

(22) 疑似3次元地震応答解析による造成地盤の地震時挙動

佐藤工業(株) 中村 晋, ○永尾浩一, 末富岩雄  
東京電力(株) 佐藤 博

1.はじめに

造成地盤の様に地表形状に不整形性が見られる地盤の地震時挙動を明らかにするため、これまで多くの地震観測や数値解析による研究が行われている。それら研究のうち地震動の伝播・増幅特性と合わせて震動の方向性に関する研究はその様な地盤の地震応答を適切に評価するための解析モデルを作成する上で重要であると考えられる。地震動の震動方向については、地表と地中の震動方向が周波数によって異なるとの観測記録に基づく指摘<sup>1)</sup>や、簡単な2層地盤モデルを対象とした疑似3次元地震応答解析<sup>2)</sup>により、斜面法屑部近傍における水平応答の周波数特性は入力地震動の入力方向によって異なり、水平動と上下動を同時に入力した場合には水平動の入力方向によらず斜面方向の震動が卓越する周波数がある等の指摘がある。これより、不整形地盤の地震時挙動は地盤構造のみならず入力地震動の特性の影響も受けることが定性的に明らかとなった。

ここでは、不整形地盤の地震応答性状に及ぼす地震動の入力方向および入力成分つまり水平動と上下動の影響を明らかにするため、実地盤を対象として実施した疑似3次元地震応答解析の結果を報告する。

2.解析手法

図-1に示す様な不整形地盤の地震応答の評価は、従来斜面方向(図中U1方向)断面を対象とした2次元面内解析により行われてきた。しかし、入力地震動の震動・入力方向が必ずしも斜面方向と必ずしも一致しないことから、本来その様な地盤の地震応答評価は3次元地震応答解析により行う必要がある。3次元地震応答解析法を用いて実地盤の応答性状を求めることは、計算機の容量や演算速度等の面からかなり困難であると考えられる。ここでは、従来の2次元解析に基づいて疑似的に3次元の地震応答を評価する手法を示す。

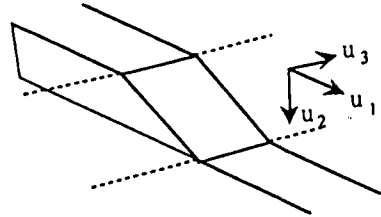


図-1 不整形地盤モデル

今、斜面直交方向(U3方向)に地盤が無限に存在すると仮定すれば斜面直交方向のひずみ( $\epsilon_{33}$ )が0、つまり平面ひずみ状態となる。さらに、水平面における面内せん断変形が小さいとして、せん断ひずみ( $\epsilon_{13}$ )も0とする。すると、3次元波動場に対するNavierの方程式は式(1)に示した斜面方向に対して面内方向の波動場を表す方程式と式(2)に示す面外方向のひずみ場に対する方程式の2つにより表される。つまり、弾性問題に対する3次元地震応答は、それぞれを独立に求めた後に重ね合わせることで得られる。ここでは、その手法を疑似3次元地震応答解析法と呼ぶ。その際、面内・外方向の解析には、有限要素解析コード

「Super-Flush(面内), Super-Flush/SH(面外)」を用いた。

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = G \cdot U_{i,jj} + (\lambda + G) U_{j,ji} \quad (i,j=1,2) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = G \cdot U_{i,jj} \quad (i=3, j=1,2) \quad (2)$$

3.地盤モデルおよび地震観測記録の特性

1)地盤モデル

地震観測は図-2に示す造成地盤上及び地中、さらに各種施設の基礎にて1988年より実施されている<sup>3)</sup>。図-2中の実線に沿った地震観測位置を含む地盤の縦断構造を図-3に示す。表層は土石流堆積物を盛土材とした盛土地盤、その下に土石流堆積物からなる地山及び安山岩となっている。ただし、地震観測位置S4とS5の間にはローム層が存在してい

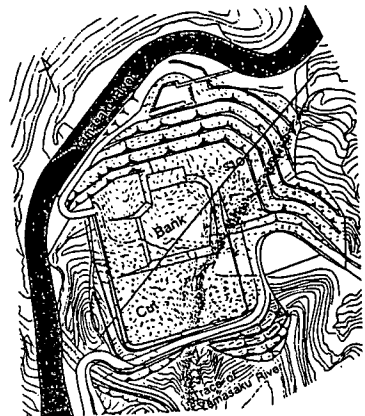


図-2 造成地盤の平面形状および地震観測位置<sup>3)</sup>

表-1 地盤物性

No	土質	単位体積重量(tf/m <sup>3</sup> )	S波速度(m/s)	ポアソン比
1	碎石	2.1	27.9Z+147	0.4
2	盛土材	2.1	22.5Z+206	0.45
3	ローム	1.3	180.	0.45
4	土石流堆積物(Da1)	2.3	7.8Z+495	0.45
5	土石流堆積物(Da2)	2.3	12.5Z+231	0.45
6	土石流堆積物(Da3)	2.3	35.0Z+210	0.45
7	安山岩	2.6	2000	0.3

る。それらの地層の地盤物性を表-1に示す。さらに、図-3に示した縦断地盤構造の有限要素モデルを図-4に示す。

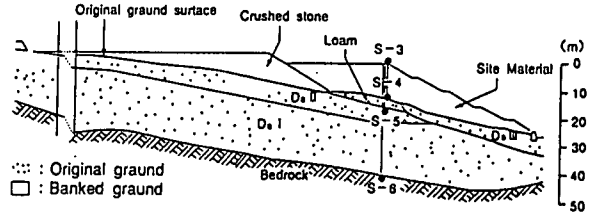


図-3 縦断構造および地震観測位置

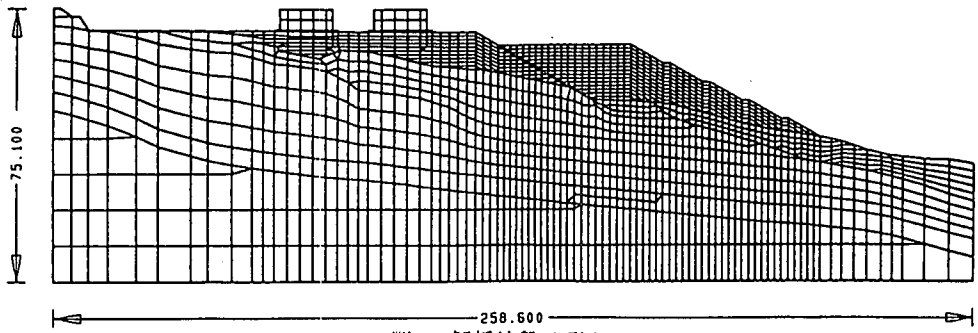


図-4 解析地盤モデル

## 2)地震観測記録の特性

検討には、観測記録に基づいて地震動の増幅特性の分析<sup>1)</sup>に用いた6地震のうち表-2に示す地震規模の大きな地震3,6および規模の小さな地震1による記録を用いた。図-3に示した地震計は、地盤構造の不整形性の影響が最も表れると考えられる法肩部(GL-1m; S3)、ほぼその直下の地盤中(GL-13m;

表-2 地震諸元<sup>1)</sup>

No.	Date	Epicentral Location		Mj	Δ (km)	Depth (km)
		Latitude	Longitude			
eq1	1991,1,26	35° 31'	138° 57'	3.3	16.0	24.0
eq3	1991,4,25	35° 4'	138° 12'	4.9	80.0	32.0
eq6	1992,2,2	35° 14'	139° 48'	5.9	98.0	90.0

S4, GL-17m; S5)及び基盤位置(GL-41m; S6)に設置されている。各観測点では水平2成分(NS,EW)及び上下成分の3成分を対象とし、サンプリング周波数100Hzで加速度の測定を実施している。

造成地盤へ入力する地震動の波動特性(P波またS波)とその波面の向きつまり入力の方向は、地盤の応答性を把握することや解析に用いる地震動の入力方向を把握する上で重要である。その検討の一例として地震6における各観測点の鉛直面内の変位軌跡を図-4に示す。これより、最下層では鉛直方向の震動が卓越しているがS5からS3と上方になるにつれ水平方向の震動が卓越していることが分る。しかし、単にS6つまり基盤位置における観測記録のみから、この位置へ入力する地震動の波動種別に応じた入力方向を把握するのは困難であると考えられる。ここでは、S6つまり基盤位置での地震動特性として水平成分はS波、上下成分はP波であると仮定し、いずれも鉛直下方から上方へ伝播したものと考えることにする。

## 3.解析結果

解析は斜面方向の二次元面内解析と疑似3次元解析を行い、最深度S6で観測された記録を図-4に示した解析地盤モデルの基盤へ入力した。それぞれに対する入力地震動は水平動のみと水平動と上下動を同時に入力した場合の2ケースとした。その際、観測されている地震動の水平成分はNS,EW方向であるので、入力地震動はそれらを解析

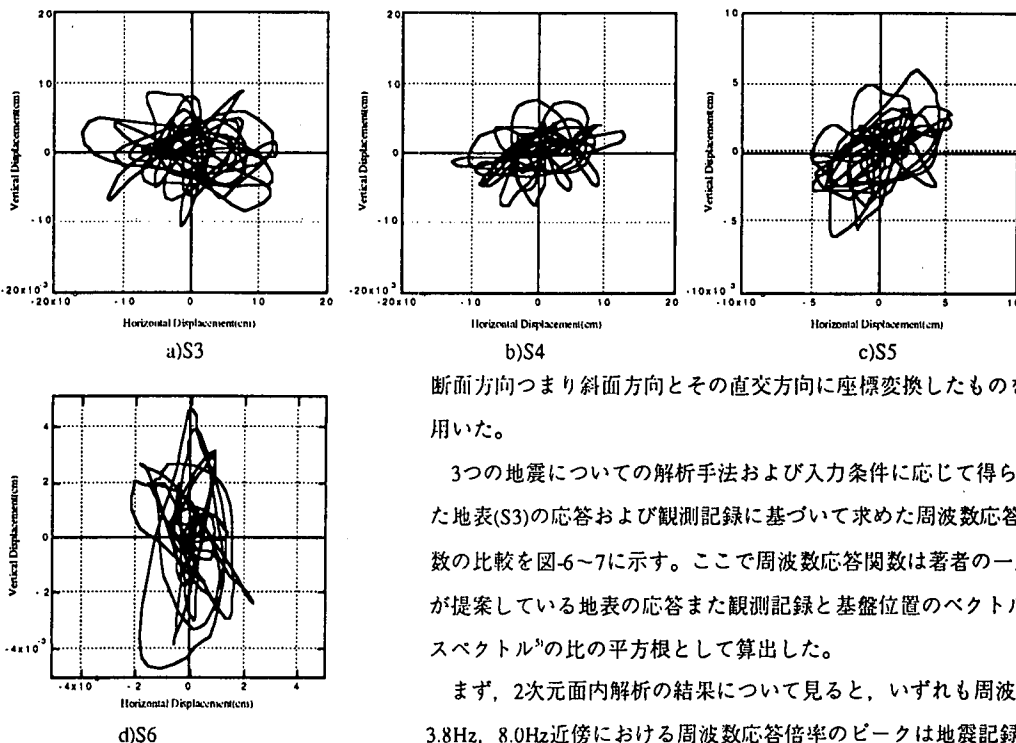


図4 鉛直面に関する各観測点の変位軌跡

断面方向つまり斜面方向とその直交方向に座標変換したものを  
用いた。

3つの地震についての解析手法および入力条件に応じて得られた  
地表(S3)の応答および観測記録に基づいて求めた周波数応答関  
数の比較を図6~7に示す。ここで周波数応答関数は著者の一人  
が提案している地表の応答また観測記録と基盤位置のベクトル  
スペクトル<sup>9)</sup>の比の平方根として算出した。

まず、2次元面内解析の結果について見ると、いずれも周波数  
3.8Hz、8.0Hz近傍における周波数応答倍率のピークは地震記録  
による値と傾向が良く対応しているが、観測記録に見られる5.0Hz  
近傍のピークが認められない。一方、水平動と鉛直動を同時入力

した場合には、周波数5.0~6.0Hzにて水平動のみの解析結果より周波数  
応答倍率が大きな値となっていることが分る。次に、疑似3次元解析  
の結果について見ると、入力条件によらず固有周波数3.8Hzにおい  
ては解析値と観測値はほぼ一致し、周波数8.0Hz近傍の特性も良  
く対応している。さらに、周波数4.0~5.0Hz近傍の周波数応答  
特性については観測記録と一致が見られないもの、周波数5.0~6.0  
Hzにおける周波数応答倍率のピークは比較的良い一致が見られ  
る。つまり、この入力条件の影響についてみると、地震3にて水平  
動と上下動の同時入力に対する周波数応答倍率は水平動のみの値  
に比べ周波数5.0~6.0Hzにおいて若干大きな値となっているもの  
の2次元面内解析ほどの差異はみられない。

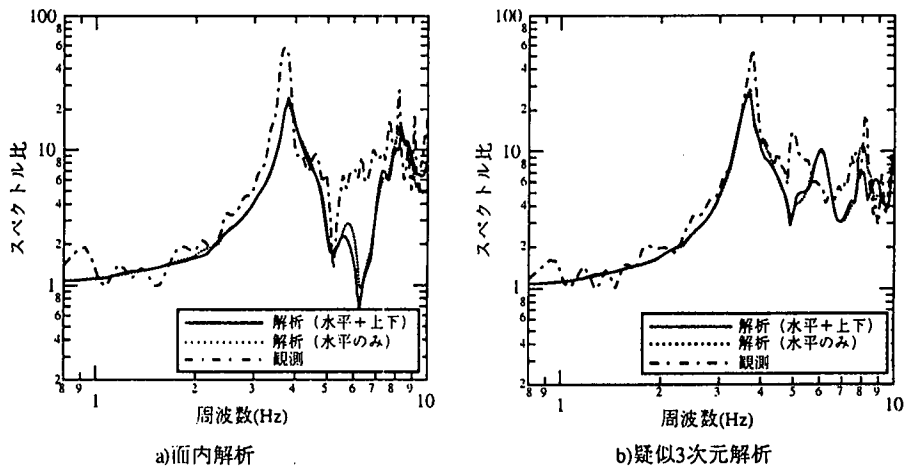
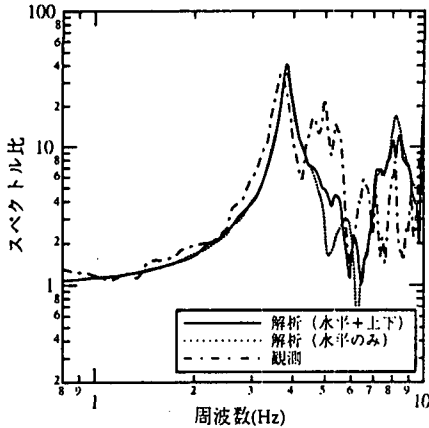
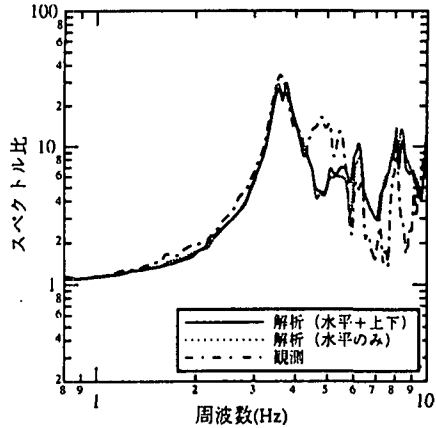


図6 地震1に対する解析と地震観測記録による周波数応答関数の比較

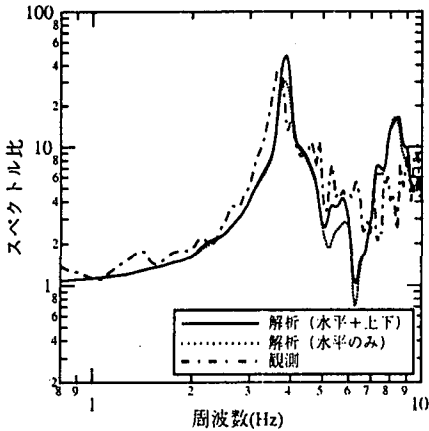


a)面内解析

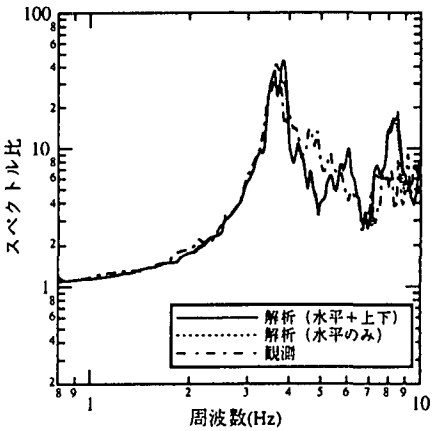


b)疑似3次元解析

図-7 地震3に対する解析と地震観測記録による周波数応答関数の比較



a)面内解析



b)疑似3次元解析

図-8 地震6に対する解析と地震観測記録による周波数応答関数の比較

## 5.あとがき

ここでは、不整形地盤の地震応答性状に及ぼす地震動の入力方向および入力成分つまり水平動と上下動の影響を明らかにするため、実地盤を対象として2次元面内解析と疑似3次元解析を実施した。その結果、造成地盤の様な不整形地盤上の応答を評価するという観点では疑似3次元応答解析が有用であることが分った。さらに、基盤位置での地震動の特性を鉛直方向に伝播するものと仮定していることから入力条件について必ずしも適切な評価となっていないが、上下方向の震動の地震応答に及ぼす影響が少なからず認められることが確認出来た。今後、入力条件が地震応答に及ぼす影響については、継続的に検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1)中村晋他,造成地盤における地震動の増幅特性,第9回日本地震工学シンポジウム,pp.199~204,1994,2)中村晋他,平面ひずみ状態を考慮した3次元地震応答解析による不整形地盤の地震応答,土木学会第47回年次学術講演会概要集,pp.168~169,1991,3)中村晋,平面ひずみ状態を考慮した3次元地震応答解析による不整形地盤の地震応答-その2 水平動と上下動の同時入力,日本建築学会大会学術講演梗概集(構造),pp.505~506,1994,4)大塚正博他,造成地盤における地震時挙動,土木学会第47回年次学術講演会概要集(第1部門),pp.144~145,1991,5)中村晋,ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用,土木学会論文集(7月号掲載予定),1995