

広帯域入力地震動についての試み

運輸省港湾技術研究所 正員 〇井合 進
正員 土田 肇

1. はじめに

最近、固有周期が10秒を越え、しかも非線型性の著しい構造物の建設が計画されるようになった。非線型性を持った構造物では、その高次振動と低次振動とを独立に扱うことが難しいことが多い。したがって、このような構造物の耐震性の検討のために、広い帯域をカバーした入力地震動の時刻歴が必要とされている。これまでに、耐震性の検討のために10秒を越える成分を含む広帯域の地震動が設定された例は少ない。また、地震動という現象の解明を目的とした研究も、ある限られた帯域のものばかりで終わるものが多い。そこで、これらの研究のいくつかをまとめ、このような広帯域入力地震動を設定するための一つの流れとしてまとめることを試みた。設定する帯域としては、静的な成分から数十分の一秒までとした。

地震動の設定は、経験公式を含む広い意味でのモデルの設定と、モデルのパラメタの設定との2段階からなる。一般にモデルのパラメタを設定するためにあらかじめ得ることができる情報には限りがある。したがって、モデルの設定にあたっては、そのモデルに必要なパラメタと、現状で得られる情報とのバランスを考える必要がある。これまでに進められた研究をまとめるに当たって、この点に留意した。

入力地震動の設定においては、表層地盤の影響を考慮するため、基盤を考慮することが多い。通常N値50以上の砂層や岩盤より深い層の性質を示すデータは得られないことが多い。そこで、工学的には、このようなN値50以上の砂層や岩盤を基盤として取扱うことが多い。この基盤面を地震学で設定する基盤面と区別する意味で設計基盤面と呼ぶ。設計基盤面より上方の表層地盤の水平方向の地震応答は、各地点において鉛直方向に一次元的なせん断波の伝播を考慮することにより取扱うことができる。このことは、東京国際空港における多刺点での地震動の同時観測でも確認された¹⁾。そこで、本報告では、設定する広帯域入力地震動として、設計基盤面における水平方向の地震動を考慮することとした。

2. これまでに行われたいくつかの研究の概要

地震動発生メカニズムとしては、断層モデル²⁾が考えられることが多い。これは弾性体中にある大きさの断層面を考え、この面においてある大きさのくいちがい³⁾が起ったときの弾性体の振動を地震動と見なす考え方である。このモデルに必要なパラメタは、断層面の形と大きさ⁴⁾と方向と位置、くいちがいの大きさ⁵⁾と方向と動き方(時間関数)、くいちがいの伝播の速さと方向、媒質の波動伝播速度である。くいちがいの時間関数や断層面上のくいちがいの不均一性、媒質の構造については様々なものが考えられている。くいちがいの時間関数については、ある時間の一定速度で動きその後では静止というものの場合には、その時間(立上り時間)をうまく決めれば、おおむね周期10秒以上の長周期成分は静的な成分を含め説明できることが多い。一般に周期の長い成分ほど立上り時間に左右されなくなる。さらに短い周期の成分についても、くいちがいの時間関数の短周期成分を調整することにより観測値を説明する余地は残されているが、地震動を予測するという意味での時間関数の短周期成分の設定方法は明らかでない。くいちがいの不均一性についても同様であり、一様にくいちがい⁶⁾が起ったとすれば長周期成分の説明が可能であるが、不均一性の考えを入れた場合、その設定方法が明らかでない。媒質の構造としては、無限、半無限、多層のものが考えられている。無限媒質の場合には、実体物の水平方向の初動部分を説明できる。半無限媒質では、地表面の影響をこれよりも正確にとり入れることができるので、上下動やレー

波の一部を説明できる。地殻を考慮した一層構造の場合には、周期20秒程度の表面波の観測例の説明もできる。しかし、さらに多層構造の場合には、これよりも短周期の成分を説明する余地は残されているが、このモデルのパラメタの設定に必要な震源から観測点までの層構造のデータが得られていない場合が多い。

一方、観測値としては、まず静的な変位がある。次に、周期20秒程度の成分の長周期地震計(Lp-L0)等による観測例がある。この観測値については、表面波マグニチュードをパラメタとする振幅と震央距離の関係を与える経験公式が得られている。³⁾ 周期数秒程度の帯域では一倍地震計をはじめとする地震計により多くの観測例があり、気象方マグニチュードをパラメタとする振幅と震央距離との関係を与える経験公式(坪井公式)が得られている。⁴⁾ これらの経験公式は、いずれも地表面の地震動に対するものである。しかし、この程度の長周期成分は、設計基準面より上方の表層地盤によって増幅される割合は小さいことが多いので、これらの公式が設計基準面でも成立すると考えても大きな誤差はないと考えられる。地盤係数⁵⁾についても同様であると考えられる。さらに短周期の成分については強震計による多くの観測例があり、気象方マグニチュードをパラメタとして、震央距離またはそれに類するものと設計基準面における最大加速度振幅との関係が得られている。⁶⁾ 加速度計として感度のフラットな領域は、可動線輪型の場合、数十分の一秒まで広がっている。

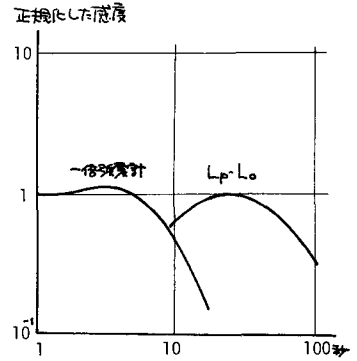


図1 一倍強震計とLp-L0型地震計の
変位計としての計器特性

以上に紹介した研究の概要を、地震動を設定するという立場から帯域別にまとめれば、次のとおりである。

(i) 静的な変位に近い成分

無限媒質に対する断層モデルで設定できる。くいちがいの立上り時間 α と τ からの影響を受けにくい。

(ii) 周期20秒程度の成分

地殻を考慮した一層構造の断層モデルで設定可能である。また表面波マグニチュード³⁾の式³⁾の逆用により最大振幅の設定が可能である。

(iii) 周期数秒の成分

多層構造の断層モデルでは、そのパラメタをすべて設定することが困難なことが多い。一方、坪井公式⁴⁾の逆用により、最大振幅の設定が可能である。

(iv) 短周期の成分

断層モデルでは設定困難。一方、野田、上部の式⁶⁾により、最大加速度の設定が可能である。

3. 入力地震動の設定方法

以上に紹介した研究を、設計基準面における広帯域入力地震動を設定するための一つの流れとしてまとめれば、次のようになる。まず全体を4つの周期帯域に分けて考える。その帯域は表-1に示して通りとする。それぞれの帯域の成分を構成するため、そのもととなる地震動を表-1の設定方法に従って作る。この段階では、これらの地震動は、対応する帯域以外の成分を含む。つぎに、バンドパスフィルタによりそれぞれの地震動から対応する帯域の成分のみをとり出す。最後に、各成分のS波の初動が一致するように重ね合わせ広帯域入力地震動とする。設定のために使う観測波形は、マグニチュード、震央距離、伝播経路が設定条件に合ったものを選ぶことにより、振動継続時間や帯域内でのサブトル特性を妥当なものに設定することが可能である。

表-1 設計基盤面における広帯域入力地震動の設定方法

帯域	30 ~ 50 秒以上	6~10 秒より, 30~50 秒まで	1~2 秒より 6~10 秒まで	0.02 秒(0.1 秒)より, 1~2 秒まで
設定の方法	振開きの設定方法 断層モデル ²⁾ によるシミュレーション	長周期地震計(Lp-L型)等による実地震の記録表形。記録した時の震央の方向が想定される震央の方向と一致するように座標変換する。	1倍強震計等による実地震の記録表形。座標変換する。	ERS強震計(帯域を0.02秒以上とする場合)やSHAC-B2強震計(帯域を0.1秒以上とする場合)等による実地震の記録表形。座標変換する。
ピーク値の設定方法	シミュレーション結果そのまゝ	表面波マグニチュード ³⁾ の式	坪井 ⁴⁾ の式と地盤係数 ⁵⁾	野田・上部 ⁶⁾ の式
設定に必要なパラメータ	断層の長さ(L), 幅(W), 傾斜角(δ), 向き(ϕ), 位置(N, E, H), 深さ(D), 方向(A), 立ち上り時間(t), 破壊の伝播速度(C), 方向(θ), P波伝播速度(V_p), S波伝播速度(V_s)	表面波マグニチュード(M_s) 震央の位置(N, E)	気象庁マグニチュード(M_j) 震央の位置(N, E) 地盤係数(K)	気象庁マグニチュード(M_j) 断層の長さ(L), 幅(W), 傾斜角(δ), 向き(ϕ), 位置(N, E, H)

4. 計算例

計算例を図2~図8に示す。設定したパラメータは表-2に示す通りである。これらのパラメータは1979年5月12日付の新聞に発表された駿河湾沖の地震の図等を参考として、著者らが便宜的に、計算例題用として設定したものであり、中央防災会議や運輸省の地震防災対策における作業とは無関係である。断層モデルによるシミュレーションプログラムは、無限媒質に対するもの(文献7)により作成した。

5 おわりに

静的な成分から数十分の一秒までの広帯域入力地震動を設定することを試みた。その方法は、全体を4つの周期帯域に分け、静的な成分に近いものは断層モデルにより、周期20秒程度の成分、周期数秒の成分、それ以下の短周期成分は、それぞれ実地震の記録表形の振幅を補正したものにより設定し、合成するというものである。今後、地質構造に関するデータや長周期地震動の観測データの集積に伴って、より精密な設定方法が実用化されることを期待したい。

気象庁勝又謙氏には長周期地震計による貴重な記録のコピーをいただき、かつ、広帯域入力地震動の設定方法について御討議いただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

6. 参考文献

- 1) H. Tsuchida and S. Iai : Observation of Earthquake Response of Ground with Horizontal and Vertical Seismometer Arrays (2nd Report), Proc. of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, Nov. 1978, pp. 169~176
- 2) N.A. Haskell : Elastic Displacement in the Near-field of a Propagating Fault, BBSA, Vol. 59, No. 2, April 1969, pp. 865~905
- 3) 宇津徳治 : 地震学, 共立出版, 1978年1月, 268p.
- 4) 気象庁 : Introductory Note, 地震月報, 1978年1月, pp. ii
- 5) 勝又謙 : 地震動振幅の地盤係数(その2) - 最大振幅について, 駿河時報, Vol. 30, No. 4, 1965, pp. 1~11.
- 6) 野田節男 上部達生・重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 4, 1975年12月, pp. 67~111.
- 7) 佐藤良輔 : 無限媒質中の有限断層による生じる変位を計算するprogram, 地震, 第2輯, 第28巻, 1975, pp. 486~489

表-2 例題として設定したパラメータ

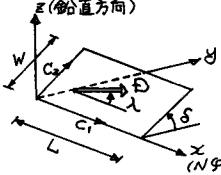
震源		震源地: 34.6°N, 138°52'E, 深さ 30 km ($x=50$ km, $y=z=0$ km) $L=100$ km, $W=50$ km, $\delta=-30^\circ$, $\phi=12^\circ$ $D=3$ m, $\lambda=-90^\circ$, $\tau=5$ 秒 $C_1=00$ km/sec, $C_2=3.0$ km/sec (破壊伝播速度) $V_p=6.0$ km/sec, $V_s=3.5$ km/sec
マグニチュード	表面波マグニチュード 気象庁マグニチュード	$M_B=8.2$ $M_J=8.0$ (地盤係数 $K=1$)
波 形	周期6~10秒より30~50秒までの帯域	L_p - L_0 型地震計による松代(36°32.5'N, 138°12.4'E)における観測波形 地震: 1977年12月24日6時2分01.6秒, 39°04'N, 143°38'E, 深さ 0 km, $M_J=5.9$
	周期1~2秒より6~10秒までの帯域	LM - L 型地震計による松代における観測波形を積分して代用 地震は上の欄に記入したものと同一
	周期0.1秒より1~2秒までの帯域	$SMAC$ - $B2$ 型地震計による大船渡湾(39.01°N, 141.74°E)岩盤上における観測波形, 0.1秒の計器特性補正. 地震: 1978年6月12日17時14分. 38°09'N, 142°13'E, 深さ 40 km, $M_J=7.4$
観測点	巷彦技術研究所構内	$35.22^\circ N$, $139.72^\circ E$



図2 想定した断層面と観測点の位置の概念図

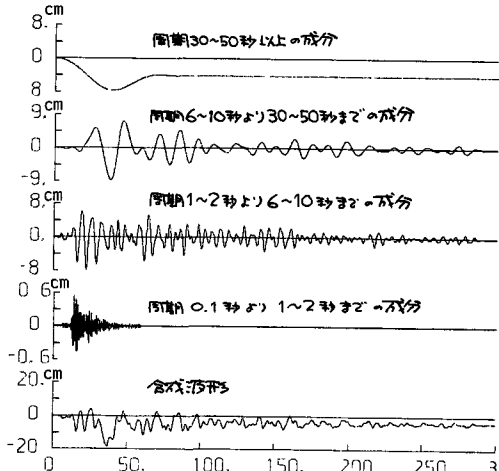


図3(a) 各帯域の変位波形の重ね合わせによる合成変位波形(EW成分)

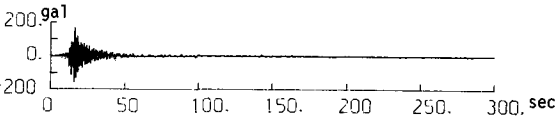


図3(b) 加速度波形(EW成分)

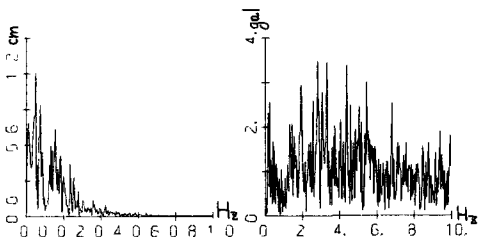


図4 変位波形のフーリエ

図5 加速度波形のフーリエ

スペクトル(0秒~300秒の区間に対するもの)(EW成分)

スペクトル(0秒~50秒の区間に対するもの)(EW成分)

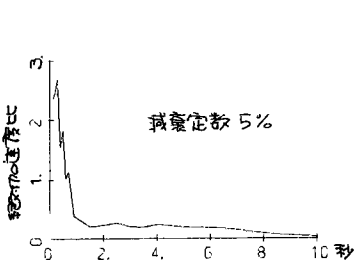


図6 加速度比応答スペクトル(EW成分)

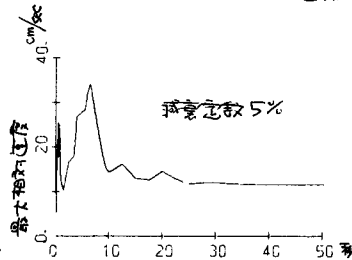


図7 相対加速度比応答スペクトル(EW成分)

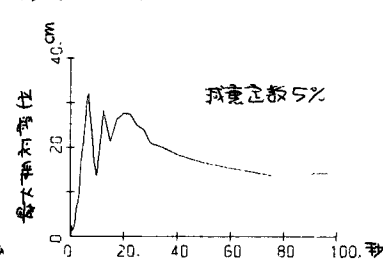


図8 相対変位比応答スペクトル(EW成分)