

盤ぶくれの変状を有するトンネルでの振動計測

渡邊 英彦¹

¹正会員 日本大学 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

E-mail: watanabe.hidehiko@nihon-u.ac.jp

本報告で対象とするトンネルでは完成から数年後に盤ぶくれによる変状が生じた。路盤面では隆起とひび割れ、アーチ部ではひび割れ、インバート部では破損が生じた。このトンネルの健全部と不健全部で振動計測を行った。振動計測として、常時微動計測と打撃振動計測を行った。この二つの計測で得られた波形のスペクトル比 (H/V) は健全部では 1 より大きく、不健全部ではそれに比べ小さな値を示した。また、打撃振動計測での波形の最大振幅は、健全部に比べ不健全部では小さな値を示した。このように健全部と不健全部における波形パラメータには異なる傾向が観察された。

Key Words: vibration property, microtremor, impact vibration, damaged tunnel, heaving

1. はじめに

トンネル本体の完成後、数年から十数年後に発生した盤ぶくれによる変状や経年劣化による変状が報告されている^{1)~3)}。このような変状の有無を調べる点検では近接目視や打音検査などが行われている。一方、橋梁等においては振動計測を用いた劣化度評価が多数行われており^{4)~6)}、トンネルにおいても常時微動などの振動を用いた手法が報告されている^{7)~9)}。振動計測の作業は打音検査などに比べ比較的容易であり、目視できない箇所の変状検出も期待できる。本研究では、盤ぶくれによる変状を有するトンネルにおいて常時微動計測に加えて打撃による振動計測を実施し、健全度判定の可能性について検討する。

2. トンネルの変状発生状況

福島県の県南地区にある甲子トンネルは延長 4,345m、本体完成は平成 19 年 2 月である。平成 23 年 3 月に路面に隆起が発生し、その後の調査で西側坑口から約 1,700m 付近の約 400m の 3 区間 (1~3 工区) で路面の隆起が確認された。最大隆起量は約 30cm であった。この区間の地質は玄武岩質自破碎状溶岩からなり、スメクタイトの含有量が多く膨張性地山の傾向があることからインバートが設置されていた。変状区間では写真-1 に示すように路面が隆起しており、舗装面や覆工にひび割れが発生していた。また、隆起が大きいことからインバートの状況を観察するために写真-2 に示すように路盤の試掘が数カ所で行われた。路盤コンクリートのひび割れは貫通して



写真-1 路面の変状発生状況



写真-2 インバートの変状発生状況

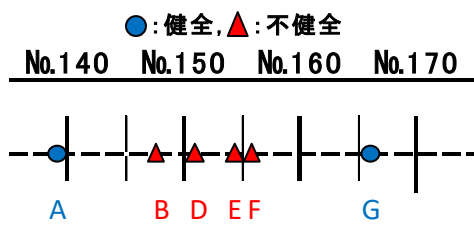


図-1 計測地点

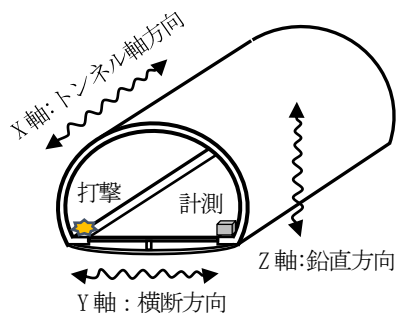


図-2 振動計測方向

おり、インバートは低角度のひび割れが発生していた。現在は既存インバートの撤去を行い、プレキャストインバートの設置が行われている¹⁰⁾。

3. 振動計測方法

(1) 計測地点

計測地点を図-1に示す。不健全部は舗装面と覆工にひび割れの発生、さらに試掘によりインバートの破損が確認され地点とし、1工区(No.146～152)でB、Dの2地点、2工区(No.153～156)でE、Fの2地点とした。健全部は路面にひび割れが発生しておらず、試掘によりインバートが破損していないことを確認した地点とし、No.140付近のA地点とNo.166付近のG地点の2点とした。なお、打撃振動計測ではD地点で試験施工が実施されたため計測を行っていない。

(2) 計測方法

振動計測は高感度振動検出器(昭和測器)を用いた。サンプリング周波数は1000Hz、図-2に示す3方向(X方向:トンネル軸方向、Y方向:トンネル横断方向、Z方向:鉛直方向)について通行車両の少ない夜間に計測した。

常時微動計測では、道路中央部で計測を行った。計測時間は各地点で20秒/回を10回行った。打撃振動計測では道路路肩部でシュミットハンマーとステンレス球(直径50.8mm、重さ543gを高さ50cmから自由落下)を用いてそれぞれ打撃を行い、反対側の路肩部で三方方向の振動計測を各地点で5秒/回を10回行った。

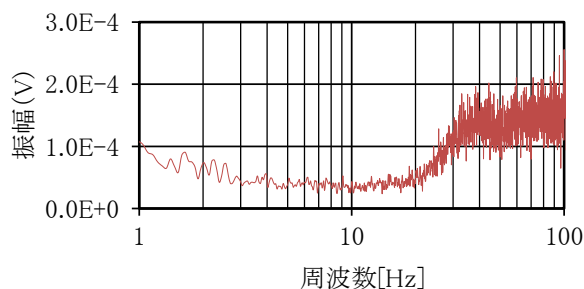


図-3 健全部(G) X方向フーリエスペクトル(常時微動)

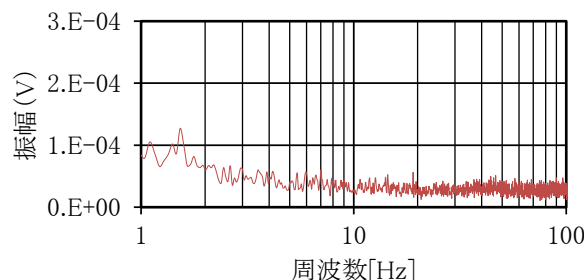


図-4 不健全部(E) X方向フーリエスペクトル(常時微動)

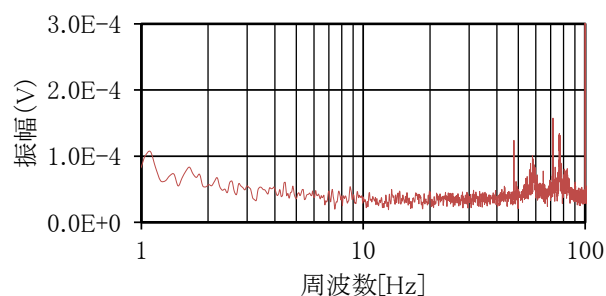


図-5 健全部(G) Z方向フーリエスペクトル(常時微動)

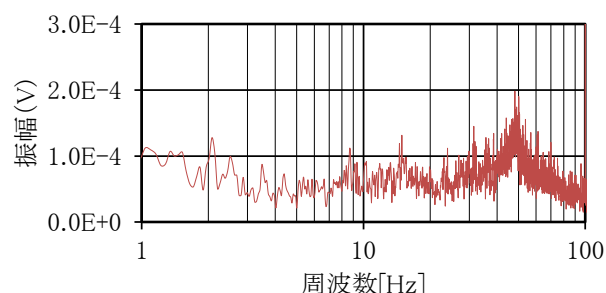


図-6 不健全部(E) Z方向フーリエスペクトル(常時微動)

4. 計測結果及び考察

(1) 常時微動のフーリエスペクトル

健全部G地点のX方向のフーリエスペクトルを図-3、不健全部E地点を図-4に、同じく健全部G地点のZ方向を図-5、不健全部E地点を図-6に示す。

健全部G地点のX方向では20Hz以上の領域で増加傾向にあり不健全部と比べると大きな値を示した。不健全

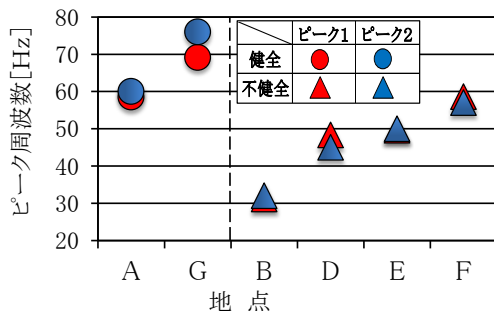


図-7 Z方向のピーク周波数（常時微動）

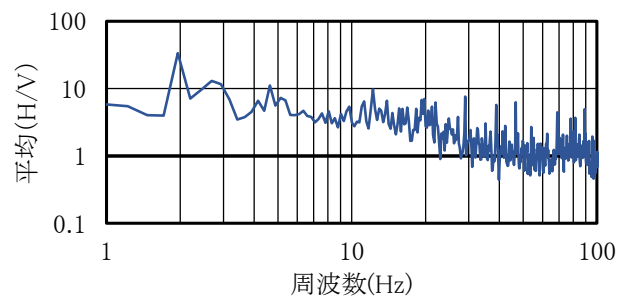


図-10 健全部 (G) 平均 (H/V) (シュミットハンマー)

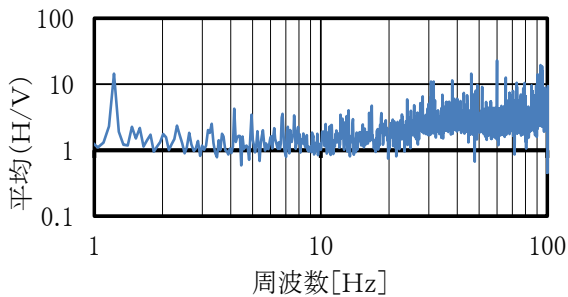


図-8 健全部 (G) 平均 (H/V) (常時微動)

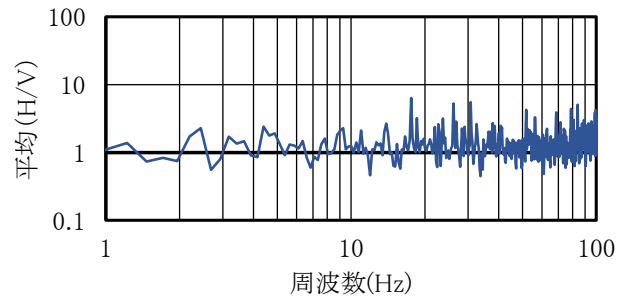


図-11 不健全部 (E) 平均 (H/V) (シュミットハンマー)

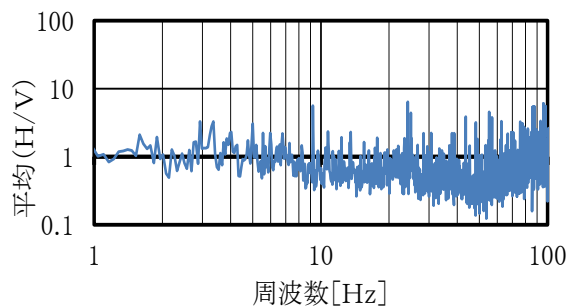


図-9 不健全部 (E) 平均 (H/V) (常時微動)

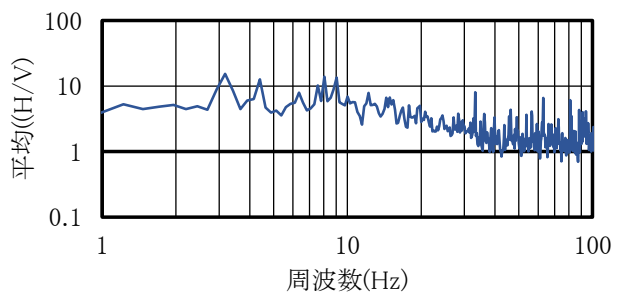


図-12 健全部 (G) 平均 (H/V) (ステンレス球)

部ではこのような増加傾向は見られずに一定の小さい値を示している。これはY方向についても同様の傾向であり、他の地点においても同様の結果となった。また、Z方向では健全部と不健全部ともにX、Y方向に存在しなかったピークが観察された。

Z方向におけるピーク周波数の比較検討を行った。個々のピーク周波数を平均したピーク1と、フーリエスペクトルを平均して求めたピーク2を図-7に示す。各地点でピーク1とピーク2は、ほぼ同じ値を示している。また、それらの値は不健全部では健全部付近と比べやや低い値を示す傾向にある。

(2) 常時微動のスペクトル比

10個のスペクトル比を平均した平均(H/V)を求めた。健全部G地点を図-8、不健全部E地点を図-9に示す。10Hz以上に着目すると、健全部では増加傾向にあり、1より大きな値を示している。一方、不健全部では周波数が50Hz以上の領域で上昇しているが、平均的には1より

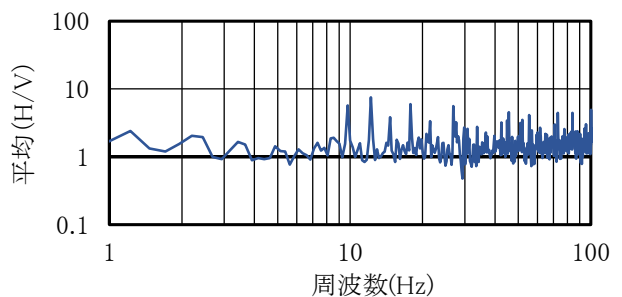


図-13 不健全部 (E) 平均 (H/V) (ステンレス球)

り小さい値を示している。

(3) 打撃振動のスペクトル比

打撃振動の場合についても平均(H/V)を求めた。健全部G地点と不健全部E地点のシュミットハンマーを用いた場合を図-10、図-11に示す。また、ステンレス球での場合を図-12、図-13に示す。両打撃方法とも健全部では1~30Hzで1より大きな値となり、不健全部では1付

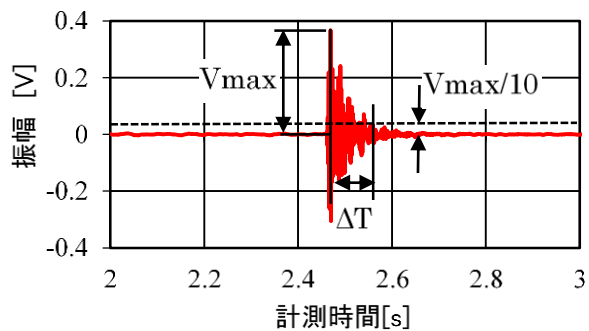


図-14 $V_{\max}$ と ΔT

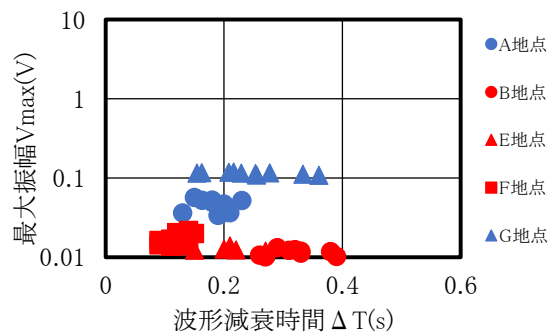


図-18 X方向の $V_{\max}$ と ΔT (ステンレス球)

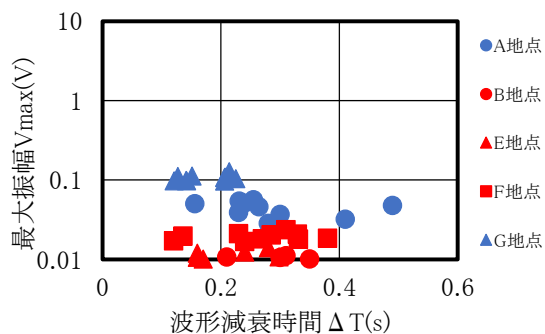


図-15 X方向の $V_{\max}$ と ΔT (シュミットハンマー)

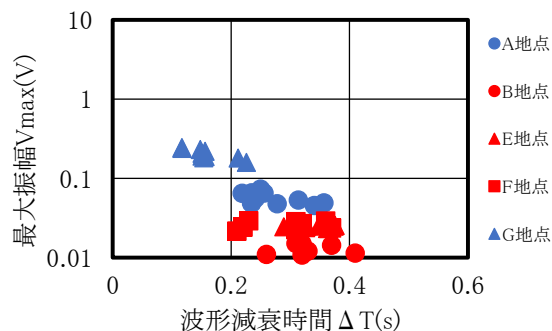


図-19 Y方向の $V_{\max}$ と ΔT (ステンレス球)

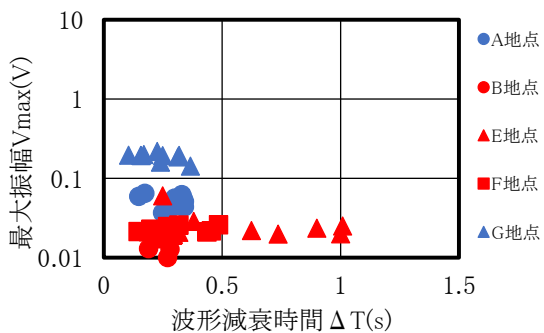


図-16 Y方向の $V_{\max}$ と ΔT (シュミットハンマー)

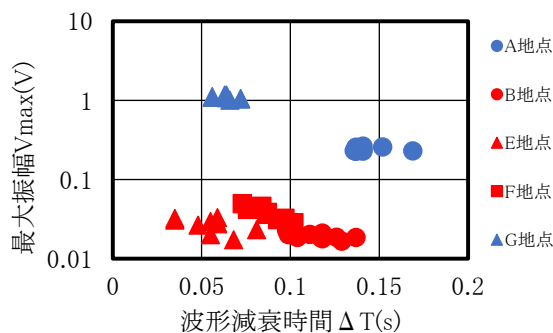


図-20 Z方向の $V_{\max}$ と ΔT (ステンレス球)

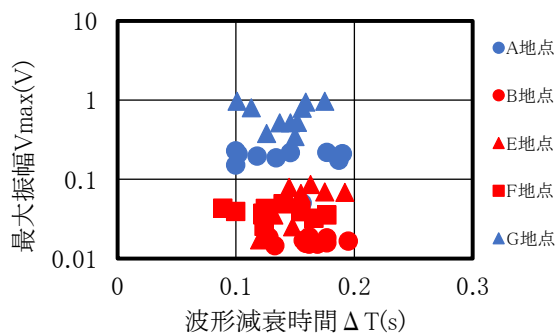


図-17 Z方向の $V_{\max}$ と ΔT (シュミットハンマー)

近の値となっており，異なる傾向を示している．他のいくつかの地点においても同様の傾向が観察された．

(4) 打撃振動の最大振幅と波形減衰時間

ステンレス球での打撃による計測波形を図-14 に示す．この波形のパラメータとして最大振幅の絶対値を $V_{\max}$ とし，この $V_{\max}$ から $V_{\max}/10$ の値になるまでの時間を波形減衰時間 (ΔT) として求めた．シュミットハンマーを用いた場合の3方向の $V_{\max}$ と ΔT の関係を図-15～図-17 に，ステンレス球を用いた場合を図-18～図-20 に示す．健全部（青）と不健全部（赤）を比較すると，

シュミットハンマー、ステンレス球の両方において計測 3 方向ともに健全部では V_{max} が大きく、不健全部は小さい傾向を示している。また、この傾向は Z 方向でより明らかであった。波形減衰時間 ΔT には健全部と不健全部での違いは観察されなかった。

5. まとめ

盤ぶくれによる変状が生じたトンネルにおいて、変状の生じていない健全部分と変状の生じた不健全部分について常時微動計測と打撃振動計測を実施した。常時微動計測によるフーリエスペクトル、常時微動と打撃振動によるスペクトル比に違いが観察された。また、打撃振動での最大振幅にも違いが観察された。このように健全部と不健全部では振動波形パラメータに異なる傾向が観察されたことから、トンネルの健全性判定に振動計測は有用と考えられるが、今回対象とした不健全部分は変状がかなり進行した状態であり、変状の初期状態を対象した場合や定量的な評価については今後の課題である。

謝辞：本研究にあたり、福島県県南建設事務所の関係各位には甲子トンネルに関する資料の提供及び振動計測の際に協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩崎好規, 橋本正, 今西肇, 山内淑人：トンネル覆工のひび割れ調査とその発生原因の推定, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 1 巻, pp.223-228, 1991.
- 2) 中野清人, 倉持典幸, 宮沢一雄, 西村和夫：地山の強度劣化に依る地盤隆起に対するインバートの長期挙動に関する考察, トンネル工学報告集, 第 26 巻, I-33, 2016.
- 3) 嶋本敬介, 川越健, 野城一栄, 小林寛明, 磯谷篤実：含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.76, No.1, pp.34-48, 2020.
- 4) 吉岡勉, 原田政彦, 山口宏樹, 伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討：構造工学論文集, Vol.54A, pp.199-208, 2008.
- 5) 宮下剛, 玉田和也, 劉翠平, 岩崎英徳, 長井正嗣：振動を利用した健全性診断に向けた実橋梁の損傷と動特性変化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.367-383, 2012.
- 6) 二出川真, 石川幹生, 高橋悠太, 山本亨輔：車両応答分析を用いた橋梁損傷検知手法における車両特性の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, I.831-I.841, 2017.
- 7) 蔣宇静, 谷川征嗣, 山内淑人, 安田亨, 田近宏則：常時微動測定に基づくトンネル覆工の健全度評価手法の提案, トンネル工学報告集, 第 20 巻, pp.205-209, 2010.
- 8) 糸井謙介, 須藤敦史, 丸山収, 佐藤京, 西弘明：寒冷地のトンネル覆工における常時微動記録を用いた劣化推定に関する研究, トンネル工学報告集, 第 22 巻, pp.277-280, 2012.
- 9) 瀬下雄一, 津野究, 加藤拓也, 小島芳之, 杉山俊幸：列車振動を活用したトンネル覆工の変状進展監視方法の提案, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.68, No.3, I.99-I.109, 2012.
- 10) 渡邊長浩, 吉田祐一, 尾崎裕司, 太田敬一：プレキャストインバートを用いた供用中トンネルの盤膨れ対策 -国道 289 号 甲子トンネル-, トンネルと地下, Vol.51, No.10, pp.19-30, 2020.

(2021.8.6 受付)

VIBRATION MEASUREMENT IN TUNNEL WITH HEAVING DEFORMATION

Hidehiko WATANABE

A heaving deformation occurred in a tunnel several years after completion. Vibration measurements were carried out at sound (2 points) and unsound (4 points) parts classified by the presence of cracking on concrete lining and fracturing in the invert. Two types of measurement of vibration, microtremor and impact vibration (Schmidt hammer, stainless steel ball), were conducted. In comparison between the two measurements, the spectral ratios (H/V) of the waveforms obtained in the sound parts were larger than $H/V=1$, whereas those in the unsound parts were smaller. The maximum amplitudes of the waveforms measured by the impact vibration were smaller in the unsound parts than in the sound parts. Accordingly, difference of vibration properties was confirmed between the sound and unsound parts. Therefore, it is expected that vibration measurements using multiple parameters will improve the soundness evaluation of tunnels.