

強震観測装置による松代群発地震記録の解析

後藤 尚男・土岐 憲三・横山 康夫
亀田 弘行・秋吉 卓

ANALYSIS OF MATSUSHIRO EARTHQUAKES RECORDED BY STRONG MOTION ACCELEROGRAPHS

By Hisao GOTO, Kenzo TOKI, Yasuo YOKOYAMA,
Hiroyuki KAMEDA and Takashi AKIYOSHI

Synopsis

In order to investigate the behavior of the ground in strong earthquakes, the observation of earthquakes have been carried out since June 1966 at four stations in the region of Matsushiro earthquakes. The spectral analysis was made about many strong earthquake records obtained at the sites with various ground structures and the vibrational characteristics of the ground were investigated from the view point of the earthquake engineering.

The microtremors were also recorded at the same stations, and their frequency distribution was calculated and compared with those for earthquakes.

1. 緒 言

構造物の地震応答に関する研究においては、入力となる地震動の特性が重要な研究課題となっている。このような研究は多くの強震記録の解析によってはじめて可能であり、SMAC等の強震計による地盤の震動観測が実施されているが、現在のところ十分な観測資料は得られていないようである。

松代群発地震は発生以来2年以上にわたって活動を続けており、地震学・地震工学の面から多くの研究者によって種々の観測が実施されている。

われわれは昭和41年6月以来、松代群発地震の発生地域にある地盤および橋りょうにおいて自然地震の観測を実施し、地表近くの深さ方向における地震動の変化の状況および自然地震による地盤と構造物の連成振動などに関する解析を行ってきたが、その結果についてはすでに報告している^{1),2),3),4),5),6)}。

ここでは硬さおよび構成の異なった4地点の地盤を選び起動器付の電磁式強震計による観測によって得た数多くの強震記録の解析結果について報告し、各種の地盤における強震の特性および松代群発地震のもつ耐震工学の面における特質について考察を加えた。また同一地点において実施した自然地震と常時微動の観測結果から両者の関連性について比較検討を行なった。

2. 震動観測の概要

構成の異なった各種の地盤における地震加速度の観測は、主として震度階IV以上の大きさの強震の記録をうることを目的として、Photo. 1にみるような電磁式強震計を用いて観測を実施した。この電磁式強震計はピックアップ、起動器、直流増幅器、制御器および3チャンネルデータレコーダーにより構成されている。ピックアップには速度型換振器に過減衰を与えた加速度変換器を用いたが、この換振器は固有振動数が2c/s

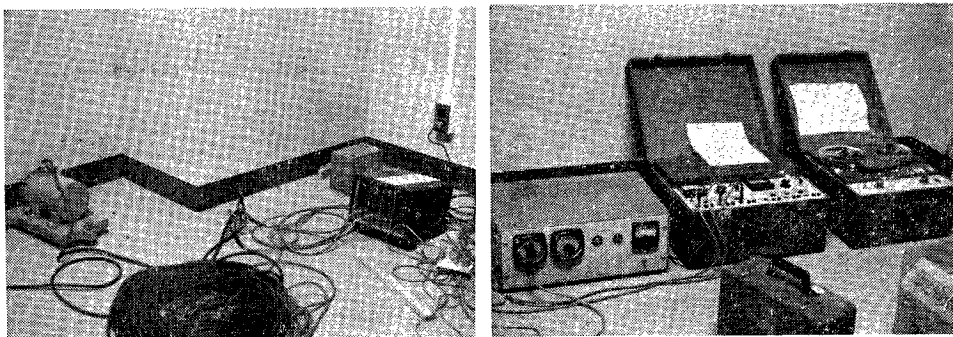


Photo. 1 General View of Strong Motion Accelerographs.



Fig. 1 Location of Earthquake Observation Sites.

で Fig. 2 に示した振動数特性からわかるように、0.2c/s から 30c/s までは一様な感度で地震の加速度を測定できるようにされたものである。

強震の観測は、制御器が起動感度約 5 gal（上下動）の起動器による信号を受けてから、約 0.5 sec 後にレコーダーへの録音を開始するように設定し、録音開始後 1～2 分間にわたる地震記録を収録した。

電磁式強震計によって地盤の震動加速度の観測を行なったのは、Fig. 1 に示した次の 4 地点であり、昭和 41 年 6 月以来下記の期間にわたって観測を実施してきた。

- 1) 信州大学工学部構内：長野市若里
昭和 41 年 6 月 13 日～同年 7 月 22 日
- 2) 国民宿舎松代荘：長野市松代町
昭和 41 年 7 月 23 日～同年 11 月 14 日
- 3) 万葉橋右岸：長野県埴科郡戸倉町
昭和 41 年 11 月 15 日～昭和 42 年 6 月 20 日
- 4) 長野県新庁舎：長野市南長野
昭和 42 年 6 月 21 日～同年 12 月現在観測続行中

観測点の地盤の概況の一部についてはすでに報告しているが、他の観測点の地盤との比較のためにここでも述べることにする。

信州大学工学部構内においては L. G. 平屋建の実験室内の厚さ 30 cm の床コンクリート上に換振器を設置したが、その地盤は Fig. 3(a) にみるように比較的硬い砂礫地盤の上に厚さ 8m 程度の軟かい粘土地盤が載ったものである。したがって建物の基礎はコンクリート杭（直径 30 cm，長さ 9 m）によって、下層の砂礫地盤に支持された杭基礎形式がとられている。

次に国民宿舎松代荘の観測点では建物から離れた位置にある物干場の床コンクリート上に換振器を設置した。その地点から約 25 m 離れた場所で行なわれたボーリングの結果は Fig. 3(b) のようであり、地盤は深さ 20 m 程度まではそのほとんどが N 値 5 以下のきわめて軟かい粘土質地盤であり、他の観測点の地盤とは相当異なっていて、いわゆる軟弱地盤の一種とみなせる。

また戸倉町の万葉橋観測点では千曲川の旧河川敷であった堤内地にある家屋内の半地下のコンクリート造貯蔵庫に換振器を設置したが、その地点から約 30 m

離れた場所で行なわれたボーリングの結果を示した Fig. 3(c) からわかるように、河川敷によくみられる砂礫地盤である。しかしこの観測点では旧河川敷の上に約 2 m 程度盛土した上に家屋が建っているため、自然地盤と比較すると表層の状態が異なり築堤に似た構造を示している。

一方、長野県新庁舎の観測点では昭和 42 年に竣工した地上 10 階、地下 1 階建の新庁舎の地下 1 階の床の上に換振器を設置したが、観測点付近で行なわれたボーリングの結果を示した Fig. 3(d) から、この地点は硬い砂礫地盤から構成されていることがわかる。なお換振器の設置位置は地下約 8 m 付近であり、自然地盤を 10 m 程掘削して建設した建物の基礎に直結しているものと考えられる。したがって他の 3 測点が自然地盤の地表に位置しているほぼ地表での地震動を記録しているのに比べると、この観測点で観測した記録は砂礫地盤の地下約 10 m での地震動に相当するものと考えてよさそうである。また大きな建物の基礎であるので、自然地盤と比較すると、建物による影響を受けることも当然考えられる。

上に述べた各観測点に電磁式強震計を設置して実施した震動観測によって収録した地震の数は数百にのぼ

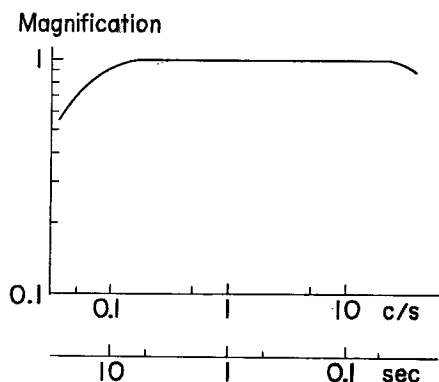


Fig. 2 Frequency Characteristics of Seismometer.

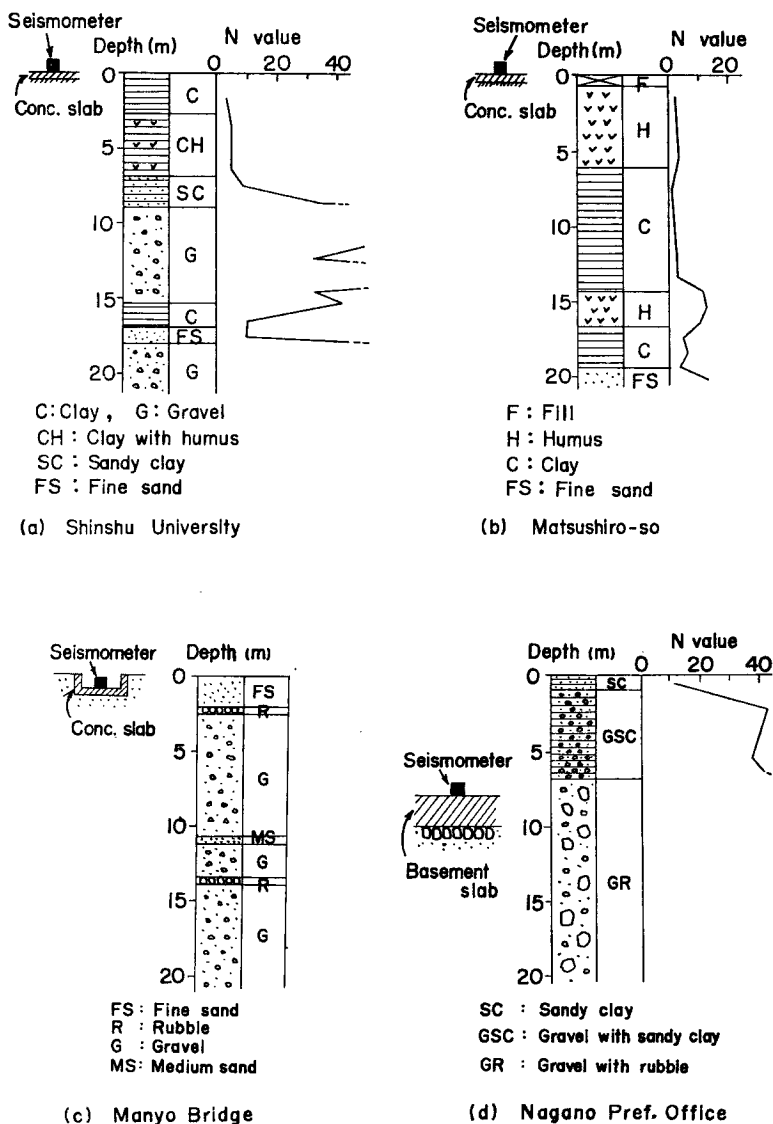


Fig. 3 Soil Profile and Arrangement of Seismometers at the four stations.

ったが、得られた強震の水平方向の加速度記録のうちの数例を Fig. 4 に示した。これらの記録例は各観測点で得られた数多くの強震のうち比較的大きな地震の加速度記録であり、現地で震度階ⅢないしⅣと発表されたものである。同図の強震記録の最初の部分にはいずれもレコーダーの始動によるノイズが認められ、初期微動の部分は明らかなでないが、主要動と思われる部分は明瞭に記録されている。またこれらの地震記録においてレコーダーの始動から地震の主要動までの時間はいずれも 1.5 sec 以下であり、起動器からの信号を受けてから録音開始までの時間遅れを考慮してもこれらの地震の初期微動継続時間は約 2 sec 以下と考えてよい。したがってこれらの地震の震源距離は約 20 km 以内程度であろうと推察され、さらに地震の主要動の継続時間もほとんどの記録が 10 sec 以下であることから、これらの地震記録は規模の小さい局地震で

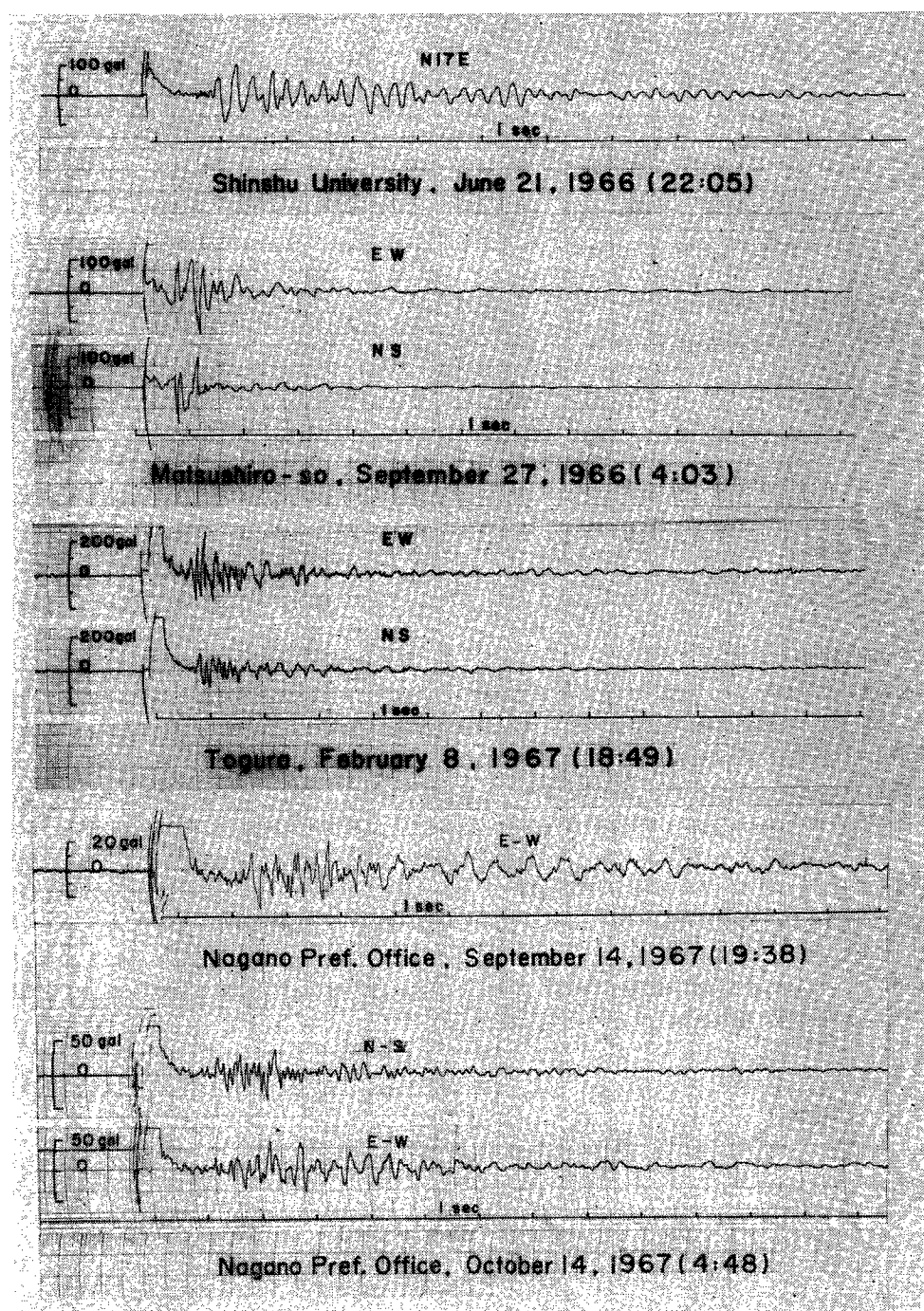


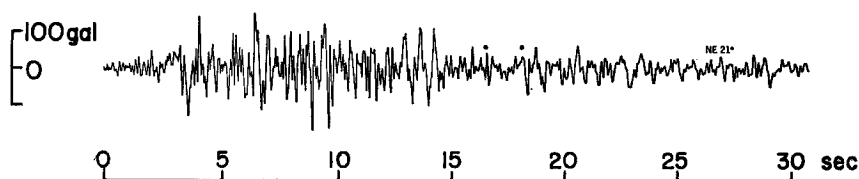
Fig. 4 Accelerograms of Matsushiro Earthquakes.

Table 1 Data of the Earthquakes Treated Herein.

Station	No.	Earthquake		JMA Intensity Scale		Magnitude	Component	Maximum Acceleration
		Date	Time	Matsushiro	Nagano			
Shinshu Univ.	S01	1966. 6. 15	9:42	III	III	3.9	N17E	83gal
	S02	1966. 6. 21	22:05	III	IV	4.5	N17E	94
	S04	1966. 7. 10	15:43	IV	IV	4.4	N17E	83
Matsushiro-so	M14	1966. 9. 27	4:03	IV	IV	4.6	EW	141
							NS	121
	M15	1966. 9. 27	19:22	III	III	4.4	EW	107
							NS	57
Manyo Bridge	T02	1966. 11. 25	2:04	II	II	3.9	EW	86
							NS	122
	T05	1967. 2. 8	18:49	II	III	4.2	EW	241
							NS	106
	T07	1967. 3. 2	3:39	III	III	4.8	EW	75
Nagano Pref. Office							NS	69
	N01	1967. 6. 24	1:31	III	III	4.8	EW	17
	N02	1967. 9. 14	19:38	IV	IV	5.0	EW	22
	N03	1967. 10. 14	4:48	V	IV	4.8	EW	45
							NS	38

ある松代群発地震の特徴をよく表わしているといえる。特に松代の地震記録例では記録の開始とほとんど同時に主要動が始まっており、観測点にきわめて近距離のところで発生した地震動であることがうかがえる。

またここに示した地震記録の震度階、規模、最大加速度振幅を **Table 1** に一括して掲げたが、これらの地震動はマグニチュードが4～5程度の規模の大きくない地震であるにもかかわらず、長野県庁を除いた他の地表面における観測点では100～250 gal という大きな最大加速度を記録している点が注目される。このことは地震が深さ10 km程度より浅い位置で発生しているために震源から観測点に至る距離が短く、震源において発生した衝撃的な波動が地殻内部で反射屈折の影響をほとんど受けないで減衰せずに伝播した結果であると考えてよからう。すなわち松代群発地震の観測を行なった結果、かなり大きな加速度振幅をもつ地震記録を得たが、地震の継続時間、地震波形などに関しては、構造物に大きな被害を及ぼす、いわゆる大地震とは異なっており、地震のもつエネルギーも小さいことがわかった。なお大地震記録の一例として示した **Fig. 5** の Taft における加速度記録 (Calif., U.S.A., July 21, 1952, N21E) と比較すると、上述の相違が容易に理解できるであろう。



Taft, Calif., U.S.A., July 21, 1952, N21E

Fig. 5 An Example of Strong Earthquake Accelerogram Recorded in U.S.A.

3. 観測結果の解析

各観測点で磁気テープに収録した数多くの地震記録のうち、主として **Table 1** に掲げた揺れの大きな地震動記録について解析を行なった。磁気テープから再生した主要動 4 ないし 10 sec 間の部分を 100 ないし 125 c/s のサンプリングで A-D 変換してディジタル電子計算機により、フーリエスペクトル、自己相関関数、応答スペクトルなどを算出した。

(1) 周期特性の解析

各観測点で観測した地震動の周期特性を解析するために、地震波形をフーリエ変換して加速度スペクトルを求めた。

Fig. 6 は信州大学工学部で得た地震記録の加速度スペクトルである ($F(f)$ の単位は $\text{cm/sec}^2/\text{cps}$)。この図には震度階 IV と発表された二つの地震の水平、N17E 成分の記録についてのスペクトルを示したが、両者とも 3.5c/s 付近に卓越した周期成分がみられる。また高い振動数成分は比較的少なく 10 c/s 以上では急激に小さくなる傾向を示している。

次に松代荘で観測した地震の加速度スペクトルは **Fig. 7** にみるように、地震および測定方向によって多少の差はみられるが、1.5 c/s および 6 c/s で共通したピークを示している。特に、大きな最大加速度を伴った地震 M14 のスペクトルでは 1.5~2c/s という低い振動数で大きな値を示しているのが注目される。なお高い振動数成分は信州大学の場合と同様に非常に小さくなっている。

一方、砂礫地盤の戸倉町万葉橋で得た加速度スペクトル図 **Fig. 8** では、3~5c/s から 8~10c/s にかけての比較的高い振動数でピークを示す地震が多く、特に 6~10 c/s の振動数成分が大きくなっているのが特徴である。また 10 c/s 以上においてもそれほど減少する傾向を示していない。なお大きな最大加速度を伴

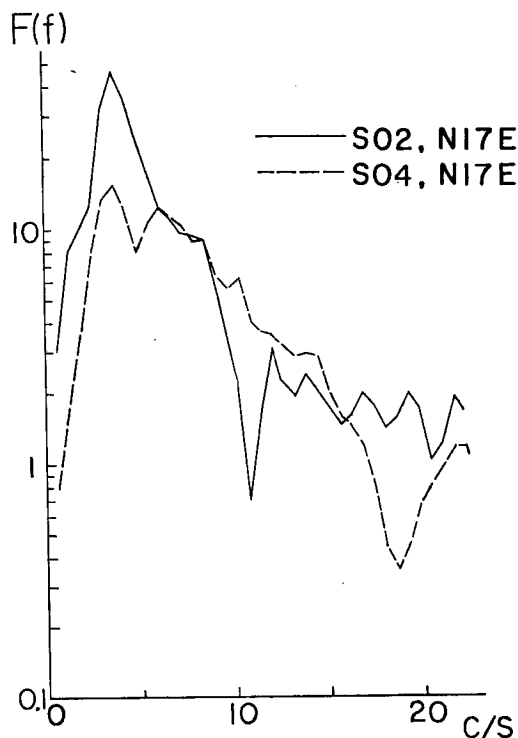


Fig. 6 Acceleration Spectra (Shinshu University).

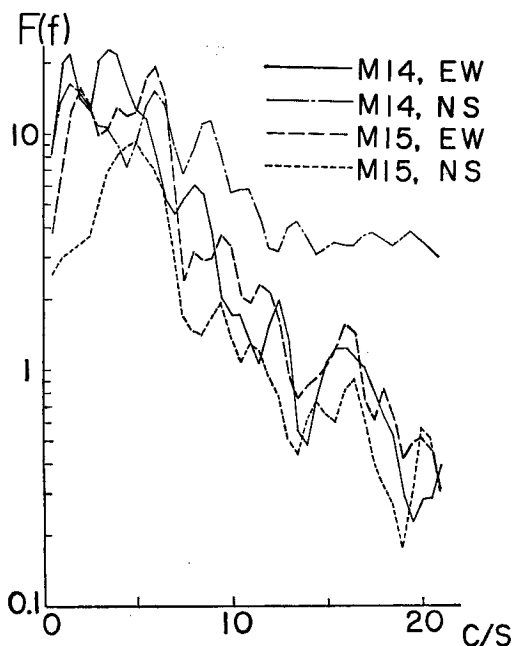


Fig. 7 Acceleration Spectra (Matsushiro-so).

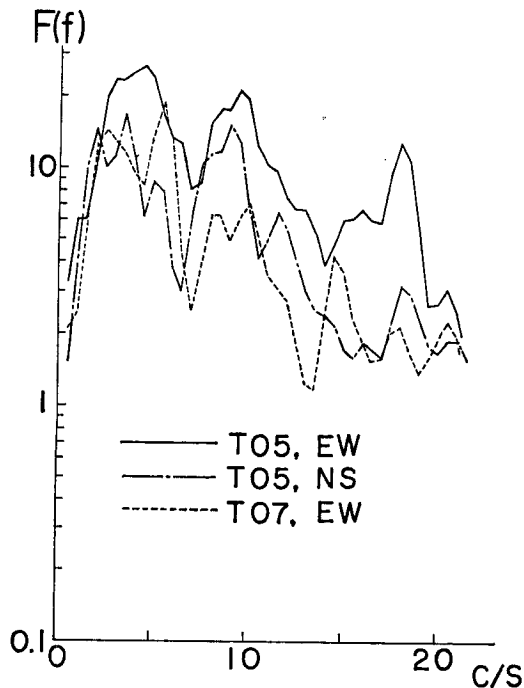


Fig. 8 Acceleration Spectra (Manyo Bridge).

った地震ほど、低い振動数成分を多く含むような振動数特性を示す傾向がみられる。

このような地表面における地震動の周期特性の相違は Fig. 3(a)~(c) から明らかなように、地盤の構成の相違によるものと考えられ、表層付近の地盤の軟かい場所ほど低振動数の震動が卓越しやすいという傾向をよく示している。

さらに地下の観測点で得た長野県庁のスペクトル図 Fig. 9 は同地点で得た加速度記録の継続時間が比較の長いので、主要動 10 sec 間の地震波動について計算した結果である。この図では 3 c/s および 5 c/s にピークをもつ傾向がよく現われており、特に 3 c/s の振動数成分が卓越していることがわかる。またこの観測点の地盤は戸倉の観測点と同様の砂礫地盤であるが、戸倉のスペクトル図 Fig. 8 でみられた高い振動数成分の振幅はかなり小さくなっており、戸倉とは異なったスペクトル図を示している。これは戸倉で観測した地震が長野県庁で観測した地震に比べて規模の小さい地震であるために、解析した主要動の最初の 4 sec 間の部分では低振動数の波動のエネルギーが小さく、相対的に高い振動数成分の振幅が大きいスペクトル図が得られたことによるものと考えられる。

また Fig. 4 に示した長野県庁の加速度記録 N02 は主要動の最初から約 3 sec 後を境にして、その前後で地震波の振動数成分が異なっていることが明らかに読みとれる。そこでこの地震波を主要動の最初から 3 sec 間および 3 sec 以後の二つの部分に分割して、それぞれの部分のフーリエスペクトルを計算し、主要動の最初から 10 sec 間のスペクトルと同時に示して時間の経過による地震波の振動数成分の変化の状況を比較したのが Fig. 10 である。この図では 10 sec 間の波動のスペクトルは 2~6 c/s にわたってほぼ一様な振幅を示しているが、部分的な波動のスペクトルでは前半部は 3.5~6.5 c/s のある程度高い振動数の波が、また後半部では 1.5~2 c/s の低い振動数の波がそれぞれ卓越していることがわかる。このように地震波動の振動数

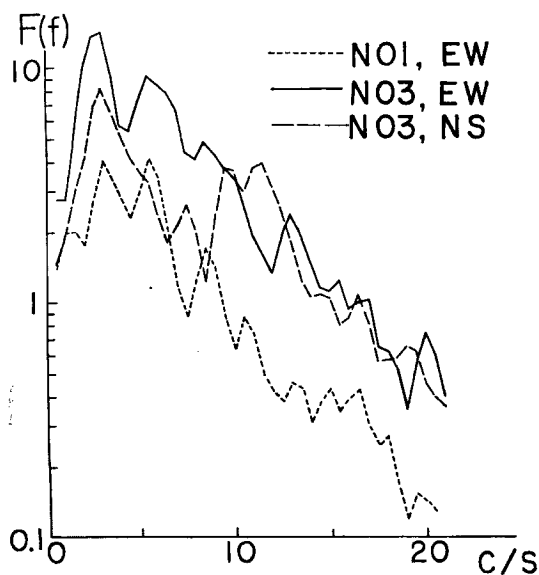


Fig. 9 Acceleration Spectra (Nagano Pref. Office).

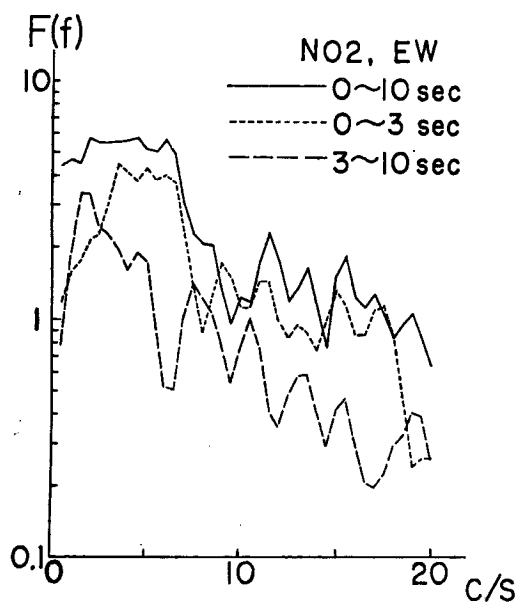


Fig. 10 Acceleration Spectra of Various Portions of Seismogram.

成分が時間の経過とともに、高い振動数領域から低い振動数領域へと変化する傾向は、波動の伝播速度およびその振動数成分を考慮すれば、最初に実体波がきて、つづいて表面波が伝播してきたことを示すものであろう。上の傾向は他の地震記録についても若干みられるが、松代群発地震は震源の浅い近地地震であるために、実体波と表面波の伝達時間にほとんど差がなく、また地震のエネルギーが小さいために表面波のエネルギーも弱く、両者の区別がはっきりしにくいものと考えられる。

次に記録波形の周期性を調べるために、地震記録の自己相関関数を計算した結果の一例を Fig. 11 に示した。この図に示した自己相関関数はいずれも各観測点で得た最大加速度を伴った地震についての計算結果である。

Fig. 6~Fig. 9 のスペクトル図からわかるように、同一地点で観測した地震の中には周期特性の多少異なるものもみられるが、Fig. 11 は各観測点で得た記録の代表的な自己相関関数と考えて大過なからう。

信州大学では一つの周期成分が卓越して含まれていることがよくわかるが、他の観測点ではこのように卓越した周期成分は認められない。松代荘では比較的長い周期成分を含んだランダムな波形であることを示しているが、戸倉では短い周期成分が波形の中に含まれており、長野県庁では比較的長い周期成分と短い周期成分とが混在していることがわかる。おのおのの自己相関関数において卓越している周期成分は Fig. 6~Fig. 9 のスペクトル図にみられたピークにほぼ相当しており、構成の異なった地盤においては地震動の周期特性が異なることをよく示している。

なお地表近くの深さ方向の地震記録の解析結果についてはすでに報告しており^{2), 3), 5)}, スペクトル解析の結果、深さにかかわらず地盤に特有のスペクトル図が得られること、お

よび砂礫地盤の観測点(岩野橋)で地下 5 m から地表面の間で振幅が急激に増大することなどが判明している。Fig. 12 は松代荘の粘土地盤において観測した二つの地震の速度記録について求めたフーリエ・スペクトルである。このうち M06 は昭和41年 8 月に地表面下 10 m と 20 m とに設置した地中地震計で観測した地震であり、M51 は昭和42年 7 月に地表面に設置した換振器で観測した地震である。これらの地震は約

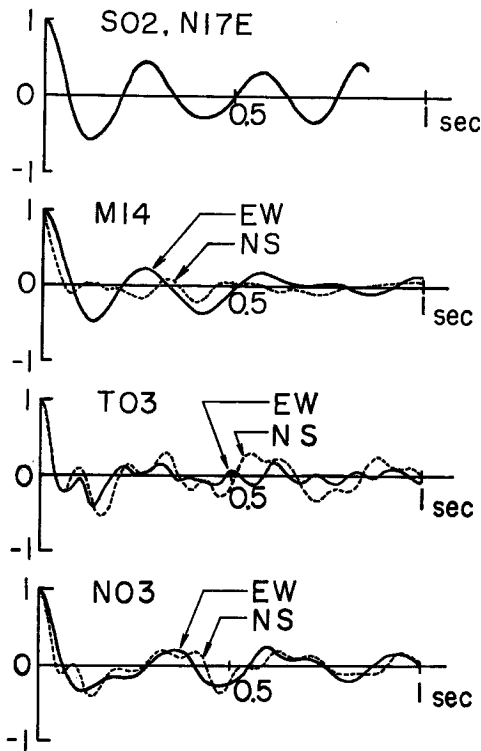


Fig. 11 Auto Correlation Functions.

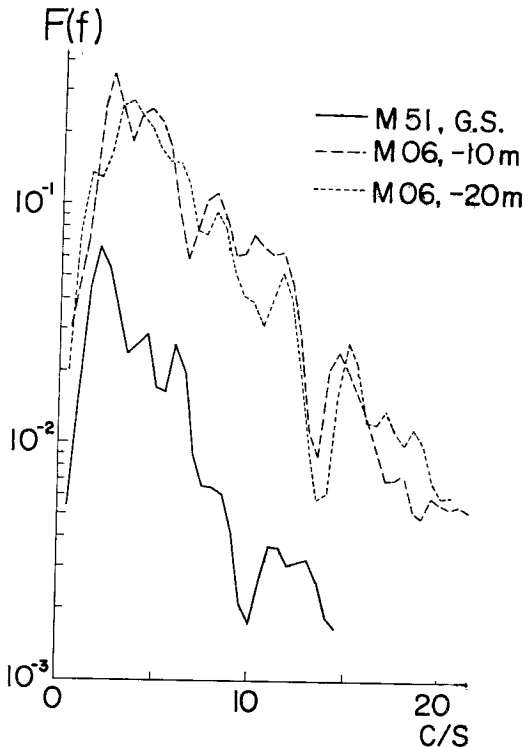


Fig. 12 Velocity Spectra (Matsushiro-so).

1年間前後して発生したものであり、地震の強さも異なるので地盤の深さ方向におけるスペクトルの大きさそのものは直接比較できないが、スペクトルの振動数特性はよく一致しており、地盤に特有の振動特性のあることが一層はっきりと確認できた。

以上述べたように、構成の異なる各種の地盤における数多くの自然地震の観測の結果、地盤に特有の周期特性のあることが明確となり、このような周期特性は松代群発地震のような局地地震においては地震の加速度の大きさあるいは測定した地震記録の成分によってほとんど影響されないことが確認できた。

(2) 構造物の応答スペクトルの解析

松代群発地震のもつ特性を構造物の応答の面から調べるために、観測した地震の加速度記録を入力とした線型1自由度系の応答スペクトルの計算を行なった。その結果の一部についてはすでに報告した^{2), 3), 4), 5)}。

速度応答スペクトル S_v の値は入力地震の大きさによって影響を受けるから、観測した地震記録の最大加速度振幅を 100 gal に換算して計算した速度応答スペクトル S_v の値を Fig. 13 に示した。これらの図の縦軸は1自由度系の応答速度の最大値、横軸は1自由度系の非減衰固有周期であり、減衰定数5%に対する S_v の値を示している。なお加速度ピックアップが 0.05 sec から 3 sec までは感度が一樣であるので、計算に当たっての感度の補正は行っていない。

信州大学の記録に対する S_v は 0.3~0.4 sec 付近にピークをもち、0.6 sec 以上の固有周期に対しては単調に減少する傾向がみられる。松代荘では他の観測点とは異なった応答スペクトル曲線が得られた。すなわち S_v がピークを示す固有周期の範囲が広く、かつ長周期の方にのびる傾向がみられ、なかには 1.5 sec ないし 2 sec 程度までかなり高いレベルを示す地震もある。万葉橋の S_v は 0.2~0.3 sec の短い固有周期でピークを示し、0.6 sec 以上の固有周期に対しては一樣に小さな値をとっている。これら3地点の応答ス

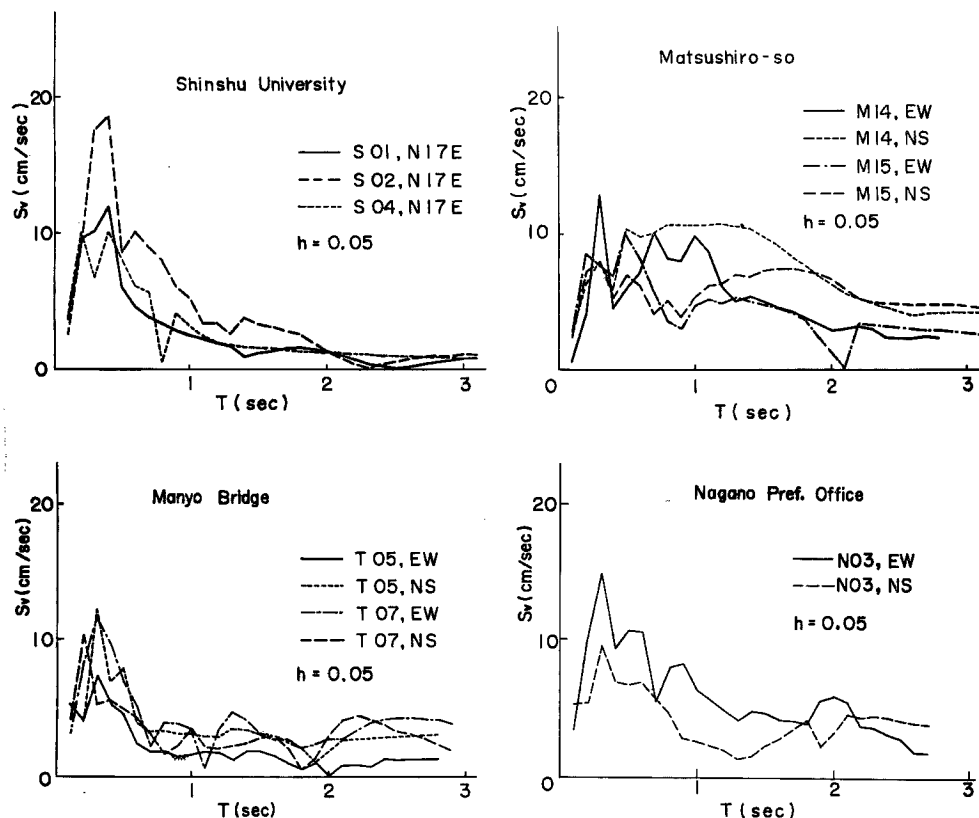


Fig. 13 Velocity Response Spectra of Matsushiro Earthquakes.

ベクトルの計算に使用した地震波動はいずれも主要動の最初の 4 sec 間の部分であるので、周期の短い波動が S_v の値に大きな影響を与えることが予想される。一方、長野県庁の記録に対する応答スペクトルは主要動 10 sec 間の加速度記録を入力として計算したものであるが、0.3 sec 付近にピークを示し長い固有周期に対してはゆるやかに減少していく傾向がみられる。

一般に地震波動のうち、短い周期成分の波動の方が長い周期成分の波動に比べて距離による減衰の大きいことはよく知られており、地震の規模の大小あるいは震央距離の遠近によって、地震動に対する速度応答スペクトル曲線が異なることが G. W. Housner 教授等による多数の強震観測記録の解析結果⁷⁾により明らかにされている。また継続時間の短い小規模の地震を震源に近い地点において観測した場合の地震動による S_v については、長い固有周期に対する S_v が比較的小さくなり、短い固有周期の構造物に対しては強い影響を与える傾向のあることが指摘されている。また松代地震と同程度の規模の近地震である San Francisco 地震 (March 22, 1957) の強震観測記録による速度応答スペクトルの解析結果からも同様の傾向のあることが報告されている⁸⁾。

したがって Fig. 13 において地盤の状態が異なっているにもかかわらず、どの観測点の S_v にもみられる 0.3 sec 付近のピークは近地震である松代群発地震による速度応答スペクトルが示す特徴であると考え

ることができる。

また速度応答スペクトルでピークを示す固有周期とその形状を比較すると、地盤が軟かいほど大きな応答速度を示す固有周期の範囲が広く、硬い地盤では応答速度が大きくなる固有周期の範囲が狭く、かつ短周期の方へかたよる傾向がみられ、応答スペクトルが地盤の状態によってもかなり影響を受けることがわかる。

これまでの多くの強震記録についての解析結果では、一般に速度応答スペクトルは構造物の固有周期に対して一定の値を示す傾向を持つ場合が多いとされているが、松代群発地震では、長周期の構造物に対しては S_r の値が小さくなる地震が多い。これは松代群発地震の周期特性および継続時間がいわゆる大地震とは異なった性格をもつことによるものと考えられる。

次に各観測点における1自由度系のせん断力スペクトルの計算結果を Fig. 14 に示した。この図は各地

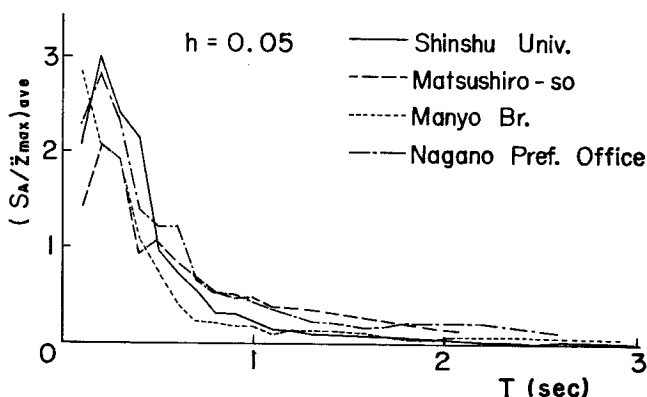


Fig. 14 Averaged Shear Force Spectra of Matsushiro Earthquakes.

震記録に対する1自由度系の最大加速度応答 S_a を入力とした地震の最大加速度 $\ddot{z}_{max}$ で除して無次元量としたものを各観測点ごとに平均した結果を示している。すなわち縦軸は入力加速度に対する構造物の最大応答加速度の倍率を表わすことになる。この図によれば、各観測点においてほとんど同様なスペクトル図が得られ、地動の最大加速度より大きな応答加速度が生じる構造物の固有周期は0.5 sec以下であることがわかる。またピークは0.1~0.2 sec付近にあり、地動加速度の2~3倍程度の応答加速度が生じる可能性のあることを示しており、軟弱な地盤の松代荘に比べると他の硬い地盤においては一層大きなせん断力が作用することがわかる。なお固有周期が1 sec以上の構造物に対しては、せん断力スペクトルの値は0.5以下であり大きな影響を持たないことを意味している。

以上のように松代群発地震のもつ特性を構造物の応答の面から検討した結果、松代群発地震は規模の小さい継続時間の短い地震であり、また近地地震であるために短周期の波の成分が支配的であり、長周期の構造物に振動が励起されるには十分でなく、いわゆる小地震に特有の性質を備えていることが明らかになった。すなわち、松代群発地震はかなり大きな最大加速度を伴った地震であるにもかかわらず、震源地である松代周辺においても構造物に大きな被害がみられなかったことも上述の解析結果からよく説明できる。

4. 地震観測地点における常時微動の観測

常時微動は交通機関や工場の動力機関などの人工的振動源、あるいは風、雨、波などの自然的振動源によって起こされた振動が伝播してきたものと考えられている。したがって、常時微動は波動が伝播してくる途中の地盤の振動特性を反映して各地盤に固有のものであろうことがいわれてきた。地震工学の研究分野においては、各種の地盤における地震動の特性を推定しようという目的から、金井 清教授等により非常に多

くの地点で常時微動の観測が実施され⁹⁾、zero-crossing の方法を用いて得られた頻度一周期曲線を地震動の記録についての曲線と比較した結果、両者の間に相関関係のあることが見出された。さらに頻度一周期曲線の形と過去の地震の被害との関係から常時微動の観測結果から地盤の良否を判定する提案がなされている。

常時微動は複雑な波動でありその卓越周期を説明するのに、実体波あるいは表面波からなると考えて理論的に説明しようという試みがなされており、嶋 悦三博士等によって両者の比較が行なわれた結果、基盤と地表層がはっきりわかれているような場所では、両者による解析結果がよく対応しているといわれている¹⁰⁾。

われわれは松代群発地震の震動観測において、構成の異なる地盤表面において地震の観測を実施した。そこでこれらの各観測点において常時微動の観測を行ない、同じ地点で観測した自然地震と常時微動の記録のスペクトル解析の結果を比較し、振動数分布、固有周期などについて検討を加えた。

常時微動の観測地点は上述した電磁式強震計による地震観測地点および千曲川筋にある岩野橋、更埴橋、落合橋の橋りょう架設位置の河川敷であり、これらの河川敷はいずれも硬い砂礫地盤により構成されていることがボーリングの結果から判明している。常時微動の観測には固有振動数 1 c/s の電磁型速度変換器を使用し、増幅器を通して水平 2 成分の速度記録をデータレコーダーに収録した。増幅器を通した速度変換器の

Magnification

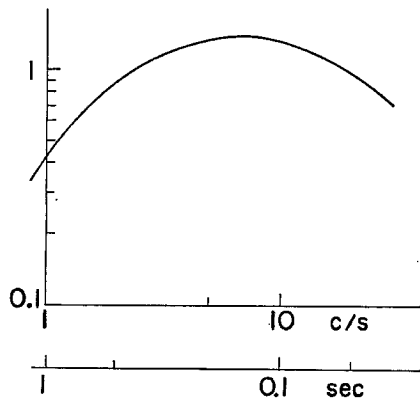


Fig. 15 Frequency Characteristics of Microtremometer.

振動数特性は Fig. 15 に示したとおりであり、約10万倍程度に増幅した速度記録を観測した。なお常時微動の観測は昭和42年9月の昼間に実施し、交通機関などによる影響を受けないように注意して各成分とも約5分間の記録をとった。

常時微動の解析にあたっては、記録のうちの10 sec間の部分を 50 c/s のサンプリングで A-D 変換し、デジタル電子計算機によってフーリエスペクトルおよび自己相関関数の計算を行なった。

同じ地点において観測した常時微動と自然地震のスペクトル解析の結果を比較するために、地盤表面において固有振動数 1 c/s の電磁型速度変換器を用いて観測した自然地震の速度記録のフーリエスペクトルを計算し、Fig. 16 に示した。これらの図においては上部に常時微動のフーリエスペクトル、下部には自然地震のフーリエスペクトルを図示し、横軸には周期を示した。

落合橋の常時微動の観測結果では NS, EW 両成分とも非常によく似た周期特性を示している。すなわち 0.2~0.25 sec 付近に鋭いピークをもち卓越した周期成分を多く含んだスペクトルである。一方、地盤表面における地震動のスペクトルも 0.15~0.25 sec にわたってかなり強い周期成分をもっており、この観測点では常時微動と自然地震の卓越周期および周期特性がよく対応していることがわかる。

更埴橋では常時微動の測定方向によってかなり異なったスペクトル図が得られた。特に EW 方向では 0.1 sec および 0.2 sec 付近に鋭いピークをもつスペクトル図が得られており、NS 方向のスペクトル図とはかなり異なった形状を示している。このように EW 成分で短い周期でかなり鋭いピークがみられるのは、観測時に約 100 m 程離れた対岸で運転中であった建設機械の振動による影響を受けたためと考えられる。NS 成分にも同様に 0.15 sec 付近にピークがみられるが 0.3~0.4 sec にかけての大きなピークは地震波のスペクトルが示すピークと比較的によく対応している。

次に信州大学工学部では常時微動のスペクトルは方向によらず同様な周期分布を示している。一方、震度階 IV と発表された地震 S04 の速度スペクトルと比較すると卓越周期はどちらも 0.3 sec でありよく一致している。

また軟弱な粘土質地盤である松代荘で観測した常時微動は河川敷の硬い砂礫地盤上の測点と比較すると卓

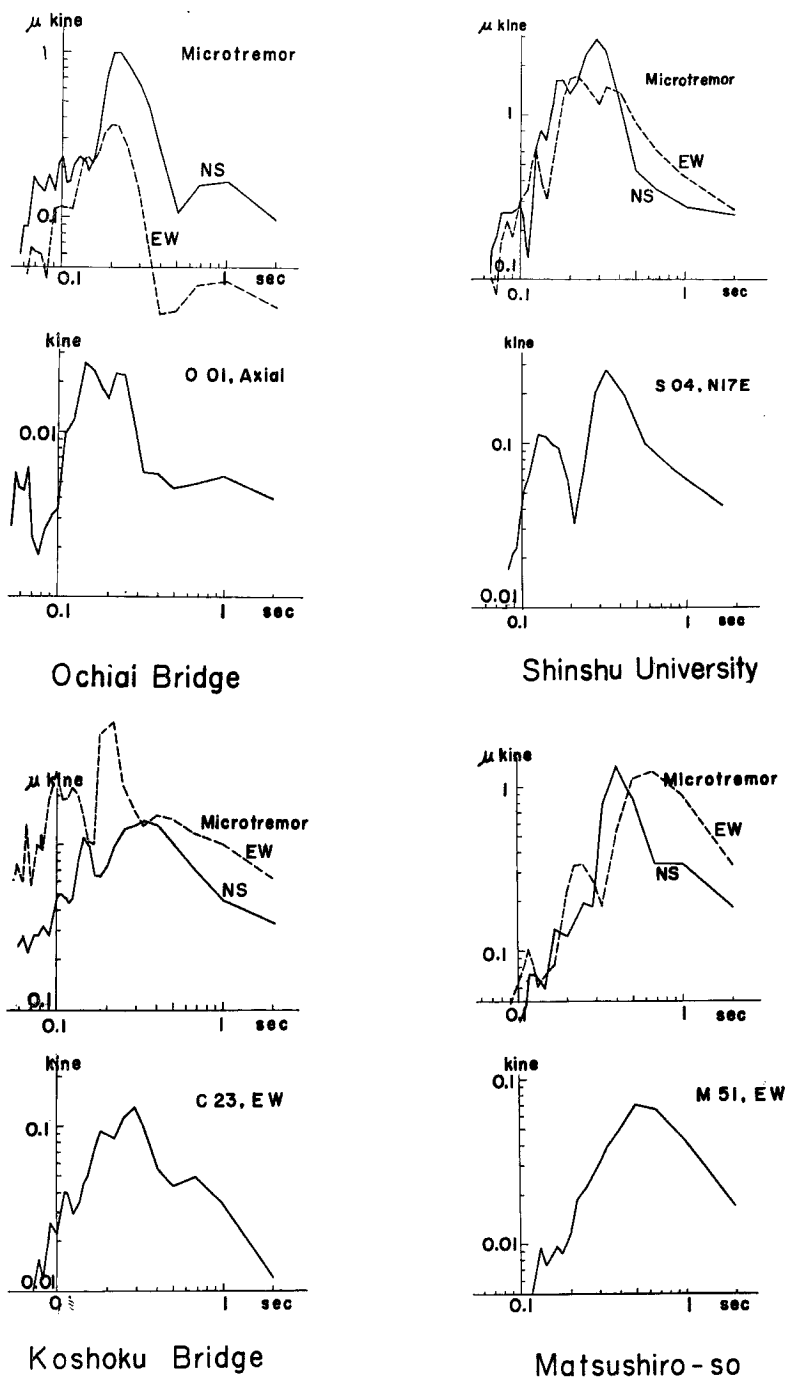


Fig. 16. Comparison of Fourier Spectra of Microtremors with Earthquakes Recorded at the Same Sites.

卓越周期は0.5~0.7 secと長くなっており、また測定成分によって卓越周期に若干の差がみられるが、地震の速度記録のスペクトル図と比較するとピークの周期および周期分布ともによく対応していることがわかる。

なお観測点によっては常時微動の成分によってスペクトル図に相違がみられたが、これは解析に用いたサンプルの選び方に起因するものと思われる。すなわち常時微動を定常過程とみなして解析を行なうに際しては、サンプル数あるいはサンプリング時間の選択などに関してさらに慎重な検討が必要であろう。逆にいえば、適当なサンプル数とサンプリング時間を選べば、常時微動のスペクトルを地盤に固有のものとして与えることを示しているといえよう。

以上のように同一地点の地盤表面において観測した自然地震と常時微動のスペクトル解析の結果を比較すると、地盤の硬軟あるいは構成にかかわらず、卓越周期および周期分布が比較的良好に対応していることが判明した。すなわち、ここで取り扱った松代群発地震のような小規模の近地地震に対しては、常時微動の観測結果から自然地震の周期特性をおおむね推定できることが、各種の地盤における多数の自然地震および常時微動の観測結果からほぼ確認することができた。

5. 結 語

松代群発地震地域の各種の地盤において、昭和41年6月以来1年半以上の期間にわたって実施した強震観測の結果から、地盤と地震動の特性、松代群発地震のもつ耐震工学の面における特質および常時微動と自然地震の周期特性などに関して次のような成果を得た。

1) 観測した強震記録のスペクトル解析の結果、地盤の構成の相違によって地震波の振動数特性が異なり、表層付近の地盤の軟かい場所ほど低振動数の震動が卓越しやすい傾向のあることが確かめられた。またこの地盤の特有の周期特性は松代群発地震のような局地的地震においては地震の加速度の大きさあるいは測定した地震記録の成分によってはほとんど影響を受けないことが確認できた。

2) 砂礫地盤および粘土地盤における深さ方向の地震記録のスペクトル解析の結果、20~30 mの沖積層では深さにかかわらず地盤に特有の振動数特性のあることが判明した。

3) 地震動のもつ特性を構造物の応答の面から検討した結果、松代群発地震のように短周期の波の成分が多く継続時間の短い近地地震に対する1自由度系の速度応答スペクトル S_v は、いわゆる大地震による S_v とは異なった形状を示し、長周期の構造物に対しては S_v の値が小さくなる傾向がみられる。すなわち、松代群発地震は固有周期が0.3 sec以下程度の構造物に及ぼす影響が最も大きく、比較的長周期の構造物に対しては大きな影響をもたないといえる。

4) 同一地点における自然地震と常時微動のスペクトル解析の結果、両者の卓越周期および周期分布は比較的良好に対応しており、松代群発地震のような近地地震に対しては常時微動の観測結果から自然地震の周期特性をおおむね推定できることが確かめられた。

なお本研究の数値計算には、京都大学電子計算機 KDC-II を用いた。またこれらの調査研究は昭和41、42年度の文部省科学研究費（特定研究—災害科学）および昭和41、42年度の文部省より京都大学防災研究所（所長 石原藤次郎教授）への松代地震調査関係費に負うところが大きく、また長野県土木部（部長 和田良雄氏）よりも種々御支援頂いた。さらに京都大学防災研究所関係の吉川・小堀・南井各教授、各研究室の諸氏にも御助言頂き、またわれわれ研究室の大学院学生諸君にも終始協力頂いた。これら関係各方面、各位に深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 後藤尚男・亀田弘行・石田昌弘：松代群発地震地域における橋りょうの震動観測結果について，第3回災害科学総合シンポジウム論文集，昭和41年11月，pp. 168~171.
- 2) 土岐憲三・横山康夫・秋吉 卓：松代群発地震地域における地盤の震動観測結果について，第3回災害科学総合シンポジウム論文集，昭和41年11月，pp. 172~175.

- 3) 後藤尚男・土岐憲三・横山康夫・亀田弘行・秋吉 卓・石田昌弘：松代群発地震地域における橋りょうおよび地盤の震動観測結果について，京都大学防災研究所年報，第10号A，昭和42年3月，pp. 201～219.
- 4) 後藤尚男・土岐憲三・横山康夫：松代群発地震の応答スペクトルについて，土木学会第22回年次学術講演会講演概要，昭和42年5月，I-161，pp. 1～4.
- 5) 後藤尚男・土岐憲三・横山康夫・亀田弘行・秋吉 卓・石田昌弘：松代群発地震地域における震動観測結果について，土木学会論文集，第145号，昭和42年9月，pp. 1～11.
- 6) 後藤尚男・土岐憲三・横山康夫・亀田弘行・秋吉 卓：松代群発地震の震動観測結果について，第4回災害科学総合シンポジウム論文集，昭和42年10月，pp. 146～149.
- 7) Housner, G. W. : Vibration of Structures Induced by Seismic Waves, Part 1: Earthquakes, Shock and Vibration Handbook edited by Harris and Crede, Vol. 3, 1961, 50-1～32.
- 8) Hudson, D. E. and G. W. Housner: An Analysis of Strong-Motion Accelerometer Data from the San Francisco Earthquake of March 22, 1957, Bull. of the Seismological Society of America, Vol. 52, No. 2, 1958, pp. 417～430.
- 9) Kanai, K., et al. : On Microtremors, X (Earthquake Damage to Wooden Houses), Bull. of the Earthquake Research Institute, Vol. 44, 1966, pp. 645～696.
- 10) Allam, A. and E. Shima: An Investigation into the Nature of Microtremors, Bull. of the Earthquake Research Institute, Vol. 45, 1967, pp. 43～59.