

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

金澤 伸治¹・能島 暢呂²・杉戸 真太³・清水 浩二⁴

¹ 学生会員 岐阜大学大学院博士前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

² 正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

³ 正会員 工学博士 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

⁴ 株式会社 市川工務店 (〒 500-8518 岐阜県岐阜市鹿島町 6-27)

地震発生後早期に被害状況を把握することは、緊急対応を迅速・正確に行うための要件である。従って、被害の概略を即時推定し初動体制を確立すること、確認情報を取り込み推定結果を更新し精度の向上を図ることが重要である。筆者らは、ライフライン施設のように連続的に扱われる施設に対するモデルを提案し、岐阜市の施設を対象にケーススタディーを行い、その有用性について考察した。本研究では、建物のように離散的に扱われる構造物に対する定式化を行い、提案モデルの拡張を図ると共に、即時推定の精度が逐次推定に及ぼす影響についてケーススタディーを行った。その結果、即時推定による被害確率が実被害確率とかけ離れている場合を除き、即時推定がある程度間違っていない、早い段階で幅を持った推定被害数に実被害数が収まり、被害の概略を捉えることを確認した。

Key Words: *Post-earthquake emergency, Bayesian estimation, Damage probability, Damage information, Seismic intensity information*

1. はじめに

近年、迅速・正確な被害把握と緊急対応を目的としたリアルタイム地震防災システムに関する取り組みが活発化している¹⁾。これらのシステムは、その迅速性においては地震直後からの被害軽減対策として有望であるが、不十分な状況把握や誤った情報が発せられた場合には、誤判断となり災害の拡大を助長する恐れがある。適切な緊急対応を行うには、所要時間と要求精度のバランスを考え、被害の全貌の概略を即時推定し緊急対応の初動体制を確立すること、時間の経過にともない蓄積される被害情報を逐次取り入れ、推定結果を更新し精度の向上を図ることが重要である。この両者を、被害の概略推定と観測データによる更新過程として捉え、ベイズ確率の方法に基づく統計的理論^{2),3)}を有効に適用できる。

このような観点から、文献4)では、一部分の実被害情報から全体の被害箇所数を逐次推定する方法、被害発生率の逐次確率比検定に基づく逐次決定過程のモデルが提案されている。さらに、このモデルを用いて筆者ら⁵⁾は、岐阜市のライフライン施設に仮想的な被害パターンを与えてケーススタディーを行い、その有用性について考察した。

文献4),5)においてはライフライン施設のような連続的に扱われる施設を対象としているのに対し、本研究では、建物や人的被害のように離散的に扱われるものを対象として、提案モデルの適用性の拡張を図ると共に、即時推定の精度が逐次推定に及ぼす影響について、ケーススタディーを行い考察した。

2. 被害確率と被害数の逐次推定法の定式化

(1) 被害情報の逐次処理の概念

図-1は、被害の確認・推定に基づく地震時意思決定過程をモデル化した概念図である。(a)は確認情報のみ、(c)は地震動強度情報等に基づく被害確率のみ、に基づいて行動をおこすが、(a)は正確だが緊急対応の時機を逸しかねず、(c)は迅速性に優れるが正確性に欠ける。両者の特徴を上手く取り入れた基準が(b)である。地震動強度情報等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、時々刻々と得られる確認情報を用いて、ベイズの定理により事前分布を事後分布に更新し、その被害確率から被害を概略的に推定するものである。

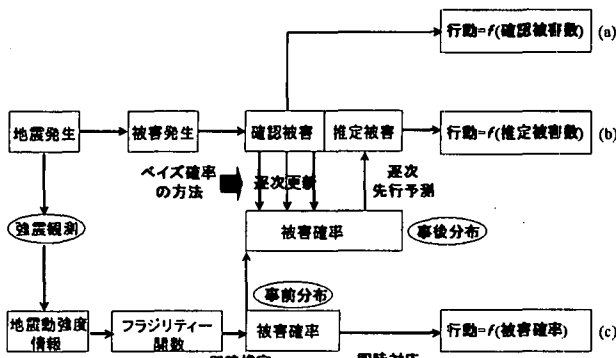


図-1 逐次推定手法と逐次決定過程の概念

(2) 逐次推定手法の定式化

図-2のように、被害区分が K 段階の場合 (ここでは、 $K=3$ として、 $k=1$:全壊被害 $\times$, $k=2$:半壊被害 Δ , $k=3$:無被害 $\circ$) を考える。ここで、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し、要素数 M の構造物群において、被害区分 $k (= 1, \dots, K)$ の被害発生数 n_k が被害確率 p_k の多項分布

$$P(n|M, p) = M! \prod_{k=1}^K \left(\frac{p_k^{n_k}}{n_k!} \right) \quad (1)$$

に従うものとする。構造物群の一部の要素 M_0 を調査したところ、被害数の内訳が n_{0k} 個であったとして、要素の被害確率 p_k と被害総数 n_{T_k} を推定する問題を考える。

ここで、2.(1) の (b) にあたる地震直後に得られる地震動強度情報等に基づいて、被害確率の即時推定が行われるものと仮定する。ここでは、初期被害推定が「要素 M'_0 あたり n'_{0k} 箇所の被害が予想される」という形で利用できる場合を考える。この M'_0 と n'_{0k} は、一般に非整数で、ベイズ更新過程では「仮想的なサンプルサイズ」と呼ばれるものである。この場合、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、次式ようになる。

$$f_P(p|M'_0, n'_{0k}, M_0 = 0) = \Gamma(M'_0 + K) \prod_{k=1}^K \left\{ \frac{p_k^{n'_{0k}}}{\Gamma(n'_{0k} + 1)} \right\} \quad (2)$$

次に、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 の事後分布は次式で与えられる。

$$f'_P(p|M_0, M'_0, n_0, n'_{0k}) = \Gamma(M_0 + M'_0 + K) \prod_{k=1}^K \left\{ \frac{p_k^{n_{0k} + n'_{0k}}}{\Gamma(n_{0k} + n'_{0k} + 1)} \right\} \quad (3)$$

この確率密度関数において、変数 p_k の平均値 μ'_{pk} および標準偏差 σ'_{pk} は、次式で与えられる。

$$\mu'_{pk} = \frac{n_{0k} + n'_{0k} + 1}{M_0 + M'_0 + 2} \quad (4)$$

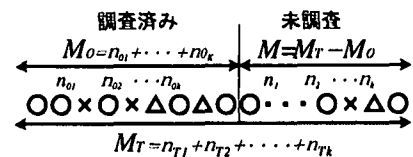


図-2 確認情報に基づく被害の逐次先行予測

$$\sigma'_{pk} = \sqrt{\frac{(M_0 + M'_0 - n_{0k} - n'_{0k} + 1)(n_{0k} + n'_{0k} + 1)}{(M_0 + M'_0 + 2)^2(M_0 + M'_0 + 3)}} \quad (5)$$

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、式 (1) と式 (3) の混合分布として、ディリクレ多項分布で得られる。

$$\begin{aligned} P(n|M, M_0, M'_0, n_0, n'_{0k}) &= \int_D P(n|M, p) f_P(p|M_0, M'_0, n_0, n'_{0k}) dp \\ &= \frac{\prod_{k=1}^K \binom{n_k + n_{0k} + n'_{0k}}{n_k}}{\binom{M + M_0 + M'_0 + K - 1}{M}} \end{aligned} \quad (6)$$

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 (4) と式 (5) を用いて、次式で与えられる。

$$\mu'_{N_{T_k}} = n_{0k} + \mu'_{pk}(M_T - M_0) \quad (7)$$

$$\sigma'_{N_{T_k}} = \sigma'_{pk} \sqrt{(M_T - M_0)(M_T + M'_0 + 2)} \quad (8)$$

ただし、 M'_0 と n'_{0k} のすべ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 μ_{pk^*} と標準偏差 σ_{pk^*} のみを規定することにより

$$M'_0 = \frac{\mu_{pk^*}(1 - \mu_{pk^*})}{\sigma_{pk^*}^2} - K - 1 \quad (9)$$

$$n'_{0k} = \mu_{pk^*}(M'_0 + K) - 1 \quad (10)$$

で求められる。地震直後にリアルタイムに地震動強度情報等に基づいて被害確率が得られない場合は $M'_0=0$, $n'_{0k}=0$ とすれば、被害総数 n_{T_k} の平均値 $\mu_{N_{T_k}}$ と標準偏差 $\sigma_{N_{T_k}}$ が求められる。

3. 岐阜県における逐次推定のケーススタディー

(1) 前提条件

岐阜県において行われた地震被害想定結果⁶⁾を用いて、2.(2)に示した逐次推定モデルのケーススタディーを示す。ここでは、市町村ごとの住宅被害の逐次推定を行うこととし、即時推定の精度が被害の逐次推定に及ぼす影響について考察する。実際に地震が発生した場合、時間の経過とともに震源断層の推定精度は高くなっていくと考えられる。そこで、震源断層に関する情報が、以下の3種の精度で得られる場合それぞれにおける即時推定を用いることとした。

(i) 震源位置とマグニチュードが得られる。

(ii) 概略的な震源位置が得られる。

(iii) 正確な震源断層が得られる。

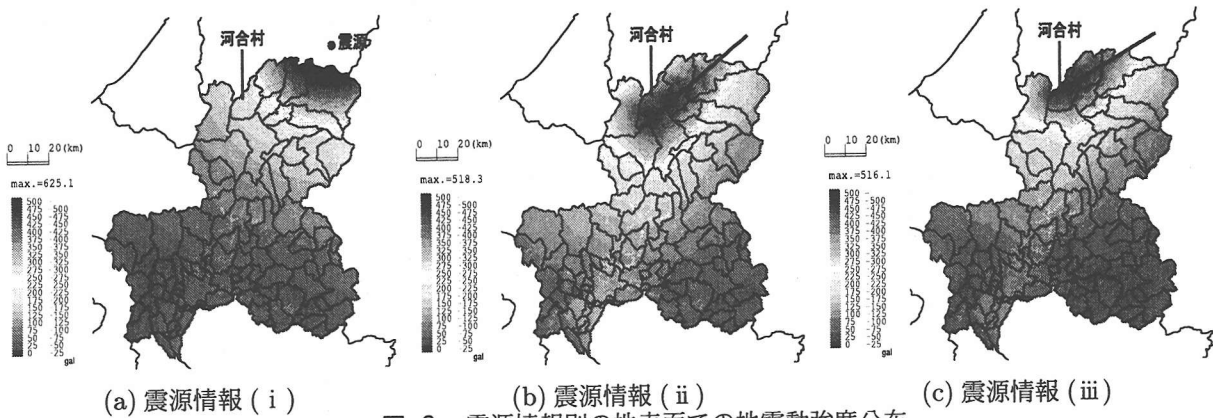


図-3 震源情報別の地表面での地震動強度分布

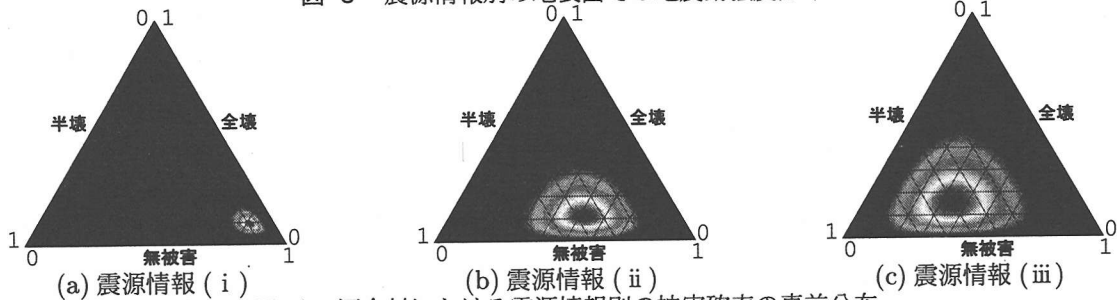


図-4 河合村における震源情報別の被害確率の事前分布

被害区分は $K=3(k=1:全壊, k=2:半壊, k=3:無被害)$ とする。文献6)においては、建物は屋根構造・建築年代を考慮して、A～D グループ(強度の弱い順)に分類されている。本研究では、市町村別に建物グループごとの被害数を逐次推定する。

(2) 即時情報として震源情報から事前分布を算出する方法

図-3 に、3 種の震源情報に基づいて地震動予測モデル EMPR⁷⁾ を用いて、増幅特性を考慮した地表面での地震動強度分布を示す。震源から遠いところでは大差はないが、震源に近い地域では、図-3 (c) に比べ、図-3 (a) では過大・過小に、図-3 (b) では全体的に大きく推定されており、断層の広がりやディレクティビティーを考慮することによる相違が明確に表れている。この地震動強度分布に基づいて文献6)より引用した被害確率と建物棟数から、市町村別に建物グループごとの被害確率を算出する。代表被災区分を半壊 ($k^*=2$) とし、半壊率 μ_{p2} 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 $\delta_p = 30\%$ とする。この変動係数を用いて標準偏差を算出し、式 (9), (10) を用いて即時情報 M'_0, n'_{0k} を求める。一例として震源断層近傍の河合村における A グループの即時情報を示したものが表-1 であり、式 (2) にあたる被害確率の事前分布を三角座標で示したものが図-4 である。図-4 (a) では、全壊率 10%, 半壊率 10%, 無被害率 80% あたりを中心

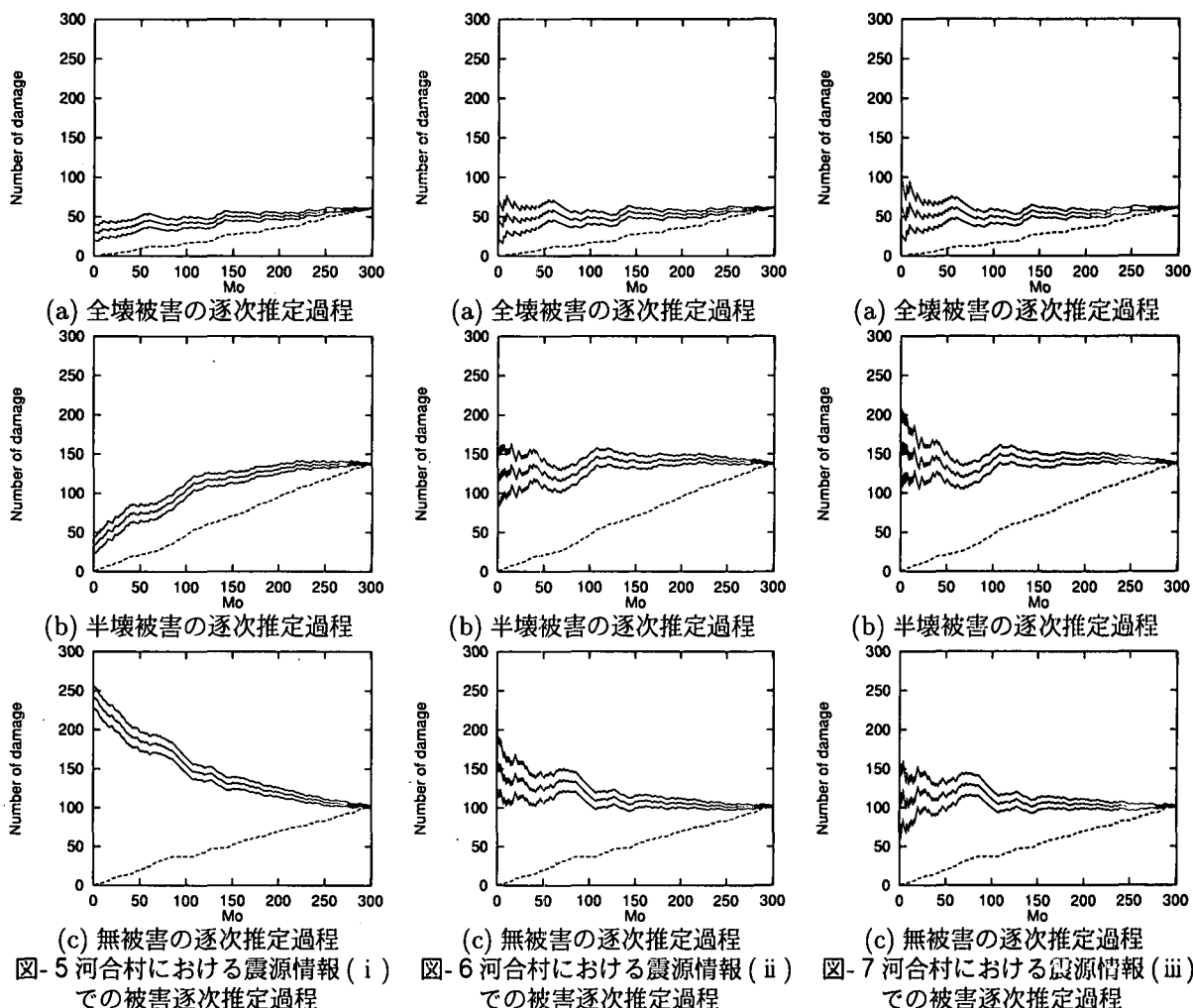
に急な分布形状をとっている。図-4 (b) では、全壊率 15%, 半壊率 35%, 無被害率 50%, 図-4 (c) では、全壊率 15%, 半壊率 50%, 無被害率 35% あたりを中心

表-1 河合村における A グループの震源情報別の即時情報

	即時情報(M'_0 あたり n'_{0k} 個の被害)			
	M'_0	n'_{01}	n'_{02}	n'_{03}
震源情報(i)	96.0	8.9	8.9	78.2
震源情報(ii)	15.8	1.8	5.8	8.2
震源情報(iii)	9.0	1.4	4.5	3.1

(3) 被害の逐次推定

震源情報 (iii) の正確に震源断層が得られる場合において算出した被害棟数を実被害情報として、市町村別にグループごとの実被害情報の集計を行い、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。この実被害情報を用いて事前分布を事後分布に逐次更新して、被害数の推定を行う。図-4 に示す事前分布を、実被害情報を取り込んで事後分布に逐次更新する。河合村における A グループの被害の逐次推定過程を震源情報別に示したものが図-5, 図-6, 図-7 である。縦軸は被害棟数、横軸は調査済み棟数、破線は各段階での確認被害数 M_0 , 3 本の実線はベイズ推定法による被害の逐次推定値である平均値 $\mu'_{N_{T_k}} \pm$ 標準偏差 $\sigma'_{N_{T_k}}$ を表す。全棟数は $M_T=301$ であり、実被害棟数は全壊棟数 $N_{T1}=61$, 半壊棟数 $N_{T2}=139$, 無被害棟数 $N_{T3}=101$ であった。図-5 の震源情報 (i) では、初期段階において無被害が過大に、



全壊・半壊被害が過小に推定されており、調査済み棟数が250棟前後になって、実被害棟数の概略を捉えている。図-6の震源情報(ii)では、初期段階から全壊・半壊被害は実被害棟数の概略を捉えている。無被害は初期段階では実被害棟数とかけ離れているが、調査済み棟数が100棟前後で実被害棟数の概略を捉えている。図-7の震源情報(iii)では、震源情報(i)、(ii)よりさらに正確な即時情報が得られることにより、全ての被害区分において初期段階からおおまかに実被害棟数の概略を捉えている。

この他、震源断層周辺の被害が予想される10市町村において検討を行った。震源に近い地域では、河合村と同様に、震源情報が正確になるほど、初期段階からおおまかに実被害棟数の概略を捉え、推定被害棟数が実被害棟数を大きく逸脱することがなかった。このような場合、早い段階で緊急対応の意思決定を行っても差し支えないと判断される。一方、震源から遠い地域では、各震源情報に対する被害の逐次推定過程に大きな相違はなかった。

4. おわりに

被害が離散的に扱われる構造物に対する定式化を行い、即時推定の精度が被害の逐次推定に及ぼす影響につ

いて考察を行った。3種の震源情報を想定し、岐阜県の住宅被害の逐次推定結果を得た。その結果、詳細で正確な即時情報が得られるほど、被害の逐次推定において初期段階から被害の概略を捉えることを確認した。今後、被害関数の推定精度が及ぼす影響や事前分布の規定方法等についてさらに詳細な検討を行う方針である。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会リアルタイム地震防災研究小委員会：第2回リアルタイム地震防災シンポジウム—リアルタイム地震防災の近未来の姿を探る—、土木学会、2000.5.
- 2) Ang, A.H-S and Tang, W.H.(伊藤学・亀田弘行共訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善、1977.
- 3) 繁樹算男：ベイズ統計入門、東京大学出版会、1985.4
- 4) 能島暢呂：ベイズ推定法に基づく被害の逐次処理に関する考察、第18回日本自然災害学会学術講演会、pp49-50,1999.10.
- 5) 金澤伸治・能島暢呂・杉戸真太：地震被害情報の逐次処理による緊急時意思決定プロセスのシミュレーション、第55回年次学術講演会概要集、I-B292,2000.9.
- 6) 岐阜県総務部消防防災課：岐阜県地震被害想定調査報告書、1998.3.
- 7) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2111/4/A, CD-ROM, 2000.