

損傷状態遷移確率と余震ハザード解析に基づく被災鋼骨組の信頼性評価  
 Seismic Reliability Assessment of Earthquake-Affected Steel Frames based on State-Dependent  
 Probability and Aftershock Probabilistic Seismic Hazard Analysis

○鈴木明子・倉田真宏・イウニオ イエルヴォリーノ・新本 翔太  
 ○Akiko SUZUKI, Masahiro KURATA, Iunio IERVOLINO, Shota SHIMMOTO

The time-variant aftershock risk of the structure was quantified integrating the developed state-dependent fragility curves with the seismic hazard, following the Markov chain model which makes use of aftershock probabilistic seismic hazard analysis (APSHA). Seismic reliability was evaluated for a benchmark structure located in Osaka, a site that may be affected by a mega-earthquake at Nankai Trough subduction-zone. Coupling APSHA with state-dependent fragility curves enabled to obtain the time-variant matrices, which contain all the unit-time transition probabilities between damage states.

### 1. はじめに

2011年の東日本大震災では、本震に続いて頻発する余震が被災地の混乱を長期化させ、被災者の度重なる避難や事業停滞による経済的損失などの問題が浮き彫りとなった。この震災を発端に、本震発生後の事業継続に関する意思決定を支援するべく、災害時に拠点となる建造物の確率的余震リスク評価に注目が集まっている。本研究は、今後発生が予想される南海トラフ巨大地震に備え、中低層鋼構造骨組を対象に、本震後時刻経過とともに進展しうる建物損傷の進行度を、フラジリティと余震ハザードを総合的に考慮した状態遷移確率 [1][2]によって評価した。

### 2. マルコフ過程に基づく状態遷移確率

損傷状態遷移確率とは、あるレベルから異なるレベルに建物の損傷状態が遷移する確率を指す。建物の損傷度は保有性能に応じて有限の状態空間として定義され、ある損傷状態の全ての組み合わせに対し算出されたある時刻  $t$  における状態遷移確率  $P_{ij}$  は、有限状態・連続時間マルコフ連鎖に基づいた以下の行列式で表される。

$$P_E(t) = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{j=2}^n P_{1,j} & \sum_{j=2}^n P_{1,j} & \cdots & \sum_{j=2}^n P_{1,n} \\ 0 & 1 - \sum_{j=2}^n P_{2,j} & \cdots & \sum_{j=2}^n P_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

式 (1)

上式において、各行・各列は定義した損傷状態と対応しており、それぞれ上から下、左から右へと

損傷が軽微な状態から深刻な状態への遷移を示す。対角要素下三角は損傷進行の不可逆性から、空事象となる。地震発生確率を考慮した場合には、ある時刻間  $(t, t+\Delta)$  での状態遷移確率は、地震が発生し建物の損傷が進行する事象とその余事象の和として、式 (2) で与えられる。

$$P_E(t, t+\Delta t) = \lambda(t)[P_E(t)] + (1-\lambda(t))[I] \quad \text{式 (2)}$$

ここで、 $\lambda(t)$  は本震発生後の時刻  $t$  における地震発生確率であり、 $[I]$  は単位行列である。さらに、マルコフ連鎖により、時刻  $t$  から一定時間  $m$  経過後の状態遷移確率は式 (3) により表される。

$$P_E(t, t+m) = \prod_{i=1}^m [P_E(t+i-1, t+i)] \quad \text{式 (3)}$$

### 3. 余震ハザードおよび建物フラジリティ解析

本研究では、上記の理論を今後発生が予想される南海トラフ沖巨大地震を想定した災害シナリオに適用し、建物固有の余震リスクの経日変化を追跡した。対象敷地は大阪府とし、余震の震源域は南海トラフ沖地震（本震）の想定震源域と同じと仮定した [3]。余震ハザード解析では、建物が被る地震の強さを表す指標として、1次固有周期加速度応答スペクトル  $Sa(T)$  を選択し、海溝型地震に対する距離減衰式から超過確率を算出した。

対象建物は3層2スパン鋼骨組とし、縮小試験体の振動台実験で検証した建物性能に基づき骨組の数値解析モデルを構築した。実験結果と要求性能規定を比較参照し、表1に示す5つの損傷状態

を定義した。降伏までのほぼ無損傷状態 As New (AN), わずかな修復のみで継続使用可能な Immediate Occupancy (IO), 修復が優先されるが人命の保護は確保される Life Safety (LS), 崩壊の危険のため立ち入りを禁ずる Collapse Prevention (CP), 修復不可能な崩壊状態を Failure (F)とした。

Fig. 1 に示す復元力特性を持つ等価 1 質点系 (ESDOF) モデルを、骨組の数値解析モデルの変位増分解析結果を基に構築し、時刻歴応答解析を行った。入力地震波として、東北地方太平洋沖地震の本震および余震群から、対象敷地と同種の地盤条件を持つ観測点における 30 波を無作為に選択した。損傷状態間の遷移を検証するため、適切にスケールした地震波を 2 波連続入力し、建物の損傷度確率 (フラジリティ) を検証した。ここでは、第 1 波によりある損傷状態に到達させた後、次の損傷状態に進展させる第 2 波の最大入力加速度  $Sa(T)$  の最小値を、状態間・地震波の全組み合わせに対し特定した。

損傷遷移を生じさせる加速度スペクトルの値の分布は対数正規分布で表されると仮定し、サンプリングされた第 2 波の最大入力加速度  $Sa(T)$  の中央値と標準偏差からフラジリティ曲線を導出した。得られたフラジリティ曲線に、先述の加速度スペクトル超過確率を掛け合わせ、地震が発生した場合の条件付き状態遷移確率行列  $P_E(t)$  を算定した。さらに、修正大森式による余震率  $\lambda(t)$  によって余震発生確率の経日変化を考慮にいたれた連続時間における状態遷移確率を式 (2), (3) によって求めた。

Fig. 3 に本震から 60 日間の状態遷移確率を本震後の損傷状態ごとにそれぞれ示す。建物は余震により損傷が不可逆的に進行するため、累積確率は日毎に増加するが、同時に余震数は日毎に減少する。したがって、遷移確率は一定時間経過後に収束する。今回の想定シナリオでは、本震後に建物が無損傷状態の場合、余震によって IO・LS レベルに遷移する可能性は少なくはない一方で、本震後の損傷状態が IO 以上である場合、余震によって損傷がさらに進行する可能性はほぼないという結果に至った。これは建物の損傷を著しく進行させるレベルの余震の発生確率が小さいことと、耐力の劣化を考慮しない弾完全塑性モデルを用いたことに起因すると考えられる。結果については更なる検証が必要だが、被災後の損傷状態を特定できれば、損傷状態確率を指標として意思決定が促せることを示した。

Table 1 Defined damage states.

	AN	IO	LS	CP	F
Roof Drift (%)	0 - 0.5%	0.5% - 1.2%	1.2% - 2.5%	2.5% - 4.0%	4.0% -

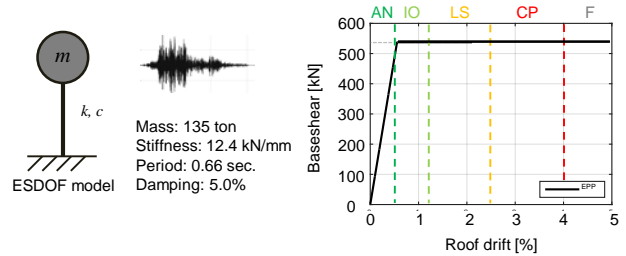


Fig. 1 ESDOF model.

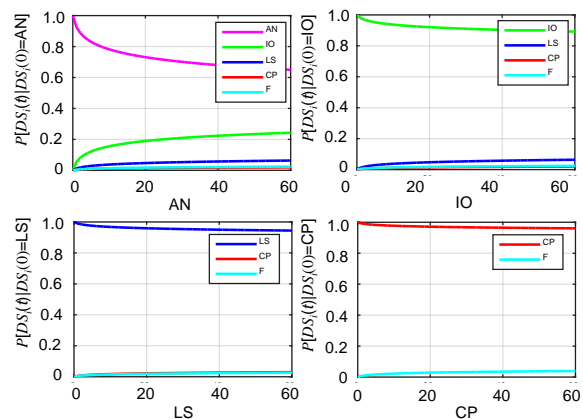


Fig. 2 Transition Probability as a time function

#### 4. まとめ

得られた成果を以下にまとめる。

- 建物の要求性能に応じた損傷レベルを定義し、各損傷状態間の状態遷移確率によって導出される余震リスク評価手法を、南海トラフ沖巨大地震群を被る鋼骨組を想定したシナリオに適用した。
- 過去の経験式や縮小骨組の振動台実験に基づいた余震ハザードおよび建物フラジリティ解析を行い、被災建物の損傷状態遷移確率の時刻変化を追跡した。

謝辞

本研究の一部は防災研究所共同研究の助成をうけた (25G-08)。ここ深く謝辞を表す。

参考文献

[1] Iervolino I, Giorgio M, Chioccarelli E. Markovian modelling of seismic damage accumulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2015; in press.

[2] Luco N, Bazzurro P, Cornell CA. Dynamic versus static computation of the residual capacity of a mainshock-damaged building to withstand an aftershock. In the proceedings of the *13th World Conference on Earthquake Engineering, 13WCEE*, Vancouver, Canada, 2004.

[3] 地震調査委員会, 地震研究調査推進本部: 南海トラフ地震活動の長期活動 (第二版) について, 2013.5.