地盤応答の非線形性を考慮した地震時損傷確率評価の簡便法 －手法の提案－

株式会社篠塚研究所　正会員　○望月　智也
株式会社篠塚研究所　正会員　静間　俊郎
株式会社篠塚研究所　正会員　中村　孝明

１．はじめに

地震リスク評価では，損傷確率の評価は応答スペクトル法[1)]を利用するケースが多い．その場合，地表面の応答スペクトルは，工学的基盤面のそれに表層地盤の増幅率を乗じて求めることができる．しかしながら，表層地盤の増幅率は地震動に依存し変化する，いわゆる非線形となるため，工学的基盤面の応答スペクトルを確率的に定めた場合，地表面のそれは地盤増幅の非線形性を記述する関数を帰して求める必要がある．一方で，地震リスク評価の実務面からはより簡便な方法が求められている．

本報では，応答スペクトル法を基本に，地盤応答の非線形性を考慮した構造物の損傷確率の評価について，簡便な方法を提案する．

２．損傷確率の評価

図 1 は距離減衰式を使い工学的基盤面（解放基盤）での応答スペクトルを定め，これに表層地盤の増幅率を乗じ，地表面の応答スペクトルを求める様子を概念的に示した図である．各周期における応答値は図のように確率分布として表され，特に工学的基盤面での応答スペクトルは対数正規分布[2)]として与えられる．地表面の応答加速度を確率変数 R と置くと，構造物の損傷確率 p_f は，応答加速度換算の耐力 S より以下のように求めることができる．

$$p_f = \int_0^\infty F_S(y)\cdot f_R(y)dy \qquad (1)$$

ここに，y は積分変数で地表面の応答加速度である．$f_R(y)$ は地表面の応答加速度 R の確率密度関数，$F_S(y)$は構造物の耐力 S の非超過確率関数である．ここで，地盤の増幅率が線形の場合には確率変数 R は対数正規分布となり，耐力 S も対数正規分布を仮定すれば，(1)式は陽に解くことができ，対数正規分布の累積分布関数として Fragility Curve が得られる．一方で，地盤の増幅率が非線形の場合，非線形関数の与え方によって確率変数 R は任意の確率分布となり，(1)式を解くには数値積分が必要になる．

３．非線形の地盤増幅率の考慮

各周期の地盤増幅率は，工学的基盤面での最大加速度（PBA ; Peak Bedrock Acceleration）に依存するものと仮定し，これを確率変数 X と置く（図 1 参照）．X は対数正規分布とする．そして，地表面の任意の周期の応答加速度 y を基盤地震動（PBA）x の関数 $y=ax^b$ と表記する．a，b は PBA に対する各周期の地表面の応答加速度から非線形回帰を行って求められる回帰係数である．

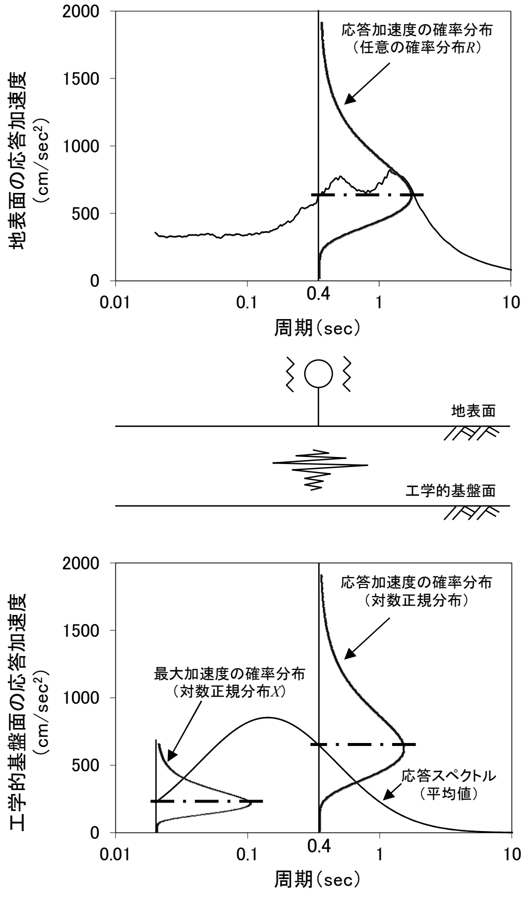

図１　工学的基盤面と地表面の加速度応答スペクトル

キーワード　損傷確率，地盤増幅，地盤応答の非線形性，応答スペクトル，応答加速度
連絡先　〒160-0023　東京都新宿区西新宿 4-5-1 幸伸ビル新宿 3F　株式会社篠塚研究所　TEL：03-5351-3781

なお，関数には周期応答倍率（応答加速度÷最大加速度）も含まれるとする．

地表面の応答加速度の確率密度関数 $f_R(y)$ は，確率変数の関数より以下のようになる．

$$f_R(y) = f_X(g^{-1})\left|\frac{dg^{-1}}{dy}\right|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X\, y^{1/b}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\frac{1}{b}\ln\left(\frac{y}{a}\right) - \ln(x_m)}{\zeta_X}\right)^2\right]\frac{1}{b}y^{1/b-1} \qquad (2)$$

ここに，g^{-1} は $y=ax^b$ の逆関数である．また，x_m は PBA の中央値，ζ_X は対数標準偏差である．なお，(2)式は以下を適用している．

$$g^{-1} = \left(\frac{y}{a}\right)^{1/b}, \quad \frac{dg^{-1}}{dy} = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/b} \cdot \frac{1}{b}y^{1/b-1} \qquad (3)$$

(2)式をさらに展開すると，以下のように誘導できる．

$$f_R(y) = f_X(g^{-1})\left|\frac{dg^{-1}}{dy}\right|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}b\zeta_X\, y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(y) - \ln(ax_m^b)}{b\zeta_X}\right)^2\right] \qquad (4)$$

(4)式は中央値が $a\,x_m^b$，対数標準偏差が $b\,\zeta_X$ の対数正規分布である．したがって，(4)式を(1)式に適用し，積分変数の変換[3)]を行うと，最終的に Fragility Curve は以下のようになる．

$$F_X(x_m) = \int_0^{ax_m^b} f_X\left(\ln x \mid \ln(s_m), \sqrt{b^2\zeta_X^2 + \zeta_S^2}\right)dx \qquad (5)$$

ここに，s_m は応答加速度換算の耐力の中央値，ζ_S は対数標準偏差である．(5)式は工学的基盤面での作用地震動の中央値 x_m が与えられた際，任意の周期を持つ構造物の損傷確率を直接求めることができ，簡便である．ただし，任意の周期の非線形性を表記する関数 $y=ax^b$ の回帰係数を求める手間は必要である．

４．比較と結語

関数 $y=ax^b$ の回帰係数として a=4.6，b=0.7，さらに工学的基盤面の最大加速度と応答加速度換算の耐力を表1のように設定する．図2は工学的基盤面の最大加速度 x に対する地表面の応答加速度 y を示したもので，一方は回帰式，一方は地盤増幅率を線形に仮定した関数である．図示した1.7倍は低加速度領域での増幅率である．工学的基盤面の最大加速度を変化させ損傷確率を評価した結果を図3に示す．図は提案手法と線形仮定を比較している．線形仮定との違いは大きいことが分かる．

提案手法は距離減衰式等から作用地震動を評価し，応答加速度換算の耐力中央値が与えられれば，地盤応答の非線形性を含めた構造物の損傷確率が求められる．一方で，適用性を議論するには，多様な条件での評価が必要であり，この点については，後報（適用性の検討）[4)]で検討する．

表１　最大加速度と耐力の諸元

工学的基盤面の最大加速度		応答加速度換算の耐力	
中央値 x_m(cm/sec^2)	対数標準偏差 ζ_X	中央値 s_m(cm/sec^2)	対数標準偏差 ζ_S
0～1000	0.45	500	0.3

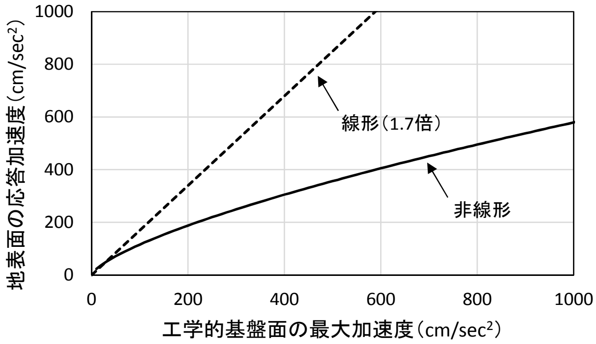

図２　工学的基盤面の最大加速度に対する地表面の応答加速度

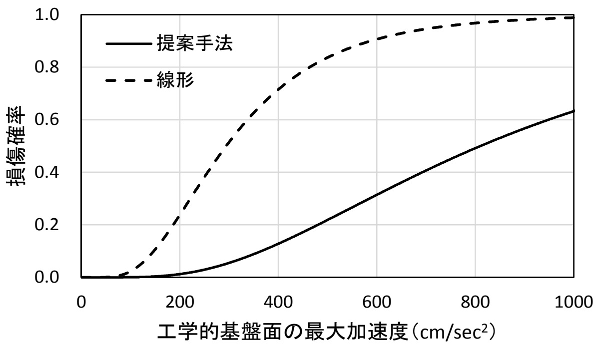

図３　工学的基盤面の最大加速度に対する損傷確率

参考文献

1) 日本建築学会: 地震リスク評価とリスクコミュニケーション，丸善出版, P.156, 2011.
2) 安中正，山崎文雄，片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
3) 中村孝明，宇賀田健: 地震リスクマネジメント，技法堂出版, P.290, 2009.
4) 静間俊郎，望月智也，中村孝明: 地盤応答の非線形性を考慮した地震時損傷確率評価の簡便法 －適用性の検討－，土木学会第 71 回年次学術講演会講演集（投稿中），2016.