

山地形の地震動シミュレーション

栗田哲史¹・安中 正²・高橋 聡³・嶋田昌義³

¹正会員 工博 東電設計株式会社 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

²正会員 理修 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

³正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

山地形の地震動特性を明らかにするために、横須賀市内の山地においてアレー観測を行ってきている。観測記録はデータベース化され、震動特性の分析に活用されている。本研究では、この山地形を対象として3次元有限要素法による数値シミュレーションを実施した。観測記録を良く説明できる適切な解析モデルを作成し、山地形の増幅特性を評価する事を目的としている。

検討の結果、山地形を忠実にモデル化することによって観測記録を良く説明できるシミュレーションが可能となった。更に同モデルを用いて、山地形に地震波が入射した時に地震動がどのような特性を示すのかを解析的に評価した。

Key Words : topography, array observation, seismic ground motion, amplification characteristics

1. はじめに

一般的な土木構造物と異なり、電力施設は山地に構築されるものも少なくない。この様な施設の耐震性を考えるとき、その構造物が立地している地盤の震動特性が重要な要因となる。

山地形のような不整形地盤では、X,Y,Z 成分間のカップリングが発生し、複雑な増幅特性となることが知られている¹⁾。しかし、山地形における地震動特性に関する観測・解析両面での研究は十分であるとは言えない。山地形の増幅特性に関する最近の研究としては、1993年1月15日の釧路沖地震($M_j=7.8$)における、釧路気象台の観測記録に対する評価がある。気象台の87型地震計及びSMAC強震計(建築研究所)の記録に関する分析では、水平成層モデルでは説明できない事を指摘し、不整形FEMモデルを用いたシミュレーションで増幅特性が再現できることなどが示されている^{2)~4)}。

東京電力では横須賀市内の山地にアレー観測システムを構築し、1982年から観測を行ってきている。本研究では、1987年12月17日千葉県東方沖地震($M_j=6.7$)の記録を対象として、3次元の有限要素法による数値シミュレーションを実施した。観測記録を良く説明できる適切な解析モデルを作成することによって、山地形の増幅特性を評価する事を目的としている。

これまでの検討^{5),6)}では、①山頂の増幅率が非常に大きくなること、②地中の観測記録には反射波に

よって打ち消されたとされる周波数成分が存在すること、などが観測記録の分析によって判明している。本研究では、これらの事項について数値シミュレーションによる解析的な検討を行う。

2. アレー観測の概要

対象となる山地形の断面図およびアレー観測の地震計配置を図-1に示す。山頂の標高は約80mで、比較的低い小山である。地震計は山頂から3深度の鉛直アレーが組まれ、山腹および山麓に各1箇所設置されている。山麓の地震計 No.5 は山に近いが平坦部に位置し、岩盤上に地震計が設置されている。各地震計は水平2成分、鉛直1成分の計3成分のセンサーからなっている。アレー観測のトリガーはNo.1地震計である。5つの地震計は平面図上で直線状に位置し、山地形の同一鉛直断面内に収まる配置となっている。

対象地点の地盤物性値は、地震計設置時に行った地質調査によって表-1の様に得られている。基本的に岩質の地形であるが、表層に極薄い風化層が存在する。

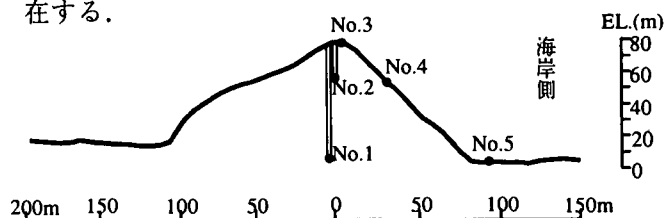
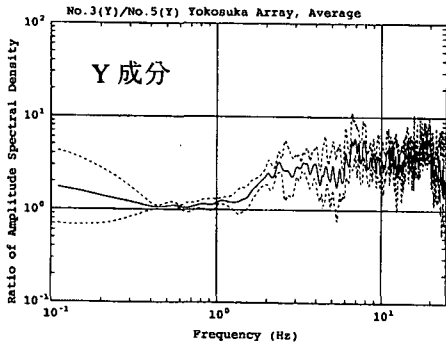
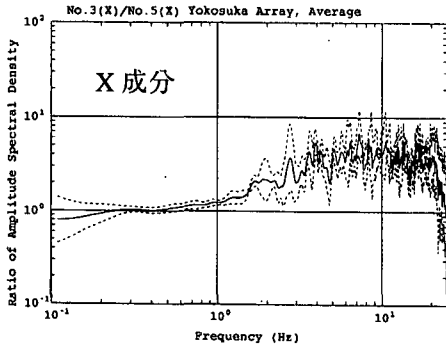


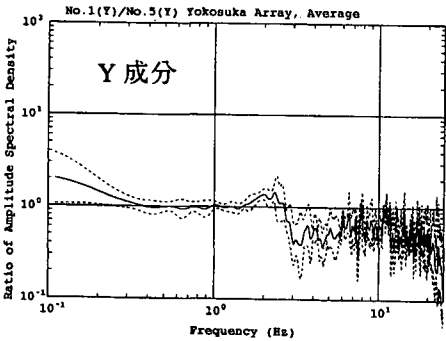
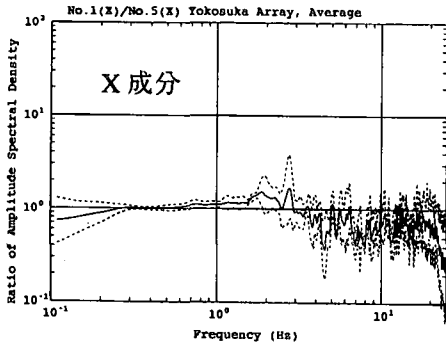
図-1 対象山地の断面と地震計の配置

表一 地盤調査結果

No.	深度 (m)	層厚 (m)	地質	Vp (m/s)	Vs (m/s)	密度 (g/cm ³)
1	-4	4	シルト質泥岩	1600	250	1.7
2	-8	4	シルト質泥岩	1600	400	1.8
3	-18	10	泥岩	1900	600	1.9
4	-58	30	砂岩	2000	700	1.9
5	-66	8	砂質凝灰岩	2000	700	1.9
6	∞	—	凝灰岩	2000	700	1.9

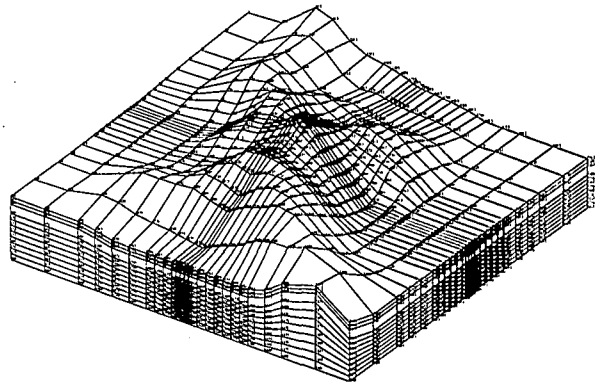


(2) No.3/No.5



(1) No.1/No.5

図一 観測記録のフーリエスペクトル比



図一 3次元解析モデル

自由地盤に近い No.5 地震計を規準として、No.1 および No.3 地震計の記録とのフーリエスペクトル比を計算した。図一に、観測記録の中で比較的加速度が大きい地震を選択して計算した、フーリエスペクトル比の幾何平均を示す。尚、フーリエスペクトル比は、加速度フーリエスペクトルに 0.2Hz の Parzen window で平滑化处理を施した後に比を計算している。

図中の実線が平均値、破線が平均値±標準偏差を表している。No.1 地震計に対する比では約 3Hz まで倍率 1.0 であるが、それ以上の周波数帯では 1 以下になっている。これは、No.1 地震計が山頂の真下に位置するため、山地形の中で発生した反射波によってこの周波数帯の成分がキャンセルされているものと思われる。No.3 地震計に対する比では、2Hz 以上の成分が増幅している。この状態は 20Hz 程度まで続いている。山頂は波が集中する事により、増幅率が大きくなるものと思われる。

3. 数値シミュレーション手法

数値シミュレーションは、図一に示す解析モデルを用いて 3 次元の有限要素法によって行った。境界条件は、底面・側面ともに粘性境界である。尚、側方境界については、2 次元の自由地盤モデルとの間にダッシュポットを配置している。要素には 8 節点要素を用いた。入射波は水平 2 成分および鉛直 1 成分で与えた。

入射波には、自由地盤に最も近い条件である No.5 地震計の記録（3 成分）を、以下の式により周波数領域で入射面(EL.-50m)まで引き戻した波を用いた。

$$\mathbf{I}(\omega) = \mathbf{H}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{R}(\omega) \quad (1)$$

ここで、

$\mathbf{I}(\omega) = \{I_X, I_Y, I_Z\}^T$: 入射波、

$\mathbf{R}(\omega) = \{R_{5X}, R_{5Y}, R_{5Z}\}^T$: No.5 地震計の観測記録、

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{bmatrix} H_{5X/X} & H_{5X/Y} & H_{5X/Z} \\ H_{5Y/X} & H_{5Y/Y} & H_{5Y/Z} \\ H_{5Z/X} & H_{5Z/Y} & H_{5Z/Z} \end{bmatrix} : \text{入射波に}$$

対する No.5 位置の応答の理論伝達関数
(先の解析モデル使用)

を表している。

解析では、各要素に表-1 の物性値をそのまま与えた。また、減衰マトリックスは Rayleigh 減衰によって与え、 $f_0=2.24\text{Hz}$ と $f_1=13.0\text{Hz}$ において $h=1\%$ となるように設定した。

4. シミュレーション結果

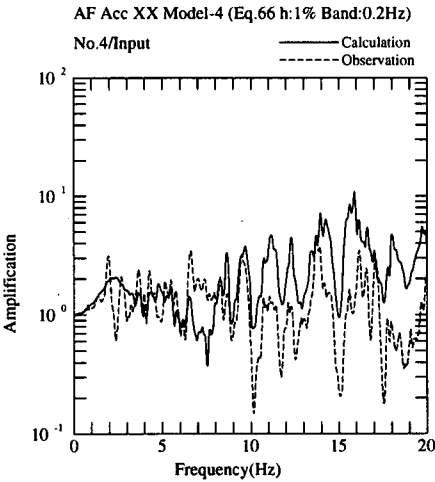
図-4 にシミュレーション結果および観測記録のフーリエスペクトル比の X 成分に関する比較を示す。ここで、解析値および観測値は、バンド幅 0.2Hz で平滑化処理している。両者は非常によく一致しており、ここで用いた解析モデルが実際の山地形を良

く再現できていることを示している。特に、山頂において 5Hz 以上の増幅率が 10 倍程度で一定となる様子、山頂直下の地中で打ち消される周波数成分が有る事などが忠実に表現できている。

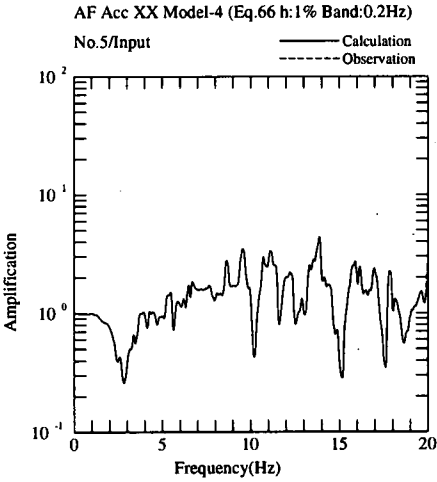
各地震計位置におけるシミュレーション結果と観測記録との加速度時刻歴に関する比較を図-5 に示す。ここでは、X 成分のみに着目している。図中の、実線は解析値、破線は観測値を表している。両者は非常に良く一致しており、精度良くシミュレートできている事が分かる。

次に、地中の地震波が反射波によって打ち消される現象に着目した。図-4(1)のフーリエスペクトル比で振幅比が 1 以下の深い谷になっている周波数を選び、その周波数における加速度ベクトルの分布を図-6 の通り求めた。分布図より、No.1 地震計の位置においてのみ振幅が小さくなっており、この点が振動の節となっている事が分かる。

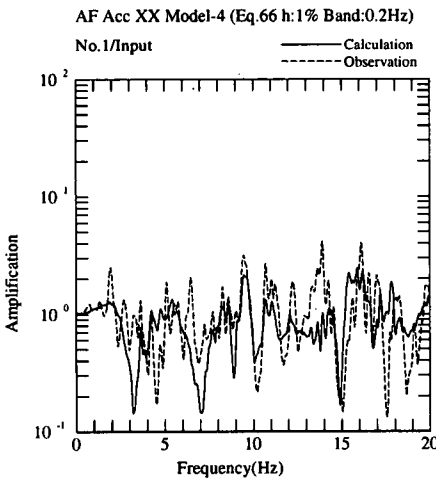
更に、山地形の形状による増幅特性を調べた。図-7 に中心周波数が 10Hz で最大振幅 10cm/s^2 の



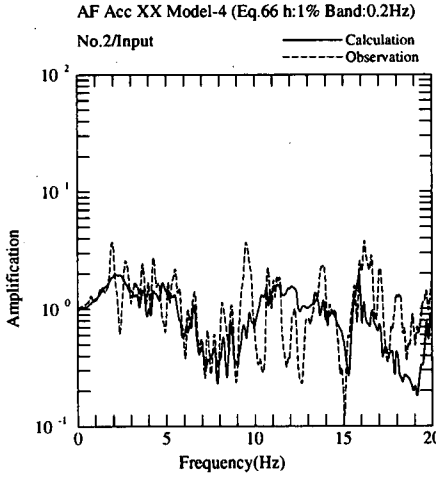
(4) No.4 の応答/入射波



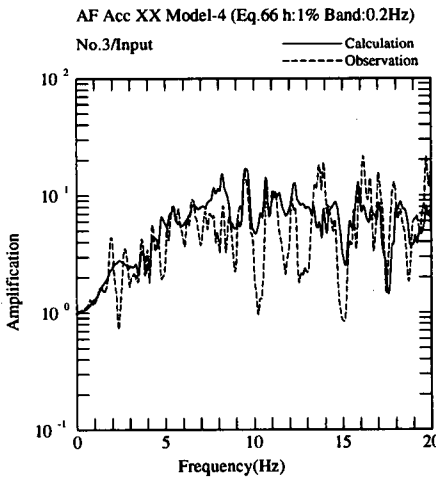
(5) No.5 の応答/入射波



(1) No.1 の応答/入射波



(2) No.2 の応答/入射波



(3) No.3 の応答/入射波

図-4 フーリエスペクトル比の比較 (X 成分)

Ricker wavelet を X 方向にのみ入射した時の、XZ 面内における最大加速度ベクトルの分布図を示す。図は各節点毎に得られたベクトルの最大値をプロットしたものである。図より、山頂付近において振幅が非常に大きくなる事が分かる。また、No.4 地震計が有る海岸側の急峻な斜面は、増幅の度合いが小さい。一方、反対側のなだらかな斜面は、非常に大きい増幅率を示している。これらの結果より、斜面の形状に応じて、増幅の様子が異なる事が分かる。

5. まとめ

山地形の増幅特性を把握する事を目的として、アレー観測記録に対する 3 次元有限要素法によるシミュレーションを実施した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ 山地形を忠実にモデル化し、観測記録を良く説明できるシミュレーションが可能となった。
- ・ 山頂付近に波が集中して、増幅率が大きくなる特性が再現できた。
- ・ 伝達関数が谷となる周波数では、地中地震計の位置が節となる挙動をしていることが分かった。
- ・ 山地形における斜面の形状に応じて、増幅の度合いが異なることが分かった。

謝辞：本研究の数値解析を実施するにあたり、(株)ユニックの前原達也 氏の協力を得た。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 編：動的解析と耐震設計 第 2 巻 動的解析の方法、技報堂出版、1989 年 7 月。
- 2) 太田外氣晴：釧路気象台における強震動と地盤・構造物の振動特性、日本建築学会構造系論文集、第 474 号、pp.77～85、1995 年 8 月。
- 3) 神田克久・源栄正人：不均質・不整形および入力コヒーレンスが地震動特性に及ぼす影響評価 ―釧路地方気象台敷地の場合―、日本建築学会構造系論文集、第 476 号、pp.85～94、1995 年 10 月。
- 4) 石田寛・佐々木透・丹羽正徳・北川良和・鹿嶋俊英：釧路地方気象台の鉛直アレー地震観測記録に見られる表層地盤の増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第 490 号、pp.91～100、1996 年 12 月。
- 5) 高橋聡 嶋田昌義・栗田哲史・安中正：山地形における地震動特性(その 1) ―アレー観測記録の分析―、土木学会 第 55 回年次学術講演会講演概要集、I 部門、平成 12 年 9 月。
- 6) 栗田哲史 安中正・高橋聡・嶋田昌義・前原達也：山地形における地震動特性(その 2) ―数値シミュレーション―、土木学会 第 55 回年次学術講演会講演概要集、I 部門、平成 12 年 9 月。

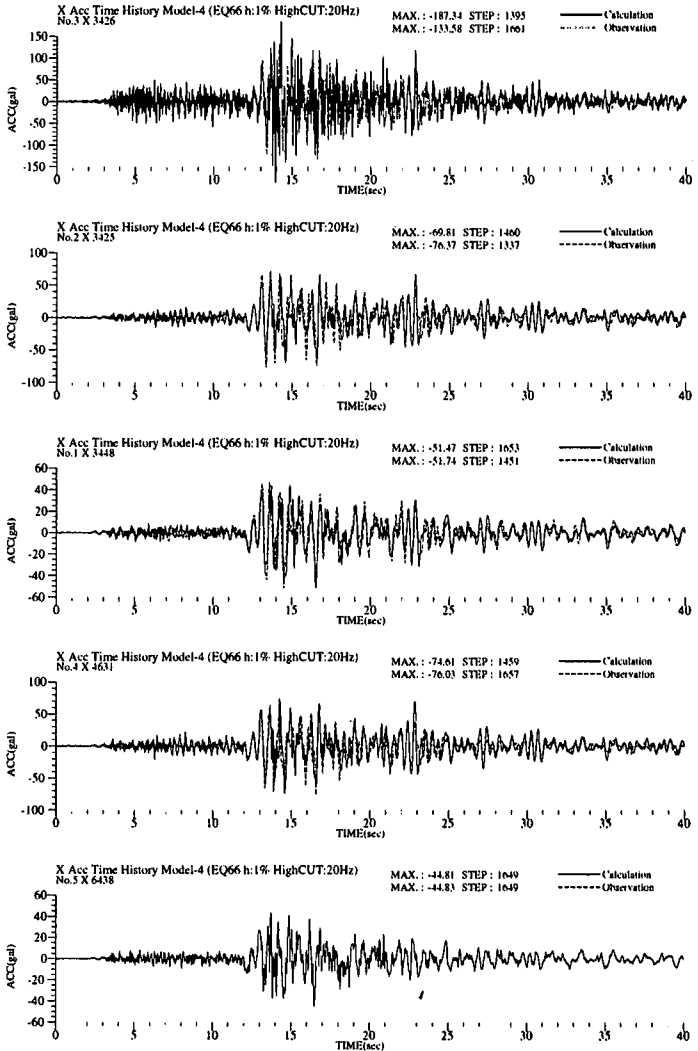


図-5 加速度時刻歴の比較 (X 成分)

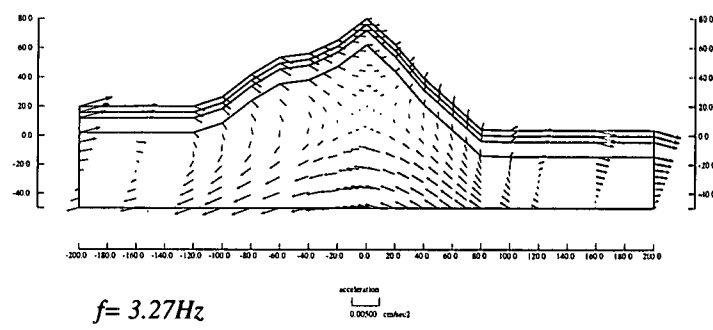


図-6 着目周波数における加速度ベクトル分布 (XZ 断面)

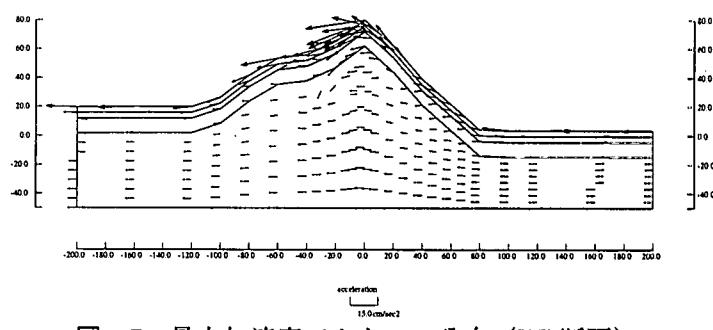


図-7 最大加速度ベクトルの分布 (XZ 断面)