

吹付法面劣化判定調査法の簡素化に向けて

(株) 地建防災 国際会員 ○浅野憲雄
小田鐵網株式会社 権田直己
(株) テイコク・テクノ 鈴木 真
中部大学工学部 伊藤 睦
岐阜大学工学部 国際会員 沢田和秀

1. はじめに

山地が支配的な我が国の道路は、切土・盛土を介して構築されていることが多く、そこには多種多様な道路付帯構造物が必要である。ここで、多くの山間道路は交通量・重要度などの条件もあり、耐用年数を超え劣化が進んだ施設が存在している。特に、切土法面保護工としての「吹付法面工」は、定期的な目視観察から概略の劣化判定を行い、時には吹付材の剝離・落下事故などが生じてから補修が実施されることもある¹⁾。一般的に吹付工の健全度（劣化）判定調査は、吹付工全面の打音検査を主体として実施されるが、専門技術者不足や調査時の仮設費、通行規制などの諸条件から実施しにくい状況が続いている。

本研究は、吹付法面工の現状を把握するために行う打音検査を簡略化・効率化する手法を検討し、日常的に吹付法面の劣化などを専門技術者以外でも判定できるようにする目的で実施した。

2. 研究内容

山間道路に敷設してある「切土法面吹付工」の健全度評価手法は、日常的な道路点検の観察で変状が確認された場合、打音検査主体の詳細判定調査を実施している。近年は、UAV 積載サーモカメラなどを用いて、法面表面温度分布を測定し劣化範囲の特定も行われるようになった。つまり、打音検査・温度測定などは切土全体の健全度判定ではなく、吹付法面表面の劣化範囲を判定しているのが現状である。

切土法面吹付工における法面劣化判定では、専門技術者による「打音検査」によって、吹付工劣化と背面地盤状況などを把握している。ところで、建設関係を取り巻く状況として、打音検査判定ができる専門技術者の不足があり吹付工判定を計画的に実施することが困難で、専門技術者育成にも時間が掛かる。このような背景から、吹付工劣化判定が一般技術者でも継続的に可能となる指標作成が望まれている。

本研究では、地形・地質的に異なる既設吹付工において簡易な打音検査を実施し、打音を録音・分析し、周波数特性などから劣化判定が可能かを検討する。また、吹付工の材料的劣化特性などを把握する目的で、吹付工供試体を作成し室内実験も実施する。さらに、サーモカメラを用いた吹付面温度測定（温度差）を行い、壁面の温度差と吹付工・背面地盤の劣化など、現地調査箇所の諸条件等との関係について検討する。

3. 研究方法

本研究では、一般的に用いられる打音検査法にて、吹付法面の劣化状況判定を行うとともに同等な吹付工部材を用いた室内実験を行い比較することで打音特性を把握する。打音検査では、打音を簡易録音機器で録音し、音波分析ソフトで解析する、容易に利用できる検査法構築を目指した²⁾。また、吹付法面調査箇所において、背後地盤からの浸透水による特徴的な変状が観察される箇所で、UAV 積載型サーモカメラを用いた法面温度変化などの観測も行い、打音検査結果と比較することで温度測定の有効性を把握した。

For the simplification of the shotcrete slope deterioration judgment investigation method:
Norio ASANO (Chickenbousai), Naomi GONDA (Odatetumou), Makoto SUZUKI (Teikoku techno),
Atsushi ITOH (Chubu-University), Kazuhide SAWADA (Gifu-University)

3-1. 原位置実験方法概要

今回の研究は、山間道路吹付法面の健全度・劣化度を判定するのに用いられる「打音検査」を基本として、研究対象法面で打音検査を実施し打音を録音・分析する。同箇所において、サーモカメラによる表面温度を日照時間変化（壁面温度変化）も考慮し2回に分けて行い表面温度差を分析する。

3-1-1. 主要使用機器

- テストハンマー（250g）
- ボイスレコーダー（ピンマイク付き）
- サーモカメラ（UAV 積載型）
- その他補助機器：ハンマー、シュミットハンマー、測量機器、カメラなど

3-1-2. 既存吹付工箇所打音検査方法

- 調査対象箇所は、供用中の道路法面であるため、調査内容が制限されるが、施設補修計画・検討されている箇所を選出した。調査箇所での補修工事に伴い、確認調査を行う計画となっている。
- 本報告の吹付法面打撃検査は、吹付工の特性を簡便に判定できるか試行するため、仮設工なしで路面より1～2mの高さの範囲を2m程度の間隔をあけて打撃調査する。
- 法面打撃は、周辺の騒音なども考慮し、1箇所当たり10回程度を連続打撃・録音する。
- 打撃音から、一般的に判定される打音高低・音量などから法面の状態を以下のように区分した。
良好箇所・・・＜B＞、やや良好・やや不良・・・＜Y＞、不良箇所・・・＜R＞

3-2. 実験室打音実験

劣化が進んだ現地法面工の打音特性と比較する目的で、室内実験用に新規で作成した供試体を利用して、新鮮な吹付材料の打音特性を把握する。

3-2-1. 供試体条件

- 供試体寸法・・・45cm角で吹付層厚 $t=5, 10, 15\text{cm}$ の3種類
- 供試体作成時の注意点
 - ✓ 供試体は、作成前に現地と同じように型枠内にラスを敷設する。
 - ✓ 供試体は、型枠を作成しその内部に吹き付けて作成する。その際、型枠を切土面に配置し、通常の吹付作業と同様の条件で吹付し作成する。

3-2-2. 室内打音検査

- 打音検査手順は、基本的に現地検査と同様とする。
- 打音検査法・・・供試体を6分割し1供試体で6箇所の打音を収録。打撃は、1箇所当たり5回。
- 供試体条件
 - ✓ クラック条件・・・クラックなし、1本クラック、十字クラックの3種類
(供試体クラックは、供試体を曲げ載荷試験により発生させた.)
 - ✓ 背後地盤条件・・・コンクリート床盤上・砂盤上・供試体下方に空洞を設けた空洞上の3条件

3-3. 打音解析について

- 打音解析は、誰もが入手し易く、扱いが容易な音波分析フリーソフトを活用する。
- ノイズ処理については、波形を観察し、極端なノイズと判定された部分だけを除去する。
- 打音解析は、録音した打音を高速フーリエ解析（FFT 解析）で卓越周波数や打音構成周波数などを把握する。
- 打音解析では、録音された5～10回程度の打撃音をフーリエ解析1回分とする。これは、複数の記録内にある「偶然誤差・ノイズ」を重ね合わせることで低減する目的もある。

3-4. 吹付工表面温度計測

劣化状態の異なる吹付法面で、UAV 積載型サーモカメラにて法面表面の温度特性を測定する。法面表面温度は、季節・天候・法面の向きなどによって一様ではないため、対象法面における温度変化（温度差）を計測する^{3), 4)}。計測法としては、季節に関わらず昼間と比較対象となる「朝方」もしくは「夕方」に撮影することで、壁面温度差を把握できるように計測する。比較のため、手動式サーモカメラでも撮影した。

サーモカメラは、以下の性能の機器を使用した。

< UAV 積載型仕様 >

温度測定範囲：-25～135℃

温度分解能：50mK @ f/1.0 以下

解像度：640×512 ピクセル

サイズ/重量：103×74×102mm/270g

< 手動式仕様 >

温度測定範囲：-40～2,000℃

温度分解能：0.035℃（30℃の場合）

解像度：640×480 ピクセル

サイズ/重量：143×196×94mm/1.3kg

4. 実験結果

4-1. 現地法面打音検査結果

本研究では、岐阜県中～西部地域で劣化の進んだ「コンクリート吹付法面」を抽出し、テストハンマーを用いた打音検査を3箇所で行った。調査箇所の地質は、岐阜県で広い分布域を示す「中古生界の美濃帯」と、同様に広い分布域を有する「濃飛流紋岩類」を基盤としている。各箇所の現地踏査から判定した背面地質の劣化状況と打音検査結果から、箇所ごとの背面地質と平均打音分布を図-1に示す。

図-1は、横軸にFFT解析で得られた周波数を取り、縦軸にソフトの最大音量を「0」として、録音した音を最大値と比較した結果を音圧（dB）で表している。各実験箇所の平均打音検査結果から、周波数1,000Hz付近を境に音圧～周波数分布に違いが見て取れる。

今回の現地実験では、打音特性と背面地盤特性を把握する目的で、予め現地踏査等から法面劣化状況、背後地盤の岩質・風化程度などが異なる法面を抽出し簡易的打音検査を実施した。図-1より、1,000Hz以上の周波数域では、吹付工の特性（部材厚・劣化程度）に関わらず同様な音圧～周波数分布特性を示しているため、吹付材料特有の音圧～周波数特性と考えられる。1,000Hz以下の周波域は、吹付工劣化や背後地盤特性によって低周波域打音の減衰傾向に差異が生じたと考えられる⁵⁾。

図-2～5は、対象法面の端から打音検査箇所番号を付け検査箇所ごとに解析し、その検査箇所番号を図右に示している。各図より、1,000Hz程度を境界にして音圧～周波数特性が異なっている。特に、100Hz付近を中心として音圧分布に大きなバラツキが生じており、吹付工・背後地盤特性によって打音の卓越する周波数帯や音圧の減衰傾向（減衰開始周波数・減衰割合）が異なっている。

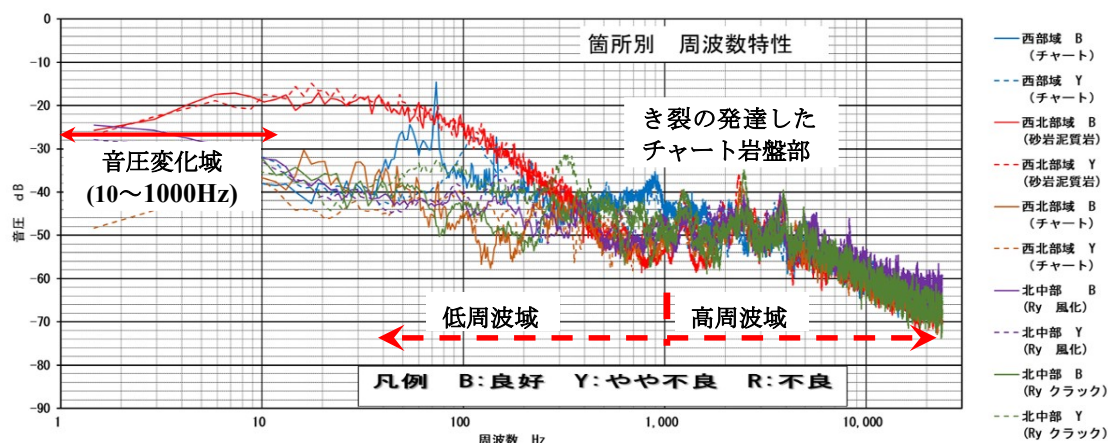


図-1 調査箇所ごとの平均打音分析結果

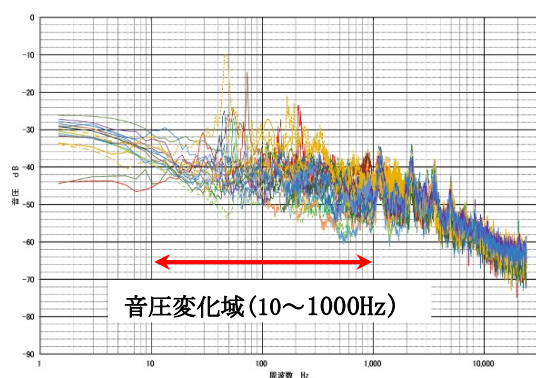


図-2 西部域吹付法面打音検査結果（基盤：チャート）

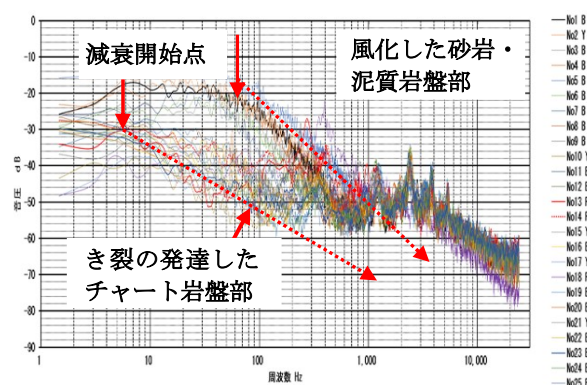


図-3 西北部域吹付法面打音検査結果
（基盤：チャート、砂岩・泥質岩互層）

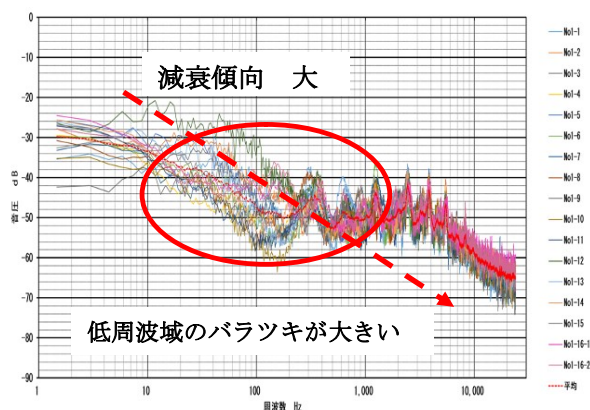


図-4 北中部域 吹付法面打音検査結果
（滑走斜面・基盤：風化流紋岩）

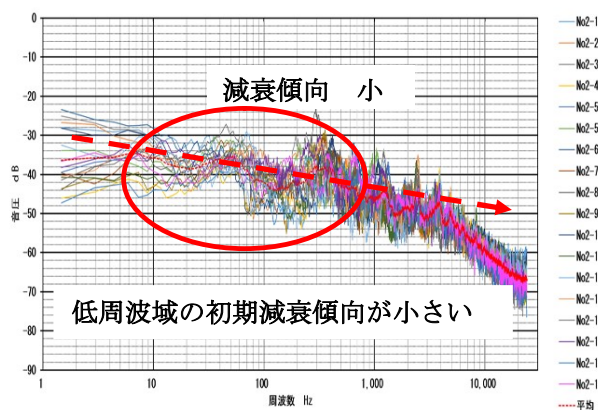


図-5 北中部域 吹付法面打音検査結果
（攻撃斜面・基盤：き裂発達流紋岩）

ここで、図-3 に示されている法面は、現地踏査等から吹付面内で背後地質の違いが判明しており、吹付工背後地質状況（岩質・風化程度）によって低周波部の減衰傾向・周波数分布形態が異なることが判明した。同様に図-4、5 は、小尾根を挟む吹付法面であり、基盤岩類としては同質だが前者は河川に対し「滑走斜面」で、後者は「攻撃斜面」を呈している。つまり、現地踏査より滑走斜面部は全体的に風化が進んだ岩盤が吹付面背後に残存し、攻撃斜面部は軟質な部分が除去され硬質岩盤に吹付工が施工されたと判定できる。ただし、攻撃斜面部は、断層活動によって基盤が破碎され、クラックの発達した岩盤となっていた。

両箇所の打音検査結果より、背後地盤の風化・劣化特性が打音の低周波域減衰特性に差を生じさせている。つまり、背後地盤が硬質である場合、き裂の有無を別にして打音の低周波域減衰傾向が小さい。それに対し、背後地盤が風化変質（軟質化・土砂化）している場合は、低周波域の減衰傾向が大きい。以上のことから、吹付工での打音検査から得られる低周波域の音圧変化が、吹付材の劣化特性より背後地盤の劣化特性に強く影響されたと考えられる。

図-6 は、打音分析の結果として低周波域が吹付工や背後地盤の劣化に関与すると考えられるため、この部分の音圧特性を求めてみた。図-6 では、岐阜県西部域で「良好～やや良好」と「不良」と判定された箇所における打音検査結果を分析した後、同解析打音範囲に発生しているノイズを分析し、分析周波数ごとに打音から差し引く処理を行った。結果として、50～1,000Hz 間の周波数帯で打音圧量の大小为観察できる。この結果と打音を比較すると、法面劣化が大きい箇所では全打音量に占める当範囲（低周波域：図-6 で黄色に着色した部分）の音圧割合が大きいことが判定され、吹付面劣化判定の指標となると考えられる。このような法面変状を示す周波数域についての分析法を確立すれば、数値的に劣化程度を表現できる可能性がある（図-6 の No1 地点は判定ミスしている可能性がでてきた）。

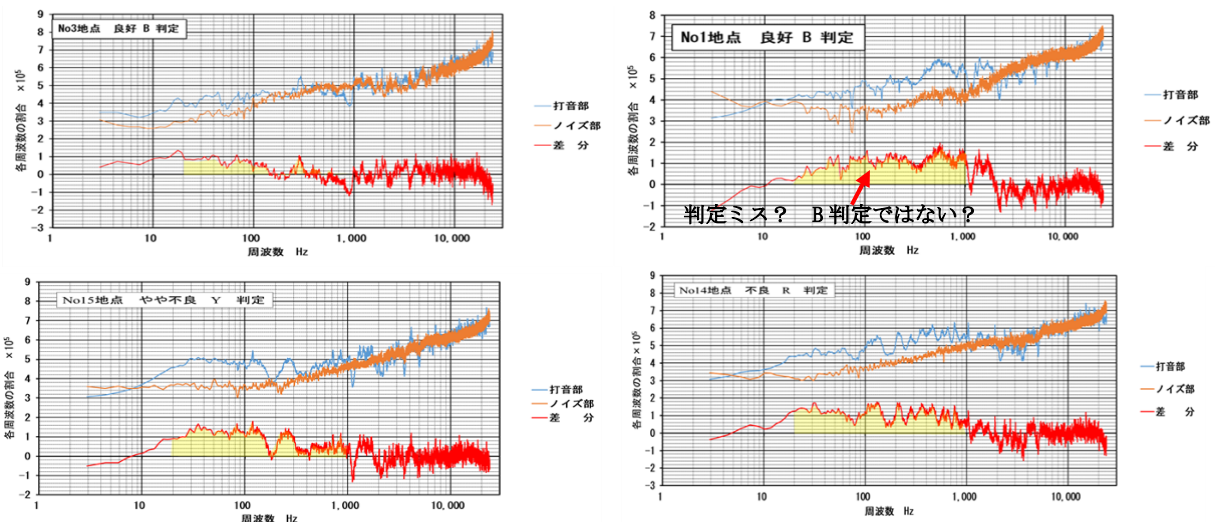


図-6 打音とノイズとの差分表示

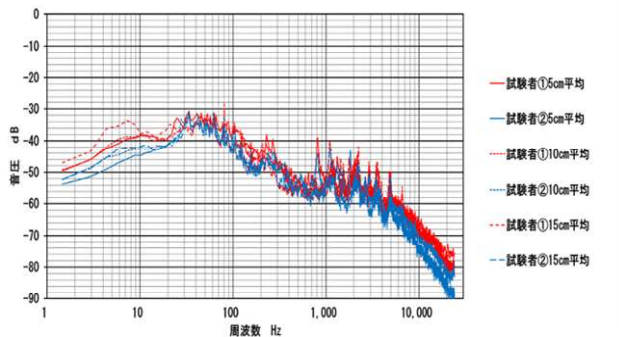


図-7 供試体厚さと打撃個人差関連図

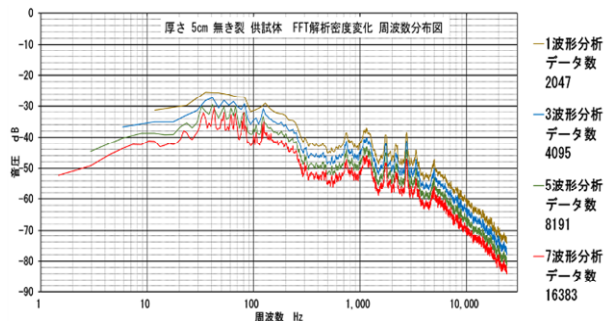


図-8 周波数分析密度に評価図

4-2. 室内供試体打音検査結果

ここでは、既設吹付法面における打音検査結果と、打音特性を比較検討する目的で室内実験用供試体を作成し打音検査を実施した。室内実験では、「3.研究方法」に示した条件で打音検査を実施した。

4-2-1. 事前実験

現地実験を実施するに先立ち、打音検査時の個人差・供試体厚さや、打音の分析密度などの検査条件について検討した。図-7 は、検査者・供試体厚さを変えて打音検査を行った結果である。図-7 より、30Hz 以下の低周波部に多少の差異が見受けられるが、この部分の大半は人の可聴域外である。また、供試体厚さによる差異は、個人差による打撃強さで生じる音圧差（5dB 程度）であり、供試体の状態（作製から実施までの条件）に差がないため周波数分析的には差異が認められないと言える。

打音の周波数分析を行うにあたり、吹付面でのクラック状況や材料が有する固有振動などを把握するために微小な変化を見いだす必要があると考え、FFT 解析の結果に影響するデータ数、つまり何回分の打撃音を解析するかについて調査した。結果として、図-8 より、打音の分析には、5 打撃分の波形から得られる 8,191 個以上のデータ数を解析すると低周波域の変化と高周波域の固有振動・共振などが確認できること判明した。よって、以降の分析では、この条件を考慮し「5 打撃分の波形から得られる 8,191 個以上」で行うこととした。同様に、現地の打音検査分析についても同様な手法を採用した。

図-9 は、打音検査に用いるハンマー種類が異なるとどのような周波数特性を示すかを把握するために、同一供試体を異なるハンマー等で打撃した結果である。図-9 より、軽量で打撃力が小さい「ネイルパンチ」以外は概ね同様な周波数特性を示すことが判明した。このため、ハンマーの種類を変えてもほぼ同様な結果が得られることが判明したことから、以降は打音テストハンマーを利用した。

4-2-2. 室内打音検査

室内打音実験では、現地地盤・壁面クラックをモデル化した供試体で、一連の打音検査を実施した。

図-10 に、「供試体厚さと背後地盤条件」を変化させた実験結果を示す。図-10 より、現場実験と同様に 1,000Hz 以上の周波数域で吹付工厚さ（ $t=5, 10, 15\text{cm}$ ）に関わらず、ほぼ同じような音圧～周波数特性を示しており、部材の固有周波数と共振周波数（一部、実験室内のノイズである）と考えられる。1,000Hz 以下の低周波域では、所々に周辺ノイズによる局所的な特異点が見受けられるが、徐々に低周波域となると「バラツキ」が大きくなる傾向にある⁵⁾。ただし、吹付工の背後が空洞の供試体打音は、背後地盤条件に関わらず収束しているように見える。

図-11 は、同厚の供試体に 2 種類のクラックを発生させ、背面地盤条件を変えて打音検査を実施した結果である。図-11 より、全体として 100~500Hz でバラツキが生じているが、背面地盤条件が「空洞」の場合、200Hz 付近で分布に変化がある。また、1 本クラックと十字クラックを比較すると、1 本クラックの場合は全体的に低周波域の減衰が少なく、クラック量と低周波域の減衰傾向に関連があると想定できる。

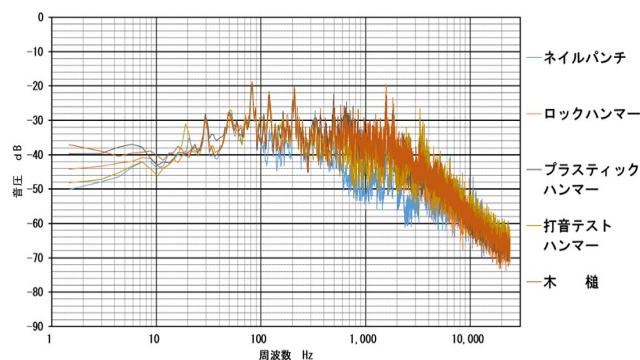


図-9 打撃ハンマー種類による打音特性変化

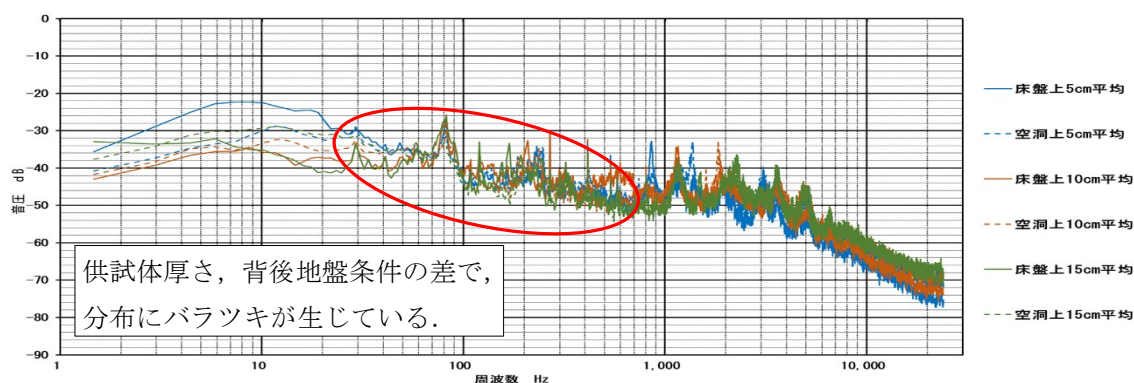


図-10 供試体厚さと背後地盤条件を変えて実施した打音検査結果

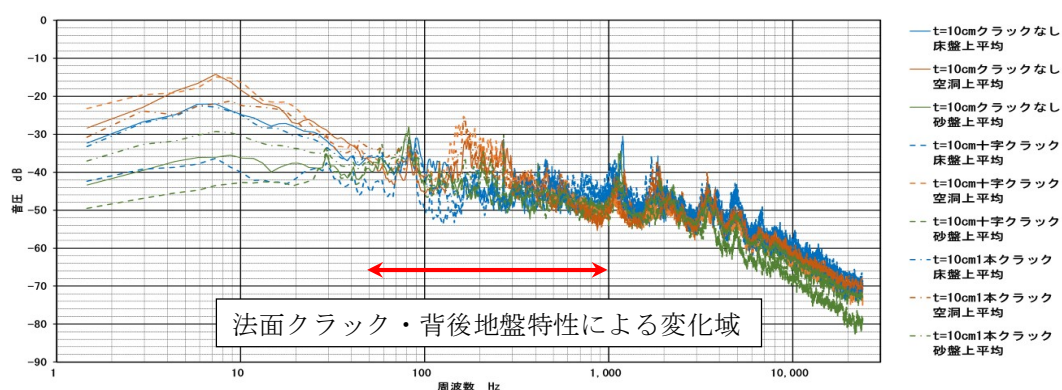


図-11 供試体厚さ～クラック状況・背面条件を変えて実施した打音検査結果

4-2-3. 室内打音検査の利用

今回の室内実験結果は、現地実験結果から得られた高周波域特性と類似した卓越周波数・共振周波数が得られている。つまり、図-1～5 と図-10, 11 から供試体厚さ・劣化度に関わらず、室内実験・現地実験ともに

約 1,000～1,100Hz を起点とした卓越周波数が観察される。その後、ほぼ定期的に共振と考えられる卓越周波数が観察されことから、約 1,000Hz 以上の音域特性は吹付材料特性として考えられる。よって、現地実験による検討は、吹付面と背後地盤の特性を評価できる「約 1,000Hz 以下の低周波域」について分析を行った。

4-3. 吹付工表面温度計測

今回の研究では、「西部域」、「北西部域」の 2 箇所では劣化吹付法面をサーモカメラ（UAV 積載型）によって、吹付表面の温度差について計測した。今回の研究では、一般的に実施されている吹付法面温度測定とは異なり、気温変化と法面表面の温度差を測定し、法面背後地盤の特性との関連を把握する手法として採用できるかを検討した。図-12、13 は、2 箇所の午前・正午付近の温度差測定を実施した結果である。図では、暖色は温度差（温度変化）が大きく、寒色は温度差が小さい。

図-12 より、対象斜面では破碎帯に沿った帯状部分と、派生した小劣化区域において温度差が大きく吹付工の劣化も進んでいた。ただし、現地は南西斜面を呈し、撮影は晩秋～初冬にかけて行ったものである。このため、現地の気温上昇もあまり小さくなく、背面の浸透水からの温度変化影響も少ない条件であった。

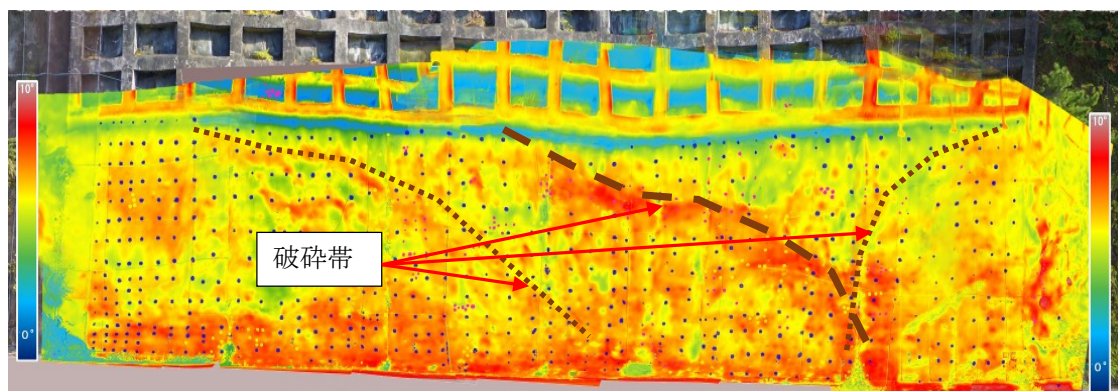


図-12 西部域吹付法面表面温度差分布状況（図中の赤点は不良箇所）

図-13 は、直射日光の影響を小さくするために北面する法面を選択した結果で、全体的に温度変化が小さかった。ただし、法面内の破碎帯付近では、やや温度差が大きく壁面劣化が大きい状況であった。また、区域左には湧水が観察されており、温度差がない状態であった。

以上の結果から、吹付法面の温度差を測定することで、法面背面の地盤状況を想定することは可能と考えられる。しかしながら、どのような地質状況でどのような温度差が生じるかを、季節・日照条件など種々の条件を設定し、継続的に調査し分析する必要がある。

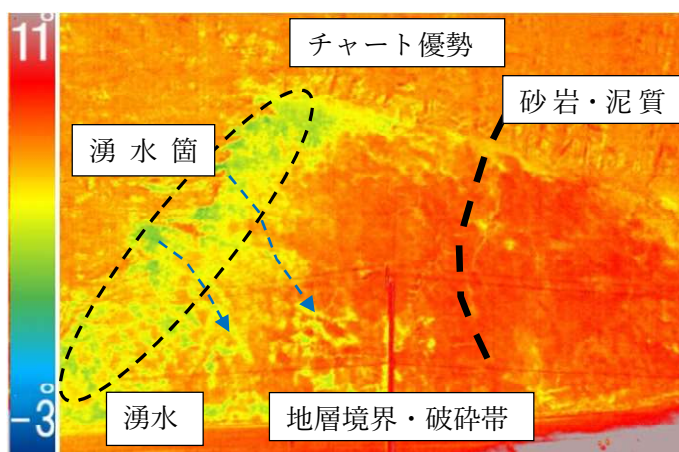


図-13 北西部域吹付法面表面温度差分布状況

5. 吹付法面の劣化判定手法の検討

今回の研究から、吹付法面の劣化基準を見いだすことで、対象施設の劣化状況・対策検討などに資することが可能となれば、施設維持の効率化が容易になると考えた。今回の研究から以下のことが判明した。

- ① 打音検査を録音し分析すると、吹付工の劣化と背面地盤の特性として 50～1,000Hz の周波数分布帯と

音圧の関係を検討することで、概略ではあるが変状を捕らえることができた（前出図-2～5 参照）。

- ② 室内打音検査では、検査条件を変えて実験した結果、周波数特性の分散など明確ではないが、部材の劣化と背面地盤特性を確認することができた。
- ③ 現地打音検査結果より、図-3、4 に示すような音圧減衰開始周波数や減衰率（勾配）などは、局所的な吹付工劣化や背面地盤特性を示す指標となる可能性がある。現地では、観察による背面地盤の風化程度と湧水状況などの違いによって音圧分布が変化していることが判明した。
- ④ 以上の結果を総括すると、打音の低周波部分の音圧・減衰率から、吹付工表面の劣化原因となる背面状態が判定する目安となると考えられる。つまり、周波数 50～1,000Hz の減衰率が周辺箇所より大きいと背後岩盤の風化が進んでおり、切土法面全体に抜本的な法面補強が必要となる。

6. まとめ

今回の研究では、当該地方に広範囲な分布域を占める「付加帯（美濃帯）」と代表的な火山岩類である「流紋岩類」分布域の吹付法面を対象とした。現在の道路付帯構造物点検は、定期的に変状把握が実施されることになっているが、小規模や重要度の低い施設は点検頻度も少なく変状が生じていても無対策であることが多く、道路施設の安全性確保として問題となっている。このことから、今回の研究対象である吹付法面工等は、簡易な劣化判定手法を確立することが重要である。

今回の研究結果として、先に述べた音圧～周波数特性・法面温度測定結果から、打音・温度測定の簡易法が点検手法として利用可能と考えられる。ただし、今回対象の吹付法面は、調査後の確認のため、ある程度背後地盤の特性が把握可能な箇所、かつ対策を講じる計画があり追跡調査ができる箇所を抽出した。そのため、種々の法面変状箇所や基盤の風化特性・背後地盤の浸透特性など幅広い諸条件を考慮して現地調査を継続する必要がある。調査箇所選定条件として、以下のような条件が考えられる。

- ① 周辺環境条件として、気象条件や地形・地質条件が異なる箇所を選択するように検討する。
- ② 選定箇所における吹付法面温度と気温・日照時間変化を予測し、環境条件とする。
- ③ 地形・地質条件等が同じであっても、吹付面劣化状況が異なる施設を劣化要因の判定条件とする。
- ④ 古い吹付法面には、吹付層厚が極端に薄い施設があるが、施設の機能を残している箇所がある。これは、吹付面と背後地盤の安定性を把握できる要因であり、地盤特性として選定条件とする。
- ⑤ サーモカメラによる劣化吹付面の温度差分布解析から、現状においても吹付面背後の状況を類推することが可能と考えられるが、異なる条件下での継続的な調査が必要と考える。

謝辞：今回の研究を行うに当たり、岐阜県県土整備部揖斐土木事務所を始めとする道路管理担当部署の協力を得て、施設維持を必要とする吹付法面にて調査を実施することができた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省(2017)：道路局:道路構造物点検要領。
- 2) 金森正樹・飯坂武雄・菊川浩治・梅原秀哲(2001)：コンクリートの打音による健全性の評価について、コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.601-606。
- 3) 的羽正樹・西岡高尚・南部啓太(2008)：長大吹付け法面の老朽化に伴う健全度調査と評価，土木学会第63回年次学術講演会，pp.197-198。
- 4) 建設省土木研究所(2008)：熱赤外線映像法による吹付法面老朽化診断マニュアル。
- 5) 一富哲也・玉井宏樹・園田佳巨(2010)：コンクリートの強度が打音特性と表面振動に与える影響に関する基礎的研究，土木学会西部支部研究発表会，pp.15-16。