

# (37) 波動種別を考慮した強震地動モデルの作成と構造物の応答

東京都立大学 正会員 堀野 計司

1. はじめに 地震時における構造物の挙動を明らかにするためには、適切な入力地震動を設定することが先決であり、そのためには、震源および伝播経路の影響を正確に把握することが必要になる。より具体的には、地震波の発生・伝播の数学的モデルや蓄積された強震記録の統計解析結果を適宜利用し、合理的な地震動モデルを作成することの必要性があると言えよう。すでに広く知られているように、同一の断層から発生し、同一の観測点に達する波動であっても、伝播経路の違い(地球内部・地表面付近)によって、性質の異なる波動として観測されることになり、それらは一般に、実体波・表面波として分類されている(波動種別)。地震現象の数学的モデルは一般に、波動種別ごとに考察する場合、取り扱いが容易になる。従って、地震動モデルを作成する場合には、実体波と表面波とを別個に行う方法が、手法的に単純化を進め易く、合理的なものと考えられる。

本研究では、実体波(S波)と表面波による地震動モデルを、それぞれの波動種別に最適と考えられる、別個の方法を用いて作成し、その後、両者を重ね合わせることによって、一つの地震動モデルを完成させるという試みを行なう。地震動モデルは加速度時刻歴の形で作成し、構造物の応答解析を線形領域のみならず、非線形領域においても可能になる状態を準備することを考えた。本研究ではまた、構造物を一自由度系に単純化して考え、構造物の耐震性状に及ぼす波動種別ごとの影響を整理するための予備的考察を行なう。

## 2. 地震動モデルの作成

2-1 地震動を構成する波動種別と地震動モデル作成の方針 関東平野のような厚い堆積層(第三紀・第四紀の地層)を持つ大規模な平野で、浅い震源を持つ地震が観測されると、そのスペクトルにはマクロに見て2つのピークのあることが少なくない。一例として、Fig. 1には川崎市の臨海地区で得られた伊豆半島沖地震(1974)の記録による応答スペクトルを示したが、そこには周期2秒と6秒を中心とする2つの顕著なピークが見られる。すでに、これら2つの優勢な成分はそれぞれに波動種別が検討され(波型識別)、周期2秒付近の成分はS波によって構成されることが判明し、周期6秒付近の成分は、各地の変位記録の解析結果を参照すれば、基本モード表面波によって構成されたものと判断される。また、これらの波型識別を通じて、周期2秒付近の成分は第四紀層地盤によるS波の増幅の結果として、周期6秒付近の成分は堆積層全体の応答によって励起された表面波として、両者の卓越の原因が明らかにされている。Fig. 2には観測点の地下構造を示したが、上述の点に従えば、S波成分は記号Aで示した地層(第三紀最上層)を、表面波成分は記号Bで示した地層(第三紀以前の地層~地殻最上層)を地震基盤と考えることによって、合理的な地震動モデル作成の方法が得られるものと思われる。

震源の条件を記述するためには2つの方法が考えられる。一方はマグニチュードによってする方法であり、他方は断層の物理的諸量(断層パラメータ)の組み合わせによる方法である。断層パラメータを設定し、同時に、地下構造の適切なモデルを作成すれば、断層運動から直接に地震動モデルを算出することも不可能ではないが、そのような方法によって適切な結果が得られるのは

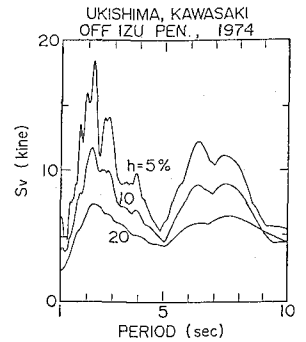


Fig. 1. 応答スペクトル

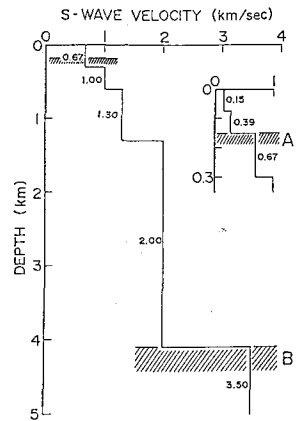


Fig. 2. 地下構造モデル

周期数秒以上の範囲に限られることが今日ではほぼ通説になっている。より短周期の波動の場合には、断層運動・地下構造の複雑さのために、この方法の適用には無理がある。周期数秒以下の範囲ではすでに強震記録の統計解析が数多く行われており、マグニチュードをパラメータとした信頼度の高いデータが整備されてきている。本研究では、周期5秒以上に存在する表面波成分は断層モデルから直接に理論記録を算出し、周期5秒以下に存在するS波成分は岩盤で得られた強震記録の統計解析結果と第四紀層地盤の伝達関数とを組み合わせる方法によって合成することを考えた。地震動モデルはマグニチュード6, 7, 8で震央距離50 kmの場合に加え、マグニチュード8の場合には震央距離100 km, 200 kmの場合を算出して、合計5通りを作成した。なお、本研究では、関東平野の京浜地域に該当する地下構造モデル (Fig. 2) のみを取り上げて考察する。実体波・表面波の勢力を分かち周期が平野の堆積層の構成と密接に関係して変化することは容易に推測され、「周期5秒」は関東平野に固有の値と考えるのが妥当であろう。

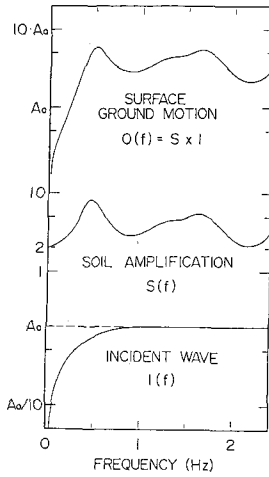


Fig. 3. 地表動フーリエ・スペクトルの評価

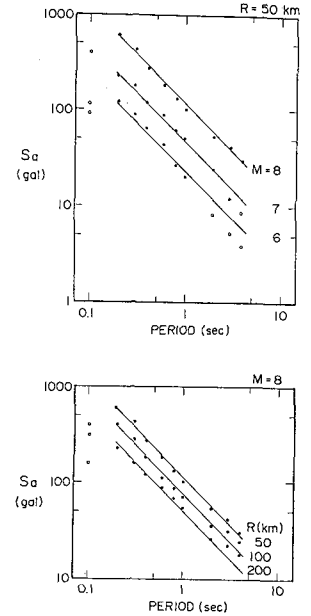


Fig. 4. 第1種地盤の加速度応答スペクトル (h=0.05)

**2-2 実体波 (S波) 成分の作成** 岩盤上で記録された地震動の加速度フーリエ・スペクトルは平坦な形状を持つことが知られ、従って、堆積層を持つ地点の地表での記録の加速度フーリエ・スペクトルの形状は堆積層の伝達関数と同じになると考えることも可能とされる。本研究ではまず、基盤面 (第三紀層上面) でのスペクトル強度を既述の統計解析結果に基づいて設定し、地盤の伝達関数によって、地表のスペクトルの周波数特性と強度を決定した (Fig. 3)。入射波のスペクトル強度  $A_0$  は Iwasaki et al.<sup>(4)</sup> による第一種地盤における加速度応答スペクトルを補間などによって整理し直し (Fig. 4)、さらに、非減衰速度応答スペクトルへの読み換え<sup>(5)</sup>、自由表面の補正を行なって求めた (Table 1)。次に、地表の加速度フーリエ・スペクトルに一致するような周波数特性を持つ時刻歴  $X$  を次式に基づいて算出した。(算出後、

	R=50 km	R=100 km	R=200 km
M=8	18.5	12.0	7.8
	42.6	27.6	17.9
	21.3	13.8	9.0
M=7	7.6	5.1	3.4
	17.5	11.7	7.8
	8.7	5.9	3.9
M=6	3.5	2.4	1.7
	8.1	5.5	3.9
	4.0	2.8	2.0

Table 1.

入射波スペクトル強度  $A_0$

$S_v, h=0.05$   
 $S_v, h=0$   
 $A_0$

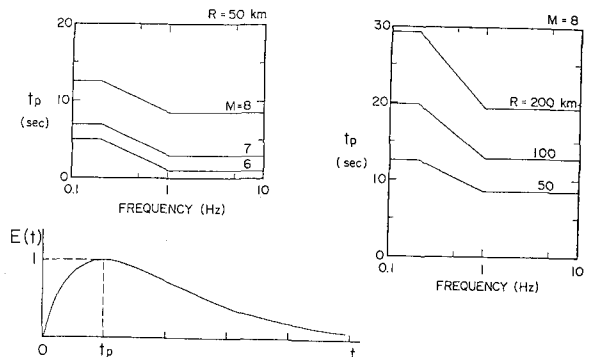


Fig. 5. 包絡線関数

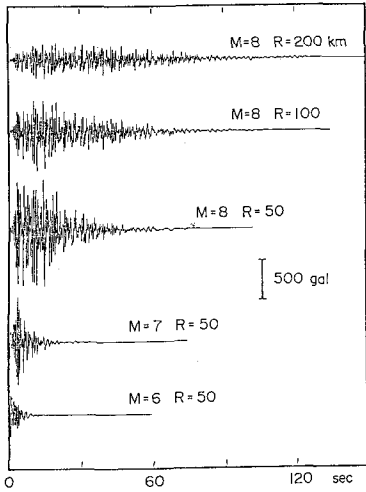


Fig. 6. 実体波(S波)時刻歴

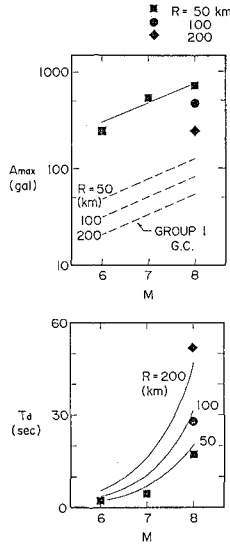


Fig. 7. 時刻歴の特性

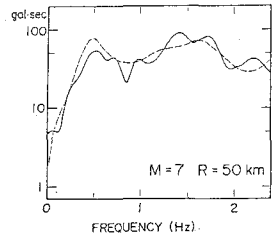
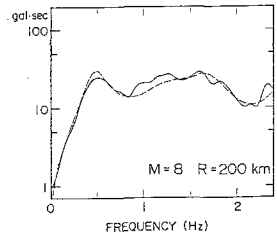


Fig. 8. 実体波時刻歴のフーリエ・スペクトル

適当な倍率を掛けて、時刻歴振幅を補正する。)
 
$$\chi(t) = \sum_{k=1}^m a(f_k) E(t, f_k) \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k)$$

$$a(f_k) = \left( \int A_0 S(f_k) \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \cdot e^{i2\pi f_k t} dt / \int E(t, f_k) \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \cdot e^{i2\pi f_k t} dt \right)$$

$$E(t, f_k) = (1/t_p) \cdot \exp(-t/t_p) \quad t > 0$$

ここに、 $E$ は地震動の非定常性を表現するための包絡線関数であり、その形状を決定するパラメータ  $t_p$  は後藤ほか(6)を参考にして Fig.5 のように設定した。 $S(f)$  は地盤の伝達関数である。 $\chi(t)$  の計算では、 $f_1 = 0.008$  Hz,  $f_m = 300 = 2.4$  Hz とし、時刻歴は  $\Delta t = 0.0610$  sec,  $ND = 2048$  T 作成した。算出された時刻歴を Fig.6 に示した。時刻歴の特性(最大加速度振幅  $A_{max}$ , 地震動継続時間  $T_d$ ) は既応の統計解析結果(6)に調和するものであることが確かめられた (Fig.7)。また、フーリエ・スペクトルについても、当初目標とした形状がほぼ満足に実現されていることが確かめられた (Fig.8)。

2-3 表面波成分の作成 本研究では表面波を代表するものとして基本モード Love

波を取り上げた。地震動モデルは、断層モデルと地下構造モデルを設定し、正規モード理論(2)によ

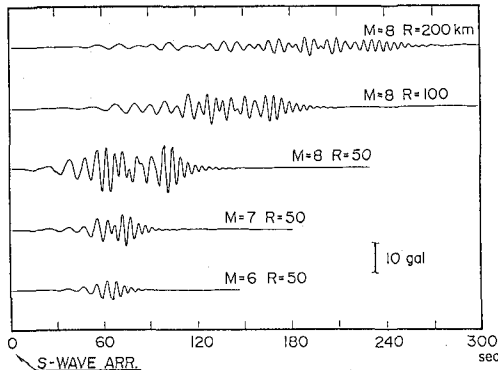


Fig. 10. 表面波時刻歴

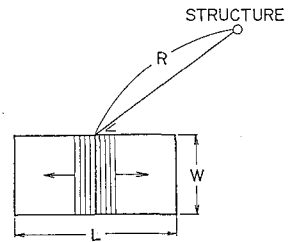


Fig. 9. 断層モデル

FAULT PARAMETERS

dip angle (degree)	$\delta = 90$
slip angle (degree)	$\lambda = 0$
rupture velocity (km/sec) $V_R$	$V_R = 2.0$
s-wave velocity (km/sec) $V_S$	$V_S = 3.5$
stress drop (dyne/cm) $\Delta\sigma$	$\Delta\sigma = 65 \times 10^6$

M=6

fault length (km)	$l = 15.8$
fault width (km)	$w = 7.9$
rise time (sec)	$T = 0.61$
dislocation (cm)	$d = 25.8$
seismic moment (dyne-cm) $M_0$	$M_0 = 1.0 \times 10^{25}$

M=7

$l = 50.1$	
$w = 25.1$	
$T = 1.9$	
$d = 82.6$	
$M_0 = 3.2 \times 10^{26}$	

M=8

$l = 158$	
$w = 79$	
$T = 6.1$	
$d = 258$	
$M_0 = 1.0 \times 10^{28}$	

Table 2. 断層パラメータ

て算出した。断層は両方向破壊伝播・沿道・横ずれタイプのを考え、観測点(構造物)の断層との位置関係は、断層トレースに直交する方向とした(Fig. 9)。断層パラメータは種々の文献を参照して、Table 2 に示したものを採用した。地下構造モデルには Fig. 2 に示したもの(全体)を用いた。表面波成分の時刻歴を Fig. 10 に示した。ここで若干の注意を要するのは、本研究で取り扱った表面波が特定のタイプの断層から発生するただ一つのモードに限られているという点である。しかし、このような限定も、表面波の基本的性質を一般的に捉えようとする目的に対しては、大きな妨げになるものではないと考えられる。

以上のようにして、実体波(S波)と表面波(基本モード Love 波)の地震動モデルを時刻歴の形で得ることができた。二つの時刻歴を重ね合わせることにより、二種類の波動の影響を考慮した、いわば、広い視野を持った地震動モデルが得られることになる。また、波動種別ごとに分離して考察(ために、震源および伝播経路の影響が物理的に明確な形で捉えられているという特長は、波形の重ね合わせを行なった後にも、基本的には保存されていると考えられることができる。

### 3. 波動種別と構造物の応答特性

地震動が複数の波動から構成される一方、構造物にはそれぞれに固有の振動特性が具わっている。従って、構造物の応答に及ぼす波動種別ごとの寄与を、構造物のタイプごとに整理しておくことは興味深く、工学的に重要な問題であると考えられる。本研究では、第2節で作成した地震動モデルを入力地震動として、復元力特性の異なる3種類の1自由度系の応答解析を行なった。復元力特性は線形・定常バイリニア型・劣化履歴型である(Fig. 11)。応答解析の結果は応答スペクトル(非線形系の場合には、降伏以前の状態で固有周期を定義)として整理した。応答スペクトルの若干の例を Fig. 12 に示したが、ここでは履歴特性の無い系は、履歴特性を持つ系に対して相対的に表面波成分を危険な要素としていることと、いくつかの点を窺うことができる。

4. おわりに 強震地動の波型識別に関する既得の研究成果を踏まえ、また、一方においては、地震波動の数学モデルや記震記録の統計解析結果を、地震動モデルの作成にどのような形で取り入れるべきかを考察しつつ、実体波・表面波それぞれの地震動モデルを作成するための方針を立て、実際に地震動モデルを作成した。さらに、作成した地震動モデルを入力地震動として利用し、各種構造物の応答への寄与を波動種別ごとに把握するための応答解析を開始した。地震動モデルの作成や応答計算に用いる構造物モデルの設定には手法的な改良の望まれる点も少くなく、現在進めている応答解析を続けることと、各種の手法の改良が今後の課題である。

参考文献 (1)堀野(1978), 5th 日本地震工学シンポジウム講演集, 289-296. (2)工藤(1977), 14th 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 337-340. (3)Ishida(1979), Bull. Seism. Soc. Am., 69, 2101-2115. (4)Iwasaki, Katayama, Kawashima, and Saeki(1978), Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation, 705-716. (5)片山・岩崎・佐伯(1978), 土木学会論文報告集, 275号, 29-40. (6)後藤・亀田・杉戸(1979), 土木学会論文報告集, 286号, 37-51.

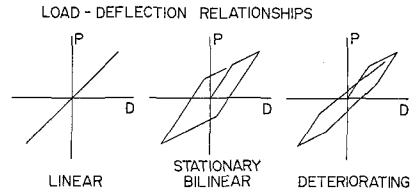


Fig. 11. 復元力特性

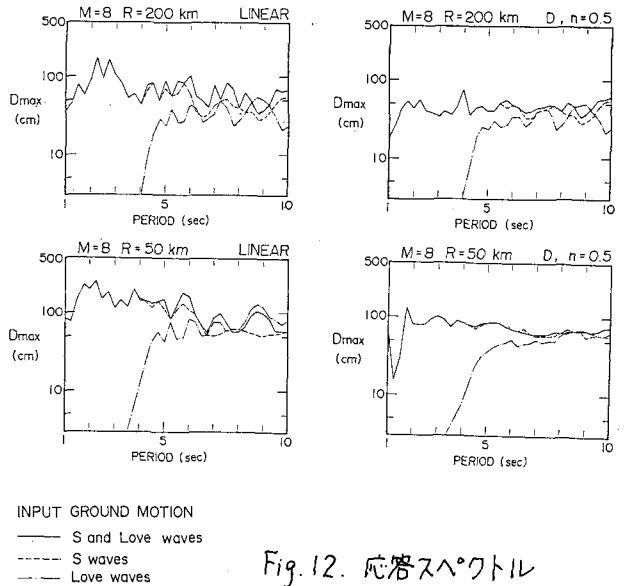


Fig. 12. 応答スペクトル