トンネル打音点検における 回転打音点検器具の打音特性

谷口 徹也1・桑野 代介2・中島 康貴3・小林 稔4・蒋 宇静5

¹正会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 営業部事業開発課 (〒810-0073 福岡県福岡市中央区舞鶴1-2-22) E-mail:t.taniguchi.a@w-e-kyushu.co.jp

²非会員 株式会社エルウィング(〒811-1353 福岡県福岡市南区柏原2丁目27-16) E-mail:kwn2216@geoform.co.jp

³非会員 リオン株式会社 開発部音響振動計測器開発課 (〒185-8533 東京都国分寺市東元町3-20-41) E-mail:yasutaka@rion.co.jp

⁴非会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 土木技術第二部トンネル技術課 (〒810-0073 福岡県福岡市中央区舞鶴1-2-22) E-mail:m.kobayashi.a@w-e-kyushu.co.jp

⁵フェロー会員 長崎大学工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

構造物点検は、近接目視による点検と、点検および診断結果の記録、保存が義務付けられている。トンネル点検では、近接目視ではく落の危険性がある損傷を発見次第、通行者への危険を未然に防ぐため点検ハンマによる打音点検を実施する。打音点検は、点検技術者が異常音を聴き、経験と感覚で健全性を判定するが、この点検手法では、健全性判定が点検技術者の経験度に依存し、なおかつ第三者による客観的検証が困難である。そこで、定量的判定、記録が可能となる回転打音点検器具をの開発を目指し、はく落危険箇所を模した供試体および現地トンネルで回転打音の採録とFFT分析を実施、検証した。その結果、トンネル内騒音、はく落の危険性がある損傷部の打音、および健全部の打音を識別できる可能性がある結果を得た。

Key Words: The damaged danger section, Continuous hammering test, FFT maximum hold analysis

1. はじめに

平成26年7月1日に道路法施行規則第4条が改正,施行され,構造物点検は「近接目視により5年に1回の頻度で行うことを基本」「点検および診断の結果について,その内容を記録し保存すること」と規定された。トンネル点検は,近接目視で覆エコンクリートのはく落により通行者へ危険を及ぼす兆候を見つけ出し,点検ハンマによる打音点検を実施する。現在の打音点検は,打撃音の音色を点検技術者が聴き,経験に基づく感覚で健全性を判定する。点検結果は,損傷状況写真,図面のほか,点検技術者が判定した健全性が記録される。1)2)この打音点検手法は,点検実施者の個人差により健全性判定結果が異なる可能性があり,また定性的な判定のため第三者の客観的検証が困難である。そこで筆者は、回転打音点検

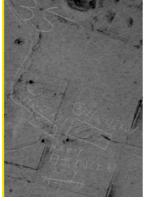
器具を活用した,回転打音の分析と判定による健全性評価と定量データの記録が可能となる点検判定器具を開発している.

本研究では、本開発の基礎研究として、交通などによる騒音が著しいトンネル内で、覆エコンクリートの健全な範囲の中に存在するはく落の危険性がある損傷を、回転打音を採録しFFT分析を行った識別法を検証した。本稿では、これらの研究成果について述べる。

2. 既往の研究

本研究で着目しているはく落の危険性がある損傷(以下,「はく落危険箇所」という)は図-1に示すような事象である. 既往の研究によると,回転打音検査器の打音シミュレーションおよび欠陥部を模し





三日月型ひび割れ

囲みひび割れ

図-1 はく落危険箇所の例

た供試体による周波数ピークや音圧の傾向 3) 4), 回転式打音検査器を使用したフーリエ変換とウェーブレット変換の特徴 5), 回転式打音検査器とテストハンマーの周波数特性の比較や、新たな周波数スペクトル差の定義による欠陥状態の評価に有効な指標の検討、健全度評価診断や欠陥検出率の検証 6)の研究がなされている. これらは、本研究と同様に欠陥部の検出が目的であるが、トンネル内の騒音下における回転打音の分析に関しては言及されていない. 本研究では、トンネル内の騒音下における回転打音の分析を試みたことに新規性があると考える.

3. 本研究の実施概要

本研究は、次の内容で構成する.

① 回転打音点検器具の回転打音室内採録検証

はく落危険箇所の一形態である, 「はく離」を模擬して作製した供試体に, 回転打音点検器具の回転打撃子を 転がして室内採録した回転打音を分析し, はく落危険箇 所の判定の可能性を検証した.

② 現地トンネルはく落危険箇所に対する回転打音検証 現地トンネルではく落危険箇所および健全部の回転打 音を採録し、両者の分析によるトンネル内騒音下での識 別の可能性について検証した.

4. 回転打音点検器具の回転打音室内採録検証

(1) 回転打音点検器具の特徴

回転打音点検器具は、回転打音点検器具の先端に六角形の回転打撃子(以下、「回転打撃子」という)を有し、コンクリート表面で回転打撃子を押し付けて転がすことで「カタカタ」という回転打音を発する。図 - 2に回転打音点検器具を示す。

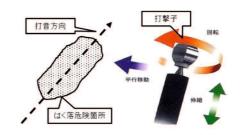


図-2 回転打音点検器具

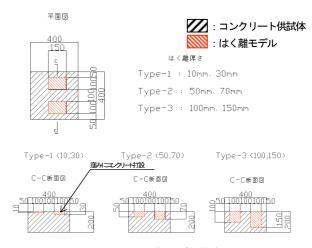


図-3 はく離モデル模式図

(2) 検証方法

本検証は、回転打撃子をはく落危険箇所上で転がした際の回転打音が、定量データとして取得できる可能性を 検証することを目的とする、検証手順を次に示す。

- ① はく落危険箇所の一形態である,各種厚さの「はく離」を模擬したコンクリート供試体(以下,「はく離モデル」という)を作製する.
- ② 回転打音点検器具にマイク, レコーダを取り付ける.
- ③ レコーダを録音状態にして、はく離モデル上で回転 打撃子を転がして回転打音を採録する.
- ④ 採録した回転打音を音圧波形とスペクトログラムで表し、はく離モデル厚さの違いによる特徴を検証する.

(3) 検証内容

a) コンクリートはく離モデルの作製

はく離モデルは,はく離の厚さを1cm,3cm,5cm,7cm,10cm,15cmの6種類設定して作製した.はく離モデルの作成手順は次のとおりである.

- 手順 1 コンクリート供試体を作製する.この際,は く離モデル部分に各種深さの窪みを設ける.
- 手順-2 窪み内面に、供試体とはく離モデルを縁切り する厚さ1mmのプラスチック板を貼り付ける.
- 手順-3 窪みにコンクリートを打設する.
- 手順-4 材齢28日まで気中養生する.
- 図 3, 図 4にはく離モデルの模式図および完成写真を示す。

b) 回転打音の採録

回転打音の採録は、回転打撃子をはく離モデル上で転がして行う。その際、転がし方による特徴の違いを検証する目的で、次の転がし方で行った。

①回転打音速度:速い (52cm/s), 普通 (30cm/s), 遅い (20cm/s)

②回転打撃子の押し付け方:強い,軽い(定性的)はく離モデル回転打音採録状況を図-5に示す.

c) 回転打音の分析結果

回転打音は、音圧波形とスペクトログラムで表した.本分析には、フリーソフトウェアの「Audacity」を使用した。音圧波形は、回転打音のはく離モデル部分通過時は、前後の波形より振幅が広くなる。スペクトログラムは、ハニング窓を使用した。回転打音がはく離モデル部分を通過する際、特定の周波数にピークが現れる。

(4) 分析結果

図 - 6にはく離モデル厚さ別のスペクトログラムを示す。回転打音速度は普通(30cm/s)である。この結果、はく離モデル上を回転打音が通過する際のピーク周波数が、はく離モデルの厚さが厚くなるに従い低くなる傾向になることがわかった。しかし一方で、ピーク周波数は、はく離モデルの厚さが厚くなるに従って不明瞭になる傾向にある。この傾向は、中山(2008)でも「欠陥の位置が供試体表面に近くになるにつれて、音圧が増大し、ピーク周波数が高周波域に変動することが確認された」(p1728)³)と同様の傾向を示している。

次に、回転打音速度の違いによるはく離モデル厚さ 5cmおよび15cmのスペクトログラムを図 - 7に示す. これらの結果、回転打音速度が変化してもピーク周波数が変化しない傾向が確認できた. 但し回転打音速度が遅くなると、打撃力が弱くなることでピーク周波数が不明瞭になる傾向にある.



図-4 はく離モデル完成状況

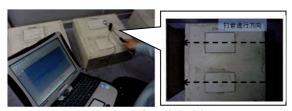


図-5 はく離モデル回転打音採録状況

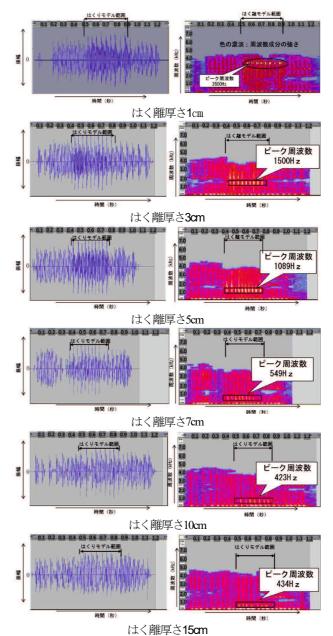


図-6 はく離厚さ別音圧波形,スペクトログラム

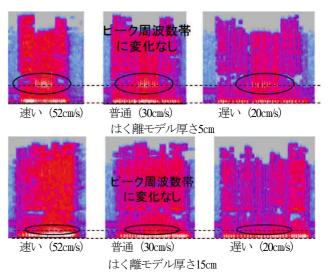


図-7 回転打音速度の違いによるスペクトログラム

はく離厚さごとの回転移動速度および回転打撃子の押し付け方による、ピーク周波数の分析結果を、**表** - 1および図 - 8に示す。この結果、部分的に該当しないケースがあるが、概ね回転打音速度や回転打撃子の押し付け強さに関わらず、はく離モデル厚さが厚くなるに従ってピーク周波数が低下する傾向になることがわかった。

5. 現地トンネルはく落危険箇所に対する回転打 音の検証

(1) 検証の目的

現地トンネルで実際に回転打音点検器具を使用するには、トンネル内で発生する換気設備や交通による著しい 騒音下で回転打音を聞き取らなければならない。その場合、騒音により回転打音がかき消されてしまい、聴覚による認識は困難である。そこで、騒音下における回転打音の周波数分析結果が、はく落危険箇所を識別可能であるかを検証することを目的として、現地トンネル内で回転打音採録および分析を実施した。

(2) 検証対象のはく落危険箇所

本検証対象のはく落危険箇所は、**図 - 1**に示すようなはく離とした. 回転打音採録対象トンネルは、**表 - 2**に示すとおりはく離が多く発生する矢板工法のトンネルを選定した.

表 - 1 回転打音の違いによるピーク周波数(Hz)

	回転打撃子の転がし方						
はく離 厚さ (cm)	回転打音速度			打撃子 押付け強さ			
	早い	普通	遅い	強い	軽い		
1	3486	3500	3530	3589	3568		
3	1421	1500	1425	1436	1356		
5	1086	1089	1065	1095	1104		
7	<u>733</u>	549	549	546	555		
10	<u>684</u>	423	468	<u>3238</u>	<u>655</u>		
1 5	382	434	422	1421	454		

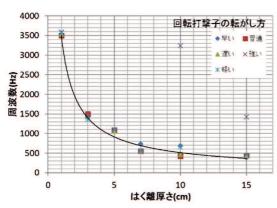


図-8 はく離モデル厚さとピーク周波数の関係

(3) 検証方法

a) 回転打音点検器具への計器設置

回転打音を採録するにあたり、回転打音点検器具への振動加速度ピックアップとマイクロホンの取り付け方法を検討した。振動加速度ピックアップは、回転打撃子からロッドに加えられた振動を極力減衰することなく測定できる位置に配置した。マイクロホンの取り付けは、①マイクロホンの方向がロッドの正面を向くこと、②回転打音子からロッドに加えられた振動がマイクロホンおよびプリアンプに極力伝わらないこと、③ロッドを伸ばしても回転打撃子とマイクロホンの距離が一定になる位置であること、に配慮して取り付け位置を決定した。

回転打音の採録は、L社製多機能計測器SA-A1を使用 し、トンネル壁面のはく落危険箇所で回転打撃子を転が す方法とした。図 - 9に回転打音点検器具への各機器の 取り付け状況を示す。

b) 現地トンネルでの回転打音採録方法

現地トンネルでの回転打音等の採録は、①健全部(清音部)、②はく落危険箇所(濁音部)、③トンネル内騒音、の3種類とし、多数の回転打音データ分析のばらつきを含めた検討を行うため、極力多くの回転打音および騒音を採録するものとした。はく落危険箇所は、「ひび割れ等により覆エコンクリート等のうき、はく離の兆候があり将来的に落下する可能性があるため監視を必要と

表 - 2 回転打音採録対象トンネル

トンネル名	延長	工法	供用年数
Aトンネル	780m	矢板工法	32年





図 - 9 回転打音点検器具への振動加速度ピックアップおよび マイクロホン取り付け状況

する状態」 2)と判定された箇所を対象とした. **表** - 3 に 採録データ箇所数を、回転打音採録手順を**表** - 4 に示す.

(4) 回転打音データの分析処理方法

回転打音データの分析処理手順を図 - 10に示す.回転打音,トンネル内騒音の切り出しには,L社製波形処理ソフトウェアAS-70を使用し,FFT分析,1/3オクターブバンド合成には,M社製数値計算言語MATLABソフトウェアを使用した.

a) 波形の切り出し

採録した 1 回の波形ファイルには、3~5 回程度の回転打音部分と、その前後にトンネル内騒音部分が含まれる. 図 - 11 に示すとおり波形ファイルを切出し、採録した 1 回の波形ファイルから、回転打音の波形データ 3 個と、騒音の波形データ 1 個を切り出した.

b) FFT分析

切り出した回転打音波形のFFT分析を行った. FFT分

表 - 3 採録データ個数

採録箇所	箇所数
トンネル内騒音	76
健全部	114
はく落危険箇所	114

表-4 回転打音採録手順

手順	作業内容
1	回転打撃子を健全部上で転がして回転打音を採録
2	回転打撃子をはく落危険箇所上で転がして回転打 音を採録
3	1,2のデータにおいて、転がす前後に採録されたトンネル内騒音を切り出し

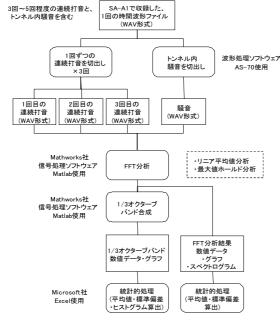


図 - 10 回転打音データ分析処理手順

析は、周波数分解能25Hz、ハニング窓、オーバーラップなしでフレーム(時間窓)をシフトしながらFFT分析、パワースペクトル密度を求め、その後各フレームの周波数ラインを最大値ホールド処理した。

リニア平均値は、各フレームの結果を平均して、パワースペクトル密度を次の式(la)に従って算出した.

$$P_{\text{ave}} (f_{\text{I}}) = 1/N \times \sum P(f_{\text{i}}, m)$$
 (1a)

ここに, Pare: パワースペクトル密度リニア平均値

f_i:周波数

P:パワースペクトル密度(dB/Hz)

N:総フレーム数

m:フレーム番号 (1~N)

最大値ホールドは、複数のフレームから求められた複数のパワースペクトルの各周波数ラインについて、フレーム番号 m 方向に最大値(lb)を求めた.

$$P_{\max}(f_i) = \max(P(f_i, m)) \tag{1b}$$

ここに、 P_{max} : パワースペクトル密度最大値ホールド (dB/Hz)

分析結果については、各々の結果すべてについてグラフの重ね書きを行い、FFTパワースペクトルがどのような周波数分布になっているかを確認した.

c) 1/3オクターブバンド合成

FFT 分析では、時間波形のサンプリング周波数と FFT 分析点数から導かれる周波数分解能に応じたパワースペクトルが算出される. しかし、パワースペクトルでは周波数分解能が細かく全体の傾向が掴みにくいため、パワースペクトルの各周波数ラインをパワー和して、1/3 オクターブバンド相当の周波数帯域幅に合成した.

1/3 オクターブバンド合成結果については、各々の結果すべてについてグラフの重ね書きを行い、傾向として1/3 オクターブバンド合成値がどのような分布になっているかを確認した。

d) 統計的処理

FFT分析結果の各パワースペクトルを対象に、各音データの平均値、標準偏差を求めた.また、1/3オクター

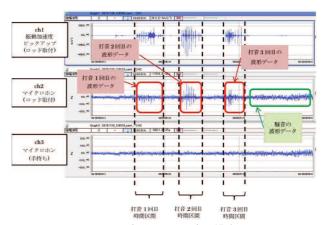


図 - 11 波形切り出し方法模式図

ブバンド合成結果のバンドレベルも同様に、各音データの平均値、標準偏差を求めた. 更に 1/3 オクターブバンド合成結果については、バンドレベル毎のヒストグラムも計算し、各音データの周波数分布を定量的に確認した.

(5) 回転打音等の採録

回転打音等の採録は、Aトンネルにおいて実施した. 図 - 12に回転打音等採録状況を示す.

(6) 回転打音等の分析結果

回転打音等の分析は、FFT分析、最大値ホールド分析、 最大値ホールド分析値を用いた1/3オクターブバンド分析、統計的処理を行った結果を示す.

a) FFT分析結果

時間変化と周波数の傾向を把握することを目的として、 採録データすべてについて、サンプリング512 Hz、フレーム長64点、オーバーラップ窓長の23(整数未満切捨て)の条件で短時間FFTを使用したスペクトログラムを 作成した. 図 - 13にスペクトログラムの例、図 - 14に はく落危険箇所、図 - 15に健全部、図 - 16に騒音の一 部を示す. この結果、個別の測定データにバラつきが大 きく、本研究の目的である騒音下におけるはく落危険箇 所と健全部の識別可能性の分析に適さないため、各周波 数ごとの平均や分布を検証する必要があると判断した.





図 - 12 現地トンネル回転打音等採録状況

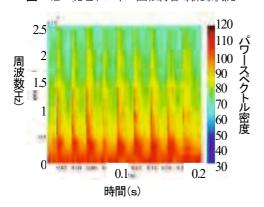
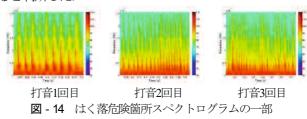
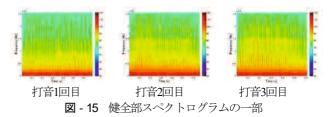


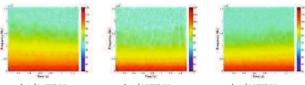
図 - 13 スペクトログラムの例

b) FFT最大値ホールド分析結果

FFT最大値ホールド分析結果について、図 - 17にはく落危険箇所、図 - 18に健全部、図 - 19に騒音の周波数分布を重ね書きグラフで示す。FFT分析のパラメータは、FFT分析点数を2048点とし分析周波数ステップを25Hz、ハニング窓、オーバーラップなしとした。分析結果グラフの横軸は周波数(Hz)、縦軸はパワースペクトル密度を示す。この結果、周波数分解能は細かいがレベル方向にバラつきが大きく、全体傾向が把握しづらいため、前項と同様に各周波数ごとの平均や分布を検証する必要があると判断した。







打音1回目 打音2回目 打音3回目 図 - 16 騒音スペクトログラムの一部

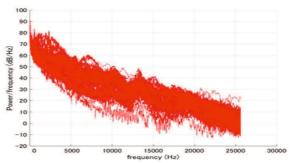


図 - 17 はく落危険箇所FFT最大値ホールド分析結果

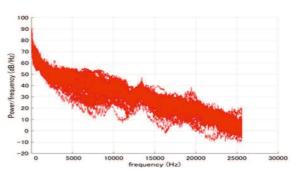


図 - 18 健全部FFT最大値ホールド分析結果

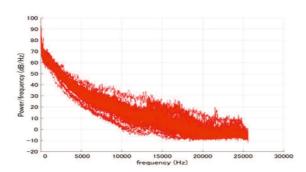


図 - 19 騒音FFT最大値ホールド分析結果

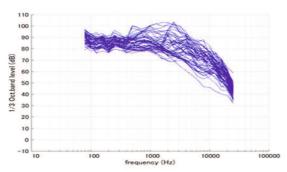


図 - 20 はく落危険箇所1/3オクターブバンド合成結果

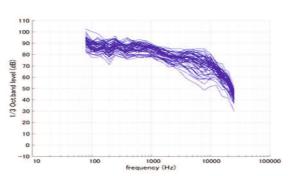


図 - 21 健全部1/3オクターブバンド合成結果

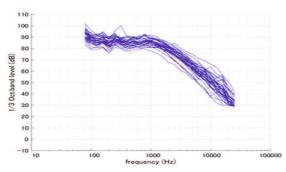


図 - 22 騒音1/3オクターブバンド合成結果

c) 1/3オクターブバンド合成結果

1/3オクターブバンド合成は、①各フレームをFFT分析、②各フレームのパワースペクトル、③リニア平均または最大値ホールド処理、④複数フレームを平均または最大値ホールドしたパワースペクトル、④周波数を1/3オクターブバンドレベル合成、の手順で行った。

最大値ホールドを用いた1/3オクターブバンド合成結果について、図 - 20にはく落危険箇所、図 - 21に健全

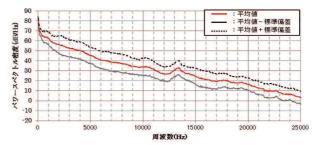


図 - 23 FFT最大値ホールド分析結果におけるはく落危険箇 所全データ平均および標準偏差

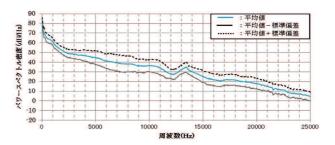


図 - 24 FFT最大値ホールド分析結果における健全部全データ 平均および標準偏差

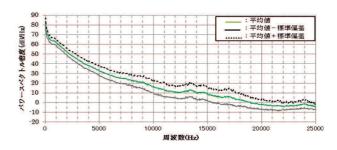


図 - 25 FFT最大値ホールド分析結果における騒音全データ平均および標準偏差

部, 図 - 22に騒音を重ね書きグラフで示す. これらの結果, FFT最大値ホールド分析結果と同様に, レベル方向にバラつきが大きいため, 各周波数ごとの平均や分布を検証する必要があると判断した.

d) 統計的処理

FFT最大値ホールド分析結果および1/3オクターブバンド合成結果について,各周波数ごとの平均や分布を検証するため,以下に示す統計的処理を行った.

①全データの平均値と標準偏差

②騒音と、はく落危険箇所および健全部の平均値比較 ③はく落危険箇所と健全部の平均値比較

なお, 1/3 オクターブバンド合成結果の平均値においては, ヒストグラムの比較も行った.

FFT最大値ホールド分析結果のはく落危険箇所、健全部、騒音各全データの周波数毎の平均値と標準偏差を、

図 - 23, 図 - 24, 図 - 25に示す. その結果, 特異的な傾向の変化は生じなかった.

次に、FFT最大値ホールド分析結果の騒音と、はく落

危険箇所および健全部について周波数毎の平均値の差分を比較した. 図 - 26の結果をみると, はく落危険箇所にでは2.2Hz程度以上の周波数で, 健全部では3.5kHz程度以上の周波数で, 騒音と各音の差分が6 dB程度以上となっている. このことから, 当該帯域以上の周波数であれば, 打音分析における騒音の影響は避けられると考えられる. なお, FFTリニア平均値分析結果でも同様の結果が得られた. 図 - 27にFFTリニア平均値分析結果における騒音と, はく落危険箇所および健全部の差分を示す.

続いて、FFT最大値ホールド分析結果のはく落危険箇所と健全部について、周波数毎の平均値の差分を求めた。この結果、図-28のとおり2.3 kHz付近の周波数で、はく落危険箇所と健全部の打音に6 dB程度の差分があることがわかる。FFTリニア平均値分析結果を用いて同様の比較を行ったところ、はく落危険箇所と健全部の差分が5 dBであったころから、FFT最大値ホールドのほうが差分が大きく、また周波数ごとの変化が小さいため、はく落危険箇所を識別しやすい可能性があることがわかった。図-29にFFTリニア平均値分析結果におけるはく落危険箇所と健全部の差分を示す。

1/3オクターブバンド合成結果について,はく落危険 箇所,健全部,騒音それぞれの全データについて,周波 数毎の平均値と標準偏差を図-30,図-31,図-32の とおり求めた.これらの結果,特異的な傾向の変化は生 じないことがわかった.

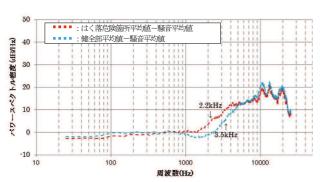


図 - 26 FFT 最大値ホールド分析における騒音と、はく落危険 箇所および健全部の差分

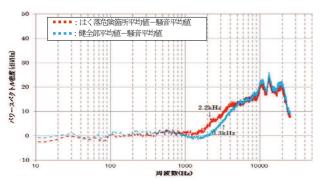


図 - 27 FFT リニア平均値分析における騒音と、はく落危険箇所および健全部の差分

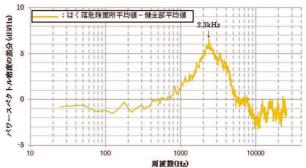


図 - 28 FFT 最大値ホールド分析におけるはく落危険箇所 と健全部の差分

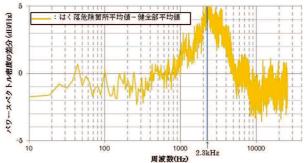


図 - 29 FFT リニア平均値分析におけるはく落危険箇所と 健全部の差分

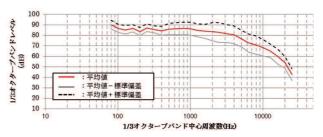


図-30 はく落危険箇所全データ平均および標準偏差

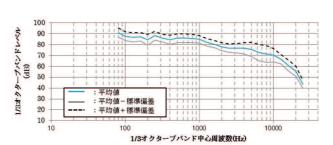


図 - 31 健全部全データ平均および標準偏差

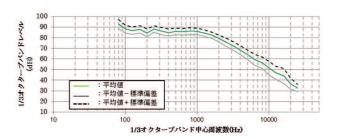


図 - 32 騒音全データ平均および標準偏差

次に騒音と、はく落危険箇所および健全部のFFT最大値ホールド分析結果を用いた1/3オクターブ合成結果について、周波数毎の平均値の差分を比較した. 図 - 33 の結果をみると、はく落危険箇所では2.5 kHz以上の周波数帯域で、騒音と各打音の差分が6 dB程度以上となっている. このことから、これらの帯域以上の周波数であれば、打音分析における騒音の影響は避けられると考えることができる. なお、FFTリニア平均値分析結果でも同様の結果が得られた. 図 - 34にFFTリニア平均値分析結果における騒音と、はく落危険箇所および健全部の差分を示す.

続いて、FFT 最大値ホールド分析結果を用いたはく落 危険箇所と健全部の 1/3 オクターブ合成結果について、 周波数毎の平均値の差分を求めた. この結果、図 - 35 に示すとおり、2.5kHz の周波数帯域で、はく落危険箇所 と健全部の打音に 6dB 程度の差分がある. また 10kHz、 20kHzで、はく落危険箇所の打音は健全部の打音より 1 dB 程度小さくなっている. FFT リニア平均値分析結果 を用いて同様の比較を行ったところ、はく落危険箇所と 健全部の差分が 5dB であったことから、FFT 最大値ホー ルドを用いたほうが差分を捉えやすい可能性があること がわかった.図 - 36に FFT リニア平均値分析結果を用

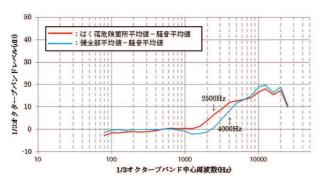


図 - 33 FFT 最大値ホールド分析結果を用いた 1/3 オクターブ バンド合成値の平均値における,騒音と,はく落危険箇 所および健全部の差分

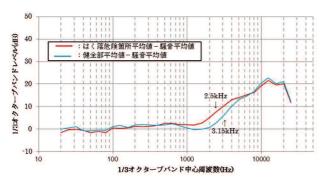


図 - 34 FFT リニア平均値分析結果を用いた 1/3 オクターブバンド合成値の平均値における,騒音と,はく落危険箇所および健全部の差分

いた 1/3 オクターブバンド合成結果の平均値における,はく落危険箇所と健全部の差分を示す.

最後に、スペクトルの平均値だけでなく、個々のデー タを含むバラつきを含むはく落危険箇所と健全部の打音 の違いを検証するため、2.5 kHz, 10 kHz, 20 kHz の周波 数帯域での,各音データのヒストグラムを比較した. ヒ ストグラムは 1 dB ステップで算出したもので、その音 圧レベルの前後±0.5 dB の範囲における打音データの個 数を示している. 図 - 37、図 - 38、図 - 39 に上記周波 数バンドにおける FFT 最大値ホールド分析結果を用い た 1/3 オクターブバンド合成値の平均値における、各音 データのヒストグラムを示す. これらの結果, 2.5kHz の 周波数バンドについて、健全部の打音の頻度は 78dB 程 度に集中しているが, はく落危険箇所の打音の頻度は, それより大きい音圧レベルに広く分布している. この傾 向は、はく落危険箇所と健全部の打音識別の手がかりと して利用できる可能性がある. 10 kHz と 20 kHz の周波数 バンドについては、上述の傾向は見られず、統計的には く落危険箇所と健全部の打音の周波数分布に差があると はいえない. FFT リニア平均値分析結果を用いた 1/3 オ クターブバンド合成値の平均値における、各音データの ヒストグラムを比較した結果においても、同様の結果が

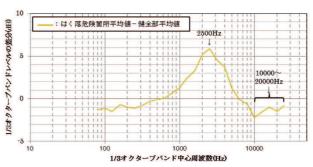


図 - 35 FFT 最大値ホールド分析結果を用いた 1/3 オクター ブバンド合成値の平均値における,はく落危険箇所と健 全部の差分

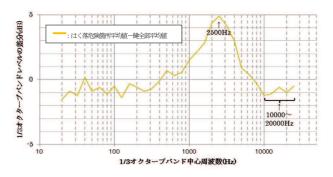


図 - 36 FFTリニア平均値分析結果を用いた1/3オクターブバンド合成値の平均値における,はく落危険箇所と健全部の差分

得られた. 図 - 40, 図 - 41, 図 - 42 に FFT リニア平均 値分析結果を用いた 1/3 オクターブバンド合成値の平均 値における,各音データのヒストグラムを示す.

(7) 検討結果

FFTリニア平均値分析およびFFTリニア平均値を用いた1/3オクターブバンド合成、FFT最大値ホールド分析およびFFT最大値ホールドを用いた1/3オクターブバンド合成による検討を行った結果、次の事項の知見が得られた.

- ① はく落危険箇所の打音が騒音の影響を避けられる周波数帯は、FFTスペクトルで2.2kHz、1/3オクターブバンド合成値で1.6kHz以上の周波数帯で可能と考える.
- ② 以下の周波数帯において、はく落危険箇所の打音と 健全部の打音を識別できる手掛かりとして利用できる 可能性がある.この傾向はFFTリニア平均値を用いる 場合よりFFT最大値ホールドを用いた場合のほうが特 徴を捉えやすい傾向にある.
 - ・FFT分析値で2.3kHz付近で音圧レベル差が生ずる.

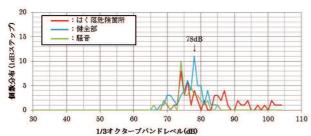


図 - 37 FFT 最大値ホールド分析結果を用いた 1/3 オクターブ バンド合成値の平均値における,各音データのヒスト グラム(2.5kHz)

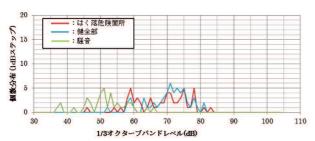


図 - 38 FFT 最大値ホールド分析結果を用いた 1/3 オクターブ バンド合成値の平均値における,各音データのヒスト グラム(10kHz)

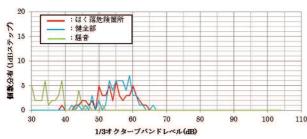


図 - 39 FFT 最大値ホールド分析結果を用いた 1/3 オクターブ バンド合成値の平均値における,各音データのヒスト グラム(20kHz)

・1/3オクターブバンド合成値で2.5kHz付近で音圧レベル差が生ずる.

6. まとめ

回転打音点検器具を活用した,一貫した健全性判定と定量データ記録が可能な点検,判定器具の開発にあたり,回転打音の分析検証を行った結果,トンネル内の騒音下において,はく落危険箇所と健全部を識別できる可能性があることを本検証において明らかにすることができた.本研究における今後の方向性は,次の事項が考えられる.
① はく落危険箇所のヒストグラムが単純な正規分布の

)はく落危険箇所のヒストグラムが単純な正規分布のような単一峰でなく、レベルが高い方に裾が長い形になっている。これは、様々な音のはく落危険箇所があることを示していると考えられる。はく落危険箇所と健全部を適切に識別するためには、はく落危険箇所の健全性レベルを細分化し、それぞれの特徴を明らかにする必要がある。

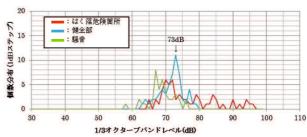


図 - 40 FFT リニア平均値分析結果を用いた 1/3 オクターブバンド合成値の平均値における,各音データのヒストグラム(25kHz)

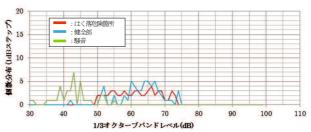


図 - 41 FFT リニア平均値分析結果を用いた 1/3 オクターブバンド合成値の平均値における,各音データのヒストグラム(10kHz)

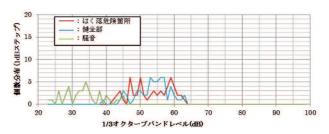


図 - 42 FFT リニア平均値分析結果を用いた 1/3 オクターブバンド合成値の平均値における,各音データのヒストグラム(20kHz)

- ② 上述の知見が1/3オクターブバンドより狭い周波数 帯域にあるのを確認できるならば、より帯域の狭い 1/12オクターブバンドやFFTパワースペクトルでの分析 結果を使うことで、特徴がより顕著にとらえられる可 能性がある.
- ③ 上述のはく落危険箇所と健全部を識別できる可能性がある2.5kHzの周波数のみではなく、統計的に特徴が得られる複数の周波数を適切に統合すると、より良い識別の指標の作成の可能性がある.
- ④ 室内試験の結果から、時間波形から音圧、周波数の振幅のピーク値が突出することがはく落危険箇所の特徴であることがわかった。今回の現地トンネルで採録した打音の検討は、周波数領域で分析を行ったが、時間波形から得られるパラメータを周波数領域の情報に加えることが有効である可能性がある。
- ⑤ 今回の打音等の採録は、1か所のトンネルのみであった。トンネルは、建設年代等により覆エコンクリートの品質が異なるため、はく落危険箇所を識別する周波数帯が異なることが考えられる。従って、様々な状況の異なるトンネルにおける検討が有効である。

今後は、上記方向性に基づき検証箇所および内容を 広げ、はく落危険箇所と健全部の識別の可能性を追求 し、点検判定器具の開発につなげていく所存である.

参考文献

- 1) 道路トンネル定期点検要領(2014年6月国土交通省道路局)
- 2) 保全点検要領構造物編(2015年4月 西日本高速道路株式会社)
- 3) 三好茜,園田佳臣,中山歩,吉田直昭:回転式打音検査によるコンクリート構造物の欠陥状態に関する解析的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.30,No.3,pp1723-1728,2008
- 4) 園田佳臣,中山歩,三好茜,吉田直昭:回転式打音法の打音特性に関する基礎的研究,土木学会論文集A, Vol.65 No.2, pp514-522, 2009
- 5) 山田裕志, 川端健太, 園田佳臣: コンクリート構造物の打音検査に関する時間 周波数解析を用いた基礎的研究, 土木学会西部支部研究発表会, pp65-p66, 2010
- 6) 園田佳臣,渡邊達郎:回転式打音検査の欠陥検出能力に関する定量的評価,構造工学論文集,Vol.59A,pp682-692,2013(2016. 8.5受付)

TAPPING SOUND CHARACTERISTIC OF ROTARY HAMMERING TEST DEVICE FOR TUNNEL LINING INSPECTION

Tetsuya TANIGUCHI, Daisuke KUWANO, Yasutaka NAKASHIMA, Minoru KOBAYASHI, Yujing Jiang

For the structure examining, examination due to the proximity visual, recording and storage of the results are required. If the abnormality is found in the close visual monitoring, the hammering sound examination by the hammer should be carried out. The same applies to the tunnel lining concrete, the degree of damage on lining is determined based on the hammering test, and the damage photos and figures is stored. However, this examining technique based on the technician's experience so it has a limitation for wide application. Therefore, we have developed the rotation hammering test device which enabled the quantitative determination and recording of the examination results. In this paper, it was carried out the recording and FFT analysis of continuous tapping sound, furthermore, the distinction between the tapping sound of the damaged point, that of the healthy section and the noise in the tunnel was also carefully investigated based on the field investigations and analyses.