地盤の非線形増幅を考慮したランダム地震応答解析

京都大学防災研究所　正員　亀田　弘行　　鹿島建設　正員　○木村　淳二

1．はじめに　地震動強度を表す基本的な工学的変数である応答スペクトルのアテニュエーション特性を明らかにするため，統計的手法による研究が従来から数多く行われてきたが，不規則振動論からこの問題にアプローチした研究は少ない。本研究ではマグニチュードM，震央距離Δ，地盤条件（本研究ではごく浅い地盤の軟弱さを表すパラメータSnと工学的基盤面までの深さdpを用いた。）の関数として決定される地盤の非線形増幅特性をも考慮した地震動モデルに対する線形1自由度系の定常ランダム応答から応答スペクトルの期待値と分散を不規則振動論を用いてclosed formで推定した。

2．入力地震動の有理関数型パワースペクトルモデル[1]　本研究は不規則振動論を用いて応答スペクトルをclosed formで推定することを目的としているため，入力地震動のパワースペクトルを有理関数で表現する必要がある。地表層の増幅特性の影響をほとんど受けない工学的基盤面における入力地震動のパワースペクトルとしては上田[1]，Kameda・Ueda・Nojima[2]による有理関数型非定常パワースペクトルを定常モデルに変換した(1)式の有理関数型モデルを用いた。

$$G_r(f) = \gamma^2 \frac{2\beta_g}{\pi^2 f_p} \cdot \frac{f^2/f_p^2}{(1-f^2/f_p^2)^2 + 4\beta_g^2 f^2/f_p^2} \tag{1}$$

ここに，γ：peak R.M.S. 加速度。(gal)，f_P：パワースペクトルの卓越振動数。(Hz)，

β_g：パワースペクトルのバンド幅をあらわすパラメータ。

上田[1]は上記のモデルパラメータをM，Δの関数として定めており，M，Δから工学的基盤面における地震動のパワースペクトルを推定できるモデルとしている。

地表における地震動は地表層の増幅特性の影響を強く受ける。さらに地表層を構成する土質材料が非線形性を示すことにより，地表層の増幅特性は地盤条件とともに基盤入力地震動の強度により変化する。そこで上田[1]，Kameda・Ueda・Nojima[2]は基盤の非線形増幅特性を考慮した(2)式の有理関数型パワースペクトル変換係数β_R^2を提案している。

$$\beta_R^2(f) = \left\{ \frac{1+2a^2 f^2/f_s^2}{(1-f^2/f_p^2)^2 + h_s^2 f^2/f_s^2} \right\}^2 \tag{2}$$

Kameda・Ueda・Nojima[2]は上式中のモデルパラメータa，fs，hsをM，Δ，Sn，dpの関数として定めている。

(2)式のβ_R^2を用いると，有理関数型の有用性を失うことなく工学的基盤面におけるパワースペクトル Gr(f) を(3)式により地表面におけるパワースペクトル Gs(f) に変換することができる。

$$Gs(f) = \{\beta_R(f)\}^2 \cdot Gr(f) \tag{3}$$

3．定常ランダム応答のスペクトルモーメントと応答スペクトルの推定　工学的基盤面および地表面における上述のパワースペクトルに対する線形1度系の応答の0次～2次のスペクトルモーメントは各々(4)式，(5)式で表される。

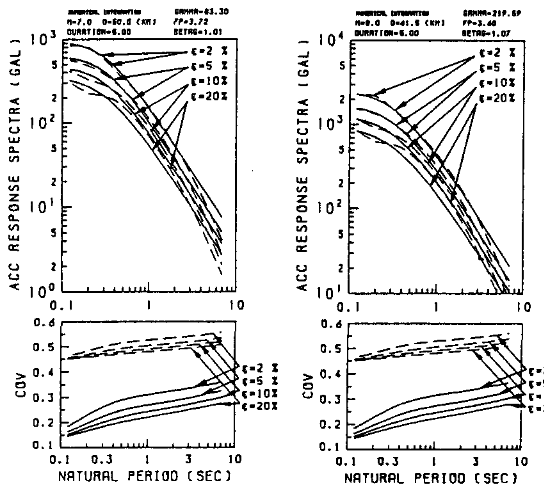
$$\lambda_i = \int_0^\infty \omega^i \, Gr(\omega) \, |H(\omega)|^2 \, d\omega \qquad (i=0,1,2) \tag{4}$$

Hiroyuki KAMEDA, Junji KIMURA

$$\lambda_{si}=\int_0^\infty \omega^i\ \{\beta_R(\omega)\}^2\ Gr(\omega)\ |H(\omega)|^2\ d\omega \qquad (i=0,1,2) \qquad (5)$$

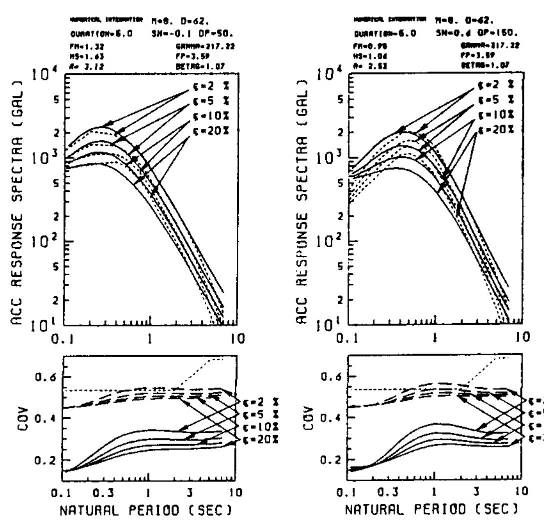
．(4),(5) 式の積分を留数積分，部分分数分解の手法を用いて行い，スペクトルモーメントをclosed form で算出した。（計算結果は文献3)に記載）なお0次，2次のスペクトルモーメントは各々変位応答，速度応答の分散値に一致する。

さらにDer Kiureghian[4] の提案している応答の分散値から応答スペクトルを推定する近似モデルを用いて，0次～2次のスペクトルモーメントから工学的基盤面および地表面における応答スペクトルの期待値と分散をclosed form で算出した。図1と図2にその計算例を示す。図1，図2とも実線が本研究で提案したモデルを用いた応答スペクトルであり，工学的基盤面においてはKameda・Sugito[5] のアテニュエーション式，地表面においてはこれを杉戸・亀田・後藤・廣瀬[6] の提案している表層地盤の非線形性を考慮した応答スペクトルの変換係数β_sを用いて地表に変換した応答スペクトルと比較した。工学的基盤面，地表面ともよく一致している。なお下段の図は実線が入力地震動強度のバラツキを考慮しない場合の応答スペクトルの変動係数であり，破線は入力地震動強度のバラツキを考慮した場合の応答スペクトルの変動係数である。



(a) M＝7，Δ＝50　(b) M＝8，Δ＝62

図1　工学的基盤面における応答スペクトル



(a) 比較的硬い地盤　(b) 軟弱地盤

図2　地表面における応答スペクトル（M＝8，Δ＝62）

4．まとめ　以上で述べたように本研究では，地盤の非線形性をも考慮した応答スペクトルを不規則振動論を用いて推定する手法を提案した。しかし，本研究は定常ランダム応答の解析の段階であるため，応答の継続時間の決定などの問題を残しており，さらに非定常ランダム応答の解析を進める必要がある。

参考文献　1)上田勝也：京都大学修士論文，昭和61年2月　2)Kameda,H.,Ueda, K.,Nojima,N.：Proc．7th Japan Earthq. Eng. Symp.,1986.pp.181-186　3) 木村淳二：京都大学修士論文，昭和62年2月　4)Kiureghian, A.,D.：Univ. of Calif. Rep. No.UBC/EERC-79/32, Dec. 1979.　5)Kameda,H.,Sugito,M.: Kyoto Univ. School of Civil Eng. Res. Rep.No.84-ST-02Oct.1984.　6)杉戸真太・亀田弘行・後藤尚男・廣瀬憲嗣：京都大学防災研究所年報　第29号B-2 別刷　昭和61年4月