

構造物の地震リスクの簡便な評価方法について ーリスクダイアグラムとその適用ー

平田 和太¹・中島 正人¹

¹ (財) 電力中央研究所 地球工学研究所
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail: hirata@cripi.denken.or.jp

構造物の地震リスク評価を行うに当たっては、地震動強度の年超過確率を与える地震ハザード評価と地震動強度を与条件とした構造物の損傷確率評価（フラジリティ評価）から年損傷確率を算出するが、一般には、その際に数値積分が必要となるため、実務に適用しにくい面があった。本論文では、著者らが提案している地震リスクダイアグラムにおいて、耐力の非超過確率レベルを選定することにより地震リスクが地震ハザードで近似的に評価できることを利用して、構造物の耐力の確率量（入力地震動強度で表した耐力の中央値とばらつき量）と地震ハザード情報のみを用いて、数値積分を必要としない簡便なリスク評価手法を提案している。提案手法の適用性については2つの地点の地震ハザード情報、地震リスク情報を用いて検証を行っており、構造物の地震リスクを簡便に評価できる見通しが得られた。また、提案手法の理論的背景についてはrisk equationにもとづく検討によって考察を加えている。

Key Words : seismic risk, seismic hazard, fragility, seismic margin, ground motion capacity

1. はじめに

構造物の地震リスク評価を行うに当たっては、地震動の年超過確率を与える地震ハザード評価と地震動強度を与条件とした構造物の損傷確率評価（フラジリティ評価）をもとに年損傷確率が算出される。地震ハザードとフラジリティの関数形を仮定すると年損傷確率はclosed formで与えられるが、一般には、数値積分が必要となる。重要構造物、施設に対しては建設地点での地震ハザード評価、構造物のフラジリティ評価を独自に行い地震リスク評価が行われることもあるが、面的に広く分布する一般的な構造物に対してはこのような手順を踏むことは技術的、経済的に困難な場合が多い。近年、地震ハザードや地震リスクが実務レベルで評価されるようになってきており、また、公的機関による地震ハザードマップ等、地震ハザード情報の入手が容易になってきているが、既存の地震ハザード情報を用いたとしても地震リスクの評価には数値解析が必要となるため、リスク情報を利用した耐震安全性の評価や耐震補強の判定などが普及しにくい面がある。本論文では、構造物の耐力についての情報（入力地震動強度で表した耐力の中央値とばらつき量）と地震ハザード情報のみを用いて、数値積分を必要としない簡便なリスク評価手法について提案する。

2. リスクダイアグラムの概要

(1) Risk equationについて

構造物の地震リスク（年損傷確率） P_F は、地震ハザード $H(a)$ （地震動強度 a の年超過発生確率）とフラジリティ $F(a)$ （地震動強度 a を与条件とした構造物の破壊確率）により下式で与えられる。

$$P_F = \int_0^{\infty} H(a) \cdot (dF(a, A_{Fm}, \beta) / da) da \quad (1)$$

ここに、 A_{Fm} ：地震動強度で表される“耐力”の中央値、 β ：“耐力”の不確実さを表すパラメータ。一般に、数値積分により上式から地震リスクが算出されるが、地震ハザードが(2)式のように指数関数で与えられ、また、フラジリティが(3)式のように対数標準正規分布関数で与えられるものとする、地震リスク P_F は、(4)式のようにclosed formで与えられる¹⁾ことが知られており、(4)式はrisk equationと呼ばれることもある²⁾。

$$H(a) = K_I \cdot a^{-KH} \quad (2)$$

ここに、 $H(a)$ ：地震ハザード（地震動強度 a の年超

過確率)， a ：地震動強度を表す指標（最大加速度PGA，最大速度PGV，スペクトル加速度 $Sa(T,h)$ 等）。

$$F(a) = \Phi([\ln(a) - \ln(A_{Fm})]/\beta) \quad (3)$$

ここに， $F(a)$ ：フラジリティ（地震動強度 a を与条件とした構造物の破壊確率）， A_{Fm} ：構造物が破壊するときの地震動強度 A_F の中央値（地震動強度をPGAとしたときには，acceleration capacity（加速度耐力）などとも呼ばれる）， β ： A_F の対数標準偏差で，応答および耐力についての対数標準偏差 β_S ， β_R を用いると， $\beta = \sqrt{\beta_S^2 + \beta_R^2}$ と表される。

$$P_F = K_I \cdot (A_{Fm})^{-KH} \cdot \exp[(1/2)(KH \cdot \beta)^2] \quad (4)$$

また，(2)，(4)式より K_I を消去すると，

$$P_F = H(a) (A_{Fm}/a)^{-KH} \cdot \exp[(1/2)(KH \cdot \beta)^2] \quad (5)$$

(2) リスクダイアグラムについて

(4)式を用いることにより， P_F と A_{Fm} の関係を β をパラメータとして容易に表すことができる。(4)，(5)式の導出ではフラジリティが対数正規分布関数で与えられることを条件としているが，応答，耐力を対数正規分布で与えることは広く受け入れられている仮定であり，この条件は一般性を有しているといえる。一方，ハザードの指数関数による近似については必ずしも一般性を有しているとはいえない。著者らは地点毎に評価された地震ハザードから(1)式を用いて（フラジリティは対数正規分布関数で与える）地震リスクを評価し，これをグラフ化したものをリスクダイアグラムとして提案している³⁴⁾。図-1にリスクダイアグラムの例を示すが，この図より，構造物の耐力（正確には構造物が破壊に達するときの地震動強度。以下では便宜的に加速度耐力として論を進めるが，加速度以外の地震動強度としても構わない）の中央値 A_{Fm} とその不確かさ（対数標準偏差） β が分かれば，構造物の年損傷確率を読み取ることができる。なお， $\beta=0$ の時には，フラジリティは階段関数となり，その微分はDiracのデルタ関数となる。従って，(1)式は，

$$P_F = \int_0^\infty H(a) \cdot \delta(a - A_{Fm}) da = H(A_{Fm}) \quad (6)$$

となり，リスクダイアグラムはハザード曲線と一致する。

実際の地震ハザード曲線を用いたリスクダイアグラムの作成は，与えられた A_{Fm} ， β に対して数値積分を行う必要がある。新規に地震ハザードが評価された場合に(1)式の数値積分を行うことは設計者の負担となり，実用に供しにくい面がある。このため，次章では簡易な地震リスク評価法について検討を行う。

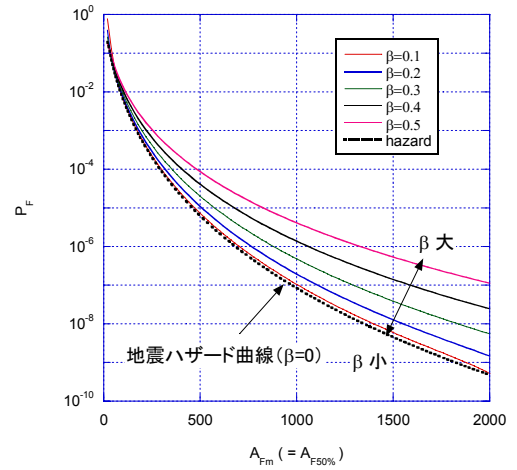


図-1 リスクダイアグラムの例

3. リスクの簡易評価手法

(1) Risk equationによる評価

まず，risk equationを用いて行われたKennedyによる検討について紹介する¹⁾。(4)式中 A_{Fm} はフラジリティ曲線の50%破壊確率に対応する入力地震動強度であり， $A_{Fm} = A_{F50\%}$ と表す。同様に，破壊確率，1%，5%，10%，15%に対応する地震動強度をそれぞれ， $A_{F1\%}$ ， $A_{F5\%}$ ， $A_{F10\%}$ ， $A_{F15\%}$ とすると，対数正規分布の仮定から，

$$A_{Fn\%} = A_{Fm} \cdot \exp(-q\beta) \quad (n=1, 5, 10, 15) \quad (7)$$

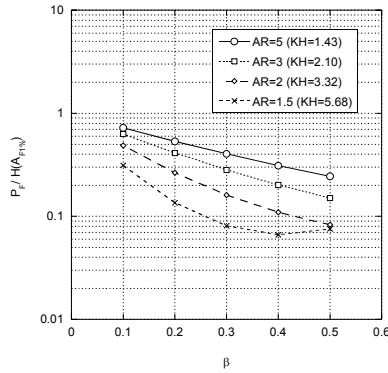
$n=1, 5, 10, 15$ に対して， $q=2.33, 1.65, 1.28, 1.04$ となる。なお， $A_{F1\%} = A_{Fm} \cdot \exp(-2.33\beta)$ はHCLPF (High Confidence Low Probability of Failure) ground motion level などとも呼ばれている。(5)，(7)式より，

$$P_F / H(A_{Fn\%}) = \exp[(1/2)(K_H \cdot \beta)^2 - q\beta K_H] \quad (8)$$

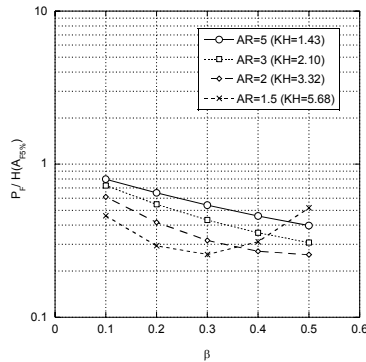
となり，年損傷確率 P_F と $n\%$ 破壊確率に対応する地震動強度（ $n\%$ 破壊加速度 $A_{Fn\%}$ ）に対するハザード $H(A_{Fn\%})$ の比 R_p （ $=P_F / H(A_{Fn\%})$ ）が地震ハザード曲線の傾きと β から算出される。Kennedyは地震ハザード曲線の傾きを表す A_R （ $K_H=1/\log(A_R)$ ）， β をパラメータとして計算した結果から，10%，15%，20%破壊加速度に対しては A_R が小さくない場合（傾き K_H が大きくない場合）には R_p のばらつき（ R_{pmin} / R_{pmax} ）が小さいことを示している。

図-2は， $A_{Fn\%}$ （ $n=1, 5, 10, 15$ ）の場合について，(5)式を用いて， A_R をパラメータとして， β と $P_F/H(A_{Fn\%})$ の関係を算出したものであるが，これらの図より以下のことが分かる。

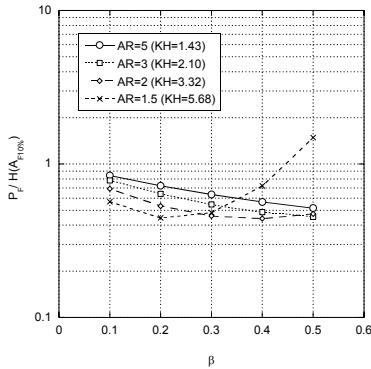
①検討したパラメータの範囲では， $P_F/H(A_{Fn\%})$ は概ね1.0を下回り， β に対して単調減少の傾向にある（ $A_R=1.5$ の場合を除く）。また， A_R が減少（ハザード曲線の勾配 K_H が増加）するに従い $P_F/H(A_{Fn\%})$ は減



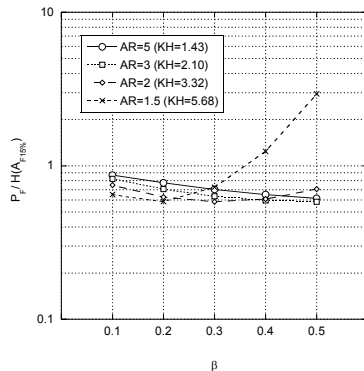
(a) $P_F/H(A_{F1\%})$



(b) $P_F/H(A_{F5\%})$



(c) $P_F/H(A_{F10\%})$



(d) $P_F/H(A_{F15\%})$

図-2 risk equation による地震リスクと地震ハザード（指数関数によるハザード）の比

少する傾向にある。

② $n\%$ 破壊加速度の確率値 n が大きくなると $P_F/H(A_{Fn\%})$ の分布範囲が狭くなり、 $P_F/H(A_{F10\%})$ は 0.4 ~ 1.0 程度となる。15% 破壊加速度を用いると、 $P_F/H(A_{F15\%})$ の分布の幅はさらに狭くなるが、 $A_R=1.5$ の場合には β が大きくなると $P_F/H(A_{F15\%})$ の変動が $P_F/H(A_{F10\%})$ に比べて大きくなる。

これらの結果は、 $P_F/H(A_{Fn\%})$ が一定値あるいは安定した値となるような $A_{Fn\%}$ (A_R や β の値に依存するものの、 $n=5, 10, 15$) を用いることにより、地震ハザードから地震リスクが概算できることを示唆している。

(2) リスクダイアグラムにもとづく評価

ここでは実際の地震ハザード曲線を用いて得られるリスクダイアグラムに基づく評価を行う。図-1 中の曲線群は A_{Fm} すなわち、 $A_{F50\%}$ に対する P_F の値をプロットしたものであるが、(7)式により $A_{F50\%}$ を $A_{Fn\%}$ ($n=1, 5, 10, 15$) に変換して曲線をプロットし直してみる。ただし、図中のハザード曲線については(6)式に示されるように $\beta=0$ に相当し、(7)式で $\beta=0$ すると $A_{Fn\%}=A_{Fm}$ となり、変換は施されないことになる。このように変換した結果を図-3 に示す。これらの図より、以下のことが言える

① $A_{F5\%}$, $A_{F10\%}$, $A_{F15\%}$ に変換した場合には、異なる β に対するダイアグラム上の曲線群は一本の曲線に収束していくように見える（ただし、 $\beta=0.5$ の場合には“ずれ”が見られる）。

② ハザード曲線は変換後の収束に向かう曲線群とほぼ重なるか、概ねそれを上回っている。

③ $A_{F1\%}$, $A_{F50\%}$ (図-1) ではこのような収束は見られず、曲線群の収束に関していうと、“最適な” $n\%$ 値がある。

上記①～③の結果を用いることにより次のように地震リスクを求めることが可能となる。構造物の A_{Fm} と β が分かれば、例えば $A_{F10\%}$ 値を(7)式より求め、 $A_{F10\%}$ で整理した図-3(c)より、ハザード曲線から $A_{F10\%}$ 値に対するハザード値（年超過確率）を読み取ることにより、(1)式の数値積分を行わなくとも、地震リスクを評価することができる。 $n=5\%$ の場合には地震ハザード曲線が曲線群を包絡しており、安全側をみるならば、 $A_{F5\%}$ に変換した結果を用いても良いと考えられる。同様のことを異なる地点（異なる地震ハザード曲線）を用いて検討した結果を図-4 に示す。この場合も上に述べたことと同様のことが言える。

評価事例が限定されているため、必ずしも一般性のある結論とは言えないが、このような手順で地震ハザード曲線のみを用いて構造物の地震リスクを簡易に評価することができる。ここでの検討は地動最大加速度 PGA についてのハザード曲線を用いているが、構造物に適した（構造物の応答との相関が高い）地震動指標（ PSV , $Sa(T, h)$ 等）を用いた場合でも、ハザード曲線の振る舞いは大きく変わることは無く、同様の結論が得られると考えて良い。

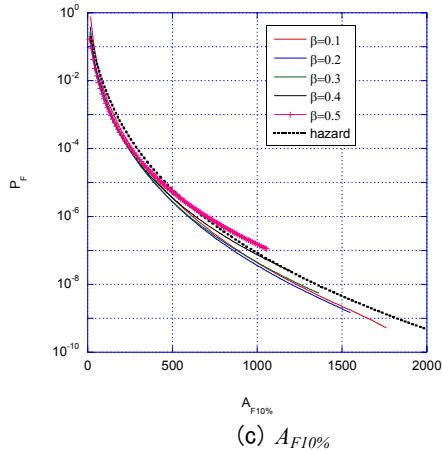
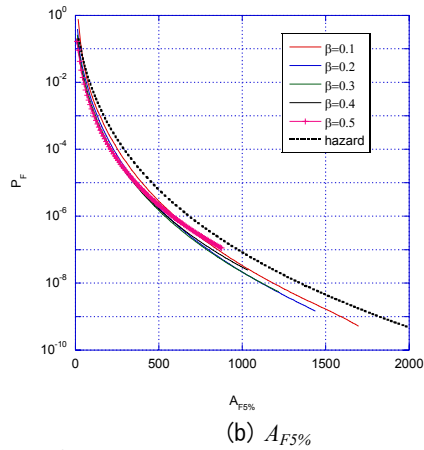
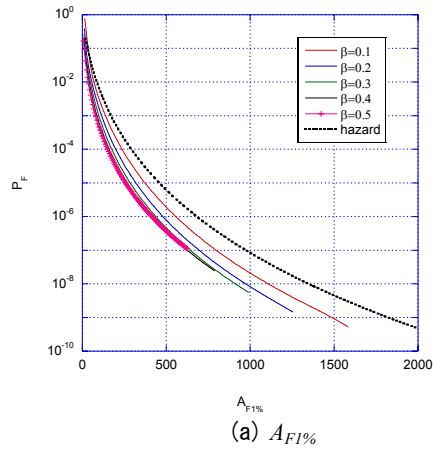


図-5 には地点 -1 と地点 -2 について $A_{F10\%}$ と $P_F/H(A_{F10\%})$ の関係を示す。図-2はrisk equationから求めた結果であり、この場合は式(8)から分かるように、 $A_{F10\%}$ の値には依存しないが、実施のハザード曲線を用いた場合には $A_{F10\%}$ の値に依存する。 $\beta=0.1\sim0.3$ では $A_{F10\%}$ の値に係わらずほぼ一定の値となるが、 $\beta=0.4, 0.5$ の場合には $P_F/H(A_{F10\%})$ は $A_{F10\%}$ に対して増加する傾向にある。また、 $P_F/H(A_{F10\%})$ が1.0を上回る場合があり、 $A_{F10\%}$ に対する地震ハザードから地震リスクを評価するとリスクが過小に評価されることになるが、図-5(a)においては高々50%程度であり、リスク評価においては許容される範囲といえよう。あくまでも過小評価を避けたいのであれば、 $A_{F5\%}$ に対する地震ハザードから地震リスクを評

価すればよい。

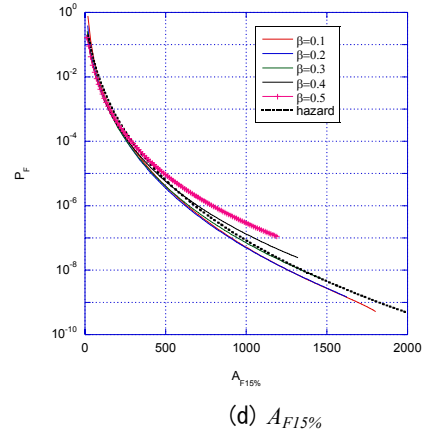


図-3 $n\%$ 破壊加速度($A_{Fn\%}$)を用いたリスクダイアグラム (地点-1)

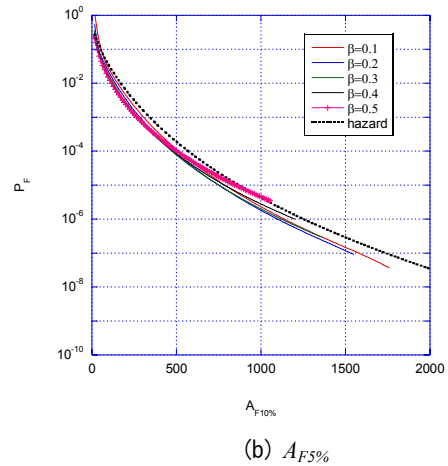
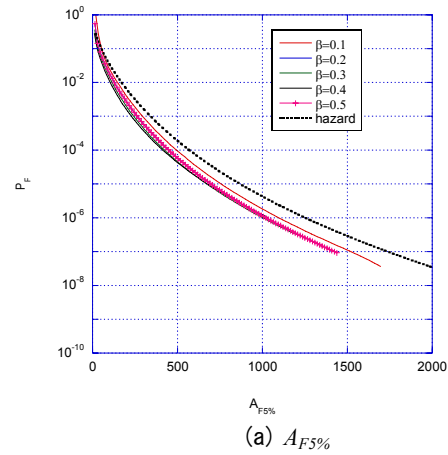


図-4 $n\%$ 破壊加速度($A_{Fn\%}$)を用いたリスクダイアグラム (地点-2)

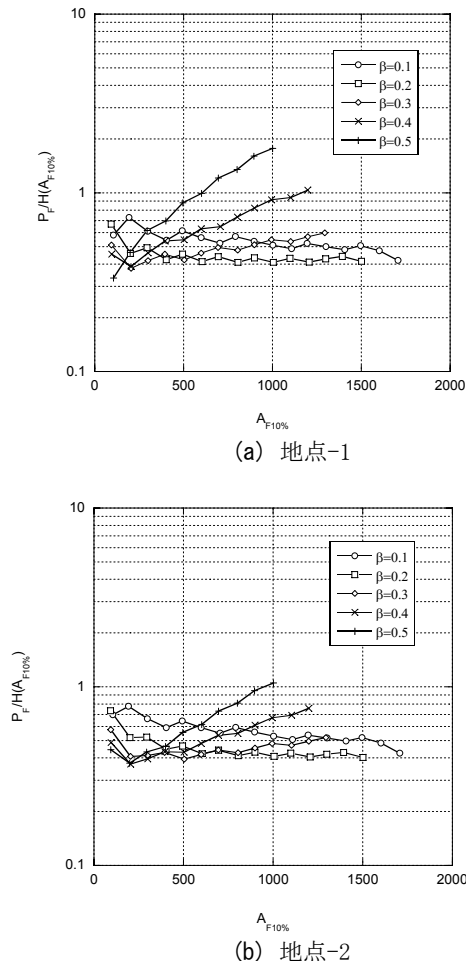


図-5 地震リスクと地震ハザード値の比

4. まとめ

本論文で提案した手法は地震ハザード情報と構造物の耐力の中央値，対数標準偏差を用いて地震リスクをするもので，数値積分等は必要としない簡便な手法といえる。ハザード情報が数値データとして無く，地震ハザード曲線として与えられた場合でもハザード曲線から直接地震リスクを読み取ることができる。提案手法の理論的背景については **risk equation** にもとづく検討によって考察を加えている。提案手法の適用性については2つの地点の地震ハザード情報を用いた検証を行っているのみであるが，今後，検証例を増やして手法の有効性を示していきたい。今後，地震リスク情報の活用が増えると考えられるが，その際，提案手法は有用な手法となりうると考えられる。

参考文献

- 1) Kennedy, R. P. : Risk based seismic design criteria, *Nuclear Engineering and Design* 192 (1999), pp.117-135
- 2) McGuire, R. M.: *Seismic Hazard and Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute MNO-10, 2004
- 3) 大島靖樹，中島正人，平田和太：構造物の耐震裕度とリスクの対応関係の研究 その1～その4，日本原子力学会 2009年秋の大会 予稿集，2010年秋の大会 予稿集
- 4) 中島正人，大島靖樹，平田和太：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

Proposal of a Simplified Method for Seismic Risk Evaluation of Structures - Risk diagram and its application -

Kazuta HIRATA and Masato NAKAJIMA

In the seismic risk analysis of structures, information on seismic hazard and seismic fragility are required. Both hazard and fragility functions (or curves) are convolved numerically, and seismic risk (or annual probability of failure) of the structure is evaluated. In this paper, a simplified method for seismic risk evaluation is proposed, where information on the seismic hazard curve and the capacity of the structure are used and numerical integration is not required, and the seismic risk can be obtained graphically from the hazard curve. The proposed method is demonstrated using seismic hazard curves at two sites. Theoretical background of the method is considered from the closed form risk equation.