

(23) 千葉実験所における地震動観測

— その 4 地中地震計の埋設方位誤差の再検討 —

東京大学生産技術研究所 山崎 文雄
 清水 建設(株)大崎研究室 佐藤 智美
 東京大学生産技術研究所 片山 恒雄

1. はじめに

東京大学生産技術研究所千葉実験所における高密度アレーには、全44個の地中加速度計が埋設されている。これらの地中地震計は、水平2方向(NS、EW)と上下方向(UD)の3成分のセンサーが、埋設用の円筒形ケースに収納された形式のものである。この地震計の形状的な理由から、3方向の直交性は保証されるが、地震計の方位は特に水平方向にねじれ易い。実際に地表近く(GL-1m)の11個の地震計については、設置後間もなく、記録から疑問が生じたため掘出して目視したところ、埋設方位にかなり大きな誤差があることが確認され¹⁾、そのうちの5個については正しい方位への再設置を行った。その他の地震計(GL-5,-10,-20,-40m)については、再設置が困難であることから、当時得られていた2つの地震記録に基づいて埋設方位誤差を推定し¹⁾、以来この結果を用いて記録補正を行ってきた。この方位誤差の推定方法は、埋設方位の判明している地震計の水平2方向の記録と、それが不確かな地震計の水平2方向の記録との相関を調べ、相関が最大となる回転角度を不確かな地震計の水平のねじれ角とみなすものである。この検討を行った後、これまでに数多くの地震記録が得られていること、および地震計の立体的なねじれ角も把握しておきたいという理由から、本報では、地震動の主軸の概念に基づく3次元的な方位補正に関する検討を行うことにした。

2. 地震動の主軸と3次元座標変換

地震動の主軸の求め方に関しては、既に幾つかの方法²⁾⁻⁵⁾が提案されているが、ここでは最も単純な共分散行列を対角化する主軸の概念を用いることにする。直交座標系(x, y, z)におけるある地点での地震動3成分は、ベクトル過程 $\mathbf{a}(t) = [a_x(t) \ a_y(t) \ a_z(t)]^T$ で表される。これら3成分が0平均の定常ガウス過程もしくは、それらに包絡関数を乗じたものと仮定すると、時間差0の共分散行列 $\boldsymbol{\mu}$ が次のように定められる。

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \dots (1) ; \quad \mu_{ij} = \mu_{ij}(t, 0) = E[a_i(t) a_j(t)] = \langle a_i(t) a_j(t) \rangle \dots (2)$$

(i, j = x, y, z)

ここで、 $E[\cdot]$ はアンサンブル平均であるが、ここではエルゴード性を仮定して時間平均 $\langle \cdot \rangle$ を用いる。共分散行列 $\boldsymbol{\mu}$ を対角行列 $\boldsymbol{\Lambda}$ に変換するような固有モード行列 $\mathbf{L} = [\boldsymbol{\rho}_1 \ \boldsymbol{\rho}_2 \ \boldsymbol{\rho}_3]^T$ は、固有値問題 $\boldsymbol{\mu} \mathbf{L} = \mathbf{L} \boldsymbol{\Lambda}$ を解くことにより求まり、 $\boldsymbol{\Lambda}$ の対角成分 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は最大、中間および最小主軸に関する固有値である。最大主軸方向は、固有ベクトル $\boldsymbol{\rho}_1 = [\rho_{11} \ \rho_{21} \ \rho_{31}]^T$ で表され、その方向は図-1示す2つの角度 α と β によって、また中間および最小主軸方向は、 $\boldsymbol{\rho}_1$ 回りの回転角 γ で以下のように規定できる。

$$\alpha = \tan^{-1}(\rho_{21} / \rho_{11}) \quad , \quad \beta = \tan^{-1}(\rho_{31} / \sqrt{\rho_{11}^2 + \rho_{21}^2})$$

$$\gamma = \text{sgn}(\rho_{32}) \cdot \cos^{-1}(-\rho_{12} \sin \alpha + \rho_{22} \cos \alpha) \quad \dots (3)$$

このようにして、座標系(x, y, z)を α, β, γ だけ回転して得られる新たな座標系を(x', y', z')とすると、地震動ベクトル過程 $\mathbf{a}(t)$ も $\mathbf{a}'(t) = [a_{x'}(t) \ a_{y'}(t) \ a_{z'}(t)]^T$ へと変換され、 $\mathbf{a}'(t)$ の各3成分の共分散は0となる。なおこの座標変換は、次式で表される。

$$\mathbf{a}'(t) = \mathbf{T} \mathbf{a}(t) \quad \dots (4)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta & \sin \alpha \cdot \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \alpha \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma & \cos \beta \cdot \sin \gamma \\ \sin \alpha \cdot \sin \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma & -\cos \alpha \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma & \cos \beta \cdot \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

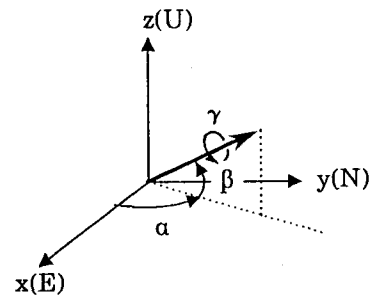


図-1 3次元座標軸と回転角

3. 主軸を用いた埋設方位の推定

ほぼ成層均質な地盤では、地震動の主軸は、当観測地域のような狭い範囲においてはほぼ同じ方向を向くであろうと予測される。従ってここでは、全ての地中地震計の3成分の記録よりそれぞれ主軸を求め、埋設方位誤差が無いと考えられるC001地点での主軸方向との差を求めることにした。すなわち*i*地点での最大主軸の方向を3つの角度 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ で表すと、以下の $\Delta\alpha_i, \Delta\beta_i, \Delta\gamma_i$ を*i*地点の地震計の方位誤差とみなす。

$$\Delta\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{C001}, \quad \Delta\beta_i = \beta_i - \beta_{C001}, \quad \Delta\gamma_i = \gamma_i - \gamma_{C001} \quad \dots\dots\dots (6)$$

この方法による推定を、最大加速度が比較的大きい図-2に示す10地震について行った。実地震動は非定常性を有し、主軸も時間領域、周波数領域で変動する。また高周波数成分は、局所的地盤の影響を受けやすい。そこでここでは、この地域全体において相関性の高いと考えられるS波の主要動部を時間領域で取り出し、この波形をハイカットフィルターに通し、このフィルター波の主軸を求めた。実際にはこのような方法で何通りかの時間帯域・周波数帯域を設定し、顕著な位相が表れるようなフィルター波を抽出している。これによる推定結果が、埋設方位の既知な地点のものとはほぼ一致したときの地震波ごとのこれらの帯域を図-2に示す。C001地点でのこのフィルター波に対する最大および中間主軸方向を図-3に示す。ここで軸の長さは固有値、すなわちエネルギーの大きさを比の形で表している。最大主軸は、10波のうち6波がほぼ震源方向を向いており、最小主軸は図には示されていないが、全てほぼ鉛直方向を向いていた。

これら10地震の各地点における $\Delta\alpha$ と $\Delta\beta$ のうち、それらのばらつきが小さい4地震についての推定結果を、平均値、標準偏差とともに表-1、2に示す。これより $\Delta\alpha$ の推定値は、実測値および前回の推定値¹⁾とほぼ一致していることがわかる。また $\Delta\beta$ は最大で7°程度と小さいが、鉛直方向にもこのように多少の埋設誤差があることが推定された。さらにもう1つの角 $\Delta\gamma$ については、ここでは示していないが、やや地震

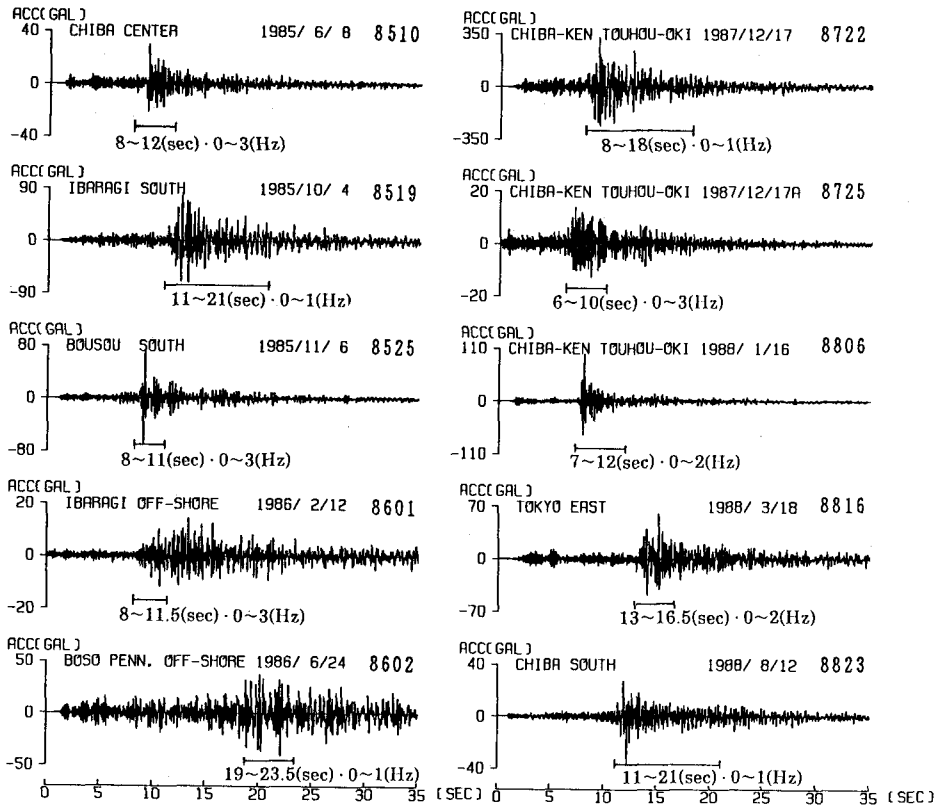


図-2 検討に用いる地震波と取り出す時間・周波数領域 (C001, NS)

によるばらつきが大きく、数度といった精度で推定するには至らなかった。これはフィルター波の作成法とも関連し、今後の検討課題と言えよう。

次にこの $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ の平均値を用い、 $\Delta\gamma$ についてはとりあえず0として、式(4)の座標変換による波形を求め、座標変換前後の2地点間の波形の相関をバンド幅0.4 HzのParzenウィンドーを用いたコヒーレンスにより比較した。図-4は、千葉県東方沖地震(1987年12月17日、地震番号8722)の継続時間36秒間を用いたC001とC005のコヒーレンスである。座標変換後、水平2成分のコヒーレンスは低周波数領域で非常に良くなっており、地震計のねじれがコヒーレンスの低下の一つの原因となることを示している。上下成分については、もともとコヒーレンスが良好いと、 $\Delta\gamma$ を考慮していないために、やや改善が見られる程度であった。なお、この鉛直成分の0-5 Hzでのコヒーレンスは、 $\Delta\gamma$ として5°を与えるとほぼ1に上昇することが確認されており、 $\Delta\gamma$ を適切に評価することの重要性が指摘される。

なおこの方法は、各地点でのフィルター波の主軸がほぼ同じ向きを向くであろうという想定のもとに成り立っているため、基準とする地点からの距離が遠くなると精度が低下する。ちなみに、C0から水平距離で118m離れたP5地点や137m離れたP6地点では、推定値のばらつきを示す標準偏差がやや大きくなっている。またこの方法で求まる $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ は、モード形の正負に意味がないことから、-90°から90°の範囲にあり、方位がこの範囲以上、例えば180°狂っているような場合には、波形による正負の確認が必要となる。

観測記録に基づく地中地震計の埋設方位誤差の3次元的な推定法は、ここで提案した方法の他にも考えられる。たとえば2地点間の3成分波形の相関を、時間遅れと3つのねじれ角をパラメータとして計算し、相関が最大となるときのそれらの値を求めるといった方法もあろう。千葉実験所の地震データベース公開に当たっては、このような方法でも検討の後、最終的な補正角度を決定したいと考えている。

4. まとめ

地震動の主軸の概念を用いて、千葉実験所高密度アレー内の地中地震計の埋設方位誤差の3次元的な推定を行った。その結果、水平面内の回転角については、実測値や以前に行った2次元的な推定結果と良好一致が得られた。しかし他の2つの立体ねじれ角については、必ずしも信頼度の高い推定結果が得られたとはい

表-1 各地点の最大主軸のC001に対する水平角度差

ICMP	水平角度 α (degree)				平均値	標準偏差	実測値	計算値	誤差(%)
	8519	8722	8806	8816					
10131 (C005)	21.5	20.2	20.5	20.8	20.8	0.48	22.4		22.4
10231 (C010)	-1.7	0.8	-0.3	1.0	0.0*	1.07	-180.0		
10431 (C020)	6.4	8.7	7.6	9.5	8.1	1.17	9.6		9.6
10831 (C040)	6.8	10.0	11.1	7.4	8.8	1.78	9.5		9.5
11031 (C101)	15.3	14.1	14.7	15.0	14.8	0.44	13.0	15.6	
11131 (C105)	8.3	9.3	9.0	9.6	9.1	0.48	7.2		7.2
11231 (C110)	12.6	12.0	12.0	13.2	12.5	0.50	12.8		12.8
12031 (C201)	10.6	9.9	10.6	11.3	10.6	0.49	12.0	11.0	
12131 (C205)	16.8	15.5	16.4	16.3	16.3	0.47	17.9		17.9
12231 (C210)	-5.0	-3.6	-3.9	-3.4	-4.0	0.62	-3.8		-3.8
13031 (C301)	0.8	4.9	2.8	4.6	3.3	1.64	2.1		2.1
13131 (C305)	-14.5	-10.5	-12.7	-10.8	-12.1	1.61	-14.2		-14.2
13231 (C310)	-0.6	-2.0	-1.2	-2.9	-1.7*	0.86	-182.2		
14031 (C401)	2.0	3.7	2.3	2.8	2.7	0.84	2.0		2.0
14131 (C405)	59.7	53.3	55.3	53.0	55.3	2.68	54.5		54.5
14231 (C410)	-4.9	-5.3	-5.4	-5.2	-5.2	0.19	-7.1		-7.1
21031 (P101)	-8.0	-5.2	-8.4	-7.0	-7.2	1.24	-7.0	-8.0	
21231 (P110)	3.2	5.2	4.2	5.3	4.3	0.85	5.9		5.9
21431 (P120)	-7.5	-4.9	-6.0	-4.5	-5.7	1.16	-5.0		-5.0
22031 (P201)	8.4	9.9	9.7	9.9	9.5	0.63	7.0	9.0	
22231 (P210)	12.0	13.8	13.5	13.7	13.3	0.73	11.6		11.6
22431 (P220)	31.2	29.1	30.8	29.9	30.3*	0.81	-149.5		
23031 (P301)	-14.5	-12.8	-13.0	-13.4	-13.4	0.66	-13.0	-13.6	
23231 (P310)	19.4	16.9	17.9	18.3	18.1	0.90	21.5		21.5
23431 (P320)	17.7	18.1	18.6	17.9	18.1*	0.33	-160.6		
24031 (P401)	22.1	20.5	18.9	21.0	20.6	1.15	20.0	22.8	
24231 (P410)	7.9	7.2	6.8	6.9	7.2	0.43	5.1		5.1
24431 (P420)	1.6	4.2	3.3	4.3	3.4	1.08	1.0		1.0
25031 (P501)	0.7	3.6	-1.5	3.7	1.6	2.17	2.5		2.5
25231 (P510)	26.4	26.8	24.4	25.4	25.8	0.93	23.8		23.8
25431 (P520)	2.4	2.9	1.3	-0.1	1.6*	1.15	-180.1		
25831 (P540)	13.7	18.1	17.1	12.9	15.5	2.20	13.9		13.9
26031 (P601)	0.5	5.6	2.6	5.8	3.6	2.20	3.0		3.0
26231 (P610)	31.4	33.4	32.3	33.0	32.5	0.76	30.1		30.1
26431 (P620)	24.9	25.8	25.8	24.8	25.3	0.48	22.8		22.8

*は180°の位相差が波形より読み取れるもの

表-2 各地点の最大主軸のC001に対する鉛直角度差

ICMP	鉛直角度 β (degree)				平均値	標準偏差	実測値
	8519	8722	8806	8816			
10131 (C005)	-2.9	-5.7	-5.9	-6.5	-5.3	1.39	
10231 (C010)	1.1	0.8	-3.2	-0.1	-0.4	1.70	
10431 (C020)	-1.3	0.2	-0.3	-0.2	-0.4	0.55	
10831 (C040)	4.1	7.0	6.7	8.1	6.0	1.13	
11031 (C101)	4.2	7.2	6.4	8.4	6.1	1.12	2.0
11131 (C105)	-0.9	1.3	0.2	0.6	0.3	0.80	
11231 (C110)	0.8	3.3	2.4	2.5	2.3	0.91	
12031 (C201)	0.1	-0.3	-0.3	-0.8	-0.3	0.32	2.0
12131 (C205)	3.3	4.0	4.1	3.1	3.6	0.43	
12231 (C210)	3.8	4.7	4.6	3.7	4.2	0.45	
13031 (C301)	3.0	1.3	1.4	0.1	1.5	1.03	0.0
13131 (C305)	1.9	-5.9	-4.5	-7.6	-4.0	3.59	
13231 (C310)	2.1	0.9	-3.3	-0.2	-0.1	2.01	
14031 (C401)	2.9	3.7	3.4	2.8	3.2	0.37	0.0
14131 (C405)	-0.1	-3.5	-3.3	-4.2	-2.8	1.58	
14231 (C410)	5.8	8.0	7.2	6.8	7.0	0.83	
21031 (P101)	2.6	2.1	1.5	0.9	1.8	0.84	0.0
21231 (P110)	2.2	3.5	2.8	2.5	2.8	0.48	
21431 (P120)	5.0	5.4	5.2	4.1	4.9	0.50	
22031 (P201)	5.0	4.0	4.1	2.6	3.9	0.86	0.0
22231 (P210)	3.4	4.2	3.8	2.9	3.6	0.48	
22431 (P220)	1.2	0.2	-3.8	-0.3	-0.7	1.88	
23031 (P301)	-1.1	1.6	1.4	1.4	0.8	1.11	0.0
23231 (P310)	4.1	3.1	4.3	2.1	3.4	0.88	
23431 (P320)	1.9	-0.9	-5.4	-2.1	-1.6	2.62	
24031 (P401)	3.0	3.0	3.7	2.7	3.1	0.37	3.0
24231 (P410)	3.8	5.3	5.8	4.8	4.9	0.68	
24431 (P420)	3.3	5.7	6.0	5.3	5.1	1.05	
25031 (P501)	6.1	3.3	4.0	1.0	3.6	1.82	0.0
25231 (P510)	5.7	2.3	3.6	-0.1	2.9	2.10	
25431 (P520)	0.7	-0.9	-5.1	-1.2	-1.6	2.13	
25831 (P540)	2.2	4.1	3.1	1.6	2.8	0.97	
26031 (P601)	0.7	4.1	0.9	-0.5	1.3	1.70	
26231 (P610)	-3.0	-1.8	-4.4	-6.0	-3.8	1.57	0.0
26431 (P620)	-3.1	0.2	-2.9	-3.8	-2.4	1.54	

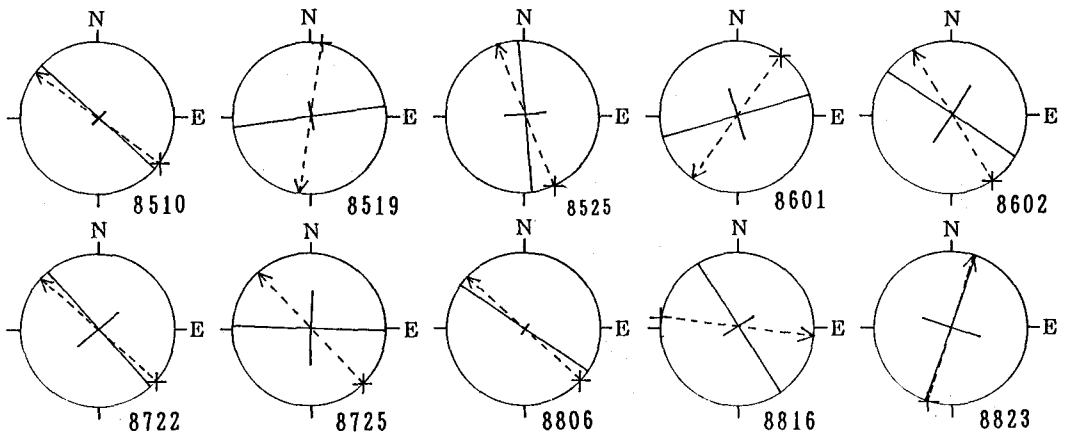


図-3 各地震に対するC001地点の最大・中間主軸の方向 (数字は地震番号、+は震源位置を示す)

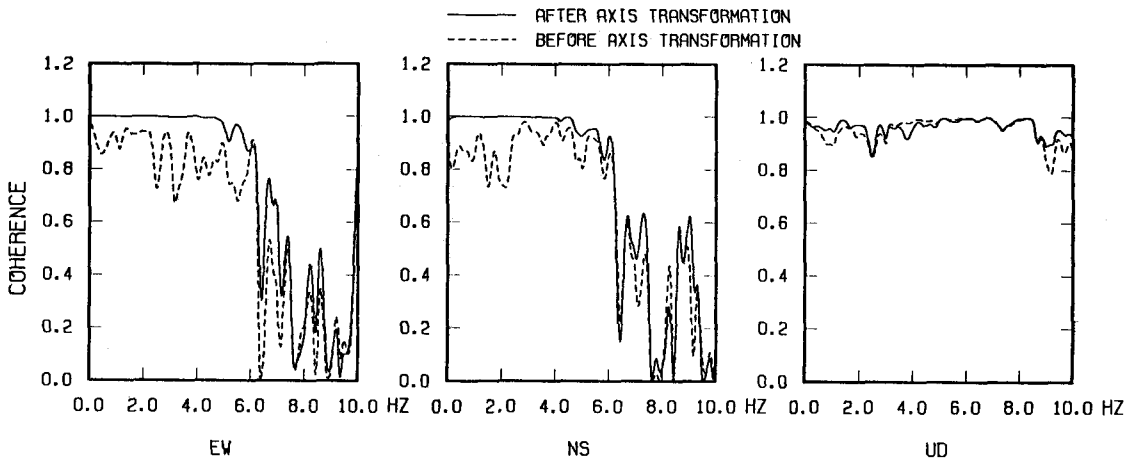


図-4 方位補正前と補正後のコヒーレンスの比較 (GL-1/GL-5)

えず、今後の検討課題として残されている。またこのようにして埋設方位誤差を補正することにより、相関性の良い波形が得られることが確認され、地震動特性評価の精度向上が期待されよう。

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。
- 2) J. Penzien and M. Watabe, "Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions, Earthquake eng. struct. dyn. 3, 365-373, 1975.
- 3) T. Kubo and J. Penzien, "Analysis of three-dimensional strong ground motions along principal axes, San Fernando earthquake," Earthquake eng. struct. dyn. 7, 265-278, 1979.
- 4) T. Kubo and J. Penzien, "Simulation of three-dimensional strong ground motions along principal axes, San Fernando earthquake," Earthquake eng. struct. dyn. 7, 279-294, 1979.
- 5) 星谷勝・石橋裕：地震動ベクトルの主軸と波形特性、土木学会論文報告集、第268号、1977。