

トンネル覆工変状調査への 回転打音検査器の適用性の検討

APPLICABILITY OF THE ROTATIONAL SOUNDED STRUCK TOOL FOR INVESTIGATION OF DEFECT IN TUNNEL LINING

村田真一^{*} 佐々木尚徳^{**} 吉武 勇^{***} 進士正人^{****} 中川浩二^{*****}
Shinichi MURATA, Naonori SASAKI, Isamu YOSHITAKE,
Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

In order to investigate small holls on detects of tunnel concrete lining, the impact acoustics method with hammer is generally used. Although the method is simple, it has the individual difference and hard work. The rotational sounded struck tool has been developed for covering the fault of the method. This research focused on the application of a tester from the experiment. Especially, this research investigated on the possibility of crack location and the individual difference by the impact test. From the test result, the effectiveness is confirmed for the rational investigation.

Key Words: tunnel concrete lining, impact acoustics methods, rotational sounded struck tool

1. はじめに

既設トンネルの覆工コンクリート（以下、「覆工」と呼ぶ）の変状調査では、大まかに覆工内に潜在する空洞やひび割れを把握するための一次点検として、覆工表面を検査する目視検査および、覆工内部を検査する打音検査により、覆工の健全度を評価するのが一般的である¹⁾。しかし、現在行われている打音検査は、ハンマーで覆工を直接叩き、その打撃音から変状度を判断する方法であるため、個々の技術者の経験と体力に依存される。この方法は個人差が大きく、作業範囲が限定されるだけでなく、危険性を伴う場合も多いことから、トンネル覆工の変状調査として、定量的な評価を行う代替法の開発が期待されていた²⁾。

本研究では、ハンマーによる打音検査の欠点を補う目的で、棒の先に回転する多角形が付いた回転打音検査器（以後、「検査器」と呼ぶ）に着目した。これは、本来ビルディング等の建築物のタイルの浮き・剥離を調査するために開発されたものであり、多角形の回転打撃により発生する連続打音の変化を基に、変状位置、状態を判断するものである。検査器そのものも180g程度と軽量であるため、肉体的負担は小さくなり、作業範囲の拡大など、作業効率の向上が期待できる。

本論文は、この検査器による打音検査の適用の可能性を検討する目的から、特に①個人差による影響②検知の範囲について、実験的検討を行ったので、その結果を報告する。

* 学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 環境共生工学専攻
** (株)クワキ・シビル
*** 正会員 博士(工学) 山口大学助手 工学部社会建設工学科
**** 正会員 学術博士 山口大学助教授 工学部社会建設工学科
***** FID-会員 工学博士 山口大学教授 工学部社会建設工学科

2. 室内実験

(a) 検査器概要

検査器は、伸縮可能な棒の先端に六角形の多面体が付いている（写真-1 参照）。また検査器の寸法等は表-1に示す。特徴としては従来の打音検査より、①軽量であるため作業性・安全性・作業者の疲労軽減が可能であること、②連続的に打音が可能であり、結果的に広範囲を確実に早く探査することができること、③作業効率が向上させることが期待される。

(b) 録音、分析方法

打撃音の録音にはコンデンサマイクロフォン（周波数範囲0～30kHz）を用いた。マイクロフォンで受信された波形は、AD変換器を通してパソコン上に記録した（図-2 参照）。その後波形図分析やFFT（高速フーリエ変換）により周波数分析を行った。サンプリングタイムは30 μsである。

3. 個人差の検証

検査器による打音検査の個人差の影響を調べるため、覆工を模擬したコンクリート供試体（寸法：1,000mm×400mm×200mm）で、検査器と岩盤判定用ハンマー（以下、ハンマーとする）の打撃音の比較実験を行った。検査器、ハンマーによるそれぞれの打撃箇所を図-2に示す。

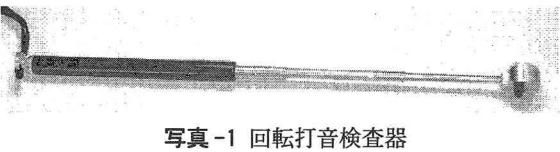


表-1 回転打音検査器の諸元

サイズ(mm)			グリップサイズ(φ) (mm)	参考重量 (g)
多面体の幅	多面体の高さ	長さ(最大～最小)		
32	25	224～820	16	180

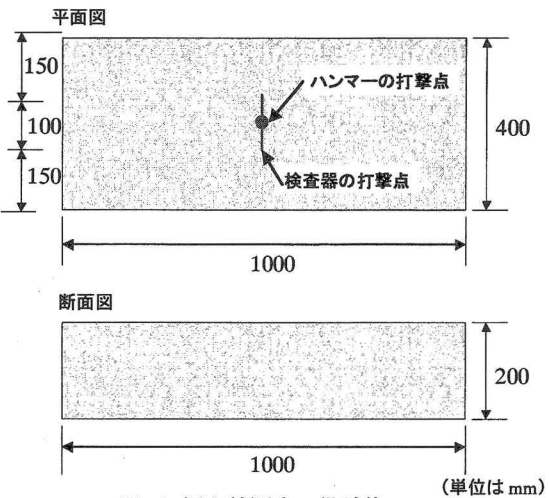


図-2 個人差測定の供試体

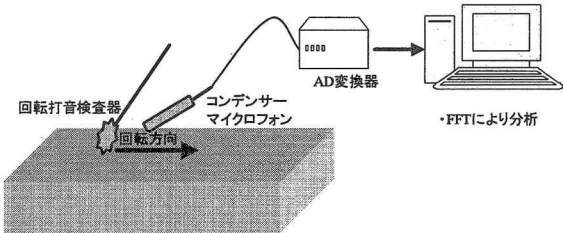


図-1 分析手法

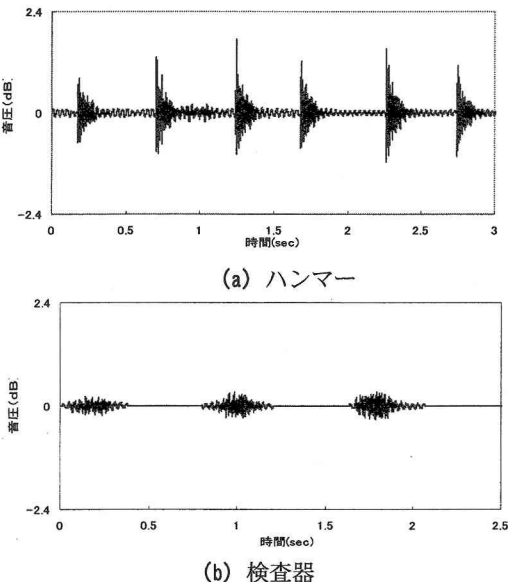


図-3 ハンマーと検査器の波形図

実験者は打音検査が未経験の3名で、各自ハンマーは打撃点を6回、検査器を直線上に3回転がした。

録音方法はハンマーの打撃点から5cm、供試体表面から5mmの高さにコンデンサマイクロフォンを固定し、打撃音を収録した。

(a) 打音検査器の個人差の検証

ハンマーと検査器の個人差を検証するため、それぞれの検査器の打撃音の最大振幅に着目し検証した。ここでいう最大振幅とは、打撃音の最大音圧の絶対値と定義した。実験者Aによる検査器とハンマーの打音の波形図が図-3である。図によると1回の打撃の最大振幅は、検査器では3回ともおよそ0.3dBであり、常に概ね一定の力で打撃していることが分かる。しかし、ハンマーによる打撃音は同一実験者にも関わらず6回の打撃の最大振幅がそれぞれ0.8dB～1.8dBと、試行回数によって異なることが分かる。これらの図からも分かるように、ハンマーでは一定の力で叩くことが難しいことが分かる。

各実験者の打撃音の最大振幅の平均値、標準偏差をハンマー、検査器でまとめたものが図-4である。どの実験者もハンマーによる打撃は、音圧そのものは検査器より大きく、かつ最大振幅のバラツキは、およそ検査器の3～4倍であることがわかる。この結果からハンマーによる打音検査は経験的手法と言われているように、未経験者では一定の力を与えることが難しいことがよく分かる。それに対し検査器では試行回数によらず各実験者が概ね同じ力で打撃していることが分かる。

(b) ハンマーと検査器の周波数分析結果

図-5に同一実験者（実験者A）によるハンマーと検査器による打音の周波数分析結果を示す。これらの図から明らかのように、検査器による打音には、全体にパワースペクトルが小さいため、全周波数域にノイズと考えられる細かいパワースペクトルの上下がみられるものの、全体として両者、2000Hz、3000Hz、4000Hzでピークがあることが分かる。

次に、実験者および試験機による周波数分析結果の違いを明らかにするため、それぞれの結果を閾値20dBとしてまとめた結果を図-6に示す。図中の◇印は、試行回数毎の卓越周波数の発生位置を示している。これらの図を比較すると、ハンマー打撃では6000Hz、9000Hz付近に卓越周波数が発生している。これはマイクの位置関係によりハンマーの固有振動を測定しているものと判断される。これらの結果を判断すると、検査器はハンマーの代替法になりうるということが明らかとなった。

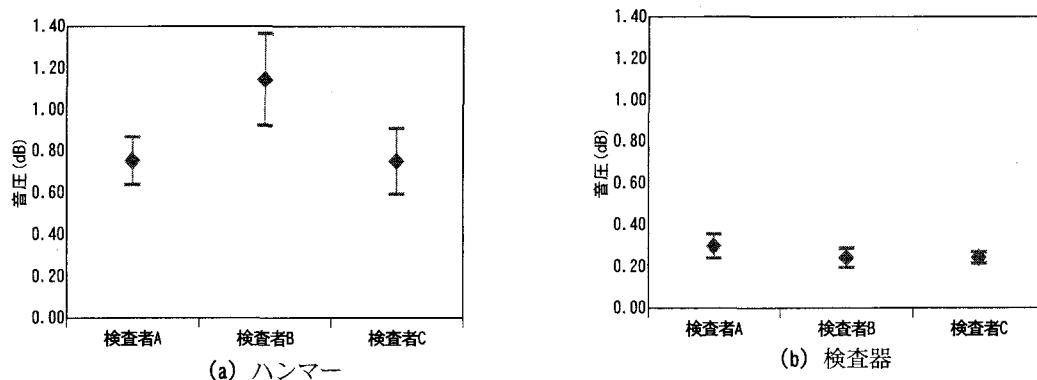
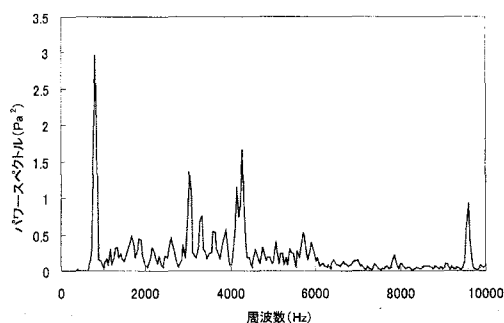
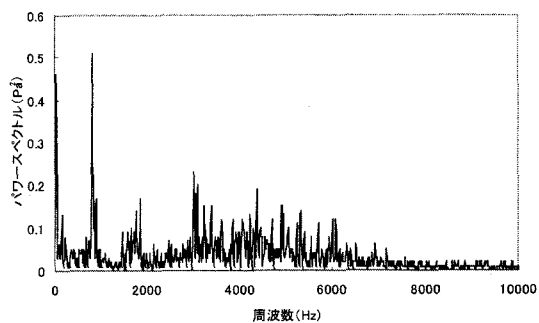


図-4 ハンマーと検査器の振幅のバラツキ

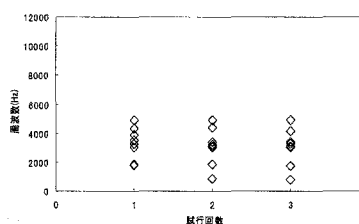


(a) ハンマー

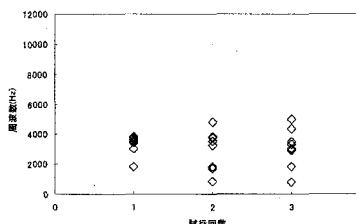


(b) 検査器

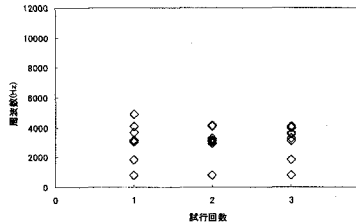
図-5 ハンマーと検査器の周波数分析 (実験者A)



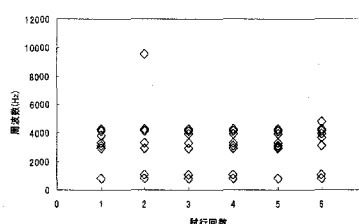
(a) 検査器 (実験者A)



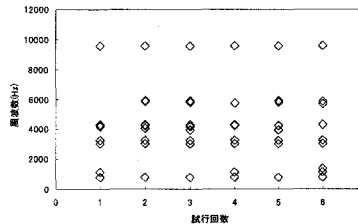
(b) 検査器 (実験者B)



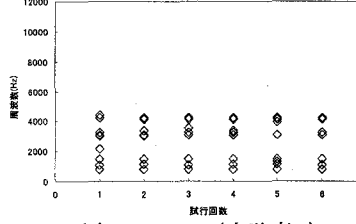
(c) 検査器 (実験者C)



(d) ハンマー (実験者A)



(e) ハンマー (実験者B)



(f) ハンマー (実験者C)

図-6 ハンマーと検査器の周波数のバラツキ

4. 変状検知深度の検証

変状位置の深さによって打撃音がどのように変化するか、検証実験を行った。用いた供試体は、寸法が200mm×100mm×400mmで、一方がひび割れを模擬したスリットを入れた供試体（以下ひび割れモデルと呼ぶ）（図-7参照）、もう一方は、スリットの入れてない供試体（以下健全モデルと呼ぶ）の計2体である。打撃箇所は図-7に示す。実験者、打撃回数は3.と同じで、各自全ての打撃箇所を転がした。マイクの位置は、打撃しているラインの中央からマイクの位置は録音方法はハンマーの打撃点から5cm、供試体表面から5mmに固定した。

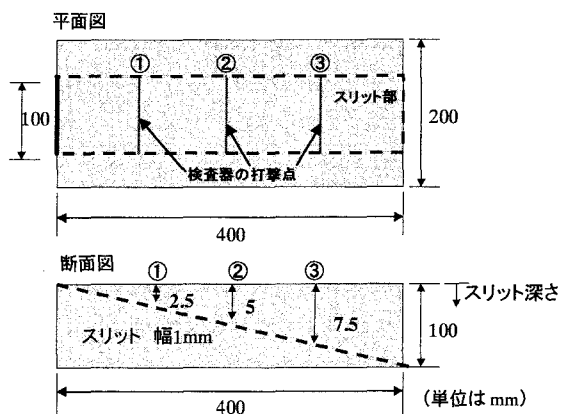


図-7 ひび割れモデル供試体

(a) 検査器の打撃音の振幅とひび割れ深さの関係

まず、打撃音の最大振幅が変状探査に有効な指標となりうるか、検証した。その一例として、実験者Aのひび割れ深さ別の1回目の打撃音の波形図(図-8参照)に着目する。図中には健全モデル(ひび割れ深さが無限大)のも併せて示している。ひび割れが深くなるごとに、最大振幅が小さくなることが分かる。特に健全モデルの最大振幅が最も小さいことから、実験者Aの結果からは、健全モデルとの最大振幅の相対評価から検知が可能と考えられる。さらに実験者A, B, Cの全ての打撃音の最大振幅の平均、標準偏差とひび割れ深さ(健全モデルは除く)の関係を図-9に示す。全体的には、2.5cmと5cmの間ではひび割れ深さが深くなるにつれて、最大振幅は小さくなるが、5cmと7.5cmではほとんど変化がみられない。このことから、検査器による打音の最大振幅からは、深さ2.5cmまでの変状であれば、検知が可能と考えられる。

一般的にコンクリートなどに対して行われるハンマーによる打音検査は、板の曲げ振動に起因し、板厚が大きくなると、打撃による板の振幅は小さく、発生する打撃音の振幅も小さくなる。それと同時に、高い周波数が卓越するといわれている³⁾。このことから、検査器による打音は、ある程度の深さでは、従来の打音検査と同じように板の曲げ振動現象に似た現象を起こしている可能性があり、検査器で得られた打撃音の最大振幅は変状検知に有効な指標になり、健全部との相対評価で変状の検知が可能と考えられる。

(b) 検査器の打撃音の周波数分析

従来の打音検査において一般的に変状のある箇所の打撃音は「濁った音」と、定性的に表現されている。しかし、最近では打撃音の周波数分析を行い、その結果を用いた定量的評価も研究されつつある⁹⁾。本研究においても健全モデルの打撃音とスリットモデルの打撃音の周波数分析結果を比較しその相違点を検証した。

実験者Aの同ライン上で3回検査器を転がした周波数分析結果を平均し、スリット深さごとに表したものを図-10に示す。深さ2.5cmにおける打撃音の卓越周波数は2000Hz, 4000Hz, 8000Hz付近と様々な卓越周波数が検出される。しかし、5cm, 7.5cmの深さでは1000Hz付近で周波数が卓越する。概ね同様の周波数分析結果が得られている。またこの分析結果は健全モデルの周波数分析と概ね同じである。したがって、最大振幅と深さの関係および、周波数分析の結果から、検査器を用いた打音検査では2.5cm程度までが検知可能と考えられる。

したがって、事前にひび割れ位置が明確に分かっている供試体でキャリブレーションすることで、検査器を用いる打音検査から最大振幅と周波数分析結果の相対評価を併せて行えば、より変状検知の可能性、安定性がさらに向上すると考えられる。

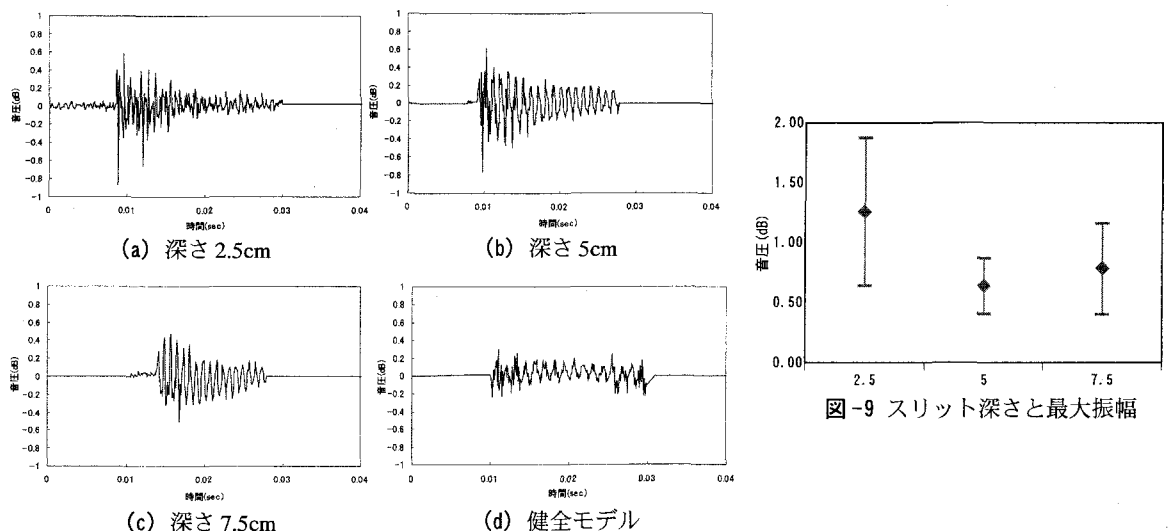


図-8 スリット深さごとの検査器の波形図(実験者A)

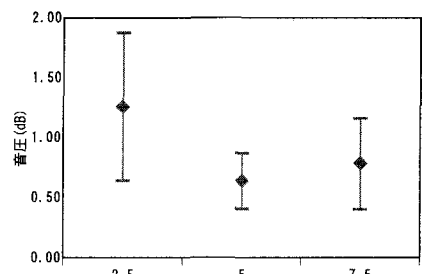
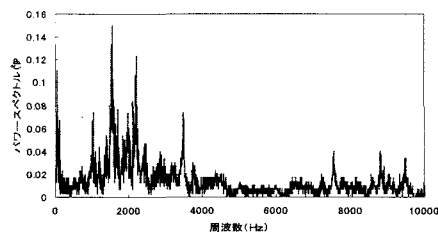
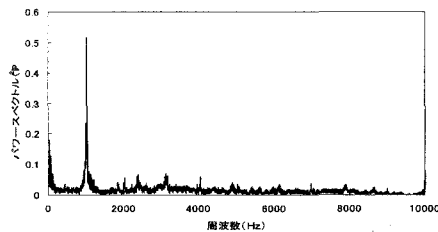


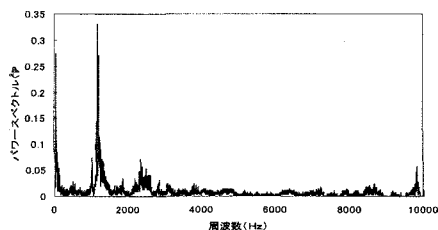
図-9 スリット深さと最大振幅



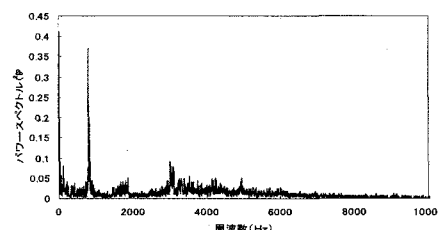
(a) 深さ 2.5cm



(b) 深さ 5cm



(c) 深さ 7.5cm



(d) 健全モデル

図-10 スリット深さと周波数分析 (実験者 A, 相加平均)

一般的には、変状がある場合は低い周波数が卓越し、健全すなわちひび割れの無い場合、または変状が表面から深いところにある場合は、高い周波数が卓越するとされている⁵⁾。しかし、今回の周波数分析結果からは、特に高い周波数が卓越しているとはいえない。これはスリットが斜めに、かつ連続で入っており、また連続的に打撃を与えていることから、供試体が複雑に振動したためであると考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する。

- ① 回転打音による検査は従来のハンマーによる打音検査より個人差が小さい。さらに打音検査と卓越周波数も概ね同じである。
- ② 検査器による打撃音の発生機構は、従来行われているハンマーによる打音検査と概ね同様であり、波形図による最大振幅とスリットの深さは相関関係があり変状感知に有効な指標になりうる。
- ③ 検査器の打撃音の周波数分析結果は、スリットの浅い場合には、卓越周波数が複数検出され、深くなるにつれて卓越周波数の検出量が小さくなり、違いがある。従って周波数分析も変状感知の有効な指標になりうる。
- ④ 振幅と卓越周波数を組み合わせることで、変状感知の精度が向上すると考えられる。

今回の室内実験から、検査器がハンマーの代替になりうる可能性が示せた。しかし、検査器は打撃を連続で与えていることから、ハンマーによる打撃の供試体表面の振動と異なり、振動が複雑になる。また与えるエネルギーもハンマーより小さく、探査深度が限られる。今後は異なる供試体サイズ、ひび割れ以外の欠陥を有する供試体や空洞の大きい供試体を作製し、その適用範囲について検証する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路公団：トンネル変状調査マニュアル，1998.10.
- 2) 村田真一，吉武勇，進士正人，中川浩二：回転打音を用いたトンネル覆工変状調査に関する研究，第58回年次学術講演会講演概要集（CD-ROM），VI-008，pp15-16，2003.9.
- 3) 伴亨，歌川紀之，高津徹，金田淳，鎌田則夫：検査ハンマーなどの簡易な点検器による剥離検知性能の評価，トンネル工学研究論文・報告集，第11巻，pp.23-28，2001.11.
- 4) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990.5.
- 5) 鎌田敏郎，浅野雅則，国枝稔，六郷恵哲：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用，土木学会論文集，No704/V-55，pp.65-79，2002.5.