

トンネル路盤コンクリートの健全度診断手法の開発

篠田 昌弘* 窪田 勇輝*
 坂本 寛章** 御崎 哲一***

Development of Inspection and Evaluation Methods of Roadbed Concrete in Tunnels

Masahiro SHINODA Yuki KUBOTA
 Hiroaki SAKAMOTO Norikazu MISAKI

Cyclic load by train causes subsidence of railway track level in tunnels, which is caused by the ground deformation under roadbed concrete. Based on the progress of track disorder and core drilling results, the deformation of the roadbed concrete have been evaluated, but there have been no quantitative inspection method until the present. To develop a method for quantitative evaluation of the slab track from the view point of train running stability, a method to survey the properties of roadbed concrete by vibrating it with vibration exciter was proposed. Vibration characteristic of roadbed concrete was evaluated with accelerometers fixed around the vibration location. Then the correlation between the results of vibration tests and progress of track disorder considered to be correlated with the soundness of roadbed concrete was verified, and an evaluation method making use of the correlation was proposed.

キーワード：トンネル，路盤コンクリート，起振器試験，振動特性，健全度評価

1. はじめに

鉄道トンネルでは、通常夜間の限られた時間で軌道保守及び土木構造物の補修等の作業が行われているが、狭隘な現場条件から作業に制約が生じ負担が大きい。さらに、新幹線等の高速運転が実施されるような箇所では、保守が重要となる。このような箇所に対し、維持管理の省力化や乗り心地の確保等を目的として、スラブ軌道が採用されている。スラブ軌道は、鉄筋コンクリート製の軌道スラブを強固な路盤上に設置し、軌道スラブと路盤コンクリートとの間のでん充層であるセメントアスファルトモルタル（CAモルタル）を介して軌道を支持する構造である。トンネル内スラブ軌道の構造を図1に示す。

このようなスラブ軌道においては、路盤コンクリートで上部軌道を直接支持するため、沈下や変位等に厳しい基準値が設けられている。スラブ軌道は、下部構造の変位に対して、鉛直方向で±50mm程度の整正可能量を有しているものの、これ以上の変位に対する対応は困難となる。また、路盤の変位がより直接的に軌道変位に表

れるので、保守管理上の注意を要する。現在、スラブ軌道を有する鉄道トンネルにおいては、直下の路盤コンクリートが列車による繰返し荷重の作用を受けることで沈下し、軌道スラブの変状や軌道変位が発生する場合がある。従来、このような路盤コンクリート下の変位に対しては、間接的に軌道検測値（高低狂い）の進行値から判断すること¹⁾や、直接、路盤コンクリート表面からボーリングを行い路盤下の状況を確認する方法、起振器を用いたスラブ軌道の振動特性の把握に関する検討^{2) 3) 4)}が実施されている。しかし、軌道検測値の進行値からは、軌道側か路盤側の要因かを区別することが困難という問題がある。さらに、ボーリング調査に関しては列車運行

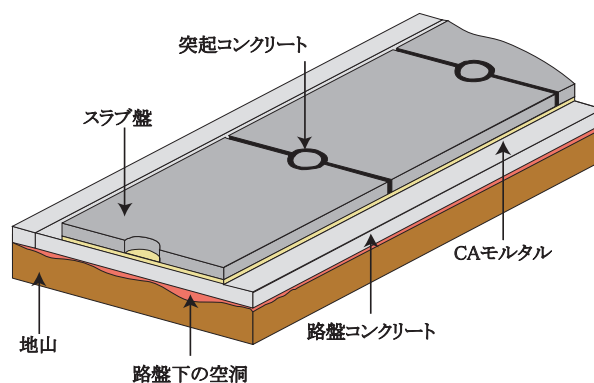


図1 スラブ軌道の構造

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
 ** 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室
 *** 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術開発部

特集：構造物技術

のない夜間の限られた作業間合いにより部分的、局所的な調査となり、地山も含めた路盤の変状について把握することが困難である。

本研究では、トンネル内のスラブ軌道区間における路盤コンクリートの健全度診断手法の開発を目的とし、実際の新幹線トンネル内において起振器を用いた路盤コンクリートの振動試験を実施し、路盤コンクリートの振動特性を把握するとともに、路盤コンクリートの振動特性と軌道検測値との相関分析を実施した。比較の結果、特定の周波数帯域において、両者の高い相関性を確認できた。

2. 路盤コンクリートの振動特性の把握

2.1 はじめに

路盤コンクリートの健全度を把握するためには、路盤コンクリートの健全度と相関のある計測可能な物理量を把握する必要がある。鉄道橋梁下部構造物や土留め擁壁は、構造物の振動特性を把握することで構造物の健全度診断が可能である。そこで、本研究においても、路盤コンクリートの振動特性に着目し、路盤コンクリートの振動特性把握のため、再現性や可搬性を考慮して、起振器を用いることとした。起振器を用いた振動試験法（起振器試験法）については、後述する。

2.2 起振器試験法

2.2.1 起振器の性能

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。本研究で用いた起振器とその仕様を図2と表1に示す。起振器の重量は80kgであり、最大加振力は490Nである。性能上0.1Hz～1000Hzまでの周波数範囲で加振できるが、加速度レベルが高いと低周波数で起振す



図2 起振器

ることは難しい。実務上は、加振1.0Gの条件で3Hz～200Hzの範囲で起振することが可能であり、路盤コンクリートの振動特性の把握では、この周波数範囲で起振することとした。

2.2.2 起振器試験法

路盤コンクリートに対する起振器試験の実施フローを図3に示す。起振器で起振する際には、加速度計を用いて、起振器及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周波数解析を行い、振幅スペクトルを算出する。このスペクトルを用いて計測箇所の振動特性を把握し、健全度の評価を行う。

起振器試験法では、突起コンクリートを起振器で鉛直方向に揺らすことで、路盤コンクリートの振動特性を把握する（図4）。実際の突起コンクリート表面は凹凸がある場合や、スラブ軌道面より下方にある場合があるため、碎石を詰めた土のう袋を調整用として用いる。なお、事前検討において、土のう袋が路盤コンクリートの振動

表1 起振器の仕様

最大加振力 (N)	490
最大変位 (mm)	150
最大速度 (cm/s)	100
最大加速度 (m/s ²)	152.9
周波数範囲 (Hz)	0.1～1000
総重量 (kg)	80

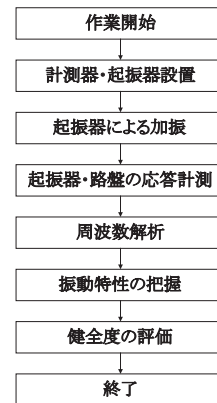


図3 起振器試験の実施フロー

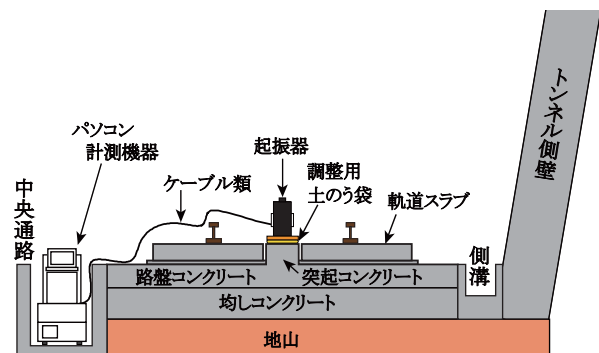


図4 起振器試験の実施イメージ



図5 試験の実施状況

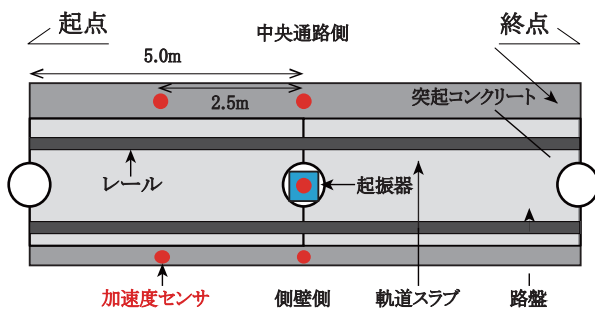


図6 起振器と加速度計の設置位置

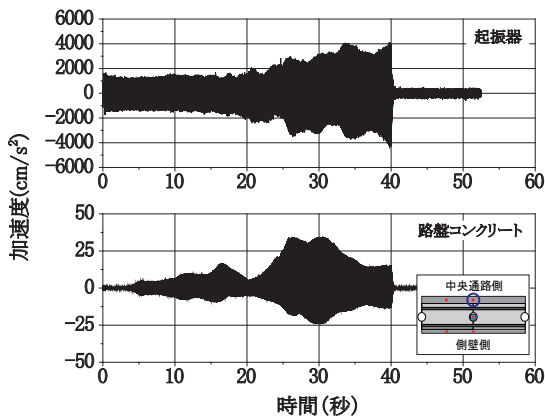


図7 注入前の起振器と路盤コンクリートの加速度時刻歴

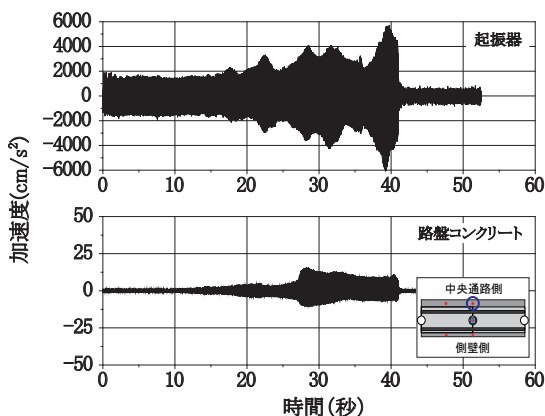


図8 注入後の起振器と路盤コンクリートの加速度時刻歴

特性に与える影響は小さいことを確認している。必要な機材としては、発電機や計測機器等であるが、これらはトンネル中央通路で運搬可能である。

2.3 新幹線トンネル内路盤コンクリートへの適用

2.3.1 試験条件

実際の新幹線トンネル内スラブ軌道区間における路盤コンクリートに対して、注入実施前後に起振器試験を実施した。注入はスラブ軌道上面を複数削孔して実施するものであり、スラブ軌道直下の路盤下の空洞を広い範囲で充填するものである。起振器試験の実施状況を図5に示す。起振器試験における加振条件としては、3Hzから200Hzの掃引加振であり、掃引速度は5Hz/s、起振器の加速度は1.0Gから2.0Gである。図6に起振器と計測器の配置図を示す。起振器の出力を計測する加速度計は起振器の錘部分に設置し、路盤コンクリートの応答を計測する加速度計は、起振器を起点として、中央通路側と側壁側のそれぞれに起点方と終点方に設置し、合計4個設置した。

2.3.2 試験結果

図7と図8に注入前後における起振器と代表的な路盤コンクリートの加速度時刻歴を示す。路盤コンクリートの加速度出力は、中央通路側の起振器に近い加速度（中央通路側終点方）とした。試験結果から、起振器は加速度一定で入力しているものの、路盤コンクリートの状態により、高振動数領域で起振器自体も路盤コンクリートの振動の影響を受けていることが分かる。また、注入前後の路盤コンクリートの加速度応答を比較すると、注入後の方が注入前より加速度応答が小さくなっていることが分かる。これは、注入により路盤コンクリートと地山の密着程度が増し、みかけ上の剛性が増加して、揺れにくい構造体となったためであると考えられる。

図9に注入前後の路盤コンクリートの伝達関数を示す。いずれの計測箇所においても、注入後の路盤コンクリートの伝達関数（振幅）は、注入前の路盤コンクリートの伝達関数（振幅）よりも小さくなった。図10に図9の50Hzまでの伝達関数の拡大図を示す。図より、注入前は大きく揺れているのに対して、注入後はほとんど揺れていないことが分かる。以上の結果から、路盤コンクリートの健全度は、振動特性（揺れやすさ）を用いることで評価可能であることが分かった。

2.4 路盤コンクリートの揺れやすさ評価

2.4.1 伝達関数（振幅）の面積を用いた揺れやすさ指標

路盤コンクリートの健全度は、振動特性（揺れやすさ）と相関が高いことから、路盤コンクリートの揺れやすさを測定可能な物理量で示す必要がある。本研究では、揺れやすさ指標として、ある周波数帯域における伝達関数（振幅）の面積を指標とした（図11）。特定の閾値より

特集：構造物技術

低い周波数帯域において、伝達関数（振幅）の面積が大きいと不健全、伝達関数（振幅）の面積が小さいと健全と判定することとした。ここで、伝達関数（振幅）の面積の算定時に用いる閾値の設定については、後述する軌道検測値の進行値が有効な指標となると考え、伝達関数（振幅）の面積が軌道検測値の進行値と相関が高くなるように設定することとした。

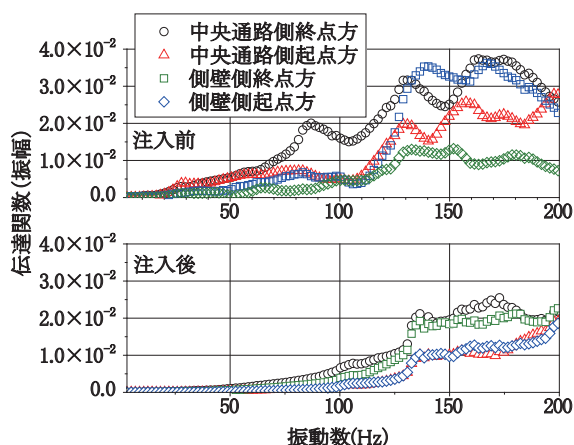


図9 注入前後の路盤コンクリートの伝達関数

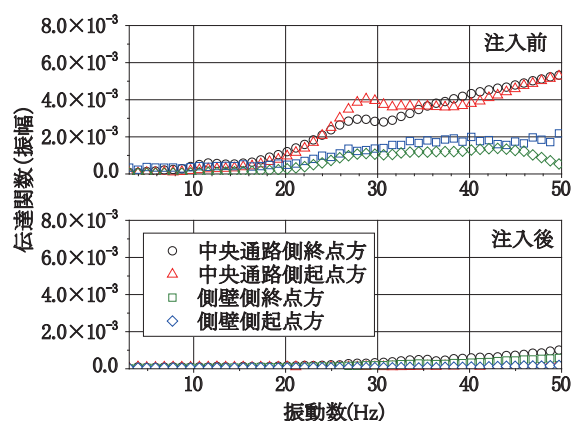


図10 注入前後の路盤コンクリートの伝達関数の拡大図

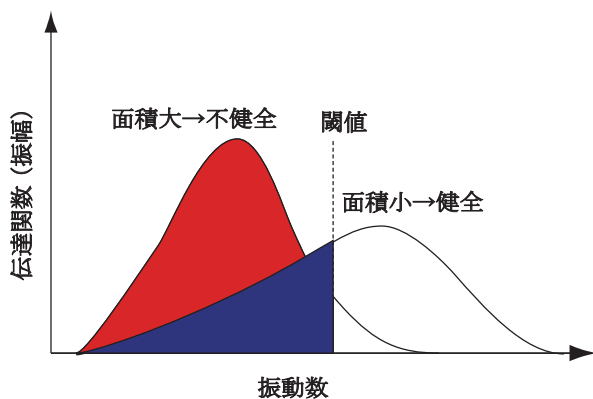


図11 伝達関数（振幅）の面積

2.4.2 伝達関数（振幅）の面積算定における閾値の検討
(1) 検討方法

路盤コンクリートの健全度評価の精度向上を目指し、路盤コンクリートの健全性の指標である伝達関数（振幅）の面積と軌道検測値の進行値との相関性について、これまで実施してきた路盤コンクリートの振動試験結果を用いた相関分析を実施した。

起振器試験では、図6で示すように、加振対象である突起コンクリート真横の位置で、中央通路側、側壁側の2箇所に加速度計を配置して計測している。よって、各加速度計に近いレールの軌道検測値と対応させることにより、データ同士の関連付けを行った。これまでに計測した6トンネル、30ヶ所の起振器試験結果及び、起振器試験の各計測箇所に対応する箇所の軌道検測値の進行値との関係を調査した。伝達関数（振幅）の面積については、3～50Hz、50～100Hz、100～150Hz、150～200Hzと4つの周波数帯域に分け、軌道検測値については、5m弦高低の2～12ヶ月進行値を検討対象とした。軌道検測値として5m弦を用いた理由は、短い波長の軌道変状を捉えるためである。なお、本検討では周期的変動の影響が無視できるほど小さいと仮定して、5m弦高低の進行値の設計期間を変化させた。

(2) 検討結果

図12に代表として、伝達関数（振幅）の面積と5m弦高低の4ヶ月進行値との関係を示す。図には相関係数も示した。相関係数が負の値を示しているが、これは軌道の高低がマイナス方向に進むほど伝達関数（振幅）の面積が大きくなる、つまりコンクリート路盤下の変状が進行するほど路盤が揺れやすくなることを意味している。なお、図12には軌道側が要因となって軌道検測値の進行値が増加しているデータも含まれているため、全体的に相関係数が低い傾向が見られる。

表2に、5m弦高低の2～12ヶ月進行値とスペクトルの関係を示す。表中の記号は、Rを相関係数とすると、×が $|R| < 0.30$ ：低い相関、△が $0.30 \leq |R| < 0.40$ ：比

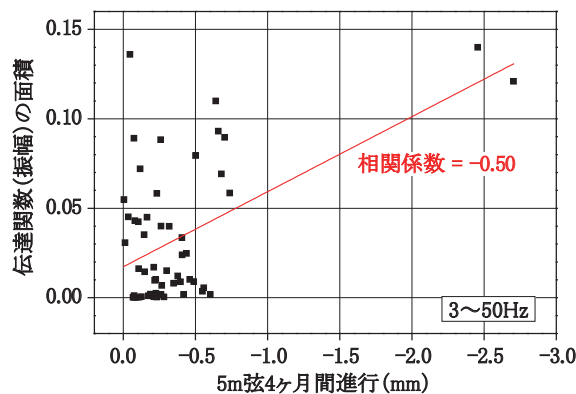


図12 伝達関数（振幅）の面積と軌道検測値の関係

較的低い相関，○が $0.40 \leq |R| < 0.50$ ：比較的高い相関，◎が $0.50 \leq |R|$ ：高い相関を表している。表2より、4ヶ月進行値と10ヶ月進行値が3～50Hzの周波数帯において相関係数の絶対値が大きかった。同じく100～150Hzの周波数帯域において、4ヶ月進行値、6ヶ月進行値、8ヶ月進行値、10ヶ月進行値が高い相関を示した。

軌道検測値の2ヶ月進行値および12ヶ月進行値においては相関係数の絶対値が低い値となった。2ヶ月進行値については、トンネル路盤の沈下が短期間で生じるものではなく列車の繰返し荷重を受けることで徐々に進行し、2ヶ月という短い期間では軌道に大きな変化が生じないため明確な傾向が見られないと考えられる。また、軌道検測値は年間を通して周期的に変化することが知られており、進行値の設定期間が長くなると、季節変動の影響を大きく受け、相関係数が低くなる可能性もある。

以上のことから、周期的変動が無視できるほど小さい場合には、軌道検測値進行期間については、軌道整備の時期を考慮した上で4ヶ月～10ヶ月の中期的な期間における進行値で評価することが妥当であると考えられる。また、伝達関数（振幅）の面積算定時の閾値については、3～50Hzと100～150Hzの周波数帯が軌道検測進行値と高い相関を示したが、新幹線通過時の加振周波数帯は3～50Hzの範囲内にあることから、本研究では、伝達関数（振幅）の面積を算定する際には、3～50Hzの周波数帯を用いることとした。軌道検測値は年間を通して周期的に変化することが知られており、今後は周期的変化を考慮したトレンド解析等によって検討していく必要がある。

(3) 現地試験結果への適用

図7と図8で示した注入前後における起振器試験では、同様な起振器試験を10箇所実施した。各計測箇所において注入前後の伝達関数（振幅）の面積の比較結果を図13に示す。図13から、いずれの計測箇所においても注入後の伝達関数（振幅）の面積が小さくなっており、路

盤コンクリートが揺れにくくなっていることから、注入による対策が有効であったことが分かる。

3. 路盤コンクリートの健全度診断手法

路盤コンクリートの健全度診断手法として、フーリエスペクトルの面積を用いる方法について前項で検討を行った。路盤コンクリートの健全度診断手法に関しては、伝達関数（振幅）の面積による評価もさることながら、列車走行性に関する直接的な指標である軌道検測値の進行値も同様に重要な指標になると考えられる。この際、軌道検測値の進行値に関しては軌道管理の実状を考慮しながら、効率的な保守管理を実施していく上で所定の閾値を定める必要がある。一方、起振器試験による指標である伝達関数（振幅）の面積に関しては、路盤の変状の目安となる閾値を設ける必要がある。

図14にこれらの閾値や、軌道検測値の進行値と起振器試験結果の相関性を利用した路盤コンクリートの健全度診断手法を示す。これまでの検討から、横軸の軌道検測値の進行値に関しては、5m弦高低の4ヶ月～10ヶ月における進行値で評価する。縦軸の伝達関数（振幅）の面積に関しては、3～50Hzの周波数帯域で算定する。

図14に示す通り、両閾値を用いることにより4つの領域に分割し、それぞれの領域に応じて対策や監視を行

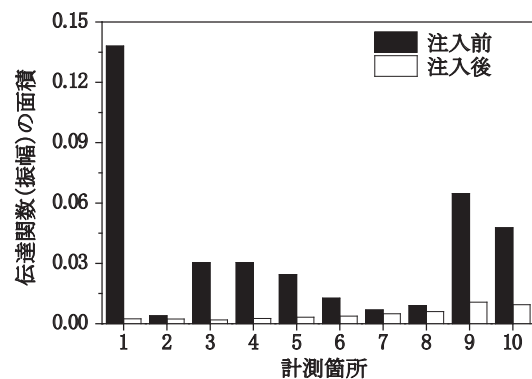


図13 注入前後における伝達関数（振幅）の面積の比較

表2 閾値を変化させた伝達関数（振幅）の面積と軌道検測値の比較

< 5m 弦 >		伝達関数（振幅）の面積			
		3～50Hz	50～100Hz	100～150Hz	150～200Hz
軌道検測進行値	2ヵ月	○	×	×	×
	4ヵ月	◎	△	◎	×
	6ヵ月	○	○	◎	△
	8ヵ月	○	△	◎	△
	10ヵ月	◎	△	◎	△
	12ヵ月	○	△	○	×

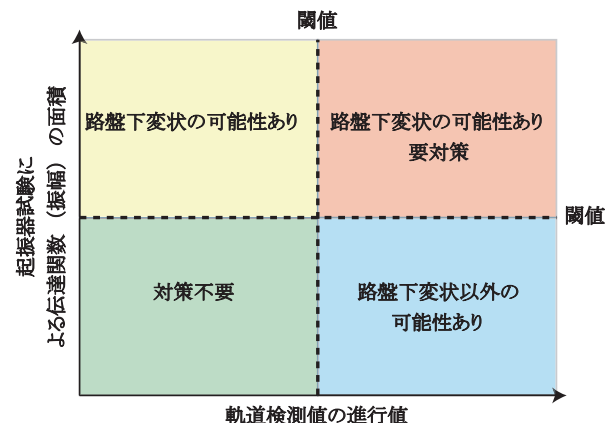


図14 路盤コンクリートの健全度診断手法

特集：構造物技術

うことが望ましい。このような健全度診断手法の確立に際しては、特に伝達関数（振幅）の面積の閾値に関して、今後も継続的な起振器試験によるデータ収集や、実験的・解析的な検討も実施するなどして、診断法の精度向上や閾値の決定に向けて取り組む必要がある。

4. 結論

本研究では、トンネル内路盤コンクリートの健全度診断手法の開発を目的に、路盤コンクリートの健全度がその振動特性と相関があることを示した後、路盤コンクリートの振動特性の実務的な計測方法である起振器試験法を提案した。さらに、起振器試験で得られた路盤コンクリートの振動特性と軌道検測値を用いた健全度診断手法を提案した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ① 路盤コンクリートへの注入前後において、起振器試験を実施した結果、注入前後における路盤コンクリートの揺れやすさの変化を定量的に把握可能であることが分かった。
- ② 伝達関数（振幅）の面積と軌道検測値（5m 弦高低）の進行値との相関性について、伝達関数（振幅）の面積算定時の周波数帯域に関する相関分析を行ったところ、特に 3～50Hz と 100～150Hz の周波数帯域において相関性が高いことが判明した。
- ③ 伝達関数（振幅）の面積と軌道検測値（5m 弦高低）の進行値との相関性について、軌道検測値の進行値算出期間に関する相関分析を行ったところ、周期的変動が無視できるほど小さい場合には、2ヶ月進行値と 12ヶ月進行値では相関性が低い結果となった。

また、4～10ヶ月進行値では、比較的高い相関性を示した。

今後は、図 14 に示した路盤コンクリートの健全度診断手法における軌道検測値の進行値と起振器試験による伝達関数（振幅）の面積の閾値を設定する必要がある。そのためには、同時期における路盤コンクリートの振動特性と軌道検測値の進行値を把握して、データベースを作成する必要がある。また、路盤下の空洞を模擬した模型実験や、現地試験結果を用いた検証解析を実施して数値モデルを作成し、数値実験を行うことが有効であると考えられる。

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) 坂本寛章・真井哲生・篠田昌弘・御崎哲一・坂本保彦・藤井大三：起振器を用いたスラブ軌道の走行安定性に関する評価法，鉄道工学シンポジウム論文集，第 15 号，pp.124-131，2011
- 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) 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・瀧浪秀元・高橋康将：スラブ軌道を有するトンネル路盤の振動特性と列車走行安定性の相関分析，第 57 回地盤工学シンポジウム論文集，pp.247-252，2012