

3次元有限要素法による3次元丘地形の地震応答解析

正会員 吉村 智昭*
 会員外 Jacobo Bielak**
 正会員 久田 嘉章***

領域縮小法 3D-FEM 不整形
 地表地形 地盤増幅 成層地盤グリーン関数

1. はじめに

兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台や、ノースリッジ地震時の Tarzana の丘地形など、地震時に丘地形において大きな地震動が観測された例が多数ある。丘地形による地震動の増幅は、2次元や比較的単純な3次元のモデルを用いた解析で定性的な傾向は説明されているが、実際に観測される増幅率の大きさを定量的に説明できるに至っていない¹⁾。

そこで本研究では、丘地形と震源の3次元性を考慮し、表層の低速度の風化層や丘体の下に存在する層地盤も考慮してパラメトリックスタディーにより丘の増幅性状を調べた。

解析手法は、興味の対象とする局所領域のみをモデル化し、遠方の震源による地震力と全く等価な等価地震力を入射境界面から入力する吉村他²⁾、Bielak et al.³⁾、Yoshimura et al.⁴⁾ の Domain Reduction Method = 領域縮小法を用いた。

2. 地盤モデルと震源モデル

図1に3次元丘地形モデルの例を、図2にY=0を含む鉛直断面を示す。原点は丘頂部の直下で平坦部レベルの位置とする。点線は等価地震力の入力位置である。図3に表層風化層と2層地盤構造の組合せを考慮した4つのモデルの鉛直断面模式図を示す。丘の半径をL、高さを $h=0.4L$ とし、高さ分布を $h(1-3r^2+2r^3)$ で与えた(r =水平距離/L)。剪断波速度は丘体部分を v_1 とし、風化層を v_2 、2層構造がある場合の下の媒質を v_3 とした。粗密波速度は剪断波速度の2倍に設定した。今回の解析では減衰を入れていない。振動数 f から無次元振動数 ω への変換は、丘の直径 $2L$ と波長 $\lambda = v_1/f$ の比を考慮して、 $\omega = 2L/\lambda = 2L/v_1 \cdot f$ とした。剪断波速度 v_2 、 v_3 の媒質に対して1波長あたりそれぞれ50,25,12.5個の四面体要素を配した。通常1波長あたり10要素(要高精度の場合12)必要であり、最大有効振動数は $\omega = 5$ となる。図1のモデルで要素数は約400万である。底面と側面は粘性境界を配した。

図4に震源モデルを示す。AはX方向に振幅を有する平面波である。BとCはダブルカップルの点震源であり、紙面に垂直で奥向きY軸を北と見なしたときのメカニズム(strike, dip, rake)はそれぞれ(0,0,90)、(0,30,90)である。Aは一次元波動論を、BとCは久田⁵⁾の方法を用いて、図1、2に点線で示した位置で変位波形を計算して保存し、文献2)3)の方法で等価地震力に変換しながら時間領域で解いた。

3. 解析結果と考察

図5に点震源BによるX成分の地表面増幅率をModel 1~4と無次元振動数 $\omega = 1,2,3,4$ の組合せで示す。各点の増幅率は、丘と風化層がない場合の同一水平位置の地表面での地震動を1とした。 $\omega = 1$ では丘頂部で増幅率が大きい、高振動数に

なると複雑な分布を示す。Y=0上とX=0上では分布が異なり、例えば $\omega = 2$ の場合Y=0上ではあまり増幅がないがX=0上では両斜面部分の増幅が大きい。いずれのモデルでも丘地形(白円)の外側に同心円状の増幅(黒)または増幅率1以下(白)のパターンが現れ、層構造を有するModel 3,4で顕著である。

図6では震源Bの場合で、縦軸をY=0に沿う距離、横軸を振動数にとり増幅率を連続的に示す。Model 1は地形の影響を示し、増幅率が大きい部分(中央黒)が丘頂部で発生し、その両側で増幅率1以下の部分(白)が存在する。高振動数で白・黒の筋が多数現れており、これらは一種の振動モードを形成していると考えられる。Model 2では、表層風化層の影響が加わって増幅率が增大するが、単純に増幅率が増すのではなく、丘の起伏と作用して複雑なパターンを生ずる。Model 3では、縦方向に白・黒の筋が現れ、これは丘地形と2層構造が相互作用していることによる。Model 4はModel 2,3が重なりあったような分布を示す。Model 3,4の $\omega = 3$ での白筋は、図5の該当図で地表面全体で白っぽいことと対応する。

図7では図5、6に示された増幅率分布より、Model 3のY=0の位置で $\omega = 1,2,3,4$ の時の値を切り出して曲線で示す。

図8は震源Cを考慮した場合の結果の例を示す。震源がXの方角に外れているためX方向に沿って非対称であり、震源の反対側の斜面で増幅率が大きくなる傾向がある。

図9は平面波Aで丘頂部でのX成分の増幅率を4つのモデルで比較した。振動数幅 $\Delta\omega = 0.5$ のParzen Windowで平滑化した。Model 2~4は表層風化層や2層構造により複雑な増幅を示すが、丘の形状のみの影響を表すModel 1の増幅率を基調にして変動することがわかる。また、Model 1の鉛直断面とほぼ同じ丘地形を2次元SH入射問題として解いたGeli(1988)¹⁾と比較すると、3次元の結果が大きいことがわかる。

4. まとめ

表層風化層や層構造が丘地形と相互作用して複雑な分布を示して増幅率を増大させること、層構造があると丘の外側まで増幅率の変動が顕著に及ぶこと、3次元モデルでは2次元モデルより大きな増幅率を示すことなどがわかった。尚、地形や震源が線対称でない場合や減衰の導入を今後検討したい。

参考文献 1)Geli et al.(1988), The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results, B.S.S.A., 78, 42-63 2) 吉村他(2001)、3次元有限要素モデルに成層地盤のグリーン関数法で計算した3次元波動場を入力する地震波動解析、日本建築学会大会、B-2、27-28 3) Bielak et al., Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions. PART I: Theory, B.S.S.A.(投稿中) 4) Yoshimura et al., Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions. PART II: Verification and applications, B.S.S.A.(投稿中) 5) 久田(1997)、成層地盤における正規モード解及びグリーン関数法の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第501号、49-56

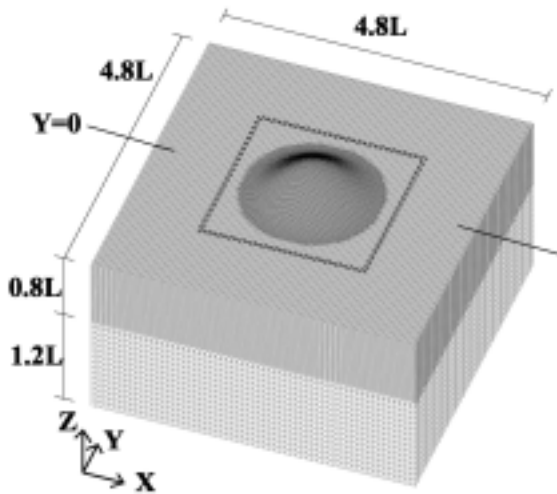


図1 3次元FEMモデルの外観(Model 4)

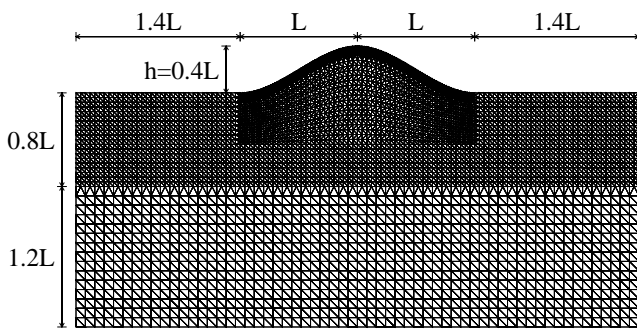


図2 3次元FEMモデルのY=0鉛直断面(Model 4)

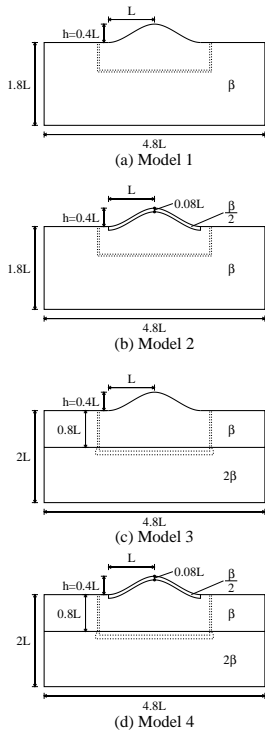


図3 4つの丘モデルの鉛直断面図模式図

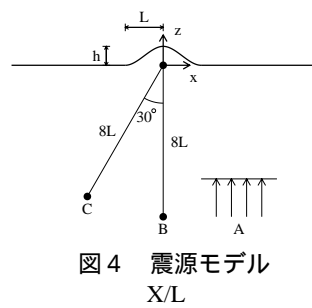


図4 震源モデル
X/L

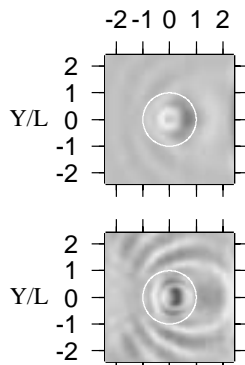


図8 点震源Cによる
地表面増幅率分布
上: Model 1, $\eta=2.0$
下: Model 3, $\eta=4.0$

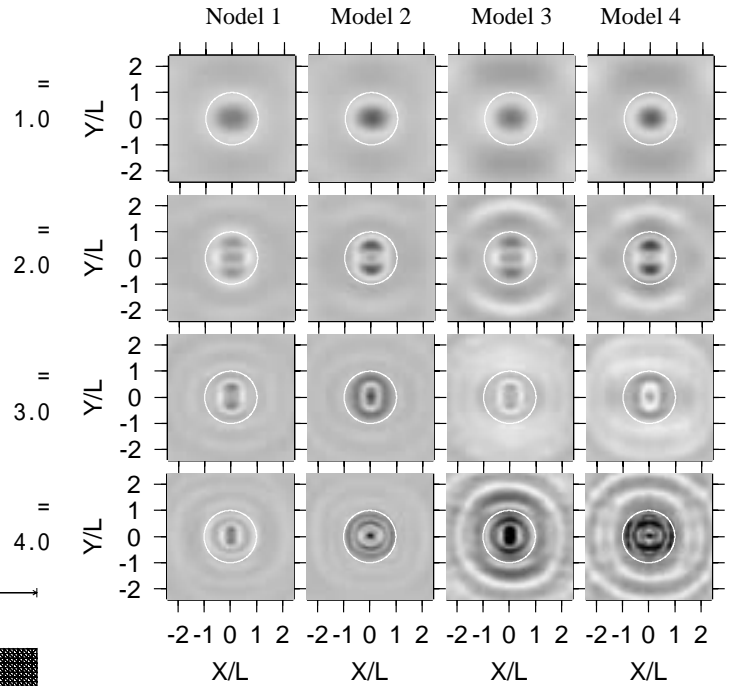


図5 地表面増幅率分布
(点震源B)

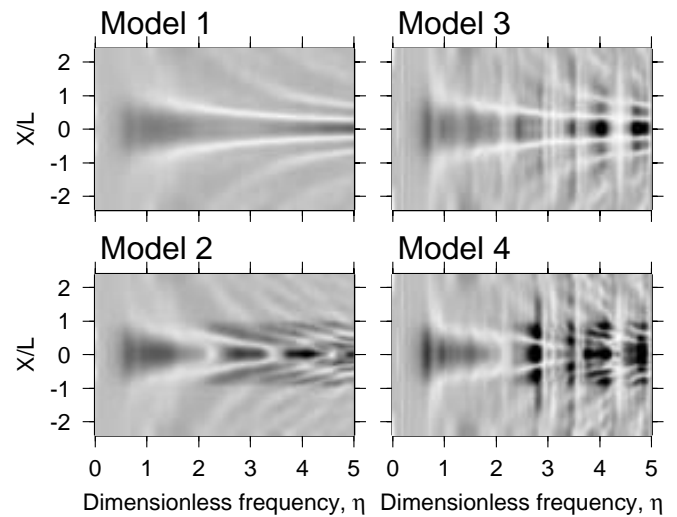


図6 Y=0に沿う地表面における
増幅率分布(点震源B)

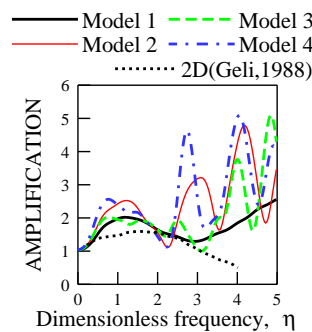


図9 丘頂部での増幅率
(平面波A)

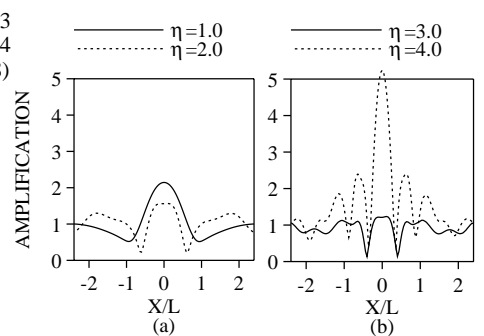


図7 Y=0に沿う地表面の増幅率分布
(点震源B、Model 3)

* 大成建設技術センター

** カーネギー・メロン大学土木環境工学科

*** 工学院大学建築学科

* Technology Center, Taisei Corporation

** Dept. of Civil and Environmental Eng., Carnegie Mellon University

*** Dept. of Architecture, Kogakuin University