

ジェットファンアンカーボルトの点検 における打音解析について

古川 伸一¹・鈴木 祥高²

¹関東地方整備局 関東技術事務所 施設技術課 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

²関東地方整備局 企画部 技術管理課 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2-1)

トンネル内に設置されたジェットファンは、年1回リフト車等で点検員が近接し、アンカー部と固定金具等の目視、触診、打音点検を実施しているが、打音点検の判定については点検員の経験に委ねられており、定量的な判断が難しい。また、今後は打音点検による音の違いを判断できる熟練技術者が減少していくことが想定される。本報告は、ジェットファンのアンカーボルト（金属式アンカー）の取付状態を把握することを目的として、打音の周波数について定量的に解析し、その特徴について考察した結果をまとめたものである。

キーワード ジェットファン、アンカーボルト、点検、打音

1. はじめに

ジェットファンは、概ね3000m以下のトンネルにおいて縦流式の換気方式として多く採用される機械設備である。一般的にはトンネルの覆工にあと施工アンカーを用いて支持されているため、その健全性は交通の安全確保の観点から非常に重要であり、「道路トンネル定期点検要領」及び「トンネル換気設備・非常用施設点検・整備標準要領（案）」において、近接目視と打音検査によって異常の有無を確認することが示されている。

点検の現場では、点検員がテストハンマーを用いてアンカーボルトやアンカーで覆工に取り付ける固定金具、ジェットファンを支持する吊り金具などを叩き、目視での確認結果と合わせて異常の有無を判断する。

コンクリート部分の打音については、健全部と劣化部分の定性的傾向について「道路トンネル定期点検要領」に示されているが、金属部を叩く打音についての指標はないため、判定は点検員の経験に委ねられている。

この異常判定の暗黙知を形式知化するため、打音自体を定量的に解析するプロセスを採用し、実際の点検時の打音、模擬的な供試体による打音、意図的に不良ボルトを施工した供試体による打音等を解析することで、その特徴を比較した。

2. 支持部の構造

ジェットファン支持部の構造を写真-1に示す。

4個の固定金具を覆工にあと施工アンカー（1個の固定金具当たり4本のアンカー）で取付け、ターンバックルで長さ調整可能な吊り金具でジェットファンを吊る構造である。この他に前後2本の吊り金具で前後の揺動を制御する。



写真-1 ジェットファンの支持部

3. 打音解析の概要

国土交通省では、笹子トンネル天井板落下事故以来、長期的耐久性の知見が得られるまで接着式アンカーボルトを使用しないこととしており、あと施工アンカーを使用する場合は実態として金属式が採用されている。

よって、打音の解析対象は金属式を用いて実施する。



写真-2 金属式アンカーボルト

(1) 現場試験

現場における打音点検の実施状況を確認するために実施する。現場は、長野国道事務所管内の笹平トンネルとした。調査の概要を以下に示す。

【実施日】2014年9月10日

【トンネル概要】

延長：1145m（対面交通2方向2車線）

断面積：57.6m²

【ジェットファン概要】

口径:1030mm 台数：10台（現在は3台）

アンカーボルト：金属式M24mm×230mm
スリーブ打込み式

【調査試験項目】

a)点検方法の確認

打音点検の具体的な方法を確認する

b)打音の収録

5台分のジェットファンについて、実際の打音を録音する。ボルト部分を叩くときに、固定金具の影響をどの程度受けるのか把握するため、打音はボルト部分だけでなく、固定金具を叩いたケースも収録する。

c)打音解析

録音した打音の周波数を解析して特徴を確認する

(2) 基礎試験

アンカーボルト、固定金具各々を単独で叩いた時の打音、固定金具を締結した時の打音を解析し、周波数分布を比較した。

(3) 供試体試験（国総研）

国土技術政策総合研究所の保有する金属式アンカーの不具合の有無を模した供試体を借用して、打音を収録し健全な同型アンカーの打音と比較した。

(4) 供試体試験（関技）

金属式アンカーによる著しい施工不良の供試体を施工し、健全な同型アンカーと打音を比較した。

4. 現場試験結果

(1) 打音点検の状況

現場では、リフト車を用いた近接点検が行われていた。点検員は、ボルトを締め付けるナット部分だけでなく、固定金具・吊り金具など多くの箇所を叩き、目視にて緩みや損傷などが無いかを確認していた。

実際のジェットファンの点検において点検員が叩く箇所数は非常に多く、また金属音であるが故に多様な音色となり、異常を示す特徴が未経験者には分かりにくいことが明らかである。

(2) 打音収録

打音の収録は、叩く箇所から約30cmの位置で騒音計を用いて録音した。収録機器の概要を以下に示す。なお、騒音計は、全ての試験に同じものを用いた。

騒音計：RION製 NL-62

(3) 打音解析

a) 一般的傾向

ジェットファン5台分の固定金具を締結する各アンカーボルト及び固定金具部を3回打撃し、各々の打撃音の周波数分布をFFTによって求めた。その代表例を図-1及び2に示す。

ボルトを叩いた場合、2kHz近傍、4～5kHz近傍と8.5kHz近傍にピークがあるのに対し、固定金具単独では音圧が上昇し、4～5kHzに複数のピークが現れ、特に4kHz近傍のピークが高い。

細かな差異はあるが、この傾向は多くの固定金具とボルトの打音で確認することができた。

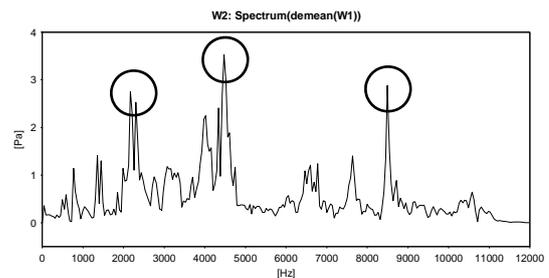


図-1 ボルトを叩いた打音の周波数分布

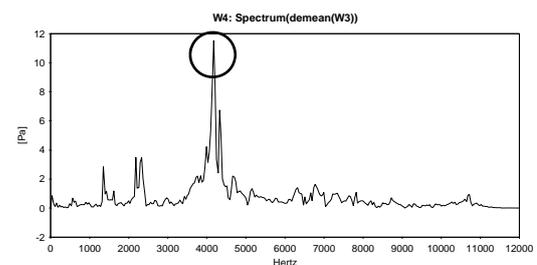


図-2 固定金具を叩いた打音の周波数分布

b)劣化部分の傾向

今回の試験において、1箇所だけナットにクラックが入った事例の打音を収録することができた。

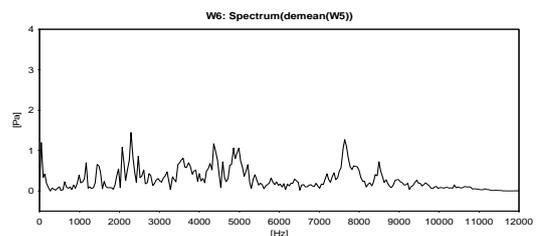


図-3 クラックのあるナットの打音周波数分布

図-1と比較すると、4～5kHzと約8.5kHzのピークがかなり低下して分布が平滑化している。打音は、他の部分と比べると鈍く音感的には低い音に聞こえる。ただし、ボルトの健全度を示すデータとして使うことは難しい。

5. 基礎試験

(1) 試験用コンクリート板

構内に、覆工を模して試験用のコンクリート板を施工した。概要を以下に示す。覆工は馬蹄形の断面をしているが、施工が難しいため板状にしている。

大きさ：長さ2.5m×幅2m×厚さ0.3m

コンクリート：高炉B セメント使用量270kg/m³

(2) 固有周波数確認試験

試験用コンクリート板に金属式アンカーを施工し、笹平で使用されているものと同じ固定金具を固定した。

ただし、関東技術ではM24ボルトが施工できないため、M20ボルトを採用している。

現場試験と同様に、固定金具部分とボルト自体を叩いた場合の周波数分布を比較した。本試験において、ボルトに荷重はかけていない。

・形式：金属式M20mm×200mmスリーブ打込み式

(3) 試験結果

図-4は、ボルト単体（固定金具なし）の打音周波数である。概ね1.0kHz及び4.0kHz近傍にピークがあり、また2kHz～6kHzの帯域に周波数成分がみられる。

図-5は、固定金具を締結した状態でボルト部分を叩いた場合の周波数分布、図-6は、同上の状態固定金具を叩いた場合の周波数分布を示す。

ボルトを叩いた場合は、約0.9～1.3kHz近傍に明確なピークが見られるケースと、概ね1.0～6.0kHzの帯域に多くの周波数成分を有する場合が多い。

次に、固定金具部分を叩いた場合は、概ね1.0～6.0kHzの帯域にピークを検出でき、固定金具を取り外して単独で叩いたときの周波数分析結果もほぼ一致することがわかった。また、固定金具を叩いたときの音色は、ボルトを叩いたときのものと感覚として似ているように聞こえる。

以上より、固定金具を取り付けた状態でボルトを叩くときに検出できる1.0～6.0kHzの周波数は、固定金具に起因する成分である可能性が高い。個別のデータでは細

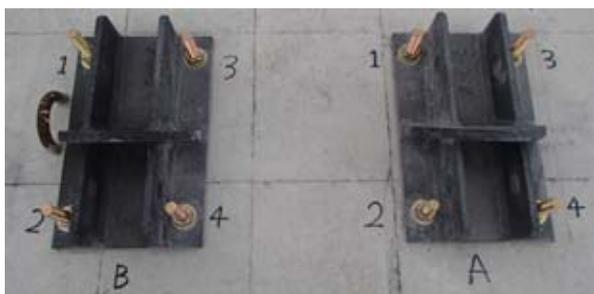


写真-3 固定金具

かな差異はあるものの、この傾向は概ね4個の取付金具全ての試験で見られた。

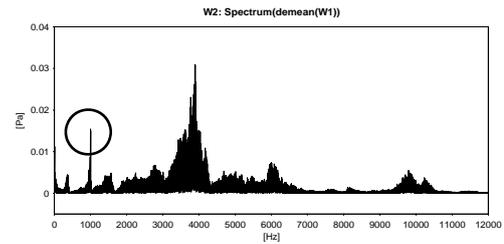


図-4 ボルト単体の打音周波数分布

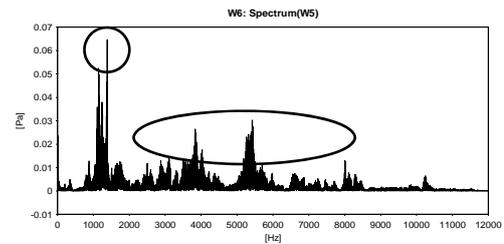


図-5 固定金具を締結したボルトの打音周波数分布

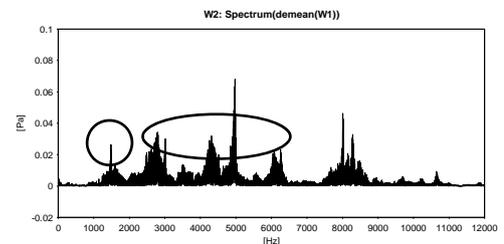


図-6 ボルトで締結された固定金具の打音周波数分布

6. 供試体試験（国総研）

(1) 供試体の概要

本試験は、金属製アンカーに不具合がある場合の周波数特性について確認するものである。よって、固定金具は使用しない。国総研が作成し保有する金属式アンカーの不具合の有無を模擬した供試体（表-1）を用いて、打音試験を行った。

表-1 供試体アンカーの概要

種類	呼び径	施工方向	健全あるいは不具合の内容
金属式(スリーブ式)	M16	上・下 横向き	健全
			打込量1/2
			斜め施工(傾斜5°)
	M24	上・下 横向き	健全
			打込量1/2

(2) 試験結果

計測データ毎に周波数分布は微妙に異なるが、健全な施工を行ったものとの差異を明確に示すことができなかった。打音試験結果事例を図-7及び8に示す。約1kHz～10kHzにピークが広がっており、不具合の内容と周波数の因果関係を明確に示すことができなかった。この結果

を受け、関技構内にて薬液によるコンクリートの中性化と国総研供試体よりさらに打ち込み量を低下させた金属式アンカーを複数施工し、付着力の低下と打音を発生するいくつかの要素との関係を把握する試験を実施することとした。

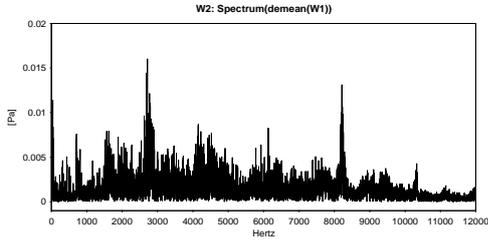


図-7 健全なアンカーボルトの打音周波数分布 (M16)

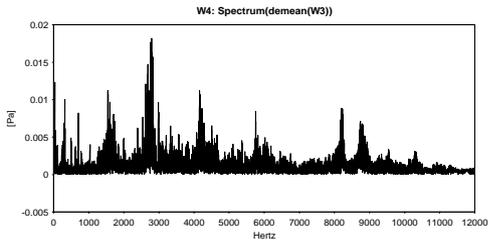


図-8 不具合(斜め施工)アンカーボルトの打音周波数分布 (M16)



写真-4 国総研模擬アンカー供試体 打音状況

7. 供試体試験(関技)

(1) 供試体の概要

本試験は、金属式アンカーの劣化要因として考えられる次の2つの条件を模擬した供試体を作成して試験を行うものである。本試験についても固定金具は使用しない。

a) M20ボルト 施工後に塩酸・硫酸・硝酸をスリーブ周辺に浸透させコンクリートを酸化させる中性化による支持力の低下を想定したもの



写真-5 アンカーボルトへの薬液による劣化状況

b) M20ボルト 超打ち込み量不足の施工(打ち込み量2/5) 何らかの要因でアンカーボルト周辺のコンクリート

に変状が生じ、緩みが出たことを想定し、非常に緩い打ち込み量で施工したもの。

(2) 試験結果

a) 酸によるコンクリート劣化

供試体に50%濃度の塩酸・硫酸・硝酸を滴下し1年経過後に打音を計測した。結果を図-9, 10に示す。

健全部との明確な差異は特に認められなかった。

また、引き抜き力を確認したところ1本当たり2t以上の引き抜き力があり、現状では健全なアンカーとの差別化ができなかった。

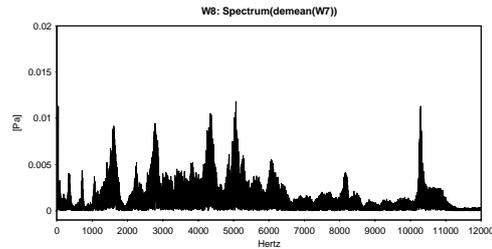


図-9 健全なアンカーボルトの打音周波数分布

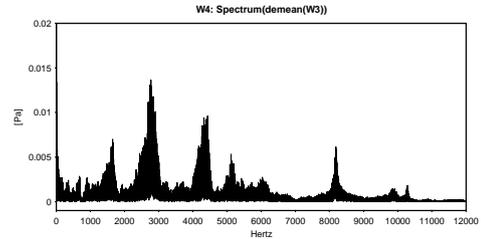


図-10 塩酸を塗布したアンカーの打音周波数分布

b) M20ボルト 超打ち込み量不足の施工(打ち込み量2/5)

国総研の施工不良供試体よりも打ち込み量をさらに少なくし、通常施工の2/5で施工したアンカーを5本作製した。そのアンカーボルトの打音を計測し、その後引き抜き力を確認した。その結果、打音については、幅広い周波数分布となった。また引き抜き力については、2本が500kg未満でスリーブが動いたが、残りの3本は1t以上の引き抜き力を有していた。

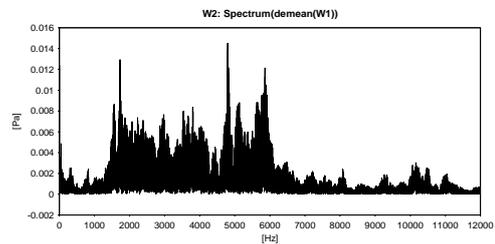


図-11 打ち込み量不足アンカーの打音周波数分布

8. 考察

(1) ボルトに起因する打音の検証

現場で使用されているM24ボルトにおける打音と関技構内におけるM20ボルトの打音解析結果より、次のとお

り検証を行った。金属式アンカーの形状と打込んで施工が完了した段階での状況から、固定金具より上部に出ている箇所が打撃によって振動し音を発すると思われる。その周波数は、ナットで固定された片持ち梁と見なせば式(1)で算出できる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda}{\ell} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ℓ : 固定金具より出ているボルト長さ

λ : 境界条件による定数 1.875

E : 鉄鋼の縦弾性係数 206×10^9 Pa

I : 断面二次モーメント

ρ : 鉄鋼密度 7860 kg/m³

A : ボルト断面積

現場では、M24ボルトをかなり深く打ち込んであり、固定金具より出ている長さは写真から推計すると60~70mm程度である。

関技構内に施工したM20ボルトは、概ね90~105mm程度で施工した。各々のケースについて、式(1)により計算した結果を表-2に示す。構内試験において、ボルトを叩いて発生する約1~1.3kHzのピークと計算結果はほぼ一致する。また、現場における打音の3.0~4.5kHzの間にある明確なピークはボルトに起因するものと推定できる。

表-2 周波数計算結果 [Hz]

呼び径/長さ	$\ell=60$ mm	$\ell=70$ mm	$\ell=90$ mm	$\ell=105$ mm
M24	4379	3217	—	—
M20	—	—	1625	1194

(2)固定金具に起因する打音の検証

厚さ10mmの鋼板でビルトアップされた固定金具の固有振動数は机上算定が難しいので、固定しない状態で打音を計測し周波数を分析した。その結果を図-12に示す。

固定金具は中心周波数を5kHzとして1~8kHzに幅広く明確なピークが存在することがわかった。打音は非常に響きのよい音であり、音圧も高く各ピークが明確である。

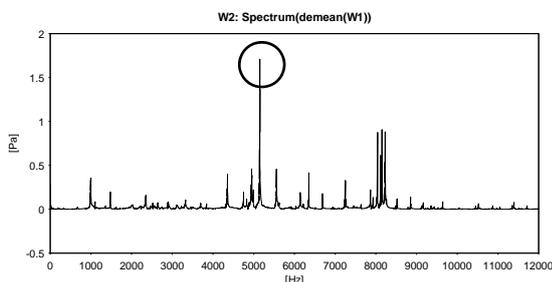


図-12 固定金具単体の打音周波数分布

(3)ナット

構成部品としてナットを使用していることから、一般的なナットの周波数を分析した。机上計算が難しいので、ナット単体をゴムではさみ打音を計測した。その結果を図-13に示す。図-13より2kHz~6kHzに複数のピークが確認できた。固定金具を使用しない場合の基礎試験において頻りに認められる2~4kHzのピークにはナットが関与

している可能性が高い。

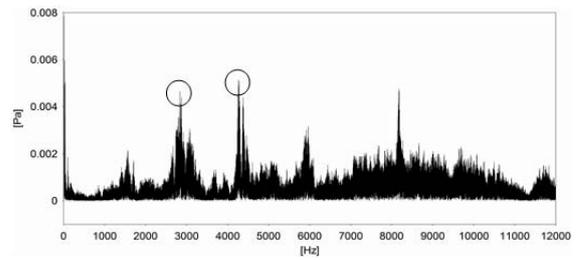


図-13 ナット単体の打音周波数分布

(4)テストハンマーの固有振動数

テストハンマーを使用していることから、一般的なテストハンマーの固有振動数を求めた。机上計算が難しいので、2本のテストハンマーの打撃面同士で打音を出し、その周波数を分析した。その結果を図-14に示す。

図-14より明確に8.1kHzにピークがある。これより、現場や基礎試験において頻りに認められる8kHz近傍のピークはテストハンマーに起因している可能性が高い。

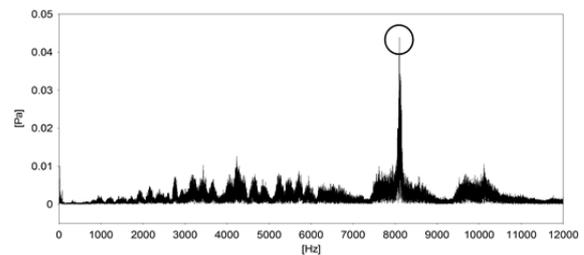


図-14 テストハンマー単体の打音周波数分布

図-12~14より、テストハンマーによる打音には、直接ボルトの健全性に関与していない金属音成分が幅広く含まれていることがわかる。

(5)打込み不足アンカーの打音特性

構内に施工した打込み不足アンカー5本のうち、2本は380~450kgの静荷重において引き抜けた。

図-11の打込み量不足のアンカーと健全なアンカーの打音と比較すると概ね次のような特徴がある。

①ボルトに起因する周波数が不明瞭になる。

②2~6kHzに複数のピークが認められる。

①については、緩みがあることでナットによるボルトの片持ち梁構造が形成されないことが考えられる。②については、金属式アンカーの構造に起因すると考えられる。本来打ち込むことによってスリーブがコンクリートに食い込み、ボルトのテーパ部を締め付けるが、この部分が緩いために、スリーブなども微弱に共振して弱い周波数が発生しているものと考えられる。結果的に打音が鈍く小さい音に感じ取れる。

(6)打音解析によるアンカー健全度評価の可能性

基礎試験・供試体試験の結果、アンカーの打音には、ボルトの露出部分やナットに起因する周波数成分と固定金具に起因する成分が含まれることが分かった。これにより、アンカーの健全度評価における打音解析結果の活用方法については次の2つの方法が考えられる。

①ボルトに起因する固有振動数の変化を観察する方法

ボルトが固定金具から出ている長さによって固有振動数が決まるので、当該成分が減少あるいは変化したらボルトに緩みが生じていると判断する。

②全体の音圧レベルで評価する方法

ボルトに緩みが生じれば、それまで固定されていたボルト本体、埋め込まれたスリーブ、固定金具にも少しずつ緩みが生じ、その結果打音の響きが低下して音圧が下がる（ナットが割れていた図-3と同じ状態）と考え、音圧が低下した場合異常と判断する。

以上の方法についての実現可能性を検証する。

①②共通の課題

現場では交通や他の点検作業などで発生する暗騒音が存在するため、これらの状況を受けにくい集音の工夫が必要である。また、現場においては波形収録のため専用のデータレコーダを使用したがる、どのジェットファンのどのボルトを叩いたか自動的に記録できない。

傾向管理を行うためには、手軽にデータ収集が行えることが必須であり、実現のためには暗騒音の排除と打撃位置記録の合理化を図る技術開発が求められる。

①の課題

アンカーボルトの打音を固定金具等の周波数成分から分離する必要がある。事前にボルト周波数成分が判明していれば周波数フィルタを活用できるが、簡単な方法として「樹脂ハンマー」の使用が考えられる。

図-15及び16は、図-4及び図-5のボルトを樹脂ハンマーで叩いた打音の周波数分布である。

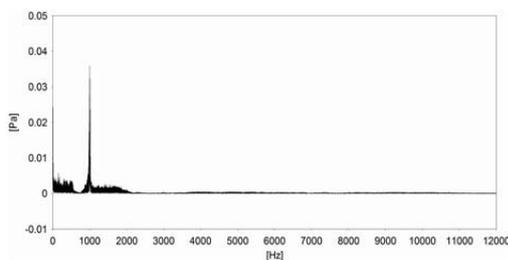


図-15 ボルト単体の打音周波数分布（樹脂ハンマー）

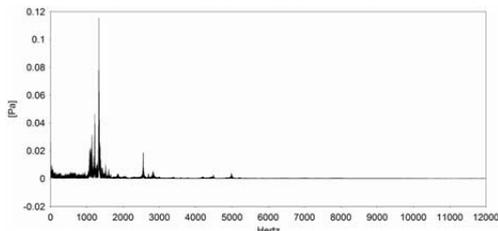


図-16 固定金具を締結したボルト打音（樹脂ハンマー）

ボルトの周波数を強調するため、ナット部ではなくボルト先端を叩いている。図-4及び図-5に見られるボルトの周波数成分がはっきり現れ、金属音成分は非常に低下した。本方法においては、事前にボルトが金具から露出している高さを計測し、その計算値が打音のピーク値と一致することを確認する必要がある。これまでの試験では、ボルトの露出部の長さとの関係において式

(1) による理論値と計測値に若干の差異があるため、その要因も明らかにしていく必要がある。

②の課題

音圧を計測対象とする場合、打撃入力を把握する必要がある。特に固有振動数に起因する音を扱うことから、入力箇所と方向、劣化要因と音圧変化の関係などを把握していかなければならない。今回の基礎試験において、インパルスハンマーを使用して入力量と打音の解析を行ったが、ハンマー加速度と音圧の収録にタイムラグがあり、時間領域の波形で単純に処理することができなかった。従って双方の時間領域波形から実効値を導き出し比較するなどのプロセスが必要となる。

9. まとめ

今後、老朽化設備の増大に備えこれまで以上に点検の重要性が高まっていく。ジェットファンを支持する重要なアンカーボルトに関して得られた知見及び今後の方針についてまとめる。

(1) ボルトの打音

ジェットファンのアンカーボルトの打音は、ボルト、ナット (2kHz～6kHz)、固定金具 (1～8kHz)、ハンマー (8kHz) 等の周波数成分を含む音の集合体であることが解かった。

(2) 引き抜き力が低下したアンカー打音の特徴

引き抜き力が低下したアンカー(本発表では、打込み量不足)では、アンカーボルトの固有振動数が不明瞭になる。

(3) 打音解析導入の可能性

ボルトの周波数成分を金属音から分離して評価する方法と音圧の変化を把握する方法が考えられる。音圧を管理する方法は、さらなる知見の蓄積と入力打撃力の管理が必要となる。現状においては、分析作業の省力化が課題として残るが、樹脂ハンマーによる打音の周波数管理は継続して検討するに値する方法であると考えている。

(4) 今後の方針

今回の基礎試験及び供試体試験は、関技の職員でできる範囲で実施した。今後も基礎的な試験を継続し、特に劣化したアンカーボルトの打音解析を実施していきたい。得られた知見については適切な方法で公表し、関係者の意見をj得て試験実施の方向性を真摯に検討するとともに、打音解析の現場導入のニーズ・シーズをさらに確認していきたい。

謝辞：本試験の実施にあたって、現場試験にあたり現場を提供いただきました長野国道事務所、並びに試験方法や評価方法に関する助言、供試体の提供を賜りました国土技術政策総合研究所橋梁研究室及び国立開発研究法人土木研究所トンネルチームに厚く御礼申し上げます。