

打音法における欠陥検知に関する一考察

佐藤工業株式会社 正会員 ○歌川 紀之
 佐藤工業株式会社 正会員 伴 享
 佐藤工業株式会社 正会員 北川 真也

1. 目的

トンネルコンクリート覆工の叩き検査を自動化する手法として、打音ロボットが開発されている。これらのロボットは、打撃装置とマイクロホンからなるセンサー部分がトンネル壁面を移動し、打撃装置によりトンネル壁面を叩き、その音をマイクロホンで収録し、解析を行い、剥離や空洞などを検知し、記録を残す仕組みである。音圧データを解析し欠陥を検知する手法については、音圧の時系列データから音圧振幅の大きさに着目する方法（振幅法）、FFT 処理したデータから、ある周波数帯のエネルギーの大きさに着目する方法、ウェーブレット処理したデータを用いる方法などが提案されている。それぞれの手法ともに、叩き検査と同様で、「剥離などの欠陥部では、見かけの板厚が薄いため曲げ振動が大きくなり、それにより生じる音圧が大きくなる。一方、健全部では、板厚は覆工厚となり、欠陥部に比較し曲げ振動が小さくなり、それにより生じる音圧が小さくなる」という原理を用いている。当社で開発している打音ロボット¹⁾「ライニングヒッター」では、表層近くの欠陥の検知と、コンクリート巻き圧や剥離面やひび割れ面までの距離について定量的に推定することを目的に振幅法を用いている。本研究では、振幅法を中心に、打音法で着目している現象の解明とそれに基づく、振幅法における測定限界、計測間隔や計測方法の妥当性について検討を行った。

2. 振幅法を用いた欠陥検知

振幅法とは、時系列で記録された最大音圧と打撃により入力された最大衝撃力の関係（振幅値比）から、コンクリート厚さを推定し、剥離や空洞箇所では厚さ（剥離面と覆工面の距離）が小さくなる特徴を用い、欠陥箇所や健全度を評価する手法である。本手法を測定例から説明する。厚さの異なるコンクリート板に対する打撃直後の音圧の時系列を図-1 に示す。時間 0 秒で、ハンマーの衝撃加速度が最大となるよう、各音圧データを整理した。図より、以下のことが分かる。1)厚さが小さいほど、発生音圧が大きくなる。2)厚さが小さいほど、最大音圧の発生時間が遅くなる。3)厚さ 30cm 以上では、厚さの違いによる音圧の最大振幅や周期の変化は小さい。振幅法では、1)の関係をを用い、欠陥検知を行っている。

次に、2)厚さの違いによる最大音圧の発生時間の変化を調べるため、観察された最大音圧がどのような振動に起因するのかを調べた。図-2 に予想される曲げ波やレーリー波の理論的な伝搬速度と打音法で観測された振動の伝搬速度を比較した。曲げ波の伝搬速度の理論式は $C_B = \sqrt{1.8 \cdot V_p \cdot h \cdot f}$ で表され、 V_p はコンクリートの弾性波速度(4000m/sec)、 h は板厚、 f は衝撃周波数(1,2,3kHz)である。また、インパルスハンマーの衝撃周波数は 1.5-2kHz である。図-2 に示すように、観測された速度は、厚さ 10cm、20cm では曲げ波の伝搬速度（衝撃周波数 2kHz）に近く、厚さ 50cm では、レーリー波の伝搬速度に近いことが分かる。

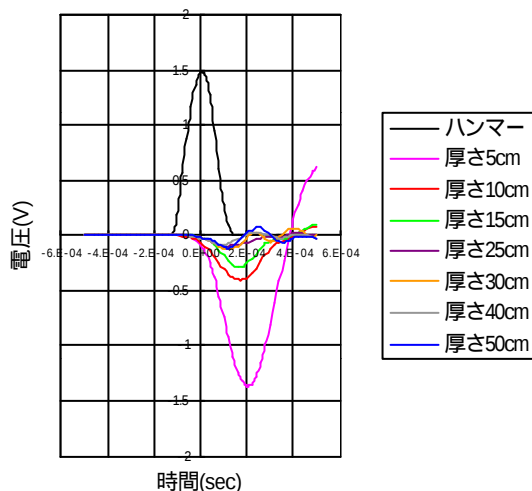


図-1 打撃直後の音圧の変化

キーワード トンネル覆工、検査、打音法

連絡先 〒243-0211 神奈川県厚木市三田 47-3 佐藤工業株式会社中央技術研究所 TEL 046-241-2172

これらの結果から、ハンマーの打撃により、コンクリート厚さ 30cm 程度までは曲げ波が発生し、厚さの違いによって振幅が変化する現象から、振幅法による厚さの推定は可能となる。しかし、厚さが 30cm を越えるとレーリー波が卓越し、厚さの変化により振幅や周波数は変化せず、振幅法による厚さの推定は難しくなるものと思われる。

3．打音法で観測している現象

打音法で観測している音が曲げ波によることを確認するため、振動計による計測を実施した。厚さ 18cm の RC 壁をハンマーで打撃し、発生する振動のモードを表面、裏面に配置した振動計を用い観測した。図-4 に $t=0.0005$ 秒までのモードを示す。これらの結果から、1) 観測している波の速度は、曲げ波の速度の理論値と一致していること、表と裏が同位相であること、マイクロホン位置（打撃位置から約 10cm）で最大振幅が観測された時間（ $t=0.0002$ ）と打音法で最大音圧を観測した時間がほぼ一致していることから、打音法で観測している音は「板の曲げ波」に起因している。なお、厚さ 18cm では、発生する曲げ波の波長は 1m、波速 1500m/sec 程度である。2) マイクロホンの位置は打撃点から、10cm 程度の位置であり、その位置が数 cm ずれても測定される最大振幅は変化しない。3) マイクロホン位置で 1 波目を観測した時間に、曲げ波の先端は打撃点から 75cm の位置にあり、測定結果はその範囲までの影響を受けている。4) 2 波目以降になると減衰や境界（固有振動）の影響を受けるので、最大振幅よりも 1 波目の振幅に着目した方が合理的と考えられる。

4．まとめ

これらの検討から、以下のことが分かった。

- 打音法で着目している現象は、板の曲げ振動であり、波長は 1m 程度（コンクリート厚さ 18cm）である。
- 振幅法により、厚さ 30cm 程度までは推定が可能である。30cm を越えると曲げ波は小さくなり、厚さによる音圧の変化が小さく、厚さ推定が難しくなる。また、マイクロホンへの第 1 波到達時には打撃点から 75cm 程度まで波頭が達しており、本手法ではその範囲における平均的な厚さ推定がなされているものと予想される。
- 計測方法：発生している曲げ波の波長は 1m 程度（コンクリート厚さ 18cm）のため、計測間隔は 50cm 程度で十分であると考えられる。ただし、剥離箇所については曲げ波の波長も短くなるため、計測間隔を狭くすることにより、欠陥範囲を特定するための精度は向上する。また、打撃点とマイクロホンの位置の距離（10cm）については、打撃点とほぼ同様な音圧が観測されることから問題はないものと考えられる。最後に、1 波目の音圧振幅に着目することにより、長期的な音圧の時間平均値に着目する方法に比較し、固有振動や減衰の影響が少ないため、均質な測定結果が得られるものと考えられる。

参考文献：例えば、篠川俊夫、歌川紀之、伴享；打音検査自動化システムの開発、建設機械と施工法シンポジウム論文集、2001。

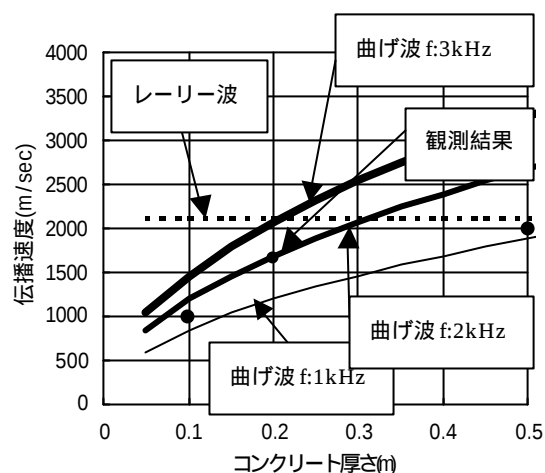


図-2 厚さと伝播速度の関係

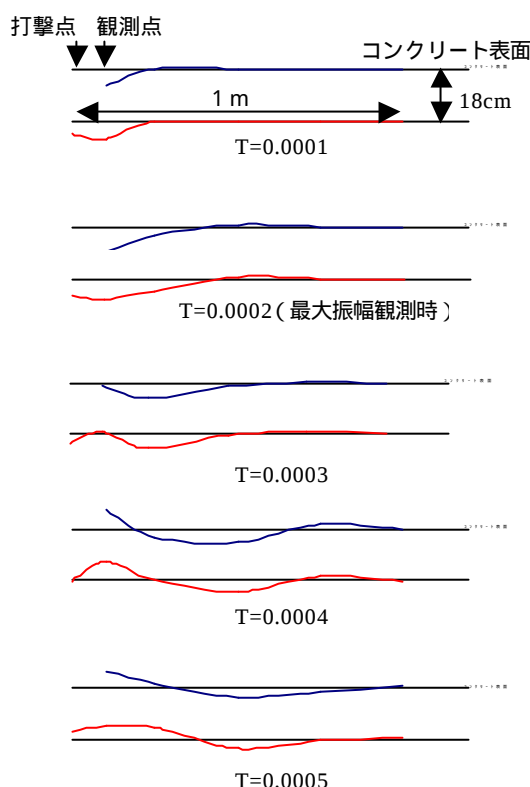


図-3 打音法で観測している振動モード