

非定常人工地震波モデルによる近距離人工地震波の作成

武蔵工業大学工学部 正員 屋谷 勝  
 武蔵工業大学工学部 正員 〇千葉 利晃

1. まえがき

海洋型巨大地震を想定した人工地震波の作成は数多く報告されている。しかし、対象地域の近くで発生する近距離地震(直下型地震)を想定したものは少ないようである。本報告はこの近距離型人工地震波の作成を試みたものである。人工地震波の作成には、先に報告した振幅、周波数共に非定常な非定常人工地震波モデル(調和関数モデル<sup>(1)</sup>)を使用した。

2. 非定常人工地震モデル(調和関数型)

与えられた非定常スペクトル特性を持つ人工地震波モデルは、単一周波数 $\omega_l$ と振幅レベル $a(\omega_l, t)$ より次のように表わせる。

$$x(t) = \sum_{l=1}^N x(\omega_l, t) = \sum_{l=1}^N a(\omega_l, t) \cos(\omega_l t + \phi_l) \quad (1)$$

ここで、1)  $\phi_l$ は(0~2 $\pi$ )で一様な確率変数で $\phi_k$ と $\phi_l$ は互に独立とする。

2)  $a(\omega_l, t)$ は確率過程 $x(t)$ のPhysical Spectrumを用いて次のように与えられるものとする。

$$a(\omega_l, t) = \sqrt{4 S(\omega_l, t; W) \Delta\omega} \quad (2)$$

ただし、 $\omega_l = \omega_L + (l - \frac{1}{2})\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega = (\omega_U - \omega_L)/N$ ,  $\omega_U, \omega_L$ は周波数の上・下限値

(2)式中の確率過程 $x(t)$ のPhysical Spectrum  $S(\omega, t; W)$ は次式で定義される。

$$S(\omega, t; W) = E \left[ \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} W(t-u) x(u) e^{-i\omega u} du \right|^2 \right] ; -\infty < \omega < \infty \quad (3)$$

ここで $W(t)$ はウィンドウ関数で $\int_{-\infty}^{\infty} W^2(t) dt = 1$ を満足し、かつ $t=0$ の近傍で正の値をとり、それ以外では $|W(t)|$ は非常に小さいものとする。本研究では、次式で定義されるガウス型ウィンドウ関数を用いた。

$$W(t) = \left(\frac{\sqrt{2}}{T}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\pi t^2}{T^2}\right) \quad (4)$$

(4)式中の定数 $T$ の値は3.5秒として計算を行った。

なお、上記モデルの詳細については、参考文献(1)を参照していただきたい。

3. 解析例

解析に使用した近距離地震は、千持3のデータから、震央距離20km以下のものを選んだ。その諸数値を表-1に、加速度波形の一例を図-1に示す。<sup>(2)</sup>

表-1 地震記録の概要  $L_g$ : 橋軸方向,  $T_r$ : 橋軸直角方向

Data No.	地震名	マグニチュード	成分方向	最大加速度 (gal)	震央距離 (km)	震源深さ (km)	記録時間 (sec.)
32	静岡・鉄道管理局	6.1	N-S	108.3	13	20	10.0
33	〃	6.1	E-W	67.0	13	20	10.0
38	小千谷(魚沼橋)	4.8	Tr	45.0	5.0	0	10.0
50	裸花ダム	5.3	N-S	52.8	12.0	0	10.0
51	〃	5.3	E-W	46.9	12.0	0	10.0
52	〃	4.9	N-S	130.4	12.0	0	10.0
53	〃	4.9	E-W	129.1	12.0	0	10.0
56	落合橋	4.7	$L_g$	178.8	10.0	0	6.0
59	〃	4.7	$L_g$	115.9	10.0	0	7.0
60	〃	5.3	$L_g$	57.8	10.0	0	12.0
61	〃	5.2	$L_g$	38.5	10.0	0	8.0
125	紀ノ川橋	5.0	Tr	71.6	7.4	0	8.0
126	〃	5.0	$L_g$	79.6	7.4	0	9.0
1	東京(東大)	6.0	N-S	70.3	16.0	50	9.0
3	〃	6.0	E-W	56.0	16.0	50	9.0
4	〃	6.0	N-S	66.6	16.0	50	10.0
5	〃	6.0	E-W	50.1	16.0	50	10.0
115	土石研(千葉)	5.1	N-S	48.4	11.1	50	12.0
116	〃	5.1	E-W	42.0	11.1	50	12.0
117	〃	0	N-S	50.9	13.2	70	8.0
118	〃	0	E-W	49.6	13.2	70	8.0

なお、上記地震のデータさざみ幅は0.04秒である。

近距離地震の非定常スペクトル特性は(3)式のPhysical Spectrumより求めた。その際、次の2種類の正規化を行なった。

(A) 各地震のPhysical Spectrumを求めたのち、体積を“1”とするように正規化を行なう。すなわち、各地震波のエネルギーを一定とするような正規化を行なう。

(B) 各地震波を最大加速度で正規化したのち、Physical Spectrumを求める。

以上2種類の方法でPhysical Spectrumを求めたのち、それを平均化したもので近距離地震の非定常スペクトル特性を表わした。

このようにPhysical Spectrumを平均したものを以下平均非定常スペクトルと呼ぶことにする。

今回求めた平均非定常スペクトルは、(A)の方法による正規化を行なったもの(震源深さ20km以下のもの13波、50km以上のもの8波、全地震波21波)の3種類、および(B)の方法による正規化(震源深さ20km以下、50km以上、全地震波)の3種類、合計6種類である。

近距離地震の平均非定常スペクトルの一例(Aの方法による正規化を行なったもの)を図-2~図-4に示す。

図-2は震源深さ20km以下のもの13波、図-3は震源深さ50km以上のもの8波、図-4は震源深さに関係なく、今回使用した全地震波21波の平均非定常スペクトルである。なお、図中の数字は平均非定常スペクトルの最大値と0の向を10等分し、各区分に入る範囲(奇数番目のみ)を示したものである。

図-2, 3を見るかぎり、震源の浅いものは深いものに較べ高振動成分を多く含んだ波であることがわかる。

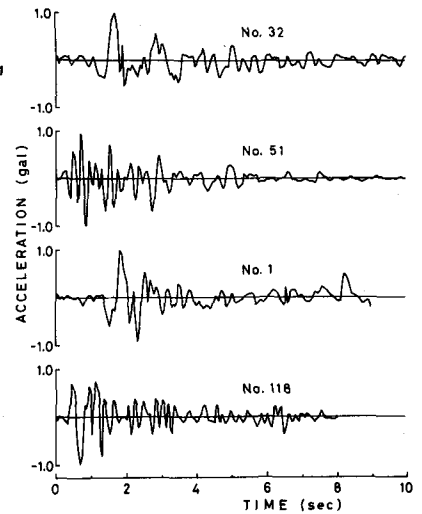


図-1: 近距離地震加速度波形

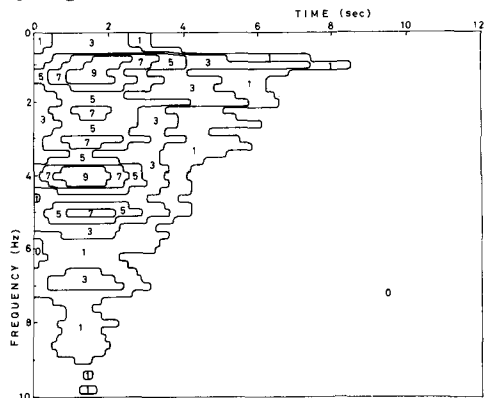


図-2, 平均非定常スペクトル  
(震源深さ $\le 20\text{ km}$ , 13波平均)

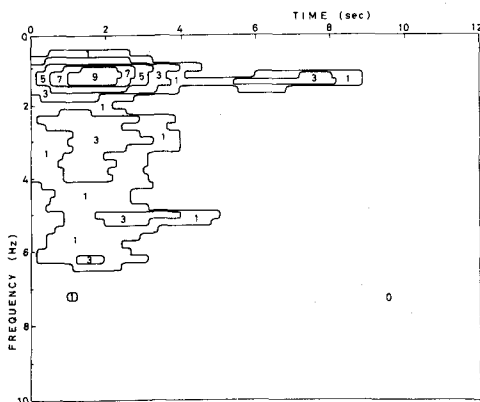


図-3. 平均非定常スペクトル  
(震源深さ $\ge 50\text{ km}$ , 8波平均)

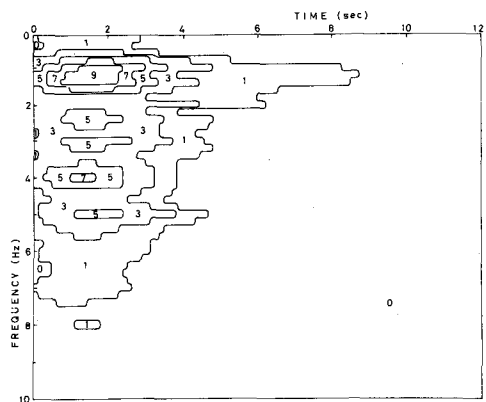


図-4. 平均非定常スペクトル  
(全地震波21波平均)

一方、震源の深いものは1~2 Hzの波を多く含んだ狭帯域の波に近い性質を持っているようである。これは震源の浅いものに比べ、地盤の影響(地盤の卓越周期)をより多く受ける結果であろう。図-4は使用した全地震波21波の平均であるから、図-2と図-3の中間的な形状を示しているのは当然といえよう。なお、図は省略したが、(B)による正規化を行った平均非常スペクトルも同様の傾向を示している。

以上のようにして求めた平均非常スペクトル特性を持つ人工地震波を(1)式より作成した。作成した人工地震波は各平均非常スペクトル(6種類)に対して5波づつ作成した。その一例として、(A)の方法で正規化を行なった全地震波(21波)の平均非常スペクトル特性(図-4)を持った人工地震波を図-5に示す。なお、データのみごみ幅は0.04秒で、継続時間は12秒である。また、(1)式中の $\omega_2$ は $0.01 \times 2\pi \leq \omega_2 \leq 10 \times 2\pi$  rad/sec, Nは100として計算を行なった。なお、図の人工地震波は総て最大加速度で正規化されている。

次に実地震波と人工地震波(総て最大加速度で正規化している)の1質点系平均加速度応答スペクトル $S_A$ を求めた。この結果を図-6~図-9に示す。なお、図中の $\beta$ は1質点系の減衰定数であり、 $T_0$ は固有周期である。

図-6は平均非常スペクトルを求める際の正規化による差を比較したものである。図中、実線は(A)の方法による正規化、点線は(B)の方法による正規化より求めた平均非常スペクトル特性(21波平均)を持つ人工地震波5波の平均加速度応答スペクトル

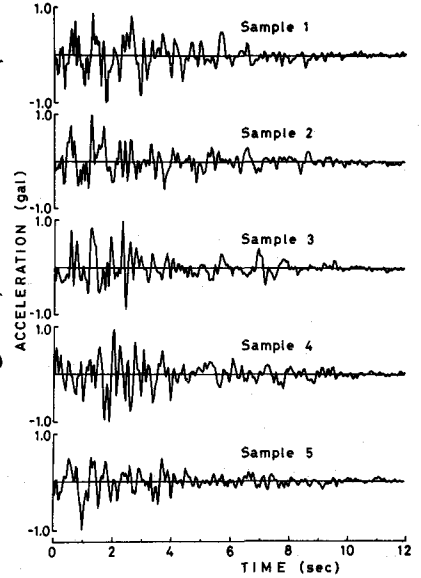


図-5 近距離型人工地震波 (Aによる正規化, 21波平均)

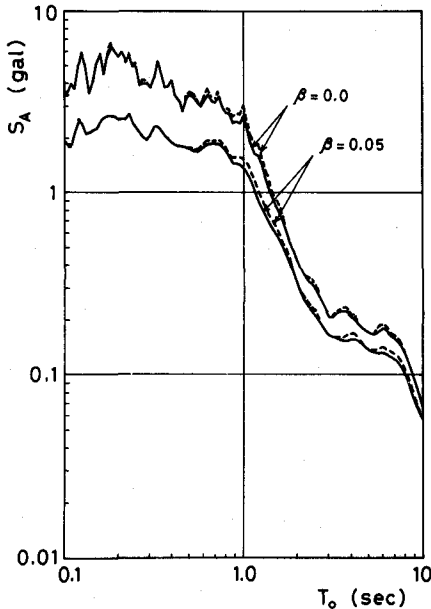


図-6 平均加速度応答スペクトル(21波平均)

—— : Aによる正規化  
 - - - - : Bによる正規化

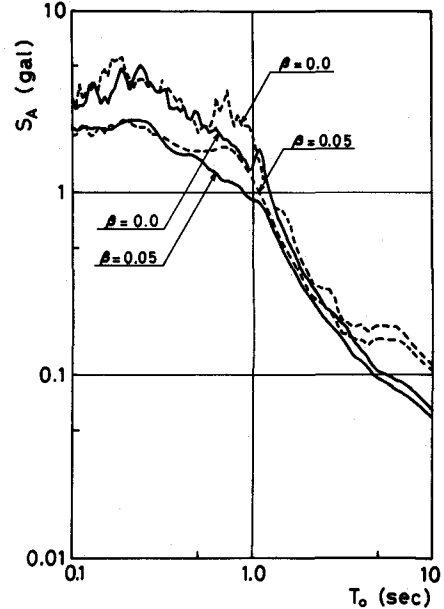


図-7 平均加速度応答スペクトル(実地震)

—— : 震源深 $\leq 20$  km, 13波平均  
 - - - - : 震源深 $\geq 50$  km, 8波平均

である。図で見ると、両者の違いはほとんど無い。これは図-4と(B)による正規化で求めた平均非常スペクトル(図は省略)との差がほとんどないことから理解できる。したがって、以下で用いる人工地震波とは総て(A)で正規化した平均非常スペクトル特性を持つ人工地震波を表わすことにする。

図-7は今回解析に使用した実地震波の平均加速度応答スペクトルを震源深さ別に表わしたものである。また、図-8は作成した人工地震波のものを示している。図中、実線は震源深さ20km以下13波の平均応答スペクトルを、点線は震源深さ50km以上8波の平均応答スペクトルを表わしている。実地震波と人工地震波による平均加速度応答スペクトルの形は、固有周期 $T_0$ が2秒以上で震源深さの深いものの方が大きくなっている等、非常によく似ていることがわかる。

図-9は実地震21波の平均加速度応答スペクトル(実線)と21波平均非常スペクトル特性をもつ人工地震波の平均加速度応答スペクトル(点線)との比較を示したものである。人工地震波の平均加速度応答スペクトルは人工地震波5波の平均であり、サンプル数が非常に少ないことを考慮すれば、両者は良好一致を示しているといえよう。すなわち、今回作成した人工地震波が元の近距離地震の性質を良く表わした地震波であるといえよう。

今回解析の対象にした近距離地震は21本と数も少なく、また、震央距離の大きい地震の非常スペクトルとの比較も行っていない。したがって、図-4(あるいは図-2, 3)が、そのまま近距離地震の特徴を表わしているとはいえないが、今回対象に選んだ近距離地震のみについていえば、その特徴はとらえられたと思う。また、このような近距離地震の非常スペクトル(Physical Spectrum)が得られれば、非常人工地震波モデル(Harmonic Model)によって、十分な精度で作成できることが確かめられたと思う。

なお、本研究は東京都防災会議の研究の一環として行なったものである。

#### 4. 参考文献

- 1) 屋谷, 千葉, 草野 "地震加速度波の非常特性とシミュレーション" 土木学会論文報告集, 245号, 1976年1月, pp.51~58
- 2) 土木研究所資料第317号, 地震記録のデジタル数値(その1), 建設省土木研究所, 昭和43年3月

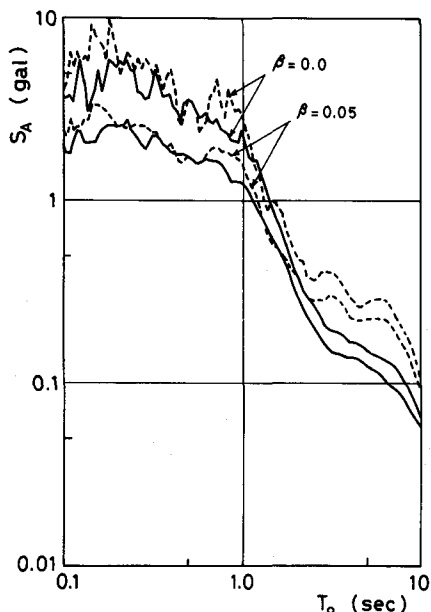


図-8 平均加速度応答スペクトル(人工地震)

——: 震源深さ $\leq 20\text{ km}$   
 - - - -: 震源深さ $\geq 50\text{ km}$

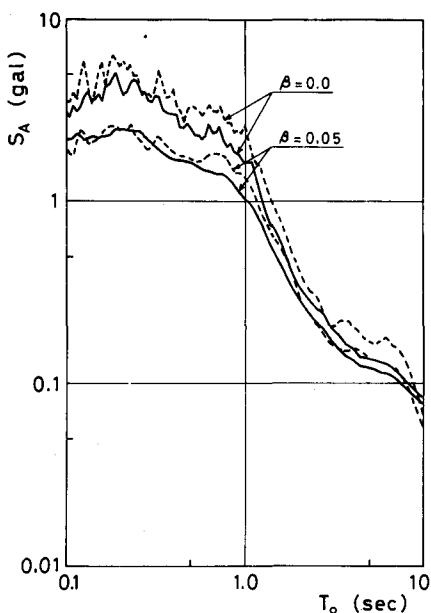


図-9 平均加速度応答スペクトル

——: 実地震21波平均  
 - - - -: 人工地震波