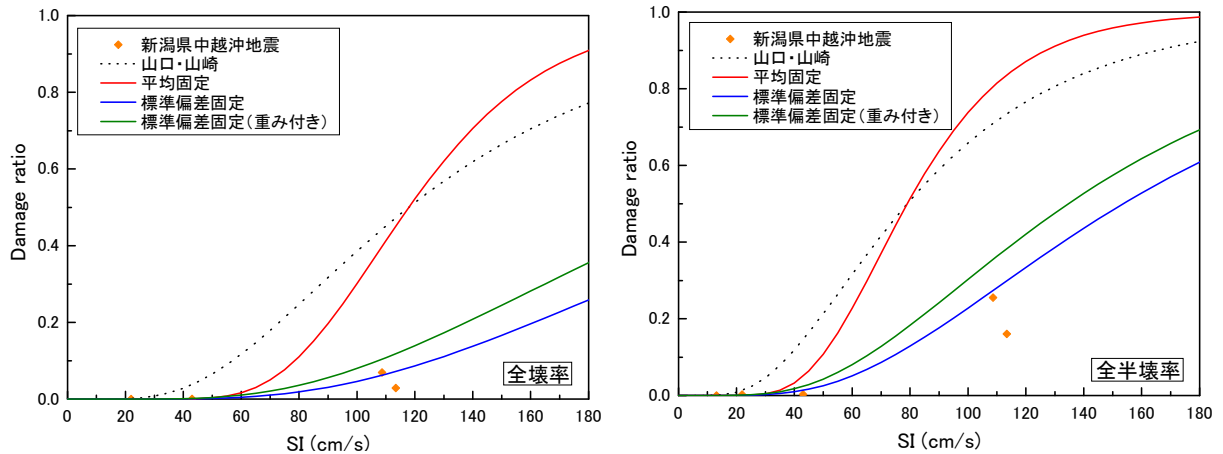


図8 新潟県中越沖地震の実被害データに基づいて更新された被害推定式  
(左：全壊，右：全半壊)

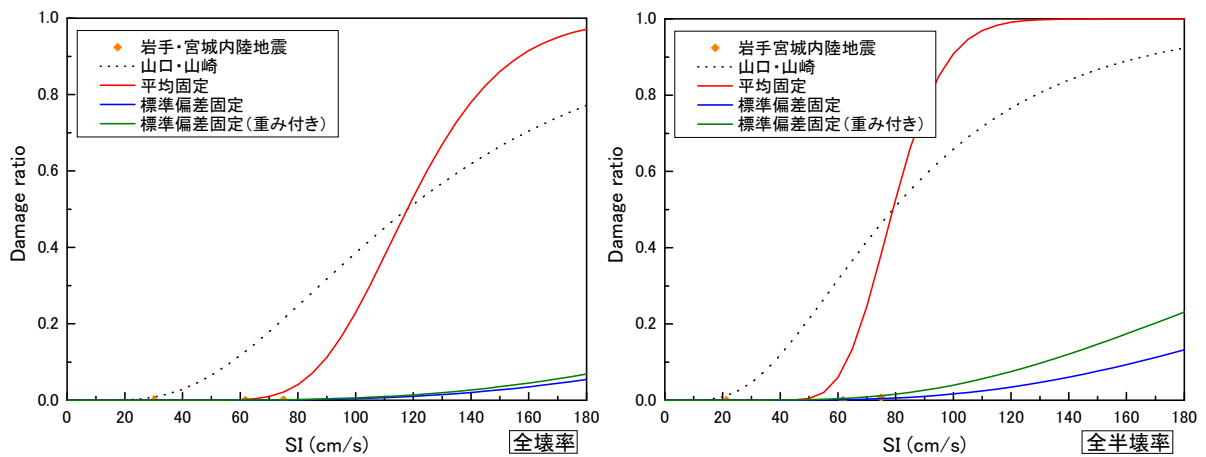


図9 岩手・宮城内陸地震の実被害データに基づいて更新された被害推定式  
(左：全壊，右：全半壊)

害が局所的に発生していることが報告<sup>13)</sup>されていることを踏まえたためである。なお、境らがとりまとめた建物被害は全壊相当であるため、K-NET穴水の全半壊率は全壊率の2倍と仮定した。図6～9に、本手法により更新された被害推定式を示す。

図6～9にあるように、ほとんどの地震で標準偏差を固定し平均値を再評価した被害推定式の精度が高いことが確認された。しかしながら、能登半島地震の建物全半壊率に関しては、石川県かほく市や宝達志水町などでSI値が小さいながら半壊した建物が数棟あることが影響し、被害率のSI値に対するばらつきが大きかった。そのため、兵庫県南部地震時の建物被害データで構築された被害関数の標準偏差を固定してしまうと、能登半島地震の建物全半壊率を精度よく表現することが困難な場合も見られた。

平均値を固定し標準偏差を更新すると、とくにSI値が大きい範囲で推定値と実測値が乖離する。標準偏差を固定した上での世帯数の重み付き回帰分析については、いずれの地震においても重みを付けたことによる被害推定精度の明確な向上は見られなかった。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、実際の被害情報に基づいて既往の被害関数のパラメータを再評価し、被害推定式を更

新する手法を提案した。被害推定式を構成する平均値と標準偏差の2つのパラメータのうち、標準偏差を既往の被害関数の値に固定し平均値を実被害データに基づき再評価することで、実際の被害を精度良く推定するように被害推定式を更新することができた。また、5地震について本手法を試算し、ほとんどの地震で同様の結果であることを確認した。

今後は、複数の地震に関して被害関数の予測値の標準偏差を評価し、既往の研究の数値シミュレーションをより現実に即した条件で実行する予定である。さらに、建物被害GISや地震後に撮影された空中写真などを用いて、実際の被害情報の収集シミュレーションを行い、既往の研究と本提案手法による推定被害率の更新過程の比較を行いたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Yamazaki, F.: Seismic monitoring and early damage assessment systems in Japan. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 3, 2001, pp. 66-75.
- 2) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Ioyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K., and Nakayama, W.: Development of real-time control system for urban gas supply network, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 2, 2006, pp. 237-249.
- 3) 翠川三郎, 阿部進: 横浜市における細密震度分布の即時評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, 1998, pp. 3467-3432.
- 4) 福和伸夫, 高井博雄, 飛田潤: 双方向災害情報システム「安震システム」と携帯型災害情報端末「安震君」, 日本建築学会技術報告集, 第12号, 2001, pp. 227-232.
- 5) 山崎文雄: 防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向, 土木学会第10回地震災害マネジメントセミナー, 地震災害対応におけるリモートセンシング・テクノロジーの活用, 2009, pp. 1-12.
- 6) 能島暢呂, 杉戸真太, 金澤伸治: 地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル, 土木学会論文集, No. 724/I-62, 2003, pp. 187-200.
- 7) Nojima, N. and Sugito, M.: Development of a decision support system for post-earthquake emergency management using synthetic data processing technique. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), CD-ROM, Paper No. 401, 2004.
- 8) 山口直也, 山崎文雄: 西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No. 2, 2000, pp. 129-138.
- 9) 新潟県: 「平成16年新潟県中越地震による被害状況について(最終報)(平成21年10月15日現在)」, <http://www.pref.niigata.lg.jp/kikitaisaku/1202058033358.html>.
- 10) 丸山喜久, 山崎文雄: 二段階回帰による計測震度からSI値への換算式, 土木学会 第64回年次学術講演会講演梗概集, CD-ROM, I-193, 2009.
- 11) 石川県 消防防災Web: 「平成19年(2007年)能登半島地震に関する被害の状況(平成21年8月12日現在)」, [http://www.bousai.pref.ishikawa.jp/press/20071001\\_01\\_press.htm](http://www.bousai.pref.ishikawa.jp/press/20071001_01_press.htm).
- 12) 境有紀, 野尻真介, 熊本匠, 田中佑典: 2007年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動との対応性, 日本地震工学学会論文集, 第8巻, 第3号, 2008, pp. 79-106.
- 13) 後藤浩之, 澤田純男, 小林望, 山田浩二: K-NET穴水観測点周辺地盤の地震動応答特性, 土木学会地震工学論文集, 第30巻, 2009, pp. 1-5.