

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

後藤 尚男・土岐 憲三・横山 康夫
亀田 弘行・秋吉 卓・石田 昌弘

SEISMIC OBSERVATIONS OF BRIDGES AND GROUNDS IN THE REGION OF THE MATSUSHIRO EARTHQUAKES

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

Synopsis

Since June 1966, the observations of earthquakes have been carried out at the six stations in the region of the Matsushiro earthquakes. The seismic waves beneath the ground were observed at three stations by seismometers which were set in the bore holes. The responses to earthquakes of bridges and embankment were observed at three bridge sites and the acceleration of ground surface at two stations were recorded by strong motion accelerographs.

In this paper the spectral analysis of recorded data by data recorder system is performed and the characteristics of the Matsushiro earthquakes are investigated from the view point of the earthquake engineering.

1. 序 言

昭和40年8月上旬に始まった松代群発地震は16ヶ月後の現在もなお活動を続けている。こうした小ないし中程度の規模の地震が続発することはきわめて稀な現象であり、自然地震を集中的に観測するには絶好の機会であるといえる。構造物の地震に対する応答を問題とするときには構造物の基礎となる地盤の地震動が究明されねばならないが、これまでは地表面における地震動が研究の対象とされることが多かった。しかしながら構造物は地表面から適当な深さの基礎を有するので、深さ方向の地震動の変化の状況は耐震設計の面にも重要な意味を持つことになる。また地震時における地盤と構造物の震動がどのような関連にあるかを実在の構造物について自然地震によって観測することは、地盤と構造物の連成振動を解明するにはきわめて重要であり、こうしたことは地震が続発している場合以外には実施が困難である。本研究はこうした観点から、群発地震の発生域となっている長野市松代町周辺を中心に数箇所において地盤および橋りょうの震動観測を実施したものであり、その結果に基づいて松代群発地震の耐震工学からみた特質を明らかにするとともに耐震工学上の資料たらしめようとしたものである。

2. 震動観測地点の概況

地震動観測の対象とした地点は Fig. 1 に示した千曲川筋の岩野橋、川中島橋、更埴橋、落合橋の4つの橋りょうと、信州大学工学部、国民宿舎松代荘の合計6地点である。川中島橋は昭和9～10年に架設された

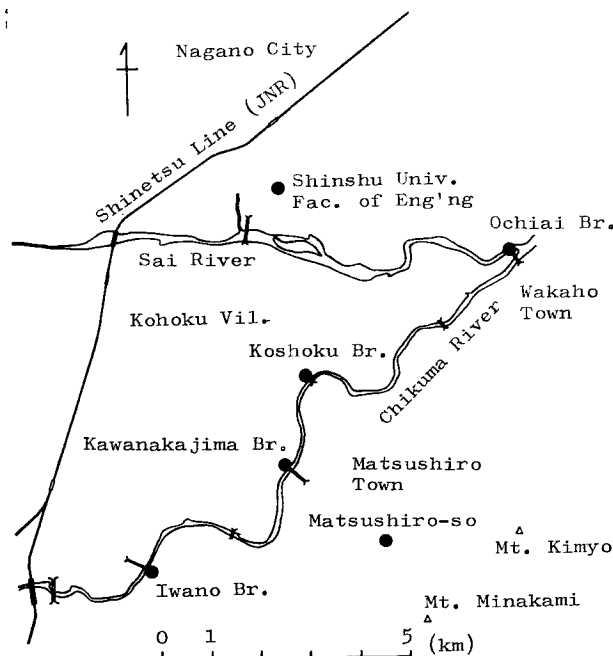


Fig. 1 Location of Earthquake Observation Sites

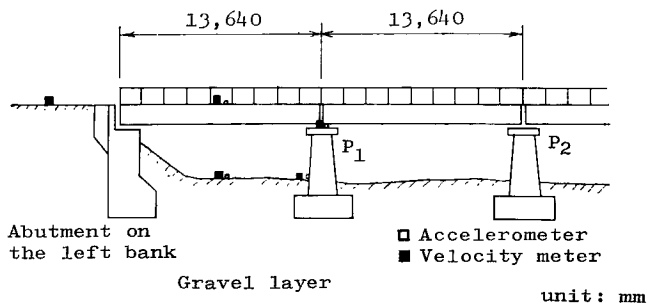


Fig. 2 General Side-view of the Observation Site at Kawanakajima Bridge (5,500 mm width)

幅員 5.5 m, 橋長 495.8 m (タイドアーチ 2 連, I 桁 28 連) の三等道路橋であり, 観測には Fig. 2 にみる左岸橋台寄を選んだ。落合橋は昭和34年4月に着工, 昭和41年12月に完成予定の幅員 6 m, 橋長 948.25 m (ゲルバー桁12連, 単純プレート桁10連) の一等道路橋であり, 観測点は Fig. 3 に示した第11号橋脚地点である。以上の2つの橋りょうでは地震時の橋りょうと地盤の震動性状やその相異を明らかにすることを目的としたものであり, 換振器の橋脚, 橋桁, 地盤などにおける配置は各図中に示した通りである。

岩野橋と更埴橋および松代荘においては地震時の地盤内部における震動の特性を調べることが目的として観測を実施したものである。岩野橋では右岸の洪水敷に地表面からそれぞれ 5 m, 10 m, 23 m の深さまで3本のボーリングを行ない, その中に地中地震計を設置して地表面と合わせて深さ方向の4つの点での震動を同時観測した。ボーリングによる地質柱状図, N値分布, 地震計の配置は Fig. 4 に示したが, この図に

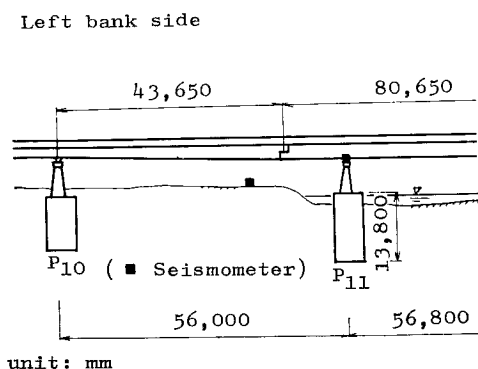


Fig. 3 General Side-view of the Observation Site at Ochiai Bridge (6,000 mm width)

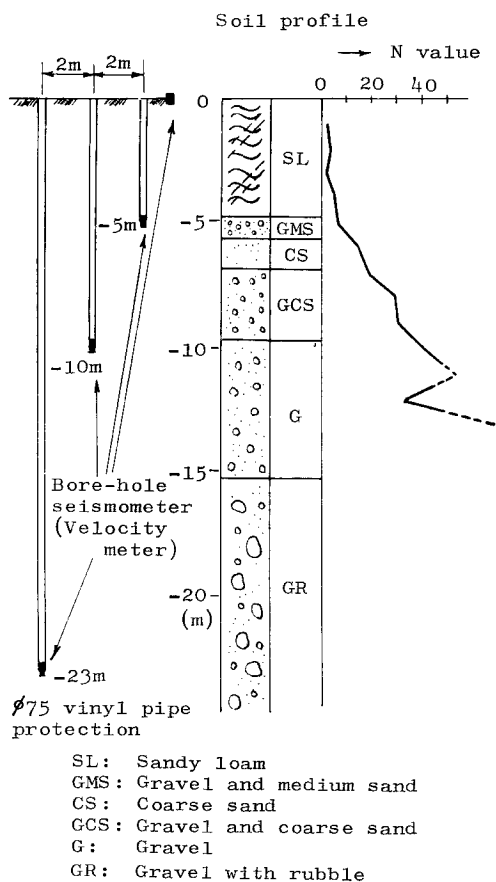


Fig. 4 Soil Profile and Arrangement of Bore-hole Seismometers at Iwano Bridge

みるように約 5 m から 15 m までは次第に硬くなり、それ以下はN値が50以上の硬い砂礫地盤である。更埴橋では地盤と土構造物の震動観測を対象としたものであり、ボーリング結果、換振器、地中地震計の配置は Fig. 5 に示した。

一方、松代荘では建物の前庭に Fig. 6 に示したごとくボーリングを行ない、地中の3点に地中地震計を設置した。この地点は図にみるようにそのほとんどがN値5以下の軟かい粘土質地盤であり、その他の観測

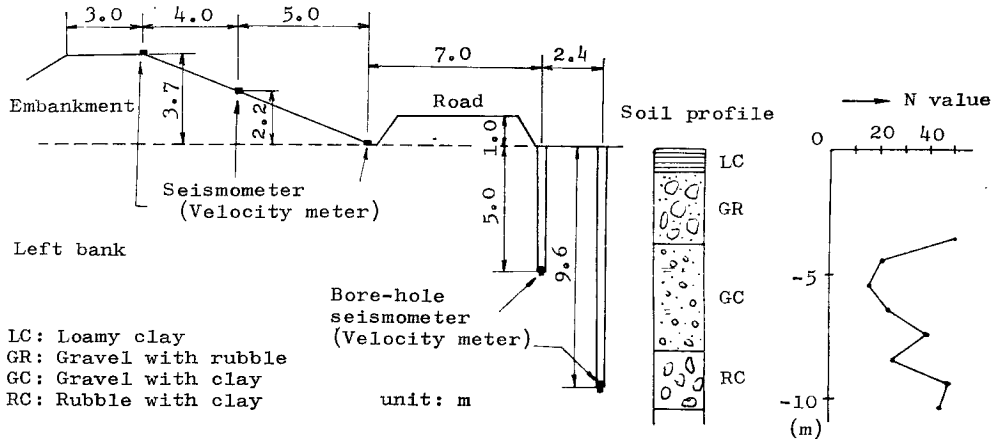


Fig. 5 Embankment at the Observation Site by Koshoku Bridge and Soil Profile

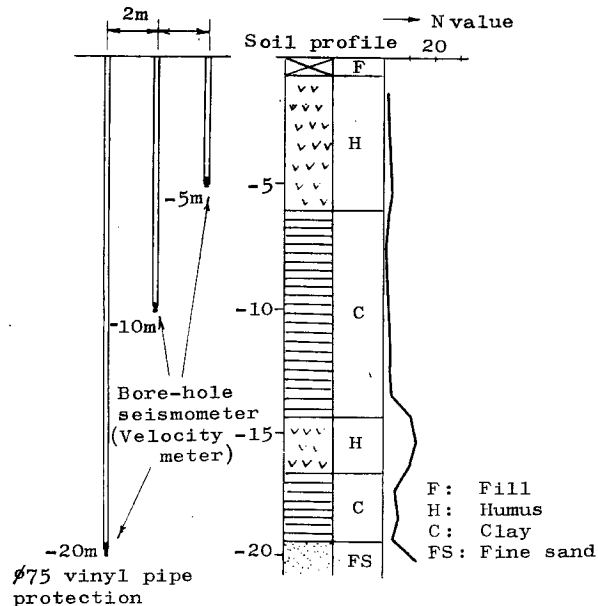


Fig. 6 Soil Profile and Arrangement of Bore-hole Seismometers at Matsushiro-so

地点とは相当異なった地盤で軟弱地盤の一種とみられる。また、信州大学工学部では 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て地表面での震動加速度の観測を主に行なったが、その地盤は Fig. 7 にみるように比較的硬い砂礫地盤の上に 8 m 程度の軟かい粘土地盤がのっており、他の観測点とは地盤の構成が違っている。

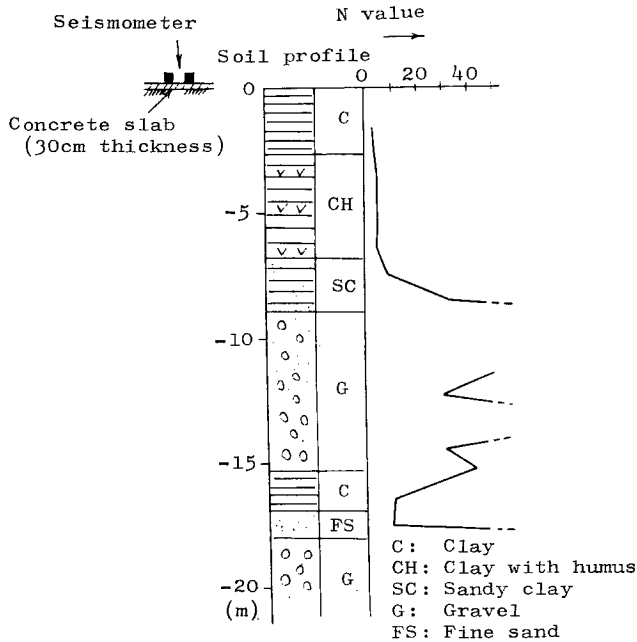


Fig. 7 Soil Profile and Arrangement of Seismometers on the Campus of Shinshu University

3. 観測方法と計測の概要

(1) 地盤の震動観測

岩野橋観測地点では3本のボーリング孔と地表面に固有振動数が 3 c/s, 感度が 18 mV/kine の地中地震計を設置した。これらの地中地震計は水平2成分、鉛直1成分を内蔵しており、合計12成分を適宜切換えを行ない、適当な増幅をした後7チャンネルのデーターレコーダーに収める方法により、2日間にわたって合計40時間の連続観測を実施した。更埴橋地点では2本のボーリング孔には上記の地中地震計を、堤防の法尻・法肩・中腹には固有振動数が 1 c/s, 感度 1 V/kine の換振器を設置した。計測方式は岩野橋におけると同様であり、観測は約2日間連続観測を行なった。

一方、信州大学工学部と松代荘においては電磁式強震計による長期観測を実施した。この強震計は起動感度 5 gal の起動器、前置増幅器、制御器ならびにデーターレコーダーより構成されており、記録継続時間は2分間とした。信州大学においては固有振動数が 2 c/s, 感度が 0.2 c/s から 30 c/s の範囲で 0.14 mV/gal の一定値を持つ加速度計を用いて約2ヶ月の観測を行なった。また松代荘では3本のボーリング孔に地中地震計を設置した場合と、地表面に上記の加速度計を設置した場合について約4ヶ月間の観測を実施した。

(2) 橋りょうの震動観測

川中島橋の観測点では、橋桁中央、1号橋脚上、橋脚から 25 cm の地盤上、橋台と橋脚の中間の地盤上、

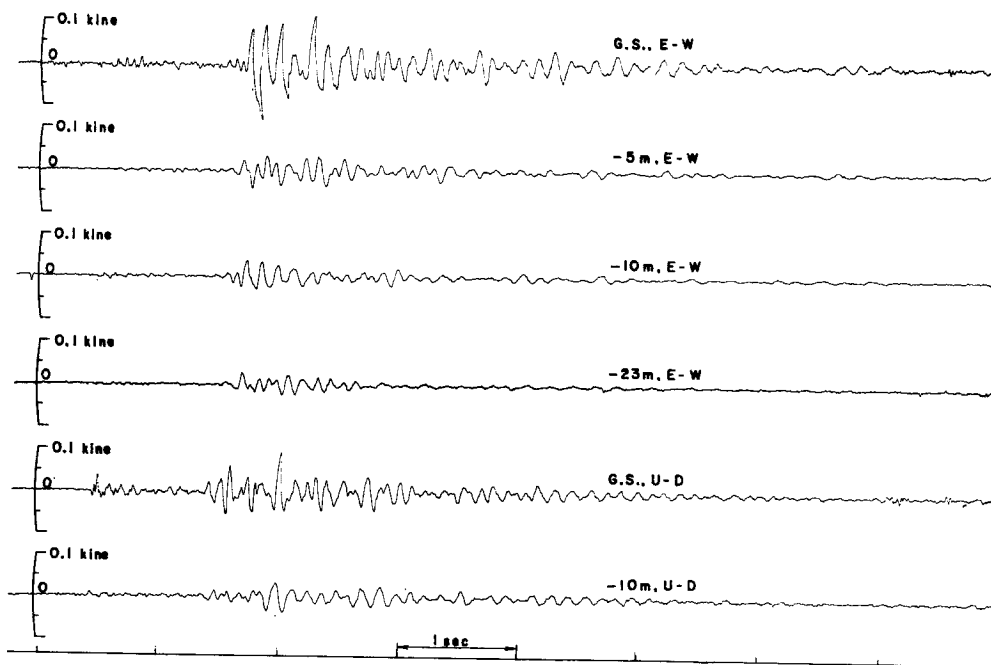
堤防などに換振器を Fig. 2 に示したごとく配置して地盤と橋りょうの地震時の連成した振動を観測した。観測に当っては上記の換振器の中から適当な成分を選び、岩野橋や更埴橋でのそれと同様に連続観測を実施した。落合橋では橋脚上およびそれから約 25 m 離れた地盤上に換振器を設置した。観測の方法は川中島橋と同様に2日間の連続観測を実施した。

以上の岩野・川中島・落合・更埴の4橋りょうの地点では昭和41年7月11日から22日の間に、また信州大学工学部では6月14日から7月22日、松代荘は7月23日から11月14日の間にそれぞれ観測を実施した。

4. 観測の結果

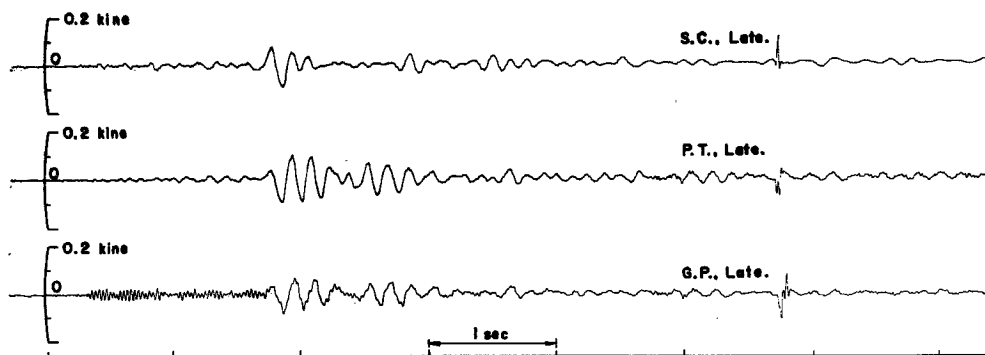
観測により得られた地震記録の例を Fig. 8~12 に示した。これらの記録は各観測点において記録されたもののうち比較的揺れの大きな地震によって得られたものである。Fig. 8 の岩野橋での記録では初期微動も明瞭にみられ、それらの記録の初期微動継続時間を読みとり、その頻度を調べた結果、その大部分は 0.9 ~ 1.2 sec であり、岩野橋で観測された地震の震源距離はほぼ 10 km 以内であろうと推察される。また岩野橋での観測結果には地中の地盤の硬い場所では鉛直成分がほぼ水平成分に相当する震動振幅を持つ地震動が見られることが注目される。岩野橋で観測された地震動はそのほとんどが震度Ⅱ以下のものばかりであるが、その継続時間は6~7秒程度のものが多く、特に主要動の部分は2~3秒程度である。

川中島橋での記録例は Fig. 9 にも明らかなように橋脚上と橋脚のすぐ近傍の地盤 (25 cm) とは非常によく似た震動をしていることがみられる。落合橋の例では橋脚上の換振器と地盤上のそれとは約 25 m 程離れているため両者の間に直接的な相関関係はほとんどみられない。一方、地下 5 m, 10 m および 20 m の3測点の水平成分の地盤震動を記録した松代荘での例 (Fig. 10) では継続時間、震動振幅のいずれもほぼ同程度であることがわかる。



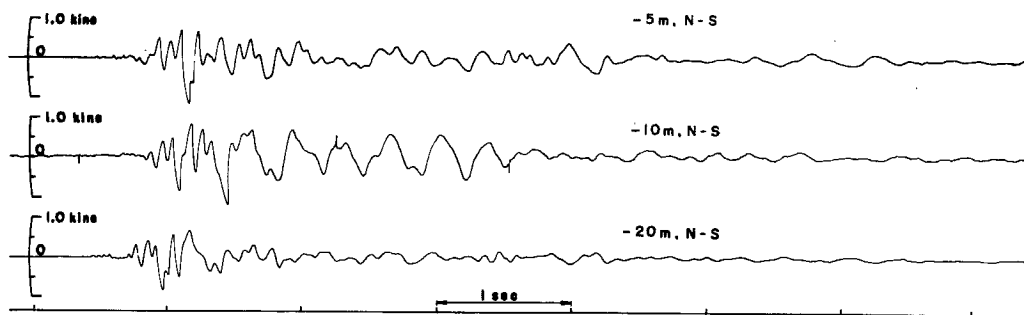
Iwano Bridge, July 14, 1966

Fig. 8 Seismogram (velocity)



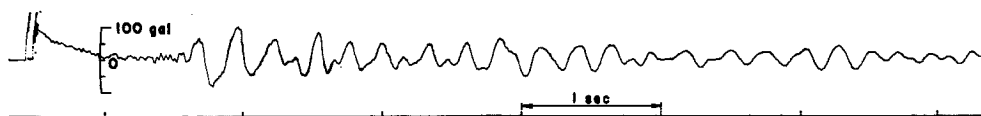
Kawanakajima Bridge, July 16, 1966 (N38E) S.C.: Bridge deck
(Span center)
P.T.: Pier top
G.P.: Ground surface
(25cm apart from pier)

Fig. 9 Seismogram (velocity)

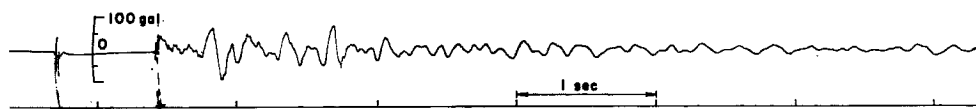


Matsushiro, August 18, 1966

Fig. 10 Seismogram (velocity)

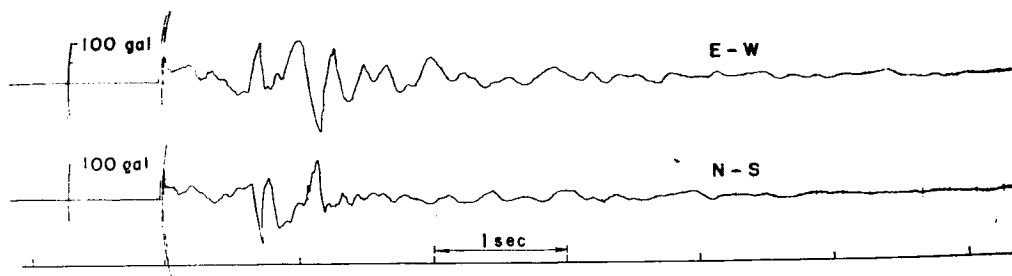


Shinshu University, June 22, 1966 (N17E)



Shinshu University, July 10, 1966 (N17E)

Fig. 11 Accelerogram



Matsushiro-so, September 27, 1966 (4:03)

Fig. 12 Accelerogram

信州大学工学部と松代荘における加速度記録の例としては最大加速度がそれぞれ 94 gal および 140 gal と計測されたものを Fig. 11 と Fig. 12 に示した。これらの記録例はいずれも初期微動の部分が完全でないが、これは電磁式強震計に起動器を用いているためであり、主要動の部分には影響を与えていない。しかしながら初期微動の継続時間が短い地震の場合にはデーターレコーダーが記録を開始したときにはすでに主要動が始っている記録例もみられた。したがって以下の解析に用いたのは主要動が完全に記録されているもののみを対象とした。

5. 観測結果の解析

各観測点で磁気テープに収められた地盤の震動と構造物の応答はきわめて多数であるので、各観測点ごとに揺れの大きなもの、あるいはその観測点での代表的な地震動による記録を数例ないしは十数例ずつを抽出して解析に供した。磁気テープからの再生記録は 160 c/s および 100 c/s のサンプリングで主要動の最初から 4 秒間を A-D 変換した後、電子計算機によりフーリエスペクトル、相関関数、応答スペクトルなどを計算した。

(1) 観測記録の振動数特性

Fig. 13 は岩野橋での記録についてのフーリエスペクトルの 1 例である。この図にみるように地盤の深さ方向におけるスペクトルの形にはほとんど変化はなく、そのピークも 8 c/s 前後にみられる。また地表面下 23 m, 10 m, 5 m に対するスペクトル振幅もほとんど差異はなく、最後の地下 5 m から地表面の間で振幅が急激に増大していることが認められる。この傾向は Fig. 13 (N-S 成分) の地震の E-W 成分についても同様であり、また他の地震によって得られたスペクトルにおいてもほとんど同じ傾向を示している。Fig. 14 は岩野橋における 5 回の地震によって得られたスペクトルの平均値を地下 23 m と地表面とについて示したものである。この図によれば地下 23 m では 5 c/s と 8 c/s に 2 つのピークを持っているが、地表面では 6~7 c/s 付近の谷が顕著でなくなり 5 c/s でのピークもあまり目立たなくなっている。

そこで地下 23 m に対する地表面でのスペクトルの比を求めたのが Fig. 15 である。同図において太い実線は Fig. 14 のスペクトルの比、細い実線と破線はそれぞれ別の地震によって得られたスペクトルの比、点線は細い実線で示した地震の記録である速度波形を数値積分して得た変位波形について再びスペクトルを求めて地下 23 m と地表との比を示したものである。この図によると 1, 6, 15, 18 c/s にピークがみられるが、6 c/s 以外でのピークはもとのスペクトルの値が小さいからほとんど問題とならず、結局この地点ではとくに 6 c/s 前後の波が増幅されていることを示すものであろう。しかるにいずれの地震についてもスペクトル図は地表面からの深さにかかわらず 8 c/s でピークを示すのは、この観測点付近の地盤の卓越振動によるものであり、地下 23 m から地表にかけての層内では 6 c/s 前後の波が増幅されたものと考えられよう。

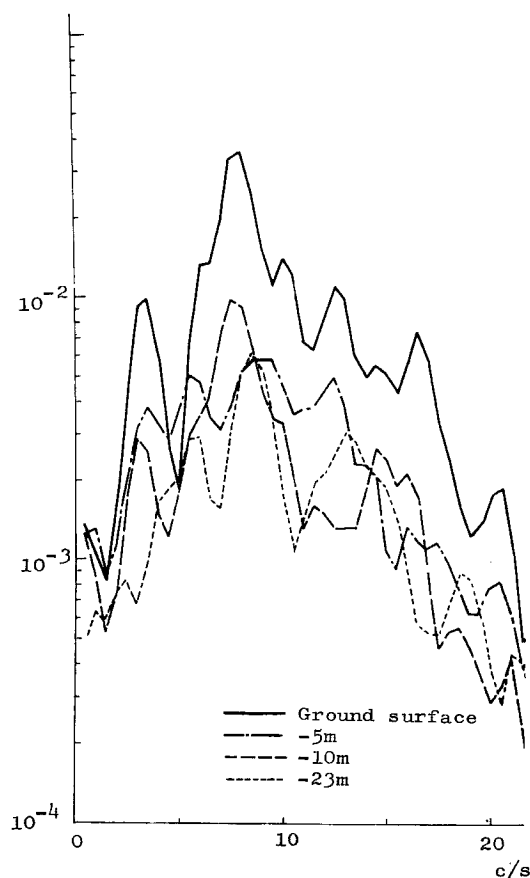


Fig. 13 Velocity Spectra (Iwano Br., N-S)

Fig. 16 には松代荘において観測した速度波形についてのスペクトルを示した。この地点でのスペクトルはいずれの地震についても、この図と似たスペクトル図を持ち、先の岩野橋におけるそれとは相当異なった形をしている。そのピークは $3 \sim 7$ c/s にみられ、 16 c/s 付近からは急激に小さくなっている。このように松代荘では岩野橋に比較して震源距離が短いと考えられるにもかかわらずスペクトルのピークが低い振動数でみられることは、Fig. 4 より明らかなように松代荘は相当に軟かい地盤であることに起因すると考えられ、このことは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既知の事実と一致している。一方、地下 5 m と地下 20 m でのスペクトル振幅の大きさを比較すると、この両者の間にはほとんど差異がみられず、深さによる震動振幅の変化が小さいことを示している。先の岩野橋での解析結果についても地盤による震動振幅の増幅作用は地表面に近い数 m の間で顕著で、それ以上の深さではほとんど増幅がみられなかったが、ここに示した松代荘は岩野橋とは非常に違った地盤であるにもかかわらず、やはり地下 20 m から地下 5 m までの間ではほとんど増幅作用を受けていないことは、構造物に及ぼす地震力を考えるに際して興味ある示唆を与えている。

つぎに、地震時における構造物と地盤の関連を調べた川中島における記録のスペクトル解析の結果を Fig. 17 に示した。この図中で実線、破線、点線はそれぞれ桁上、橋脚に 25 cm と近接した地盤上、橋脚から 7 m 離れた地盤上でのスペクトル振幅を表わしている。 8 c/s 以下の低い周波数域ではこれら 3 者のスペク

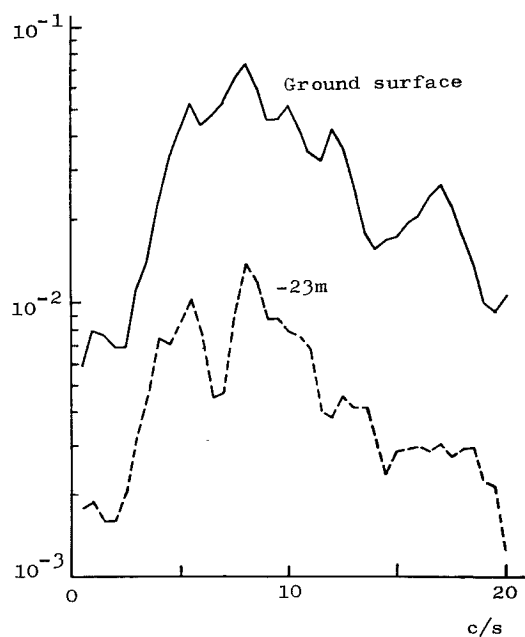


Fig. 14 Velocity Spectrum Averaged for Five Earthquakes (Iwano Br., N-S)

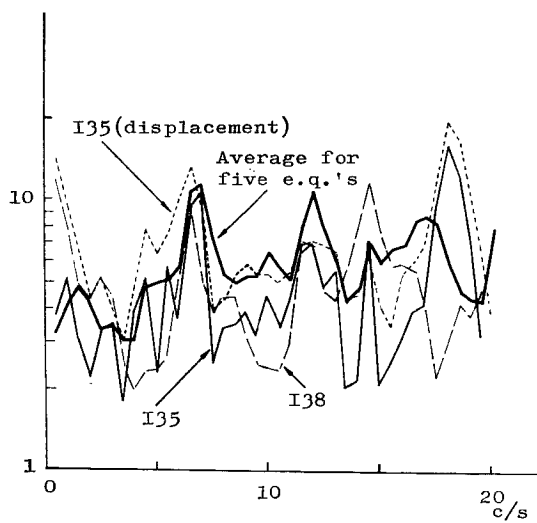


Fig. 15 Spectrum Ratio (Iwano Br., N-S)

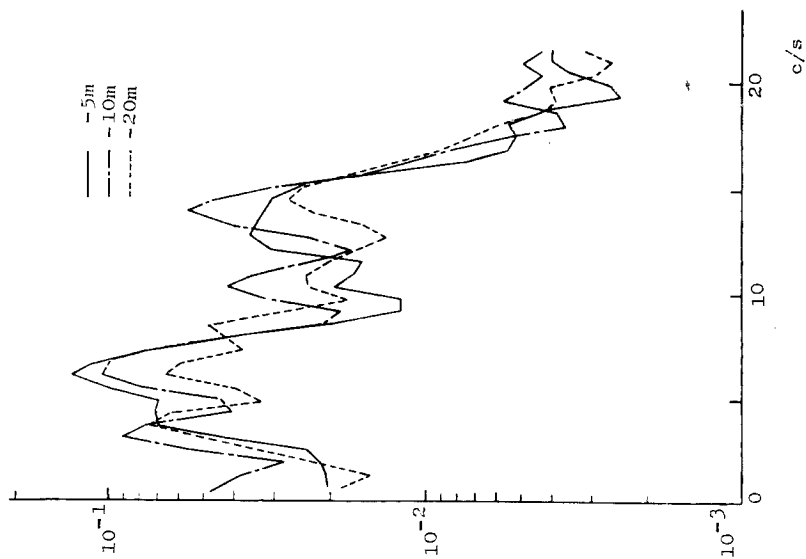


Fig. 16 Velocity Spectra (Matsushiro so)

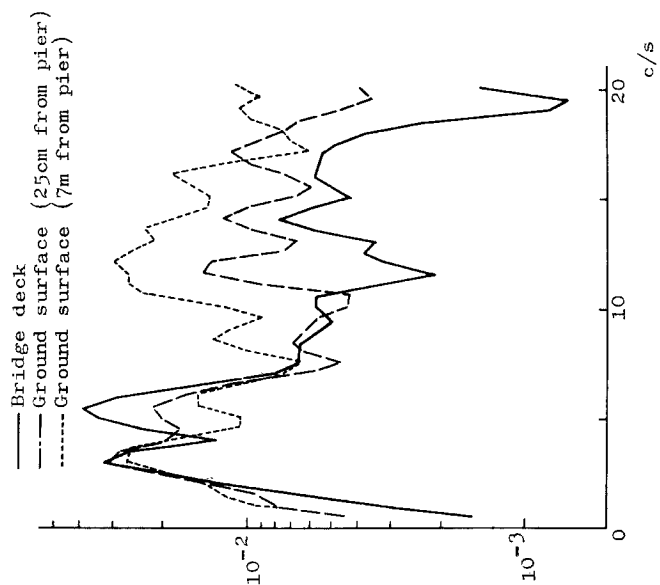


Fig. 17 Velocity Spectra
(Kawanakajima Br., parallel to axis)

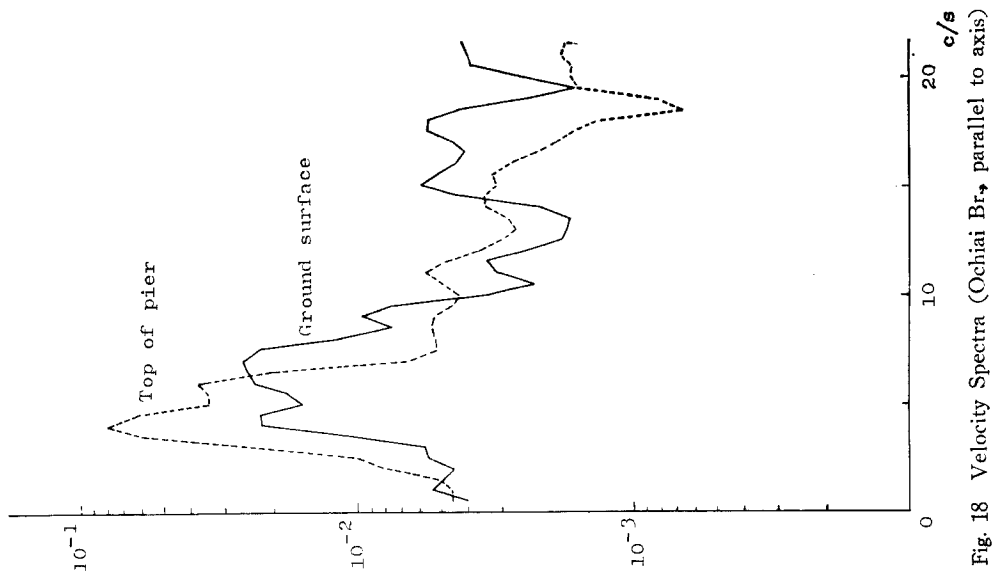
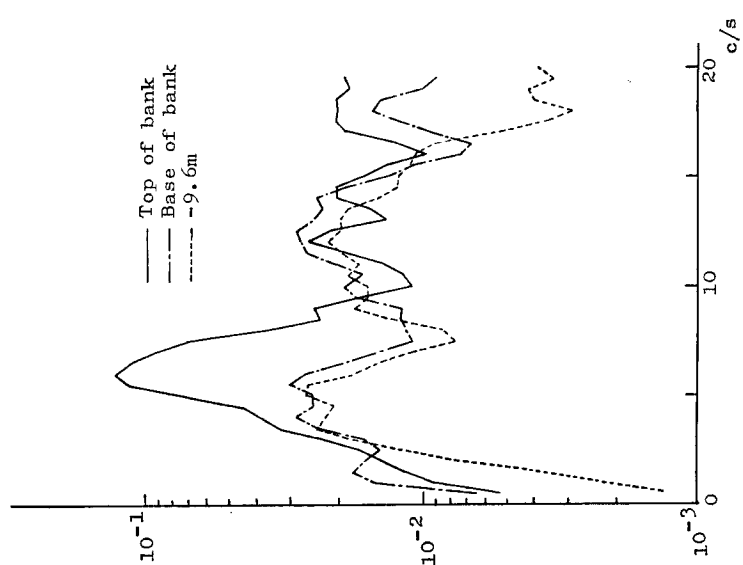


Fig. 18 Velocity Spectra (Ochiai Br., parallel to axis)

Fig. 19 Velocity Spectra
(Koshoku Br., lateral embankment)

トル振幅はほぼ同程度であるが、それより高い周波数域において相当違った形状をしており、地盤から橋脚周辺の地盤、さらに橋脚を経て橋桁に至るまでの間に比較的高い周波数の波が減少して行く過程が明瞭にみられる。こうした構造物によるフィルター作用の現象は落合橋での記録から得られた Fig. 18 のスペクトル図にも明らかである。この場合は橋脚高が川中島橋のそれより大きいので高い周波数の成分が減少するのみならず、低い周波数成分の増幅が顕著であり、スペクトル図のピークも地盤上の $6\sim 8$ c/s に対して橋脚上ではピークの周波数が 4 c/s に移動しているのがよくわかる。このスペクトル図について地盤に対する橋脚頂部でのスペクトル振幅の倍率を求めると、 $3.5\sim 4$ c/s にきわめてするどいピークが現われ、それは対象とした橋脚の固有振動であろうと推察されるが、その振動形態については明らかでない。

こうした構造物による増幅作用は土構造物である堤防についても同様である。Fig. 19 は更埴橋での堤防と地中での地震動記録から得たスペクトル図であり、同図にみるように地下約 10 m と地表面の法尻まではほとんど同じスペクトルを有しているが、法肩では相当の増幅作用を受けていることがわかる。この堤防は法尻と法肩の高低差が 3.7 m 程度であるにもかかわらず、卓越振動数の付近では約 10 倍近い増幅を受けていることは注目される。

(2) 観測記録の波形分析

観測された記録の自己相関関数を計算して波形分析を行なった。Fig. 20 には岩野橋地点の地中と地表面における同一地震に対する自己相関関数を示した。同図に明らかのように、この例では地下 10 m では比較的周期成分が多いにもかかわらず、それより 5 m 上の場所ではややランダムな波動が多くなっていること

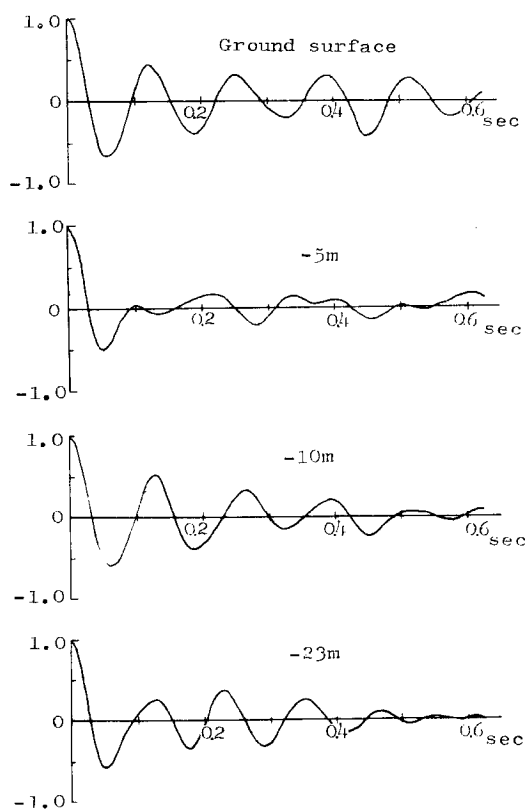


Fig. 20 Auto Correlation Functions (Iwano Br., E-W)

がわかる。すなわちこの記録例では地下 23 m の深い場所できわめて周期性に富んだ波が観測され、次第に地表に近くなるにしたがってランダムな波が多くなり、最後に地表では再び周期化されていることになる。地盤が軟弱な松代荘での結果を Fig. 21 に示したが、この場合は先のスペクトル図の場合と同様に地盤の硬い岩野橋より長周期の成分が卓越していることが明らかである。

一方、構造物では波形がどのように変わるかを調べたのが Fig. 22, 23 の結果である。Fig. 22 は落合橋の観測地点の橋脚と地盤について示したものであり、Fig. 23 は更埴橋で堤防について観測した結果である。これらの図はいずれも地表面から上に出ている構造物では地盤での地震波がフィルター作用により周期化されていくことを示している。また構造物とその周辺の地盤との関連を調べた川中島橋における記録につ

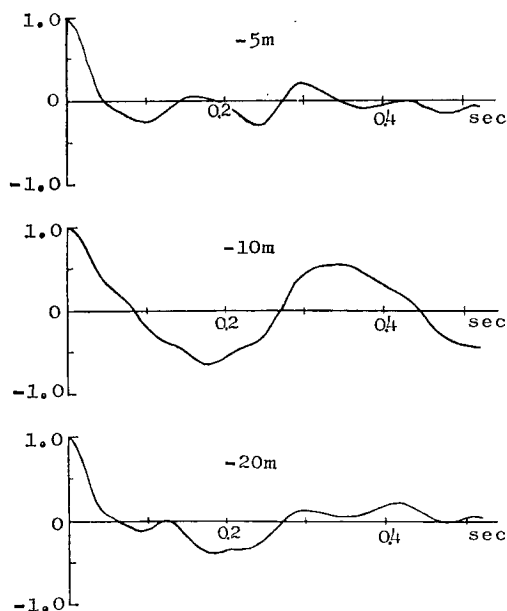


Fig. 21 Auto Correlation Functions (Matsushiro-so, N-S)

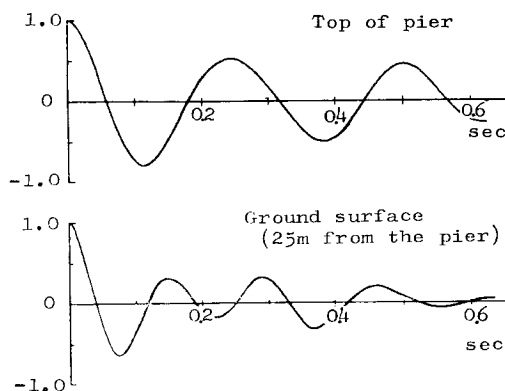
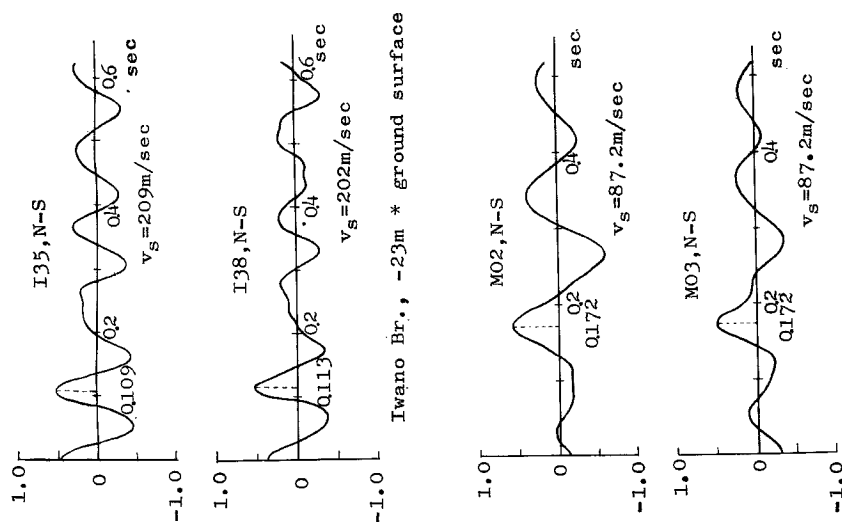


Fig. 22 Auto Correlation Functions (Ochiai Br., parallel to axis)



Matsushiro-so, -20m * -5m

Fig. 24 Cross Correlation Functions

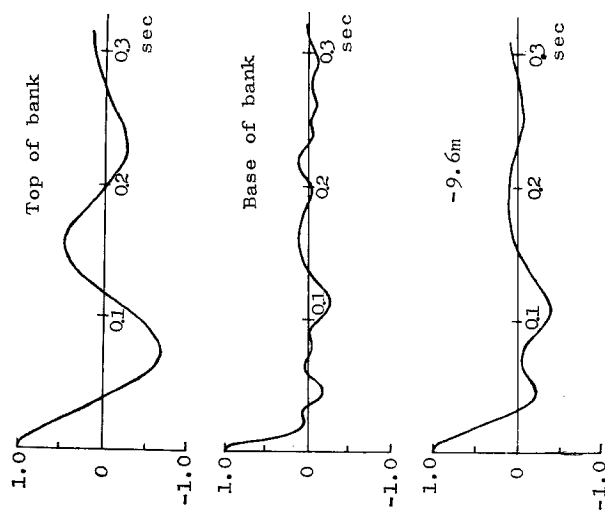


Fig. 23 Auto Correlation Functions
(Koshoku Br., lateral to embankment)

いての解析結果はいずれの地震に対しても橋脚上とその周辺の地盤の自己相関関数はほとんど同じ形であり、周期の面のみならず波形の面からも構造物に接する近傍の地盤は構造物の影響を受けて両者は相関連して連成的に運動することが実証されたと考えられる。

つぎに地盤中の深さ方向に異なる2点での観測結果より両者の相互相関関数を計算した結果を Fig. 24 に示した。上の2例は岩野橋、下の2例は松代荘での記録から得たものである。これらの図中の v_s の値は相関図の最初のピークに対する遅延時間が2点間を波動が伝播する時間と考えられるので、この時間を読み取って2点間の距離を除いたものである。したがってこの値は2点間のS波の平均伝播速度であると考えてよい。岩野橋については地下23mと地表面との間での値であり、2つの地震に対してそれぞれ209 m/sec, 202 m/sec であるが、この地点は Fig. 4 にみたごとく比較的硬い地盤でありほぼ妥当な値であろう。また、松代荘は地下20mと地下5mの2点間についての計算結果であり、この場所は深さにかかわらずほぼ一様な地盤であることが先の Fig. 5 に示されており、計算された約87 m/sec はこの観測点でのS波の伝播速度であると考えられる。

(3) 加速度記録による応答スペクトル

松代群発地震の持つ特性を構造物の応答の面から調べるために、観測によって得られた加速度記録により1自由度系の速度および加速度応答スペクトルを求めた。Fig. 25, 26, 27 は信州大学工学部と松代荘で観測した最大加速度を伴った地震動についての速度応答スペクトルを示したものであり、縦軸は1自由度系の応答速度の最大値、横軸はその非減衰固有周期、パラメーターは減衰定数である。Fig. 25 は信州大学工学部についての例であるが、0.3 sec 付近にすどいピークを有し、0.5 sec 以上に対しては単調に減衰する傾向にある。この傾向は他の地震動の記録についても同様である。また、地盤の軟弱な松代荘においてもほぼ同様な傾向を有しており、Fig. 26 はその1例であるが、この場合は S_r が減少しはじめるのが1秒程度に伸びている点が信州大学におけるそれとは異なっている。しかしながら、松代荘で観測された記録の中には平均的なスペクトル図とは違った形を示すものが含まれており、Fig. 27 はその1例である。この例では固有周期が1.5秒程度まではかなりの高いレベルを維持しつつ、ほぼ一定の値を示しており、稀には3秒程度まで S_r が一定の傾向を持つものも見られた。

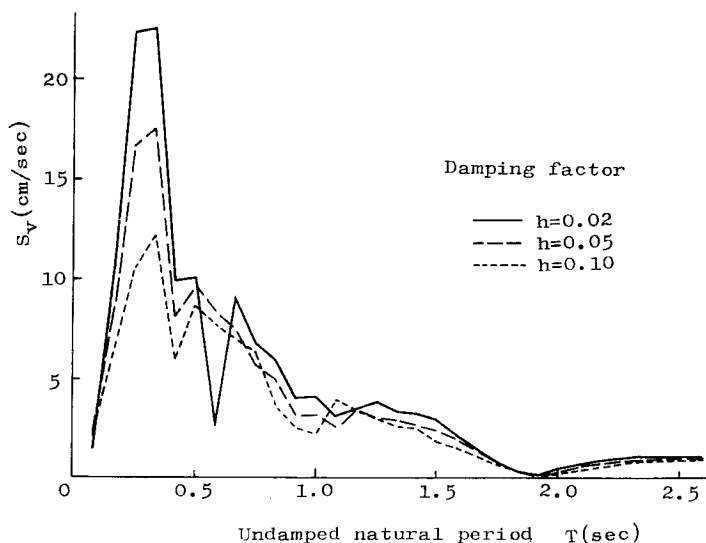


Fig. 25 Velocity Response Spectra (Shinshu Univ., N-S)

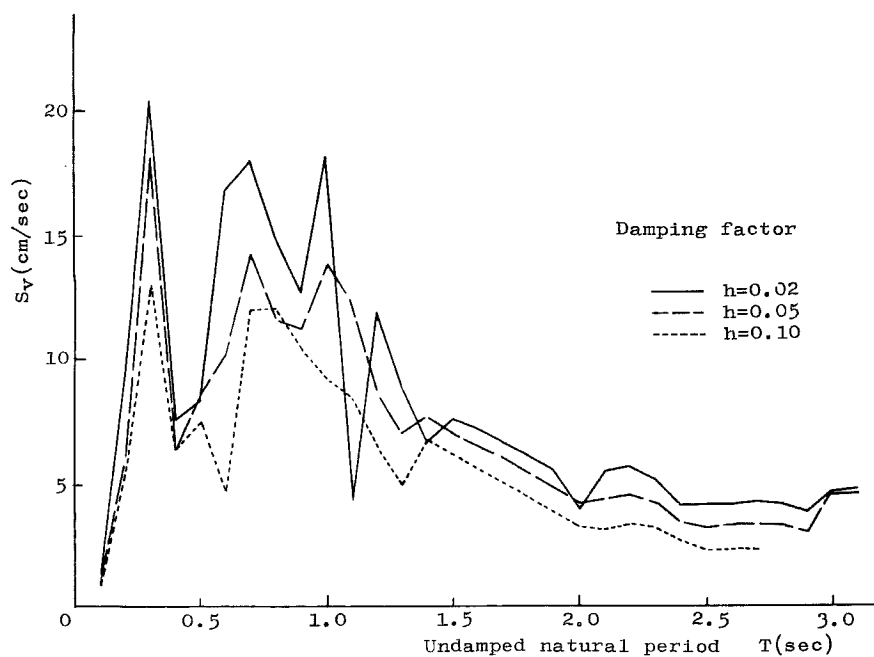


Fig. 26 Velocity Response Spectra (Matsushiro-so, E-W)

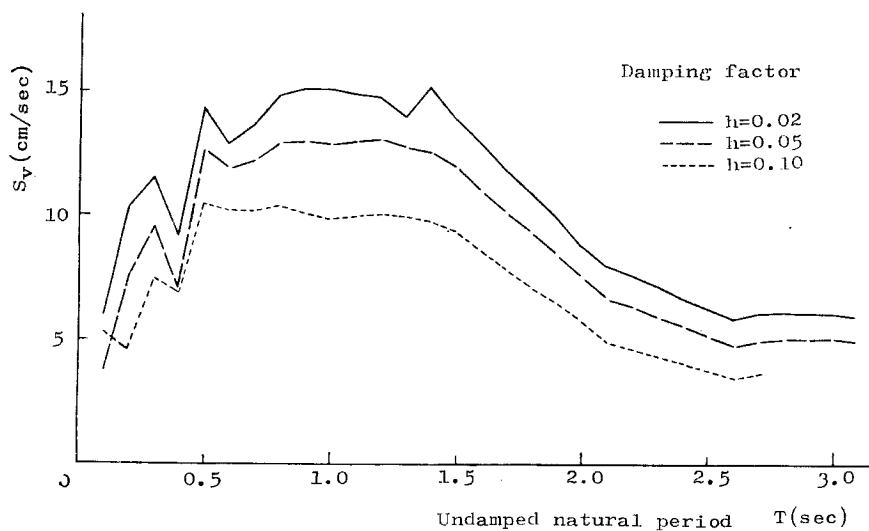


Fig. 27 Velocity Response Spectra (Matsushiro-so, N-S)

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周期に関してほぼ一定の傾向を持つ場合が多いとされているが、松代群発地震では上述のように長周期の構造物に対しては S_r の値が小さくなる地震動が多くなっている。この関係を比較対照したのが Fig. 28 であって、この図に明らかのように松代群発地震は構造物に及ぼす影響の面ではかなり違った様相を呈している。速度応答スペクトル S_r は入力地震の大きさにより当然その値が変わるので、これを無次元量で表示するために1自由度系に生ずる最大加速度応答 S_a を求め、この値を入力とした地震記録の最大加速度 $\ddot{z}_{max}$ で除した加速度スペクトルの計算結果を Fig. 29 に示した。したがってこの縦軸の値は構造物の固有周期ごとに、入力加速度に対する最大応答加速度の倍率を表わしている。これらの図中において、長野、松代はそれぞれ信州大学工学部、松代荘での観測記録に基づいたものである。Fig. 29 によれば長野、松代地方に起っている地震動は固有周期が 0.2~0.3 sec 程度の構造物に及ぼす影響が最も大きく、地動の加速度の2~3倍程度の最大加速度が生じる可能性のあることを示しており、固有周期が 1 sec 以上の構造物に対しては大きな影響を持たな

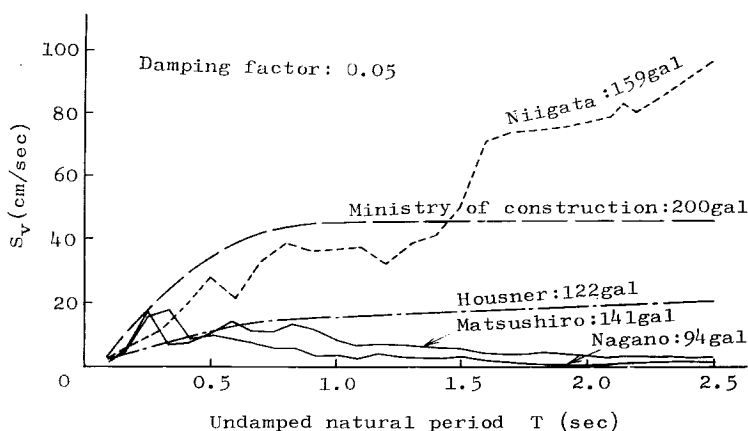


Fig. 28 Comparison of Velocity Response Spectra with Past Data

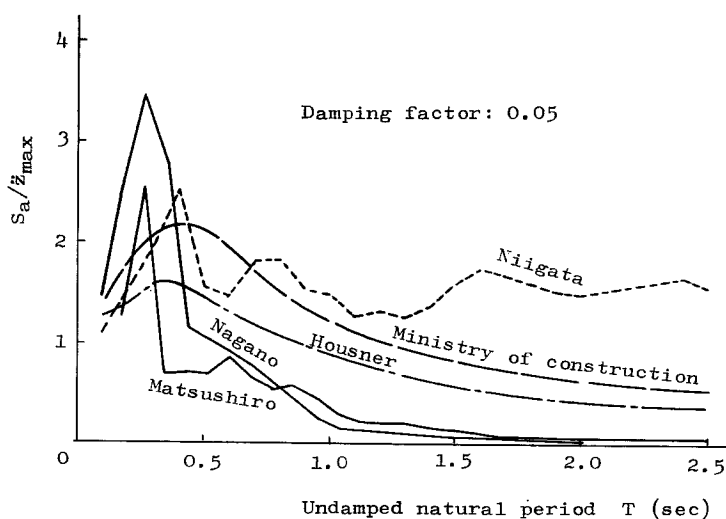


Fig. 29 Comparison of Acceleration Response Spectra with Past Data

いことを意味している。このように比較的長周期の構造物の応答が小さいのは、松代地方での群発地震はいずれも比較的短周期でしかも地震継続時間が短いので、長周期の構造物の応答が大きくなり得ないためであろうと考えられる。

5. 結 言

松代群発地震地域の橋りょうと地盤における地震動とそれに対する応答を観測し、得られた記録を解析することによって上述のような成果を収めた。観測した地震は数百にもものぼり、解析はそれらのうち比較的揺れの大きなものを対象としたためごく一部のものに限られたが、地盤の深さ方向の震動の差異が地盤の種別とどのような関係にあるか、構造物とその周辺の地盤とはどのような関連で震動するか、また松代地震の耐震工学の面における特質はどうであるかなどに関してある程度の情報を得ることができた。

他の資料についても整理解析を進めており、かつ長野県戸倉町においては引続き電磁式強震計により地表面での地震加速度を現在も観測中である。これらの観測と解析を今後進めることによって耐震工学における有力な資料たらしめたいと考えている。

なお、本研究の数値計算は京都大学電子計算機 KDC—II によったことを付記し、これらの調査研究は昭和41年度文部省科研費（特定課題）にも負うところが大きいとともに、京都大学防災研究所と長野県土木部より絶大な御支援を頂き、さらにわれわれ研究室の大学院学生諸君にも終始協力を頂いた。あわせて深謝する次第である。