

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

Tapping Sound Analysis of Jet Fan Anchor Bolts in Tunnels

○ 古川 伸一（国土交通省 関東技術事務所）

Shinichi FURUKAWA,
Equipments Engineering Section, Kanto Engineering Development Office, Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 6-12-1 gokounishi, Matsudo City, Chiba Pref. 270-2218

Key Words: Jet Fan, Anchor Bolt, Frequency Analysis, Hammering test

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. ジェットファン支持部の構造

ジェットファン支持部の構造をFig.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、ターンバックルにより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抑止する。

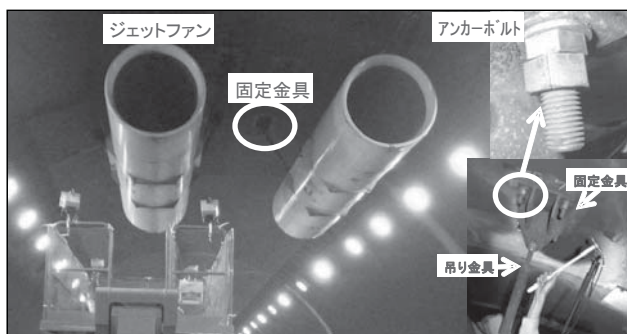


Fig.1 ジェットファンの支持部の構造

3. 打音解析の概要

3.1 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。

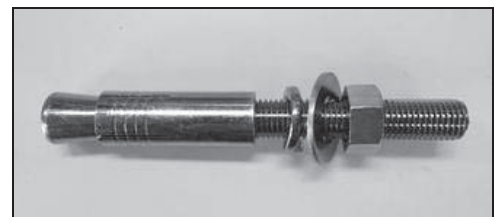


Fig.2 金属式アンカーボルト

3.2 現場試験

現場における打音点検の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：57.6 m²

【ジェットファン概要】

口径：1030 mm 台数：10台（現在は3台）

アンカーボルト：金属式 M24 mm×230 mm

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。

3.3 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。また、事務所構内に覆工を模したコンクリート板を用意し、金属式アンカーを施工してアンカー単独、ジェットファン固定金具を締結した状態など基本的な条件において打音を収録し周波数を解析した。

3.4 供試体試験（関東技術事務所）

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

4.1 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な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。

4.2 打音収録

打音の収録は、叩く箇所から約 30 cm 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

4.3 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 Fig. 3 及び 4 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。

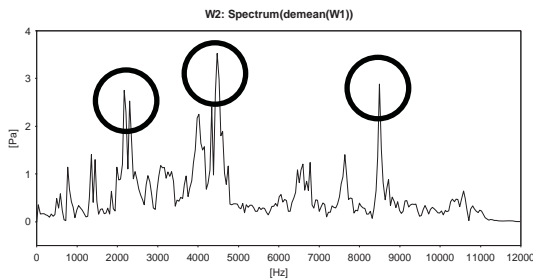


Fig.3 ボルトを叩いた打音の周波数分布

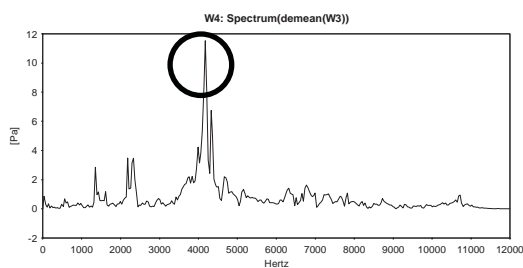


Fig.4 固定金具を叩いた打音の周波数分布

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打音を収録することができ、その結果を fig. 6 に示す。Fig. 3 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。

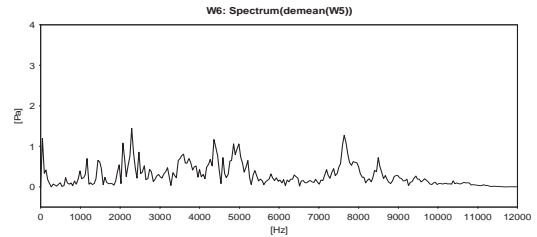


Fig.5 クラックのあるナットの打音周波数分布

ただし、あくまでナットの緩みに起因するものであり、ボルトの健全度を示すデータとして使うことは難しい。現場における打音解析結果だけでは、ボルトの健全性を評価できる指標を得ることはできなかった。

5. 基礎試験結果

5.1 試験用コンクリート板

構内に、覆工を模した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 270 kg/m³

5.2 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。(Fig. 6) 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 M20 mm×200 mmスリーブ打込み式

5.3 試験結果

Fig. 7 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。

Fig. 8 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、Fig. 9 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同様に聞こえる。

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。



Fig.6 固定金具

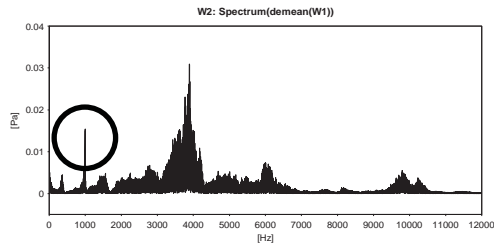


Fig.7 ボルト単体の打音周波数分布

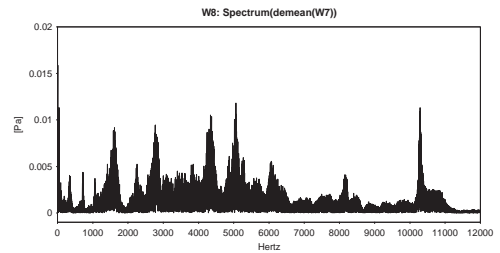


Fig.11 健全なアンカーボルトの打音周波数分布

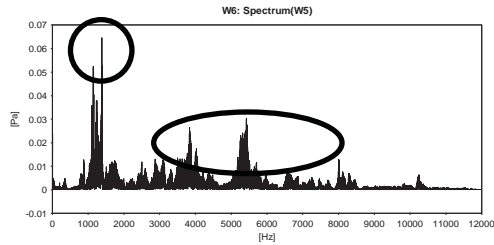


Fig.8 固定金具を締結したボルトの打音周波数分布

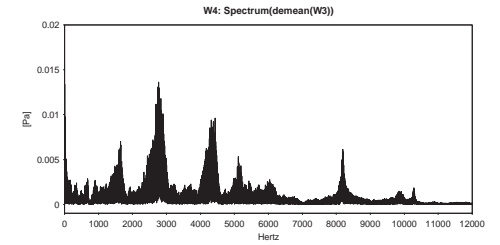


Fig.12 塩酸を塗布したアンカーの打音周波数分布

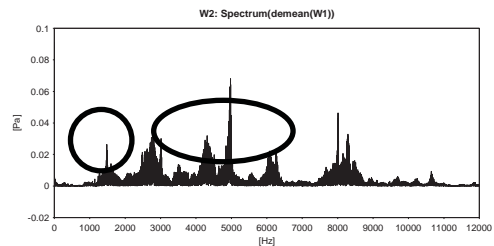


Fig.9 ボルトで締結された固定金具の打音周波数分布

b) M20 ボルト 超打ち込み量不足の施工(打ち込み量 2/5)
 通常想定される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、Fig.13 に示すとおり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 500 kg 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。金属式アンカーの場合、アンカースリーブが拡張しコンクリートに支持をとっている部分のコンクリートが完全に中性化するなどしないかぎり、スリーブがずれてもコンクリートが健全な部分で再度半力を得られる状態となってしまう、1t 程度の荷重では完全に抜けることは無かった。

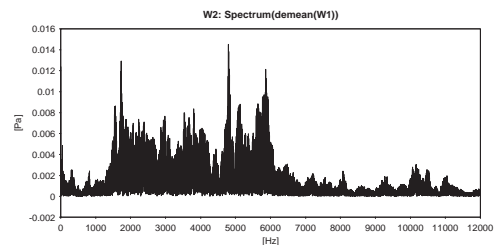


Fig.13 打ち込み量不足アンカーの打音周波数分布

6. 供試体試験結果

6.1 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 ボルトを施工後に、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

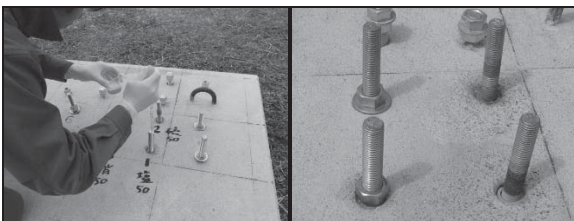


Fig.10 アンカーボルトへの薬液による劣化状況

- b) M20 ボルトで超打ち込み量不足アンカーを施工(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。

6.2 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 Fig.11, 12 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。

7. 考察

7.1 固定金具に起因する打音の検証

Fig.7~9 に示す打音の周波数のうち、打音の由来を成分毎に識別するために構成要素単体の打音を解析した。

まず、固定金具であるが厚さ 10 mm の鋼板でターンバックルを支持するような形状にビルトアップされており、固有振動数の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 Fig.14 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。

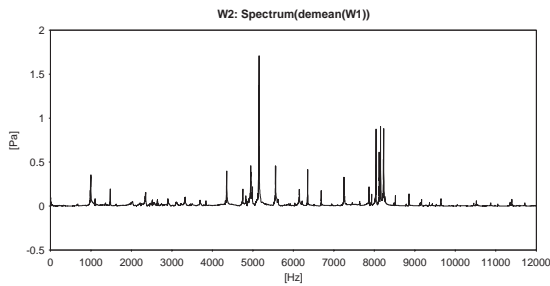


Fig.14 固定金具単体の打音周波数分布

7.2 ナットに起因する打音の検証

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 Fig. 15 に示す。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繁に認められる 2～4kHz のピークにはナットが関与している可能性が高い。

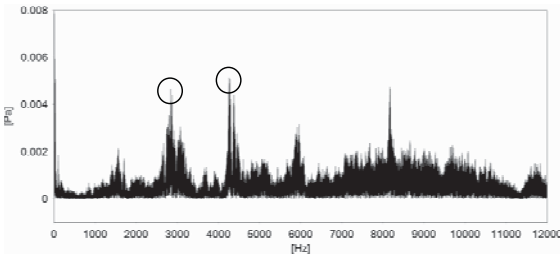


Fig.15 ナット単体の打音周波数分布

7.3 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 Fig. 16 に示す。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繁に認められる 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。

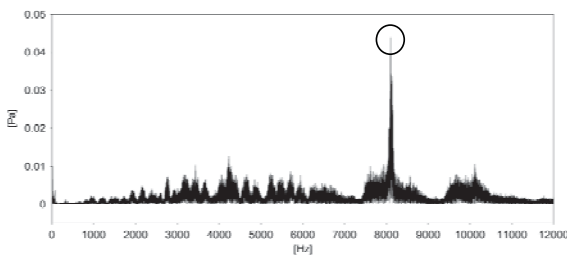


Fig.16 テストハンマー単体の打音周波数分布

Fig. 14～16 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。

7.4 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 380～450 kgの静荷重においてスリーブが動いた。

Fig. 13 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、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。

7.5 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 Fig. 5 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。

Fig. 17 及び 18 は、Fig. 7 及び 8 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。

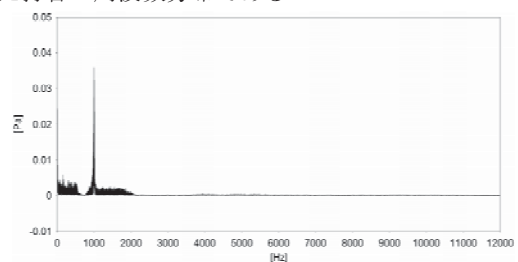


Fig.17 ボルト単体の打音周波数分布 (樹脂ハンマー)

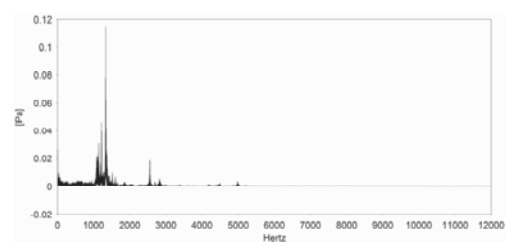


Fig.18 固定金具を締結したボルト打音 (樹脂ハンマー)

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。Fig. 7 及び 8 に見られるボルトの周波数成分ははっきり現れ、その他の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。

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性がある。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。

7.6 ボルトに起因する打音の検証

本試験では、前項①の考察に基づき、ボルト露出部の長ささと樹脂製ハンマーによる打音の周波数を解析するものとした。

a) 公式による周波数の算出

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考える。その周波数は、ナットで固定された片持ち梁と見なせば、下記の Eq. (1) で算出できる。

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

- l : 固定金具より出ているボルト長さ m
- λ : 境界条件による定数 1.875
- E : 鉄鋼の縦弾性係数 206×10⁹ 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 m²

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 60～70 mm 程度である。

関技構内に施工した M20 ボルトは、人力にて削孔したため、個々の埋め込み長に差異があり、コンクリート面から露出している長さは 90～110 mm 程度であった。各々のケースについて、Eq. (1) により計算した結果を Table 1 に示す。構内試験において、ボルトを叩いて発生する約 1kHz 周辺のピークと計算結果は近い値となった。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。

Table 1 周波数計算結果

	【Hz】			
呼び径/長さ	l=60mm	l=70mm	l=90mm	l=110mm
M24	4379	3217	—	—
M20	3657	2686	1625	1194

ただし、本検証を実施する中で、発生周波数と公式によって求められる周波数に違いについて、以下の検証を行った。

b) 公式による周波数の検証

公式から算出される周波数を検証するため、以下の条件によりボルトを樹脂ハンマーで打撃し追加検証を実施した。

なお、公式内の l は、コンクリート面からの長さを採用した。

- ①ダブルナットで締結されたボルト
 - ②シングルナットで締結されたボルト
 - ③ナットを外したボルト
- ②と③は同じアンカーボルトを使用した。

その結果を以下 Fig. 19～20 に示す。

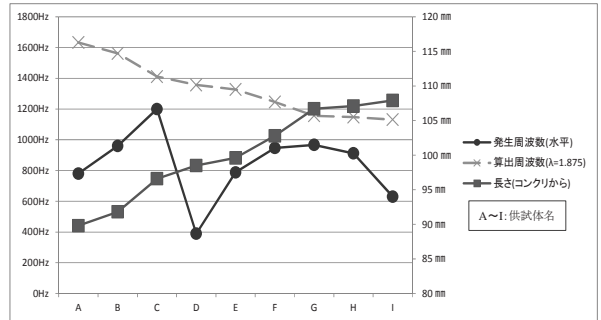


Fig.19 発生周波数と算出周波数(ダブルナット)

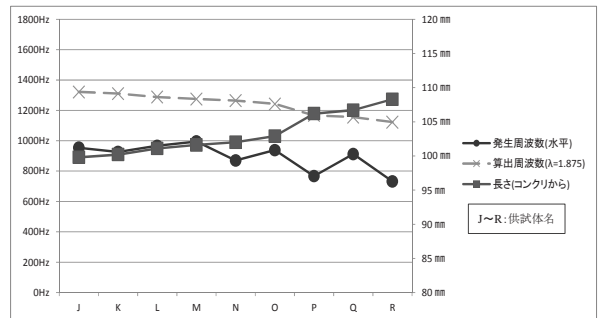


Fig.20 発生周波数と算出周波数(シングルナット)

上記より、樹脂ハンマーにてダブル及びシングルナットのアンカーボルトを打撃した場合において、算出した周波数と発生周波数が一致することはなかった。ただし、シングルナットの場合、アンカーボルトの長さに対する発生周波数の相関は認められる。

また、ナットを外したボルトについては、ナットがある場合とは異なり、発生周波数と算出周波数に乖離があった。そこで、アンカーボルトがコンクリートに対し効力を発揮し支持点となる位置の測定が必要と考え、アンカーボルトのスリーブをコンクリートの穿孔径である 28 mm まで広げ、その長さ L (Fig.21 参照) を計測し周波数を算出した。その結果を Fig.22 に示す。算出した周波数と発生周波数がほぼ一致することがわかった。

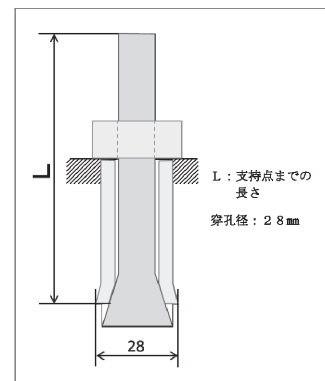


Fig.21 アンカーボルトの支持点までの計測

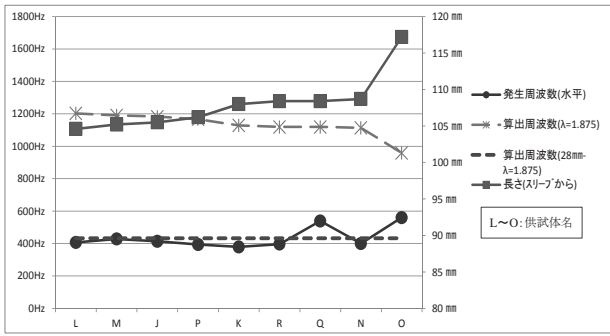


Fig.22 発生周波数と算出周波数(ナット無し)

また、②と③は同じアンカーボルトであることから、ナットの有無による周波数の違いを比較した結果を Fig.23 に示す。

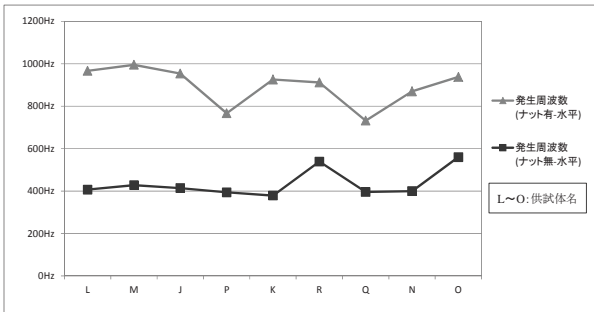


Fig.23 ナットの有無による発生周波数比較

上記より、発生周波数に違いはあるが同様の傾向を示していることから、ナットが発生周波数に影響を与えていることがわかる。

次に、ナットがある場合について、算出周波数との相関は認められたが乖離があることから、定数である λ の値が「1.875」ではなく別の定数で合致するか検証した。

・ λ について、Eq.(1)より発生周波数から逆算し λ の値を算出した。その結果、相関のみられたシングルナットのケースでは、逆算した λ 値が 1.6 弱となり「 $\pi/2$ 」に近いことが判明した。 $\lambda = \pi/2$ としたときの結果を Fig.24 及び 25 に示す。

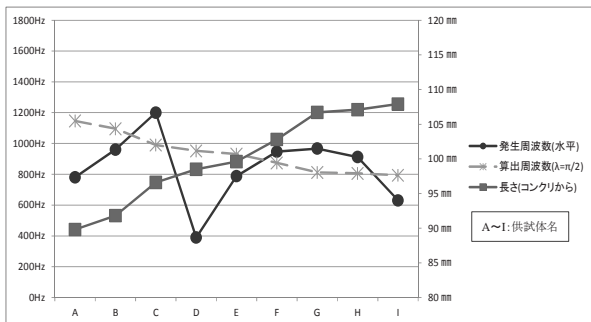


Fig.24 発生周波数と算出周波数(ダブルナット $\lambda = \pi/2$)

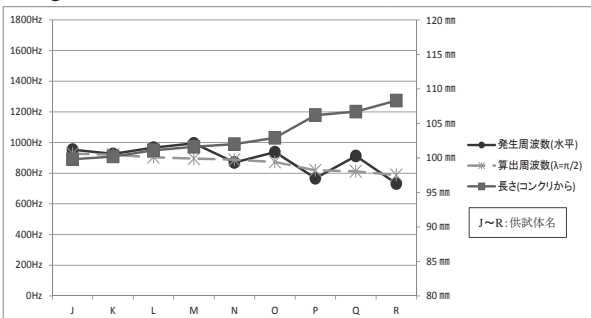


Fig.25 発生周波数と算出周波数(シングルナット $\lambda = \pi/2$)

上記より、ダブルナットの場合は、当初の検証と同様にあまり相関は見られないが、シングルナットの場合は発生周波数と $\lambda = \pi/2$ とした算出周波数に同様の傾向がみられ、また近い値となった。今後も更なる検証は必要だが、本検証を行った上では充分思慮できる結果と考える。

今回の検証から、公式により周波数若しくは長さを算出する場合は、ナットの影響を考慮する必要があるが、アンカーボルトの施工が適切に行われているかボルトを叩いた打音の周波数を確認することで判定できる可能性がある。

8. 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) アンカーボルトの打音

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ボルト打音の特徴

引き抜き力が低下したアンカーボルト (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打撃入力及管理が必要となる。現状においては、分析作業の省力化が課題として残るが、打音点検におけるナットの影響や、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。

(4) 今後の方針

アンカーボルト打音の周波数分析については、あと施工アンカーの施工後のチェックに有効な手法になり得るのではないかと考えられる。施工後のボルト長を計測し打音周波数との整合をとることで、コンクリートとの支持の確認が可能となると思われることから、現場での検証を今後は行っていきたい。