

近接工事の調査・設計・施工技術

5. 近接施工での計測技術

大西 靖和 (おおにし きよかず)
エルメス計測工業㈱ 取締役

内山 伸 (うちやま のぶる)
清水建設㈱技術研究所 主任研究員

5.1 はじめに

本講座では、近接工事として、主に山留めを用いた開削工事を対象としている。近接工事による周辺構造物に及ぼす影響の程度は、仮に影響要因となる山留め壁の変位や地下水位の低下量が精度よく推定できたとしても、介入する地盤特性や境界条件の評価が難しいことから、必ずしも十分な精度で予測できるとは言えない。そのため、工事中の計測管理は、周辺構造物の安全性・健全性を確保し、設計・施工計画の妥当性を確認するための、唯一の手段・拠り所となる。

個々の地下工事では、目視による点検も含めて、何らかの計測が行われる。特に、公共性の高い鉄道・道路等の構造物に対する近接工事では、軌道や既設構造物に各種の計器を設置して自動計測が行われる。しかしながら、得られた測定結果に対して、「工事もしていないのに測定値が大きく変動している」、「本当にこんな変形が出ているのか?」というような声をしばしば耳にする。また、管理者との近接協議では、変位量として数 mm オーダーの管理値を設定され、計測方法や使用する計器・システムに、高い精度を要求されることが多い。

計測結果の信頼性については、現場計測に関する既往の文献^{1),2)}などにも述べられているが、具体的な測定値のばらつきを示した例は少ない。本稿では、近接工事の計測に用いられる計器の使用上の留意点、計器に要求すべき特性、温度変化等に伴う実際の測定値のばらつきを程度を示すとともに、計器・計測方法の違いによる測定値の比較事例も併せて紹介する。

5.2 近接工事における計測管理

5.2.1 計測管理の目的

近接工事における計測管理は、既設構造物に影響を及ぼす要因となる側、すなわち工事側での計測と、影響を受ける側の既設構造物を対象とする計測(変状計測)に大別されるが、計測管理の目的を工事する側から考えると、一般に、以下の①～④が挙げられる。

- ① 工事中の事故防止(安全管理)
- ② 周辺地盤・構造物への障害防止(環境保全)
- ③ 過剰な計画の修正(合理化・経済性の追求)
- ④ データの蓄積(設計・施工法の検証)

このうち、①は一般の施工管理として行われるもので、山留め壁の倒壊等、工事側での事故・障害を未然に防ぐ

ことを目的とする。ただし、近接工事では、特に第三者の安全と財産の保全が要求されることから、許容される変位量等が厳しく制限され、山留め架構等の安全性に対しては、比較的余裕があることが多い。したがって、近接工事における計測では、工事側の安全管理よりも、②に掲げた周辺地盤・構造物の安全性・健全性・使用性の確保が主目的となる傾向にある。

なお、③および④は、設計・施工法の検証を目的とするもので、周辺環境にかかわらず、データの有効利用という観点から重要である。また、工事中の計測結果から次段階以降の挙動を予測し、施工にフィードバックする、いわゆる情報化施工(Observational Procedure)でも、計測が主要な役割を担っている。

5.2.2 代表的な測定項目と使用計器

開削工事における近接工事では、変形の要因となる工事側では山留め架構、影響を受ける周辺地盤・構造物側では、鉄道・道路・共同溝等の既設構造物(橋脚・トンネル・軌道・擁壁・建物等)が主な計測対象となる。

測定項目・方法には種々のものがあるが、代表的なものを計測対象で分類して表-5.1に掲げる。このうち、山留め架構では、挿入式あるいは固定式傾斜計による山留め壁の水平変位の計測が、周辺構造物側では、連通管式沈下計による鉛直変位と設置型傾斜計による傾斜の測定が、最も頻繁に行われている。

技術の進歩は計測の分野でも著しく、計器ではレーザー、CCDカメラ、光ファイバー等を利用した各種の計器、あるいは高精度の測量機器であるトータルステーションや電子レベル(デジタルレベル)を常設した自動計測システム等が実用化・適用されている。

5.2.3 管理方法

計測管理では、ある変形・応力の値に対して設定された限界値(許容値)に対し、一般に一次管理値、二次管理値というように、段階を設けて管理値を設定する(第2章参照)。管理値は、近接構造物を計測対象としていれば、通常、その変位量に対して設定するが、近接構造物での計測を行わない場合には、間接的に、山留め壁の変位量等で設定することがある。この場合、両者の変形には、地盤の変形解析等による関連づけが必要となる。

また、一次・二次管理値は、限界値に対して各々50%、80%というように設定されるが、限界値が近接構造物のどのような限界状態に対して設定された値であるかを考慮して定めるべきである。例えば、近接構造物の

表—5.1 代表的な測定項目・使用計器

計測対象	測定項目	主な使用計器	
山留め壁	水平変位	・挿入式・固定式傾斜計 ・トランシット ²⁾ ・水糸・スケール	
	応力	・ひずみ計 ・鉄筋計	
	側圧・水圧	・土圧計・水圧計	
	支保工	切梁軸力	・ひずみ計 ・ブルドン管式油圧計
		グラウンドアンカー軸力	・センターホール型荷重計 ・ブルドン管式油圧計
		温度	・温度計
掘削底面		・鉛直変位 ・レベル ²⁾ ・層別沈下計	
地下水	水位・水圧	・水位計・水圧計	
周辺地盤・構造物 ¹⁾	自然地盤盛土	鉛直変位	・レベル ・層別沈下計
		側方変位	・トランシット ・挿入式・固定式傾斜計
	地下水	水位・水圧	・水圧計・水位計
	擁壁	鉛直変位	・レベル ・連通管式沈下計
		傾斜	・傾斜計 ・下げ振り
	トンネルカルバート橋脚・橋台軌道(レール)	鉛直変位	・レベル ・連通管式沈下計
		水平変位	・トランシット ・ワイヤー式変位計 ・レーザー変位計
		傾斜	・傾斜計 ・下げ振り
		三次元座標	・トータルステーション
		内空変位(トンネル等)	・ワイヤー式変位計 ・レーザー距離計
		応力	・ひずみ計
		亀裂幅	・亀裂変位計
		建物	鉛直変位
	傾斜		・傾斜計 ・下げ振り

1) 通常、温度はいずれの構造物に対しても測定項目に掲げる
2) レベル・トランシットには光学式・レーザー式・電子式あり

構造性能や使用条件から限界値を定めるのが困難な場合、FEM 変形解析結果等を限界値として設定することもあるが、予測解析結果は実際の変形と一致しないことが大半であり、また、安全性・使用性に対して十分余裕があることも考えられる。管理値を、いたずらに安全側に設定することは、頻繁に管理値を超えることにもなりかねず、計測管理上、望ましいことではない。

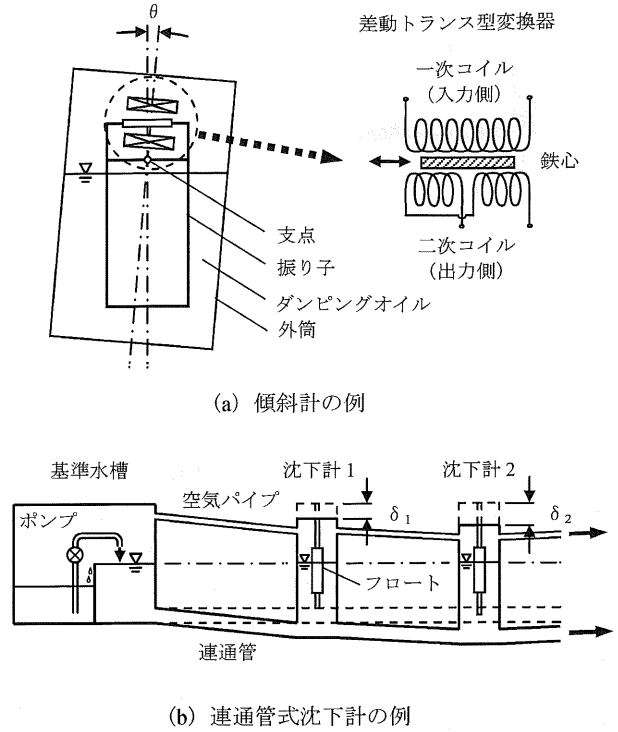
5.3 計測上の留意点

5.3.1 計器の仕様・特徴

測定値の信頼性について、まず、最も基本となる計器(センサ)の特性について考えてみたい。

図—5.1には、変位計測でよく用いられる傾斜計および連通管式(水盛り式)沈下計の測定原理を示した。傾斜計では、差動トランス型の例を示したが、このほかに、ひずみゲージ型、磁気誘導型、サーボ型等、各種の変換方式がある。

電気的な変換部分はさておき、傾斜計の機械的な主要部分は振り子からなり、重力方向に対する振り子の傾斜角を出力する(ただし、サーボ型では振り子が動かないように電気的に制御する)。ひずみゲージ型を除き、通常、振り子の支点には、摩擦を低減するために、ベアリングやナイフエッジ等が用いられているが、これら機械



図—5.1 計器の測定原理

加工の精度が出力値の精度に大きく影響するのは言うまでもない。また、衝撃に対して、計器内部にダンピングオイルを充填するなどの処置がなされている。

連通管式沈下計は、フロート式と圧力式に大別され、図—5.1(b)はフロート式の例を掲げた。傾斜計と同様、電気的な変換方式には各種のものがあ、連通管、フロート等、装置の仕様は様々である。

表—5.2には、山留め壁の変位測定に用いる傾斜計と連通管式沈下計の特徴、使用する際の主な留意点をまとめた。現場計測では、測定値の変動傾向は計測環境に大きく左右されるが、それらについては5.3.4に記述する。

5.3.2 計器の信頼性

(1) 計器に要求される特性

計測を計画・実施する立場にある技術者が、各種計器の原理・機構・変換方式等の詳細を理解し、それによって計器の優劣を判断することは困難である。しかしながら、使用する計器の、所定の物理量に対する出力値の特性を理解しておくことは、測定値の信頼性を評価し、また、計測の限界を知る上で無駄ではない。

一般に使用されている計器の主な特性値の例を、計測器メーカーのカタログ等を参考に、表—5.3に示した。

ここで問題とすべきは、表中の「非直線性」を、しばしば計器の精度と理解されていることである。計器の非直線性は、通常、図—5.2に示すような計器の校正曲線において、校正係数で表される傾きを持った直線に対する最大偏差から定義され、非直線性とは、文字どおり、直線からの偏差を示すものに過ぎない。

また、一部では最小出力値(分解能)を計器の精度と誤解されているようであるが、最小出力値は、通常、使用する測定器(データロガー)の設定に依存し、計器自

表—5.2 傾斜計（山留め壁変位測定用）と連通管式沈下計の使用上の留意点

計器	特徴	使用上の留意点	備考	
傾斜計	挿入式	<ul style="list-style-type: none"> 通常の自動計測では、工事工程に応じて随時測定する 自動計測の場合、1台の計器を転用できるため、設置箇所が多い場合に経済的 計器の修理・交換が可能 180°反転して2回測定することで、計器のゼロドリフトを除去できる 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削中の重機、溶接等による応力材・ガイドパイプの損傷に注意する ガイドパイプの接続部分に測点を設けない 計器の温度が安定するまで、一定時間ガイドパイプ内の水に浸してから測定する 可能な限り、同一人が測定する 	<ul style="list-style-type: none"> 一般に、挿入式の方が固定式に比べて測定値の信頼性が高い（特に予想変位量が小さい場合や長期計測に対して） 巻上げ等を自動で行う挿入式傾斜計あり 回収可能なローラー型固定式（多段式）傾斜計あり
	固定式	<ul style="list-style-type: none"> 自動計測によるリアルタイムな測定が可能 箇所ごとに複数の計器が必要 通常の埋設式では、計器の異常・ケーブルの断線に対する対応が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 再現性・安定性・耐久性の高い計器を選定する 設置間隔は2~3m以内とする（全長を考慮して配置する） ケーブルの養生を十分行う（特に立上がり部分） 	
連通管式沈下計	<ul style="list-style-type: none"> フロート式と圧力式で大別される 圧力式はある程度の高低差まで適用可能 気泡の混入、温度差に対する水の密度の差が測定精度に影響する 風、振動による連通管の揺れによって測定値が変動する 	<ul style="list-style-type: none"> 水は脱気水あるいは蒸留水を使用する 設置時の気泡の混入を避ける 連通管から各沈下計の水面までの立上りを短くする（30cm程度まで） 連通管の揺れを防止する 連通管を断熱材で養生する 	<ul style="list-style-type: none"> 一般に、気泡・温度の影響は圧力式の方が受けやすい 	

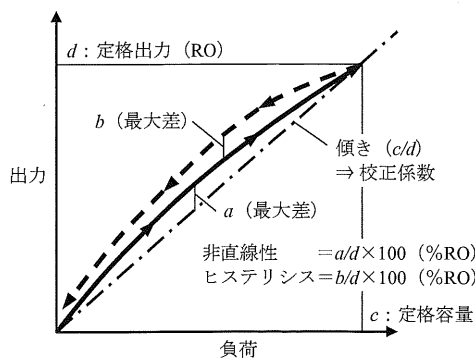
表—5.3 計器（傾斜計）特性の例

定格容量（測定範囲）	±5°
変換方式	ひずみゲージ
非直線性	±0.5%RO 以内
ヒステリシス	±0.5%RO 以内
定格出力（RO）	1.8mV/V 以上
温度補償範囲	-10~60°C
零点の温度影響	±0.05%RO/°C 以内
出力の温度影響	±0.1%/°C 以内
耐水圧	500 kPa

表—5.4 傾斜計の室内安定性試験結果

	変換方式	容量	最小出力 (rad)	温度との相関	標準偏差： σ (rad)
傾斜計 A	ひずみゲージ	±5°	4.04×10 ⁻⁵	ややあり ¹⁾	4.26×10 ⁻⁵
傾斜計 B	ひずみゲージ		4.10×10 ⁻⁵	なし	4.70×10 ⁻⁵
傾斜計 C	差動トランス		8.70×10 ⁻⁶	あり ²⁾	5.09×10 ⁻⁵

1) 相関係数：-0.572, 温度勾配：-0.76×10⁻⁵ rad/°C
2) 相関係数：0.797, 温度勾配：1.26×10⁻⁵ rad/°C



図—5.2 計器の校正曲線

体の特性とは異なる。出力値の最小表示桁を下げたからといって、安定した値が出力されなければ意味がなく、計器の精度を表す指標とはなり得ない。

近接工事における変状計測では、計測期間が数箇月以上、時には数年に及ぶことが多く、実際の計測においては、非直線性から生じる真値（検証は不可能であるが）に対する数%の誤差よりも、温度変化や日射の影響に伴う周期的変動や、シフト（出力値が不連続に移動すること）、あるいはドリフト（出力値が一方向に徐々に変動すること）が問題となる。

すなわち、計器に最も要求される性能は、非直線性よりも、むしろ、繰返し変動や長期計測に対する再現性および安定性で、具体的な特性として、繰返し特性（ヒステリシス）と温度特性が挙げられる。

表—5.3に示したように、市販の計器のカタログには、

通常、ヒステリシス特性と温度特性（温度補償範囲のみの記載が多い）が示されているが、長期にわたって再現性・安定性を検証した例は少ない。以下、傾斜計について行った室内安定性試験結果について示す。

(2) 傾斜計の室内安定性試験結果

本試験は、数種の固定式傾斜計各2台ずつを安定した治具に固定して密閉した室内（空調あり）に設置し、一定期間、出力値を連続して採取し、安定性を確認したものである。いくつかの要因をパラメータとして各種の試験を実施したが、その中から、種類の異なる3台の計器の出力値～温度関係と出力値のばらつきを、抜粋して図—5.3、表—5.4に示す。試験期間は16日間、データ数は約11600である。

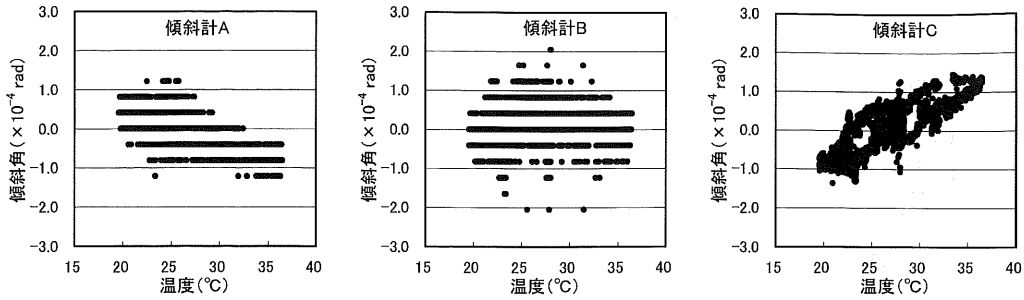
ここで、傾斜計Cの最小出力が傾斜計A、Bに比べて小さいのは（図—5.3(a)、表—5.4参照）、前述したように、測定器の設定が変換方式によって異なるためである。

温度との相関性は、3種の傾斜計でまちまちであった。また、値のばらつきは、温度の頻度が正規分布でないこともあり、いずれも正規分布とは若干異なるが、傾斜計A、B、Cともに、おおむね $\pm 2\sigma \approx \pm 1 \times 10^{-4} \text{ rad} (= 1/10000)$ であった（σ：標準偏差）。

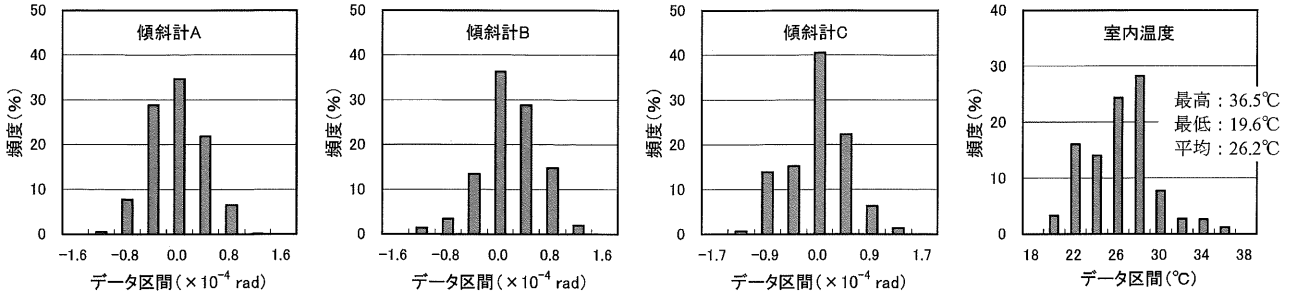
正規分布では、平均値±2σの範囲に測定値の約95%が分布するが、上記の±2σの値は、定格容量（±5°）に対して±0.1%程度で、計器の安定性に対するばらつきとしては、十分小さな値と判断できる。なお、同種の2台の傾斜計では、温度特性、ばらつきに多少の差が認められるものの、おおむね類似した特性を有していた。

5.3.3 計測上のトラブル

工事現場内では、計器・測定器の不良や測定用ケーブ



(a) 測定値～温度関係



(b) 測定値の頻度分布

図—5.3 傾斜計の室内安定性試験結果

ルの断線等、計測上のトラブルがつきものである。トラブルの主な原因には以下のものがあり、落雷等を除いて人為的要因によるものが多い。

- 重機等による計器・ケーブル・システムの破損
- 落雷による計器・システムの破損
- 計器・システムの設置不良
- 計器・システムのハード・ソフト上の不良
- 手動計測・測量等における人為的ミス

測定装置のいずれかに不具合が生じた場合、明らかにケーブルの断線、あるいは装置・機器の故障と判断される場合は、むしろ対応が容易である。問題となるのは、例えばケーブルの絶縁抵抗が低下した場合で、出力値は得られるものの、不規則なばらつきやドリフトが生じ、結果的に測定値の信頼性を損ねることになる。

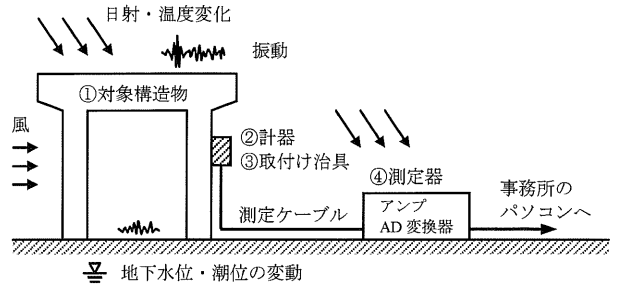
絶縁抵抗の低下の原因としては、ケーブル表面の小さな損傷に気づかなかった場合、あるいは断線したために再接続したが、その間の降雨等により、ケーブル内部に水が浸透した場合が考えられる。疑わしい場合には、各出力端子間の抵抗値を測定して確認する。

自動計測では、計測上のトラブルによって、ある期間データが欠落すると、その間の連続性が得られなくなることがあり、計測期間中は、データに異常がないことを常に確認することが重要である。また、手動計測・測量では、測定後、直ちにそれまでの値と比較し、ヒューマンエラーの防止に努める必要がある。

5.3.4 環境的要因による測定値の変動

(1) 環境的要因

近接工事における変状計測では、図—5.4に示すように、種々の外乱の影響を受けやすく、工事の影響がなくても測定値は変動することが多い。これらの変動は、対象とする工事の影響を把握するという、計測本来の目的



図—5.4 測定値の変動に対する環境的要因

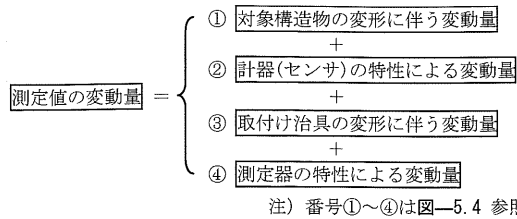
表—5.5 測定値の変動に対する環境的要因

周期的要因	<ul style="list-style-type: none"> • 外気温の日変動・季節変動 • 日射の影響 • 地下水位の季節変動 • 潮位の変動
非周期的要因	<ul style="list-style-type: none"> • 風圧力 • 交通振動 • 重機の走行による振動 • 降雨による地下水位の短期的変動 • 電気機材・高圧線による磁界

にとつての障害となる。

測定値の変動に対する主な外乱の種類、すなわち環境的要因を表—5.5に掲げる。影響を受ける要因の種類と変動の程度は、計測対象物の立地条件・構造特性・計測条件に左右され、例えば、外気温の変動による影響は、程度の差はあれ、ほとんどの現場計測において避けられない問題である。温度変化の影響による測定値の変動に着目すると、図—5.5に示すように、四つの変動量が加算されている可能性が考えられる。

このうち、②計器特性については5.3.2に述べたが、④測定器自体も、温度の影響による内部電気回路の抵抗の変化や熱起電力の発生等が考えられる。ただし、元来、測定器には計器以上に高い信頼性が要求され、出力値の



図—5.5 温度変化に伴う測定値の変動

安定性は十分保証されていることが原則である。

一方、①構造物および③取付け治具の温度変化に伴う変形を推定することは困難で、一旦計器を設置した後、これらの量を分離して評価することは、ほとんど不可能である。ただし、近接工事の計測では、あくまで工事の影響を把握するのが目的であるという観点に立てば、図—5.5に示した四つの変動量の割合がどうであろうと、測定値そのものの変動量が把握できればよい。

環境的要因による変動の程度・傾向は、事前計測（影響工事開始前の計測）の結果から判断するのが唯一の方法である。事前計測期間は長いほど望ましいが、協議から影響工事開始までに時間的余裕のあることはまれで、実情は数週間～1箇月程度のことも多い。それに対し、計測期間が数年にわたる近接工事では、半年から1年程度実施されることがあり、その場合、温度あるいは地下水位の季節変動の影響まで把握することが可能である。

なお、事前計測は、計器・取付け治具の安定（いわゆる馴染み）、および計測システム全体が正常に作動することを確認するためにも不可欠である。

(2) 事前計測結果の例

ここでは、外気温の変動・日射に対する測定値の実測例について示す。対象建物および測定項目は以下のとおりで、鉛直変位と直交する2方向の傾斜角は、いずれも建物の隅角部4点で測定した。

・建物概要

- 構造・規模：RC造地上2階地下1階
- 平面規模：約30 m × 25 m
- 基礎形式：直接基礎（基礎底深さ GL-7.2 m）

・測定項目・方法

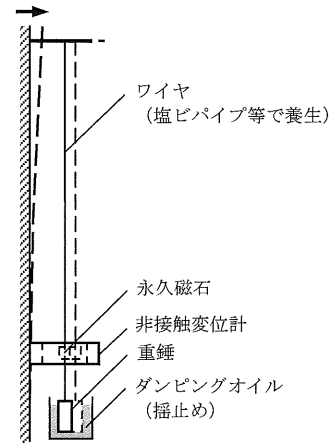
- 鉛直変位：フロート式連通管式沈下計
- 傾斜角：非接触2方向変位計（磁気センサ）³⁾と下げ振りによる上下2点間（高低差3.3 m）相対水平変位から算出（図—5.6参照）

図—5.7に、事前計測期間1年間の相対鉛直変位と1方向の傾斜角の経時変化を抜粋し、外気温とともに示す（日射の影響のない毎日03:00のデータのみで整理）。

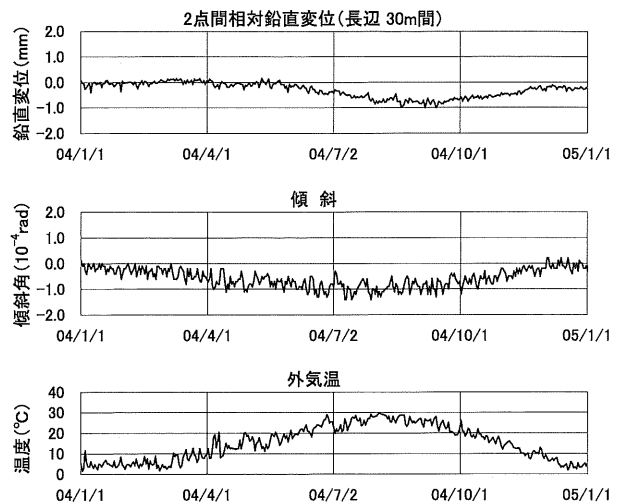
1年間の事前計測結果によれば、2点間相対鉛直変位、傾斜ともに、外気温の季節変動に伴う周期的な変動が認められる。年間変動幅は、相対鉛直変位では0.8 mm、傾斜角は 1×10^{-4} rad 程度である。

年間変動に対して、図—5.8は、2点の傾斜角について、ある3日間の測定結果を抜き出したものである。

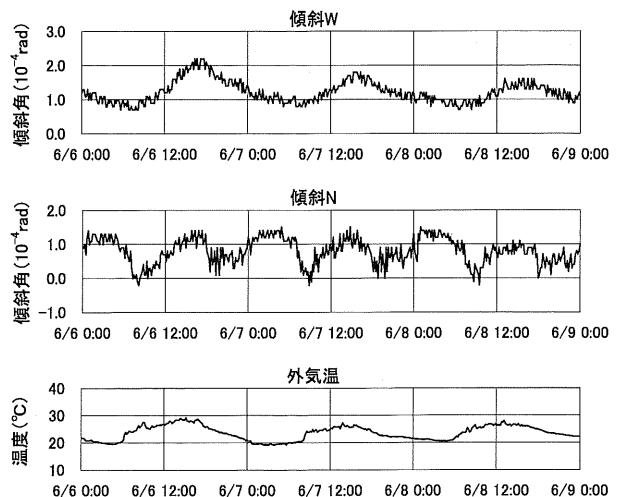
ここで、傾斜 W は建物西側隅角部、傾斜 N は北側隅



図—5.6 非接触変位計と下げ振りによる傾斜測定



図—5.7 事前計測結果（1年間：03:00のデータ）



図—5.8 事前計測結果（3日間：10分間隔のデータ）

角部に設置した測点の1方向の値である。いずれも年間変動幅と同様、 1×10^{-4} rad 前後の幅の周期的な変動が見られるが、傾斜 N では、2サイクル/日の変動が生じている。この理由は、北側隅角部は朝夕2回、直射日光が当たり、その間、日陰になるためと考えられる。

ちなみに、傾斜測定に用いた非接触変位計の室内校正試験から得られている温度特性は、 $\pm 0.015\% \text{RO}/^\circ\text{C}$ 以

内 (RO : ±25 mm) で、測定距離3.3 m、外気温の年間変動幅を25℃とすると、計器自体の温度による変動幅は、 $\pm 0.28 \times 10^{-4} \text{ rad} (= \pm 0.015 \% \text{ RO} / \text{℃} \times 25 \text{ mm} / 3300 \text{ mm} \times 25 \text{℃})$ 以内と算定できる。室内試験結果をそのまま適用するには問題があり、また、取付け治具の影響は不明であるが、本事例においては、変動量の多くは、建物躯体の温度伸縮によるものと推定できる。

このように、日射の影響は、外気温の変動とは異なる変動性状を示し、必ずしも同じに扱うことはできない。また、通常、長期的な温度変動(季節変動)と短期的な温度変動(日変動)では、温度に対する変動割合が異なる。仮に、温度補正を行う場合、長期的な温度変動に対しては、日射の影響を無視できる時間帯のデータを用いることである程度可能であるが、短期的な日変動に対する温度補正は困難なことが多い。

外気温に代表される環境的要因による測定値の変動量の大小は、工事の影響に対する限界値・管理値と対比して判断されるものである。実際の計測では、事前計測の段階で管理値に達する場合も見受けられ、管理値の設定に際しては、環境的要因による変動を十分考慮する必要がある。

5.3.5 測定方法に起因する理論的誤差

これまで、計器特性あるいは環境的要因による測定値のばらつきおよび変動について述べたが、ある種の計測では、測定方法そのものに起因して生じる誤差が無視できないことがある。ここでは、「個々の測定値は、ある程度のばらつきを有する」ことを前提に、最終的に求める物理量のばらつきについて検討した結果を、既往の文献^{3),4)}より一部引用して紹介する。

図-5.9は、測量の分野で偏角法と呼ばれるもので、対象構造物上に設けた各測点における偏角(2本の測線の成す角度)を測定することによって、各測点の基準線からの変位を順次求める方法である。測量のほか、剛性の高い部材同士をピン接合し、接合部での部材間の角度から求める方法があり、トンネルや軌道等、連続する構造物の変位測定に適用されている。

図-5.9は3測線の場合を示したが、測点間の距離 l を一定とし、測線数を n としたときの右端部の点 P_{n+1} における基準線(P_0, P_1 から設定)に対する変位 δ_n は、 $\tan \theta_i = \theta_i (i=1, 2, \dots, n)$ として、(1)式で求められる。

$$\delta_n = l \cdot \{n\theta_1 + (n-1)\theta_2 + \dots + 2\theta_{n-1} + \theta_n\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、(1)式における各測定値 θ_i は、いずれも図-5.10で示す正規分布するものと仮定する。正規分布は、一般に、変数 x の平均値 μ と分散 σ^2 (σ :標準偏差)によって $N(\mu, \sigma^2)$ で表され、次の性質を有する。

- x_1, x_2 が独立変数で $N(\mu_i, \sigma_i^2) (i=1, 2)$ の分布のとき、 $c_1x_1 + c_2x_2$ は $N(c_1\mu_1 + c_2\mu_2, c_1^2\sigma_1^2 + c_2^2\sigma_2^2)$ の分布に従う

(1)式における各測定値 θ_i は独立変数であることから、いずれも等しいばらつき(分散: σ^2)を有し、 l を定数とすれば、 σ_n の分散 σ_T^2 と標準偏差 σ_T は、上記の性質より、各々(2)式、(3)式で表すことができる。

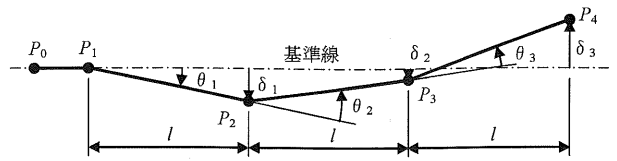


図-5.9 偏角法による変位の算出方法

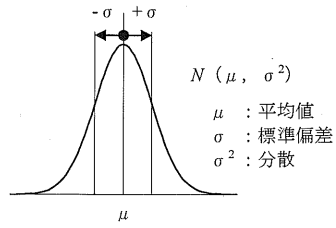


図-5.10 測定値のばらつき

表-5.6 偏角法による測定値のばらつきの試算結果

	測定区間 全長 (m)	測点間距離: l (m)	分割数: n	δ_n のばらつき: $\pm 2\sigma_T$ (mm)
case-1-1	50	2.5	20	± 13.4
case-1-2		5	10	± 9.8
case-1-3		10	5	± 7.4
case-2-1	100	2.5	40	± 37.2
case-2-2		5	20	± 26.8
case-2-3		10	10	± 19.6

$$\sigma_T^2 = n(n+1)(2n+1) \cdot l^2 \sigma^2 / 6 \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_T = l \sigma \sqrt{n(n+1)(2n+1)} / 6 \dots \dots \dots (3)$$

以下に示すいくつかの条件を設定し、(3)式によって δ_n のばらつきの程度を試算した結果を表-5.6に示す。

- 測定区間全長: 50, 100 m
- 測点間距離: $l=2.5, 5, 10$ m
- 各測定値のばらつき: $\pm 2\sigma = \pm 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 以内

表-5.6に示したように、全長100 mでは、求める変位 δ_n のばらつきを表す $\pm 2\sigma_T$ の値は数10 mmに達し、また、測点間距離を短く分割するほどばらつきは増大することがわかる。なお、ここでは、各測定値 θ_i のばらつきを、約95%の信頼確率として $\pm 2\sigma = \pm 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 以内と仮定したが、現状の測量あるいは各種の計測方法において、偏角の測定値をこの程度に収めることは容易ではなく、決して過大な仮定値ではない。

このように、測線を片側に延長して変位を求める偏角法では、延長するに従って測定誤差が累積される。ただし、両端に不動点と見なせる基準点を設けることができれば、測定値が最もばらつくのは中央部付近となり、ばらつき(標準偏差)の最大値はかなり減少する。

また、挿入式あるいは固定式傾斜計による山留め壁の水平変位測定も類似した方法であるが、各傾斜角は、いずれも鉛直方向に対する値であり(方位角法)、累積されるばらつきは、偏角法に比べて小さい⁴⁾。

5.4 現場での比較事例

各種の計器・装置あるいは計測方法には、各々一長一短がある。計測計画にあたっては、対象とする測定項目に対して、計測目的に合う1種類の計器・方法を選択

するのが一般的であるが、異なる計器・方法を併用（ダブルチェック）できれば、互いの欠点を補完し、また、計測結果の信頼性を高めることができる。

本節では、異なる2種類の計器あるいは計測方法によって得られた測定結果を比較した二つの事例について、既往の文献⁵⁾より加筆・修正して紹介する。

5.4.1 異なる方式の傾斜計による山留め壁水平変位の比較

開削工事において、工事側での計測として一般的に行われる山留め壁の水平変位計測には、通常、固定式または挿入式傾斜計が用いられる。両者の特徴や使用上の留意点は、表-5.2や文献^{1),2)}にもまとめられているが、同一の条件で両者の測定結果を比較した例は少ない。ここでは、実現場で、ソイルセメント壁の同一応力材（H形鋼）を両計器で測定し、どの程度の差が生じるかを検証した例を示す。

表-5.7はA~D現場の4事例での計測概要である。測定深さは23~34 mの範囲で、測定間隔はA現場では固定式、挿入式ともに1.0 m、B~D現場では固定式が2.0 m、挿入式が1.0 mである。

ここで、A現場では、3箇所の山留め断面の最終施工段階において、固定式傾斜計を取り除いた後に、挿入式傾斜計で同一の計測管を再度計測している。また、B~D現場では、各1箇所の山留め断面の同一応力材（H形鋼）に2本の計測管を設置して、施工過程ごとに固定式と挿入式で同時に計測している。

図-5.11は、最終施工段階におけるA~D現場それぞれの山留め壁水平変位の深度分布例である。山留め壁の最大水平変位の範囲は5~60 mmであり、同一深度での固定式と挿入式との最大差は、A, C, D現場では5 mm程度、B現場では9 mm程度であった。

表-5.7 山留め壁水平変位の計測概要

現場名	計測深さ (m)	掘削深さ (m)	測定間隔 (m)		比較した施工段階数
			固定式	挿入式	
A	30~34	11.2~20.5	1.0	1.0	3断面 1ステップ
B	23	17.2	2.0		1断面 5ステップ
C	24	8.6			1断面 2ステップ
D	23	12.5			1断面 2ステップ

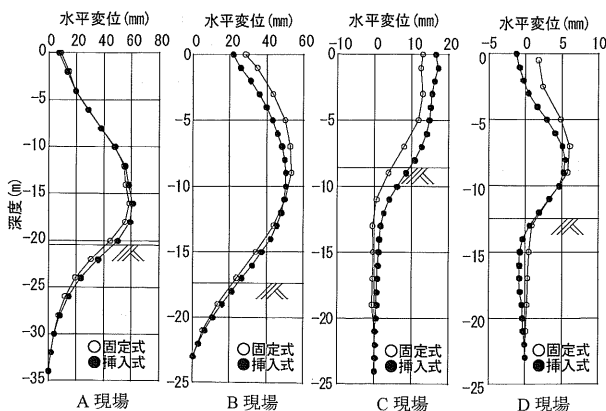


図-5.11 各現場の山留め壁水平変位分布（最終段階）

図-5.12は、各現場の全施工段階（1~5ステップ）での同一深さにおける、固定式と挿入式の傾斜角を比較したものである。得られた傾斜角は $\pm 7.0 \times 10^{-3}$ radの範囲に分布した。

固定式と挿入式で顕著な大小関係は見られず、両者の傾斜角の差は、おおむね 1.0×10^{-3} rad以下であった。水平変位に換算すれば、固定式傾斜計と挿入式傾斜計の差は、深さ1.0 mあたり1.0 mm程度以内という結果であった。

5.4.2 異なる計測方法による構造物鉛直変位の比較

既設構造物側での計測として、トンネルあるいはボックスカルバート等の地中構造物を計測対象とする場合、一般に、工事の影響が懸念される範囲で、構造物の縦断方向にいくつかの測点を設け、鉛直変位の計測が行われる。ここでは、現場に近接する地下鉄シールドトンネルの鉛直変位を、光学式レベルおよび連通管式沈下計で計測し、両者の結果を比較・検証した例を示す。

表-5.8はE~G現場の3事例での計測概要である。地下鉄シールドに接する掘削工事の幅は56~86 m、近接距離は1.6~14 mである。光学式レベル、連通管式沈下計の設置間隔（測定間隔）は各現場20 mである。

図-5.13は、各現場の工事最終段階における近接する地下鉄シールド縦断方向の鉛直変位分布例である。鉛直変位は、E現場とG現場では主に隆起方向（+方向）に、F現場では主に沈下方向（-方向）に発生した。

光学式レベルと連通管式の最大変位差は、E現場とF現場で1.0 mm程度、G現場で2.5 mm程度であった。なお、G現場は最終段階直前に、他の近接地下工事の影響で基準水槽の移動の可能性が懸念されていた。

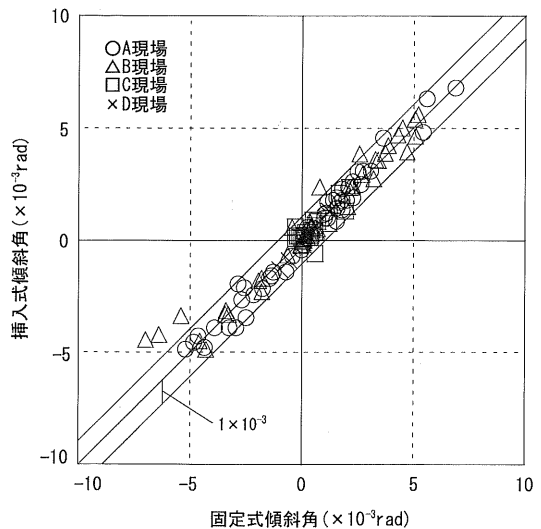
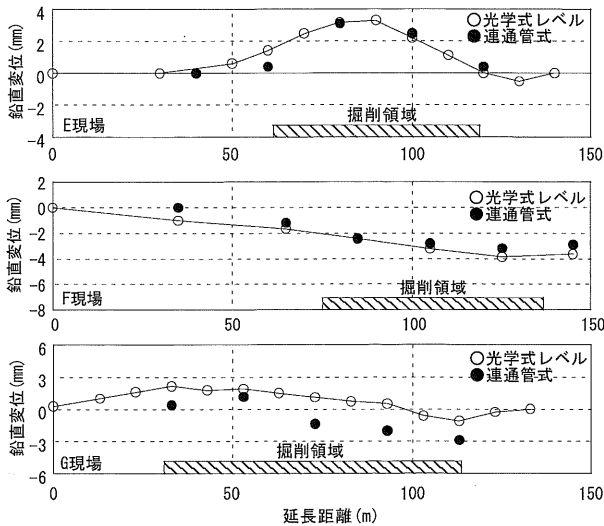


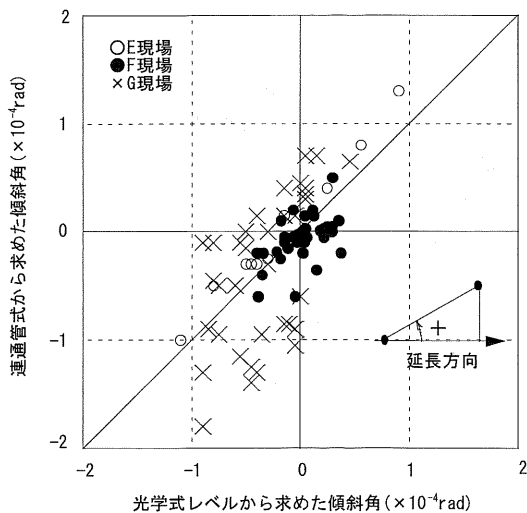
図-5.12 同一位置・深さでの傾斜角の比較

表-5.8 地下鉄構内での鉛直変位の計測概要

現場名	近接する掘削工事		計測	
	掘削幅 (m)	最小離れ (m)	設置間隔 (m)	比較した施工段階数
E	56	1.6	20	4ステップ
F	58	6	20	7ステップ
G	86	14	20	6ステップ



図—5.13 近接する地下鉄シールドの鉛直変位(最終段階)



図—5.14 連通管式沈下計と光学式レベルの傾斜角比較

図—5.14は、各現場の全比較段階(4~7ステップ)で、対応する同一区間の傾斜角を比較したものである。傾斜角は延長に対して増加する方向を正としている。

測定値のばらつき傾向は現場により異なり、E現場では連通管式の値が光学式レベルよりも+方向に測定される傾向が見られた。両者の最大差は、E現場では 3.0×10^{-5} rad程度、F現場では 5.0×10^{-5} rad程度で、連通管式の基準水槽が動いた可能性のあるG現場では 1.0×10^{-4} rad程度であった。

気温変化が少ない構内計測で、基準水槽の設置が正しくなされる条件であれば、連通管式沈下計と光学式レベルの鉛直変位測定値の差は、距離20 mに換算して最大1.0 mm程度という結果が得られた。

5.4.3 比較事例の結果に対して

ここに示した二つの事例では、異なる計器あるいは計測方法による測定結果の差は、一部の現場を除き、比較的小さいという印象を受ける。ただし、計測方法の異な

る5.4.2などの場合、一般的な傾向として捉えるには、より多くの事例での比較・検証が必要と考えられる。

なお、ダブルチェックによって、両者の結果がほぼ一致すれば、測定結果の信頼性はかなり高まるが、無視できない差が生じた場合、どちらが信頼できるかは、測定値の単純な比較のみからは判断が困難である。個々の測定値の誤差・ばらつきには何らかの原因があり、5.3に記述したように、各計器・計測方法の特性および環境的要因を考慮して判断すべきである。

5.5 おわりに

計測に要求されるのは、一言で言えば「信頼できるデータを確実に採る」ことである。ここで、JISでは、計測用語における「真の値」を、以下のように定義している⁶⁾。

- 真の値：ある特定の量の定義と合致する値(備考：特別な場合を除き、概念的な値で、実際には求められない)
- (取決めによる) 真の値：取決めによって、ある目的に対して妥当な不確かさをもつものとして受け入れられた値(備考：標準器については、それが確実に持つ値)

上記によれば、「計測によって、実際の構造物の真の変形・応力を捉えることは、元来、不可能で、ばらつきの中から信頼できる値を読み取れ」と解釈できる。

これまで述べたように、近接工事における計測では、計器特性の問題や環境的要因の影響を受けやすく、「信頼できる値」を得ることは容易ではない。ただし、「真の値」と「信頼できる値」との間には、人間の工学的判断が介入する余地がある。測定値のばらつきが避けられなくとも、計画時にそれを予測し、また、得られた結果を適切に評価することによって、計測の本来の目的は、十分果たすことが可能である。

なお、傾斜計の室内安定性試験結果は、(株)フジタの社内資料を引用したものである。末筆ながら、データを提供いただいた丸 隆宏氏(建築本部 建築統括部)はじめ、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 土質工学会編：現場計測計画の立て方，1990。
- 2) 地盤工学会編：計測結果の解釈と計測管理，1999。
- 3) 小室真一・大西靖和・細川 実・丸田春樹・青木龍之：磁気センサを用いた構造物の変位測定方法(その1)・(その2)，第38回地盤工学研究発表会，pp. 79~82，2003。
- 4) 大西靖和：傾斜計による山留め壁の水平変位における累積誤差，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 385~386，2003。
- 5) 日本建築学会山留め設計小委員会：シンポジウム山留め設計の諸課題，pp. 144~150，2006。
- 6) 日本工業規格：JIS Z 8103 計測用語，2000。