

I-381

地震計の埋設方位の精度が三角形アレー観測の結果に及ぼす影響度について

清水建設(株) 正会員 田 蔵 隆 正会員 佐藤 正義
正会員 清水 勝美

1. ま え が き

本報は三角形アレー観測の記録から算定される地震波の伝播方向、伝播速度ならびに地盤ひずみに対して、地震計の埋設方位の精度がどの程度の影響を及ぼすかについて考察したものである。

2. 地震波の伝播方向、伝播速度ならびに地盤ひずみの算定方法

図-1に示すような三角形アレー観測から得られる記録に基づく地震波の伝播方向 α ならびに伝播速度 v の算定式は、以下のように与えられる。

$$\alpha = \tan^{-1} \{ (\tau_{AC}/\tau_{AB}) (\ell_{AB}/\ell_{AC}) \cdot \operatorname{cosec} \beta_A - \cot \beta_A \} \quad (1)$$

$$v = (\ell_{AB}/\tau_{AB}) \cdot \cos \alpha = (\ell_{AC}/\tau_{AC}) \cdot \cos (\beta_A - \alpha) \quad (2)$$

ここに、 τ_{AB} および τ_{AC} は、地震波がA点からB点およびA点からC点に進むのに要する時間であり、それぞれA点とB点の記録あるいはA点とC点の記録の位相差として検出される。

ところで、図-1に示す三角形アレー観測において、A点、B点およびC点に設置した地震計の各方位が図-2に示すように、所定の方向に対してそれぞれ角度 θ_A 、 θ_B 、 θ_C だけ回転して設置されていた場合、A点とB点の記録から計算される相互相関関数を正しい方位で計算される相互相関関数に変換する式として、次のような関係式が得られる。

$$\begin{aligned} C_{x_A x_B} &= \cos \theta_A \cdot \cos \theta_B \cdot C^0_{x_A x_B} + \sin \theta_A \cdot \cos \theta_B \cdot C^0_{y_A x_B} \\ &\quad + \cos \theta_A \cdot \sin \theta_B \cdot C^0_{x_A y_B} + \sin \theta_A \cdot \sin \theta_B \cdot C^0_{y_A y_B} \\ C_{y_A y_B} &= \sin \theta_A \cdot \sin \theta_B \cdot C^0_{x_A x_B} - \cos \theta_A \cdot \sin \theta_B \cdot C^0_{y_A x_B} \\ &\quad - \sin \theta_A \cdot \cos \theta_B \cdot C^0_{x_A y_B} + \cos \theta_A \cdot \cos \theta_B \cdot C^0_{y_A y_B} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $C_{x_A x_B}$ および $C_{y_A y_B}$ は地震計が正しい方位で設置された場合の記録に基づく相互相関関数であり、 $C^0_{x_A x_B}$ 、 $C^0_{y_A x_B}$ 、 $\dots$ は図-2の状態地震計が設置された場合の記録から計算される相互相関関数である。すなわち、工学的には $C_{x_A x_B}$ 、 $C_{y_A y_B}$ を必要としているのに対し、地震計の埋設方位が正しくないことによって $C^0_{x_A x_B}$ 、 $C^0_{y_A y_B}$ が得られることになる。本来は(3)式によって相互相関関数の変換を行うことが必要となるが、実際にはそうはしない。議論すべきことは、 $C_{x_A x_B}$ あるいは $C_{y_A y_B}$ から算定される位相差 $\tau_{x_A x_B}$ 、 $\tau_{y_A y_B}$ と $C^0_{x_A x_B}$ 、 $C^0_{y_A y_B}$ から算定される位相差 $\tau^0_{x_A x_B}$ 、 $\tau^0_{y_A y_B}$ との差であり、さらにこの差が(1)式および(2)式から計算される地震波の伝播方向 α と伝播速度 v にどの程度の影響を与えるかである。

また、図-2のような状況で地震計の方位が回転していた場合、有限要素法の三角形要素の理論に基づく地盤ひずみ $\{\epsilon^0\}$ は次式によって計算される。

$$\{\epsilon^0\} = [B] \{x^0\} \quad (4)$$

ここに、 $\{\epsilon^0\} = \{\epsilon^0_x \ \epsilon^0_y \ \gamma^0_{xy}\}^T$ 、 $[B]$ はひずみ-変位マトリックス、 $\{x^0\} = \{u^0_A \ v^0_A \ u^0_B \ v^0_B \ u^0_C \ v^0_C\}^T$ である。一方、正しい地盤ひずみ $\{\epsilon\}$ は次式によって与えられる。

$$\{\epsilon\} = [B][C(\theta)] \{x^0\} \quad (5)$$

ここに、 $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$ であり、 $[C(\theta)]$ は、

$$[C(\theta)] = \begin{bmatrix} [SC(\theta_A)] & \mathbf{0} \\ & [SC(\theta_B)] \\ \mathbf{0} & [SC(\theta_C)] \end{bmatrix} \quad [SC(\theta_i)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

である。この場合の工学的な問題は、地震計の回転角 θ_A 、 θ_B 、 θ_C に対して $\{\epsilon\}$ と $\{\epsilon^0\}$ にどの程度の

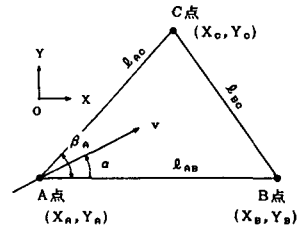


図-1 三角形アレー観測

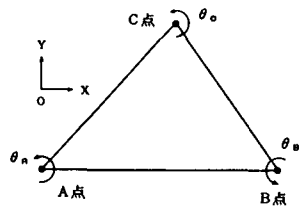


図-2 各地震計の回転角

差異が発生するかということである。

3. 数値解析例

地中地震計の埋設は、通常ピアノ線で地震計を保持しながらボーリング孔内を降下させ、ボーリング孔底部に設置するという方法で行われている。また、地震計の方位の設定は地震計がボーリング孔の底部に達した時点で、地震計と連結したロッド頂部のジャイロに従い、地震計を回転させ所定の方位に合わせるという方法で行っている。この場合、地震計の設置深度に伴い、埋設方位の精度低下が予想される。佐藤、片山の研究報告¹⁾を参考にすると、GL-40 mで角度 10° 程度の誤差は一般的と考えられそうである。

(3)式において、 $\theta_A = \theta_B = \pm 10^\circ$ とすると、

$$\begin{aligned} C_{x_A x_B} &= 0.970 C^{\theta} x_A x_B \pm 0.171 C^{\theta} y_A x_B \\ &\quad \pm 0.171 C^{\theta} x_A y_B + 0.030 C^{\theta} y_A y_B \\ C_{y_A y_B} &= 0.030 C^{\theta} x_A x_B \mp 0.171 C^{\theta} y_A x_B \\ &\quad \mp 0.171 C^{\theta} x_A y_B + 0.970 C^{\theta} y_A y_B \end{aligned} \quad (7)$$

となる。いま、辺長が300 mの正三角形アレーを考え、 $\theta_A = 10^\circ$ 、 $\theta_B = -10^\circ$ 、 $\theta_C = -10^\circ$ とし、地震波の伝播方向 $\alpha = 20^\circ$ 、伝播速度 $v = 500$ m/secとした場合について考える。図-3は1968年十勝沖地震八戸記録のNS成分およびEW成分の加速度記録から計算した $C_{x_A x_B}$ 、 $0.970 C^{\theta} x_A x_B$ 、 $0.171 C^{\theta} y_A x_B$ 、 $0.171 C^{\theta} x_A y_B$ 、 $0.030 C^{\theta} y_A y_B$ である。これより、 $C_{x_A x_B}$ と $C^{\theta} x_A x_B$ には差はほとんど見られず、伝播方向 α 、伝播速度 v の算定においても問題は少ないと言える。

図-4は地盤のせん断ひずみ γ_{xy} と γ^{θ}_{xy} について示したものである。最大値で10%程度の差が生じているが、両者の波形としての差異は大きくない。

4. あとがき

地震波動伝播の実現象は一般に複雑であり、完全な形で地震波が水平方向に伝播するといったことはあり得ない。地震観測から得られる観測記録に基づいて、伝播方向 α 、伝播速度 v および地盤ひずみ $\{\epsilon\}$ を検討する場合、有効数字何ケタといった高い精度の値が要求されることはほとんどなく、通常はそのオーダーの把握が主目的となる。地中地震計の設置において、埋設方位の調整には当然十分な注意が必要であるが、設置誤差が 10° 程度であれば工学的には許容できる範囲であると考えられる。

参考文献

(1) 佐藤暢彦、片山恒雄；地中地震計の埋設方位の推定、第17回地震工学研究発表会、1983年7月。

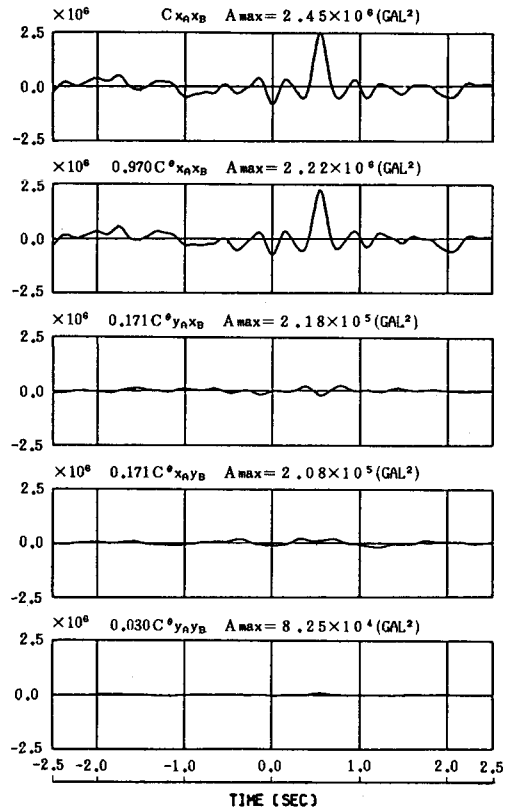


図-3 十勝沖地震記録に基づく各相互相関関数

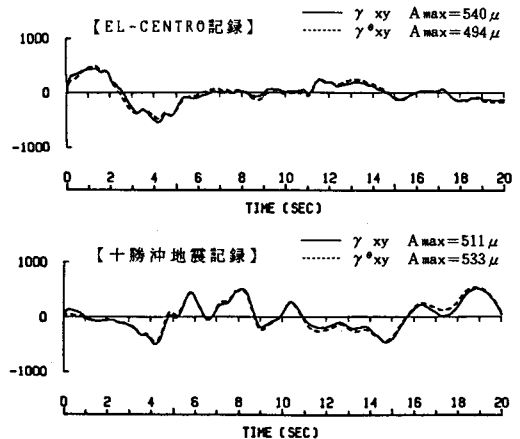


図-4 地盤のせん断ひずみ