時間とともに変化するスペクトル密度を有する地震動が構造物の応答に与える影響について

神戸市　正会員　○新谷瑞穂
京都大学工学部　正会員　北浦　勝
京都大学工学部　正会員　亀田弘行

1. 緒言

土木構造物の耐震設計を行なう場合　最近では実地震動や人工地震波に対する応答を求めることがしばしば行なわれるが、これらの入力は定常確率過程としてモデル化されたり、振幅特性のみ時間的に変化する(すなわち周波数特性は時間的には変化しない。)と仮定してモデル化されることが多かった。しかし実際には、耐震設計において最も重要な加速度振幅の大なる部分に限定しても周波数特性は時間的に変化する場合もある。[1,2] 本研究は地震動のスペクトル密度が時間的に変化する時の線形1自由度系の応答を、主として応答標準偏差に注目してその時間的変化を調べたものである。

2. スペクトル密度の時間的変化の分類

非定常確率過程のスペクトル密度は、定常確率過程におけるそれのように明快な物理的意義を持つ概念が現在のところ確立しておらず、研究者各人が種々の定義を行ないそれを用いているといった状態である。著者らは、非定常な地震動 $\ddot{z}(t)$ の時間函数としてのスペクトル密度 $S_{\ddot{z}}(\omega,t)$ を定義するため、地震記録から時間軸に沿って一定の継続時間を持つ部分記録を取り出し(すなわち時間軸上での区間 $(t_1-\tau,\ t_1+\tau)$ の部分記録を取り出す。)、各部分記録は定常であるものとして通常の定常解析を行なってスペクトル密度を求め、それを時刻 t_1 におけるスペクトル密度 $S_{\ddot{z}}(\omega,t_1)$ とした。そして t_1 を任意に固定することによって時間函数としてのスペクトル密度 $S_{\ddot{z}}(\omega,t)$ を定義した。このように定義した $S_{\ddot{z}}(\omega,t)$ は $\tau\to\infty$ とすることによって従来の定常確率過程におけるスペクトル密度 $S_{\ddot{z}}(\omega)$ に帰着する。この方法でいくつかの地震動のスペクトル密度を求めたが、その結果地震動のスペクトル密度の時間的変化を次のように大きく分類することができた。(1)時間の経過とともに高い周波数成分または低い周波数成分が卓越するもの(例えばEl Centro)、(2)卓越周波数は変らないが、卓越周波数付近のエネルギーが大きくなったり小さくなったりするもの(すなわち正弦波的になったりランダム波的になったりするもの、例えば十勝沖地震の室蘭での記録)、(3)時間的にスペクトル密度がほとんど変化しないもの(すなわち周波数特性がほぼ定常とみなせるもの、例えば松代群発地震の建設省長野国道事務所での記録)、(4)卓越周波数が時間的にランダムに変化するもの(例えば *Olympia SW 266°*)

3. 数値計算結果および考察

スペクトル密度が時間とともに変化する場合の加速度を　後藤・土岐氏の表示法[3]を改定して次のような確率過程で表現する。

$$\ddot{z}(t) = \psi(t)\cdot g(\omega,\phi,t) \qquad (1)$$

$$g(\omega,\phi,t)=\lim_{N\to\infty}\sum_{n=1}^{N}\frac{a}{\sqrt{N}}\cos\{\alpha(t,\omega_n)+\phi_n\} \qquad (2)$$

$$\alpha(t,\omega)=\{\beta(t)\cdot\omega+\gamma(t)\}\cdot t \qquad (3)$$

$$\beta(t)=k\,\exp(-bt)+C \qquad (4)$$

$$\gamma(t)=v\,t+d \qquad (5)$$

ここに$\psi(t)$はshape functionと呼ばれる時間に関する確定函数、aは加速度の単位を持つ定数、Nは正整数、ω_nは確率密度$p(\omega_n)$をもつ確率変数、ϕ_nは$0\sim2\pi$の間の一様乱数、b, C, d, k, vは定数である。特に$k=d=0$, $C=1$の場合は図1-aのように時間的にスペクトルの形は変化せず ただ周波数軸に沿って平行移動のみする場合を表わし $k=C=1$, $v=d=0$の場合は図1-bのように卓越周波数が低くなるにつれてランダム波から正弦波に近づいていく場合を表わす。これを入力として線形1自由度系に作用させたときの応答を求めた。以下に得られた結果を図示し若干の考察を加える。なお系の固有振動数は1.0Hzとし、$p(\omega)$, $\psi(t)$はそれぞれ次式で与えた。

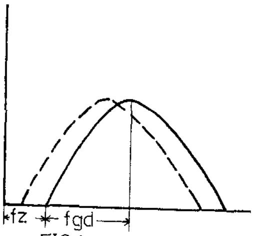

FIG 1 a スペクトル密度の形の変化

FIG 1 b スペクトル密度の形の変化

$$p(\omega)=\frac{4\omega^2}{\omega_p{}^3}\exp\left(-\frac{2\omega}{\omega_p}\right) \qquad (6)$$

$$\psi(t)=\frac{t}{t_p}\exp\left(1-\frac{t}{t_p}\right) \quad \text{[振幅特性が非定常のとき]} \qquad (7)$$

$$\psi(t)=1 \quad \text{[振幅特性が定常のとき]} \qquad (8)$$

図2は入力地震動のパワースペクトル(図1-aの形式のもの)の周波数軸上での移動速度を一定にして、減衰の効果が応答に及ぼす影響を示したものである。同図より減衰が小さいほど応答変位の標準偏差は大きく、特に$h=0$の場合は、応答の標準偏差は構造物の固有振動数の2倍の振動数で振動していることがわかる。また構造物の周波数応答函数のピークとスペクトルのピークが重なった後に各hに対する標準偏差の差がより大きくなると言える。図3は減衰定数を一定にしてパワースペクトルの周波数軸上での移動速度の違いが系の応答に及ぼす影響を示したものであり、細線は周波数特性が定常の場合のものである。地震記録が全継続時間にわたり定常であるとして求めたスペクトルから得られる卓越周期が、構造物の固有周期と一致していない場合を考えると、この図からそのような場合には従来の定常解析を行なうよりも、周波数特性が時間的に変化し得ると考えて解析を行なう方が構造物にとってより不利な条件となり得ることもあることがわかる。なおこの他に、応答の速度・加速度についても検討を加え、変位とほぼ同様の結果を得ている。今後は、非線形系についても同様な手法で研究を進めていくつもりである。

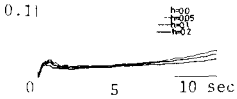

Fig.2 Standard Deviation

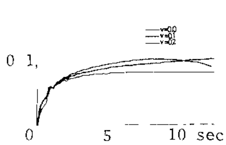

Fig 3 Standard Deviation

参考文献　1) 亀田・北浦：昭和47年土木学会関西支部年次学術講演概要

2) 山原：建築学会論文報告集，第175号，昭和45年9月

3) 後藤・土岐：第1回地震工学研究発表会講演概要

4) 亀田・北浦：昭和47年土木学会第27回年次学術講演概要集第1部