

構造物の耐震裕度～地震リスクダイアグラムの提案

(財) 電力中央研究所 正会員 中島正人
 (財) 電力中央研究所 正会員 大島靖樹
 (財) 電力中央研究所 フェロー会員 平田和太

1 はじめに

構造物の耐震裕度¹⁾は、構造物の応答（応力、ひずみ等）あるいは入力に着目して表すことが可能であり、応力やひずみ等の応答に着目して表現した場合、破壊基準との直接比較が可能となるため、技術者・研究者にとっては非常に理解し易い表示となる。しかし、安全性を議論する上でリスクとの関係を明らかにしておくことは不可欠であるため、リスクとの関係を明確にし易い入力に着目して耐震裕度を定義することは非常に有用である。本報告では、構造物の耐震裕度（構造耐力）と地震リスクの関係の関係を示すダイアグラムを提案するとともに、その考え方を拡張し地震リスクを簡便に評価する方法を提案する。

2 構造耐力～リスクダイアグラム²⁾と等価 K_H

(1) 構造耐力と地震リスクの関連付け

従来、構造物や機器の耐震裕度は設計用地震動あるいは想定される地震動による応答に対して、耐力が持つ余裕（margin）で定義されることが多かった。しかしながら、地震動強度を指標とした耐震裕度の定義の方が、応答で定義された耐震裕度よりも汎用性かつ、理解され易さという観点から優れていると考えられるため、地震動強度を指標とした耐震裕度を用いることを提案する（図1）。地震動強度で定義した耐震裕度（構造耐力）と地震リスク（年損傷確率）は以下の式に基づき関連付けることが可能である。

$$P_f = \int_{A_{min}}^{\infty} \frac{dF_C(X_m, \beta, a)}{da} \cdot H(a) da \quad (1)$$

上式中、 $F_C(\cdot)$ はフラジリティー曲線であり、対数正規分布の累積密度関数に従うと仮定すると、 X_m （入力地震動強度 a で規定される構造耐力の中央値）、 β （不確かさ）、 a の3つの変数により規定され以下の式のように表現される。

$$F_C(a, X_m, \beta) = \Phi \left[\frac{\ln(a) - \ln(X_m)}{\beta} \right] \quad (2)$$

上式中、 $\Phi[\cdot]$ は標準正規確率分布関数を表す。一方、 $H(a)$ は地震ハザード曲線であり、対象地点の地震ハザード解析より得られる。 A_{min} は積分範囲の下限値を表し、通常はこの A_{min} を0を設定して得られる結果が地震リスクである。

(2) 等価 K_H および構造物の不確かさ β を用いた信頼性設計法

構造耐力～リスクダイアグラムを作成するためには、対象地点の正確な地震ハザード情報が必要となる。しかしながら、対象構造物（群）が広域に多数存在する場合には構造耐力とリスクの関係を簡便に評価する方法も有用となる。提案する構造耐力～リスクダイアグラムの考え方にに基づき、以下の手順に従い得られる地震ハザード曲線の傾き（等価 K_H ）を用いて、地震リスク評価を簡便に実施することが可能となる。

Step 1: 目標とする地震リスク（年損傷確率） P_f^* と構造物の不確かさ β を仮定する。Step 2: 詳細計算より対象地点の地震リスク P_f を計算し、 $P_f = P_f^*$ となる構造耐力 X_m を求める。Step 3: 対象地点の地震ハザード曲線 $H(a)$ より、Step 2で求めた X_m に対応する、地震動強度の年超過確率 $H(X_m)$ を求める。Step 4: 式(4)より、 P_f と X_m に実現する、地震ハザード曲線の擬似的な傾き K_H^* を計算する。Step 5: β と P_f を変化させて K_H を計算する。Step 6: Step 5の結果に基づき K_H を評価する。

$$P_f = \exp \left\{ \frac{1}{2} (K_H \beta)^2 \right\} \quad (3)$$

$$K_H^* = \frac{\sqrt{2}}{\beta} \sqrt{\ln \left\{ \frac{P_f}{X_m} \right\}} \quad (4)$$

Key Words: 耐震裕度, 地震リスク, 不確かさ, 地震ハザード, フラジリティー

〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, TEL.04-7182-1181, FAX.04-7184-2941, E-mail : masato@cripi.denken.or.jp

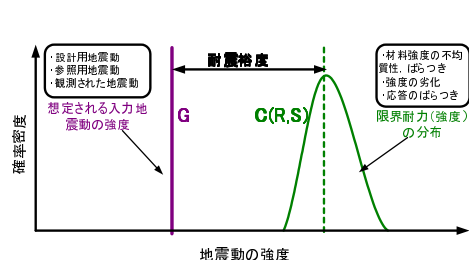


図1 入力地震動強度に基づく耐震裕度の定義

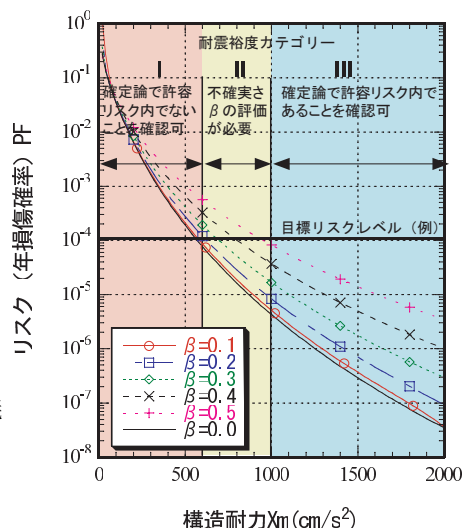


図2 構造耐力～リスクダイアグラム

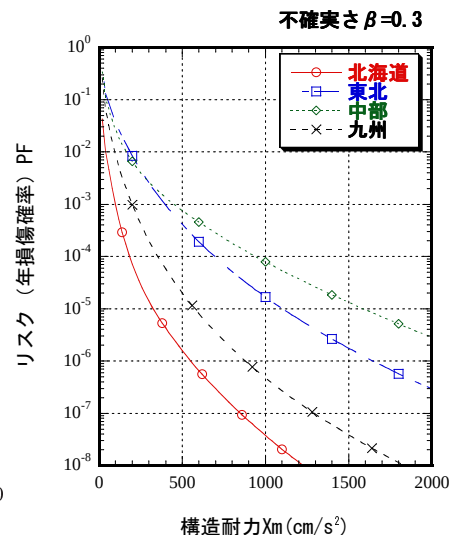


図3 構造耐力～リスクダイアグラムの地点による違い

3 数値計算例

(1) 解析手法・解析モデル

国の地震調査研究推進本部の調査結果に基づき標準的な地震発生源モデルを設定し、非ポアソン型の確率論的地震ハザード解析³⁾を実施した。地震活動度が異なる4地点を対象として、地震動評価においては硬質地盤を対象とした距離減衰式を用いた。式(1)に基づく計算では、構造物の脆弱性曲線は前述のとおり対数正規分布に従うと仮定し、曲線の傾きを規定する不確かさ β は0.1～0.5の範囲で設定した。

(2) 計算例

式(1)に基づき計算した構造耐力(耐力加速度)と地震リスク(年損傷確率)の関係を図2に示す。不確かさ β が零の場合は損傷度曲線はHevisideのステップ関数となるため、横軸に地震動強度を取った場合の地震ハザード曲線に一致する。このダイアグラムは、耐震裕度と地震リスクの関係を示す他、仮に目標リスクレベルが与えられた場合に、 β を評価しなくとも確定論的な応答解析より評価できる現実的な耐力を用いてリスクレベルを推測することが可能となる。さらに、 β の範囲が対象構造物毎に特定されれば、詳細なリスク解析による確率計算を行わずに図中に示した3つの領域に分割することが可能になるため、許容リスクと比較することにより概略判定を行うことが出来る。 $\beta=0.3$ に固定した場合の4地点における構造耐力～リスクダイアグラムを図3に示す。例示計算より、地域毎の地震ハザードの特性を反映して構造耐力とリスクの関係が異なることが明らかになった。目標とするリスクに適合し、かつ構造物の不確かさ β の変動を考慮した等価 K_H の計算結果および特徴については別途説明する。

4 まとめ

耐震裕度を地震動強度で定義することにより、限界耐力で表現した構造耐力と地震リスクを定量的に関連付けた、構造耐力～リスクダイアグラムを提案した。この構造耐力～リスクダイアグラムでは既往の方法(例えば⁴⁾)とは異なり地震ハザードの情報が簡略化されることなく全て考慮されており、確定論的に評価される構造耐力に基づき、土木構造物の地震リスクレベルを概略的に評価することが可能である。

参考文献

- 1) Electric Power Research Institute: A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin, Rep.EPRI NP-6041-SL, Rev.1, 1991.
- 2) 中島・大鳥・平田: 構造物の耐震裕度と地震リスクの対応関係に関する研究—構造耐力～リスクダイアグラムの提案—, 電力中央研究所研究報告 N10007, 2010.
- 3) 中島: 高地震帯における地震ハザード評価方法の提案, 一対象期間における地震の複数回発生を考慮した検討—, 電力中央研究所研究報告 N08069, 2009.
- 4) Kennedy, P.: Risk based seismic design criteria, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.192, pp.117-135, 1999.