

建物物性値の不確定性が応答に及ぼす影響の評価手法に関する研究

東京工業大学	正会員	○飯山かほり
東急建設株式会社	非会員	細 政貴
東京工業大学	正会員	盛川 仁
東京工業大学	正会員	廣瀬 壮一
理化学研究所	正会員	藤田 航平
東京大学	正会員	市村 強

1. はじめに

首都直下地震等，都市部における大規模地震の発生が懸念されている昨今，人的・物的被害や構造物被害を精度よくかつ迅速に予測し，被害の拡大を最小限に抑えるために，都市全体を対象とした面的な地震被害評価の技術が果たす役割は大きい．本研究では，現在開発が進められている地震シミュレータ(IES)¹⁾に基づく都市全体の被害評価への適用を目的とした，実用的な建物損傷評価法について検討する．具体的には，剛性など建物物性値の不確定性を踏まえた地震損傷評価法として，点推定を利用する手法を提案する．この手法では，少ない試行回数から建物物性値の不確定性を考慮した損傷確率を推定するため，演算時間の大幅な短縮が期待できる．モンテカルロ法との比較により，提案手法の建物損傷評価法としての適用性を評価する．

2. 応答値の確率分布の推定方法

2.1. 点推定²⁾

点推定は，ある確率密度(平均 μ_x ，標準偏差 σ_x)を有する確率変数 x からいくつかの評価点を選択し，各評価点に対応する応答と重み(確率密度)から応答の期待値を評価する方法である．例として評価点を3点とする三点推定は，評価点 x_- ， x_0 ， x_+ と各評価点に対する重み P_- ， P_0 ， P_+ を次式で与える．

$$x_0 = \mu_x, \quad x_{\pm} = \mu_x \pm \sqrt{3}\sigma_x, \quad P_0 = \frac{2}{3}, \quad P_{\pm} = P_{\mp} = \frac{1}{6}$$

そして，各評価点に対する応答 y_- ， y_0 ， y_+ と重みから，応答の期待値を次式で求める．

$$E[Y^m] = P_-(y_-)^m + P_0(y_0)^m + P_+(y_+)^m \quad (1)$$

ここに， $E[\cdot]$ は期待値， m は次数である．点推定による試行回数は評価点の数に一致するため，評価点が少ないほど演算時間の面で有利となる．

2.2. 応答の確率密度分布の推定方法

建物物性値の不確定性を考慮して損傷確率を推定するためには，応答の期待値だけでなくその分布形状までを推定する必要がある．代表的なものに，「正規分布」や「対数正規分布」を与える方法がある．また，より高次のモーメントを用いて分布形を推定する手法として，次式「Gram-Charlier 展開³⁾」を用いる方法がある．

$$P(y) = \left[1 + \sum_{k=3}^{\infty} \frac{c_k}{k! \sigma_k} h_k \left(\frac{\mu - y}{\sigma} \right) \right] \phi \left(\frac{\mu - y}{\sigma} \right)$$

ここに， c_k は k 次のキュムラント， h_k は Hermite 多項式， ϕ は標準正規分布を表す． c_k は k 次以下のモーメントで表せる．本研究では，建物の損傷確率を応答頻度分布から評価する方法として上記3つの関数を点推定と組み合わせる手法を提案し，その適用性を評価する．

3. 解析方法および解析条件

IES を利用して，建物総数約 7000 棟(層数 1~37)を対象に多質点系せん断モデルによる非線形時刻歴応答解析(平均加速度法， $dt=0.0005s$)を行った．El-centro 波を地表面-50m に入力し，各建物位置の地盤構造を考慮した次元増幅解析により計算された地表面波形(最大加速度 $337\sim 710cm/s^2$)を各建物の入力とした．モード減衰定数は 1,2 次共に 2~3%として Rayleigh 減衰を適用した．本研究は応答評価でなく応答評価手法の検討を目的としているため，建物モデルは単純なものとし，質点質量及び剛性は各層一定，剛性モデルを完全弾塑性型とした．剛性モデルの降伏層せん断力 Q_y ，降伏変形 δ_y は，建物総重量 W ，ベースシア係数 C_B ，階高 H_s ，降伏層間変形角 θ_y を用いて次式で設定した．

$$Q_y = W \cdot C_B, \quad \delta_y = H_s \theta_y$$

不確定性を与える建物の物性値を降伏層間変形角 θ_y とし，これが正規分布に従うと仮定した(図1)．

4. 解析結果と考察

降伏層間変形角 θ_y の不確実性が正規分布 $\mu=0.01, \sigma=0.003$ に従うとした場合の結果例を示す. 応答評価の対象は最大層間変形角 θ_{max} とした.

4.1. 応答の確率密度分布

モンテカルロ法から求めた θ_{max} の頻度分布の形状が異なる建物を抜粋して図2に示す. 図2(a)のように頻度分布が正規分布に近い場合は, 評価手法の種類によらずその頻度分布の概形を精度良く再現している. 一方, 同図(b)のように頻度分布がやや非対称で峰が1つでないようなケースでは, Gram-Charlier 展開による評価が分布を最もよく再現しているようである. なお, 図は省略するが, 適用した関数は全て正規分布系であるため, θ_{max} の頻度分布が正規分布的でない建物に対しては適用関数によらずその概形の再現は難しかった.

4.2. 損傷確率の評価

全ての手法に対し, 対象全建物の最大層間変形角 θ_{max} の確率密度関数から求めた累積分布 $P(\theta_{max})$ から, θ_{max} が評価値 θ_e を超える確率 $FP(\theta_e)$ を次式で求めた.

$$FP(\theta_e) = 1 - P(\theta_e)$$

図3に, 確率 $FP(1/50)$ の値を 30×30 (900棟分) のメッシュ上に建物ID順に色分けして示した例を示す. (正規分布の図は割愛した.) 同図から, 全体としてモンテカルロ法に対し $FP(1/50)$ をやや高めに評価する(色が濃い)傾向は見られるが, どの評価手法もモンテカルロ法から求めた損傷確率の傾向を捉えているといえる. 各手法から求めた対象全建物の損傷確率とモンテカルロ法による損傷確率の線形回帰係数 α と相関係数を表1に示す. 同表より, α は対数正規分布で最も1.0に近いが, 手法間に有意な差はないといえる.

以上の結果は, 提案手法を実用的な建物損傷評価手法として適用できる可能性を示唆するものである.

5. まとめ

都市全体を対象とした大規模シミュレーションに基づく被害推定に適用できる実用的な損傷評価手法として点推定を利用した手法を提案し, 少ない試行回数からでも比較的精度よく損傷評価を行えることを示した.

参考文献

1)Muneo Hori and Tsuyoshi Ichimura: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, Journal of seismology, 12(2), pp.307-321, 2008. 2)Rosenblueth, E: Point estimate for probability moments, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 72, No.10, pp.3812-3814, 1975. 3)小倉久直:「物理・工学のための確率過程論」,コロナ社,1993.

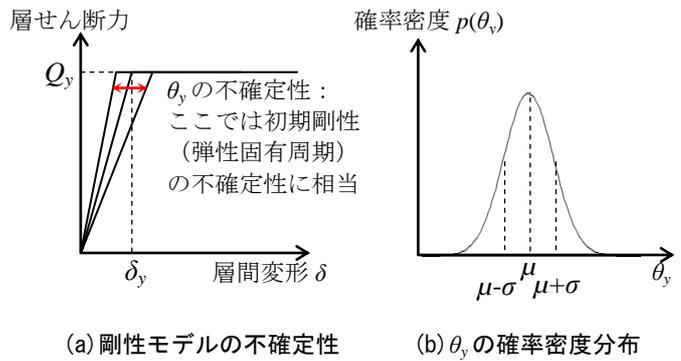


図1. 建物業値の不確実性の設定

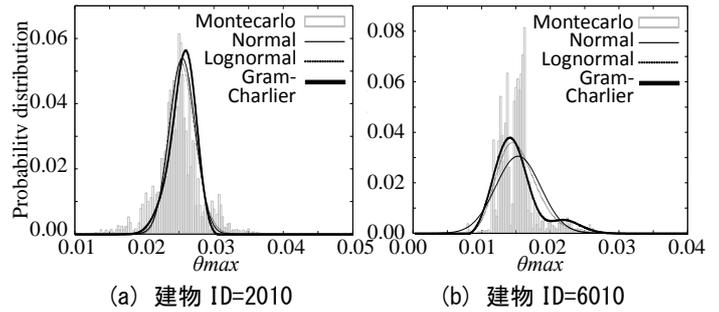


図2. 各手法による応答の確率密度分布の比較例

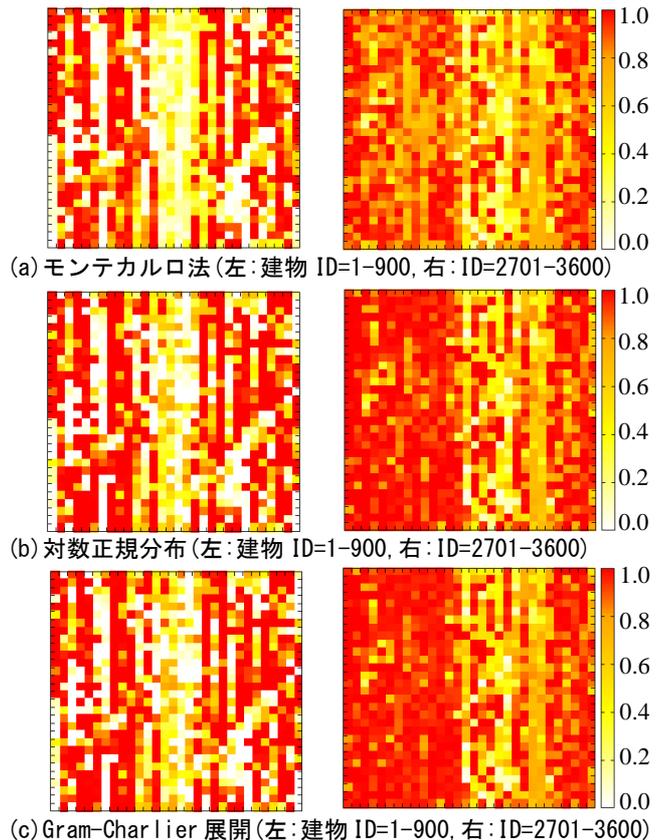


図3. 最大層間変形角が1/50を超える確率の比較

表1. モンテカルロ法に対する各手法の損傷確率の線形回帰 ($y = \alpha x$) の回帰係数 α と相関係数

	点推定+ 正規分布	点推定+ 対数正規分布	点推定+ Gram-Charlier
FP(1/100)	0.994 (0.88)	0.995 (0.86)	0.989 (0.87)
FP(1/50)	1.020 (0.93)	1.005 (0.93)	1.015 (0.93)

()内数値は相関係数を表す.