

各論 最近の計測技術と計測管理の考え方

大西 靖和*

1. はじめに

計測は、観測施工において中心的な役割を担っており、視点を変えれば、計測データを活用して次段階以降の施工にフィードバックできる体制を備えた「計測管理」を「観測施工」と見ることができる。観測施工の形態はさまざまであるが、山留め工事は任意仮設として扱われることも多く、施工途中の計測結果に基づき、安全性を確保するための対策の実施、あるいは過剰な計画の修正が可能な工事の一つである。

本稿では、観測施工とその情報活用において、主に山留め掘削工事を対象として、最近の計測技術と計測管理の考え方について記す。

2. 最近の計測技術

2.1 計測技術の傾向と新しい計器

最近の計測技術の傾向を以下に掲げる。

- ① パーソナルコンピュータの普及
- ② インターネット等の通信技術の発達
- ③ 新しいセンサ・計測方法の開発・適用

このうち、パーソナルコンピュータの大容量化・高速化・低価格化による普及は、計測機器の制御、データの収録・処理、データ転送など、一連の計測業務を省力化するとともに、膨大な計測データの処理を可能とした。またデータ転送では電話回線、さらにインターネットの利用も一般的となり、データの共有化にも寄与している。

センサについては、レーザーや画像処理技術等を応用した各種計器が普及し、計測方法・計器選定の際のメ

ニューが豊富となった。一部ではケーブルの配線を不要としたワイヤレス・センサも実用化されている。

ただし一方では、ハード・ソフトともにブラックボックス部分が増大し、計測上のトラブル対応や結果に対する判断が迅速に行なわれないという弊害も生じている。管理・責任体制を明確にし、関連部署間の連携をスムーズに行なうことが、以前にもまして重要である。

なお、最近の計器の中には古くから用いられている測定原理・方法を改良・応用したものがいくつか見受けられる。それらの例を以下に紹介する。

2.1.1 自動挿入式傾斜計・回収式固定傾斜計

山留め壁の水平変位の計測には、通常、挿入式あるいは固定式（埋設型）傾斜計が用いられる。両者は状況に応じて使い分けられているが、従来、挿入式は手動であること、埋設型では計器等に異常・損傷が生じた際の対応が困難であるという問題があった。

これらを改善するために、挿入式傾斜計では計器の巻上げ・反転を自動化したもの（写真-1）、固定式では必要に応じて回収が可能な多段式（ローラー型）傾斜計が実用化されている。

2.1.2 デジタルレベル

既設構造物の鉛直変位の計測には、連通管式（水盛り式）沈下計が用いられることが多いが、一方でデジタルレベルを用いた自動計測が行なわれている。本計器は、標尺のバーコード画像をCCDによって自動認識するもので、従来の光学式レベルに比べてばらつきの少ない測定値を得ることができる。

写真-2は、駅舎外壁面の柱に複数のデジタルレベル



写真-1 自動挿入式傾斜計の例（自動制御技術研究所提供）



写真-2 デジタルレベルによる計測例

*ONISHI Kiyokazu エルメス計測工業(株) 取締役 | 神奈川県大和市下鶴間2792-2

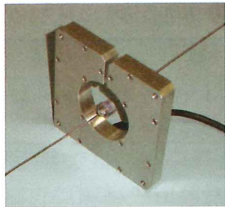


写真-3 ワイヤ式変位計の例

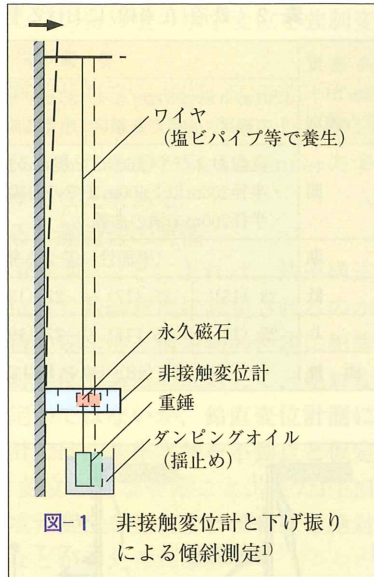


図-1 非接触変位計と下げ振りによる傾斜測定¹⁾

と標尺を交互に連続して設置した例である。本方法は、2点間あるいは3点間の相対鉛直変位（図-5参照）によって管理するのに適している。

2.1.3 ワイヤ式非接触変位計

水糸・ワイヤ・下げ振りによる手動計測は古くから行なわれているが、構造物の傾斜（倒れ）を、ワイヤ式非接触変位計（写真-3）と下げ振りを組合わせて測定する方法を図-1に掲げる¹⁾。

構造物の傾斜測定には、一般に傾斜計が用いられるが、剛体と見なせない高架橋や建物では、傾斜計の設置箇所によって傾斜角が異なる。図-1の方法は、重力を利用した単純な構成で、上下2点間の相対水平変位から、信頼性の高い2方向の傾斜角を得ることができる。

なお、写真-3の計器はワイヤを水平方向に張り、構造物の鉛直・水平変位計測にも用いられている²⁾。

2.2 測定値の信頼性

2.2.1 外乱による測定値の変動

測定値は、図-2に示すように、対象とする工事以外にさまざまな外乱（環境的要因）の影響を受ける。特に問題となるのは温度変化・日射の影響による変動で、対象構造物の温度伸縮と計測機器・装置の温度特性に起因する¹⁾。後者は、本来無視できるのが望ましいが、前者の構造物の温度伸縮は避けられない現象である。

問題となるのは、外乱の影響による測定値の変動量が、工事の影響によって生じる変動量に対して無視できない場合である。計画時点に影響要因と変動傾向・変動量を予測するのは困難で、影響工事開始前の事前計測によらざるを得ない。

2.2.2 計器に要求されるべき性能

計器の測定精度・誤差は、一般に「非直線性」のみから評価されることが多いが、実用上、 $\pm 1 \sim 2\%RO$ （RO：定格出力）程度の非直線性が問題になることは稀である。「動かないものを測るのが最も難しい」といわれるように、計器に要求されるべき性能は非直線性よりも、むしろ時間経過に対する「安定性」と繰返し変動

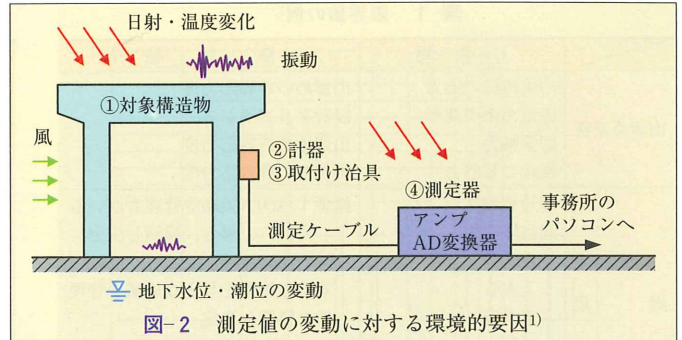


図-2 測定値の変動に対する環境的要因¹⁾

に対する「再現性」である。具体的には温度特性、ヒステリシス特性等がこれに当る。これらは、長期の安定性試験・繰返し試験あるいは事前計測期間の結果などに基づき、評価すべきものである¹⁾。

2.2.3 ダブルチェックの推奨

外乱の影響も含めて、測定値の変動が計画・設計時に予想したものと異なる場合など、測定値の信頼性に疑問が生じるケースがしばしば見受けられる。

測定値の信頼性を確認する有効な手段の一つは、複数の計器、あるいは異なる計測方法の併用（ダブルチェック）である。実用的な方法は、以下に掲げるように、自動計測に手動計測または測量を追加するもので、比較事例の結果も報告されている^{1),3)}。

- ①山留め壁の変位計測における埋設型傾斜計と挿入式傾斜計（手動）の併用
- ②連通管式沈下計とレベル測量の併用

3. 計測管理の考え方

計測の対象は、一般に影響を及ぼす側（工事側）と影響を受ける側（周辺地盤・構造物側）に大別されるが、市街地における地下工事は近接工事となるのが大半である。ここでは、主に近接工事における計測管理の考え方について述べる。

3.1 近接工事における近接程度の判定

近接構造物として、道路・鉄道・上下水道・ガス・電気などの公共施設が対象となる場合、一般にその管理者との協議が必要となる。計測管理の要否は工事と既設構造物との関係から判断されるが、公的機関・企業体の多くは近接の程度を以下のように分類している⁴⁾など。

- ①無条件範囲（Ⅰ）（一般範囲）
- ②要注意範囲（Ⅱ）
- ③制限範囲（Ⅲ）（要対策範囲）

各企業体の指針類では、いずれも既設構造物側に対する影響範囲の具体的な設定方法を既設構造物および新たに行なう工事の種別ごとに掲げており、通常、工事範囲が制限範囲（Ⅲ）あるいは要注意範囲（Ⅱ）に入ると計測の対象としている（詳細は各指針参照）。

また指針類によらない場合は、工事側から影響範囲を設定することが多い。掘削工事においては、山留め壁の適切な深さから背面側地盤内に水平線に対して $45^\circ + \phi/2$ （ ϕ ：内部摩擦角）の主動すべり線を仮定し、その内側を影響範囲とするのが一般的な方法である。

表-1 限界値の例⁵⁾

対象物	限界値
山留め壁の応力	山留めの許容応力度
山留め壁の変形	設計クリアランス
切梁軸力	山留めの許容応力度
腹起こし応力	山留めの許容応力度
周辺地盤沈下	傾斜 1/200 (道路等管理者がいる場合、協議し決定)
周辺埋設物	有害な影響を与えない値を管理者と協議し決定
ガス管	
上水管	
下水管	
通信等のケーブル	
地下鉄	
周辺構造物	

表-2 鉄道(在来線)における整備基準値の例⁴⁾

最高速度 (km/h)	整備基準値				
	120km/h以上の変位の種別	95 km/h を超える線区	85 km/h を超える線区	45 km/h を超える線区	45 km/h 以下の線区
軌間	・直線および半径600mを超える曲線 20 (14) ・半径200m以上600mまでの曲線 25 (19) ・半径200m未満の曲線 20 (14)				
水準	(平面性に基づき整備を行なう)				
高低	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	32 (24)
通り	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)	32 (24)
平面性	23 (18) (カントのてい減量を含む)				

(単位: mm)

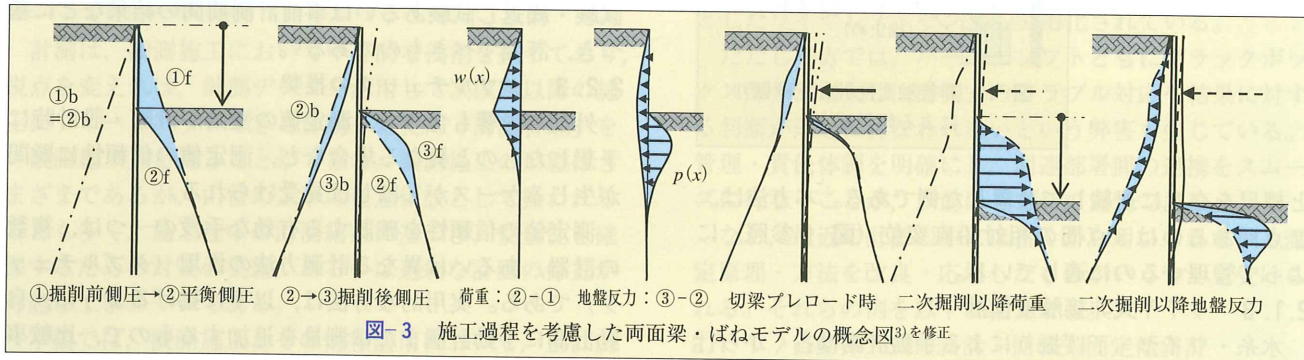


図-3 施工過程を考慮した両面梁・ばねモデルの概念図³⁾を修正

3.2 限界値および管理値

山留め掘削工事における限界値(許容値)は、一般に山留め架構の安全性と、周辺に対する影響の程度から設定される。日本建築学会の山留め設計施工指針には、限界値の例として表-1が示されている⁵⁾。

ここで、山留めの各部材強度に関する限界値は、材料の許容応力度(限界強度)に基づき設定することに大きな問題はないが、変形の限界値は一概に設定できない。

近接工事における周辺に対する限界値は、公共構造物の場合、近接程度の判定と同様、対象構造物の管理者との協議によって設定することとなる。鉄道構造物を例にとれば、通常以下の2点について考慮し、クリティカルな方で限界値を設定する。

- ①列車走行に対する安全性(軌道狂い・建築限界)
- ②構造物の安全性・健全性・使用性(機能)

上記①に対する限界値として、鉄道のマニュアル⁴⁾では、表-2に示すような軌道の整備基準値を準用することが示されている(表-2の各用語の定義は文献参照)。また、②については解析的検討(3.3.2参照)によることになるが、RC構造物では、①よりも②による限界値の方が小さいのが一般的である。

なお、管理値は限界値の60%を一次管理値(警戒値)、80%を二次管理値(工事中止値)というように、通常2~3段階に設定し、管理フローを作成する。

3.3 山留め掘削工事における予測評価技術

観測施工では、計測データとともに、ある施工段階での状況を判断し、さらに将来を予測するための評価技術が必要である。山留め掘削工事を対象にすれば、基本となるのは山留め解析技術、近接工事において周辺地盤・

構造物の検討が必要な場合には、影響評価技術がそれに加わる。以下、各々について記述する。

3.3.1 山留め解析技術

山留め設計法として最も一般的なものは、梁・ばねモデルによる解析法(いわゆる弾塑性法)であるが、ある施工段階までの計測データから、その後の山留めの挙動を予測するには、順解析を繰り返すにしろ、回帰分析による逆解析手法にしろ、設計法以上に高い再現性を有する解析モデルを用いるのが望ましい。

再現性の高い解析法の一つとして提案されている梁・ばねモデルの概念図を図-3に示す。本解析モデルは、山留め壁の両面にばねを設定し、施工過程を考慮した方法で^{6),7)}、多くの実測事例に対するシミュレーション解析の結果より、従来の梁・ばねモデルに比べ実測値によく近似できる結果が得られている³⁾。

なおわが国では、設計法として有限要素法(FEM)が用いられることは少ないが、実測結果による検証を積重ねれば、梁・ばねモデルに替わる有効な手法になり得るものと考えられる。

3.3.2 周辺地盤への影響評価技術

山留め掘削工事における周辺地盤の主な挙動をあげると、以下のとおりである。

- ①山留め壁の水平変位に伴う沈下
- ②掘削に伴う地盤の隆起(リバウンド)
- ③地下水位の低下に伴う沈下

これらの検討は、FEMによる地盤変形解析や浸透流解析、圧密による地盤沈下の検討などによるのが一般的である。このうち、①に対して最も一般的に行なわれている方法は、図-4に示すように、二次元FEM解析モデ

ルにおいて、別途算定した山留め壁の水平変位を強制変位として入力する方法である。

また、②に掲げた地盤のリバウンドは、①の沈下と相殺されるが、実現象では浮上りが卓越することも多い。図-4では①と同時に求められるが、Steinbrennerの多層近似解等で別途算定することもある。

3.4 近接工事における計測管理の実情

近接協議での実態調査結果³⁾などによれば、鉄道構造物での限界値は絶対変位量で数mm程度に設定されるのが大半のようである。軌道の安全性と構造物の性能に影響を及ぼすのは、本来相対変位であるのに対して、絶対変位で管理される理由は定かではないが、鉛直変位計測に使用する連通管式沈下計では、基準水槽を不動点と仮定すれば各測定値は絶対変位と見なせること、またFEM等による解析結果は、境界変位を無視すればやはり絶対変位と解釈できることなどが考えられる。

一方、筆者らが関係した鉄道構造物の計測では、デジタルレベルあるいはワイヤ式変位計（写真-2、写真-3参照）を使用し、図-5に示すように、3点間相対変位で管理した例がある。3点間相対変位は、表-2に示した軌道整備基準における「高低」・「通り」（いずれも10m弦に対する中点の変位）に相当するもので、さらに曲率に換算し、構造部材の曲げ応力の限界値と関連づけた例もある。ただし、これらの方法は、 $\pm 0.5 \sim 1$ mm程度の測定精度では困難で、連通管式沈下計等による計測では推奨できない。

3.5 現状の問題点・今後の課題

評価技術も含め、計測管理における現状の問題点・今後の課題を以下に列挙する。

- ① 現状の近接程度の判定方法は、主に土の破壊基準や支持力理論を根拠にしたものであるが、実現象における影響範囲とは、やや違和感がある。周辺地盤の許容変形量は、通常、数mm～数cmであることを考えると、既往の実測結果に基づき、地盤の変形特性と関連づけた判定方法の検討・提案が望まれる。
- ② 既設構造物の事前影響解析結果を根拠に限界値が設定される場合、厳しい限界値が設定されることが多く、事前計測の段階で管理値・限界値を超えることがしばしば生じる。ある設計体系に基づいた現状の解析手法による結果が、実際の応力・変形と、どの程度整合しているかは疑問で、調査・実測結果による検証によって評価技術の信頼性を高めると同時に、計測の実情を考慮して管理値を定める必要がある。
- ③ 管理者側・施工者側ともに、一部で画一的な評価・管理方法を望む傾向が見られる。実際の地盤・構造物・工事の条件を、適切に反映すべきである。
- ④ 現状の計測では、変形による管理が大半である。構造物の部材応力を、精度よく把握できる計測技術の確立が望まれる。

4. おわりに

建設分野で行なう一般的な計測および使用する計測機

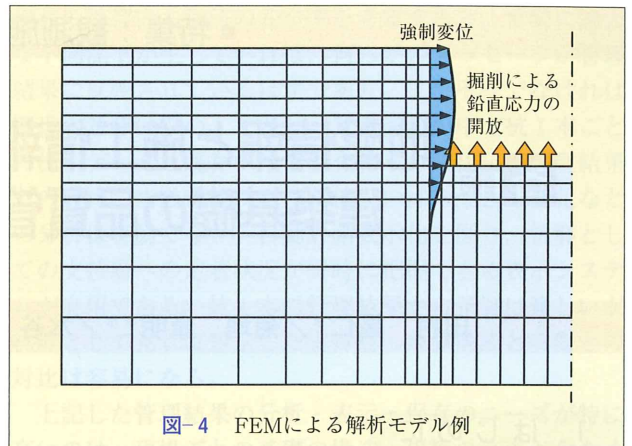


図-4 FEMによる解析モデル例

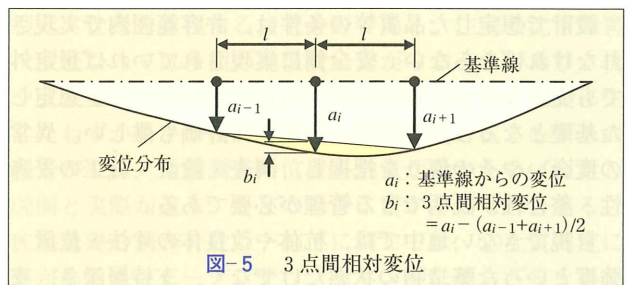


図-5 3点間相対変位

器は、「計量法」の対象から外れるものである。それが理由というわけではないが、計器特性や外乱による測定値の変動等については、従来、機器メーカー・計測業者側の説明も十分とはいえず、曖昧なまま実施されてきた面がある。その一方で、地下工事は事故を防止できればよかった時代から、周辺への配慮が重視される時代となり、ますます厳しい管理が要求される傾向にある。

3.5に掲げた問題点の根底には、既設構造物の管理者側と施工者側、あるいは解析技術者と計測管理者の立場上の違いによるものもあると考えられるが、計測技術および評価技術の現状の問題点を互いに理解し、各々の技術を高めることによって、計測管理あるいは観測施工の価値を今まで以上に高められるものとする。

参考文献

- 1) 大西靖和, 内山伸: 講座 近接工事の調査・設計・施工技术 5. 近接施工での計測技術, 土と基礎, Vol. 55, No. 7, pp. 53~60, 2007.
- 2) 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.
- 3) 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, 2006.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007.
- 5) 日本建築学会: 山留め設計施工指針, 2002.
- 6) 大西靖和, 石崎長俊: 山留め壁に作用する側圧の評価 (その1)・(その2), 第31回地盤工学研究発表会, pp. 1865~1868, 1996.
- 7) 實松俊明, 下村修一, 鈴木康嗣: 施工過程を考慮した累加計算法に基づく山留め解析法 (その1)・(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 533~536, 2005.