

## 厚岸大橋近傍地盤において観測された強震記録の特性(1)

中 辻 隆\*・芳 村 仁\*\*

Characteristics of Strong Motion Accelerograms Observed near the Akkeshi Bridge (1)

Takashi NAKATUZI and Jin YOSHIMURA

### 要 旨

北海道東部厚岸に架設された厚岸大橋の橋脚近傍地盤および橋脚に強震計が設置され強震観測が行なわれている。橋梁の架設地がおおよそ地表下 60 m 付近に支持層をもつ軟弱地盤であることから、得られた強震記録は軟弱地盤における地震波の増幅特性を明らかにするための貴重な資料となっている。

本研究では、これまでに得られている記録について整理し、かかる軟弱地盤における地震波の挙動について基礎的な解析を行なった。

### Synopsis

Accelerograms have been installed on and in the ground near the Akkeshi Bridge and the strong motion earthquake observations have been continued. The records are utilized as fundamental data of the earthquake resistant design of structures.

In this report, the following analyses are carried out.

- (1) the distribution of acceleration, velocity and displacement in the direction of depth.
- (2) the Fourier spectrum at each ground depth.
- (3) the amplitude characteristics.
- (4) the surface wave components included in the ground surface records.

### 1. ま え が き

現在、日本各地の橋梁、ダムあるいは港湾には数多くの強震計が設置され、そこで記録された地震記録は土木構造物の耐震設計のための基礎資料となっている。またその中の代表的な記録波は構造物の動的解析を行なう際に入力地震波として直接利用されている。

地震の地震波のもつ特性は、発震あるいは伝達機構だけでなく観測地点の表層地盤に大きな影響をうけているので動的解析時に地盤条件の異なる地点で得られた記録を安易に用いる事は解析結果に時として大きな誤りをもたらす事すらある。

近年、構造物が地盤条件の悪い地点に建設され

る事が多くなってきたが、このような構造物の動的解析を行なう時には、構造物を支持する基盤を地震波の入力面として解析を行なう。しかしながら、これまでに得られている強震記録の多くは、地表において観測された波形であるため、かかる解析を行なう際には、重複反射理論等を用いて地表の記録から基盤の地震動を推定する必要があった。表層地盤における地震波の挙動については、基盤で得られた記録の数が多いために未だ説明されていない事も多い。

昭和 47 年に竣工した厚岸大橋は、北海道東部にある厚岸湾と厚岸湖口の間に架設された橋であるが、その架設位置が深さ 60 m に支持層をもつ軟弱地盤であり、またこの地方がその地殻構造上地震の起きやすいところとして知られていることから、その地震時における挙動に大きな関心が寄せられ、北大ならびに北海道庁土木部により、橋脚の

\* 助教授 土木工学科

\*\* 教授 北大工学部土木工学科

近傍地盤および橋脚に強震計が設置され強震観測が行なわれている。ここで得られた記録は軟弱地盤での地震波の挙動を知る上で貴重な資料となっている。

本報告では、これまでに得られている記録について。

- (1) 加速度、速度および変位の深さ方向分布
- (2) 地表及び地中記録のフーリエスペクトル
- (3) 当該軟弱地盤における増幅特性
- (4) 地表記録に含まれる表面波成分などについて検討した結果を報告するものである。

## 2. 強 震 記 録

地震計は、地表に SMAC-E<sub>2</sub> 型(固有振動数  $f=20$  Hz, 減衰定数  $h=0.6$ )が、地盤中 3 地点(−25 m, −47 m, −68 m)に動電型 ( $f=7.5$  Hz,  $h=15$ )が設置され、地表では 3 成分(橋軸, 橋軸直角, 上下), 地中では水平 2 成分の記録が得られるようになっている。図-1 と図-2 に SMAC-E<sub>2</sub> 型と動電型地震計の振幅の振動数特性曲線を示した。

記録波形は平坦なスクラッチフィルム上に搔かれた後マイラーに引き伸ばされ、0.01 秒あるいは 0.02 秒間隔で数字化されている。同時に、解析にあたっては、計器特性補正などの補正を行なっている。

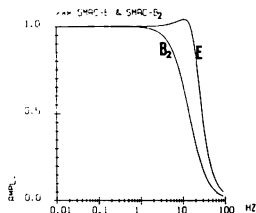


図-1 SMAC-E<sub>2</sub>型強震計の周波数特性(振幅)

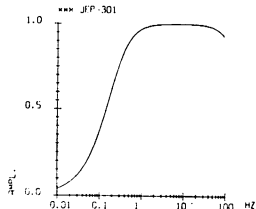


図-2 地中地震計の周波数特性(振幅)

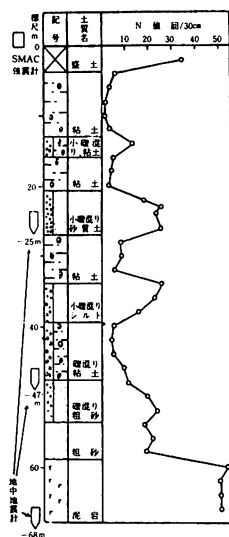


図-3 土質柱状図

地震計の設置されている地盤はいわゆる軟弱地盤である。図-3 に土質柱状図を示した。支持基盤である−60 m 付近まで数 m 厚で砂質上層と粘度層が互層になっている。地震計は−25 m(砂質土)−47(粘土)そして−68(泥岩)の各深さに設置されている。

表-1 解析に利用した地震記録

| No. | 年     | 月   | 日  | M   | 震源地   | 距離   | 深度   |
|-----|-------|-----|----|-----|-------|------|------|
| 1   | S 47. | 5.  | 11 | 5.8 | 釧路沖   | 97km | 60km |
| 2   | S 48. | 6.  | 17 | 7.4 | 根室半島沖 | 90   | 40   |
| 3   | S 48. | 6.  | 24 | 7.1 | "     | 150  | 30   |
| 4   | S 49. | 9.  | 20 | 5.5 | 釧路沖   | 82   | 50   |
| 8   | S 53. | 12. | 6  | 7.7 | エトロフ沖 | 250  | 100  |

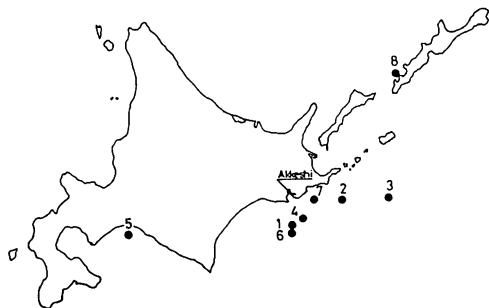


図-4 震央分布

表-1は、今回解析に用いた地震波の諸元を示したものであり、図-4はその震史分布である、マグニチュードが7を超えた大地震は昭和48年の根室半島沖地震(本震6月17日、余震6月24日)と昭和53年12月のエトロフ沖地震であり、その他は中地震である。震央距離の分布からみると、No.5(苫小牧沖)とNo.8(エトロフ沖)とが200kmを越えており、同時に両者は震源の深さが100kmを超えるいわゆる深発地震である。

### 3. 解析結果

#### 3.1 加速度、速度および変位の深さ方向分布

表-1中の、No.1、No.4、そしてNo.8の橋軸直角方向の記録について、加速度、速度および変位の最大値の鉛直方向の分布を示したのが図-5である。数値積分にあっては所要の補正を施した後、低振動領域で0.1 Hzあるいは0.2 Hz以下の成分を、高振動数領域では15 Hz以上の成分を台形型のバンドパスフィルターを用いて除去している。

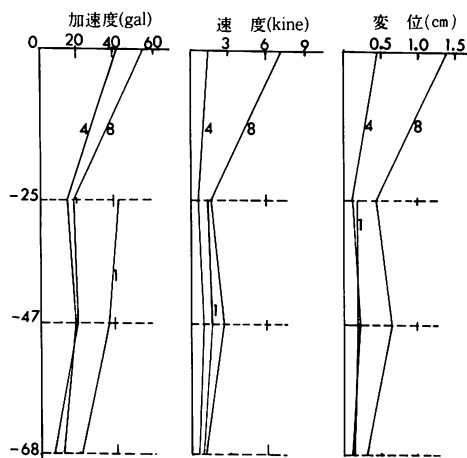


図-5 最大加速度、速度、変位の深さ方向の分布

図-5において、わずかながらも-47 m点の方が-25 m点より増幅される傾向にあるのはそれぞれの地点の土質条件の差異が影響を及ぼしていると思われる。またNo.4とNo.8とを比較した場合、加速度の大きさとしては両者に差異がない(地長最大57 galと41 gal)のに対し変位において割合大きな差異(地表最大1.4 cmと0.5 cm)が生じているのは、含まれている振動数成分の違いがあらわれていると思われる。すなわち、No.8ではマグニチュードが大きくしかも震央距離も大きいので、変位波形に大きな影響を与

える長周期成分が卓越していることによると推定される。

これまでに得られた最大加速度の大きさはNo.2(根室半島沖地震)の地表の橋軸直角方向で記録された136 galであるが、その時の最大の速度と変位は数値積分の結果20 cm/sと4.5 cmと求められている。

耐震工学においては、地震波のうちS波が地盤の鉛直下方から入射し地盤中で反射透過をくり返す事を仮定した理論(重複反射理論)に基づき各種解析を行なう事が多い。本研究においても、実際の加速度波形から数値計算された変位波形とS波の重複反射理論から求められた変位波形とを図-6において比較してみた。対象とした波形はNo.4の橋軸直角方向の記録である。図中で計算値(Calculated)とは、-68 m地点で観測された波形を入力として重複反射解析より計算された地表、-25 mそして-47 m地点での変位波形であり、また記録値(Recorded)とは各地点で観測された加速度記録から数値計算して求めた変位波形を意味している。表-2に計算に用いた各地盤層の土質定数を示したが、当該地盤においてはS波速度の測定を行っていないので、土の種類および

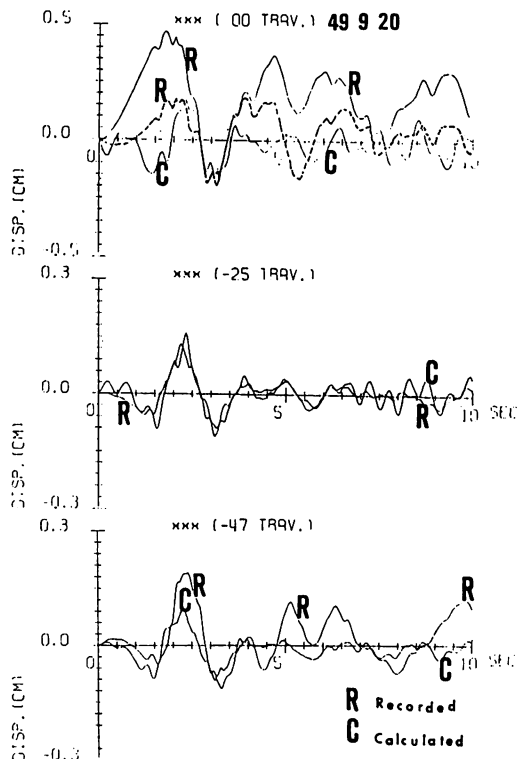


図-6 変位波形の記録値と計算値

表-2 各地層の弾性定数

| 層 厚 | S波速度   | 単 位 体 積 重 量 |
|-----|--------|-------------|
| 3m  | 140m/S | 1.8         |
| 10  | 65     | 1.8         |
| 3   | 155    | 1.8         |
| 5   | 105    | 1.8         |
| 4   | 275    | 1.8         |
| 2   | 290    | 1.8         |
| 7   | 215    | 1.8         |
| 5   | 340    | 1.8         |
| 8   | 255    | 1.8         |
| 12  | 360    | 1.8         |
| 9   | 1500   | 2.6         |
| ∞   | 1500   | 2.6         |

N値から推定したものである。

図を見ると、地中、特に-25 mにおいて計算値とが比較的合致し地表においては、一部を除いてはあまり良い対応は示していない。この原因として考えられることは、理論的には土を粘弾性体として仮定しているが実際の土の挙動がモデル化されているような粘弾性体では説明しきれないこと、あるいは地表の記録の中には、実体波成分だけでなく表面波の成分も含まれていること、さらには、記録自体の精度に問題があること、すなわち、地表と地中で異なる形式の地震計を用いているために含み込まれる誤差に違いがありしかも各種の補正によっても除去出来ない誤差も記録波形の中に含まれていることなどが考えられる。特に表面波の影響については、その耐震工学上の重要性から今後検討して行きたい。なお変位波形を得るための数値積分においては、0.2 Hz以下の低振動数成分(長周期成分)をしゃ断しているが、図中(地表)の点線で示した波形は、しゃ断周波数を0.3 Hzとしたものである。

### 3.1. スペクトル特性

地震のマグニチュード、震央距離あるいは観測個所の土質条件によって各記録波に含まれている振動数成分がどのように変化しているかを調べるために、いくつかの記録波形から求めた各深さ位置でのフーリエスペクトルを図-7に示した。ここで、各スペクトル曲線は比較を容易にするために平滑化され、またその最大値が1となる様正規化されている。

図-7から、各地震波のスペクトルが各深さ位置において比較的類似している事がわかる。特にNo.1とNo.4とは、共に同程度のマグニチュードでありしかも震源がお互い近くにあるために似

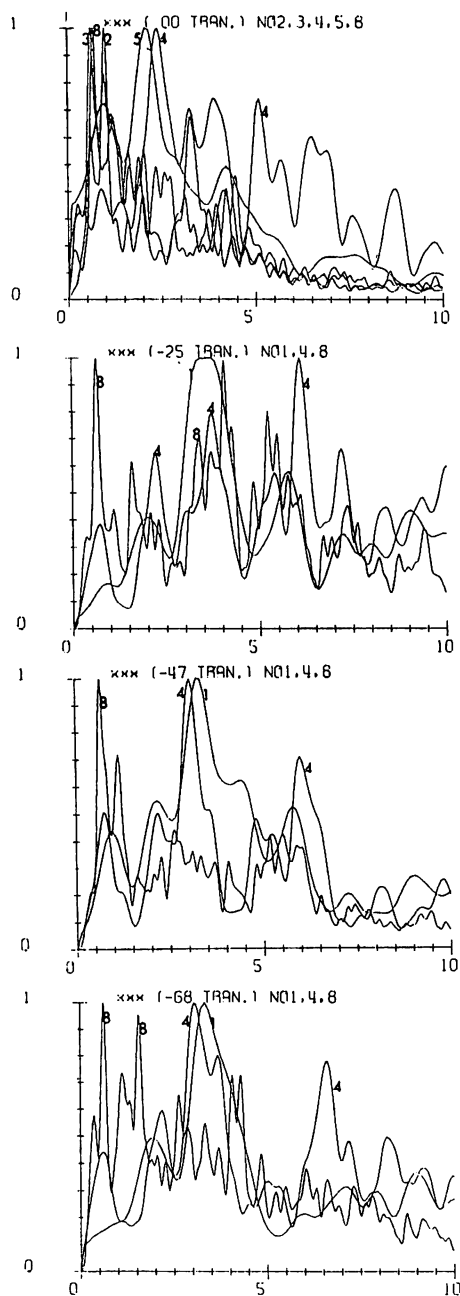


図-7 各深さ位置におけるフーリエスペクトル

かよったスペクトル図になっている。

しかしながら、各地震波のもつマグネチュードや震央距離の影響もあらわれている。No. 2, No. 3あるいはNo. 8はマグネチュードが7を超える大地震であるので比較的長周期成分1~1.5秒(0.7~1.6 Hz)付近で卓越しているのに対し、中地震であるNo. 1あるいはNo. 4では0.4~0.5秒(2.0~2.5 Hz)付近で卓越している。また、震央距離の小さいNo. 4では、短周期成分が減衰することなく残存しているのに対し、震央距離が200 kmを超えるNo. 8では短周期成分の減衰がはっきりとみられる。

深さ方向のスペクトル図の変化を見ると、各地震波は発震の機構あるいは伝播の経路の違いのため、基盤(-68 m)地点に達した時には、それらのスペクトルにばらつきを示しているが、地盤層を通して地表まで上昇してくるが、各地盤層で一種のフィルター作用をうける。そのために、-47 mあるいは-25 m地点でのスペクトルに共通性があらわれているものと推察される。さらに詳細に図-7を見ると、-25 m地点ではおよそ3.5 Hz付近に共通した卓越が見られるのに対し、-47 m地点では、それに対応するのは約3.0 Hzと若干長周期寄りとなり、しかも0.7~0.9 Hz付近においても-25 m地点に比し卓越性があらわれているのは、おのおのの地点での土質条件の差異によるものと思われる。

### 3.3 増幅特性

図-8は、当該軟弱地盤における伝播特性を検討するために示した増幅度スペクトルである。こ

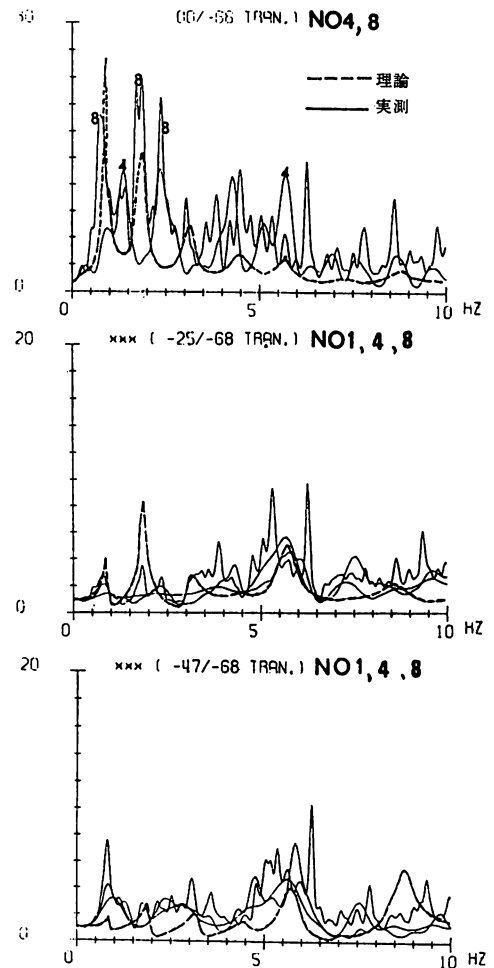


図-8 各深さ位置における増幅度スペクトル

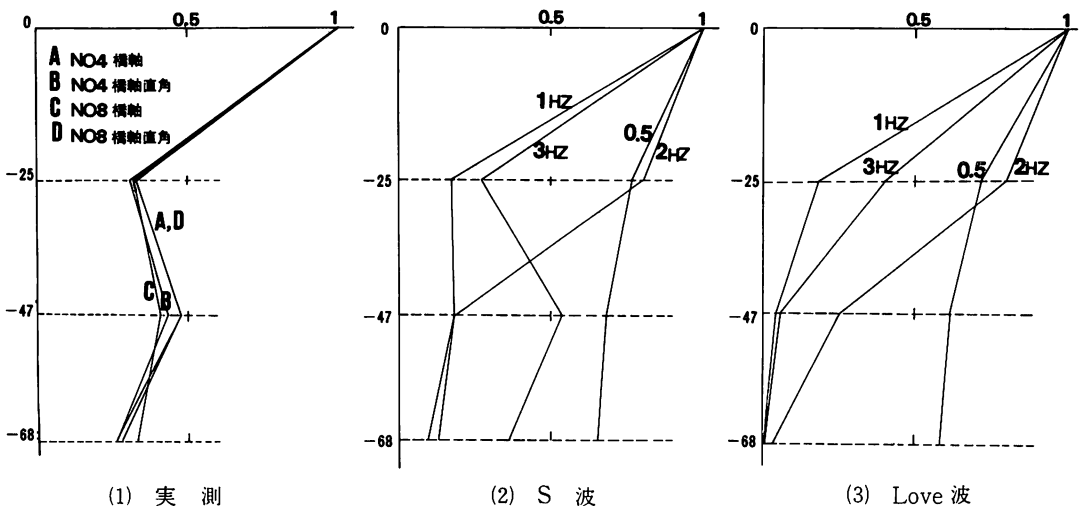


図-9 各深さ位置における変位振幅比(実測, S波, Love波)

ここで増幅度スペクトルとは、基盤(−68 m)と各深さ地点(地表, 25 m, −47 m)どのフーリエスペクトルの比として定義されるが、スペクトルの急変を避けるために十分な平滑化を行なっている。また、図中に示した点線の曲線は、S波の重複反射理論を用いて計算された増幅度スペクトルである。

図-8の地表における増幅度スペクトルを見ると、およそ1.0 Hz, 1.8 Hzあるいは3.2 Hz付近では重複反射理論との良い対応を認める事が出来るが、1.3 Hzあるいは2.5 Hzでは合致していない。また地表においては、フーリエスペクトル同様各地震波によるばらつきがあり、ここでも各震波のもつ性格があらわれている。すなわち、No. 8では低振動数(長周期)領域での、またNo. 4では高振動数領域での増幅度が大きい事が示されている。地中での増幅度を見ると、各地震波による差異が小さくなるとともに、理論値と良い一致(特に−25 m地点において)を示している。また増幅される領域も地表と比較して相対的に高振動数(短周期)側に寄っていることも特徴的である。図-8は、No. 1, No. 4そしてNo. 8の橋軸直角方向の記録を解析して得られたものであるが、橋軸方向の記録についても同様な結果が得られている。

さらに、地盤の増幅に対し各周波数成分の影響を検討したが図-9である。(1)の図はNo. 4とNo. 8の橋軸方向および橋軸直角方向の各深さ地点で観測された記録から計算された最大変位での値が1になるよう正規化して示したものである。また(2)と(3)はいくつかの振動数成分に対して、当該地盤中における増幅度を理論的に求めたものである。(2)はS波の重複反射理論に、(3)はLove波のそれに基づき計算されたものである。

(1)の図を見ると、No. 4とNo. 8は、お互い異なる地震波の特性をもつにも拘わらず、その増幅の深さ方向の分布形は、S波の理論から求めた3 Hz成分の増幅形にも比較的類似している。これは、雑駁な推定ではあるが、図-7のフーリエスペクトル図等に地中記録において3 Hz成分付近に卓越性が見られることから判断すると、この当該軟弱地盤の増幅に3 Hz成分が少なからぬ影響をもっているものと思われる。

### 3.4 表面波成分

最後に、地表で観測された記録に含まれている表面波(Love波)の分散性について検討してみたい。図-10はそれぞれ、(1) No. (2)の橋軸方向記録

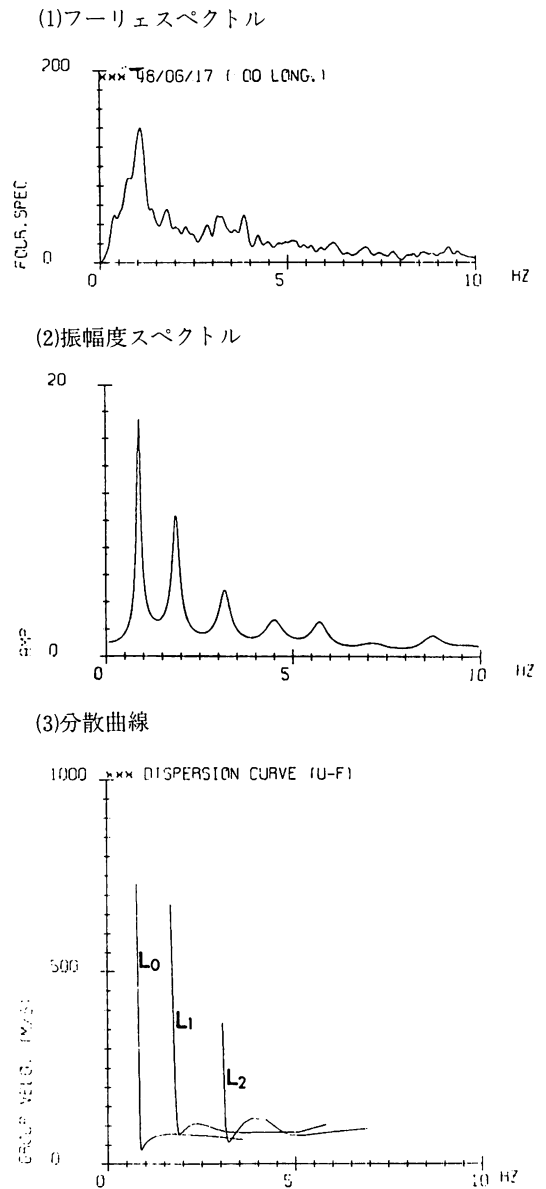


図-10

のフーリエスペクトル, (2)S波の重複反射理論から計算された地表における対基盤の増幅度スペクトル, (3)Love波の分散曲線(群速度-振動数)である。ここでNo. 2の橋軸方向記録を解析例としたのは、No. 2が大地震でありしかも地震の震央が橋の真横方向にあることによる。

図-10のフーリエスペクトル図において、およそ1.0, 1.8そして3.2 Hz付近で卓越しているのが見られる。これらの卓越振動数は、増幅度スペクトルにおいて増幅度が極大になり、また分散

線においても基本モード、1次モードそして2次モードの群速度が極小となる振動数と一致している。

各振動数成分の時間的変化を見るために、Response Envelope Spectrum(RES)を図-11に示した。これは、1自由度系の加速度応答において質点の固有周期(横軸)を種々変化させた時の応答加速度の大きさの経時変化を三次元的に表現したものである。ここでは減衰定数を0.05として計算し、また応答加速度の大きさと0~4までの5段階表示としさらに表示を見やすくするために四捨五入して繰り上げる応答値を空白表示している。

図において約1 sec (1 Hz)付近に縦方向の稜線が見られるがこれは、図-10に示した分散曲線の基本モードに対応しているものと思われる。1次あるいは2次のモードについては分散曲線との対応を見出す事は出来ない。

以上の結果から、No.2の地表橋軸方向で観測された地震波の1 Hz成分には実体波成分だけでなく表面波としての成分も含まれているものと思われる。

#### 4. あ と が き

以上の解析の結果から以下の点が明らかになった。

- (1) 強震記録から数値積分を行なって得られた地表の最大変位は、No.2の地震で数cmであり、No.2とはほぼ同じマグニチュードではあるが震央距離線の大きいNo.8では1~2 cm程度となった。地中では更に小さく地表の数分の1程度であった。
- (2) 各深さ位置でのフーリエスペクトル、増幅度スペクトルにはかなりの規則性が見られ地震のマグニチュードや震央距離だけでなく地盤それ自体の影響を大きくうけている。
- (3) 地表得られた記録には実体波成分だけでなく表面波成分も含まれている。

今回解析に用いた記録は一部だけであり、軟弱地盤における地震波の特性を明らかにするには未だ解析例が不十分である。今後、記録の整理を進め解析例を増やし軟弱地盤における地震波の挙動を明らかにして行きたい。

#### 参 考 文 献

- (1) Schnabel, Lysmer and Seed: SHAKE, A Computer Programm For Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site; Col. of Eng.

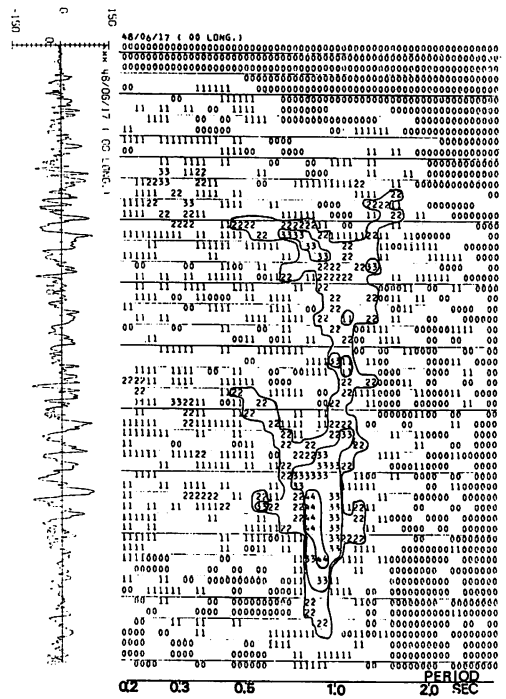


図-11 RES(No.2振軸方向記録)

Univ. of Calif. Berkeley, NO. EERC 72-12 Dec. 1972

- (2) 神山：強震記録の波動論的考察，土木学会第13回地震工学研究発表会講演概要，1974
- (3) 佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店，1978
- (4) Trifunac: Response Envelope Spectrum and Interpretation of Strong Earthquake Ground Motion, Bull. of Seism. Sci. of Amer. Vol 61, No. 2, Apr. 1971
- (5) Haskell; The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. of Seism. Soc. of Amer. Vol. 43, 1953
- (6) Kanai et al ; Comparative Studies of Earthquake Motions on the Groud and Underground. I, II, Bull. of Earth. Res. Inst. Vol 37, 44, 1959, 1966
- (7) 中辻. 芳村. 大屋，北海道東部において観測された強震記録について，土木学会等35回学術講演会概要集第1部，1980
- (8) 中辻. 芳村. 早川，厚岸大橋地盤における強震記録の解析について，土木学会北海道支部論文報告集，vol 36, 1980

(昭和55年12月1日受理)

