

(37) 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

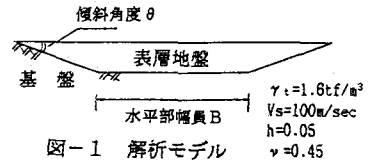
東京大学生産技術研究所 正会員 田村重四郎
東京電力(株) 正会員○富所 達哉

1. はじめに

基盤上の表層の動特性が地震動に影響を与えることが、地震観測、震害、地震動の調査の結果から認められるようになった。一方、表層地盤の動特性の3次元的な分布の状態も地震動に影響を与えるであろうことが推測されている。本報告では、逆台形断面をもつ長い表層地盤を想定し、基盤の傾斜角および表層の厚さおよび幅が、その断面の地震時挙動にどのような影響を及ぼすかを、数値シミュレーションにより検討した結果について述べる。

2. 解析モデルと解析手法

解析対象とした表層地盤は、左右対象の断面を持つ細長い地盤で2次元的に解析する。基盤の傾斜角 θ は、 10° 、 20° 、 30° の3種類で、水平部の層厚(H)は25m、幅(B)は、100m、200m、300mの3種類である(図-1)。地盤は線形性状を示すものとし、せん断波の伝播速度 V_s を100m/sec、ポアソン比 ν を0.45、Rayleigh減衰を5%と想定し、基盤は剛体として取り扱った。



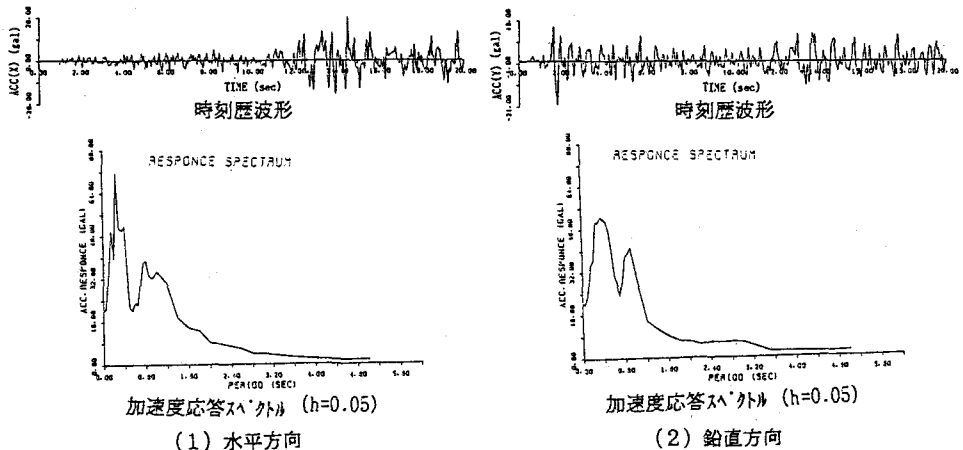
解析は、FEMを用い、モード重畳法および直接積分法により入力地震動に対する応答を求めた。固有値解析にあたって、固有値 λ_n は二分法で、また振動モード形 ϕ_n は逆反復法により求めている。

解析に使用した地震動は、1987年12月17日の千葉県東方沖地震の際、横浜市北部の土丹層($V_s = 750\text{m/sec}$)で得られた記録に10.0Hzのロ-パス・フィルタを掛けたもので、最大加速度は N-Sで24.9gal, E-Wで20.0gal, U-Dで20.2galである。解析にあたっては、これらのうちE-W成分およびU-D成分を基盤表面に同時に入力した。その時刻歴波形および応答加速度スペクトルはそれぞれ図-2に示す。

3. 応答解析結果

表-1に示す固有値解析の結果では、各ケースとも約1.0Hzおよび3.3Hz前後のモードが著しく卓越し、両者をあわせて関与係数は55~65%となり、他の振動モードの関与係数はこれらに比べて一般に非常に小さい。また、 $V_s=100\text{m/sec}$ 、 $V_p=332\text{m/sec}$ であること、および、ポアソン比 ν を変えたモデルではその V_p に対応した振動モードの関与係数が高くなることも確認されていることから、約1.0Hzのモードは表層地盤水平部における水平せん断1次振動であり、3.3Hz前後のモードは縦波に関わる1次振動であると推定される。地盤の卓越振動モードの例を図-3に示す。

図-4は、傾斜角 $\theta=20^\circ$ 、水平部幅 $B=200\text{m}$ のモデルについて、(1)10.0Hz未満の固有振動数をもつモードの重畳法、(2)Wilsonの θ 法($\theta=1.4$ 、 $\Delta t=0.01\text{sec}$)による直接積分法、(3)関与係数が上位10位まで(71%)のモード重畳法のそれぞれで求めた地表面中央位置における応答加速度の時刻歴波形である。3者はほぼ一致しており、応答値に対して関与係数が大きいモードが極めて支配的であることが明らかである。ただし、傾斜部においては、(1)と(2)の結果の近似性は十分保



たれるものの、(3)の結果はやや外れることが分かったので、以下の応答解析にあたっては10.0Hz未満のモードを重ね合わせて求めることとした。

図-5は、同じモデルの地表面上の3点における応答加速度波形の $\bar{h} \cdot \bar{w} \cdot \bar{h}$ 外を示したものであるが、おのおの関与係数の大きい振動モードに対応する1.0Hz付近または3.3Hz前後の成分が著しく卓越している。水平方向の加速度応答では、水平部の点③において1.0Hz付近の振動が卓越して現れるが、これは入力地震動のせん断波に対し基本振動が増幅されたことを示している。さらに、約3.0Hzの成分が比較的卓越しているのは、図-3(2)に示すせん断2次振動が発生しているためである。また、傾斜部の点①および境界部の点②では、縦波に関わる1次振動も顕著である。一方、図-5(2)から、鉛直方向加速度応答については、3.3Hz前後のモードが支配的である。なお、図-4(1)の時刻歴波形より、水平動の2次振動は2~3秒前後に認められ、基本振動は約1.2秒付近から卓越して現れる。3.3Hz前後の鉛直動は、2秒前後からほぼ全域にわたって卓越して現れているのが分る。これらの傾向は、他の傾斜角 θ 、水平部幅Bを変えたモデルにおいても同様認められた。

4. 基盤傾斜角および表層幅の影響

図-6(1)、(2)はそれぞれ水平部幅Bが200mの場合の水平及び鉛直方向の地表面上における最大応答加速度分布(絶対値)を傾斜角 θ を $\bar{h} \cdot \bar{w} \cdot \bar{h}$ として示したものである。水平軸は、凡例に示すように、地表面上の位置を斜面部及び水平部の各長さA、Bで規準化した値である。これらの図より次のことがわかる。①斜面部では水平方向の最大加速度は θ が小さくなるほど大きい値となるが、鉛直方向では逆に θ の増加と共に増大する。②最大加速度のピークは、水平方向については、 θ が大きいほど斜面部と水平部の境界からみて水平部寄りに現れる。鉛直方向では境界の両側に2つのピークが現れ、傾斜部寄りでは θ が大きいほど大きな値を示すが、水平部寄りではほとんど θ の影響を受けていない。③水平部中央付近では、水平方向、鉛直方向とも θ による差異がほとんどない。

図-6(3)、(4)は傾斜角 θ が20°で水平部幅Bを変化させた場合の水平方向、鉛直方向の最大応答加速度分布である。これらの図より次のことがわかる。①斜面部では、水平方向、鉛直方向ともBによる差異は認められない。②水平部の水平方向加速度はBが小さいほど大きく、また、Bが大きいほど斜面部と水平部の境界付近に明瞭なピークが現れる。鉛直方向では境界の斜面部寄りに極大値がまた水平部寄りに極小値が現れるが、Bによる顕著な差異は認められない。③水平部中央点では、B=100mの水平方向を除き、Bによる差異がない。

図-7は、最大応答変位分布(絶対値)について示したものである。これらの図より次のことがわかる。①水平方向変位は、各ケースとも、傾斜部縁端から水平部中央にかけて漸増し、水平部においては傾斜角 θ が小さいほど、また、水平部幅Bが大きいほど若干大きめの値を示す。②鉛直方向変位は、各ケースとも、斜面部と水平部の境界付近にピークを示し、応答値は水平方向変位に比べてかなり小さい。また、傾斜角 θ 、水平部幅Bによる顕著な差異は認められない。③これらは、変位応答においては縦波の影響が相対的に著しく低下したことに起因していると考えられる。

このように、地表面上の a/A 、 b/B が同じ位置では、傾斜角 θ 、水平部幅Bの違いによって、周波数特性はあまり変わらないものの、加速度および変位の応答にはいくつかの差異が現れることが分た。

4. まとめ

罅れ谷のような狭い範囲に限られた表層地盤の地震動が、その断面形状によって、どのような影響をうけるかを、谷幅および傾斜角をパラメータとして数値解析により検討した。対象とした地盤は、厚さ25m、地表部の幅が240~480m、基盤傾斜角が10°~30°程度の比較的軟弱な地盤である。その結果、傾斜角や谷幅が地表面の地震動に与える影響が定性的に示された。

表-1 固有値解析結果

θ度	B(m)	制動振動モード	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
10	200	モード1次	1	22	24	3	20	30	5	17
		振動数(Hz)	1.08	3.41	3.52	1.39	3.23	4.01	1.78	3.00
		制動係数(S)	28.7	17.7	4.7	3.8	3.3	2.1	2.1	2.0
20	300	モード1次	1	28	3	30	34	5	24	
		振動数(Hz)	1.04	3.40	3.28	1.28	3.53	3.85	1.82	3.18
		制動係数(S)	31.8	20.4	9.5	3.3	1.3	1.3	1.1	1.1
20	200	モード1次	1	19	20	22	21	3	18	17
		振動数(Hz)	1.07	3.28	3.39	3.50	1.47	3.25	3.08	
		制動係数(S)	31.9	9.7	9.2	6.9	3.4	3.1	2.2	1.8
20	100	モード1次	1	12	14	15	3	10	22	11
		振動数(Hz)	1.18	3.41	3.57	3.85	1.88	3.07	4.78	3.17
		制動係数(S)	31.2	15.5	7.8	5.8	3.1	3.0	2.3	1.8
30	200	モード1次	1	18	20	3	17	16	21	28
		振動数(Hz)	1.08	3.35	3.48	1.52	3.18	3.18	3.84	4.11
		制動係数(S)	32.8	14.9	14.3	2.9	2.7	1.7	1.2	1.2

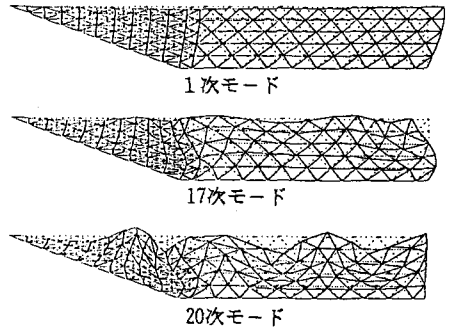
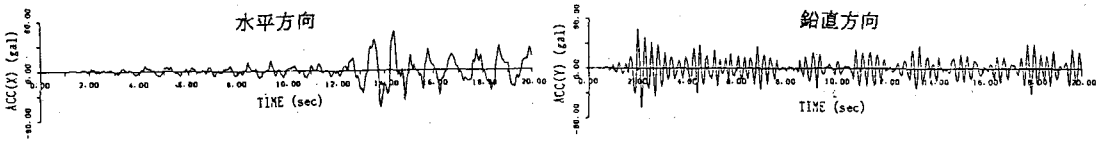
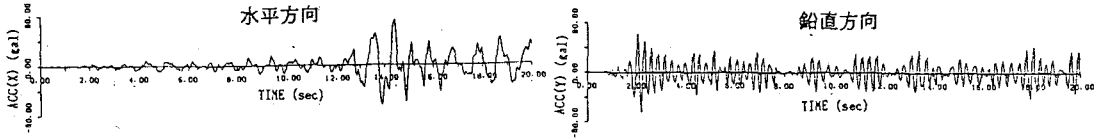


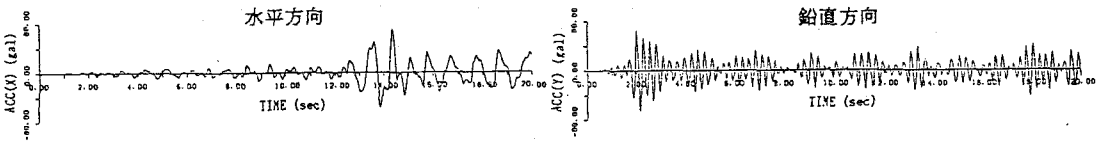
図-3 表層地盤の振動モード



(1) モード重畳法 (10Hz未満)

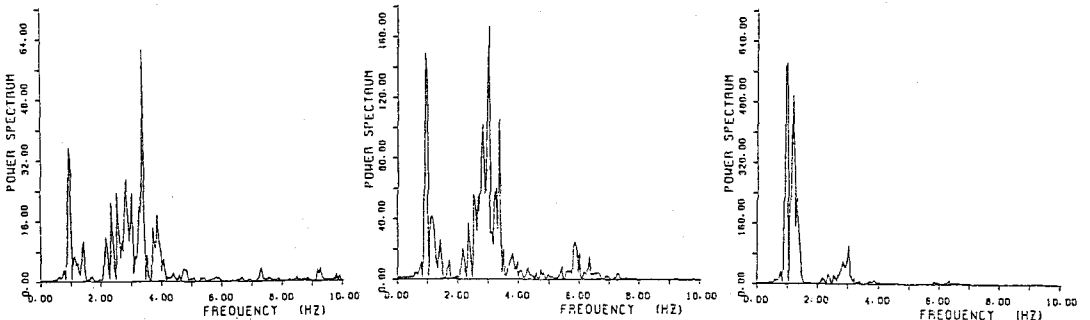


(2) 直接積分法



(3) モード重畳法 (関与係数上位)

図-4 地表面中央の応答加速度 ($\theta=20^\circ$ B=200m)

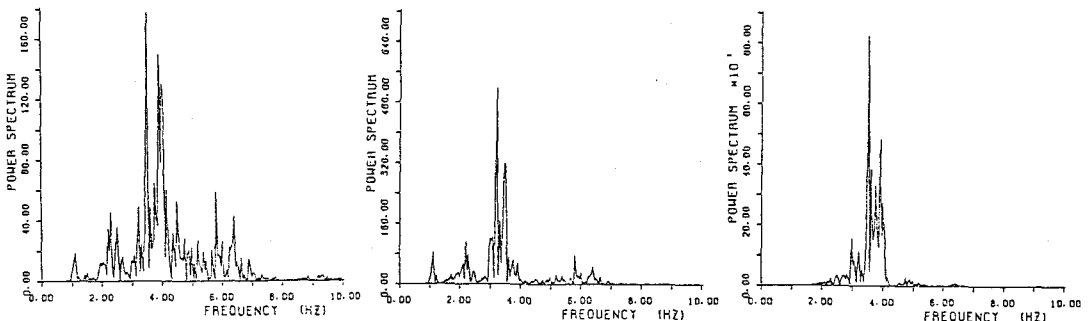


① (傾斜部)

② (境界部)

③ (水平部)

(1) 水平方向



① (傾斜部)

② (境界部)

③ (水平部)

(2) 鉛直方向

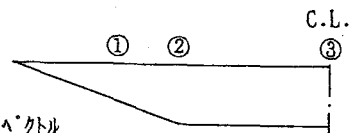


図-5 地表面中央の応答加速度のフーリエ変換

($\theta=20^\circ$ B=200m)

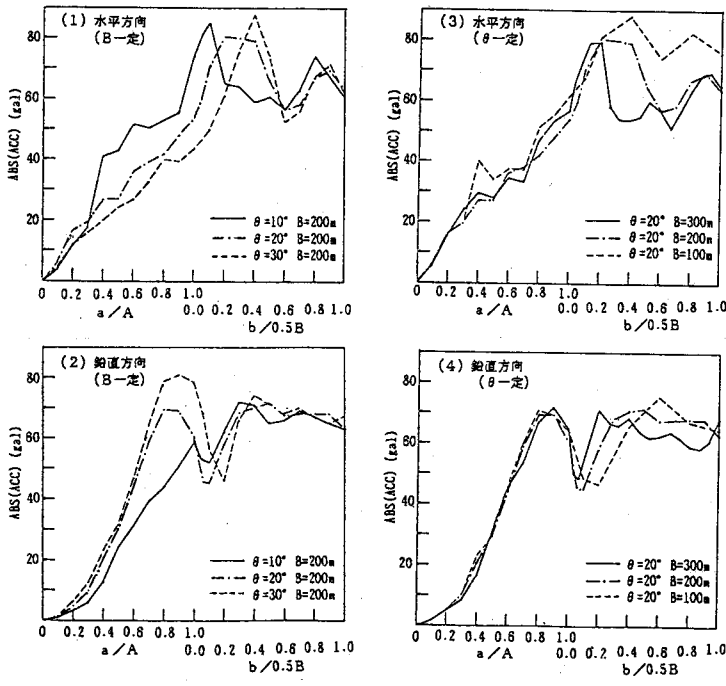


图-6 地表面最大応答加速度分布 (絶対値)

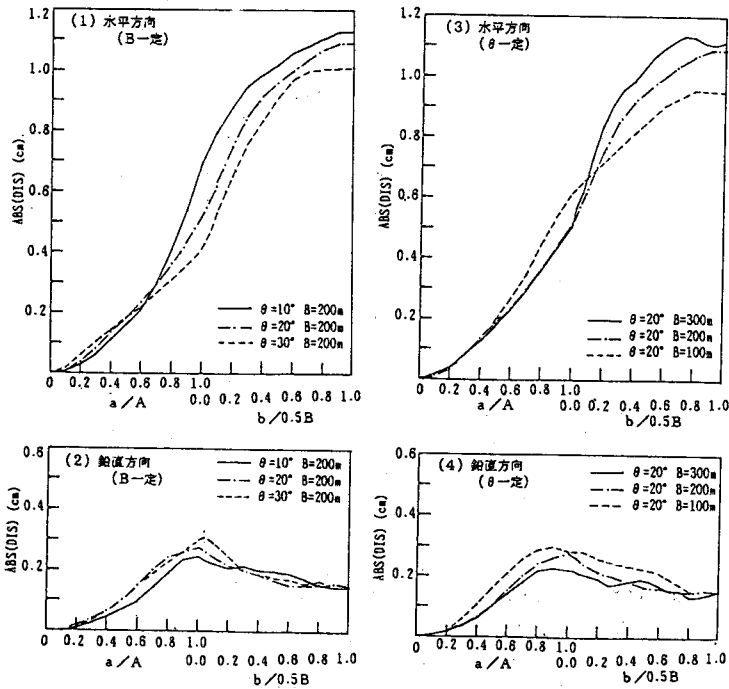


图-7 地表面最大応答変位分布 (絶対値)