1987年千葉県東方沖地震の地震動応答スペクトルにみられる
地盤特性の評価EVALUATION OF SITE EFFECTS ON RESPONSE SPECTRA OF GROUND
MOTIONS OBSERVED DURING THE 1987 CHIBA-KEN-TOHO-OKI EARTHQUAKE

翠川三郎*, 作川孝一**

Saburoh MIDORIKAWA and Koichi SAKUGAWA

Site effects on response spectra of ground motions observed at 173 sites during the 1987 Chiba-ken-toho-oki earthquake ($M=6.7$) were evaluated. The results indicate that 1) the site effects are significant on motions with periods longer than 0.2 second, 2) geomorphological land classification is more appropriate for evaluating the site effects than soil classification or surface geology, 3) the site amplifications at longer periods have stronger dependence on the average shear-wave velocity of ground, and 4) the average shear-wave velocity is a useful predictor for the site amplifications at periods of 0.7 to 1.5 seconds.

Keywords: strong ground motion, site effect, response spectrum, geomorphological land classification, average shear-wave velocity, the 1987 Chiba-ken-toho-oki earthquake

強震動, 地盤特性, 応答スペクトル, 地形分類, 平均S波速度, 1987年千葉県東方沖地震

1. はじめに

近い将来発生するであろう地震動の特性をあらかじめ予測しておくことは構造物の耐震設計上かつ地震防災対策上重要な問題のひとつである。地震動の強さの尺度としては最大振幅や応答スペクトルなどが用いられるが, 構造物の振動解析の際には応答スペクトルを用いたモード解析法がよく用いられる。そこで, 観測された強震記録を用いて, 応答スペクトルの特性に及ぼす地震規模や地盤条件の影響が統計的に解析されてきた^{1)~5)}。

これらの解析では, 地盤条件は地盤種別や表層地質により大まかに分類され, 各地盤分類での応答スペクトル特性の違いが示されている。しかし, これらの地盤分類は利用できる地盤の情報に基づいて分類されたもので, これらが地震動に及ぼす地盤の影響を評価するための最良の分類法とは限らないことも指摘されている^{3), 4), 6)}。

筆者らは, 1987年千葉県東方沖地震の多数の強震記録を用いて, 地盤条件が地表面最大加速度および最大速度に及ぼす影響を評価する際には, 従来用いられている地盤種別や表層地質よりも表層地質を地形分類で細分類

した地盤分類を用いるのがより適当であることを示した⁷⁾。本研究では, 前報⁷⁾で用いた1987年千葉県東方沖地震の強震記録を用いて, その応答スペクトルにみられる地盤特性の定量的評価を試みた。

2. 1987年千葉県東方沖地震の強震記録

1987年千葉県東方沖地震は $M6.7$ の中規模地震で, この地震の最大震度は勝浦, 千葉, 銚子での V であり, 住家の一部破損などの被害が千葉県東部で多くみられた⁸⁾。解析に用いた強震記録は31機関により観測された173地点でのものである。図-1に示すように, これらの地点は千葉県, 茨城県, 埼玉県, 東京都, 神奈川県, 静岡県に分布しているが, 東京湾沿岸に集中して分布している。観測点の地盤条件は岩盤から埋立地盤までさまざまである。距離は25km~180kmに分布しており, 50~100kmのものが比較的多い。なお, ここでは距離の定義として断層面⁹⁾からの最短距離を採用した。

各地点で用いられている地震計はさまざまであるため, 地震計の特性補正を行った。前報⁷⁾と同様に, ノイ

* 東京工業大学総理工社会開発工学専攻 助教授・博士(工学)

** 東京工業大学総理工社会開発工学専攻 大学院生

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Eng., Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Environmental Eng., Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

図一 1987年千葉県東方沖地震の震央、断層面の位置および強震観測点の分布

ズ成分を除去するために、周期0.1秒から3.5秒まで平坦で、周期0.06秒以下と7秒以上を完全に遮断するバンドパスフィルターを周波数領域でかけた。これらの処理を行った後、速度記録についてはさらに数値微分して加速度記録を求めた。補正された加速度記録の最大値は9~430 cm/s²に分布し、大部分は30~200 cm/s²の範囲にある。また、最大速度振幅では大部分が3~20 cm/sの範囲にある⁷⁾。最大速度が20 cm/s程度を超えないと地盤の非線形性の影響は顕著に現れないこと¹⁰⁾から、これらのデータの解析結果には地盤の非線形性の影響はあまり含まれないものと考えられる。

応答スペクトルは、地震動の方向性を考慮して、2次元応答スペクトルの形で計算した¹¹⁾。すなわち、水平2成分の加速度記録に対して一質点系の絶対加速度応答の時刻歴をそれぞれ計算し、それらの2乗和の平方根の最大値から絶対加速度応答スペクトルを求めた。減衰定数は5%とし、周期0.1~3秒の範囲で計算した。

3. 各地盤分類における地盤の増幅率

地震動の特性を支配する要因として、地盤条件の他に、震源特性と伝播経路特性がある。震源特性のひとつとして、震源からの方位依存性が指摘されているが、この地震の記録の最大振幅には方位依存性の影響は無視できるものと考えられる⁷⁾。そこで、伝播経路特性の主な要因である距離減衰の影響を補正して応答スペクトルに及ぼす地盤の影響を近似的に抽出することとした。

まず、観測点の地盤条件を地盤分類によって評価することとし、地盤分類ごとに距離減衰式を求めて各地盤分類での平均的な地盤の増幅率を評価した。用いたデータのほとんどは震源の大きさに比べて震源からの距離が大

表一 用いた地盤分類と対応するデータの数

地盤分類	データ数	細分類	データ数	細分類	データ数
地盤種別	1 2 3				
沖積層	107	泥がち 砂がち 礫がち	37 54 11	埋立地 三角州 砂州・自然堤防 扇状地	44 29 17 10
洪積層	41	ローム 軟岩	37 3	ローム台地 砂礫台地 丘陵地	24 6 7
第三紀ないしそれ以前	19			丘陵地 山地	12 2

図二 地盤種別ごとの地盤の増幅率

きいので、点震源を仮定した以下の式¹²⁾で絶対加速度応答スペクトル $S_a(T)$ と距離 X (km) の関係を回帰分析した。

$$\log S_a(T) = C_i(T) - \log X - k(T)X \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $k(T)$ は伝播経路での粘性減衰を表す項である。 $C_i(T)$ は補正項で、これを各地盤分類 i に対して求めた。

地盤の分類として、しばしば用いられる地盤種別の他に、地質区分、土質分類、地形分類も用いた。本研究で用いた地盤種別は、建築基準法施行令による地盤種別の定義に基づき、観測点のボーリング調査結果、各種地盤図などを用いて著者らの責任で定めたものである。また、各地点の地質区分等は国土庁土地分類図やそれに基づく国土数値情報¹³⁾を利用して定めた。ただし、全173地点の内、地盤種別ないし他の地盤分類のいずれかがわからなかった地点もわずかながらある。表一に用いた地盤

分類と対応するデータ数を示す。

回帰分析より得られる各種地盤での補正項 $C_i(T)$ には震源のスペクトル特性も含まれる。そこで、各種地盤での補正項から基準となる地盤でのそれを引いて基準化した後、その真数をとって各種地盤の増幅率を表すこととした。地盤種別で地盤分類し、1種地盤を基準とした場合の結果を図-2に示す。周期0.1~0.15秒では各地盤種別の差はほとんどない。周期0.15~0.5秒では2種地盤と3種地盤の違いはほとんどないが、1種地盤に対して1.5倍前後の増幅率を示す。それより長い周期では、2種地盤では周期0.6~1秒で2倍程度の増幅を示すのに対し、3種地盤では周期約1秒で4倍弱の増幅率を示す。2種地盤に対する3種地盤の増幅率の比は1.6倍前後である。

これらの結果を既往の研究の結果と比較して図-3に示す。なお、片山ら⁴⁾の用いた地盤種別は道路橋耐震設計指針に基づくもので、片山らのⅠ種地盤、Ⅱ種・Ⅲ種地盤およびⅣ種地盤はそれぞれ本研究の1種地盤、2種地盤および3種地盤におおむね相当する。本研究の結果は、片山らの結果とおおむね一致する。3種地盤の周期1.5秒以上の範囲では本研究の結果の方が大きい。これは本研究では堆積層の厚い関東平野でのデータのみを用いたためとも考えられる。図には、建築基準法の振動特性係数を1種地盤のそれで基準化したものも示してある。これらは、本研究の結果に比べて周期0.2~1.5秒程度の範囲で地盤の影響を小さく評価している傾向にあ

図-3 地盤種別ごとの地盤の増幅率（既往の結果との比較）

るが、それ以外の周期では両者はおおむね対応している。

地質区分を用いて、沖積地盤、洪積地盤、第三紀ないしそれ以前の地盤に地盤分類し、第三紀ないしそれ以前の地盤を基準とした場合の増幅率を図-4に示す。周期0.1~0.25秒では沖積地盤と洪積地盤の差はほとんどなく、1.5倍前後の増幅率を示す。それより長い周期では、洪積地盤では増幅率は周期によらず1.5倍前後の値を示すのに対して、沖積地盤では周期1秒で増幅率は3倍を示し、洪積地盤に比べて最大で2倍の値を示す。

沖積地盤および洪積地盤を表層土質で細分類した場合の増幅率を図-5に示す。沖積地盤では、砂がち（砂質）

図-4 表層地質ごとの地盤の増幅率

図-5 土質分類ごとの地盤の増幅率

図—6 地形分類ごとの地盤の増幅率

地盤で増幅率が大きく、前述の3種地盤の場合とほぼ同じ結果を示す。増幅率は泥がち（粘土質）地盤ではやや小さく、礫がち（礫質）地盤ではさらに小さく、洪積のローム地盤と同様に周期によらず1.6倍程度の値を示す。洪積の軟岩では増幅率は小さく、0.8～1.5の値を示す。

沖積、洪積、第三紀ないしそれ以前の地盤を地形分類で細分類した場合の増幅率を図—6に示す。第三紀ないしそれ以前の地盤である山地と丘陵地の内、山地でのデータ数が少ないので、丘陵地を基準として示してある。山地では周期0.15秒以下では増幅率は1をやや上回るが、周期が増大するにつれて増幅率は減少し、周期0.5秒以上では増幅率の大きい埋立地等に比べて1/10程度の値を示す。洪積地盤では地形ごとの違いは小さく、増幅率は周期によらず1.3程度の値を示す。沖積地盤の内、扇状地では洪積地盤と同様の値を示し、砂州・自然堤防、三角州、埋立地の順で増幅率は増大していく。ただし、周期0.3秒程度以下では地形ごとの違いはほとんどなく、1.5前後の値を示す。いずれの地盤分類の場合でも、地盤ごとの増幅率の違いは、短周期では小さく、長周期で大きくなる傾向にある。

得られた回帰式による予測値に対する観測値の比を求め、その対数の標準偏差を図—7に示す。地盤種別で分類した場合と表層地質で分類した場合は標準偏差はほとんどかわらない。表層地質を土質で細分類した場合にもあまり改善されない。地形で細分類した場合には、分類数が9種類に増えたとはいえ、標準偏差はかなり小さ

図—7 回帰式の標準偏差の比較

くなり、応答スペクトルに及ぼす地盤条件の影響を評価するために地形分類がより適当であることを示唆している。

本研究で用いた土地分類図は国土調査法による土地分類調査を各県別単位にまとめた中縮尺（10万ないし20万分の1）のものである¹⁴⁾。国土調査法では、地形の成因論で地形の分類項目が決められ、地形的に等質性のある広がりを受けた形成過程を基礎とした地形分類がなされている¹⁵⁾。したがって、この地形分類は、単なる形態的な分類ではなく、地盤の形成過程を反映したものであり、ある程度の深さまでの地盤の構造を反映したものと考えられる。

一般に、山地、丘陵地、台地、低地と、標高が低くなるにつれて地盤が軟弱となり、低地の中では、扇状地、自然堤防、三角州と、河川の下流で形成される地形ほど軟弱となる¹⁶⁾。実際、深さ30mまでの地盤の平均S波速度は地形ごとにある程度まとまっており、前述の順番で各地形の地盤の平均S波速度は小さくなっている¹⁷⁾。地盤の平均S波速度は、平均的には、低地で200～300 m/s、台地で300～400 m/sの値を示す。第三紀またはそれ以前の丘陵地は、そのほとんどが新第三紀の堆積地盤で、平均S波速度は平均的には500 m/s程度と考えられる¹⁷⁾。

山地のデータは、1地点は古生代の岩盤上に、他の1地点は新第三紀の火山岩上に位置し、S波速度で1 km/sないしそれ以上の硬い岩が地表近くに存在している。山地のデータは2地点のみで、これら2地点が山地の地盤を代表している保証はないが、山地に比べ丘陵地では堆積作用がより強いので表層地盤の層厚がより厚いと考えられることや、山地では先第三紀の岩盤や硬質な火山岩の占める割合が比較的多いことから、山地と丘陵地で地盤のS波速度に大きな相違が生ずることは一般的

図—8 回帰式による加速度応答スペクトル

とも考えられる。

後に述べる地盤のS波速度と増幅率の相関から、この地形ごとの地盤のS波速度の違いは、低地から台地、丘陵地になるにつれて増幅率が小さくなり、山地では大幅に小さくなるという前述の結果を定性的にはよく説明しており、地形分類が地盤の増幅率を評価する指標として適当であることに一つの物理的根拠を与えるものである。

地形分類の場合に得られた回帰式に距離 20 km を代入して得られる応答スペクトルを図—8 に示す。短周期では砂州・自然堤防で振幅が大きく、長周期では埋立地で振幅が大きい。スペクトル形状は、埋立地や三角州では周期 0.8 秒前後まで加速度応答量はおおむね一定であるが、それ以外の沖積の地形や洪積の地形では周期 0.3 ~ 0.5 秒以上で振幅は周期とともに減少する。第三紀ないしそれ以前の地形では周期 0.15 ~ 0.2 秒以上で振幅は周期とともに減少する。

参考までに、各地盤分類を行った場合に得られた距離減衰係数 $k(T)$ の値を図—9 に示す。関東地域での地震記録から得られた既往の減衰係数^{(18), (19)}も図に示してある。地盤種別、表層地質、土質分類の場合には $k(T)$ はおおむね周期によらず一定の傾向を示す。地形分類の場合には、周期とともに減少する傾向がみられ、周期 0.3 秒以上では他の場合に比べ小さい。

用いた応答スペクトルと距離の関係にばらつきが小さいことや用いたデータの距離が比較的狭い範囲に分布していることから、今回の回帰分析ではいずれの場合にも得られた $k(T)$ の値の信頼性は高いとはいえない。そこで、どちらの傾向が実際の距離減衰特性を示し

図—9 距離減衰係数 $k(T)$ の比較

ているのか断定するのは困難であるが、いずれの場合でも距離減衰係数の値は既往の結果と大きな隔たりはない。なお、用いたデータの距離は、80 km 程度を中心として前後 30 km に全体の約 75 % が分布することから、距離減衰係数の値を多少変化させても得られる増幅率の結果に大きな変化は生じないものと考えられる。

4. 地盤の平均S波速度と地盤の増幅率の関係

地震動に及ぼす地盤の影響と密接に関係する物理量として、地盤のS波速度がある³⁾。従来より、地表からある深さ $[d]$ までの地盤の平均S波速度 $[AVS(d)]$ が地盤の増幅度を予測するための簡便な物理量であることが指摘されている^{7), (20)~(23)}、そこで、今回の記録を用いて応答スペクトルから得られた増幅率に対する $AVS(d)$ の影響を定量的に検討した。

173 観測点のうち深さ 50 m までのS波速度構造が推定可能な 41 地点について、 d を 10 m きざみで 10 m から 50 m に変化させて $AVS(d)$ を求めた。また、第三紀ないしそれ以前の丘陵地の距離減衰式からの値に対する観測値の比 $R(T)$ を各周期 T について求め、 $AVS(d)$ との関係が (2) 式のように対数で線形関係になるものと仮定して回帰式を求めた。

$$\log R(T) = a(T) \log AVS(d) + b(T) \pm c(T)$$

..... (2)

ここで、 $c(T)$ は標準偏差で、 $AVS(d)$ の単位は m/s である。各周期 T について、 $R(T)$ と各深さまでの $AVS(d)$ との回帰式を求め、最も高い相関を示す $AVS(d)$ の d を最適深さと呼び、最適深さ d での $AVS(d)$ と $R(T)$

表—2 地盤の増幅率と平均S波速度の関係式の各係数

周期 (秒)	係数 a	係数 b	標準偏差 c	相関係数	最適深さ d (m)
0.1	-0.43	1.17	0.19	0.48	50
0.15	-0.26	0.72	0.21	0.41	10
0.2	-0.35	0.96	0.21	0.52	10
0.3	-0.47	1.20	0.19	0.66	10
0.4	-0.45	1.23	0.22	0.59	10
0.6	-0.55	1.44	0.20	0.70	10
0.8	-0.81	2.18	0.14	0.88	20
1.0	-0.98	2.68	0.17	0.85	30
1.5	-0.77	2.15	0.16	0.76	50
2.0	-0.62	1.72	0.20	0.60	50
3.0	-0.70	2.02	0.20	0.65	50

図—10 増幅率の平均S波速度依存性および最適深さと周期の関係

について得られた各係数を表—2に示す。

相関係数が0.65を超える周期に着目すると、図—10に示すように、周期が長くなるほど、最適深さが深くなっている。これは、周期が長くなるほど、その周期領域を支配する地震波の波長が長くなり、より深い地盤の影響を受けることを示唆している。また、係数 $a(T)$ と周期の関係はバラツキがみられるが、全般的な傾向として $a(T)$ の絶対値は周期とともに増大している。

地盤の粘性減衰を無視すれば、増幅率は基盤に対する地盤のインピーダンス比に反比例し、係数 $a(T)$ はほぼ-1の値をとるものと期待される。解析結果は短周期になるほどこれよりも絶対値が小さくなる。すなわちS波速度の変化に対して鈍感となる傾向を示す。これは、短周期では地盤分類ごとの増幅率の違いが小さいという前章での結果とも対応している。この理由として、既に指摘されている²⁴⁾ように、地盤の粘性減衰によって短周期では地盤の増幅が抑えられることが考えられる。

深さ10 m, 30 m, 50 mまでの平均S波速度と増幅率の関係式の標準偏差を図—7にプロットした。深さによる標準偏差の違いは比較的小さいが、周期1秒前後では

深さ30 mの場合に偏差がやや小さい。各地盤分類の場合の標準偏差と比較すると、周期0.7秒から1.5秒の範囲では地形分類の場合に比べても標準偏差はかなり小さく、この周期範囲では平均S波速度が増幅率を推定する適当な指標であることがわかる。このことは最大速度に対する地盤の増幅率と平均S波速度が強い相関を示すという既往の結果とよく対応する^{7), 21)}。それ以外の周期では、地形分類の場合と同程度かやや大きな偏差を示し、平均S波速度が格別有力な指標であるとは言いにくい。

5. 結 論

1987年千葉県東方沖地震の際に173地点で得られた強震記録の応答スペクトル特性に及ぼす地盤条件の影響を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 各地盤での地盤の増幅率の相違は周期0.2秒以下では小さいが、周期が長くなるにつれて地盤ごとの相違が大きくなり、各地盤分類に対する平均的な増幅率の相違は10倍程度にまで達する場合がある。
- 2) 地盤の増幅率を評価するには、通常用いられている地盤種別や地質区分よりは、地質区分を地形分類で細分化した地盤分類を用いるのがより適当である。
- 3) 地盤の増幅率は、周期が長くなるほど、より深い地盤の平均S波速度に対して依存性がより強くなる傾向にある。
- 4) 周期0.7～1.5秒の範囲では、地盤の平均S波速度を用いると、地盤の増幅率をより精度良く評価できる。

謝 辞

本研究で用いた強震記録は、運輸省港湾技術研究所、大林組、科学技術庁防災科学技術研究所、鹿島建設、神奈川県、神奈川大学、熊谷組、建設省建築研究所、建設省土木研究所、佐藤工業、自治省消防研究所、清水建設、竹中工務店、鉄道総合技術研究所、電源開発、電力中央研究所、東急建設、東京ガス、東京工業大学、東京大学地震研究所、同生産技術研究所、東京電力、東京都土木研究所、同港湾局、同下水道局、西松建設、間組、フジタ、三井建設、三菱地所、早稲田大学の各機関（五十音順）により観測されたものである。地形分類の意味・解釈について早稲田大学若松加寿江氏よりご教示いただいた。本研究の一部は鹿島学術振興財団研究助成金によった。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土田 肇ほか3名：各種地盤における平均応答スペクトル、港湾技術研究所報告、Vol.12, No.4, pp.171～199, 1973.
- 2) Seed, H. B. et al. : Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.66, pp.221～243, 1976.
- 3) Mohraz, B. : A Study of Earthquake Response Spectra

- for Different Geological Conditions, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, pp. 915-935, 1976.
- 4) 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, No. 275, pp. 29-40, 1978.
 - 5) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之: 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, 第 166 号, 1985.
 - 6) Aki, K. : Local Site Effects on Strong Ground Motion, Earthquake Engineering & Soil Dynamics II -Recent Advances in Ground-Motion Evaluation, ASCE, pp. 103-155, 1988.
 - 7) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 442 号, pp. 71-78, 1992.
 - 8) 望月利男ほか 3 名: 1987 年千葉県東方沖地震調査一震度分布と被害の概要一, 総合都市研究, 第 35 号, pp. 5-31, 1988.
 - 9) 山田尚幸: 体積歪計で観測された 1987 年 12 月 17 日千葉県東方沖の地震, 地震学会講演予稿集, No. 1, p. 66, 1988.
 - 10) 時松孝次, 翠川三郎: 地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 388 号, pp. 131-137, 1988.
 - 11) 小林啓美, 長橋純男: 地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の特性, 日本建築学会論文報告集, 第 240 号, pp. 79-92, 1976.
 - 12) 武村雅之, 太田外気晴, 稗園成人: 地震動の平均応答スペクトルを評価する経験式の物理的基礎, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 375 号, pp. 1-9, 1987.
 - 13) 国土庁計画調整局, 国土地理院: 国土数値情報, 国土情報シリーズ 2, 大蔵省印刷局, 1987.
 - 14) 島 博保, 奥園誠之, 今村遼平: 土木技術者のための現地踏査, 鹿島出版, 1981.
 - 15) 大矢雅彦編: 地形分類の手法と展開, 古今書院, 1984.
 - 16) 池田俊雄: わかりやすい地盤地質学, 鹿島出版, 1986.
 - 17) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した地盤の平均 S 波速度の推定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 443 号, pp. 65-71, 1993.
 - 18) 長橋純男: 関東地方周辺域における地震動短周期成分の距離減衰特性, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 1, pp. 283-288, 1990.
 - 19) 木下繁夫: 南関東における強震動特性— $1/Q_s(f)$ —, 地震学会講演予稿集, No. 2, p. 121, 1992.
 - 20) Shima, E. : Seismic Microzoning Map of Tokyo, Proc. Second International Conf. Microzonation, Vol. 1, pp. 433-443, 1978.
 - 21) 翠川三郎: 地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定, 第 8 回地盤震動シンポジウム資料集, pp. 59-64, 1980.
 - 22) Joyner, W.B. and Fumal, T.E. : Use of Measured Shear-wave Velocity for Predicting Geologic Site Effects on Strong Ground Motion, Proc. Eighth WCEE, Vol. 2, pp. 777-783, 1984.
 - 23) Borchardt, R. et al. : Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, CA, Proc. Fourth International Conf. Seismic Zonation, Vol. 3, pp. 545-552, 1991.
 - 24) Takemura, M. et al. : Site Amplification of Swaves from Strong Motion Records in Special Relation to Surface Geology, J. Phys. Earth, Vol. 39, pp. 537-552, 1991.

(1992 年 9 月 7 日原稿受理, 1993 年 2 月 8 日採用決定)