

# 実被害情報を考慮した建物被害推定式の更新手法の提案

Reevaluation of Fragility Curves for Wooden Houses based on Collected Damage Information

09TM0347 星 幸江  
Sachie Hoshi

指導教員 山崎 文雄

## SYNOPSIS

Immediately after an earthquake, the building damage ratios are estimated using ground motion indices and fragility curves constructed from the prior earthquake damage data. However, it should be noted that the fragility curves may provide less accurate estimations for recent earthquakes. On the other hand, some researchers are focusing on collecting the actual damage information efficiently soon after an earthquake. In this study, a method for data synthesis to restructure fragility curves is proposed based on the actual collected damage information. Either the mean or the standard deviation of the prior fragility curve is reevaluated based on building damage datasets after recent earthquakes. As a result, the restructured fragility curves with the updated mean values show better estimations than the original ones.

## 1. はじめに

地震発生後の被害推定は、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。現在、被害推定は地震観測ネットワークで得られた地震動指標値と既往の被害推定式に基づき行われる。その際に用いられる被害推定式は、過去の地震被害の事例などをもとに構築されており、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ない場合も生じている。

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。中には非常に高密度なものもあり、地震発生直後に正確な指標値を得ることが可能となってきている。一方、地震直後に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。モバイル端末やGPSなどを組み合わせた情報収集システムが検討・運用され、リモートセンシング技術を用いて画像から被害を把握する研究も行われている。今後これらの研究が進み、技術が向上することで、地震後速やかに被害情報が収集できることが期待される。

したがって、収集された実際の被害情報を加味した被害推定ができれば、より正確に実被害を反映した予測結果を得られるものと考えられる。そこで本研究では、地震直後に木造建物の被害情報が収集できたことを仮定し、地震動指標値から推定される被害率を実データに従って更新する手法を構築することを目的とする。被害推定式は平均値と標準偏差の2つのパラメータから構築されており、本研究では一方を既往値に固定し、もう一方を収集された実被害情報に基づき更新する。今回は指標値としてSI値を採択し、近年の被害地震の事例をもとに本手法の試算を行った。また、既往の研究に基づく数値シミュレーションも併せて行い、提案手法の更新過程や精度を比較した。

## 2. 既往の研究に基づく数値シミュレーション

能島ら<sup>1)</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。被害の程度が有無の2ランクで区別され、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。地震直後に得られる地震動指標値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とすると、被害確率 $p$ の逐次更新された平均値 $\mu'_p$ 、標準偏差 $\sigma'_p$ は、以下のようになる。

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

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

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、被害推定値の不確定性を定量的に評価するパラメータである。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ことと等価であると解釈される。

本章では、山口・山崎<sup>2)</sup>によって構築された被害推定式を用いて、逐次更新過程の数値シミュレーションを行う。

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

$P$ を半壊以上の建物被害が発生する確率とすると、木造(全建築年)に対して $\lambda=4.37$ 、 $\zeta=0.576$ と求められている。

まず、地震計により観測されたSI値が60cm/sであると仮定すると、被害推定式から即時被害の平均値は $\mu_p=0.316$ と推定される。標準偏差 $\sigma_p$ は、変動係数を0.6および0.3の2通りに仮定し算出した。建物群の全棟数 $M_T$ を300、収集された建物棟数 $M_0$ と被害棟数 $n_0$ はランダムサンプリングにより取得する。実被害率を0.1と仮定し、被害推定式(5)が被害率を過大評価した場合についてシミュレーションを行う。

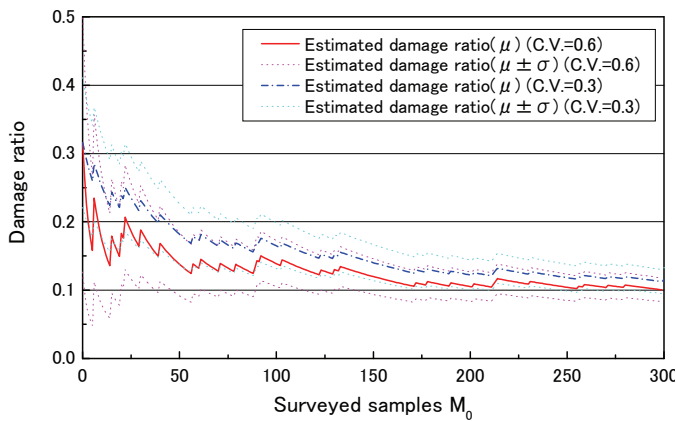


図 2-1 能島ら<sup>1)</sup>による推定被害率の逐次更新過程 (即時推定被害率 0.316, 実被害率 0.1)

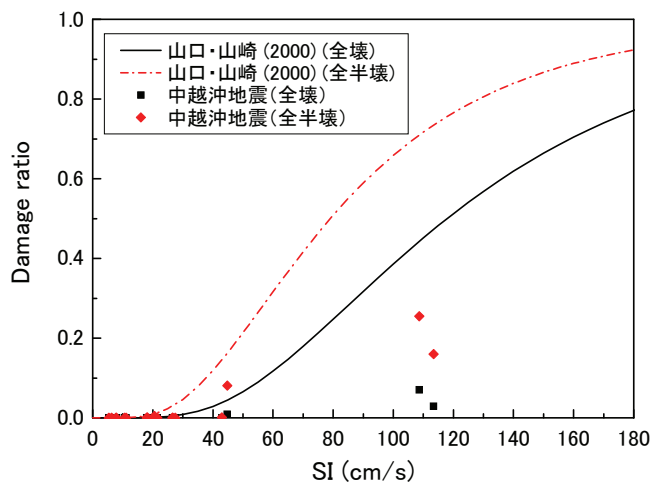


図 3-1 山口・山崎<sup>2)</sup>の被害推定式と新潟県中越沖地震の建物被害率<sup>3)</sup>の比較

図 2-1 に木造建物被害率の逐次更新過程を示す。調査が 300 棟に達すると実被害率 0.1 に収束していることが分かるが、変動係数の大きさにより更新過程に違いがみられた。これには、変動係数を小さくすると即時推定された被害率がより確からしいと判断され、 $M_0'$ ,  $n_0'$  の値が大きくなるものが影響している。このことを踏まえ本研究では、木造建物の被害データが整備されている 1995 年兵庫県南部地震のデータをもとに建物被害率の地震動強さに対するばらつきを検討し、標準偏差  $\sigma_p$  を再評価して数値シミュレーションを行うこととする。

### 3. 実被害情報を考慮した被害推定式の平均値、標準偏差の更新

#### 3-1 平均値、標準偏差の再評価

SI 値を用いた木造建物の被害推定式は式(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、これらは確率紙を用いた最小二乗法により決定される。図 3-1 に兵庫県南部地震の被害データから構築された山口・山崎<sup>2)</sup>の被害推定式と新潟県が収集した 2007 年新潟県中越沖地震の住家被害率<sup>3)</sup>を示す。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、兵庫県南部地震をもとに構築された被害推定式は新潟県中越沖地震の被害状況を過大評価する傾向にある。

そこで本研究では、被害推定式を構築する 2 つ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

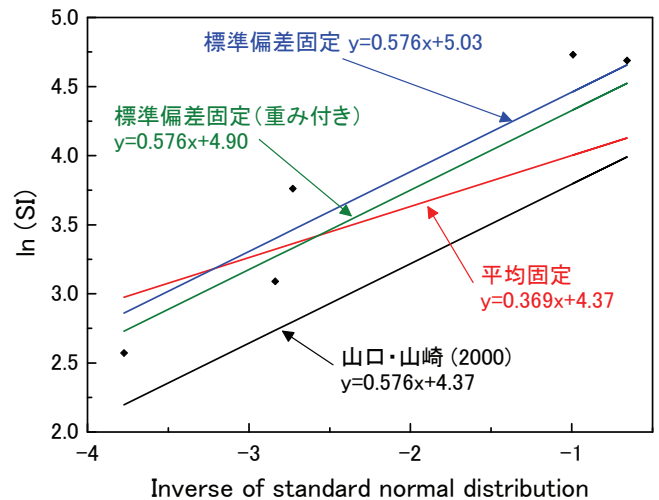


図 3-2 新潟県中越沖地震の実被害データ<sup>3)</sup>を用いた確率紙上の回帰分析 (全半壊)

表 3-1 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)
0.304	0.667	0.907	0.883

害をより正確に推定することを試みる。被害推定式の形状は 2 つのパラメータ  $\lambda$ ,  $\zeta$  によって決まる。例えば、実被害率が被害推定式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  $\lambda$  を大きくするか、標準偏差  $\zeta$  を小さくするかなど、2 つのパラメータ値を再評価することで、被害推定式を更新することが可能である。

#### 3-2 2007 年新潟県中越沖地震に基づく試算

2007 年新潟県中越沖地震を例に、この手法を試算する。建物被害率は、新潟県が取りまとめた各市町村の住家被害率<sup>3)</sup>を木造建物の被害率と仮定し使用した。地震動指標値には、気象庁や防災科学技術研究所などの地震計の設置位置と建物被害の分布状況を GIS を用いて精査し、最も妥当と思われる地震観測値を使用した。波形が入手できず計測震度しか利用できないものは、換算式<sup>4)</sup>を用いて SI 値を推定した。

これらの被害データセットを用いて、確率紙上での最小二乗法による回帰分析によって平均値、標準偏差を決定する。被害率が 0 のデータについては、SI 値ごとに建物総数と被害建物数を集約することで被害率を算出し、そのときの SI 値は建物数による重み付き平均値とした。また、地震発生直後に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。よって本研究では、精査された被害データに基づき構築された山口・山崎<sup>2)</sup>の被害推定式の一つのパラメータを固定し、もう一方を実被害データに基づき再評価することとする。

図 3-2 に確率紙上の回帰分析結果を示す。標準偏差を固定したものについては、世帯数による重み付き回帰分析も行った。図 3-2 に示すように、実被害データを考慮し被害推定式のパラメータ値を再評価することで、実被害率を精度良く表すことができる。この結果を定量的に表すために、実被害率と各回帰直線の決定係数を算出した(表 3-1)。この結果から、標準偏差を既往値に固定し、平均値を実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

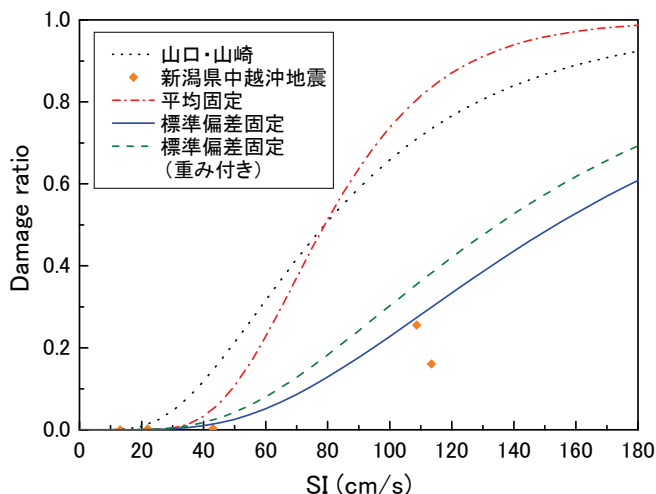


図 3-3 新潟県中越沖地震の実被害データ<sup>3)</sup>に基づき更新された被害推定式(全半壊)

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 3-3 に示す。本手法により、実際の被害率をより精度良く推定するように被害推定式が更新されていることが分かる。

さらに、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、2008 年岩手・宮城内陸地震についても同様の試算を行った。これらの地震についても、本手法により実被害率を精度良く推定できるように被害推定式を更新した。いずれの試算でも、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。世帯数による重み付き回帰分析の結果については、いずれの地震においても重みを付けたことによる推定精度の向上は見られなかった。

#### 4. 既往の研究と本手法の更新過程および精度の比較

##### 4-1 現地調査データに基づく比較

既往の研究<sup>1)</sup>と本手法についてシミュレーションを行い、更新過程や精度に関して比較、検討する。

まず、実際に地震直後に行われた現地調査に基づき、それらのデータを収集し更新した場合について検討する。境ら<sup>5)</sup>は、強震観測点を中心とした半径 200m 以内の木造建物に関して、外観から被害レベルの判定を行っている。この現地調査データを用いて、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震について木造建物の被害推定式を更新した。

図 4-1 に能登半島地震の際の現地調査データ<sup>5)</sup>をもとに更新した被害推定式を示す。2 手法とも兵庫県南部地震の建物被害データから構築した被害推定式<sup>2)</sup>に比べ、実被害を精度よく推定するよう更新されているが、逐次更新手法<sup>1)</sup>による結果は、SI 値が大きい範囲で過大評価となっている。本手法に関しては、過小評価している点が数点あるものの実被害率に当てはまりがよい被害推定式が構築された。また、新潟県中越地震や新潟県中越沖地震についても同様の結果を示した。

##### 4-2 収集調査棟数の違いに基づく比較

収集される調査棟数の違いが被害推定式の更新過程にどのように影響するのかを検討する。調査棟数が 50 棟、100 棟、200 棟、300 棟の場合を仮定して、被害推定式のパラメータ値の更新シミュレーションを行う。被害率は、調査棟数の違いに関わらず各地震の最終報告の被害率に準ずるものとする。

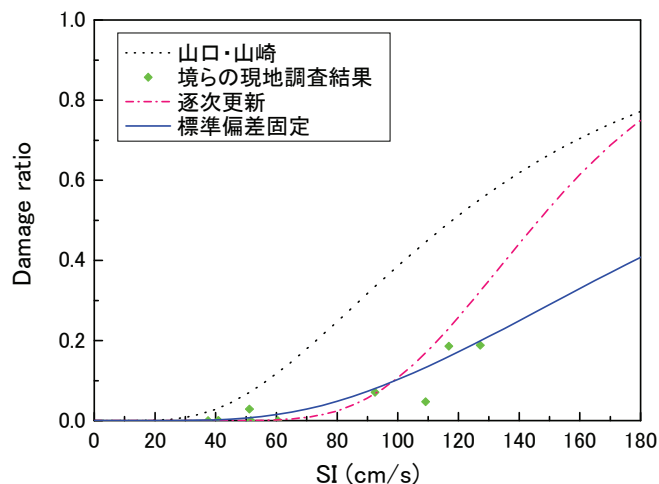


図 4-1 能登半島地震の現地調査データ<sup>5)</sup>に基づき更新された被害推定式(全壊)

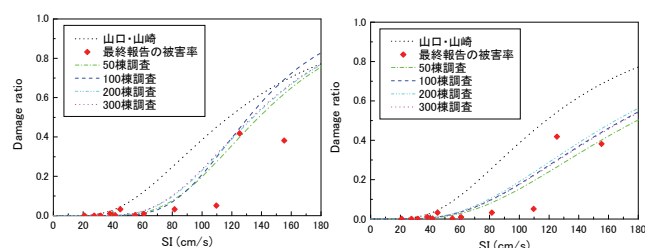


図 4-2 調査棟数の違いによる更新結果の推移(中越(全壊))  
(左：逐次更新，右：標準偏差固定)

図 4-2 に新潟県中越地震における逐次更新手法<sup>1)</sup>と本手法の更新結果の比較を示す。本手法については、少ない調査棟数でも新潟県がとりまとめた最終集計データをもとに更新した被害推定式に近い形状を示している。鳥取県西部地震や能登半島地震などについても同様の検討を行ったところ、50 棟程度の調査棟数があれば最終結果に近い被害推定式が得られるものと考えられる。逐次更新手法<sup>1)</sup>については、とくに SI 値が大きくなるにつれて被害率を過大評価する傾向にあることが確認された。また、調査棟数が少ないと、被害推定式の標準偏差 $\sigma$ が回帰分析で得られず、推定式を構築できない場合も生じた。

##### 4-3 建物被害 GIS に基づく調査範囲の違いによる比較

次に、新潟県中越沖地震における柏崎市の詳細な建物被害 GIS を用いて、調査範囲が被害推定式の更新過程に与える影響について検討する。本研究では、課税台帳調査の対象となった木造居室データのみを使用した。図 4-3 に、JMA 柏崎観測点周辺の木造居室の被害状況を示す。観測点を中心とした半径 100m、200m、300m、500m 円内について調査データが得られたものと仮定し、被害推定式の更新の推移を検討する。調査データとして、半径内にある木造居室数と罹災判定による全壊数を算出した。

調査範囲を地震観測点から半径 100m 以内とした場合では、被害推定式を更新するための十分な棟数を得ることはできなかった。調査範囲を半径 200m 以上とした場合は、とくに本手法で良好に被害推定式の更新がなされた(図 4-4)。逐次更新手法<sup>1)</sup>については、4-2 のように一定の被害率の建物被害データが常に収集される場合と比べると、調査範囲による更新結果にやや違いが見られた。実際の地震発生後の被害収集においては、地震動強さに空間的な変動があることや古い木造住宅が特定の地域に密集している場

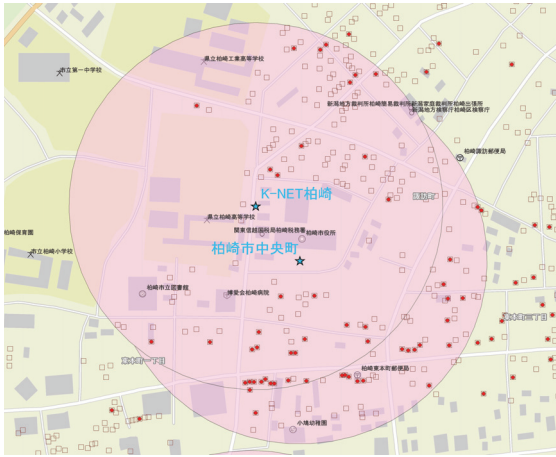


図 4-3 新潟県中越沖地震における JMA 柏崎観測点周辺の木造住宅の被害状況

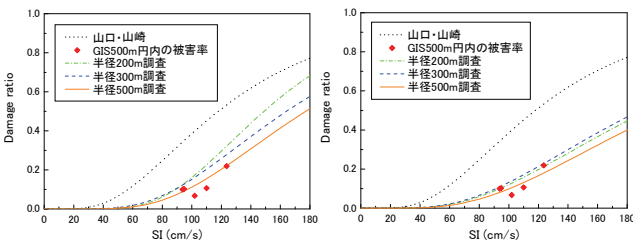


図 4-4 調査範囲の違いによる更新結果の推移 (左：逐次更新，右：標準偏差固定)

合があることなどを考えると、常に一定の被害率で建物被害データが収集されることは考えにくい。本手法については、そのような場合でも更新結果の差異が小さく、良好に被害推定式が再構築されるものと考えられる。

#### 4-4 航空写真の目視判読に基づく比較

次に、建物被害状況の調査方法の一つとして航空写真を用いた場合の検討を行う。航空写真は地震発生後の機動性、即時性に優れた高い解像度を有しているため、地震被害を早期に把握する目的で今後の活用が期待されている。

2007 年新潟県中越沖地震後に国土地理院などにより撮影された航空写真を用いて、目視判読により建物被害を把握した。地震観測点が写っている航空写真を選択し、観測点から半径ほぼ 500m 円内にある建物のうち、4-3 の建物被害 GIS データと共通の木造住宅について判読を行う。今回は目視で判読を行ったが、航空写真を用いた被害抽出に関しては自動抽出などの研究<sup>6)</sup>が行われている。

図 4-5 に目視判読結果に基づき更新した被害推定式を示す。判読結果と建物被害 GIS を比較すると、上空からの航空写真では判読できない被害を見落としていることが多かった。とくに建物が密集している鏡町供給所 (SI=113.4cm/s) の周辺でこの影響が顕著に見られ、本手法で更新された被害推定式については SI 値が大きい範囲でやや過小評価となった。図 4-6 に更新した被害推定式から算出した予測被害棟数と、建物被害 GIS の 500m 円内の実被害棟数の比較を示す。本手法については、一部過小評価しているものの、逐次更新<sup>1)</sup>に比べ良好な結果を得ることができた。

4-3 と総評すると、市内の狭い範囲での更新については、他の地震や地域に関して同様の検討を行い、手法の妥当性をさらに検証する必要があると考えられる。

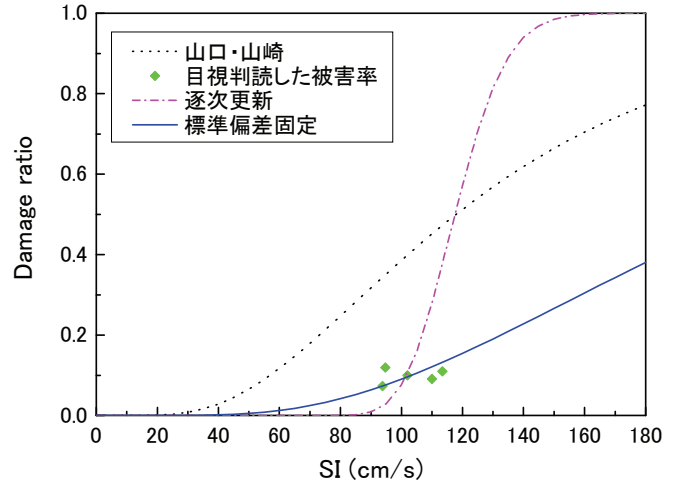


図 4-5 航空写真の目視判読データに基づき更新された被害推定式 (中越沖 (全壊))

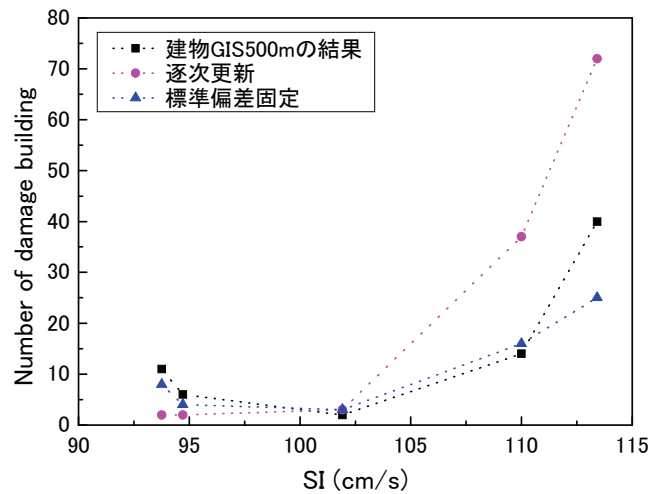


図 4-6 被害推定式から予測された被害棟数と建物被害 GIS の被害棟数の比較

#### 5. まとめ

本研究では、実被害情報に基づき被害推定式のパラメータ値を再評価し、更新する手法を提案した。過去の被害データによる試算では、標準偏差を固定し平均値を再評価することで、実被害を精度良く推定できる被害推定式に更新することができた。

さらに既往の研究<sup>1)</sup>との比較を行ったところ、本手法については、少ない現地調査棟数でも安定した推定結果を得ることができた。これは、詳細な建物被害データから構築された既往の被害推定式<sup>2)</sup>の標準偏差が、他の地震や地域に適用できると仮定した本手法の利点であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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, pp.187-200, 2003.
- 2) 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, pp.129-138, 2000.
- 3) 新潟県: 2007年新潟県中越沖地震関連情報(平成21年11月現在), <http://www.pref.niigata.lg.jp/bosai/0716jishin.html>.
- 4) 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.
- 5) 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, 日本地震工学論文集, 第8巻, 第3号, pp.79-106, 2008.
- 6) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 最近の地震災害の空撮画像を用いた建物被害地域の自動抽出の試み, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.267-278, 2002.