

地震動情報と実被害情報の統合処理による被害推定の逐次更新モデル

岐阜大学大学院 学生会員 金澤伸治

岐阜大学工学部 正会員 能島暢呂・杉戸真太

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、迅速な被害把握や緊急対応のためのリアルタイム地震防災システムの開発・導入が盛んである。これらのシステムでは、「迅速性」と「正確性」とのバランスが重要な課題となっている。筆者ら¹⁾は、地震動情報とフラジリティ関数に基づく推定情報と部分的な実被害情報を組み合わせて、被害箇所数を逐次推定する方法をモデル化し、シミュレーションを行った。一方、近年強震観測システムや空撮・人工衛星リモートセンシング画像処理技術²⁾などの発達により、被害情報を入手する手段が多様化している。このような多種の情報を統合的に処理することにより、被害推定に対する不確定性を低減させることが可能であると考えられる。本研究では、地震発生後早期に得られる震度情報に基づく推定情報と、時間とともに蓄積される部分的な実被害情報を組み合わせることにより、被害箇所数の逐次推定を市町村単位で行う。

2. 被害確率と被害箇所数の逐次推定手法の定式化

2.1 被害情報の逐次処理の概念

地震後の被害の把握過程をモデル化した概念図を図1に示す。(a)は確認被害のみ、(c)は地震動情報に基づく被害確率による即時推定結果のみ、から被害箇所数を推定する。(a)は正確だが時間を要し、(c)は迅速だが精度が悪い。そこで、両者の長所を取れ入れた基準が(b)である。地震動情報に基づいて即時推定された被害確率を即座に利用するのではなく、ベイズ確率の方法における事前分布とする。つまり、時間とともに蓄積される部分的な確認被害情報を組み込んで、ベイズの方法により被害確率の事前分布を事後分布に逐次更新し、被害の概略を推定するものである。

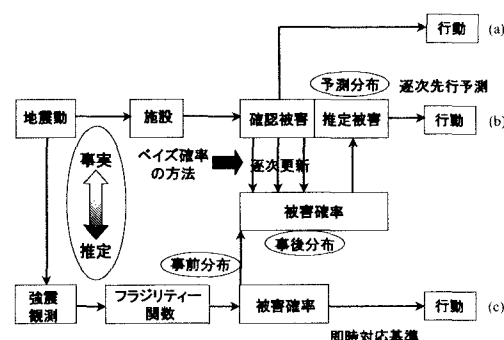


図1 逐次推定法と逐次決定過程の概念

2.2 逐次推定手法の定式化

被害区分が K 段階の場合 (例えば、 $K=3$ として、 $k=1$:全壊 $\times$, $k=2$:半壊 Δ , $k=3$:無被害 $\circ$) において、全要素数 M_T の構造物群において被害が全要素にわたって一様ランダムに発生すると仮定する。被害区分 $k(=1, \dots, K)$ の被害発生数 n_k は被害確率 p_k の多項分布に従うものとする。この時、図2のように、全体のうち一部の要素 M_0 を調査したところ、被害箇所数の内訳が n_{0k} 個であったとして、被害箇所数を逐次推定する問題を考える。

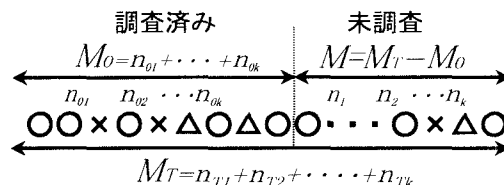


図2 確認被害に基づく被害の逐次先行予測

調査開始前の被害確率の事前分布として多項分布の共役分布であるディリクレ分布を用いると、要素 M_0 あたり n_{0k} の被害情報が得られた後の被害確率 p_k の事後分布はディリクレ分布で得られる。この確率密度関数において、変数 p_k の平均値 μ'_{p_k} および標準偏差 σ'_{p_k} は、次式で与えられる。

$$\mu'_{p_k} = \frac{n_{0k} + n'_{0k} + 1}{M_0 + M'_0 + K} \quad \sigma'_{p_k} = \sqrt{\frac{\{M_0 + M'_0 - n_{0k} - n'_{0k} + (K-1)\}(n_{0k} + n'_{0k} + 1)}{(M_0 + M'_0 + K)^2 \{M_0 + M'_0 + (K+1)\}}} \quad (1)$$

さらに、要素数 M_T の構造物群の被害発生数が n_{T_k} となる確率の確率関数は、多項分布とディリクレ分布の混合分布として、ディリクレ多項分布で得られ、被害総数 n_{T_k} の平均値 $\mu'_{N_{T_k}}$ および標準偏差 $\sigma'_{N_{T_k}}$ は、式(1)を用いて、次式で与えられる。

$$\mu'_{N_{T_k}} = n_{0k} + \mu'_{p_k}(M_T - M_0) \quad (2)$$

$$\sigma'_{N_{T_k}} = \sigma'_{p_k} \sqrt{(M_T - M_0)(M_T + M'_0 + K)} \quad (3)$$

ただし、 M'_0 と n'_{0k} の全てを独立に定めることはできないので、代表被害区分 k^* を選んで、その被害確率の平均値 $\mu_{p_{k^*}}$ と標準偏差 $\sigma_{p_{k^*}}$ のみを規定することにより、次式で求められる。

$$M'_0 = \frac{\mu_{p_{k^*}}(1 - \mu_{p_{k^*}})}{\sigma_{p_{k^*}}^2} - K - 1 \quad n'_{0k} = \mu_{p_k}(M'_0 + K) - 1 \quad (4)$$

3. 兵庫県南部地震における建物被害の逐次推定のケーススタディー

3.1 シミュレーション方法と対象地域および使用データ

兵庫県南部地震を対象とした建物被害の逐次推定のケーススタディーを示す。まず、地震動情報からフラジリティ関数を介して被害確率を算出し、被害確率の事前分布を導く。この事前分布を実被害情報に基づいて事後分布に更新し、被害箇所数の逐次推定を行う。対象地域は、兵庫県南部地震で甚大な被害が生じた神戸市灘区の大字72町とし、町ごとにシミュレーションを行う。地震動情報としての震度分布とフラジリティ関数は文献3)のデータを用い、実被害情報については建設省建築研究所が取りまとめたデータ⁴⁾を用いた。本研究では、被害区分を $K=3(k=1$:全壊, $k=2$:半壊, $k=3$:無被害)とした。

3.2 計測震度から事前分布の算出

文献3)の震度情報と fragility関数から被害確率を算出し、町ごとに被害確率の事前分布を算出する．ここで、代表被害区分を半壊 ($k^*=2$) とする．その半壊率 μ_{p_2} に対して、倍半分の領域をカバーすることを見込んで変動係数 $\delta_p = 30\%$ として標準偏差を算出し、式(4)を用いて即時情報 M'_0, n'_{0_k} を求める．一例として、表1に建物棟数が最大である篠原南町の計測震度と、それより算出した即時情報を示す．また、被害確率の事前分布を三角座標で示したものが図3(a)である．全壊率35%，半壊率30%，無被害率35%あたりを中心に緩やかな分布形状をとっている．

3.3 被害箇所数の逐次推定

3.2で取り上げた篠原南町において、文献4)のデータを再集計したものが表2である．これらの建物棟数と被害棟数から得られる各被害確率を用いて、モンテカルロ法により実被害情報の入手パターンを作成する．図3(a)に示した事前分布を、実被害情報に基づいて事後分布に更新しながら、被害箇所数の逐次推定を行う．図4に篠原南町における被害箇所数の逐次推定過程を示す．横軸は調査済み棟数、縦軸は被害箇所数、点線はモンテカルロ法を用いて生成した被災パターンを用いた各段階での確認被害数 M_0 を表している．3本の実線はベイズ確率の方法に基づく被害箇所数の逐次推定値である平均値 $\mu'_{N_{T_k}} \pm$ 標準偏差 $\sigma'_{N_{T_k}}$ を示している．初期被害推定結果の $\mu'_{N_{T_k}}$ と $\sigma'_{N_{T_k}}$ を表3に示す．全棟数は $M_T=762$ であり、実被害棟数は全壊棟数 $N_{T_1}=365$ ，半壊棟数 $N_{T_2}=138$ ，無被害棟数 $N_{T_3}=259$ であった．図4(a)の全壊被害では、初期段階では事前分布の影響を受けて実被害棟数に対して過小評価しているが、調査済み棟数が100棟前後で実被害の概略を捉えている．図4(b)の半壊被害では、100棟前後から300棟前後まで実被害棟数に対して過大評価をしているが、概ね実被害棟数の概略を捉えている．図4(c)の無被害では、推定過程全般において被害の概略を捉えている．全調査が終了した時点での被害確率の事後分布を示したものが、図3(b)である．全壊率45%，半壊率20%，無被害率35%あたりを中心に急な分布形状をとっている．

この他の町においてもシミュレーションを行った結果、初期段階から実被害の概略を捉える場合、過大・過小評価する場合、全棟数の大部分を調査しなければ実被害棟数の概略を捉えることができない場合など、様々な過程で被害箇所数の逐次推定が行われていくことを確認した．

4. おわりに

兵庫県南部地震における震度情報と fragility関数に基づく被害確率と、部分的な実被害情報を組み合わせ、被害箇所数の逐次推定を大字単位で行った．その結果、震度情報に基づく初期被害推定が最終的な実被害棟数とかけ離れていても、部分的な実被害情報を取り込むことによって、比較的早い段階で推定結果を修正できていることを確認した．現在、多様な情報源を統合的に処理することを目的として、地震動情報を1次情報、リモートセンシング画像による被害情報を2次情報、実被害情報を3次情報としたモデルについて検討中である．

参考文献

1) 金澤伸治・能島暢呂・杉戸真太・清水浩二：実被害情報の逐次処理による地震被害のリアルタイム推定モデル，第26回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1433-1436,2001.8.
2) 松岡昌志・青木久・山崎文雄：人工衛星画像を用いた1995年兵庫県南部地震による被害地域の判読，EDMテクニカルレポート，No.8，理化学研究所地震防災フロンティア研究センター，2001.1.
3) 山口直哉・山崎文雄：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，土木学会論文集，No.612，pp.325-336,1999.1.
4) 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.

表1 篠原南町における計測震度と即時情報

計測震度	M'_0	n'_{0_1}	n'_{0_2}	n'_{0_3}
6.57	21.0	7.1	6.4	7.5

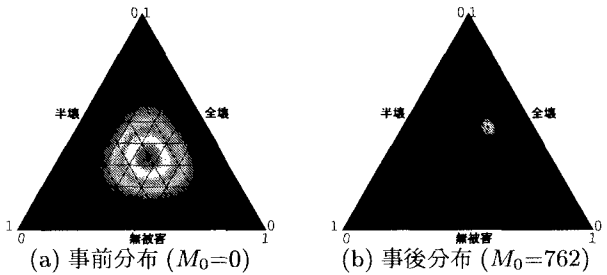


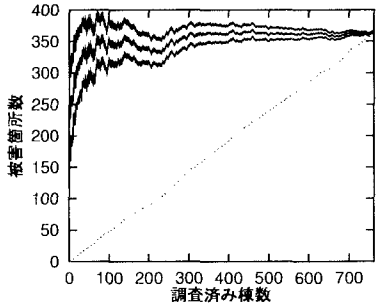
図3 篠原南町における被害確率の分布

表2 篠原南町における建物棟数と被害確率

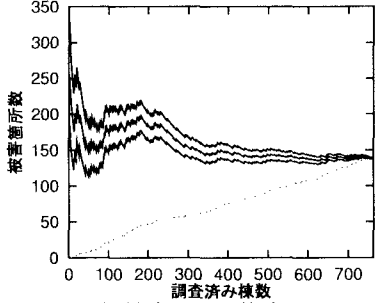
	全壊 ($k=1$)	半壊 ($k=2$)	無被害 ($k=3$)	合計
棟数	365	138	259	762
被害確率	0.48	0.18	0.34	1.00

表3 篠原南町における初期被害推定結果

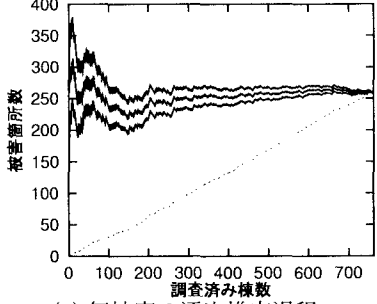
	全壊 ($k=1$)	半壊 ($k=2$)	無被害 ($k=3$)
平均値 $\mu'_{N_{T_k}}$	245.5	256.5	260.1
標準偏差 $\sigma'_{N_{T_k}}$	70.9	71.7	72.0



(a) 全壊被害の逐次推定過程



(b) 半壊被害の逐次推定過程



(c) 無被害の逐次推定過程

図4 篠原南町における被害箇所数の逐次推定過程