

赤外線ドローンによる法面点検の検討について

濱口 貴仁・橋本 康平

滋賀県建設技術センター 技術課

モルタル吹付工法は施工性が良く、凹凸のある法面でも施工が可能であるが、施工後何十年も経過したものも存在する。モルタル吹付背面の空洞化が進んでいても、目視点検のみでは確認できないことが課題となっている。また、橋梁やトンネル等と異なり定期点検が義務化されていないため、定期点検が実施されていない傾向にある。本報告は赤外線ドローンによる法面点検により誰もが手軽に撮影でき、空洞箇所を発見できることを目指して、点検手法を検証することを目的とする。

キーワード 赤外線ドローン, 法面点検, サーモグラフィ, 2時刻調査

1.はじめに

モルタル吹付工法は施工性が良く、凹凸のある法面でも施工が可能であることから、法面保護工として多用されている。しかし、施工後何十年も経過したものも存在する。モルタル吹付背面の空洞化が進んでいても、目視点検のみでは確認できないことが課題となっている。また、橋梁のように道路法施行規則第4条の5の6の規定に基づいた定期点検が定められているわけではないため、定期点検が実施されていない傾向がみられる。実際に数か所の土木事務所にヒアリングしても、平成8年度に実施された道路防災総点検により抽出された災害危険箇所を中心に年に1回程度の経過観察に留まっている。このようなモルタル吹付法面は、背面の空洞化の進行による法面崩壊のリスクを抱えている。

「平成29年8月 道路土工構造物点検要領 国土交通省 道路局」によるとモルタル吹付法面は近接目視による点検を基本としており、打音検査を行うこととなっているが、点検技術者の不足、作業の手間および点検費用の圧迫などから、打音検査による空洞部調査については、定期的には実施できていない。

当センターではこの現状を脱却するため、赤外線ドローンを用いた点検の可能性について、検討を行うこととした。特長としては機動性が高く手軽に調査可能なドローンと赤外線による法面調査を掛け合わせたものとなる。

しかし、赤外線カメラを用いた法面点検の知見は少なく、試行の結果、特に温度・時間・角度・距離・風など様々な要因に左右されるため、少しでも条件が異なるだけで結果が変わることが少なくなかった。そのため、異常部の検出精度を高めることを目的に、赤外線ドローンで撮影する際に最適な条件および方法を見出す必要があ

ると考え、立命館大学総合科学技術研究機構と共同研究を行うこととした。本報告は赤外線ドローンによる法面点検の試行および共同研究を踏まえた今後展望について報告するものである。

2.赤外線映像法による調査方法

赤外線カメラは物体から放射される赤外線エネルギーをレンズで補足し、デジタル処理することによって、温度を可視化することができる。可視化された赤外線画像は赤外線サーモグラフィと呼ばれ、このサーモグラフィを使用して太陽光パネルや建物の外壁パネルの損傷部調査などが行われており、土木分野ではコンクリート構造物の浮きや法面調査に活用されている。

3. 機器の選定方法

赤外線カメラの撮影方法として、固定式のカメラとドローン搭載式のカメラの2種類が存在した。固定式のメリットとしては、手振れが極めて少ないため、安定した写真が撮影できる。デメリットとしては、カメラを設置できる場所を確保しなければならないことや、撮影した場所の位置や角度等を記録しておく必要がある。また、ロケーションによっては近くから撮影することができないため、高額な望遠赤外線カメラが必要となる。

逆にドローン搭載式のメリットとしては、場所の制限を受けにくく、電線や樹木、車道との離隔等が確保出来ていれば、人が入っていけないような崖や河川等でも撮影が可能である。さらに自動飛行プログラムの作成により常に同じ位置、角度から複数個所の撮影することができるため、撮影時間を短縮することができる。逆にデメリットとしては、強風時は撮影できないことや夜間は安

全装置が働かないため、撮影できない。

また、固定式の赤外線カメラによる法面点検支援は進められているが、赤外線ドローンによる法面点検支援の事例はまだ少ない状況である。

表-1 固定式・ドローン搭載式赤外線カメラのメリット・デメリット

赤外線カメラ	固定式	ドローン搭載式
メリット	・手振れしにくい	・撮影箇所の制限が少ない ・複数個所の撮影時でも容易
デメリット	・撮影箇所が制限される ・複数個所の撮影時は時間がかかる ・望遠レンズが高額	・強風、夜間撮影に弱い

上記のような特徴を踏まえ、手軽で撮影箇所の制限が少ないドローン搭載式での撮影の方が法面の点検に向いていると考え、ドローン搭載式での赤外線での点検について検討を行うこととした。

導入時点で赤外線ドローンは2種類が流通していた。

「Mavic2 Enterprise Advanced」と「Matrice 300 RTK + Zenmuse H20T」である。どちらもDJI社製であるが、Mavic2 (図1) はドローンと可視・赤外線カメラが一体型となっており、機体の大きさは322×242×84mmとコンパクトであり、かつ赤外線の精度も条件を満たし、安価であったことからこの機体を採用した。

表-2 赤外線ドローン2機のメリット・デメリット

	Mavic2 Enterprise Advanced	Matrice 300 RTK + Zenmuse H20T
メリット	・コンパクト ・安価	・比較的強風に強い ・カメラの交換が可能
デメリット	・風の影響を受けやすい	・赤外線カメラが外付け ・機体が多い ・高額



図1 Mavic 2 Enterprise Advanced (赤外線ドローン)

5. 赤外線の吹付法面への適用

モルタル吹付法面における調査は「熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル (建設省 土木研究所)」において、赤外線映像法による法面調査方法が提案されており、以下に内容を示す。

吹付のり面は、図2-1のように、高温時は太陽の日射により、モルタルの表面が温められ、土砂部に伝達していく。しかし、モルタルと土砂部との間に空洞が存在すると空洞内の空気層による断熱効果により、土砂部に伝達されず、モルタル表面で熱が蓄えられることになる。このため、モルタルの背後に空洞が存在する場合は、日射による地山への熱伝達が空気層により妨げられ、健全部と比較してモルタル表面の温度が高くなる現象が生じる。

逆に低温時は図2-2のように、土砂部から伝達した熱が放射されて徐々に冷やされるが、モルタル背後に空洞が存在すると空気層による断熱効果により熱伝達が妨げられるため、モルタル表面が冷やされる。このため、モルタルの背後に空洞が存在する場合は、健全部と比較してモルタル表面のみが低くなる現象が生じる。

この現象を利用して、図3のように吹付法面の表面温度が大きくなるAM11時またはPM1時前後と表面温度が小さくなるAM3時前後の2時刻で撮影し、その温度差分から差分温度の高い部分が異常部の可能性があるかと判断する手法となる。

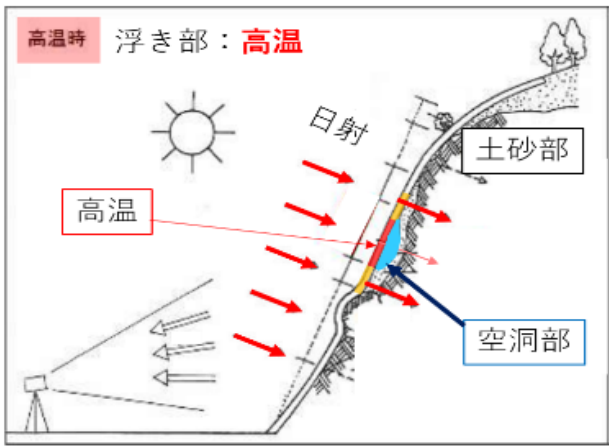


図2-1 吹付法面の熱移動模式図（昼間）¹⁾

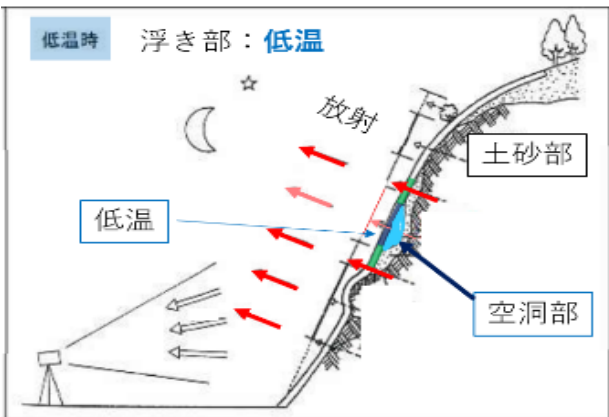


図2-2吹付法面の熱移動模式図（夜間）¹⁾

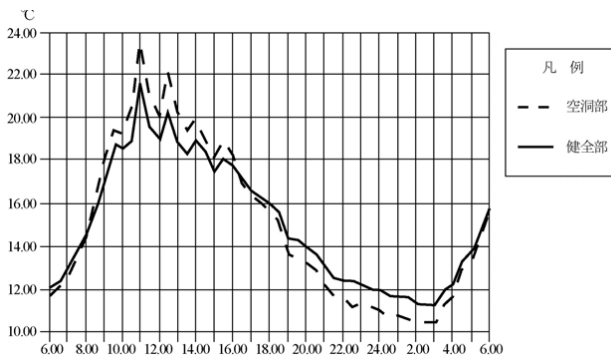


図3 吹付法面における表面温度の日変化¹⁾

4. 法面点検の試行

(1) 場所の選定

東近江土木事務所に協力していただき、モルタル吹付法面が数多くある国道421号（東近江市永源寺）の永源寺付近の新清水谷橋から大滝橋までの法面から選定することとした。当該路線の中で日当たりが良く、視界が広く確保されている法面を選定した。図4に示す法面は、上記の条件を満たし、永源寺ダムの管理事務所駐車場から離陸ができ、撮影時は車道から離れてダム湖上からの撮影ができるため、この法面で調査することとした。

実際に撮影した画像が図4である。左側の画像が可視画像で、右側が赤外線サーモグラフィ画像である。

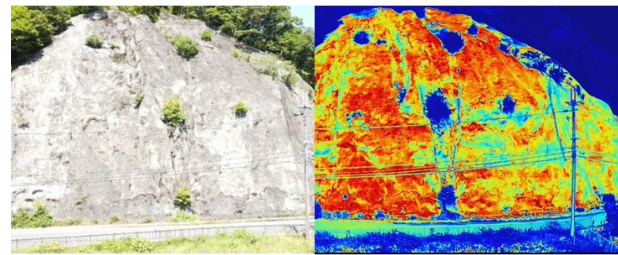


図4 モルタル吹付法面撮影（左：可視，右：赤外線）

(2) 撮影手法の検討

旧建設省土木研究所の文献（図5）では、2時刻（日照の少ない朝方と日照が最大となる昼間の2回撮影）の撮影時間は最も温度が上昇するAM11時またはPM1時頃と最も温度が低下するAM3時頃が好ましいと記載されていたが、ドローンの特性上、夜間飛行ができないため、飛行可能な午前9時から午後6時までを撮影時間とした。

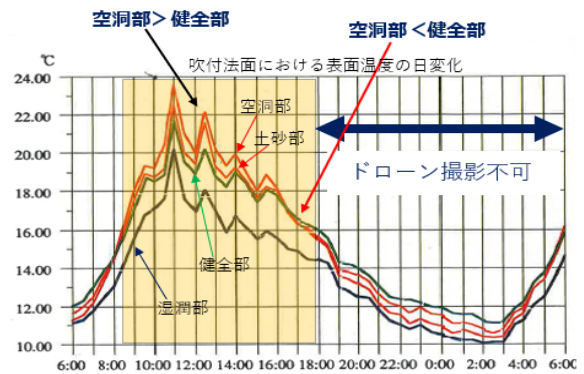


図5 吹付のり面における表面温度の日変化¹⁾

また、モルタル吹き付け法面の点検は2時刻での撮影が必要となることから、何度撮影しても同じ距離の同じ角度から撮影できるよう自動飛行のプログラムを作成することとした。Mavic2では予めコントローラーに内蔵されているDJIのアプリを用いて飛行プログラムを作成した。飛行プログラムの作成方法は2通りある。1つ目は、コントローラーに表示されている地図に飛行ルートをクリックしていき、その地点の高度、ジンバルの向きおよび撮影等を設定していく方法である。2つ目は実際に飛行

させたルートや撮影位置を保存する方法である。今回は背面がダム湖であり、現地でない距離感がわからないことや支障となる電線等あったことから、後者の実際に飛行させたルートを保存してプログラムを作成した。



図6 自動飛行プログラム

(3) 試行結果

8月8日13時と8月2日の18時に撮影した赤外線画像である。同日の撮影結果ではないが、他の文献でもよく似た気温の別日に撮影したものを採用している事例があったため、この結果を採用した。撮影した赤外線画像をDJI Thermal Analysis Tool3を用いて、温度解析したものである。図7に記載されている温度は四角で囲った範囲の平均温度を表している。法面を頂部、中腹部、下部の3つの範囲でグループ分けした際に、2時刻での温度差を比較すると頂部で最も顕著な結果となっており、約11℃の温度差が生じた結果となった。この結果から、頂部で空洞化の可能性が考えられる。ただし、打音検査等による実際の空洞確認ができていないため、どこまで精度が良いか確認できていないため、精度については今後検証していく必要がある。

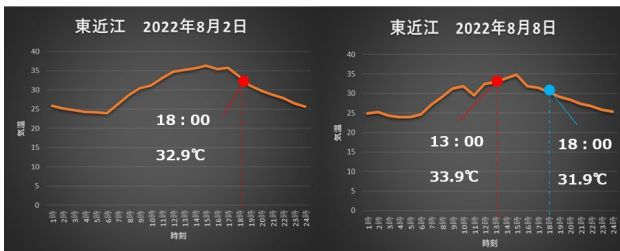


図7-1 8月2日と8月8日の外気温

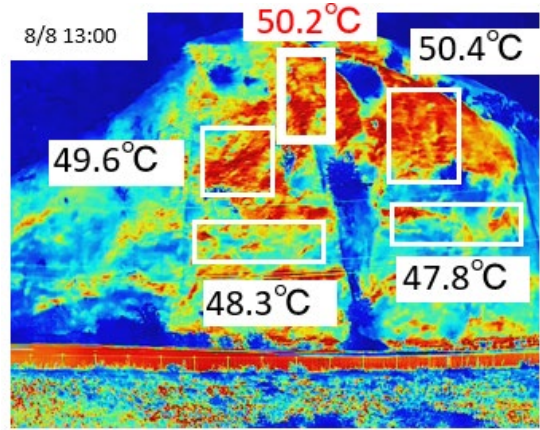


図7-2 赤外線画像の解析結果(8/8 13:00)

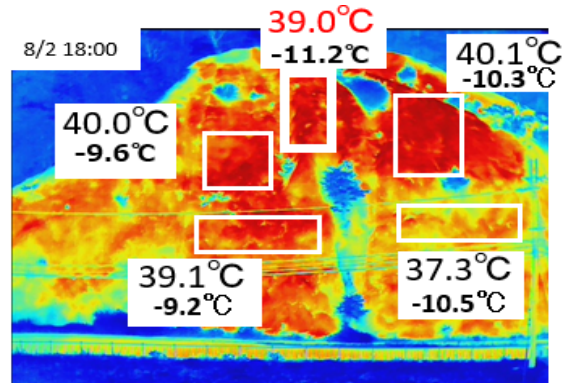


図7-3 赤外線画像の解析結果(8/2 18:00)

温度変化概略図

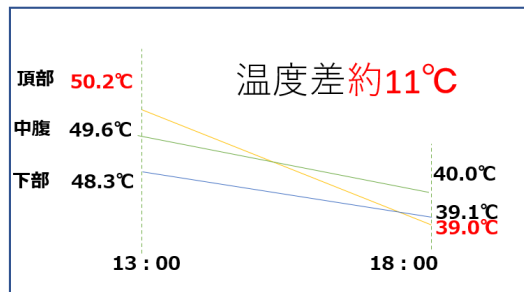


図7-4 表面温度の変化

また、図7-5のように同じ日に撮影しても違う位置から同じ部分を撮影しても温度が異なる結果となった。これは法面が円弧を描いており、法面に対して正面から撮影できていないことと撮影距離が異なるため、温度が分散したことが原因と考えられる。

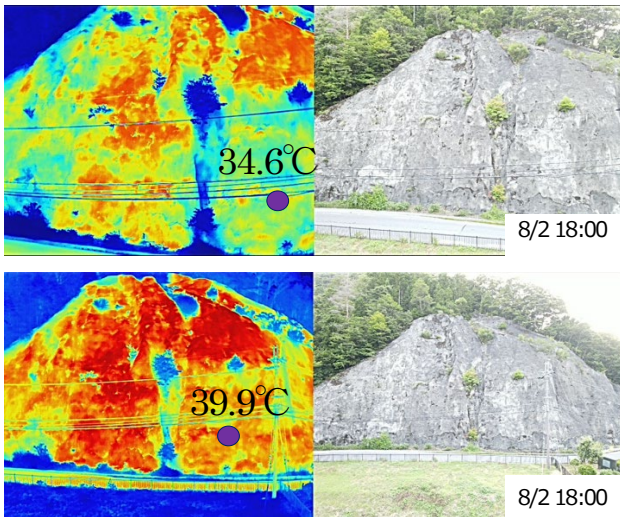


図7-5 撮影角度の差による表面温度の変化

図7の法面以外にも違う法面で数か所の撮影を実施した。しかし、影部があったため、想定したような温度差が検出されなかったり、背面に樹木があり角度のついた位置からでないと撮影できず、正確な温度検出ができなかった。

5. 立命館大学と共同実験

試行結果を踏まえて、赤外線ドローンの撮影による法面点検で、より良い成果を出すためにはより好ましい条件で撮影する必要がある。上記の法面点検の結果では精度について不明であり、さらに最適条件を探し出すための実験のノウハウを持っていなかったため、立命館大学総合科学技術研究機構に相談し、共同研究を行うこととした。

試行による状況からどのような実験が必要で、背面が空洞化したモルタル吹付法面をどのように再現するか、また、2時刻調査する上で、気温、時間、角度、距離など様々な条件をどのように設定するかなど、度重なる協議の結果、下記のような実験を行うこととした。

図8-1のように厚さの異なる(厚さ20,70mm)50cm×50cmのモルタル板を用意した。背面には空洞を見立てた発泡スチロールの周りを土砂で箱詰めした装置と空洞がない装置を用意し、架台に乗せて条件を変えながら撮影を行った。条件としては、図8-2のように撮影距離を1m, 2m, 5mとし、法面法線からのずれを0°, 30°, 45°, 60°とし、時間帯を13時と17時として調査を行った。この実験によりどれぐらい温度差が生じた場合に異常とするか、どこまでの範囲が許容な条件となるか等について調べることを目的とした。

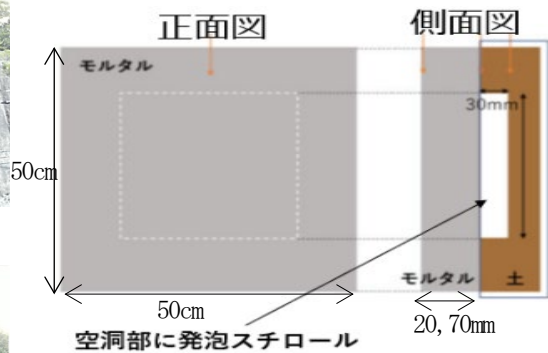


図8-1 実験モデル

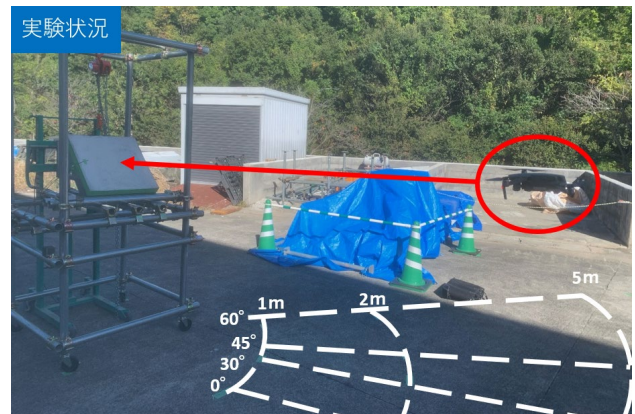


図8-2 実験風景

図9-1は13時の距離2m, 角度0°, 厚さ70mm, 空洞部あり, 図9-2は空洞部なしで撮影した結果である。図9-1の空洞部ありは中心部の方が温度が高くなっており、端部は中心部より温度が低くなっている。空洞部は温度が高温になりやすいという、「熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル」での既往報告と同様の傾向を確認することができた。しかし、温度差が出ないはずの図9-2の空洞無しにおいても、同じ傾向が見られた。よって、外気温により端部が冷やされ、温度が下がった可能性も考えられる。この結果を踏まえて今後は、端部から温度が低下しないような工夫を検討することや端部の結果は棄却し、中心部のみの結果を採用するなど、どのように実験を進めていくか検討が必要となる。また、固定式赤外線カメラと比較して、様々な角度から撮影できるが、同じ箇所でも撮影方向によって温度が異なるため、棄却の判断が難しいといった課題も出てきたことから、大学と議論を重ねて精度を高めていく。

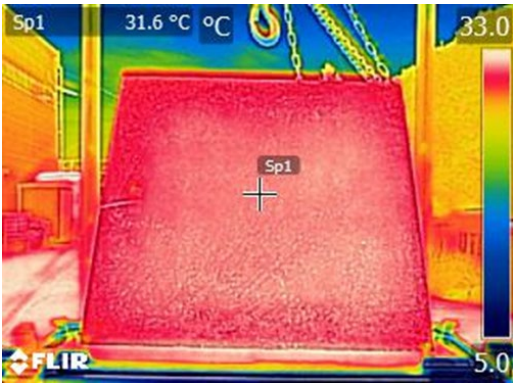


図9-1 実験結果 空洞部あり 厚さ70mm

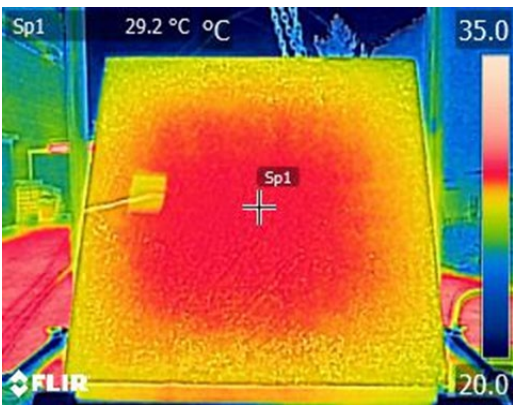


図9-2 実験結果 空洞部なし 厚さ70mm

6. 今後の展望

立命館大学総合科学技術研究機構との共同研究の結果から最適な時間、角度、距離、季節等の条件を見つけ出し、撮影マニュアルの策定を行う。そのためには、空洞箇所が確認済みの場所で調査を行うことで、どこまで正しい精度で撮影結果が表示されているかを検証していく必要がある。実験と検証を繰り返しながら徐々に精度を高めていき、赤外線ドローンによる点検手法の確立を目指していきたい。

また、赤外線ドローンによる点検手法が確立された場合の位置づけとしては、劣化が進行していると判断された箇所や災害によるモルタルの剥落等が発生した箇所において異常箇所の範囲を特定し、打音検査などの詳細調査を実施するためのスクリーニングに活用していきたい。

そして、今後、特定道路土工構造物の点検が実施されるようになった場合でも、特定道路土工構造物以外の法面（おおむね15m未満）は直営点検となる可能性もあるため、その場合に活用できると考えており、早期の実用化に向けて撮影時の最適条件や精度の向上を検証していく。

7. 参考文献

- 1) 熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル 平成8年1月建設省土木研究所