

# 北海道における地震の主方向の一考察

島田 武<sup>1</sup>・金子 孝吉<sup>2</sup>・吉田 紘一<sup>3</sup>・佐藤 昌志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062 北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目)

<sup>2</sup>正会員 工博 専修大学北海道短期大学教授 土木学科 (〒079-01 北海道美唄市光珠内町)

<sup>3</sup>正会員 北海道開発局 旭川開発建設部 (〒??-?? 旭川市8条通12丁目)

<sup>4</sup>正会員 北海道開発局 開発土木研究所 (〒062 北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目)

近年、北海道では平成5年に釧路沖地震、北海道南西沖地震、平成6年に北海道東方沖地震とマグニチュード8クラスの地震が発生している。北海道開発局では昭和41年以来強震計による地震観測を行っており、北海道3大地震についてもその地震波形を記録している。地震動観測は主に水平2成分、垂直成分の3成分に分けて観測されているが、構造物等に対する地震動がおよぼす影響を評価するに当たりその主軸方向を明確にすることが重要であると考えられる。本発表は、北海道の3大地震の主軸方向を求め、その特性について考察をしたものである。

**Key Word:** strong motion seismogram, ground motion, polarization, rectilinearly

## 1. はじめに

近年、全国各地で大規模地震が発生している。北海道においては、平成5年1月の釧路沖地震、同年7月の北海道南西沖地震、翌年10月の北海道東方沖地震とマグニチュード8クラスの地震が頻発した。

北海道開発局では、昭和41年に地震時の動的挙動計測を目的とし千代田大橋に強震計を設置して以来、北海道各地の橋梁に対し、強震観測を行なっており、上記の三つの地震についても地震動の記録を行なってきたところである。

しかし、記録された地震動の加速度成分は橋軸方向に対して平行になるように観測しており、観測点以外の土木構造物に対する地震動の影響を評価するには、統一された指針に基づく方向性が必要と考えられる。

そこで、本研究は、構造物に対する地震動が及ぼす影響を評価するに当たり主軸方向を明確にすることが重要であると考え、主軸解析により、北海道の地震動特性検討するものである。

主軸解析については、さまざまな提案がなされているが、今回は、時間領域での非線形ポーラリゼーション・フィルター解析 (Polarization filter techniques) を適用した。

本解析はFlinn<sup>1)</sup>によって提案されたものであり、

解析の特徴は、三次元空間での地震動粒子軌跡の楕円形の性質を表わす特性 (Rectilinearity) と方位指向性 (direction of polarization) の2つのパラメータで表現しようとする考え方にもとづいていることである。

## 2. 解析方法

ここで示すポーラリゼーション解析はMotnaltbeti<sup>2)</sup>の手法を基礎にしており、以下に示した流れの操作手順に従い実行される。その手順に従い解析方法を説明する。

[1] 記録された橋軸方向 (LG)、橋軸直角方向 (TR) 三成分の加速度波形 ( $G_{ij}$ ) を読み込む。

[2] 加速度波形 ( $G_{ij}$ ) を、南北方向 (NS)、東西方向 (EW) に変換し成分波 ( $G_i$ ) を作成する。

[3] 成分波 ( $G_i$ ) の立上がりから一組N個のデジタル量に関する共分散行列 (Covariance Matrix)

$$V = \begin{bmatrix} \text{var}[G_{NS}] & \text{cov}[G_{NS}, G_{EW}] & \text{cov}[G_{NS}, G_{UD}] \\ \text{cov}[G_{NS}, G_{EW}] & \text{var}[G_{EW}] & \text{cov}[G_{EW}, G_{UD}] \\ \text{cov}[G_{NS}, G_{UD}] & \text{cov}[G_{EW}, G_{UD}] & \text{var}[G_{UD}] \end{bmatrix} \dots\dots (1)$$

を求める。

[4] ハウスホルダー変換法 (Householder's method) により固有値と固有ベクトルを計算する。行列を対角化し、二要素分割法で変換マトリックス固有値を求め、ウィーラントの繰り返し法で固有ベクトルを計算する。これらの値は最大主軸、中間主軸および最小主軸の大きさ ( $\lambda_i$ ) とそれぞれの入射角 ( $\Phi_i$ )、方位角 ( $\theta_i$ ) をあらわすものである。

[5] 方位角と入射角により地震動の注目した基本的な水平方位成分 R (Radial) とその方向に直角な成分 T (Transverse) および上下方向 Z (Vertical) の三成分の波を合成するための Direction Function

$$D_i = (e_i)^k \quad (i=R, T, Z, \equiv 1, 2, 3) \dots\dots (2)$$

を求める。なお、 $0 < D_i < 1$ 、 $k$  は強調を表す指数である。また、 $e_i$  は方位座標変換の関数であり、たとえば水平方位の座標変換の関係式は

$$\left. \begin{aligned} e_R &= X = x \cos \vartheta + y \sin \vartheta \\ e_T &= Y = y \cos \vartheta - x \sin \vartheta \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

のように表わすことができる。また Rectilinearity Function は Flinn が用いた 2 次元の場合

$$F_1 = \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^n \right\}^m \dots\dots (4)$$

式 (4) を 3 次元に拡張して、

$$F_2 = \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_2^2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2^2}{3 \lambda_1^2} \right)^n \right\}^m \dots\dots (5)$$

のようにも提案した。ここで、式 (5) のカッコ内の項には主軸で作られる楕円の面積

$$A_1 = \pi \lambda_1 \lambda_2, A_2 = \pi \lambda_1 \lambda_3, A_3 = \pi \lambda_2 \lambda_3$$

楕円球の体積

$$V = 4\pi \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 / 3$$

と最大主軸  $\lambda_1$  を半径とする円の面積  $A_\lambda = \pi \lambda_1 \lambda_2$ 、球の体積  $V_\lambda = 4\pi \lambda_1^3 / 3$ 、との比がそれぞれ組み

合わせて用いられている。なお、 $n, m$  も強調指数を示すものであり、以降の解析においては  $k=1, n=m=1$  を用いることとする。

一組  $N$  個のデジタルデータは、線形な時間ウィンドウ関数になっている。これを地震波の全データに適用するため、ウィンドウの時間幅を一定にしてウィンドウの中心時刻  $t_j$  ( $j=1, 2, \dots, M$ ) のフィルター関数として順次時刻を再新し同じ計算を繰り返す。時刻の移動により  $M$  回ウィンドウが変化するため非線形フィルターとみなすことができるが、隣接するウィンドウ同士は重なる時間領域をもっており低域通過フィルターを適用した場合にがいとうする。

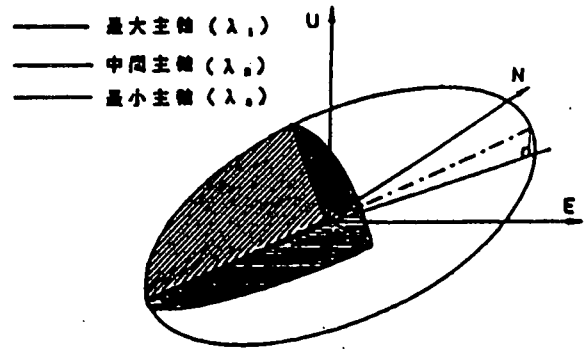


図-1 方位座標変換と主軸

[6] 主軸成分を強調した地震波形  $G_{ij}$  は上記のように作られたポーラリゼーション・フィルターを用いて次式で表現する事ができる。

$$G_{ij}(t) = G_j(t) * F_j(t) * D_{ij}(t) \quad (i=R, T, Z, j=1, 2, \dots, M) \dots\dots (7)$$

[7] P 波初動部から推定された入射方向の成分と入射角の方位が平行で入射角が直角な SV 波の成分を強調するような P 波、S 波を合成し作図することによって波形識別を容易にする。

### 3. 解析結果

解析データとしては、釧路沖地震、北海道南西沖地震、北海道東方沖地震で記録された地震データを使用した。データはすべて表記の橋梁付近の地表で観測された加速度記録である。データ解析の条件としては、デジタルサンプリング間隔は 0.01 秒のデータに対してウィンドウ時間幅 10 秒、時間間隔 5 秒で解析をおこなった。

表-1～3 にその結果を示す。また、解析結果の例として東方沖地震の千代田大橋の地震記録の解析結果を図-3、4 に示す。

1) 地震動特性

各地震の地表面での地震動特性の指針として最大主軸と中間主軸の比を求めた。この比が1に近づくほど地表の地震動は円に近くなり指向性の無いものとなる。釧路沖、南西沖は、共に最大主軸と中間主軸の比の平均が約1.5程度となるが、東方沖は約1.2程度の値を示した。この結果から、地震毎に着目した場合、地表面の方向性の影響はあまり差が無いように読み取れる。

しかし、各観測地点毎に着目した場合、札幌IC、島松沢橋、空知大橋等は、どの地震に対しても高い方向性を示しているし、同様に、千代田大橋、温根沼大橋は、どの地震に対しても円状の地震特性を示している。

このことから、地震動特性は各観測地点の地盤条件による影響が大きいと考えられる。

表-1 釧路沖地震の主軸解析結果

| 橋梁名   | 震央距離   | 震央方向 | 主軸方向 | 最大主軸   | 中間主軸   | MAX/INT |
|-------|--------|------|------|--------|--------|---------|
| 白鳥大橋  | 286.31 | W    | W    | 36.10  | 28.49  | 1.2671  |
| 石狩河口橋 | 249.72 | W    | W    | 12.98  | 9.09   | 1.4275  |
| 札幌大橋  | 242.85 | W    | SW   | 8.53   | 7.05   | 1.2103  |
| 札幌IC  | 242.58 | W    | W    | 27.43  | 12.88  | 2.1297  |
| 島松沢橋  | 231.51 | W    | W    | 22.55  | 10.47  | 2.1538  |
| 空知大橋  | 214.11 | W    | W    | 12.75  | 6.52   | 1.9555  |
| 静内橋   | 174.66 | W    | NW   | 140.90 | 123.90 | 1.1372  |
| 幌満橋   | 140.14 | NW   | SW   | 16.01  | 13.48  | 1.1877  |
| 斜里大橋  | 116.92 | S    | E    | 70.09  | 38.19  | 1.8353  |
| 広尾橋   | 108.78 | NW   | SW   | 158.70 | 110.60 | 1.4349  |
| 温根沼大橋 | 99.86  | SE   | SW   | 156.50 | 122.40 | 1.2786  |
| 千代田大橋 | 81.32  | W    | N    | 88.56  | 73.64  | 1.2026  |
| 十勝河口橋 | 64.10  | W    | SW   | 82.19  | 57.18  | 1.4374  |
| 厚岸    | 31.68  | W    | NW   | 129.60 | 93.51  | 1.3859  |
| 大楽毛橋  | 20.56  | SW   | NW   | 128.60 | 96.30  | 1.3354  |

表-2 北海道南西沖地震の主軸解析結果

| 橋梁名   | 震央距離   | 震央方向 | 主軸方向 | 最大主軸  | 中間主軸  | MAX/INT |
|-------|--------|------|------|-------|-------|---------|
| 千代田大橋 | 341.87 | E    | E    | 1.97  | 1.24  | 1.5984  |
| 真浜厚真橋 | 216.75 | E    | NE   | 8.41  | 5.53  | 1.5205  |
| 新石狩大橋 | 192.94 | E    | NE   | 31.05 | 25.67 | 1.2096  |
| 島松沢橋  | 191.65 | E    | E    | 30.66 | 8.25  | 3.7173  |
| 札幌IC  | 183.25 | E    | NE   | 23.32 | 13.65 | 1.7084  |
| 石狩河口橋 | 181.77 | E    | NE   | 11.68 | 7.91  | 1.4770  |
| 無意根橋  | 164.56 | E    | E    | 4.30  | 3.89  | 1.1071  |
| 七峰橋   | 154.92 | NE   | E    | 81.64 | 70.30 | 1.1613  |
| 白鳥大橋  | 151.64 | E    | SE   | 55.05 | 39.37 | 1.3983  |
| 上島崎橋  | 139.92 | NE   | NE   | 60.62 | 47.46 | 1.2773  |
| 磯谷橋   | 95.89  | E    | S    | 43.19 | 35.15 | 1.2287  |

表-3 北海道東方沖地震の主軸解析結果

| 橋梁名   | 震央距離   | 震央方向 | 主軸方向 | 最大主軸   | 中間主軸   | MAX/INT |
|-------|--------|------|------|--------|--------|---------|
| 七峰橋   | 644.76 | W    | N    | 2.89   | 2.63   | 1.0989  |
| 石狩河口橋 | 511.29 | W    | SW   | 9.26   | 7.12   | 1.3006  |
| 錦岡橋   | 509.09 | W    | SW   | 18.73  | 15.79  | 1.1862  |
| 新石狩大橋 | 498.45 | W    | SW   | 15.29  | 12.08  | 1.2657  |
| 千代田大橋 | 350.63 | W    | NW   | 56.79  | 54.28  | 1.0462  |
| 大楽毛橋  | 279.54 | W    | W    | 43.09  | 34.59  | 1.2457  |
| 温根沼大橋 | 177.19 | W    | SW   | 118.10 | 109.70 | 1.0766  |

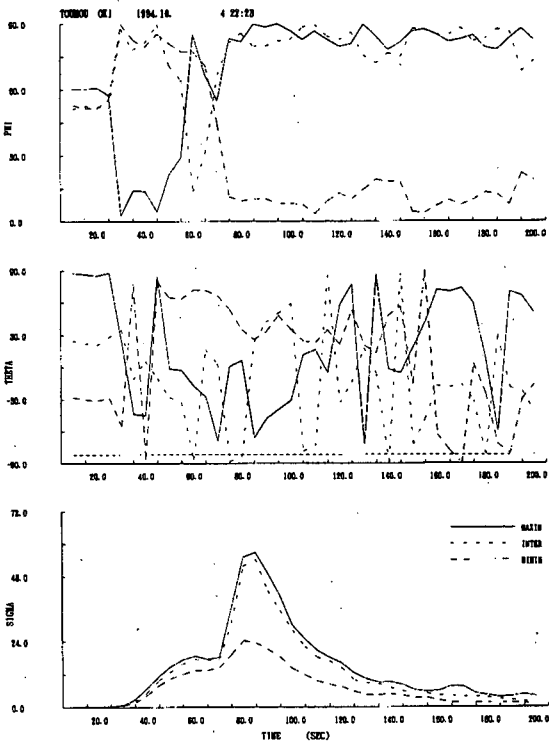


図-3 東方沖地震の千代田橋の主軸解析結果

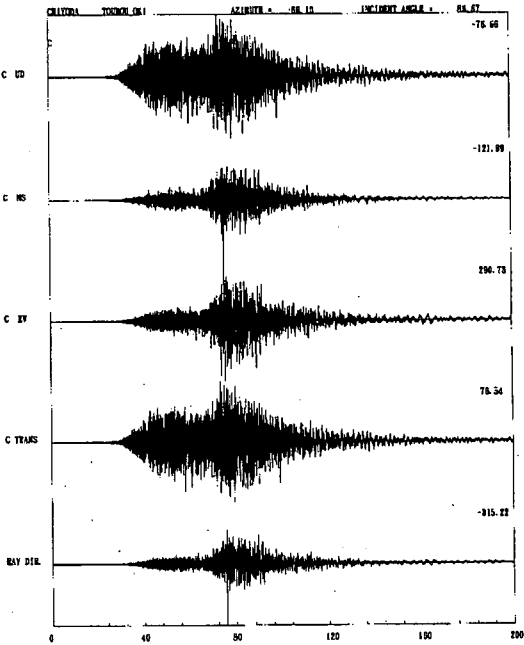


図-4 東方沖地震の大楽毛橋の変換波形

## 2) 主要動の方向

各観測点における、地震動の主方向についてその結果を図-5～7にまとめた。

表-1～3には観測点から見ての方向を8方位で表わしている。

主軸方向は地震動の最大エネルギー時の方向を求めているにとほとんど変わりが無いため、基本的には、震源方向と同じになるはずである。しかしながら、図からは、震源方向によるよりも、観測位置に固有の方向性があるように読み取れる。

釧路沖地震 主方向図

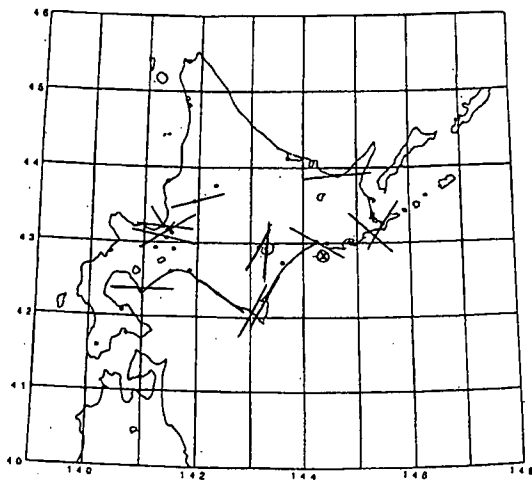


図-5 釧路沖地震の各観測点の主方向図

南西沖地震 主方向図

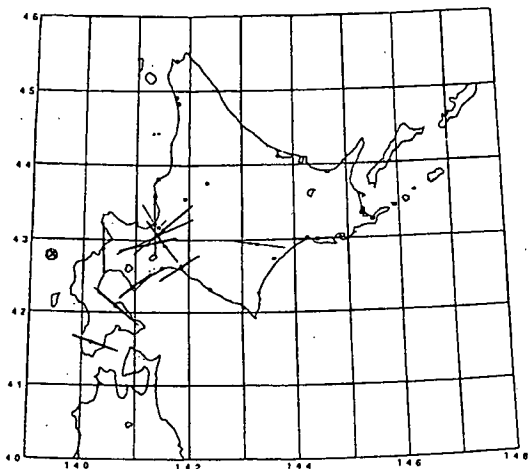


図-6 北海道南西沖地震の各観測点の主方向図

東方沖地震 主方向図

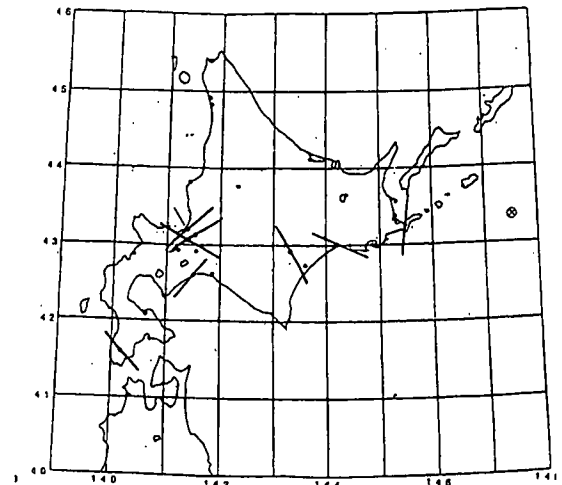


図-7 北海道南西沖地震の各観測点の主方向図

## 4. まとめ

以上のことより、北海道における地震特性を考える上で、地震動粒子軌跡の楕円特性や最大主軸方向はその地震発生位置よりも各観測位置により強い影響を受けるように考えられる。

地震動特性が、観測地点の影響を高く受けるとするならば、各地域毎の地震動に対する影響特性を検討することにより、土木構造物の耐震設計の資料とすることが可能であると考えられる。

今回の解析では、同一地域での観測記録が少なく、各地域ごとにどのような影響力があるかを検討するには至らなかった。しかし、現在、北海道開発局では強震記録の観測及び、被害予測を行う「地震情報伝達システム」を開発しており、全道に約160カ所の地震動観測を行っている。

今後は本システムで記録されたデータについても解析を行い、北海道の地域による地震動の影響について検討していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Flin, E.A.: Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, Proc.I.E.E.E., 53, 1874, 1965.
- 2) Montalbetti, J.F. & Kanasevich, E.R.: Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, Geophys.J.R.astr.Soc., 21, 119-129, 1970