

集水井工の三次元点群モデルを用いた形状変形の客観的評価

国土防災技術株式会社 ○加藤 貴大

論文要旨

集水井は、地下水を排除することで地すべり活動を抑制する防災施設であり、その多くにおいて、内部の錆や孔詰まりなどの老朽化による機能低下が懸念されている。近年では点検作業に伴うリスクと作業コストを考慮して、集水井内に撮影機を降下させ、内部の様子を三次元点群で再構築する SfM (Structure from Motion) 技術が導入されている。これにより、集水井内部に立ち入らずに施設点検が可能となり、点検作業に伴うリスク・安全対策へのコストは以前より低減した。ただし、立入での測量を行わないため、三次元点群による点検では、集水井の形状変形を定量的に評価できていない。本研究では、三次元点群のデータを利用して、集水井工の形状変形(集水井の傾き方向・偏心量)を客観的に評価する手法を開発した。データをプログラムに処理させることにより客観性を向上させ、作業量の大幅な削減を目指した。これにより、従来と比べて低リスク・低コストかつ、客観性と再現性が確保された施設点検や維持管理、老朽化対策が可能になると考えられる。

キーワード：地すべり，集水井，維持管理，三次元点群，SfM

まえがき

「世界で最も価値ある資源は石油ではなく、データである」と英エコノミスト誌が2017年に主張したように、データを活用したIT化やDX化は多岐にわたる分野において関心の高い研究課題である。建設分野においても例外ではなく、老朽化した全国のインフラ・防災施設を効率良く、一定の質で維持管理するために、データの適切な活用が喫緊の課題である。

本研究が対象とするのは、地すべりの誘因となる地下水を排除する防災施設、集水井である(図1)。集水井は鉛直方向に掘られた立坑であり、その深度は数十mとなる。立坑は直径3.5m前後の円形で掘削され、立坑内壁は銅製のライナープレートで覆われている。そして集水井内部から伸びた集水ボーリングが地下水を集め排水する。

集水井は全国に11,000基以上施工されており、その多くでライナープレートの腐食(錆付き)や横ボーリングの孔詰まりなど、老朽化による排水機能の低下が懸念されて

いる。集水井の排水機能を維持するために、適切な施設点検が必要であるものの、そこには「作業上の課題」がある。

例えば、立入点検による転落・酸欠などの作業上のリスク、安全対策への投資コスト、作業者の技術的差異などである。

近年ではSfM (Structure from Motion) 技術により三次元点群を構築することで、以上の課題は解決されつつある。三次元点群を用いれば、集水井内には立ち入らないため、作業上のリスクが比較的小さい。また、内部の様子を点群で表現できるため、錆範囲のスケッチ等に伴う作業者の技術的差異についても改善されている(図2)。

しかし、三次元点群の導入により、別の形で作業者の技術的差異が生じている。集水井は鉛直に施工されているものの、地すべりの活動とともに傾いていき、集水井の中心がズレていく(偏心)。立ち入り点検では内部での測量により、これら集水井の形状変形(傾き方向や偏心量など)を計測できる。一方、三次元点群を用いる場合、現状では形状変形の客観的な定量化手法が確立されていない。つまり、分析結果は作業者の技術・経験に大きく依存しており客観性を欠いていることが現状の課題である(図3)。そこで本研究では、集水井における2つの形状変形(傾き方向と偏心量)について、三次元点群のデータを用いて客観的定量化、および作業効率化を可能にする手法を開発した。以下では、具体的な分析手法とその結果について報告する。

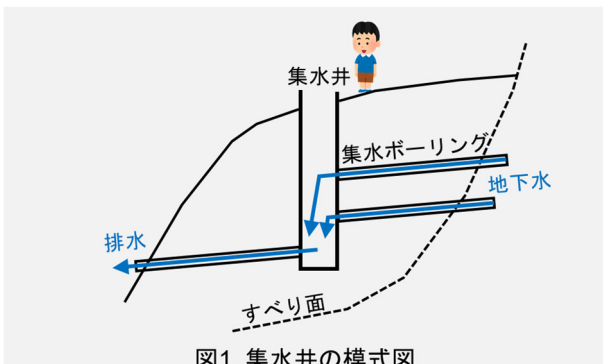
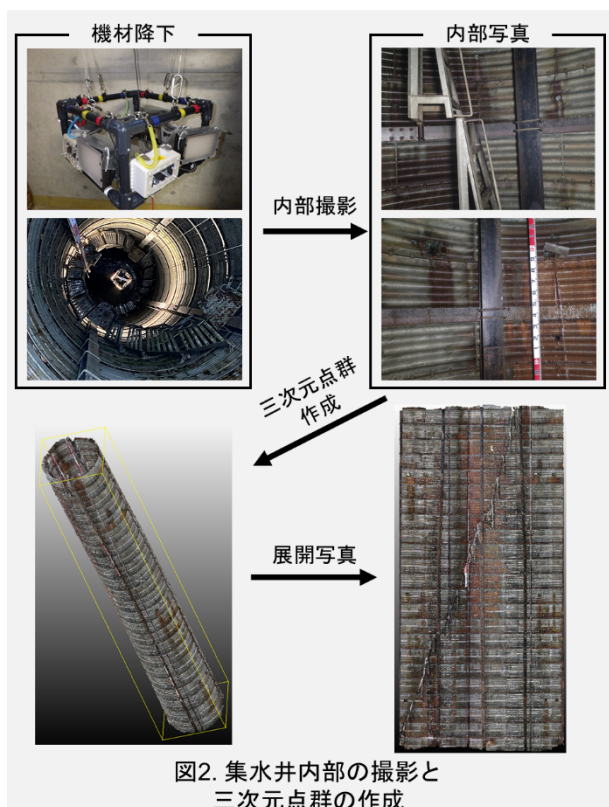
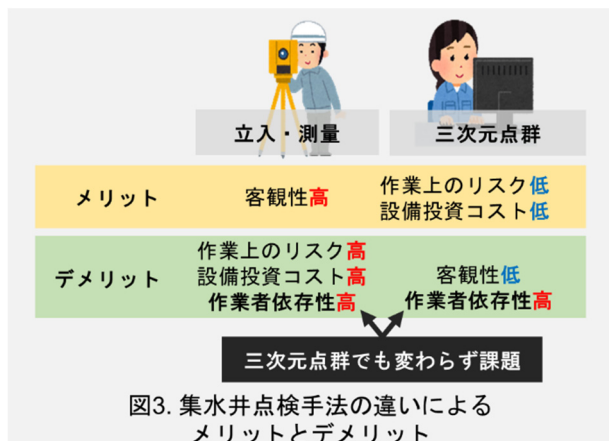


図1. 集水井の模式図



1. 目的

本研究の目的は、三次元点群のデータから、集水井の形状変形（傾き方向・偏心量）について、プログラム処理を用いて客観的に定量化することである。

2. 方法と結果

2.1. 三次元点群の構築

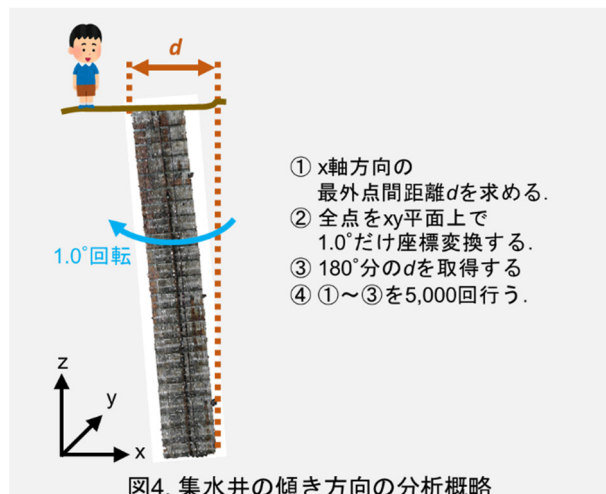
2022年8月に、著者らを含む共同研究グループが開発した手法を用いて¹⁾、ある地域の集水井内部を撮影し三次元点群を作成した。使用した集水井は、深度約23m、直径3.5mであり、ライナープレートを材料として補強リングとパーティカルスティフナーにより補強されている。集水井内にカメラを降下させ、内部を網羅的に撮影し、SfM技

術により三次元点群を構築した（図2）。この三次元点群のデータ（las形式データ）には、全82,282,300点についてのx, y, z座標が含まれている。このデータを使用して、プログラミング言語R（ver 4.2.3）により以下の分析を実施した²⁾。

2.2. 傾き方向の探索

本研究ではまず、集水井が傾いている方角（傾き方向）について分析を行った。傾き方向の定義は、三次元点群をxz平面上で見た時に、三次元点群の両端の距離が最大となる方向とした（図4）。

以下は分析の概略である。xz平面上に投影した三次元点群を考える。この時、x座標が最大となる点と最小となる2点間の、x軸方向の距離 d を求める（図4）。次に、点群全体をxy平面上で 1.0° 、円形の集水井を回転させるように一次変換を行い、同様にxz平面上で d を求める。これを 180° 分繰り返すことで、 d が最大（= d_{max} ）となる角度が得られる。この作業を5,000回行い（5,000の d_{max} が得られる）、最頻となる d_{max} の角度を傾き方向として採用する。また、以上の作業を、 d が最小（= d_{min} ）となる角度についても実施した。この目的は、 d_{max} と d_{min} を取る角度が直交しているかを確認するためである。



なお、本分析では、点群を一次変換する度に全点から1,000点を復元無作為抽出することで、ノイズとなる点の採用確率を減じ、 d に対する影響を抑えている。分析の結果、本研究が用いた三次元点群では、時計回りに 20° 、つまり $N70^\circ W$ の方角に傾いていると判定された（図5）。

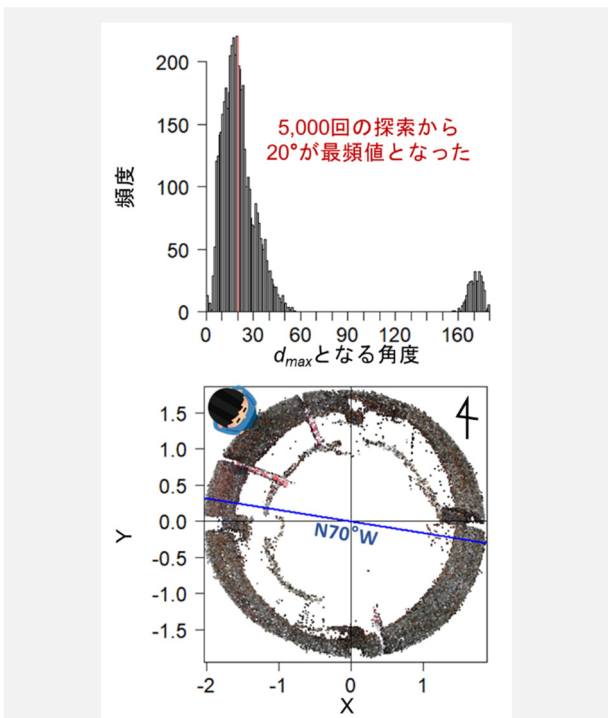


図5. 上: 5,000回探索した d_{max} となる角度の分布,
下: 集水井をxy平面上で見た時, 青線が最大の傾き方向

2.3. 偏心量の算出と視覚化

集水井天端付近の中心と、各補強リングの中心との距離を偏心量とした。これら中心の算出方法は以下の通りである。まず、最大の傾き方向を実現する角度で、点群の座標をxy平面上で一次変換する。一時変換後の点群をxz平面上に投影すると、最も傾いて見える状態となる(図6左)。

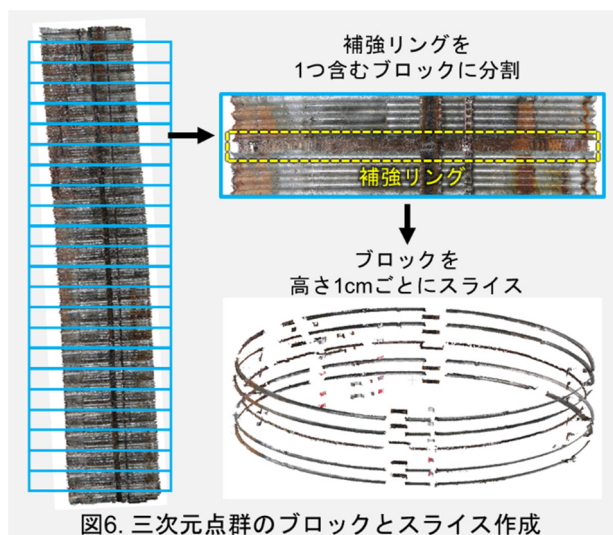


図6. 三次元点群のブロックとスライス作成

この時、補強リングに該当する箇所を点群から抽出し、左右の最外点間の中心を補強リングの中心とする。

本研究が使用した集水井では、補強リングが深度1mごとに設置されていた。そこで、補強リングが必ず含まれる

ように、点群を深度1m置きに分割した(図6右上;ブロックと呼ぶ)。次にすべてのブロックを深度1cm幅でスライスした(図6右下;1ブロックにつき100のスライスができる)。三次元点群上では、補強リングはライナープレートよりも内側に凹んだ形で認識できる(図6右上)。よって、最大と最小のx座標を取る2点間の距離が最小となるスライスが、補強リングを抽出できていることになる。ただし、集水井には傾きが生じている可能性があるため、スライス方向を -2° から $+2^\circ$ まで、 0.1° ずつ変えながら上記の分析を実施した(図7上;1ブロックにつき 41×100 のスライスができる)。これを100回繰り返し、ブロック内において最大と最小のx座標を取る2点間の距離が最小となるスライスを補強リングとして採用した(図7下)。

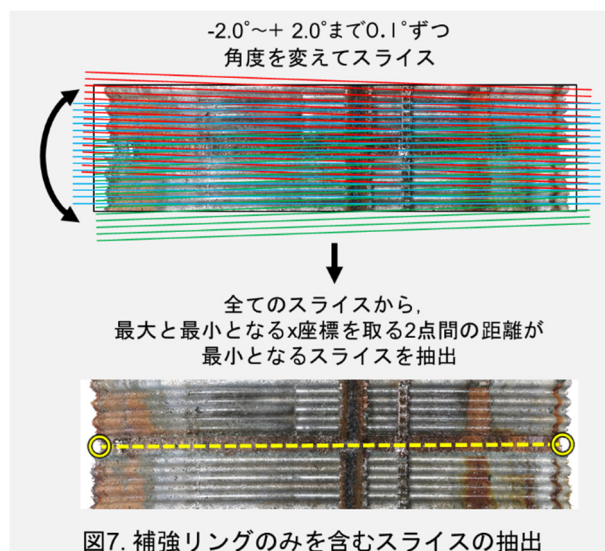


図7. 補強リングのみを含むスライスの抽出

また、そのスライスが補強リングであるかを確認するため、当該のスライス位置を視覚的に確認した(図8)。これらに加え、補強リングよりも集水井の端に近い位置の数値を求める目的で、集水井の天端から0.6~0.8m、底端から0.2~0.5mのライナープレートについて、その中心と誤差を求めた。この時、三次元点群における全点の1/50を100回、復元無作為抽出して計算を行った。

そして、各ブロックにおいて補強リングとしたスライスの中心を求め、深度ごとにプロットした(図9)。その結果、本研究が使用した集水井には、天端から底端の間に $354.70 \pm SD 2.08$ mmの偏心が生じており、特にGL-9m付近での形状変形が顕著であるという結果となった(図9)。

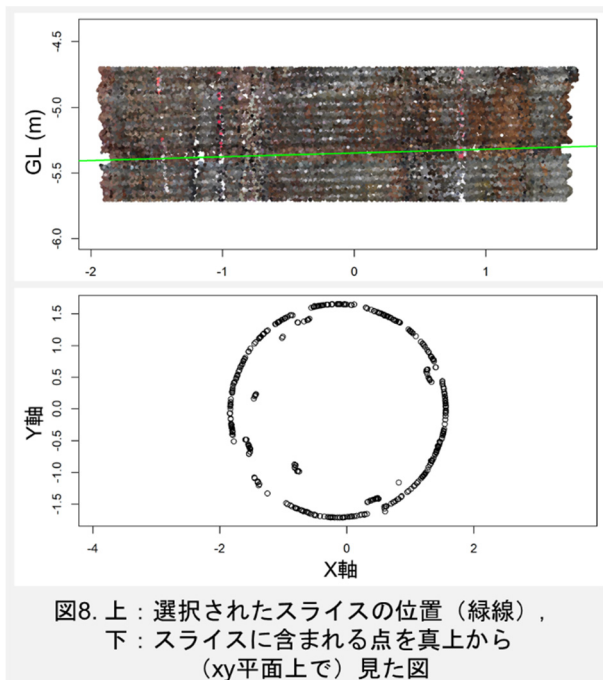


図8. 上：選択されたスライス位置（緑線），
下：スライスに含まれる点を真上から
（xy平面上で）見た図

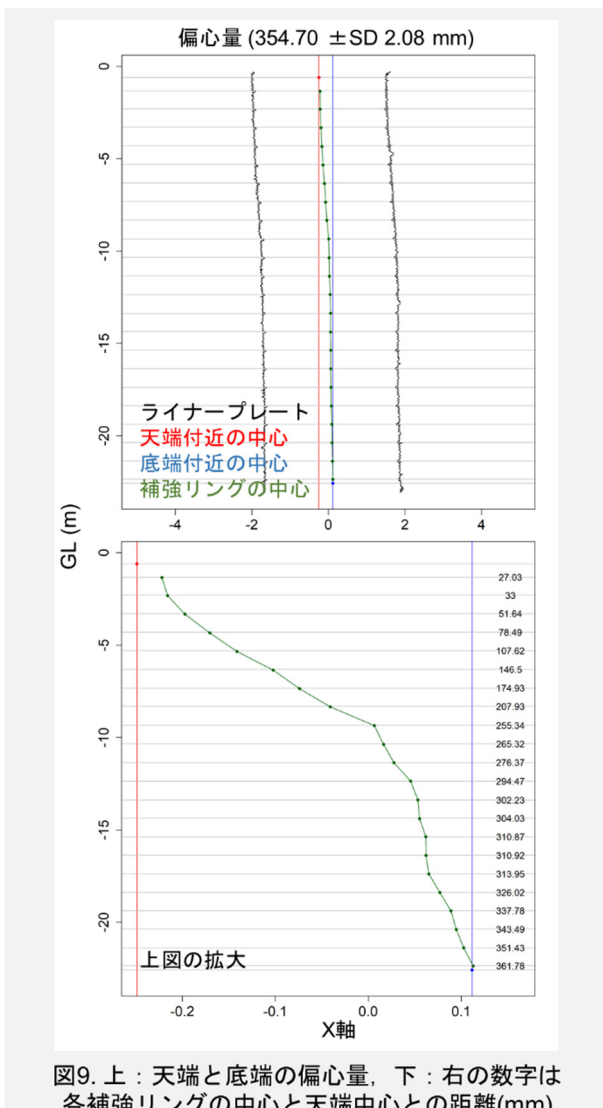


図9. 上：天端と底端の偏心量，下：右の数字は
各補強リングの中心と天端中心との距離(mm)

3. 本研究の意義と今後の課題

三次元点群の構築から得られるデータをプログラム処理することにより、集水井の傾き方向と偏心量の算出に成功した。プログラムには恣意的なバイアスを与えていないため、客観的に定量できていると考えられる。また、従来は目視と手作業により1時間以上かけて点群から形状変形を検出していたのに対し、本研究のプログラムでは約15分で計算から作図までを完了した(Windows 11 Pro, 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700, RAM 32.0GBで実行した場合)。さらに、プログラム実行中は別の作業に従事できるため、確実に生産性が向上した。

その一方、課題も残る。例えば今回のプログラムは、捻じれるように(複数方向に)変形した集水井には適用できない。また、内部構造によっては、補強リングに注目した定量化が難しい場合もあり得る。ただし、これらの課題は計算量の増加や形状変形の定義変更など、戦術的な課題であり、修正を加えることで十分に対応可能である。

より本質的な課題は、現実を反映できているかどうかについてである。本研究の手法は三次元点群の構築精度を無条件に信頼しているため、プログラムの出力結果の信頼性は点群構築までの作業精度に依存する。したがって、SfMによる三次元点群の構築結果とプログラムの出力結果が、真の値とどれだけ乖離するのかについて、データ収集と比較が必要である。これにより、適切な補正手法の導出や分析手順を改善することができるため、分析精度の向上が見込まれる。同時に、プログラムにとって十分な精度を把握することは、現場での撮影作業やSfMによる点群構築作業のコストが適切であるかを判断する材料となり、データ駆動型の戦略的な労力投資を可能にする。

4. まとめ

本研究では、三次元点群を構築するのみならず、そのデータをいかに活用するかに焦点を当てた。そして課題を残しつつも、防災施設を客観的かつ一定の質で定量化できた。今後高まるインフラ施設の老朽化対策と維持管理の需要に対して、少子化等による作業者の供給低下が予想される。この現状への対応策の1つが、積極的なデータ活用による作業員間の技術的差異の解消と生産性の向上である。本研究は集水井の維持管理の一部について、その方法を提案するものである。

あとがき

集水井内部の撮影作業へのご協力, SfM による三次元点群構築や本研究をご指導して頂いた関係者様に, 深く感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 秋山一弥, 石田孝司, 金澤瑛, 野坂隆幸, 石川泰裕, 丸山清輝, 地表からの効率的な集水井内点検手法共同研究報告書, 整理番号 508 号, 国立研究開発法人土木研究所, R.1.6.1., pp.27~32.
- 2) R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.