I-153　非定常ショット・ノイズ型人工地震波のシミュレーション

武蔵工業大学土木工学科　正員　星谷　勝
〃　○正員　千葉利晃

1. 緒言

地震動加速度波形の振幅成分および周波数成分は,時間的に不規則に変動するものである。この不規則性に着目して地震動を確率過程でモデル化する場合,解析上の容易さと物理的意味が明確であることから,定常確率過程で取り扱うことが多い。しかし現象を正確にモデル化するためには,非定常確率過程として取り扱うのが妥当であろう。このような観点から本研究は,実際の地震加速度波と同じ非定常性をもった人工地震波を非定常確率過程を用いて作成した。人工地震波モデルとしては,フィルターを通したショットノイズ型モデルを使用した。このモデルは震源から地盤を伝播して地表面に到るプロセスを考慮した地震波のシミュレーションとして有効であろう。なお非定常スペクトルの解析には,Physical Spectrumの概念を用いた。このPhysical Spectrumは物理的意義が明確で,その数理論を地震加速度データの解析に直接適用できるので,他の非定常スペクトルに比べて,とらえ易い利点があろう。

2. 非定常スペクトル

確率過程$x(t)$のPhysical SpectrumはMarkによって提唱されたもので,次式で定義される。

$$S(\omega,t;W)=E\left[\frac{1}{2\pi}\left|\int_{-\infty}^{\infty}W(t-u)x(u)e^{-i\omega u}du\right|^2\right]\quad;-\infty<\omega<\infty \tag{1}$$

ここで$W(t)$はWindow関数と呼ばれ$\int_{-\infty}^{\infty}W(t)dt=1$を満足し,かつ$t=0$の近傍で正値をとり,この近傍の外では$|W(t)|$は非常に小さいものとする。本研究ではガウス型Window関数を用いた。このガウス型Window関数は次式で与えられる。

$$W(t)=\left(\frac{\sqrt{2}}{T}\right)^{1/2}exp\left\{-\frac{\pi t^2}{T^2}\right\} \tag{2}$$

3. ショットノイズ型モデル

このモデルは図-1のようにフィルターを通した確率ショットノイズ過程の狭帯域の波を作り,これを重ね合せたものである。ショットノイズ過程$y(\omega_\ell,t)$を次式で定義する。

$$y(\omega_\ell,t)=\sum_{k=1}^{n_t}Y_{k\ell}\,\delta(t-\tau_k) \tag{3}$$

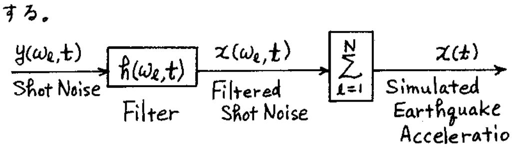


図-1　ショットノイズ型モデル

ここで,$Y_{k\ell}$はたがいに独立でかつ同一の確率分布に従い平均値は0とする。τ_kは等間隔Δtで到着するパルスの到着時間で,n_tは時間tまでのパルスの数を表わす。また,$Y_{k\ell}$の2乗平均値はフィルターを通した確率ショットノイズ過程の振幅強度$I(\omega_\ell,\tau_k)$を用いて次のように与えられるものとする。

$$E[Y_{k\ell}^2]=I(\omega_\ell,\tau_k)\Delta t \tag{4}$$

フィルターを通した確率ショットノイズ過程$x(\omega_\ell,t)$は(3)式をフィルター$h(\omega_\ell,t)$に通して作成された狭帯域の波である。すなわち,

$$x(\omega_\ell,t)=\int_0^t h(\omega_\ell,t-u)\,y(\omega_\ell,u)du=\sum_{k=1}^{n_t}Y_{k\ell}\,h(\omega_\ell,t-\tau_k) \tag{5}$$

したがってショットノイズ型人工地震波は次式で与えられる。

$$x(t)=\sum_{\ell=1}^{N}x(\omega_\ell,t)=\sum_{\ell=1}^{N}\sum_{k=1}^{n_t}Y_{k\ell}\,h(\omega_\ell,t-\tau_k) \tag{6}$$

次に，$I(\omega_\ell, \tau_k)$の決定について述べる。非定常確率過程は定常確率ガウス過程を非定常過程に拡張し，次式で与えられるものとする。

$$x'(t)=\sum_{\ell=1}^{N} x'(\omega_\ell,t)=\sum_{\ell=1}^{N} a(\omega_\ell,t)\cos(\omega_\ell t+\phi_\ell) \qquad (7)$$

ここでϕ_ℓは0と1との間の一様乱数で，ϕ_iとϕ_j；$i\neq j$はたがいに独立とする。また$a(\omega_\ell,t)$はPhysical Spectrumを用いて　$a(\omega_\ell,t)=[4S(\omega_\ell,t;W)\Delta\omega]^{1/2}$　で与えられるものとする。(7)式は平均値0でPhysical Spectrum $S(\omega,t;W)$をもつ非定常確率過程であることが証明できる。さて$I(\omega_\ell,\tau_k)$は(7)式の成分波$x'(\omega_\ell,t)$と(5)式のショットノイズ型モデルの成分波の2乗平均値を等しくする，すなわちエネルギーを等しくすることによって次式のように決定した。

$$I(\omega_\ell,t)=8\beta\omega_\ell^3 S(\omega,t;W)\Delta\omega \qquad (8)$$

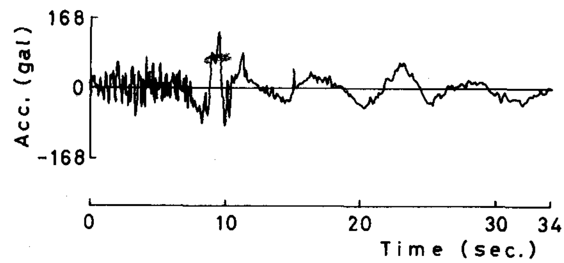
なお，フィルターとしては，線形1自由度系フィルターを使用した。このフィルターは次式で与えられる。

$$h(\omega_\ell,t)=\frac{1}{\omega_\ell\sqrt{1-\beta^2}}e^{-\beta\omega_\ell t}\sin\omega_\ell\sqrt{1-\beta^2}\,t \qquad (9)$$

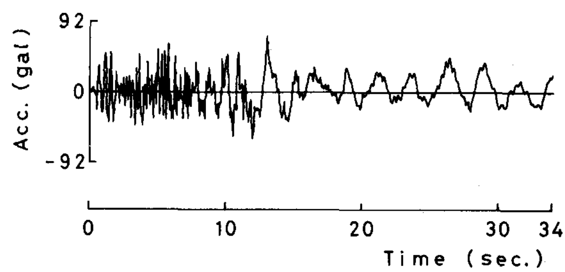
ここでβは減衰定数である。

4. 数値解析例

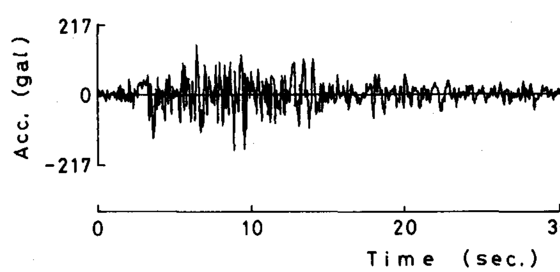
数値解析には新潟地震記録（NS成分，最大加速度134.75gal，1964年）とTaft（N21E成分，最大加速度173.8gal，1952年）の2つの地震加速度記録を使用した。(2)式のWindow関数の定数Tは$T=2.5$秒とし，(9)式のフィルターの減衰定数は0.05とした。また周波数ωの分割数は40区間とした。しかし，新潟地震の場合，周波数分布が0～1Hzに集中しているため，0～1Hzの間を30区間に1Hz～10Hzの間を10区間に分割して計算を行なっている。2つの地震加速度記録と(6)式より作成された人工地震加速度波を図2～5に示す。新潟地震の場合，人工地震波は原波形と長周期部分，10秒以降でかなりの違いが認められる。また最大加速度も原波形の½程度と非常に小さくなっている。一方Taft地震の場合は，図からわかるようにかなりな精度で人工波が作成されているものと思える。今回はPhysical Spectrumは示していないが，作成した人工地震波の精度から見ても，今回使用したPhysical Spectrumは地震動の非定常特性をとらえるのに十分使用できよう。またショットノイズ型人工地震波モデルも新潟地震のような周波数成分の特異なものを除けば十分使えるものと思える。しかしフィルターの検討を加える等の検討を加えより精度を高める必要があろう。



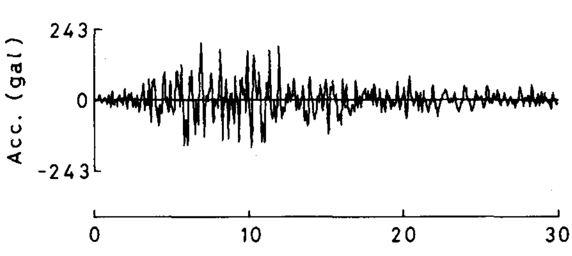
図－2　新潟地震加速度記録



図－3　人工地震波（新潟地震）



図－4　Taft地震加速度記録



図－5　人工地震波（Taft地震）