

## 音響・構造連成解析による軌道スラブの打音特性に関する基礎的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○稲葉紅子 高橋貴蔵 桃谷尚嗣

## 1. はじめに

新幹線で用いられる主要な軌道にスラブ軌道がある。スラブ軌道は、図1の通り、上から順に、レール、レール締結装置、軌道スラブ、てん充層およびコンクリート道床から構成される。

スラブ軌道の多くは敷設から数十年が経過しており、凍害などによって、てん充層とその上の軌道スラブとの間に、図2に示すようなくさび状の欠損(隙間)を生じる事象が確認されている<sup>1)</sup>。こうした欠損は、軌道スラブに損傷を生じさせ、それが拡大すると、スラブ軌道の維持管理に影響を与える恐れがある。そのため、欠損が比較的軽微な段階で、これを検知する必要がある。そのための非破壊検査手法として、打音法(打音検査)が検討されてきた<sup>2)</sup>。打音法をスラブ軌道に適用するにあたっては、軌道スラブから発生する打撃音の周波数特性や減衰性といった打音特性とてん充層の欠損範囲や支持形状といった欠損状態との関係を明らかにする必要がある。

しかし、さまざまな欠損状態を模した実物大供試体を製作して、実験的な検討を行うことは容易ではない。

そこで、本研究では、音響・構造連成解析による数値シミュレーションから、軌道スラブの打音特性(周波数特性、減衰性)について考察した。

## 2. 解析手法

本研究では、打音法を模擬するために、音響・構造連成解析を用いた。これは、弱連成型のマルチフィジックス解析手法の一つで、過渡応答解析で得られた応答速度を境界条件として、音響解析を行うものである。式(1)に過渡応答問題の支配方程式を、式(2)に音響問題の支配方程式(Helmholtz方程式)を示す。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

ここで、 $M$ は質量行列、 $C$ は減衰行列、 $K$ は剛性行列、 $F$ は荷重ベクトル、 $x$ は変位ベクトルである。

$$\nabla^2 p(r) - k^2 p(r) + q(r, t) = 0; k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2)$$

ここで、 $p$ は音圧、 $r$ は位置ベクトル、 $q$ は音源項、 $t$ は時刻、 $k$ は波数、 $\omega$ は角速度、 $f$ は周波数、 $c$ は音速である。

## 3. 解析モデルと解析例

## 3. 1. 解析モデル

本解析では、図3に示す軌道スラブの上面3箇所( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ )に対して、落下高さ1.0mm、初速度0.86m/sで、鉛直下向きに、重錘を衝突させるモデルで計算した。初速度については、式(3)に示す運動量と力積の関係から求めた。このとき、打撃荷重を1000N、加振時間を $1.0 \times 10^{-3}$ sとした。

$$m(v_0 + \sqrt{2gh}) = \int F dt \quad (3)$$

ここで、 $m$ は重錘の質量、 $v_0$ は初速度、 $g$ は重力加速度、 $h$ は落下高さ、 $F$ は打撃力、 $t$ は加振時間である。

解析対象のスラブ軌道は、3次元六面体のソリッド要素で、下から順に、コンクリート道床、てん充層、軌

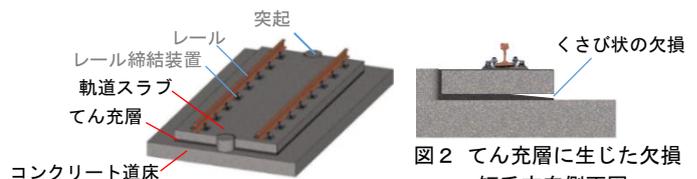


図1 スラブ軌道

	寸法 (mm)
コンクリート道床	2540×4930×200
てん充層	2340×4930×50
軌道スラブ	2340×4930×190
重錘	50×50×50

表1 寸法値

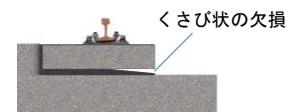


図2 てん充層に生じた欠損

: 短手方向側面図

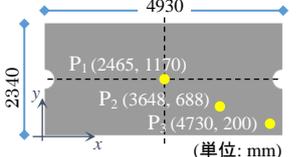
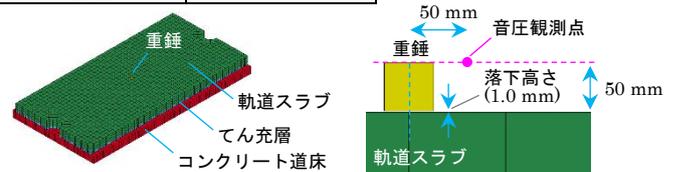


図3 打撃位置



(a) 鳥瞰図

図4 解析モデル

(b) 拡大図: 重錘周辺

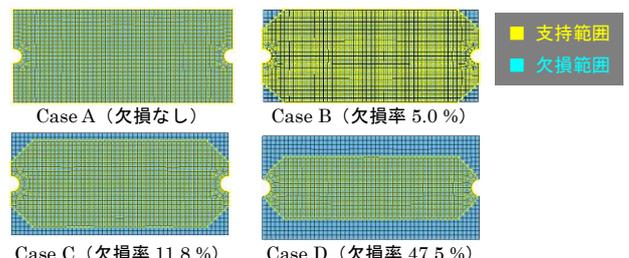


図5 各解析例の欠損範囲: てん充層上面図

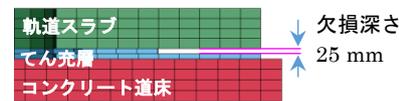


図6 てん充層の欠損モデル: 短手方向側面図

道スラブからなる線形弾性体の3層構造である。本解析では、鉄筋、レール、レール締結装置については省略した。また、重錘は3次元ソリッド要素からなる立方体の剛体である。境界条件については、コンクリート道床下面を鉛直方向のみ拘束した。表1に寸法値を、図4に解析モデルの鳥瞰図ならびに重錘周辺の拡大図を示す。各部材間の接触判定に際しては、ペナルティ法を用いた。このとき、ペナルティ係数を一般に用いられる値である1.0とした。減衰については、スラブ軌道全体に作用する剛性比例減衰ならびに各層の接触面に作用する粘性減衰を考慮した。前者については、減衰定数を1.0%、後者については、粘性減衰係数を10%とした。音圧観測点については、図4(b)に示すように、重錘の中心から長手方向に50mm、軌道スラブ上面から鉛直上向きに50mm離れた位置とした。材料物性値については、表2の通り定めた。

## 3. 2. 解析例

本解析では、てん充層に欠損のない健全なもの(Case A)、深さ25mmの欠損を生じたもの(Case B, Case C, Case D)に大別して、計算した。図5に各解析例の欠損範囲を、図6に欠損モデルを示す。なお、後者の解析例

キーワード 打音法, スラブ軌道, てん充層, CA モルタル, 音響解析, 過渡応答解析, 音響・構造連成解析

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道・路盤 TEL 042-573-7276

表2 材料物性値

	コンクリート道床	軌道スラブ	てん充層	重錘	空気
密度 $\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )	$2.30 \times 10^{-6}$	$2.30 \times 10^{-6}$	$1.70 \times 10^{-6}$	$7.80 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-9}$
音速 $c$ (mm/s)	—	—	—	—	$3.40 \times 10^5$
ヤング率 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.64 \times 10^4$	$3.10 \times 10^4$	$1.26 \times 10^3$	$2.00 \times 10^5$	—
ポアソン比 $\nu$	0.17	0.17	0.35	0.30	—
静止摩擦係数 $\mu$	上面 0.5	下面 0.3	上面 0.3 下面 0.5	下面 0.7	—

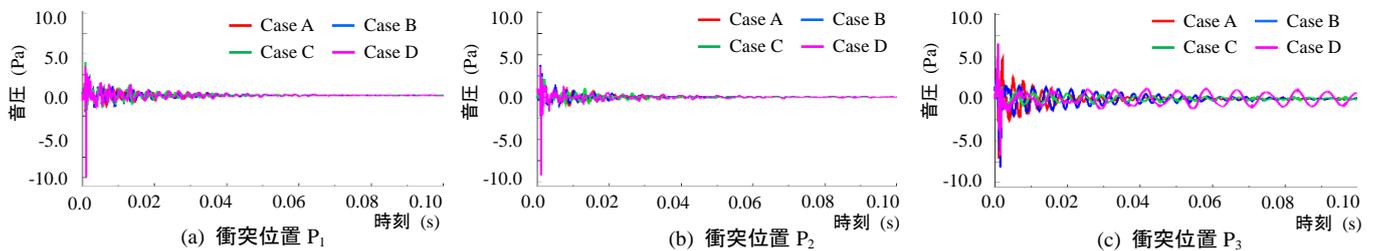


図7 解析結果：時刻歴応答

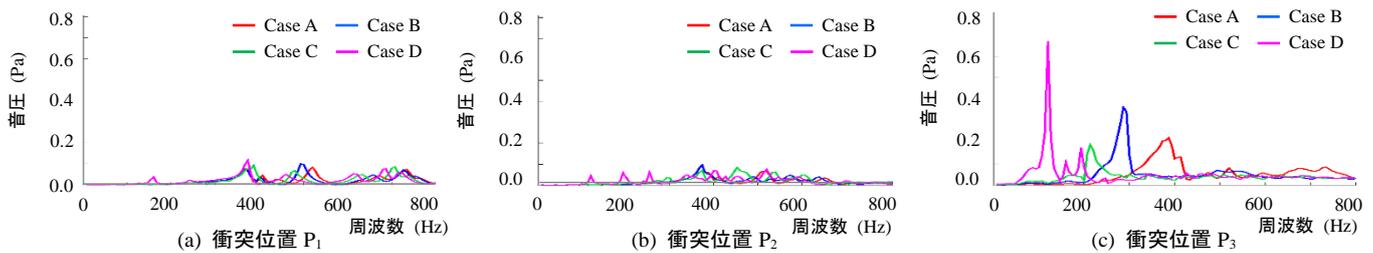


図8 解析結果：周波数応答

について、Case B はてん充層の隅角部のみが欠損した場合、Case Cは欠損が長手方向側面まで拡大した場合、Case DはCase Cよりも広範囲に欠損が拡大した場合を想定した。

#### 4. 解析結果

図7に時刻歴応答を、図8に周波数応答を示す。なお、周波数応答については、卓越点のうち、周波数の低い順から、1次、2次、…… $n$ 次卓越周波数と呼称する。

はじめに、図7(a),(b)より、衝突位置 $P_1, P_2$ のとき、重錘の衝突直後から、急激に音圧が減衰した。一方、同図(c)より、衝突位置 $P_3$ では、前二者よりも音圧の減衰が緩やかであった。これは、欠損のないCase Aでも同様であった。

つぎに、図8(a),(b)から、衝突位置 $P_1, P_2$ のとき、1次卓越点の応答値は0.10 Pa以下であった。一方、同図(c)より、衝突位置 $P_3$ のとき、衝突位置 $P_1, P_2$ よりも応答値が大きい傾向にあった。

また、1次卓越周波数およびこれに対応する音圧の応答値については、以下の通りとなった。

##### (1) 衝突位置 $P_1$

- Case A : 1次卓越周波数 373 Hz, 応答値 : 0.077 Pa
- Case B : " 367 Hz, " : 0.074 Pa
- Case C : " 387 Hz, " : 0.093 Pa
- Case D : " 160 Hz, " : 0.037 Pa

なお、Case Dでは、373 Hzにおいて、2次の卓越点(応答値 0.116 Pa)を認めた。

##### (2) 衝突位置 $P_2$

- Case A : 1次卓越周波数 373 Hz, 応答値 : 0.094 Pa
- Case B : " 373 Hz, " : 0.096 Pa
- Case C : " 293 Hz, " : 0.070 Pa
- Case D : " 120 Hz, " : 0.044 Pa

なお、2次以上の卓越点については、Case C (2次 : 373 Hz (応答値 0.070 Pa), Case D (2次 : 193 Hz (応答値 0.058 Pa), 3次 : 253 Hz (応答値 0.062 Pa), 4次 :

340 Hz (応答値 0.050 Pa), 5次 : 400 Hz (応答値 0.070 Pa), 6次 : 520 Hz (応答値 0.076 Pa) で確認された。

##### (3) 衝突位置 $P_3$

- Case A : 1次卓越周波数 387 Hz, 応答値 : 0.220 Pa
- Case B : " 287 Hz, " : 0.361 Pa
- Case C : " 213 Hz, " : 0.187 Pa
- Case D : " 120 Hz, " : 0.669 Pa

なお、2次以上の卓越点については、Case A (2次 : 681 Hz, 応答値 0.108 Pa), Case D (2次 : 181 Hz, 応答値 0.175 Pa, 3次 : 148 Hz, 応答値 0.100 Pa) で確認された。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

##### (i) 重錘の衝突位置が欠損箇所から離れている場合

- 打撃音は、衝突直後から、急激に減衰する。
- 340~390 Hz 付近の帯域で、1次あるいは2次以上の高次の卓越点を認める。また、衝突位置が欠損箇所から近い場合では、直下のてん充層が健全であっても、100~300 Hz 付近の帯域で卓越することがある。

##### (ii) 重錘の衝突位置の直下が欠損箇所である場合

- 打撃音は、中心部のときよりも緩やかに減衰する。
- 欠損範囲の拡大に伴って、1次卓越周波数が100~250 Hz 程度低下する。
- 1次卓越周波数に対応する音圧の応答値は、(i)と比較して大きい傾向にある。

#### 参考文献

- 1) 高橋貴蔵, 澁上翔太, 谷川光, 吉川秀平, 桃谷尚嗣 : スラブ軌道てん充層の大断面補修工法の開発, 鉄道総研報告, 2016
- 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, コンクリート建造物の非破壊検査シンポジウム, 2018