

18. 地形が地震被害に及ぼす影響について

九州電力株式会社 佐々木 有 三
筑波大学・構造工学系 藤野 陽 三
地震研究所 伯野 元 彦

(昭和 53 年 4 月 28 日受理)

1. ま え が き

地震による構造物の被害の要因は複雑多岐にわたるであろう。例えば軟弱な地盤上の構造物、特に木造家屋が地震の際に大きな被害を受けてきたことはよく知られた事実であるし、地震動の強弱及び構造物の強度が被害に影響することは言うまでもない。

以上のような震害の原因の他に最近構造物の建設されている地点の周辺地形もその要因となり得るのではないかとされている。震害においてこの地形が影響しているのではないかと思われる 1 つの例として 1976 年 5 月 6 日の北イタリア地震があげられよう (伯野・土岐, 1976)。この地震における構造物の被害分布は Fig. 1 に示すように東西 40 km, 南北 20 km ほどの範囲に及んでおり、特に被害のひどい地域の立地条件は次の 2 つに分類されると思われる。

すなわち

① Tagliamento 河によってつくられた扇状地のうち山沿いの地域 (この中には特に被害のひどかった

Venzone, Gemona, Osoppo が含まれる)

② 山間部落のうち特に崖に近かったり急峻な丘の上にあたりするもの。

上の②で被害の大きかった Osoppo は町の東側は約 50 m の高さの岩山に接しており、西側も約 20 m の丘の上に一部接しており東西から丘にはさまれている区域である。興味深いのはこの区域からわずか数 10 m 離れただけで何の被害もないという点である。また Gemona は Fig. 2 に示すように比較的硬い地盤が丘を形成しその裾野に礫混り砂質土、さらに沖積層が続いている地域に建設された町であるが、硬い地盤にごく近い家屋群 (A)

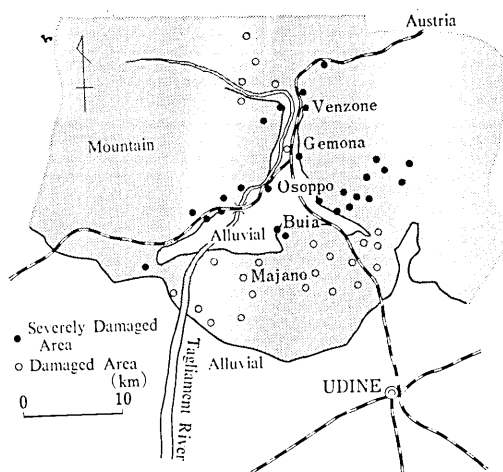


Fig. 1. Distribution of damage by 1976 North Italy Earthquake.

の被害が激しかったのに対し、丘から離れた同じ沖積層上の家屋群 (B) は何ともなかったということである。

このような震害における地形の影響についてすでにいくつかの研究がなされている。入倉 (1977) は不整形地盤周辺での地震波の増幅特性を実験、観測によって調査している。一方理論的研究として BOORE (1972) は有限差分方程式を用いて丘を形成する地形の増幅特性を求めている。さらに一歩進めたものとして地盤の不整形領域の形状が、半円あるいは半だ円の場合に対して入力がせん断波の問題を変数分離の方法により解析した TRIFUNAC (1973) の研究がある。また小堀 (1977) は境界値問題を見直すことによって、その境界での積分方程式に帰着させる方法を用いて任意の境界の形状をもつ不整形地盤の振動特性を研究している。

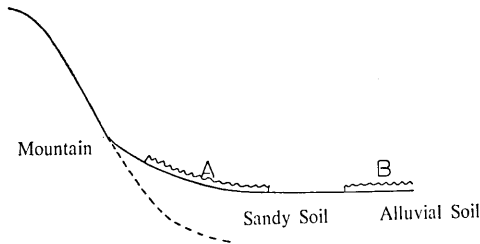


Fig. 2. Schematic Topography.

しかし、いずれの解析的手法でも多層不整形地盤のように複雑な境界条件をもつ場合には解析上の困難がともなう。

そこで本論文では、繁雑さが少なく、取り扱い易い有限要素法を用いて地形が地表地震動をどのように変えるかという見地から、いくつかの数値計算を行ない、定性的ではあるが、興味のある結果を得た。それは Fig. 2 の (A) のような場所において鉛直動が地形の影響により誘起される可能性が高いということである。

ここで本論文では、繁雑さが少なく、取り扱い易い有限要素法を用いて地形が地表地震動をどのように変えるかという見地から、いくつかの数値計算を行ない、定性的ではあるが、興味のある結果を得た。それは Fig. 2 の (A) のような場所において鉛直動が地形の影響により誘起される可能性が高いということである。

2. 解析方法

Fig. 2 に示されるような地盤をモデル化し (Fig. 4 下) 有限要素法による動的応答計算を行なった。

使用したプログラムは I. M. IDRISSE, J. LYSMER ら (1973) により開発された QUAD-4 である。このプログラムは土の各要素の諸定数 (例えば剛性、減衰定数) を歪レベルに応じて変化させる等価線形法を用いて非線形応答を求めるようになっている。しかし非弾性応答を求めるのは計算時間が大変かかるので、ここでは計算時間の制約から弾性応答を求めた。要素の大きさはモデル I (Fig. 4 下) の場合は波長の 1/5 以下にした。モデル II (Fig. 9 下), モデル III (Fig. 19) では波長の 1/8 以下にとった。これは L. KUHLEMEYER, J. LYSMER (1973) の報告によって示された解の条件を満たしている。また四角形要素, 三角形要素の形, 要素の縦横比などの適切な値は M. IDRISSE ら (1973) によって報告されている値を用いている。

入力地震波は水平 1 方向のみとし、エルセントロおよびタフトでの地震記録の基盤にもどしたデータを、北イタリア地震記録は震度のひどい区域のはずれから約 10 km 北の Tolmezzo において地表で取られたデータを用いた。

計算に用いた各地震波の最大加速度は各々、

- エルセントロ ~326 gal
 1940-5-18, NS 方向
- タフト (NS) ~173 gal
 1952-7-21, NS 方向
- 北イタリア (Tolmezzo) ~332 gal
 1976-5-6, NS 方向

である。

また地震波はモデルの基盤から S 波が鉛直上方に進行するものとする。

3. 数値計算 (モデル I)

Fig. 2 に示すような地形での地震動を有限要素法による動的解析によって求めるために Fig. 4 下のような 2 次元地盤モデルを考え、Fig. 3 に示すような要素分割を行った。要素数が増えると計算時間が幾何級数的に増大するので、このモデル I は丘を途中で切断せざるを得なかった。丘及び基盤を C 層、丘の裾から広がる沖積層を A, B 層とし、各層の地盤定数を Table 1 に示した。C 層での減衰定数 0.05 をはじめとする各々の減衰定数は地盤固有の内部減衰定数としては大きな値である。無限地盤への地震波動の逸散減衰が有限要素法では考慮できていないので、その逸散減衰効果を各要素の減衰定数に置き換えるため大きな値としたのである。

側壁の境界条件としては次の 2 つの場合を考えた。

- 1) 両端とも水平、上下方向拘束

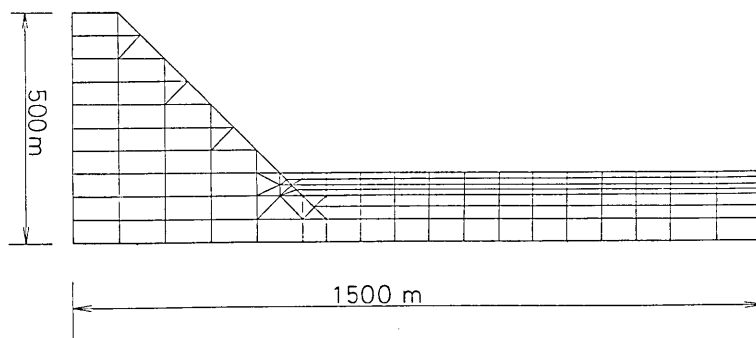


Fig. 3. Finite element model.

Table 1. Values of parameters in Model I.

	Weight per unit Volume	Poisson Ratio	Damping Coefficient	Shear Wave Velocity
Layer A	1.8 t/m ³	0.45	0.1	200 m/s
Layer B	2.0 "	0.40	0.08	400 "
Layer C	2.5 "	0.35	0.05	1000 "

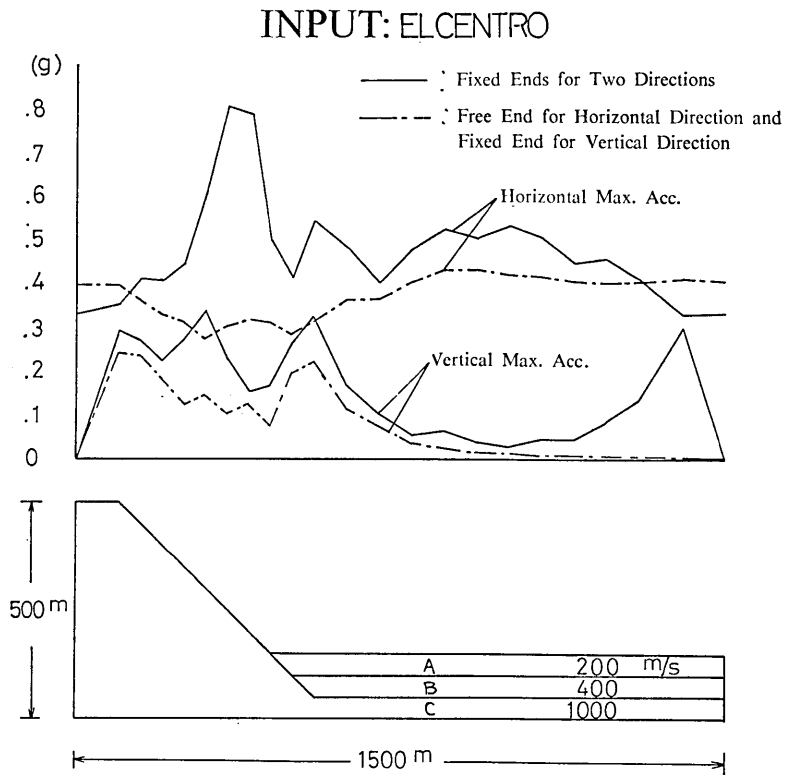


Fig. 4. Maximum acceleration at surface (Model I).

2) 両端とも水平方向自由, 上下方向拘束

エルセントロ, タフト, 北イタリア地震記録を基盤から主要動4秒間入射させた場合の境界条件の違いがどのように応答に影響するのか示したものが Figs. 4, 5, 6 である。

Figs. 4, 5, 6 の上のグラフは各々の地震記録を入力したときの地表における最大加速度である。実際の地盤の境界条件は上の 1), 2) の中間であろうから応答もおそらくこの間の値をとるものと考えられる。

Fig. 7 は沖積層の A 層をさらに軟らかくしたもので, せん断波速度を 100 m/s と仮定し, 応答計算を行なった結果である。

このモデルは丘を途中で切断したために起こる境界の影響が大きいと思われるが, Figs. 4, 5, 6, 7 に示しているように比較的軟弱な層, ならびに傾斜した硬い地盤上で, いずれの地震に対しても鉛直動がでていることは興味深い点である。

このモデルでは境界の影響が大きいと考えられるので応答への影響の少ないモデルを次に考えた。

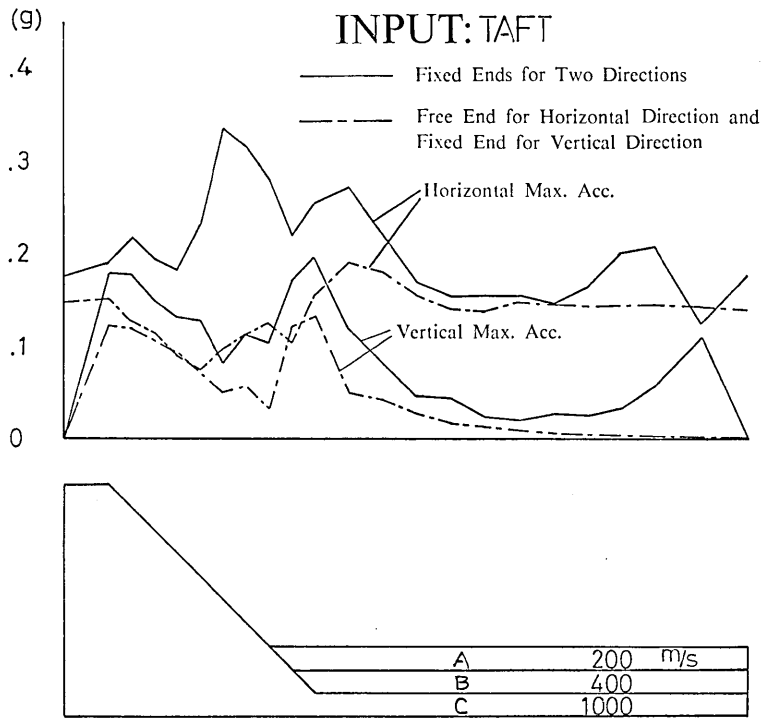


Fig. 5. Maximum acceleration at surface (Model I).

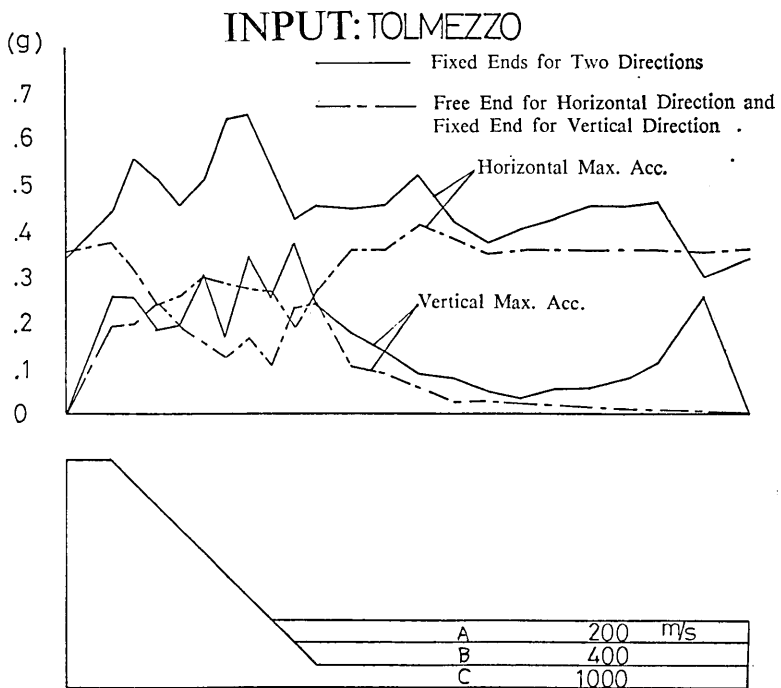


Fig. 6. Maximum acceleration at surface (Model I).

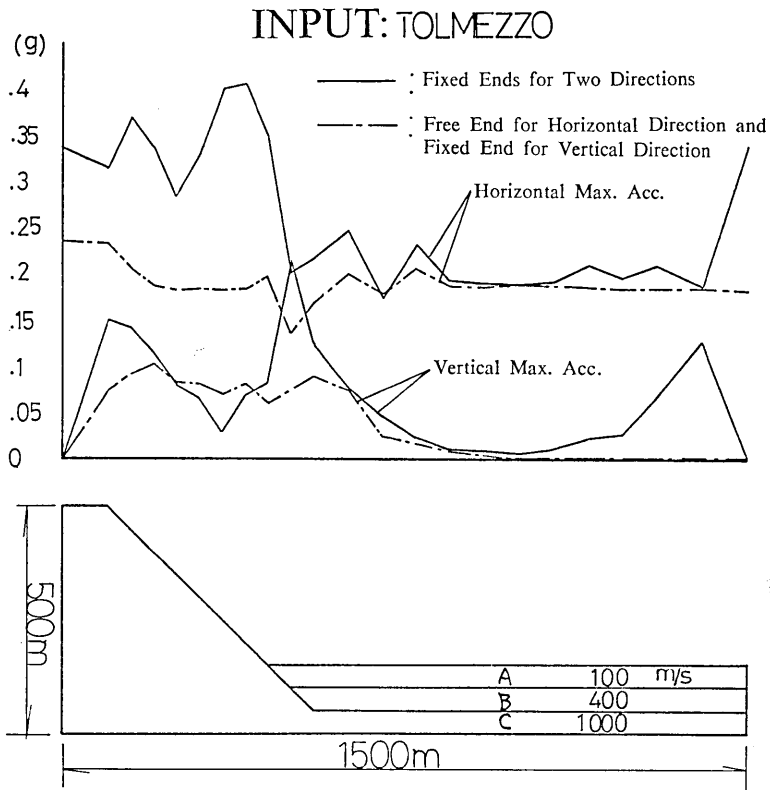


Fig. 7. Maximum acceleration at surface (Model I).

4. 数値計算 (モデル II)

このモデルはモデル I を縦横ともに縮小し硬い岩から成る丘をすっぽり含む形である。このモデル II を図示したのが Fig. 9 下である。

モデル I では各要素の大きさをせん断波の波長の 1/5 以下としたが、モデル II では L. KUHLEMEYER ら (1973) の提案する波長の 1/8 以下としたので 10 Hz までの波動の伝播は比較的精度よく求まることになる。要素分割を示したのが Fig. 8 である。

地盤の物性値は Table 2 に示す。この表のようにモデル II では軟弱層を A 層だけとしている。基盤及び丘の部分はモデル I と同じ物性値を用いている。

両端の境界は水平方向、上下方向の 2 方向とも拘束としている。しかしながら境界の影響をできるだけ少なくするため、Fig. 9 のモデルの水平距離を最初十分にとり地表の応答加速度 (特に山裾の部分) を求め、この水平距離を次第に縮小していき、その都度、丘の裾での応答と比較しながら、許容できるモデルの水平距離 (すなわち境界の位置) を決めた。

このモデル II において斜面の角度を 45° と固定し、軟弱層の厚さを変えてエルセントロ地震波の主要部を 4 秒間入力し、地表の水平、鉛直最大加速度を求めたのが Fig. 9 であ

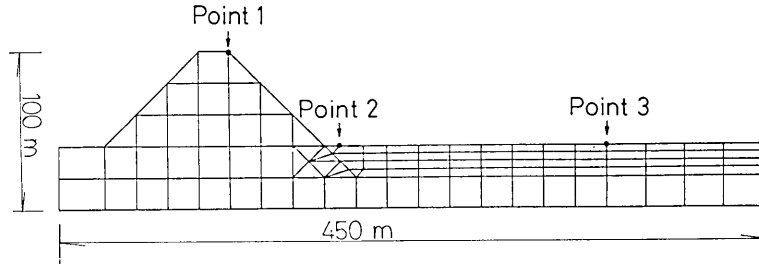


Fig. 8. Finite element model.

Table 2. Values of parameters in Model II.

	Weight per unit Volume	Poisson Ratio	Damping Coefficient	Shear Wave Velocity
Layer A	1.8 t/m ³	0.45	0.1	200 m/s
Layer B	2.5 "	0.35	0.05	1000 "

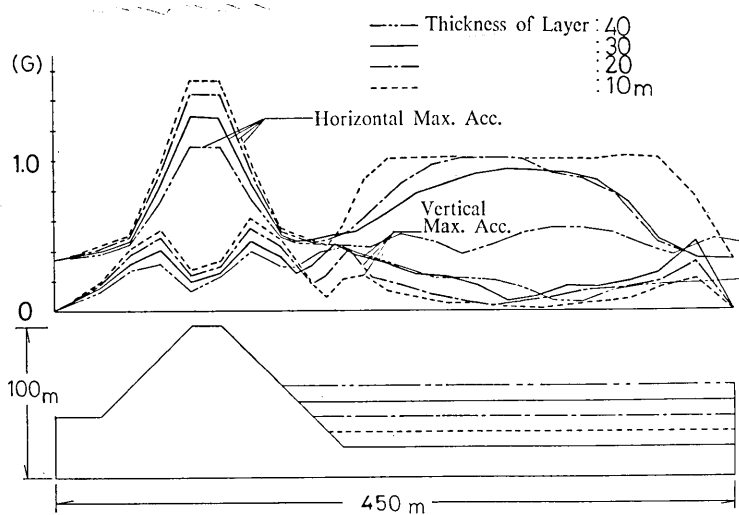


Fig. 9. Maximum acceleration at surface (Model II).

る。この図において二点鎖線、実線、鎖線、破線は各々、表層の厚さを 40 m, 30 m, 20 m, 10 m としたときの最大加速度分布を示す。この結果、いずれの軟弱層厚の場合も軟弱層の丘に近い場所 (Fig. 8 の Point 2) では鉛直動が起きているのが認められる。

誘起される鉛直動は軟弱層が厚くなるに従って大きくなるようである。これを明らかにするために軟弱層の丘に近い地点における鉛直動の水平動に対する比 β を $\beta = \text{最大鉛直加速度} / \text{最大水平加速度}$ と定義し、この β の値を 3 種類の地震波について求めたものが

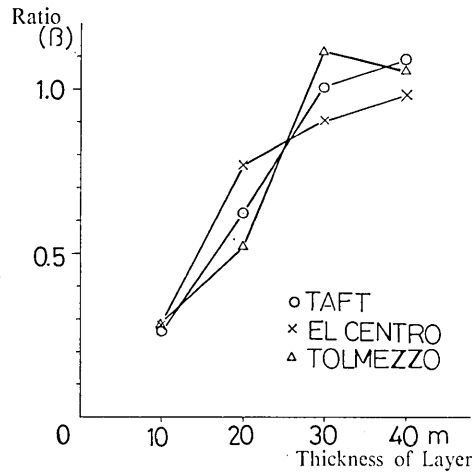


Fig. 10. Ratios of vertical to horizontal maximum acceleration for various thicknesses.

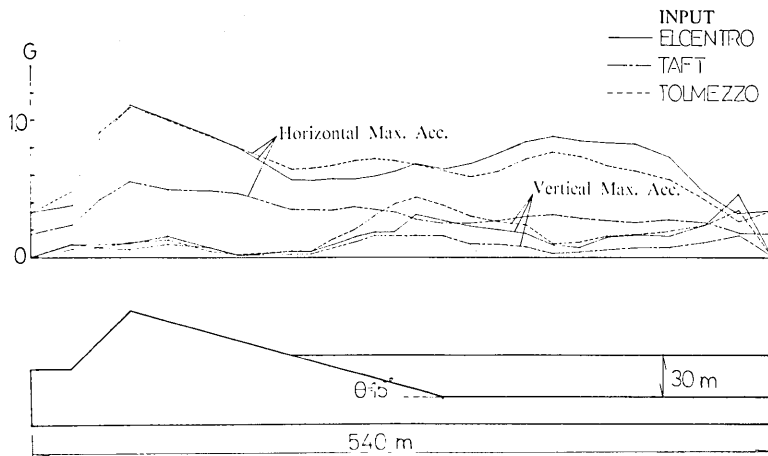


Fig. 11. Maximum acceleration at surface (Model II).

Fig. 10 である。入力地震波により増加率は多少変わるが、ある層厚までは軟弱層が厚くなるに従い、鉛直加速度が水平加速度に比して大きな値をとるようになる。ただし、軟弱層厚がある値を越えると鉛直加速度と水平加速度の比 β は頭打ちの傾向を示す。いずれにせよ、概して軟弱層が厚いと鉛直動が誘起され易いということがわかった。

また Fig. 9 において丘の両斜面上においても鉛直動が大きく出ていることも注目すべきであろう。

次に斜面の角度がどのように応答に影響を及ぼすかを調べるため軟弱層厚を 20 m と固定し、斜面の角度を 45° から $15^\circ, 30^\circ, 75^\circ$ と変化させた場合の地表の最大加速度分布を

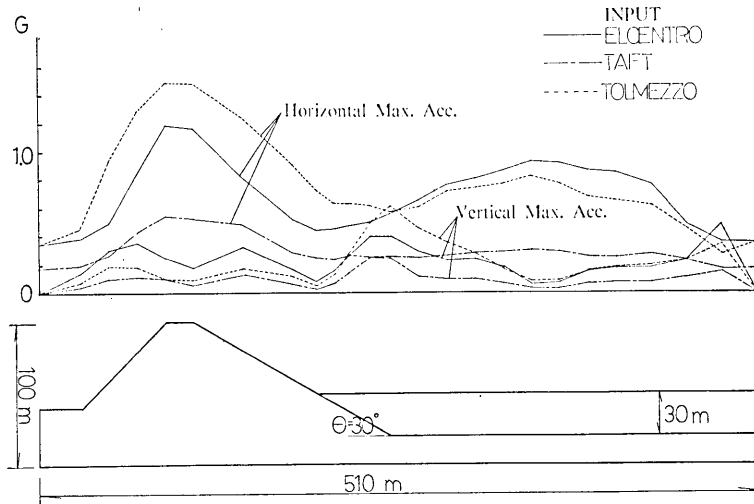


Fig. 12. Maximum acceleration at surface (Model II).

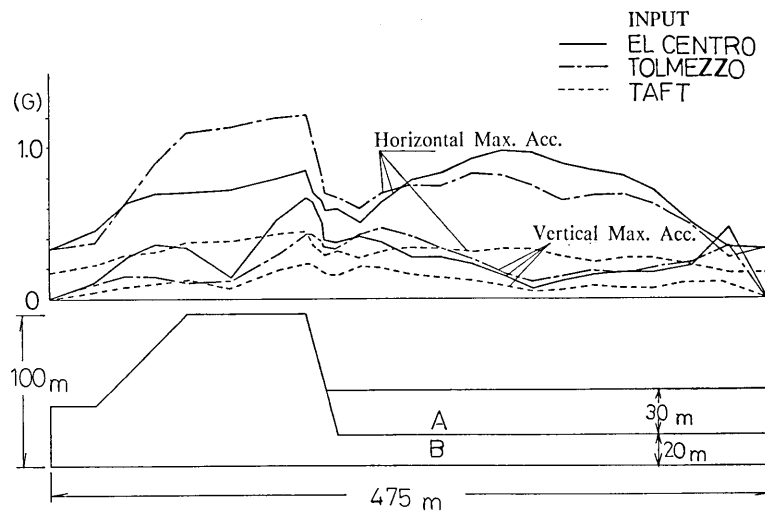


Fig. 13. Maximum acceleration at surface (Model II).

示したのが Figs. 11, 12, 13 である。この図からわかるように斜面の角度によっても鉛直動の起り方は敏感に変化しているようである。斜面の裾近くの軟弱層上の点 Point 2 (Fig. 8) におけるこの角度の変化と鉛直動との関係をさきに定義した β (\equiv 最大鉛直加速度/最大水平加速度) を使って示したのが Fig. 14 である。 β の値は斜面の角度 θ によって変化し、 $\theta=40\sim 50^\circ$ で最大値をとることが Fig. 14 よりわかる。

ここで求めている地表での鉛直加速度は基盤に水平一方向の入射地震動を入力として計算されたものである。実際の入射地震動には水平成分のみならず、かなりの鉛直成分が存

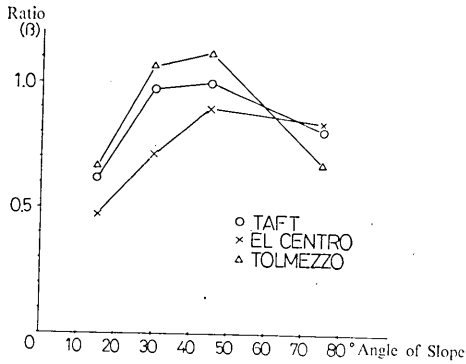


Fig. 14. Ratios of vertical to horizontal maximum accelerations for various angles of slope.

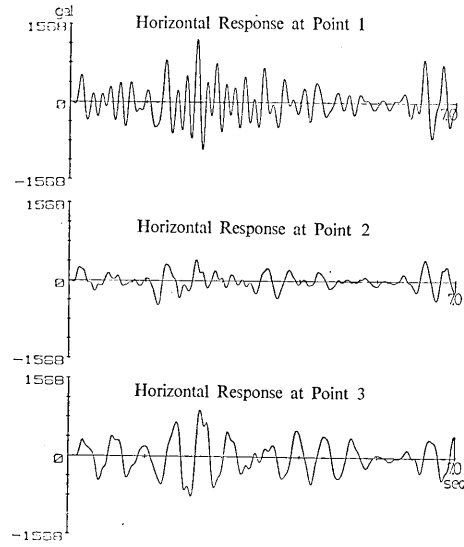


Fig. 15. Earthquake horizontal responses to El Centro incident wave.

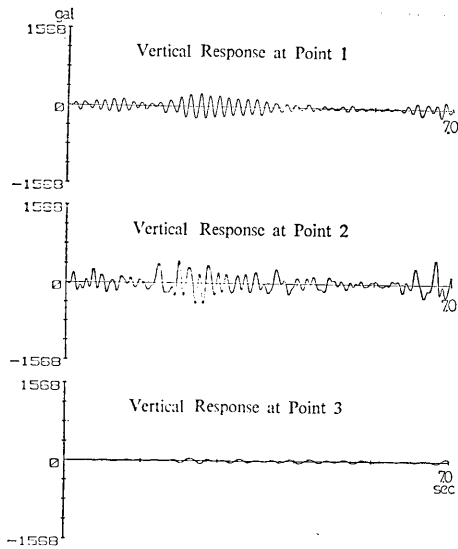


Fig. 16. Earthquake vertical responses to El Centro incident wave.

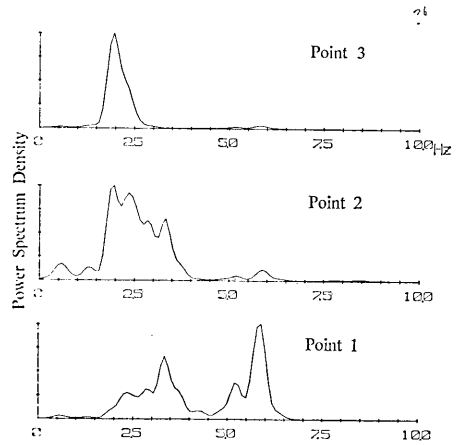


Fig. 17. Power spectrum of horizontal responses.

在する。このことを鑑みれば、本解析で得られた地表の鉛直加速度は実際に生じうるであろう値をかなり下回ったものであるといえよう。したがって、Figs. 10, 14 の β 値は実際にはもっと大きな値となることが予想される。

ちなみにエルセントロの入射地震動を7秒間入力したときのこのモデルII(斜面勾配45°, 軟弱層の厚さ20mとしたもの)の丘の上, 裾, 平地の3点(Fig. 8におけるPoints 1, 2, 3)における水平鉛直方向の加速度応答を示したのがFigs. 15, 16である. また各々の地点で加速度応答の周波数特性を求めたのがFigs. 17, 18である. 縦軸はパワースペクトル密度で各々の最大値を同じスケールとして表わしている. このように丘の裾では平地と山頂の周波数特性を重ね合わせたようになっている. これは丘の裾の軟弱層では丘の影響をうけて高い振動数が平地に比べて多くなるということである.

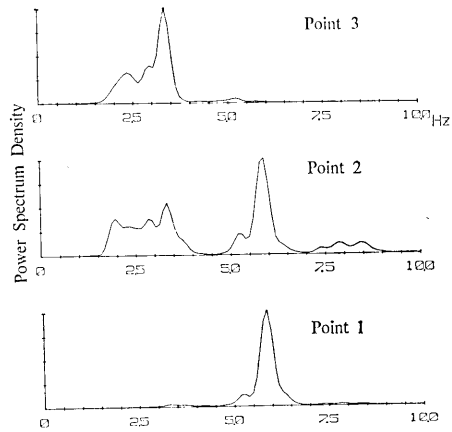


Fig. 18. Power spectrum of vertical responses.

5. 数値計算 (モデル III)

このモデルはモデル I, II の丘の部分がなく, 基盤と軟弱層からなる地形で Fig. 19 下に示す. 地盤の物性値はモデル II と同じである. エルセントロ地震を入力とし, 軟弱層と接する基盤の傾きを 90°, 60°, 30° と変化させたときの地表での最大応答加速度分布を示したものが Fig. 19 上である.

この図からわかるように, モデル I, II のような丘を成す地形よりも鉛直動の起こり方が激しいようである. また斜面の傾きにより上下動の生じる位置が異なっている. たとえ平地であっても地盤の性質が急変するような所では鉛直動が地形の影響により激しく発生することが有り得るということである.

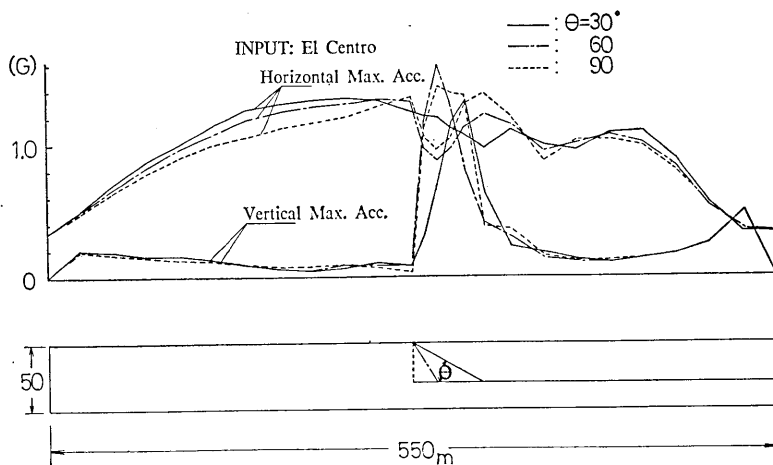


Fig. 19. Maximum acceleration at surface (Model III).

6. 考察ならびにあとがき

1976年北イタリア地震の被害分布の特徴を地形の影響という見地から捉えようとして幾つかの簡単な地盤モデル(モデル I, II)を用いて有限要素法による地震応答解析を行なった。その結果、

○丘の斜面、斜面に接する軟弱層では大きな鉛直動が生じる可能性が高い。

○丘裾の軟弱層で生じる鉛直動は軟弱層の厚さ、斜面の傾きと深い関係にある。ことがわかった。また、平坦な所でも地盤の剛性が急変するような場所(モデル III)においては軟弱層に大きな鉛直動が生じることが示された。

北イタリア地震による構造物被害の中で特に被害の大きかった地域では、本解析結果によれば鉛直動が特に大きかった地域ということになる。被害を受けた構造物はブロック、レンガを積み重ねたもので、これらの構造物は鉄筋コンクリート、木造構造物などに比べて鉛直方向の引張力に対する強度はあまり期待できないと考えられる。したがって、これらの構造物がある特定の地域で数多く破壊した1つの要因は、これらの地域で事実鉛直動が大きかったためではないかと推察される。

地形が地震被害に何らかの形で影響を及ぼすとうすうす感じている人は多いことと思う。著者のうち1人、伯野は1976年北イタリア地震被害調査に行き、あらためてそこに1つの例を見た。これをヒントにして簡単な数値計算を行い、興味のある結果を得た。勿論ここで扱ったのは地形が地震被害に及ぼす影響の1つの例であり、考えられるケースはこの他にもいくつもある。また本論では数値計算に頼ったが、実際に最も有効な方法はいろいろな地形の所での地震観測、常時微動観測結果による解析、あるいはゼラチン等で作った地形模型の振動実験であろう。これらについては今後の課題としておきたい。

現在地震危険度に関するマイクロゾーニングが東京都をはじめとして盛んに行なわれている。しかし、現時点ではこれらのマイクロゾーニングには“地形”というファクターはあまり考慮されていないようである。より緻密なマイクロゾーニングを作るためにも、地形が地震被害に及ぼす影響という見地からの広汎な研究調査が望まれていることを指摘したい。

文 献

- BOORE, D. M., 1972, A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**, 275-284.
- 伯野元彦・土岐憲三, 1976, 北イタリア(フリウリ)地震による被害調査, 土木学会誌, **61**, 11, 22-28.
- IDRISS, I. M., LYSMER, J., HWANG, R., and SEED, B. H., 1973, A Computer Program for Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element Procedures, Report No. EERC 73-16, *Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, California*, 1-67.
- 入倉孝次郎, 1977, 表層地盤による地震波の増巾特性への基盤地形の影響, 第5回地盤震動シンポジウム資料集, 日本建築学会, 1976,
- 小堀鐸二・篠崎祐三, 1977, 不整形地盤の振動特性, 地震, II, **30**, 2, 1-10.
- KUHLEMEYER, L., and LYSMER, J., 1973, Finite Element Method Accuracy for Wave Propagating Problems, *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **99**, SM 5, 421-427.

TRIFUNAC, M. D., 1973, Scattering of Plane Waves by a Semi-cylindrical Canyon, *Intl. J. Earth. Eng. Struct. Dynam.* **1**, 267-281.

18. *Effects of Topographical Features on Earthquake-Induced Damage — A Numerical Study —*

By Yuzo SASAKI,

Kyushu Electric Power Corporation,

Yozo FUJINO,

Institute of Structural Engineering, University of Tsukuba

and

Motohiko HAKUNO,

Earthquake Research Institute.

It has been recognized, to some extent, that certain topographical features change the nature of surface or near-surface earthquake ground motions. One may conjecture this from the distribution of earthquake-induced damage with respect to the area. From the viewpoint of topographical effects on earthquake damage, an example can be seen in the distribution of the earthquake-induced damage due to the 1976 North Italy Earthquake. There most of the severely damaged houses were located either on the slope of mountains or on the alluvial soil layers adjacent to the slopes.

To clarify the ground motion characteristics in such locations, a dynamic response analysis by the finite element method is carried out. In the analysis, two types of ground models are employed and the horizontal earthquake records at Tolmezzo, North Italy (1976), El Centro (1940), and Taft (1952) are used as incident waves. The principal result is that vertical ground motion is strongly induced on the slope of mountains and on the alluvial soft soil layer adjacent to mountains due to the topographical feature. The magnitude of the induced vertical motion on the alluvial layer is found to be rather sensitively dependent on the thickness of the layer and the angle of the slope.

The houses damaged by the North Italy Earthquake were mostly made of bricks or blocks piled on top of each other, and are considered to have little tensile strength for vertical loading. As a conclusion, the characteristic of the damage distribution in the North Italy Earthquake can be explained by the strong vertical motions induced by the topographical feature.
