

# 地震応答解析における基盤設定について

東京大学工学部 正員 石原 研而  
 東京大学工学部 学生員 ○ 岡野 哲

## 1. まえがき

軟弱層による地震波の増幅作用を応答解析により求める場合、動きが一樣な基盤を決定し、そこから地震波動を入力してやることが多い。この場合基盤の選び方として

- (i) 地域の地質条件より経験的に定める方法
- (ii) セン断波速度又はN値がある値以上になる地点をみつけて定める方法

等が用いられている。そこで、ここではこの問題ととりあげ、基盤がみだすべき条件を波動伝播という立場から考えてみた。そして、更に、この条件と実際の地震波の伝播との間の関係を数値解析により調べてみた。

## 2. 3層モデルによる考察

十分に硬い基盤の上に、表層、中間層の存在するA地点と表層が欠けたB地点とがあるとする(図-1. 参照)。各層に入射する波の振幅を $E_n$ 、反射波の振幅を $F_n$ とすると、基盤では入射波振幅が同じでなくてはならないから、A点でもB点でも入射波は $E_3$ なる振幅をもっている。基盤より少し軟らかいと仮定した中間層を通過して上方へ進む波の振幅は表面層の影響を受けているから、A点とB点とでその振幅が一般に異なる。しかし、或る程度中間層が硬くて、 $E_2$ と $E_2'$ の値が接近してくると、中間層を新たに基盤とみなしても実用上さしつかえなくなる。従って、この中間層がどの程度基盤としての性質を備えているかを判別するためには、 $E_2/E_2'$ の値がどの程度1.0に近いかをみればよいことになる。このような考えから、 $E_2/E_2'$ の値をいくつかの場合について求めてみた。

計算方法としては、重複反射理論を用いて行ない、定常状態を考え、粘性の影響を無視した。更に簡単のために密度は各層とも同じ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ )とし、入射sin波の角振動数 $\Omega$ に関係した量( $\Omega H/\nu$ )を変数にとって $|E_2/E_2'|$ の値を求めた。この際、各層のせん断波速度の比と層厚の比をパラメータとした。密度が各層とも一定であるから、せん断波速度の比はインピーダンスの比と等しくなる。

計算結果をグラフにしたものの中から、CASE I ( $\mu_1 = 2$ ,

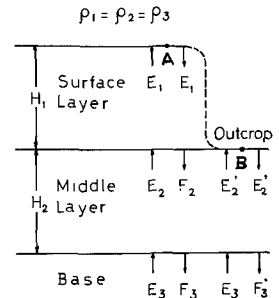


Fig 1. Three Layered Ground Model

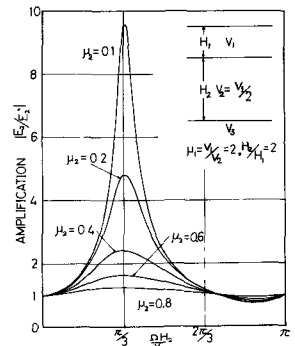


Fig 2a Amplification Curves for 3 Layered Problem Case I ( $\mu_1 = 2, \mu_2 = 2$ )

$H_2/H_1 = 2$  の場合を図-2a. に, CASE II ( $M_1 = 1/2$ ,  $H_2/H_1 = 2$ ) の場合を図-2b. に示した。但し,  $M_1$  は中間層と表層のインピーダンス比を ( $M_1 = V_1/V_2$ ),  $M_2$  は基盤と中間層のインピーダンス比 ( $M_2 = V_2/V_3$ ) を表す。各パラメーターを変えてグラフを書いた結果一般的な特徴として次のようなことが明らかとなる。

- $M_2 = V_2/V_3$  が1に近い程, 中間層は基盤としての性質を有する。
- $M_1 = V_1/V_2$  が0に近い程, 中間層は基盤としての性質を有する。
- $H_2/H_1$  はどのような値をとっても  $|E_2/E_1|$  にそれ程影響しない。

更に, 振動数 ( $\omega H/V$ ) で表される) の値に関係なく,  $1/2 < |E_2/E_1| < 2$  なる条件をみたすべき振動インピーダンス比  $M_2$  を求めると,  $M_2 = V_2/V_3 > 0.5$  となる。また,  $2/3 < |E_2/E_1| < 1.5$  なる条件では,  $M_2 > 0.67$  となる。

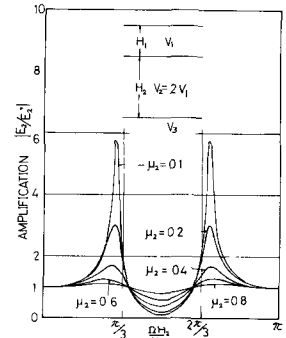


Fig 2b Amplification Curves for 3 Layered Problem Case II ( $M_1 = 1/2, H_2/H_1 = 2$ )

### 3. 東京下町地盤による考察

次に実際の地盤と実際の地震波記録によって基盤の設定を考えてみた。この場合も解析の手段として重複反射理論を用いたが, 粘性による減衰の影響を考慮している。また, 一般に土のせん断弾性係数及び減衰定数はひずみレベルによって変化することが明らかになっている。本解析においてもこのことを取り入れ, 土を粘性土, 砂質土, 岩, 聖い粘性土の四種類に分け, それぞれについてひずみレベルでの変化を与えた。実際の計算では, まずひずみ  $\epsilon = 10^{-4}$  % 程度でのせん断弾性係数及び減衰定数の初期値を与え, それらをもとに最大ひずみ量を計算し, その65%を有効ひずみとする。次にその有効ひずみ量にあたるせん断弾性係数及び減衰定数を求め, それらを用いて再び最大ひずみを計算し, それを0.65倍して有効ひずみ量を求める。このようにして何回か繰り返し計算を行なうと, 大体或る値に収束する。こうしてできた地盤モデルに地震波を入力し, 検討を加えた。

この場合に例として東京下町の地盤を扱った。1968年7月1日の東松山地震(マグニチュード 6.1, 震央(東経139.4°, 北緯36.0°, 埼玉県中部), 深さ50km)の際に, 下町の2地点で強震記録が同時にとられている。ところで, Schnabelら(1971)は地表の加速度記録から表層の影響を除くのに基盤の露頭での加速度記録を計算で求め, それを用いて表層条件の異なる他の地点での加速度記録を求める計算方法を提案して

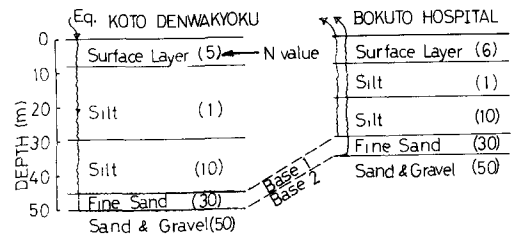


Fig. 3 Schematic Model for Base Evaluation

いる。そこでこの方法を利用して東京下町2地点における地震記録を関係づける際に基盤の選び方がいかなる影響を持つのか調べてみた。これが図-3.に模式的に示してある。N値の平均が30である細砂層(基盤1とする)を基盤に選んだ場合と、N値50以上の砂礫層(基盤2とする)を基盤とした場合との2つをとりあげ、江東電話局側で得られた記録から墨東病院側の記録を計算で求める際に、基盤のえりかわりによって計算値と実測値とがどのように影響を受けるのかを調べた。

この2地点におけるボーリング資料は図-4.に示してある。江東電話局(江東区平井町3の17)のボーリング資料は45mの深さの地点まで残っていたため付近のボーリング資料から補った。墨東病院(墨田区江東橋4の10)と江東電話局との水平距離は2.5kmである。計算に用いるせん断波速度は、今井らの提案した $V_s = 92.1 \cdot N^{0.329}$  (m/s)を用いてN値より推定した。但し、軟弱層のN値が1以下の部分については、繰り返し計算でのみずみの値があまり小さくならないように $V_s = 110$  m/sに固定した。層区分はボーリング資料に依り、地質分類とN値の変化を考慮して行なった。図-5a, bには江東電話局と墨東病院との地盤モデルの値をそれぞれ示した。ここで示した減衰定数 $\beta$ は繰り返し計算によって収束したみずみにおける $\beta$ の値をパーセントで表わしたものである。

計算結果を図-5c, dに示す。図-5cは各層の上端における最大加速度の分布を示すものである。実線で示したものは、それぞれ基盤1と基盤2を通じて計算した場合の最大加速度の分布を示し、破線で示したものは検定の意味で墨東病院での地震波記録(EW成分)を地表から入力した場合の最大加速度の深さ分布を示す。この図を見ると基盤1より基盤2を通じたものの方が比較的良く一致していること、深さ10~20mぐらいの軟弱層で地震波が約倍に増幅されていること等が分かる。一方、最大せん断応力の分布は基盤1も基盤2によるものも直接表面から入力したものよりみずみだけ大きいが、基盤2によるものの方がいくらか一致の程度が良いようである。

ところで、この方法にはいくつかの問題点がある。まず前に述べたが、上記2地点が2.5kmも離れていることである。しかしこのことはこの2地点の地盤が隅田川と荒川放水路との沖積層上の地盤という比較的広い地質的広がりを含まれていることから、下

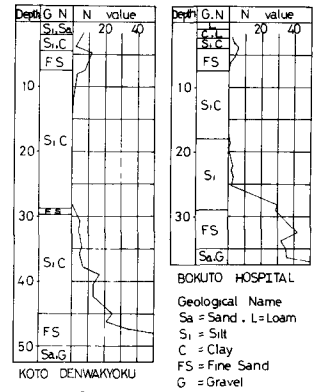


Fig 4 Geological Formation

Type	H (m)	N	$V_s$ (1/m)	G (1/m)	$\beta$ (%)	$V_s$ (m/s)
Umc	2.0	5	1.8	440	2.6	160
Umc	2.5	3	1.8	300	4.1	130
Ums	3.0	8	1.7	610	5.2	180
	5.0	2	1.7	230	6.0	120
UC	16.5	1	1.6	200	7.7	110
	6.0	4	1.7	360	6.4	145
LC	10.0	15	1.8	920	3.5	220
LS	5.0	30	2.0	1600	5.5	280 Base1
LS	5.0	50	2.2	2440	3.30	330 Base2

Fig 5a Ground Model of KOTO DENMAKYOKU

Type	H (m)	N	$V_s$ (1/m)	G (1/m)	$\beta$ (%)	$V_s$ (m/s)
Umc	1.5	8	1.8	610	2.8	180
Umc	1.5	4	1.8	360	3.8	150
Ums	3.5	5	1.8	440	6.0	160
UC	10.5	1	1.6	200	6.6	110
LC	7.5	3	1.7	320	6.3	130
	3.5	15	1.8	920	4.6	220
LS	6.0	30	2.0	1600	5.0	280 Base1
LS	5.0	50	2.2	2440	3.30	330 Base2

Fig 5b Ground Model of BOKUTO HOSPITAL

部砂礫層を基盤と考へてもよいと思われる。オエの問題は最大加速度が50 gal程度であることである。前にも述べたようにせん断係数及び減衰定数はひずみレベルで変化するため、応カーひずみ間の線形性は成立しない。従て、50 gal程度で判明したことを直ちに200 gal程度の場合にも適用できるとは限らない。しかしながら一般に地表の地震記録はその置かしている地盤の特性をよく反映すること、また東京下町などのように軟弱層が厚く堆積している地域ではその軟弱層の影響が大きいことを考へ合わせると、その下の砂礫層を基盤としてよいと思われる。しかし、200 gal程度の地震記録のない現状では推定領域に止まらざるを得ない。

以上のモデルで採用した基盤について更に検討してみる。先に紹介した  $V_s = 42.1 \cdot N^{0.329}$  の関係を用いて基盤1のせん断波速度  $V_2$  を求めてみると、280 m/secであり、基盤2のそれは  $V_3 = 330$  m/sec となる。従て、振動インピーダンス比は  $V_2/V_3 = 280/330 \approx 0.85$  となる。この程度の値であれば図2のデータからも明らかのように、基盤1を基盤とした場合の結果が基盤2を用いた時の結果と大きく変わることはないと思像される。図5c及びdの比較もこの観点から見ると納得できるであろう。

#### 4. 結論

(i) 軟弱層の下に基盤として採用しうる層が2つ重なっている場合、上層と下層のインピーダンス比が0.7以上あれば上層の方を基盤と考へて、それより上の軟弱層に関する応答解析を行つても誤差は少ないことが三層モデルを用いて示された。

(ii) 東松山地震の際に得られた墨東地区内の2ヶ所における地震記録を用いて重複反射理論にもとづく地盤の応答計算を行なつた結果、N値が30の細砂層を基盤としても、その下のN値が50の砂礫層を基盤としても結果はほぼ同じになった。

#### 参考文献

- ・金井 清 「地震工学」第5章「地盤振動」 (1969) 共立出版
- ・P. Schnabel, H.B. Seed, J. Lysmer 'Modification of Seismograph Records for Effect of Local Soil Conditions' (1971) EERC-71-8 University of California
- ・学術文献普及会 'Digitized Strong-Motion Earthquake Accelerograms In Japan · 1972'

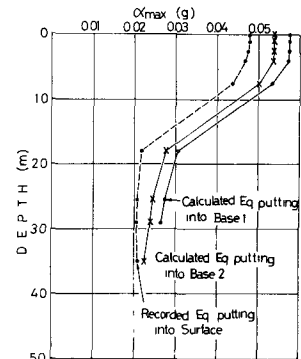


Fig.5c Distribution of Maximum Acceleration Soil Profile BOKUTO HOSPITAL

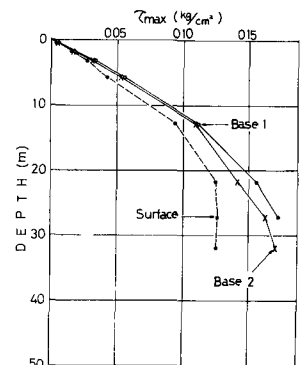


Fig.5d Distribution of Maximum Stress Soil Profile BOKUTO HOSPITAL