

打音試験でスラブ軌道てん充層の劣化状態を検査する

スラブ軌道は、コンクリート製の道床と軌道スラブの間にCAモルタル製のてん充層が充てんされた構造で、新幹線の主要な軌道として広く用いられています。寒冷地にある一部のスラブ軌道では、てん充層の凍害などで、軌道スラブの底面に隙間を生じる場合があります。軌道スラブ底面に生じた隙間を放置すると、軌道スラブにひび割れを生じるおそれがあることから、隙間を検知して補修することが求められます。これまで、鉄道総研では打音試験による隙間検知に関する研究開発に取り組んできました。ここでは、打音試験の高精度化・機械化に向けた取り組みについて紹介します。



稲葉 紅子
Kohko Inaba
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
研究員



高橋 貴蔵
Takatada Takahashi
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
主任研究員



瀧上 翔太
Shota Fuchigami
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室
副主任研究員



桃谷 尚嗣
Yoshitsugu Momoya
軌道技術研究部
軌道・路盤研究室長

スラブ軌道とてん充層

新幹線で用いられている主要な軌道の一つにスラブ軌道があります。これは、コンクリート製の道床と軌道スラブの間にCAモルタル（セメント、アスファルト乳剤などからなる複合材料）製のてん充層が充てんされた構造となっています（図1）。スラブ軌道はコンクリートなどの剛性が高い部材からなるため、砕石からなるバラスト軌道と比べると、軌道の変形が生じにくい特徴があります。スラブ軌道のてん充層は、適度な剛性と可とう性を有していることから、軌道スラブ敷設時の高さ調整を行ったり、軌道スラブを安定して支えたりするうえで重要な役割を果たしています。

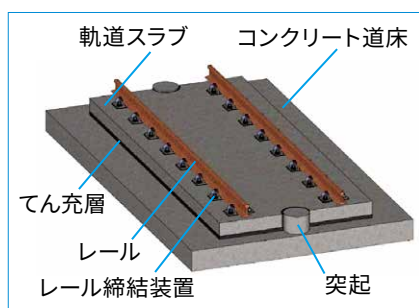


図1 スラブ軌道

てん充層の劣化による軌道スラブ底面の隙間の発生

スラブ軌道は、山陽新幹線をはじめとする新幹線用の軌道として広く用いられてきました。一方、スラブ軌道は古いもので敷設から40年以上が経過していることから、近年では、維持管理の在り方が課題となっています。とくに、寒冷地のスラブ軌道の一部では、凍害などによるてん充層の劣化が問題となっています。てん充層が劣化すると、てん充層に支えられている軌道の底面に隙間ができ、軌道スラブの端部が宙に浮いたような状態になってしまいます（図2）。このような状態を放置すると、軌道スラブにひび割れが生じ、性能が下がるおそれがあります。そのため、スラブ軌道の維持管理では、軌道スラブの性能が下がる前に、底面に

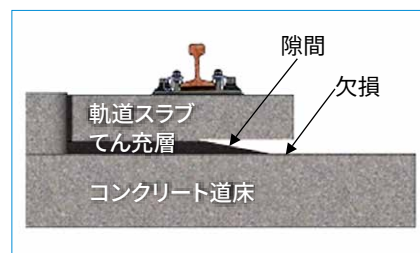


図2 てん充層の劣化による影響

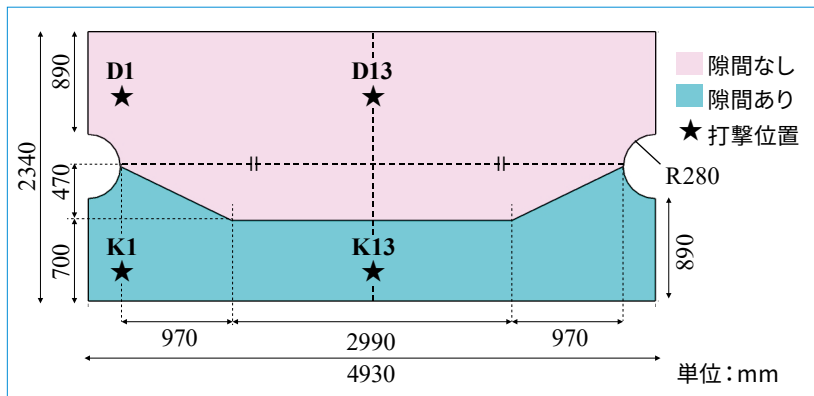


図3 実物大供試体で模擬した隙間の範囲および打撃位置



図4 打音試験の様子

生じた隙間を非破壊検査で発見し、補修を行うことが重要です。

打音試験による軌道スラブ底面の隙間検知の現状と課題

鉄道総研では、前章で述べた経緯から、打音試験による軌道スラブ底面の隙間検知に関する研究開発に取り組んできました。打音試験とは、対象物を小型のハンマーで打撃し、発生した打撃音の音響特性(高さ・大きさ・減衰性)から対象物内部の空洞を検知する検査手法のことです。打音試験は操作が簡単で短時間に検査できることから、トンネル覆工部などのコンクリート構造物を中心に広く用いられています。スラブ軌道についても、打音試験を軌道スラブ底面の隙間検知に適用できる可能性が示されています¹⁾²⁾。

一方で、これまでの研究は、打撃音の大きさに着目したものであり、音の高さや減衰性については基礎的な検討に留まっていました。また、軌道スラブは5m×2m程度の板状の部材であるため、打撃位置によって打撃音の音響特性が変化する可能性が考えられますが、打撃位置による影響についても未検討でした。軌道スラブ底面の隙間の有無をより精度良く判定するためには、これらについて詳細な検討を行うことが求められます。

ここでは、打音試験時における打撃音の音響特性の解明と機械学習を用い

た隙間の判定方法に関する取り組みを中心に紹介します。

実物大実験と固有値解析による打撃音の音響特性の解明

軌道スラブ底面の隙間の有無や打撃位置が打撃音の音響特性に与える影響について明らかにするため、軌道スラブ底面に厚さ7mm程度の隙間を模擬した実物大供試体を用いて打音試験を行いました。隙間を模擬した実物大供試体による打音試験はこれまでの研究でも行われていますが²⁾、今回の供試体は、実際に予想される隙間の形状により近いものとなっています(図3)。

打音試験では、軌道スラブ上面を長手方向に12分割(測線A～K)、短手方向に26分割(測線1～25)する測線の交点(測点A1～K25、合計232測点、締結部・突起部・CAモルタル注入孔を除く)を打撃しました(図3)。ここでは、隙間のない測点の代表として測点D1とD13を、隙間のある測点の代表として測点K1とK13を示します。また、インパルスハンマーで荷重を、マイクロホンで打撃音をそれぞれ計測しました(図4)。打音試験の結果、打撃荷重は平均850N程度、変動係数は5.0%程度となり、ばらつきが比較的小さいことがわかりました。打撃音については、時刻歴データと周波数データ(時刻歴データを高速フーリエ変換したもの)をもとに、打撃音の傾向を

分析しました(図5、図6)。時刻歴データから周波数データに変換することで、どのくらいの高さの音がどのくらいの強さで鳴っているのかを知ることができます。図5および図6から、以下の傾向がみられました。

- これまでの研究と同様、隙間がある測点(K1, K13)の方が隙間のない測点(D1, D13)よりも音が大きい。
- 図5から、隙間がない場合、長手方向端部に位置する測点D1の方が長手方向中央部に位置する測点D13よりも音が大きく、かつ高い。
- 図6から、隙間がある場合、長手方向端部に位置する測点K1の方が長手方向中央部に位置する測点K13よりも音が大きく、かつ急激に減衰している。一方で、隙間のない測点D1やD13と異なり、音の高さは変わらない。

以上より、隙間の有無だけでなく、打撃位置によっても、打撃音の音響特性が異なることがわかりました。

そこで、打撃位置が打撃音の性質に与える影響についてより詳細な検討を行うために、固有値解析を行いました。固有値解析とは、解析対象物が持っている振動特性(固有周波数、固有モード)を求めるための数値シミュレーションのことです。固有値解析で求める固有周波数(音の高さ)は解析対象物の形状や剛性によって決まります。固有モードは、解析対象物の振動

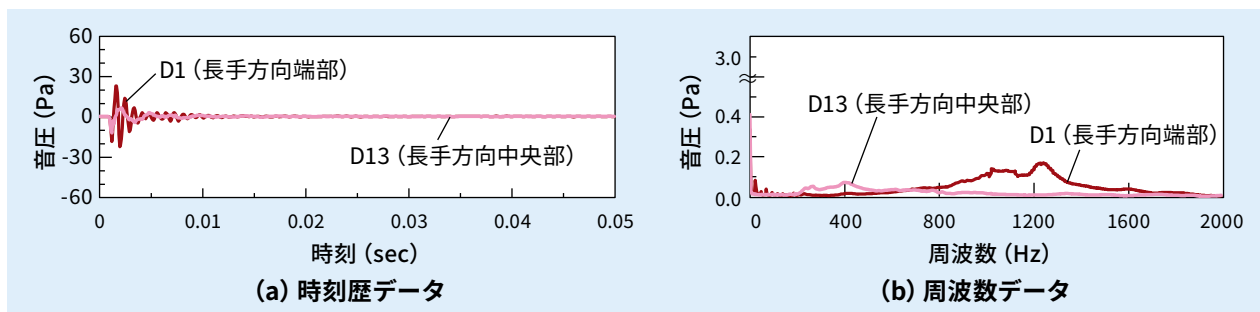


図5 打撃音の例：隙間がない場合（測点D1, D13）

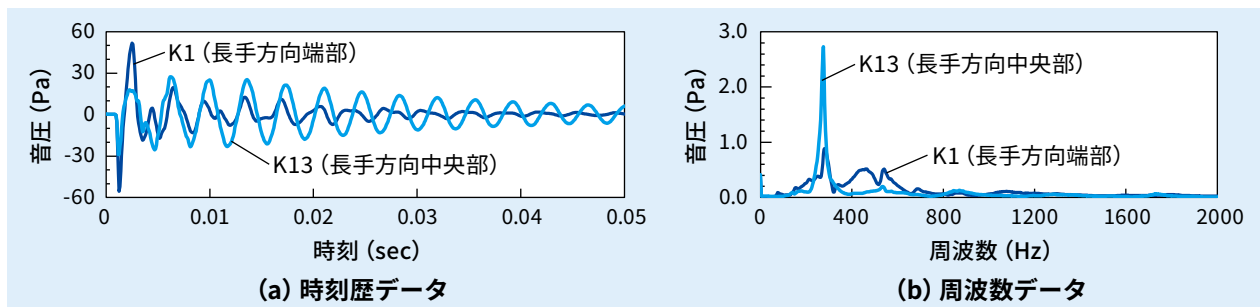


図6 打撃音の例：隙間がある場合（測点K1, K13）



図7 固有周波数と固有モードの例

するときの揺れ方（振動モード）を表すもので、固有周波数に対応します。

ここでは、軌道スラブの固有周波数と固有モードを求めました（図7）。固有値解析の結果から、隙間がない場合・隙間がある場合のいずれも、打撃音の高さが曲げまたはねじれの固有モードに対応していることがわかりました。さらに、固有モードには節（ほとんど変形しない箇所）と腹（大きく変形する箇所）が複数あることがわかりました。このことから、打撃位置によって打撃音の音響特性が異なるのは、打撃位置と軌道スラブの振動モードの節や腹までの距離が影響しているためだと考えられます。例えば、節に近いところを打撃すれば小さな音が鳴り、腹に近いところを打撃すれば大きな音が鳴ります。

機械学習による隙間検知

これまでの研究²⁾では、音の大きさ（時刻歴データまたは周波数データの最大値）で閾値を設定して、閾値を超えたら隙間があるとみなす方法で判定していました。この方法でも、ある程度判定することができますが、隙間の有無をより正確に判定したい場合には、打撃位置による影響も考慮する必要があります。しかし、軌道スラブの振動モードには、上に述べたように、節や腹が複数あるため、打撃位置一つ一つに人間が閾値を設定することは容易ではありません。このような場合、隙間がある、または隙間がないときの打撃音のパターンを教師あり機械学習で学習させることで、隙間の有無を判定するという方法が考えられます。ここで

は、教師あり機械学習を用いて、隙間の有無を判定した例について紹介します。

教師あり機械学習では、ランダムフォレストと呼ばれるアルゴリズムを用いました。ランダムフォレストでは、決定木という考え方に基づいています。決定木とは、隙間の有無を判定するためのルールを定めたフローチャートのようなものです（図8 (a)）。ランダムフォレストはこの決定木をたくさん集めたもので、決定木1本で判定するよりも、高い精度で判定することができます（図8 (b)）。ここでは、各測点の1回目～4回目の周波数データを学習用データに、5回目の周波数データを判定用データに用いました。また、学習用・判定用データともに、0：締結部・突起部、1：隙間なし、2：隙間ありとしてラベリングしました。判定した結果、正解率：97%、適合率：97%、再現率95%、F値：95%となり、非常に高い判定精度であることがわかりました（参照「機械学習の評価指標について」）。また、判定結果をもとに作成したコンター図から、正解ラベ

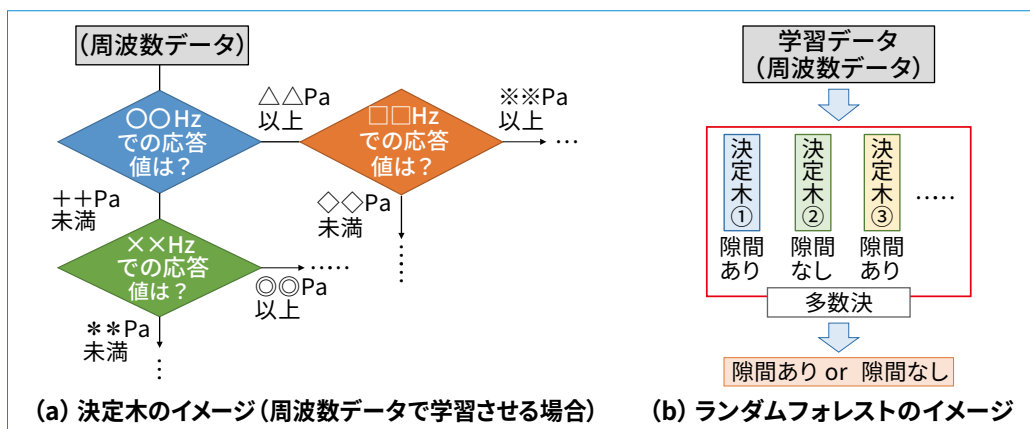


図8 決定木とランダムフォレストのイメージ

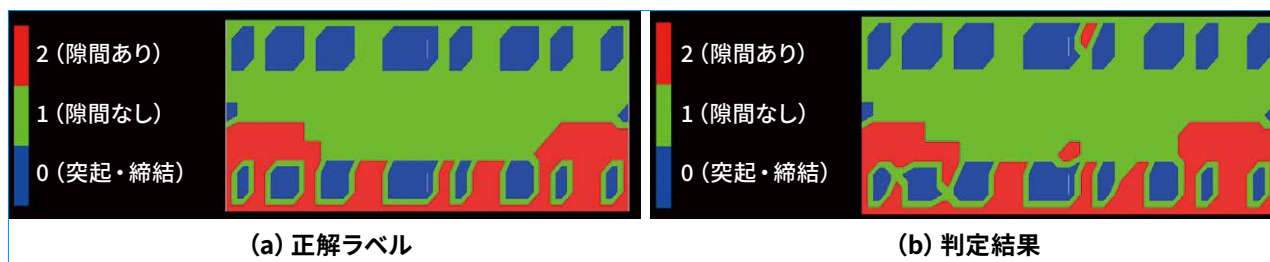


図9 教師あり機械学習による判定結果

ルともよく合致していることがわかりました(図9)。以上から、教師あり機械学習は、軌道スラブ底面の隙間を検知するのに有用なツールである可能性が示されました。

打音試験の機械化と今後の展望

ここでは、隙間の有無を高精度に判定するための取り組みを中心に紹介しましたが、実際の現場では、精度だけでなく、短時間に多くの範囲を検査できることが求められます。現在、打音試験のスピードアップを図るため、打音試験の機械化にも取り組んでいます。これまで手動でハンマーを操作していた動作を機械化することで、より少な

い作業人数でより速く検査できることが期待されます。開発したスラブ軌道用打音試験装置(図10)では、11連からなる打撃ユニットを空圧で押し出すことで軌道スラブを打撃し、付属のマイクロホンで集音する仕組みとなっ

ています。スラブ軌道用打音試験装置と機械学習による隙間検知を組み合わせることで、効率的かつ高精度な打音試験を実現できると考えられます。[RRR]

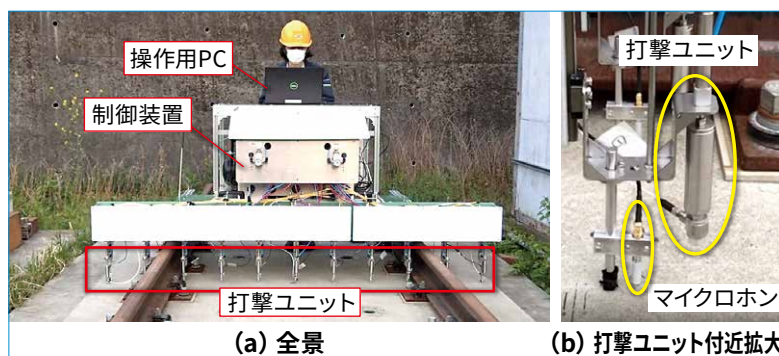


図10 スラブ軌道用打音試験装置

機械学習の評価指標について

機械学習では、おもに以下の指標で学習モデルの性能を評価します。

- 正解率：全判定数に対する正解数の割合
- 適合率：実際に隙間がある数に対して、隙間があると正しく判定できた数の割合
- 再現率：隙間があると判定した数に対して、実際に隙間があった数の割合
- F 値：適合率と再現率の調和平均

一般に、F 値が高いほど学習モデルの性能が高いといえます。

文 献

- 1) 高橋貴蔵, 淵上翔太, 谷川光, 桃谷尚嗣：軌道スラブ底面に生じる隙間の検査と補修により予防保全する, RRR, Vol.76, No.10, pp.12-15, 2019
- 2) 高橋貴蔵, 小滝康陽, 桃谷尚嗣, 板倉真理佳：打音試験による鉄道用軌道スラブ底面の隙間の評価に関する基礎的研究, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.6, pp.217-222, 2018