

(19) 傾斜した軟弱層上の地震動増幅に関する数値実験

東洋大学 正会員 鈴木崇伸

東洋大学 正会員 伯野元彦

大成建設 正会員 五十嵐俊一

1. はじめに

いわゆる不整形地盤での地震動の増幅現象の把握は地震工学上重要な検討課題である。古くから沖積地盤で地震被害が多くなることが知られていたが、最近のいくつかの被害報告によれば沖積地盤の中でも特に被害が集中する区域のあることが指摘されている。1976年Friuli地震、1985年Mexico地震、1985年Chili地震、1993年Northridge地震では丘陵地に近い軟弱地盤で被害が甚大であることが指摘されており、筆者のうち伯野は「なぎさ現象」と呼んできた。これらの地震被害を踏まえて、解析的アプローチにより地震動の増幅メカニズムの研究と増幅度合の定量化の研究がいろいろと試みられている。工学的見地にもとづく解析的アプローチには有限要素法によるもの、境界要素法によるもの、波線理論によるものなどが挙げられる。また解析の対象とされた不整形な地下構造としては、谷地形、埋没谷、盆地、地層境界の傾斜などがあり、複雑な震動の発生が確認されている。

さて1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、淡路島北部から六甲山南麓にかけて帯状に被害が集中しており、震度階Ⅶのゾーンが数10kmにわたって発生した。阪神地区の地下構造は不明確な部分もあるが、被害が集中した地域はおよそ傾斜した沖積地盤上にあると考えられ、沖積層の厚い海岸近くよりも内陸で被害が大きくなっており、地震動も大きかったのではないかと推測されている。近傍での断層運動の影響も考えられるが、諸外国での被害分布から見られたのと同様に傾斜した軟弱地盤の影響で地震動が増幅され、被害が集中する結果となった可能性もあると考えられる。そこで傾斜した沖積層で衝撃的な地震力がどのように伝播するかを数値実験的に計算し、地震動の増幅作用について調べてみる。

2. 解析方法

前述した被害の分布状況を踏まえて、有限要素法により再現計算を行う。不整形地盤の解析方法にはいろいろな手法が提案されているが、地盤全体の挙動を観察する点と計算の容易さから有限要素法を採用する。実際の地形的な条件は3次元的に複雑に変化をし、また地盤データも不明確な部分も多いが、沖積層と洪積層の地層境界が傾斜している条件だけを反映させることとする。弾性体近似でせん断剛性率が大きく異なる2層が傾斜して接するモデルを設定する。解析プログラムは2次元弾性体中における波動方程式を解くために作成した独自のFEMプログラムを使用する。このプログラムは地表面を除く3方の境界は解析上の仮想的な境界としてCundallの重ね合わせ境界 (superimposing boundary) の処理手順にしたがって、解析領域内部から外部にむけて伝播する波動を消波するフローとなっている。また多くの汎用解析コードとは異なり、進行性の波動を入力する方法を用いており、基盤層内の一列の節点列に入力地震動の速度に比例する外力を加え、鉛直上方に伝わる地震動を入力する。

有限要素モデルを図-1に示すが、沖積層のせん断弾性波速度 (V_s) は100m/s、基盤層は300m/sとしており、両者の地層境界の勾配は約 5° にしてある。なお丘陵地部分の影響は小さいと考えられるので平坦な地表面の地盤モデルとしてある。残りの3方の境界は先に述べた仮想境界である。2次元アイソパラメトリック要素を用いて離散化した運動方程式をつくり、3次のルンゲクッタ法で直接積分して、各節点の運動を追跡する。尚今回の解析目的は波動の伝播の様子を理解することにおいているために地盤の内部減衰は考えな

いことにする。運動の追跡方法としてEWSグラフィックシステムによる変位分布のアニメーションと、固定観測点の応答波形の観察・分析を用いる。また各節点の運動をアニメーション化することにより、衝撃的な外力によって伝播する波動の動きや、地表面あるいは地中の変形が観察できる。固定観測点の波形出力をフーリエ変換することにより周波数応答関数が計算でき、その絶対値から周波数毎の増幅度合を知ることができる。

さて有限要素メッシュのサイズと波動の位相速度の関係から大きく乱れを生じない最小波長が決定される。これまでの研究成果によればおよそ10要素分の波長までは精度的に満足できるとされ、それより短い波長では進行するにつれて乱れを生じてしまうことが知られている。今回の有限要素モデルにあてはめれば精度的に満足できるのは約5Hzまでであり、それ以上の波長では波動方程式にしたがった伝播とはならない。そこで衝撃的な外力として5Hzの片側正弦波で表される変位を考え、0.4秒間隔で3波加えることとする。また入力波の振幅は速度で50kineとした。今回解析に用いた入力波形を図-2に示す。

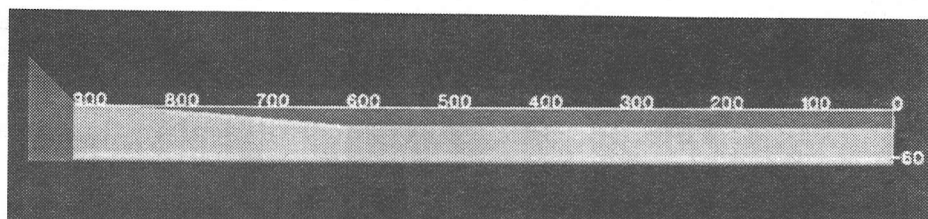


図-1 FEM解析モデル

3. 解析結果と考察

(1) アニメーション

今回解析の対象とした領域は水平方向900m、深さ方向60mの領域であり、鉛直上方に伝わる波動がどのように変化するかをコンピュータグラフィックシステムでビジュアル化して観察する。グラフィックソフトはAVSを使用して地表の変位を明確にするために擬似3次元に変換して波動伝播の様子を調べてみる。

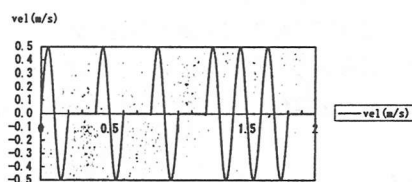


図-2 入力波形

モデル下方の一系列の節点列に加えられた外力により鉛直上方に伝わる波動が発生し、波長約60mの平面波が沖積層に入射される。地層境界が平坦な場合には剛性の違いから波長は約20mと短くなり、エネルギーの保存法則により振幅は約3倍に変化する。沖積層に入射された波動は地表面と地層境界で反射をくり返し、共振が起こるが今回の解析条件では共振周波数は1.2Hzとなる。一方傾斜した地層境界の場合には平面波の形が崩れ複雑な波動の変化をする。図-3は2次元解析結果を擬似3次元に変換して作成したアニメーションの1コマである。陰影の影響により上下動が誇張されているが、傾斜した沖積層では平面波が崩れて変位の大きい部分が局在しているのがわかる。この波長30~60m程度の波動成分は入力波が逸散した後も変位は小さくなるものの継続し、共振に似た現象が起こっていると考えられる。

次に傾斜した地層境界上での地表面及び側面の変形を図化した結果を図-4(a)に示す。沖積層厚が約5mを超えるあたりから地表面が波立ちはじめ、傾斜地層上で約200mの間に4~5個の高まりが生じている。上下方向の変位とともに水平方向の大きな変位も発生しており、地中の歪みもかなり大きくなることが予想される。地層境界が水平になるあたりでは3/4波長の共振が起こっているのがわかる。この波動は海側に向かって進行し、地層境界が平坦な部分に入ると減衰して消えていく。一方図-4(b)は地層境界が水平な海側のメッシュの変形を示しているが、水平動のみの震動であり、地盤歪みは傾斜面上に比べて小さいといえる。

傾斜した沖積層上でみられる複雑な波動現象が地上の構造物や地下の構造物の被害に関連したのではないかと推定される。

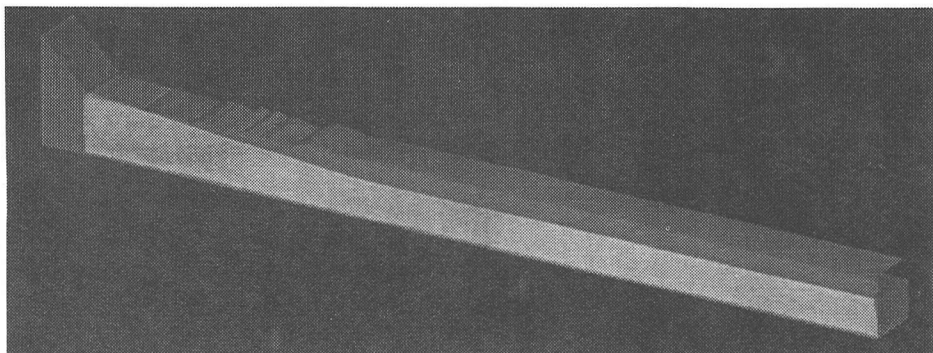
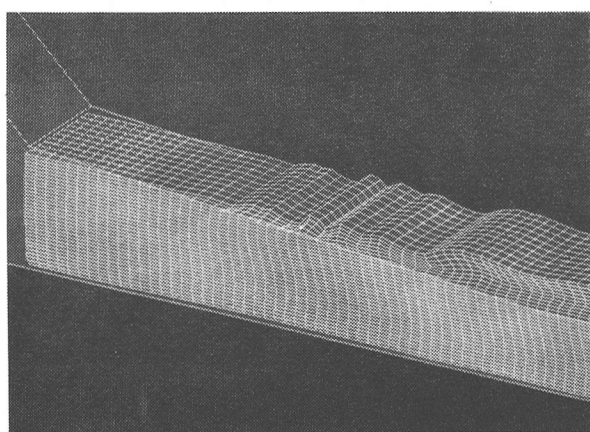
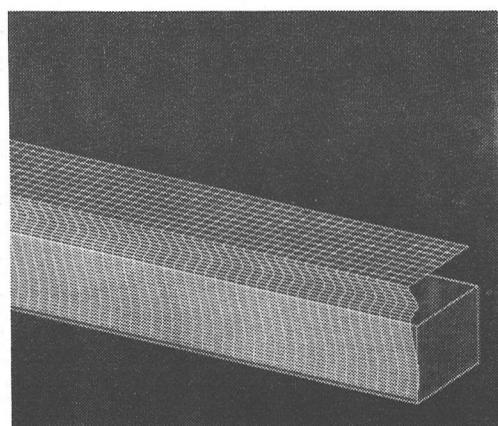


図-3 地盤振動のアニメーションの1コマ



(a) 傾斜した沖積層の変形



(b) 平坦な沖積層での変形

図-4 メッシュ表示による沖積層の変形図

(2) 観測波形の分析

次に変位観測波形のフーリエ変換と入力波形から周波数応答関数を計算し、周波数成分毎にどのように増幅されているかを調べてみる。海側の自由地盤では水平動のみの入力のため、水平方向の成分のみが応答する。 $V \leq 100\text{m/s}$ 、厚さ20mとしているので精度的に満足できる範囲の共振周波数は約1.2Hzと約3.6Hzになる。図-5に計算結果を示すが、これは水平動と上下動をベクトルの重ねて計算したものである。同図中に点線で示してあるのは海側の自由地盤での周波数応答であり、共振周波数のところで約6倍になっており、規則的に変化している。またNo. 4341は硬地盤上の観測点であり、周波数に関係なく一定の応答となっているが、これは入力された波動が自由境界で反射をするために振幅が2倍になっていることによる。

傾斜面上にとった3観測点についてみると、軟弱層厚が薄いところに位置するNo. 4031は周波数が高くなるほど増幅率を増す傾向にある。増加の程度は1次元応答のように狭い帯域だけ増幅されるのではなくゆったりした分布になっている。また軟弱層厚が中くらいのところに位置するNo. 3721は2.5Hz付近にピークをもつ分布となっているが、これは水平動の増幅によるものであり、共振周波数帯域が広がっている。また上下動のみに着目すれば周波数が高くなるほど増幅率も高まる傾向にある。No. 3411は軟弱層が厚いところに位置する観測点であるが、水平動では1.7Hz付近にピークがあり、上下動では2.8Hz付近にピークをもつ分布となっ

ている。両者が重なりあって1～3 Hzで全体的に増幅度合が高くなっている。

一方傾斜面からある程度離れたNo. 2326では1～2 Hzでやや乱れはあるものの概ね自由地盤での増幅と同様の傾向になっている。上下動だけに着目しても小さな高まりはあるものの、傾斜面上に比べるとはるかに小さくなっている。共振帯域が広がる理由としては複数の共振モードが重なりあっていることが考えられるが、解析上の基盤面の傾きが長く連続しているために、地表面と基盤面で反射を繰り返す波動が複雑に重なりあっているものと考えられる。数回反射を繰り返した波動が3/4波長で共振する揺れと、鉛直方向の共振が重なるとすればおよそ周波数特性にあってくる。

入力波の周波数特性により時間軸で見たときの揺れの大きさは異なってくるが、入力波をホワイトノイズと仮定すれば、周波数応答関数の平均から揺れの大きさを推定することができる。ホワイトノイズの平均振幅を1としたときに地表の観測点の振幅Aは次式で求められる。

$$A^2 = \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} H^2(\omega) d\omega$$

硬地盤上の観測点ではA=2.0、海側の自由地盤上の観測点ではA=3.5が得られる。傾斜面での揺れの重なりあい方は位置によって変化するが鉛直方向の入射波と斜め45°からの入射波が重なり合うとすれば、水平方向の振幅はA_h=4.5、鉛直方向の振幅はA_v=2.9となる(図-6参照)。

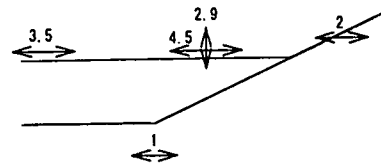
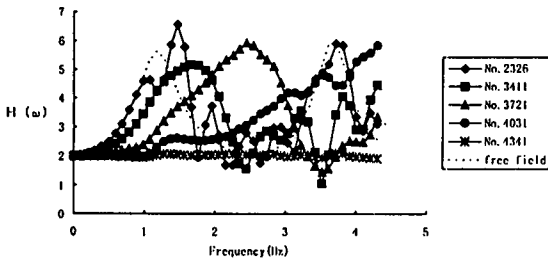


図-5 観測点での周波数応答関数

図-6 ホワイトノイズ入力時の振幅の比較

4. まとめ

今回の数値実験の結果から、傾斜した地層境界上で被害が大きくなる原因として地震動の増幅が考えられる。この地震動は傾斜した沖積層で山側から海側に向けて伝播する複雑な波動であり、自由境界である地表面と地層境界で共振しながら進行すると考えられる。また揺れの重なりにより振幅も増大し、水平方向加振であっても大きな上下動を生じやすい特徴をもっている。モデル化した地盤での数値実験により、傾斜した沖積層で大きな揺れが発生することが確認でき、定性的であるが被害集中地域の傾向と概ね一致する結果が得られた。しかしながらモデル化した地盤はおおまかな特徴だけをとりいれたものであり、条件的にも未解明の点も多い。今後の研究課題として扇状地堆積物の影響、3次元的な増幅作用、入力地震動の検討の3点を考えている。

(参考文献)

伯野：被害から学ぶ地震工学（鹿島出版会）

鈴木、伯野：消波境界をもった有限要素法による波動伝播解析、地震研究所集報第59号、1984

Kunar, R.R. and Rodriguez Ovejero: A model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analysis, Int. J. EESD, 8, 1980

Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J.: Finite element method accuracy for wave propagation problems, J. SM Div., ASCE, 99, 1973

五十嵐他：地盤の不整形性による鉛直地震動の励起と構造物被害、第23回地震工学研究発表会、1995