

京都大学大学院 学生員 ○ 高木英樹
京都大学工学部 正会員 後藤尚男
京都大学工学部 正会員 亀田弘行

1. まえがき 地震動を確率過程として模擬する地震動のシミュレーションに関する研究は近年著しい発展を見、今や非定常スペクトルを有するモデルを取り扱うまでに至っている。しかしその前段階である、定常確率過程に振幅レベルの非定常性を支配する確定関数を乗じたいわゆる振幅変調型モデルも、その簡潔性のゆえに少なからざる利点を持つものである。そこで著者の1人らによって提案された等価継続時間の概念を導入したモデルを用いて地震動を模擬し、弾塑性系入力時の応答誤差を通して模擬地震動特性に考察を加え、振幅変調型モデルのモデル化手法を検討した。

2. モデル化 地震動の加速度記録 $y(t)$ より求めたr.m.s.強度の時間曲線 $b(t)$ をその最大値 σ_{max} で除した非定常包絡線関数 $f_g(t)$ から、等価継続時間 T_n を次式で定義する。

$$T_n = \int_0^{\infty} \{f_g(t)\}^n dt \tag{1}$$

T_n は、そのパラメータ n について減少関数である。

地震動のシミュレーション加速度 $x(t)$ を次のように表わす。

$$x(t) = \sigma_{max} f(t) g(t) \tag{2}$$

ただし、 $f(t)$ は最大値1のモデル化包絡線関数、 $g(t)$ は平均値0、分散1の定常ガウス過程で、

$$g(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \tag{3}$$

$$a_k^2 = 2G_n(\omega_k) \Delta\omega \tag{4}$$

ただし、 $\omega_k = 2\pi f_2 + (k-1)\Delta\omega$, $\Delta\omega = 2\pi(f_u - f_2)/(N-1)$, ϕ_k は一様分布するランダム位相角であって、 $f_2 = 0.1\text{Hz}$, $f_u = 13\text{Hz}$, $N = 251$ とした。また $G_n(\omega)$ はモデル化パワースペクトル密度関数であり、3タイプ用意し、実記録より得られるパワースペクトルと最小自乗法によって適合させ、タイプの選択・パラメータの決定を行なった。これについて詳しくは参考文献1)によられたい。

$f(t)$ としては指数関数型、Amin-Ang型、定常型の3種用いたが、紙面では都合上次に示す指数関数型包絡線関数についてのみ述べる。 $f(t)$ は $f_g(t)$ と等しい等価継続時間を持つように決定される。

$$f(t) = \begin{cases} 0 & ; t < 0 \\ (t/t_0) \exp\{1 - (t/t_0)\} & ; t \geq 0 \end{cases}, \quad t_0 = \frac{n^{n+1} T_n}{e^n \Gamma(n+1)} \tag{5}$$

3. 計算結果と考察 わが国で得られた強震記録12成分について模擬地震動を発生させ、それらを非減衰固有振動数 f_0 、靱性率 μ の弾塑性系に入かし、降伏変形スペクトル V と全履歴エネルギー E を求めた。そしてシミュレーションによる誤差を次のように表わす。ただし、添字 s , r はそれぞれ模擬地震動、実地震動を意味する。

$$r_d = \ln(V_s/V_r), \quad r_e = \ln(E_s/E_r) \tag{6}$$

図1に5成分に限って、 n に伴う T_n の変動のようすを示す。(1)式の積分に寄与が大きいのは地震動の強震部分であるから、 T_n の減少の割合が大きいものほど非定常性の強い地震動であることがわかる。

また一般的な傾向としては $\bar{n}$ より $\bar{e}$ のほうが n による変動が大きく、全履歴エネルギーのほうが地震動の非定常性の影響を受けやすいといえる。 μ については μ の増大とともに n による変動が小さくなる。全体的にみて n の値としては2程度が最適であるが、降伏変形スペクトル V は全 f_0 領域で比較的よく発現し得るにもかかわらず

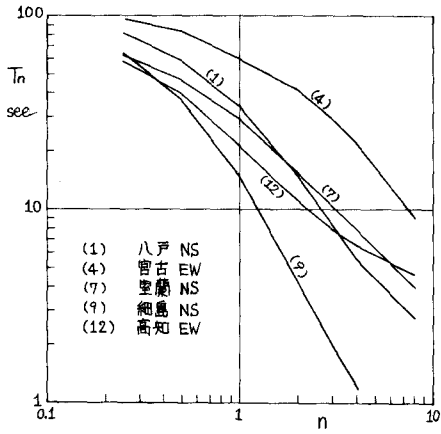


図1. 等価継続時間

全履歴エネルギーEについては芳しい結果が得られていない。図2に、 $\mu=2$ の場合の $\bar{n}_d$, $\bar{n}_e$ の n , f_0 に対する変動のようすを例としてあげてある。

図2にも現われているが、 $n=2$ 程度を境として $\bar{n}_d$, $\bar{n}_e$ の f_0 に対する誤差傾向が異なる。 $n \leq 2$ では f_0 の増大に対して誤差が減少し、図上で全体的に右下りの傾向を持つ。これは $G_n(\omega)$ 決定の際に地震記録より得られたフーリエスペクトルの絶対値の自乗曲線を用いているがために、一般的に継続時間の長いと考えられる低周波数成分が高周波数成分より $G_n(\omega)$ に対して大きく寄与し、一方ではどの周波数成分に対しても一律の継続時間を設定するという振幅強度と継続時間の不均衡の結果であり、低周波数成分に対しては継続時間の過小評価より振幅強度の過大評価の影響が大であり、高周波数成分に対しては継続時間の過大評価より振幅強度の過小評価の影響が大きいものと思われる。

また $n \geq 2$ における誤差傾向として特徴的なことは、 $f_0=1$ Hz 付近で $\bar{n}_d$, $\bar{n}_e$ (特に $\bar{n}_e$) がするどい谷を持つことである。これは以下のように考えられよう。(2)式の模擬地震動のフーリエスペクトルは次式で表わされる。

$$F_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{m}_{\max} f(t) g(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \dot{m}_{\max} \int_{-\infty}^{\infty} F_g(\omega') F_f(\omega - \omega') d\omega' \quad (7)$$

ただし、 $F_g(\omega)$, $F_f(\omega)$ はそれぞれ $f(t)$, $g(t)$ のフーリエスペクトルである。ここで狭帯域関数のフーリエ変換は広帯域であるという性質から、 n の増大に伴って継続時間の短くなる $f(t)$ のフーリエスペクトル $F_f(\omega)$ は n とともに広帯域化する。このことが(7)式の積分に関係し、 $F_x(\omega)$ は $F_g(\omega)$ より平滑化され、同様のことがそれらの絶対値の自乗曲線についても予想される。図3に記録八戸NSについて、 $|F_x(\omega)|^2$ の正規化曲線と $\bar{n}_d$ ($\mu=1$) を示す。卓越周波数 $f_p=0.84$ Hz 付近での $|F_x(\omega)|^2$ の落ち込みと、 $f_0=f_p$ 付近での $\bar{n}_d$ の谷が見られよう。八戸NSは非定常性の強い記録であるが、定常性の強い宮古EWなどはそのような現象を見せない。以上より、模擬地震動の中には卓越周波数成分の密度低下現象を起こしているものがあり、その影響がここで用いた地震群の平均的な卓越周波数と対応する $f_0=1$ Hz において $\bar{n}_d$, $\bar{n}_e$ に及んでいるのであろう。

総合すれば、周波数特性定常の仮定、波形振幅の時間軸上の巨視的変動を独立としてとらえる、という振幅変動型モデルにおける近似がシミュレーション誤差に現われているといえよう。そして非弾性応答を考慮する場合には、地震動の非定常性に敏感である全履歴エネルギーの一致を評価の尺度とすべきである。

【参考文献】 1) Kameda, H.; U.S.-Southeast Asia Symposium on Engineering for Natural Hazards Protection, Manila, 1977

