

# 覆工打音調査時の振動スペクトルを活用した剥落安全性評価法

津野 究\* 嶋本 敬介\*

## Evaluation Method of Safety Factor Against Falling Lining Concrete with Vibration Spectrum at Hammering Test

Kiwamu TSUNO Keisuke SHIMAMOTO

This paper describes hammering tests with specimens simulating tunnel lining and shows that the decay time tends to be long and a peak in the eigen frequency was clearly identified in case of the specimen with one inner cavity. Three-dimensional numerical calculation was also carried out and the results were compared with the hammering test results. It reveals that the existence of an inner cavity causes clear peaks in the spectrum and the peak frequency is influenced by its shape. This paper also proposes the method to evaluate the safety factor against falling lining concrete by comparing the shear force acting on the crack surface with its shear strength.

キーワード：トンネル覆工，剥落，打音調査，振動特性，数値解析

### 1. はじめに

鉄道トンネルにおいては、目視と打音調査を主体とした全般検査が定期的に行われており、覆工コンクリートの剥落に対しては、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ という指標を用いて健全度の判定が行われている<sup>1)</sup>。この打音調査は、簡便であり即時に結果が得られるという利点があるが、検査者の経験や感覚に頼っている部分が多く、判定結果が定性的で個人差が比較的大きい。

打音調査は、ハンマー打撃により振動を発生させ、これに伴う音を判定に用いており、振動を利用した構造物の健全性評価法についても、これまでも検討が行われている<sup>2) 3)</sup>。しかし、打音調査時の振動特性と剥落に対する安全性の関係が定量的に把握されていないのが現状である。また、個別のひび割れ、浮き等の変状に対して、どの程度、剥落に対して安全率が見込めるかを定量的に評価する方法は示されていない。

そこで、本研究では、トンネル覆工を模擬したコンクリート試験体の打音試験を行って内部空洞の有無やコンクリートの厚さが表面の振動特性に及ぼす影響について検討するとともに、これを対象とした三次元的解析を行って解析手法の妥当性を検証した。そのうえで、三次元的解析を用いて、覆工厚さや内部空洞の範囲や深さ等の条件を変えたパラメトリックスタディを行い、振動特性に及ぼす影響を把握した。さらに、文献4、5に示す方法を用いてひび割れ面に作用するせん断応力とせん断抵抗力を比較することにより剥落に対する安全率を算出し、振動特性と剥落安全率の関係を整理した<sup>6)</sup>。

### 2. 打音試験

本章では、トンネル覆工を模擬したコンクリート試験体の打音試験を行って内部空洞の有無やコンクリート厚さが表面の振動特性に及ぼす影響について検討した結果を示す。

#### 2.1 試験概要

試験は、トンネル覆工を模擬したコンクリート試験体をインパクトハンマーで打撃することによって行った(図1)。試験体は、図2に示す試験体A(厚さ500mm、内部空洞なし、コンクリートの弾性係数40000N/mm<sup>2</sup>)および試験体B(厚さ500mm、内部空洞あり、コンクリートの弾性係数18000N/mm<sup>2</sup>)である。試験体の背面に空洞はなく、砂が転圧されている。

試験にあたっては、コンクリート表面の中心を打撃し、中心から水平方向に50mm(V1測点)、150mm(V2測点)および300mm(V3測点)の位置で、打撃時を含めた0.16秒間の振動加速度を計測した。

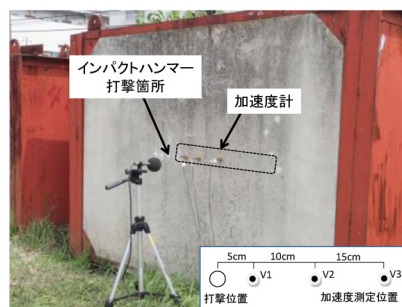
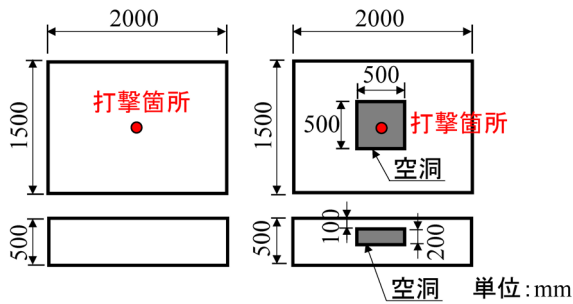


図1 打音試験の概要

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室



(a) 試験体 A (b) 試験体 B

図2 試験体

## 2.2 試験結果

V1 測点で得られた時刻歴加速度波形を図3に示す。これより、試験体 A については、加振後 0.005 秒ほどで振動が減衰し収束している。一方、内部空洞のある試験体 B では、収束に 0.05 秒ほどかかっており、内部空洞のない試験体 A と比較して、減衰にかかる時間が長い結果となっている。

つぎに、フーリエ変換により周波数分析を行った結果を図4に示す。これより、内部空洞のある試験体 B については、内部空洞の範囲に位置する V1 測点および V2 測点において、1000Hz 付近に板のたわみ振動と推定される明瞭なピークが確認できるが、試験体 A では明瞭なピークが確認できない結果となっている。

## 3. 三次元動的解析

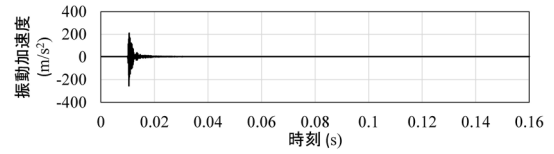
本章では、2章で実施した打音試験を対象として三次元動的解析によるシミュレーションを行い、解析手法の妥当性を検証するとともに、パラメトリックスタディを行った結果を示す。

### 3.1 打音試験のシミュレーション解析

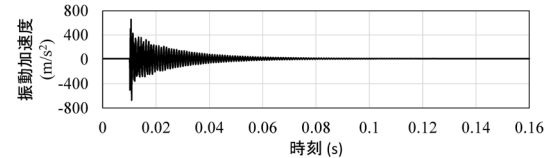
#### 3.1.1 解析概要

解析に用いた有限差分法プログラムは FLAC3D である。なお、ここでは、時刻歴応答解析を行った。

解析モデルは、打音試験で用いた試験体が上下左右対称であることから、図5に示すような 1/4 モデルとした。解析メッシュは、6面体ソリッド要素を用いてモデル化しており、要素が1辺 25mm の直方体となるように分割した。入力物性値については、実験に合わせ、コンクリートの弾性係数  $E$  を試験体 A では  $40000\text{N/mm}^2$ 、試験体 B では  $18000\text{N/mm}^2$ 、密度  $\rho$  を  $2.3\text{g/cm}^3$ 、ポアソン比  $\nu$  を 0.2 とした。背面地盤については、弾性係数  $E$  を  $40\text{N/mm}^2$ 、密度  $\rho$  を  $1.5\text{g/cm}^3$ 、ポアソン比  $\nu$  を 0.35 とした<sup>6)</sup>。

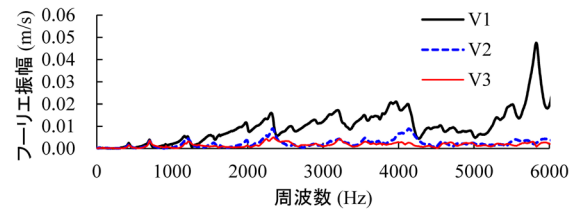


(a) 試験体 A

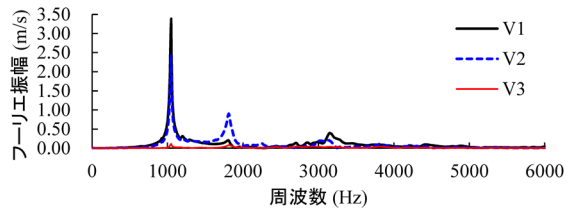


(b) 試験体 B

図3 時刻歴加速度 (V1 測点)



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図4 振動加速度のスペクトル

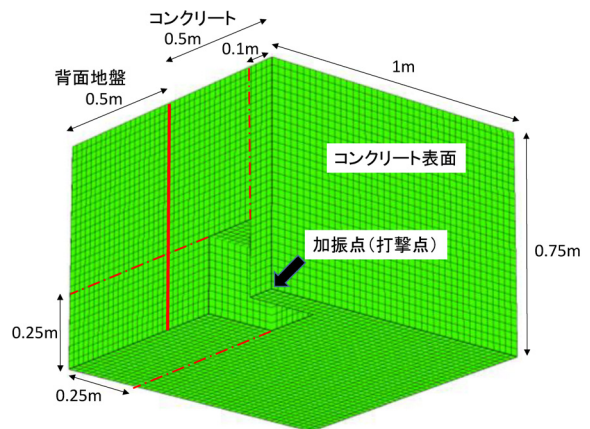


図5 解析モデル

加振については、インパクトハンマーで得られた時刻歴の加振力波形を打撃位置（コンクリート表面中心）に節点力として与えて、0.16 秒間の解析を実施した（図 6）。

### 3.1.2 解析結果

解析より得られた V1 測点の時刻歴加速度波形を図 7 に示す。ここでは、打音試験の結果も併せて示し、比較している。これより、打音試験では、内部空洞がある場合に減衰時間が長くなる傾向が見られたが、解析結果でもこの傾向が確認できる。

つぎに、試験体 A について、解析より得られた V1 測点の振動加速度スペクトルを、打音試験の結果と併せて図 8(a) に示す。これより、解析結果は打音試験の結果と概ね対応している。また、試験体 B について、V1、V2 および V3 測点の振動加速度スペクトルを図 8(b)~(d) に示す。打音試験では、内部空洞がある試験体 B において、空洞範囲の測点である V1 および V2 測点で 1000Hz 付近のピークが確認されたが、解析でも同様の傾向が確認できる。また、空洞範囲外の V3 測点についてもこれが明瞭でなくなることも含めて、解析により概ね打音試験の結果を表現できている。

## 3.2 三次元動的解析によるパラメトリックスタディ

### 3.2.1 検討概要

つぎに、3.1 節で妥当性を確認した解析モデルを用いて、実トンネルを想定した三次元動的解析を行い、内部空洞の範囲や深さの影響について検討した結果を示す。

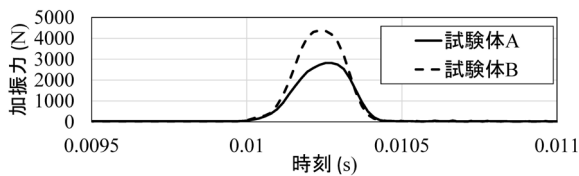
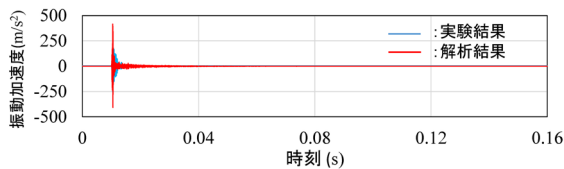
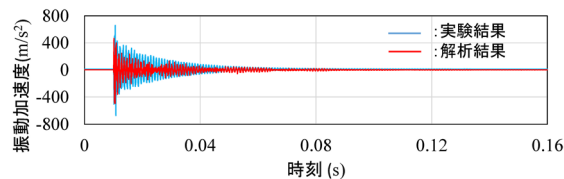


図 6 入力加振力

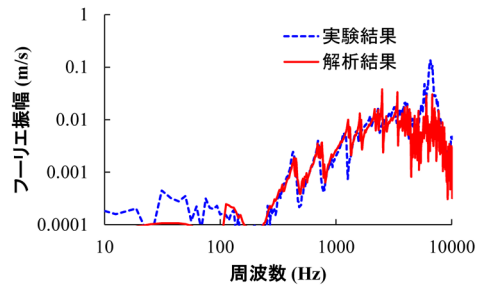


(a) 試験体 A

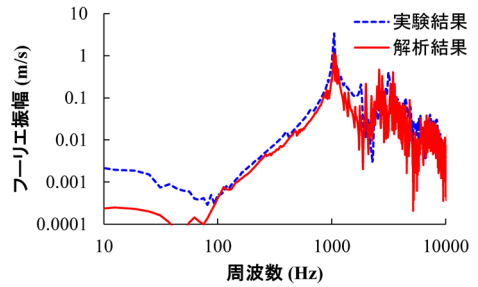


(b) 試験体 B

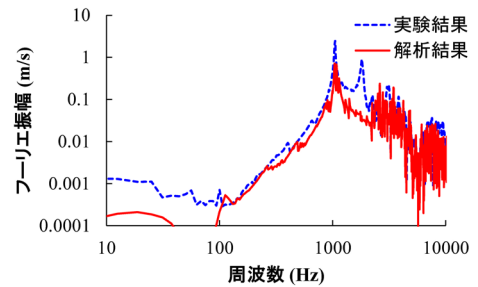
図 7 時刻歴加速度の比較 (V1 測点)



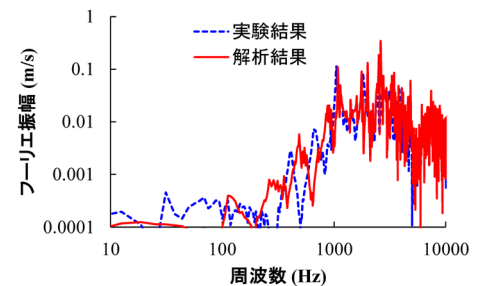
(a) 試験体 A, V1 測点



(b) 試験体 B, V1 測点



(c) 試験体 B, V2 測点



(d) 試験体 B, V3 測点

図 8 振動加速度スペクトルの比較

解析モデルについては、3.1 節と同様のモデルを基本とし、上下左右対称を仮定して 1/4 モデルとした。

コンクリートの物性値については、既往の鉄道トンネルの調査結果をもとに設定し、弾性係数  $E$  を  $26000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu$  を 0.2、密度  $\rho$  を  $2.35\text{g/cm}^3$  と設定した。背面の砂については、弾性係数  $E$  を  $40\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu$  を 0.35、密度  $\rho$  を  $1.5\text{g/cm}^3$  とした。

加振については、式 (1) による正弦波を加振点に入力した。

$$F(t) = 1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

ただし、

- $F(t)$ : 加振力 (kN)
- $t$ : 時刻 (s)
- $T$ : 加振時間 (s)

打音試験におけるインパクトハンマー加振時間は 0.0005s (500 $\mu$ s) 程度であることから (図 6)、式 (1) 中の  $T$  を 500 $\mu$ s とした。また、本章における解析では、打撃時 (加振開始時) を  $t=0$ s とし、0.08s 間の解析を実施している。

### 3.2.2 内部空洞の範囲の影響

図 9 に示すような内部空洞のある解析モデルを用いて、内部空洞の範囲の影響を検討した。ここでは、空洞深さを 100mm とし、空洞範囲を変えたケースを設定した。空洞範囲は、500 × 500mm, 600 × 600mm, 800 × 800mm および 1000 × 1000mm の 4 ケースとした。

内部空洞の範囲を変えた場合について、加振点から 50mm 離れた位置 (V1 測点) の振動加速度のフーリエスペクトルを比較した結果を図 10 に示す。これより、内部空洞がある場合には明瞭なピークが見られる。また、いくつか発現するピーク周波数のうちの最低周波数は、内部空洞の範囲が大きいかほど低くなる傾向が見られる。

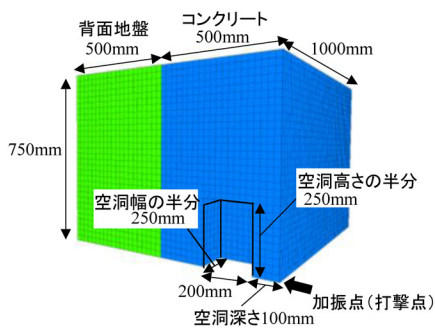


図 9 解析モデルの例

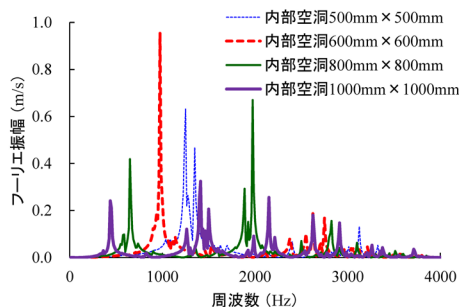


図 10 空洞範囲を変えた場合の振動加速度スペクトルの比較 (V1 測点)

### 3.2.3 内部空洞の深さの影響

3.2.2 項と同様の解析モデルを用いて、内部空洞の深さの影響を検討した。ここでは、内部空洞の高さを 500mm, 幅を 500mm とし、空洞深さを変えたケースを設定した。空洞深さは、100mm, 75mm, 50mm および 25mm の 4 ケースとした。

内部空洞が存在する深さを変えた場合について、加振点から 50mm 離れた位置 (V1 測点) の振動加速度のフーリエスペクトルを比較した結果を図 11 に示す。これより、いくつか発現するピーク周波数のうちの最低周波数は、内部空洞の深さが小さいほど低くなる傾向が見られる。また、内部空洞の深さが小さくなるにつれて、ピーク周波数のフーリエ振幅が急激に大きくなることを確認できる。

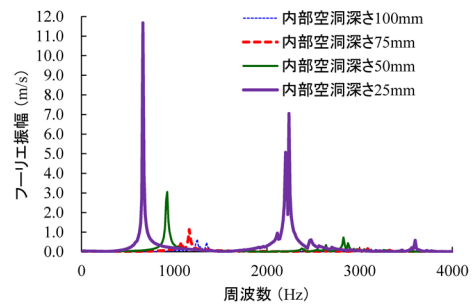


図 11 内部空洞の深さを変えた場合の振動加速度スペクトルの比較 (V1 測点)

## 4. 剥落に対する安全性の検討

本章では、ひび割れ面に作用するせん断応力とせん断抵抗力を比較することにより剥落安全率を算出し、振動特性と剥落安全率の関係を整理した結果を示す。

### 4.1 剥落安全率の算出方法

図 12 に示すような、トンネルの無筋コンクリート覆工から、内部空洞およびひび割れが閉合した剥落片 (幅  $B$ , 奥行き  $D$ , 厚さ  $H$ ) が剥落することを想定して検討を行った。もし、ひび割れ面にまったく凹凸が無い場合、ひび割れが閉合した段階で剥落片が落下することになる。しかし、実際はひび割れ面の凹凸に起因して、せん断抵抗力が発生することから、ひび割れ面に作用するせん断応力とせん断抵抗力を比較することで剥落に対する安全率を定量的に評価する。

図 12 の場合、剥落片の自重および作用する外力によって、ひび割れ面 (剥落片の側面に該当する 4 面) にせん断応力  $\tau_a$  が発生する。このひび割れ面に発生するせん断応力  $\tau_a$  は、式 (2) のようになる。

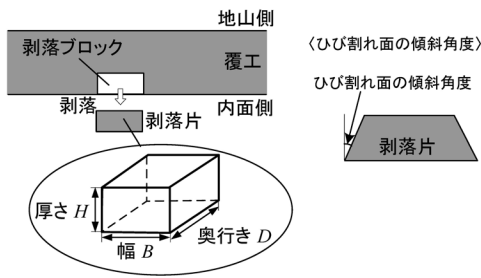


図 12 剥落のモデル化の概念図

$$\tau_a = \frac{W}{A} + \frac{fBD}{A} = \frac{\gamma BD}{2(B+D)} + \frac{fBD}{2H(B+D)} \quad (2)$$

ただし、

- $\tau_a$ : ひび割れ面に発生するせん断応力 (kN/m<sup>2</sup>)
- $W$ : 剥落片の自重 (kN)
- $\gamma$ : 剥落片の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $B$ : 剥落片の幅 (m),  $D$ : 剥落片の奥行き (m)
- $H$ : 剥落片の厚さ (m)
- $A$ : ひび割れ面の面積 (=2H(B+D)) (m<sup>2</sup>)
- $f$ : 外力 (幅 B, 奥行き D の範囲に作用する応力) (kN/m<sup>2</sup>)

一方、ひび割れ面の凹凸に起因して、せん断抵抗力が発生する。せん断抵抗力の最大値は、ひび割れ面の凹凸形状、傾斜角度、剥落片の一軸圧縮強さ等により決まるが、これをひび割れ面のせん断耐力  $\tau_b$  とする。ここで、ひび割れ面に作用するせん断応力  $\tau_a$  がひび割れ面のせん断耐力  $\tau_b$  より大きくなると、覆工片が剥落することから、剥落安全率  $F_s$  を式 (3) で定義する。剥落安全率  $F_s$  が 1 を下回ると、剥落が発生することになる。

$$F_s = \frac{\tau_b}{\tau_a} \quad (3)$$

#### 4.2 ひび割れ面のせん断耐力

文献 4, 5 に示すひび割れ面のせん断過程のシミュレーション手法を用いて、せん断変位とせん断応力の関係を求め、これをもとにひび割れ面のせん断耐力  $\tau_b$  を算出した。本手法では、材料強度 (一軸圧縮強さ)、基礎摩擦角、ひび割れ幅、3 次的に広がる離散化された凹凸形状 (ラフネス) のデータを入力すれば、ピークから軟化し残留状態に至るせん断過程について、せん断変位とせん断応力の関係等が予測できる。

なお、既往の研究<sup>4)</sup>において、実トンネルから採取したひび割れ面の JRC 値 (岩盤不連続面の凹凸の指標) の平均値は、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリート梁のせん断試験により作製した面とほぼ一致する結果

となっている。そこで、本研究では、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリート梁のせん断試験により作製した面を、実トンネルのひび割れ面の代表的な凹凸形状として検討に用いた。

一軸圧縮強さは、既往の鉄道トンネルの調査結果<sup>7)</sup>より 18N/mm<sup>2</sup> とし、基礎摩擦角 (凹凸が無い場合の摩擦角) を既往の研究<sup>4)</sup>をもとに 32° とした場合について、ひび割れ面の傾斜角度を変えてせん断応力を算定した。ひび割れ幅 1mm の場合について、ひび割れ面の傾斜角度を変えたケースのせん断変位とせん断応力の関係の一例を図 13 に示す。これより、ひび割れ面の傾斜角度が大きいほど、せん断応力が小さくなる傾向が確認できる。そのうえで、せん断応力の最大値をせん断耐力  $\tau_b$  として算定した。ひび割れ幅 0mm, 1mm, 2mm および 3mm の場合について、傾斜角度を 0° ~ 60° まで 5° ずつ変えてせん断耐力  $\tau_b$  を算定した結果を図 14 に示す。これより、ひび割れ面の傾斜角度が大きくなるほど、せん断耐力が小さくなる傾向が確認できる。

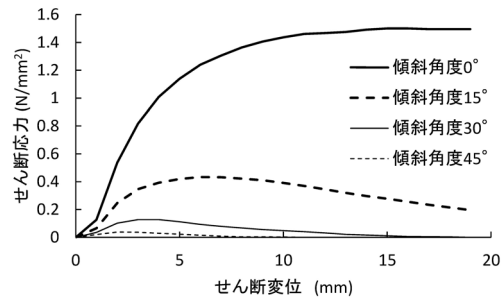


図 13 せん断変位とせん断応力の関係 (一軸圧縮強さ 18N/mm<sup>2</sup>, ひび割れ幅 1mm)

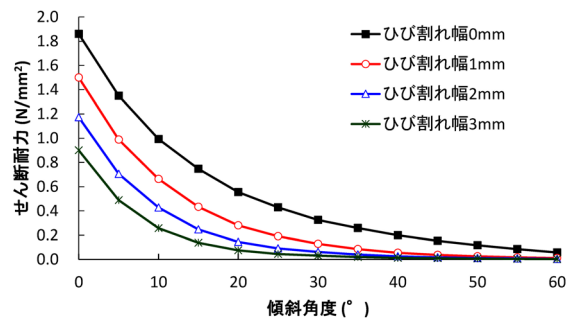


図 14 ひび割れ面の傾斜角度とせん断耐力の関係 (一軸圧縮強さ 18N/mm<sup>2</sup>)

#### 4.3 振動特性と剥落安全率の関係

3 章における検討から、空洞範囲が大きいほど、また、空洞深さが小さいほど、ピークが発現する周波数が低くなる傾向を確認した。そこで、図 15 に示すように内部空洞があり、ひび割れが繋がって剥落ブロックが形成されることを想定して、剥落安全率を試算し、ピークが発

現する周波数との関係を整理した。

打音時の検討については、内部空洞にひび割れが繋がっていない、図 15(a) の状況（一軸圧縮強さ  $18\text{N/mm}^2$ 、空洞範囲  $B500\text{mm} \times D500\text{mm}$ ）を考え、内部空洞の深さ  $h$  を 4 ケース（ $100\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$ 、 $50\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ ）設定してピークが発現する周波数を算出した。つぎに、剥落安全率の算出に当たっては、図 15(b) の状況を考え、4.1 節で示した方法を用いて、ひび割れ幅  $1\text{mm}$ 、 $2\text{mm}$  および  $3\text{mm}$  の 3 ケースを検討した。ひび割れ面の傾斜角度については、 $45^\circ$  と仮定して試算を行った。

試算結果を図 16 に示す。これより、剥落ブロックを構成するひび割れ幅が  $1\text{mm}$  の場合、ピーク周波数が概ね  $1000\text{Hz}$  より小さくなると、剥落安全率が 3 を下回ることになる。このように、一軸圧縮強さ、内部空洞の範囲、ひび割れ面の凹凸や傾斜角度等を仮定すれば、打音時の振動特性より得られるピーク周波数と剥落安全率の関係が整理できるようになる。

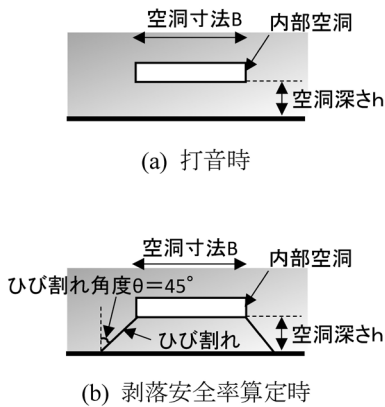


図 15 検討条件

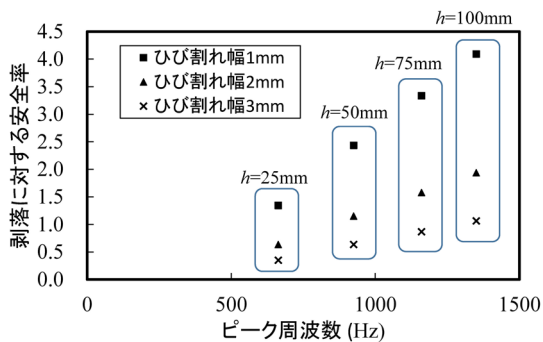


図 16 ピーク周波数と剥落安全率の関係  
(内部空洞： $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ )

## 5. まとめ

本研究では、打音試験や三次元解析により、トンネル検査における打音調査時の変状の程度と振動特性の関係を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- ・覆工を模擬した試験体を打撃する打音試験を行い、内部空洞がある場合に減衰に要する時間が長くなることや、固有振動に相当する周波数に明瞭なピークが見られる等の特性を把握した。
- ・三次元的解析を行い、打音試験と対応していることを確認するとともに、内部空洞により振動スペクトルに明瞭なピークが見られることや、卓越周波数は空洞範囲や空洞深さの影響を受けること等の振動特性を把握した。
- ・ひび割れ面のせん断応力とせん断抵抗力を比較することにより剥落安全率を算出する手法を提案し、ピークが発現する周波数と剥落安全率との関係の一例を示した。これより、ピークが発現する周波数が低いほど、剥落安全率が小さい傾向を把握した。

## 文 献

- 1) 国土交通省：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル、丸善、2007
- 2) 榎本秀明，稲川敏春，横山秀史：トンネル覆工コンクリートを対象とした打音検査装置の最適仕様の検討，土木学会論文集，No. 784/VI-66，pp. 87-97，2005
- 3) 保田尚俊，御崎哲一，島田義則，江本茂夫，金田道寛，武岡学，田中幸司，石田信孝，高山宜久，曾我寿孝：レーザーを用いたコンクリート構造物の非接触健全性評価，土木学会論文集 F1，Vol.74，No.1，pp. 58-69，2018
- 4) 津野究，吉川和行，西山達也，小島芳之，岸田潔：トンネル覆工コンクリート片の剥落に関する基礎的研究，土木学会論文集 F1，Vol.65，No.2，pp. 196-208，2009
- 5) 津野究，小島芳之：トンネル覆工コンクリート片の剥落の評価手法，鉄道総研報告，Vol.26，No.4，pp. 35-40，2012
- 6) 津野究，嶋本敬介：トンネル覆工打音調査時の振動特性を活用した剥落安全性評価に関する研究，土木学会論文集 F2，Vol.75，No.1，pp. 26-38，2019
- 7) 三浦一郎，西郷勘次郎，早川留蔵：コンクリートコア及びレンガの試験（第 1 報），鉄道技術研究所速報，No.59-261，pp. 4-12，1959