

## 2. 地盤伸縮計の歴史と現状

### History of extensometer

樋口佳意 Kei HIGUCHI／坂田電機株式会社 Sakata Denki Co., Ltd.

#### 1. まえがき

地盤伸縮計は、地すべり機構解明のための移動量調査、警戒避難を目的とした地すべり監視、対策工の効果判定など、様々な場面で使用される重要な計測機器である。また、地盤伸縮計の歴史は地すべり調査の歴史でもあり、地すべり調査の開始とともに開発が始まり、現在でも光ファイバを用いた地盤伸縮計<sup>1)</sup>などの新しいセンサの研究開発が続けられている。

本稿では、このような地盤伸縮計開発の歴史的変遷と現状について紹介する。なお、地盤伸縮計は「地すべり計」、「地すべり記録器」、「地表変位計」など色々な名称や製品名で呼ばれているが、読者諸氏が慣れ親しんでいると思われる「地すべり観測便覧」<sup>2)</sup>に従い、本稿では「地盤伸縮計」と呼ぶこととする。

#### 2. 戦前から戦後直後の地盤伸縮計開発

##### 2.1 内務省土木試験所の地盤伸縮計

地すべり調査が本格的に実施されるようになったのは戦後のことであるが、亀の瀬地すべりや茶臼山地すべり地においては、現在の独立行政法人土木研究所の前進である内務省土木試験所によって戦前から実施されている。これらの地すべりでは移動量調査も行われており、不動地内に打った杭の上に雨量計で使われていた記録器を設置し、地すべり土塊中に打った杭とインバー線で連結するという方法で計測されている<sup>3)</sup>。斜面の2点間の相対変位を測定するという今日では常識的な技術が、地すべり調査の初期には既に存在していたのである。

##### 2.2 鉄道技術研究所の地盤伸縮計

戦後は当時唯一の長距離交通網である鉄道が地すべりで寸断されるという事故が多く、鉄道技術研究所でも齊藤迪孝氏、針生幸治氏らによって図-1に示すような地盤伸縮計が昭和21年（1946年）頃に開発されている<sup>4),5)</sup>。この地盤伸縮計は、一端の杭にヒンジで鉄ロッドを固定し、他端は杭頭のローラー指示針（ニクロム線）の上に置いており、杭間隔が伸びると指示針は右回りに回転する構造になっている。この回転角を分度器で読み取ることで移動量が計測されるという仕組みである。

針生氏<sup>5)</sup>は、この地盤伸縮計を当時まだ残っていた防空壕を覆う土の斜面に設置し、散水による崩壊実験を行ったところ、指示針はゆっくりと回転を始め、翌日に

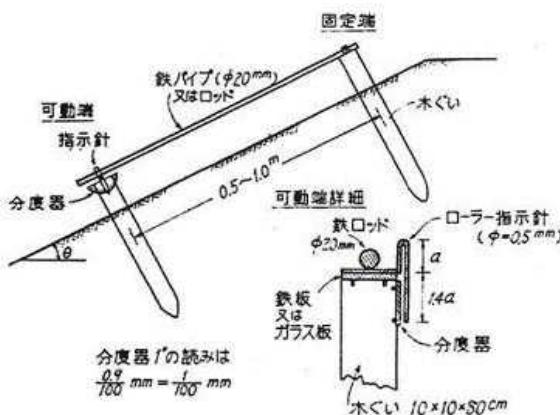


図-1 齊藤・針生の地盤伸縮計

は相当大きな動きになっていたということを記録している。その後、実際の地すべり現場に設置して観測をしたところ、大体思うような結果が得られ、特許も取得したと報告されている。また、この指示針として、当時使用されていた荷札の針金を曲げて利用していたらしく、当時の物不足の状況がうかがえる。

その後、図-1のローラー指示針と分度器の組合せをダイヤルゲージに換えたもの（図-2）に改良され、さらに金属棒（鉄ロッド）を石英ガラスに換えて測定値の温度影響を減らすなどの精度向上策が図られている。当時の技術では数m程度の長さまでの石英ガラスしか手に入らず、長い距離の測定には複数個のセンサを並べて使用している。当時の設計者の話では、石英ガラスは割れやすく、加工には相当の神経を使ったそうである。

##### 2.3 京都大学の地盤伸縮計

同じ頃、京都大学の佐々憲三教授は地殻潮汐による地盤のひずみを観測するために開発した地盤伸縮計を利用し、地すべりの測定を始めようとしていた。この地盤伸縮計は、図-2の金属棒をインバー線に換え、ダイヤルゲージをレバーと自記記録ドラムに換えたものであり、昭和23年（1948年）に伯備線莊の宮トンネルで発生した地すべり観測に佐々らによって使用されている。この地盤伸縮計は「佐々式地殻伸縮計」<sup>6)</sup>と呼ばれ、昭和24年（1949年）にはインバー線の変化をブーリー（滑車）の回転に換え、それをギアで増幅して自記ドラムに記録する構造に改造されたものが能生谷地すべり（新潟県）の観測に使用されている。その後、更なる改造が京都大

学遠藤教授、高田教授らによって行われているが、亀の瀬地すべりなどに設置されている地盤伸縮計の基本原理はこの佐々式地殻伸縮計と同じである<sup>7)</sup>。

### 3. 警報器と遠隔記録方法の開発

昭和27~28年（1952~53年）には、鉄道技術研究所の針生幸治氏、坂田電機株の坂田肇氏らが図-1の指示針をラック・ピニオンギアに換え、これに電気接点をつけた警報器付の地盤伸縮計を考案した。

また、坂田氏らは図-2のダイヤルゲージに電気接点をつけ、そのパルスにより自記ドラムのペンを動かすリレーを接続し、地すべりの発生している斜面から離れた場所で記録できる地盤伸縮計を開発した。この地盤伸縮計は、地すべりの移動があったときのみ電流が通じ、常時は電力を消費しないという特長を有している。

本稿のために聞き取りに応じてくれた当時の開発者によれば、この警報器付の地盤伸縮計とダイヤルゲージ自記記録型の地盤伸縮計が当時建設省河川局砂防課課長補佐だった谷口敏雄先生に評価され、鉄道分野で生まれた地盤伸縮計が道路関係でも数多く使われるようになったそうである。

### 4. 現行センサの原型

#### 4.1 自記記録式地盤伸縮計

昭和30~40年代には時計を内蔵した自記式ドラム型の地盤伸縮計が使用されるようになっていたが、時計で回転する記録紙上を地すべり移動に伴ってペンが円弧状に動く構造であったため、移動量が大きいとペンが記録紙から外れやすいうことや時間と移動量の関係がわかりにくいという問題があった。

これらの問題に対し、富山県氷見土木事務所所長であった川島孝雄氏は佐々式地殻伸縮計を改良した独自のセンサ（図-3）を試作し、胡桃地すべりの調査に用い

た。この地盤伸縮計は、ドラムの回転と直角方向に時計でペンが進み、移動量がドラムの回転方向に記録される構造となっており、現在の自記式の地盤伸縮計の原型となるセンサとなった。このとき川島氏の指導の下で針生氏・坂田氏らが改良して誕生した「SRL-1型地すべり記録器」、「SRL-3型地すべり警報器」（図-4）<sup>8)</sup>は現在でも製造販売されており、筆者が最近訪れた地すべり現場でも設置されていた。

#### 4.2 電気式地盤伸縮計

昭和35年頃からは、図-5のようなポテンショメータを用いた電気式の地盤伸縮計も使われるようになってきた。このセンサ構造は非常に簡単で、ブーリー（滑車）に巻きつけたインバー線にウェイト（錘）で張力を加えておき、地すべりの移動で変化するブーリーの回転をポテンショメータで電気抵抗に変換して計測される。図-6<sup>9),10)</sup>のように、ブーリーの換わりにラダーホイルを使用し、インバー線を巻きつける代わりにラダーチェーンを使うものもある。また、ポテンショメータの換わりにひずみゲージを変換器に用いたものもある（図-7）<sup>11)</sup>。

#### 4.3 センサ開発時の課題

インバー線の保護は、塩ビパイプを用いるのが今では一般的である。しかし、昭和30年代初めまでは安価な適

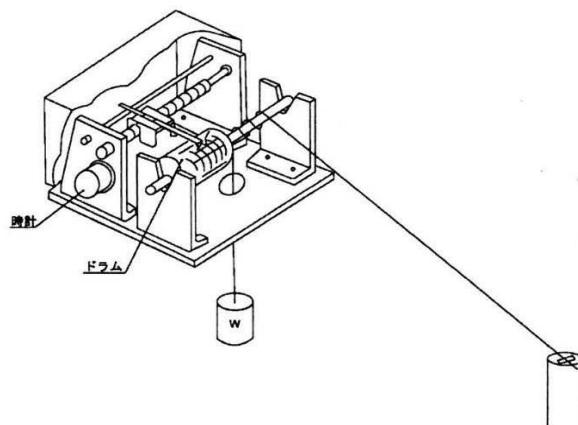


図-3 川島氏考案の地盤伸縮計

SRL-1, 3

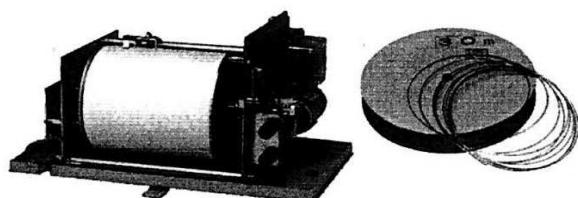
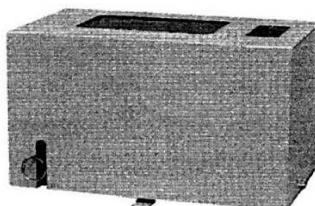


図-4 針生・坂田が改良した地盤伸縮計

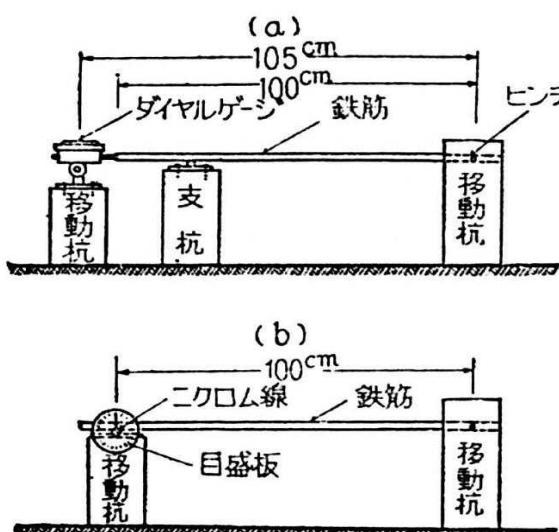


図-2 斎藤・針生の地盤伸縮計の改良型

ELS-7022B

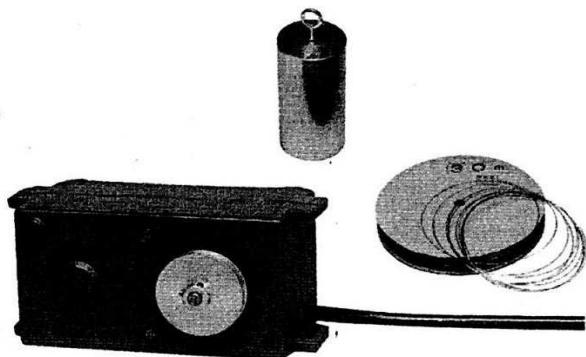


図-5 ポテンショメータ型地盤伸縮計

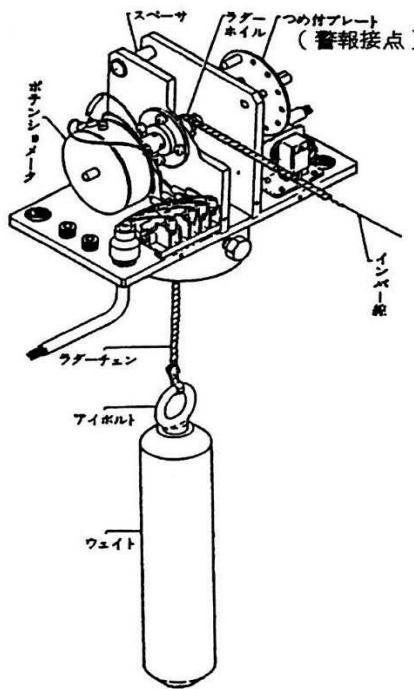


図-6 ラダー使用のポテンショメータ型地盤伸縮計

当な材料がなかったため、インバー線の保護管はなく、測定エラーがよく発生していた。このエラーを防ぐため、塩ビパイプが手に入るようになるまでは、トタンや木の樋、節を抜いた竹などでインバー線を保護していた<sup>7)</sup>。

自記記録式の地盤伸縮計では、ペン送りのための時計の調達のほか、記録紙やペンなどの材料の調達が課題であった。昭和48年（1973年）頃に電気式時計に換わる前は機械式時計を使用していたが、時計の心臓部であるテンプやヒゲゼンマイの品質が悪く、時計が止まって測定ができなくなることもあった。記録紙やペンにおいては、気象変化の激しい山間部でしかも出水期に計測することが多いことから、結露などによる水分でインクがにじむという問題があった。これらの問題を解消するため、海外から調達することになった材料もある。



図-7 ひずみゲージ型地盤伸縮計

## 5. 現在の地盤伸縮計

### 5.1 地盤伸縮計の種類

上述したように、自記記録式の地盤伸縮計は現在でも製造され現場で使用されている。ポテンショメータ、ひずみゲージを用いた電気式も同様に使用されている。近年のICTの進歩により、携帯電話でデータを遠隔地に伝送したり、メモリを内蔵して記録用メディアでデータを回収できるデジタル式の地盤伸縮計が多く使われるようになってきたが、基本的な計測原理や警報出力などの機能は開発当初から大きく変わっていない。

### 5.2 誘導雷対策

地盤伸縮計に限った問題ではないが、地すべり観測機器は気象変化の激しい山間地で使用されることが多いため、誘導雷によって損傷を受けることが多い。避雷器を内蔵した機器も多く使われているが、ある種の避雷素子があらゆる誘導雷サージに対応しているわけではないため、雷害を完全に防ぐことは困難である。

このようなことから、誘導雷の影響を受けない光ファイバケーブルを用いた地盤伸縮計例えは<sup>[12], [13], [14]</sup>の開発が各方面で取組まれており、実用レベルになってきている（図-8）<sup>8)</sup>。しかし、山間部であることの多い地すべり地区は光ファイバ網が整備されている区域と一致しないことも多く、採用する場合には現場条件や経済性が課題となる。

### 5.3 計測精度について

一般に計測精度と分解能や感度という言葉が混同されていることが多い、道路土工 - のり面工・斜面安定工指針<sup>[15]</sup>でも「計器の精度は0.2mm以上のもの・・・」と記述されている。

現在、分解能（=読み取れる細かさ）が0.1~0.2mmという地盤伸縮計は存在するが、精度が0.1~0.2mmのものはおそらく存在しない。国内の各メーカーのカタログ<sup>[8], [10], [11], [15]</sup>の仕様を見ても、分解能のみ示しており精度

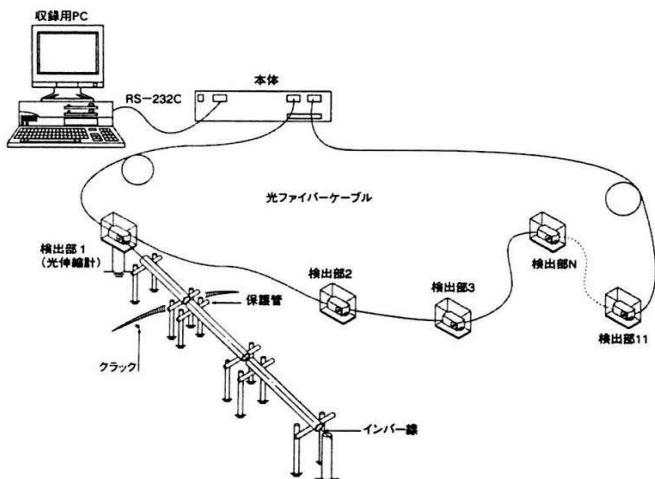


図-8 OFRI式光ファイバ伸縮計

は示していない。文献8や地すべり観測便覧<sup>2)</sup>に記述されている「分解能0.2mm・・・実用上の精度は1mm程度・・・」というのが正しい表現であり、適切な計器の選定や計測データの評価を行いう際には注意が必要である。

#### 5.4 新たな取組み

最近の大地震や豪雨で地すべりや斜面災害が多発したこともあり、災害復旧現場の二次災害防止を目的に設置する地盤伸縮計に関する検討が行われている。国土交通省北陸技術事務所では、欧州で開発されたワイヤー式ポジションセンサやレーザー測距計を使用した大変位計測に取組んでおり、インバー線の設置替えのために何度も危険斜面へ人が立入ることを避けようとしている。同様の取組みは独立行政法人土木研究所地すべりチームでも行われている。

その一方で、地盤伸縮計による計測にインバー線を使わない方法なども考案されている。大川ら<sup>17)</sup>は、剛性とフレキシビリティを持ち合わせた炭素繊維複合ケーブルをインバー線の代わりにした計測方法を開発しており、豪雪地域での設置における課題などを解消している。納谷ら<sup>18)</sup>は拡散レーザー変位計を使用し、インバー線を使わない計測方法を研究している。

#### 6. おわりに

地盤伸縮計の歴史と現状について紹介してきた。現場計測に用いるセンサの多くが欧米の技術に学び、それから国内で独自の発展を遂げて今日に至っているが、地盤伸縮計は国内で発案された世界に誇れるセンサの一つで

ある。

地盤伸縮計が現在の姿になってから50年くらいになるが、記録媒体のデジタル化や新しいデータ伝送方法などが若干加わった程度で、センサとしての計測原理、精度、設置方法は大きく変化していない。したがって、計測されたデータに対しては、様々な誤差要因を考慮した現場技術者の評価や判断が必要であることも変わらない。現場の管理者も、設置してデータを評価する技術者も、そして計器の開発者も、計測目的や計器特性などをよく理解して計測することが必要である。

#### 参考文献

- 1) 横口佳意・野村康弘・浅井健一・藤澤和範：OTDR方式による光ファイバを用いた地すべり変位検出センサの開発、第44回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp315-318、2005。
- 2) 社団法人地すべり対策技術協会：いつでも、どこでもすぐに役立つ地すべり観測便覧、pp119、1996。
- 3) 谷口敏雄：地すべりの道を拓く、地すべり学会「谷口敏雄先生遺稿集」編集委員会、社団法人地すべり対策技術協会、1989。
- 4) 福岡正巳：地じりとその対策、OHM文庫（308）、オーム社、pp.63-67、1953。
- 5) 針生幸治：地すべり記録器（伸縮計その1）、地すべり技術、Vol.1, No.5, 1975。
- 6) 柴田徹：地盤の移動量調査、土木計測便覧、京都大学土木会、pp.702-703、1970。
- 7) 谷口敏雄：地すべり調査と対策、山海道、1972。
- 8) 坂田電機株式会社：総合カタログ52、2008。
- 9) 財団法人高速道路調査会：地すべり危険地における動態観測施工に関する研究（その3）報告書、pp.35-39、1993。
- 10) 株式会社共和電業：土木建築用変換器、2002。
- 11) 株式会社東京測器研究所：製品総合カタログ、2005。
- 12) 横口佳意・長友聖二・山本彰・高嶋徹：光ファイバリング干渉計を用いた地盤変位測定、第38回地盤工学研究発表会講演集、2003。
- 13) K. Higuchi, K. Fujisawa, K. Asai, A. Pasuto, G. Marcato: Application of new landslide monitoring technique using optical fiber sensor at Takisaka Landslide, Japan, 1st North American Landslide Conference, Paper No. 17800, 2007.
- 14) 藤澤和範・小原娘子・池田学・山越重志・山本宏幸・村上恵司・高濱利光：光ファイバセンサを活用した地すべりモニタリングシステム、第47回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp349-352、2008。
- 15) 社団法人日本道路協会：道路土工－のり面・斜面安定工指針、pp115、1999。
- 16) 株式会社オサシ・テクノス：New Product Guide10
- 17) 大川滋・齊藤浩之・坂東和郎：炭素繊維複合ケーブルを用いた地表伸縮計について、第46回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp231-232、2007。
- 18) 納谷宏・溝上雅宏・浅利晋一郎・増成友宏・清水則一：非接点式による計測技術の研究Vol.3、第46回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp219-222、2007。

（原稿受付2009年2月16日、原稿受理2009年2月17日）