領域縮小法による3次元丘地形の地震応答解析

吉村 智昭

Keywords: 3D finite element method, Substructure method, Local geography, Topography, Amplification factor, Strong ground motion 3次元有限要素法、サブストラクチャー法、局所地形、地表地形、増幅率、強振動

1. はじめに

地震動には、地盤構造や地形の不整形性の影響が含ま れており、中でも丘地形が原因で周囲より大きな地震動 が生じたと考えられる観測例が多数ある。最近の例では、 1993 年釧路沖地震の気象台記録、1995 年兵庫県南部地 震の神戸海洋気象台記録、1994 年 Northridge 地震の Tarzana の記録などがある。丘地形による増幅特性を考 慮して地震動予測を行ったり、逆に上記のような著名な 地震記録から丘地形によるサイト固有の増幅特性を除い て他の場所の建物の設計に供したりするには、丘地形の 地震波増幅特性を適切に把握することが重要である。

丘地形の増幅特性を把握するため、理論的手法による 解析的な説明が多く試みられているが、既往の理論解析 結果は、定性的傾向、即ち、丘頂部で基部に比べて地震 波が増幅する点、丘の高さ/幅比が大きいほど増幅が顕 著となる点などを説明できているが、観測記録に見られ る非常に大きな増幅率を定量的に説明できていないとい う問題点がある¹⁾²⁾³⁾。原因として、既往の解析例で は、2次元モデルや非常に単純な3次元モデルによる検 討が多く、地形の3次元性、入射波の複雑性、丘頂部の 風化、薄い低速度層の被覆、丘浅部の不均一な速度構造 などが十分に計算に反映されていない点が考えられる。

そこで本研究では、丘を覆う低速度の風化層や丘直下 の成層構造といった地盤の複雑性を考慮に入れて4種類 の3次元丘地形モデルを作成し、入射地震波として平面 入射および点震源の場合について、3次元丘地形が地震 波の増幅特性に及ぼす影響を検討した。また、3次元モ デルと2次元モデルとの比較も行った。解析手法は、有 限要素法を用いた2段階解法である領域縮小法⁴⁾⁵⁾⁶⁾ を用いた。なお、本論文は文献4)の内容に斜め入射の 場合も加え、また、アニメーションを用いて視覚的、直 感的理解が得られるようまとめたものである。

2. 領域縮小法

図1に解くべき原問題として、震源断層、広域的地盤、 局所地形を含む半無限領域を模式的に示す。このような 問題に対して、領域縮小法⁴⁾⁵⁾⁶⁾は、まず丘などの局 所地形を除いた単純な地盤で効率的に地震波を計算し、 次にこれを有限要素法で詳細にモデル化した局所地形モ デルに入力する2段階解法である。定式化の詳細は文献



図1 震源断層、広域的地盤、局所地形を含む原問題 Original problem including falut, regional ground and local geology





Two-step procedure of the Domain Reductuin Method

4) 5)に譲り、ここでは概要を記す。

図2に領域縮小法の計算手続きの概要を示す。仮想の 境界 Γ と有限要素一要素分だけ外側の境界 Γ_e を設定す る。ステップ I では、 Γ の内側は局所地形を取り除いた 地盤 Ω_0 に置き換え、広域的地盤のみで地震波を計算し、 Γ および Γ_e 上の変位 u_b^0 , u_e^0 を保存する。ステップ II では、 Γ の内側は局所地形を含む地盤 Ω に戻し、ステッ プ I で求めた u_b^0 , u_e^0 から、遠方の震源力 P_e と全く等価 な節点力として有効地震力 P_b^{eff} , P_e^{eff} に変換して入力波 とする。 Γ_e の外側の変位 w_e は広域的地盤のみの場合の 変位との残差となるように定式化されており、残差の波 動場が反射して再び Γ に内側に入ってくることがない限 り、計算領域を大幅に縮小しても Γ の内側では原問題の 地震波を正確に計算することができる。

3. 地盤モデルと震源モデル

3.1 地盤モデル

地形の3次元性、表層風化層や地層構造といった地盤 の複雑性が、丘地形の増幅特性に及ぼす影響について検 討を行うために、図3に示す表層風化層と2層地盤構造 の組合せを考慮した4つのモデルを設定した。丘地形は 軸対称形であり、丘半径をL、高さh=0.4L、地表平坦部 レベルの丘頂部直下に座標原点を設定し、原点からの水 平距離をLで除した無次元半径rにより高さ分布を h(1-3r²+2r³)で与えた。なお、ここで設定した地形の断 面の輪郭および形状比(丘の高さ/半幅)は、Geli et al. (1988)¹⁾において2次元解析で用いられたものと 同等である。図4に Model 4の有限要素モデルの外観を、 図5にX軸に沿った鉛直断面を示す。図3~図5中の点 線は有効地震力 P^{eff}の入力位置を示す。モデルの底面と 側面には、残差場を吸収するための粘性境界を配した。

地盤物性に関し、丘体部分のS波速度を β 、風化層を $\beta/2$ 、2層地盤の基盤層を2 β とし、P波速度をS波速 度の2倍に、密度一定に設定した。S波速度 β の媒質は 長さLに対して25個の四面体要素を配置した。1波長 あたり10要素必要とすると、表現できる最小のS波波 長は λ =10L/25となる。無次元振動数 η を丘直径2Lと 波長 λ = β/f の比で定義すると、 η =2L/ λ =2L·f/ β で あり、最大有効無次元振動数は η =5となる。S波速度 $\beta/2$ 、2 β の媒質は、長さLあたりそれぞれ50個、12.5 個の要素を配置して同じ振動数を確保した。無次元振動 数 η =5の具体的なイメージは、L=100m、 β =500m/sの丘 で f=12.5Hzとなり、L=500m、 β =1000m/sの丘では f=5Hzとなる。また、無次元時間 τ は時間Tを用いて τ



Vertical section of Model 4 including Y=0

= β / (2L)・T と表現される。なお、これらのモデルの要 素数は 250 万~400 万である。今回の解析では、減衰を 考慮していない。

3.2 震源モデル

図6に震源および入射波モデルを示す。AはX方向に 振幅を有する鉛直平面波で、無次元中心周期 0.35 の Ricker 波を2回積分した波形を用いた。B、CはXZ平



Modeling of source and input wave

面内のダブルカップルの点震源であり、紙面に鉛直奥行
 き方向のY軸正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)度、(0,30,90)
 度であり、滑り速度関数は無次元時間 0.35 の幅を有す
 る三角形とした。Aは一次元波動論により、Bは久田 図7
 7)の成層地盤のグリーン関数法を用いて、図3~5の
 点線の位置にある節点で変位波形を計算し保存した。

4. 丘地形の応答

4.1 平面波入射と点震源の比較

図7に、これらの4モデルに鉛直平面波Aを入射した ときの、X軸に沿った地表でのX成分の変位応答結果を 示す。振幅は、それぞれのモデルで丘と風化層がない場 合の地表面でのX成分の最大振幅で基準化した。同図よ り、丘地形により回折波が生じ、表層風化層や2層構造 による重複反射により、波動の増幅と継続時間の伸びが 生じる様子が見られる。

図8に、Model 1 の点震源B、Cに対する X 成分の変 位応答を示す。振幅は丘のない場合の丘頂点直下平坦部 位置の最大振幅で基準化した。点震源Bに対する応答は 平面波Aに対する応答(図7の1段目)に類似している。 一方、点震源Cに対する応答は、点震源が-Xの方向に 有るため、X方向に沿って非対称となり、+Xの斜面で 顕著な回折波が生じていることが観察される。



図7 平面波Aに対する4つのモデルの変位応答 Displcacement response of four hill model for plane wave A



図8 Model 1 の点震源B, Cに対する変位応答 Displacement responses of Model 1 for point source B and C

4.2 モデル化の次元の影響

図9に、X方向に振幅を有する平面波Aに対する Model 1 の応答の振動数特性について、2次元モデルと 3次元モデルの比較を示す。(a)は3次元モデルのX軸 に沿った地表6点でのX成分の増幅率と対応する2次元 モデルのSV波入射に対する増幅率の比較を、(b)は3 次元モデルのY軸に沿った地表6点でのX成分の増幅率 と,同様な2次元モデルでGeli et al. (1988)¹⁾が求め たSH入射による増幅率の比較を示す。

これらの図より、頂部付近(点1および2)では2次 元と3次元の増幅特性に顕著な違いが見られ、麓に近づ くにつれてそれらの差がなくなっていく一般的傾向が見 られる。これは、麓に近づくにつれて、モデルの次元を 問わず同一の半無限地盤となるため妥当な傾向である。 また、頂部付近ではSVおよびSHタイプの入射のいず れにおいても、η=1 あたりで3次元モデルの増幅率に ピークが見られ、そのピーク値は対応する2次元モデル に比べて3割増し程度となることに注意が必要である。

4.3 成層性と風化層の影響

図 10 に、平面波Aに対する丘頂部でのX成分の増幅 率を上述の4モデルで比較した結果を示す。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、地 形効果のみを表すModel 1の増幅率を基調にして変動す ることがわかる。一様地盤であるModel 1の増幅率が最 大約2倍であることと比べ、成層地盤あるいは風化層を 有するモデルの丘頂部での増幅率は5倍に達することよ り、地形効果に関する検討を行う場合には地盤構造の把 握が必須であることがわかる。

図 11 に点震源BによるX成分の地表面増幅率の分布 を、Model 1~4 と無次元振動数 η =1,2,3,4 の組合せで 示す。各モデルの増幅率は、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としている。 η =1 では丘頂部で増幅率が大きいが、高振動数になると複雑 な増幅率分布が生じ、Y=0 上と X=0 上では分布が異なり、 例えば η =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、 回折波の干渉によると考えられる同心円状のパターンが 認められ、Model 3,4 では層構造による重複反射波も加 わって波動干渉の傾向はさらに顕著となる。

図 12 は同様に点震源Cについて地表面の増幅率分布 を描いたものである。点震源Cは-X側にあるので、増 幅率分布はX軸に沿って対象とならず、点震源と反対側 の+X側の斜面で増幅率が大きくなる傾向が全般的に見 られる。これは図8(b)の時刻歴波形で見た傾向とも調



- (b) Y軸(X=0)上の点での2次元SH入射との比較
- 図9 3次元と2次元の増幅率の比較(Model 1) Amplification factor of 3D model and 2D model (Model 1)



図 10 丘頂部における増幅率の比較 Amplification factor at the top of hills

和的である。1987 年 Whittier Narrows 地震の時の Puente Hills において、震源と反対側の斜面で被害の 集中がみられたが⁸⁾、上記の計算結果はこの観測事実と 調和的である。

4.4 アニメーションによる地震波動伝播の観察

図 13 は点震源Cの場合の地表面のX成分変位のスナ ップショットを4つの丘モデルについて描いたものであ



Amplification factor at the surface for point source B

る。無次元時刻 $\tau = 0$ は破壊開始時間に相当する。主要動(赤)が丘の左側の麓に到達した時刻から描いている。

均質な丘と基盤構造を有する Model 3 を例に地震波動 の伝播を観察する。震源は丘の左側にあり、 $\tau = 2.20$ で球面状の主要動(赤)が丘の左端に到達する。 $\tau = 2.40$ で、丘の外側の平坦部レベルでは主要動が丘位置 を通過しつつあるが、丘頂部ではまだ主要動が到達して いない。 $\tau = 2.60$ で、平坦部位置では主要動は丘を通 過したが、丘内部では頂部に向かって地震波動が集中し ている。この集中した地震波動が頂部の地震応答を大き くすると考えられる。 $\tau = 2.60$ から $\tau = 3.00$ にかけて 一度頂部に集中した地震波動から回折波が生成され、麓 に向かって同心円状に回折波となって伝播していく様子 が観察される。 $\tau = 3.20$ 以降では、回折波が引き続き 外側に伝播していく様子と、基盤構造の存在による重複 反射が観察される。丘の存在により、重複反射波によっ ても同心円状の回折波が生じる。

他のモデルについても観察する。Model 3,4 では基盤 構造上面で波線が屈折して鉛直に近くなるが、Model 1,2 では地表面への波線の入射角がついたままであり、 従って地表面を通過する球面波の速度は遅くなる。 Model 1,2 では、 $\tau = 4.44$ 付近で頂部へ地震波動が集中 し、その後回折波が生成されて麓へ伝播する様子が見ら れる。基盤構造がないため、 $\tau = 4.84$ 以降で Model 3,4



Amplification factor at the surface for point source C

のような重複反射は見られない。

表層風化層を有する Model 2,4 について見てみると、 頂部に集中する地震波動が Model 1,3 に比べて強くな っている (Model 2 で τ =4.44、Model 4 で τ =2.60)。 また、斜面を下り降りる回折波も強くなっている (Model 2 で τ =4.64~5.04, Model 3 で τ =2.80~ 3.20)。速度の遅い風化層は、地震波動をトラップし、 頂部に集中する地震波動およびこれから生じる回折波を 強め、丘の応答を大きくする効果が顕著である。

5. まとめ

表層風化層と丘体直下の層構造の組合せを考慮した4 つの丘モデルと、鉛直平面波入射および点震源を用いた 検討ならびに2次元モデルとの比較を行い、丘地形の3 次元性や地盤の複雑性が地震波の増幅特性に与える影響 について、以下の知見を得た。

- 1) 丘地形による増幅効果は第一義的に回折波の干渉に より生じると考えられるが、表層風化層や層構造に よる重複反射により増幅は相乗的に増大するため、 地形効果の検討においては地盤構造の詳細なモデル 化が必須である。
- 斜め入射(点震源 C)の場合、震源と反対側の斜面で
 回折波が顕著となり、地震波の増幅率も大きくなる。



Snapshots of surface displacements of four hill models for point source $\ensuremath{\mathsf{C}}$ -2.5 0.0



- 3) 3次元モデルの丘頂部での増幅率は、2次元モデル による増幅率の3割増であった(均質な丘、無次元 振動数η=1のとき)。2次元モデルでは実際の3 次元地形の増幅率を過小評価する可能性がある。
- 4) 風化層は、地震波の増幅率を著しく増大させる効果 がある。
- 5) アニメーションによる地震波動伝播の観察により、 周囲の平坦部における波面の通過にやや遅れて丘頂 部に向かって地震波動が集中し、これが回折波とな って麓の方に伝播していく様子がわかった。風化層 はこれらの波動を強める効果があり、丘の応答を増 大させる。

なお、本検討で設定した、丘の形状、丘の高さ/半幅 比、風化層や層構造の設定、震源の位置やメカニズムは 限られた組合せのものであり、さらに一般的な丘の増幅 特性を定量化するには、これらのパラメーターを変動さ せる必要がある。また、本検討においては地盤の減衰を 含めていないため、今後の課題として減衰の影響も含め た検討が挙げられる。

参考文献

- Geli, L., P.Y. Bard and B. Jullien : The Effect of Topology on Earthquake Motion: A Review and New Results, Bulletin of the Seismological Society of Ameruca, Vol. 78, pp.42-63, 1988.
- 2) Kawase, H. : Earthquake Motion and Ground Conditions Part1,
 3.3 Effects of Surface and Subsurface Irregularities, pp.118-155,
 Edited and Published by The Architectual Institute of Japan,

1993.

- Bard, P.Y. : Effects of Surface Geology on Ground Motion: Recent Results and Remaining Issues, 10 th Europian Conference on Earthquake Engineering, pp.305-323, 1995.
- 吉村智昭、前田寿朗:領域縮小法による3次元丘地形の 地震応答解析、日本建築学会構造系論文集、第564号、 pp.55-62、2003年2月.
- 5) Bielak, J., K. Loukakis, Y. Hisada and C. Yoshimura : Domain Reduction Method for Three-Dimentional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No.3, pp.817-824, April 2003.
- 6) Yoshimura, C., J. Bielak, Y. Hisada and A. Fernandez : Domain Reduction Method for Three-Dimentional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part II: Verification and Applications, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No.3, pp.825-840, April 2003.
- 7) 久田嘉章:成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論 文集、第501号、pp.48-57、1997年11月.
- 8) Kawase, H., and K. Aki : Topography Effect at the Critical SV-wave Incident: Possible Explanation of Damage Pattern by the Whittier Narrows, California, Earthquake of 1 October 1987, Bulletin of the Seismological Society of Ameruca, Vol. 80, pp.1-22, 1990.