

音響反射を利用したトンネル覆工コンクリートの劣化診断に関する基礎的検討

鍋島 康之¹・上杉 潤矢²

¹正会員 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科（〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3）

E-mail:nabesima@akashi.ac.jp

²学生会員 明石工業高等専門学校 専攻科（〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3）

E-mail: ac1702@s.akashi.ac.jp

わが国では高度成長期に道路整備が急激に進み，2010年代には建設後50年以上経過した道路施設が急増している．特にトンネルについては2012年笹子トンネル天井板落下事故以来，一斉点検が実施されるなど，維持管理・補修・修繕が重要な問題となっている．

トンネル内を車両が走行する際に発生する音響を覆工コンクリートが反射する際の振動を計測し，劣化程度を判断できるか検討している．室内実験により空隙を内部に有するコンクリート供試体の振動挙動を把握するとともに，実際のトンネル内において車両走行時に覆工コンクリートがどのような振動をしているかについて実測を行った．

Key Words : maintenance, laser Doppler vibrometer, tunnel lining concrete, soundness

1. はじめに

わが国では高度成長期に道路整備が急激に進み，2010年代には建設後50年以上経過した道路施設が急増している．特にトンネルについては2012年笹子トンネル天井板落下事故以来，一斉点検が実施されるなど，維持管理・補修・修繕が重要な問題となっている．

本研究では，図-1に示すようにトンネル内を車両が走行する際に発生する音響を覆工コンクリートが反射する際の振動を計測し，劣化程度を判断できるか検討している．室内実験により空隙を内部に有するコンクリート供試体の振動挙動を把握するとともに，実際のトンネル内において車両走行時に覆工コンクリートがどのような振動をしているかについて実測を行った結果を報告する．

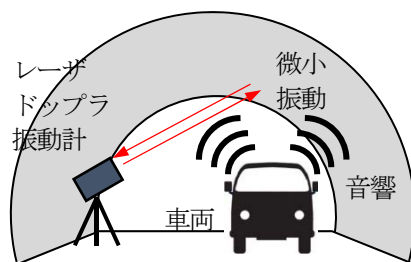


図-1 音響による覆工コンクリートの振動

2. わが国におけるトンネルの老朽化と維持管理

わが国のインフラ施設は高度経済成長期に集中的に整備され，今後急速に老朽化することが懸念されている．今後20年間で，建設後50年以上経過する施設の割合は加速度的に高くなり，一斉に老朽化するインフラを戦略的に維持管理・更新することが求められている．国土交通省の調査（http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html，2017年7月3日取得）では建設後50年以上経過するインフラの割合を表-1のように予測している．特に道路橋，トンネル，河川管理施設等の老朽化が著しく，鉄道トンネルではより状況が深刻で，調査を行った4737本の鉄道トンネル中，建設後100年以上経過したトンネルが600本近くに達している．また，2012年には中央自動車道笹子トンネルにおいて天井板落下事故が発生し，9名の人命が失われた．この事故を契機に，国土交通省による緊急点検指示がでるなど，社会的にも

表-1 建設後50年以上経過する社会資本の割合

	個数	平成25年	平成35年	平成45年
道路橋	約40万橋	18%	43%	67%
トンネル	約1万本	20%	34%	50%
河川管理施設	約1万施設	25%	43%	64%
下水道管きよ	約45万km	2%	9%	24%
港湾岸壁	約5千施設	8%	32%	58%

大きな影響を及ぼしている。

国土交通省のマニュアル¹⁾では、道路トンネルの定期点検は5年に1度実施するようになっており、近接目視を基本として、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うことになっている。また、トンネル点検員はトンネルに関する一定の知識および技能を有することになっており、誰もが簡単にできるシステムにはなっていない。

一方で、道路トンネルの覆工コンクリートのうき・はく離を検知する新技術（http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000374.html, 2017年7月3日取得）などが提案されているが、現在も近接目視を補助する目的でしか用いられていない。この様に、トンネルの維持管理は未だに省力化が進んでいない状況であり、新技術のさらなる開発や実績が必要とされている。

3. レーザドップラ振動計を用いた計測方法

現在の国土交通省のマニュアルでは近接目視と打音検査による調査が実施されているが、熟練技術や時間を必要とするため、より簡便な方法が検討されており、レーザー欠陥検出法が提案されている。しかしながら、この方法では覆工コンクリートを振動させるため、高出力の加振レーザーの照射が必要である。一方で、トンネル坑内はほぼ密閉空間であり、車両の走行音を反射することにより覆工コンクリートは振動している状態であるため、この走行車両の音響を反射した際の覆工コンクリートの振動をもとに覆工内部の劣化を評価する方法を開発することを試みている。

(1) レーザドップラ振動計

本研究で使用したレーザドップラ振動計（写真-1）は μm レベルの微小な変動を遠距離から非接触で測定できるシステム（ポリテックジャパン（株）RSV-150、仕様は表-2参照）である。まず室内試験では内部に空隙を有するコンクリート供試体に下方からスピーカーで音響を照射し、その際の振動をレーザドップラ振動計で計測した（写真-2）。コンクリート供試体は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の立方体で、内部に長さ 100mm 、幅 20mm 、厚さ 1mm の空隙を有している。次に、兵庫県国道9号線にある2箇所のトンネルにおいて車両が走行時に発する音響を覆工コンクリートが反射する際に発生する振動を室内実験で使用した同じレーザドップラ振動計を用いて計測した（写真-3）。

(2) 社会基盤工学分野での適用事例

レーザドップラ振動計はマイクロサイズの微小物体か

ら大型構造物等の表面振動を非接触・高周波数・高精度・低ノイズで計測することが可能なため、精密機器をはじめとする様々な工学分野において利用されているが、社会基盤分野においてはまだ使用例は少ない。主な事例として、橋梁分野では鋼桁橋の補強前後の常時微動比較²⁾や斜張橋の健全度評価³⁾に用いられている。いずれのレーザドップラ振動計も μm レベルの微小な変動を遠距離から非接触で測定できるロングレンジタイプが使用されている。

表-2 レーザドップラ振動計の諸元

レーザー波長	照準 532nm（緑色） 測定 1550nm（不可視）
レーザー出力	10mW
安全クラス	II
計測可能距離	50m
速度分解能	使用レンジにより変化、最大スケール 0.1m/sec の場合、 $1\mu\text{m}/\text{sec}$
計測可能周波数帯	0～25Hz



写真-1 レーザドップラ振動計



写真-2 レーザドップラ振動計による室内試験



写真-3 トンネル内での計測状況

4. 室内試験

室内試験⁴⁾は写真□2に示すように、壁面等で音波が反射することを防ぐために、コンクリート供試体を防音箱に設置し、供試体の中央部に測定用レーザーを照射し、振動を測定する。コンクリート供試体を振動させる音波は写真□2のように供試体下方斜め方向から周波数100～200Hzの音波を連続して照射し、その際の振動をレーザードップラ振動計で測定した。比較したコンクリート供試体は内部に空隙が無いもの、内部空隙の深さ5mm、10mmの供試体の結果である。図-2に室内実験で実測された表面振動速度を示す。各供試体において振動速度のピークがいくつか見られたが、全ての供試体で共通して振動速度のピークが現れた周波数は155Hz、175Hz付近であった。空隙なしと空隙深さ5mmの供試体は比較的類似した振動挙動が見られたが、高周波数になるほど空隙なしと空隙深さ5mmの供試体で表面振動速度に差が見られる。次に、空隙深さ10mmでは、160Hz付近で空隙深さ5mmでは見られなかったピークが見られており、空隙深さが異なることで同じ周波数の場合でも振動が異なる結果が観測された。

以上のことから、空隙の有無や深さの変化によって振動する周波数に違いが見られ、健全な覆工コンクリートの振動特性と比較することによって、内部の劣化程度を評価する可能性が示唆された。

5. 現地調査

トンネル内で実際の覆工コンクリートの振動を測定した結果⁵⁾について示す（実測状況は写真-3参照）。振動計測は車両が接近し、通過するまでの10秒間の振動を計測した。振動計測と同時に車両走行時の騒音レベルについても騒音計で測定した。図-3はトンネル内で計測した騒音レベルを示している。今回の計測は日中に実施したため、完全な静穏時における騒音レベルを計測できなかったが、車両が走行していない時間に測定した騒音レベ

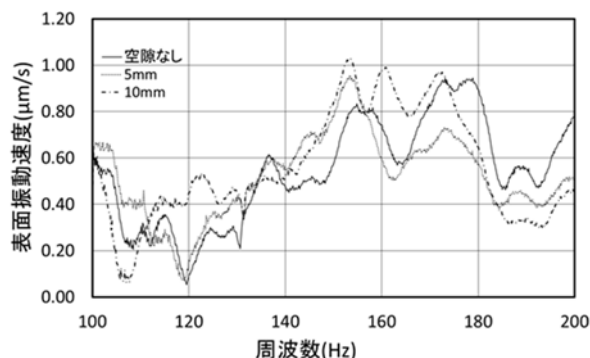


図-2 室内試験の振動測定結果

ルの平均値は73.6dBであった。このため、車両が走行していない時点でも全くの無音状態でなかった。また、車両走行時の騒音は全て85dB以上であり、95dBを超える値も記録した。ただし、大型車両の通過時に最大値が記録されたわけではなく、普通乗用車の騒音（最大値）とあまり差が見られなかった。この結果から、トンネル内は車種に関係なく、車両走行時には非常に大きな騒音が発生していることが確認できた。

次に、車両走行時に発する音響による覆工コンクリートの振動計測結果の例を図-4、5に示す。今回は写真-4に示したような覆工コンクリートに亀裂が発生している箇所周辺部1点を測定するシングルポイント計測を実施した。なお図-4の振動を計測した際の騒音レベル（最大値）は93.1dBで、図-5の場合は91.7dBであった。図-4では車両が測定箇所へ近づく際に大きな振動がパルス的に生じている（図中の赤色矢印）ことがわかる。図-5でも同じく車両が接近する際にパルス状の振動（図中の赤色矢印）が生じている。しかしながら、図-4では車両通過時および通過後にもパルス状の振動（図中の青色矢印）が見られたが、図-5では車両通過時にはそのような振動は確認できなかった。今回の計測では、走行車両の車種（大型車両、普通乗用車）、速度、台数（単独、複数走行）など走行車両に関する詳細なデータを収集していなかったため、どのような走行状況で覆工コンクリートが振動しているのか把握できなかったため、より詳細な測定調査が必要である。

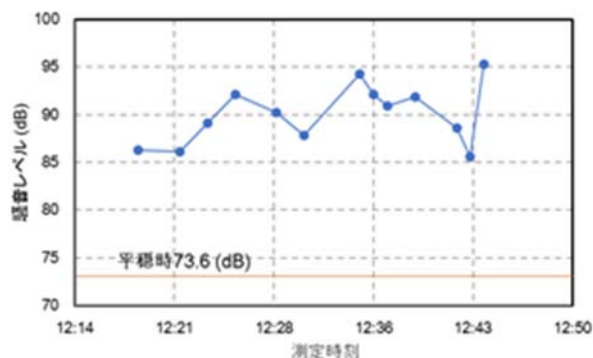


図-3 騒音レベル測定値

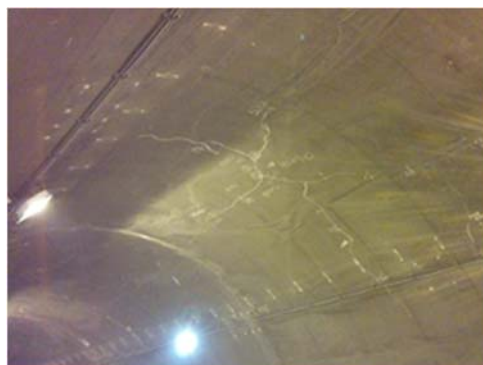


写真-4 実測したトンネル覆工の状況

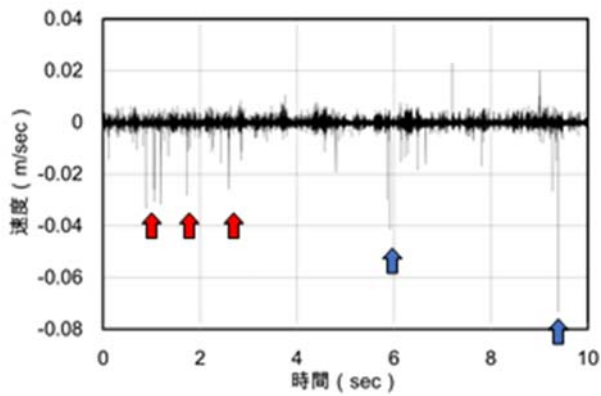


図-4 振動実測値 (その1)

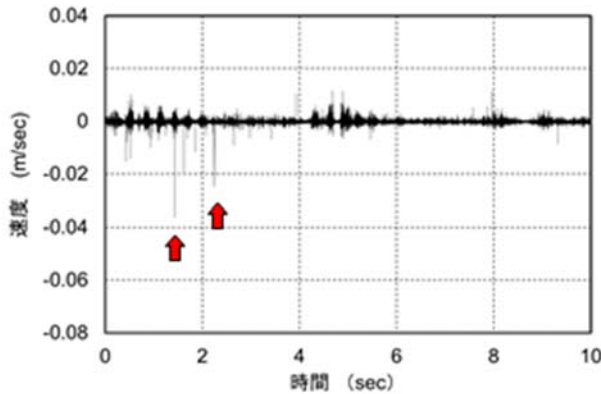


図-5 振動実測値 (その2)

6. まとめ

本研究では、車両走行時に発する音響によるトンネル覆工コンクリートの振動挙動を計測し、劣化程度を判断できるか検討した。その結果、室内試験結果から、コンクリート供試体内部に存在する空隙の深さによって音響

反射時の振動挙動に差異が見られた。また、現地実測の結果から、亀裂周辺部では車両走行時にパルス状の振動が生じていることが確認できた。ただし、今回の計測結果が計測したトンネルの特性なのか、他のトンネルでも同様な挙動が計測されるのかについてより詳細な調査が必要である。

謝辞：本研究の実施に当たって、レーザドップラ振動計による計測を（株）ポリテックジャパンの協力を得て実施し、国道トンネルの実測調査については国土交通省近畿地方整備局の協力を得て実施することができた。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，2014.
- 2) 宮下剛，石井博典，藤野陽三，庄司明宏，関雅樹：レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響，土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.277～296, 2007.
- 3) 玉田和也，宮下剛，石崎寛史：健全度評価のための斜張橋ケーブルの振動計測，土木学会第 65 回年次学術講演会，第 I 部門，pp.1071～1702, 2010.
- 4) 鍋島康之，上杉潤矢：レーザドップラ振動計を用いた空隙を有するコンクリートの音響反射振動，土木学会第 72 回年次学術講演会，III-434, 2017.
- 5) 鍋島康之：走行車両の音響反射によるトンネル覆工コンクリートの振動計測，土木学会第 71 回年次学術講演会，III-410, 2016.

(2017. 8. 11 受付)

FOUNDAMENTAL STUDY ON LINING CONCRETE SOUNDNESS JODJEMENT BASED ON VIBRATION CAUSED BY SOUND REFLECTION

Yasuyuki NABESHIMA and Junya UESUGI

The maintainance of the old tunnel were one of the important problems. The authors tried to estimate the tunnel lining concrete soundness based on the vibration caused by sound reflection of running vehicles. The vibration characteristics of the deteriorated lining concrete was different from that of sound lining concrete. The vibration of model lining concrete with inner void was measured by the laser Doppler vibrometer. The different vibration behaviors with some different frequencies could be measured in the model tests. Also, a field measurement was carried out in the real tunnel. Sharp vibration behavior due to the running vehicles was measured near the crack of the lining concrete.