

I-13 厚岸大橋近傍地盤において観測された地震動の主軸方向分布について

北大工学部 中 辻 隆
 北海学園大 早 川 寛 志
 北大工学部 芳 村 仁
 道 士 木 部 川 口 孝 太 郎

1. まえがき

北海道東部の厚岸湾に架設されている厚岸大橋の近傍地盤において、地表と地中3地点に地震計が設置されて昭和46年以来強震観測が行われている。本報告は、これまでに地表および地中で得られている記録を用いて加速度地震動の主軸方向に関する解析を行なったものである。

地震動の主軸に関しては、星谷(1977)、渡部(1974)、Kubo(1978)らによる研究が行われている。これらの研究において、地震動の全エネルギーが最大となる軸は水平に近く、その方向は観測地と震央を結ぶ方向(震央方向)、あるいは震央方向と直交する方向に近いと言われている。

通常よく言われるように、ある観測地で記録された地震の波形は、震源における発震機構、途中経路の伝播特性、あるいは観測地盤における地震波の重複反射に基づく増幅特性の反映である。地震の発生が点源であり、また途中の伝播経路の性質も等方性である時には、地震動の主軸方向が震央方向に対応することが容易に推察されるが、実際においては、震源での断層のすべりの方向をはじめ、伝播経路上に地質上の不連続面、あるいは地盤の構成状態などの方向性を有していると考えられるので、場合によっては、主軸の方向が震源のみによって決定されるのではなく、伝播経路、あるいは観測地の地盤特性によって大きく影響されることもあると思われる。特に、図-1に示すように、当該観測地が厚岸湾に突き出る半島の先端部にあるので、地震時には、半島の固有振動的な挙動もあるのではないかと予想される。

本解析において、これまでの代表的な5の地震時に、地表および地中で得られた3組の記録に対して地震時の主軸を求めたところ、観測地の局所的な特性と思われる傾向的な主軸方向の分布が得られたので報告したい。

2. 強震記録

強震計は、図-1に示すように 半島部の北端、橋の南側の地点に、地表にはSHAC-E2型($f_0=20\text{Hz}$, $k=0.6$)の、地中には動電型($f_0=7.5\text{Hz}$, $k=15$)の加速度計が設置され、橋軸方向、橋軸直角方向の水平2成分と上下方向の観測を行なっている。(地中-25m, -68m地点の上下動成分は昭和54年から観測。) 強震計設置地の地盤構成は、図2の柱状図に示すように、N値の小さな粘土層と砂層とが、約-60m地点からのN値が50を超える泥岩の支持層まで、数mごとの互層をなしている。

表-1は、解析に用いた記録の一覧である。表中の◎、○、△の印は、脚注に示すように、記録された成分数の状況を示しており、地表と地中において、水平2成分、鉛直1成分の3成分が観測されているのは、昭和56年以後の記録のみである。

水平成分において、その最大加速度の大きさが50 gal 以上のものは、地表での2記録のみで、逆に20 gal未満のものは、地表では9/11、-25m地点では11/12、-68m地点では9/10となっている。鉛直成分においては、昭和48年の根室半島沖地震時に地表で記録された86 gal が最大であり、13記録中10記録が10 gal未満の最大加速度値をもった記録である。

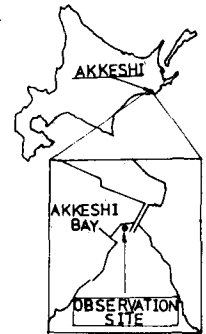


Fig-1 Observation Site

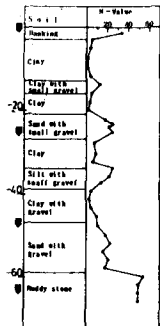


Fig-2 Core Log of Observation Site

3. 主軸の解析

地震動の主軸に関しては、2への議論があるが、ここでは、加速度記録の全時間成分から求まる共分散行列を対角化する方向として定義した。

$$A = \begin{bmatrix} \sum x_1 x_1 & \sum x_1 x_2 & \sum x_1 x_3 \\ \sum x_2 x_1 & \sum x_2 x_2 & \sum x_2 x_3 \\ \sum x_3 x_1 & \sum x_3 x_2 & \sum x_3 x_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

ここで、 (x_1, x_2, x_3) は、橋軸、橋軸直角、上下方向の地震加速度の大きさをあらわすものとする。

主軸の方向は、実体波であれば、P波、SV波、SH波の方向に、表面波であれば、Rayleigh波、Love波の振動方向に対応するとされている。また、狭帯域の周波数成分に対しては、その微小構造物の長軸および短軸に対応している。

主軸の方向は、主軸を水平面内に投影した軸が橋軸方向となす角度と鉛直からの傾き角とをもって表現する。また、ここでも既往の研究と同様に、最大主軸と中間主軸の方向がほぼ水平に近いことが確かめられたので、表-1中に於いて鉛直成分が得られていない○と△印の記録に対しては、その水平2成分から主軸を求め考察の対象とした。

図-3の(1)~(3)は、それぞれ、地表、-25m、-68m地点における最大主軸と中間主軸の水平面内の方向分布とその時の震央分布を示したものである。地表においては、11記録中Gの記録を除いて他の全てが橋軸方向を中心として±20°の範囲に最大主軸の方向が分布しているのに対し、-25m地点では逆に、Aの記録を除いた11記録が橋軸直角方向を中心とした分布となっている。ただし、例外となったGとAの記録においても、最大主軸の中間主軸に対する分散値の比は、それぞれ1.26と1.35であり、他の記録に比べ比較的に近い値となっている。また、-68m地点では橋軸直角方向に近いものが、10記録中8記録となり、その分布範囲も地表や-25m地点よりもややばらつきの大きい結果となっている。

最大主軸の方向が震央方向、あるいはそれに直角な方向いずれに近いかを調べてみると、震央方向に近いものが、地表では5/11、-25m地点では10/12、-68m地点では4/10となっている。また、図-4は、最大主軸、あるいは中間主軸いずれに近い軸の、震央方向からの偏角45°の度数分布を観測点の深さ位置別に表わしたものである。

以上の事から、既往の研究で言われてきたような、最大主軸の方向が震央方向あるいはそれに直交する方向に対応するという特性が、この厚岸で観測された記録では必ずしもあらわれていな

	DATE	M	Δ	Depth	
A	46.08.02	7.0	2.2/km	60km	△
B	47.03.26	6.1	111	50	△
C	47.05.11	5.8	49	60	△
D	47.09.08	5.0	75	60	○
E	48.06.17	7.4	90	40	○
F	48.06.17	5.7	53	40	△
G	48.06.24	7.1	155	30	○
H	49.09.20	5.5	44	50	○
I	49.11.09	6.5	258	130	△
J	53.05.24	5.5	59	70	△
K	53.06.14	5.0	44	40	△
L	53.12.06	7.7	254	100	○
M	56.01.23	7.1	227	130	◎
N	56.09.12	5.9	136	130	◎
O	56.11.23	6.0	109	40	◎

M: Magnitude Δ: Epicentral Distance

◎: Three (two horizontal and one vertical) components were observed on and in the ground. (O, -25, -68m)

○: Three components were observed only on the ground surface.

△: Two horizontal components were observed.

Table-1 Profile of Accelerograms



Fig-3 (1)
Direction of Major Axis (GL 0m)



Fig-3 (2)
Direction of Major Axis (GL -25m)



Fig-3 (3)
Direction of Major Axis (GL -68m)

い。その理由として以下のことが考えられる。

(1) 観測地の地盤が、各地震波の特性に関係なく固有な振動を励起しやすい構造にある。観測地は、図-1に示すように半島部の先端に近いところであり、その地質構造も図-2の柱状図に示すように、地震波の増幅作用を受けやすい条件にある。その原因に対する波動論に基づく説明は不明であるが、地表では橋軸方向に、 -25° 地点では橋軸直角方向に最大主軸の方向が分布している事は、地盤構造の異方性の影響と推察される。

図-5の(1)は、S波の重複反射理論から求まる、当該地盤における支持基盤に対する地表面の増幅度スペクトルであり、また(2)~(10)は、表-1の中の9つの記録に対しての地表橋軸方向の加速度フーリエスペクトルである。S波の重複反射理論から求まる卓越周波数は、0.9, 1.8, あるいは2.2 Hzであるが、実際に記録された地震波のフーリエスペクトルを見ると、その多くの記録において、これらの卓越周波数に近い周波数で大きなスペクトル値となっており、当該地盤で観測された加速度地震波の主要動には、地盤の増幅特性が大きな影響を与えているものと推定される。

(2) 最大主軸および中間主軸の方向が橋軸あるいは橋軸直角方向に対応している事から、橋梁構造物の振動の影響を受けている事が予想される。図-6は、表-1において、橋脚上で観測された記録もデジタル化されているE, L, Mの記録に対して、橋軸方向(上段)と橋軸直角方向(下段)のフーリエスペクトルを示したものである。橋軸方向と橋軸直角方向とはともに類似したスペクトル特性を示しているが、対応する地震時に地盤で観測された記録のスペクトル(図-5)と比較すると、1.7~2.0 Hzの卓越性が顕著である。この周波数成分は、橋脚の固有振動周波数であると思われるが、地盤の記録においてこの周波数成分が強く卓越している例は少ない。

図-7は、同じE, L, Mの記録に対して、地表と橋脚上の地震動の水平面内における主軸の方向を示したものである。実線の軸が地盤上での、破線は橋脚上での主軸方向を示し、また一点鎖線は震央方向であるが、それらの間には強い相関が見られる。

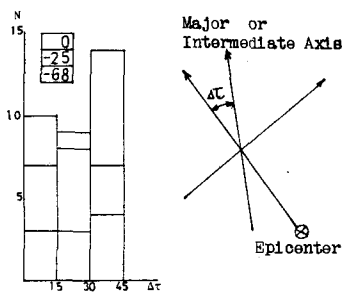


Fig-4 Histogram of Deflection Angle

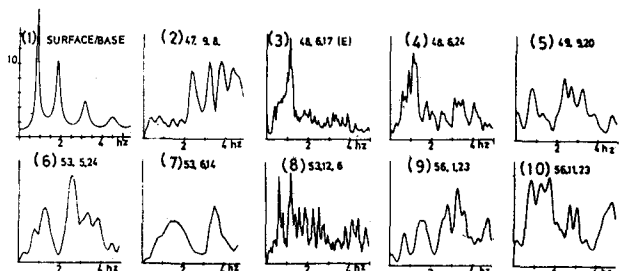


Fig-5 Amplitude Spectrum (1) and Fourier Spectrum (2)~(10)-Ground-

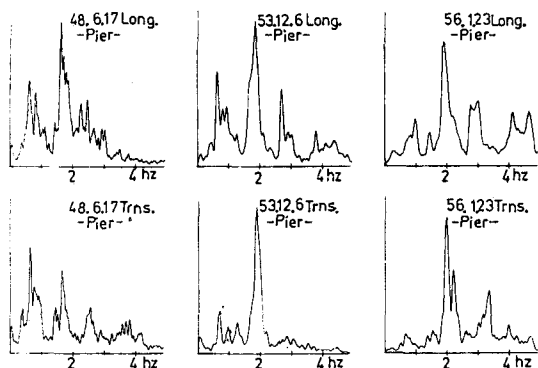
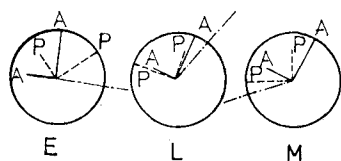


Fig-6 Fourier Spectrum -Pier-



A: Principal axes of records observed on the ground surface.
P: Principal axes of records observed on the pier.
long axis: Major Axis
short axis: Intermediate Axis
chained line: direction to the epicenter

Fig-7 Principal Axes on Ground and Pier

また、一般的に構造物と地盤の相互作用において、地盤が構造物に与える影響は、ても、構造物が周辺地盤へ与える効果は小さいと言われており、当該地盤における最大主軸方向の分布へ与える橋梁基礎の影響は小さいものと推定される。

地震動の主軸方向分布には、観測地盤による効果だけでなく、震源の影響も反映されている。図-8は、最大主軸方向の鉛直軸からの傾き φ と震源深さ z との関係を示したものである。一般的に、地震波の主要動は、ほぼ鉛直に近い方向から入射するS波であると言われていたが、図-8によると、ほぼ鉛直に近いとは言え、震源の深い地震ほど鉛直に近い入射となっている傾向が見られる。しかしながら、 φ の値が 80° 以上であるので、実際の地盤震動へ与える影響は小さい。

さらに表-2は、地表、-25m、および-68m地点で水平成分と鉛直成分の成分が観測されている昭和46年のM、N、Oの3つの記録に対して、それぞれの深さ位置における φ の大きさを示したものである。地表に近い程 φ の値が 90° 、すなわち、地震動の方向が水平になっていることがわかる。この事は、ある程度深い震源をもつ地震の主要な波は、ほぼ鉛直に近い方向から入射して地盤内で重複反射しながら取らねる上層へ伝播するに従って、より鉛直に近い向きに屈折して行っている事を示す傍証となっている。

4. 結論・おとぎ

厚岸大橋近傍地盤の地表、軟弱地盤内(-25m地点)、および支持基礎内(-68m地点)で得た地震記録を用いて、地震動の主軸方向に関する解析を行ない以下の結果を得た。

(1) 地表においては、11記録中10記録が橋軸方向を、-25m地点では、12記録中11記録が橋軸直角方向を中心とする最大主軸方向の分布をなしているが、これは、地盤および橋脚上で得られた記録から求めた主軸方向とフーリエスペクトルの特性から判断して、地震計が設置されている地盤の特性によるとと思われる。また、主軸の方向が橋軸、あるいは橋軸直角方向であるが、橋梁基礎構造物の影響は小さいものと思われる。

(2) 主軸の方向が地表では橋軸方向に、-25m地点では橋軸直角方向となることに対する波動論的説明は、地盤の詳細な構成状態が不明であるので、明快には見い出せず、今後の検討課題として残されている。

(3) 本解析においては、最大および中間主軸の方向は水平面に近い値となった。これは、本解析に用いた地震記録がいずれも震源の深さが数十km以上であり、その主要動がほぼ鉛直に近い入射角をもつS波であるためと思われる。

(4) 地震動の主軸方向には地盤のみならず震源深さの影響も反映されており、深い震源を持つ地震ほど最大主軸の方向が水平に近くなる傾向にある。

最後に、本研究にあたり、熱心な御討議をしてくださいます 美唄専修大学の金子孝吉先生と北大工学部の佐々木康彦氏に深く感謝致します。

参考文献

1) 屋谷他: 土木学会論文集, 第286号, 1977

2) 渡部: 昭和49年度建築研究年報

3) Kudo, et al: E.E.R.C., 76-6, 1976

4) Dziewonski et al: B.S.S.A., Vol. 59, 1969

5) 田中他: B.E.R.I., vol. 54, 1979

6) Sutton et al: J. Geophys. Res., Vol. 68, 1963

7) 金子清通: 6th J.E.E.S., 1982

8) 芳村・中辻: “ ”

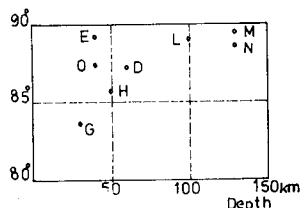


Fig-8 Relationship between φ and Focal Depth

Record	φ
M 0m	89°
-25m	86
-68m	84
N 0m	89
-25m	88
O 0m	87
-25m	80
-68m	75

Table-2 φ at each observation Depth