

# 論文 吹付コンクリート法面の無人打音点検装置の開発

小石 明\*1・伊東 修\*2・森 和也\*3

**要旨:** 老朽化した吹付コンクリート法面の安定性や耐久性を的確に評価するために、法面点検を実施している。一般的な法面点検は、作業者が高所ロープワークにて実施しているが、転落の危険が伴う為、安全な点検技術が望まれる。また、法面崩壊の主な原因である背面空洞を調査するための打音検査は、作業者がテストハンマーで行っており、機械的に実行できる方法が求められる。そこで、斜面を自在に移動し、遠隔操作で自動打撃装置によりテストハンマーと同等の打音検査を行うことができ、Moving Base 方式 RTK-GNSS により位置情報を正確に得ることのできる無人打音点検装置を開発した。

**キーワード:** 老朽化吹付コンクリート法面, 空洞調査, 自動打撃, 遠隔点検, Moving Base 方式 RTK-GNSS

## 1. はじめに

近年、豪雨災害等により、老朽化した吹付コンクリート法面の崩壊が発生している。吹付コンクリート法面崩壊は、背面空洞の存在が原因の一つと考えられ、これを確実に把握する為の安全な法面点検技術が求められている。ここで、吹付コンクリート法面損傷について図-1に概略を示す。このうち、傾動、目地ずれ、開口、クラック、剥離等は目視点検で調査可能である。一方、背面空洞は物理探査手法により調査する方法等<sup>2)</sup>も考案されているが、現状では打音調査を行うことが一般的である。

ここで、一般的な法面点検方法について簡単に説明する。まず、法面表面を清掃後、適切な間隔で格子状にロープを設置する。この格子を位置情報の手がかりとする。その後、作業者が法面上部からロープワークにて降下し、目視による傾動・目地ずれ・開口・クラック・剥離の調査や、背面空洞の有無を点検するための打音調査を実施する(図-2)。

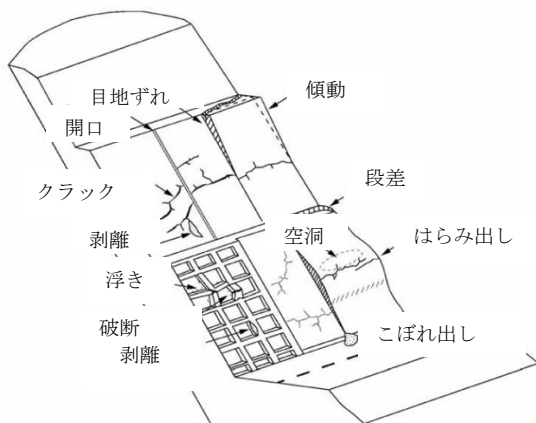


図-1 法面損傷例

打音調査は、点検用ハンマーで斜面を打撃することで、打音により背面空洞の有無を聴覚により識別し、ロープで形成された格子により特定される位置情報と合わせて、法面の健全度を感覚的に判定する。また、必要に応じてコア抜き調査を行い、吹付コンクリートや背面空洞の状態を確認する。これらの調査方法では作業者が転落する危険にさらされるので、安全上好ましくない。また、打音検査結果の判断も、作業者の経験に頼るところが大きい。従って、機械化し、無人点検作業とすることが望ましい。さらに、格子状ロープによる位置情報把握は設置工数がかかる上、精度も期待できないので、低コストで正確な位置把握についても併せて検討することとした。

## 2. 装置概要

### 2.1 装置仕様

前述の要望に応えるため、斜面を自由に移動し、遠隔操作で打音検査を行うことができる無人打音点検装置を開発した。無人打音点検装置としては、外部電源を使用しないで打音検査を行うタイプの点検装置<sup>3)</sup>が開発されているが、上下方向のみの移動に制限されている。



図-2 打音点検状況

\*1 熊本大学 大学院先端科学研究部 (学生会員)

\*2 株式会社テクノコンサルタント 西日本ロボットドローンセンター

\*3 熊本大学 大学院先端科学研究部 教授

よって、法面を自在に移動し、任意の位置で打音検査を実施できる装置を開発することにした。

点検装置開発の目標は、小型軽量（機体重量は 10 kg を超えないこと）、簡単な構造であること、精密な位置情報を得られること、手動打撃と同様の打音検査を遠隔で行えること、傾斜角 60° の法面を自在に移動できること、簡単に素早く設置できることとした。図-3 に点検装置概要を示す。

## 2.2 接地力

車輪の接地力について検討を行った（図-4）。製作した点検装置を計測したところ、重心高さ  $h_0=0.126\text{ m}$ 、吊り高さ  $h_1=0.08\text{ m}$ 、ホイールベース  $L_0=0.5\text{ m}$ 、重心までの距離  $L_1=0.33\text{ m}$ 、装置重量  $m=8.1\text{ kg}$  であった。なお、 $g$  は重力加速度、 $T$  はロープ張力、 $R_0$  は後軸反力、 $R_1$  は前軸反力である。斜面上の装置に関する運動方程式は式(1)、式(2)となった。これらの式より計算した  $R_0$ 、 $R_1$  の計算値と、 $R_0$  の計測結果を図-5 に示す。なお、 $R_0$  は薄型計量器（DRITEC KS-374 軽量範囲：0~3kg）を後軸と斜面の間に挟んで斜面を傾斜させて計測した。

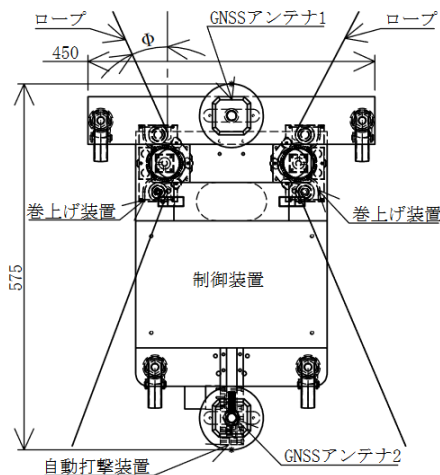


図-3 点検装置概要

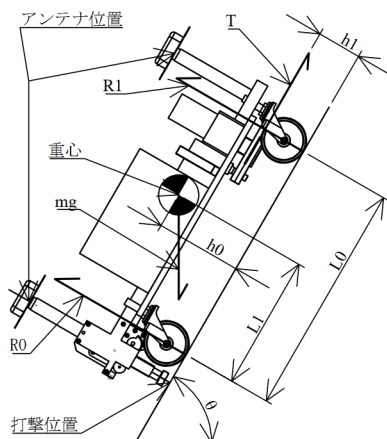


図-4 接地力の検討

$$R_0 = mg \left( \cos \theta - \frac{(h_1 \sin \theta + L_1 \cos \theta - h_0 \sin \theta)}{L_0} \right) \quad (1)$$

$$R_1 = mg \cos \theta - R_0 \quad (2)$$

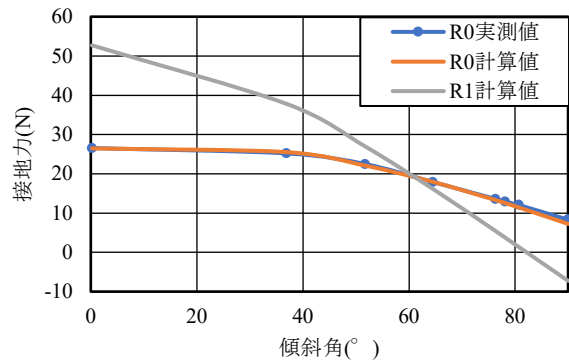


図-5 接地力と法面傾斜角の関係

傾斜角  $\theta=80^\circ$  までは前軸は接地力を有しており、法面表面から離れない。なお、重心高さ  $h_0$  と吊り高さ  $h_1$  を一致させると傾斜角  $\theta=90^\circ$  まで接地力を保持できる。

## 2.3 ロープ巻き上げ装置

移動に際しては、2本のロープを用いて昇降及び左右移動を行うが、ロープをドラムに巻き取る形式では乱巻き対策が必要となり、機構の複雑化を招き、装置重量の増加の恐れがあるため、シンプルな構造のロープ巻き上げ装置を検討した。

動力は減速比 1:150 のギアボックス付 DC モーター（12V、30W）を使用した。最大トルク  $T_{\max}=4.41\text{ Nm}$ 、回転数  $N=39.5\text{ rpm}$  であり、これに  $\phi 50\text{ mm}$  の特殊駆動輪が取り付けられている。最大牽引能力  $F_{\max}=176.4\text{ N}$ 、巻取り速度  $V_w=7.8\text{ m/min}$  である。

点検装置はこの巻き上げ装置を左右に2つ搭載しており、合計牽引力  $F_t=352.8\text{ N}$  となる。移動速度の計測値は傾斜角  $\theta=60^\circ$  斜面の登攀速度  $V_c=6.0\text{ m/min}$ 、水平速度  $V_H=12.6\text{ m/min}$  であった。最大登攀高さはロープ角度  $\phi$ （図-3）により決まるが、斜面傾斜角  $\theta=60^\circ$  では  $\phi=77^\circ$  にてロープ張力が最大牽引能力に達するため、それ以上の登攀はできない。なお、点検準備は点検対象の法面上部からロープを2本設置することで完了する。

## 2.4 自動打撃装置

自動打撃装置はモーター駆動であり、ばね定数  $k=320\text{ N/m}$  の圧縮ばねをラック&ピニオンにより縮量  $s=0.03\text{ m}$  圧縮させ、質量  $m=0.1\text{ kg}$  のハンマー（強度区分 4.8 低炭素鋼ボルト、M16 を加工）で打撃する。打撃頻度は 33 回 / min である。横向きでの打撃の場合、ハンマー打ち出し速度は式(3)で計算される。

$$v_0 = s \sqrt{\frac{k}{m}} = 0.03 \sqrt{\frac{320}{0.100}} = 1.69\text{ m/s} \quad (3)$$

本装置の打撃による力積は  $0.1 \text{ kg} \times 1.69 \text{ m/s} = 0.169 \text{ Ns}$  である。一方、作業者が行う一般的な打音検査では、 $0.113 \text{ kg}$  (1/4 ポンド) のテストハンマーを用いて、秒速  $1 \text{ m/s} \sim 2 \text{ m/s}$  で打撃する。従って、作業者による打撃の力積は  $0.1 \text{ kg} \times 1 \sim 2 \text{ m/s} = 0.1 \sim 0.2 \text{ Ns}$  程度であり、本装置による打撃は実際の点検作業の状況とよく一致する。

さて、本装置で用いたハンマーによる加振周波数の最大値  $f_{\max}$  は  $0.1 \text{ kg}$  の鋼球 (直径  $29 \text{ mm}$ ) の打撃と同等とすれば式(4)にて、

$$f_{\max} = \frac{291}{d} = \frac{291}{0.029} = 10.0 \text{ kHz} \quad (4)$$

と計算される<sup>4)</sup>。一方、たわみ振動の卓越周波数  $f_0$  は式(5)で計算される<sup>5)</sup>。検出対象とする法面空洞を短辺長  $a = 0.5 \text{ m}$  以上、長辺長  $b = 0.5 \text{ m}$  以上、コンクリート厚み  $h = 0.1 \text{ m}$  以下、ヤング率  $E = 22000 \text{ N/mm}^2$ 、密度  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$  と定義した場合、たわみ振動の卓越周波数  $f_0$  は  $2.0 \text{ kHz}$  以下と計算される。

$$f_0 = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \left( \frac{2.25}{a^2} + \frac{1.4}{b^2} \right) \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} h = 2.0 \text{ kHz} \quad (5)$$

周波数が離れているので、本装置を用いた打音検査により空洞部のたわみ振動音を検出可能である。

本装置を用いて法面を打撃したのち、集音センサー (SONY ECM-PC60 コンデンサマイクロホン, 指向特性: 全指向性, 周波数特性:  $50 \text{ Hz} \sim 15 \text{ kHz}$ , 正面感度:  $-38 \text{ dB} \pm 3.5 \text{ dB}$ ) にて集音する。打音解析は、装置に搭載したマイコンを用いて行う。

## 2.5 制御システム

機体制御装置はドローンに用いられるフライトコントローラーを転用した。ラジコン送信機からの信号により、2台のロープ巻取り装置をそれぞれ無段階制御することで、斜面上で精密な移動が可能となっている。



図-6 自動打撃装置

打撃装置は送信機からの信号によりリレーにて ON/OFF 制御されている。姿勢や位置などの機体状態の把握は、別途設置した Ground Control Station (以下 GCS) にて行う。GCS は機体状態や位置が把握できるソフトウェアである。GCS と機体の通信は MAVLink プロトコルを用いて行う<sup>9)</sup>。打撃時の位置情報把握と打音情報の取得は、ラジコン送信機から送信された打撃信号をトリガーとして、打撃位置の情報を別途作成した監視プログラムにて MAVLink 経由で読み取る。この情報と、打音解析より得られた空洞に関する情報を併せ、法面空洞分布に関する情報とする。

## 2.6 位置情報把握

位置情報把握は RTK-GNSS を使用した。RTK 基準局は近隣の公共機関が提供する無償の基準局を利用した。なお、GNSS 測量により得られる位置情報はアンテナ位置であり、打撃位置とは異なる (図-4)。このため、正確な打撃位置を算出するためには、アンテナ高さ、ピッチ、ロール、ヨー、方位角といった機体の姿勢を用いて制御装置にて補正を行う。姿勢情報は制御装置に内蔵されたジャイロセンサーや加速度センサーから得るが、方位角は周囲の磁気の影響を受けやすい磁気コンパスを利用するため誤差が大きく、精密な計測には不向きである。このため、2台の RTK-GNSS から得られる位置情報により精密に方位角を検出する Moving Base 方式とした<sup>9)</sup>。

## 3. 打音検査

### 3.1 実法面における打音検査

まず、実際の法面にて、手動打撃による打音検査を実施した。図-7 に打音検査法面の状況を示す。赤い点線で囲んだ部分 ( $0.5 \times 0.5 \text{ m}$ ) が空洞の存在が疑われる領域であり、他は空洞の無い健全領域である。打撃位置はそれぞれ X 点及び Y 点であり、水平距離で  $0.5 \text{ m}$  離隔している。なお、吹付コンクリートについての材齢、強度、厚みは不明である。空洞の有無については熟練作業者の助けを借りて、テストハンマーの打音により判断した。

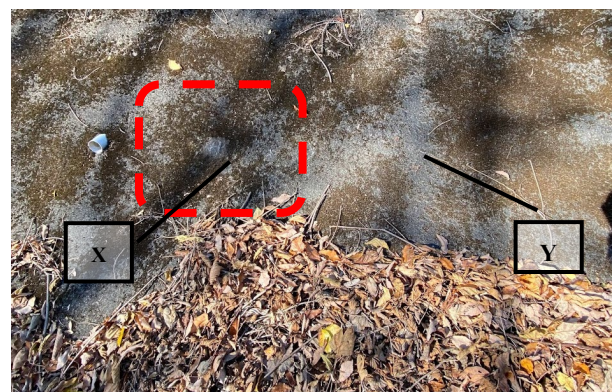


図-7 吹付コンクリート法面

### 3.2 手動打撃による打音

手動打撃には、テストハンマー（オーエッチ工業 TH-2：質量 100 g）を用い、比較としてプラハンマー（KTC K9-6：質量 450 g）を使用し打音検査を行った。打音は PC を用いてサンプリング周波数 12 kHz、サンプリング数 600 点、計測時間 50 ms にて収録し、FFT 解析を行った。なお、FFT 分解能は 20 Hz である。

図-8 にテストハンマーによる打音波形、図-9 に FFT 解析結果を示す。X 点打音では、2 kHz 以下に空洞部のたわみ振動音によると考えられるピークが Y 点よりも強く出現しており、これより空洞有無の判定ができると考えられる。

次に、プラハンマーにより打音検査を行った。図-10 に波形、図-11 に FFT 解析結果を示す。スペクトラムを比較すると、X 点打音の場合、テストハンマーによる打音と同様に 2 kHz 以下で大きなピークが出現している。

一方で、Y 点打音でも 2 kHz 以下で比較的大きなピークが出現していることがわかる。これはテストハンマーとプラハンマーの加振周波数特性の違いによる影響と考えられる。

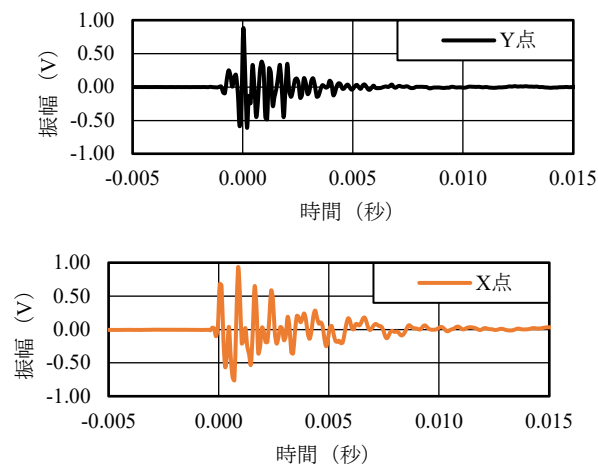


図-8 テストハンマーによる実法面打音波形

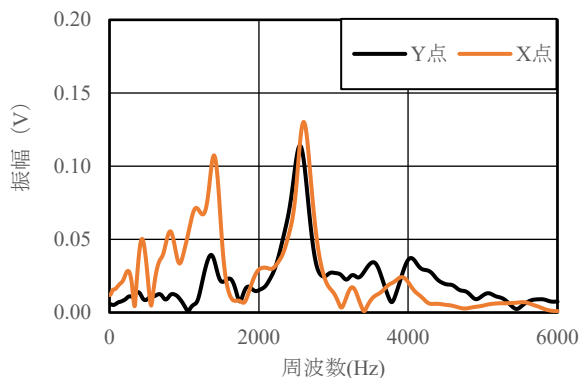


図-9 テストハンマーによる実法面打音比較

### 3.3 自動打撃装置による打音

自動打撃装置による打音波形を図-12 に、FFT 解析結果を図-13 に示す。X 点打音のスペクトラムでは、テストハンマー打音と同様の傾向を示しており、2 kHz 以下に打音のピークが Y 点打音のものよりも強く出現している。このピークにより空洞有無の判断ができると考えられる。

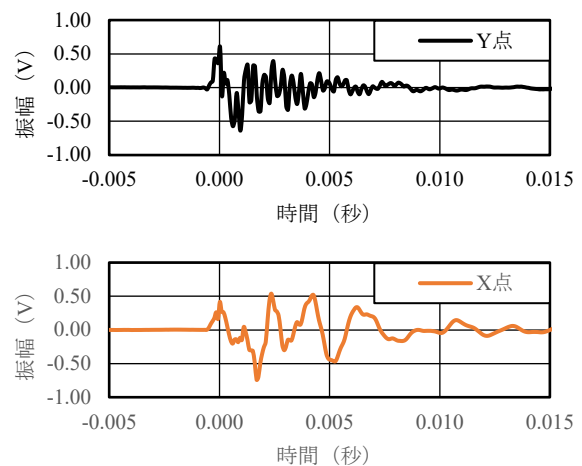


図-10 プラハンマーによる実法面打音波形

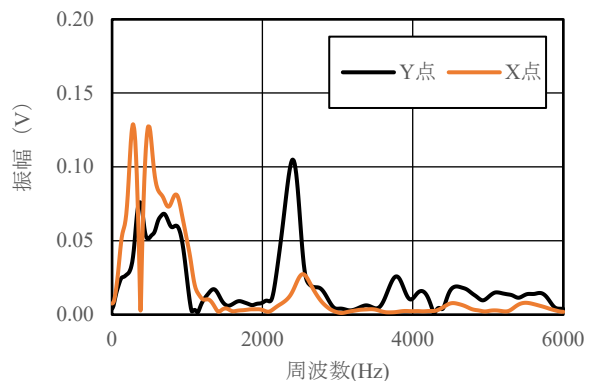


図-11 プラハンマーによる実法面打音比較

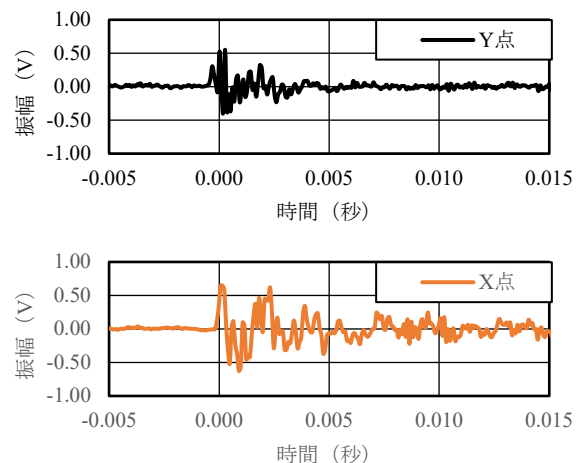


図-12 自動打撃装置による実法面打音波形

### 3.4 各ハンマーおよび自動打撃装置の加振特性

同一地点の打音スペクトラムの違いは、加振周波数特性の違いによるものと考えられるため、インパルスハンマー（小野測器 GK-3100：ハードチップ）にて加振周波数特性を計測した。ほぼ同一の力で各ハンマーをインパルスハンマーにて打撃することで得られた打撃波形のFFT解析結果を図-14に示す。縦軸は電圧振幅、横軸は周波数である。プラハンマーはテストハンマーに比較して、低い周波数帯における打撃力が強く発生するため、付近の欠陥を誤って検出する恐れがあると考えられる。また、2kHz以上の加振力が弱いため、高い固有周波数を有する欠陥の検出は難しいと予想される。

自動打撃装置については、テストハンマーに近い加振周波数特性を有していることが分かった。

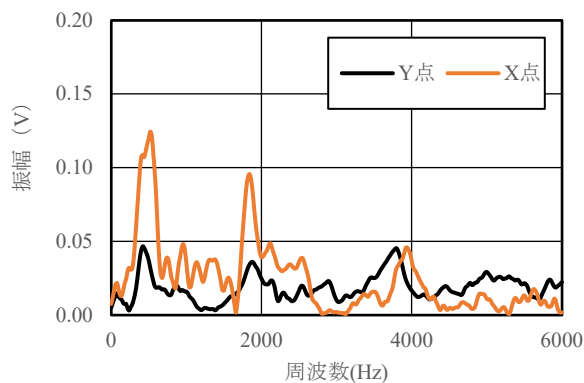


図-13 自動打撃装置による実法面打音比較

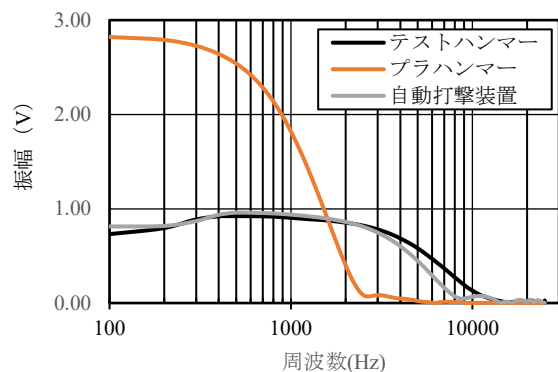


図-14 加振周波数特性比較

### 4. 位置情報把握

位置情報把握テストは（株）テクノコンサルタント所有大型供試体（5.0×5.0×5.0 m：コンクリート仕様Fc18-8-40）にて実施した（図-15）。本供試体は傾斜角60°、幅1.5mの斜面を有しており、斜面上の運動性能テストと位置情報把握精度の検証、および空洞の存在しない健全個所に限られるが、打音検査に関するテストを行うことが出来る。

まず、斜面にマーキングした点P1~P4(1.0×1.0m)を設け、これらの位置で打音検査を行った。図-16に各点における打音のスペクトラムを示す。各点とも図-13自動打撃装置による実法面打音比較におけるY点の打音のスペクトラムと同様の傾向を示している。

次に、位置精度を検証した。表-1に位置精度の検証結果を示す。実座標は別途準備したRTK-GNSS装置（機体と同じRTK-GNSS装置、アンテナポール設置のため姿勢補正必要無し）により計測した座標情報であり、推定打撃位置は機体姿勢を用いて制御装置が補正した打撃位置である。比較すると、最大で水平位置：0.049m、標高：0.083mの差異が認められた。図-17に平面図、図-18に側面図を示す。

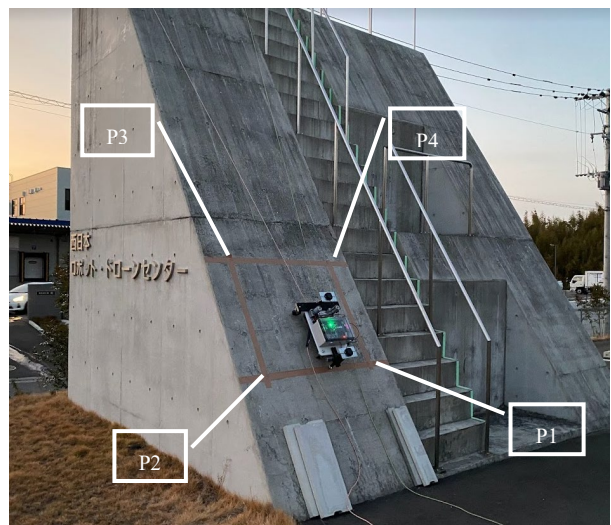


図-15 大型供試体

表-1 実座標と推定打撃位置の差異

点名	実座標			推定打撃位置			差異	
	緯度 (度)	経度 (度)	標高 (m)	緯度 (度)	経度 (度)	標高 (m)	水平距離 (m)	鉛直距離 (m)
P1	33.2097475	131.7201187	38.220	33.20974758	131.7201192	38.172	0.049	0.048
P2	33.2097384	131.7201186	38.210	33.2097387	131.7201189	38.127	0.044	0.083
P3	33.2097385	131.7201134	39.010	33.2097387	131.7201133	38.975	0.024	0.035
P4	33.2097476	131.7201134	39.010	33.2097478	131.7201133	38.966	0.025	0.044

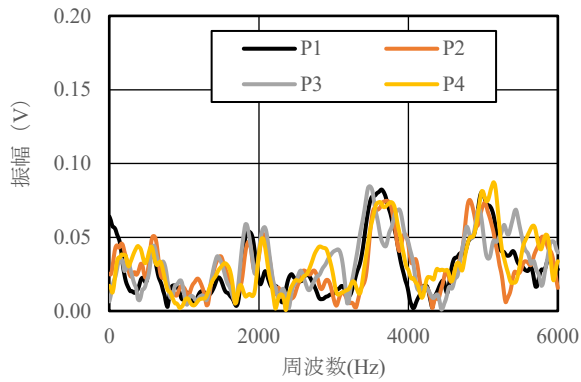


図-16 各点における打音の比較

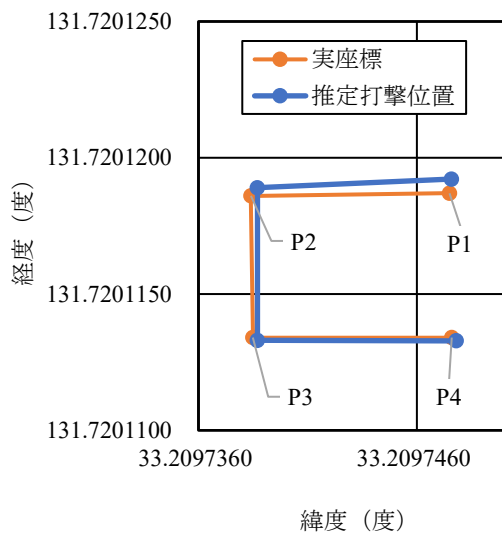


図-17 平面図

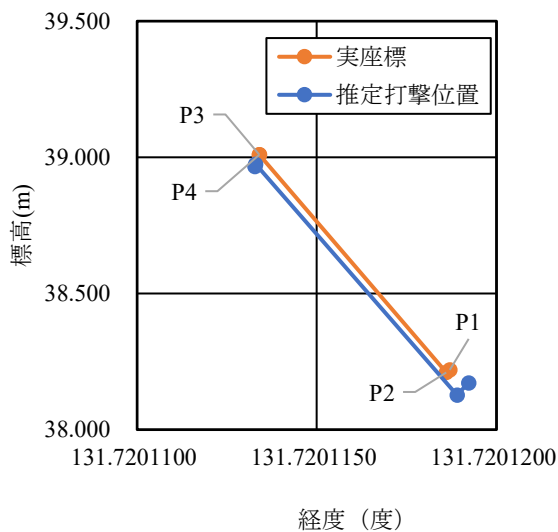


図-18 側面図

## 5. まとめ

本研究では、老朽化した吹付コンクリート法面の空洞調査を遠隔操作で行うことを目的として、無人打音点検装置の開発を行った。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 実法面空洞部と健全部のテストハンマー打音を比較したところ、たわみ振動によるピークの存在により、空洞有無の識別ができた。コンクリートの厚みや状態、空洞の大きさにもよるが、低周波域のスペクトラム形状により空洞有無の識別を行うことは可能である。
- (2) テストハンマーに近い加振周波数特性を持つ自動打撃装置により、実法面においてテストハンマーと同様の打音を計測できた。従って、自動打撃装置により背面空洞の有無を識別できると考えられる。
- (3) 傾斜角 60°の供試体上を、2本のロープを用い自在に移動し、任意の位置で打音検査を実行できた。
- (4) MovingBase方式 RTK-GNSSを用い、正確な方位角を得ることで、高精度で打撃位置を特定できた。

本検討では、供試体上での移動・位置把握、打音検査について検証できたが、実法面上での性能については十分に検証することができなかった。法面の凹凸や傾斜の影響についても不明である。今後、実法面における検証を進め、法面点検作業の合理化に役立てていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 大分県土木建築部道路保全課：大分県道路のり面土工構造物定期点検要領，p. 付-8, 2017.6
- 2) 芦田 譲，沖村 孝：老朽化吹付法面の調査対策の手引き，(社)物理探査学会，pp31-59 2006.9
- 3) 徳臣 佐衣子，森 和也，大嶋 康敬：道路法面点検のためのワイヤ駆動遠隔打音検査装置，第25回ロボティクスシンポジウム講演論文集，Vol. 1，日本機械学会，pp. 262-265, 2020.7
- 4) Sansalone, M. J. and Streett, W. B. :Impact Echo, Bullbrier Press, p31, 1997
- 5) 川口 昇平，東 邦和，廣中 哲也：打音法の周波数応答を用いたコンクリート内部の欠陥手法の検討，土木学会第63回年次学術講演会，pp.333-334 2008.9
- 6) MAVLink Developer Guide:<https://mavlink.io/en/> (閲覧日：2022年12月6日)
- 7) GPS for Yaw (aka Moving Baseline): <https://ardupilot.org/copter/docs/common-gps-for-yaw.html> (閲覧日：2022年12月6日)