

松代群発地震地域における震動観測結果について

SEISMIC OBSERVATIONS IN THE REGION OF MATSUSHIRO EARTHQUAKES

後藤 尚 男* ・土岐 憲 三** ・横山 康 夫***
亀田 弘 行**** ・秋吉 卓*** ・石田 昌 弘***

By Hisao Goto, Kenzo Toki, Yasuo Yokoyama,
Hiroyuki Kameda, Takashi Akiyoshi and Masahiyo Ishida

1. 緒 言

昭和 40 年 8 月上旬に始まった松代群発地震は 19 ヵ月後の 42 年 2 月の現在に至るもなお活動をつづけている。この地震は、当初は規模の小さな局地地震とみられていたが、その後次第に地震発生回数も増加し、41 年の 4~5 月にはその最盛期を迎えて 41 年 4 月の有感地震回数は約 12000 回にまで達した。それより数ヵ月間は下降線をたどっていたが、9 月には再び活発化して松代町では大きな地すべりが生じて、田畑や人家にも被害が出た。このように一定の地域内に地震が続発することはきわめてまれな現象であり、地震動の特性、地震災害の軽減などの研究に多くの資料をもたらすものである。構造物の耐震性の研究においても地震動に対する構造物の応答を問題とするときには入力である地震動の特性、とくに構造物は一般に基礎工を有することからして地盤の深さ方向の震動の相異を知ることが重要な課題であるが、地震の発生を予知できない現在の段階では、このような地盤の震動観測資料は十分に得られていない。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際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、このような観測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されている長野市松代町周辺、埴科郡戸倉町および長野市内の信州大学工学部などにおいて地盤および橋梁の震動観測を実施し、その結果について若干の解析を行なって地盤と構造物の地震時における震動の特性を明らかにし、もって耐震工学上の資料たらしめようとしたものである。

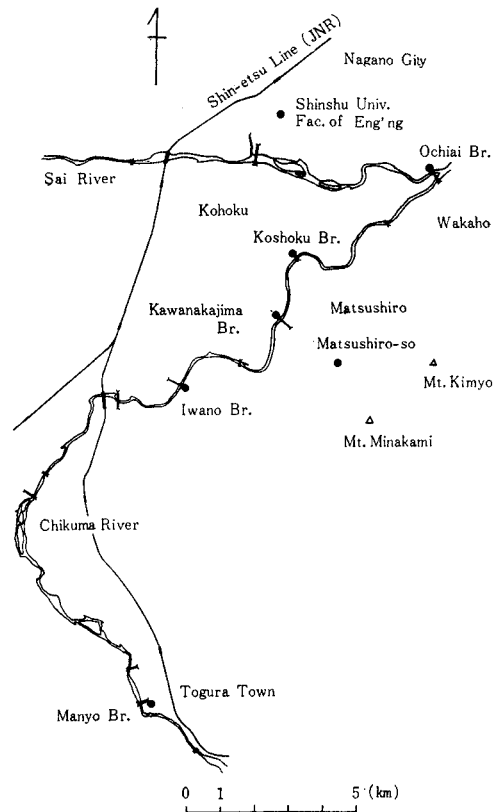
2. 震動観測の概要

(1) 観測地点の概要

地震動観測の対象とした地盤および橋梁は 図一1 に示

* 正会員 工博 京都大学教授
** 正会員 工修 京都大学助教授
*** 正会員 工修 (横山) 京都大学助手
以上 5 名ともに工学部交通土木工学教室
**** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 博士課程
土木工学専攻

図一1 震動観測地点の概略図



した千曲川筋にある下記の 7 地点である。

- 1) 信州大学工学部構内, 長野市若里
- 2) 岩野橋右岸, 長野県埴科郡松代町 (現在長野市)
- 3) 更埴橋左岸, 長野県埴科郡更北村 (同上)
- 4) 川中島橋左岸, 長野県篠井市 (同上)
- 5) 落合橋左岸, 長野県上高井郡若穂町 (同上)
- 6) 松代荘, 長野県埴科郡松代町 (同上)
- 7) 万葉橋右岸, 長野県埴科郡戸倉町

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て地表面での震動観測を主に行なったが、その地盤は 図一2 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ているような構成になってい

図-2 信州大学工学部観測地点の地盤図

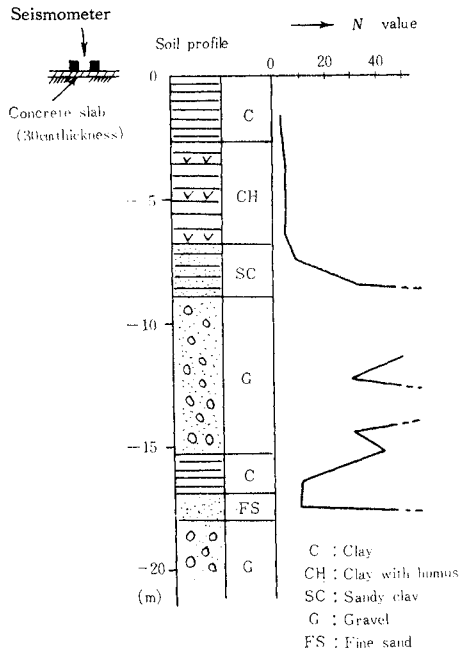
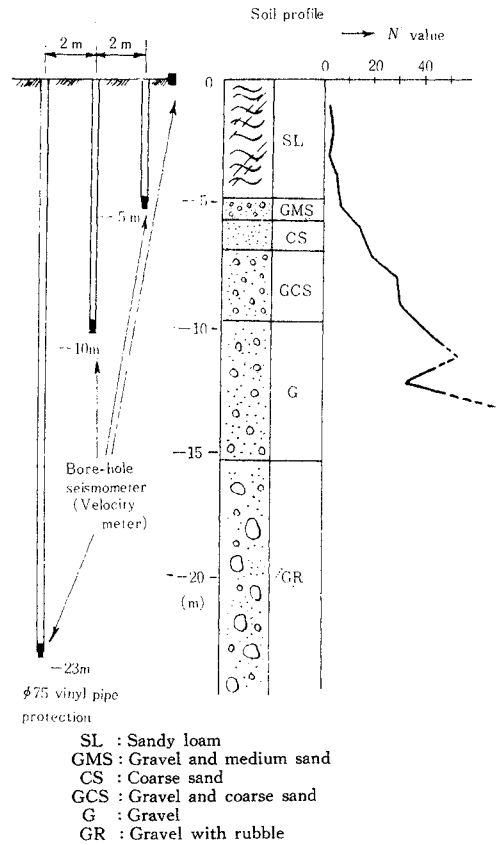


図-3 岩野橋観測地点の地盤図



る。

岩野橋は永久橋がまだ架設されていないので、この地点における観測は地震時における地盤内部の震動の特性を調べることが目的として実施したものである。すなわち岩野橋右岸の高水敷に地表面から、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って地盤構成を調査した後、その中に地中地震計を設置して地表面と合わせて合計 4 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、地震計の配置は図-3 に示したが、この図にみるように地表面下 5 m から 15 m までは次第に硬くなり、それ以上の深さにおいては N 値が 50 以上と推定される硬い砂礫地盤である。更埴橋も永久橋が近く架設されることになっており、この観測点は地盤内部および土構造物である堤防での震動観測を目的として選定したが、ボーリングによる地盤構成や換振器の配置は図-4 に示したとおりである。一方川中島橋は、昭和 9~10 年に架設された幅員 5.5 m、橋長 495.8 m (タイドアーチ 2 連、1 桁 2 連) の三等道路橋であり、観測には図-5 にみる左岸橋台寄りを選んだ。また落合橋は昭和 34 年 4 月に着工、昭和 41 年末に完成予定であった幅員 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、その観測点は図-6 に示した第 11 号橋脚およびその周辺の地盤上である。以上の 2 つの橋梁での観測は地震時の橋梁と地盤の震動特性やその相違を明らかにするために行なったものであり、換振器の橋脚、橋桁、地盤などにおける配置

図-4 更埴橋観測地点の概略図

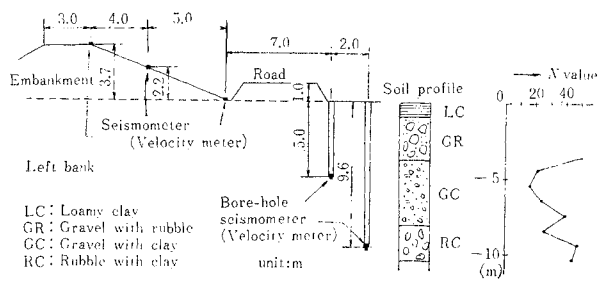
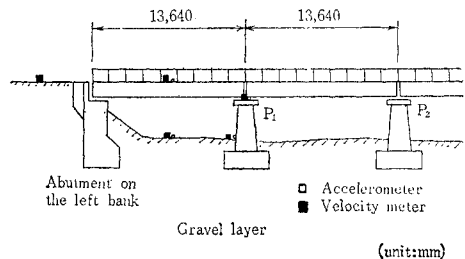
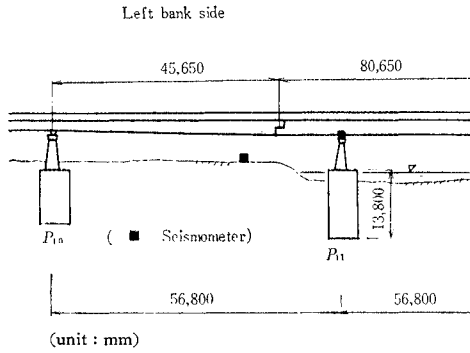


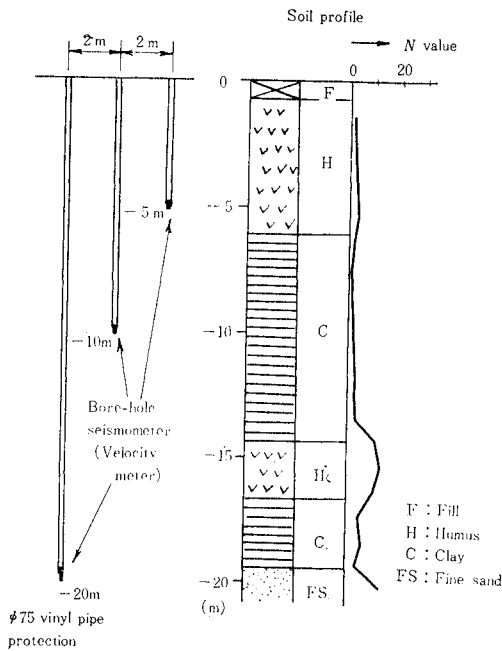
図-5 川中島橋観測地点の概略図



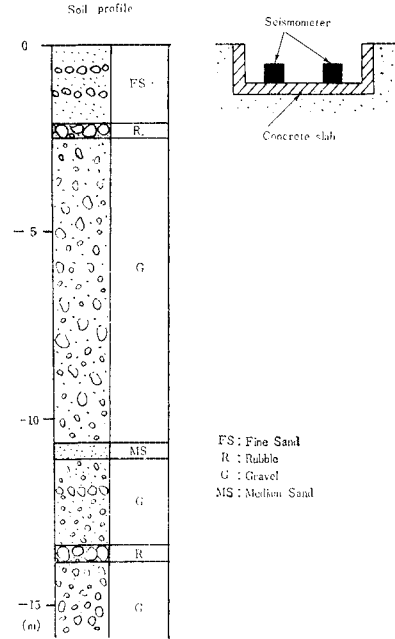
図一六 落合橋観測地点の概略図



図一七 松代荘観測地点の地盤図

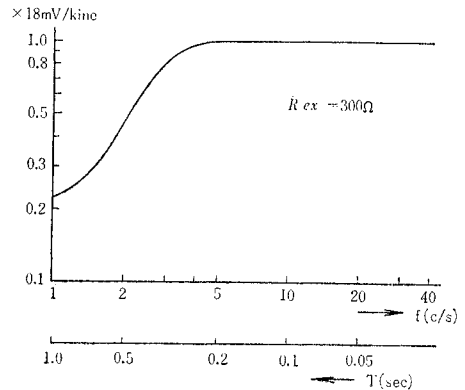


図一八 万葉橋観測地点の地盤図



ップとして用いた。この地中地震計は水平2成分，上下1成分を内蔵し，外形は直径64mm，長さ200mmの円筒状となっている。その固有振動数は3c/sで，周波数特性は図一九に示したが，その感度は18mV/kineであるので，直流増幅器を通じて7チャンネルのデータレコーダーに収録した。岩野橋，更埴橋，松代荘などではこのような計測方式を用いたが，まず岩野橋での観測には4個の地中地震計により合計して成分を適宜に成分の切換えを行なって，2日間にわたり合計40時間の連続観測を実施した。更埴橋では2本のボーリング孔には上記の地中地震計を設置し，また堤防ののり尻・のり肩・中腹には固有振動数が1c/s，感度1V/kineの速度

図一九 地中地震計の周波数特性



さらに松代荘の観測点では，建物の前庭に図一七に示したように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。この観測点は図にみるようにそのほとんどがN値5以下のきわめて軟かい粘土質地盤であり，他の観測地点における地盤とは相当異なっていて軟弱地盤の一種とみなせる。また，戸倉町の万葉橋観測点は以前に河川敷であった堤内地にある家屋内のコンクリート造の地下貯蔵庫に換振器を設置したが，その地点から約30m離れた場所で行なったボーリングの結果を示した図一八より岩野橋，更埴橋などと同様に河川敷に共通した砂礫地盤であることがわかる。

(2) 震動計測の概要

この震動観測は観測の方法，対象，計測方式などによりつぎの3通りに分けられる。

a) 地盤表層内の震動速度の観測 地盤震動の観測にはボーリング孔の底に埋設した地中地震計をピックア

型換振器を配置して岩野橋と同様に2日間にわたって連続観測を行なった。

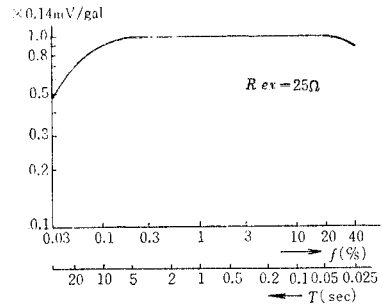
松代荘での地盤震動の観測にはピックアップとしては上記地中地震計を用いたが、記録方式は起動器を通じて3チャンネルのデータレコーダーに収録する方式をとり、約2カ月間にわたって観測を行なった。

b) 橋梁と地盤面の震動観測 川中島橋観測点では桁中心、1号橋脚上、橋脚から25cm離れた地盤上、橋台と橋脚の中間の地盤上、堤防上など速度型換振器を図-5に示したように配置して地盤と橋梁の連成した振動を観測した。観測に当っては、上記の換振器から適当な成分を選んで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25m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におけると同様であって2日間の連続観測を行なった。

c) 地盤表面の震動加速度の観測 地盤の震動加速度の観測は信州大学工学部構内、松代荘で行ない、現在も戸倉町万葉橋右岸で継続中であるが、いずれも速度型換振器に過減衰を与えた加速度変換器をピックアップとした電磁式強震計によりある程度の長期観測を行なった。この換振器は固有振動数が2c/sであり、その周波数特性は図-10に示したように0.2c/sから20c/sまでは一様な感度0.14mV/galである。また電磁式強震計は起動感度5galの起動器、前置増幅器、制御器、3

チャンネルデータレコーダーにより構成されており、起動器からの信号を受けてから0.5sec後に記録を開始し、記録継続時間は2分間である。各観測点での換振器の設置場所は前述のとおりである。

図 10 加速度交換器の周波数特性



以上の岩野・川中島・落合・更埴の4橋梁地点では、昭和41年7月11日~22日の間に、また信州大学工学部では6月13日~7月22日、松代荘では7月23日~11月14日の間にそれぞれ観測を実施し、万葉橋では11月15日以降引き続き観測続行中である。

3. 観測の結果

観測により得られた地震記録の数例を観測点ごとに図-11~図-16に示した。これらの記録例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

図-11 岩野橋観測点での震動記録 (I 28, 速度, 昭. 41. 7. 14)

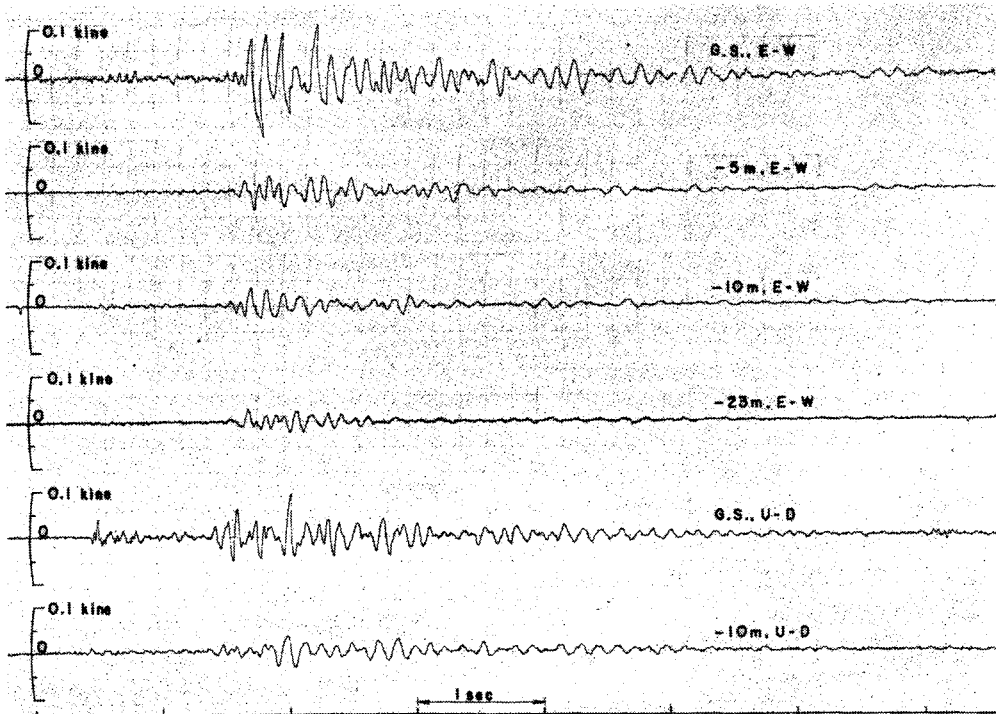


図-12 川中島観測地点での震動記録 (K 20, 速度, 昭. 41. 7.16, N 38 E)

S.C. : Bridge deck (Span Center), P.T. : Pier top, G.P. : Ground surface (25 cm apart from pier)

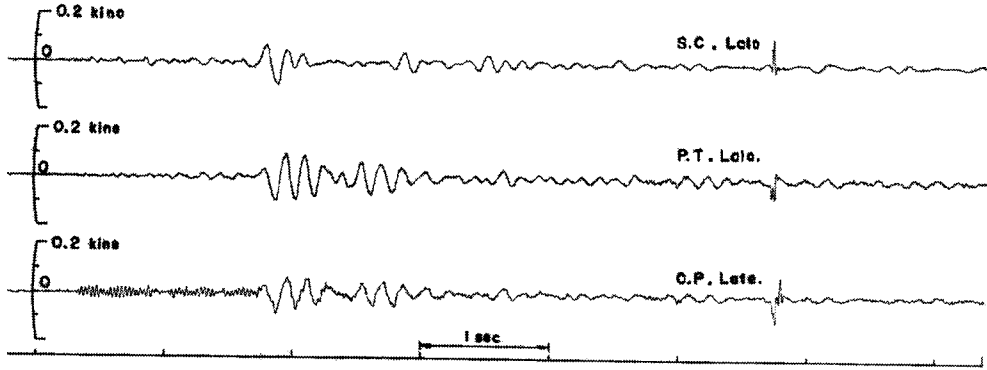


図 13 松代荘観測地点での震動記録 (M 03, 速度, 昭. 41.8.18)

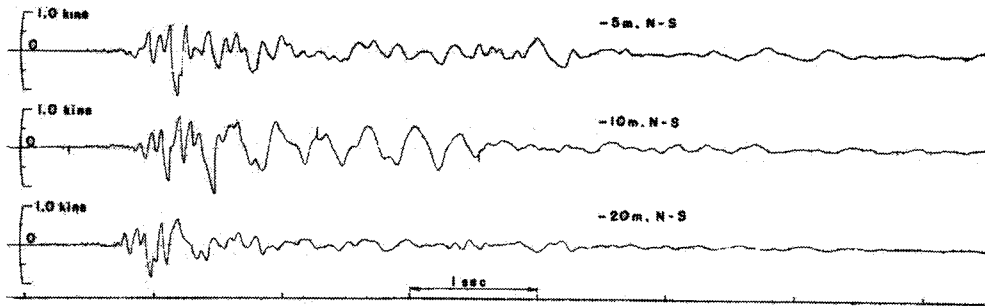


図-14 信州大学工学部観測地点での加速度記録 (S 02, 昭. 41.6.22, N 17 E)

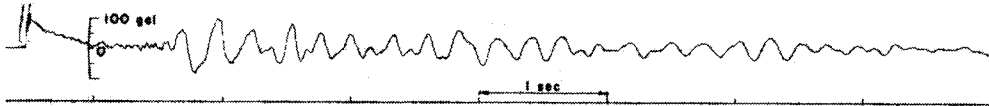


図-15 松代荘観測地点での加速度記録 (M 14, 昭. 41. 9.27)

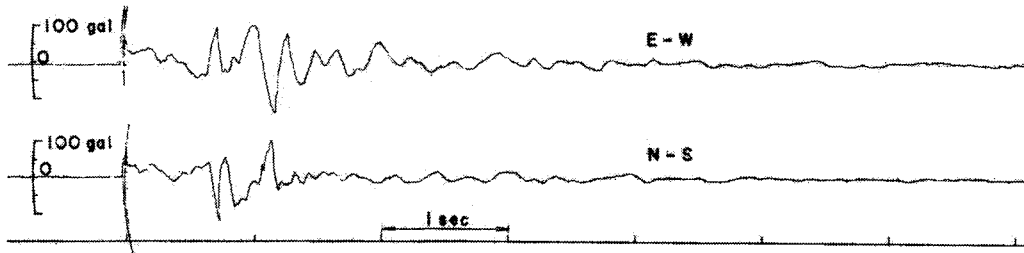
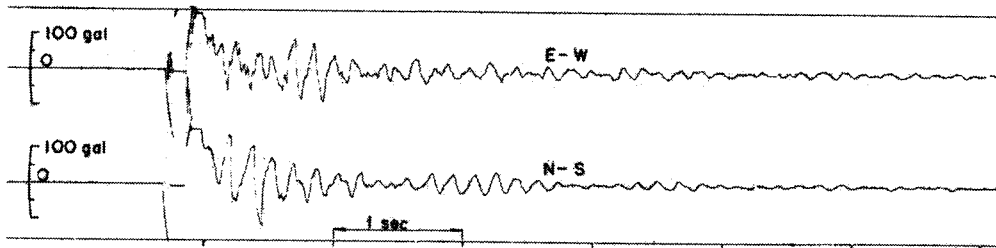


図-16 万葉橋観測地点での加速度記録 (T 02, 昭. 41.11.25)



ついてデータレコーダーから再生記録したものである。

岩野橋での記録例(図-11)では、初期微動が明瞭にみられるが、約30の地震について初期微動継続時間を読みとって頻度を調べた結果、その大部分は0.9~1.2secであり、岩野橋で観測された地震の震源距離はほぼ10km以内であろうと推察される。またここに示した例は水平成分と鉛直成分、深さ方向の震動振幅の相違などが明瞭に現われている。岩野橋で観測された地震動はそのほとんどが震度階Ⅱ以下のものばかりであり、その継続時間は6~7sec前後の地震が多く、特に主要動と思われる部分は2~3secのものが多数である。

川中島橋での橋梁および地盤の震動記録例(図-12)によると、橋脚上と橋脚から25cm離れた地盤とは非常に良く似た震動をしていることがわかるが、これは地盤上の測点が橋脚にきわめて接近していることと、橋脚が低いためであろうと考えられ、構造物周辺の地盤におよぼす構造物の影響が明らかに現われている。一方、落合橋での観測結果では、橋脚上の換振器と地盤上のそれとが約25m程度離れていることと、橋脚が川中島橋の橋脚より高いため、両者の間に直接的な相関関係が見受けられない。

地下5m, 10m, 20mの3測点での水平方向の震動振幅を対比した図-13の松代荘の例では、地震動の継続時間、震動振幅が深さ方向にほとんど差異がみられないことが注目され、先の岩野橋の場合とは違った震動特性を持っていることが推察される。

図-14, 15, 16はそれぞれ信州大学工学部、松代荘、万葉橋での加速度記録の例であり、いずれも記録の最初の部分には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。信州大学、松代荘の記録例はいずれも震度階Ⅳと発表された地震によるものであり、万葉橋での記録は松代での震度階Ⅱであった地震に対応している。

4. 観測結果の解析

各観測点で磁気テープに収録し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いもの、あるいはその観測点での代表的な地震動による記録、約80成分を抽出して解析に供した。磁気テープから再生した記録は160c/sおよび100c/sのサンプリングで主要動の4sec間をA-D変換した後、デジタル電子計算機により、フーリエスペクトル、相関関数、応答スペクトルなどを算出した。

(1) 周期特性の解析

図-17は岩野橋で得られた地盤震動の記録から求めたフーリエスペクトルの一例である。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、そのピークは8c/s前後にみられる。また地表面下23m, 10m, 5m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5m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。この傾向は同じ地震のE-W成分についても、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。図-18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、地表面と地下23mについて示したものである。地表面と地下23mのスペクトルはかなりよい相似を示しており、5c/sと8c/sのピークも一致しているがただ地下23mでは7c/s付近にあった深い谷が地表面においては認められない点

図-17 速度スペクトル(岩野橋)

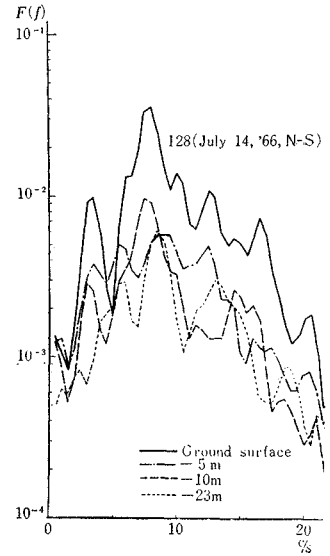


図-18 速度スペクトルの平均(岩野橋, N-S)

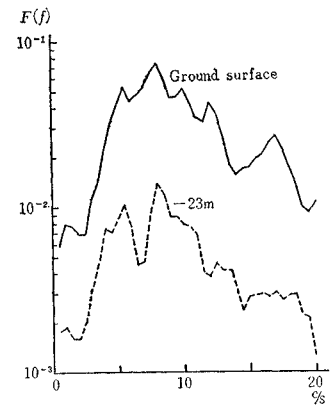
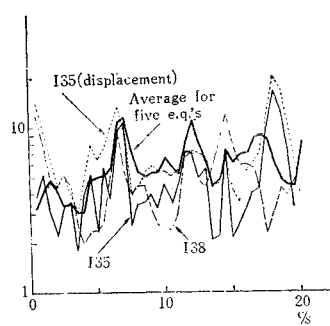


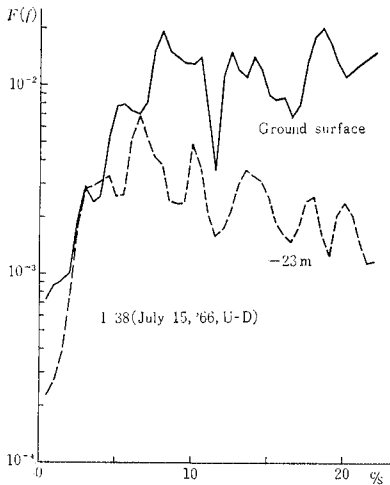
図-19 スペクトル倍率(岩野橋)



太い実線は図-18に示した5回の地震によるスペクトルの比、細い実線は図-17のスペクトルの比、破線は別の地震のスペクトル比、点線は細い実線に対応する地震を時間軸上で数値積分して変位記録としたものについて求めたフーリエスペクトルから計算した比率を表わしている。この図によれば1, 6, 15, 18c/sにピークを

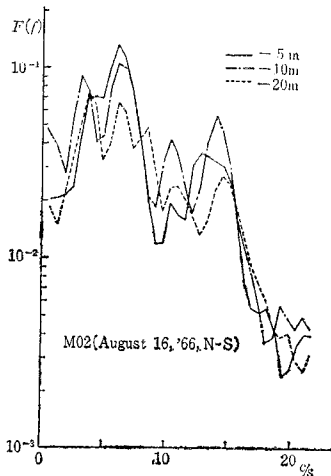
示しているが、6 c/s 以外でのピークはもとのスペクトルの値が小さいので問題にならず、結局この地点では特に 6 c/s 前後の波が増幅されたことを示すものである。しかるに、もとのスペクトル図は地下 23 m と地表のいずれも 8 c/s でピークを示すのはこの観測点付近の地盤の卓越振動によるものであり、地下 23 m から地表にかけての層内では 6 c/s 前後の波が増幅されたものと考えられる。また、この倍率図から地盤表面では地下 23 m の 4~6 倍の震動レベルを持っていることも示されている。

図-20 速度スペクトル (岩野橋)



一方、図-20 は岩野橋観測点での地震動記録の上下動についてのスペクトルの例である。まず地表面について先の水平動と比較すると、上下動では 7~20 c/s 付近までほぼ一定の値を示しており、特に 10 c/s 前後での低レベルが顕著である。また、地下 23 m でのスペクトルは形状・振幅ともに上下動と類似していることから、地盤表層内の深い部分においては、上下動と水平動はほぼ同様な震動特性

図-21 速度スペクトル (松代荘)

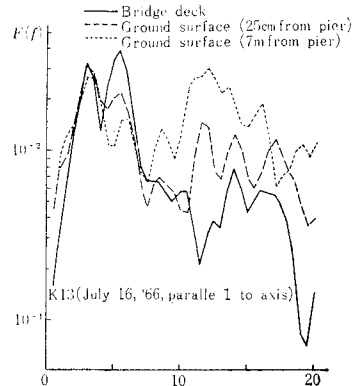


持っており、地表面近くでは水平動の方が震動振幅が大きく、また周波数的にはより低周波数の成分が増えるものと考えられる。松代荘において観測した地震記録についてのスペクトルを 図-21 に示した。この観測地点でのスペクトルはどの地震につ

いてもほぼ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 3~7 c/s 付近にみられ、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、図-7 より明らかかなように松代荘は相当に軟かな地盤であることに起因すると考えられ、地盤の軟かい場所では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 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おいても地下 5 m, 10 m, 23 m におけるのスペクトル振幅にそれほど大きな差が認められなかったことを考え合わせると、結局地盤による震動振幅の増幅作用は地盤が軟弱であっても地下の深い部分では小さく、地表面に近い数 m 程度の部分で大きく増幅されているものと考えられ、構造物あるいは構造物の基礎工におよぼす地震力を考えるに際しては興味ある示唆を与えている。

つぎに、地震時

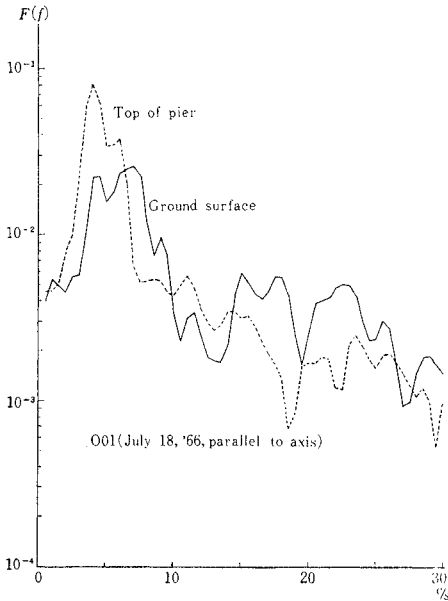
図-22 速度スペクトル (川中島橋)



における地盤震動と構造物の応答との関連を調べた川中島橋の観測点での記録についてのスペクトル解析の結果を 図-22 に示した。図中で、実線、破線、点線はそれぞれ桁上、橋脚と 25 cm 離れた地盤上、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周波数の高い波が減少して行く過程が明瞭に認められる。このように、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 図-23 のスペクトル図にも明らかである。この場合は川中島橋より橋脚が高いため、高周波数成分が減少するのみならず、低周波数成分の増幅が顕著であってスペクトル図のピークの周波数が地盤上での 6~8 c/s に対して橋脚上では 4 c/s に移動していることが認められる。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 3.5~4 c/s にきわめてするどいピークが現われ、それは対象

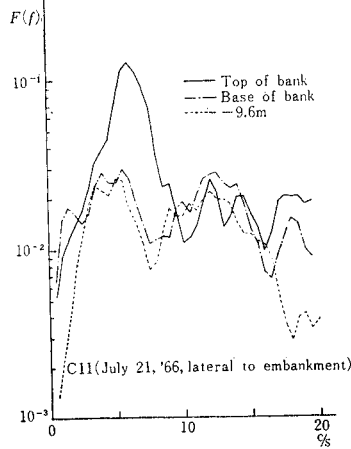
図-23 速度スペクトル(落合橋, 橋軸方向)



とした橋脚の固有振動の影響であろうと考えられるが、測点数が少ないためにその振動形態が動揺振動であるかあるいは並進動揺振動であるかなどについては明らかにできなかった。

構造物による震動の増幅作用は、土構造物である堤防についても同様である。図-24は更埴橋の観測点において、堤防と地中での地震記録から得たスペクトル図であるが、同図にみるように地下10mと地表面ののり尻まではほとんど同じスペクトルを有している

図-24 速度スペクトル(更埴橋)



が、のり肩では相当の増幅作用を受けていることがわかる。この堤防はのり尻とのり肩の高低差が3.7m程度であるにもかかわらず、卓越振動数の付近では約10倍近い増幅作用を受けていることは注目される。

(2) 相関関数による波形分析

震動記録に含まれる周期成分を見出すために記録の自己相関関数を求め、それに基づいて地盤中あるいは地盤から構造物へと震動が伝わる間に波形がどのようにに変化するかについての解析を行なった。

図-25には岩野橋で観測した記録の自己相関関数の

一例を示した。この図は同一地震に対して地盤中と地表面の4点で同時記録したものについての計算結果であるが、地下10mでは比較的周期性がはっきりしているにもかかわらず、それより5mだけ地表面に近い場所ではややランダムな波動が多くなっていることがわかる。すなわち、この記録例では地下23mの深い場所で周期が約0.12sec程度の周期性のある波が観測され、測点が地表面に近づくにつれてランダムな成分が次第に卓越して、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記録についての自己相関関数の例を図-26に示した。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は明らかであり波形の面からは岩野橋ほど周期成分が明瞭でないことがわかる。

一方、構造物では波形がどのように地盤のそれと異なるかを調べたのが図-27, 28である。図-27は落合橋の観測点での橋脚と地盤について示したものであり、地盤上に比較して橋脚頂部では相当に周期化され、かつその周期も長くなっている。また図-28は地表面(のり尻)では波形がランダムな震動が堤防の頂部(のり肩)では著しく周期化されることを示すものである。これら

図-25 自己相関関数(岩野橋)

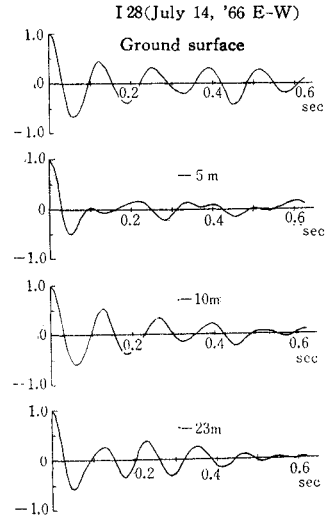


図-26 自己相関関数(松代荘)

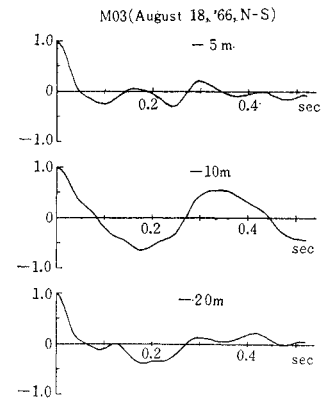
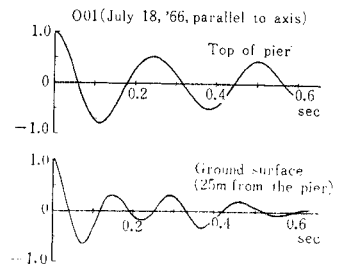
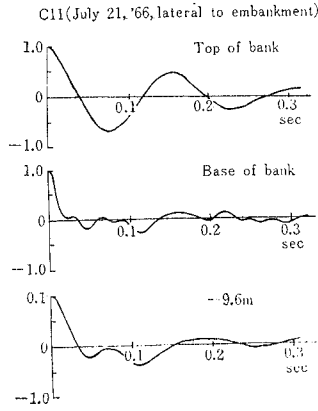


図-27 自己相関関数(落合橋)



の図から、地表面から上にある構造物に入ってくる地震波は構造物のフィルタ作用により震動の波形が周期化される過程が明らかに認められる。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明らかである。

図-28 自己相関関数(更埴橋)



つぎに地盤中の深さ方向に異なる2点での同時観測記録から両者間の相互相関関数を計算した結果を図-29, 30に示した。相互相関関数は2点における同時観測記録をずらしたものを互いに乗じて適当な時間だけ積分を行なって求められるから、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のに要する時間と考えられるので、この時間を読み取ってこの値で2点間の距離を除したものが2点間の横波の平均伝播速度 v_s であるとみなしてよい。図-29は岩野橋の観測点の地表面と地下5m, 地下5mと地下10m, 地下10mと地下23m, 地表面と地下23mの各2点での同時記録から求めた解析結果であり、それぞれ v_s の値は170 m/sec, 240 m/sec, 560

図-29 相互相関関数(岩野橋)

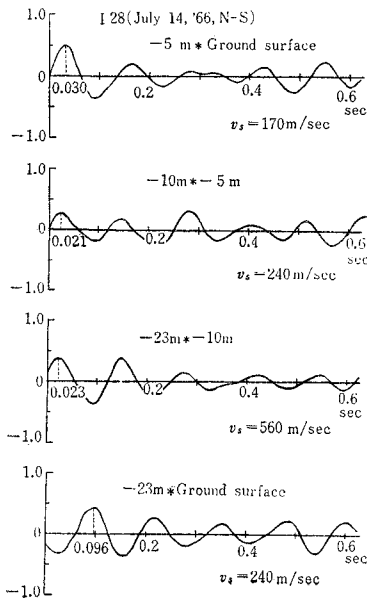
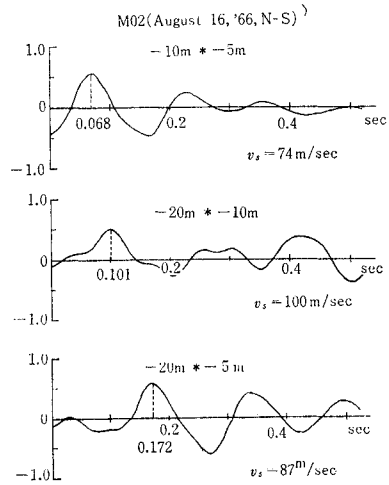


図-30 相互相関関数(松代荘)



m/sec, 240m/sec となっている。すなわちこの測定の範囲内では図-3の地盤図と対応させて考えると、地表面近くの軟かい場所では170 m/sec程度の伝播速度であり、深い場所になるにしたがって次第に伝播速度は速くなり地下の硬い場所では560 m/secに達することがわかる。また地表面と地下23mの2点について求めた $v_s=240$ m/secはこの2点間の平均的な値であろう。他の地震について地表面と地下23mの2点について同様な計算をした結果では $v_s=200$ m/sec, 210 m/secなどの値が得られたが、これらの値はこのような比較的硬い地盤の値としてはほぼ妥当であろう。

また、松代荘についての同様な解析を行なった結果が図-30であるが、地下5mと地下10m, 地下10mと地下20m, 地下5mと地下20mについてそれぞれ $v_s=74$ m/sec, 100 m/sec, 87 m/secである。この場合には地盤が地表面近くから地下20mまでほぼ一様な軟弱層であることから、深さ方向における伝播速度の差が小さく、またその値も先の岩野橋での値より小さくなっている。地下5mと地下20mの2点について他の地震について調べた結果でもやはり87 m/secという値が得られた。

(3) 応答スペクトルによる加速度記録の解析

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地盤上での加速度記録により1自由度系の応答スペクトルを求めた。図-31, 32, 33はそれぞれ信州大学工学部、松代荘、戸倉町万葉橋でこれまでに観測した記録のうち、最大加速度をともな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る。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、パラメーターは減衰定数であり、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から計算に当たっての感度の補正

図-31 速度応答スペクトル (信州大学工学部)

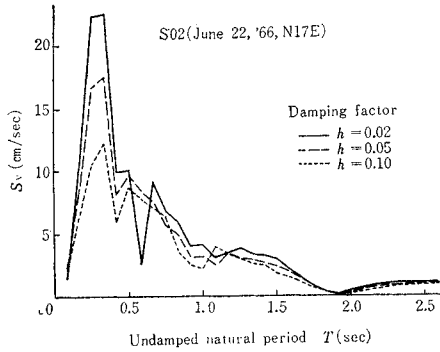


図-32 速度応答スペクトル (松代荘)

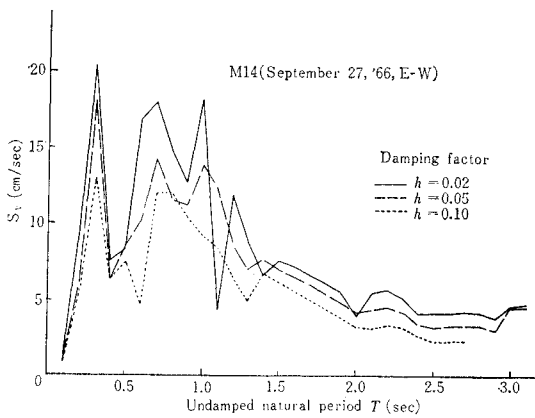
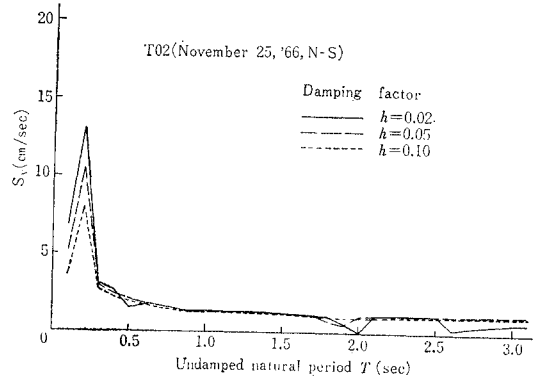


図-33 速度応答スペクトル (万葉橋)



ここに示したスペクトルはいずれも各観測点で得た最大加速度をともなう地震についての計算結果であるが、他の地震動についての解析結果もほぼ同様なスペクトル図であり、これらは各観測点での代表的スペクトルと考えてよい。まず、図-31, 32, 33においてピークを示す周波数とその形を比較すると、図-33の万葉橋での記録が最も短い周期に対してすどいピークを示し、図-32の松代荘での記録がより長い周期においてピークがみられる。そこで、現地盤の状態を検討すると、万葉橋(図-8)では硬い砂礫地盤であり、信州大学の地盤は8m程度の粘土地盤が砂礫地盤に載っているような地盤であり、松代荘(図-7)は20m以上、約40mにも達する非常に軟かい粘土地盤であることを考えると、応答スペクトルは地盤の状態にかなり関係するであろうことが明らかである。

は行っていない。

図-31は信州大学工学部で得た最大加速度94galの地震記録についての例であるが、0.3sec付近にすどいピークを有し、0.5sec以上の固有周期に対しては単調に減少する傾向にあるが、このような傾向は他の地震動の記録のいずれについてもほぼ同様に認められた。また、地盤の軟弱な松代荘についての一例を図-32に示したが、この場合は0.3sec付近のすどいピークのほかに0.6secから1secにかけてもう1つのピークを有する点が先の信州大学工学部の例とは異なっている。松代荘で観測した記録の中にはその地点で得られた平均的な応答スペクトルとは違った形をしたものが少数ではあるが含まれており、固有周期が1.5sec程度まではかなりの高いレベルを示すものや、まれには3sec程度まで S_v の値がほぼ一定の値を持つものも見られた。図-33は戸倉町の万葉橋での記録に対する応答スペクトルであるが、0.25secにすどいピークを示しており、0.3sec以上の固有周期に対しては著しく小さな値である。また、この観測点で得られた最大加速度100gal程度の記録についてはいずれもほとんど同じ応答スペクトルが得られた。

応答スペクトルは入力地震の大きさに影響を受けるであろうから、最大加速度が200gal以上に達するような地震に対しては、また違った特性を示すことが考えられるが、ここで取り扱ったような100gal前後の最大加速度をともなうような震源の近い地震動では、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、硬地盤では応答速度が大きくなる周期の範囲が狭く、かつ短周期の方にかたよる傾向があると考えてよからう。

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関してほぼ一定の値を示す傾向を持つ場合が多いとされている

図-34 速度応答スペクトル

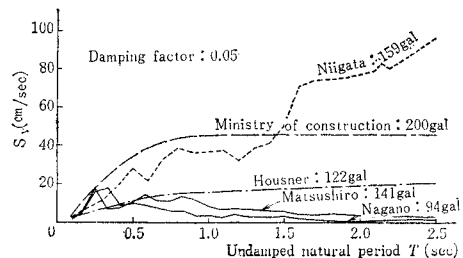
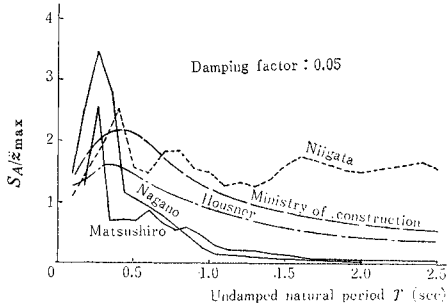


図-35 加速度応答スペクトルの比較



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_v の値が小さくなる地震が多くなっている。この関係を比較対照したのが 図-34 であって、この図に明らかなように松代群発地震は構造物におよ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_v 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 a_{max} で除した加速度応答スペクトルの計算結果を 図-35 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構造物の応答加速度の倍率を表わすことになる。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から求めたものである。この 図-35 によれば長野、松代および戸倉町方面に起こっている地震動は固有周期が 0.2~0.3 sec 程度の構造物におよぼす影響が最も大きく、地動加速度の 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がいずれも短周期の波の成分が多く、地震の継続時間が短くて長周期の構造物の振動が励起されるには十分でないためと考えられる。

5. 結 言

松代群発地震地域の地盤と橋梁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取めた。観測した地震は数百にものぼり、解析はそれらのうち比較的揺れの大きなものに限られたが、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連で震動するか、松代群発地震の耐震工学の面における特質、または地盤と構造物の応答との関係などに関して、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を進めており、かつ長野県戸倉町の万葉橋において電磁式強震計により現在も引き続き地表面での地震加速度の観測を続行中である。このような観測と得られたデータについての解析を今後も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 年度文部省科学研究費（特定研究）に負うところが大きいとともに、京都大学防災研究所（所長 石原藤次郎教授）と長野県土木部（部長 和田良雄氏）より絶大なご支援を頂き、さらにわれわれの研究室の大学院学生諸君にも終始協力を頂いた。これら関係各方面、各位に対して深謝の意を表するものである。

(1967. 2. 9・受付)