

起振器試験を用いたトンネル路盤の健全度診断手法の開発

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○小湊 祐輝 正会員 篠田 昌弘 正会員 雪岡 剛哲
(株) 西日本旅客鉄道株式会社 正会員 坂本 寛章 正会員 御崎 哲一

1. はじめに スラブ軌道を有する鉄道トンネルでは、地山からの湧水や列車走行等により、路盤コンクリート底面と地山の間に空洞が発生し、路盤コンクリートや軌道スラブの変状が発生している箇所がある。スラブ軌道は、新幹線等の高速運転が実施されるような箇所での維持管理の省力化や乗り心地の観点から採用されているが、路盤コンクリートで上部軌道を直接支持するため、沈下や変位が軌道変状に直結し、維持管理に影響を及ぼす恐れがある。路盤コンクリート下の変状に対しては、間接的に軌道検測値（高低狂い）の進行から判断すること¹⁾や、直接コアボーリングによって路盤下の空洞を確認する方法がとられている。しかし、変状箇所の特特定（軌道側、路盤側）が困難な事や、作業性の面から局所的な調査に限定される等、路盤の定量的な健全度診断手法は確立されていない。

本研究では、変状箇所の特特定と対策効果の確認が可能な健全度診断手法の開発を目的として、トンネル内で実施した起振器試験結果と試験実施場所における軌道検測値の分析と、注入前後におけるトンネル路盤の起振器試験の再現解析によって得られた数値モデルによる路盤コンクリート下の空洞率の推定を行う。

2. 起振器試験法 起振器試験法は、構造物に対して起振器の起振力で強制的に振動させ、構造物の振動特性を把握する方法である。試験条件は、既往の研究²⁾に示すとおりで、起振器で起振する際には、加速度計を用いて、起振器および計測箇所における加速度を計測する。これらの計測データを用いて伝達関数（振幅）を算出し、計測箇所の振動特性を把握するものである。トンネル内スラブ軌道の構造と起振器試験の概要を図-1に示す。

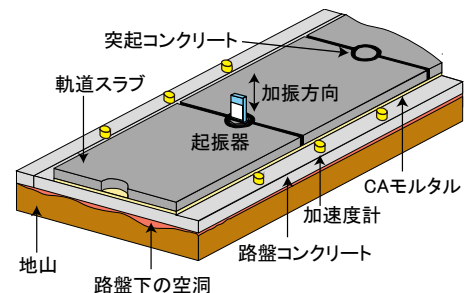


図-1 スラブ軌道の構造と起振器試験

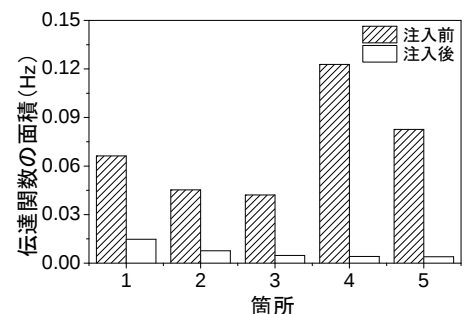


図-2 トンネル内路盤コンクリートの注入前後の伝達関数の面積

3. 路盤コンクリートの伝達関数の面積と軌道検測値 トンネル内路盤コンクリートの振動特性を把握するために、8トンネル62箇所（注入前後の計測の重複を許す）において起振器試験を実施した。あるトンネルの注入前後における起振器試験により得られた路盤コンクリートの伝達関数の面積（3～50Hz）を図-2に示す。対象箇所は5箇所であるが、いずれのケースについても注入前の伝達関数の面積が大きく、注入後の伝達関数の面積が小さくなっている。これは、先の研究²⁾³⁾とも同様の傾向を示しており、伝達関数の面積を用いる手法は有効と判断できる。

路盤コンクリートの振動特性と軌道検測値の相関性を把握することは実務への展開にあたり重要である。そこで、蓄積したトンネル内路盤コンクリートの伝達関数の面積と該当区間における軌道検測値との相関性について分析を実施した結果を図-3に示す。ここで、軌道検測値は該当区間における5m弦高低の最大値としている。（測定間隔は0.25m）基本的な傾向として、健全または注入前の状態では、軌道の高低差が大きく、起振器試験による伝達関数の面積が大きい箇所がある。注入後の状態では、軌道検測値の高低差が小さくなるのが分かる。なお、図-3に示す関係図は路盤と軌道の両方の要因が含まれているため、明瞭な差が出にくいことに注意する必要がある。次に、軌道検測値の高低の絶対値ではなく、その進行速度に着目して分析を実施した。図-4にあるトンネルにおける伝達関数の面積と5m弦高低における12ヶ月進行値の区間最大値との関係を示す。注入前の状態では12ヶ月進行値の区間最大値と伝達関数の面積が大きく、注入を実施することで12ヶ月進行値の区間最大値と伝達関数の面積が小さくなる事が確認できる。

キーワード スラブ軌道, トンネル, 路盤コンクリート, 健全度評価, 起振器試験

連絡先 〒185-0023 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7261

4. 路盤コンクリート下の空洞率の推定

上記の検討から、トンネル路盤の健全度診断では、軌道検測値を用いた一次スクリーニングにより起振器試験実施箇所を選定することが可能となる。そのうえで、変状箇所の特定制と対策効果の確認をおこなうため、路盤コンクリートの伝達関数の面積と路盤コンクリート下の空洞の程度

の相関性を把握することが重要である。しかし、現地計測結果から相関性を把握することは、路盤コンクリート下の空洞の状況が不明な為困難である。そこで、3次元有限要素法による数値モデルを構築し、路盤コンクリート下の空洞率を変化させた数値実験を行った。なお、構築した数値モデルは先の研究⁴⁾に示すとおりで、路盤コンクリート下の空洞の状況を計測しているトンネルの再現解析を実施することで作成した。

空洞率は、全体空洞率を4枚の軌道スラブを8等分した領域に、局所空洞率を中央の2枚の軌道スラブを4等分した領域に対して設定した。(図-5) 図-6に示すように、全体空洞率をパラメータとして0、25、50、75、100%とし、全ての空洞発生状況を想定して、それぞれ1、10、13、10、1ケースの合計35ケースで実施した。加振波形は、線路方向の両端まで伝搬しておらず、局所空洞率に応じて伝達関数の面積が変化することを確認し、着目する加速度の位置を図-7に示す位置とした。なお、加速度の着目位置は現地試験における加速度計の位置と整合している。

各ケースについて、図-7に示す着目位置6点での加速度波形の出力から路盤コンクリートの伝達関数の面積の和を算出した。図-8に伝達関数の面積の和と局所空洞率との関係を示す。路盤コンクリート下の空洞の程度と路盤コンクリートの伝達関数には明確な相関性があり、下式が成立することが判明した。

$$\text{局所空洞率} = 100 - 115 \times \text{EXP}(-15 \times \text{伝達関数の面積の和}) \quad (1)$$

なお、式(1)で示す局所空洞率は、加振点周辺における平均的な割合であることに注意する必要がある。空洞箇所の詳細な位置を把握したい場合には、各着目点における加速度波形から得られる伝達関数の面積から判断する必要がある。

5. まとめ 軌道検測値を用いた一次スクリーニングと、現地での起振器試験結果から路盤コンクリート下の空洞の割合を推定する事で、スラブ軌道を有するトンネル内路盤の変状箇所の特定(軌道側、路盤側)と対策効果の確認が可能健全度診断手法を示した。

<参考文献> 1) 佐々木陽, 武山和生: 路盤下空洞の影響を受ける軌道狂い発生メカニズムの解明と管理方法に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, pp.491-492, 2010. 2) 篠田昌弘, 窪田勇輝, 坂本寛章, 御崎哲一: トンネル路盤コンクリートの健全度診断手法の開発, 鉄道総研報告, vol.28, No.8, pp.17-22, 2014. 3) 窪田勇輝, 篠田昌弘, 中島進, 阿部慶太, 江原季映, 坂本寛章, 御崎哲一, 高橋康将: 起振器試験を用いたスラブ軌道を有するトンネル路盤の変状対策工評価手法, 土木学会第68回年次学術講演会概要集, pp.179-180, 2013. 4) 雪岡剛哲, 篠田昌弘, 中島進, 坂本寛章, 御崎哲一: スラブ軌道を有するトンネル路盤の健全度診断手法に関する検討, 地盤工学シンポジウム論文集, pp.91-94, 2014.

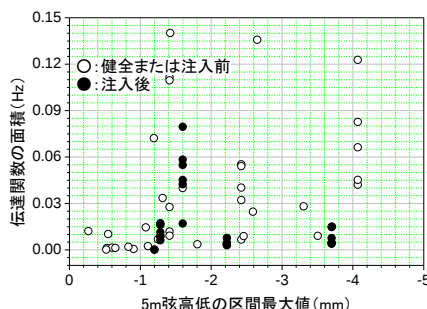


図-3 軌道高低差と伝達関数の面積

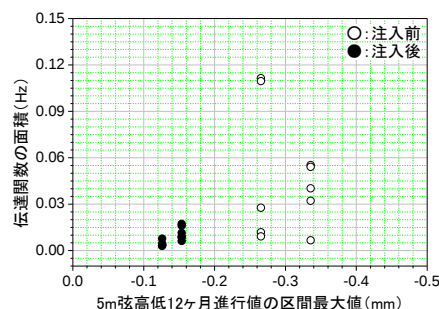


図-4 軌道高低の12ヶ月進行値と伝達関数の面積

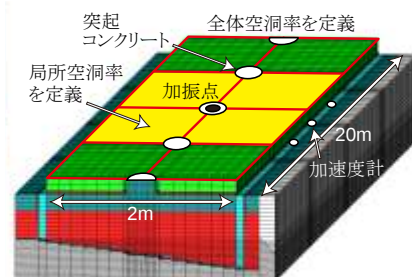


図-5 空洞率の定義

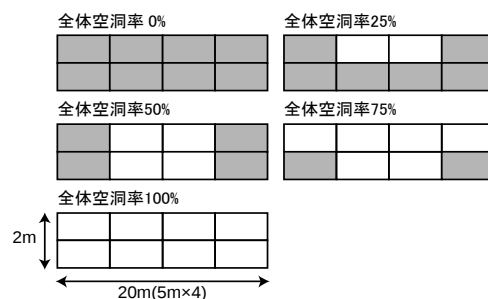


図-6 全体空洞率の設定例

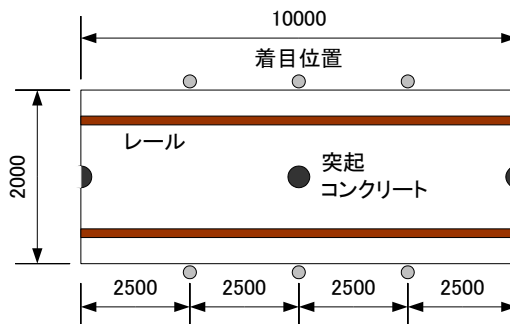


図-7 着目した加速度波形の位置

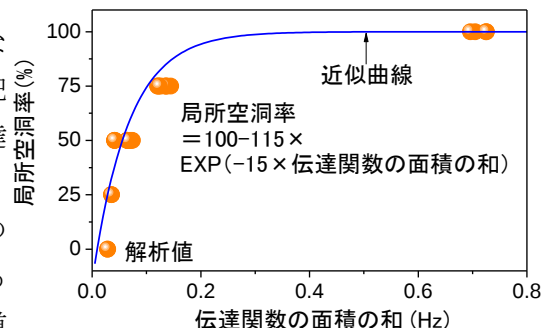


図-8 伝達関数の面積の和を用いた

局所空洞率の推定