

イベントツリー解析を用いた鉄筋コンクリート単柱式橋脚の地震リスク評価

武蔵工業大学大学院 学生会員 大井幸太  
 武蔵工業大学工学部 正会員 吉川弘道

1. はじめに

土木業界では現在までに様々な事故，災害，環境問題等の原因，対策とその費用対効果が論じられた．その結果，近年は土木構造物が有する多種多様なリスクに対してリスクマネジメント手法の適用が求められている．

本論では，対象リスクを地震リスクとし，鉄筋コンクリート(以下:RC)単柱式橋脚の地震リスクをイベントツリー解析より定量評価する．ただし，被害誘引要因は構造被害のみ，評価結果は地震損失関数(以下:SDF)で示す．

2. 広義のリスク評価

本論におけるイベントツリーは地表面最大加速度(以下:P.G.A.) $\alpha_i$ Galの地震動を発端事象とし，破壊モードは曲げ破壊，曲げ降伏後のせん断破壊(以下:曲げせん断破壊)，せん断破壊の3事象，損傷レベルは Table1 に示す 6 事象を設定する．最終帰結は，構造被害が生起しない，つまり $d_1=0$  の場合を含め，7 つとなる(Fig.1)．

破壊モード，構造被害，損傷レベル生起確率は対象構造物の物性値より信頼性理論に基づいて算定する(Fig.2)．本論で定義する性能関数は，曲げせん断耐力比に相当する $Z=V_{y|\alpha_i}/V_{mu}$  と $Z_K=\delta_{resp|\alpha_i}/\delta_K(K=Y,M,N)$ の4 つである．ただし， $V_{y|\alpha_i}$ ， $V_{mu}$ ， $\delta_{resp|\alpha_i}$ ， $\delta_K$  は繰返し荷重作用によるせん断耐力劣化を考慮したせん断耐力，曲げ耐力，応答変位量，限界状態Kの変位量である．よって，各生起確率は参考文献 3)4)より次式から算定される．

破壊モード生起確率

$$P(F_n | \alpha_i) = \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_Z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_Z}{\zeta_Z}\right)^2\right] dz \quad (1)$$

ただし，曲げ破壊( $F_1$ ): $Z_1=1.5$ ， $Z_2=$

曲げせん断破壊( $F_2$ ): $Z_1=0.8$ ， $Z_2=1.5$

せん断破壊( $F_3$ ): $Z_1=0$ ， $Z_2=0.8$

$\lambda_Z, \zeta_Z$  は  $\ln z$  の期待値， $\ln z$  の標準偏差である．

構造被害生起確率

$$P_f(F_1 | \alpha_i) = 1 - P_s(F_1 | \alpha_i) = 1 - F_Y(\alpha_i) \quad (2-1)$$

$$P_f(F_2 | \alpha_i) = 1 - P_s(F_2 | \alpha_i) = 1 - F_Y(\alpha_i) \quad (2-2)$$

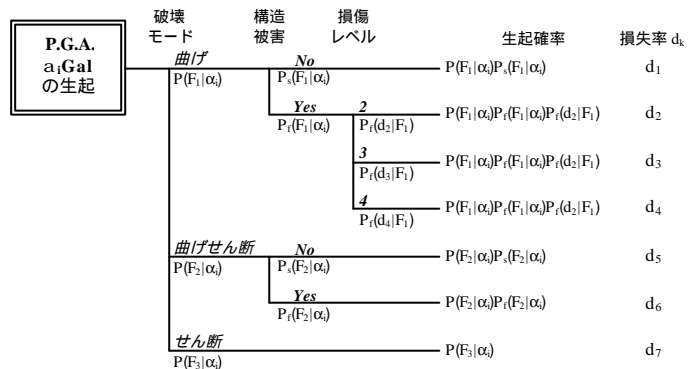


Fig.1 本論におけるイベントツリー

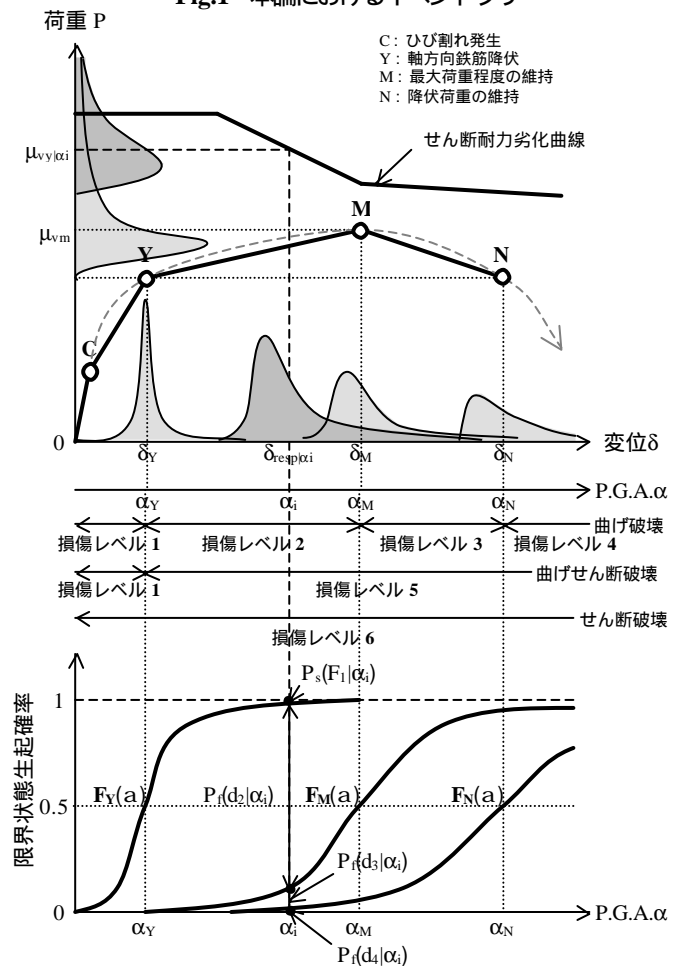


Fig.2 破壊モード，構造被害，損傷レベル生起確率

Table1 損傷レベルとPerformance Level の関係<sup>1)2)</sup>

損傷レベル	破壊モード	Performance Level	損失率d(-)
1	曲げ破壊，曲げせん断破壊	Fully Operational	0
2	曲げ破壊	Operational	0.008
3		Life Safe	0.033
4		Near Collapse	1
5	曲げせん断破壊		
6	せん断破壊		

Key Words :RC 単柱式橋脚，イベントツリー解析，構造被害，Seismic Damage Function，地震リスクマネジメント

連絡先 :〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1丁目28番地1号 TEL :03-3703-3111 内線(3241) FAX :03-5707-1165

ここで、限界状態生起確率  $F_K(\alpha_i)$  は次式で算定される。

$$F_K(\alpha_i) = \int_1^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{Z_K} Z_K} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln Z_K - \lambda_{Z_K}}{\zeta_{Z_K}}\right)^2\right] dZ_K \quad (3)$$

ただし、限界状態  $K=Y$

$\lambda_{Z_K}, \zeta_{Z_K}$  は  $\ln Z_K$  の期待値,  $\ln Z_K$  の標準偏差

損傷レベル生起確率

$$P_f(d_k | F_1) = \frac{P_f(d_k | \alpha_i)}{P_f(F_1 | \alpha_i)} \quad (k=2,3,4) \quad (4-1)$$

ここで,  $k=2$  の場合  $P_f(d_2 | \alpha_i) = F_Y(\alpha_i) - F_M(\alpha_i)$  (4-2)

$k=3$  の場合  $P_f(d_3 | \alpha_i) = F_M(\alpha_i) - F_N(\alpha_i)$  (4-3)

$k=4$  の場合  $P_f(d_4 | \alpha_i) = F_N(\alpha_i)$  (4-4)

ただし,  $k$ : 最終帰結番号 (Fig.1 において上から順に 1~7)

$F_M(\alpha_i)$ : 限界状態 M の生起確率

$F_N(\alpha_i)$ : 限界状態 N の生起確率

以上より、イベントツリーにおける各分岐点で生起確率及び非生起確率を算定でき、広義のリスクである最終帰結の生起確率 7 つは Fig.1 に示す式より算定される。

### 3. 狭義のリスク評価

狭義のリスクである条件付期待損失率  $E[d|\alpha_i]$  は、任意の  $P.G.A.\alpha_i Gal$  に対して次式より算定される。

$$E[d|\alpha_i] = P(F_1 | \alpha_i) \left[ d_1 P_s(F_1 | \alpha_i) + P_f(F_1 | \alpha_i) \sum_{k=2}^4 d_k P_f(d_k | F_1) \right] + P(F_2 | \alpha_i) \left[ d_5 P_s(F_2 | \alpha_i) + d_6 P_f(F_2 | \alpha_i) \right] + d_7 P(F_3 | \alpha_i) \quad (5)$$

予想し得る全ての地震動強度に対して条件付期待損失率  $E[d|\alpha_i]$  を算定することで SDF の算定、つまり RC 単柱式橋脚が有する地震リスクの定量評価が可能となる。

### 4. 数値解析例

解析対象とする RC 単柱式橋脚の物性値を Fig.3 に、解析パラメータを Table1, Table2 に示す。ただし、本論では損失率  $d_k$  を  $d_1=d_5=0, d_4=d_6=d_7=1$  と仮定した。また、せん断耐力劣化は、応答変位量  $\delta_{respl\alpha_i}$  に応じてコンクリート負担分  $V_c$  が低下する考え方を適用した<sup>5)</sup>。せん断耐力劣化曲線には Priestley らが提案する劣化曲線を用いた<sup>6)</sup>。以上より、Fig.4 に示す数値解析結果を得られる。

### 5. 今後の課題

曲げせん断破壊、せん断破壊の損傷レベル区分は破壊メカニズムに基づく破壊点位置より定める必要がある。

#### 【参考文献】

1) 鉄道総合技術研究所: SI 単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善株式会社, pp149-155, 1999.10  
 2) 家田仁, 村上迅: 人の被害認知特性を考慮した費用便益分析とネットワーク分析に基づくインフラ施設の要求耐震性能決定法の基礎研究, 土木計画学研究・公論集 No.22(2), pp539-542, 1999.10

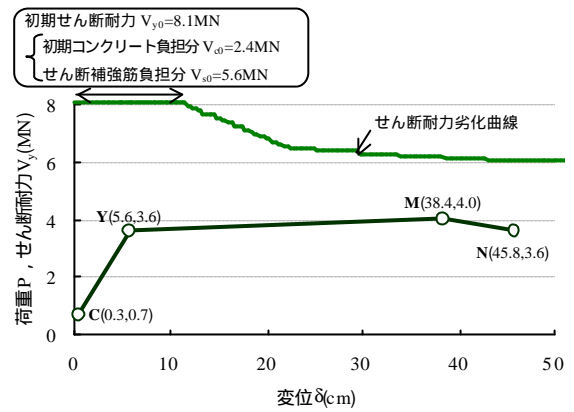
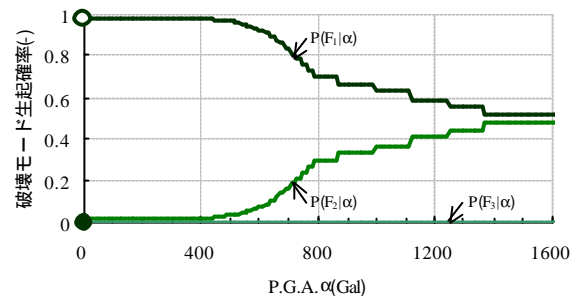


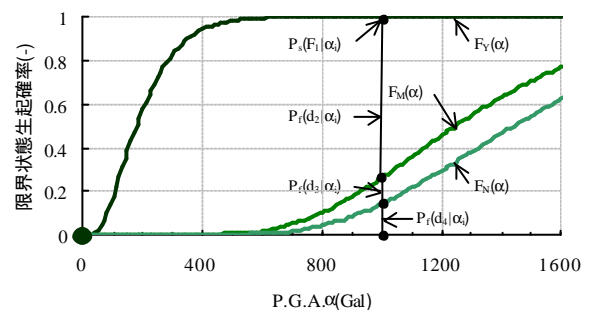
Fig.3 解析対象 RC 単柱式橋脚の物性値

Table2 解析パラメータ

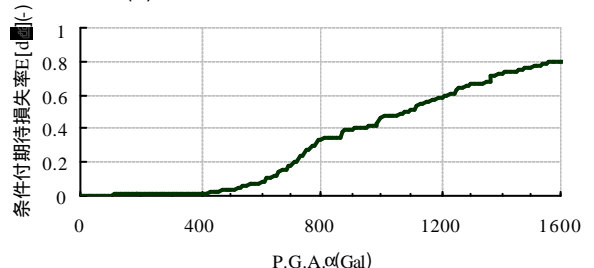
変動係数	変位	物性値	0.30
		応答値	0.30
耐力		曲げ	0.11
		せん断	0.08



(a) 破壊モード生起確率



(b) Seismic Fragility Curve



(c) Seismic Damage Function

Fig.4 数値解析結果

3) Yoshikawa, H. and Miyagi, T.: Ductility and Failure Modes of Single Reinforced Concrete Columns, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, pp229-244, 1999.10  
 4) 遠藤昭彦: 鉄筋コンクリート橋脚に対する地震リスク評価手法の適用, 武蔵工業大学修士論文, 2002.3  
 5) 大江亮二: 繰返し大変形を受ける鉄筋コンクリート単柱のせん断強度劣化と靱性評価, 武蔵工業大学修士論文, 2001.3  
 6) Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, A Wiley-Interscience Publication, 1996