

[討議・回答]

夏川亨介
目野 豊 共著
蜂須賀義文
松井繁之

「全方位測定傾斜計の開発」への討議・回答

(土木学会論文集 No. 693/VI-53, 2001年12月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

荒井 健 (前田建設工業)

Ken ARAI

1. はじめに

本論文は、渦電流によるインダクタンスの変化と位相のずれを傾斜計に応用した点に新規性がある。

試作した計測器の実験結果から、差動トランス型センサーや4ゲージ型センサーと比較して温度特性が優れていると結論付けている。

しかし、実験内容と実験結果の図に、いくつか疑問を覚える。誤解に基づくものかもしれないが、疑問を解消していただければ幸いである。

2. 放置試験

(1) 放置試験の意味

4. 室内試験 (4) 放置試験の図-14に示された全方位測定傾斜計の挙動を見ると、各測定日の前半に正の傾斜を示し、後半に負の傾斜を示す微小な日変動が見られる。一方、従来型の傾斜計の測定結果をみると、従来型傾斜計Aは、傾斜が負の方向に漸増する傾向が見られ、従来型傾斜計Bは、傾斜が正の方向に出ている。従来型傾斜計の測定結果には、日変動と考えられる挙動は見られない。

全方位測定傾斜計の測定結果が最も真値に近いとすると、各計測器を載せた台座の傾斜が日変動するような条件になっていたと考えられる。また、全方位測定傾斜計が、室温の変化を受けて測定値が変動した可能性も否定できない。

この実験を実施した温度条件は、試験中の温度変化が約 2°C と記述されていることから、温度変化の影響を大きく受けたとは考えにくい。しかし、室温の経時変化と台座の傾斜のデータが示されない限り、全方位測定傾斜計が従来型の傾斜計と比較して安定性が最も高いと結論づけることはできないと考えられる。

ところで、表-3に試験傾斜計の仕様が示されてお

り、それぞれの分解能は7秒~10秒となっている。しかし、図-14に示された各傾斜計の測定データは、 ± 7 秒以下であることから、傾斜計の安定性についての判断材料となりえるのか疑問である。また、表-3に示された分解能の数値の出所・根拠も不明である。

(2) 全方位測定傾斜計のデータ

図-14を見ると、従来型傾斜計の測定結果は、デジタルデータに基づく階段状のプラフとなっているのに対し、全方位測定傾斜計の測定結果は、あたかもアナログデータのような印象を受ける。従来型傾斜計Aの最小出力は、図-14から約0.7秒と読み取れ、従来型傾斜計Bの最小出力は、約3秒と読み取れる。これらの値は、非常に議論のあるところだが、このような最小出力に近い測定では、グラフが階段状に表示されるのが一般的である。

一方、図-14に示された全方位測定傾斜計の測定結果をみると、デジタルデータとは思えない非常に微妙な挙動まで記録されており、最小出力単位が非常に小さいと推察される。しかし、全方位測定傾斜計の最小出力について、本論文には記述されていない。

一般に、最小出力が微小な場合、従来型のセンサーは、測定レンジが狭くなる傾向がある。図-8の計測ダイアグラムのように、従来型計測器用データロガーを利用する計測方法で、このような微小な分解能と測定レンジ $\pm 0.82^{\circ}$ が確保できるのか疑問である。

(3) 従来型傾斜計のスペック

図-14から従来型傾斜計AとBの最小出力は、前述のように差動トランス型傾斜計が約0.7秒でゲージ式傾斜計が約3秒と読み取れる。従来型の差動トランス型およびゲージ式傾斜計の最小出力は、従来型傾斜計の代表的なメーカーの製品で1.4秒~1.8秒である。最小出力が約0.7秒となる差動トランス型傾斜計であれば、その測定レンジは $\pm 1^{\circ}$ 以下の製品と推定され

る。また、最小出力が約3秒となるゲージ式傾斜計であれば、測定レンジ $\pm 2^\circ$ の製品と推定される。したがって、図-14に示された放置試験は、測定データの処理を誤ったか、比較すべき適切なスペックの製品を使用しなかった可能性が考えられる。

また、全方位測定傾斜計の測定レンジを $\pm 0.82^\circ$ としているが、図-9から測定レンジ ± 1200 秒(= $\pm 0.33^\circ$)でしか精度を検証しておらず、保証された測定レンジは $\pm 0.33^\circ$ と判断すべきと考えられる。このような測定レンジがそれぞれ異なる測定器同士の精度比較は、不適切と考えられる。

3. 現場計測

図-16、図-17および図-18、図-19に差動トランス型の傾斜計と全方位測定傾斜計のX方向とY方向の傾斜の経時変化が示されている。これらの図から差動トランス型の傾斜計は、常時約0.2分の幅で微動していることがわかる。一方、全方位傾斜計は、振動の影響をあまり受けずに安定した測定結果が得ることがわかる。

その理由として、差動トランス型傾斜計に用いられている重錘よりも数十倍重い重錘を採用したことによる固有振動の違いをあげている。

しかし、全方位傾斜計と同様に、従来型の差動トランス型やゲージ式の傾斜計内部は、高粘度シリコンオイルなどがダンピング材として充填されており、振り子の振動を抑制している。したがって、図-16と図-18の計測結果が示す常時微動の原因は他にあると考えられる。

ところで、一般に計測作業において、変形やひずみ

を高精度に測定するためには、センサーの精度などのスペックだけでなく計測方法にも十分留意しなければならない。これは、計測方法が、測定結果に大きな影響を与えるためである。

図-16と図-18のような常時微動している測定結果が得られた場合には、通常以下の3つが原因として考えられる。

- ① 傾斜計内の重錘が振動している。
- ② 傾斜計の固定部材が振動している。
- ③ 傾斜計本体が振動している。

本論文中では、①だけを差動トランス型傾斜計の測定結果が安定しない理由と判断している。しかし、②と③も無視し得ない要因となっている可能性がある。論文中の図-5(B)に全方位測定傾斜計の取り付け図において、測定対象に取りつけたアングル材を固定部材としているが、従来の傾斜計は、測定対象の構造物にアンカーを打込み、3本の直径8mm程度のボルトで固定するのが一般的である。

従来の傾斜計の固定に使用されるボルト3本と全方位測定傾斜計の固定に使用されるアングル材では、剛性が大幅に異なり、振動に対する影響は異なるものと考えられる。また、差動トランス型傾斜計は、細長い形状だけでなく、カンチレバー状に取りつけられるのが普通で、傾斜計本体が振動しやすと考えられる。

本論文は、傾斜計の設置位置は示しているが、設置方法の説明がなく、これらを判断する材料がない。各傾斜計の設置方法および固定方法の違いが測定結果へ与える影響をどのように評価すべきか御教示いただければ幸いである。

(2002.5.14 受付)

▶回答者 (Closure) ————— 夏川亨介 (中央復建コンサルタンツ)・目野 豊 (中央復建コンサルタンツ)・

蜂須賀義文 (総合計測)・松井繁之 (大阪大学)

Kyosuke NATSUKAWA, Yutaka MENO, Yoshifumi HACHISUGA and Shigeyuki MATSUI

1. はじめに

筆者らの論文に対して貴重なご討議を頂き、感謝申し上げます。

筆者らの論文への討議ならびに回答により、討議者および現場計測関係者のご理解をより深めて頂ければ幸甚と考えております。

2. 放置試験

(1) 放置試験の意味

論文中の図-14に欠けていた試験期間中の室内温度測定結果を追加したものを図-1に示す。同図のスケールは左側が傾斜角、右側が室内温度を示している。室内温度は最高14.3°C、最低11.7°Cを示し、この期間における温度変化は2.6°Cであった。

ところで、放置試験の目的は、傾斜計に対して外部から刺激を与えることなく、比較的安定した状態にお

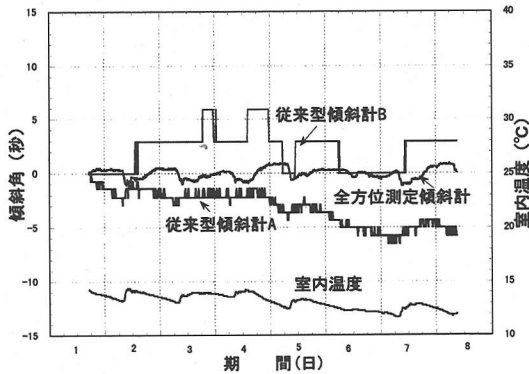


図-1 放置試験結果

ける計器の安定性を把握するために実施した試験であり、この特性は現場計測において非常に重要な要素であると考えている。このため試験室の条件として傾斜計に対して外乱が作用しにくい環境設定とした。

まず、温度条件として、試験室内の温度変化が比較的少ない時期を選定した。また傾斜計を設置した台座は、建築基礎杭上の鉄筋コンクリート造床に設置し、その天端に鉄板を固定して、ボルトにて取り付けた。

台座自体の微小な変化を定量的に把握することは困難であるとの認識から、従来型傾斜計 A、B および全方位測定傾斜計を写真-1、2 に示すように配置を換えて試験を繰り返し実施した。その結果、図-1 の結果と概ね同様であるとの結果から、傾斜計を載せる台座の変化は、温度変化 2.6°C 程度の少ない条件下において小さく、無視することができると考えた。

放置試験結果を再確認するために、図-1 に示された各傾斜計の特性を整理すると以下のとおりである。

- ① 試験期間中の温度変化は、右肩下がりであり、従来型傾斜計 A の変化とほぼ同傾向を示す。
- ② 全方位測定傾斜計は、±1 秒程度の範囲で日々の温度変化に追従した微小変化を示す。
- ③ 従来型傾斜計 B は、僅かな温度変化に対してランダムな不安定値を示す。

つまり、全方位測定傾斜計は従来型傾斜計 A とともに、室内温度変化に応じた変化を示している。しかし日単位では同程度の変化を示すものの、その変化量を累積することはない。すなわち、室内温度が 14.3°C から 11.7°C と僅かに低下しているにもかかわらず、傾斜角は 0 度を中心とした挙動を示し、漸減(漸増)傾向は見られないことから、室内の微小な温度変化に対しても安定していると判断した。

図-1 に示した各傾斜計の変化量は、5 秒程度の微小領域であり、各製造者が保証している分解能ならびに直線性の保証値と比べて小さい挙動である。しかし、

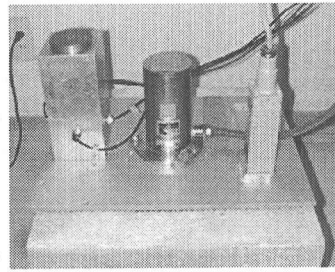


写真-1 従来型傾斜計 A を中央に配置した放置試験

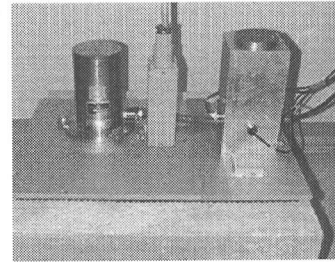


写真-2 従来型傾斜計 B を中央に配置した放置試験

表-1 傾斜計の測定範囲と出力電圧と分解能

	全方位傾	従来型 A	従来型 B
測定範囲	±0.82 度	±1.00 度	±1.00 度
出力電圧	±2.0V	±0.5V	±610 μV
分解能	0.07 秒	0.70 秒	2.96 秒

この領域における比較に対して議論はあるものの、微小領域での安定性確保は、現場計測における傾斜計の要求精度が高まるなかで、非常に重要な要素であると考えられる。

次に、論文中的表-3 に示した傾斜計の仕様は、各傾斜計の試験成績表や技術資料ならびに筆者らの試験結果に基づいている。そのなかで従来型傾斜計の分解能は、技術資料から引用した。しかし、被試験傾斜計と論文中的表-3 に示した分解能には相違が見られる。従来型傾斜計 A と B では表-1 に示すようにそれぞれ 0.70 秒と 2.96 秒であり、論文中的表-3 に示した値を十分満足していることがわかる。同様に、全方位測定傾斜計における分解能は、従来型傾斜計と同等性を確保するとの観点から 7 秒としたものである。しかし、実際の分解能は、0.07 秒を確保している。

(2) 全方位測定傾斜計のデータ

表-1 に比較試験に使用した 3 タイプの傾斜計における傾斜角と出力電圧および分解能の関係を示した。表-1 に示した値は各傾斜計の試験成績から得られた

ものである。

傾斜角と出力電圧の関係は、全方位測定傾斜計が+0.82度傾斜した時に+2.0Vであるのに対して、従来型傾斜計Bは+1度傾くと+610 μ Vの出力電圧が得られることを示している。両傾斜計の測定範囲には若干の相違はあるものの、全方位測定傾斜計の出力は従来型傾斜計Bに対して約3000倍の高出力であることがわかる。この相違が分解能の違いに反映される。ここで分解能とは、入力がある値（ゼロではない）から徐々に増加する時、その増加分がある値以上になって初めて出力が変化するが、この入力増加分を分解能という。言い換えると、測定可能な最小入力変化であると定義される。表-1に示した分解能は、各傾斜計の出力電圧とデータロガーの最小入力電圧との関係から決定される。

このように、放置試験時の全方位測定傾斜計が示した微小な傾斜角は、表-1に示す分解能が論文中の図-14に示した経時変化図に明瞭に反映されている。これにより従来型傾斜計Bが示したデジタル状の出力に対して、全方位測定傾斜計は、あたかもアナログ状の出力に見える結果となった。

ただし、これはあくまでも全方位測定傾斜計の高い分解能を示したものであって、直線性が同等に高いということにはならない。

なお、データロガーの利用に関しては、上記傾斜角に対する出力電圧との関係からもわかるように適切であると考えている。

(3) 従来型傾斜計のスペック

論文中の図-9および図-11は、 ± 0.33 度（ ± 1200 秒）の範囲を示しており、論文中の表-3に示した測定範囲（ ± 0.82 度）における直線性の検証にはなっ

ていない。この不整合は、討議者をご指摘のとおり不適切であった。

まずご指摘の測定範囲について述べる。現場計測で要求される構造物傾斜の管理値は、土木構造物の場合 ± 3 分（ ± 180 秒）程度に設定されることが多い。この値から判断して、その5倍の範囲まで信頼性を確保するとしても、 ± 15 分（ ± 900 秒）程度である。筆者らはこの範囲の直線性が特に重要であるとの認識から、 ± 0.33 度（ ± 1200 秒）の範囲である図-9、11を示した。

次に表-3に示した測定範囲 ± 0.82 度の検証について述べる。全方位測定傾斜計の計画段階では、傾斜計の測定範囲は ± 1.00 度を目標としていた。しかし、製作段階において、構造的制約があることが判明したため、測定範囲を ± 0.82 度に仕様変更した。その試験結果を図-2に示す。この試験結果では、 ± 0.33 度（ ± 1200 秒）の範囲において論文中の図-11より少し大きな誤差を生じているものの、直線性の許容値0.8%（論文中の表-3参照）を充分満足している。

その後改良を加え、 ± 0.33 度（ ± 1200 秒）に限定して試験したものが論文中の図-11である。

3. 現場計測について

現場計測に用いた従来型傾斜計Aは、計測業務として現場比較試験に先立ち56台設置した。写真-3に従来型傾斜計A、写真-4に全方位測定傾斜計の設置状況を示す。

取付け方法は、計測対象構造物のコンクリートの柱頭部に傾斜計1台当たり4本のボルト（ $\phi 10$ mm）で直接に固定した。この方法は従来型傾斜計Aの標準

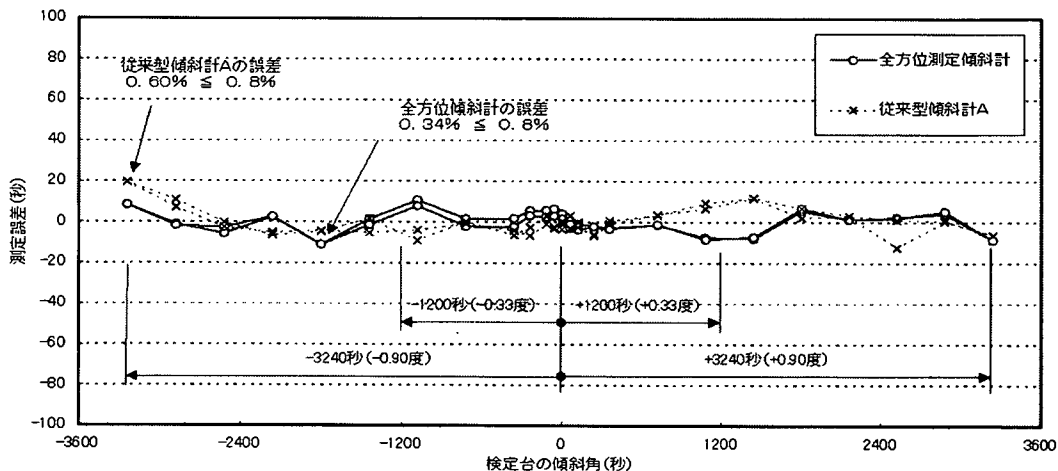


図-2 直線性比較試験結果

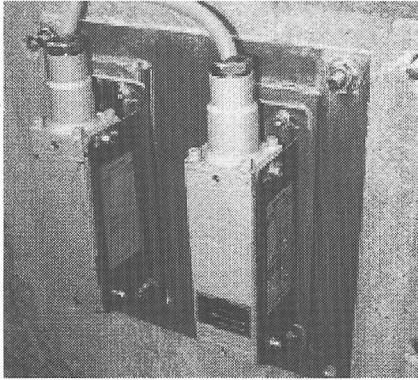


写真-3 従来型傾斜計 A 設置状況

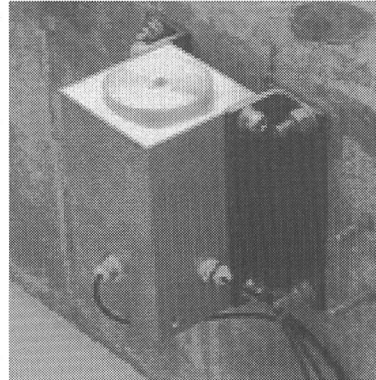


写真-4 全方位測定傾斜計設置状況

的な取付け方法であり、全方位測定傾斜計との取付け方法の強度の差異はないと考えている。

なお、筆者らはこれまでに従来型傾斜計 A を多用してきていること、比較試験対象とした傾斜計以外に複数台の従来型傾斜計 A も同時に測定した結果から、ボルトの緩みなどの特異な状況は観察されていないことを付記する。

傾斜計を取り付けた構造物は、列車荷重を支持している。そのため数十分間隔で列車が通過しており、その振動の影響を受けている。さらに、構造物と平行・直交して国道が位置しており、その影響も受けることが推察される。

従来型傾斜計 A に対して列車通過時の影響は、論文中の図-18 に示した波形のうち振幅の大きな振動部分である。

同じ振動条件下に設置した全方位測定傾斜計（両傾斜計は隣に設置）の変化は、論文中の図-19 に示した通りである。その顕著な特徴は、列車が走行している時でも微振動は現れず、この経時変化図からは列車通過を知ることとはできない。言い換えると、全方位測定傾斜計は、列車通過時に発生する構造物振動の影響を

受けにくい傾斜計であるということができる。

両傾斜計は、同じように重錘を懸垂させた構造を採用しており、ダンパー材に用いたオイルの粘性も同程度の材料を使用しているにもかかわらずこのような差が出るのは、傾斜計固有の差、すなわち重錘の質量差であると考えられる。

4. むすび

筆者らの拙文をご注目頂き、貴重なご意見を頂きました討議者に重ねて御礼申し上げます。

研究の比較試験で用いました各製造者の傾斜計は、長年の利用実績があり、現在も確固たる市場を有しております。それらを比較対象とするためには、前提条件を明確にすることが大切であり、討議者をはじめ関係者に誤解を与えることはあってはならないと考え、ここに回答させて頂きました。

(2002.12.16 受付)