

公開地震ハザードを用いた RC 橋脚の地震時破壊確率の簡易算定法

東北大学大学院 学生会員 ○林 弘

東北大学大学院 正会員 秋山充良

東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

東北大学大学院 学生会員 猪股右樹

1. はじめに

設計耐用期間内に発生する地震動の大きさ・頻度を確率的に表現し、さらに、構造物の構造性能評価に伴う不確定性を考慮した上で、構造物の地震時破壊確率を社会的に許容される値以下に抑える信頼性設計法を導入する動きがある。構造物が有する地震時の安全性の大小を破壊確率により定量化し、それを社会に開示することは、耐震性能に対するアカウンタビリティが求められる時代背景にも合致する。しかし、世界第一級の地震国である我が国では、全国各地で内陸型・海洋型の地震発生を考慮する必要があり、様々な断層の寄与を考慮した地震ハザード解析を行わなければならない固有の難しさから、その確率的な評価は避け、設計地震動などは過去に発生した最大地震動などに基づき与えてきた。一方で、近年は、地震調査研究推進本部などの公的機関から各地の地震危険度が確率的に公表されるようになってきた。これを用いることで、信頼性理論の考えを取り入れた耐震設計基準の整備が可能になると思われる。

ただし、公開地震ハザードが入手されても、構造物の厳密な地震時破壊確率を算定するためには、モンテカルロ法の中で構造物の弾塑性地震応答解析を繰り返し行うことで fragility 曲線を評価し、さらにはその fragility 曲線と地震ハザード曲線から数値計算を行う必要があるなど、煩雑な作業が求められる。そこで本研究では、Cornell¹⁾の耐震信頼性解析に関する研究成果を修正することで、公開地震ハザードを用いた構造物の地震時破壊確率の簡易算定法を構築した。また、RC 橋脚を対象に提案手法の適用性を検証した。

2. 地震時破壊確率の簡易算定法に関する既往の研究

Cornell は、地震ハザード曲線は地震動強さ（地動最大加速度など）の大きさに関わらず一定の勾配 k を持つと仮定するなど、地震時破壊確率の算定過程に幾つかの仮定を設けることにより、構造物の限界変位を超過する応答が生じる確率の算定式として式(1)を提案した。

$$pf = H(\alpha^{\hat{C}}) \exp \left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} (\beta_{D|\alpha}^2 + \beta_C^2) \right] \quad (1)$$

ここに、 $H(\alpha^{\hat{C}})$ は構造物の限界変位の中央値 $\hat{C}$ に対応する地震動強さの超過確率、 k は地震ハザード曲線の勾配、 b は構造物の弾塑性応答と地震動強さの関係式に用いるパラメータ、 $\beta_{D|\alpha}$ は構造物の弾塑性応答と地震動強さの関係式が持つばらつきを表す対数標準偏差、 β_C は構造物の変形性能のばらつきを表す対数標準偏差である。

ただし、Cornell が想定する地震ハザード曲線は、図-1の仙台のような地震動強さに関わらず勾配 k が概ね一定のものである。一方、我が国では、複数の断層の影響を受け、各断層の地震ハザードへの寄与は地震動強さごとに異なる。そして、図-1の静岡や名古屋のようにハザード曲線の勾配 k が一定と見なせない地域が多い。そこで、以降では、図-1の静岡や名古屋のようなハザード曲線の近似方法を提案する。なお、図-1のハザード曲線は、後述のRC橋脚の破壊確率の算定で用いた地震ハザード曲線であり、J-SHIS（地震ハザードステーション）²⁾により公開されている。

3. 地震ハザード曲線の近似域設定方法

図-1の静岡や名古屋のような強い非線形性を示す地震ハザード曲線に対し、構造物の破壊確率に最も影響する地震動強さの範囲から式(1)で用いる勾配 k を求める。また、構造物の弾塑性応答と地震動強さの関係は動的プッシュオーバー解析に基づき評価する。具体的な算定手順を以下に示す。

- 1) 破壊確率 pf を与える。計算開始時は初期値として $pf = p_0 (= 0.01)$ を与える。この pf に対応する地震動強さ α^{p_0} を地震ハザード曲線から求め、その近傍で勾配 k を算定する。

Key Words : 地震ハザード曲線, 信頼性評価, 破壊確率, RC 橋脚

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL : 022(795)7449 FAX : 022(795)7448

$$d_{\max}^{\pm n} = \hat{C} \exp \left[-\frac{k}{b} \beta_c^2 \pm 2\beta_c^2 \ln \left(\frac{1}{n} \right) \right] \quad (2)$$

$$H_D(d) = H(\alpha^d) \exp \left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{D|\alpha}^2 \right] \quad (3)$$

$$\left| \frac{\log H_D(d_{\max i}) - \log H_D(d_{\max i+1})}{\log H_D(d_{\max i+1})} \right| \leq \varepsilon \quad (4)$$

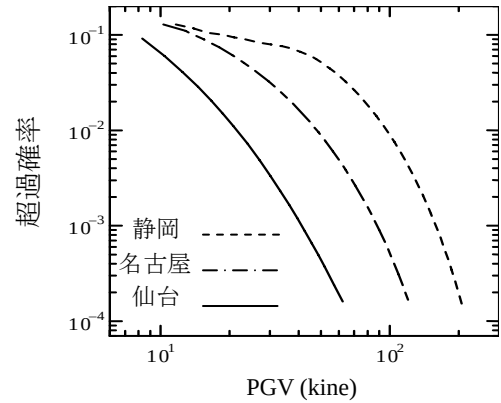


図-1 地震ハザード曲線

- 2) 動的プッシュオーバー解析により，構造物の限界変位の中央値 $\hat{c}$ に対応する地震動強さでの b と $\beta_{D|\alpha}$ を求める．
- 3) 式(2)の変位を式(3)に代入し，それぞれの変位に対応した超過確率を求める．
- 4) 3)で得られた超過確率の範囲でハザード曲線の勾配 k を求め，これを式(1)に代入して新たな破壊確率 pf を得る．
- 5) 式(4)を満足するまで，1)～4)を繰り返す．

4. 解析条件

4.1 解析対象 RC 橋脚

ここでは，RC 橋脚を対象に提案手法の適用を試みる．RC 橋脚は，固有周期を 2 種類，限界変位の大きさを 3 種類とし，さらに変形性能の評価に伴うバラツキを考慮する β_c の大きさとして 3 種類を考慮した．

4.2 地震動の設定

着目する地震動強さ（本研究では，地動最大加速度 PGA と地動最大速度 PGV）と RC 橋脚の弾塑性応答の関係を動的プッシュオーバー解析に基づき求めることで，式(1)のパラメータ b と $\beta_{D|\alpha}$ が求められる．動的プッシュオーバー解析で用いる地震波は，K-NET³⁾より公開されているものを使用し，i)マグニチュード 6.0 以上，ii)震央距離 300km 以内，iii)I 種地盤上で観測，の各条件に合致する地震波を選択している．

4.3 公開地震ハザード曲線と着目する地震動強度

公開地震ハザードは地震動強さにPGVを用いたJ-SHISのものと，地震動強さにPGAを用いた安中・矢代⁴⁾のものを用いた．想定地点はそれぞれ本州内の6箇所を選定している．使用したJ-SHISの地震ハザード曲線の一部は図-1に示してある．

5 解析結果

提案手法により求めた安全性指標 β_p ($pf = 1 - \Phi(\beta)$ ， Φ ：標準正規分布の累積分布関数)とモンテカルロ法を用いた厳密解法による信頼性指標 β_M の比 ($= \beta_M / \beta_p$)を前記した橋脚 18 パターンと 12 地点の地震ハザード曲線の組み合わせに対して算定したところ，平均値 1.02 で変動係数 11%であった．一方，Cornell が提案する参考文献 1)の手法をそのまま用いた安全性指標 β_c と β_M の比 ($= \beta_M / \beta_c$)の平均値は 1.25 で変動係数 42%であった．

6 まとめ

本研究は，公開地震ハザードの結果を土木構造物の耐震設計や耐震補強戦略などに活用することを目的として，構造物の地震時破壊確率の簡易算定法を構築した．既往の研究成果に対し，我が国の地震ハザード曲線が持つ非線形性の影響を考慮できるような改良を加えることで，実用上十分な精度で構造物の破壊確率を算定できた．また，地震時破壊確率の算定式が陽な関数で与えられていることから，モンテカルロ法を行う場合などに比べ，特に信頼性理論に関する知識を必要としない．

参考文献

- 1) C. Allin Cornell, Fatemeh Jalayer, Ronald O. Hamburger, and Douglas A. Foutch : Probabilistic Basis For 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol128, NO4, pp526-533, 2002
- 2) 防災科学技術研究所 : <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 3) 防災科学技術研究所 : <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 4) 安中正, 矢代晴実 : 大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp489-494, 1998