

〔農工研技報 214〕  
〔221～240, 2013〕

# 農業水利施設群を対象とした地震リスク評価手法

浅野 勇\*

\* 施設工学研究領域施設機能担当

キーワード：農業水利施設群, 地震リスク, リスク評価, シナリオ地震, 信頼性理論

## I 緒言

農業水利施設は、ダム、ため池、頭首工、トンネル、開水路、管水路、排水工、揚水機場などの諸施設が有機的に連結したシステムとして構成され、受益地の用排水を担っている。このような多種多様な施設から構成される農業水利施設に対し、地震対策箇所や優先順位などの検討をする際には、地震リスクマネジメント (Seismic Risk Management, 以下SRM) が有効である。SRMは、物理的な損害、機能停止に伴う損害、第三者への派生的損害などを総合的に定量評価し、効果的な対策の意思決定支援を行う体系化された評価技術である。SRMにおけるリスクは、復旧コストや要求機能の復旧期間などで表現された施設の脆弱性あるいは安全性を示す指標であり、地震対策に伴うコストと共に、対策計画 (耐震補強など) を選定する際の客観的指標として用いられる。

本報告では、農業水利施設が地震により受けるリスクを工学的に分析し、災害により発生するリスクの大きさを受益者、地域住民が理解しやすい貨幣指標等に換算した地震リスク評価方法について報告する。また、新潟県中越地震により被害を受けた長岡市周辺の農業水利施設を対象とした地震リスク評価結果を報告する。

## II 単独施設を対象とした地震リスク評価

施設群を対象とした地震リスク評価は単独施設の地震リスク評価手法を基本とする。ここでは、施設群のリスク評価手法を述べる前にまず単独施設の地震リスク評価手法について説明する。

### 1 単独施設を対象とした地震リスク評価

単独施設の地震リスク評価の概要を Fig.1 に示す。単独施設の地震リスク評価では、対象期間内に地域に発生する地震により施設が損傷する確率やその損失額を推定する。損傷確率や損失額が大きな施設を優先的に対策することにより、対策の効率化を図る。地震リスク評価手法には数多くの方法があるが (日本建築学会, 2010), ここでは、Fig.2 に示すフロー図に沿った評価方法について述べる。

地震リスク評価では、解析のための入力情報として

地域に発生する地震と施設の耐力の情報が必要となる (Fig.2)。地域に発生する地震情報とは、施設のサイトにおける地震の発生確率および大きさに関する情報を意味し、地震ハザード情報と呼ばれる。地震ハザード情報は地震ハザード曲線にまとめられる。施設の耐力の情報とは、地震の大きさと損害額の関係をまとめた情報であり、地震損傷度曲線 (SFC: Seismic Fragility Curve) と呼ばれる。地震損傷度曲線を求めるためには、地震による施設の損傷形態 (損傷モード) をイベントツリー (ET: Event Tree) などを用いてモデル化し、地震の大きさと損傷確率の関係を求める。地震損傷度曲線と地震による施設の損失額を組合せ、地震動の大きさと施設の損傷の関係を表す損失関数が求まる。さらに、地震ハザード曲線と損失関数を組み合わせ、地震動の大きさと施設の損失額の関係、すなわち地震損失曲線 (SLF: Seismic Loss

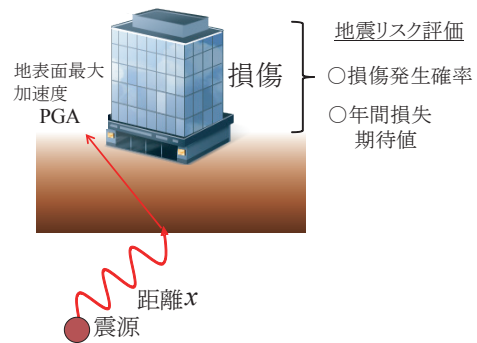


Fig.1 地震リスク評価の概要  
The concept of seismic risk analysis

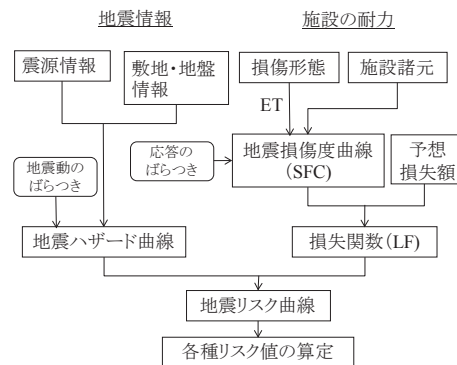


Fig.2 地震リスク評価の流れ  
Process flow of seismic risk analysis

Function) を求める。これらの情報からリスク評価に必要な評価指標を算定することができる。

2 イベントツリーによる損傷形態の分類

地震損傷度曲線を求めるためには、地震による施設の損傷形態を分類しなければならない。損傷形態の分類にはイベントツリー解析 (ETA: Event Tree Analysis) が用いられる (星谷ら, 2002; 中村ら, 2009)。ETAでは、施設の損傷をいくつかの発生要因に分解し、損傷を発生要因の積事象として分類する。積事象とは事象Aに引き続き事象Bが発生する事象を意味する。例えば、「液状化による施設の変状」に引き続き「施設の部材の損傷」が発生するような損傷事象は「液状化による施設の変状が発生しかつ部材損傷が発生する」という積事象で表される。

ETAでは、施設に大きな損傷を与える事象を分岐図の上位に置き、上位の事象と下位の事象を組合せることで、損傷を互いに背反でかつすべてを尽くした事象に分類する。ETの一例を Fig.3 に示す。Fig.3 は、地表面最大加速度  $PGA=100cm/s^2$  の大きさの地震が施設に作用した場合の損傷形態を表す。損傷事象は「液状化」と「部材損傷」の2つ発生要因を組み合わせた4つの積事象で表される損傷形態に分類される。ETの分岐線の下に数字は上位の損傷に引き続き下位の損傷が発生する場合の条件付き確率の値である。1つの分岐に対する条件付き確率の和は常に1となる。

ETを用いることにより4つの損傷形態の発生確率が計算できる。Fig.3のETの上段のパス (液状化変状無-部材損傷無) を例に損傷発生確率の計算方法を説明する。具体的に考えるため、施設に  $PGA=100 cm/s^2$  の地震動が100回作用する場合を考える。ETの上位の被害発生要因である「液状化」の分岐確率は、「変状無」が0.7、「変

状有」が0.3である。これは、100回の地震動が作用すると、70回は液状化による変状無し、30回は変状有を意味する。「液状化による変状無し」に引き続き「部材損傷無し」の事象が発生する条件付き確率は0.6である。これは、液状化による施設の変状が発生しない条件 (100回の地震の中で70回) の下で部材損傷が発生しない確率が0.6であることを示す。「液状化による変状が無くかつ部材損傷も無い」という積事象が発生する確率は確率の乗法定理から  $0.7 \times 0.6=0.42$  と計算できる。すなわち、100回地震が作用した場合、その内42回は施設は無損傷であると予測できる。このように、ETを用いれば、地震によって発生する損傷形態の発生確率をETの分岐確率の積から求めることができる。すなわち、ある大きさの地震動 (PGA) に対するETの分岐確率が求めれば、その大きさの地震動に対する施設の損傷発生確率と損失額が求まる。分岐確率の求め方については地震損傷度曲線の項で述べる。

3 地震損傷度曲線及び地震損失関数

a 地震損傷度曲線とET

横軸に地震動の大きさを、縦軸に施設の損傷発生確率を取り、両者をプロットした曲線を地震損傷度曲線と呼ぶ。地震動の大きさを表す横軸には、施設の損傷と相関が高い指標が採用され、地震動指標と呼ばれる。地震動指標としては、地表面最大加速度 (PGA)、地表面最大速度 (PGV: Peak Ground Velocity)、施設の応答加速度 (Response Acceleration)、計測震度、気象庁の震度階級などが用いられる (星谷ら, 2002; 損保料率機構, 2009) が、施設の損傷と相関が高いものを選択する必要がある (境ら, 2006)。ただし、地震動指標の中には多くのデータと複雑な計算を必要とするものも存在するため、損傷との相関性の高さ、指標を得るための計算の複

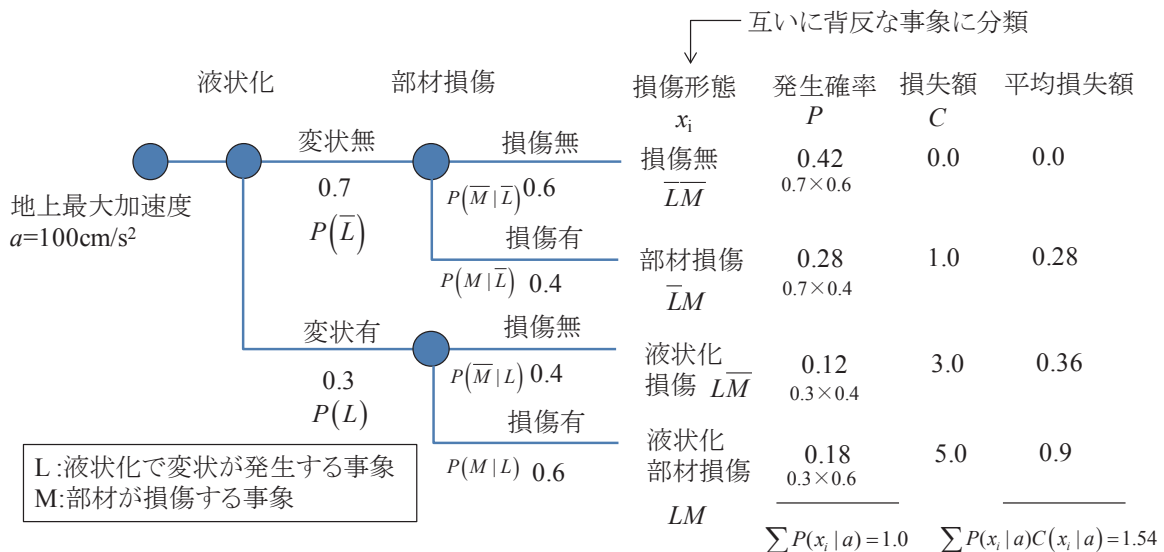


Fig.3 地震損傷形態を算定するためのイベントツリー ( $a=100cm/s^2$  のとき)  
Event tree for classification of seismic damage ( $a=100cm/s^2$ )

雑さ等を勘案し、バランスの取れた指標を採用することが望ましい。

**b 地震損失関数**

地震損失曲線とは地震動の大きさに対する施設の損失額を表した曲線である。曲線の横軸には地震動指標を、縦軸には損失額を取る。地震動が大きくなると施設の損失額は一般的には増加するので、地震損失関数は地震動指標に対して単調増加する曲線となる。地震損失曲線の値は、地震損傷度曲線から損傷発生確率を求め、その値に施設の予想損失額Cを掛けることで求まる（例えば、星谷ら、2002；吉川、2008）。Fig.4の地震損傷度曲線から求めた地震損失関数をFig.5に示す。

**c 複数の損傷形態に対する地震損傷度曲線と地震損失関数**

前項bでは、地震による施設の損傷事象が1つ（部材破壊）の場合の地震損傷度曲線と地震損失関数の求め方について述べた。ここでは、複数の損傷事象に対する地震損傷度曲線と地震損失関数の求め方について述べる（星谷ら、2002；吉川、2008）。

損傷無から大破までの4種類の損傷形態が発生する場合を考える（Fig.6）。施設にはFig.6に示す「無損傷」、「小破」、「中破」、「大破」が発生すると仮定する。損傷形態を $\alpha_i$ とし、添え字*i*を用いて、*i*=1（無損傷）、*i*=2（小破）、

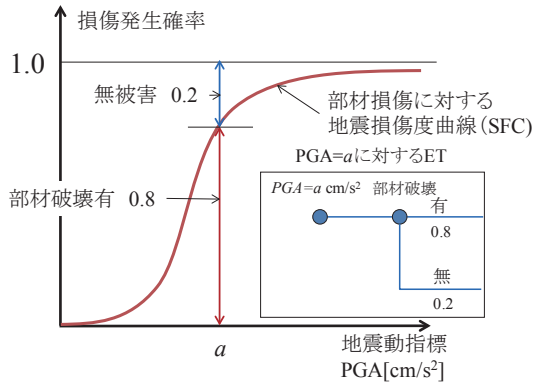


Fig.4 地震損傷度曲線の例  
Example for a seismic fragility curve

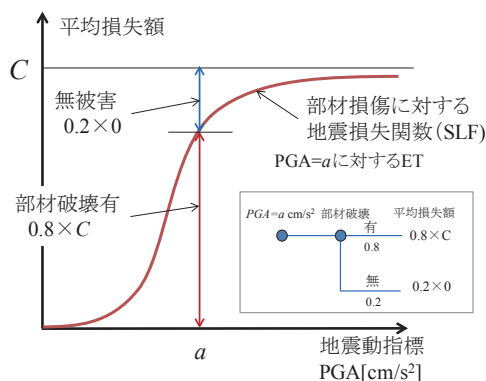


Fig.5 地震損失曲線の例  
Example for a seismic loss function

*i*=3（中破）、*i*=4（大破）と区別する。また、損傷形態 $\alpha_i$ に対する損傷発生確率を $P_i$ 、損失額を $C_i$ 、地震による平均損失額を $L_i$ とする。また、施設の損傷は地表面最大加速度PGAと良く相関し、PGAと損傷形態の発生確率の関係を表す地震損傷度曲線は対数正規分布の累積分布関数に従うものとする。対数正規分布とは確率変数の対数が正規分布となる確率分布である。対数正規分布の確率密度関数は式（1）で表される。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(x)-\lambda}{\xi}\right\}^2\right\} \quad (1)$$

ここで、

$x$  : PGA

$\lambda$  :  $\ln(x)$ の平均値（対数平均値）

$\xi$  :  $\ln(x)$ の標準偏差（対数標準偏差）

対数正規分布の2つのパラメータ $\lambda$ ,  $\xi$ は対数変換する前の確率変数の平均値 $\mu$ , 標準偏差 $\sigma$ から式（2）、（3）より求めることができる。

$$\xi^2 = \ln\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\lambda = \ln \mu - 0.5\xi^2 \quad (3)$$

標準正規分布の確率分布関数を $\phi$ とすれば、対数正規分布の確率分布関数 $F_X(x)$ は次式より求まる。

$$F_X(x) = \phi\left(\frac{\ln(x)-\lambda}{\xi}\right) \quad (4)$$

$\phi$ は解析関数を用いて表すことはできず、実際の計算では、数表あるいはMS EXCELなどの標準関数を利用して求める。MS EXCELでは（4）式は（5）式の関数名となる。

$$F_X(x) = \text{LOGNORMDIST}(x, \lambda, \xi) \quad (5)$$

「小破」、「中破」、「大破」の損傷形態に対応する地震損傷度曲線を $SFC_2(x)$ ,  $SFC_3(x)$ ,  $SFC_4(x)$ とする。Table 1にそれぞれの地震損傷度曲線が従う対数正規分布のパラメータを示す。ここで、地震損傷度曲線 $SFC_i(x)$ が示

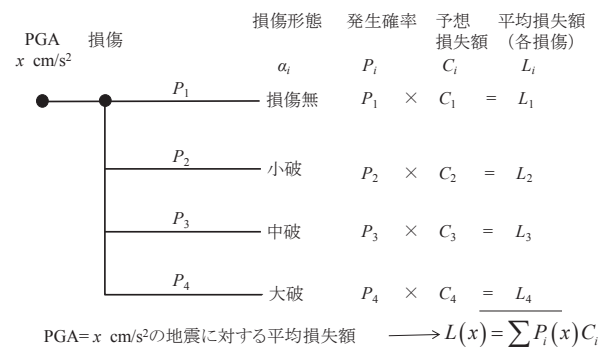


Fig.6 複数の損傷形態に対応したイベントツリーの例  
(PGA= $x \text{ cm/s}^2$ のとき)  
Event tree corresponding to some seismic damage (PGA= $x \text{ cm/s}^2$ )

す各損傷の発生確率は、施設の損傷が各損傷の限界値を超える確率、すなわち超過確率であることに注意が必要である。例えば、「施設が小破する確率 $SFC_2(x)$ 」とは「小破以上の損傷が発生する確率」、つまり「小破+中破+大破が発生する確率」となる。**Fig.6**のETと**Table 1**の値を用いて求めた地震損傷度曲線を**Fig.7**に示す。地震損傷度曲線が表す値が超過確率であることに注意すれば、「無損傷」、「小破」、「中破」、「大破」の事象が発生する確率 $P_1, P_2, P_3, P_4$ は**Fig.7**の相隣り合った曲線間の距離と等しいことがわかる。各損傷形態の発生確率 $P_i$ は式(6)から求めることができる。

$$\begin{aligned}
 P_1(x) &= 1 - SFC_2(x) \\
 P_2(x) &= SFC_3(x) - SFC_2(x) \\
 P_3(x) &= SFC_4(x) - SFC_3(x) \\
 P_4(x) &= SFC_4(x)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

各損傷形態の発生確率 $P_i$ に損傷程度に応じた損失額の $C_i$ を掛けると各損傷形態が発生した場合の平均損失額 $L_i$ を求めることができる。例えば、 $PGA=x \text{ cm/s}^2$ の時の地震損失関数の値 $SLF(x)$ は $L_i$ の和から次式により求めることができる。

$$SLF(x) = \sum_i P_i(x) C_i \tag{7}$$

式(6)を用いて地震損傷度曲線から地震の大きさ(PGA)と施設の損傷発生確率との関係を表す曲線(損失発生確率曲線)が求まる(**Fig.8(a)**)。損失発生確率曲線は、地震動の大きさと施設の損失発生確率の関係を示す。**Fig.8(a)**から、PGAが小さいと「無損傷」の発生確率 $P_1(x)$ が大きい、PGAが大きくなると「大破」の発生確率 $P_4(x)$ が増加し、PGAが $200 \text{ cm/s}^2$ 付近になると施設が大破する確率 $P_4(x)$ がほぼ100%に近づくことがわかる。すなわち、PGAが $200 \text{ cm/s}^2$ を越える地震が作用すると、この施設は「大破」する可能性が極めて高い。

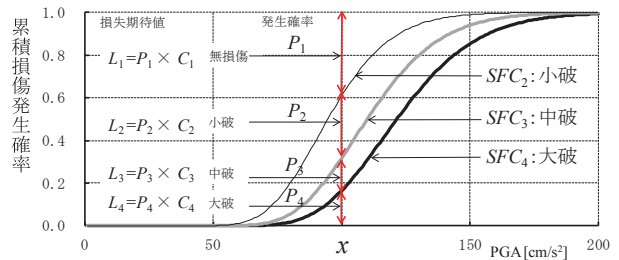
施設が大破した場合の損失額を $C_4$ 、中破 $C_3=0.5C_4$ 、小破 $C_2=0.2C_4$ 、無損傷 $C_1=0$ と仮定すれば、**Fig.7**の地震損傷度曲線から地震損失関数を求めることができる(**Fig.8(b)**)。**Fig.8(b)**からPGAが増加すると地震損失関数の値は施設が大破した場合の損失額 $1.0C_4$ に漸近することがわかる。**Fig.8(b)**から $PGA=100 \text{ cm/s}^2$ の地震に対する施設の平均損失額を求めると $0.3C_4$ となる。これは、施設の大破時の損失額 $C_4$ の30%に相当する。ただし、 $0.3C_4$ という値はあくまでも平均値であり、実際の損失額はこの平均値 $0.3C_4$ の回りに分布することを忘れてはならない。例えば、 $PGA=100 \text{ cm/s}^2$ の地震動が100回施設に作用したとすると、施設の損傷は確率変数であるため、無損傷から大破の損傷が施設には発生する。すなわち、100回の地震動に対して毎回 $0.3C_4$ の損失額が発生するわけではない。地震による施設の損

失額はばらつく確率変数であり、損失額は地震が発生して初めて確定する値であること、平均損失額はそのばらつく損失額の平均値であることに注意が必要である。

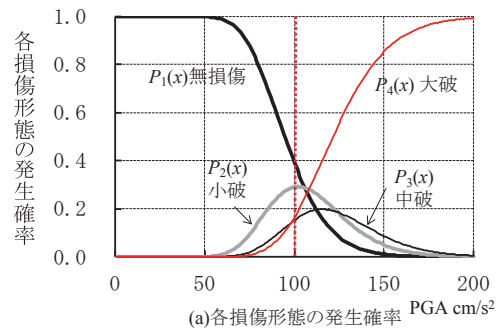
平均損失額を中心とした損失額の分布を損失確率密度関数と呼ぶ。**Fig.8(b)**には $PGA=100 \text{ cm/s}^2$ の地震動に対する平均損失額と損失確率密度関数を重ねて描いた。損失の発生確率が $P_1, P_2, P_3, P_4$ と離散的な値をとるため、損失確率密度関数 $L_i=P_i C_i$ は階段状の関数となる。重要施設では、このような地震による損失の分布を考慮する必要がある場合がある。例えば、特定の施設の地震損傷がシステム全体の機能に対して致命的となるシステムで

**Table 1** 地震損傷度曲線のパラメータ  
Parameters of seismic fragility curves

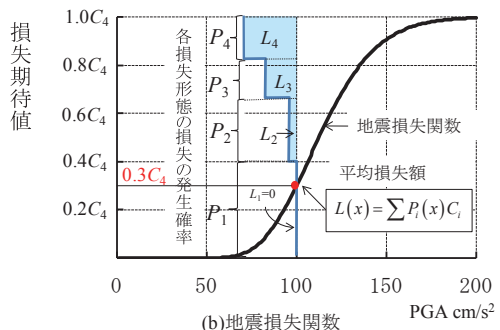
損傷形態	対数平均 $\lambda$	対数標準偏差 $\xi$	中央値 $e^\lambda$
小破以上	4.55	0.20	95
中破以上	4.70	0.20	111
大破	4.80	0.20	122



**Fig.7** 地震損傷度曲線  
Seismic fragility curves



(a)各損傷形態の発生確率



(b)地震損失関数

**Fig.8** 損失発生確率曲線と地震損失関数  
Seismic loss probability density function and seismic loss function

は「地震によって起こりうる最悪な損失」の可能性を検討する必要が生じる。このような場合は、地震による損失の分布を考慮した評価指標、たとえば予想最大損失PML (Probable Maximum Loss) などを用いた評価が有効となる。PMLについては、後ほどⅡ.7で説明する。

#### 4 地震ハザード曲線

地震ハザード曲線とは、施設が位置する地域にどの程度の大きさ地震動がどの程度の頻度で発生するか（地震危険度）を集約した情報である。ある地域における地震情報を整理するためには、その地域に起こりうる可能性がある地震動を対象に、地震の発生確率と大きさを評価する必要がある。このような評価方法としては1) 地域に起こりうるすべての地震動を対象に総合的に発生確率を評価する方法、2) 震源を仮定したシナリオ地震に基づく評価方法の2つがある（中村ら，2009）。ここでは前者の方法を説明する。後者は主に施設群の地震リスク評価に用いられるため後ほど説明する。

地震ハザード曲線は地震動指標 $\alpha$ と地震の年間超過発生確率（地震指標 $\alpha$ を超える地震動が1年間に発生する確率）の関係をグラフに表したものであり、サイトの総合的な地震危険度を表す。横軸の地震動指標としては複数の指標があるが、ここではPGAを用いた例をFig.9に示す。PGAの値が大きな地震ほど1年間に発生する回数は少なくなるため、地震ハザード曲線はPGAに対して減少関数となる。また、曲線が右側に移動するほど同一のPGAに対する地震の年間超過発生確率は増加するため曲線が表すサイトの地震危険度は大きくなる。地震ハザード曲線は建築学会の建築物荷重指針・同解説(2004)、防災科学技術研究所が運営する地震ハザードステーションなどから入手できる。

地震ハザード曲線の縦軸の年間超過確率 $P_\alpha$ は地震指標 $\alpha$ を超える大きさの地震動の年間発生確率に等しい。年間超過確率 $P_\alpha$ の地震動の発生がポアソン過程に従うとすれば、 $\alpha$ を超える地震動が発生した後に次の地震動

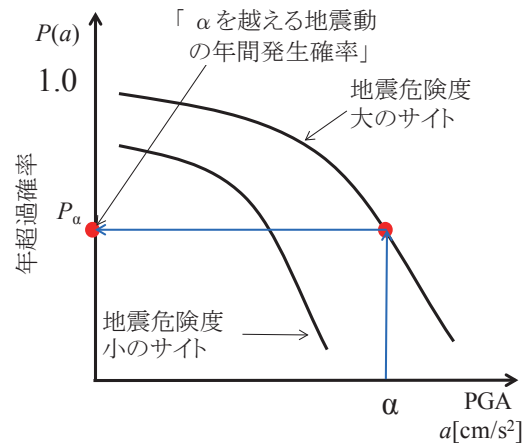


Fig.9 地震ハザード曲線  
Seismic hazard curve

が発生するまでの時間間隔の平均値、すなわち平均再現期間は式(8)から求まる。たとえば、年間超過発生確率が0.01の地震の平均再現期間は $1/0.01=100$ 年となる。

$$T_R = \frac{1}{P_\alpha} \tag{8}$$

地震ハザード曲線を $P(y)$ とすると、 $P(y)$ は $PGA=y$ に対する地震の年間超過発生確率を表す。ここで施設に1年間に作用する地震の大きさ(PGA)の確率密度関数を $f_Y(y)$ 、累積分布関数を $F_Y(y)$ とすれば、 $P(y)$ 、 $f_Y(y)$ および $F_Y(y)$ の間にはFig.10の関係がある。 $P(y)$ は $F_Y(y)$ の補関数となり1年間に $y$ 以上の大きさの地震が施設に作用する確率を表す。 $F_Y(y)$ は地震ハザード曲線 $P(y)$ から式(9)により求めることができる。

$$F_Y(y) = 1 - P(y) \tag{9}$$

$$f_Y(y) = \frac{d}{dy} F_Y(y) = -\frac{d}{dy} P(y) \tag{10}$$

さらに、 $F_Y(y)$ を微分することによりPGAの年間確率密度関数 $f_Y(y)$ を式(10)から求めることができる。この関

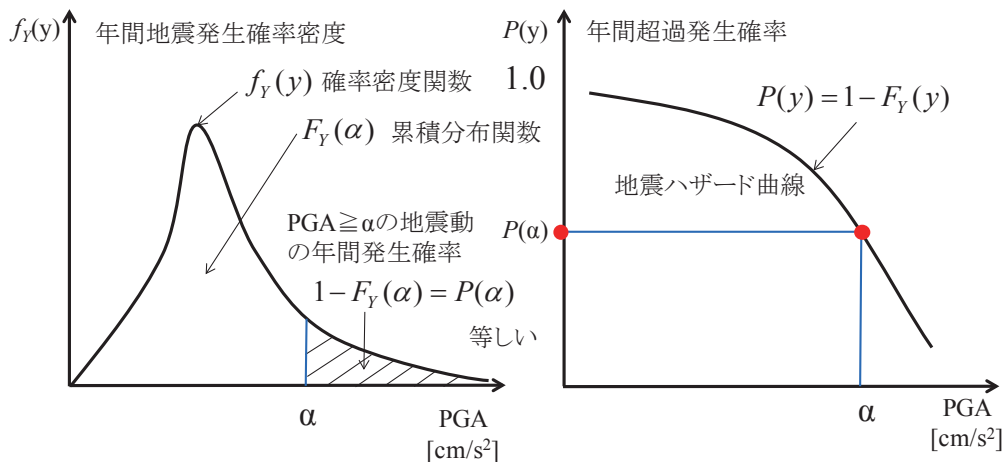


Fig.10 地震ハザード曲線とPGAの確率密度関数 $f_Y(y)$ と累積分布関数を $F_Y(y)$ の関係

係は後ほどの地震リスク評価で用いる。

5 地震リスク評価

施設の脆弱性に関する情報（地震損傷度曲線と地震損失関数）と施設が位置するサイトの地震危険度の情報（地震ハザード曲線）を組み合わせることにより様々な地震リスクに必要な情報を得ることができる。地震リスク評価では、年間地震リスク密度（Annual Seismic Risk Density）と地震リスク曲線（Seismic Risk Curve）が重要な情報となる。

a 年間地震リスク密度曲線

地震ハザード曲線と地震損失関数から年間地震リスク密度曲線が得られる。年間地震リスク密度曲線の例を Fig.11 に示す。年間地震リスク密度曲線下の総面積は地震による施設の年間平均損失額に等しい。また、ある地震動指標の区間で曲線を積分するとその値はその区間における施設の年間平均損失額となる。曲線下の面積が施設の年間平均損失額を表す性質を利用して、このグラフから施設の耐震性が評価できる。Fig.11 に2つの施設(A, B) の年間地震リスク密度曲線を示す。施設Aの曲線下の面積は施設Bのそれに較べ大きいので施設Aは施設Bより施設の年間平均損失額が大きい、すなわち施設Aは施設Bより耐震性が低い。また、曲線の形状から地震動の大きさと施設の脆弱性の関係を把握できる。Fig.11 から、施設Aの曲線にはPGA=150cm/s<sup>2</sup>付近に確率密度のピークが見られる。このことは、施設Aは中小規模の地震に対する損失発生の可能性が高いことを示す。一方、施設Bの曲線にはPGA=400m/s<sup>2</sup>付近に緩いピークが見られる。このことは施設Bが比較的大規模な地震に対して損失発生の可能性が高いことを示す。このように年間地震リスク密度曲線から施設の地震に対する損傷特性の評価ができる。これらの情報は耐震補強を行う場合などに重要な判断指標となる。

年間地震リスク密度を求める手順を Fig.12 に示す。PGAの確率密度曲線の値 $f_A(a)$ と地震損傷関数の値 $L(a)$ の積 $ed(a)=f_A(a)L(a)$ を求め、年間地震リスク密度を作成する。この計算は数値積分を用いて行う。

b 地震リスク曲線

地震ハザード曲線と地震損失関数から地震リスク曲線が求まる。地震リスク曲線の例を Fig.13 に示す。グラフでは、横軸に平均損失率（損失額／施設の再建設費用）、縦軸に平均損失額を超える地震が基準期間（ここでは1年間）に発生する確率（超過確率）を取り曲線を描いた。リスク曲線の読み方は、例えば、横軸の損失率 $a\%$ に対応する曲線Aの値が $P_a$ と求まれば、施設の損失率が $a\%$ 以上となる地震が1年間に発生する確率が $P_a$ と求まる。逆に損失率が $a\%$ 未満の地震が1年間に発生する確率は $1-P_a$ となる。施設に大きな被害を与える地震ほど発生確率は一般に低いため、地震損失率に対して地震リスク曲線は減少関数となる。地震リスク曲線は、施設の耐震対

策の評価指標として良く用いられる。Fig.13に示すように、地震リスク曲線が左に移動すると施設の損失発生確率は低下する。つまり、曲線が左に移動することは施設の耐

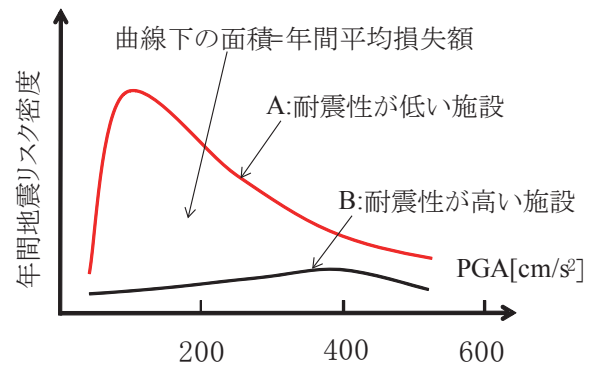
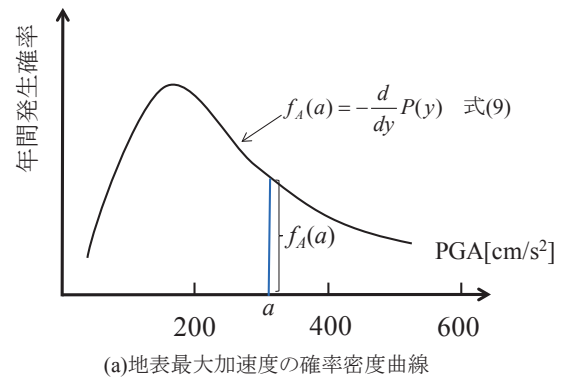
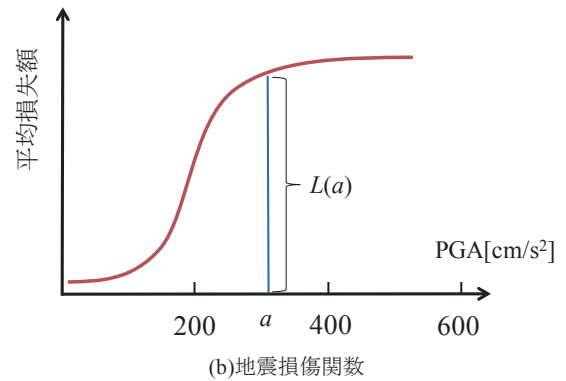


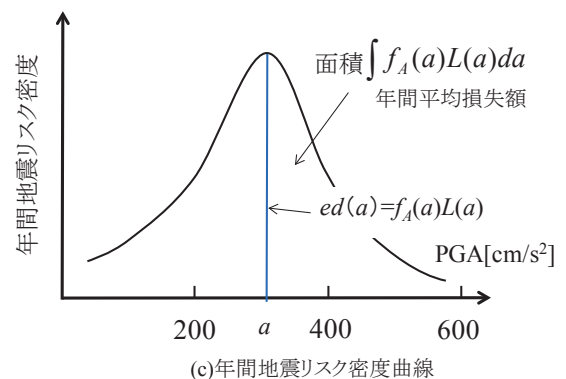
Fig.11 年間地震リスク密度曲線  
Annual seismic risk density curve



(a)地表最大加速度の確率密度曲線



(b)地震損傷関数



(c)年間地震リスク密度曲線

Fig.12 年間地震リスク密度曲線の求め方  
Calculation of annual seismic risk density curve

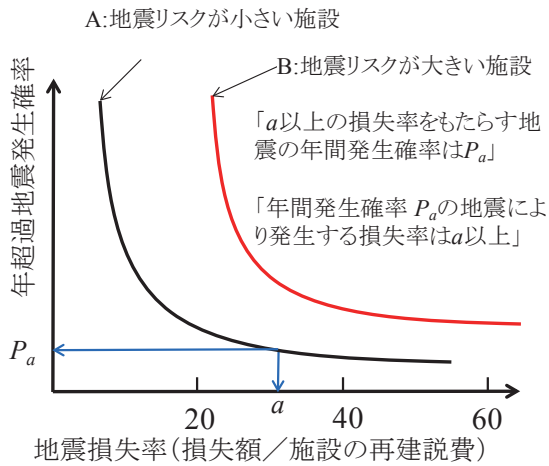


Fig.13 地震リスク曲線の例  
Example of seismic hazard curve

震性が向上したことを、逆に地震リスク曲線が右に移動することは施設の耐震性が低下したことを意味する。

c 地震リスク曲線および年間地震リスク密度曲線

Fig.7で求めた地震損傷度曲線を用いて、東京に位置する施設の年間地震リスク密度曲線及び地震リスク曲線を求める。東京の地震ハザード曲線としては建築物荷重指針に示された曲線を用いた。結果をFig.14に示す。

6 地震損傷度曲線の算定

地震損傷度曲線は地震リスク評価の解析精度に大きな影響を与えるため地震リスク評価の重要なポイントとなる。地震損傷度曲線の求め方としては、①解析的な方法、②統計的な方法、③経験的な方法がある。本節では特に①と②の方法について説明する。

①解析的な方法

信頼性理論に基づき、施設の破壊確率を算定し地震損傷度曲線を求める。

②統計的な方法

実際の地震による被害調査データから地震損傷度曲線を求める。

③経験的な方法

前に述べたように、地震損傷度曲線の対数正規分布のパラメータ $\lambda, \xi$ を工学的な判断に基づき決定する。

a 解析的方法

解析的方法として信頼性理論に基づく方法を説明する。この方法では、地震による施設の応答と施設の耐力から施設の破壊確率を算定し地震損傷度曲線を求める。

(1) 信頼性理論に基づく地震損傷曲線の算定

耐力 $R$ と外力 $S$ がある分布を持った確率変数と仮定して、施設の破壊確率を求める。具体的には、信頼性理論に基づき耐力 $R$ 、外力 $S$ が対数正規分布に従うと仮定し、地震損傷度曲線を耐力の平均値 $\mu_R$ 、変動係数 $v_R$ 、地震動指標 $x$ と応答の平均 $\mu_R(x)$ の関係（応答の中央関係式と呼ぶ）、地震の大きさの変動係数 $v_s(x)$ から求める。

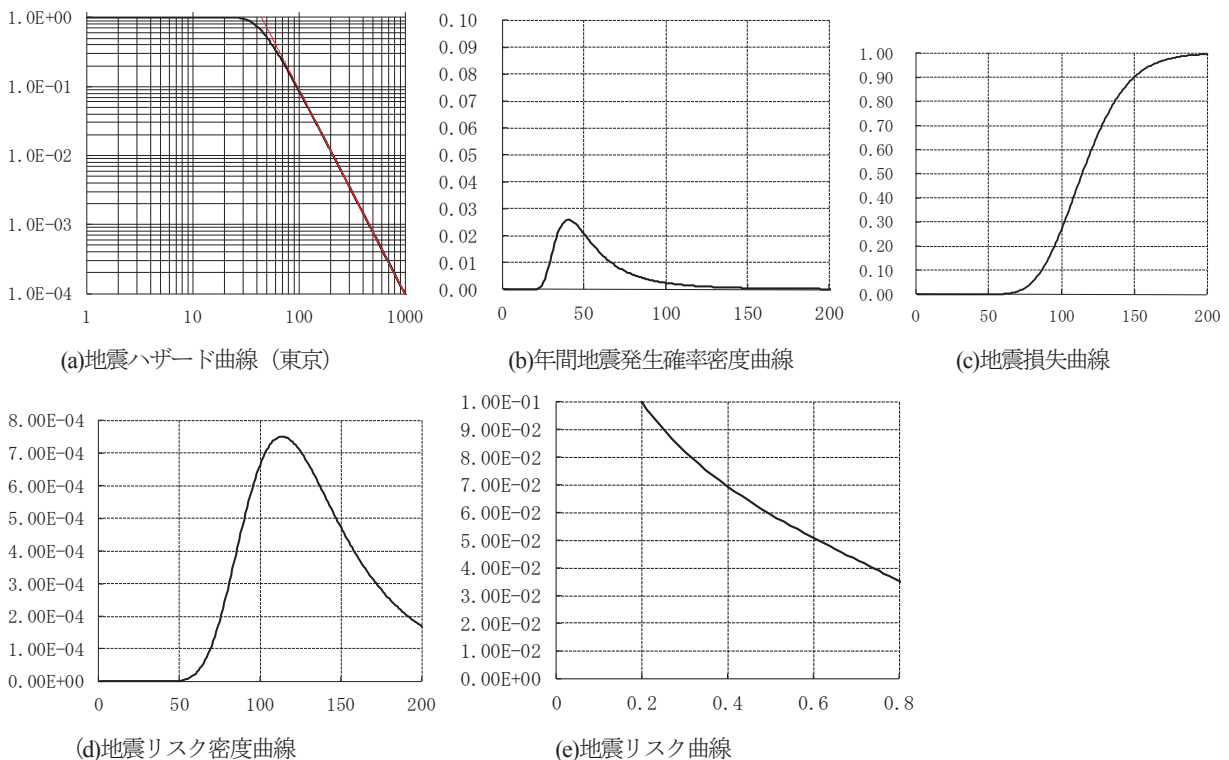


Fig.14 地震リスクの算定例  
Example for result of seismic risk analysis

信頼性理論では、外力や耐力をばらつきを有する確率変数であると考え、施設の安全性を評価する。施設を構成する材料、施工のばらつき、構造計算の誤差などにより施設の耐力はばらつく。また、PGAが等しい地震であっても震源が異なれば地震の振動特性は異なり、それに伴い施設の応答もばらつく。このように外力および耐力を確率変数と仮定するのは妥当と考えられる。

以下、耐力および外力をそれぞれ確率変数RおよびS

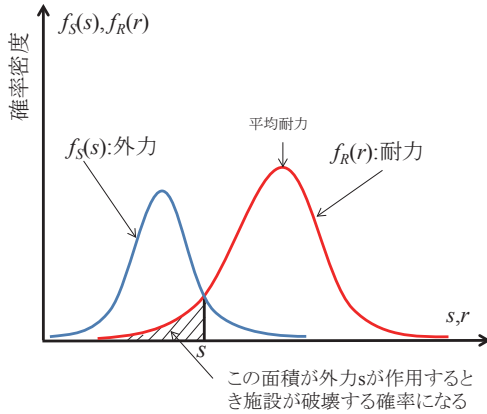


Fig.15 耐力と外力の分布  
Statistical distributions of load and resistance

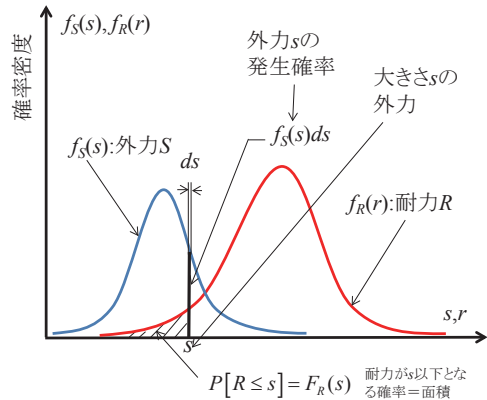


Fig.16 破壊確率の計算概念  
Outline of calculation of the probability of failure

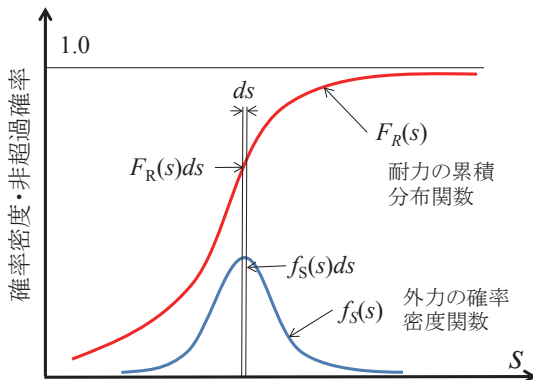


Fig.17 耐力の累積分布関数を用いた破壊確率の計算  
Outline of calculation of the probability of failure based on cumulative distribution function

で表し、耐力Rと外力Sが従う確率密度関数を $f_R(r)$ ,  $f_S(s)$ とする (Fig.15)。また、耐力が外力を下回る $R \leq S$ という事象が施設の破壊を表すとし、 $R \leq S$ である事象の確率を構造物の破壊確率 $p_f$ と定義する。なお、以下では確率変数を大文字で、その実現値を小文字で表す。

耐力Rと外力Sの関係を Fig.16 のように仮定する。すなわち、耐力Rの施設に地震による大きさsの外力が作用した状態を考える。大きさsの外力に対して施設が破壊する確率は、耐力Rがsを下回る確率に等しく、Fig.16の耐力の確率密度関数 $f_R(r)$ の曲線下の面積(斜線部) $P[R \leq s]$ に等しい。この面積は次式で表される。

$$P[R \leq s] = \int_0^s f_R(r) dr = F_R(s) \quad (11)$$

ここで、 $F_R(r)$ は $f_R(r)$ の累積分布関数である。微小区間dsで外力の大きさは一定と考えれば、大きさsの外力が作用する確率は $f_S(s)ds$ となる。RとSが独立と仮定すれば、「外力Sがsとs+dsの間にあり」かつ「耐力Rがsを下回る」確率は次式により求まる。

$$P[(s \leq S \leq s + ds) \cap (R \leq s)] = \left\langle \int_0^s f_R(r) dr \right\rangle f_S(s) ds = F_R(s) f_S(s) \quad (12)$$

地震による外力sは0から∞の値を取りうるので、すべての地震動に対する施設の破壊確率 $p_f$ は次式のように求められる (Fig.17)。

$$p_f = \int_0^\infty F_R(s) f_S(s) ds \quad (13)$$

耐力R, 外力Sが対数正規分布の累積分布関数に従うと仮定すると式 (13) の積分が可能となる。また、耐力R, 外力Sの確率密度関数をそれぞれ $f_R(r)$ ,  $f_S(s)$ とすれば、それらの関数は対数正規分布として、次式から求めることができる。

$$f_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_R r} \exp \left\langle -\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(r) - \lambda_R}{\xi_R} \right\}^2 \right\rangle \quad (14)$$

$$f_S(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_S s} \exp \left\langle -\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(s) - \lambda_S}{\xi_S} \right\}^2 \right\rangle \quad (15)$$

ここで、

$\lambda_R$  : 耐力Rの対数 $\ln(r)$ の中央値 (耐力Rの中央値は $\mu_R$ とする)

$\lambda_S$  : 外力Sの対数 $\ln(s)$ の中央値 (耐力Sの中央値は $\mu_S$ とする)

$\xi_R$  : 耐力Rの対数 $\ln(r)$ の標準偏差 (対数標準偏差)

$\xi_S$  : 外力Sの対数 $\ln(s)$ の標準偏差 (対数標準偏差)

外力Sに対する耐力Rの商を安全余裕度Zと定義する。

$$Z = \frac{R}{S} \quad (16)$$



(16) 式の両辺の対数を取ると、

$$\ln Z = \ln R - \ln S \quad (17)$$

右辺が対数正規分布の差となるので、 $\ln Z$ も対数正規分布となる。すなわち、安全余裕度 $Z$ も対数正規分布となる。 $Z$ の確率密度関数は次式となる。

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_Z z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(z)-\lambda_Z}{\xi_Z}\right\}^2\right\} \quad (18)$$

ただし、

$$\lambda_z = \lambda_R - \lambda_S$$

$$\xi_z^2 = \xi_R^2 + \xi_S^2$$

である。つまり、安全余裕度 $Z$ の確率密度関数 $f_z(z)$ は耐力 $R$ 、外力 $S$ の対数確率分布のパラメータから求まる。 $Z$ が1以下になると耐力が外力を下回り施設は破壊するので、安全余裕度 $Z$ が1以下になる確率が破壊確率 $p_f$ となる。式(18)を0から1まで積分し、破壊確率 $p_f$ を求めると途中過程は省略するが、式(19)となる。

$$p_f = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_Z z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(z)-\lambda_Z}{\xi_Z}\right\}^2\right\} dz \quad (19)$$

$$= \Phi\left(-\frac{\lambda_z}{\xi_z}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\lambda_z}{\xi_z}\right)$$

$\phi$ は標準正規分布である。ここで、次式の安全指標 $\beta$ を導入すれば、破壊確率 $p_f$ を $\beta$ の関数として式(21)から求めることができる。

$$\beta = \frac{\lambda_z}{\xi_z} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_S^2}} \quad (20)$$

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (21)$$

対数変換する前の耐力 $R$ 、外力 $S$ の平均と分散を $\mu$ および $\sigma^2$ 、変動係数を $v$ とし、対数変換後の対数平均を $\lambda$ 、対数標準偏差を $\xi$ とすれば、式(2)、(3)から次の関係式が得られる。

$$\lambda = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right) = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln(1 + v^2) \quad (22)$$

$$\xi^2 = \ln(1 + v^2) \quad (23)$$

式(20)にこれらの関係式を代入すれば、 $\beta$ を耐力 $R$ 、外力 $S$ の平均および変動係数の関数として表すことができる。つまり、耐力 $R$ 、外力 $S$ の平均および変動係数がわかれば、安全指標 $\beta$ を介して施設の破壊確率 $p_f$ を求めることができる。

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_S^2}}$$

$$= \frac{\ln(\mu_R) - \frac{1}{2} \ln(1 + v_R^2) - \left(\ln(\mu_S) - \frac{1}{2} \ln(1 + v_S^2)\right)}{\sqrt{\ln(1 + v_R^2) + \ln(1 + v_S^2)}}$$

$$= \frac{\ln\left(\frac{\mu_R}{\mu_S} \sqrt{\frac{1 + v_S^2}{1 + v_R^2}}\right)}{\sqrt{\ln(1 + v_R^2) + \ln(1 + v_S^2)}} \quad (24)$$

式(24)は変動係数 $v_R$ 、 $v_S$ が小さい場合は、次式の近似式を用いることができる。

$$\beta = \frac{\ln \mu_R - \ln \mu_S}{\sqrt{v_R^2 + v_S^2}} \quad (25)$$

実際の地震動による施設の破壊確率を求める場合は、それぞれの地震動によって地震による外力の確率分布が変化することを考慮しなければならない。概念図をFig.18に示す。施設の耐力 $R$ は1つの確率密度関数で表わされるが、外力 $S$ の確率密度曲線は地震動の大きさによって変化する(PGAが異なれば、異なる平均と標準偏差を有する)。よって、施設の破壊確率を計算するためには想定地震ごとに外力の確率密度関数を変化させ、施設の破壊確率を計算する。外力 $S$ が地震動指標 $x$ の関数であると仮定すれば、 $\beta$ は地震指標 $x$ の関数となり、破壊確率を式(26)、(27)から求めることができる。

$$\beta(x) = \frac{\ln \mu_R - \ln(\mu_S(x))}{\sqrt{v_R^2 + v_S(x)^2}} \quad (26)$$

このとき、破壊確率 $p_f$ は $x$ の関数となる。

$$p_f(x) = 1 - \Phi(\beta(x)) = \Phi(-\beta(x)) \quad (27)$$

式(27)が地震動指標の大きさと施設の破壊確率の関

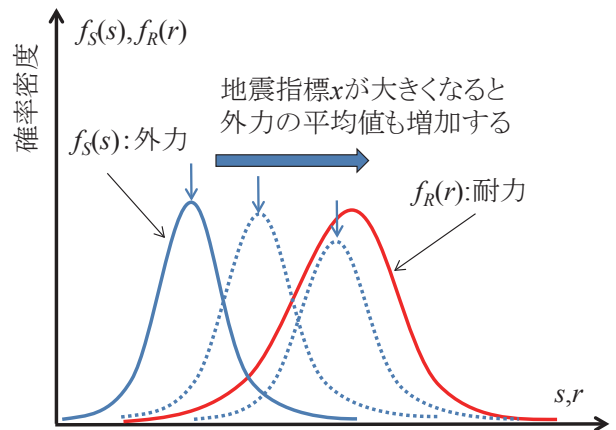


Fig.18 外力の分布(平均値,ばらつき)が変化する場合の破壊確率の算定概念

Outline of calculation of the probability of failure in the case of variation of the applied load

係、すなわち地震損傷度曲線を表わす関係式である。式(26)から明らかのように、耐力の平均値 $\mu_R$ と変動係数 $v_R$ が決定されれば、外力の平均およびその変動係数を地震指標 $x$ の関数として表すことにより、破壊確率 $p_f$ と地震損傷度曲線を求めることができる。このように、信頼性理論に基づき耐力 $R$ 、外力 $S$ が対数正規分布に従うと仮定した場合、地震損傷度曲線を求めるために必要なパラメータは、耐力の平均値 $\mu_R$ 、変動係数 $v_R$ 、地震動指標 $x$ と外力(応答)の平均 $\mu_s(x)$ の関係(応答の中央関係式と呼ぶ)および外力(応答)の変動係数 $v_s(x)$ となる。

## (2) 耐力 $R$ の算定

地震損傷度曲線を決定するためには、耐力 $R$ の確率密度曲線を求める必要がある。耐力 $R$ が単純に対数正規分布に従うと仮定すれば、耐力 $R$ の平均値と標準偏差から確率密度曲線を求めることができる。ただし、この方法は経験的な確率密度曲線の設定方法となる。実験あるいは数値解析に基づき耐力 $R$ の確率密度曲線を求める方法を以下に示す。

- 1) 実物あるいは模型を用いた静的載荷試験あるいは動的載荷試験を多数行い、その結果から「破壊状態」と「発生頻度」の整理・分析を行い、耐力 $R$ の確率密度関数を推定する。この場合「破壊の程度(小破や大破)」の条件を明確に決定(建物で言えば層間変位 $\text{〇〇mm}$ のとき小破と定義するなど)し、供試体の材料物性や境界条件などを複数変化させばらつきを考慮した解析を行う。
- 2) 施設の破壊(限界状態)を予測可能な数値解析手法を用いて材料条件等を変化させ耐力の分布を推定する。

この他にも、1)と2)を組み合わせ、耐力 $R$ の確率密度曲線を求める方法も用いられる。

## (3) 応答の中央関係式

地震損傷度曲線を求めるためには地震動指標 $x$ と施設の平均応答 $\mu_s(x)$ の関係(応答の中央関係式)および応答の対数標準偏差 $\xi_s(x)$ を求める必要がある。ここでは、 $x$ と $\mu_s(x)$ の関係を $x$ のべき関数と仮定し、応答の中央関係式を求める。なお、以下、外力の代わりに施設の応答を「地震による荷重効果の一般的な表現」という意味で用いて、外力と同じ文字 $S$ で表す。耐力 $R$ と応答 $S$ は同じ単位で比較ができる量を用いることが重要である。

$x$ と $\mu_s(x)$ の関係が式(28)に示す $x$ のべき関数で表されるとする。

$$\mu_s(x) = ax^b \quad (28)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ は後に示す実験、数値解析から定まるパラメータである。応答 $S$ の平均 $\mu_s(x)$ が耐力 $R$ の平均 $\mu_R$ と一致するような地震指標を $x_m$ とすると、

$$\mu_s(x_m) = ax_m^b = \mu_R \quad (29)$$

$$\ln \mu_R = \ln ax_m^b = \ln a + b \ln x_m \quad (30)$$

これらの式を式(27)に代入し、式(25)を用いて変形すれば、

$$\begin{aligned} p_f(x) &= \phi(-\beta(x)) \\ &= \phi\left(-\frac{\ln(\mu_R) - \ln(\mu_s(x))}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_s(x)^2}}\right) \\ &= \phi\left(\frac{-\ln a - b \ln x_m + \ln a + b \ln(x)}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_s(x)^2}}\right) \\ &= \phi\left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_s(x)^2} / b}\right) \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、

$$\begin{aligned} x_m &= \left(\frac{\mu_R}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \\ \lambda_{\text{SFC}} &= \ln x_m \\ \xi_{\text{SFC}} &= \frac{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_s(x)^2}}{b} \end{aligned} \quad (32)$$

とおけば式(33)が得られる。

$$p_f(x) = \phi\left(\frac{\ln x - \lambda_{\text{SFC}}}{\xi_{\text{SFC}}}\right) \quad (33)$$

式(33)が地震損傷度曲線となり、対数平均 $\lambda_{\text{SFC}}$ 、対数標準偏差 $\xi_{\text{SFC}}$ の対数正規分布の累積分布関数となる。すなわち、何らかの方法によって式(28)の応答の中央関係式を求めることができれば、式(33)から施設の地震損傷度曲線を求めることができる。

## (4) 動的応答解析による地震損傷度曲線の求め方

ここでは、施設の耐力 $R$ が既知である場合に、動的応答解析から応答の中央関係式を求め、最終的に地震損傷度曲線を求める方法について説明する。

地震損傷度曲線の算定手順を以下に示す。なお、具体的に説明するため施設の構造被害は応答変位量 $\mu_s(x)$ によって定まると仮定する。

- 1) 地振幅特性や位相特性のばらつきを変化させた地震動指標の大きさが異なる地震波形を用意し、地震動指標の大きさを変化させた施設の動的応答解析を行う。
- 2) 地震動指標 $x$ と応答変位の平均 $\mu_{sm}(x)$ の関係(中央関係式)を求める。具体的には、動的応答解析の結果を地震動指標 $x$ と変位量 $\mu_s(x)$ のグラフに整理し、両者の関係を最小二乗法などにより $\mu = ax^b$ の関数で近似し、 $x$ と $\mu_{sm}(x)$ の関係 $\mu_{sm}(x) = ax^b$ を求める(Fig.19)。
- 3) 動的応答解析の結果から応答 $\mu_s(x)$ のばらつき(対

数標準偏差 $\xi_s(x)$ を求める (Fig.19)。

- 4) 耐力 $R$ の平均値 $\mu_R$ , 対数標準偏差 $\xi_R$ と2), 3)の結果から得られる $\mu_{sm}(x)$ ,  $\xi_s(x)$ から式 (31) から $\lambda_{SFC}$ と $\xi_{SFC}$ 算出し, 式 (33) から耐力 $R$ の施設に対する地震損傷度曲線を求める。

この他にも入力地震動と施設の材料や諸元を共にランダムに変化させて, モンテカルロシミュレーションなどから地震損傷度曲線を求める方法などもある (中澤ら, 2012)。

**b 統計的方法**

地震の実被害を統計解析することで地震損傷度曲線を求めることができる。統計解析手法としては, ①2項尤度モデル解析, ②被害事例からの統計的推定方法がある。

二項尤度モデル解析では, 施設の被害の程度を明確に定義し(小破, 中破などの状態), その状態の発生の有無(2値情報)から地震損傷度曲線を求める。Fig.20にその概要を示す。解析方法の詳細については中村らの文献に詳しい (2009)。

被害事例からの統計的推定では, 地震指標の大きさがほぼ同程度と思われる地域に存在する施設の地震被害調査を行い, それぞれの被害の程度に対する被害率を算定し, 最小二乗法などにより地震損傷度曲線を求める。ある程度の数のデータが得られる建築構造物での適用事例が多い (村尾ら, 2001; 日本建築学会, 2009)。

**7 地震予想最大損失額 (PML)**

地震リスク評価は地震による施設の損失額 $C$ を求めることが目的である。損失額 $C$ は地震の性質, 施設の耐力などのばらつきのため, 平均損失額 $L$ のまわりにランダムにゆらぐ確率変数となる。地震損失を評価するためには確定値が使いやすいため, 平均損失額, すなわち損失期待値 (NEL: Nomal Expected Loss) が良く用いられる。NELは地震の平均的な損失額の評価指標としては適切であるが, 地震により想定される最大損失の予測には適さない。地震に対して予想される最大損失を評価する場

合は, 予想最大損失額 (PML: Probable Maximum Loss) を評価指標として用いることが多い。NELとPMLの違いを概念的に示した図がFig.21である。PMLとはある地震に対する損失額の90%非超過確率値に等しい。すなわち, ある地震によって起こりうる損失額の分布の90%を越えない損失額がPMLである。具体的に示すと, ある地震において100箇所の施設が被害を受けとする。施設を損失額の小さい順に並べたとき, 50番目の施設の損失額がNEL, 90番目の施設の損失額がPMLとなる。このようにPMLは損失のばらつきを考慮した場合, 最悪損失の発生を評価する際に用いる地震リスク指標である。

PMLを算定する場合は, 対象期間と対象地震を設定する必要がある。一般的には「対象施設あるいは施設群に対して最大の損失をもたらす再現期間475年相当の地震」を対象地震とする。再現期間475年相当の地震とは, 供用期間50年に1回以上遭遇する確率が10%の地震に相当する。この定義を用いれば, 「再現期間475年相当の地震が発生した場合の損失の90%非超過確率値」がPMLの一般的な定義となる。

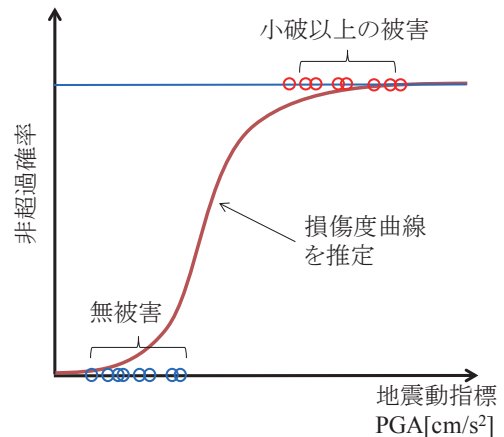


Fig.20 二項尤度モデルの概要  
Outline of probit model

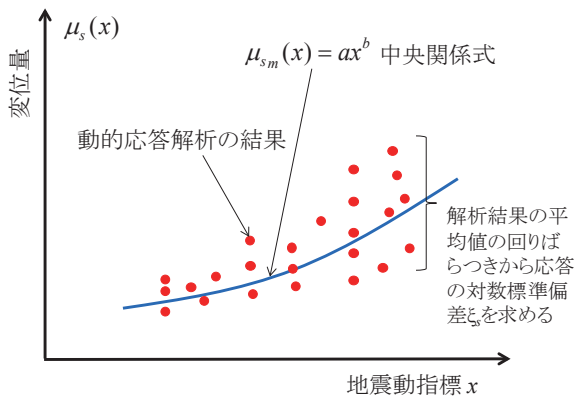


Fig.19 動的応答解析結果からの中央算定式の求め方  
Estimation of the relationships averages response and seismic intensity using nonlinear seismic response analysis

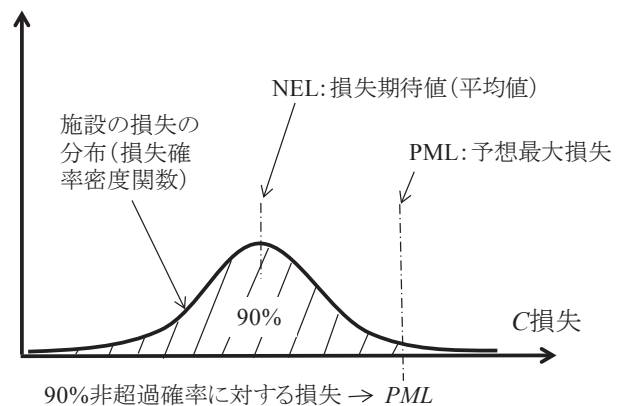


Fig.21 予想最大損失額PMLの概念図  
Outline of probable maximum loss

### Ⅲ 施設群を対象とした地震リスク評価

#### 1 施設群を対象とした地震リスク評価

Ⅲ章では施設群のリスク評価について述べる。施設群のリスク評価の最も基本的な考え方は、個別施設の地震による平均損失額を求めその結果を足し合わせ施設群の総平均損失額を求めるという方法である。しかし、この方法は以下に述べる理由により損失額を適正に評価できない恐れがある。ここではまずその理由について述べる。

##### a 大数の弱法則および損失の相関

地震リスク評価は地震による損失を求めることが目的である。Ⅱ章でも述べたように地震および耐力のばらつきにより施設の損失は損失の平均値のまわりにばらつく確率変数となる。地震による施設群の総損失も同様に総損失期待値（施設群の損失の総和の平均）のまわりにばらつく確率変数となる。Ⅱ章で述べた方法により個別施設の損失期待値等をもとめ、その和をとり施設群の総損失期待値とした場合、総損失期待値（NEL）は等しいが、施設群の総損失の分布のばらつきに依存するPMLを過大に見積もる可能性がある。これは、Fig.22に示すように施設群の総損失の分布が、確率分布を数多く足し合わせていくとばらつきが減少し平均に収束するという「大数の弱法則」の影響を受けるために生じる（中村ら、2009）。施設群を構成する施設はそれぞれ異なる損失確率分布を持つが、建物の数が増せばこの大数の法則の効果が現れ、損失の和のばらつきはだんだん小さくなる。個別施設のリスク評価によって求めたPMLを足し合わせ施設群のPMLとすることは、この大数の弱法則を考慮していないためPMLの過大評価に繋がる可能性がある（矢代ら、2002）。また、大数の弱の法則は施設間の損失の相関に依存する。施設間の損失の相関が低い、すなわち施設群の損傷が全く独立に発生する場合は、大数の弱の法則の効果が大きく、施設群の総損失のばらつきは著しく低下する。すなわちPMLも小さくなる。一方、施設間の損傷の相関が高い場合は、施設群の総損失のば

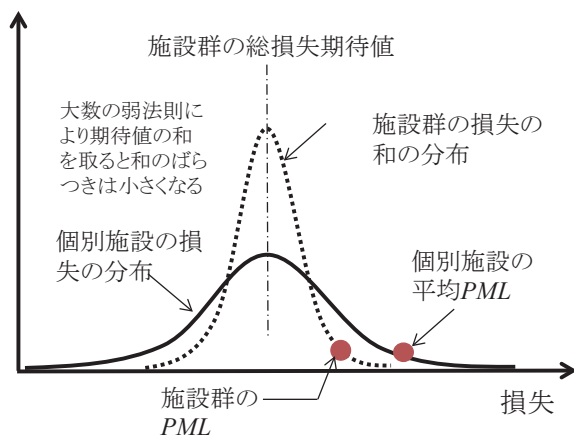


Fig.22 大数の弱法則の効果  
Effects of weak law of large numbers

らつきは必ずしも低下しない。このように、施設群の損失のばらつきを考慮する場合には施設の地震損失(被害)の相関係数が重要なファクターとなる。「大数の弱法則」の効果を考慮するためには後ほど述べるようにシナリオ地震動による損失評価と適切な不確実性を計算に導入することが必要となる。

##### b 分散配置効果

同時に地震を受ける可能性が少ない広域的に配置された施設群を対象とした地震リスク評価では、Ⅱ章で述べた個別施設のリスク解析手法を応用することが可能である。例えば、施設を北海道と九州に配置する計画立案が必要な場合は、地震ハザード曲線に基づく地震リスク評価を行えばよい。ところが、ある地震では施設が同時に被害を受けるが、ある地震では片方の施設のみが被害を受けるような微妙な位置関係にある施設群もある。特に農業水利施設群は貯水池から排水施設までの線的施設であり、全体が地震被害を受けることは稀であり、システムの一部に大きな地震被害を受けることが多い。つまりこのような微妙な位置関係にある施設群といえる。Ⅱ.4で説明した地震ハザード曲線には震源情報が含まれていないため、震源位置や規模の影響による施設の地震遭遇の違いを評価することができない。このような問題を解決するために、施設群の地震リスク評価では震源位置および規模が特定可能なシナリオ地震モデルが用いられる。

##### c システム機能の評価

農業水利施設は、水路、パイプライン等が有機的に連結することで場への用排水を担うシステムである。上下水道や道路も同様の施設と言える。このようなシステムでは損傷が発生する位置、規模によってシステムの機能低下の程度に差が発生するため、Ⅱ章で述べた個別施設のリスク評価に加えて、構成要素の連結状況および損傷発生のパターンを考慮したリスク評価が必要となる。システム機能の喪失に関しては、吉川ら（2012）の報告を参照されたい。

#### 2 シナリオ地震動

施設群の地震リスク評価では大数の弱法則や分散配置効果を考慮するためのシナリオ地震動モデルが必要となる。シナリオ地震動の詳細な説明については他の書籍（中村、2009）および論文（宇賀田、2001）に譲り、ここではその概要のみを説明する。

Ⅱ章で示した地震ハザード曲線は、対象地点で観測される地震動の大きさの超過確率を周辺で発生するすべての地震を対象に重ね合わせて評価したものと考えることができる。そのため、その超過確率の中にはすべての地震の影響が含まれており、個々の地震の発生確率や地震強さを特定することはできない。施設群のリスク評価では、個々の地震動に対する施設の損失を評価する必要があることから、個々の地震を独立に評価する方法が必要

となる。個々の地震動が、いつ、どこで、どの程度の確率で発生するか特定して地震危険度を評価する方法を複数震源モデル (Multi Event Model) と呼ぶ。また、複数震源モデルで想定される地震をシナリオ地震動 (Scenario Earthquake) と呼ぶ。

複数震動モデルの概要を Fig.23 に示す。複数震動モデルは対象震源を設定する。震源は地震メカニズムにより、点震源、線震源、面震源、震源が特定できないものなどに分類され、位置、地震規模および発生周期とばらつきなどの特性値が与えられ、確率・統計的な方法に基づき震源における地震の規模や発生確率を計算する。すなわち、いつ、どこで、どの程度の確率で地震が発生するか震源毎の確率的な情報が得られる。これらの情報をシナリオ地震と称する。シナリオ地震が発生した場合、震源から施設までの距離に基づき、対象施設直下の工学的基盤位置での地震強さを距離減衰式より評価した後、表層地盤までの増幅を計算し、解析に必要な地震動指標の大きさを求める。

### 3 施設群を対象とした地震リスク評価手法

施設群のリスク解析手法については、複数の手法が存在するが、その多くはシナリオ地震による損失評価を基本とする (日本建築学会, 2010)。施設群を対象としたリスク評価は、シナリオ地震ごとに施設群の損失確率関数を求めイベントリスク曲線などを作成することに帰着する。施設群の損失確率関数の定式化については複雑であり、ここではその概要を述べるにとどめる。定式化についての詳細は他の書籍を参考にされたい (中村, 2009; 吉川, 2008)。施設群の損失確率関数を求めるためには数値解析が必要となる。数値解析は、地震や耐力の不確実性の導入方法により、①モンテカルロシミュレーションによる方法、②全確率の定理を利用した被害相関を考慮する方法に分かれる。モンテカルロシミュレーションを用いる方法は、矢代ら (2002), 福島ら (2002) の文献に詳しい。被害相関を考慮する方法としては、中村 (2008), 静岡ら (2000) の文献に詳しい。

中村ら (2009) は、シナリオ地震  $E_s$  が発生した場

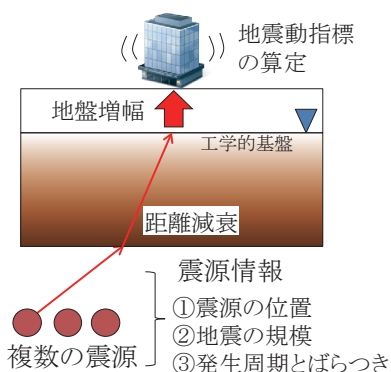


Fig.23 マルチイベント地震モデルの概要  
Outline of Multi-Event seismic model

合の施設群の損失確率密度関数  $f(c|E_s)$  を次式により定式化している。

$$f(c|E_s) = \int_0^{\infty} f'(c|x) f_0(x|E_s) dx \quad (34)$$

ここで、 $f'(c|x)$  は地震動のばらつきを考慮していない施設群の損失確率密度関数、 $f_0(x|E_s)$  は作用地震動の確率密度関数である。実際の計算は式 (34) を離散化して行う。作用地震動の確率密度関数  $f_0(x|E_s)$  はシナリオ地震動から求める。 $f'(c|x)$  については、施設ごとに ET を作成し、地震動の大きさ  $x$  に対して地震損傷度曲線から ET の分岐確率を与え求める。

シナリオ地震に基づく地震リスク評価の流れを Fig.24 に示す。図の地震危険度解析の部分で、各シナリオ地震に対する確率密度関数  $f_0(x|E_s)$  を準備する。リスク解析部分では、シナリオ地震  $i$  を離散化し (地震動の大きさごと) に計算を行うという意味、地震動の大きさの条件付きの施設の ET の分岐確率を計算し施設の損失確率密度曲線を求める。実際には施設の損失確率密度曲線は離散化された損失確率関数として求まる。損失確率関数の和をとることでシナリオ地震  $i$  に対する施設群の損失確率関数が得られる。施設群の損失確率関数が求めれば、Fig.24 の右図に示すようにシナリオ地震  $i$  に対する NEL や PML などの地震リスク指標が計算できる。

### 4 地震イベントリスク曲線

横軸に施設群の損失額をとり、縦軸にシナリオ地震  $i$  の年発生確率の累積 (年超過確率) をとりプロットした曲線を地震イベントリスク曲線と呼ぶ。この曲線は Fig.13 の個別施設の地震リスク曲線に対応するものである。地震イベントリスク曲線の概要を Fig.25 に示す。Fig.25 の青丸はシナリオ地震ごとの施設群の損失平均値 (NEL) を示す。Fig.25 には施設群のリスク評価から求まるシナリオ地震動に対する施設群の損失分布を赤線で重ね書きした。この分布に従って施設群の損失は NEL を中心にばらつく。各シナリオ地震の損失の 90% 非超過確率値がシナリオ地震に対する損失の PML に相当する。図には示していないが、NEL の地震イベントリスク曲線と同様に各シナリオ地震動の施設群の損失分布の PML を結んだ折れ線も作成可能である。地震イベントリスク曲線 (NEL) の下の面積は施設群の年間損失期待値に等しくなる。また、地震イベントリスク曲線から Fig.26 に示すような施設群の損失額、損失発生確率などの情報を読み取ることができる。

## IV モデル地区を対象とした施設群の地震リスク評価

Fig.24 に示した手法を用いて、農業水利施設群のケーススタディを行う。対象とする農業水利施設群としては、新潟県小千谷市～長岡市に位置する水路と周辺のダムお

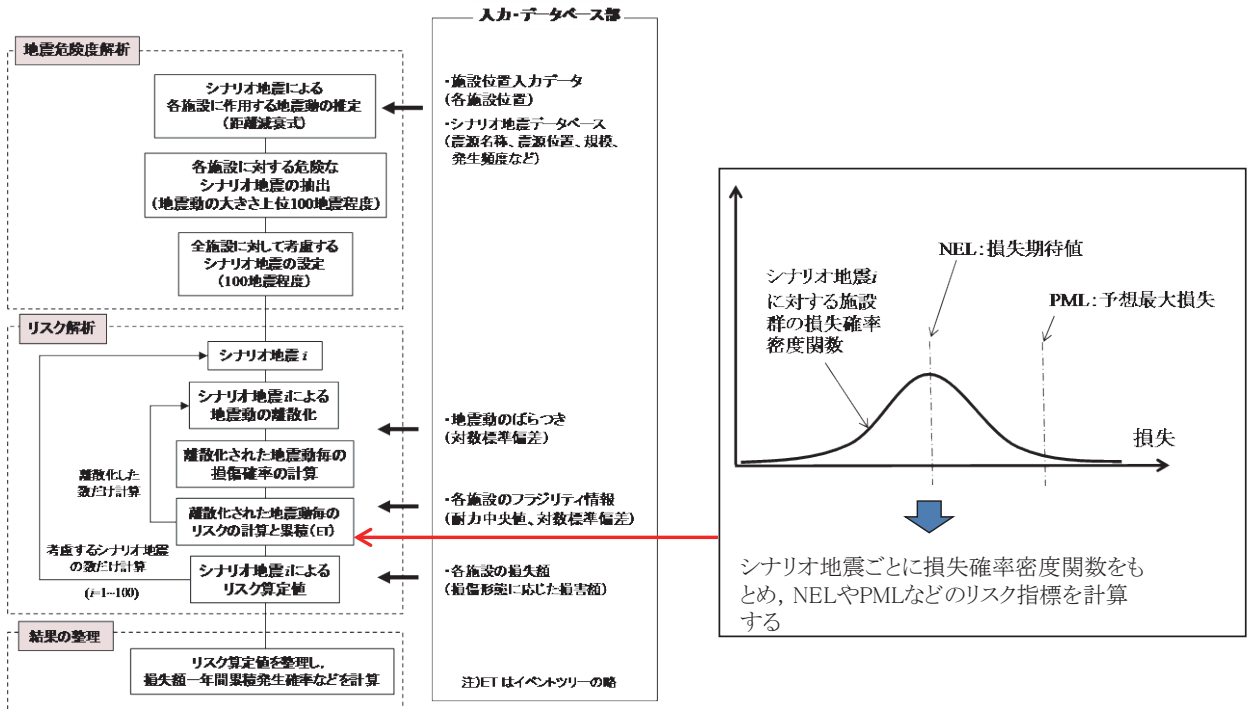


Fig.24 施設群のリスク評価算定方法  
Flowchart of seismic risk analysis for portfolio of facilities

よびため池とした。なお、今回のケーススタディでは、被害の程度に応じた施設の損失情報に概略の値を用いたため、損失額の相対的な大小には意味があるが、定量的な額については実際の地震被害額とは一致しない点に注意されたい。

1 解析対象地区及び施設

評価対象とした施設を Fig.27 に示す。信濃川沿いの頭首工、揚水機場、放流工、用水路、ロックフィルダム3基、ため池3箇所を対象とした。線状施設である水路については、頭首工、暗渠、トンネル、開水路、揚水機場の工種により要素施設 (ユニット) に分解し解析を行った。

2 解析モデル

Fig.27 から分かるように農業水利施設は多種多様な施設が有機的に連結した用排水システムである。このように多種多様な施設で構成される施設群を効率的に評価するために、施設のモデル化においては、工種による施設の分類を行い、複雑な構造の施設についてはさらにそれをいくつかの要素に分解して取り扱うことにした。モデル化の概念を Fig.28 に示す。工種レベルによる施設の分類をユニットと呼ぶ、ユニットをさらに構成要素に分解したものをコンポーネントと呼ぶ。これらのユニットおよびコンポーネントに耐力のパラメータを設定し、施設の脆弱性 (地震損傷度曲線) を設定した。モデル化したユニットの諸元を Table 2 に示す。なお、線状ユニッ

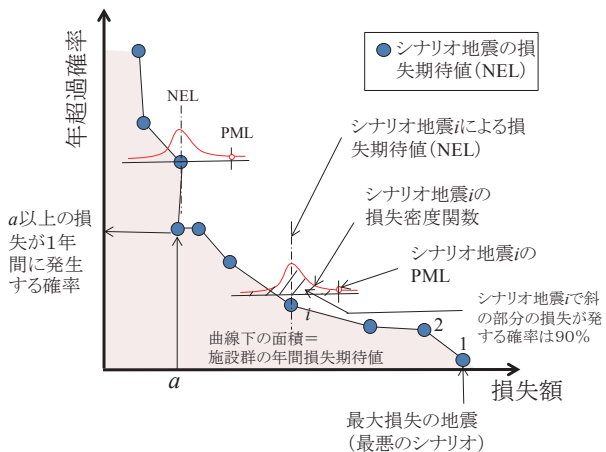


Fig.25 地震イベントリスク曲線  
Seismic event risk curve

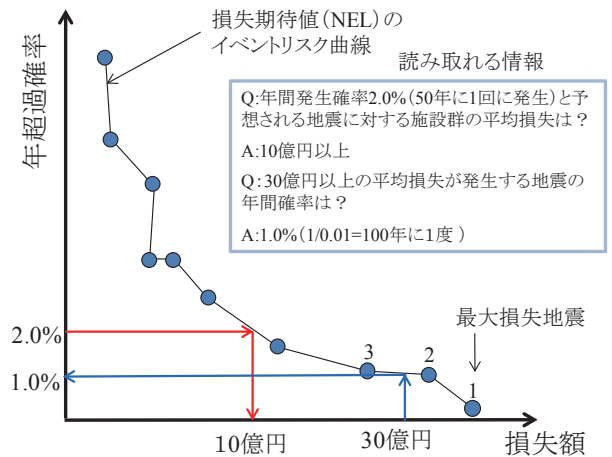


Fig.26 地震イベントリスク曲線の読み取り方  
Understanding how to read seismic event risk curve

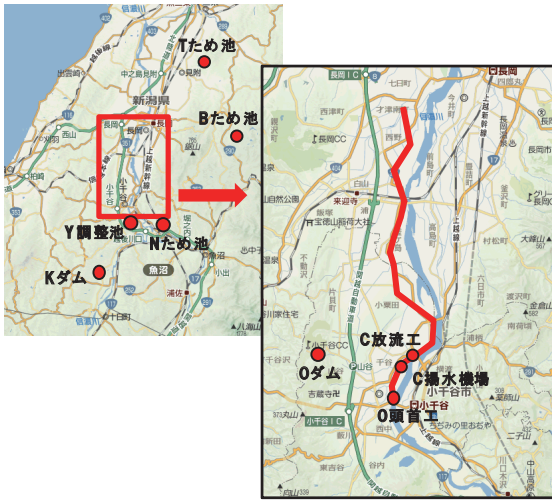


Fig.27 評価対象地区および対象施設  
Target area and facilities

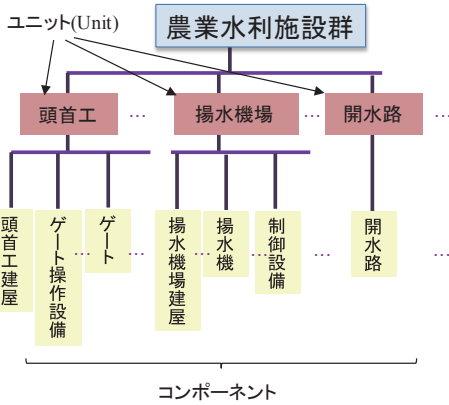


Fig.28 施設のモデル化  
Modeling of facilities

トを代表する位置は要素の中央点とした。ユニットの総数は28である。なお、開水路区間やトンネルなどの線状施設については耐力がほぼ等しいと思われる500～800m程度の区間を1ユニットとした。この区間の長さの決定方法については根拠が十分とは言えないため、今後検討が必要と考える。

### 3 損失情報

対象施設および施設の再建に要する費用(再調達価格)を基に地震時の損失額を計算した。再調達価格については農業水利施設諸元考((社)農業農村整備情報総合センター, 2009)から、これまでの施設の建設費の平均と施設規模の関係性を求め、各ユニットの施設規模から再建設費を推定した。Fig.29に28ユニットの再調達価格を示す。対象施設群の再調達費用の総額は97.8億円である。

### 4 イベントツリーの作成

施設群のリスク評価を行うためにはETを用いて施設の損傷形態をモデル化する必要がある。今回の評価では、開水路、暗渠、頭首工、揚水機場、放流工、ダム、ため

Table 2 ユニット諸元  
Conditions of model of facilities

Unit 番号	Unit 名称	Unit位置(代表点)						Unitに含まれる 主な構造物・設備	
		緯度			経度			名称	長さ(m)
1	暗渠1	37	18	43	138	48	4	暗渠	180
2	暗渠2	37	18	54	138	47	59	暗渠	563
3	開水路1	37	19	2.6	138	47	60	開水路	126
4	開水路2	37	19	12	138	48	4.7	開水路	581
5	開水路3	37	19	32	138	48	15	開水路	670
6	開水路4	37	19	45	138	48	32	開水路	580
7	暗渠3	37	19	60	138	49	1.5	暗渠	1260
8	開水路5	37	20	22	138	49	19	開水路	600
9	暗渠4	37	20	38	138	49	15	暗渠	400
10	開水路6	37	20	57	138	48	56	開水路	1210
11	開水路7	37	21	17	138	48	25	開水路	720
12	開水路8	37	21	44	138	48	12	開水路	1200
13	開水路9	37	22	14	138	48	4.6	開水路	680
14	開水路10	37	22	48	138	48	11	開水路	1520
15	開水路11	37	23	24	138	48	24	開水路	790
16	暗渠5	37	23	47	138	48	25	暗渠	720
17	開水路12	37	24	12	138	48	18	開水路	860
18	開水路13	37	24	45	138	48	25	開水路	1360
19	開水路14	37	25	28	138	48	33	開水路	1510
20	O頭首工	37	18	41	138	48	7.3	建屋・支柱、ゲート機器類、護岸	
21	C揚水機場	37	19	13	138	48	5.4	建屋、機器類	
22	C放流工	37	19	46	138	48	39	ゲート、開水路	
23	Kダム	37	11	46	138	44	19	ダム	
24	Yダム	37	17	37	138	48	21	ダム	
25	Oダム	37	19	49	138	45	54	ダム	
26	Bため池	37	25	27	139	1	13	ため池	
27	Tため池	37	31	58	138	56	19	ため池	
28	Nため池	37	16	14	138	52	28	ため池	

池の計12のETを作成した。紙面の都合もありすべてのETを示すことはできないため、代表的な例として液状化による変状が想定される開水路のETおよび損失額をFig.30に示す。ユニットの区間長および構造が異なるため、損失額はユニットにより異なる。

### 5 耐力の設定

IV.3で示したユニットのETの損傷発生確率(ETの分岐確率)は地震損傷度曲線から求めることができる。施設の地震損傷度曲線は、II.3.bで述べた対数正規分布の累積分布関数に従うと仮定した。対数正規分布関数は耐力の中央値および標準偏差の2つのパラメータによって決定されるため、この2つのパラメータを各コンポーネントに対して与えれば良い。各コンポーネントの損傷要因に対応した耐力(中央値)をTable 3に示す。耐力の中央値については工種ごとに建築設備の設計指針および工学的判断を踏まえて簡易的に決定した。今後は、各施設の耐力の中央値をII.6に示したような解析的な手法などを用いて定量的に決定することが課題と考える。また、

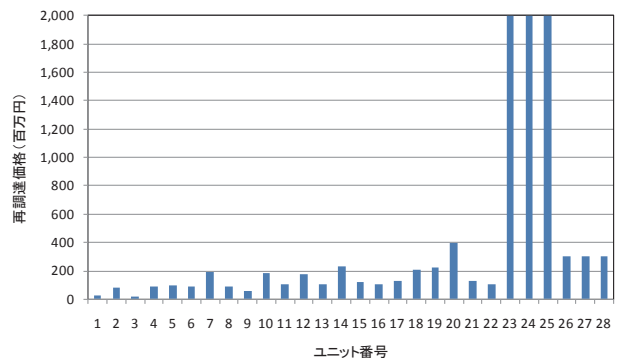


Fig.29 施設の再調達額  
Reconstruction costs of the facilities

Table 3では、耐力中央値の地震動指標として地表面最大加速度 (PGA) を用いているが、解析では同表中に示した表層地盤の地盤増幅率でPGAを除いた基盤最大加速度 (PBA) を用いた。地盤増幅率については独立行政法人防災科学技術研究所「地震ハザードステーション J-SHIS」にて示されている当該施設近傍の30m平均S波速度の分布から各ユニットの緯度経度を照合し、30m平

均S波速度を求め増幅率を計算した。耐力のばらつき(不確実性)を表す対数標準偏差はすべてのコンポーネントで一律0.3に設定した。同様に地震動の不確実性(対数標準偏差)として0.45を与えた。これらを合わせた複合偏差は0.54程度である。これらの値の設定も工学的判断に基づくものであり、今後検討が必要な課題である。本報告では詳細に述べなかったが、今回の解析は被害相関を考慮する方法を用いた数値解析を行っており、施設間の損傷の相関係数が必要となる。損傷の相関係数は対象とする全施設で一律0.7程度に設定した。

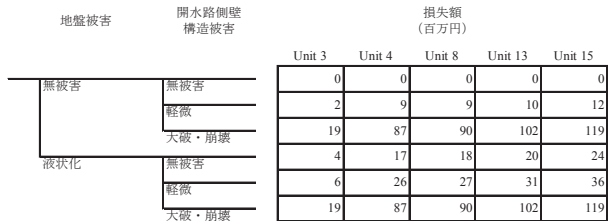


Fig.30 ETの例 (開水路)  
Example of event tree (open canal)

### 6 地震リスク評価

マルチイベント地震モデルに基づいた地震リスク評価結果について述べる。損失率 (損失額/対象施設群の再建設費) のNELの大きな順にシナリオ地震を並べた

Table 3 コンポーネントの耐力の設定  
Parameters of resistance of facilities

ユニット	コンポーネント	被害要因	設置階	固有周期 (sec)	耐力の応答加速度 (cm/s/s)				耐力の応答加速度(建屋はPGA、設備は応答加速度=設置位置) (cm/s/s)				応答倍率	耐力の基盤最大加速度換算 (cm/s/s)			
					軽微	中破	大破	倒壊	軽微	中破	大破	倒壊		地盤の増幅特性	軽微	中破	大破
暗渠1	トンネル	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	441	-	588	-	1.360	441	-	588	-
暗渠2	トンネル	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	441	-	588	-	1.360	441	-	588	-
開水路1	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路2	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路3	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路4	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
暗渠3	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	492	-	656	-	1.220	492	-	656	-
	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
開水路5	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
	トンネル	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	410	-	1.220	-	-	410	-
暗渠4	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	492	-	656	-	1.220	492	-	656	-
	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	492	-	656	-	1.220	492	-	656	-
開水路6	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	410	-	1.220	-	-	410	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	262	-	525	-	1.220	262	-	525	-
開水路7	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路8	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路9	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路10	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路11	開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
暗渠5	トンネル	構造被害	-	-	600	-	800	-	441	-	588	-	1.360	441	-	588	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路12	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路13	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
開水路14	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
O頭首工	ゲート門柱・建屋	構造被害	-	-	740	940	-	2500	544	691	-	1838	1.360	544	691	-	1838
	ゲート設備	構造被害	-	-	440	-	660	-	324	-	485	-	1.360	324	-	485	-
	護岸	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
C揚水機場	建屋	構造被害	-	-	740	940	-	2500	544	691	-	1838	1.360	544	691	-	1838
	揚水機	構造被害	-	-	440	-	660	-	324	-	485	-	1.360	324	-	485	-
	建屋・揚水機	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
C放流工	ゲート	構造被害	-	-	440	-	660	-	324	-	485	-	1.360	324	-	485	-
	開水路	構造被害	-	-	320	-	640	-	235	-	471	-	1.360	235	-	471	-
	ゲート・開水路	地盤被害	-	-	-	-	500	-	-	-	368	-	1.360	-	-	368	-
Kダム	ダム	地山崩壊被害	-	-	700	-	-	2000	470	-	-	1342	1.490	470	-	-	1342
	ダム	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	268	-	-	537	1.490	268	-	-	537
Yダム	ダム	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	328	-	-	656	1.220	328	-	-	656
	ダム	斜面崩壊被害	-	-	470	-	-	700	385	-	-	574	1.220	385	-	-	574
Oダム	ダム	地山崩壊被害	-	-	700	-	-	2000	515	-	-	1471	1.360	515	-	-	1471
	ダム	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	294	-	-	588	1.360	294	-	-	588
Bため池	ため池	地山崩壊被害	-	-	700	-	-	2000	470	-	-	1342	1.490	470	-	-	1342
	ため池	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	268	-	-	537	1.490	268	-	-	537
Tため池	ため池	地山崩壊被害	-	-	700	-	-	2000	574	-	-	1639	1.220	574	-	-	1639
	ため池	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	328	-	-	656	1.220	328	-	-	656
Nため池	ため池	地山崩壊被害	-	-	700	-	-	2000	470	-	-	1342	1.490	470	-	-	1342
	ため池	堤体構造被害	-	-	400	-	-	800	268	-	-	537	1.490	268	-	-	537



表を **Table 4** に、同じく損失率のPMLの大きな順にシナリオ地震を並べた表を **Table 5** に示す。これらの表から、施設群に平均的なあるいは最大の損失を与えるシナリオ地震が明らかになり、それぞれの地震に対してどのような対策を取れば良いかの方針を立てることができる。なお、2つの表の震源名に（緯度，経度）が記述されている地震はいずれも位置や規模が特定できない直下型、近傍地震（バックグランド地震）を示す。震源名の（緯度，経度）は便宜的な震源位置を表す（中村ら，2009）。

**Table 4** より、施設群の平均的な損失を考えた場合は、対象地域の最大断層である長岡平野西縁断層帯による地震（長岡平野西縁断層帯と呼ぶ）が最大損失を与えることがわかる。この地震により想定される施設群の平均損失は再建設費の44%（約44億）であり、対象地震の発生頻度は、年間発生確率が0.00012、すなわち  $1/0.0012=8333$  年に1回の発生が想定される。長岡平野西縁断層帯地震は発生頻度が低い最大損失を与える地震である。

一方、**Table 4** の8番目の「十日町断層帯西部」地震は、年間発生確率が0.0040、すなわち  $1/0.0040=2500$  年に1回の発生が想定され、施設群の平均損失は25%である。地震による損失は1番目の「長岡平野西縁断層帯地震」に較べ小さいが、発生頻度は高い地震であることが分かる。このように地震の発生頻度と予想損失の情報を分析し、対策が必要なターゲット地震を絞り込むことが重要である。発生頻度は低いが大規模な地震による損失の低減を目指すのか、発生頻度がやや高い中規模の地震による損失の低減を目指すのか、リスク低減の目的に応じてターゲット地震を選定し、対策を立案することが必要である。

**Table 5** は損失のPMLの大きな順に並べた表である。PMLは前に述べたように損失の分布における90%非超過確率の損失を意味する。すなわち平均的な損失であるNELよりも発生する確率は小さいが、もし発生した場合は極めて大きな損失、いわゆる最悪の損失を予想するときに用いられる指標である。**Table 4,5** を比較す

ると、NELとPML双方の地震の順位は一致しない。これは、地震による平均損失（NEL）がほぼ等しい場合も、損失のばらつきが大きくなるほどPMLが大きくなるためである。機能損失によるリスクが極めて高い施設ではPMLを用いたリスク評価が必要とされる場合もある。

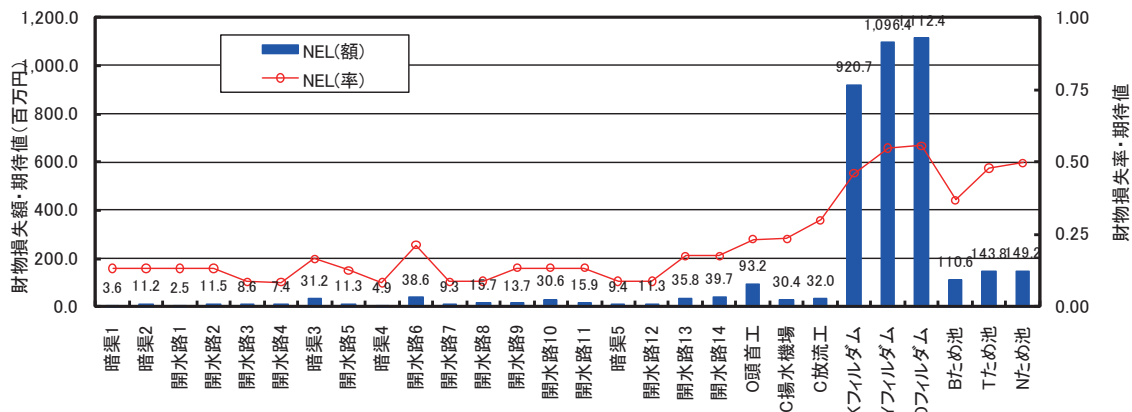
**Fig.31** に **Table 4** の損失順位1番目のシナリオ地震「長

**Table 4** シナリオ地震ごとの損失率NEL（上位20地震）  
The percentage of seismic damage costs *NEL* by scenario earthquakes (top 20)

No.	震源名	マグニチュード	年間発生確率	累積確率	NEL
1	長岡平野西縁断層帯	M8.0	0.00012	0.00012	0.4370
2	悠久山断層帯	M7.1	0.00016	0.00028	0.4111
3	(138.88, 37.28)	M7.0	0.00002	0.00030	0.2952
4	(139.08, 37.28)	M7.0	0.00002	0.00033	0.2724
5	(139.08, 37.48)	M7.0	0.00002	0.00035	0.2672
6	(138.88, 37.48)	M7.0	0.00001	0.00036	0.2611
7	(138.68, 37.28)	M7.0	0.00001	0.00036	0.2569
8	十日町断層帯西部	M7.4	0.00040	0.00076	0.2545
9	(138.68, 37.48)	M7.0	0.00001	0.00077	0.2491
10	(138.88, 37.28)	M6.5	0.00009	0.00086	0.2318
11	(138.88, 37.08)	M7.0	0.00002	0.00089	0.2126
12	(139.08, 37.28)	M6.5	0.00009	0.00098	0.2023
13	(139.08, 37.48)	M6.5	0.00009	0.00107	0.1980
14	六日町断層帯北部	M7.1	0.00012	0.00119	0.1975
15	(139.08, 37.08)	M7.0	0.00002	0.00121	0.1939
16	(138.68, 37.08)	M7.0	0.00001	0.00122	0.1938
17	(138.88, 37.48)	M6.5	0.00003	0.00124	0.1870
18	(138.68, 37.28)	M6.5	0.00003	0.00127	0.1817
19	(138.68, 37.48)	M6.5	0.00003	0.00130	0.1719
20	十日町断層帯東部	M7.0	0.00017	0.00146	0.1577

**Table 5** シナリオ地震ごとの損失率PML（上位20地震）  
The percentage of seismic damage costs *PML* by scenario earthquakes (top 20)

No.	震源名	マグニチュード	年間発生確率	累積確率	PML
1	長岡平野西縁断層帯	M8.0	0.00012	0.00012	0.6142
2	悠久山断層帯	M7.1	0.00016	0.00028	0.6052
3	(138.88, 37.28)	M7.0	0.00002	0.00030	0.5113
4	(139.08, 37.28)	M7.0	0.00002	0.00033	0.4968
5	(139.08, 37.48)	M7.0	0.00002	0.00035	0.4893
6	(138.88, 37.48)	M7.0	0.00001	0.00036	0.4823
7	(138.68, 37.28)	M7.0	0.00001	0.00036	0.4803
8	(138.68, 37.48)	M7.0	0.00001	0.00037	0.4767
9	(138.88, 37.28)	M6.5	0.00009	0.00046	0.4502
10	十日町断層帯西部	M7.4	0.00040	0.00086	0.4470
11	(139.08, 37.28)	M6.5	0.00009	0.00095	0.4211
12	(139.08, 37.48)	M6.5	0.00009	0.00104	0.4101
13	(138.88, 37.08)	M7.0	0.00002	0.00107	0.4052
14	(138.88, 37.48)	M6.5	0.00003	0.00110	0.3976
15	(139.08, 37.08)	M7.0	0.00002	0.00112	0.3934
16	(138.68, 37.28)	M6.5	0.00003	0.00115	0.3923
17	六日町断層帯北部	M7.1	0.00012	0.00126	0.3897
18	(138.68, 37.08)	M7.0	0.00001	0.00127	0.3844
19	(138.68, 37.48)	M6.5	0.00003	0.00130	0.3827
20	(138.88, 37.28)	M6.0	0.00035	0.00164	0.3552



**Fig.31** 各ユニットの平均損失額（NEL）  
Average damage costs of units (NEL)

岡平野西縁断層帯」をターゲット地震とした場合のユニットの損失率、損失額のNELを示す。Fig.31からユニット間の損失の大きさ(脆弱性)の比較できる。すなわち、どのユニットの耐震性の向上が必要であるか、など具体的な施設のリスクマネジメントを行う際の情報が得られる。ただし、これらの情報はある特定のシナリオ地震の発生という条件付きの情報であることに注意が必要である。すなわち、対象とする施設群に今後想定されるすべての地震動に対するリスク情報は得られない。

ここまでは、個別のシナリオ地震に対するリスク評価指標に関して説明した。シナリオ地震のリスク評価結果からは、個別のユニットの損傷情報など具体的な情報が得られるが、発生する地震の総合的なリスク評価情報を得ることができない。施設群に対して、その地域に起こりうるすべての地震に対する損失を総合的に予測する場合には地震イベントリスク曲線を用いるのが良い。Fig.32に施設群の地震イベントリスク曲線を示す。イベントリスク曲線の読み方についてはFig.27に示したとおりである。地震イベントリスク曲線か地震リスク評価に必要な「損失の大きさ」と「発生確率」に関する情報が得られる。例えば、最大損失地震(長岡平野西縁断層帯地震)による施設群の損失期待値(NEL)は44億円と推定される。また、損失の90%非超過確率値であるPMLは61億と平均的な損失のNELより20億程度上昇する。NELの地震イベントリスクカーブの下面積は年間損失期待値に等しく、その値は290万と推定される。これは、施設群の地震による平均損失を表し、この施設群に地震保険を掛けるような場合を考えた場合の年間地震保険料の基本情報となる。また、Fig.32の横軸の損失10億に対するNEL曲線の値は0.0025となる。これは、平均損失10億円以上の地震の年間発生確率が0.0025であることを意味する。年間発生確率が0.0025の地震の再現期間は $1/0.0025=400$ 年であることから、この地域では平均損失が10億円以上となる地震が400年に1回程度の頻度で発生することが分かる。このように地震イベントリスク曲線を利用することにより施設群の様々な条件下にお

けるリスクの発生確率と損失額を求めることができる。

## V 結言

本報では、個別施設および施設群を対象とした地震リスク評価手法について定式化の過程を整理した。また、施設群のケーススタディを行い手法の有効性を検証した。

II章では地震リスク評価の基本である個別施設のリスク評価の具体的な定式化の過程を整理した。個別施設の地震リスク評価は施設の耐力に関する情報と地震危険度の情報を基に、施設の耐力に関する情報については地震損傷度曲線と地震損失関数として整理する。一方、その地域の地震危険度の情報は地震ハザード曲線として整理する。最終的に、地震損失関数と地震ハザード曲線から地震リスク曲線を求める。地震リスク曲線は地震発生確率と損失の関係を表した曲線であり、リスク評価に必要ななどのくらいの頻度でどの程度のリスク(損失)が発生するかという情報が集約される。実際のリスク評価を行うためには、施設の耐力と地震動の大きさの平均値、ばらつきをどのように設定するかが最も重要な課題となる。これらのパラメータは現状では工学的判断によって設定されているため、今後は信頼性理論などに基づく定量的な設定手法の開発が技術的課題と言える。

個別施設のリスク評価技術を基に施設群のリスク評価手法が可能である。施設群のリスク評価では、その地域に発生が想定される地震に対して一つ一つリスク計算を行い、損失を積み上げ施設群全体のリスク評価を行う必要がある。このような手法をマルチイベント地震モデルと呼ぶ。III章ではマルチイベント地震モデルの概要を説明するとともに、ケーススタディとして新潟県の中越地方を対象とした農業水利施設群のリスク評価を行い、マルチイベント地震モデルから得られるリスク評価指標の有効性について検証した。その結果、マルチイベント地震解析によって得られる地震リスクイベントカーブ等から施設の脆弱性、損失などに関する有益な情報が得られることが明らかになった。ただし、施設群の地震リスク解析においても個別施設の解析と同様に、施設の再建設費、施設の耐力および地震動のばらつき、施設間の相関係数などの入力情報を定量的に算出する手法は定まっておらず、これらの評価手法を開発することが今後の技術的課題と言える。

謝辞：本報告をまとめるにあたっては豊橋技術科学大学・中澤祥二准教授が作成された公開授業資料を参考にさせて頂いた。ここに記して感謝を表します。(株)篠塚研究所・静岡俊郎博士には、本報告をまとめるにあたり貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

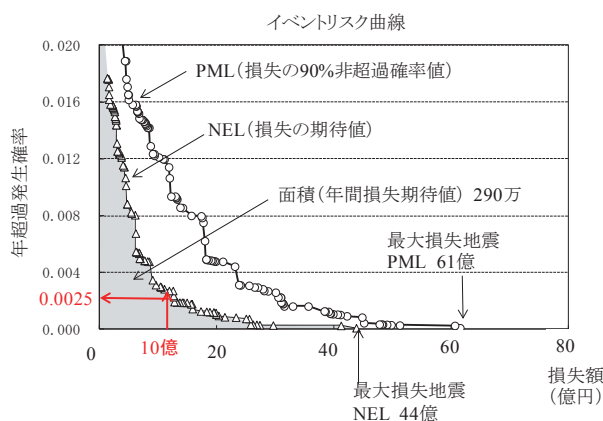


Fig.32 地震イベントリスク曲線  
Seismic event risk curve

### 参考文献

- 1) 星谷勝・中村孝明 (2002)：構造物の地震リスクマネジメント，山海堂
- 2) 中村孝明 (2008)：相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価，日本建築学会構造系論文集，623，49-56
- 3) 中村孝明・宇賀田健 (2009)：地震リスクマネジメント，技報堂出版
- 4) 日本建築学会 (2009)：事例に学ぶ建築リスク入門，68-71，技報堂出版
- 5) 日本建築学会 (2010)：建築物の安全性評価ガイドライン 小委員会報告書
- 6) 中澤祥二・加藤史郎・八木佑奈 (2012)：単層ラチスドームの地震時の損傷評価手法に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，674，593-601
- 7) 村尾修・山崎文雄 (2001)：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，527，189-196
- 8) 静間俊郎・中村孝明 (2000)：相関を考慮した広域的地震リスク評価に関する基礎的研究，第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，193-198
- 9) 損害保険料率算出機構 (2002)：地震危険度指標に関する調査研究-地震PMLの現状と将来-，地震保険研究1
- 10) 損害保険料率算出機構 (2009)：250mメッシュを用いた地震被害想定システムに関する研究[付録]，地震保険研究20
- 11) 境有紀・中村由紀子・大月俊典・小杉慎司 (2006)：2004年新潟県中越地震で発生した地震動と建物被害の対応性，日本建築学会構造系論文集，601，69-73
- 12) 宇賀田健 (2001)：シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価，日本建築学会構造系論文集，541，95-104
- 13) 矢代晴実・福島清一郎 (2002)：地震リスクの証券化に関する数理解析，統計数理，2，259-278
- 14) 吉川弘道 (2008)：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析，丸善株式会社
- 15) 吉川弘道・静間俊郎・高澤尚子・中村孝明 (2011)：線状施設の震災後機能停止期間に関するシステムリスク解析，土木学会論文集F4 (建設マネジメント)，67(2)，92-108

---

受理年月日 平成24年12月10日

## A Portfolio Seismic Loss Estimation for Irrigation and Drainage Facilities

ASANO Isamu

### Summary

Japan is one of the most earthquake-prone countries in the world, and has repeatedly suffered serious damage caused by earthquakes. There is a possibility that a major earthquake will occur in the future in Japan. It is necessary to promptly take earthquake protection measures for irrigation and drainage facilities to keep stable production of agricultural products. Seismic risk assessment and loss estimation is an essential first step to seismic hazard reduction for irrigation and drainage facilities. Knowing the seismic risk and potential losses allows for proper seismic risk management. In this paper, we present the overview of the formulation of the risk assessment of individual facilities. Components of seismic risk assessment and loss estimation are (1) Seismic hazard analysis; (2) Seismic fragility curve based on Event Tree; (3) Seismic hazard curve. These components are described in Chapter II. In Chapter III, we present the outline of a method for evaluating portfolio seismic risk based on Multi-Event seismic model with a set of scenario earthquakes. Using this method, we perform simulations of portfolio of irrigation and drainage facilities in Niigata prefecture. As a result, it is confirmed that a lot of useful information can be obtained from the seismic event risk curve which is determined in the portfolio seismic loss estimation.

**Keywords** : Portfolio of irrigation and drainage facilities, Seismic risk, Risk analysis, Scenario earthquakes, Multi-Event seismic model