共同研究報告書

整理番号第 530 号

長期観測を可能にする
地中変位観測技術の開発

－孔内傾斜計の小型・軽量化－

共同研究報告書

令和 3 年 7 月

国立研究開発法人土木研究所

応用地質株式会社

多摩川精機株式会社

坂田電機株式会社

株式会社オサシ・テクノス

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は，国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書

整理番号第 530 号

長期観測を可能にする
地中変位観測技術の開発

－孔内傾斜計の小型・軽量化－

共同研究報告書

【要旨】

本報告書は，土木研究所地すべりチームと民間企業 4 社が，平成 29 年度から令和元年度にかけて実施した共同研究「長期観測を可能にする地中変位観測技術の開発」の成果である。本共同研究では，地すべりの変位によって計測不能となったガイド管の実態調査の結果を踏まえ，小型・軽量な 3 タイプの新型計器を開発した。

キーワード：地すべり，すべり面調査，孔内傾斜計，ガイド管

表　本共同研究の担当者一覧（令和 3 年 7 月時点）

所属	役職	氏名
（国研）土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム	上席研究員	杉本　宏之
（国研）土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム	元　上席研究員	藤平　大
（国研）土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム	主任研究員	竹下　航
（国研）土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム	元　研究員	高木　将行
応用地質（株）本社海外グループ事業本部	副本部長	荘司　泰敬
応用地質（株）計測システム事業部	副事業部長	谷川　正志
応用地質（株）計測システム事業部防災システム部	副部長	伊藤　義行
応用地質（株）砂防・防災事業部技術部（高知営業所駐在）	グループリーダー	古宮　一典
応用地質（株）砂防・防災事業部技術部	グループリーダー	千葉　伸一
応用地質（株）計測システム事業部製品技術部	グループリーダー	小澤　健志
応用地質（株）計測システム事業部製品技術部	専任職	石川　貴規
応用地質（株）砂防・防災事業部技術部（金沢営業所駐在）		加茂　圭祐
多摩川精機（株）スペーストロニックス研究所 TUG-NAVI 開発課	主任技師	中村　友計
多摩川精機（株）スペーストロニックス研究所 TUG-NAVI 開発課	担当	片山　諒一
多摩川精機（株）スペーストロニックス研究所 TUG-NAVI 開発課	担当	三石　真宏
多摩川精機販売（株）開発営業本部空間技術営業部	課長	今村　清和
坂田電機（株）技術営業部	部長	須賀原　慶久
坂田電機（株）計測工事部	課長	才田　誠
坂田電機（株）技術営業部		長崎　裕仁
坂田電機（株）計測工事部		飯田あゆ美
（株）オサシ・テクノス未来創造部	部長	古島　広明
（株）オサシ・テクノス未来創造部	研究・企画担当	青木　寛明
（株）オサシ・テクノス開発課	係長	須崎　貴広
（株）オサシ・テクノス開発課	係長	近藤　功二

目次

1. はじめに 1
1.1. 研究背景と目的 1
1.2. 実施体制 1
1.3. 活動履歴 1
1.4. 研究の概要と報告書の構成 1
2. 計測不能となったガイド管の実態把握 4
2.1. はじめに 4
2.2. 方法 5
2.2.1. 孔内傾斜計変動図の読取 5
2.2.2. 孔内カメラによる観察 6
2.3. 結果 7
2.3.1. 孔内傾斜計変動図の読取 7
2.3.2. 孔内カメラによる観察 8
3. 新型計器の開発 10
3.1. 開発方針 10
3.2. 試験の概要 11
3.3. 小型挿入式計器 12
3.3.1. 仕様 12
3.3.1.1. 応用地質製 12
3.3.1.2. 坂田電機製 14
3.3.2. 通過性試験 16
3.3.2.1. 試験方法 16
3.3.2.2. 試験結果 18
3.3.3. 現場実証試験 19
3.3.3.1. 試験方法 19
3.3.3.2. 試験結果 22
3.4. フレキシブル型挿入式計器 26
3.4.1. 仕様 26
3.4.2. 通過性試験 28
3.4.2.1. 試験方法 28
3.4.2.2. 試験結果 28
3.4.3. 測定試験 29
3.4.3.1. 試験方法 29
3.4.3.2. 試験結果 30
3.4.4. 現場実証試験 32
3.4.4.1. 試験方法 32
3.4.4.2. 試験結果 32
3.5. 小型設置式計器 35
3.5.1. 仕様 35
3.5.1.1. 応用地質製 35
3.5.1.2. 坂田電機製 37
3.5.1.3. オサシ・テクノス製 39
3.5.2. 通過性試験 41
3.5.2.1. 試験方法 41
3.5.2.2. 試験結果 41
3.5.3. 性能試験 42

3.5.3.1.　試験方法.....42
3.5.3.2.　試験結果.....45
4.　長期観測のための地中変位計測手法の検討 47

1. はじめに

1.1. 研究背景と目的

地すべり調査において，地中にあるすべり面の深度や地すべり土塊の変形状況を把握する調査は重要である。この調査に用いられる手法の 1 つに挿入式孔内傾斜計観測がある。この手法では，計測値として変位量が得られること，深度方向に連続的にデータが得られること，微小な変位も計測できること，現地にはガイド管のみを設置するために長期観測に適している等の特徴を有し，多くの地すべり地において用いられている。

しかし，地すべりの変位速度が大きい場合や観測期間が長期にわたる場合などでは，観測期間中にガイド管が計器の挿入限界よりも大きく変形し，その後の計測ができなくなる事例も少なくない。この場合，新たなガイド管を再設置するまでは観測できず，観測データの連続性が途絶えてしまう。また，計測を続けるためにはガイド管を再設置する必要があり，それには追加の費用や作業が必要となる。そのため，従来よりも計器の挿入限界を拡大し，より大きな変位に対応できるようにすることは重要なことである。

そこで，本共同研究では，従来の計器で挿入できなくなったガイド管においても観測を可能とする，大変位に対応した計器を開発することを目的とした。

1.2. 実施体制

本共同研究は，地中変位観測に関する計測器の製造及び開発技術を有する応用地質株式会社，多摩川精機株式会社，坂田電機株式会社，株式会社オサシ・テクノスの 4 社と土木研究所の公募型共同研究で実施した。

1.3. 活動履歴

本共同研究は，平成 29 年 4 月から令和 2 年 3 月までの 3 年間実施した。表 1-1 に実施工程，表 1-2 に活動概要を示す。

1.4. 研究の概要と報告書の構成

本共同研究では，はじめに計測不能となったガイド管の実態把握を行った（2 章）。その実態を踏まえて新型計器の開発方針を整理し，それに基づいて新型計器の開発を行った。新型計器の性能や適用性を検証するため，屋内での通過性試験，測定試験，性能試験，地すべり地での現場実証試験を実施した（3 章）。これらの結果をとりまとめて，長期観測のための地中変位計測手法を提案した（4 章）。

表 1-1　実施工程

研究項目	研究細目	研究分担		年次計画		
		土研	共同研究者	H29	H30	R1
(1) 計測不能となったガイド管の実態把握	①資料に基づく実態調査	◎	－	↔		
	②現場における実態調査	◎	◎	↔		
(2) 計測器の開発	①計測器の開発	－	◎	↔	↔	
(3) 実証実験	①実験方法，評価方法の検討	◎	○		↔	
	②精度・適用性に関する実験（屋内・屋外）	－	◎		↔	↔
	③従来の計測器との比較実験（屋内・屋外）	○	◎		↔	↔
	④データ解析の検討	◎	◎		↔	↔
(4) 開発計測器の使用法に関するマニュアル作成	①マニュアル作成	◎	○			↔

表 1-2　活動概要

年月日	件名	内容	場所
平成 29 年 11 月 7 日	全体打合せ（1）	・研究の進め方 ・計測不能管の実態調査結果 ・各社から研究方針	土木研究所
平成 30 年 4 月 18 日,25 日	現場予備試験	・計測不能管への挿入性の確認	群馬県 譲原地区
平成 30 年 5 月 9 日	全体打合せ（2）	・計測不能管の実態調査結果 ・現場予備試験の結果 ・実証試験の方法	土木研究所
平成 30 年 11 月 16 日	全体打合せ（3）	・地中動態観測手法の整理 ・変形ガイド管の条件	土木研究所
令和元年 5 月 23 日	全体打合せ（4）	・変形管への挿入結果 ・新型計器の構想	土木研究所
令和元年 11 月 19 日,20 日	現場実証試験（1）	・従来型，新型計器による測定	埼玉県 金崎地区
令和元年 12 月 24 日	全体打合せ（5）	・変形管への挿入結果 ・現場実証試験（1）の結果 ・報告書目次	土木研究所
令和 2 年 1 月 30 日,31 日	現場実証試験（2）	・従来型，新型計器による測定	埼玉県 金崎地区
令和 2 年 2 月 10 日	全体打合せ（6）	・現場実証試験（2）の結果 ・共同研究報告書の作成	土木研究所
令和 2 年 3 月 10 日	全体打合せ（7）	・小型挿入式計器の測定間隔 ・小型設置式計器の性能試験 ・共同研究報告書の作成	WEB 会議

2. 計測不能となったガイド管の実態把握

2.1. はじめに

計測不能となったガイド管（以下，「計測不能管」という。）の実態把握として，挿入式孔内傾斜計の測定限界となる変位量や計器が挿入できなくなったガイド管内部の変形状況を明らかにするため，計測不能管における孔内傾斜計変動図の読取と孔内カメラによる観察を行った。実態把握の対象事例は，表 2-1 に示すとおりで，計 10 地区である。なお，一部の事例では孔内傾斜計変動図の読取，孔内カメラによる観察のどちらか一つのみを行った事例もある。

表 2-1　計測不能管の実態把握の対象事例

地区名	所在地	孔内傾斜計 変動図の読取	孔内カメラ による観察
月山	山形県西村山郡西川町	0	1
譲原	群馬県藤岡市	10	10
金崎	埼玉県秩父郡皆野町	1	9
此田	長野県飯田市	0	3
清水谷	和歌山県 西牟婁郡上富田町	0	6
重山	鳥取県鳥取市	5	3
善徳	徳島県三好市	27	0
怒田・八畝	高知県長岡郡大豊町	3	0
大渡	高知県吾川郡仁淀川町	9	10
藤	宮崎県串間市	3	6
	計	58	48

2.2. 方法

2.2.1. 孔内傾斜計変動図の読取

孔内傾斜計変動図のグラフ形状がせん断変形を示した計測不能管を対象に，計器が挿入できなくなった計測回の前回の変位量（以下，測定限界変位量）と孔内傾斜計計測を開始してから計器が挿入できなくなる計測回の前回までの期間（以下，測定期間）を変動図上で読み取った。計測不能管は 58 孔，そのうち，せん断変形を示した箇所は 62 箇所であった。

図 2-1 に孔内傾斜計変動図上の読取例を示す。図 2-1 に示すように，計器が挿入できなくなった計測回の前回の変位区間の長さと測定限界変位量を読取った。測定限界変位量については，A・B 軸方向それぞれの値から合成値を算出した。また，測定期間については日単位で算出し，不明な場合は月単位とした。

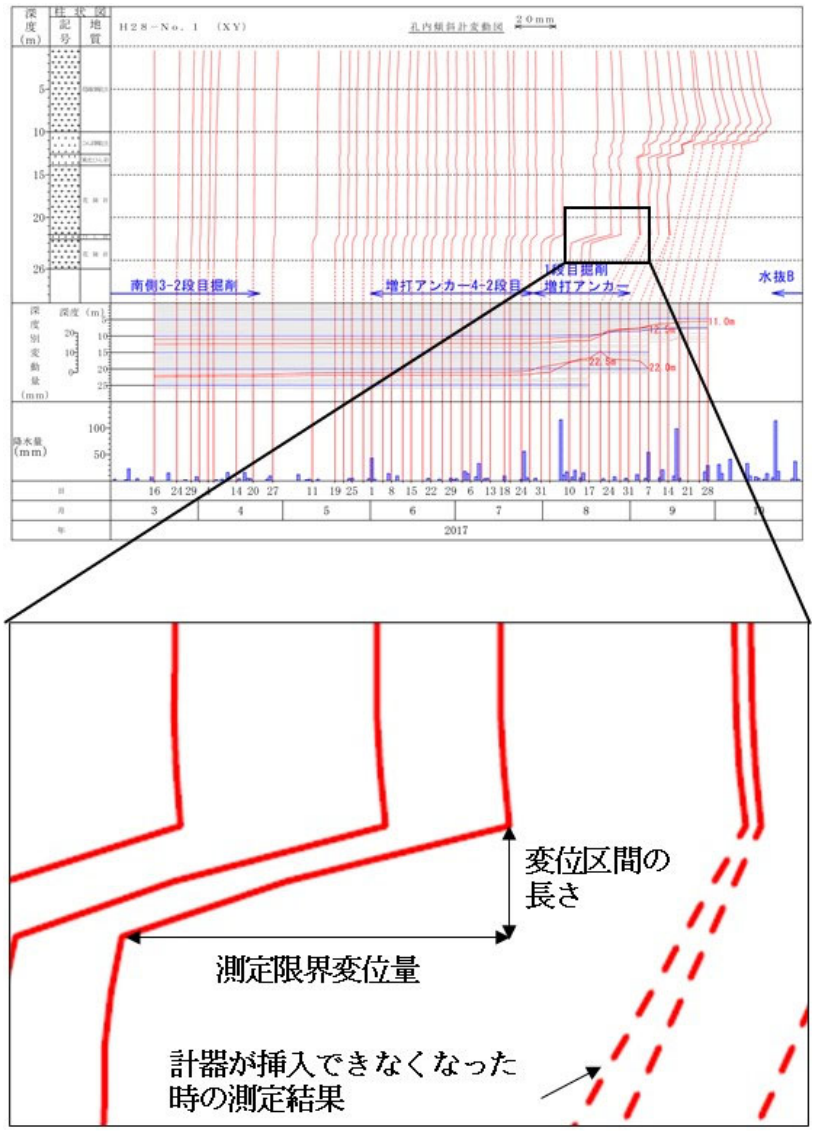


図 2-1　孔内傾斜計変動図上の読取例

2.2.2. 孔内カメラによる観察

孔内カメラによる観察では，計器が挿入できなくなる要因の類型化，変形箇所における内径の推定を行った。対象とした計測不能管は 48 孔であった。使用した孔内カメラは RIDGID 社製の検査カメラで，静止画撮影，動画の機能を有し，カメラ径 25㎜，ケーブル延長 30m である。観察方法については，計測不能管に孔内カメラを挿入し，計器が挿入できなくなった深度やカメラで変形等が認められた深度において，その変形状況を確認した。変形状況等より，計器が挿入できなくなる要因の類型化を行った。

変形箇所における内径の推定では，土砂詰まり，水濁等によって変形状況が確認できない事例を除き，変形が認められた深度ごとに図 2-2 に示すように孔内カメラで撮影した画像上で，変形箇所とその直上の未変形箇所とに内接する円をそれぞれ描いた。そして後者の内径を 50㎜ と仮定し，前者の内径を求めた。ただし，この手法では，変形箇所直上を未変形の断面と見なしていることから，変形箇所の内径の算出に誤差が生じると考えられる。また，本観察は，計器が挿入できなくなってから 1～20 年後に実施していることから，孔内カメラで確認された管内状況は，実際に計器が挿入できなくなった時点での状況とは必ずしも一致していない。そのため，算出した内径を 0㎜ 以上～15㎜ 未満，15㎜ 以上～30㎜ 未満，30 ㎜以上～50㎜ 以下の 3 階級に分け，変形傾向を分析するにとどめた。

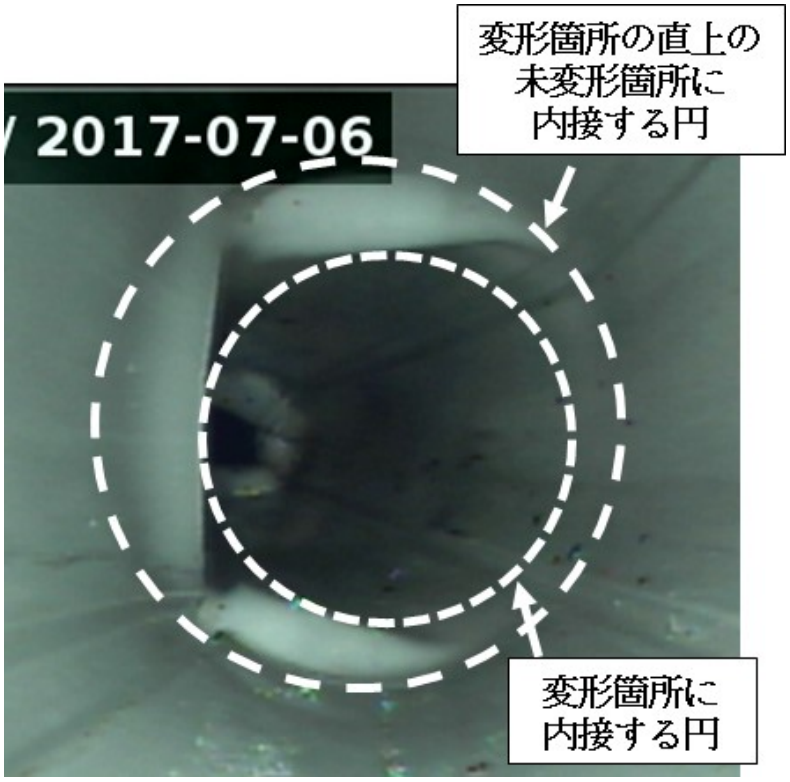


図 2-2　変形箇所における内接円の設定

2.3. 結果

2.3.1. 孔内傾斜計変動図の読取

図 2-3 に変位区間の長さのヒストグラムを示す。変位区間の最頻値は 0.5～1.0m であった。一般的な挿入式孔内傾斜計の計器の長さは 0.5～1.0m 程度（測定区間長は 0.5m）であり，ほぼ同程度の長さである。1.5m 以下が 77%，2.0m 以下が 89%を占め，最大は 4.0～4.5m であった。

図 2-4 に測定限界変位量のヒストグラムを示す。測定限界変位量の最頻値は 20～30mm であり，最大は 100mm 以上であった。20mm 以下で測定限界に至った事例が 39%，30mm 以下が 68%であった。測定限界変位量を，挿入式孔内傾斜計の測定区間長 0.5m 当たりの値に換算して表示したヒストグラムを図 2-5 に示す。測定限界変位量の最頻値は 5～10mm/0.5m となり，最大は 25～30mm/0.5m となった。

図 2-6 に測定期間のヒストグラムを示す。測定期間の最頻値は 0～24 ヶ月となり，最長で約 20（240 ヶ月）年となった。

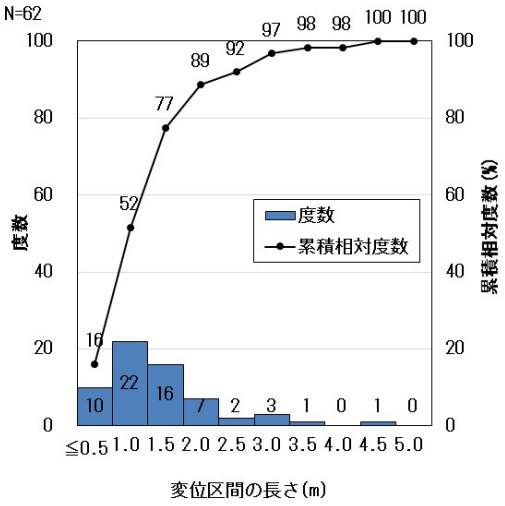


図 2-3　変位区間の長さのヒストグラム

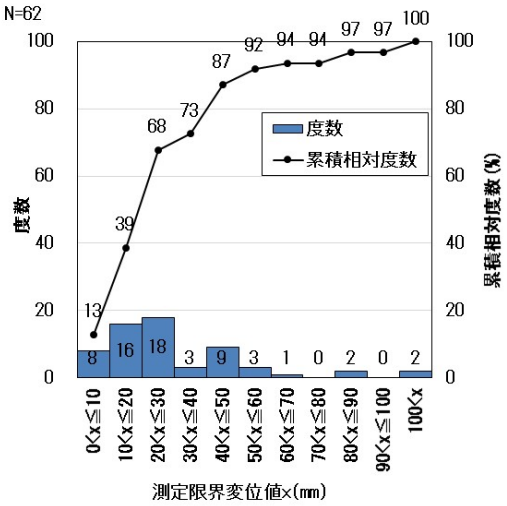


図 2-4　測定限界変位量のヒストグラム

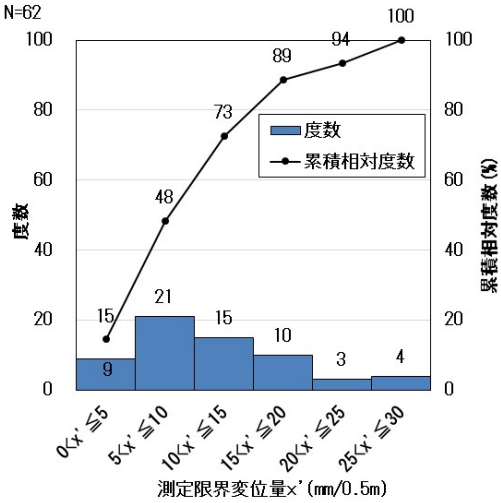


図 2-5　0.5m 当たりの測定限界変位量のヒストグラム

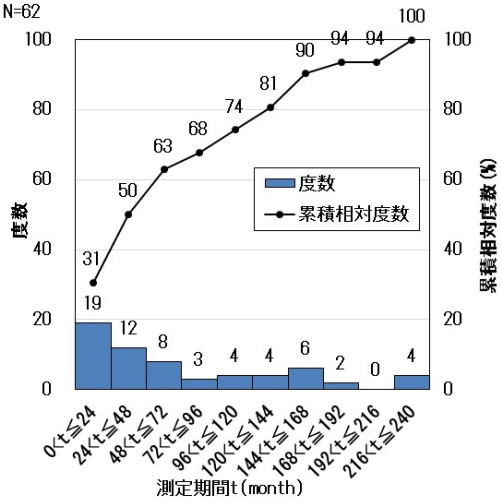


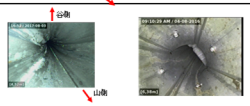
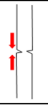
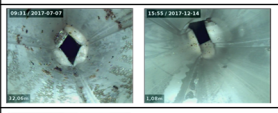
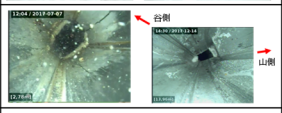
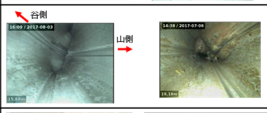
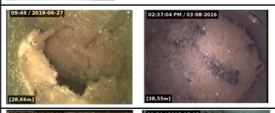
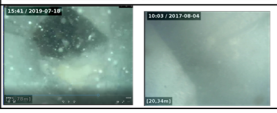
図 2-6　測定期間のヒストグラム

2.3.2. 孔内カメラによる観察

孔内カメラによる観察結果から，ガイド管に計器が挿入できない要因の類型化を行った。表 2-2 に計器が挿入できない要因と変形タイプの一覧を示す。水濁などによって管内状況が不明であった事例を除くと，計器が挿入できない要因は「変形」，「土砂詰まり」，「付着物」の 3 つに大別された。さらに「変形」では，タイプによって「せん断」，「傾倒」，「座屈」，これら 3 つに該当しないタイプを一つにまとめた「その他」，変形の進行によって閉塞したために変形のタイプが確認できない「閉塞」に分類された。図 2-7 に計器が挿入できない要因別の割合，図 2-8 に変形タイプ別の割合を示す。図 2-7 より，計器が挿入できない要因では「変形」によるものが最も多くなり，図 2-8 より，変形タイプでは「せん断」が最も多くなった。

図 2-9 に変形箇所における内径のヒストグラムを示す。変形箇所における内径が 30mm 以上となる事例が 67%であった。この結果から，今回対象とした計測不能管の 2/3 で，内径が 30mm 以上確保されていることが明らかとなった。そのため，計器を小型化することで，計測を継続できる事例が相当数あるものと考えられる。

表 2-2　計器が挿入できない要因と変形タイプの一覧

計器が挿入できない要因	変形タイプ	鉛直方向の模式図	事例	説明
変形	せん断			鉛直方向の数十cm区間にて，2つの変形が互いに向かい合う方向に認められる。方位が確認できた事例では，浅い深度の変形が山側に，深い深度の変形が谷側に生じている。この変形は，地すべりの滑動によって，変形深度以浅となる土塊が谷側に移動したことにより，呈したものと考えられる。
	傾倒			屈折もしくは，湾曲のような変形が認められる。屈折や湾曲が生じた深度を起点にし，以浅が特定方向に傾き倒れているためと考えられる。なお，屈折，湾曲のうち，どちらの変形に呈するかは不明である。
	座屈			管の部材が内側へと巻き込むような変形が認められる。（独）土木研究所ら（2010）によると，座屈となる理由がすべり面付近や破砕帯や空洞部などの軟弱層の存在，管の設置作業時にグラウト充填の不十分のためと報告されている。
	その他			「せん断」，「傾倒」，「座屈」の3つに該当しないタイプを一つにまとめている。
	閉塞			変形の進行によって閉塞したために変形のタイプが確認できない。
土砂詰まり				管内で土砂詰まりが認められる。管が変形により破断したことで，管外から土砂が流入したものと考えられる。
付着物				管壁に付着物が認められる。
不明				水濁により，管内の状況が確認できない。

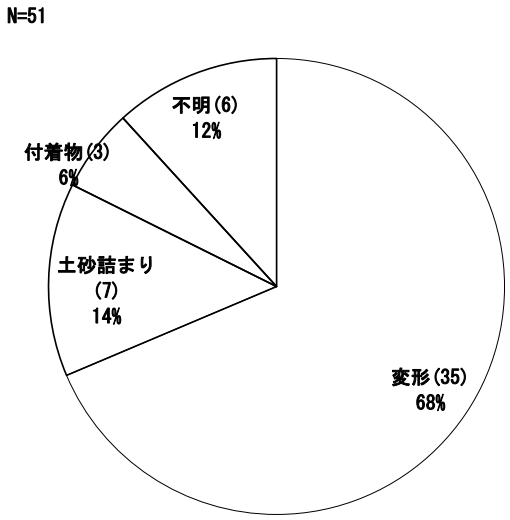


図 2-7　計器が挿入できない要因別の割合

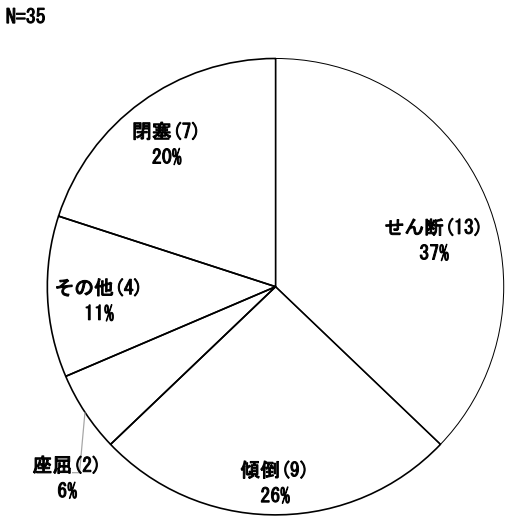


図 2-8　変形タイプ別の割合

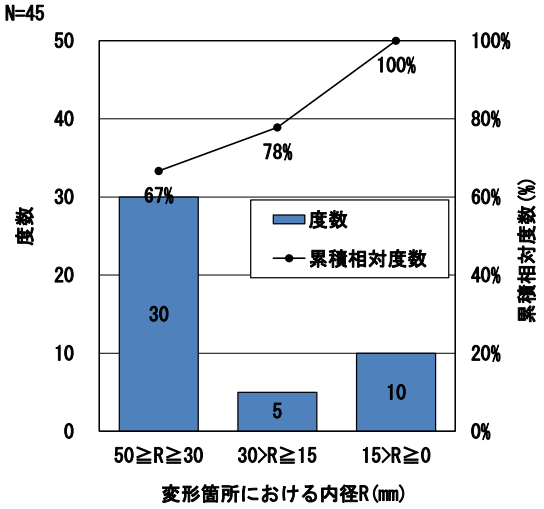


図 2-9　変形箇所における内径のヒストグラム

3. 新型計器の開発

3.1. 開発方針

前章「2.計測不能となったガイド管の実態把握」の検討から，計器を小さくすることで，計測不能管であっても計測が継続でき，さらに長期に渡って計測できる可能性が示された。そのため，新型計器の開発方針は，計器をより小型化して大変位に対応することとし，共同研究に参加した4社それぞれが，下記の3タイプ（①～③）の計器の開発を行った。

タイプ①の小型挿入式計器は，従来の挿入式孔内傾斜計の構造のまま，小型・軽量化した計器である。小型・軽量化することにより，従来の孔内傾斜計に比べて挿入限界の向上が期待できる。このタイプの開発は，応用地質㈱，坂田電機㈱が担当した。

タイプ②のフレキシブル型挿入式計器は，3軸ジャイロと3軸加速度計を組み合わせた慣性計測装置とブラシ形状の保持機構からなる計器である。計器自体が小型で，慣性計測装置と保持機構の中継部がフレキシブルに変形するため，大きく変形した箇所も通過可能である。このタイプの開発は，多摩川精機㈱が担当した。

タイプ③の小型設置式計器は，従来の設置式傾斜計を小型化した計器である。計器の小型化により，従来型に比べて，大きく変形した箇所にでも設置可能である。このタイプの開発は，応用地質㈱，坂田電機㈱，㈱オサシ・テクノスが担当した。

3.2. 試験の概要

新型計器の性能や適用性を検証するために，屋内で通過性試験と測定試験，性能試験，地すべり地で現場実証試験を行った。表 3.2-1 に新型計器における試験の実施状況を示す。

通過性試験は，全ての新型計器を対象とし，変形させたガイド管での計器の通過性を確認した。これは，新型計器の通過性について，従来型挿入式計器との定量的な比較を行うために実施した。

測定試験は，タイプ②：フレキシブル型挿入式計器を対象とし，変形したガイド管を測定し，その形状と測定結果を比較し，測定精度を確認した。

性能試験は，タイプ③：小型設置式計器を対象とし，変形したガイド管内に計器を固定し，任意角度に傾斜させた際の傾斜角の測定精度を確認した。

現場実証試験は，タイプ①：小型挿入式計器とタイプ②：フレキシブル型挿入式計器を対象とし，地すべり地に実際に設置されたガイド管を用いて測定を行い，従来型挿入式計器での測定結果と比較し，新型計器の測定性能を確認した。また，現地で実際の測定作業を行うことで，測定作業における問題点や改善点の抽出も行った。

次節以降，新型計器のタイプごとに計器の仕様，実施した試験の方法と結果を示す。

表 3.2-1　新型計器における試験の実施状況

タイプ	メーカー	通過性試験	測定試験	性能試験	現場実証試験	対応節
タイプ①：小型挿入式計器	応用地質	○	－	－	○	3.3.
	坂田電機	○	－	－	○	
タイプ②：フレキシブル型挿入式計器	多摩川精機	○	○	－	○	3.4.
タイプ③：小型設置式計器	応用地質	○	－	○	－	3.5.
	坂田電機	○	－	○	－	
	オサシ・テクノス	○	－	○	－	

3.3. 小型挿入式計器

3.3.1. 仕様

3.3.1.1. 応用地質製

この小型挿入式計器は，これまで計測できなかった変形を伴うガイド管でも計測ができるように，2 軸の高精度小型 MEMS（Micro Electro Mechanical Systems，微小な電子回路と機械要素を一つの基板上に組み込んだデバイス・システム）センサを採用することで小型化を実現した。ガイド管の潰れによる狭い開口面積に対応するために，計器直径をφ30mm からφ20mm とし，ガイド管の大きな曲がりに対応するために，計器の長さを 660mm から 360mm とした。

また，計器本体の質量は従来型の 1/2 以下となっており，扱いやすいものとなっている。ケーブルは，計器がガイド管から抜けなくなるなどの不測の事態にも対応できるように従来型と同様の高強度高張力タイプを採用し，ケーブル質量は従来と同等である。

従来型と小型挿入式計器の外観を図 3.3-1 に，サイズ比較を図 3.3-2 に，仕様を表 3.3-1 に，小型挿入式傾斜計のシステム構成例を図 3.3-3 に示す。

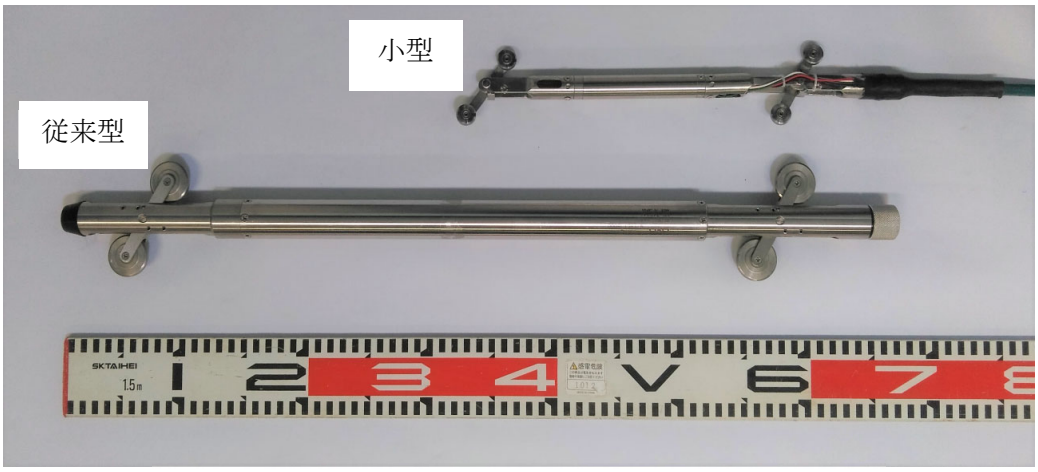


図 3.3-1　従来型と小型挿入式計器の外観

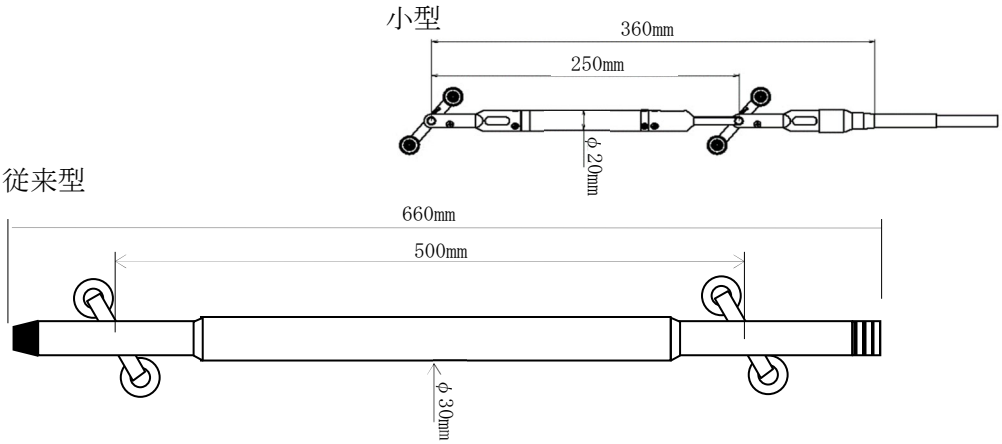


図 3.3-2　従来型と小型挿入式計器のサイズ比較

表 3.3-1　小型挿入式計器と従来型の仕様

項目	小型	従来型（同社製）	備考
長さ	360mm	660mm	
直径	φ20mm	φ30mm	突起部を除く
車輪距離	250mm	500mm	
質量	0.7kg	1.7kg	
測定成分	2 軸（A 軸，B 軸）	2 軸（A 軸，B 軸）	
測定範囲	±20 度	±30 度	
分解能	10 秒以下	10 秒以下	
計測器一式質量	7.5kg	8.5kg	ケーブル 50m

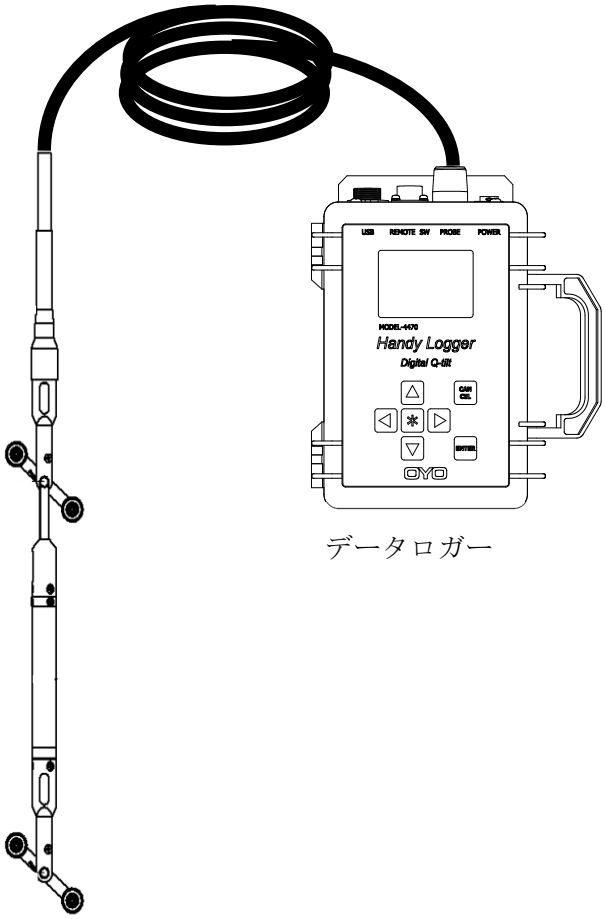


図 3.3-3　小型挿入式計器のシステム構成例

3.3.1.2. 坂田電機製

従来では測定できなかった変形を伴うガイド管でも測定ができるように小型挿入式計器は以下の形状とした。

1) 小型挿入式計器に用いる傾斜計の直径を従来のφ32mm からφ15mm に細くし，潰れによる狭い開口面積に対応。

2) 計器の全長を従来の 779mm から 487mm に短くし，大きな曲がりに対応。

小型挿入式計器に用いる傾斜計の変換方式は差動トランス（コイルと非接触状態の鉄芯の相対変位から電気的出力を取得。温度変化に強く，ノイズや絶縁低下に強い）を採用し，測定範囲は±30 度と大変位にも対応できる仕様とした。小型挿入式計器を細く，短くすることで，ケーブルも含めた全重量は従来の 1/3 となり，かなり軽量化された。そのため，計測器の運搬および測定作業の労力が軽減できる。従来型の挿入式計器と新型の小型挿入式計器の外観を図 3.3-4 に，サイズ比較を図 3.3-5 に，仕様を表 3.3-2 に，小型挿入式傾斜計のシステム構成例を図 3.3-6 に示す。

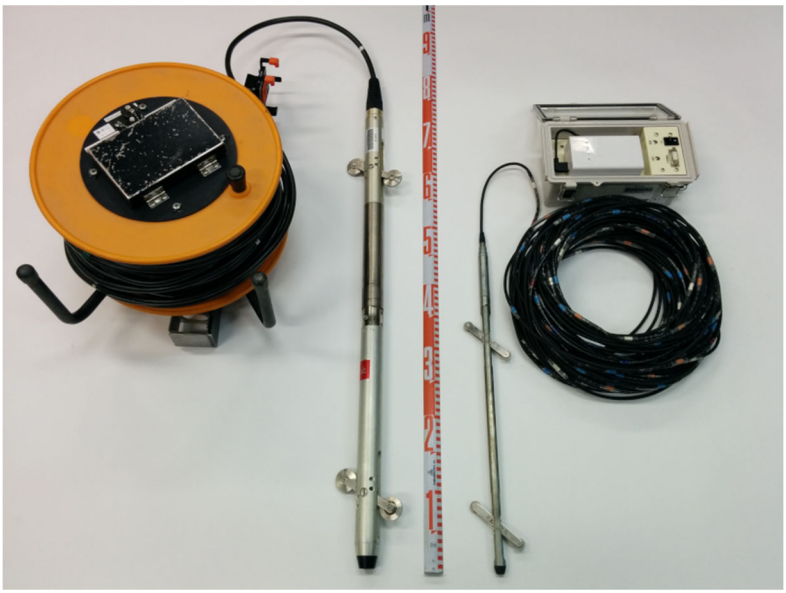


図 3.3-4　従来型の挿入式計器と新型の小型挿入式計器の外観

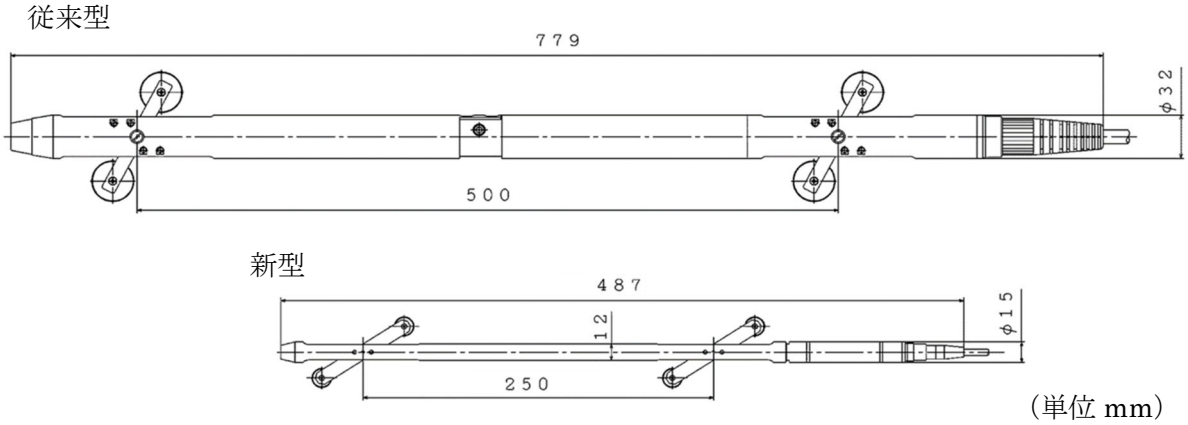


図 3.3-5　従来型の挿入式計器と新型の小型挿入式計器のサイズ比較

表 3.3-2　小型挿入式計器と従来型の仕様

項目	新型	従来型（同社製）	備考
長さ	487mm	779mm	
直径	φ15mm	φ32mm	突起部を除く
車輪距離	250mm	500mm	
質量	0.35kg	1.6kg	
測定成分	1 軸	1 軸	
測定範囲	±30 度	±5 度	他のレンジも可能
分解能	10 秒以下	5 秒以下	
計測器一式質量	4.1kg	11.9kg	ケーブル 50m

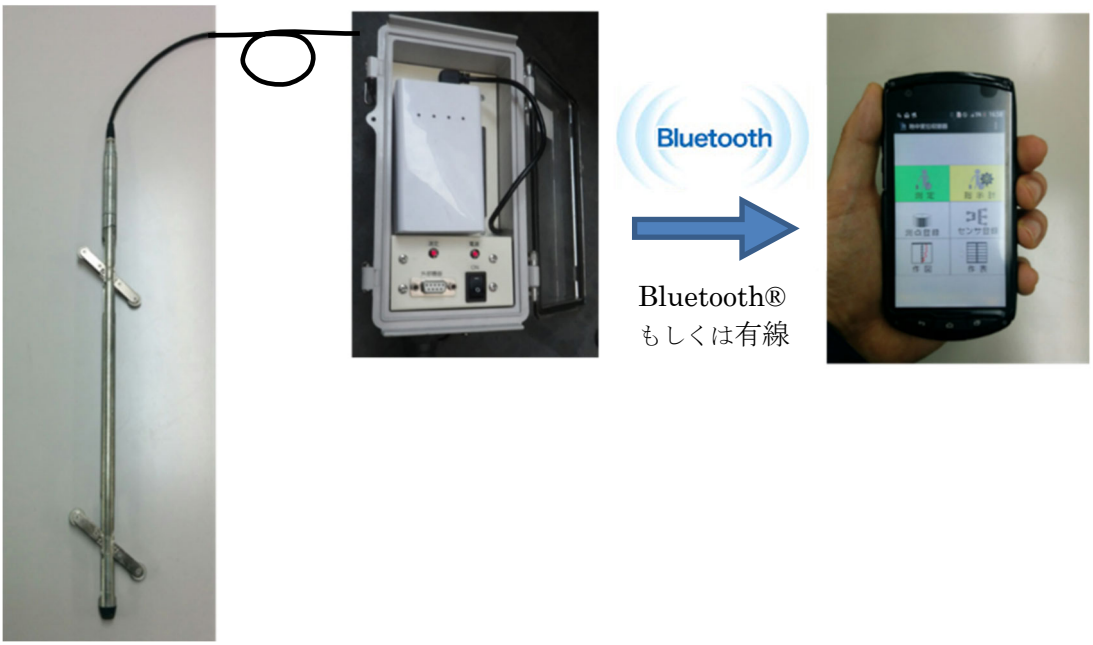


図 3.3-6　小型挿入式計器のシステム構成例

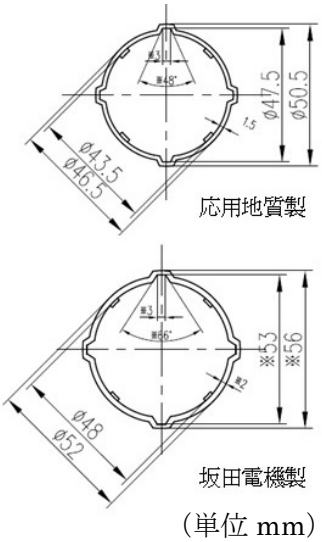
3.3.2. 通過性試験

3.3.2.1. 試験方法

通過性試験では，変形させたガイド管での新型計器の通過性を確認し，従来型挿入式計器の通過性との比較を行った。試験に使用したガイド管は応用地質製，坂田電機製で，それぞれの規格は図 3.3-7 のとおりである。従来型挿入式計器については，応用地質製，坂田電機製の孔内傾斜計と自社ガイド管を組み合わせ，メーカーが推奨する条件で通過性を確認した。新型計器は，実際の現場での使用を想定し，応用地質製，坂田電機製のそれぞれの計器と自社及び異なるメーカー全てのガイド管との組み合わせで通過性を確認した。

ガイド管の変形には，図 3.3-8 の電動式パイプベンダを用いており，図 3.3-9 の軸方向に変形させ，図 3.3-10 のような形状とし，その軸を A 軸とした。ガイド管の変形の程度を示す指標として，屈折角から換算した鉛直方向 0.5m 当たりの水平方向の変位量を用いた。従来型挿入式計器の対象とするガイド管の変位量については，経験的な測定範囲となる 20～40mm/0.5m を対象とした。新型計器の対象とするガイド管の変位量は表 3.3-3 のとおりで，すべての計器で共通に変位量 75mm，100mm のガイド管を対象とし，挿入して測定する小型挿入式計器，フレキシブル型挿入式計器では，さらに大きい変位量のガイド管を対象にした。通過性試験の実施状況は写真 3.3-1 のとおりである。車輪機構を有する計器ではガイド管を通過させる軸を A 軸とした。

なお，後述するフレキシブル型挿入式計器の通過性試験（3.4.2.），小型設置式計器の通過性試験（3.5.2.）も同様の試験方法である。



（単位 mm）

図 3.3-7　ガイド管の規格

図 3.3-8　電動式パイプベンダ

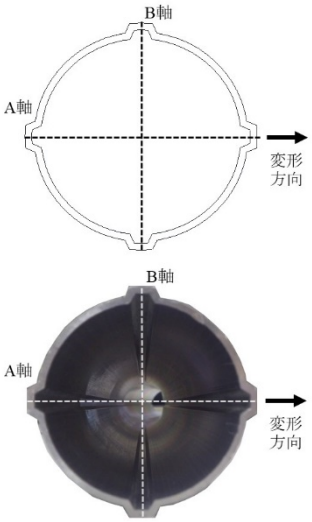


図 3.3-9　ガイド管の
断面図

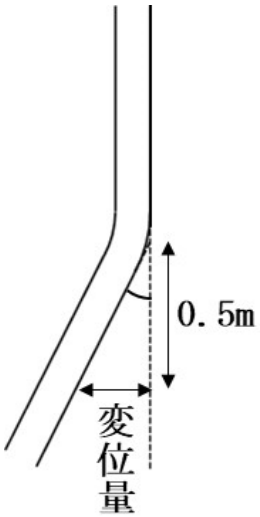


図 3.3-10　変形ガイド管の
模式図

写真 3.3-1　通過性試験の
実施状況

表 3.3-3　新型計器の対象とするガイド管の諸元

	ガイド管メーカー	屈折角	変位量(/0.5m)	従来型挿入式計器での通過限界に対する比	小型挿入式計器	フレキシブル型挿入式計器	小型設置式計器
変形①	応用地質 坂田電機	約 8.5 度	約 75 ㎜	約 2.5 倍	○	○	○
変形②	応用地質 坂田電機	約 11.3 度	約 100 ㎜	約 3.3 倍	○	○	○
変形③	応用地質 坂田電機	約 16.7 度	約 150 ㎜	約 5.0 倍	○	○	-
変形④	応用地質 坂田電機	約 21.8 度	約 200 ㎜	約 6.6 倍	○	○	-
変形⑤	坂田電機	約 37.3 度	約 400㎜	約 13.3 倍	-	○	-
変形⑥	応用地質	約 45.9 度	約 500㎜	約 16.6 倍	-	○	-

3.3.2.2. 試験結果

図 3.3-11 に通過性試験の結果を示す。応用地質製ガイド管を用いた試験（図 3.3-11a）では，従来型挿入式計器（応用地質製）は 32mm/0.5m まで通過でき，35mm/0.5m は通過できなかった。小型挿入式計器は，応用地質製が約 200mm/0.5m，坂田電機製が約 150mm/0.5m まで通過できることが確認された。

坂田電機製ガイド管を用いた試験（図 3.3-11b）では，従来型挿入式計器（坂田製）では 27mm/0.5m まで通過でき，30mm/0.5m は通過できなかった。小型挿入式計器は，応用地質製が約 150mm/0.5m，坂田電機製が約 150mm/0.5m まで通過できることが確認された。

応用地質製と坂田電機製共にほぼ同等の結果となり，従来型挿入式計器の通過限界が約 30mm/0.5m，小型挿入式計器の通過限界が約 150～200mm/0.5m となることが確認された。通過限界となる変位量の比較で，小型挿入式計器の通過性は，従来型挿入式計器の約 5～6 倍程度という結果が得られた。

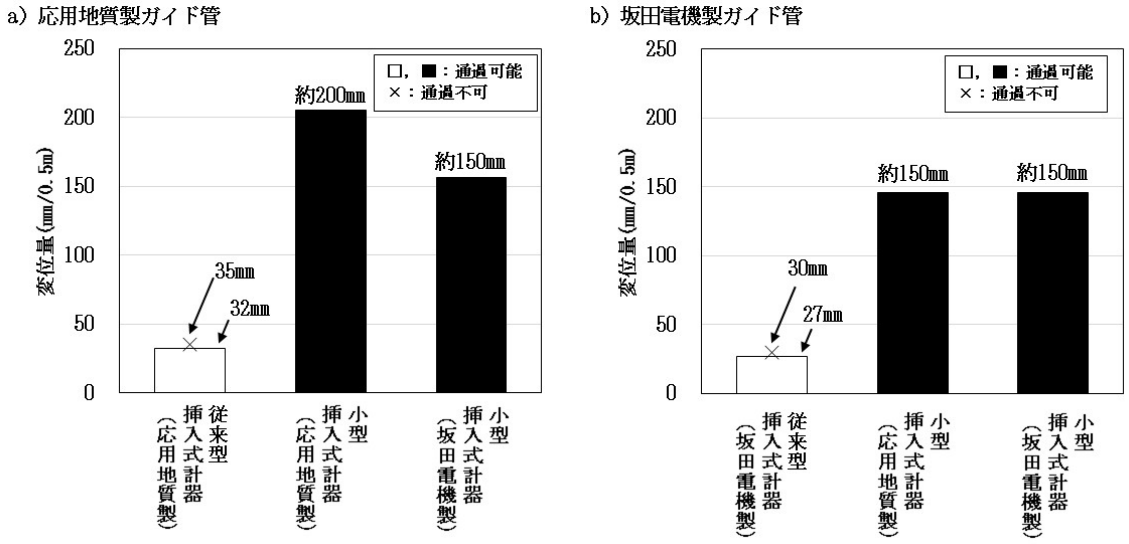


図 3.3-11　通過性試験の結果

3.3.3. 現場実証試験

3.3.3.1. 試験方法

現場実証試験は，埼玉県秩父郡皆野町金崎地区において埼玉県が調査のために設置した既存のガイド管を使用し，孔底まで挿入可能な 1 孔（BV14-3），挿入不能な 2 孔（BV6-3，BV6-4）の計 3 孔を対象とした。従来型挿入式計器，新型計器による測定を行い，両者の測定結果から測定限界深度，測定精度を比較した。

対象とした 3 孔のガイド管の位置を図 3.3-12 に，諸元を表 3.3-4 に示す。孔内カメラで撮影した BV6-3，BV6-4 の管内の変形状況を図 3.3-13，図 3.3-14 に示す。BV14-3 では，従来型挿入式計器を孔底まで挿入することができ，孔内傾斜計変動図によると深度 22～25m に変位が生じていたが，孔内カメラ観察ではその深度を含め管内に明瞭な変形は認められなかった。BV6-3 では，深度 44～45m 付近で従来型挿入式計器が挿入できなくなり，孔内カメラ観察からせん断変形が認められた（図 3.3-13）。BV6-4 では，深度 8～10m 付近で従来型挿入式計器が挿入できなくなり，孔内カメラ観察からせん断変形が認められ（図 3.3-14），その内径がせん断変形の上位の変形で約 38mm，下位の変形で約 40mm であった。深度 24～26m 付近では，水濁して詳細に観察できないが，変形による狭窄が認められた。なお，孔内カメラがこの深度で停止したため，以深の管内状況は不明である。

測定区間は，BV14-3 では変位区間（深度 22～25m）を含む深度 30m までを，BV6-3，BV6-4 では計器が挿入できなくなる深度までを対象とした。測定間隔については，従来型挿入式計器では 0.5m 間隔，小型挿入式計器では 0.25m 間隔とした。なお，試験時間の都合上，計器によっては，一部の孔での測定省略，測定間隔の間引きを行った。孔底保持として，測定開始時に計器を最下深度で保持し，計器温度を孔内温度に近づけ，電気回路を安定化させた。

測定結果については，地表面以下で最も浅い測点を基準点とした孔曲がり図として示している。従来型挿入式計器，小型挿入式計器では，測定深度での傾斜角を変位量に換算し，それらを累積させている。

なお，後述するフレキシブル型挿入式計器の通過性試験（3.4.4.）も同様の試験方法であるが，測定区間を従来型挿入式計器での測定限界深度を含む数 m 区間を対象とし，測定間隔を 0.1m 間隔とした。

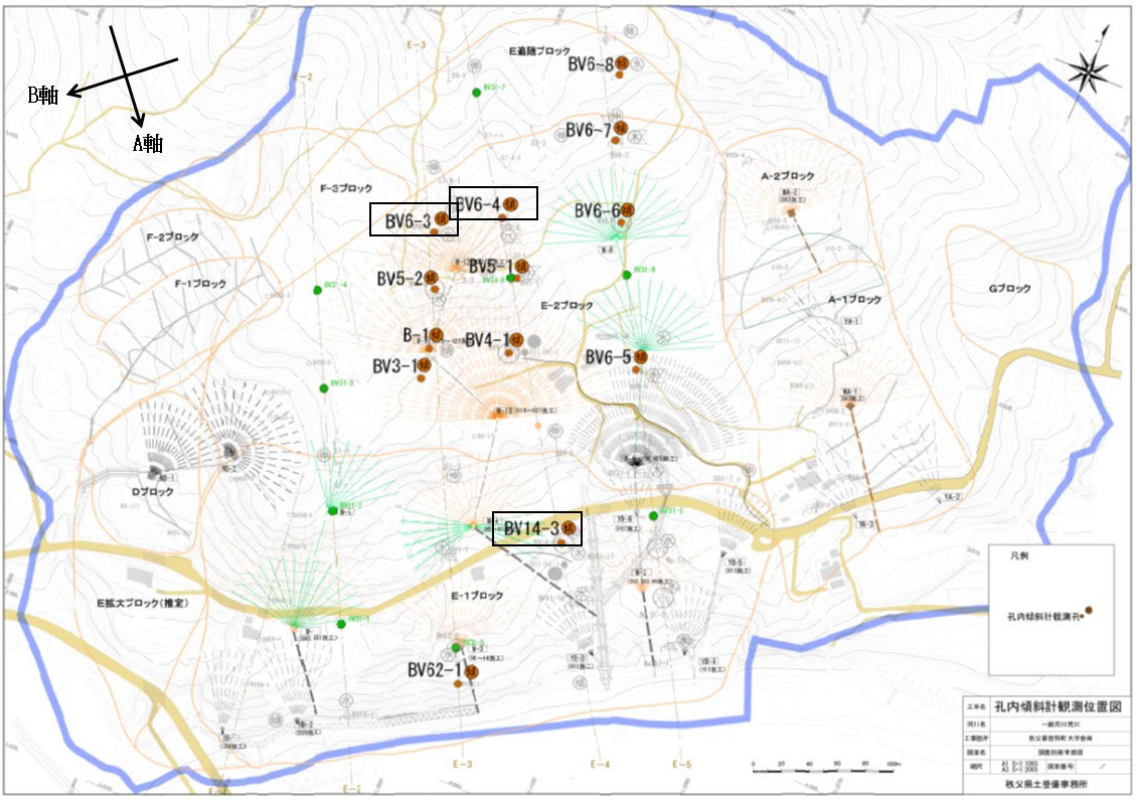


図 3.3-12　ガイド管の位置図（埼玉県提供資料に加筆）

表 3.3-4　ガイド管の諸元

孔名	管長 (m)	内径 (mm)	溝幅 (mm)	変位区間(m:地表基準，下線：従来型挿入型計器による挿入限界深度)				
				区間①	区間②	区間③	区間④	区間⑤
BV14-3	66.5	43	4	22～25				
BV6-3	60	43	4	<u>44～45</u>				
BV6-4	80	43	4	<u>8～10</u>	24～26	29～30	34.5～37.5	44～46

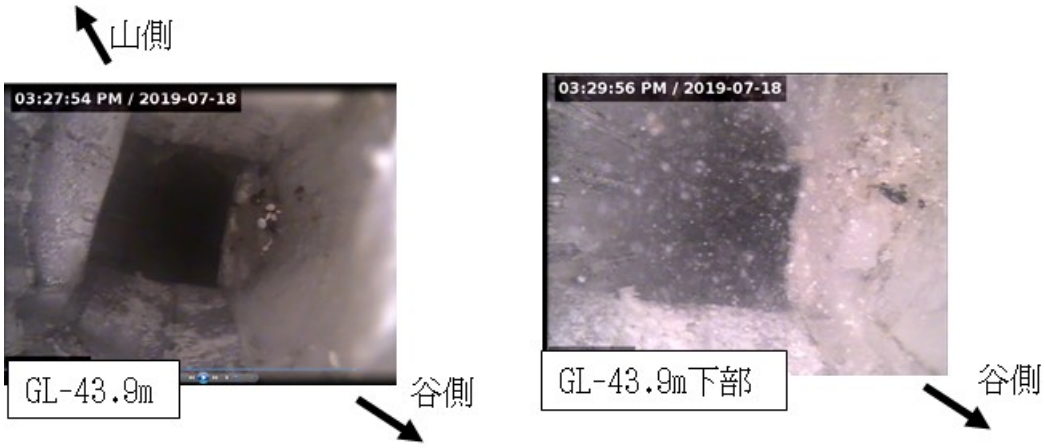


図 3.3-13　BV6-3 の管内の変形状況（土木研究所撮影）

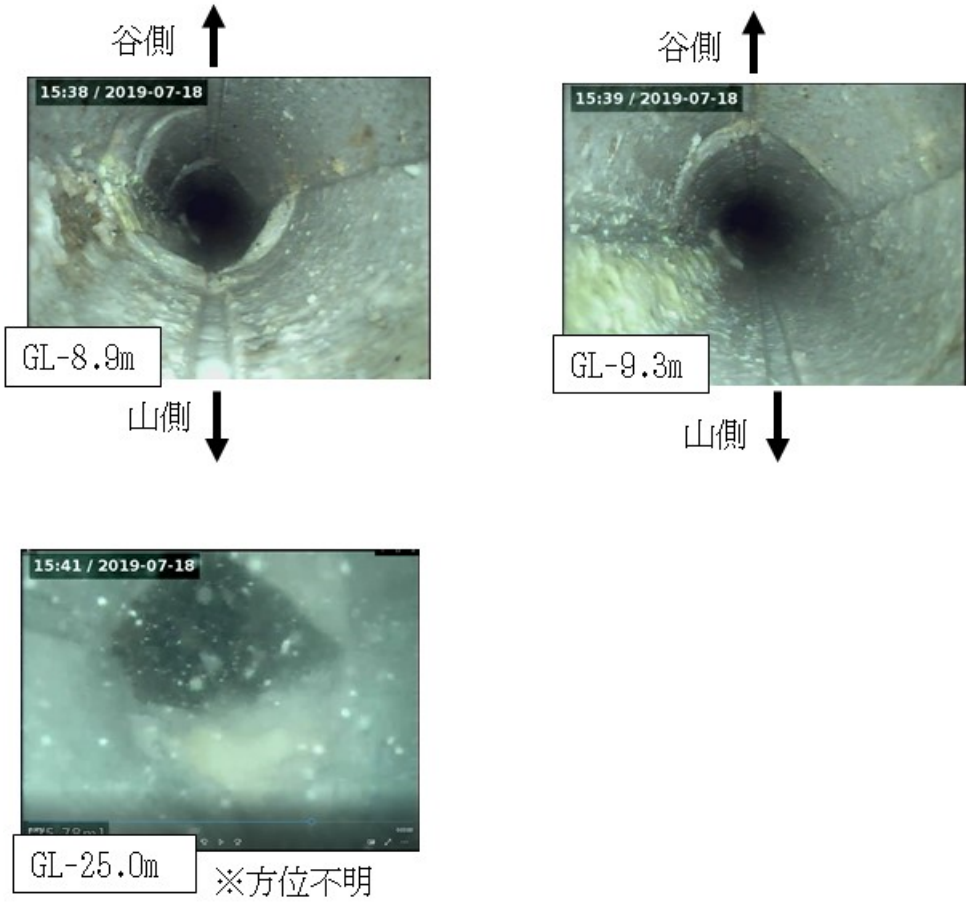


図 3.3-14　BV6-4 の管内の変形状況（土木研究所撮影）

3.3.3.2. 試験結果

従来型挿入式計器では挿入不能な BV6-3 と BV6-4 での測定限界深度を図 3.3-15 に示す。BV6-3 では，図 3.3-15a に示すとおり，従来型挿入式計器（応用地質製，坂田電機製）の測定限界は深度 44.5m であり，小型挿入式計器（坂田電機製）の測定限界も深度 44.5m であった。BV6-4 では，図 3.3-15b に示すとおり，従来型挿入式計器（応用電機製，坂田電機製）は深度 8.7m までしか測定できなかったが，小型挿入式計器では，応用地質製が深度 20.2m，坂田電機製は深度 42.7m まで測定できた。なお，小型挿入式計器（応用地質製）では，20.2m 以深の測定を省略している。

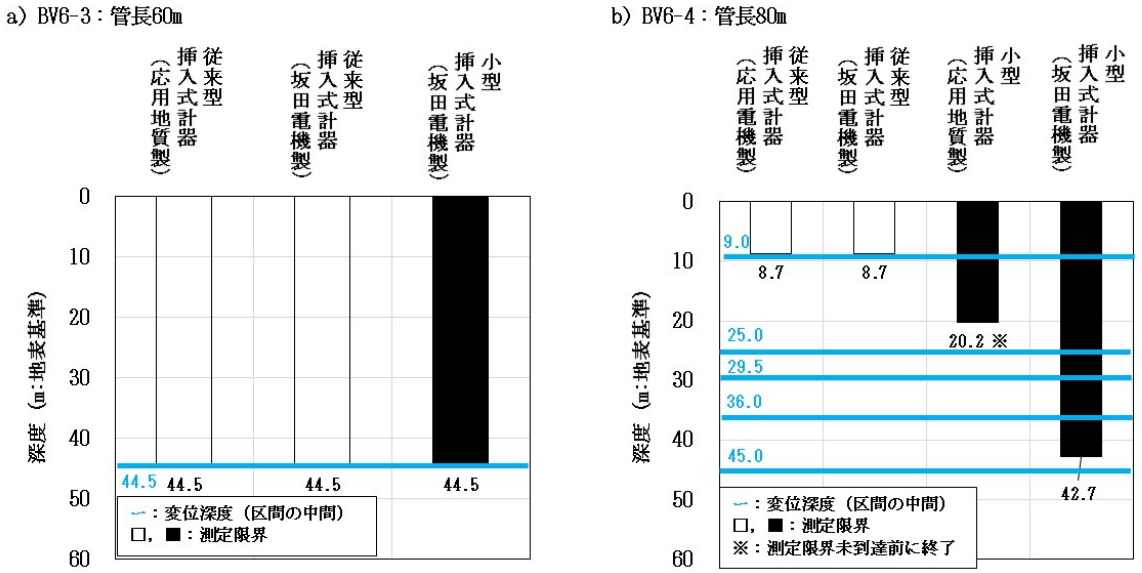


図 3.3-15　測定限界深度の結果

測定性能について，図 3.3-16 の BV14-3 の孔曲がり図に示されるとおり，小型挿入式計器のグラフ形状は従来型挿入式計器（応用地質製）と同様の形状を示しており，23～24m 付近の変位も同様に計測された。測定区間（深度 0.5～30m）における従来型挿入式計器との変位量の差は，小型挿入式計器（応用地質製）では A 軸で 59.2mm，B 軸で 49.0mm，小型挿入式計器（坂田電機製）では A 軸で 2.9mm であった。

図 3.3-17 の BV6-4 の孔曲がり図では，従来型挿入式計器（応用地質製）の測定限界深度 8.7m までは同様のグラフ形状を示しており，さらに深度 25，35m 付近の変位まで計測することができた。測定区間（深度 0.2～8.7m）における従来型挿入式計器との変位量の差は，小型挿入式計器（応用地質製）では A 軸で 6.2mm，B 軸で 2.9mm，小型挿入式計器（坂田電機製）では A 軸で 7.4mm，B 軸で 1.0mm であった。

なお，新型計器と従来型計器の変位量の差については，同一メーカー同士で比較したが，従来型計器にて計測していない場合には，別社の従来型計器の計測結果を用いている。

現場実証試験の結果，両社の小型挿入式計器は共に，従来型挿入式計器の測定限界を超えて計測できることが現地で確認できた。測定性能については，従来型挿入式計器の測定結果との比較によって，開発中の新型計器の性能を確認することができた。

小型挿入式計器（応用地質製）ついては，現場実証試験（令和元年 11 月実施）で使用した計器は試作段階であり，今後の製品化に向け，精度向上のため，機械加工精度の向上やセンサアライメントの調整機能を追加していく予定である。

小型挿入式計器（坂田電機製）では，従来型挿入式計器の測定結果と概ね同等であることが確認でき，かつ従来型挿入式計器では測定不可能だった深度においても測定ができたことから，同等の精度を持ちつつ本研究の目標である測定限界の向上を実現できたと考えられる。

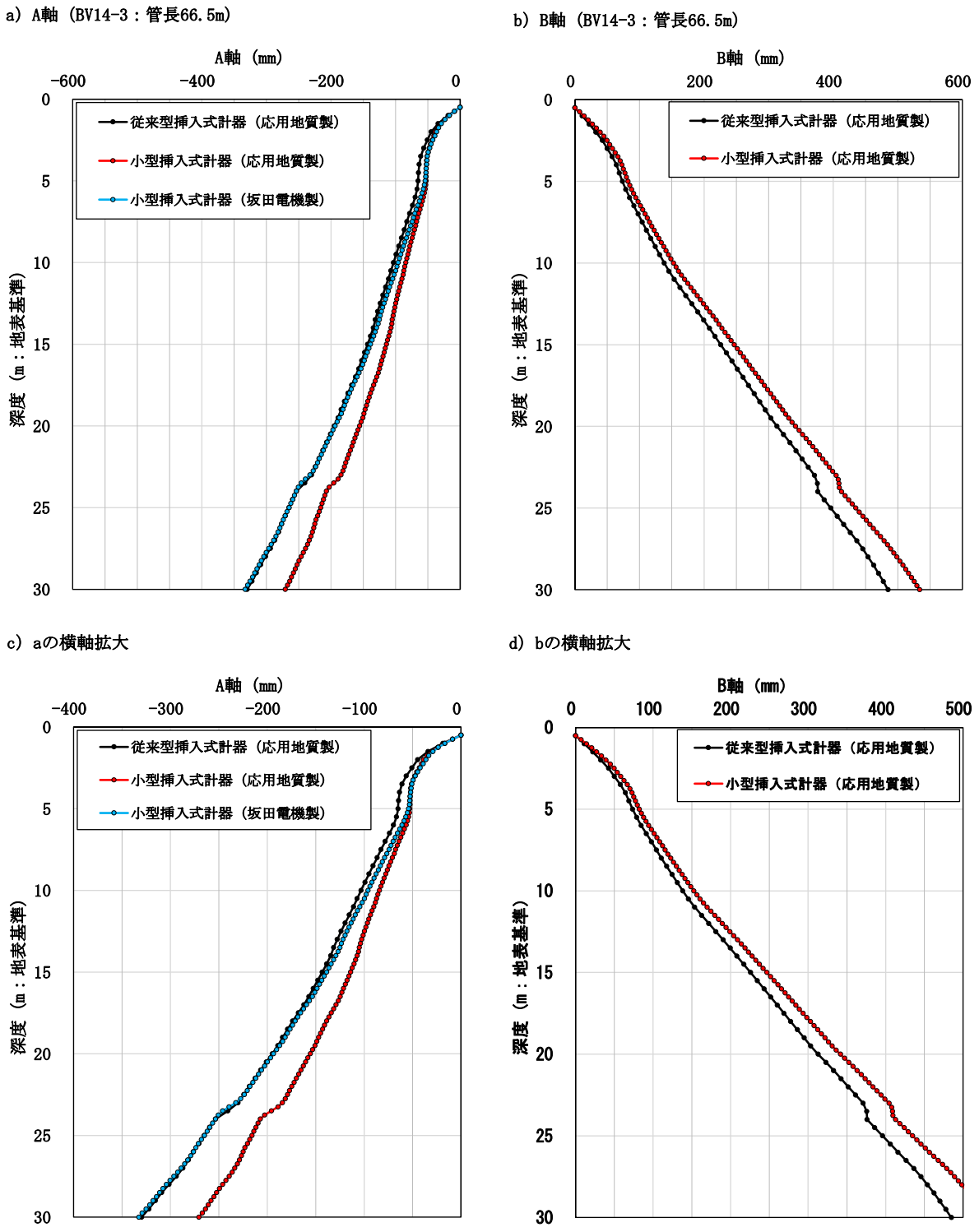


図 3.3-16　BV14-3 の孔曲がり図

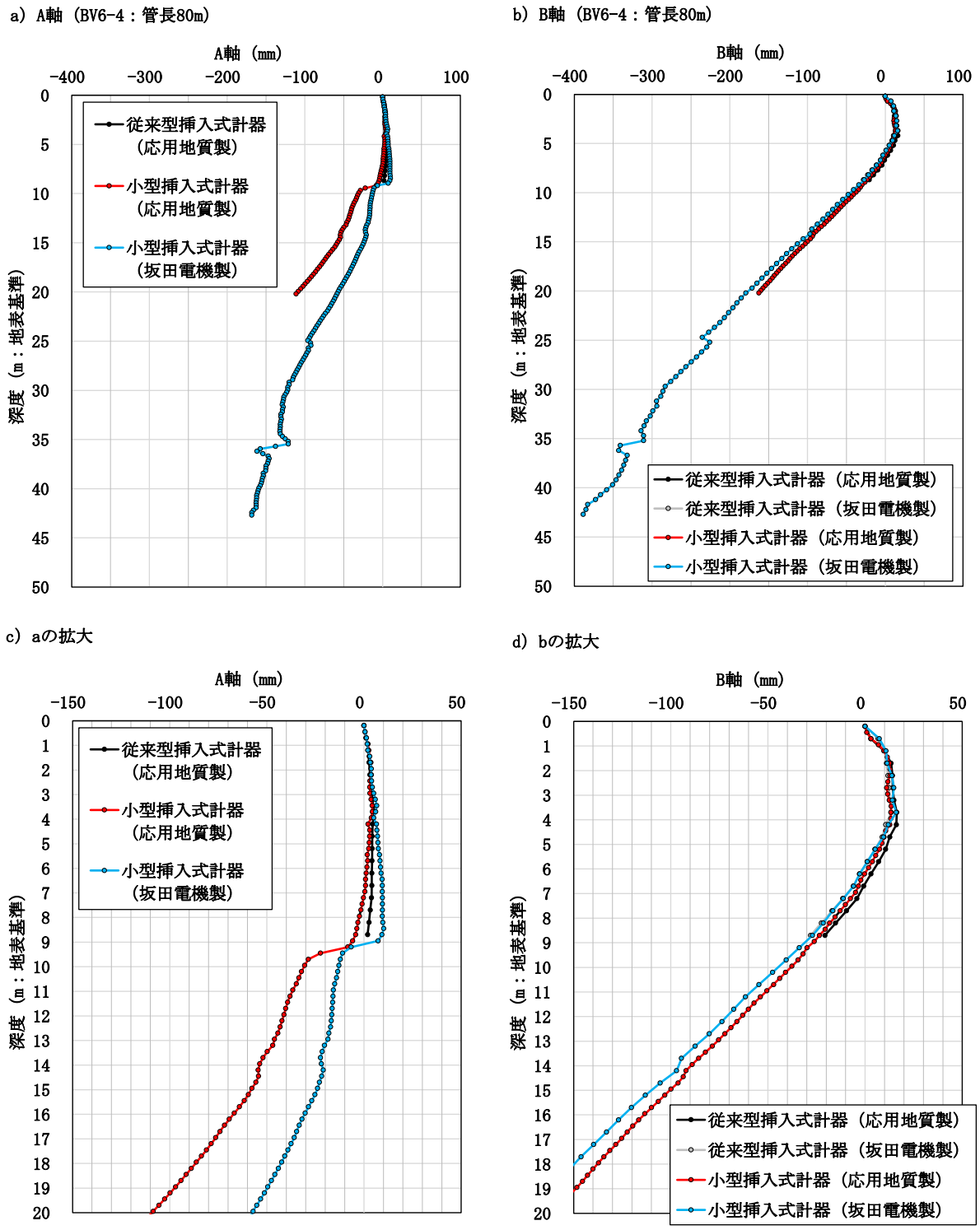


図 3.3-17　BV6-4 の孔曲がり図

3.4. フレキシブル型挿入式計器

3.4.1. 仕様

フレキシブル型挿入式計器（以下本計器）は，フレキシブルな中継を持つ多連式構造の筐体に，位置を測定することができる慣性計測装置（以下 IMU）を搭載した挿入式計器である。本計器本体の外形を図 3.4-1，寸法を図 3.4-2 に，周辺機器であるケーブルリールを図 3.4-3，演算部を図 3.4-4，測長器を図 3.4-5 に，図 3.4-6 に本計器の構成図，本計器の仕様を表 3.4-1 に，図 3.4-7 に変形ガイド管（カットモデル）へ挿入した時の様子を示す。

本計器は，3 軸 MEMS ジャイロと 3 軸 MEMS 加速度計を組み合わせた IMU を搭載し，本計器本体をガイド管内で移動させながら位置座標データを取得できるため，静止データを計測する従来型挿入式計器に比べて測定時間が短く，データのサンプリングを 50Hz で行うため鉛直方向に対する分解能は cm オーダーで任意に設定することが出来る。また，本計器最大の特徴として，ナイロン製ブラシを円周に配置したブラシ部によるセンサ保持機構と，IMU が搭載されているセンサ部とブラシ部が分かれた多段式の形状を持っていることがあげられる。ガイド管の中心にセンサ部が位置するようにブラシ部が保持しつつ，ガイド管の変形により閉塞した部分ではブラシがつぶれて本計器本体が通過する。センサ部とブラシ部が分かれた多段式形状は，各部の中継に FRP 材を使用しているため，ガイド管の大きな変形にも追随して通過することが出来る。

全体の計測システムは，本計器に加えて計器の走行距離を測定する測長器と，本計器と測長器から得られた測定データを基に計器本体が移動した軌跡データを演算，表示する演算部により構成されている。構成品全てが小型になるように設計されており，持ち運びが可能なモバイルバッテリーを使用することで，急傾斜地が多い測定現場でも，少人数で安全に運搬することが出来る。

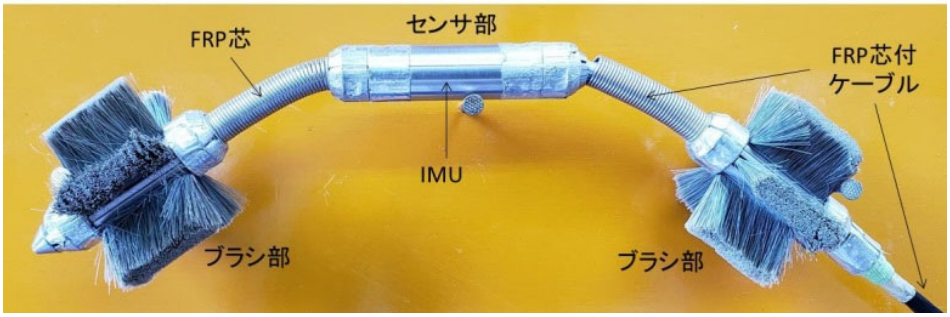


図 3.4-1　フレキシブル型挿入式計器本体

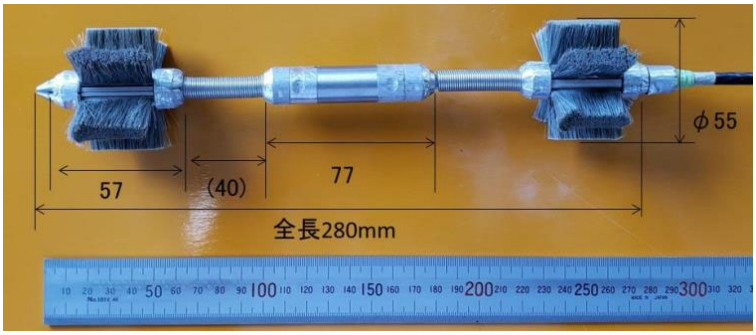


図 3.4-2　フレキシブル型挿入式計器本体　寸法

図 3.4-3　ケーブルリール

図 3.4-4　演算部

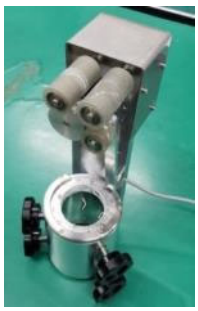


図 3.4-5　測長器

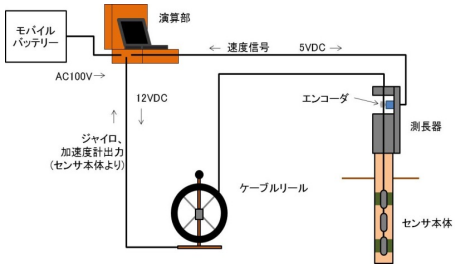


図 3.4-6　フレキシブル型挿入式計器構成図

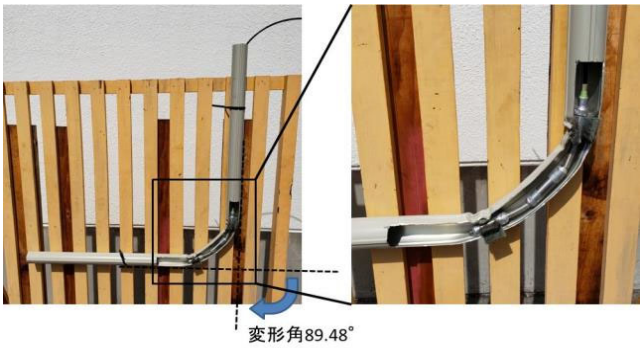


図 3.4-7　変形ガイド管（カットモデル）へ挿入した時の様子

表 3.4-1　フレキシブル型挿入式計器の仕様

項目	仕様	備考
長さ	280mm	本体のみ
直径	φ17mm	突起部を除く
質量	0.3kg±0.03kg	センサ部のみ
測定成分	3 軸	XYZ 直交成分
測定範囲	±90 度	
分解能	0.001 度	
角速度検出範囲	±900 度/秒	
加速度検出範囲	±19.6m/秒/秒	±2G
計器一式質量	4.3kg±0.3kg	ケーブル 50m

3.4.2. 通過性試験

3.4.2.1. 試験方法

「3.3.2.1.試験方法」と同様である。

3.4.2.2. 試験結果

図 3.4-8 に通過性試験の結果を示す。応用地質製ガイド管を用いた試験結果（図 3.4-8a）では，従来型挿入式計器（応用地質製）の通過限界は 32mm/0.5m であるが，フレキシブル型挿入式計器（多摩川精機製）では約 500mm/0.5m まで通過できることが確認された。坂田電機製ガイド管を用いた試験結果（図 3.4-8b）では，従来型挿入式計器（坂田電機製）の通過限界は 27mm/0.5m であるが，フレキシブル型挿入式計器（多摩川精機製）では約 400mm/0.5m まで通過できることが確認された。

フレキシブル型挿入式計器は，ガイド管の仕様にもよるが，通過限界は約 400～500mm/0.5m となることが確認された。通過限界となる変位量の比較で，フレキシブル型挿入式計器の通過性は，従来型挿入式計器の約 13～16 倍程度という結果が得られた。

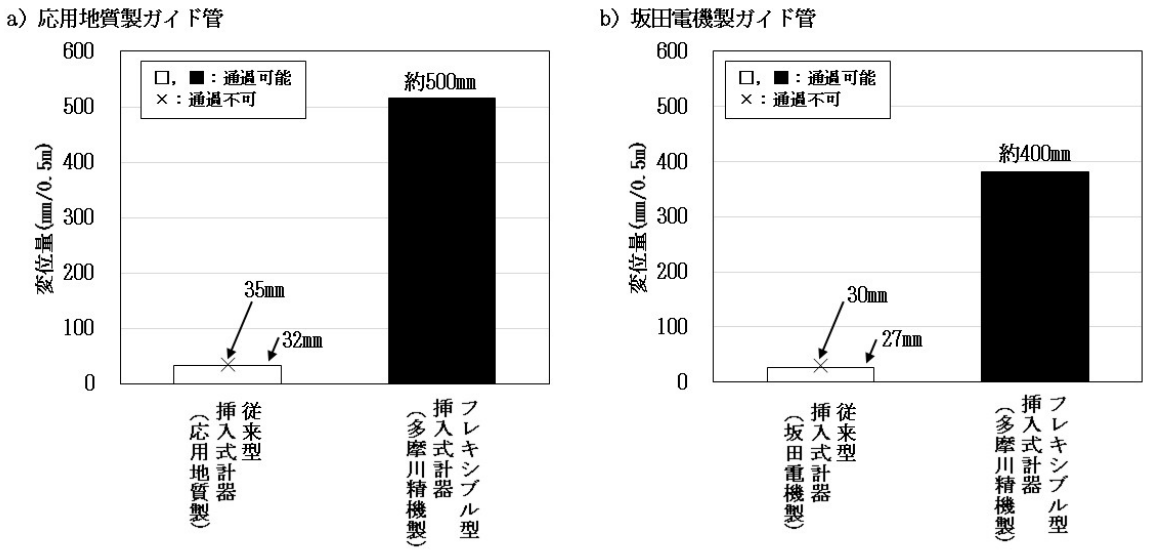


図 3.4-8　通過性試験の結果

3.4.3. 測定試験

3.4.3.1. 試験方法

本計器は，角速度・加速度を時間で積算して演算を行う関係上，測定時間が増えることによって誤差も累積されて測定精度が低下しやすい特徴があるため，ガイド管の変形箇所のみを計測対象とすることで測定時間を短くし，測定精度を高める手法（以下，局所計測手法）を検討することとした。図 3.4-9 に局所計測手法のイメージを示す。従来型挿入式計器で測定限界までを計測し，測定限界以深は本計器で測定し，それらの測定結果を組み合わせる。本計器の測定区間を短くすることで，測定時間が増えることによる測定精度の低下を抑えることができる。さらに，本計器の測定を複数回行い，座標データの平均化処理を行うことで，より高い測定精度が期待できる。このようなことから，局所計測手法の有効性を確認するため，通過性試験で使用したガイド管を対象に測定試験を行った。

試験で使用したガイド管は,応用地質製のガイド管で屈折角 7.0 度,9.0 度,45.9 度のもので,ガイド管長は 1,500mm とした。図 3.4-10～12 に各屈折角のガイド管を示す。測定区間は，ガイド管全長約 1,500mm に対して，本計器の全長 280mm 分を除く約 1,220mm の区間の測定を行った（位置座標を取得する IMU が計器の中心にあるため，管底から 140mm，管口から 140mm の区間は測定されない）。1 回の測定を計器が管底から管口までを通過するまでとし，1 つの変形ガイド管について，4～10 回測定した。

変曲点直前の傾斜角は，A 軸の傾斜角は複数計測する内の 1 回目に計測した傾斜角をそのまま採用し，B 軸の傾斜角については 0 度になるようにフレキシブル型挿入式計器の初期姿勢角および方位角を補正した。また，位置座標データの取得間隔は 20mm としている。

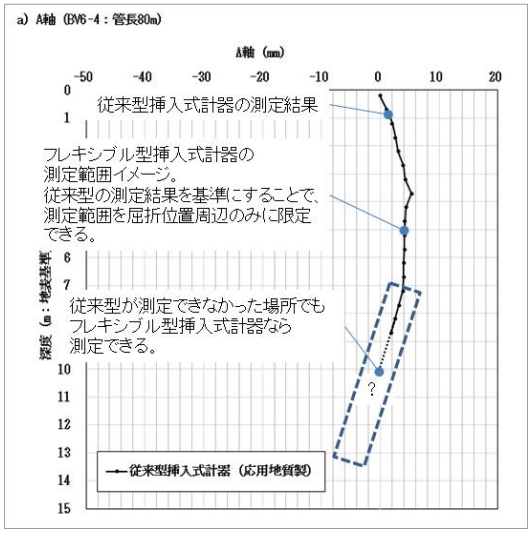


図 3.4-9　局所計測手法

図 3.4-10　屈折角 7.0 度ガイド管

図 3.4-11　屈折角 9.0 度ガイド管

図 3.4-12　屈折角 45.9 度ガイド管

3.4.3.2. 試験結果

図 3.4-13 に屈折角 7.0 度ガイド管の A 軸断面図，図 3.4-14 に屈折角 9.0 度ガイド管の A 軸断面図，図 3.4-15 に屈折角 45.9 度ガイド管の A 軸断面図の本計器の測定結果を示す。各 A 軸断面図には，本計器が管口から管底まで測定した座標データを図示している。なお，グラフの原点は管口より 140mm 下の位置となっている。また，グラフ最下点は管底より 140mm 上の位置である測定結果より，ガイド管の屈折角と測定結果から得られた角度が概ね一致していることから，屈折角の大小を問わずガイド管の形状を測定できることが確認できた。図 3.4-16 に，実際の屈折角 45.9 度ガイド管写真と測定値の軌跡を比較した図を示す。

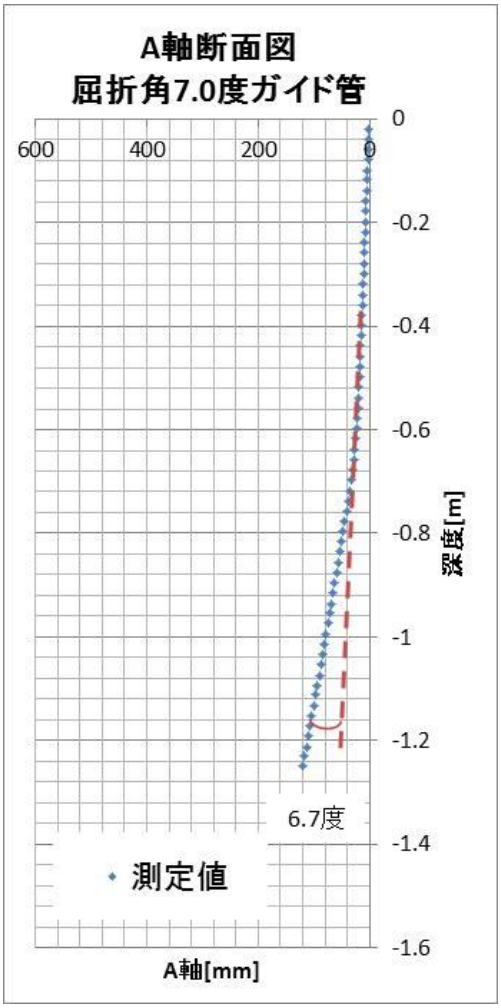


図 3.4-13　屈折角 7.0 度
ガイド管 A 軸断面図

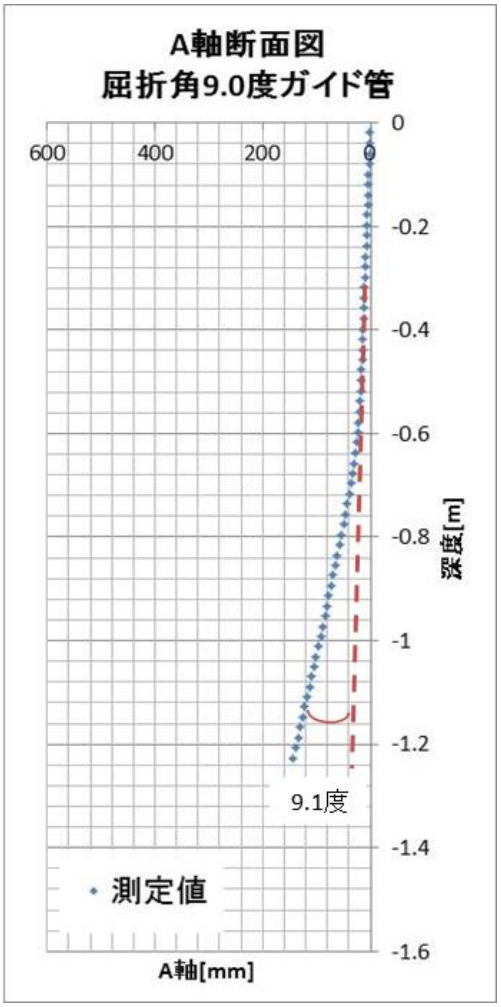


図 3.4-14　屈折角 9.0 度
ガイド管の A 軸断面図

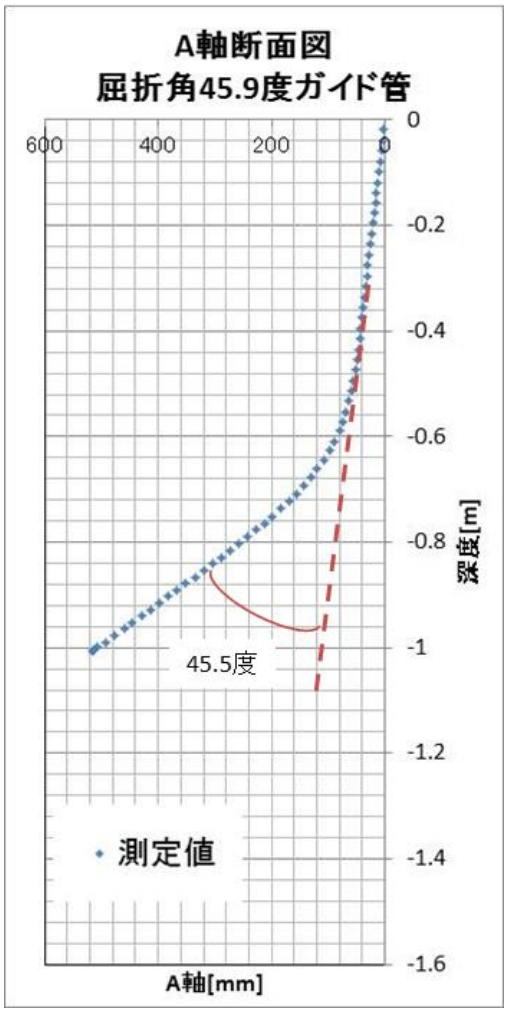


図 3.4-15　屈折角 45.9 度
ガイド管 A 軸断面図

図 3.4-16　屈折角 45.9 度
ガイド管写真と測定値軌跡比較

3.4.4. 現場実証試験

3.4.4.1. 試験方法

試験方法は「3.3.3.1.方法」と同様である。

3.4.4.2. 試験結果

測定限界深度について，BV6-3 では図 3.4-17a に示すとおり，従来型挿入式計器（応用地質製，坂田電機製）の測定限界は深度 44.5m であり，フレキシブル型挿入式計器（多摩川精機製）では深度 45.5m まで測定することができた。BV6-4 では，図 3.4-17b に示すとおり，従来型挿入式計器（応用地質製，坂田電機製）の測定限界は深度 8.7m であったが，フレキシブル型挿入式計器（多摩川精機製）では，深度 30.2m まで測定できた。

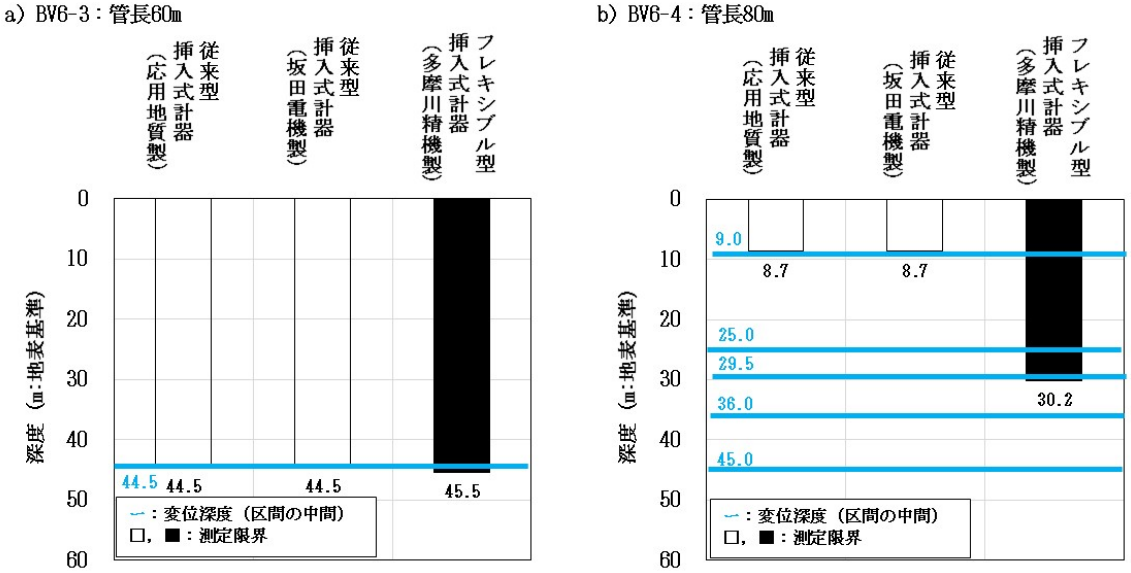


図 3.4-17　測定限界深度の結果

「3.4.3.1.試験方法」で示した局所計測手法を用いて,BV6-4 の深度 7～12m の区間を測定した。測定データについて平均化処理を行い，従来型挿入式計器の測定限界深度である深度 8.7m での AB 軸座標に，同一深度でのフレキシブル型挿入式計器の AB 軸座標を一致させた。その結果が図 3.4-18 の孔曲がり図である。A 軸では深度 9～11m でマイナス方向に変位し，深度 11m よりプラス方向に転じ,B 軸では,マイナス方向に変位する結果を示した。図 3.4-19 の小型挿入式計器の BV6-4 の測定結果（図 3.3-16c，d の再掲）と比較すると，フレキシブル型挿入式計器の結果では，変形箇所までの変位量は小型挿入式と同様に計測できているものの，深度 11m 以下では大きく異なる結果となった。この原因としては，ブラシ部によるセンタリング機能がうまく機能せず，変形箇所の通過後にセンサ部がガイド管に対して同じ姿勢で移動できなかったことが原因と考えられる。

今後の改良点として，センサ部のセンタリング機能を強化することで，変形箇所の通過による姿勢の変化を抑え，精度の向上を図ることが考えられる。

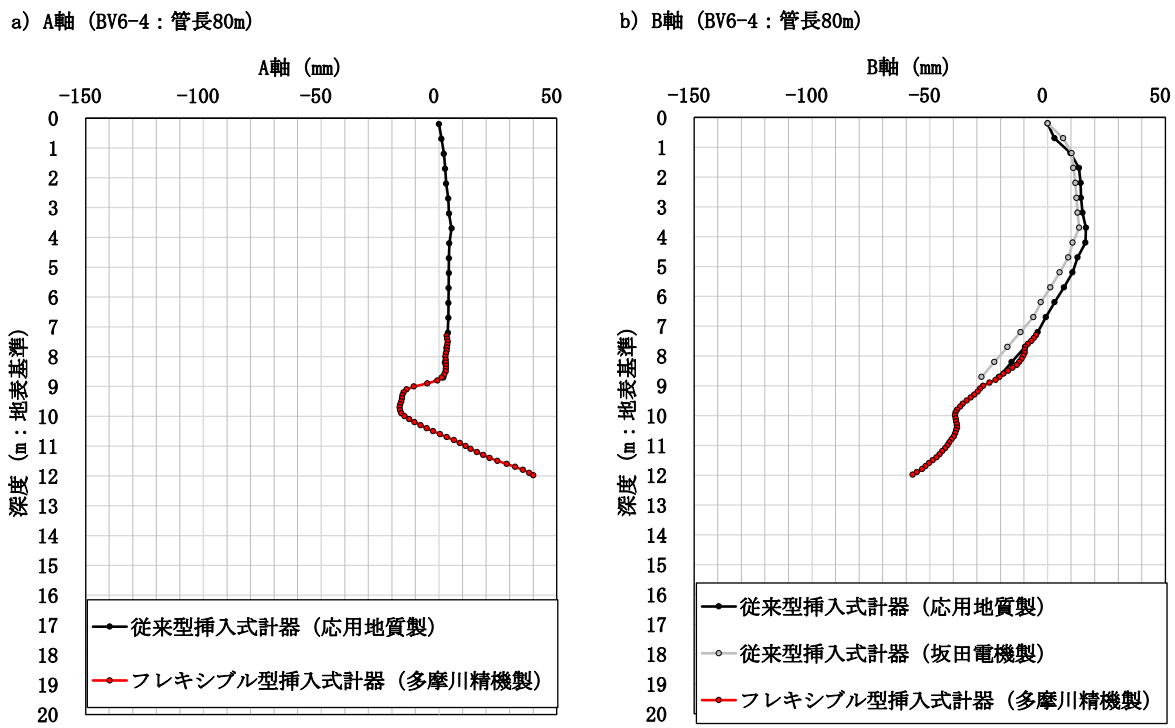


図 3.4-18　BV6-4 の孔曲がり図

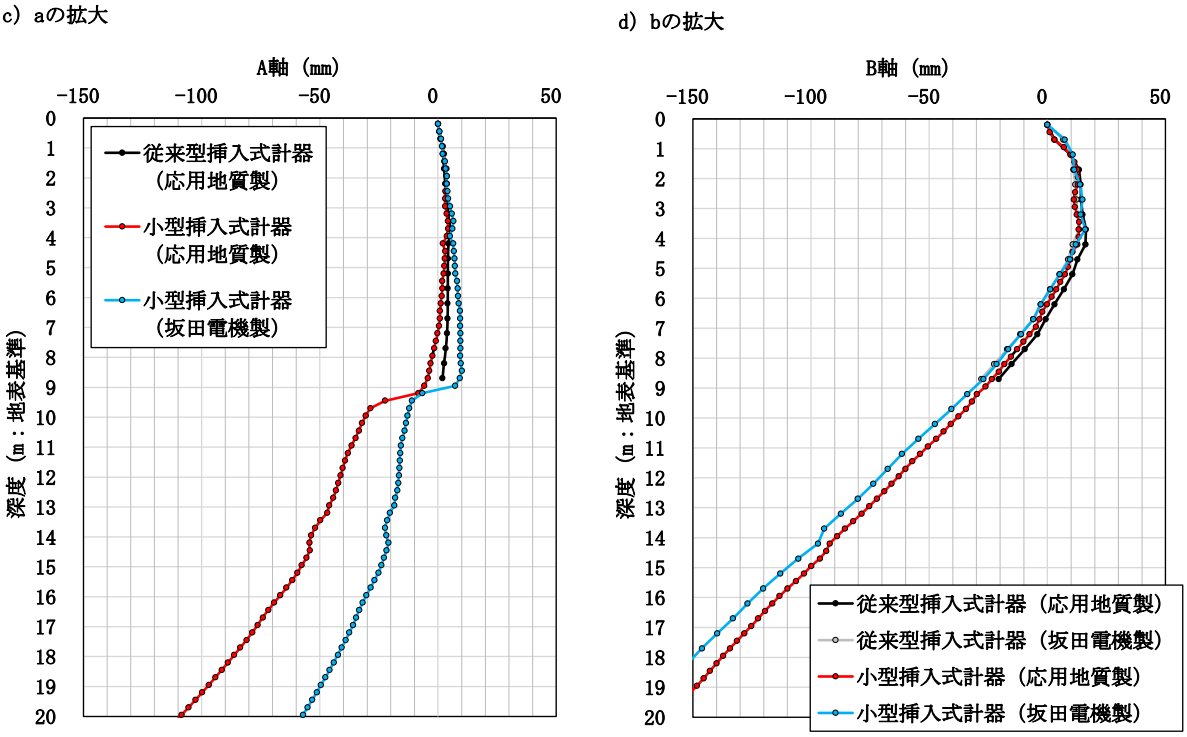


図 3.4-19　小型挿入式計器による BV6-4 の孔曲がり図（再掲）

3.5. 小型設置式計器

3.5.1. 仕様

3.5.1.1. 応用地質製

応用地質製の小型設置式計器は，傾斜センサに 2 軸の高精度小型 MEMS センサを採用することで，小型化を実現した。ガイド管の潰れによる狭い開口面積に対応するために，計器直径をφ30mm からφ18mm とし，ガイド管の大きな曲がりに対応するために，センサユニット長を 500mm から 250mm とした。さらに，車輪などの突起を省くことで，計測不能となったガイド管の大きな変形がある箇所へ挿入し，継続して計測することを可能としている。2 軸センサを内蔵したセンサユニットは，スプリングを介して 250mm 間隔で 3 ユニット連結しており，スプリングの反力でガイド管に沿わせ，連続した 3 区間の傾斜を計測する。なお，センサユニット上部にはガイドとなる車輪部があり，ガイド管の溝にガイド車輪部を挿入することでセンサの向きを設定することができる。

従来型と小型設置式計器の外観を図 3.5-1 に，センサ部の外観を図 3.5-2 に，サイズ比較を図 3.5-3 に，仕様を表 3.5-1 に示す。小型設置式計器のシステム構成例を図 3.5-4 に示す。図に示すように，孔口に蓋をした状態で設置し，データは通信機能を内蔵したデータロガーに蓄積し，一定間隔でデータを送信することができる。システムは，ソーラパネルとバッテリとを組み合わせた内蔵電源で駆動され，自律したシステムとなっている。

図 3.5-1　従来型と小型設置式計器の外観

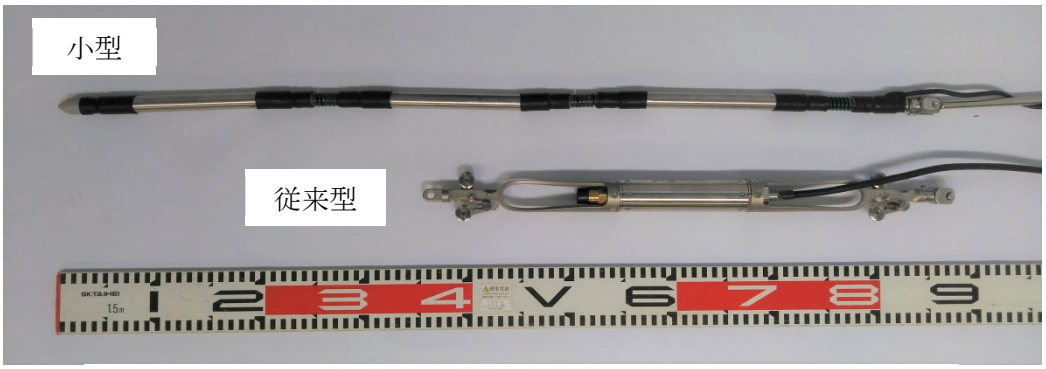


図 3.5-2　従来型と小型設置式計器のセンサ部の拡大

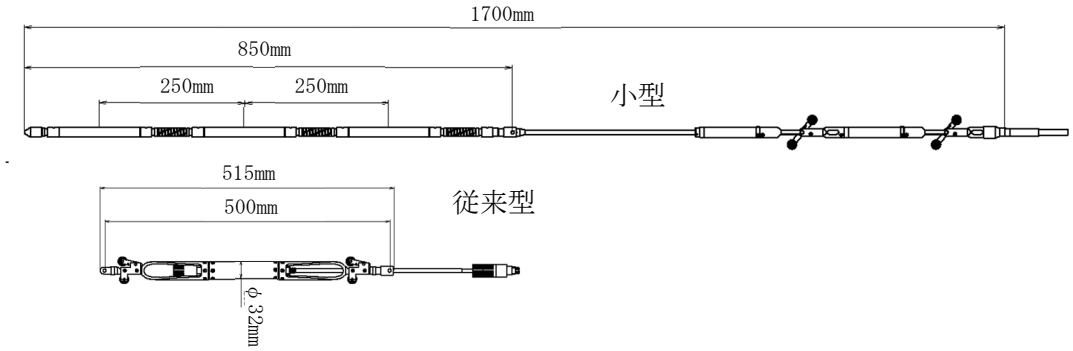


図 3.5-3　従来型と小型設置式計器のサイズ比較

表 3.5-1　従来型と小型設置式計器の仕様

項目	小型	従来型（同社製）	備考
長さ	1,700mm	―	従来型は可変
直径	φ18mm	φ32mm	突起部を除く
センサ間隔	250mm	500mm	
最大接続数	3ch	20ch	新型：3ch 固定
最大測定延長	750mm（250mm×3）	ロッド追加により任意	
測定成分	2 軸（A 軸，B 軸）	2 軸（A 軸，B 軸）	
測定範囲	±20 度	±15 度	
分解能	0.001 度	0.001 度	

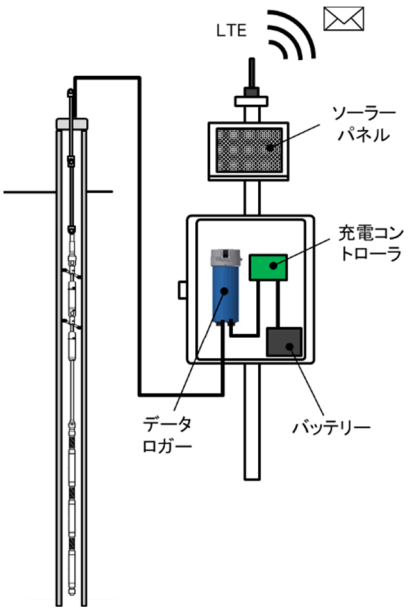


図 3.5-4　　小型設置式計器のシステム構成例

3.5.1.2. 坂田電機製

小型挿入式傾斜計（坂田電機製）は，連結してワイヤで吊ることにより，小型設置式計器としても使用することが可能となる。小型設置式計器とする場合，ワイヤで吊る構造だけを変更することから，通過性は小型挿入式傾斜計として使用する場合と同等であり，BV6-4 程度の変形箇所は通過して設置することが可能である。従来型の設置式計器と新型の小型設置式計器の外観を図 3.5-5 に，サイズ比較を図 3.5-6 に，仕様を表 3.5-2 に，小型設置式計器のシステム構成例を図 3.5-7 に示す。

小型設置式計器は，複数台ワイヤで接続され，主にすべり面付近に常設される。各計器に接続されたセンサケーブルを地表に設置したデータロガーに接続し，決められたインターバルで自動計測する。一般的に特定小電力無線や携帯電話 LTE 回線など通信装置を接続し，管理者へ自動伝送する。これらの観測機器はソーラーや内蔵電池等を使用することで，商用電源を必要とせずに測定可能である。

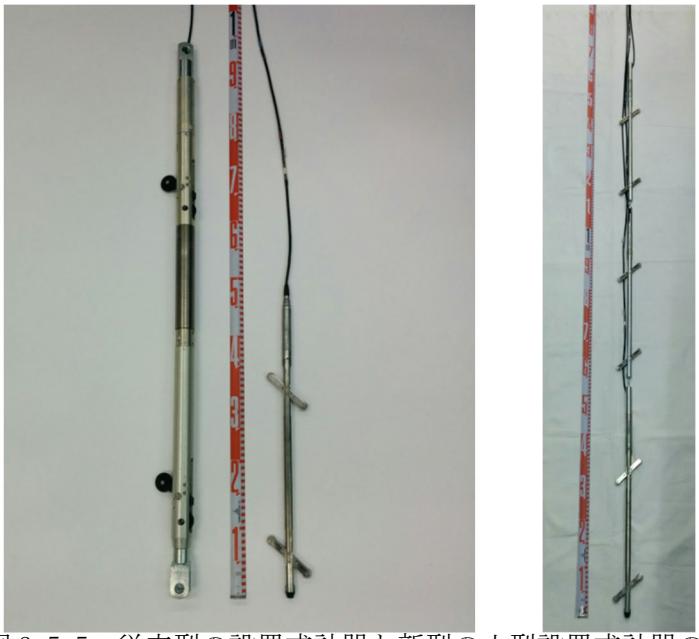


図 3.5-5　従来型の設置式計器と新型の小型設置式計器の外観
従来型と新型 1 台分（左）・新型 3 台連続時（右）

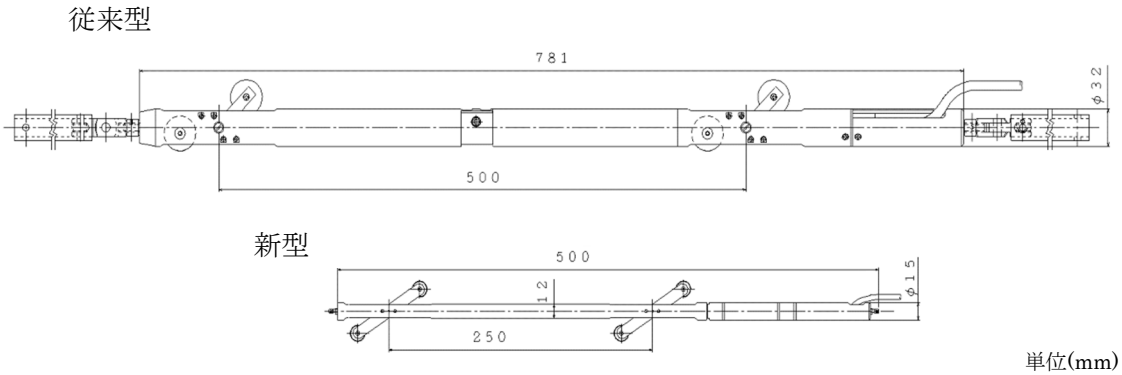


図 3.5-6　従来型の設置式計器と新型の小型設置式計器のサイズ比較

表 3.5-2　従来型の設置式計器と新型の小型設置式傾斜計の仕様

項目	新型	従来型（同社製）	備考
長さ	500mm	865mm	
直径	φ15mm	φ32mm	突起部を除く
センサ間隔	500mm	1,000mm	
最大接続数	40ch	25ch	ガイド管φ48 使用時
最大測定延長	中間ワイヤにより任意	中間ワイヤにより任意	
測定成分	1 軸	1 軸	
測定範囲	±30 度	±5 度	他のレンジも可
分解能	10 秒以下	5 秒以下	

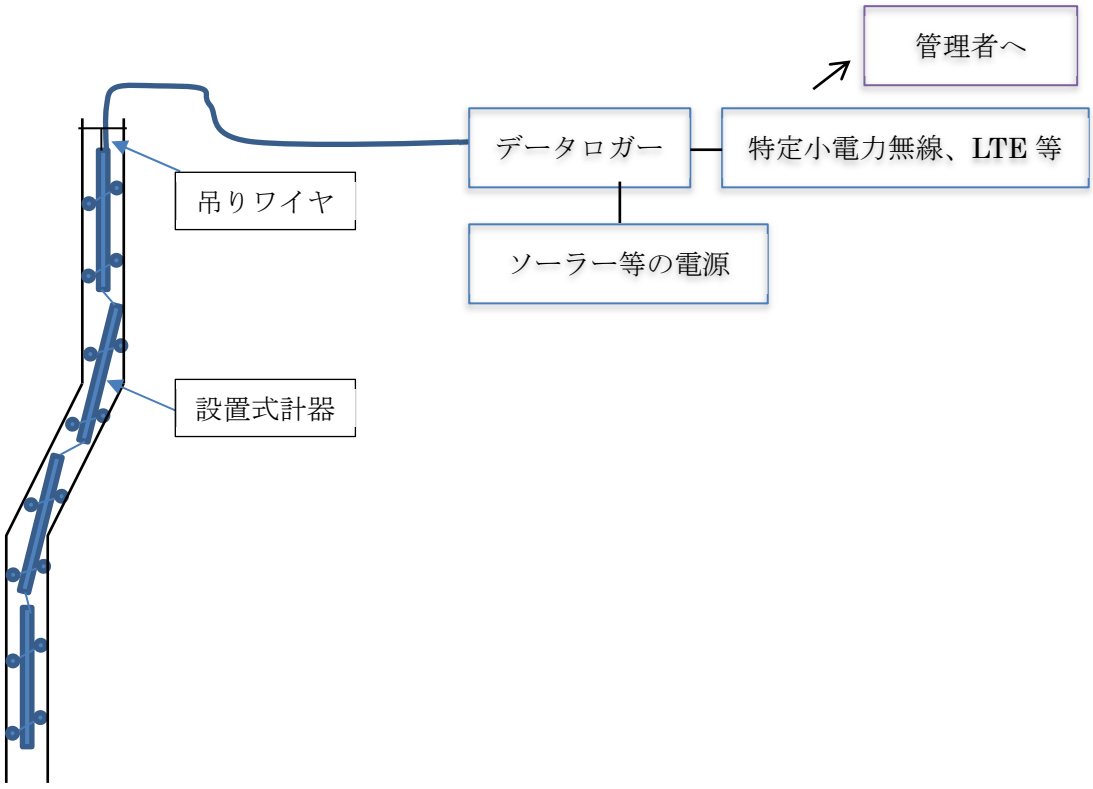


図 3.5-7　小型設置式計器のシステム構成例

3.5.1.3. オサシ・テクノス製

オサシ・テクノス製の新型設置式計器は，角度検出に MEMS 加速度センサを用いた傾斜計で，角度を測定するセンサ部とそのデータを集約して記録するデータロガーとで構成される。

従来のプローブと比べ，本計器のセンサ長や径が短いため，従来の孔内傾斜計で挿入できないガイド管にも挿入することができる。センサ部には方位センサも内蔵し，孔内でのセンサ方向ねじれを補正することができる。

センサ部の両端からは多段接続用ケーブルが伸びており，防水コネクタでセンサ部同士を接続できる。データはセンサケーブルで接続されたデータロガーに蓄積され，1 台のデータロガーには最大 8 台までのセンサを多段接続ができる。

センサ部を設置後，ガイド管内部にグラウト材を充填し，センサをガイド管に沿って固定することで，傾斜以外の物理的な作用を除去することが可能である。その場合，グラウト材の急な充填による外圧でセンサの故障するのを防ぐため，複数に分けて充填を実施する。

新型設置式計器のシステム構成例を図 3.5-8 に，センサ部の外観を図 3.5-9 に，サイズを図 3.5-10 に，仕様を表 3.5-3 に示す。

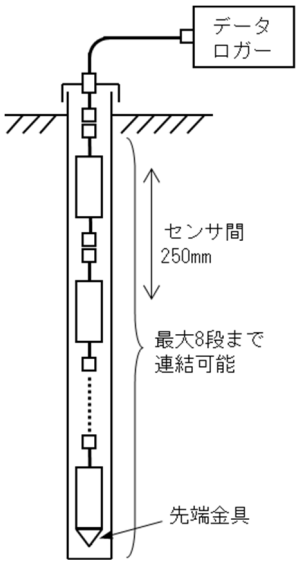


図 3.5-8 新型設置式計器の
システム構成例

図 3.5-9 新型設置式計器の
センサ部の外観

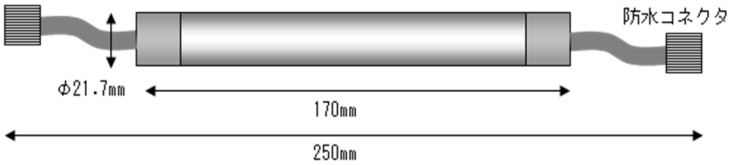


図 3.5-10 新型設置式計器の
サイズ

表 3.5-3　新型の設置式計器の仕様

項目	新型		備考
長さ	170㎜		
直径	φ21.7㎜		突起部を除く
センサ間隔	250㎜		
最大接続数	最大 8 連		
最大測定延長	2,000㎜		
測定成分	傾斜 2 軸	方位	
測定範囲	±30 度	0～359 度	
分解能	0.01 度	1 度	

3.5.2. 通過性試験

3.5.2.1. 試験方法

「3.3.2.1.方法」と同様である。

3.5.2.2. 試験結果

図 3.5-11 に通過性試験の結果を示す。応用地質製ガイド管を用いた試験結果（図 3.5-11a）では，従来型挿入式計器（応用地質製）の通過限界は 32mm/0.5m であるが，小型設置式計器では，応用地質製，坂田電機製，オサシ・テクノス製のいずれも約 100mm/0.5m まで通過できることが確認された。一方，坂田電機製ガイド管を用いた試験結果（図 3.5-11b）では，従来型挿入式計器（坂田電機製）の通過限界は 27mm/0.5m であるが，小型設置式計器では，応用地質製，坂田電機製，オサシ・テクノス製のいずれも約 100mm/0.5m まで通過できることが確認された。

各社の小型設置式計器は，ともに約 100mm/0.5m となるガイド管を通過することが確認された。通過限界となる変位量の比較で，小型設置式計器の通過性は，従来型挿入式計器の約 3 倍程度という結果が得られた。

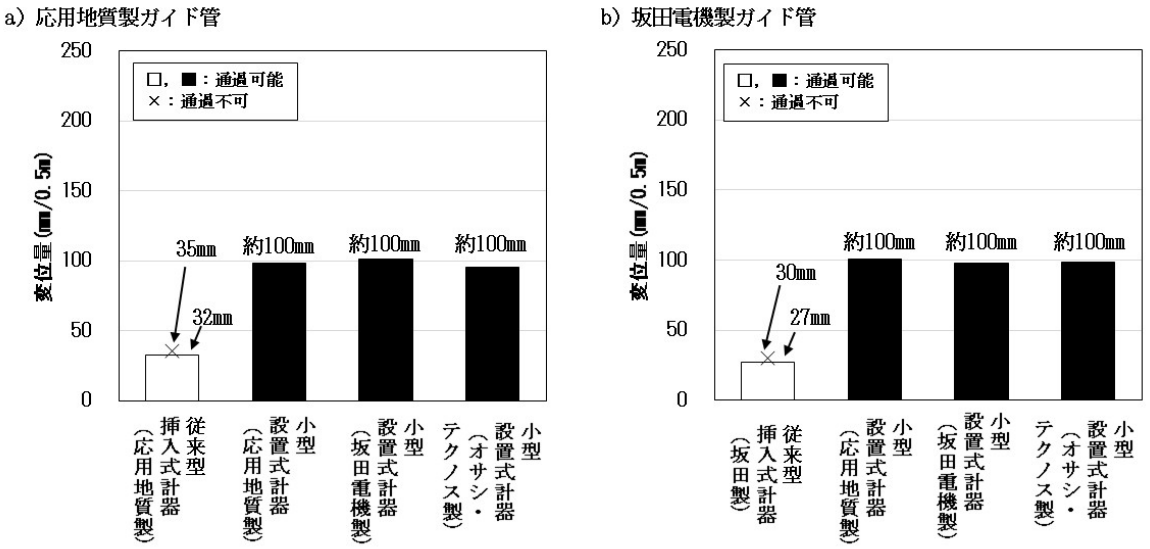


図 3.5-11　通過性試験の結果

3.5.3. 性能試験

3.5.3.1. 試験方法

性能試験では，変形したガイド管内に計器を固定し，それを回転させた際の傾斜角の測定精度を確認した。

図 3.5-12 に性能試験の実施状況，図 3.5-13～15 に各社における性能試験の実施状況を示す。管延長 1,500mm の変形させたガイド管に小型設置式計器（3 台連結：上から順に 1 段目，2 段目，3 段目）を挿入し，管内で計器の深度を固定した状態で，図 3.5-13～15 それぞれが示す基準となるガイド管の姿勢を 0 度として，±20 度の範囲で 5 度ピッチにガイド管を回転させた。図 3.5-16 に示すとおり，ガイド管の変形方向を A 軸とし，試験は A 軸及び B 軸それぞれで回転させたケースで実施した。各社で異なる試験条件は表 3.5-4 のとおりである。測定データは，0 度の時の測定値を基準値として，基準値からの差をとって整理した。

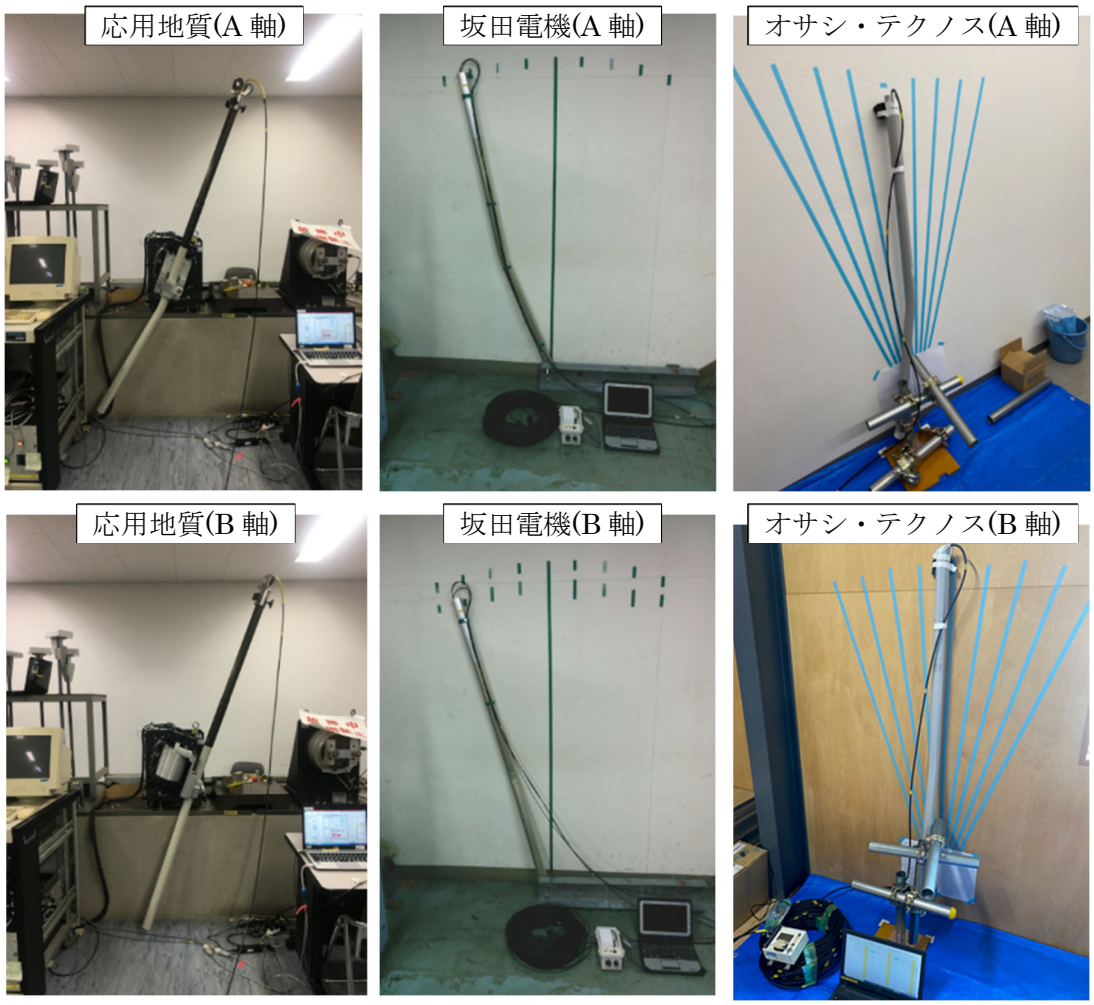


図 3.5-12　性能試験の実施状況

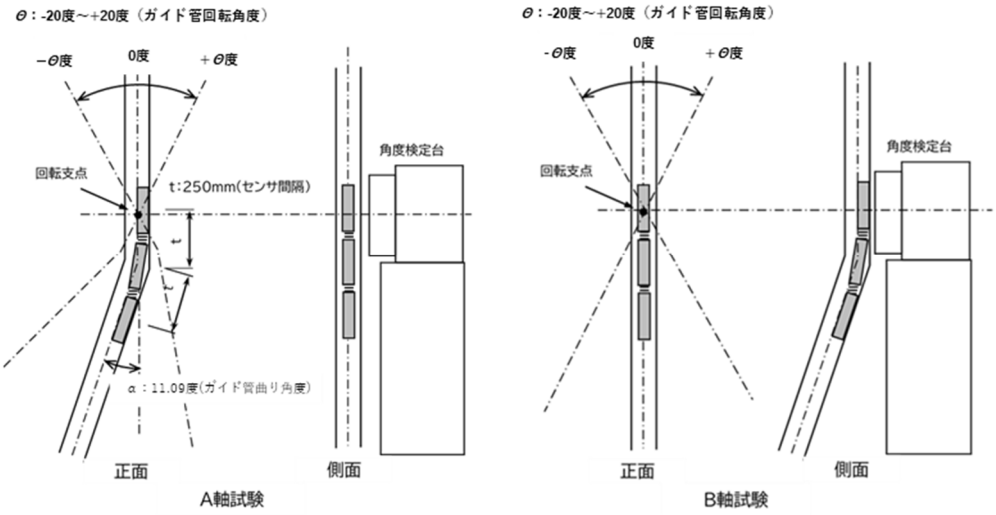


図 3.5-13　性能試験の実施状況（応用地質）

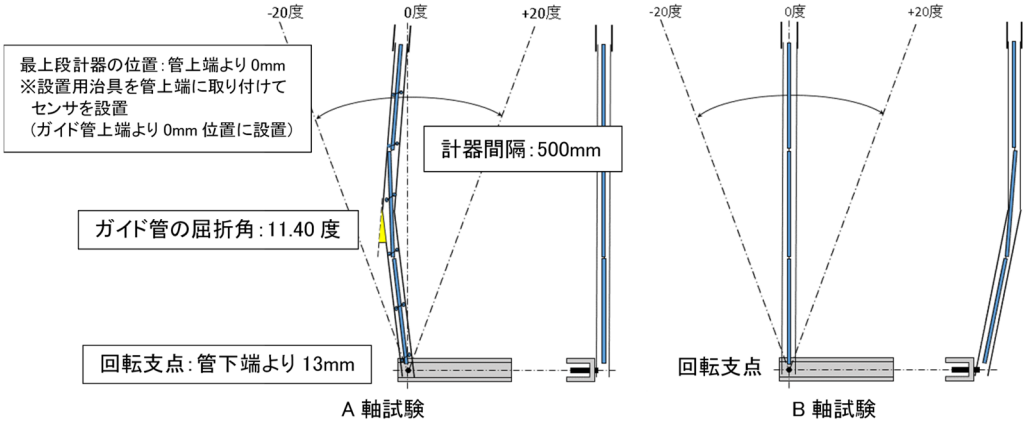


図 3.5-14　性能試験の実施状況（坂田電機）

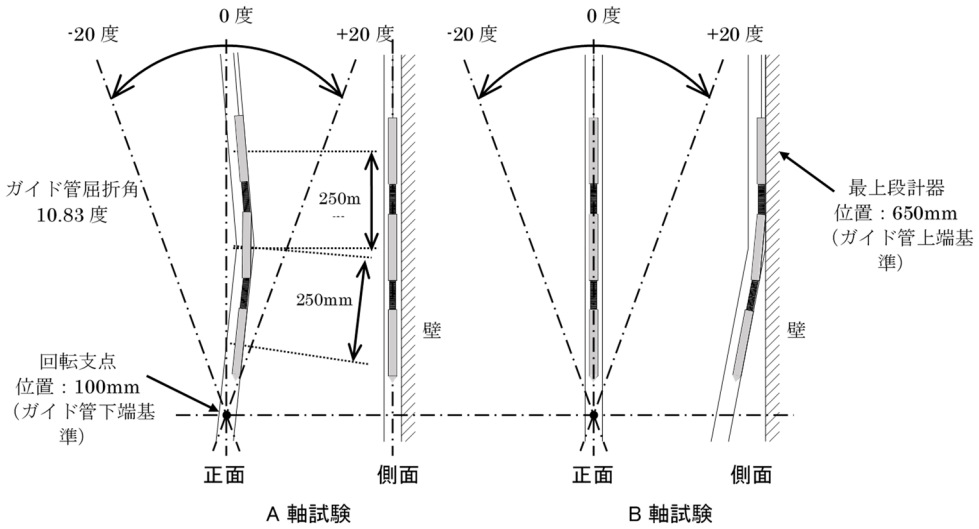


図 3.5-15　性能試験の実施状況（オサシ・テクノス）

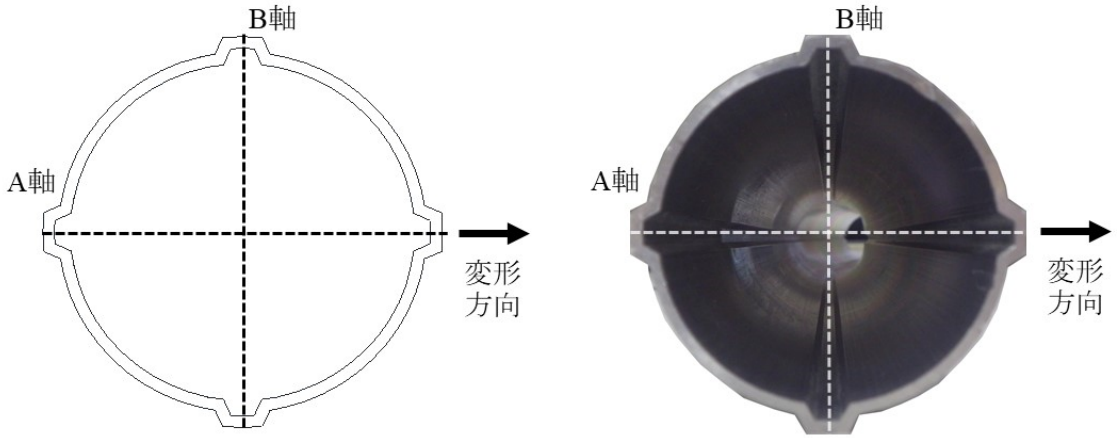


図 3.5-16　ガイド管の断面図

表 3.5-4　試験の詳細条件

	応用地質	坂田電機	オサシ・ テクノス
ガイド管 メーカー	応用地質製	坂田電機製	応用地質製
ガイド管の 屈折角	11.09 度	11.40 度	10.83 度
計器間隔	250㎜	500㎜	250㎜
最上段計器の 位置	1,080㎜ (管上端基準)	0㎜ (管上端基準)	650㎜ (管上端基準)
回転支点の 位置	1,080㎜ (管上端基準)	13㎜ (管下端基準)	100㎜ (管下端基準)

3.5.3.2. 試験結果

試験結果として，与えた角度と測定値の関係を図 3.5-17～19 にそれぞれ示す。

(1) 応用地質

図 3.5-17 に示すとおり，同じ傾斜角変化を与えたときの 1 段目から 3 段目における測定値に±150 分の差異が生じた。これは計器の構造上により生じたものと考えている。応用地質の計器は，図 3.5-2 に示すように各段のセンサ部にガイド管に固定する機構を有していない。ガイド管内で完全に固定された状態で測定を行っていないので，ガイド管を傾斜させていくにつれてセンサ部に微少の回転等が発生して，各段の測定結果に差異が生じたものと考えている。

使用している傾斜センサは，小型挿入式計器で使用しているものと同型のセンサである。仕様上，センサは 20 度の角度を与えたときの精度は±0.6 分以内としている。しかし今回の試験ではこの精度を達成できていない。

今後，各段のセンサを連結している部分（図 3.5-2 のセンサを連結している黒色の部分）の部材の剛性を強化して，傾斜角以外のねじれ等がセンサ部に作用しない構造にすることで，測定精度の向上を図っていくことが課題である。

(2) 坂田電機

A 軸および B 軸ともに，概ね与えた角度変化に比例した測定結果が得られた。特に誤差が大きくなる角度も存在しなかった。最大誤差はおおよそ 34.2 分であり，センサ本来の精度より著しく精度が低下しているが，これは試験装置の回転機構部の遊びによるがたつきによるものであること，壁面にマーキングした位置に手動で合わせて試験した試験方法の影響も考えられる。

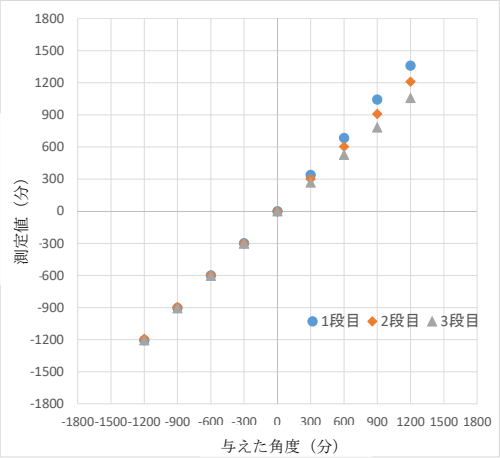
課題としては，センサの構造が 1 方向にしか対応していないことである。現在，2 方向測定が可能な改良を実施中であるため，早急に実現して検証を行う予定である。

(3) オサシ・テクノス

センサの測定精度 6 分に対し，最大で約 15.6 分の誤差が生じており，A 軸，B 軸および各段ともに大きな違いはなかった。センサ単体の性能は問題ないことから，試験方法やガイド管とセンサの固定方法に起因するものと考えている。

試験治具の角度変化に対する誤差もあるが，特に大きな誤差要因としてはグラウトの方法によるものと考えられる。オサシ・テクノスの計器は，ガイド管内部をグラウトすることで，センサをガイド管に沿って固定しているが，角度変化を与えた際にグラウト材も変形し，その結果，測定結果に差異が生じたものと考えている。

解決策として，グラウト材及びグラウトの充填方法の再検討を行い，グラウト材の変形等の傾斜以外の物理的な作用がセンサの設置状態に影響を与えないようにすることを考えている。



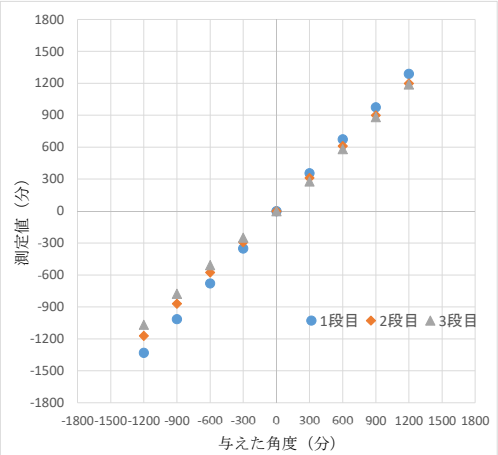
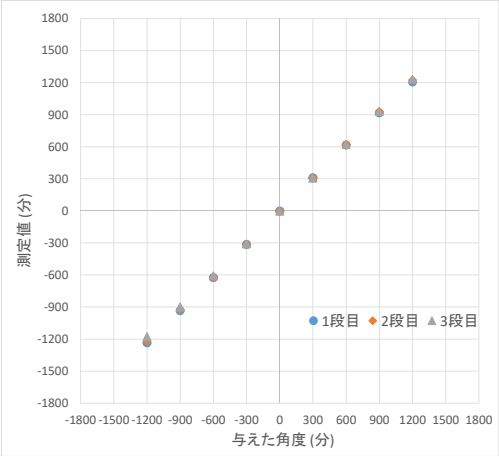


図 3.5-17　与えた角度に対する測定値の関係
（応用地質，左図：A 軸回転，右図 B 軸回転）



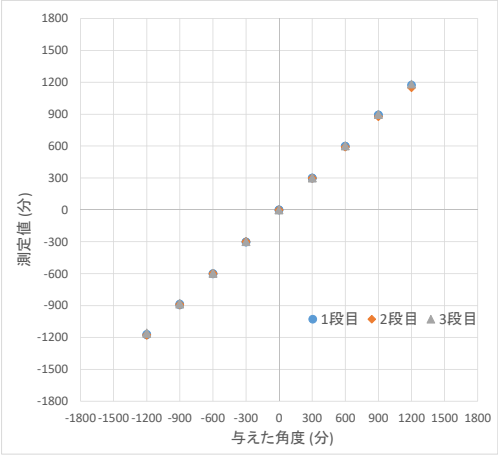
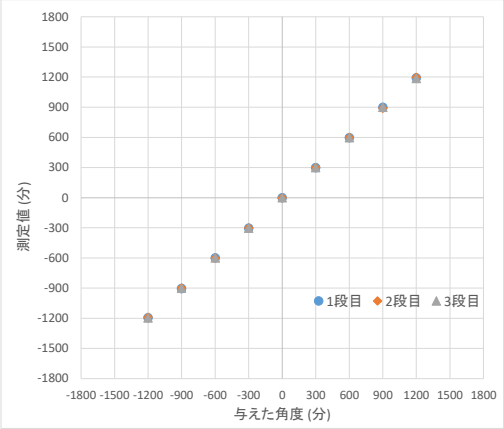


図 3.5-18　与えた角度に対する測定値の関係
（坂田電機，左図：A 軸回転，右図 B 軸回転）



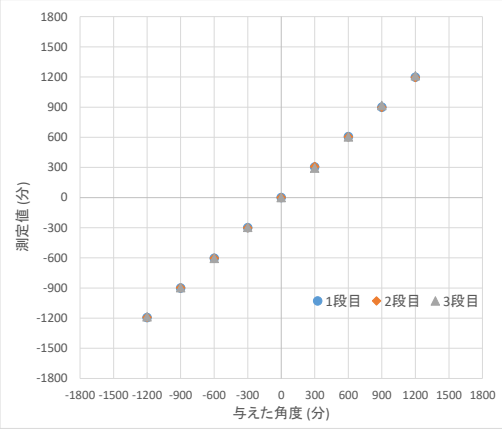


図 3.5-19　与えた角度に対する測定値の関係
（オサシ・テクノス，左図：A 軸回転，右図 B 軸回転）

4. 長期観測のための地中変位計測手法の検討

本共同研究において開発を行った新型計器の仕様や性能，各種試験の結果から，新型計器と従来型計器の比較を表 4-1，表 4-2 に示す。

小型・フレキシブル型挿入式計器では，表 4-1a に示すとおり，計器のサイズと質量が従来型と比べ小さくなり，測定器やケーブル等を含めた計測器一式の質量も軽くなった。さらに性能についても，表 4-1b に示すとおり，変形ガイド管への通過可能となる変位量が従来型挿入式計器に比べ向上し，一定の測定精度を有することが確認された。計器の小型化に伴い，車輪間隔が従来型の 500㎜ に対して新型では 250㎜ となり，測定間隔が 1/2 となった。従来よりも細かな計測ができるようになる反面，測定点数が 2 倍になるため，測定に時間を要することになる。

小型設置式計器では，表 4-2a に示すとおり，計器のサイズと質量が従来型と比べ小さくなり，性能についても，表 4-2b より，任意角度に傾斜させた変形ガイド管の傾斜角を概ね測定でき，変形ガイド管への通過可能となる変位量が従来型挿入式計器に比べ向上したことが確認された。

表 4-1　小型・フレキシブル型挿入式計器と従来型計器の比較

a) 小型・フレキシブル型挿入式計器と従来型計器の比較（仕様）

<table>
<tr><th rowspan="3">タイプ</th><th rowspan="3">メーカー</th><th colspan="12">計器の仕様</th></tr>
<tr><th colspan="2">全長</th><th colspan="2">直径
※突起部除く</th><th colspan="2">車輪・測定
間隔</th><th colspan="2">測定成分</th><th colspan="2">質量</th></tr>
<tr><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th></tr>
<tr><td rowspan="2">タイプ①：
小型挿入式
計器</td><td>応用
地質</td><td>360㎜</td><td rowspan="3">660㎜
～
779㎜</td><td>20㎜</td><td rowspan="3">30㎜
～
32㎜</td><td>250㎜</td><td rowspan="3">500㎜</td><td>2軸</td><td rowspan="3">1軸
～
2軸</td><td>0.7kg</td><td rowspan="3">1.6kg
～
1.7kg</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td><td>487㎜</td><td>15㎜</td><td>250㎜</td><td>1軸</td><td>0.35kg</td></tr>
<tr><td>タイプ②：
フレキシブル型
挿入式計器</td><td>多摩川
精機</td><td>280㎜</td><td>17㎜</td><td>なし</td><td>3軸</td><td>0.3kg</td></tr>
</table>

b) 小型・フレキシブル型挿入式計器と従来型計器の比較（性能・質量）

<table>
<tr><th rowspan="3">タイプ</th><th rowspan="3">メーカー</th><th colspan="3">性能</th><th colspan="2" rowspan="2">計測器一式
の質量
※ケーブル50m</th></tr>
<tr><th colspan="2">通過可能な変位量
(/0.5m)</th><th>測定範囲</th></tr>
<tr><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>新型</th><th>従来型</th></tr>
<tr><td rowspan="2">タイプ①：
小型挿入式
計器</td><td>応用
地質</td><td>約150㎜</td><td rowspan="3">約30㎜</td><td>±20度</td><td>7.5kg</td><td rowspan="3">8.5kg
～
11.9kg</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td><td>約150㎜</td><td>±30度</td><td>4.1kg</td></tr>
<tr><td>タイプ②：
フレキシブル型
挿入式計器</td><td>多摩川
精機</td><td>約400㎜</td><td>±90度</td><td>4.3kg</td></tr>
</table>

表 4-2　小型設置式計器と従来型計器の比較

a)小型設置式計器と従来型計器の比較（仕様）

<table>
<tr><th rowspan="3">タイプ</th><th rowspan="3">メーカー</th><th colspan="8">計器の仕様</th></tr>
<tr><th colspan="2">全長</th><th colspan="2">直径
※突起部除く</th><th colspan="2">センサ間隔</th><th colspan="2">測定成分</th></tr>
<tr><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th></tr>
<tr><td rowspan="3">タイプ③：
小型設置式
計器</td><td>応用
地質</td><td>1700mm
(3ch)</td><td rowspan="3">任意</td><td>18mm</td><td rowspan="3">32mm</td><td>250mm</td><td rowspan="3">500mm
～
1000mm</td><td>2軸</td><td rowspan="3">1軸
～
2軸</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td><td>500mm</td><td>15mm</td><td>500mm</td><td>1軸</td></tr>
<tr><td>オサシ・
テクノス</td><td>170mm</td><td>21.7mm</td><td>250mm</td><td>2軸</td></tr>
</table>

b)小型設置式計器と従来型計器の比較（仕様・性能）

<table>
<tr><th rowspan="3">タイプ</th><th rowspan="3">メーカー</th><th colspan="2" rowspan="2">最大接続数</th><th colspan="2" rowspan="2">最大測定延長</th><th colspan="3">性能</th></tr>
<tr><th colspan="2">通過可能な変位量
(/0.5m)</th><th>測定範囲</th></tr>
<tr><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型</th><th>新型</th><th>従来型
挿入式</th><th>新型</th></tr>
<tr><td rowspan="3">タイプ③：
小型設置式
計器</td><td>応用
地質</td><td>3ch
固定</td><td rowspan="3">20ch
～
25ch</td><td>0.75m</td><td rowspan="3">任意</td><td>約100mm</td><td rowspan="3">約30mm</td><td>±20度</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td><td>40ch</td><td>任意</td><td>約100mm</td><td>±30度</td></tr>
<tr><td>オサシ・
テクノス</td><td>8ch</td><td>2m</td><td>約100mm</td><td>±30度</td></tr>
</table>

新型計器と従来型計器の比較を基に表 4-3 のように新型計器各タイプのメリット・デメリットを整理した。開発した新型計器は従来型挿入式計器と比べて，多くのメリットを有しているが，一方でデメリットも有している。これらのメリットを生かし，従来の計器で挿入できなくなったガイド管においても観測を可能とし，大変位や長期観測に対応できる地中変位計測手法とするため，状況に応じた新型計器の使い分けを検討した。

表 4-3　新型計器各タイプのメリット・デメリット

<table>
<tr><th>タイプ</th><th>メーカー</th><th>メリット</th><th>デメリット</th></tr>
<tr><td rowspan="2">タイプ①：
小型挿入式
計器</td><td>応用
地質</td><td rowspan="2">・従来型挿入式計器に比べ，通過性に優れる。
・従来型挿入式計器と同等精度で測定可能である。
・従来型挿入式計器よりも細かい測定間隔で測定可能である。
・計測器一式の質量が軽い。</td><td rowspan="2">・従来型挿入式計器よりも測定時間を要する。</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td></tr>
<tr><td>タイプ②：
フレキシブル型挿入式
計器</td><td>多摩川
精機</td><td>・従来型挿入式計器に比べ，通過性に優れる。
・連続測定が可能である。
・従来型挿入式計器よりも測定時間が短い。
・計測器一式の質量が軽い。</td><td>・従来型挿入式計器に比べ，測定精度が劣る。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">タイプ③：
小型設置式
計器</td><td>応用
地質</td><td rowspan="3">・従来型挿入式計器に比べ，通過性に優れる。
・現地での定期的な測定が不要である。</td><td rowspan="3">・特になし</td></tr>
<tr><td>坂田
電機</td></tr>
<tr><td>オサシ・
テクノス</td></tr>
</table>

まず，従来型計器で計測不能となった場合，小型挿入式計器を用いて計測を行うことが第一に考えられる。新たにガイド管を設置することなく，従来と同様の観測を継続することができる。次に，ガイド管の変位が相当大きくなり，小型挿入式計器でも計測不能になった場合には，フレキシブル型挿入式計器または小型設置式計器で対応する。フレキシブル型挿入式計器は，現時点での測定精度は高くないものの，高い通過性能を生かして，さらに長期にわたって測定を継続できると期待される。一方，小型設置式計器は，計器の接続数とその間隔により測定区間が 2m 以下に限定されるが，従来と同等の測定精度かつリアルタイムによる観測が可能になるというメリットがある。このような考え方をフロー図に示すと図 4-1 のとおりである。

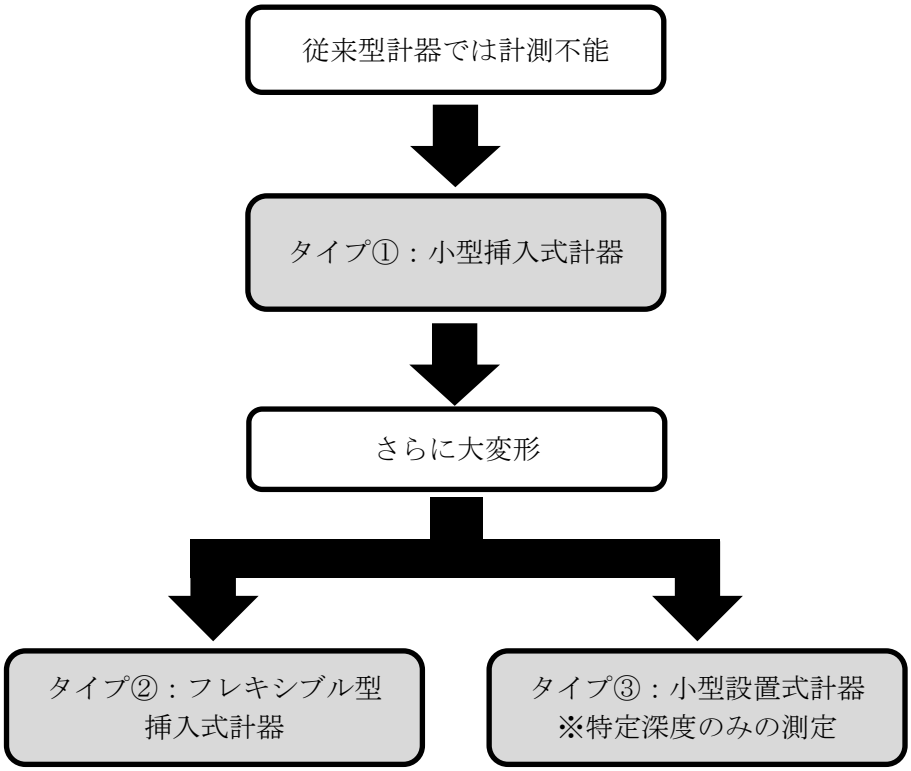


図 4-1　新型計器の使い分けのフロー図

新型計器を用いた観測を実施することで，以下の 3 点が期待される。

(1)　長期連続観測の実現

従来型計器による観測では，計器が挿入できなくなると，新たにガイド管を再設置するまでは欠測となり，観測期間に空白が生じていた。新型計器では，従来型計器の挿入限界を超えて変形したガイド管においても観測可能であることから，欠測することなく，長期間に渡って連続的な変動が観測可能になる。

(2)　観測孔の再設置コストの縮減

新型計器を用いることで，新たに観測孔を設置することなく，観測を実施することができる。そのため，観測孔を再設置するためのコストが縮減でき，そのための予算要求や発注手続といった事務的な作業も不要となる。

(3)　観測作業の負荷軽減

新型計器では，計器そのものが軽量化されたことで，測定時の計器の上げ下ろし作業の負荷が軽減されるとともに，合わせて計測器一式も軽量化されたため，それらを運搬する際の負荷も軽減される。また，測定時や運搬時の作業の安全性の向上も期待される。

一方で今後の課題としては，測定精度の向上が挙げられる。各種試験において，新型計器の測定限界が大きく向上したことが確認されたものの，従来型挿入式計器の測定結果に対しては誤差も認められた。地中変位の詳細な把握には，従来型挿入式計器と同程度の測定精度を要求されることから，引き続き新型計器の測定性能の向上に努める予定である。

謝辞

国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所，国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所，国土交通省中部地方整備局天竜川上流河川事務所，国土交通省中国地方整備局鳥取河川国道事務所，国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所，国土交通省四国地方整備局大渡ダム管理所，埼玉県，和歌山県，宮崎県には，本共同研究の実施にあたりご協力を頂いた。ご協力頂いた皆様に深く感謝いたします。

参考文献

1)独立行政法人土木研究所･応用地質株式会社･坂田電機株式会社･日本工営株式会社(2010)：地すべり地における挿入式孔内傾斜計　計測マニュアル，理工図書

2)独立行政法人土木研究所･応用地質株式会社･坂田電機株式会社･日本工営株式会社(2010)：孔内傾斜計データ不良の原因に関する実態調査と計測技術の標準化，共同研究報告書，第397号

3) 独立行政法人土木研究所・日本工営株式会社・坂田電機株式会社（2012）：孔内傾斜計データ不良の原因に関する実態調査と計測技術の改善・開発，共同研究報告書，第430号

共同研究報告書
Cooperative Research Report of　PWRI
No.530 July 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754