

画像解析を用いた河川堤防天端に生じた亀裂の進行性評価に関する研究

Progressive Evaluation for the Cracks at the Crest of River Levees Using Image Analysis

中田 芳貴¹⁾, 森 啓年²⁾, 三津井 勇佑³⁾, 猿渡 雄二⁴⁾, 能島 佑佳⁵⁾

1) Yoshitaka NAKATA, 博士後期課程, 山口大学大学院, c007wdw@yamaguchi-u.ac.jp

2) Hiroto MORI, 准教授, 山口大学大学院, mori@yamaguchi-u.ac.jp

3) Yusuke MITSUI, 技術員, 中電技術コンサルタント(株), yuusuke.mitsui@cecnet.co.jp

4) Yuji SARUWATARI, 主査, 中電技術コンサルタント(株), saruwata@cecnet.co.jp

5) Yuka NOJIMA, 技術員, 中電技術コンサルタント(株), yuuka.noujima@cecnet.co.jp

河川堤防天端に生じた亀裂等変状に対する現地計測の効率化・高度化を目的に、デジタルカメラを用いた画像解析(SfM解析)による亀裂の計測方法について検討した。SfM解析とエスロンテープによる計測値の差分量1cm未満のデータ率は、前回87%に対し今回は93%と6%向上し、より高い精度で計測可能なことを確認した。亀裂の進行性の有無を把握するための手法として、エスロンテープ計測値の差分量が+5cm以上を対象に、三角形を構成する3つの鉸間距離における計測値と図化した距離を比較して評価する手法を提案した。この手法を用いて亀裂の進行性を把握可能であることを確認した。

キーワード：堤防, 亀裂, 進行性破壊

(IGC : C-07, E-02, H-00)

1. はじめに

1.1 研究背景

河川堤防(以下、「堤防」という)は、住民の生命と資産を洪水から防御する極めて重要な防災構造物であり、長大な堤防の多くは、古くから逐次断面拡大や護岸等による強化が重ねられてきた。そのため、堤防は、時代によって築堤材料や施工法が異なるため、堤体の強度が不均一でその分布が不明であるとともに、基礎地盤自体が河川的作用によって形成された地盤であり、極めて複雑である。また、堤防が被災した場合、堤体や基礎地盤が破壊されてしまい、被災原因を解明することが困難であること、局所的な安全性が一連の堤防区間の安全性を規定すること等の特性を有している。これらのことから、堤防が有すべき機能を適切かつ確実に維持管理するためには、適切な時期に、堤防の機能維持に着目した状態を見(診)てその変化を分析・評価する点検を実施することが必要である。

国土交通省が直轄として管理する大河川では、年1回以上の頻度で、管理施設の変状・変化を発見・観察するために目視を主体とした点検が行われている。点検時に亀裂等変状が確認された場合には、その状況写真を撮影するとともに、簡易な計測として、エスロンテープ、コンベックスやピンポールを用いて変状の「延長」、「幅」、「深さ」の3項目について計測がなされている。その状況や計測結果は河川維持管理データベースシステムであるRiMaDIS(River Management Data Intelligent System, 河川維持管理業務を支援するデータベースで、河川巡視や

表-1 変状箇所ごとの点検結果評価区分²⁾

評価区分		状態	変状確認	機能支障
a	異状なし	・目視できる変状がない、または目視できる軽微な変状が確認されるが、堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていない健全な状態	なし	なし
b	要監視段階	・堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていないが、進行する可能性のある変状が確認され、経過を監視する必要がある状態(軽微な補修を必要とする場合を含む)	あり	なし
c	予防保全段階	・堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていないが、進行性があり、予防保全の観点から、対策を実施することが望ましい状態 ・詳細点検(調査を含む)によって、堤防等河川管理施設の機能低下状態を再評価する必要がある状態	あり	なし
d	措置段階	・堤防等河川管理施設の機能に支障が生じており、補修または更新等の対策が必要な状態 ・詳細点検(調査を含む)によって機能に支障が生じていると判断され、対策が必要な状態	あり	あり

点検の結果や河川管理施設等の補修履歴等を一元管理するもの)に登録されている。これらの計測結果を基に、変状の規模や進行性の有無等を踏まえて、表-1に示す4つの指標で評価されている²⁾。

しかしながら、変状の計測において定点観測が行えるような環境が整備されていない場合には計測値にばらつきが生じやすいため、その計測値の信頼性が失われる。また、計測環境が整備されている場合において変状の進行性の有無が確認できたとしても、その変状が進行している方向までは把握することはできないことが想定される。加えて、亀裂の延長が長い等変状規模が大きい場合

には変状全体の状況写真を撮影することが困難なため、変状全体を記録することが可能な手法を用いることが望ましい。

1.2 研究目的

堤防天端が舗装されている場合には、堤体の緩み、空洞およびすべりの発生の予兆現象として舗装面に亀裂等が現れているため、芝等草類で覆われているのり面と比べて変状を容易に発見しやすく、堤防の異状を発見・把握しやすい。

そこで、著者らは、堤防天端のアスファルト舗装部に生じた亀裂に着目し、デジタルカメラを用いた SfM 解析による変状計測方法の適用性について取り組んでいる³⁾。ここで「SfM (Structure from Motion) 解析」⁴⁾とは、重複して撮影された複数の写真から抽出した多数の特徴点を用い、共線条件による制約条件に基づいて、カメラの内部標定要素および外部標定要素、特徴点の三次元座標を一度に求める手法である。本手法を用いることにより、延長の長い亀裂についてもオルソ画像を作成し、変状全体の状況を把握することができるとともに、亀裂周辺に設置した鉸間距離を画像上で計測することにより、変状の進行性の有無、進行箇所やその方向も把握可能である。しかし、本計測手法は、技術的には実施可能であるものの、その計測精度について不明であり、進行性の有無を把握するためには少なくとも mm オーダーの計測精度で行えることが望ましい。

本報では、2021 年度、2022 年度と 2 回亀裂の定点観測を行い、従来手法であるエスロンテープと本提案手法の平面的な鉸間距離の計測値の計測精度の検証、鉸間距離による亀裂の進行性を把握するための手法の提案、また、これらの提案手法における課題について整理した。

1.3 河川維持管理における計測技術

近年、IT や ICT の進展・普及に伴い、生産人口の減少に伴う生産性向上を目的とした ICT の導入やインフラ分野の DX が積極的に取り組まれている。河川維持管理分野においても、効率化・高度化やコスト削減を目的に、堤防等河川管理施設の点検においては UAV (Unmanned Air Vehicle: 無人飛行機の略称) や MMS (Mobile Mapping System の略称) 等による堤防の変状把握や、河道の点検においては航空レーザを用いた河川地形モニタリング技術や UAV を用いた地形測量技術などの新技術の開発や活用が進められている。各計測手法の範囲と高度に係る模式図を図-1 に示す。

これらの計測手法を用いた具体的な取組みとして、以下に示す事例が挙げられる。安達ら⁶⁾は、MMS にて計測した堤防地表面の点群データの活用について、陣内ら⁷⁾は MMS に搭載した LP (レーザプロファイラー) で測定した堤体形状データからデータの精度に及ぼす法面への入射角や植生の影響について検討されている。また、吉田ら⁸⁾はデジタルカメラで撮影した画像をカメラに搭

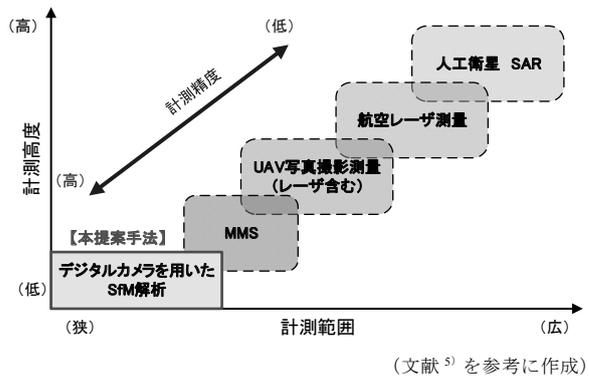


図-1 計測手法の計測範囲と高度の関係

表-2 アスファルト舗装における健全度区分¹⁾

区 分	状 態
I 健全	損傷レベル小： 管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である。
II 表層機能保持段階	損傷レベル中： 管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である。
III 修繕段階	損傷レベル大： 管理基準に照らし、それを超過している。または早期の超過が予想される状態である。
	(III-1 表層等修繕) 表層の供用年数が使用目標年数を超える場合 (路盤以下の層が健全であると想定される場合)
	(III-2 表層等修繕) 表層の供用年数が使用目標年数未満である場合 (路盤以下の層が損傷していると想定される場合)

表-3 アスファルト舗装における健全度評価指標¹⁾

区 分	ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI [※]
I 健全	20%未満程度	20mm未満程度	3mm/m未満程度
II 表層機能保持段階	20%以上程度	20mm以上程度	3mm/m以上程度
III 修繕段階	40%以上程度	40mm以上程度	8mm/m以上程度

※: International Roughness Index (国際ラフネス指標) の略称

載された GPS の座標と現地測量にて得た地上調整点 (GCP) を付与した SfM 解析により作成したオルソ画像を用いて、AI による護岸目地部のひび割れの検出が試みられている。また、樋門・樋管や水門等のコンクリート構造物では、計測用パネルと市販のデジタルカメラを用いたクラック画像計測システム⁹⁾や画像解析によるクラックの幅や長さの検出^{例えは¹⁰⁾}(検出可能なクラック幅は数 mm 程度が一般的で、ソフトによっては約 1cm 程度まで可能)が挙げられる。

一方で、道路事業におけるアスファルト舗装に対する点検では、5 年に 1 回程度の頻度を目安として道路管理者が点検を実施されている。点検手法は、道路管理者が表-2 に示す健全度区分に対して、表-3 に示すような適切な管理基準を設定し、河川堤防と同様に目視(車上・徒歩)を基本としつつ、新技術の積極的な採用に向け、機器を用いた手法など道路管理者が設定する適切な手法により舗装の状態を把握することとされている¹¹⁾。

道路舗装における近年の取組み事例^{例えは^{12),13)}}では、主として変状の有無や状態把握を面的に把握することができ、画像解析ソフトより数 mm 程度までのひび割れ幅を検出可能である。しかし、堤防天端のアスファルト舗装に生じた規模の大きい変状(亀裂幅 1cm 以上を想定)に

対して SfM 解析を用いた計測に関する取組み事例は、調査した限りでは見受けられなかった。

2. 計測手法及び結果概要

2.1 計測方法

堤防天端アスファルト舗装部に生じた変状の計測は、一級河川 A 川の直轄堤防で縦断亀裂と亀甲状ひび割れを対象に、2021 年度では 17 箇所、2022 年度では 28 箇所で行った。変状の計測手法と検討のフローを図-2 に示す。

2.1.1 従来手法

亀裂の変状計測は、図-3 に示すように亀裂周辺に 2~4m ピッチを目安に鉋を設置し、その鉋間距離をエスロンテープにて計測した。特に亀裂幅が大きい箇所では、亀裂幅の進行の有無が容易に把握できるように三角形に鉋を配置した。また、亀裂幅は金尺で、亀裂深さはピンポール等を用いて計測した。

計測初年度となる 2021 年度の計測では、1 回の計測のみであったが、計測 2 年目となる 2022 年度では、前回の 2021 年度計測値と比較しながら実施し、読み取りや記入のミス等の防止に努めた。

2.1.2 SfM 解析による変状計測手法

SfM 解析による変状計測手法は、鉋上に標定点となるマーカーを設置し、図-4 に示すようにデジタルカメラを用いて亀裂に対して 2 方向から写真のラップ率が 70%以上となるように撮影した。なお、使用したデジタルカメラは、有効画素数 1,200 万画素と一般的な仕様のカメラである。また、三次元点群データやオルソ画像を作成することを目的に、撮影した画像と鉋の座標位置を RTK-GNSS にて計測したデータを用いて SfM 解析を行った（解析使用ソフト：MetaShape (Agisoft 社)）。RTK-GNSS とは、GNSS 衛星を用いた相対測位であり、地上に設置された既知点（基準局）と位置を求めようとする観測点の 2 つのポイントを同時に GNSS 観測し、基準局で観測したデータを無線等を用いて観測点へリアルタイムに送信し、基準局の位置成果に基づき観測点をリアルタイムに求めることができ、誤差数 cm 内と精度が高い。

2021 年度の計測では、1 回の計測から鉋間距離を算出し、従来手法であるエスロンテープと SfM 解析の計測値を評価した。2022 年度では、解析ソフト上にて図-5 に示すようにカメラ位置と画像のオーバーラップを確認した。ここで、図-5 に示す凡例の数字は、デジタルカメラにより撮影した画像の重なり枚数を表す。また、GNSS の計測は、マルチパスや電離層の変動により、正確な測位を乱す場合がある。そのため、GNSS の計測値と画像解析のマーカーの座標値を比較し、図-6 に示すような標定点の位置と誤差の推定値を確認し、大幅な差が生じている箇所については GNSS での再測を行い、精度向上に努めた。ここで、図-6 に示す凡例は、高さ方向誤差は楕円の色で、平面誤差は楕円の形状で表している。

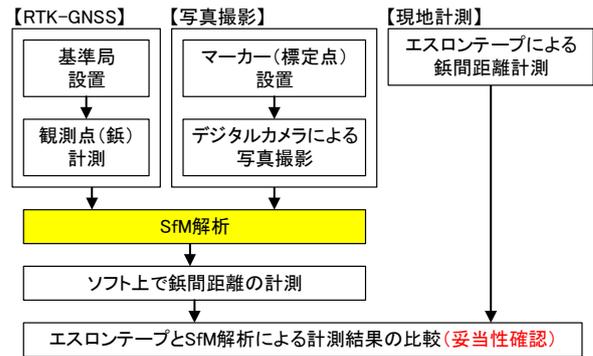


図-2 変状の計測手法と検討フロー

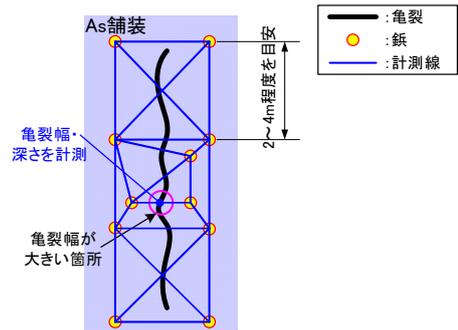


図-3 亀裂の平面的な計測環境のイメージ



(a) 撮影状況

(b) GNSS 計測状況

図-4 提案手法の計測状況

2.2 実測値と解析値の比較

2021 年度と 2022 年度において、亀裂周辺に設置した鉋間距離をエスロンテープにて計測した実測値と SfM 解析による計測値の比較結果を図-7 に示す。

2021 年度ではエスロンテープ実測値と SfM 解析計測値の差分量が最大±5cm 程度であったのに対し、2022 年度では最大±3cm 程度の差分量であった。また、2022 年度の差分量は 2021 年度と比較してばらつきも小さく、±1cm 以内となったデータ数の比率は 87%から 93%と 6% 向上している。これらの要因として、従来手法であるエスロンテープによる計測時には、前回の計測値と比較しながら実施したこと、デジタルカメラを用いた SfM 解析による計測値は、画像のオーバーラップ状況や計測データの妥当性を確認したことによる精度向上と考える。

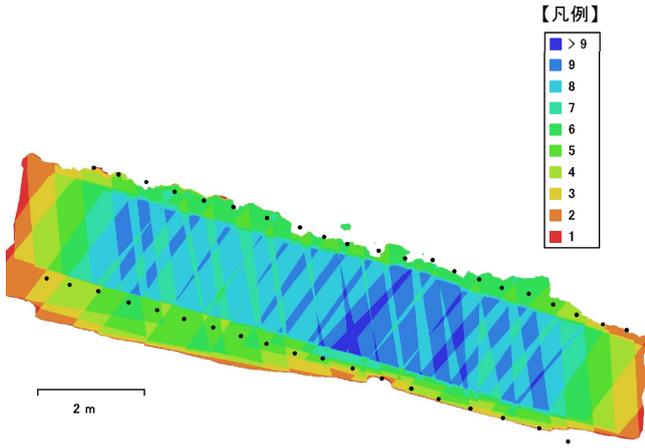


図-5 カメラ位置と画像のオーバーラップの一例

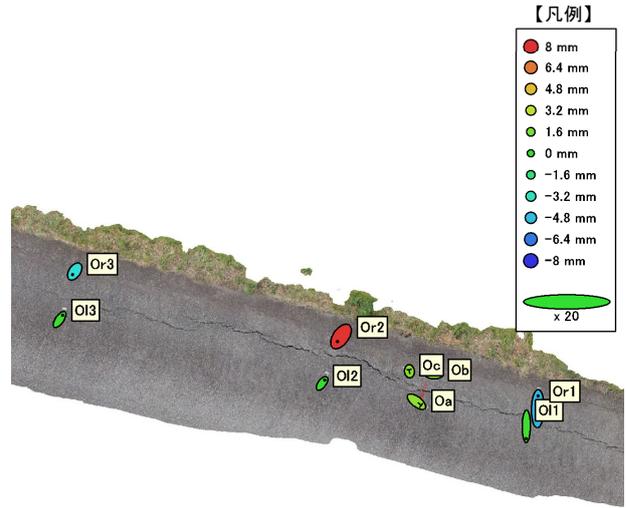
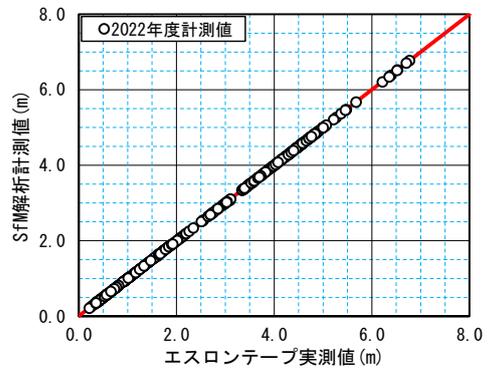
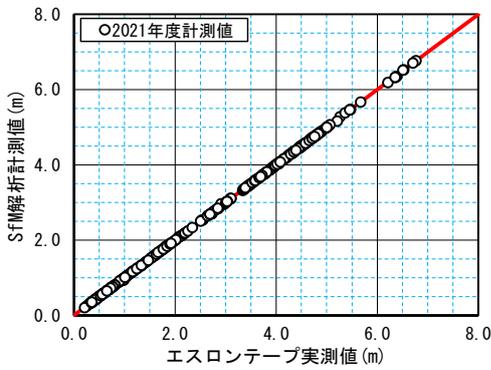
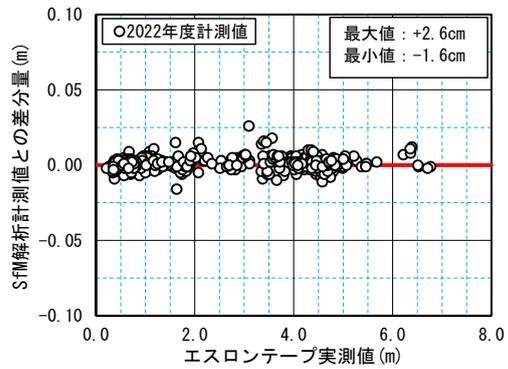
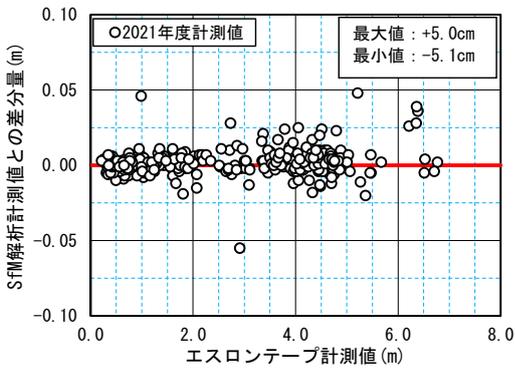


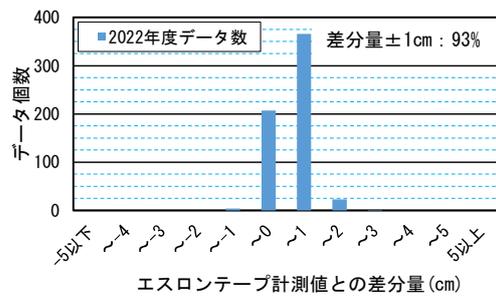
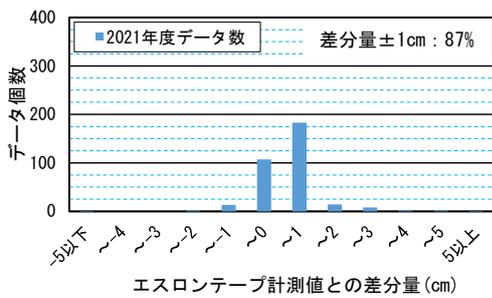
図-6 標定点位置と誤差の推定値の一例



(a) エスロンテープと SfM 解析の計測値の比較



(b) 実測値との差分量



(c) 実測値との差分量の範囲

図-7 鋸間距離のエスロンテープ実測値と SfM 解析による計測値との比較

2.3 画像解析の精度検証

鉸間距離別に整理したエスロンテープによる実測値の2022年度に対する2021年度との差分量とSfM解析計測値の差分量との関係を図-8に示す。ここで、図中の赤色の実線(①)はエスロンテープ計測値とSfM解析計測値の差分量と同じであることを、赤色の破線(②)は、その差分量が±1cmであることを示している。

図-8(a)より、鉸間距離が1m未満の場合、SfM解析の計測値は実測値との差分量に対して±5mm以内のデータ数が81%、±1cm以内のデータ数が95%と高い精度で計測できている。しかしながら、図-8(b)や(c)のように鉸間距離が長くなるにつれて、実測値に対するSfM解析の計測精度が下がることがわかる。この要因として、画像のラップ率に留意した撮影を行っているものの、解析ソフトで画像のつなぎ合わせを行う際、特徴の少ないアスファルト舗装では重ね合わせ時の精度が低くなることが想定される。

3. 亀裂の進行性の評価

3.1 亀裂に対する評価指標

堤防点検結果より堤防(土堤)に生じた亀裂に対する評価区分の判定は、表-4が目安として示されている²⁾。表中の「c」評価は、河川水位が住民の避難判断水位(市町村長による避難勧告等の発令判断の目安であり、住民の避難判断の参考になる水位)やはん濫危険水位(溢水・はん濫等により重大な災害が起こるおそれがある水位)等大規模出水を踏まえた記載と想定される。しかしながら、亀裂は、通行荷重や平常時の河川水位の変動により進行することも考えられる。

そこで、堤防天端に生じた亀裂に対する進行性を評価するにあたり、①鉸間距離と②亀裂の幅と深さに着目し、その適用性について検討した。

3.2 亀裂の進行性が懸念される箇所の抽出

3.2.1 鉸間距離による抽出

進行性の評価指標として「鉸間距離」に着目して抽出する場合には、現地計測時の作業員によるばらつき(エスロンテープの張り具合等)が生じることやアスファルト舗装表面の凹凸等を踏まえて、エスロンテープによる鉸間距離の計測値の差分量が+5mm以上となる箇所を抽出した。抽出した結果を図-9に示す。図より、平面的な進行性が懸念される地点は3地点(R1.00k, R6.80k, R7.08k)であった。

3.2.2 亀裂の幅・深さによる抽出

進行性の評価指標として「亀裂の幅と深さ」に着目して抽出するにあたり、亀裂幅については、写真-1に示すようにアスファルト舗装表面の骨材の凹凸による影響を受けていることが挙げられる。また、亀裂深さについては亀裂周辺の堤体土の崩れ・落ち込みによる影響等を受

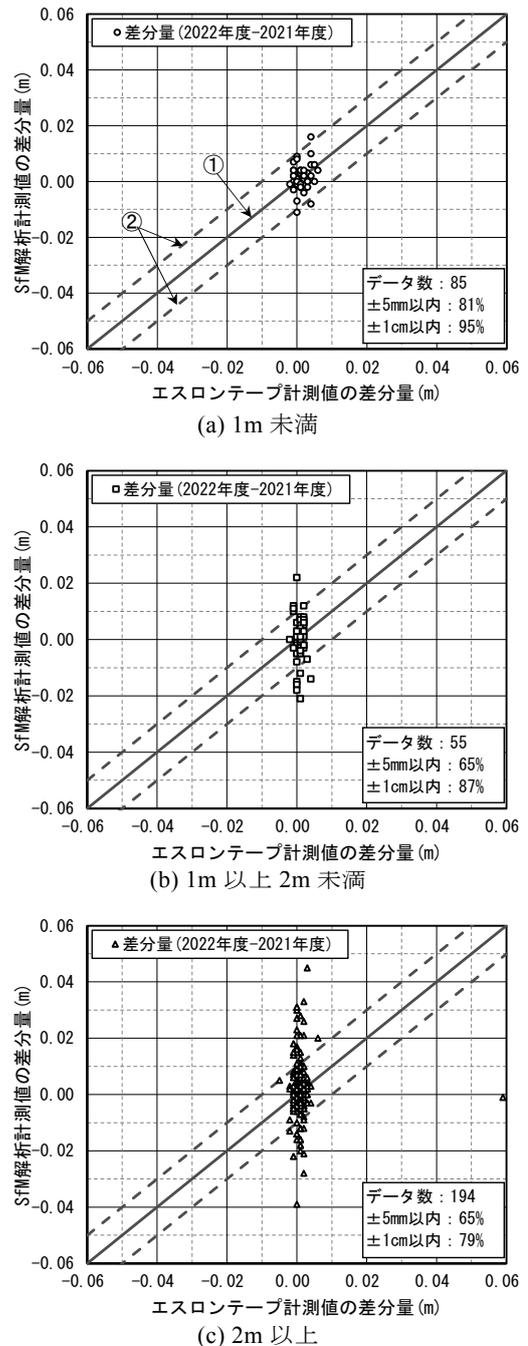


図-8 鉸間距離別の計測値の差分量 (2022年度-2021年度)

表-4 土堤に生じた亀裂の評価区分の判定目安²⁾

評価区分	亀裂の評価	
a	異状なし	・変状なし
b	要監視段階	・亀裂が発生しているが、堤防の機能に支障は生じていない ・軽微な補修を含む
c	予防保全段階	・盛土による堤防は洪水等により、急激に変状が進行することもあるため、劣化の予測が困難であることから、「c」評価を設定したいことを基本とする
d	措置段階	・亀裂により堤防の機能に支障が生じている ・亀裂がH.W.L以下まで及んでいる など

けている可能性がある。

そのため、進行性の評価指標として「亀裂の幅・深さ」

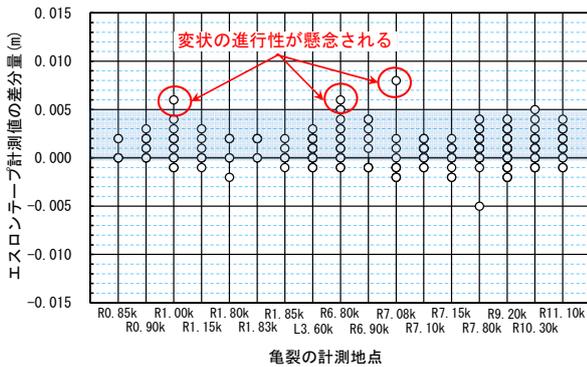


図-9 計測地点毎の鉸間距離の差分量

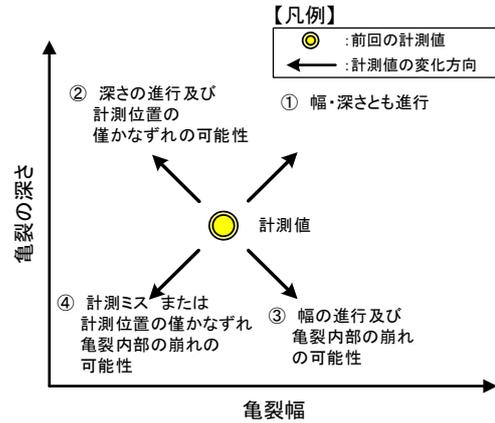


図-10 亀裂の幅・深さによる進行性評価



(a) R 6.80k 地点

(b) R 6.90k 地点

写真-1 計測状況（2022年度）の一例

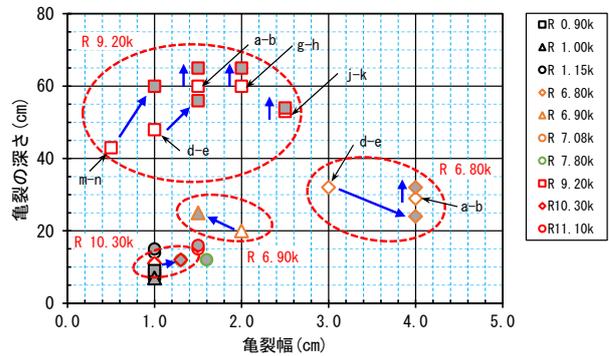


図-11 亀裂の幅・深さの関係（2021-2022年度）

に着目して抽出する場合には、図-10 に示すような亀裂の幅・深さの関係性を踏まえて対象地点を抽出する必要がある。2021年度と2022年度に計測した亀裂の幅と深さの関係を図-11 に示す。ここで、図中の白の塗潰しのマーカーは2021年度計測値を、グレーの塗潰しのマーカーは2022年度計測値を表す。図より、進行性が懸念される地点は、4地点（R6.80k、R6.90k、R9.20k、R10.30k）であった。R6.80k地点では亀裂幅が、R9.20k地点では亀裂深さが他の地点と比較して卓越している。幅・深さとも増加している箇所があるものの、逆にR6.80k地点 d-e間では亀裂深さが8cm減少し、R6.90k地点では亀裂幅が0.5cm減少している。

3.3 亀裂の進行性の検討結果

3.3.1 鉸間距離による進行性の把握

エスロンテープで計測した鉸間距離による亀裂の進行性の評価フローを図-12に、詳細を図-13に示す模式図を例に提案手法を以下に示す。ここで、本提案における鉸間距離による進行性評価はエスロンテープによる計測値を基本とし、SfM解析による計測値はエスロンテープ計測値の妥当性確認として使用している。

(1) 前年度計測結果と比較し、閾値+5mm以上となる箇所を抽出する（図中の区間 b-d）。

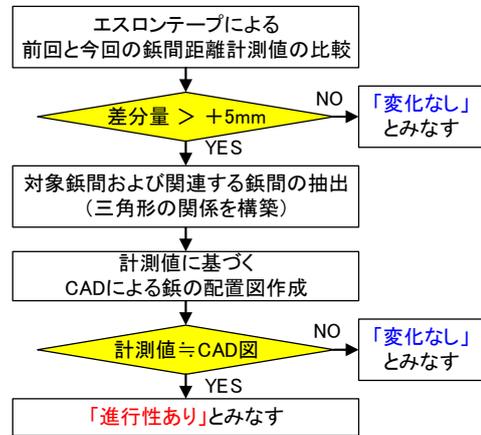


図-12 鉸間距離による進行性評価フロー

- (2) 左記 (1) で抽出した箇所において、エスロンテープ実測値と SfM 解析値による計測値が概ね同値であり、かつエスロンテープによる計測値との差分量が閾値 ±5mm 以上となる箇所を抽出する（図中の区間 a-c および c-e）。
- (3) 上記 (2) で抽出した箇所において、箇所周辺を含む 2 回分の計測値を図化する。
- (4) 上記 (3) にて作成した図面より、計測値と図化した値が概ね同値の場合には「進行性がある」とみなす。前述の評価手法にて検討した結果のうち、R6.80k 地点の例として、鉸間距離による進行性の検証結果を表-5 に、

検討地点の鉸配置とエスロンテープで計測した鉸間距離の差分量を図-14に、オルソ画像を写真-2に示す。写真-2に示すように、亀裂発生箇所は川裏側法肩部付近であり、鉸の配置はやむを得ず直線的になっている。

図表より、鉸間距離が閾値を超えている箇所はa-b, d-e, e-f間である。a-b間は、両計測値が概ね同値であることから、本提案手法により図化した鉸間距離が計測値と概ね同値であることから、本区間は「進行性がある」とみなした。d-e間は、両計測値の差分量が概ね同値であることから、本区間は「進行性がある」とみなした。e-f間は、SfM解析による計測値と図化した計測値が同値であったことから、本区間では「変化なし」とみなした。以上のことから、本地点では「進行性がある」とみなした。

R1.00k 及び R7.08 地点においても同様の検討を行い、両地点とも「変化なし」とみなした。

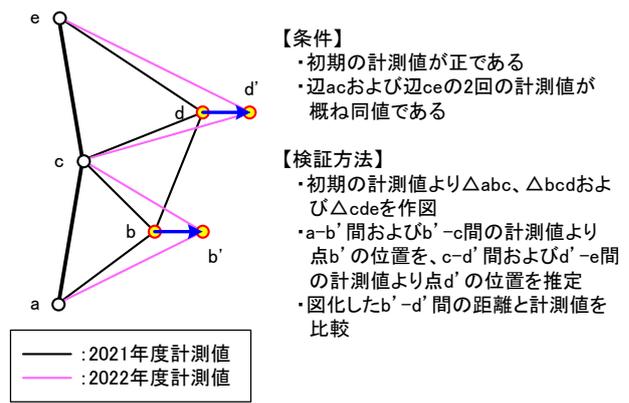
3.3.2 亀裂の幅・深さによる進行性の把握

R6.80 地点で亀裂の幅・深さを計測した箇所は、図-14および写真-2に示すように2箇所である。a-b間で亀裂深さが3cm増加していた。d-e間では亀裂幅が1cm増加しているものの、亀裂深さは8cm減少していた。亀裂幅の進行性については、前述のa-b間およびd-e間の鉸間距離による検証結果から「進行性あり」とみなしており、a-b間では開きは確認できていないが、d-e間では同様の傾向が得られている。ただし、その増加量には差がある。亀裂深さについては、a-b間の深さは増加傾向にある。d-e間では減少傾向となっており、亀裂周辺の堤体土の崩れ・落ち込みによる影響等を受けたと想定される。以上のことから、当該地点では「亀裂の幅・深さとも進行している」とみなした。

R6.90k 地点では1箇所計測しており、亀裂幅が0.5cm減少し、亀裂深さが5cm増加した結果となった。亀裂幅の計測値は減少しているが、エスロンテープによる鉸間距離の差分量は0.4cm増加と異なる傾向であった。以上のことから、当該地点では「亀裂の深さは進行している」とみなした。

R9.20k 地点で計測した箇所は5箇所である。亀裂幅は、このうちd-e間およびm-n間の2箇所0.5cm増加していた。また、エスロンテープによる鉸間距離の差分量は、d-e間で0.4cm増加、m-n間で0.1cm増加しているものの、その増加量は微小であることから、「変化なし」とみなされる。亀裂深さは、a-b間で5cm、d-e間で17cm、g-h間で5cm、j-k間で1cm、m-n間で8cmと全ての箇所増加していることから、当該地点の「亀裂深さは進行している」とみなした。

R10.30k 地点では1箇所計測しており、亀裂幅は0.3cm、亀裂深さは1cm増加していた。エスロンテープによる鉸間距離の差分量は0.1cmであることから、幅・深さの増加量が僅かであるから、当該地点では「亀裂の幅・深さは変化なし」とみなした。



(b-d間の進行性が懸念される場合)

図-13 鉸間距離の図化方法

表-5 鉸間距離による進行性の検証結果 (R6.80k 地点)

計測地点	測点	計測方法	計測値(m)		差分量(m)
			2021年度	2022年度	
R6.80k	a ~ b (検証箇所)	エスロン	0.342	0.348	0.006
		SfM解析	0.343	0.347	0.004
		(差分量)	-0.001	0.001	
		図化	0.342	0.347	0.005
	d ~ e	エスロン	0.365	0.370	0.005
		SfM解析	0.361	0.367	0.006
		(差分量)	0.004	0.003	
		図化	0.365	0.370	0.005
	e ~ f (検証箇所)	エスロン	0.310	0.315	0.005
		SfM解析	0.315	0.315	0.000
		(差分量)	-0.005	0.000	
		図化	0.310	0.310	0.000

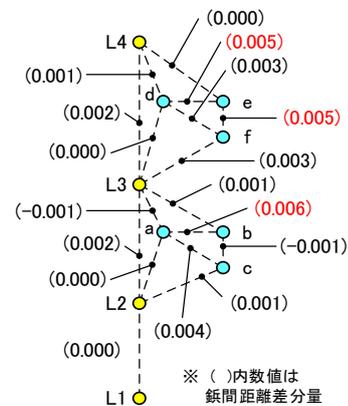


図-14 鉸の配置と鉸間距離の差分量 (R6.80k 地点)

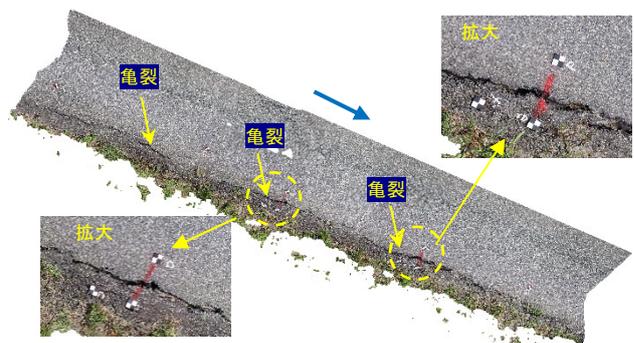


写真-2 オルソ画像 (R6.80k 地点)

3.4 亀裂の進行性の把握に係る考察

3.4.1 鉦間距離による進行性評価

亀裂の進行性を鉦間距離の計測値により評価するためには、mm オーダーの精度が求められる。今回の計測値の範囲の中では、鉦間距離の計測値の妥当性を確認した上で、+5mm 以上であれば変状が進行していると評価することができる。と考える。

3.4.2 亀裂部の幅・深さによる進行性評価

亀裂部の幅・深さの計測値より進行性を評価するためには、鉦間距離と同様に mm オーダーの精度が求められる。しかしながら、今回の調査地点の状況を考えると、進行性を評価することが困難と考える。そのため、亀裂幅は、亀裂の規模を表す指標（目安）として取り扱い、進行性評価は亀裂部周辺に設置した鉦間距離にて評価するのがよいと考える。

亀裂深さについては、堤体内の状況を把握することが困難であることから、今回の計測値の範囲では、+5cm 以上であれば進行していると評価することができる。と考える。

4. まとめ

本研究では、堤防天端アスファルト舗装に生じた亀裂に対して、亀裂周辺に定点観測用の鉦を設置し、従来のエスロンテープによる計測手法に対し、デジタルカメラを用いた SfM 解析による亀裂の変状計測方法の妥当性を検証した。また、得られた鉦間距離や代表的な亀裂箇所の幅や深さから、亀裂の進行性評価について試行した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) デジタルカメラを用いた SfM 解析による鉦間距離の計測手法は、従来手法であるエスロンテープによる計測値に対して、±2~3cm 程度の精度で計測可能であり、±1cm 以内の精度で 93%と高い精度で計測可能ことがわかった。
- (2) 特徴点の少ないアスファルト舗装を対象に SfM 解析を行う際には、1 枚の撮影画像内に複数の標定点（マーカー）を配置（図-8(1)より 1m 程度）することにより、鉦間距離を高い精度で計測可能ことがわかった。
- (3) 亀裂の進行性は、鉦間距離と亀裂深さの 2 種類の計測値にて評価することが可能である。亀裂幅は、亀裂の規模を表す指標として用いることが望ましい。
- (4) 本研究結果では、鉦間距離で+5mm、亀裂深さで+5cm 以上であれば進行性を評価することが可能であることがわかった。ただし、現時点では、エスロンテープによる実測と SfM 解析による鉦間距離の進行性を把握するためには、実測値や解析値の差分量のみで評価するのではなく、差分量の少ない区間を基にした図化による計測値の精度検証を行い、その鉦間距離の妥当性を確認した上で評価することが望まし

い。

以上の研究成果から、今後、特徴点の少ないアスファルト舗装に生じた亀裂の進行性を評価することを目的とした画像解析を行う際には、標定点（マーカー）を 1m 程度で配置することで、更なる精度向上を期することが可能であり、SfM 解析を用いて亀裂の進行性評価への適用が可能になると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，2007.3.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領，2023.3.
- 3) 中田芳貴・森啓年・猿渡雄二・土井雄生・能島佑佳・片岡航大：堤防天端に生じた亀裂等の現地計測の効率化・高度化に関する基礎的研究，第 57 回地盤工学研究発表会，No.21-5-2-05，2022.7.
- 4) 菅井秀翔・宮地邦英・中村孝之・南秀和・橋克巳：UAV を活用した写真測量の精度検証，国土地理院時報，No.129，pp.147-157，2017.
- 5) 佐古俊介・田村善昭：河川堤防管理における計測技術の活用，JICE REPORT，No.32，pp.31-36，2018.
- 6) 安達孝実・河野隆治・関克己・藤山秀章・小澤淳眞：堤防管理の高度化に向けた堤防地表面データの点群データの活用に関する検討，河川技術論文集，第 24 巻，pp.565-570，2018.6.
- 7) 陣内尚子・岡村未対：LP で取得した堤体表面 DEM データ精度に与える植生の影響について，土木学会第 73 回年次学術講演会，pp.329-330，2018.8.
- 8) 吉田龍人・藤井純一郎・大久保順一・天方匡純：護岸のひび割れ検出 AI の作成とオルソ画像を活用したひび割れ幅の評価，AI・データサイエンス論文集，1 巻 J1 号，pp.580-587，2020.
- 9) (一社)リバーテクノ研究会：中小河川でも使える水防災に関する技術情報集，pp.72-73，2022.8，http://rirt.or.jp/portal_suibou/pdf/jirei_ver1_220809.pdf（2023 年 6 月 1 日確認）。
- 10) (株)ニコン・トリンプル HP：ひび割れ画像計測ソリューション「SightFusion」，https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0101_geospatial/sightfusion.pdf（2023 年 6 月 1 日確認）。
- 11) 国土交通省道路局国道・防災課：舗装点検要領，2017.3.
- 12) 倉立尚明・熊倉信行・関晃仁：効率的な道路維持管理を実現する舗装ひび割れ認識技術，東芝レビュー，Vol.70 No.9，2015.
- 13) 井原正・加藤晃・浅野耕司：デジカメ診断ソフトによる舗装路面のひび割れ測定，舗装，Vol.43 No.7，pp.31-34，2008.7.

(2023 年 6 月 19 日 受付)