

自走装置を用いた樋門函体の 3次元変位計測技術の開発

(独)土木研究所寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○小宮山 一 重
牧野 正 敏
山崎 貴 志

北海道には泥炭性軟弱地盤が広く分布しており、長期にわたり沈下する特性を有している。河川堤防の樋門・樋管は地盤沈下の影響を受け、函体周辺の空洞化や函体継手部の変形などの問題が生じている。この対策として、柔構造樋門・樋管が建設されるようになった。柔構造樋門・樋管では、函体の沈下量等を計測する動態観測が行われているが、計測値は1次元であるため、変位方向の判別がしづらく、高さが1.5m以下の函体内での作業は苦渋を伴う。このことから、詳細な動態把握と人力作業軽減を目的に、トータルステーションと自走装置を用いて函体内に設置されている測定鉤を3次元で計測する技術を開発した。

キーワード：樋門・樋管、計測、トータルステーション、自走装置

1. はじめに

北海道には泥炭性軟弱地盤が広く分布（図-1）しており、長期にわたり沈下する特性を有している¹⁾。

泥炭性軟弱地盤における河川構造物の樋門・樋管では、地盤沈下により函体周辺に空洞が発生し、その空洞が水みちとなり、洪水時には破堤を引き起こし大きな災害を発生させる要因となる²⁾。

この対策として、建設省（現国土交通省）より、「樋門の新設・改築にあたっては、原則として柔構造樋門とするものであること」と通達³⁾されており、今後は柔構造樋門の設置数が増えていくと想定される。

柔構造樋門・樋管の建設では、動態観測として函体沈下量と函体継手部の開きなどを盛土完了後6ヶ月程度まで人力で計測している。

函体内には、沈下測定鉤と継手変位測定鉤が設置されており、函体沈下量は沈下測定鉤の高さをレベルとスタッフを用いて計測し、函体継手部の開きは、継手双方に設置されている継手変位測定鉤間を金尺などを用いて計測している（写真-1）。しかし、計測値は1次元であるため変位方向が判別しづらいという難点があるほか、函体高さが1.5m以下の小規模な函体内での計測作業は苦渋を伴っている。

平成22年度現在、国土交通省北海道開発局（以下、開発局という）で管理している樋門・樋管1,480箇所⁴⁾のうち、函体の高さ・口径が1.5m以下の数は約800箇所（54.1%）と半数以上を占めている。

このことから、函体の詳細な動態把握と函体内における人力作業の軽減を目的に、トータルステーション（以下、TS という）と小型クローラ式自走装置（以下、

自走装置という）を用いて、函体内の測定鉤の座標を3次元（X、Y、Z）で計測する「変位計測技術」を開発した。



図-1 北海道の泥炭性軟弱地盤分布図¹⁾



写真-1 沈下測定鉤の沈下量計測状況（左側）と継手変位測定鉤間の開き計測状況（右側）

2. 変位計測システム概要

測定鉤の座標を3次元（X、Y、Z）で計測する方法と

して、TS を函体の外（吐き口側または呑み口側）に設置し、測定鉞を直接視準する方法がある。しかし、連結している函体では、撓みや継手部のゴムが大きく変形している場合があるなど、測定鉞を TS で直接視準することが困難であるため、函体内で計測する技術が必要である。併せて、小規模函体内における人力作業の軽減を図るために、小型機械をベースにした函体内の測定鉞を計測するシステムとした。

システム構成は、変位計測装置を搭載して函体内を走行する「自走装置」、自走装置に搭載する計測部の「変位計測装置」、変位計測装置の操作、座標の算出を行う「変位計測ソフト」、計測したデータを管理する「帳票管理ソフト」とした（図-2、図-3）。

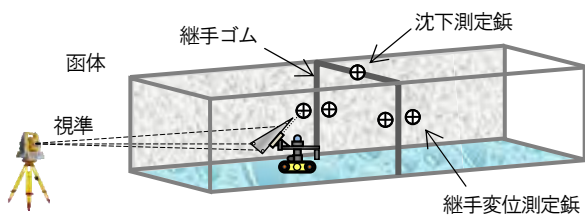


図-2 変位計測システムによる計測イメージ図

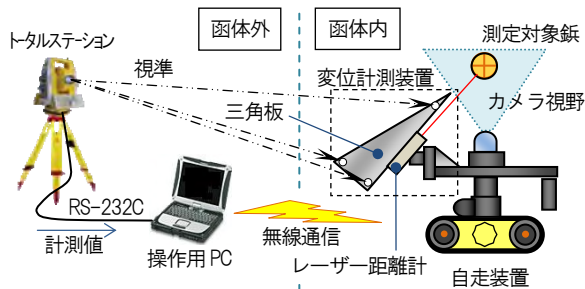


図-3 変位計測システム機器構成図

(1) 自走装置

自走装置は、次の条件を満たす自走装置（写真-2）を用いて、小規模函体内での計測作業を効率的に行うための改造を施した（写真-3、表-1）。

選定条件

- ①防水性を有すること
- ②無線通信による遠隔操作が可能であること
- ③カメラ画像で函体内の状況を確認できること



写真-2 改造前の自走装置（左側）と操作用パソコン（右側）

改造箇所

- ①計測装置搭載用キャリアの取付（伸縮式）
- ②点検用カメラの移設
- ③走行用カメラの増設
- ④照明装置の増設
- ⑤計測・照明装置用電源BOXの増設
- ⑥後方転倒防止装置の取付

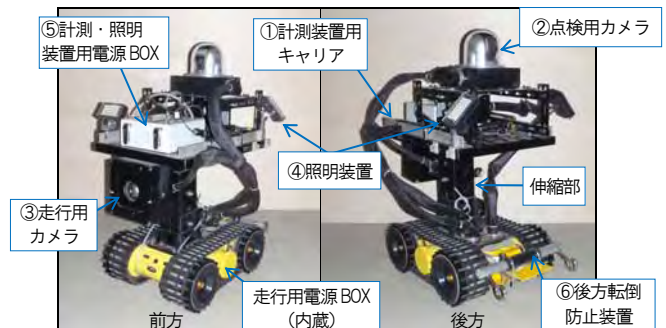


写真-3 改造後の自走装置

表-1 自走装置主要諸元（改造後）

| | |
|------------|---|
| 寸法 | W350×D452×H588～838mm（伸縮式） |
| 質量 | 25.7kg |
| 積載質量 | 20.0kg以下 |
| 動力源 | ニッケル水素バッテリー（7.2V）×4本 |
| 駆動方式 | 電気モータ×2個 |
| 走行速度 | 最高 1.49km/h（24.8m/min） |
| 走行用カメラ | カラー 32万画素 |
| 点検用カメラ | カラー 32万画素 パン（左右）±175度、チルト（上下）0～120度 |
| 照明 | LED 6.4W×3灯 |
| 計測・照明装置用電源 | ニッケル水素バッテリー（7.2V）×4本 （計測装置用2本、照明装置用2本） |
| 保護等級 | IP67（クローラ部） |
| 乗越え可能最高段差 | 80mm |
| 操作装置 | 防水型ノートパソコン、コントローラ |
| 通信方法 | 無線LAN IEEE.802.11g |

(2) 変位計測装置

変位計測装置は、電動雲台、レーザー距離計等を用いて構成した（写真-4）。また、測定鉞の座標を計測するには、変位計測装置の向き、傾きを把握する必要があることから、三角測量の原理を応用し、レーザー距離計に取付けた三角板の端部3点を計測して測定鉞の座標を求めるシステムとした（図-3）。

三角板の向き、傾きを把握するために、端部3点に視準点として測量で用いられている反射シールを貼り付けた（写真-5）。また、3点間の距離は極力離れた方が計測精度の向上に繋がるが、大きすぎると小規模函体内での計測に対応することができなくなるため、函体の断面サイズに応じて三角板の使い分けができるように、3サイズ（200mm×300mm、200mm×400mm、200mm×700mm）を製作した。なお、変位計測装置の動作制御及び座標算出は、変位計測ソフトで行う。



写真-4 変位計測装置

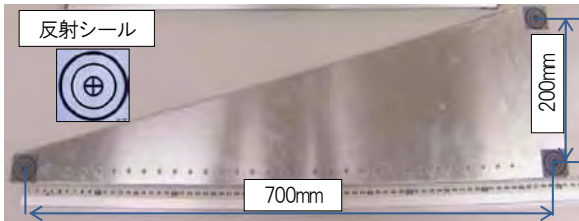


写真-5 三角板 (200mm×700mm)

(3) 変位計測ソフト

変位計測ソフトは、変位計測装置（電動雲台、レーザー距離計）の制御、座標の算出を行う。測定鈎の座標は、函体の外（吐き口または呑み口側）に設置した TS 器械点の座標 (X、Y、Z) を基に、次の計測値を用いて算出する。

- ① TS と変位計測装置間の距離、角度
- ② 変位計測装置と測定鈎間の距離

(4) 帳票管理ソフト

変位計測ソフトで算出した座標値データを取込み、沈下測定鈎と継手変位測定鈎の座標値を一つの帳票で管理することができる。

3. 変位計測システム計測試験（動作確認試験）

変位計測システムの自走装置の機能性及び計測精度を検証するため、寒地土木研究所構内で、断面形状 1.2m×1.2m、延長 50m の樋門を想定し、0～50m 地点まで 10m 間隔で測定鈎を各 3 箇所ずつ設置して、計測試験を

実施した（図-4）。

測定鈎を TS で直接視準した計測値を真値として計測値の差を検証した結果を表-2 に示す。

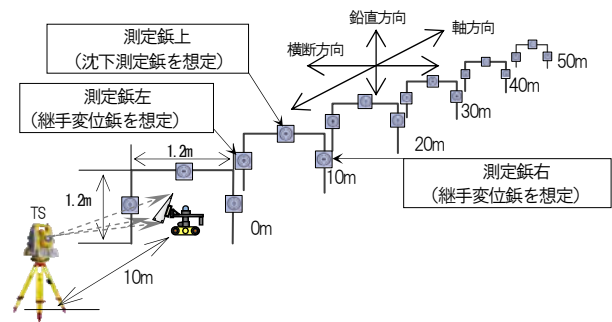


図-4 試験イメージ図

試験結果から、自走装置の無線通信による遠隔操作及び点検用カメラ画像で測定鈎におけるレーザー光の照射状況を確認する方法で、50m 地点（自走装置操作場所からは 60m 程度）までの計測を行えることを確認した。

計測精度は 0～40m 地点の平均値が約 3～4 mm、50m 地点の平均値が約 6 mm となった。この計測精度は、一般的に土木工事の GNSS 測量に用いられている RTK 法の公称測定精度（ $\pm 20\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times \text{測定距離}$ ）⁵⁾、スタティック法の公称測定精度（2 周波： $\pm 5\text{mm} + 1 \times 10^{-6} \times \text{測定距離}$ 、1 周波： $\pm 10\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times \text{測定距離}$ ）⁵⁾ と同等の精度であるといえる。

4. 変位計測システム計測試験（現場適用性試験）

変位計測システムの自走装置の機能性及び計測精度を検証する現場適用性試験を実験門 4 箇所（表-3）で実施した。なお、計測精度を検証するため、計測は次の 3 種類による方法で実施した。

表-2 変位計測システム計測精度

(単位 : mm)

| 地点 | 0m | | | 10m | | | 20m | | | 30m | | | 40m | | | 50m | | | 平均 (0-50m) |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|---------------|
| | 左 | 上 | 右 | 左 | 上 | 右 | 左 | 上 | 右 | 左 | 上 | 右 | 左 | 上 | 右 | 左 | 上 | 右 | |
| 軸方向 | 5.00 | 0.40 | 2.30 | 4.25 | 1.00 | 1.15 | 3.85 | 1.75 | 3.25 | 7.20 | 2.25 | 3.05 | 4.45 | 1.55 | 3.05 | 7.20 | 4.45 | 2.80 | 3.28 |
| 横断方向 | 0.20 | 2.20 | 6.95 | 6.20 | 5.60 | 5.15 | 5.65 | 2.60 | 10.40 | 3.60 | 4.15 | 7.85 | 5.55 | 1.90 | 10.50 | 12.10 | 3.70 | 9.05 | 5.74 |
| 鉛直方向 | 2.00 | 4.00 | 1.50 | 3.50 | 5.00 | 3.50 | 2.00 | 4.00 | 1.50 | 1.50 | 3.00 | 1.00 | 0.50 | 4.50 | 2.00 | 4.00 | 7.00 | 3.50 | 3.00 |
| 平均 | 2.40 | 2.20 | 3.58 | 4.65 | 3.87 | 3.27 | 3.83 | 2.78 | 5.05 | 4.10 | 3.13 | 3.97 | 3.50 | 2.65 | 5.18 | 7.77 | 5.05 | 5.12 | 4.01 |
| 平均 | 2.73 | | | 3.93 | | | 3.89 | | | 3.73 | | | 3.78 | | | 5.98 | | | 4.01 |

※TS直接視準による計測値を真値とした場合の差（絶対値）

- ①変位計測システムによる計測
- ②TS 直接視準による計測 (TS で測定鉤を直接視準)
- ③従来手法による計測
(レベルとスタッフ及び金尺を用いる)

ただし、②において TS から測定鉤が直接視準できない場合は、測量道具 (ピンポールとプリズム (写真-6)) を測定鉤にあてて計測を行った。

表-3 試験実施場所

| 管理事務所名 | 樋門名 | 断面形状 | 水深 (cm) |
|----------|-------|----------------------|----------|
| | | | 堆砂厚 (cm) |
| 札幌河川事務所 | 小沼川樋門 | Φ1.6×24.5m ~1連 | 1~10 |
| | | | 7 |
| 岩見沢河川事務所 | 昭栄樋門 | 1.5×1.5×92.0m ~1連 | 11~17 |
| | | | 0 |
| 千歳川河川事務所 | 志文別樋門 | 3.0×3.0×47.0m ~2連 | 3~14 |
| | | | 0 |
| | 南8号樋門 | 1.5×1.5×62.5m ~1連 | 6~22 |
| | | | 0 |



写真-8 樋門函体内 (H=1.5m) 計測状況 (遠くに見えるのが函体の外に設置したTS)



写真-9 樋管函体内 (内径1.6m) 計測状況



写真-6 ピンポールとプリズムを用いた計測状況

試験状況を写真-7~11 に、「変位計測システムによる計測値」と「TS 直接視準による計測値」との差を表-4 に、「変位計測システムによる計測値」及び「TS 直接視準による計測値」と「従来手法による計測値」との差を表-5 に示す。

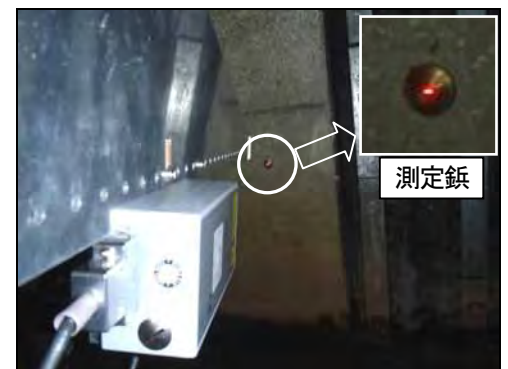


写真-10 測定鉤にレーザー光を照射している状況



写真-7 函体内の変位計測装置をTSで視準している状況

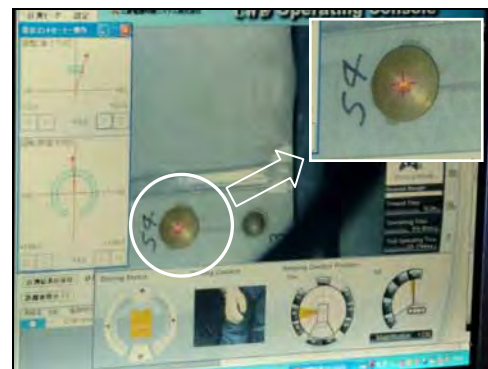


写真-11 操作用PCで測定鉤を確認している状況

表-4 TS直接視準による計測値との差

(単位：mm)

| 樋門名 | 沈下測定鈎と継手変位測定鈎 | | | | |
|---------------------|---------------|---------|----------|----------|-----|
| | 測定 点数 | 計測差 | | | |
| | | 軸 方向 | 横断 方向 | 鉛直 方向 | 平均 |
| 小沼川樋門 (延長 24.5m) | 18 | 0.1 | 2.9 | 3.1 | 2.0 |
| 昭栄樋門 (延長 92m) | 57 | 0.6 | 4.6 | 5.0 | 3.4 |
| 志文別樋門 (延長 47m) | 44 | 1.2 | 3.9 | 3.1 | 2.7 |
| 南8号樋門 (延長 62.5m) | 32 | 0.1 | 5.2 | 6.3 | 3.9 |
| 平均 値 | — | 0.5 | 4.2 | 4.4 | 3.0 |

※TS直接視準による計測値を真値とした場合の差の平均値 (絶対値)

表-5 従来手法による計測値との差

(単位：mm)

| 樋門名 | 沈下測定鈎 | | | | 継手変位測定鈎 | | | |
|---------------------|--------------|---------|------------|---------|--------------|---------|------------|---------|
| | 変位計測 システム | | TS 直接視準 | | 変位計測 システム | | TS 直接視準 | |
| | 測定 点数 | 計測 差 | 測定 点数 | 計測 差 | 測定 点数 | 計測 差 | 測定 点数 | 計測 差 |
| 小沼川樋門 (延長 24.5m) | 6 | 3.2 | 6 | 4.2 | 6 | 1.7 | 6 | 2.5 |
| 昭栄樋門 (延長 92m) | 12 | 2.3 | 10 | 5.8 | 21 | 5.6 | 20 | 4.6 |
| 志文別樋門 (延長 47m) | 14 | 3.4 | 10 | 0.6 | 15 | 5.5 | 11 | 1.7 |
| 南8号樋門 (延長 62.5m) | 8 | 9.4 | 8 | 1.9 | 12 | 4.6 | 12 | 5.6 |
| 平均 値 | — | 4.6 | — | 3.1 | — | 4.4 | — | 3.6 |

※従来手法の計測値を真値とした場合の差の平均値 (絶対値)

※継手変位測定鈎は、二対で1点とした。

試験結果から、自走装置を用いて、延長 90m 程度の狭い函体内において、無線通信による遠隔操作及び点検用カメラ画像で測定鈎におけるレーザー光の照射状況を確認する方法で計測を行えることを確認した。しかし、走破性と防水性に関する課題が判明した。詳細は次項で説明する。

また、開発局が管理している樋門・樋管のうち、延長 90m 未満の割合は 99.3% (図-5) であることから、ほとんどの樋門・樋管函内において自走装置の操作が可能である。

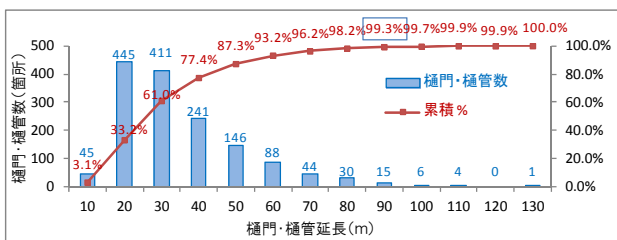


図-5 樋門・樋管延長別設置数

計測精度については、「TS 直接視準による計測値」との差 (表-4) は、横断方向が 4.2mm、鉛直方向が 4.4mm と軸方向の 0.5mm に比べ、大きい結果となった。

樋門別にみると、昭栄樋門及び南8号樋門での差が横断方向と鉛直方向で大きくなっている。この要因は、TS 直接視準による計測時に用いた測量道具 (ピンポールとプリズム) での計測は、ピンポールを手で持ち (写真-6)、鉛直及び水平調整を目視で行ったため、計測誤差が大きくなったと推定される。

よって、計測距離が 90m 程度であれば、計測距離と誤差の相関関係は無いものと判断する。

また、従来手法による計測値との差 (表-5) では、計測手法の違いによる明確な差は現れなかった。

実樋門における変位計測システムの計測誤差は次の要因で生じると考えられるが、GNSS 測量 (RTK 法、スタティック法) の公称測定精度と同等であるため、変位量の管理には有効な精度といえる。

- ①変位計測システムの計測誤差 (TS、レーザー距離計の機器の計測精度を含む)
- ②TS による三角板計測時の視準誤差
- ③レーザー距離計のレーザー光を測定鈎中心に合わせる時の誤差
- ④測定鈎表面の凹凸等によるレーザー距離計の誤差
- ⑤水流に起因する自走装置の振動による誤差

5. 課題及び対応策

現場適用性試験から判明した課題を 3 点説明する。

①函体内における自走装置の走破性及び防水性

自走装置は 80mm 程度の段差を乗り越えることが可能だが、函体継手ゴムの変形により函体底版の段差が大きい箇所 (写真-12) や土砂が堆積した箇所では、人力による走行の補助が必要であった。また、クローラ部は防水性能 (IP67) を有しているが、2 時間程度水没した状態では、走行用電源 BOX (内蔵) のキャップ (写真-3) の取付部から、自走装置内に水が侵入したことがあった。



写真-12 函体継手ゴムの変形で生じた段差 (H=120mm)

②高い位置に設置されている測定鈎の計測誤差

翼壁など、函体の外の高い位置に設置されている測定鈎（写真-13）の計測は、レーザー距離計との距離が遠くなるため、点検用カメラの画像では測定鈎の中心に照準を合わせることが難しくなり、計測誤差が大きくなる可能性があることがわかった。

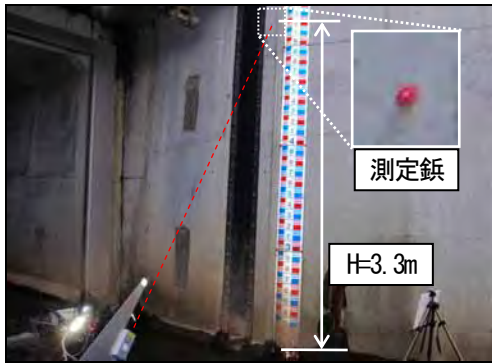


写真-13 高い位置に設置されている測定鈎

③測定鈎の形状による影響

実樋門に設置されている測定鈎は、樋門毎に大きさや形状が異なっており（写真-14）、中心に凹凸がある測定鈎の計測では、レーザー距離計のレーザー光が影響を受けて反射光を受光できず、計測できない場合があり、自走装置の位置をずらし、再計測を行った。



写真-14 実樋門に設置されている測定鈎

これらの課題の対応策として、次のことが考えられる。

- ①に対しては、本研究で用いた自走装置よりも走破性、防水性が高い機種を用いることで、対応が可能と考える。
- ②に対しては、測定鈎が函体の外に設置されているため、レーザー光の位置を直接目視で確認することで、計測精度を維持できる。
- ③に対しては、測定鈎の設置時に、表面に凹凸が無い形状を選定することで回避できる。

6. おわりに

柔構造樋門・樋管の動態観測において、沈下量と継手部の開きの計測は人力で行われ、計測値（変位量）は1次元で管理されている。また、小規模な函体内での作業は、苦渋を伴っている。

本技術の開発により、測定鈎の座標を3次元（X、Y、Z）で計測することが可能となり、函体の動態を詳細に把握することができる。また、自走装置を用いることで、函体内における人力作業の軽減に寄与できるものである。さらに、河川工事における情報化施工技術の一般化に向けた普及推進が図られている⁶⁾ことから、河川構造物の維持管理においても3次元座標での管理が求められることも想定され、本技術の活用が期待できる。

今後は、実樋門で計測を試行することにより、樋門・樋管の維持管理に貢献していきたい。

謝辞：本研究に対し、ご協力いただきました札幌開発建設部の関係各位に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (独) 土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、pp.3～7、2011
- 2) 佐藤厚子・西本聡：柔構造樋門の圧密沈下挙動について、北海道開発土木研究所月報、632号、p.13、2006
- 3) (社) 日本河川協会：改定解説・河川管理施設構造令、pp.420～422、2000
- 4) 国土交通省北海道開発局：河川管理施設一覧、ホームページ、http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_kasen/saigai/pdf/kasensisetsu.pdf
- 5) 国土交通省国土地理院：測量機器性能基準、ホームページ、<http://psgsv.gsi.go.jp/koukyou/kihon/seino/index.htm>
- 6) 国土交通省：情報化施工推進会議（第8回）、資料3 情報化施工技術の一般化・実用化の方針、<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/kensetsusekou/kondankai/ICTsekou/8siryo/3.pdf>