

画像解析によるグラウンドアンカーの変状評価 ——撮影マニュアルと精度の検討——

A Study on the Deformation Estimation of Ground Anchors by Image Analysis

一井康二 Koji ICHII (広島大学大学院工学研究院)
内山周 Shu UCHIYAMA (元広島大学工学部)
伊東達彦 Tatsuhiko ITO (広島大学大学院工学研究科)
玉木徹 Toru TAMAKI (広島大学大学院工学研究院)

本研究では、グラウンドアンカーの維持管理の効率化をめざし、デジタルカメラ画像による3次元形状復元(SIFTを用いた画像解析技術)による変状評価手法を検討した。まず、模型計測実験によってグラウンドアンカーの形状復元に適した撮影位置と、変状の評価精度を検討した。さらに、現地計測実験において、提案した位置での撮影を行うためにドローン(ラジコンヘリ)を用いた撮影方法を検討し、提案手法によりグラウンドアンカーの3次元形状復元が可能であることを示した。

キーワード：維持管理, 画像解析, 3次元形状復元, グラウンドアンカー, ドローン(IGC : C-7, C-4)

1. はじめに

グラウンドアンカー(以下、アンカー)が本格的に使用され始めてからすでに50年以上が経過し、劣化したアンカーが増加してきている¹⁾。アンカーが劣化すると、アンカー頭部の剥落・破損などのアンカー本体の問題にとどまらず、斜面の変形・崩壊など大規模な災害につながる可能性がある。そこで、定期点検などに基づくアンカーの維持管理は重要である。

アンカーだけでなく、構造物の維持管理は、その点検項目の多くを目視点検に頼っている。アンカーにおいても、詳細な点検方法としてはリフトオフ試験²⁾やアンカー緊張力のモニタリング³⁾などがあるが、コスト等の面から、まだ多くのアンカーの維持管理は目視に基づく点検に依存している。そして、目視点検の問題点として、多くの時間がかかることや、結果が技術者の技量に依存する部分が多いということが挙げられる。

これまで、構造物の目視点検の効率化等を目的に、画像解析による種々の構造物の変状把握手法が検討されてきた。例えば、寺本ら⁴⁾はデジタル写真による補強土壁の長期計測を試みている。また、画像の特徴量をSIFT(Scale Invariant Feature Transformation)⁵⁾により求め、特徴量によりカメラパラメータを逆算し、対象物の表面形状を3次元点群として復元する技術も簡便な手法として着目されている。この手法については、各種土木材料や消波ブロックへの適用性検討⁶⁾や変状比較方法の検討⁸⁾がなされている。

そこで、本研究では、このSIFT特徴量に基づく3次元形状復元技術のアンカーへの適用を試みる。まず、模型実験により適用性と精度の検証を行う。そして、実際のアンカーにおいて現地計測実験を行い、提案手法の適用性を確認する。

2. 画像解析による3次元形状復元

2.1 3次元形状復元の原理

3次元形状復元は、特徴点の検出、特徴点の対応付け、対象物上の各点の3次元座標の算出の3段階の作業からなる。図-1に形状復元の流れを示す。

まず第1段階は、画像内の特徴点の検出である。図-1(a)に示すように、特徴点とは周囲の色(輝度)と比べて、自身の色(輝度)が大きく異なる点であり、画像中のエッジやコーナーに相当する。これらの特徴点は、画像内の他の点と異なる独自の特徴を有しており、複数の画像においても同一の点であると認識できる場合がある。

これらの特徴点は、例えば人間が目視で画像を確認すると、少数であれば容易に抽出できる。しかし、手動で数多くの画像から数多くの特徴点を抽出する作業は大変である。そこで、自動で特徴点を検出する方法としてSIFTが提案された⁵⁾。SIFTは画像中の輝度変化をもとに特徴点を検出し、特徴点周辺の輝度勾配と輝度方向により、点の特徴をSIFT特徴量として記述する。

第2段階は、特徴点の対応付けである(図-1(b))。対応付

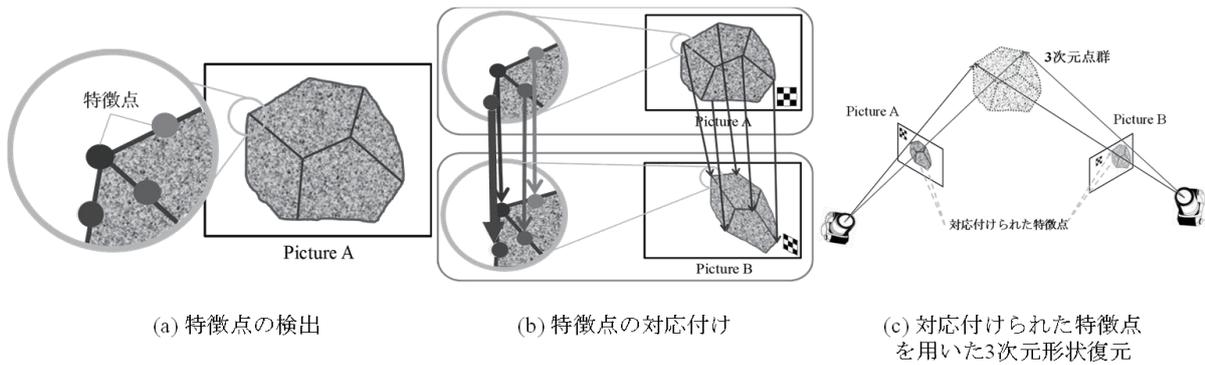


図-1 特徴点の検出に基づく3次元形状復元の流れ

けとは、それぞれの特徴点が他の画像のどこにあるかを探
すことである。SIFTを用いる方法では、SIFT特徴量の類
似性を用いて、自動で対応付けを行うことができる。また、
SIFT特徴量は、画像の回転やスケールの変化等の影響を
受けにくく、異なる画像においてもロバストな点の対応付
けを行うことができる。

第3段階は、対応付けられた特徴点の座標値を用いた3
次元形状復元である(図-1(c))。三角測量の原理を用いて、
カメラから特徴点へ直線を引き、対応する特徴点を通る2
本の直線の交点が復元した3次元点となる。

この3次元形状復元の手法では、カメラ位置を逆解析で
求めるため、撮影時のカメラ位置を把握しておく必要はな
い。ここで、カメラ位置や対象物の形状は、基準点が含ま
れないため、相対的な座標として算出される。しかし、点
群として得られる3次元形状の情報は、復元結果ごとに、
座標軸やスケールがそれぞれ異なっている。撮影時刻が異
なる形状復元結果をもとに、変状を評価するためには、何
らかの方法を用いて、基準点や座標軸、スケールを一致さ
せることが必要となる。なお、復元形状に基準点が複数含
まれている場合には、復元された基準点の座標情報より、
座標軸や原点、スケールを一致させることができる。

2.2 3次元形状復元のデータ処理の流れ

本研究では、画像解析において Bundler^{9),10)}と
PMVS2^{11),12)}を用いて、図-2に示す処理を行った。Bundler
は入力情報として対象物を写した3枚以上の画像を用い、
各画像で特徴点を検出する。そして、画像2枚ごとに比較
を行い、特徴点情報の一致を基にカメラの3次元位置情報
と対象物の3次元形状情報を出力する。ここで出力される
3次元形状情報はわずかで、対象物の形状が分かるほど正
確な情報ではない。そこで、さらにPMVS2を用いて対象
物の詳細な3次元形状復元を行う。ここでは、Bundlerで
出力されたカメラの位置情報と画像を入力情報として用
いる。3次元復元された形状は点の集合であり、各点の3
次元座標値と各点の表面法線情報、色情報(RGB)の9つが

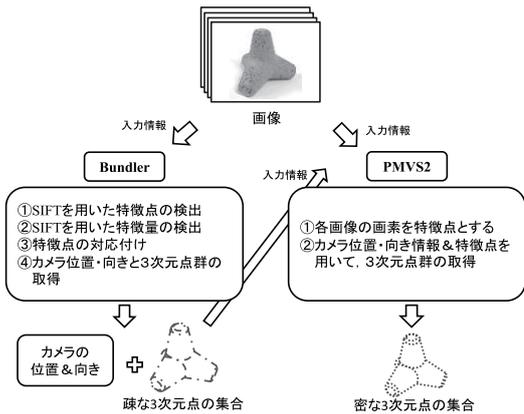


図-2 データ処理の流れ

出力される。解析結果はテキスト形式のファイルで出力で
き、例えば非構造3D三角形メッシュの処理・編集のため
のフリーソフトである Mesh Lab¹³⁾を用いて可視化できる。

前述したように、SIFTを用いた画像解析技術では最低3
枚の画像から3次元形状とカメラ位置・向きの取得が可能
である。なお、測定精度を保証するための具体的な画像枚
数に関しては、撮影角度や撮影対象の材質のほか、復元範
囲や入力画像の解像度などに依存する。この点についての
検討事例については参考文献⁹⁾を参照されたい。

ここで、画像解析に用いる画像の枚数が多ければ多いほ
ど、より密な3次元形状復元が可能となる。しかし、実務
的には作業手順の明確化のため、必要精度に応じた適正な
撮影枚数などの情報があることが望ましい。つまり、アン
カーの維持管理のための変状把握という目的に対応した
撮影マニュアル等の整備が、本技術の普及に役立つと考え
られる。

3. アンカーの変状把握の模型計測実験

3.1 実験概要

アンカーの3次元形状復元において、復元精度を確保で
きる撮影方法を把握し、変状の把握が可能かどうかを確認
するために模型実験を行った。

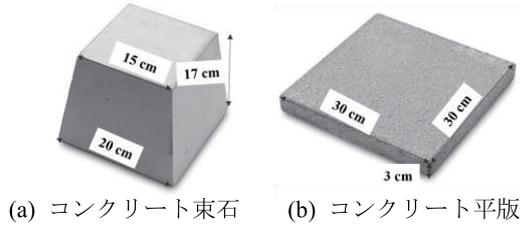


図-3 アンカー頭部模型

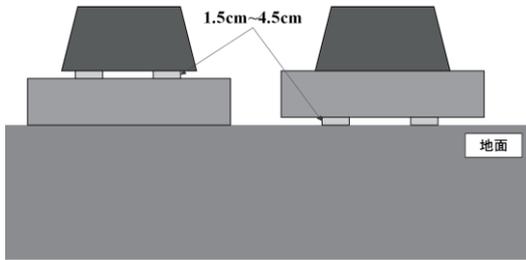


図-4 アンカー頭部への変状の与え方

表-1 撮影に用いたカメラの仕様

| | |
|----------|-------------------------------|
| 製品名 | COOLPIX P7700 |
| 有効画素数 | 1219万画素 |
| 撮影素子 | 1/1.7型減色CMOS、総画素数1276万画素 |
| レンズ | 光学7.1倍ズーム、NIKKORレンズ |
| 焦点距離 | 6.0-42.8mm(35mm判換算28-200mm相当) |
| 開放F値 | f/2-4 |
| レンズ構成 | 10群13枚(EDレンズ2枚) |
| 手ぶれ補正機能 | レンズシフト方式 |
| オートフォーカス | コントラスト検出方式 |

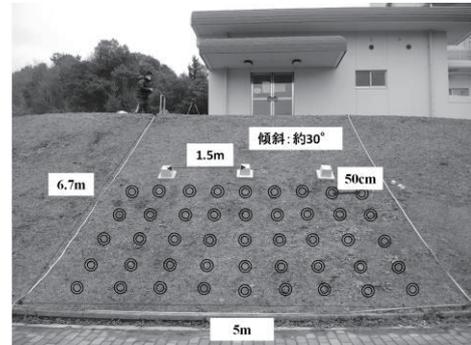


写真-1 計測フィールドと撮影位置 (◎)

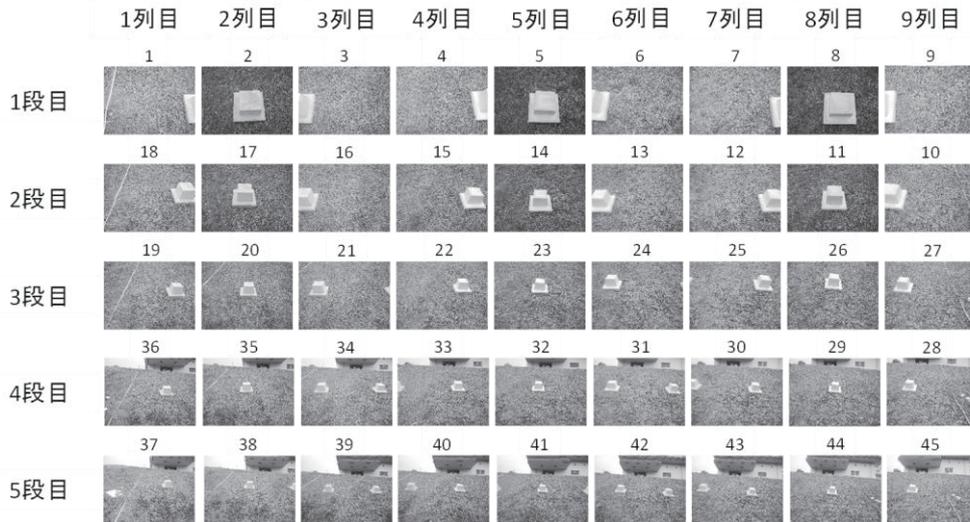


写真-2 撮影画像一覧

アンカーの地中部は、デジタルカメラ画像に写らないため検討対象に含めず、地表に露出するアンカー頭部のみを対象とした。アンカー頭部の模型として、図-3(b)に示すコンクリート平板の上に図-3(a)に示す台形型東石を乗せることとした。また、計測対象として想定するアンカーの変状としてはアンカー頭部の浮き上がりを想定し、模型(平板と東石の間)あるいは模型と地盤間に木板を挟むこととした(図-4)。浮き量は1.5 cm, 3 cm, 4.5 cmの3ケースとした。これは、テンドンの破断による頭部の浮き上がりが数 cm から 1 m 程度、寒冷地の凍上時のアンカー頭部の浮き上がりが数 cm 程度と示されていることより、自由長 7.4 m のアンカーの設計事例²⁾において、アンカーの設計時の伸びが 3.5 cm 程度と試算されたことより、変状として把握すべきアンカー頭部の変位量を 2~3 cm 程度と推測したことによる。撮影に用いたカメラはNikon COOLPIX P7700 である。表-1 に撮影に用いたカメラの仕様を示す。

表-2 形状復元を試みた画像選択パターン一覧

| パターン | 段 | 列 | 枚数 | 復元 | 誤差(%) |
|--------|---------|-------|----|----|-------|
| パターン1 | 1 | 全列 | 9 | × | - |
| パターン2 | 2 | 全列 | 9 | × | - |
| パターン3 | 3 | 全列 | 9 | × | - |
| パターン4 | 4 | 全列 | 9 | × | - |
| パターン5 | 5 | 全列 | 9 | × | - |
| パターン6 | 1,2 | 全列 | 18 | × | - |
| パターン7 | 2,3 | 全列 | 18 | × | - |
| パターン8 | 3,4 | 全列 | 18 | ○ | 0.15 |
| パターン9 | 4,5 | 全列 | 18 | ○ | 2.10 |
| パターン10 | 2,4 | 全列 | 18 | × | - |
| パターン11 | 1,2,3 | 全列 | 27 | × | - |
| パターン12 | 2,3,4 | 全列 | 27 | ○ | 0.38 |
| パターン13 | 3,4,5 | 全列 | 27 | ○ | 2.38 |
| パターン14 | 1,3,5 | 全列 | 27 | × | - |
| パターン15 | 1,2,3,4 | 全列 | 36 | ○ | 0.35 |
| パターン16 | 2,3,4,5 | 全列 | 36 | ○ | 0.40 |
| パターン17 | 全段 | 全列 | 45 | ○ | 0.82 |
| パターン18 | 1,2 | 2,5,8 | 6 | × | - |
| パターン19 | 2,3 | 2,5,8 | 6 | × | - |
| パターン20 | 3,4 | 2,5,8 | 6 | × | - |
| パターン21 | 4,5 | 2,5,8 | 6 | × | - |
| パターン22 | 2,4 | 2,5,8 | 6 | × | - |
| パターン23 | 1,2,3 | 2,5,8 | 9 | × | - |
| パターン24 | 2,3,4 | 2,5,8 | 9 | × | - |
| パターン25 | 3,4,5 | 2,5,8 | 9 | ○ | 26.05 |
| パターン26 | 1,3,5 | 2,5,8 | 9 | × | - |
| パターン27 | 1,2,3,4 | 2,5,8 | 12 | × | - |
| パターン28 | 2,3,4,5 | 2,5,8 | 12 | × | - |
| パターン29 | 全段 | 2,5,8 | 15 | ○ | 14.90 |

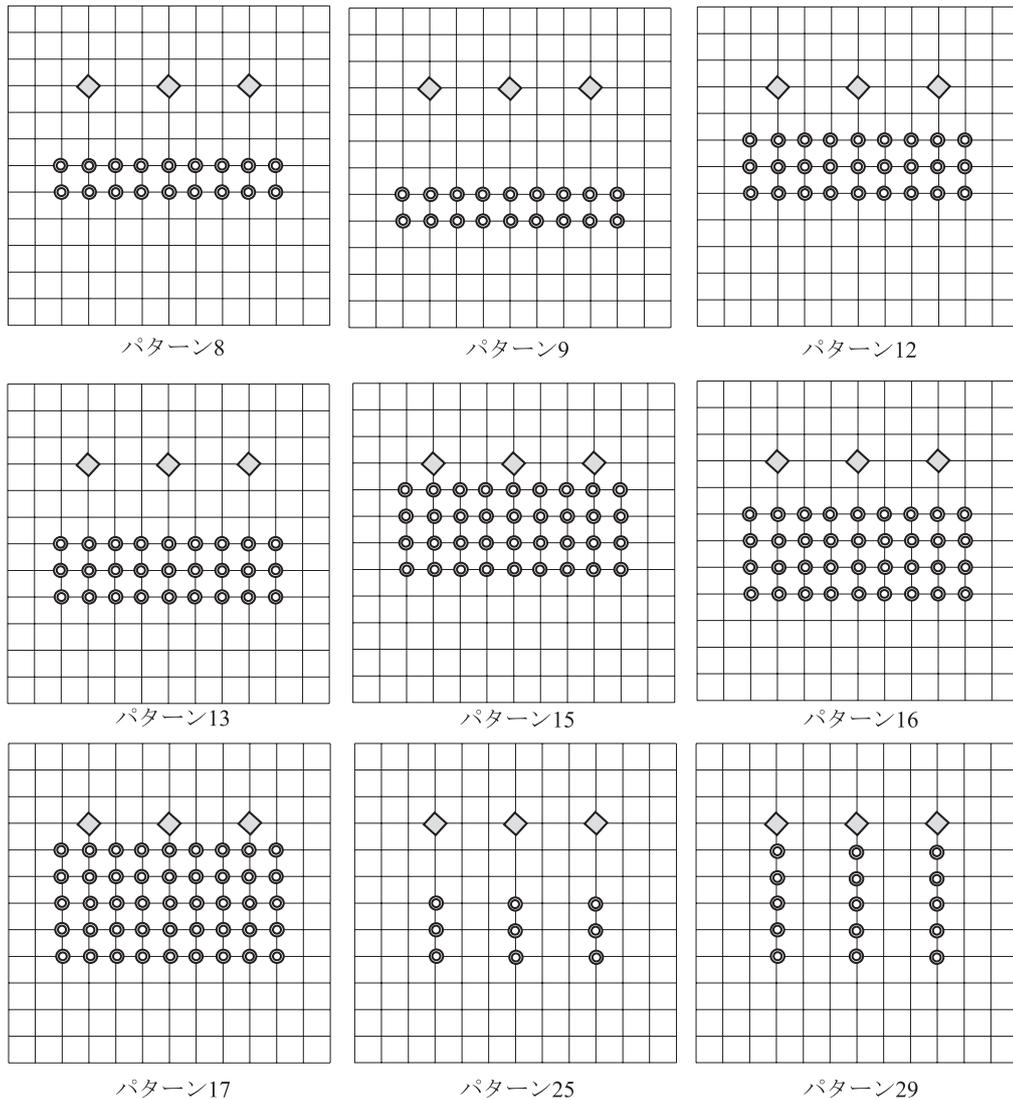


図-5 復元に成功した撮影位置(1マス 50cm, ◎撮影位置, ◇アンカー)

3.2 復元精度を確保できる撮影位置

まず浮きを与えていないケースを対象に、画像 45 枚の撮影を行った。3つのアンカー頭部の模型を計測フィールドに 1.5m 間隔で水平に設置した。そして、計測フィールドを 50cm 四方のメッシュで区切り、メッシュの交点から撮影を行うことにした。撮影は、水平方向の角度は正面で固定し、上下方向の角度はアンカーが中央に写り込むように変化した。写真-1 に計測フィールドと撮影位置を示す。カメラの高さは 85cm (鉛直方向) に固定し、斜面下側から撮影を行った。ただし、カメラの角度は、アンカー頭部模型が写るように手で調整しており、均一ではない。写真-2 に撮影画像を示す。45 枚の画像から、復元に使う画像を変えながら計 29 パターンの復元を行った。表-2 に復元を試みた画像選択パターンの一覧を示す。表-2 の「復元」の「×」は、計算が収束しなかった場合と、計算が収束しても明瞭に異常値を示した場合である。復元形状については、左端のアンカー頭部模型のコンクリート平板の辺長をもとにスケール合わせを行った。そして、復元形状の精度評価として、右端のアンカー頭部模型のコンクリート

平板の辺長(斜面下側)を実際の値と比較して誤差を算定した。

3次元形状復元が可能であったのは 29 パターンのうち 9 パターンであった。図-5 に復元に成功したパターンの撮影位置を示す。

段に着目すると、一段のみの画像では復元が困難であり 3,4 段および 4,5 段からの画像が復元成功例には使われている。つまり、今回のスケールでは、アンカーから 1.5m~2.5m 離れた位置からの撮影が必須である。

次に列に着目すると、復元に全列を使用したものが 6 パターン、2,5,8 列を使用したものが 2 パターン復元可能であった。しかし、2,5,8 列のみの画像を使ったものは誤差が非常に大きくなっており、列に関しては全列の画像が必要である。

以上をまとめると、今回のケースで精度よく復元を行うためには、アンカーから 1.5m~2.5m 離れた位置から、4m の幅にわたって 50cm 間隔で撮影を行えばよいことが分かった。最も精度の良かったパターン 8 の復元形状を図-6 に示す。アンカー頭部の状況がよく把握できる。

3.3 画像解析によるアンカー頭部の変状の判定

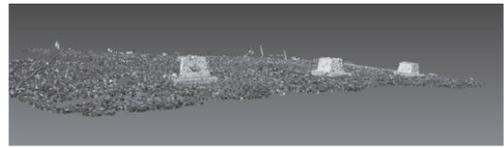
上記のとおり、表-2 に示すパターン 8 の撮影位置からの形状復元が最も復元精度が良い結果となった。一般には、撮影枚数が多いほど復元精度はよくなると考えられるので、撮影枚数の少ないパターン 8 が撮影枚数の多いパターンよりも精度がよかったのは偶然であると考えられるが、パターン 8 において一定レベル以上の形状復元精度が期待できることは事実であると考えられる。そこでパターン 8 の撮影位置で撮影したアンカー(変状あり)の画像から、1.5 cm、3.0 cm、4.5 cm のアンカー頭部の浮きが画像解析で把握できるかを検討した。

図-7 にそれぞれの復元形状を示す。また、図-8 に復元形状から浮きの確認を行った場所と座標、表-3 に各ケースの復元精度を示す。浮き量の把握は、中央アンカーの前面部の復元形状を拡大し、水平位置がほぼ等しいと思われる点を上部および下部から抽出し、その座標から 2 点間の距離として計算した。したがって、座標選択時の誤差も復元形状からの浮き量の計測値の誤差に含まれている。

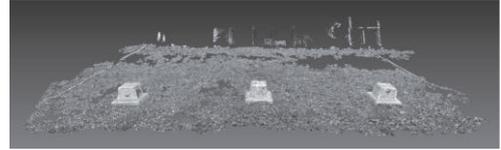
コンクリート板と東石の間に浮きを生じさせた case1~3 において、画像解析から評価した浮き量の誤差は大きくとも数 mm 程度であった。しかし、平板と地面の間に浮きを与えた case4~6 は誤差が非常に大きく、case4 に関しては復元によって浮きを確認すること自体が不可能であった。case4~6 の誤差が大きくなった原因として、地面に草が生えていることの影響が考えられる。すなわち、草の部分は形状復元が困難であり、この理由として、草は風の影響等で位置が変化しやすいこと、また材質的に特徴点の特徴量に違いが生じにくいことなどが可能性として挙げられる。このように、草木の多い地面に接する部分に対する浮き等の相対変位を提案手法で評価することは現時点では困難である結果となった。しかし、この問題については、維持管理の対象となるアンカー頭部周囲の地表面をセメント処理することなどで対応可能であると考えられる。

3.4 アンカー頭部を対象とした撮影位置の提案

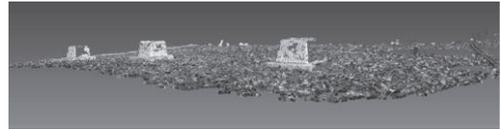
以上の検討結果から、アンカー頭部の変状把握に適した撮影位置を以下のように提案する。アンカーの変状は、アンカー頭部の相対位置の変化に着目して行うこととし、対象となるアンカー頭部間の距離 L の 1 倍及び 2 倍、あるいは 2 倍及び 3 倍の距離から、1/3 L 程度の間隔で幅 3L 程度にわたり撮影すると良い。この撮影位置のイメージを図-9 に示す。ただし、この提案は撮影条件にも依存すると考えられ、図-9 に示すように、4000×3000(pix)以上の画素数を備えたカメラで適用すべきものと注記した。



(a) 斜面左下方から見た状況



(b) 斜面正面から見た状況



(c) 斜面右下方から見た状況

図-6 アンカー頭部模型の復元形状 (パターン 8)

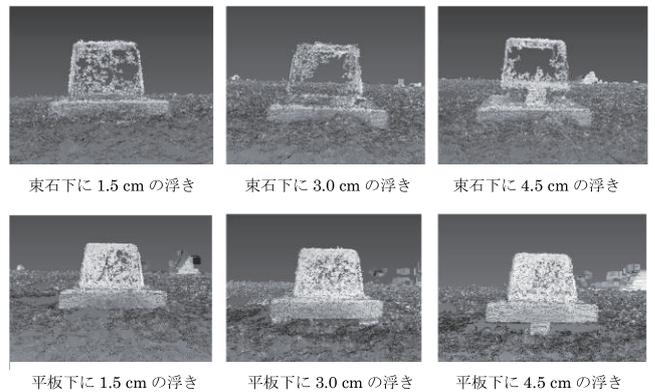
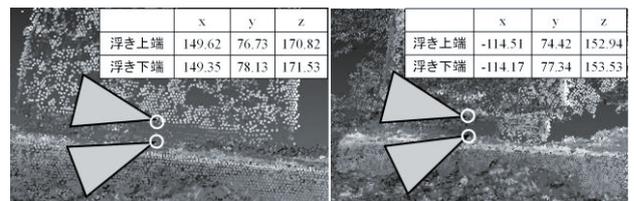
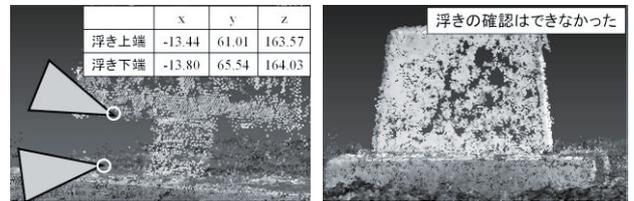


図-7 変状を与えた場合の復元形状



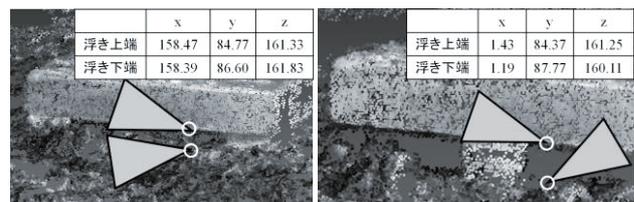
東石下に 1.50cm の浮き

東石下に 3.00cm の浮き



東石下に 4.50cm の浮き

平板下に 1.50cm の浮き



平板下に 3.00cm の浮き

平板下に 4.50cm の浮き

図-8 浮きの確認を行った場所と座標(単位: cm)

(原点および座標軸方向は未調整, スケールのみ調整)

4. 現地計測実験による適用性検証

4.1 検討対象フィールド

高知県高知市において、実際のアンカーの撮影を行い、提案手法の有効性を検証した。撮影場所を図-10、撮影対象のアンカーを写真-3、アンカー配置の平面図を図-11、アンカーの受圧板構造図を図-12に示す。なお、3段あるアンカーのうち、下段のアンカーを撮影対象とした。

復元精度の指標としては、アンカー頭部の受圧版間の距離に着目し、現地でメジャーにより測定した実際のアンカー受圧版間の距離と、3次元形状復元でアンカー受圧版間の距離を比較し、復元精度を評価した。便宜上、下段のアンカーを図-13のように番号付けし、ひとつひとつのアンカーの角を斜面上部側から時計回りに(a)~(d)とした。

4.2 3次元形状復元

図-9に示した撮影位置の提案では、アンカー頭部に接近した撮影が必要となる。しかし、実際の現場では、安全に通行できる通路に制約があるなど、理想的な位置で撮影することは非常に難しい。

そこで本研究では、提案した位置からの撮影を可能にするべく、ドローン（ラジコンヘリ）を用いることとした。ラジコンヘリはDJI Phantom 2、ラジコンヘリに取り付けるカメラはGoPro HERO 3+である。写真-4にラジコンヘリとカメラを示す。

ラジコンヘリを操作しながら静止画を撮影することは困難であるので、アンカーを動画で撮影し、画像をキャプチャして復元を行った。表-4にカメラの撮影モードを示す。ここに示すカメラの性能は、ヘリコプターに搭載可能なカメラを用いる必要があったため、表-1より性能は低下している。なお、GoProのレンズは魚眼レンズのため、撮影した動画もその影響を受けてしまう。そこでGoPro専用アプリのGoPro Studio¹⁴⁾を用いて魚眼レンズによる影響を取り除いた。写真-5に撮影風景を示す。

ラジコンヘリからの画像だけでは、現地でスケールの把握が可能な指標がないため、形状復元された3次元点群のスケールを求めることができない。模型実験時にコンクリート平板のサイズを用いてスケール把握を行ったように、アンカー受圧版のサイズを用いてスケール把握を行うことも考えられたが、変状把握の対象となる受圧版を計測の基準となる指標として用いることには問題がある。標尺を設置した場合には、標尺の点の読み取り誤差が生じるため、新たな方法として、復元の際に写真-6のように距離が固定された2台のデジタルカメラで撮影された画像を混ぜ、形状復元時に逆解析で求められたこのデジタルカメラ2台（撮影条件は表-1と同じ）による画像の撮影位置の距離を用いてスケール調整を行うこととした。アンカー下部で通常のデジタルカメラの使用が可能な位置において、距

表-3 それぞれのケースの復元精度

| 浮きを与えた場所 | case | 実際の浮き量(cm) | 復元で得られた浮き量(cm) | 誤差(%) |
|----------|-------|------------|----------------|-------|
| 東石下 | case1 | 1.50 | 1.59 | 6.27 |
| | case2 | 3.00 | 2.99 | 0.19 |
| | case3 | 4.50 | 4.66 | 3.64 |
| 平板下 | case4 | 1.50 | - | - |
| | case5 | 3.00 | 1.89 | 36.94 |
| | case6 | 4.50 | 3.60 | 20.08 |

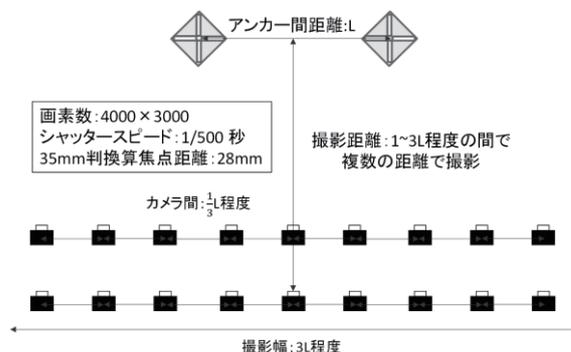


図-9 アンカー頭部を対象とした撮影位置の提案



図-10 現地計測実験サイト位置
(国土地理院地図に加筆)



写真-3 対象としたアンカーの状況

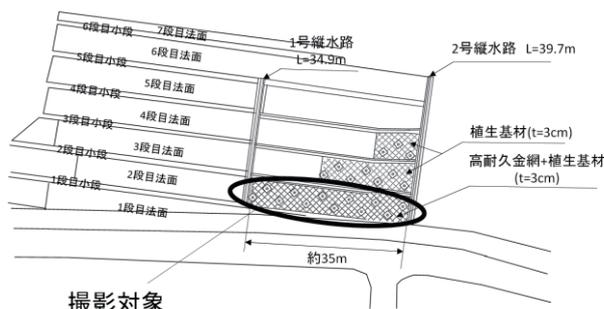


図-11 アンカー配置平面図

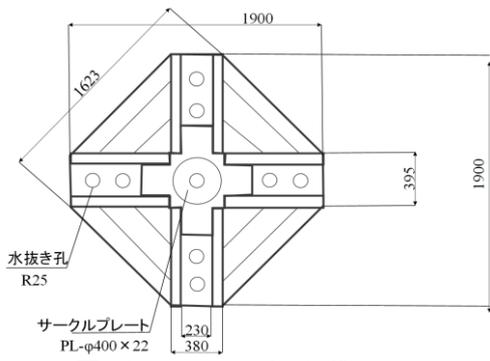


図-12 アンカー受圧版構造図

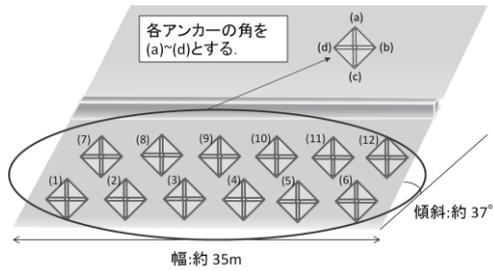


図-13 アンカー受圧版のナンバリング



写真-4 使用したラジコンヘリとカメラ

表-4 ラジコンヘリからの撮影条件

| カメラ: GoPro HERO 3+ | | |
|--------------------|---------|-----|
| 解像度 | フレームレート | 視野角 |
| 1920 × 1080 | 60fps | ナロー |



写真-5 ラジコンヘリによるアンカーの撮影状況

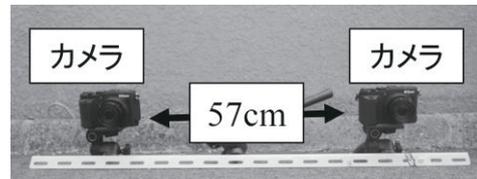


写真-6 距離を固定した2台のデジタルカメラ
(カメラの仕様は表-1と同様)

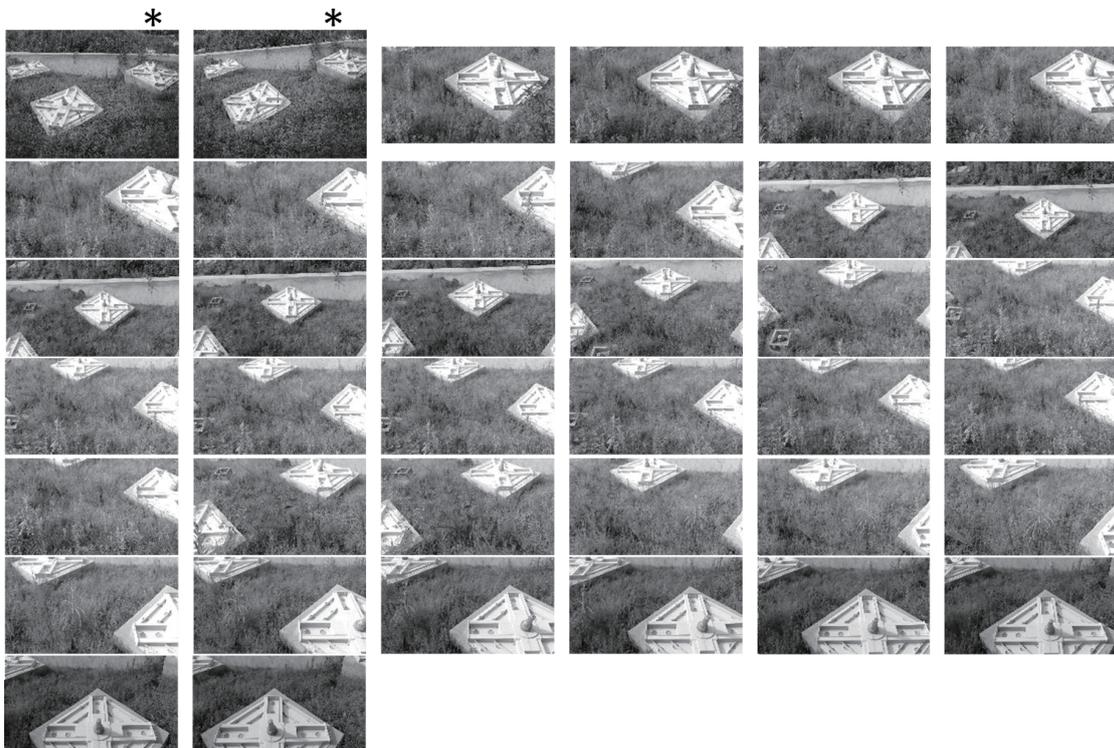


写真-7 形状復元に用いた画像一覧 (計 38 枚)
(*は距離を固定した2台のカメラによる撮影画像)

離を固定した 2 台のデジタルカメラで撮影した画像を形状復元時に用いると、そのデジタルカメラ 2 台の撮影（相対）位置（および距離）も逆解析で求まることから、スケールの調整が可能となる。

最終的に、アンカー(3)とアンカー(8)を対象として、写真-7 に示す計 38 枚の画像を用いて復元を行った。図-14 に復元形状を示す。また、撮影位置を斜面上に投影した結果を図-15 に示す。ラジコンヘリの操縦能力の問題があるため、これらの結果は図-5 のパターン 8 よりもパターン 13 に近いが、形状復元後でないとも撮影位置が逆解析で求まらず、さらに、蛇行するヘリコプターからの撮影画像を目して抽出するため、パターン 8 よりも画像の枚数が多い結果となった。なお、座標系は、右端のカメラを原点とし、斜面上方に y 軸、斜面左方向に x 軸、斜面垂直方向に z 軸を設定した。

表-5 に復元されたアンカー受圧版間の距離で評価した復元精度を示す。実際のアンカー受圧版間の距離と復元された距離の誤差は 2.2 % である。模型実験時の形状復元精度（もっともよいパターン 8 で 0.15 %）よりも劣る。

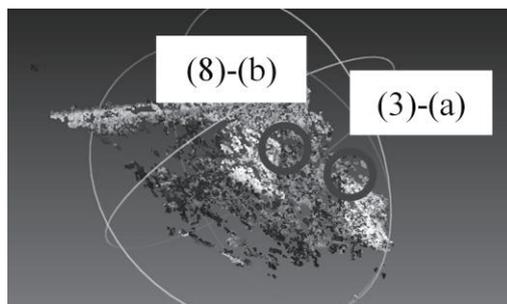
アンカー受圧版間の距離のように斜面並行方向の距離の計測精度とアンカー受圧版の浮きのように斜面垂直方向の計測精度を同等に議論することは必ずしも適切ではないが、撮影位置の分布を考えると、斜面水平方向の計測精度のほうが高いと考えられ、アンカーの受圧版の数 cm 程度の浮きを把握するには未だ不十分な精度であると考えられる。

しかし、アンカー受圧版間の約 2 m の距離に対して 2.2 % の誤差は 5 cm 程度に相当する。3 章で述べた模型実験ではアンカー受圧版の浮きを想定していたが、実際のアンカー変状には斜面の流動等に伴うアンカー受圧版の水平変位もありえる。この場合、水平変位が 10 cm 程度発生した場合には、提案手法で十分に把握することが可能であると考えられ、本研究で提案した撮影位置（図-9 のとおり、対象となるアンカー頭部間の距離 L の 1 倍及び 2 倍、あるいは 2 倍及び 3 倍の距離から、1/3 L 程度の間隔で幅 3L 程度にわたって撮影する）には一定の適用性がある。

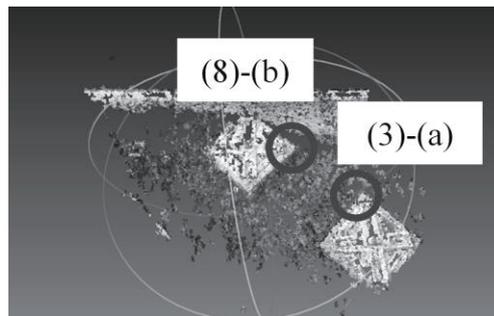
5. 結論

本研究では、グラウンドアンカーの維持管理の効率化をめざし、デジタルカメラ画像による 3 次元形状復元(SIFT)を用いた画像解析技術)による変状評価手法を検討した。得られた結論は下記のとおりである。

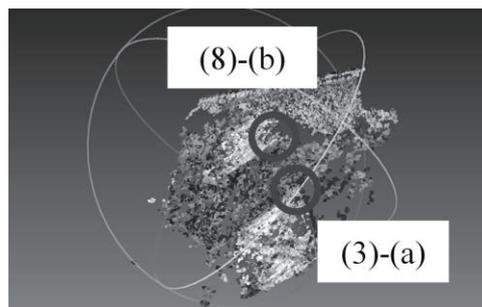
- (1) 画像解析によるグラウンドアンカーの 3 次元形状復元は可能であり、撮影枚数や撮影位置などの条件が整えば、数 cm 程度のアンカー頭部の浮きを評価することができる。ただし、草が多く写り込んでいる地面付近の形状把握は難しく、必要に応じて、アンカー頭部周囲の地面をセメント処理するなどの対応が必



(a) 斜面左下方から見た状況



(b) 斜面正面から見た状況



(c) 斜面右下方から見た状況

図-14 アンカー受圧版の復元形状

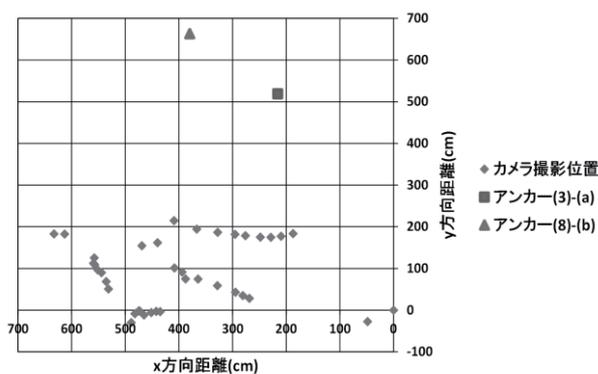


図-15 復元に用いた画像の撮影位置（斜面上に投影）

表-5 現場実験における形状復元精度

| 復元に用いた画像38枚 | x | y | z |
|---------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| カメラ座標範囲 | -583.2 ~ 46.5 | -254.3 ~ 57 | 0.000 ~ 240.9 |
| アンカー座標(3)-(a) | -33.6 | 221.5 | 407.0 |
| アンカー座標(8)-(b) | -194.5 | 193.2 | 552.7 |

(単位: cm)

| 復元から計算した距離 | 218.8 | cm |
|------------|-------|----|
| 実際の距離 | 214.0 | cm |
| 誤差 | 2.2 | % |

要となる。

- (2) 模型実験と現地計測の結果より、本研究で使用したカメラの性能であれば、対象となるアンカー頭部間の距離 L の 1 倍及び 2 倍、あるいは 2 倍及び 3 倍の距離から、 $1/3 L$ 程度の間隔で幅 $3L$ 程度にわたり撮影すると精度の良い復元結果が得られると考えられる。なお、現地計測の事例では、38 枚の画像から 2.2 % の誤差で対象としたアンカー頭部間の距離を評価できた。
- (3) 実際の現場において、アンカーに近づけないなど、上記の提案位置での撮影が困難な場合、ラジコンヘリを用いた撮影画像を使用することもできる。このとき、動画をキャプチャした画像も適用可能である。また、スケールの評価には、標尺を持ち込む代わりとして、距離を固定した 2 台のデジタルカメラによる画像（斜面下方等でアンカーに近づける部分において撮影）を用いることができる。

謝辞

本研究には、一般社団法人日本アンカー協会の研究助成および一般財団法人日本建設情報総合センターの研究助成をいただいた。また、株式会社相愛、株式会社地研の皆様には、現地調査の実施等で種々のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所，社団法人日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，2008。
- 2) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーのリフトオフ試験方法に関する検討，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.67，No.4，pp. 558-568，2011。
- 3) 藤澤和範，石田孝司，窪塚大輔：既設アンカー緊張力モニタリングシステム運用マニュアル，土木研究所資料，第 4171 号，2009。
<http://www.db.pwri.go.jp/pdf/D6401.pdf>（参照：2015 年 5 月 23 日）
- 4) 寺本俊太郎，尾方武文，木村亮：デジタル写真測量技術を用いた補強土壁の長期計測，地盤工学ジャーナル，Vol.9，No.2，pp. 287-298，2014。
- 5) David, L. : Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol.60, No.2, pp. 91-110, 2004.
- 6) 角田光法，一井康二：土構造物の維持管理への SIFT を用いた画像解析の適用性に関する研究：地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム，地盤工学会関西支部，pp.5-10，2011。
- 7) 一井康二，玉木徹：画像解析を用いた護岸消波工の積層構造分析技術の開発と維持管理及び長寿命化への応用，平成 22 年度中国地方建設技術開発交流会，2010。
- 8) Lin, B., Ueno, Y., Sakai, K., Tamaki, T., Raytchev, B., Kaneda, K. and Ichii, K.: Image Based Detection of 3D Scene Change, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 133, No. 1, pp. 103-110, 2013.
- 9) Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Modeling the World from Internet Photo Collections, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 80, No. 2, pp. 99-115, 2008.
- 10) Bundler(Structure from Motion for Unordered Image Collections) : <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>, 確認年月日 2015 年 5 月 27 日
- 11) Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362-1376, 2010.
- 12) Patch-based Multi-view Stereo Software(PMVS-Version2) : <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/>, 確認年月日 2015 年 5 月 27 日
- 13) Mesh Lab : Main page, <http://meshlab.sourceforge.net/>, 確認年月日 2015 年 5 月 27 日。
- 14) GoPro Studio : <http://shop.gopro.com/softwareandapp/gopro-studio/GoPro-Studio.html#/#/ciniform>, 確認年月日 2015 年 5 月 27 日

(2015 年 6 月 22 日 受付)

