

三次元再構成と熱収支シミュレーションを統合した RC 建造物の浮き検出

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員○ 柴野一真
新潟大学自然科学系（農学部） 正会員 鈴木哲也

1. はじめに

道路擁壁などの RC 建造物では、鉄筋腐食などによりかぶりコンクリートに浮きが生じ、はく落に至る。浮きの検出に用いる打音検査は壁面への近接を要し、崖沿いの擁壁では足場や交通規制が必要となる。赤外線サーモグラフィ法 (IRT) は、非接触で広範囲の表面温度を計測でき、浮きの検出に用いられている¹⁾。日射を熱源とするパッシブ IRT では、浮き部と無損傷部の温度差を経験的な閾値で判定することが多い²⁾。

壁面では張出し部や地形の影により日射条件が部位ごとに異なるため、単一の閾値では壁面全体を評価できない。筆者らは、熱収支シミュレーションにより浮き部と無損傷部の表面温度を比較してきた^{3),4)}。本研究では、Structure-from-Motion (SfM) で再構成した三次元メッシュ上で影を計算し、熱収支モデルによる無損傷部の計算温度と実測温度の残差から、供用中の RC 擁壁の浮きを検出した。



図-1 対象とした RC 道路擁壁

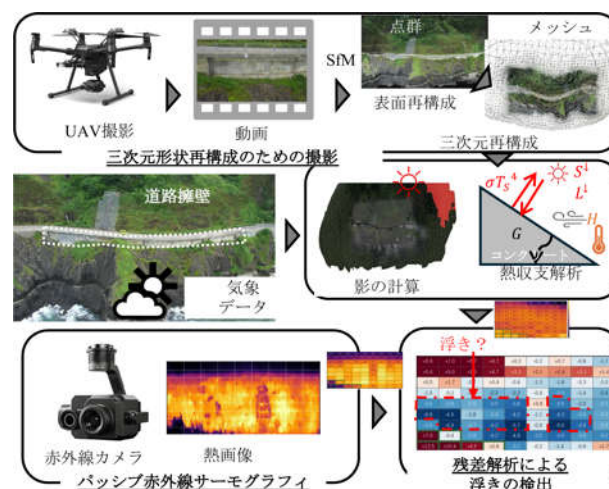


図-2 提案手法の概要

2. 対象建造物および解析方法

2.1. 対象建造物と計測

対象は、新潟市西蒲区角田浜の海岸の崖沿いにある 1973 年竣工の RC 道路擁壁である (図-1)。壁面は西向きで、天端に約 1.0 m の張出し部がある。10 パネルを約 1.5 m×0.3 m のセルに分割し、打音検査と目視点検の結果から分類した。植生部を除く 391 セルのうち、浮き (断面欠損を含む) は 40 セル、無損傷は 128 セルである。

熱画像は、2021 年 6 月 25 日 (晴天) の 8:00 から 16:00 に 2 時間間隔で、UAV に搭載した赤外線カメラ (Zemuse XT2) で取得し、セルごとの平均温度を実測表面温度 T_m とした。気象データは擁壁から約 730 m の地点で観測した。

2.2. 解析方法

提案手法の概要を図-2 に示す。UAV の動画から

SfM で擁壁と周辺地形の三次元メッシュを作成し、太陽方向へのレイキャスティングでセルごとの日向率を求めた。全天日射量を Erbs モデル⁵⁾で直達成分と散乱成分に分離し、日向率、入射角および天空率から壁面の日射量を算出した。

コンクリート表面の熱収支は次式で表される。

$$R_n = H + G \quad (1)$$

ここに、 R_n は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 G は伝導熱フラックス ($W \cdot m^{-2}$) である。 G は一次元非定常熱伝導を差分法で解いて求めた。熱伝導率や放射率など 8 つのパラメータは、無損傷 128 セルの平均絶対誤差 (MAE) が最小となるよう同定した。

浮きの検出には、壁面が日向となる 14:00 から

16:00 の温度上昇の残差を指標 D として用いた.

$$D = (T_{m,16} - T_{m,14}) - (T_{c,16} - T_{c,14}) \quad (2)$$

ここに, T_c は計算表面温度, 添字は時刻である. 影の影響を除くため, 各指標は同じ行の日向セルの中央値との差とした. 比較のため, 表-1 の指標 A~C および E も評価した. 打音検査の結果を正解として ROC 曲線の AUC で評価し, 閾値は無損傷セルの指標 D の二乗平均平方根 (RMS) とした.

3. 結果および考察

影の計算では, 壁面は 12:00 まで直達日射を受けず, 14:00 に下部から日向となり, 16:00 にはほぼ全面が日向となった. 計算した影の境界は可視画像と一致した. このことから, 壁面の IRT に適した時間帯は時刻ではなく構造物の影で決まる. 無損傷セルの MAE は 2.29 K であり, 全セルが日陰の朝は計算値が実測値を約 3 K 上回ったが, 午後のバイアスは 0.1 K 未満であった.

各指標の AUC を表-1 に, ROC 曲線と指標 D の分布を図-3(a), (b)に示す. AUC は指標 D で 0.973 と最も高く, 1 時刻の残差 (指標 B) は 0.682 であった. 1 時刻の残差に含まれる放射率などの時間変化しない誤差は, 温度上昇の差をとると相殺される. また, 浮き部は空気層があるため, 日向になると無損傷部より速く昇温する.

指標 D の RMS (1.82 K) を閾値とすると, 感度 86 %, 特異度 94 %, F1 値 0.89 であった (図-3(c)). この閾値は浮きのラベルなしで設定できる. 未検出の 5 セルは浮き領域の縁にあり, 補修済みのパネル 8~10 に誤検出はなかった. 浮きを空気層としてモデル化すると, 温度上昇は深さ 35 mm 以下の浮きで再現され, 浮きのかぶり (100 mm) より浅いと推定された.

4. おわりに

三次元メッシュ上で影を計算した熱収支シミュレーションと熱画像の残差により, 供用中の RC 擁壁の浮きを AUC 0.973, F1 値 0.89 で検出できた. 今後は, 他の構造物や長期計測データに適用し, 本手法の適用可能性と限界を明らかにする必要がある.

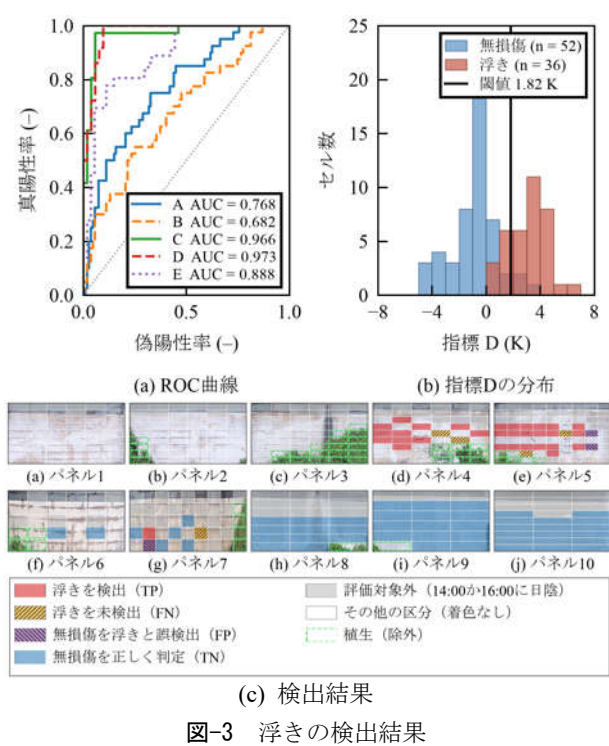


図-3 浮きの検出結果

表-1 各指標の定義と AUC

指標	定義	AUC
A	16:00 の実測温度	0.768
B	16:00 の残差 (実測-計算)	0.682
C	14:00~16:00 の実測温度上昇	0.966
D	C の残差 (式(2))	0.973
E	14:00 の実測温度 (符号反転)	0.888

である. 計測にご協力いただいた日本サミコン株式会社に感謝申し上げます.

参考文献

1) Tomita, K. and Chew, M.Y.L.: A review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings, Sensors, Vol.22, 423, 2022.
2) Watase, A. et al.: Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation, Construction and Building Materials, Vol.101, pp.1016-1030, 2015.
3) Shibano, K., Hagiwara, T., Kimura, M. and Suzuki, T.: Quantitative detection of delamination in reinforced concrete road wall by infrared thermography with heat balance simulation, Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT8), Vol.2, pp.852-860, 2024.
4) 柴野一真, 萩原大生, 木村匡臣, 大野健太郎, 鈴木哲也: 画像クラスタリングに熱収支解析を組み合わせたパッシブ赤外線サーモグラフィ法によるダムコンクリートの表層損傷評価, ダム工学, Vol.34, No.2, pp.129-143, 2024.
5) Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A.: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, Solar Energy, Vol.28, pp.293-302, 1982.