

# 鋼板接着補強床版アンカー一部の損傷調査における 打音法の適用性について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○畠山 乃  
角間 恒  
蛸子 恭好

寒冷地における鋼板接着補強床版の点検・調査では、凍害等に起因するコンクリートの損傷進行に伴うアンカー部の健全性低下を的確に把握することが求められる。本稿では、アンカー部コンクリートの損傷調査手法の確立に向けた基礎的段階として、要素試験体の室内打音試験を実施し、アンカー部コンクリートの状態と打音波形の時間周波数特性の関係性を基に、アンカー部の損傷調査における打音法の適用可能性を検討した。

キーワード：床版、鋼板接着、打音、時間周波数解析

## 1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、床版）では、昭和 39 年以前の基準によって設計された床版を中心に、疲労損傷対策を目的とした下面の鋼板接着補強が行われてきた。国土交通省北海道開発局が管理する道路橋では、昭和 50 年頃～平成 10 年頃に本工法の採用実績が多く、補強後の経過年数が 20～40 年に達したこれらの床版において、現在、補強材の損傷が増加している<sup>1)</sup>。

著者らはこれまでに、北海道内で供用された鋼板接着補強床版の損傷実態の調査<sup>2)</sup>を行い、寒冷地特有の損傷形態として、床版と補強材を一体化させるアンカー部におけるコンクリートの凍害等の進行（写真-1）に注意が必要であることを指摘している。一方で、外観目視ではアンカー部の健全性を判断できないこと、打音による損傷の検出精度については不明確な部分が多いことなどが原因で、点検・調査時にアンカー部の状態を把握するには大きな困難を伴うことを認識している。

本研究では、アンカー部コンクリートの損傷を効率的かつ簡便に調査する手法を確立することを最終目標に、その基礎的段階として、アンカー部の健全性調査における打音法の適用性可能性を実験的に検討した。具体的には、アンカー部を模した要素試験体を使用して室内での打音試験を実施し、アンカー部の状態と打音波形の時間周波数特性の関係性を調査した。

## 2. 打音試験方法

### (1) 試験体

#### a) 概要

図-1 に打音試験に使用した試験体の概要を示す。本



※文献1中の写真を一部修正している

写真-1 鋼板接着補強床版アンカー部の損傷事例<sup>1)</sup>

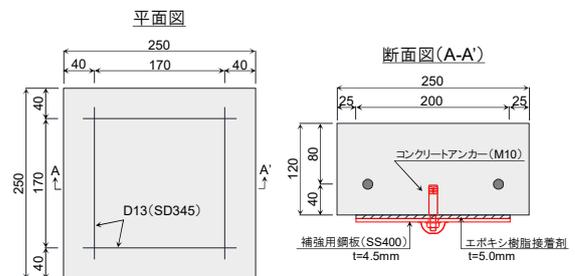


図-1 試験体概要

試験では、平面寸法 250mm×250mm、厚さ 120mm の鉄筋コンクリート平板に補強材を接着して打音試験に供した。試験体のコンクリートには JIA A 5308 に準ずるレディミクストコンクリート（早強 24-12-20 N）を、鉄筋には D13 (SD345) を、補強材には厚さ 4.5mm の SS400 材を、打込み式金属系アンカーには M10 (SS400) を、接着用樹脂には二液性エポキシ樹脂（混合粘度 2000 ± 1000mPa・s、20°C）を使用した。

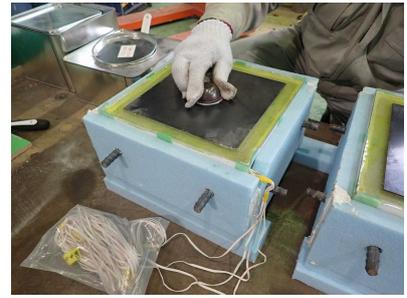
試験体は合計 5 体製作し、2 体 (S-1、S-2) ではアンカー部コンクリートが健全な状態を、3 体 (D<sub>F</sub>-1、D<sub>F</sub>-2、D<sub>F</sub>-1) ではアンカー部コンクリートに損傷が生じた状態を想定した。D<sub>F</sub>-1、D<sub>F</sub>-2、D<sub>F</sub>-1 におけるコンクリートの



(a) アンカーの打込み



(b) 接着用樹脂の流し込み  
写真-2 補強材の接着手順



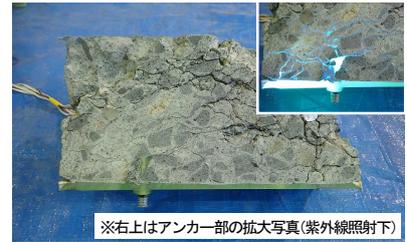
(c) アンカーキャップの設置



(a) 健全(S-1、S-2を想定)



(b) 損傷あり(D<sub>r</sub>-1、D<sub>r</sub>-2を想定)  
写真-3 アンカー部の損傷状況



(c) 損傷あり(D<sub>r</sub>-1を想定)

損傷は、フレッシュ状態のコンクリートに酸化カルシウムを主成分とする静的破砕剤を添加し、コンクリート中の水との反応による膨張圧を利用して模擬的に導入したものであり、静的破砕剤の添加量を調整することで、コンクリートに導入する損傷の程度も変化させた(D<sub>r</sub>-1とD<sub>r</sub>-2は同一の状態、D<sub>r</sub>-1は損傷が大きい状態を想定)。なお、実構造物でアンカー部のコンクリートに損傷が生じているような場合には、同時に補強材やアンカーとコンクリートとの間に剥離が生じていることも想定されるが、本試験体ではこれらを考慮していない。

#### b) 補強材の接着手順

本試験体では、作業性を考慮して鉛直下向きに補強材の接着作業を行った。写真-2に補強材の接着手順を示す。まず、鉄筋コンクリート平板に径10.6mmおよび長さ60mmのアンカー孔を削孔、深さ40mmまでアンカーを差し込み打込んだ後、コンクリート表面から5.0mmの高さに補強材を設置して固定した。その後、補強材周囲のコンクリート露出部から接着用樹脂を流し込み、試験体に打撃による振動を与えることで、補強材、アンカー、コンクリートの間の隙間に樹脂を充填させた。実構造物を対象にした鋼板接着補強工では、鋼板に設置した小径孔から接着用樹脂を圧入するのが一般的であるが、本試験においては、試験体1体当たりの接着面積が小さく、樹脂の充填不良が生じる可能性が低いことを考慮して、上記の方法を採用した。最後に、アンカー末端部(露出部)に、二液性のエポキシ樹脂系パテ材を充填した鋼製のアンカーキャップを設置した。

上記の接着作業は、コンクリートに損傷が導入された後に実施しており、損傷進行と補強材接着の時系列が実構造物に合致していない可能性がある。

表-1 打撃条件

項目	条件
打撃方向	鉛直下向き
打撃箇所	1) アンカーキャップ 2) アンカーキャップ撤去後のアンカー末端
打撃用ハンマー	1) 橋梁点検用ハンマー(質量220g) 2) 建築土木用鋼製ハンマー(質量780g)
打撃回数	1ケース当たり3回

#### c) 試験体の損傷状況

試験体に導入された損傷を把握するため、上記(1)と同様の方法で試験体を別途製作して、内部(切断面)の損傷状況を目視観察した。これらの試験体では、接着用樹脂に紫外線照射下で発光する蛍光染料を添加することで、接着作業時の樹脂充填に伴うひび割れの閉塞状況を観察しやすいようにしている。

写真-3に、アンカー部のコンクリートの状態を目視観察した結果を示す。写真より、健全状態を想定した試験体(写真-3(a))において、コンクリートにひび割れの発生は確認されなかったのに対し、アンカー部の損傷を想定した試験体(写真-3(b)および(c))では、コンクリートに複数本のひび割れが発生しているのを確認できる。また、損傷ありの場合でも、D<sub>r</sub>-1およびD<sub>r</sub>-2とD<sub>r</sub>-1では明らかに損傷状況が異なっており、D<sub>r</sub>-1において、アンカー周囲のひび割れが多く、かつ、微細なひび割れの周辺でコンクリートが著しく損傷した状態になっていたと推察できる。なお、D<sub>r</sub>-1を想定した試験体において、紫外線照射時にアンカー部のコンクリートが発光する様子が確認されており、打音試験体でも、コンクリートに発生したひび割れが接着用樹脂によって部分的に閉塞されていた可能性がある。

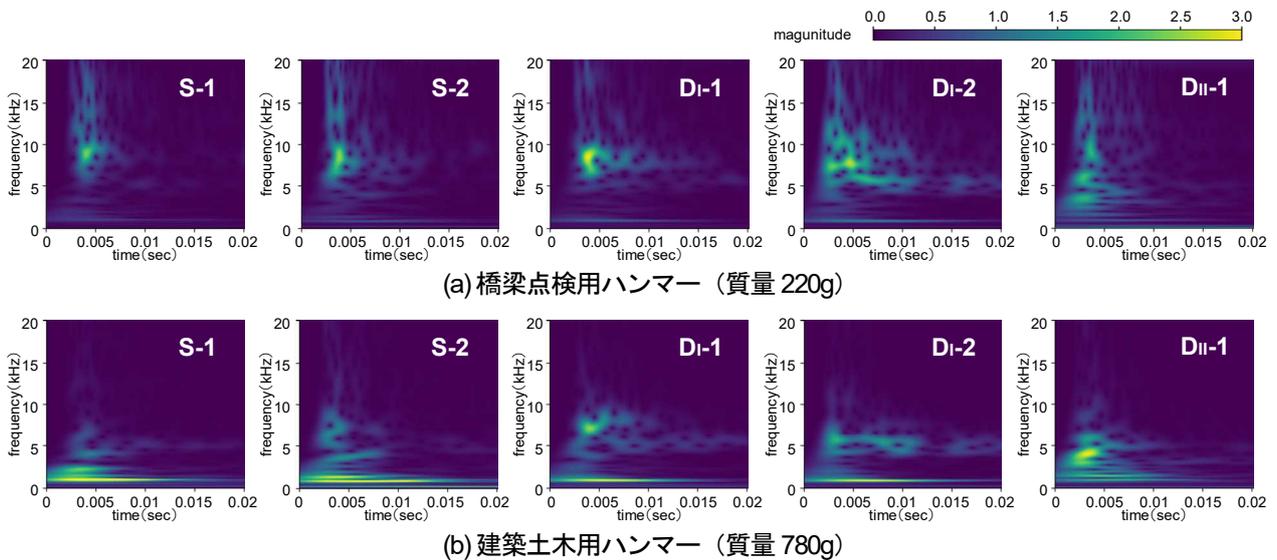


図-2 打音波形の時間周波数解析結果（アンカーキャップを打撃した場合）

## (2) 打音の収録方法

打音試験は、寒地土木研究所の実験室内において実施した。表-1に打撃条件を示しており、試験体1体につき、打撃箇所や打撃用ハンマーの種類の組合せを変えた4ケース、合計12回分の打音データを収録とした。ここで、打撃箇所や打撃用ハンマーの種類を変化させたのは、アンカー部コンクリートの損傷を捉えやすい打撃条件を明確にすることを目的にしたものであり、前者ではアンカーキャップの有無、後者ではハンマーの質量（橋梁点検用ハンマー：220g、建築土木用鋼製ハンマー：780g）を試験パラメータにした。

打音の収録には音声編集用フリーソフト Audacity (ver. 3.3.3) を使用し、アンカーから150mm程度の位置に配置した単一指向性のステレオコンデンサーマイク（サンプルレート44.1kHz、ビットレート16bit、周波数特性20Hz～20kHz）により収録して、wavファイルとしてノートパソコンに取り込んだ。

## 3. 打音試験結果

### (1) 時間周波数解析の方法

打音試験結果の分析に当たって、収録した音圧時刻歴波形の時間周波数解析を行った。その際、波形データの前処理として、1)ステレオ音声のモノラル音声への変換、2)波形データの抽出（打撃によって音圧の励起が開始する約2.0msec前から約183msec後までの合計8192データ）、3)音圧振幅の正規化を行っている。

時間周波数解析はMorlet関数をマザーウェーブレットとする連続ウェーブレット変換により行い、試験体毎に得られたスカログラム（信号強度を時間と周波数の関数として図化したもの）を比較した。なお、本研究における連続ウェーブレット変換は、python (ver. 3.11.4) のライブラリ swan を用いて実施した。

### (2) 時間周波数解析の結果

図-2および図-3に、音圧波形データに連続ウェーブレット変換を適用して得たスカログラムを示す。本稿では、各ケース3回の打音を行ったうちの代表的な結果を例示しており、これらの時間周波数特性（以下、打音特性）を比較する。

#### a) アンカーキャップ上を打撃した場合

図-2(a)は、橋梁点検用ハンマーによりアンカーキャップ上を打撃した場合の打音特性であり、健全状態を想定したS-1およびS-2では、いずれも周波数8～10kHz程度、時間0.005sec以前に信号強度のピークが現れた。損傷の発生を想定した3体では、試験体によって打音特性に差異があり、Df-1では、打音の励起時間がやや長くなる傾向があることを除くと、S-1およびS-2と比較して打音特性の差異は認められなかった。一方、Df-2では、ピーク周波数は前述の3体と同程度であるが、6kHz程度の波形が比較的長い時間励起していることが明らかである。また、Df-1では、周波数3～4kHz程度で信号強度がやや大きくなるなど打音の周波数帯が広範囲に分布し、信号強度のピークは不明瞭になった。

図-2(b)に、建築土木用ハンマーによりアンカーキャップ上を打撃した場合の打音特性を示す。本ケースでは、いずれも周波数1kHz程度の信号強度が大きくなっているが、これはアンカーキャップからの反射音の特徴を表していると考えられる。アンカー部の状態の違いに着目すると、損傷の有無によって信号強度が大きくなる周波数には差異があり、周波数1kHz程度の波形が卓越するS-1およびS-2に対し、Df-1、Df-2、Df-1では、それよりも大きな周波数（4～7kHz）で信号強度の増大が見られた。また、Df-2では、明らかに波形の励起時間が長くなっていることもわかる。

#### b) アンカー末端を打撃した場合

図-3(a)に、アンカーキャップを撤去した状態で、橋梁

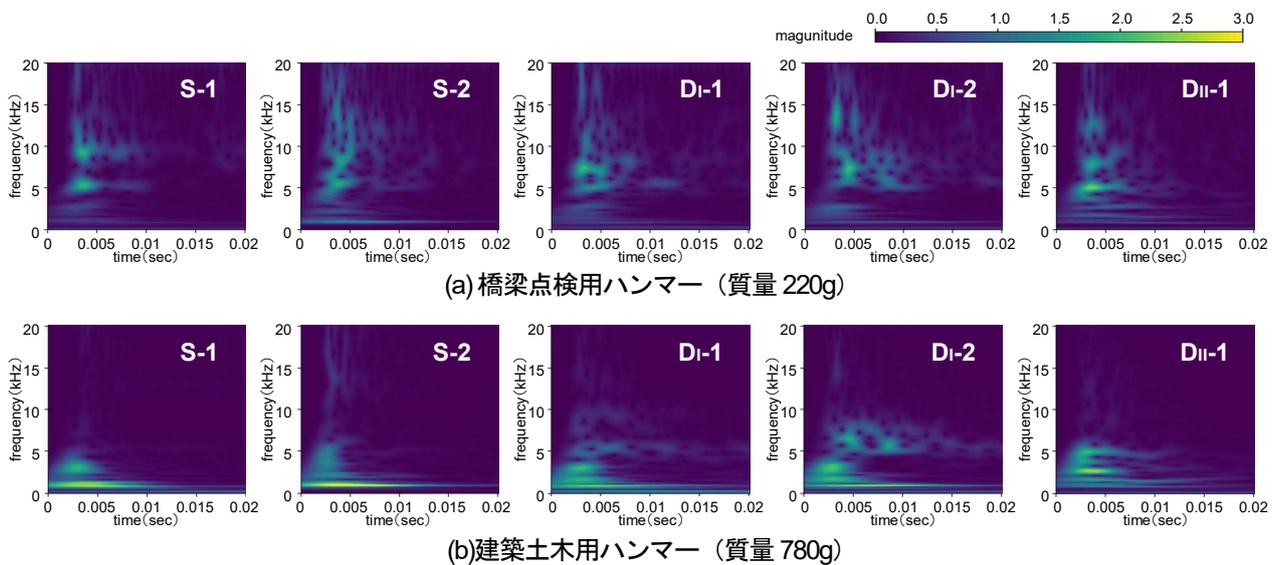


図-3 打音波形の時間周波数解析結果（アンカー末端を打撃した場合）

点検用ハンマーによりアンカー末端を打撃した場合の打音特性を示す。本ケースは、本試験の範囲内で、アンカー一部の状態に応じた打音特性の差異が最も隠微であった。具体的には、いずれの試験体も信号強度の明確なピークが現れず、打音の周波数が5~15kHz程度の広範囲に分布した。また、Df-2を除くと、損傷有無による打音波形の励起時間への影響も明確ではない。

図-3(b)に、アンカーキャップを撤去した状態で、建築土木用ハンマーによりアンカー末端を打撃した場合の打音特性を示す。本ケースにおける打音特性は、図-2(b)に示したアンカーキャップ上を打撃した場合に類似しており、アンカーからの反射音と思われる1kHz程度以下の信号強度が大きくなっている。また、損傷ありの場合には、それよりも周波数が大きな波形の信号強度が大きく、励起もやや長くなっている様子がわかる。

### (3) 試験結果のまとめ

以上は、スカログラムに基づき打音の時間周波数特性を簡易に比較した結果であるが、これらを総合すると、打音波形の時間周波数特性（ピーク周波数や波形の励起時間）の違いによってアンカー部コンクリートの状態の違いを捉えられる可能性があると考えられる。また、橋梁点検ハンマーより質量が大きいハンマーを使用した場合、その中でもアンカーキャップ上を直接打撃した場合に、損傷有無による打音波形の時間周波数特性の変化を捉えやすくなることが推察される。

アンカー部コンクリートの損傷程度の影響に言及すると、本試験の範囲では、相対的に軽度な損傷（Df-1 および Df-2）は打音波形の励起時間の変化を、相対的に重度な損傷（Df-1）は打音波形のピーク周波数の変化をもた

らした。これらの結果は、打音波形の時間周波数特性に着目した損傷状態評価の可能性を示唆すると同時に、本試験で取り扱っていない損傷形態（例えば、補強材やアンカーと床版との剥離）の影響を適切に考慮することの必要性を示すものである。複数の損傷形態が複合している場合の打音波形への影響については、アンカー部の損傷調査における打音法の適用に向けた今後の課題として、引き続き、検討していく必要がある。

## 4. おわりに

本稿では、鋼板接着補強床版アンカー部におけるコンクリートの損傷調査手法の確立に向けた基礎的検討として、アンカー部を模した要素試験体の室内打音試験を実施した。その結果、打音波形の時間周波数特性に着目することで、アンカー部コンクリートにおける損傷の有無を判別できる可能性があることを確認した。

本打音試験は、損傷状態や打音環境等の試験条件が限られる中で実施したものであり、今後は、様々な試験条件に対する打音データの蓄積および分析を進め、現場実装が可能な形で成果を取りまとめていきたい。

### 参考文献

- 1) 角間恒、仁平陽一郎、畠山乃：積雪寒冷地における鋼板接着補強床版の損傷調査、第66回（2022年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集、pp.714-719、2023.
- 2) 角間恒、仁平陽一郎、畠山乃：模擬損傷部材による寒冷地特有の損傷が進行した実橋床版の損傷性状に関する再現実験、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文集、第23巻、pp.479-484、2023.