

リスクマネジメントにおける地震リスクの考え方と解析方法  
RC橋脚における適用と試算

武蔵工業大学 正会員 吉川 弘道  
武蔵工業大学 中公 雄介

1. 地震リスクとは [1]

リスクマネジメントは、「リスクの認識」、「リスクの解析/評価」、「リスク対策の実行」により構成される。「リスクの解析/評価」の基本量となる地震リスク (seismic risk) の本来の (狭義の) 定義は、次式のように記述できる。

$$\bullet \text{ 地震リスク} = \text{地震の発生確率 (Hazard)} \times \text{そのときの損害/脆弱性 (Vulnerability)} \quad (1)$$

リスクは、単に、「予測できない危険性」、損害を受ける可能性の意味ではないことに注意されたい。

本文では、地震リスクの適用方法を考察し、RC橋脚を対象として、2例の解析事例を示す。

2. 地震リスク解析例 # 1 : 損傷期待値の算定 (図 1)

地震ハザード曲線  $P_1(a)$  と対象構造物の脆弱性 (Vulnerability) としての損傷指数  $DI(a)$  を準備する。地震ハザード曲線を、 $a$  にて微分し発生確率密度  $p_1(a)$  に変換する。そして、P.G.A.  $a_i$  に対する年損傷度期待値密度  $ed_1(a_i)$  および年損傷度期待値  $ED_1$  は次式により算出する。

$$ed_1(a) = DI(a) \cdot p_1(a) \quad (2)$$

$$ED_1 = \int_0^{+\infty} ed_1(a) da = \int_0^{+\infty} DI(a) \cdot p_1(a) da \quad (3)$$

同様に、供用期間  $t$  年間の損傷度期待値  $ED_t$  は次式より求められる。

$$ED_t = \int_0^{+\infty} ed_t(a) da = \int_0^{+\infty} DI(a) \cdot p_t(a) da \quad (4)$$

これは、式(1)に定義された地震リスクを、地震ハザード曲線  $P_1(a)$  と損傷関数  $DI(a)$  によって、具現化したものである。

3. 地震リスク解析例 # 2 : ETAとリスクカーブの算定 [2]

損傷レベルと震害額 : RC橋脚の非線形特性をテトラリニア型の骨格曲線でモデル化し、損傷レベルを、骨格曲線上のC点 (ひび割れ発生時)、Y点 (主鉄筋降伏時)、M点 (最大耐力時)、N点 (終局時) に設定する (図 2上図の  $a_{resp}$  は、最大応答変位である)。また、損傷レベル  $i$  における損失額を  $c_i$  と ( $i=1,2,3,4$ ) とした。

Fragility Curve と各損傷レベルでの発生確率 : 応答変位  $a_{resp}$  に対応する入力加速度  $a$  によって限界状態発生確率を表すと、地震損傷度曲線 (Fragility Curve) が得られる (図 2中図)。限界状態間の範囲を示す損傷レベルの発生確率  $Prob. (C_i | a)$  は、例えば、 $i=2$  の場合、 $Prob. (C_2 | a) = F_Y(a) - F_M(a)$  のように表される。限界状態時の変位  $a_k$  ( $k=y, m, n$ )、および各限界状態の条件付発生確率  $F_Y, F_M, F_N$  は、図 2を参照さ

れたい。(限界状態時の変位  $a_k$ 、応答変位  $a_{resp}$  は、ともに対数正規分布に従う確率量としている)。

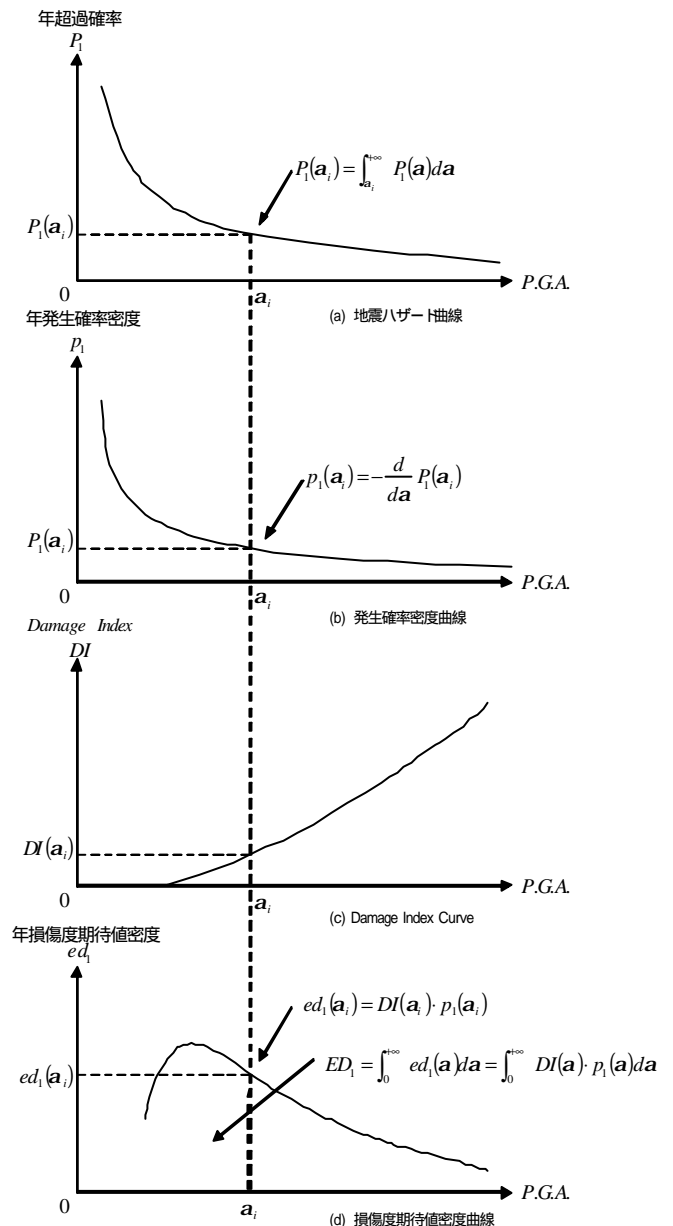


図 1 損傷期待値の算定に関する一連のフロー

Key Word : リスクマネジメント, Event Tree Analysis (ETA), リスクカーブ, 地震損傷度曲線  
連絡先 : 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 武蔵工業大学 工学部 都市基盤工学科 構造材料工学研究室 TEL : 03-3703-3111 内線(3241)

ETAと損害期待値：以上をまとめ、イベントツリーとして表すと図3のように表記できる。すなわち、4つに分類した損傷区分に対して、発生確率  $Prob(c_i | a)$  と損害額  $c_i$  がセットになる（ただし、 $\sum Prob(c_i | a) = 1$ ）。損傷レベル発生確率  $Prob(c_i | a)$  と損失額  $c_i$  との関係から、損失額の期待値  $c_m$  と分散  $c^2$  を算定する。

$$c_m = \sum_{i=1}^n c_i \cdot Prob.(c_i | a) \quad (5)$$

$$s_c^2 = \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 \cdot Prob.(c_i | a) \quad (6)$$

期待値  $c_m$  は Normal Expected Loss と呼ばれ、加速度を条件とした損失額の期待値となり、 $C_{NEL}$  と呼ぶ。

地震リスクカーブ：損失額  $c$  とその年超過確率  $G(c)$  との関係を表す地震リスクカーブにより、地震による損失リスクを定量的に認識することができる。まず地震ハザード曲線より、基盤最大加速度  $a_m$  が与えられた場合の、損失額の超過確率  $G(c | a_m)$  を式(7)により算出する。

$G(c | a_m)$  は、地震動の不確実性を考慮した損失額の超過確率である。すべての基盤最大加速度の発生を考慮するため  $G(c | a_m)$  に  $a_m$  の発生確率  $p(a_m) da_m$  を乗じて、最終的に損失額  $c$  の超過確率  $G(c)$  を式(8)により求める。

$$G(c | a_m) = \int_0^{\infty} h(a; I_a, z_a) \cdot R(c | a) da \quad (7)$$

$$G(c) = \int_0^{\infty} p(a_m) \cdot G(c | a_m) da_m \quad (8)$$

図4に超過確率  $G(c)$  の算定過程を模式的に示した。これは、基盤最大加速度  $a_m$  の発生確率に、 $a_m$  を条件とした加速度の発生確率、さらにその  $a_m$  を条件とした損失額の超過確率の算定という重積計算を表す。

4. あとがき

構造物の耐震設計は、100年程度の供用期間に対し、再現期間が1000年単位の地震動を想定する。さらに、耐震工学では、地震動とその伝播、構造物の応答特性、構造物の非線形挙動、信頼性理論の導入、など異なる固有技術を集約する必要がある。地震リスクの導入が、これらの2つの「難敵」を克服し、次世代の設計手法になることを期待している。

参考文献：

- [1]吉川弘道：「もっと知りたいコンクリー講座」耐震設計入門講座，  
http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/RC/tai\_a.htm
- [2]遠藤/吉川：鉄筋コンクリー橋脚に対する地震リスク評価手法の適用，構造工学論文集，vol.49A，2003.

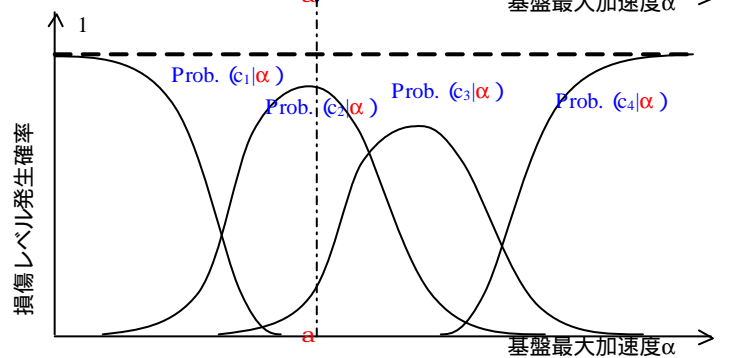
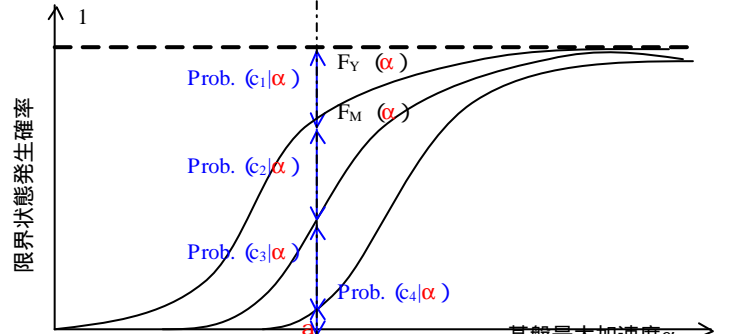
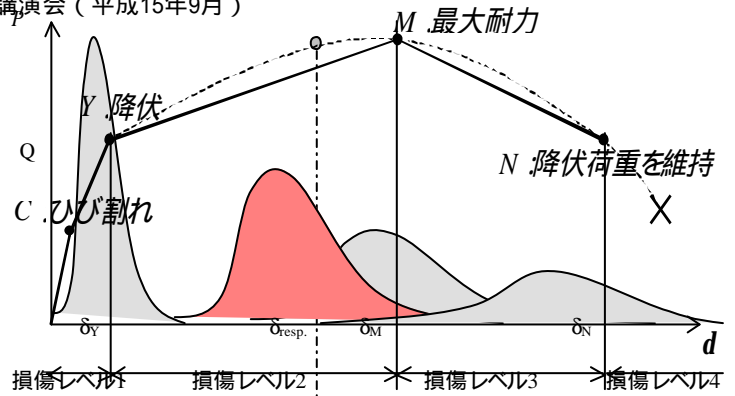


図2 損傷レベル(C1 ~ C4)発生確率の算定フロ

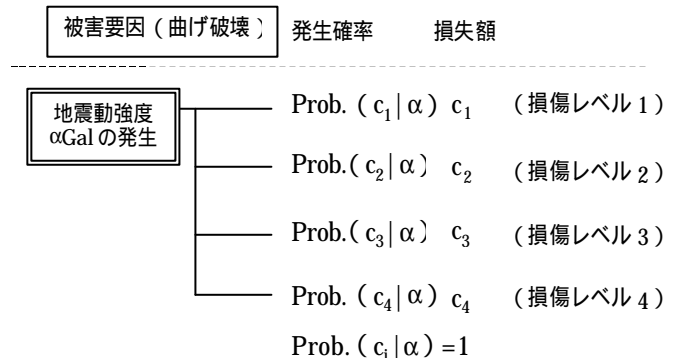


図3 イベントツリー解析/損傷レベルの発生確率と損傷額

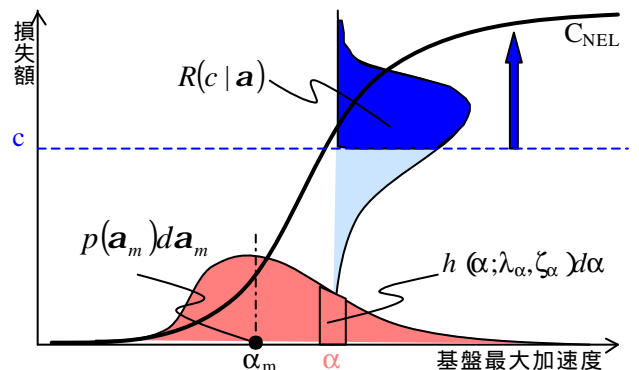


図4 地震動と損失額の不確実性