

## 地盤の不整形性による地震動の増幅についての 3次元シミュレーション

東洋大学 鈴木 崇伸\*  
東洋大学 伯野 元彦\*  
大成建設 五十嵐 俊一\*\*

兵庫県南部地震では構造物被害と地形あるいは地下構造の関係が注目されいろいろな研究が行われている。神戸市内のボーリングデータを分析した結果、構造物被害が特に大きかった三宮や大開近辺では3次元的に窪んだ洪積層上に軟弱な表層が堆積しており、3次元的な地盤の不整形性が揺れの増幅に影響を及ぼしたのではないかと考えられる。そこで対象地盤を3次元的に取り出し、有限要素法でモデル計算を行い、3次元的な不整形性が揺れの増幅にどのように影響するかを分析する研究を行った。その結果、ある層厚の地区で共振により揺れが増幅され、基盤の傾斜によって増幅された揺れが軟弱層厚の厚い方へ表面波的に伝播するのが確認された。さらに3次元的な影響により表面波的に伝播する波は特定地域で重なりあうが、このことが地震動を複雑なものにし、大きな揺れの原因になると考えられる。

### 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。いろいろな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が、工学的見地にもとづく方法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。

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のゾーンが数十kmにわたって発生した。さらにそのゾーン内でも被害の発生のしかたにばらつきがあり、その分析がいろいろな角度から進められている。本研究では特に被害が大きかった三宮や大開の地下構造に着目し、埋没谷状の地形でどのような地震動であったかを推定する基礎検討を行った。3次元弾性体の有限要素法により埋没谷をモデル化し、入力波の伝播状況を観察することで増幅メカニズムを分析していく。被害を大きくした原因はいろいろあると考えられるが、3次元的な地下構造の不整形性の影響は大きいと考えられ、不整形性による地震動の局地的な増幅が被害集中地域と密接に関連していると考えられる。

キーワード：3次元シミュレーション、埋没谷、地震動の増幅

\* 東洋大学工学部環境建設学科 0492-39-1391

\*\*大成建設 土木本部 03-5381-5289

### 2. 兵庫県南部地震の被害と地下構造

兵庫県南部地震で被害が大きかった阪神・淡路地区のうち阪神地区は、六甲山の南麓にできた扇状地と沖積低地の上に市街地が広がっている。神戸市のN値50以上の工学的基盤の地表面からの深さを等高線で表わし、木造被害の分布と対比したところ、基

盤の傾斜面状や埋没谷状のところで被害が大きくなっていることが判明した(五十嵐他1995)。筆者らは基盤層の傾斜に注目して、洪積層の傾斜面上で水平動・上下動が大きくなることを2次元シミュレーションから分析している(鈴木他1995)。

工学的基盤面の分布状況と被害の関係で注目されるのは大開周辺であり、これを図-1に示している。大開周辺では2km四方の範囲で基盤面の深さが4~16mの範囲で変化しており、被害率30%以上の震度階Ⅶのゾーン、被害率50%以上の超震度階Ⅶゾーンは基盤面が周囲に比べて深い部分とおよそ一致している。特に超震度階Ⅶのゾーンは基盤の傾斜面からみておよそ谷筋にそっていると考えられ、地下構造の3次元的变化が影響したものと考えられる。

そこで埋没谷での揺れの増幅を数値実験的に調べることにするが、今回の解析はゆるやかな“すり鉢”状の堆積層の場合と、図-1に示した大開周辺をモデル化した場合の2ケースを行う。それぞれのモデル地盤を図-2(a), (b)に示すが、両方とも沖

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、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解析する。

### 3. 解析方法

前述した被害の分布状況を踏まえて、有限要素法により埋没谷状の地形の再現計算を行う。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。3次元的变化する地下構造は、解析の簡単さから2次元弾性体で近似されることが多いが、本研究では3次元弾性体で解析を進める。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3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5面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

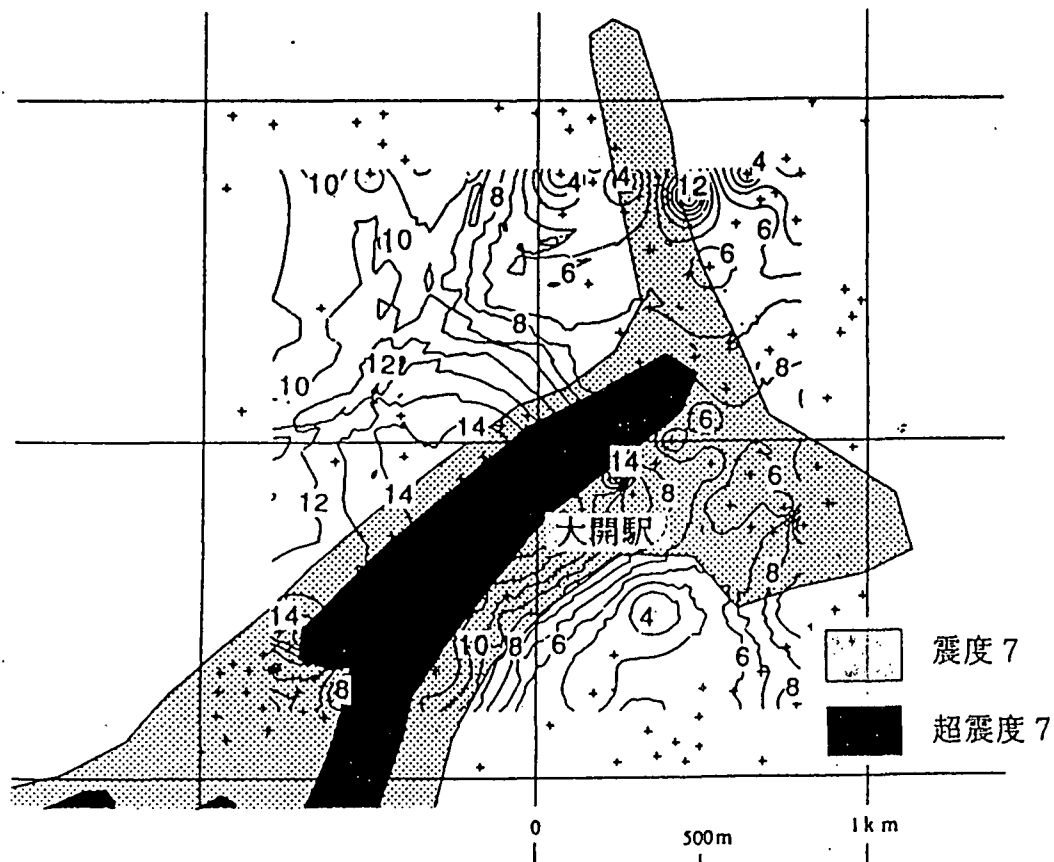
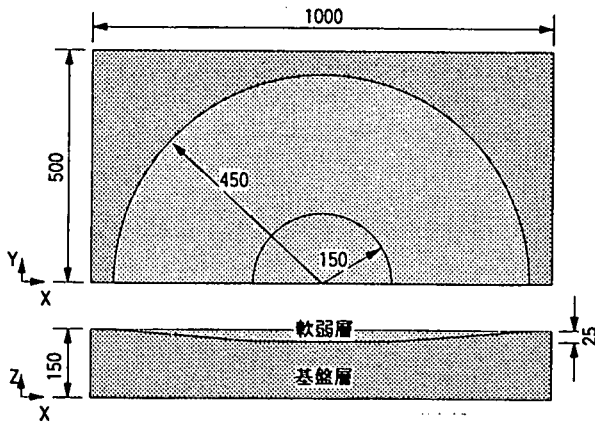
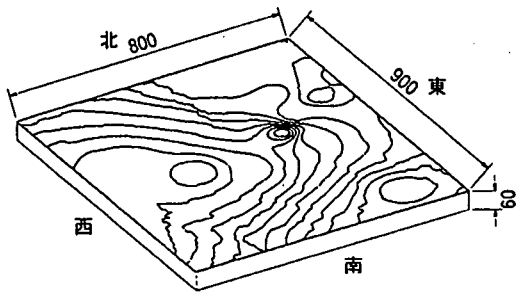


図-1 大開周辺の地震被害の特に大きな地域と工学的基盤面の深さの関係



(a) すり鉢状表層のモデル地盤



(b) 大開周辺のモデル地盤

図-2 解析の対象とする地盤モデル

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

(Suzuki et al. 1985)。

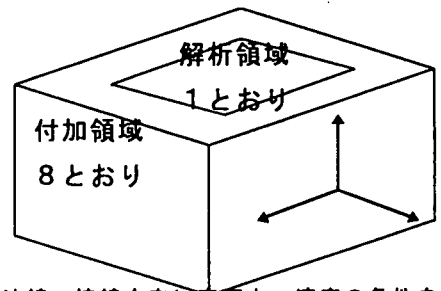
図-3 に境界処理手順の概念図を示すが、仮想境界の外側には消波可能な反射波を発生させるための境界領域を付加し、その外側境界は一定応力、一定速度の条件を組み合わせる解を求め、一定時刻経過したとき8とおりの解の平均を計算し、反射波を消去する。またこのとき境界条件となる表面力、運動速度の値も更新する。

付加領域に入射する波動の識別は、仮想境界の外側の領域では2次元解析 (SV波問題、SH波問題) が可能であると仮定して、3次元の解析領域とは独立して4面の2次元モデルの解析を行い、その差分を逸散波成分とする。この概念図を図-4 に示している。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、基盤層内のある面上の節点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。

3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。二次元的な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を用いる。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。

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、3次元要素でも同様と考えられる。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4Hz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4Hzの片側正弦波で表される変位を考え、数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。



境界面で法線、接線方向に表面力、速度の条件を組み合わせる

図-3 境界での処理方法の概念図

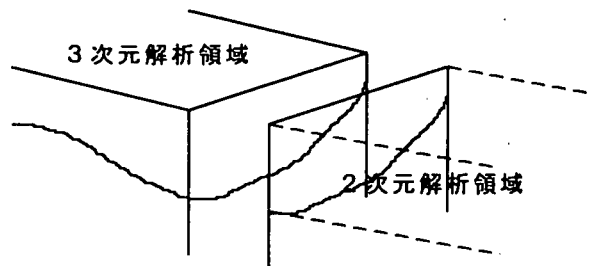


図-4 逸散波を識別するためのモデル

#### 4. 解析結果と考察

##### (1) すり鉢状表層

今回解析の対象とした地盤は地表面で900mにわたってすり鉢状の表層がある場合で、構造と運動の対象性から1/2の領域をモデル化している。円錐面状の地層境界の勾配は8.3%であり、最大深さは25mとしている。入力条件はx方向に4Hzの正弦波2波とし、基盤内を地表に向けて進行するx方向に変位成分をもつ波長75mの平面波がすり鉢状の表層内でどのように変化するかをアニメーションにより観察する。

図-5(a)、(b)に時刻を変えてアニメーション処理した結果を示す。基盤から表層に入ったせん断波は剛性の違いから波長は25mと短くなり、振幅は約3倍に変化する。この波動は地表面と地層境界で反射をくり返しせん断波の共振が起こるが、表層厚をHとしたとき、1次の共振周波数は $V_s/4H$ で求められる。今回の入力条件では表層厚が約6mであるドーナツ状の領域でせん断波は共振によって増幅され、大きな振幅が発生する。共振により増幅された波動成分は地層境界が一定でない条件を受けて、層厚の厚いすり鉢の中央部に向かって進行する。2次元の傾斜基盤のシミュレーション結果でも上下動をともなった運動となったが(鈴木他1995)、3次元解析でも同様に上下動をともなった波動成分が現れている。ただし地層境界の傾斜と入力波の運動方向によって中央部に進行する波動の上下動の位相は逆になっている。

すり鉢状の表層の中央部分では四方から進行してくる波度成分が重なりあって複雑な波動の変化をする。埋没谷地形の谷筋に相当する部分であるが、上下動は構造の対称性から打ち消しあうものの、水平動は重なりあって大きな揺れが発生するのが確認された。あたかも水を入れた洗面器の縁を叩いたときに波紋が中央に向かっていくような現象がすり鉢状の弾性体でも起こるといえる。

##### (2) 大開周辺

次に大開周辺の実際の地下構造をモデル化して解析した結果について説明する。なお地表の高低差の影響はモデル化しておらず水平としている。先にも述べたように埋没谷状の地形ではあるものの、基盤

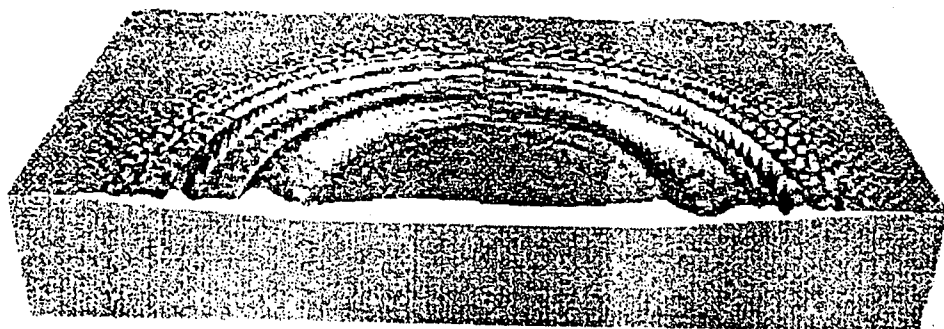
面深さの差は十数mであり、すり鉢状の表層モデルと比べると水平成層地盤に近い地下構造である。

図-6(a)、(b)に時刻を変えてアニメーション処理した結果を示す。入力条件はすり鉢状の表層モデルの場合と同様に4Hzの片振幅の正弦波2波を加えている。入力条件から表層厚が約6mである領域で大きな揺れは発生し、表層の厚い方に向かって進行しはじめる。地表にそったみかけの波長を徐々に長く変化させながらモデルの中央にむかって進行するこの成分は重なりあって揺れを大きくすることが確認された。すり鉢状のモデルの場合には対称性から中央部分で上下動が打ち消しあう結果となっているが、実際の地下構造をモデル化した場合には特定の位置で打ち消しあうことはなく、より複雑なものとなっている。ただし地層境界の傾斜勾配が小さいために今回の入力条件では上下動はそれほど大きなものとはなっていない。

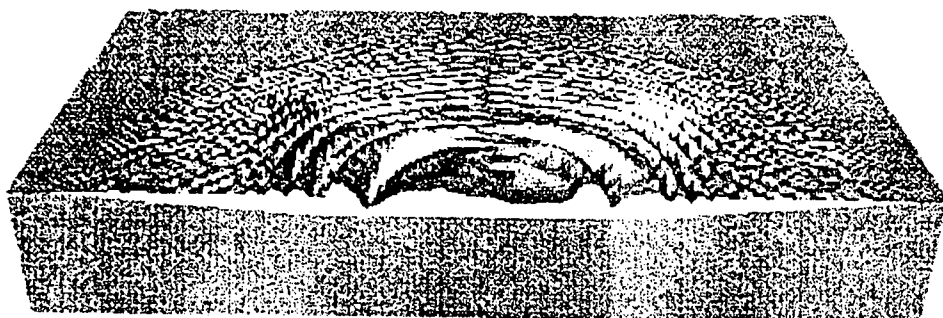
##### (3) 埋没谷の増幅メカニズム

以上の数値実験結果をもとにどのような要因で揺れが増幅されるかを考察する。基盤を伝わって地表層に入力する地震動はある周波数特性をもっている。入力された地震動は表層地盤内の重複反射によって共振周波数付近の帯域で増幅され、地表で大きな揺れとなる。埋没谷地形の表層厚の変化を考えあわせると、共振帯域に一致するある厚さの区域では大きな揺れが起こることになる。3次元的なせん断波の共振を考えると水平2成分が連成して回転するような振動となり、共振振動数は1次元で近似した場合と同じとなる。

埋没谷地形では基盤層と表層の境界面が水平ではなく傾斜している。平面波の斜めの入射・反射の繰り返しを考えると、反射する毎に進行方向は徐々に水平方向に変化していく。柔らかい媒質から硬い媒質へ波が入射する場合、屈折波を生じなくなる臨界角が存在する。特に臨界角を超えたせん断波の入射に対しては、入射波の振幅と反射波の振幅の絶対値が同じになる全反射が起こる。地表と地層境界で全反射するために波が逸散することによる減衰はなくなり、せん断波成分は水平方向に伝わることになる。

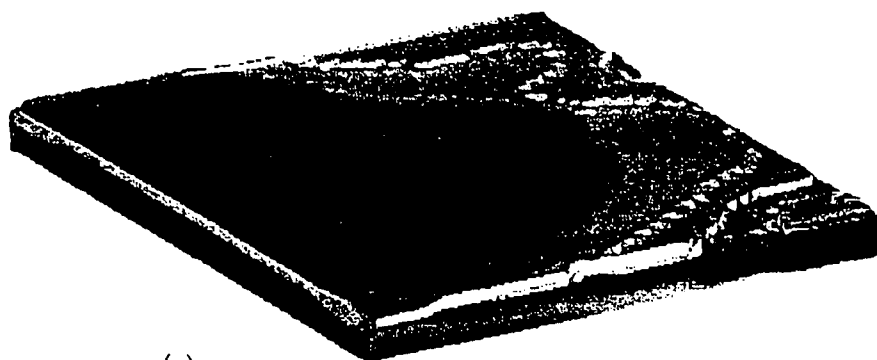


(a)

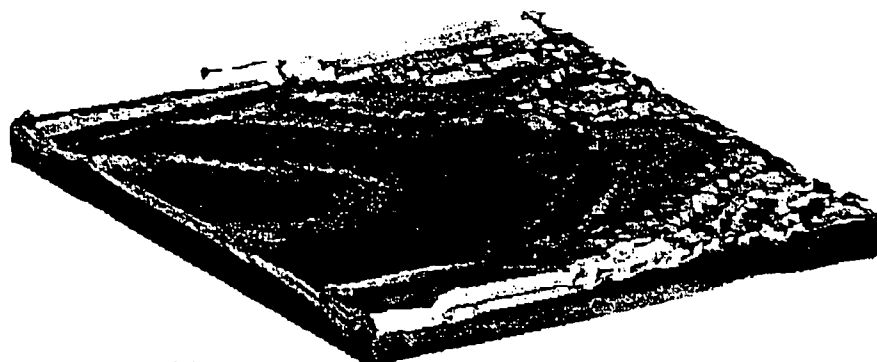


(b)

図-5 すり鉢状の表層のシミュレーション結果



(a)



(b)

図-6 大開周辺のシミュレーション結果

この成分と表層内をほぼ鉛直に進行する別のせん断波成分が重なりあって地層境界の傾斜面上で複雑で大きな揺れが発生する。

共振の影響で増幅されたせん断波成分は全反射を繰り返しながら、表層厚の小さな方から大きな方に伝わっていく。さらに3次元的な地下構造の影響によりこのような全反射を繰り返すせん断波が複数発生し、特定の区域で重なりあうことにより、大きな揺れが起こりうる。埋没谷においてはこのようなメカニズムで大きな揺れとなると考えられるが、この揺れは近接する別の地点の共振の影響や全反射を繰り返すせん断波の影響を含んだものであり、1次元の近似、2次元の近似ではうまく説明できないと考えられる。

## 5. まとめ

兵庫県南部地震の被害集中地域のうち、大開周辺の地下構造を調査した結果、埋没谷状の構造であることがわかり、3次元的な地下の不整形性の影響について数値実験的研究を行った。今回の数値実験の結果から埋没谷内のかなりの範囲で大きな揺れが発生し、表層地盤の共振とみかけ上水平方向に進行する波動成分がその原因と考えられる。埋没谷での地震動の特徴とその発生要因についてのまとめを以下に示す。

①傾斜した基盤層上の表層地盤では特定区域のせん

断波の共振の影響が水平方向に伝わる。この波動成分は地表面と地層境界面で全反射をくり返し減衰することなく表層の厚い方へ伝播する。

②3次元的に地下構造が変化する場合は、表層の薄い区域で発生する大きな揺れが表層の厚い区域で重なりあい、大きな水平動を引き起こす。

③また全反射を繰り返すせん断波成分は上下方向の運動も引き起こし、条件によっては水平動成分と同程度の大きさとなる。

今回モデル化した地盤はおおまかな特徴だけを取り入れたものであり、地盤条件的、入力条件的にも未解明の点も多いが、3次元的な不整形性の影響は大きく3次元波動シミュレーションをより定量的なものにして分析する必要があると考える。

## 【参考文献】

- 1)伯野：被害から学ぶ地震工学（鹿島出版会）
- 2)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会地震工学研究発表会、77-80, 1995
- 3)鈴木、伯野、五十嵐：傾斜した軟弱層上の地震動増幅に関する数値実験、第23会地震工学研究発表会、73-76, 1995
- 4)Suzuki, T., Hakuno, M.: 3-D dynamic analysis of ground motion by FEM with non-reflecting boundary, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 2 No. 1, 185-193, 1985

## 3-D Wave Propagating Simulation on the Irregular Surface Layers

Takanobu Suzuki, Motohiko Hakuno, Shunichi Igarashi

In Kobe Earthquake(1995) the heaviest damages were centered at some area which has the soft surface layers and the irregular topographical conditions. We focused on the embedded valley, which are assumed from boring data in Kobe City. Making two finite element models like a brick, we did three dimensional wave propagation simulation. From the numerical simulations, seismic motion on the embedded valley is magnified because of the predominant vibration of shearing wave and the wave components which apparently move horizontally from shallow to deep alluvium. Superimposing these components can make large earthquake motion and cause heavy damages.