

(50)不整形地盤地震応答特性の評価式の検討

(株)大林組技術研究所 正会員 ○江尻讓嗣
 正会員 後藤洋三

1. まえがき

表層地盤が比較的軟弱で基盤層との動的剛性比(IP)が小さい場合は表層地盤の共振現象や地盤の不整形性の影響による地震動の増幅が生じやすい。ここでは、数10~100m程度の規模の基盤不整形構造が地震動に及ぼす影響を検討しそれを地震荷重を表す設計震度スペクトルの形で簡易的に予測評価する方法を検討した。

2. FEM地震応答解析による代表的な不整形構造の影響評価

設計震度スペクトルに簡易的に不整形構造の影響を取り込むには、まず不整形構造と表層地盤物性が表層地盤の地震応答特性に及ぼす複雑な影響を明らかにする必要がある。ここでは地震応答特性を調査するためにFEM地震応答解析によるパラメトリックなケーススタディを行ない不整形構造の影響をモデル化するための標本群を作成した。

(1) 不整形構造 表層地盤と基盤層からなる2層系の基盤不整形を取り扱うこととし図-1に示す片側傾斜(Sタイプ)と堆積盆地状の両側傾斜(Dタイプ)の2種類とした。Sタイプの場合は基盤の傾斜勾配を1/1、1/2、1/4と変えたS1~3の3モデル、Dタイプは両側の基盤傾斜勾配を1/2に固定し盆地底幅を傾斜部水平距離の0、1、2倍としたD1~3の3モデルとし合計6種類の不整形構造モデルについて地震応答解析を実施した。

(2) 地盤物性 地盤が層構造を成す場合には層間のIPによって震動振幅の増幅率が大きくなることが地震観測や解析により明らかになっている。そこで、ここでは不整形構造における表層地盤と基盤層のIPを地震応答特性に影響を及ぼす重要なパラメータと考慮して1/6、1/4、1/3、1/2の4種類を想定した。個々の地盤層の具体的な物性値については表-1に示したものをを用いた。地盤材料はすべて線形弾性材料とし減衰は表層地盤、基盤層ともに5%とした。

(3) 入力地震動 道路橋示方書耐震設計編¹⁾に記載されている第I

種地盤上の標準加速度応答スペクトル(h=0.05)を解放基盤の設計震度スペクトルと考えてこれに適合するようにTAFT-EWを修正し入力地震動(最大加速度117gal)を作成した。図-2にはTAFT修正波の時刻歴ならびに絶対加速度応答スペクトルを示す。(4) 解析方法 加振方向は面内と面外の水平で(3)で作成した入力地震動振幅の1/2倍を基盤入力し入射波解析を実施した。入射角は軟弱な表層地盤を対象としているので0度とした。解析コードは面外がFLUSH²⁾改良版、面外はFEM2D³⁾を用いた。底部は面内・面外ともに粘性境界を用い側部は面内がエルク-伝達境界、面外は薄層要素法により無限境界条件を満足させるようにした。(5) 解析結果の一例 図-3にD1モデルの盆地中央地表面のIP別の増幅率(地表面応答の加速度応答スペクトル(h=0.05)の標準加速度応答スペクトルに対する比)を示す。IPが小さくなると最大増幅率は大きくなる。卓越周期は表層地盤のS波速度に対応して変化する。図-4にS2モデルの傾斜端部からHの5倍の距離の地点5における面内のIP別の増幅率を示す。最大増幅率、卓越周期ともにD1に比べて水平成層地盤のそれに近い。

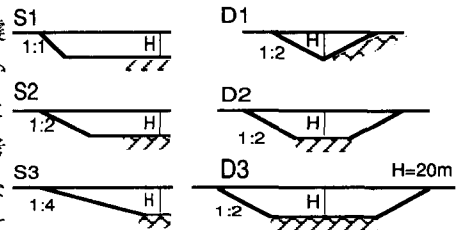


図-1 不整形構造

表-1 地盤物性

動的剛性比	$IP = \frac{\rho_1 V_{S1}}{\rho_2 V_{S2}}$			
	1/6	1/4	1/3	1/2
密度 ρ_1, ρ_2 (ton/m ³)	1.8/9.8			
表層地盤せん断波速度 V_{S1} (m/sec)	100	150	200	150
基盤せん断波速度 V_{S2} (m/sec)	600	600	600	300
減衰定数 h_1, h_2	0.05			

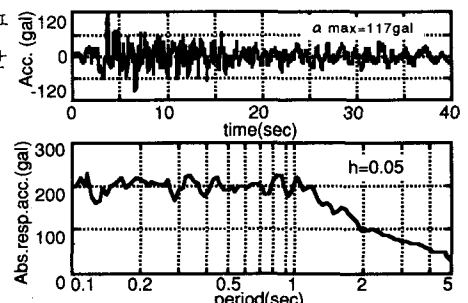


図-2 入力地震動

3. 震度スペクトルを用いた不整形地盤応答特性評価式

ここでは2.で求めた増幅特性を基にこれを簡易的に設計震度スペクトルへ導入することを試みる。

(1) 増幅関数のモデル化 基盤構造の不整形性と表層地盤の軟弱性の両者の影響を同時に補正する増幅関数Cs(T)を線形1自由度系の伝達関数と相似の(1)式で定義する。この増幅関数を第I種地盤上の設計震度スペクトル(解放基盤設計震度スペクトル)に乗ずることにより目的とする設計震度スペクトルを求めることができるものとする。ただしCs(T) ≤ 1の時はCs(T)=1とする。ここにTは周期(秒)、Amaxは最大増幅率、TA*は最大増幅率を生ずる周期を示している。この増幅関数はAmaxとTA*のみにより形状が決まる。ここではAmaxを水平成層地盤を鉛直方向に伝播する波動による最大増幅率AHmaxと鉛直下方から波動が入射した時に不整形構造に帰因して境界面から生ずる水平方向伝播波動による最大増幅率Aimax(i=S,D)との自乗和平方根として(2)式で求めることとした。AHmaxは不整形構造の地表面上の任意の地点における表層地盤厚と等価な層厚を持つ水平成層地盤の最大増幅率として定義される。

(2) 水平成層地盤の最大増幅率 AHmaxのモデル化にあたり水平成層地盤のIPをパラメータとした応答解析をS波重複反射理論により実施した。その結果を基に(3)式に示す様にIPの関数としてAHmaxをモデル化した。Hxは地表面上の任意の地点での地表面から基盤までの深度(m)である。βは表層地盤の深さがAHmaxに与える影響を補正する係数でHxと基準深度Hoの関数で定義される。弾性波動論によれば非減衰の2層系への正弦波入力を考えた場合AHmaxの理論値は1/IPとなるが、ここでは現実の地震波が不規則波であること、多重反射効果、表層地盤の減衰性等を考慮して理論値の2倍の平方根をAHmaxとした。

(3) 水平方向伝播波動により生ずる最大増幅率の誘導

図-5に示すような堆積盆地状の不整形構造に鉛直下方より振幅A、角振動数ωの正弦波が入射した時、左右の不整形境界面L,Rのそれぞれにおいて堆積盆地の内または外方向に水平に伝播する波動が生ずると仮定するとそれらは(4)式のように表現できる。ここに、B,C,D,Eはそれぞれの波動の振幅をexp^{-γx}項は堆積盆地内での距離減衰を表している。境界面LおよびRにおける変位と応力の連続条件から境界面より堆積盆地内へ伝播する波動の振幅CおよびDは最終的に(5)式のようになる。ここにLw; 堆積盆地幅、αL, αR; 左右境界面の閉塞率、Vs,i, ρi; 微小ひずみ域でのS波速度ならびに密度 (i=1; 表層地盤, i=2; 基盤層) である。Fは、振幅Aの波動が鉛直下方より不整形構造に入射した時に境界面LおよびRに生ずる仮想の力を表現したものでここでは(6)式で定義する。ここにG1は表層地盤のせん断剛性、κは未知の変換係数であるがここではκ=2とした。片側傾斜の場合は谷幅Lw→∞と考えるとφ→0となる。左側傾斜を考えてαR=0、左右対称性を考慮して|C|=|D|、α=αLとしこれらを(5)式に代入して整理すると増幅率ASは(7)式のようになる。αは片側傾斜の閉塞率である。両側傾斜の場合にはφを最大化することを考えればよりから結局η→0、exp^{Lwη/Vs1}→1とした時にφは最大値1となる。この関係を(5)式に代入してを整理すると両側傾斜の場合の増幅率は左右の傾斜境界による増幅率をそれぞれ

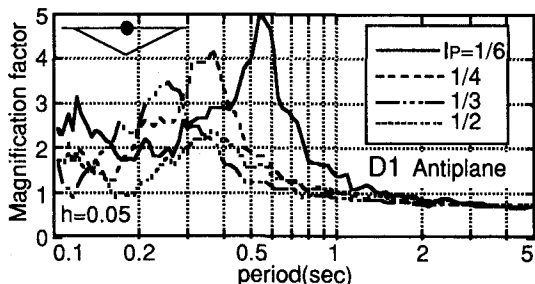


図-3 IPによる増幅率の相異(D1)

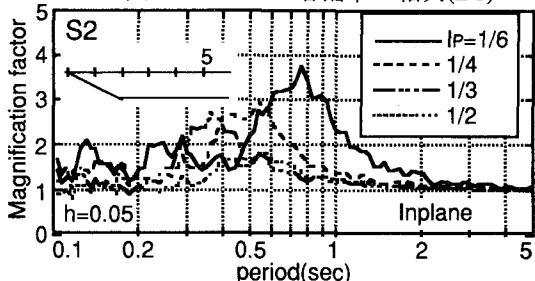


図-4 IPによる増幅率の相異(S2)

$$Cs(T) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_A^{*2}}{T^2}\right)^2 + \left(\frac{T_A^*}{T}\right)^2}} / A_{max}^2 \quad (1)$$

$$A_{max} = \sqrt{A_{Hmax}^2 + A_{imax}^2} \quad (2)$$

$$A_{Hmax} = \beta * \sqrt{\frac{2}{IP}} \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.25 & H_x \geq 50m \\ 0.8 * \left\{ \left(\frac{H_x}{H_0}\right)^{0.3} + 0.25 \right\} & H_x \leq 50m \end{cases} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_x \geq 50m \\ H_x \leq 50m \end{array} \right.$$

$$H_0 = 20m$$

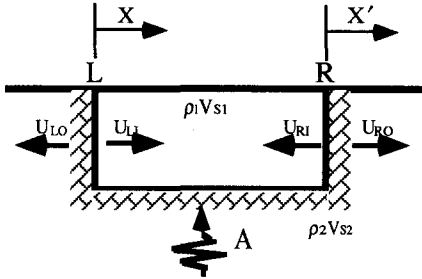


図-5 水平方向伝播波動の概念図

ADL, ADRとすれば(8)式のようになる。(7)、(8)式は不整形構造に正弦波が入射した時の振幅の増幅率を与えるが3.(2)で水平成層地盤の最大増幅率を定めた時と同様の理由でそれらの値の2倍の平方根を最終的な増幅率とした。

(4) 不整形地盤応答特性評価式の提案

a) 片側傾斜 (9)式に図-6の片側傾斜の水平方向伝播波動による最大増幅率Asmaxとそれを生ずる周期TA*を示す。

α ; 傾斜部の閉塞率でHL/H, L; 傾斜地盤の影響が最大となる傾斜端部からの距離で(10)式より求める。X; 傾斜端部から当該地点までの距離, LD; 傾斜部の水平距離, H; 表層地盤の最大深さ, Hx; 傾斜端部からの距離Xの地点の表層地盤の深さでX \geq LDの時はHx=Hとなる。Hu; 不整形な基盤の高低差, Hu; 基盤が浅い部分の表層厚, Ip; 動的剛性比= $\rho_1 V_{S1} / \rho_2 V_{S2}$

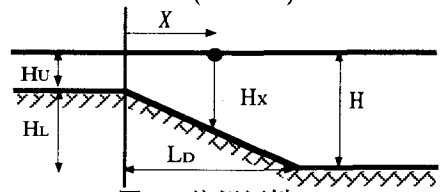


図-6 片側傾斜

$$T_A^* = \frac{4Hx}{V_{S1}} \quad A_{smax} = \sqrt{\frac{2\alpha(1-Ip)}{(\alpha+Ip)}} * \left(\frac{Hx-Hu}{HL}\right) * \left(\frac{X}{L}\right) * \exp\left(1-\frac{X}{L}\right) \quad (9) \quad L = 4\sqrt{LD * HL} \quad (10)$$

b) 両側傾斜 (11)式に図-7の両側傾斜の水平方向伝播波動による最大増幅率ADmaxとそれを生ずる周期TA*を以下のように定義した。両側の傾斜の影響はそれぞれを重ね合わせるにより取り入れてある。H''; 両側傾斜堆積盆地の等価深度で(12)式より求める。S; 堆積盆地の断面積 (a,b,c,dで囲まれた面積) 、 α_L ; 左側傾斜部の閉塞率で=HLL/H、 α_R ; 右側傾斜部の閉塞率で=HLR/H, LL, LR; 片側だけ独立して考えた場合の傾斜地盤の影響が最大となる傾斜端部からの距離で(13)式より求める。X; 傾斜端部から当該地点までの距離, LDL, LDR; 傾斜部の水平距離, Lw; 堆積盆地の幅, Hx; 傾斜端部から Xの距離の地点の表層地盤の深さでLDL \leq X \leq Lw-LDRの時はHx=Hとなる。Hu; 傾斜端部からXの距離の地点の地表面からadを結ぶ線までの深さ

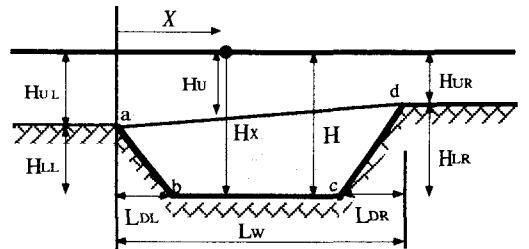


図-7 両側傾斜

$$T_A^* = \frac{4H''}{V_{S1}} + \frac{4Hu}{V_{S1}} = \frac{4}{V_{S1}} * \frac{S}{Lw} + \frac{4Hu}{V_{S1}} \quad H'' = \frac{S}{Lw} \quad (12) \quad L_L = \sqrt{2 * LD_L * H_{LL}} \quad (13) \quad L_R = \sqrt{2 * LD_R * H_{LR}}$$

$$A_{Dmax} = \sqrt{\frac{(1-Ip)}{(\alpha_L + \alpha_R)Ip}} * \left\{ \sqrt{Ip(\alpha_L - \alpha_R) + 2\alpha_L\alpha_R} * \left(\frac{Hx-Hu}{H_{LL}}\right) * \left(\frac{X}{L_L}\right) * \exp\left(1-\frac{X}{L_L}\right) + \sqrt{Ip(\alpha_R - \alpha_L) + 2\alpha_L\alpha_R} * \left(\frac{Hx-Hu}{H_{LR}}\right) * \left(\frac{Lw-X}{L_R}\right) * \exp\left(1-\frac{Lw-X}{L_R}\right) \right\} \quad (11)$$

4. 観測解析例との比較

図-8には、片側傾斜のBEM応答解析による周波数伝達関数⁶⁾と評価式による増幅率の比較を示す。BEMの解析値は基盤が平らな部分での変動が激しく値も評価式よりも大きいが地表面に沿った分布傾向を式は良く再現している。図-9には、

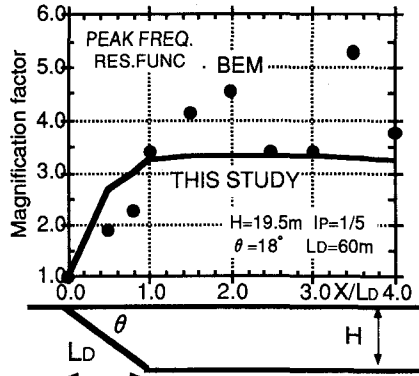


図-8 BEMとの比較(S)

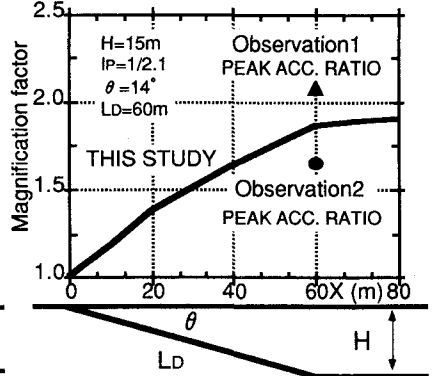


図-9 地震観測との比較(S)

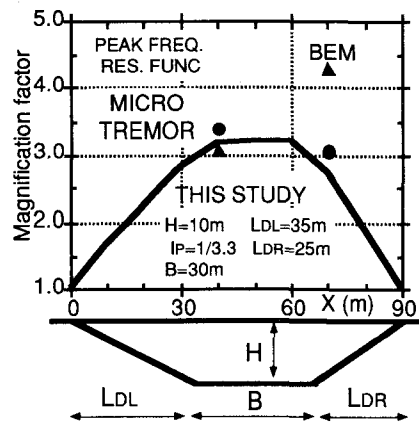


図-10 微動、BEMとの比較(D)

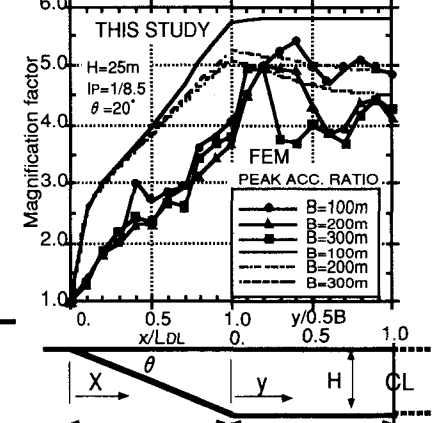


図-11 FEMとの比較(D)

片側傾斜の造成地盤における地震観測⁷⁾により得られた水平最大加速度比と評価式による増幅率の比較を示す。評価式を増幅率は観測値の平均値と良く対応している。図-10には、堆積盆地状の造成地における常時微動観測結果とそれを対象としたBEM応答解析の周波数伝達関数⁸⁾の増幅率と

評価式による増幅率の比較を示す。微動観測結果は評価式による推定値と良い対応を示している。BEMについては、 $X=40$ mでは一致するが $X=70$ mでは評価式の値がかなり小さい。図-11には、堆積盆地の底幅をパラメータとしたFEM地震応答解析⁹⁾による水平最大加速度比と評価式による増幅率の比較を示す。FEM解析値に見られるような盆地底幅の変化により最大増幅率の生ずる相対的位置が変化する傾向も評価式はうまく表現している。

5. おわりに 本研究では、2種類の基盤不整形が地表面の地震応答特性に及ぼす影響を設計震度スペクトルの形で簡易的に導入する方法を提案した。不整形構造の地震応答特性を評価するための種々の地震応答解析手法が提案されているがこれらを検証するための地震観測記録や地盤構造・物性の情報が現状ではまだ不足している。今後の地盤構造探査技術の発展とそれらにより構造を厳密に把握した上での地震観測が展開されることが必要である。(参考文献)1)道路橋示方書・同解説 V耐震設計編,日本道路協会,PP.8385,1990.

2)Lysmer J. et al.:A computer program for approximate 3-D analysis of soil structure interaction problems, EERC Report 75-30, 1984. 3)安井讓他:有限要素法による不整形地盤の斜め射解析(その1),大林組技術研報, No.39, PP.103~106, 1989. 4)岡本舜三:第5章沖積地盤の地震動,耐震工学,オーム社, PP.99~105, 1971. 5)佐藤泰夫:弾性波動論, 岩波書店, PP.59~66, 1978. 6)関崇夫他:傾斜基盤を有する堆積地盤の地表面応答の簡便な計算手法, 第21回地震工学研究発表会, PP.117~120, 1991. 7)安藤広和他:不整形地盤の振動特性が埋設管に及ぼす影響について, 第21回地震工学研究発表会, PP.4952, 1991. 8)今岡克也他:造成地盤及びその上に建つ構造物の振動性状, 第8回日本地震工学シンポジウム, PP.415~419, 1990. 9)田村重四郎他:基盤形状が表層地盤の地震時挙動に及ぼす影響に関する基礎的考察, 第20回地震工学研究発表会, PP.145~148, 1989.