

アレー観測における地震計設置誤差の評価

山崎文雄*・鹿林**・片山恒雄***

地震動のアレー観測において、地震計の設置方位にかなりの誤差が含まれることがあることを指摘した。また地震記録より三次元空間での3つの回転誤差角を推定する手法として、最大相互相関法と最大コヒーレンス法を提案した。千葉アレー記録を用いた推定結果は両法でよく近似しており、地震によるばらつきも小さく、一部行った目視による確認とも一致していた。また他の2つのアレーについても設置誤差が検出された。

Keywords : seismometer, orientation error, array observation, cross correlation function, coherence function

1. はじめに

地震動の観測は、いろいろな地点における地震動の諸特性を調べることや、耐震設計・耐震解析に用いるための地震動を得ることなどを目的として、古くから行われてきているが、その多くは地表の1点における観測であった。しかし地盤による地震動の違いが次第に明らかになるにつれ、軟弱な埋立地盤や沖積地盤に構造物を建設することの多いわが国では、表層地盤の増幅特性が大きな関心事となってきている。また近年建設されるようになった大規模建築や長大橋、さらに沈埋トンネルや埋設管などの地中構造物では、構造物の各部に入力する地震動に波形の違いや位相差を考慮する必要も生ずるようになってきた。さらに石油タンクや超高層ビルなどの周期の長い構造物に対しては、地震動のやや長周期成分が問題となり、表面波などの特性の解明が急務となってきた。

このような背景から、地震動を構成する各種の実体波・表面波の波群の識別・分離や、これらの波の増幅・伝播特性や空間変動特性などを調べるために、計画的に配列された多数の地震計による多点同時観測、すなわちアレー観測^{1)~4)}が、近年各地で盛んに行われるようになった。アレー観測における地震計の典型的な配置としては、地表面に二次元的に展開される平面アレー、地中のいろいろな深さに埋設される鉛直アレー、さらにこれらの2つを組み合わせた三次元アレーがある。

このようなアレー観測では、数多く行われてきている従来の1地点での観測では余り注意を払われなかったことが、大きな問題になることがある。その1つとして、

地震計がはたして所定の方位に正しく設置されているかどうかという問題がある。アレー観測では、複数の地震計による記録を比較することによって地震動の諸特性を論ずるため、設置方位に誤差があると正確な議論が行えない。地震計は通常、十分な注意を払って設置されているはずであるが、特に地震計を地中に埋設する場合など、目視が困難なこともあって設置誤差が生じやすい。いくつかの近接する地震計の記録を比較すると、どうも地震計の設置方位に疑問が生ずる場合がしばしば見受けられる。

アレー観測における地震計の設置方位誤差を論じたものとしては、佐藤・片山⁵⁾による研究を初めとして、わが国におけるいくつかの研究^{6),7)}や、最近ではアメリカのターキーフラット (Turkey Flat) でのアレー観測⁸⁾に関するものなどが存在する。これらはいずれも地震計の水平面内での設置誤差、すなわち二次元的な回転のみを考えており、水平2成分記録の軌跡を描いて比較したり、時刻歴波形の2成分同士の相互相関を検討したりしている。

しかし地震動には上下動を含む3成分が存在するので、より一般的に、鉛直軸に対する地震計の設置誤差も考えた三次元空間での補正⁹⁾について論ずる必要がある。本論文では、千葉アレー地震動記録のデータベース化¹⁰⁾に際して行った三次元空間での一般的な設置誤差の推定方法と、それによる補正結果について述べる。また別の2つのアレーについても、地震動記録より方位誤差が推定されることを示し、地震観測記録の評価におけるこの問題の重要性を指摘する。

2. 地震計の設置誤差

地震計にはさまざまな形式があるが、ここでは地中埋設用によく用いられる3成分型のものを考えてみよう。その多くは、直交する水平2方向と上下方向の3成分の

* 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所
(〒106 港区六本木 7-22-1)

** 学生会員 工修 東京大学大学院

*** 正会員 Ph. D. 東京大学教授 生産技術研究所

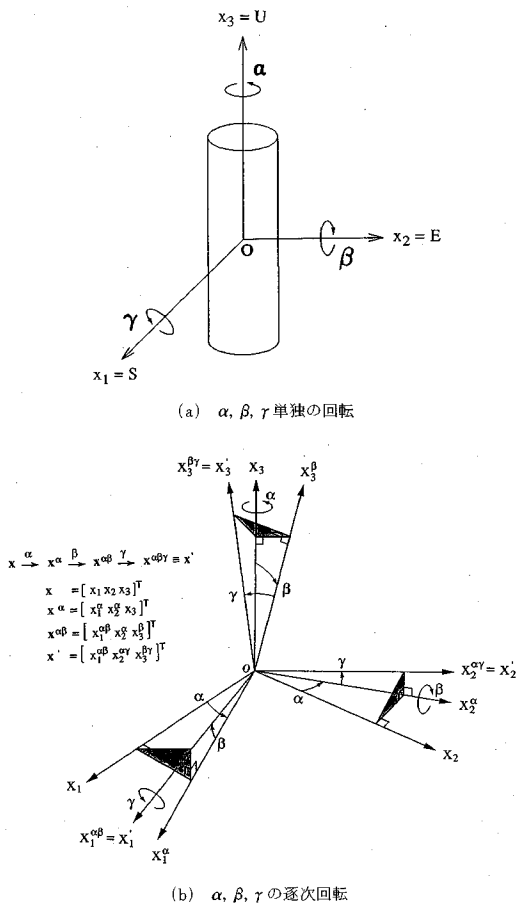


図-1 三次元空間における座標変換

センサーが、埋設用ケースに収納されたものである。ここで地震計のセンサー同士の直交性は、製作時に保証されているものと考えことにする。設置にあたって地震計は、前もって掘削したボーリング孔中に地上より降ろしていき、所定の深度に達したところでモルタルなどで固定し埋め戻すことが多い。地震計の形状や設置方法にもよるが、多くの場合、かなりの注意を払ってもその方位は、拘束が小さい鉛直軸回りにねじれやすいと考えられる。またボーリング孔壁による拘束はあるものの、地震計は鉛直軸に対し傾いて設置される可能性もある。

このように3成分型地震計の場合、設置誤差の可能性として、図-1(a)に示す3つの角度 α, β, γ がある。右手系の三次元直交座標系を考えると、 α は鉛直軸($x_3 = U$)軸回り、 β と γ は2つの水平面内の座標軸(たとえば $x_2 = E$ と $x_1 = S$)回りの回転角である。これは α, β, γ のいずれかが単独で生じた場合であるが、これらが複数同時に生じた場合、回転の基準軸がずれてきてやや複雑になる。図-1(b)は、 α, β, γ の順に、逐次新たな座標軸回りで回転していくような座標変換を示して

いる。地震動のベクトル過程 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$ もこの座標回転によって、座標変換マトリックス T を介し、新たなベクトル過程 $x'(t) = [x'_1(t) \ x'_2(t) \ x'_3(t)]^T$ へと変換される。

$$x'(t) = Tx(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで T の各要素は、各座標変換マトリックスの積 $T = T_\gamma T_\beta T_\alpha$ として求められる。

$$t_{11} = \cos \alpha \cdot \cos \beta, \quad t_{12} = \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad t_{13} = \sin \alpha$$

$$t_{21} = -\sin \alpha \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma,$$

$$t_{22} = \cos \alpha \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma, \quad t_{23} = \cos \beta \cdot \sin \gamma,$$

$$t_{31} = \sin \alpha \cdot \sin \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma,$$

$$t_{32} = -\cos \alpha \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma,$$

$$t_{33} = \cos \beta \cdot \cos \gamma.$$

いまある地点 o における地震計の設置方位は確認されているとする。設置誤差の予想される地点 i における基準点 o に対する相対的な誤差角度の組 $\alpha_{io}, \beta_{io}, \gamma_{io}$ は、これらの角度だけ補正することにより地震動ベクトル $x_o(t)$ と $x_i(t)$ が、全体的にみて最も近似するようになる角度とみなしてもよからう。通常ほぼ成層とみなせるような地盤条件では、地震動がねじれ振動しながら伝播するとは考えにくく、また構造物やその周辺地盤などを除くと、ロッキング振動も起こりにくいので、この仮定は納得しやすいものと思う。しかしSnellの法則に基づく地震波面の地中での屈折を考えた場合、2地点 o と i の深度が異なると、推定される β_{io} と γ_{io} は埋設誤差がなくとも零にはならないことが予想される。しかし、工学的な地震観測が行われるような表層地盤については、これらの値は小さく、さらに複数の震央方向の異なる地震についてのこれらを平均することにより、ほとんど無視できる値になると考えられる。

2地点の地震波形(3成分)の近似を判断する方法としては、確率過程論に基づいて各成分同士の相関を調べることがまず考えられる。また各地点ごとに地震動ベクトル過程の主軸を求め、それらを比較することも可能であろう。すなわち以下の3通りをここでは考えてみた。

- ① 時間領域での2組の波形間の相互相関関数を最大化する方法
- ② 振動数領域で2組の波形間のコヒーレンス関数を最大化する方法
- ③ 2地点における地震動の三次元主軸の方向を一致させる方法

これらの方法を用いる場合、地震波形は加速度、速度、変位のいずれの次元でもよいが、直接測定したものを用いるのが自然であろう。またいずれの方法も、設置誤差を推定するにあたっては、波形同士の相関の高くなるような時間帯域と振動数帯域を選択することが、精度上望ましい。三次元空間での補正を考えると、水平動2成分

と上下動とのいずれもが、ある程度の大きさの振動エネルギーを有している必要がある。したがって例題では、P波とS波の主要動部を含むような時間帯域を用いている。また振動数領域で2地点の波形の相関を考えると、一般に低振動数成分は相関が高く、高振動数成分は相関が低いことが指摘されている^{10),11)}。観測に用いている地震計の低振動数域での測定精度を考慮したうえで、コヒーレンス関数などをみながら、適当な振動数帯域を選択する必要がある。

なおこれらの地震計設置誤差の推定方法は、各地点での帯域フィルター波が、基準点のそれと相関が高いであろうという想定のもとに成り立っているので、基準点からの距離が遠くなると推定精度が低下する傾向にある。したがって、基準点からある程度の距離以内の点でしか、設置誤差の推定は行えないことに注意されたい。また地盤不整形性の影響が大きと思われる地点など、基準点との震動特性の違いが予想される箇所に対しても適用できない。これらの手法の詳細について、以下に述べる。

3. 設置誤差の推定方法

(1) 最大相互相関法

地震計の設置方位が確かめられている基準点での地震波形ベクトルを $x(t)$ 、また設置方位が不確かな地点での波形ベクトルを $y(t)$ とする。これらはいずれも3成分を有する時間の関数であり、相関の強くなるような時間および振動数帯域を取り出したフィルター波であるとする。ここで $y(t)$ を α, β, γ だけこの順に回転して得られる波形ベクトル $y'(t)$ は、座標変換マトリックスを T として次式で表される。

$$y'(t) = Ty(t) \dots\dots\dots (2)$$

$x(t)$ と $y'(t)$ の各成分同士の相互相関関数の和 S は、 α, β, γ と2地点の波形間の時間遅れ τ の関数として表される。

$$S(\alpha, \beta, \gamma, \tau) = \sum_{i=1}^3 R_{x_i y'_i}(\tau) \dots\dots\dots (3)$$

式(2)を式(3)に代入し展開すると次式が得られる。

$$S(\alpha, \beta, \gamma, \tau) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 t_{ij} R_{x_i y_j}(\tau) \dots\dots\dots (4)$$

ここに t_{ij} は、 T の各要素で α, β, γ の関数である。ここでエルゴード性を仮定し、 n を時間刻みの個数とすると、相互相関関数は次の時間平均で近似される。

$$R_{x_i y_j}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(t_k) y_j(t_k + \tau) - \bar{x}_i \bar{y}_j \dots\dots\dots (5)$$

ここに

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(t_k), \quad \bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_j(t_k + \tau) \dots\dots\dots (6)$$

x と y' の相互相関を最大化する問題は、 α, β, γ および τ をパラメーターとして S の最大化を求める問題と

考えることができる。ここで改訂準ニュートン法¹²⁾などの方法により、仮定した τ に対して S が最大となるときの α, β, γ を求める。この τ の初期値としては、 x と y の各成分同士の3個の相互相関係数が最大となる時間遅れの平均値を用いている。後の例題で示すように、これらの相互相関係数が最大となるような τ の値は、 α, β, γ だけ座標回転することにより変化することがある。したがってこの計算ステップを2~3回繰り返して、式(4)を最大とするそれらの組合せを見つける必要がある。

手法の検証として、同じ3成分の地震波を2組用意し、その片方の組を適当に α, β, γ だけ座標回転し、この方法を適用してみた。その結果、これらの角度が正確に推定され、2点での記録がノイズ成分を含まない場合における本手本の精度が検証された。なおこの方法では、相互相関の正の最大値を求めているので、比較する2地点間の伝達関数の1次ピークより小さい振動数帯域、すなわち振動モード形が2点間で節をもたないような範囲で検討する必要がある。

(2) 最大コヒーレンス法

(1)の方法と同様に、基準点での波形ベクトル $x(t)$ と設置方位が不確かな地点での波形ベクトル $y(t)$ を考える。ここでこれらは、相関が強くなるように振動エネルギーの大きな時間帯域を取り出したものとする。 $y(t)$ を α, β, γ だけこの順に回転して得られる波形ベクトル過程 $y'(t)$ と $x(t)$ との振動数軸上での相関係数、すなわちコヒーレンス関数は、各 i 成分同士について次式で表される。

$$\text{coh}_{x_i y'_i}^2(f) = \frac{|S_{x_i y'_i}(f)|^2}{S_{x_i x_i}(f) S_{y'_i y'_i}(f)} \dots\dots\dots (7)$$

ここに分母は $x_i(t)$ と $y'_i(t)$ のおのおののパワースペクトル、分子はそれらの相互スペクトルの絶対値の二乗であり、1組の波形からこれらを近似的に求めるには、フーリエ変換を行ったあと、スペクトル・ウィンドウを用いた平滑化が必要である。

このコヒーレンス関数を、波形同士の相関の強いと考えられる振動数帯域 ($f=f_1 \sim f_2$) で積分し、3成分についての和をとる。

$$C(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{i=1}^3 \int_{f_1}^{f_2} \text{coh}_{x_i y'_i}^2(f) df \\ = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^m \text{coh}_{x_i y'_i}^2(f_k) \Delta f \dots\dots\dots (8)$$

ここに m は $f_1 \sim f_2$ における振動数刻み個数、 Δf はフーリエ変換における振動数刻み、すなわち $\Delta f = (f_2 - f_1) / m$ である。式(8)の C を最大とするような α, β, γ の組合せが、設置方位の誤差であるものとする。コヒーレンス関数を求める際に平滑化を行っているため、式(8)を解析的に評価することは困難である。したがって数値的に、 C を最大とするような α, β, γ の組合せを捜すこ

とにする。

この組合せを単純な掛け合わせで考えると、膨大な計算量となる。したがってまず β と γ を 0 と置き、 α を適当な範囲でたとえば 0.5 度刻みに変化させて、最大となる S を探す。この範囲で極大値がないようなら、さらに探索の範囲を広げ、 α の 1 次推定値を求める。次に α をこの値に固定して、 β と γ を適当な幅で変化させ S の極大となる組合せを探す。この β と γ の探索範囲は、 α と比べて小さな範囲で通常は十分であろう。このようにして求められた α, β, γ の 1 次推定値の近傍で、多少幅をもたせて α, β, γ を変化させ、 S が極大となる組合せを探す。このような繰り返し計算により、効率的に設置誤差を推定することができる。

なおコヒーレンスは常に正值であることから、この方法で求まる α, β, γ は -90° から 90° の範囲にあり、方位がこの範囲以上、たとえば 180° 狂っているような場合には、位相差か波形による確認が必要となることに注意されたい。また 2 地点間のコヒーレンス関数は、伝達関数のピークとなる点の近傍で非常に低下するので¹³⁾、振動数帯域としては最大相互相関法と同様に、伝達関数が 1 次ピークを与える振動数以下の範囲を選ぶことが望ましい。なお平滑化で求めたコヒーレンス関数の値は、波形間に位相遅れがあると低下するとの指摘¹⁴⁾があるが、例題で用いる程度の規模のアレーでは地点間距離が小さいため（最大 300 m 程度）、実体波に対しては位相遅れがごくわずかで、ここでの結果には影響しないものと考えられる。

(3) 地震動主軸を用いる方法⁹⁾

この方法は、地震動の振動エネルギーの卓越する方向が、そう広くない範囲の地域ではほぼ一致することを仮定するものである。まず検討対象となる地域全体において相関性が高くなるような、顕著な位相が表れている波形を、時間帯域ならびに振動数帯域でのフィルター波として抽出する必要がある。地震動の三次元主軸^{15)~17)}は、各地点における地震動 3 成分の時間差 0 の共分散マトリックス R の固有値問題を解くことにより求められる。この R (3×3) の各 ij 要素は、エルゴード性を仮定することによって、式 (5) と同様の時間平均で推定できる。

$$R_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(t_k) x_j(t_k) - \bar{x}_i \bar{x}_j \dots\dots\dots (9)$$

ここに右辺の第 2 項は、式 (6) より求めるか、または時間帯域を十分長くとることにより 0 とみなす。共分散マトリックス R を対角マトリックス A に変換するような固有モード・マトリックス $\Phi = [\phi_1 \phi_2 \phi_3]^T$ は、次の固有方程式の解として求まる。

$$R\Phi = \Phi A \dots\dots\dots (10)$$

A の対角成分 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ はそれぞれ最大、中間および最小主軸に関する固有値である。またここで Φ は、そ

の対角成分がすべて正となるように、各固有ベクトル ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 の符号を決める。最大主軸の向きは、固有ベクトル $\phi_1 = [\phi_{11} \phi_{21} \phi_{31}]^T$ で表され、図-1(b) と同様に x_1 軸を α と β だけ順に座標回転することで定義できる。また右手系を考えると、中間および最小主軸の向きは、 ϕ_1 軸回りの回転角 γ で規定でき、これらは以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1}(\phi_{21}/\phi_{11}) \\ \beta &= \tan^{-1}(\phi_{31}/\sqrt{\phi_{11}^2 + \phi_{21}^2}) \\ \gamma &= \tan^{-1}(\phi_{32}/\sqrt{\phi_{12}^2 + \phi_{22}^2}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

各地点における地震動主軸の向きは、おのおの 3 つの角度 α, β, γ で表される。設置誤差の予想される地点 i における基準点 o に対する相対的な誤差角度の組 $\alpha_{io}, \beta_{io}, \gamma_{io}$ は、これら 2 地点における角度差として、次式で求められる。

$$\alpha_{io} = \alpha_i - \alpha_o; \quad \beta_{io} = \beta_i - \beta_o; \quad \gamma_{io} = \gamma_i - \gamma_o \dots\dots\dots (12)$$

このようにして推定された設置誤差は、モード形の正負に意味がないことより、最大コヒーレンス法の場合と同様に -90° から 90° の範囲にあり、方位がこの範囲以上に狂っているような場合には、位相差か波形による確認が必要となる。

この方法による千葉アレーの地震計の埋設誤差推定結果については、すでに報告⁹⁾したのでここでは省略するが、その精度は、(1) や (2) の方法に比べるとやや劣るようである。 α については安定した解が得られたが、 β と γ については信頼度の高い解は得られなかった。これはこの方法が、波形自体の相関ではなく、振動エネルギーの卓越方向の相関という、空間的に比較的ばらつきやすいものを用いていることによるものと思われる。また水平 2 方向の振動エネルギーは近似した値となることもあり、そのような場合には、最大主軸と中間主軸の方向は不安定になる。したがってここでは、この方法による例題は示さないことにする。

4. 千葉アレーにおける地震計設置誤差の推定

東京大学生産技術研究所では、1982 年より千葉実験所構内において三次元高密度アレーによる地震動観測^{10), 18)~20)}を実施している。図-2 に示すように、水平距離が 5 m から約 300 m の計 15 本のボーリング孔に、合計 44 個の加速度計が埋設されている。埋設深さは、地表近くの -1 m に 15 個、 -5 m に 5 個、 -10 m に 11 個、 -20 m に 11 個、 -40 m に 2 個である。またこのほかに、記録装置の置かれている観測棟の 1 階にも、1 個が設置されている。これらの地震計は、3 成分のせん断型圧電素子センサーが、円筒形鉄製ケース ($\phi 65 \times 335$ mm) に収納された形式のものである。地震計が従来のものに比べて小口径・軽量であることから、設置時

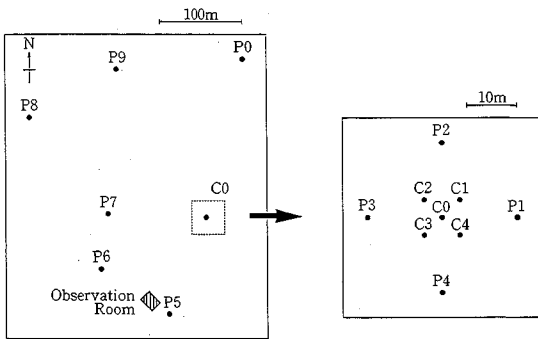


図-2 千葉アレー観測におけるボーリング孔配置

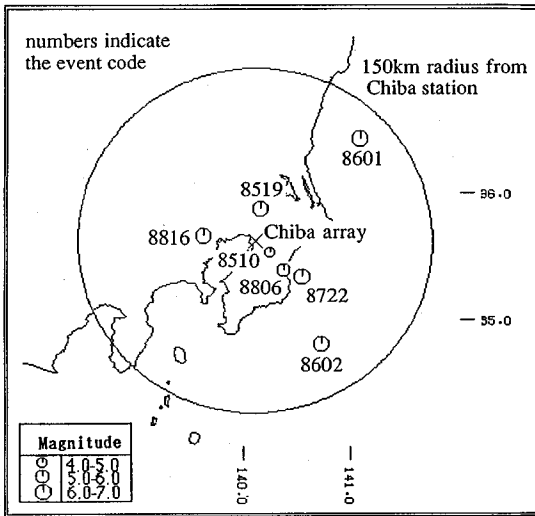


図-3 設置誤差の推定に用いる7地震の震央位置

に鉛直軸回りにねじれやすい。実際に地表近くの11個の地震計(C0-C4, P1-P6)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り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⁵⁾、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, -40 m)については、再設置が困難であるため、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⁵⁾、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方向の記録との時刻歴での相関を調べ、相関係数が最大となる回転角度を不確かな地震計の鉛直軸回りのねじれ角とみなすものである。この検討を行った後、数多くの地震記録が得られており、記録のデータベース化にあたり地震計の立体的なねじれ角(β, γ)も把握しておきたいという理由から、新たに三次元的な方位補正に関する検討を行うことにした。

これまでに得られた地震記録の中から主要な7つを選

表-1 設置誤差の推定に用いる7地震の諸元

No.	IEQK	JMA M	d (km)	Δ (km)	Azimuth (deg.)	Max. Acce. at C001 (cm/s/s)		
						EW	NS	UD
1	8510	4.8	64	16	126.1	27.4	29.6	12.6
2	8519	6.1	78	28	9.0	59.2	82.2	23.5
3	8601	6.1	44	125	44.5	15.4	14.3	5.2
4	8602	6.5	73	105	147.7	54.0	40.7	21.5
5	8722	6.7	58	45	128.1	213.6	327.1	124.8
6	8806	5.2	48	38	133.3	54.9	97.8	19.8
7	8816	6.0	96	42	276.3	48.4	59.8	15.2

M=magnitude; d=focal depth; Δ =epicentral distance. Azimuth: clockwise from north.

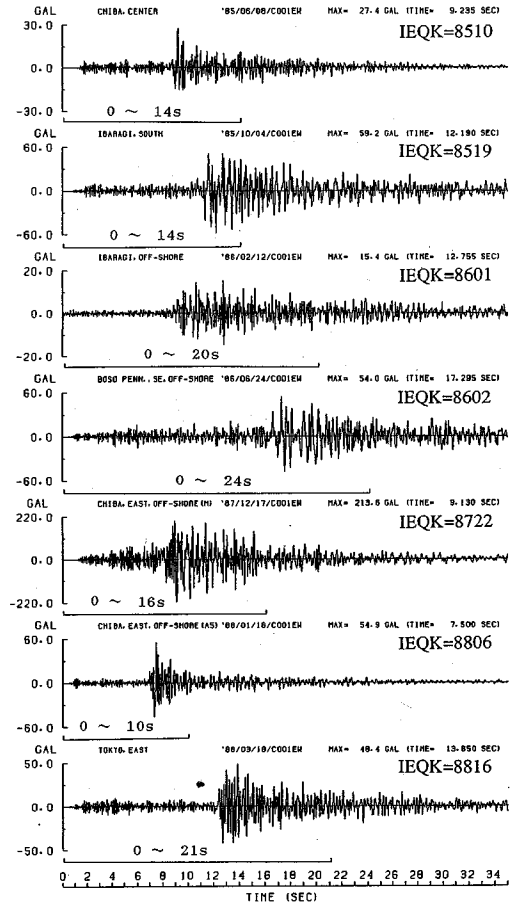


図-4 設置誤差の推定に用いる地震波と利用する時間帯域(C001, EW成分)

び、それらを使って地震計の埋設方位誤差を前述の最大相互相関法および最大コヒーレンス法により推定する。基準点は、再設置を行ったC001(C0孔のGL-1m)とする。図-3はこの7地震の震央位置を示しており、図中の数字は千葉アレーにおいて観測された地震番号(IEQK)である。また表-1にこれらの地震の諸元を、図-4にC001におけるこれらのEW成分波形と推定に用いた時間帯域を示す。振動数帯域としては、 $f=0.1 \sim 1.5$ Hzを用いた。振動数帯域の下限値0.1 Hzは圧電型加速度計の低振動数での精度²¹⁾より決定し、上限値1.5 Hzは一番深く埋設された地震計(GL-40 m)と

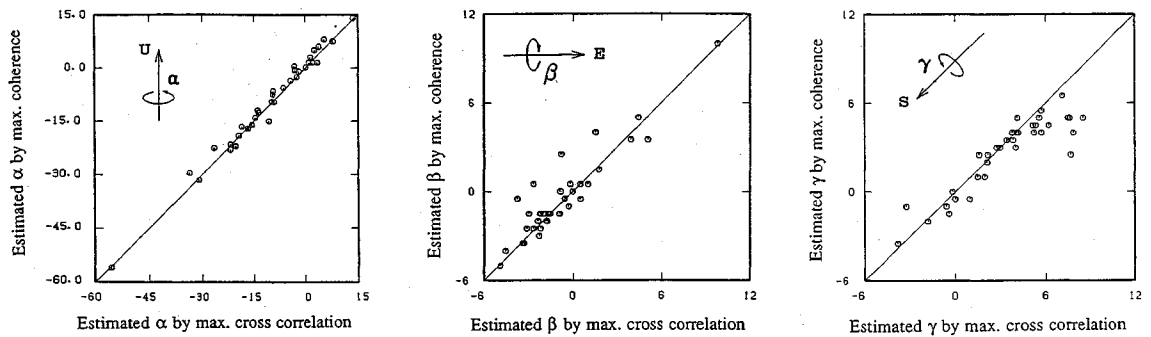


図-5 最大相互相関法と最大コヒーレンス法による44地点の推定設置誤差の比較 (IEQK=8722)

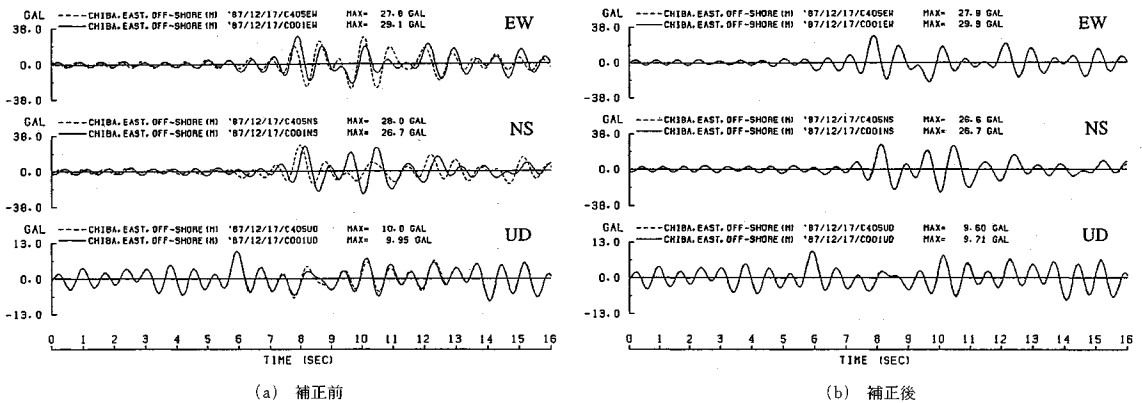


図-6 設置誤差の補正前・後の2地点におけるフィルター波の比較 (IEQK=8722, C001 vs C405, $f=0.1\sim 1.5$ Hz)

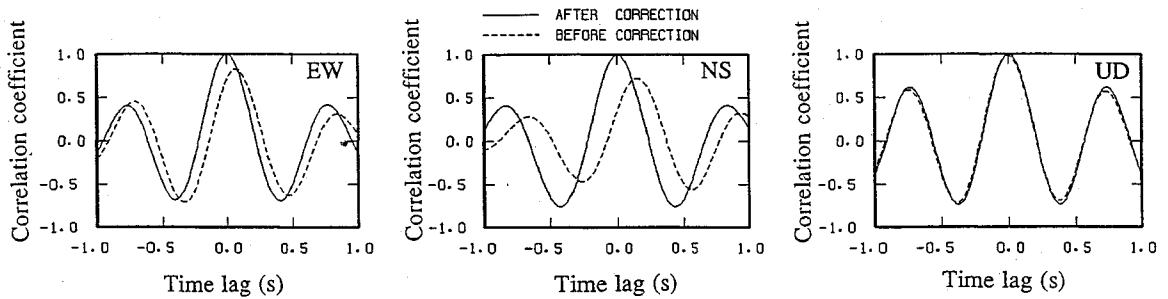


図-7 設置誤差の補正前・後のフィルター波の相互相関係数の比較 (IEQK=8722, C001 vs C405, $f=0.1\sim 1.5$ Hz)

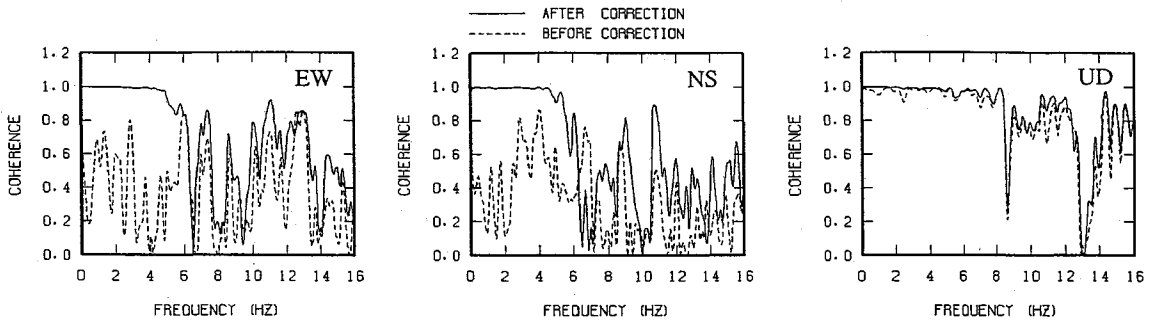
基準地震計との伝達関数のピークが約2.3 Hzにあることから²²⁾、それ以下の値となるように決定した。

千葉県東方沖地震(1987年12月17日, IEQK=8722)に対する2つの方法による3つの誤差角度の推定結果を図-5に示すが、 β と γ に多少のばらつきがみられるものの、2つの推定結果はよく一致している。鉛直軸回りの回転角としては最大で $\alpha=-55.6^\circ$ 、鉛直軸からの傾きとしては最大で $\beta=9.4^\circ$ の設置誤差が検出された。

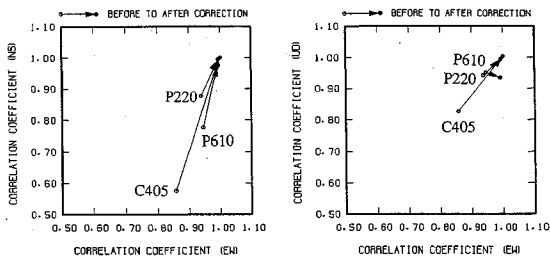
C001より水平方向に5m、深さ方向に4m離れたC405地点において、特に大きな誤差($\alpha=-55.6^\circ$, $\beta=2.8^\circ$, $\gamma=-5.0^\circ$)が検出されている。そこでこれを例

として設置誤差の影響を調べてみる。C405地点でのフィルター波形を、基準点C001のものと比較して図-6に示す。推定された設置誤差を座標回転により補正すると、図-6(b)に示すように、3成分ともにC001とほぼ同一のフィルター波形が得られることがわかる。この場合、補正によって鉛直成分におけるわずかな波形の違いもなくなることが観察され、 β と γ の設置誤差も影響していることが確認された。

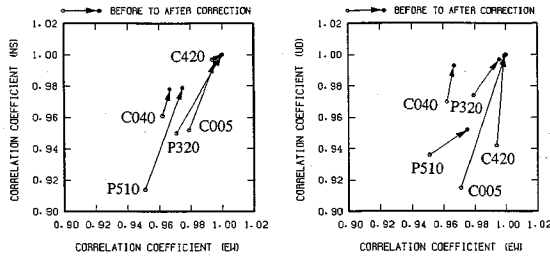
また図-7は補正前と後の各成分のフィルター波同士の相互相関係数を示しており、補正後はそれがほぼ1.0に上昇していること、さらに相互相関係数が最大となる



図—8 設置誤差の補正前・後のコヒーレンス関数の比較 (IEQK=8722, C001 vs C405)

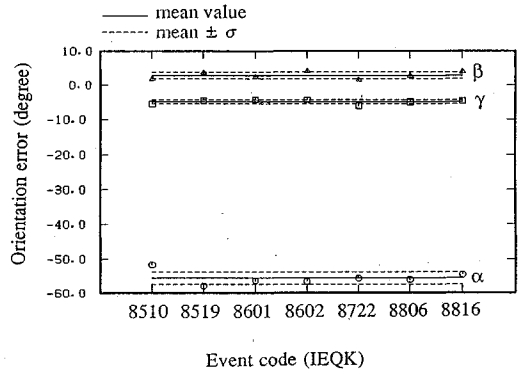


(a) 設置誤差の大きい3地点



(b) 設置誤差のやや大きい5地点

図—9 設置誤差の補正による相互相関係数の変化 (IEQK=8722)



図—10 7地震による推定設置誤差の平均値と標準偏差

表—2 推定設置誤差と実測値の比較

seismo- meter	α (degree)		β (degree)		γ (degree)	
	Meas.	Est.	Meas.	Est.	Meas.	Est.
C001*	0	0	0	0	0	-3.0
C101	-13	-15.4	-2	-4.6	0	1.7
C201	-12	-10.6	0	0.2	-2	-3.2
C301*	0	-1.0	0	1.2	0	-0.2
C401*	0	-1.7	0	-2.2	0	0.2
P101	7	8.2	0	-0.5	0	-1.1
P201	-7	-8.9	0	0.0	0	2.1
P301	13	13.9	0	-2.5	0	-3.3
P401	-20	-20.6	-3	-1.3	0	1.1
P501*	0	2.0	0	2.4	0	2.8
P601*	0	-2.6	0	-1.5	0	-0.8

* : Re-orientated; Meas.=measured; Est.=estimated

時間遅れが、補正の前後でやや異なることが注目される。図—8は、補正前と後の各成分同士のコヒーレンス関数 $\text{coh}^2(f)$ を、バンド幅0.4 HzのParzenウィンドウを用いて計算し比較したものである。補正により波形間の相関が、3成分ともに、特に低振動数領域で高まっていることが読み取れる。その他の地点に対しても同様の検討を行った結果を、補正による相互相関係数の変化として図—9に示すが、いずれの地点でも相互相関係数が増加していることが確認できる。

さらに他の6地震についても、最大相互相関法により誤差角度を推定したところ、よく近似した結果が得られた。図—10は、地震ごとの設置誤差の推定範囲をC405地点について示したもので、地震によるばらつきが小さいことがわかる。したがって、これら7地震の結果の平均により、地震動データベース構築の際の設置誤差補正を行うことにした。表—2に、これらの推定値と以

前に掘り出して確認した地表近くの10地点における設置誤差の値⁵⁾と比較するが、それらはよく一致している。最大で2~3°の差については、方位磁石と下げ振りによる測定精度の方に問題があるように思える。

また建物の軸線に合わせて観測棟1階に設置した地震計の方位についても推定したところ、測量による建物方位とよく一致していた。なお設置誤差は、C001を基準にしているの、C001では3つの誤差角度は0と仮定している。ここで、立体ねじれ角 γ については、C001と建物を除く43地点の平均値が約3°であり、また建物内の地震計についての推定値も約3°であった。ここで β や γ は、平均値0でランダムに発生する可能性が高く、また建物内の地震計は目視もできるので誤差は小さいと考えられる。したがって逆に、基準点C001に $\gamma=-3^\circ$

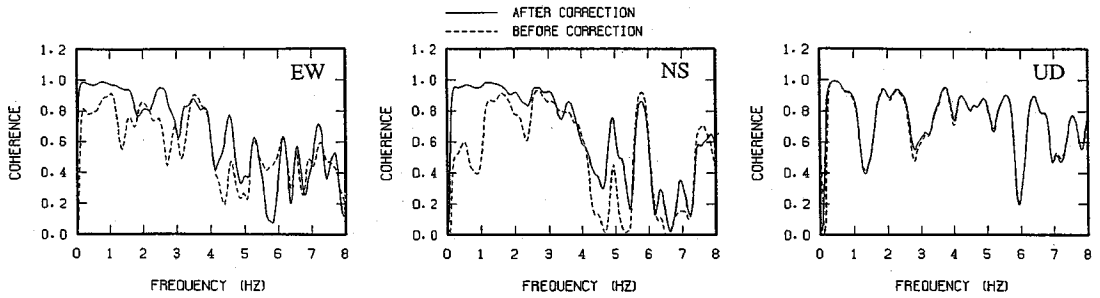


図-11 Lアレーにおける設置誤差の補正前・後のコヒーレンス関数の比較

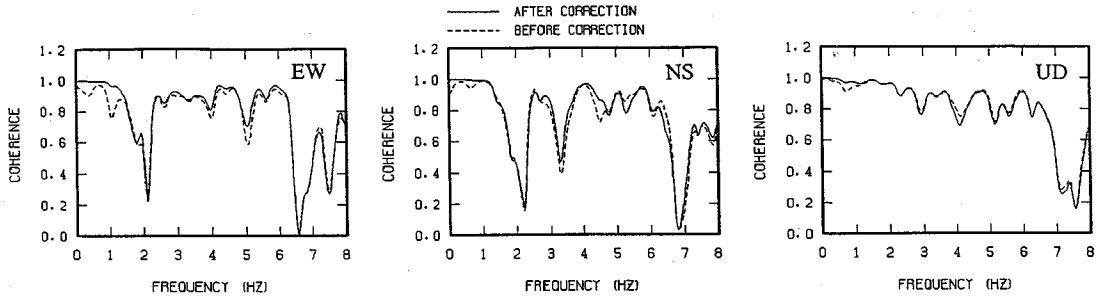


図-12 Yアレーにおける設置誤差の補正前・後のコヒーレンス関数の比較

の誤差があると推定し、最終的な補正角を決定した。この結果は、たとえ十分気をつけて再設置を行っても、通常行われている程度の方位決めの方法では、数度の誤差は起こり得ることを示唆しているといえよう。このような詳細な設置誤差の補正によって、記録の信頼性が向上し、地震動データベースとしての価値が一層高まったものと考えている。

5. Lアレーにおける地震計設置誤差の推定

Lアレーは沖積平野に設置された三次元アレーであり、地盤と構造物の動的相互作用を観測することを主たる目的としている。構造物モデルを中心として地表に展開された3本の測線に沿って、地表の15地点に加速度計が設置されている。またこれらのうち2地点では、地中にも鉛直アレーが展開されている。このアレーで得られた地震動記録の空間変動特性を検討してみると、奇妙なことに気がついた。構造物モデルからおのおの50m近く離れて自由地盤と考えられる3地点の地表記録を比較すると、そのうちの2地点での記録間のコヒーレンスは高いのに対し、他の1地点の記録を含むコヒーレンスはこれよりかなり低い。相互に約90mしか離れていない2地点の記録同士で、なぜこのような差異が生ずるのか疑問に思いつつも、地盤特性が異なるせいであろうとその時点では考えていた。

しかしその後、設置誤差の検討を行ってみたところ、問題の1地点において鉛直軸回り (α) に31度の設置

誤差が検出された。図-11は補正前と後のこの地点と基準点とのコヒーレンス関数であり、補正によって低振動数におけるコヒーレンスの値が、大きく増加することがわかった。2つの地震についてはほぼ同様の結果が得られたため、アレー管理者に連絡し調査してもらったところ、実際に約30度誤って設置されていることが発見された。このアレーの問題の地点は、地表であったため確認が容易であったが、このように地表に置かれた地震計でさえ、方位を誤って設置されることがあることは、注目すべきであろう。

6. Yアレーにおける地震計設置誤差の推定

Yアレーは、東京湾臨海部の埋立地に設置された鉛直アレーであり、地下-1m、-18m、-90mに3成分型加速度計が埋設されている。また間隙水圧の観測も地表近くの軟弱層で同時に行われている。このアレーで得られた地震記録に対し、特に疑問があったわけではないが、地震計の設置方位誤差の例題として、アレー所有者に依頼し、記録を使用させて頂いた。このアレーで得られた3個の地震記録を用いて、-1mの地震計を基準に、最大相互相関法により他の2つの設置誤差を検討した。推定に用いる振動数帯域は、コヒーレンス関数を計算してみようとして、 $f=0.1\sim 0.6$ Hzとした。

検討の結果、-18mと-90mの地点ともに、-1mの地点に対する設置誤差が検出された。図-12は、補正前と後の-18mの地点と基準点(-1m)とのコヒー

レンス関数であり、補正により低振動数におけるコヒーレンスが、3成分ともに増加している。-18 m 地点での推定設置誤差は、-1 m 地点に対して $\alpha = -11.3^\circ$, $\beta = -2.2^\circ$, $\gamma = 0.8^\circ$, また -90 m 地点では同じく $\alpha = -10.9^\circ$, $\beta = -8.6^\circ$, $\gamma = 4.9^\circ$ であった。これらの推定値は、3地震についての平均値であるが、地震によるばらつきは小さく、信頼できるものと思う。

このように今回検討した3つのアレーすべてについて、設置誤差が検出された。したがってアレー記録の評価に際しては、まずこの問題を吟味すべきではなかろうか。

7. 結 論

地震動のアレー観測において、特に地中地震計の方位にかなりの設置誤差が含まれる可能性があることを指摘した。これまでにこの問題については、得られた地震記録より水平面内でのねじれ角を推定する方法が提案されているが、本論文ではさらに一般的に、三次元空間内での3つの回転角誤差を推定する方法を提案した。地震計の設置方位が確かな地点を基準とし、設置方位が不確かな地点での3成分波形と基準点の3成分波形の相関が最も高くなるように、3つの回転角を求めるのである。相関の求め方としては、時間領域での相互相関関数を最大化する方法、振動数領域でのコヒーレンス関数を最大化する方法、さらには地震動の三次元主軸の方向を一致させる方法などが考えられる。これらはいずれも、波形同士の相関が強くなるような時間帯域ならびに振動数帯域について適用する必要があり、比較する2地点間の距離があまり遠くないという制約がある。

例題として、東京大学生産技術研究所の千葉実験所に設置された高密度三次元アレーにおける地震計設置誤差を推定したところ、最大相互相関法と最大コヒーレンス法によって、よく近似した結果が得られ、またそれらは地震によるばらつきも小さかった。推定された誤差角は、過去に行った目視の結果ともよく一致しており、これらの手法は十分信頼できるものと考えられる。また、水平面内の回転角として最大約56度、鉛直軸からの傾きとして最大約9度の設置誤差が検出され、それらがアレー地震動を評価するうえで無視できないことを指摘した。

さらに別の例題として、沖積地盤における三次元アレーと埋立地における鉛直アレーをとり上げて検討したところ、いずれもかなりの設置誤差があることが明らかになった。今回の例題は、あくまでもアレー所有者の好意で使用させていただいたが、検討結果はその他の多くのアレー観測においても同様の設置誤差が含まれる可能性があることを示唆している。しかしたとえ設置誤差があっても、今回提案するような方法で補正すれば、地震記録としての価値が損なわれることは決してない。ア

レー地震動記録を用いた詳細な解析を行う前に、まず地震計の設置誤差を検討してみることも大切であろう。

参 考 文 献

- 1) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology, Vol. II, W.H. Freeman and Co., 1980.
- 2) 日本建築学会：地震動と地盤—地盤振動シンポジウム10年の歩み—, 1983.
- 3) 表俊一郎：強震アレー観測，原子炉施設の耐震設計，産業技術出版，1987.
- 4) Iwan, W.D.: Strong-Motion Earthquake Measurements: Past Accomplishments and Future Directions, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp.97-104, 1988.
- 5) 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講演概要，土木学会，pp.115-118, 1983.
- 6) 田蔵 隆・佐藤正義・清水勝美：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，土木学会第4回年次学術講演会，第I部門，pp.761-762, 1986.
- 7) 菅原良次ほか：やや長周期地震動を用いた地中埋設強震計の方位推定，地震学会講演予稿集，秋期大会，pp.7, 1990.
- 8) Real, C.R. and Cramer, C.H.: Turkey Flat, USA Site Effects Test Area: "Blind" Test of Weak-Motion Soil Response Prediction, Proc. of 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.535-544, 1990.
- 9) 山崎文雄・佐藤智美・片山恒雄：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—，第20回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，pp.89-92, 1989.
- 10) 片山恒雄・山崎文雄・永田 茂・佐藤暢彦：高密度3次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化，土木学会論文集，No. 422/I-14, pp.361-369, 1990.
- 11) Loh, C.H.: Analysis of the Spatial Variation of Seismic Waves and Ground Movements from SMART-1 Array Data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.13, pp.561-581, 1985.
- 12) FACOM：科学用サブルーチンライブラリSSL II 使用手引書，pp.403-406, 1980.
- 13) Lu, L., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Soil Amplification based on the Chiba Array Database, Proc. of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.511-516, 1990.
- 14) 川上英二・佐藤靖彦：コヒーレンスの性質および算定方法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.32 A, pp.749-762, 1986.
- 15) Penzien, J. and Watabe, M.: Characteristics of 3-dimensional Earthquake Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, pp.365-373, 1975.
- 16) Kubo, T. and Penzien, J.: Analysis of Three-Dimensional Strong Motions Along Principal Axes, San Fernando Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.7, pp.265-278, 1979.

-
- 17) 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，pp.33~46, 1977.
- 18) Katayama, T. and Sato, N.: Ground Strain Measurement by a Very Densely Located Seismometer Array, Proc. of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.241~248, 1982.
- 19) 佐藤暢彦・片山恒雄：地震動と地盤ひずみの観測，生産研究，東京大学生産技術研究所，Vol. 35, No. 9, pp. 430~434, 1983.
- 20) Sato, N., Katayama, T., Nakamura, M., Iwamoto, T. and Ohbo, N. : Observation of Seismic Ground Motion and Buried Pipe Strain in a Very Dense Seismometer Array, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp.29~34, 1988.
- 21) 永田 茂・片山恒雄・山崎文雄・佐藤暢彦：加速度・速度・変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討，土木学会論文集，No. 422/I-14, pp.371~380, 1990.
- 22) 鹿 林・山崎文雄・片山恒雄：千葉実験所における地震動観測—その 5 自由地盤の伝達特性について—，第 20 回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，pp. 93~96, 1989.
- (1990.10.9 受付)

ORIENTATION ERROR ESTIMATION OF SEISMOMETERS IN ARRAY OBSERVATION

Fumio YAMAZAKI, Lin LU and Tsuneo KATAYAMA

Array observation is an efficient tool to investigate various characteristics of earthquake ground motions. However, seismometers used in an array may involve unexpected error in their orientation. Methods of orientation error estimation were developed in the three-dimensional space and effects of orientation error were demonstrated. The maximum cross correlation method and the maximum coherence method were recommended because of their accuracy. The earthquake ground motions recorded in the Chiba array and other two arrays were used in numerical examples. Non-trivial orientation errors were detected for all these arrays. The cross correlation coefficient and the coherence functions between two points increased significantly by correcting the estimated orientation error.