

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

# コンクリートまくらぎのひび割れを診る

経年劣化や損傷を有するプレストレストコンクリートまくらぎ（以下、PCまくらぎ）を適切に検知し計画的に交換していくことが重要です。しかしながら、バラスト軌道では上面以外の損傷を目視で確認することは困難です。このような損傷PCまくらぎを打音により検知する手法の開発を進めています。ここでは、各種の振動・騒音測定により明らかにしてきたPCまくらぎの損傷と振動との関係や、損傷まくらぎ検知に適した振動モード、効率的な検知を実現するための打音計測、実路線での実証試験結果について紹介します。



松岡 弘大

Kodai Matsuoka

鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
副主任研究員

【専門分野】 構造力学、  
動的相互作用、構造逆  
解析、振動、損傷検知



渡辺 勉

Tsutomu Watanabe

鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
主任研究員

【専門分野】 構造力学、  
動的相互作用、振動、  
計算工学



曽我部 正道

Masamichi Sogabe

前 鉄道力学研究部 部長  
(現 総務部 次長)

【専門分野】 車両・軌道・  
構造物の動的相互作用  
解析、振動、疲労

## はじめに

PCまくらぎはレール支持や軌間保持を担う軌道部材で、1950年代から日本の鉄道に導入されてきました。古いものは導入後50年を超え、ひび割れなどの損傷も顕在化しつつあります<sup>1)</sup>。安全な列車運行を続けていくためにも、状態に応じてPCまくらぎを計画的に交換していく必要があります。

PCまくらぎの代表的な損傷の一つにひび割れがあります。ひび割れは列車通過時に大きな曲げモーメントが発生するレール部断面の下部で生じる傾向にあります(図1)。しかしながら、バラスト軌道では、PCまくらぎは上

面までバラストに埋まっているため、一般的な目視による検査では、PCまくらぎの状態を「診る」ことが困難です。PCまくらぎの損傷状態に応じて、効率的な維持管理を実現するためにも、センサーなどによりPCまくらぎの損傷状態を把握する手法が必要とされています。

ここでは、目視で確認できない損傷を有するPCまくらぎを検知するため、これまで開発してきた打音による損傷まくらぎ検知手法について、損傷検知のメカニズム、測定手法の改良や実証試験結果などを紹介します。

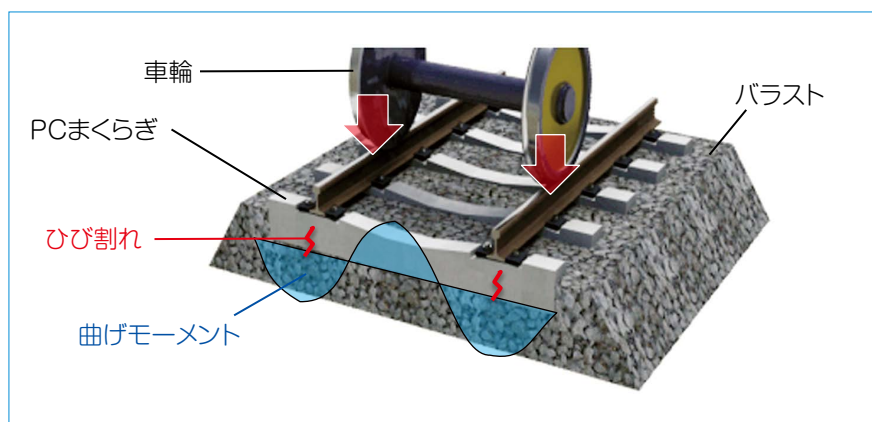


図1 PCまくらぎのひび割れ

## 振動・音による損傷検知

ちやわん  
茶碗やコップにひび割れが入るとたたいたときの音が変わります。これと同様に、PCまくらぎについてもひび割れなどの損傷が生じるとハンマーなどでたたいた際の音が変わると考えられます。本研究のアイデアはこのような古くからよく知られる知見に基づいています。

もう少し詳しく説明します。PCまくらぎをハンマーなどでたたくと、PCまくらぎに振動が生じます(図2)。PCまくらぎの振動は空気を通して周辺空間に伝播し、それが音として聞こえる、もしくは騒音計により音圧として測定されます。したがって、音が変わるということはPCまくらぎの振動性状が変化していることになります。

PCまくらぎを含めた構造物や機械の振動には、いくつかの揺れやすい周期と各周期に対応した変形形状を有した振動モードが存在します。この揺れやすい周期を固有振動数、変形形状をモード形とよびます。固有振動数は主に構造物の「硬さ」と「重さ」から決まるため、重さが変化しない場合、損傷などにより「硬さ」が変化することで固有振動数が変化します。ひび割れなどの損傷が生じた場合は固有振動数が低下します。固有振動数の変化から損傷を検知する技術は古くから機械や土木分野で検討されてきました。橋りょうなどの構造物と比較した場合、PCまくらぎは構造が単純です。また、交換部材であるため検知対象とする損傷規模も比較的大きいことが特徴です。このような特徴から、上述した固有振動数による基本的な損傷検知が実現できる可能性があります。ただし、音や振動による損傷PCまくらぎの検知を実現するためには、損傷がどの振動モードに影響するのか、どの程度の損傷を検知できるのか、その振動モード

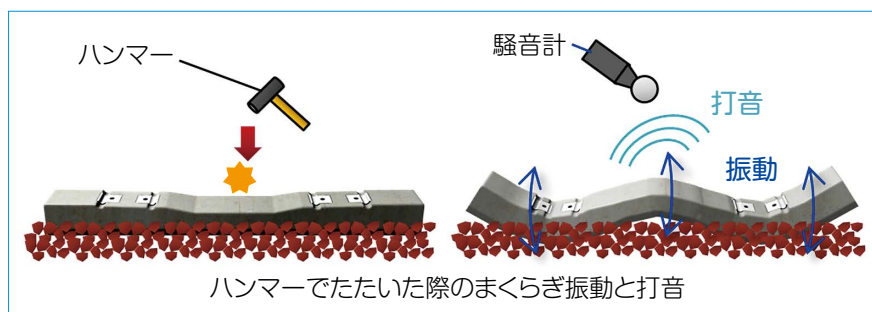


図2 まくらぎの振動と打音

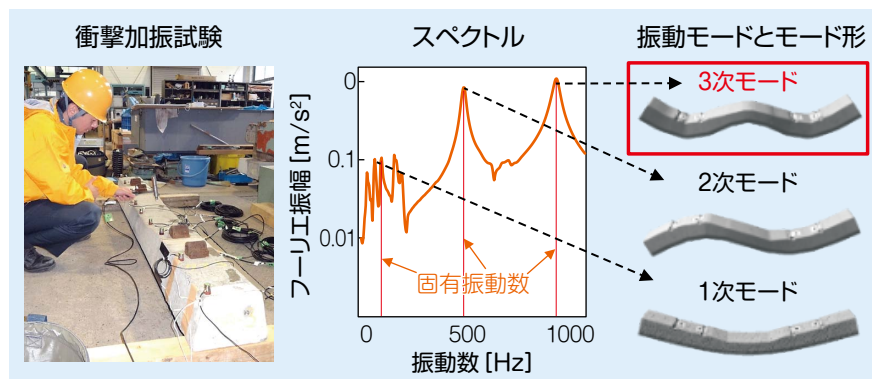


図3 PCまくらぎの固有振動

を音で測定できるのか、他の軌道部材の影響があるのか、などを明らかにする必要があります。

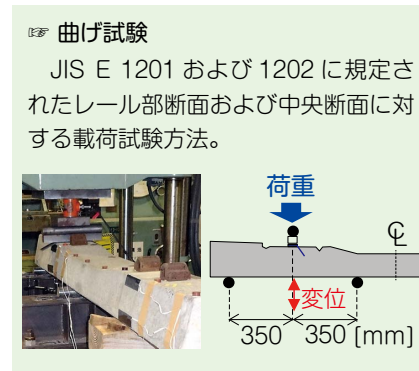
## PCまくらぎの損傷と振動の関係

PCまくらぎの固有振動数は衝撃加振試験により調べることができます。衝撃加振試験では、PCまくらぎをハンマーなどでたたいた際の振動を測定し、得られた波形をフーリエ変換により波形を振動数と振幅の関係に変換します。縦軸に振幅、横軸に振動数を取った図をスペクトルとよびます。このとき、PCまくらぎの1次から3次までの振動モードに対応したピークがスペクトルに生じるため、これらのピークから固有振動数を推定できます(図3)。

つぎに、損傷がどの振動モードにどの程度の影響するのかについて、実際の損傷を有するPCまくらぎの固有振動数を調査した結果を例に説明します

(図4)。PCまくらぎはJIS3号PCまくらぎ13本を中心に実路線から回収したもので、ひび割れや鋼棒破断などレベルの異なる損傷を有しています。また、ここではプレストレスの導入方法が異なるプレテンションタイプとポストテンションタイプの2種類について、それぞれ検討しました。比較のために健全なものと曲げ試験(参照)により破壊したものも調査しました。

1次モードや2次モードでは衝撃加振で振動モードをうまく励起できず、



①固有振動数を推定できない例が散見されます。また、②1次モードや2次モードでは損傷が深刻化しても固有振動数が低下しない場合も確認できます。これに対して、③3次モードの固有振動数は損傷の深刻化とともに明確に低下します。とくに、確実な検知が必要な鋼棒破断などの深刻な損傷では、④3次モードの固有振動数が健全時から100Hz以上低下しており、損傷検知に適した指標であることがわかります。

ここでは代表的な検討事例を紹介しましたが、このほかにも曲げ試験や実環境試験、数値解析により、3次モードの固有振動数がPCまくらぎの損傷に対して感度が高いだけでなく、他の軌道部材の状態に影響を受けづらい損傷検知に適した振動モードであることがわかっています<sup>2)</sup>。

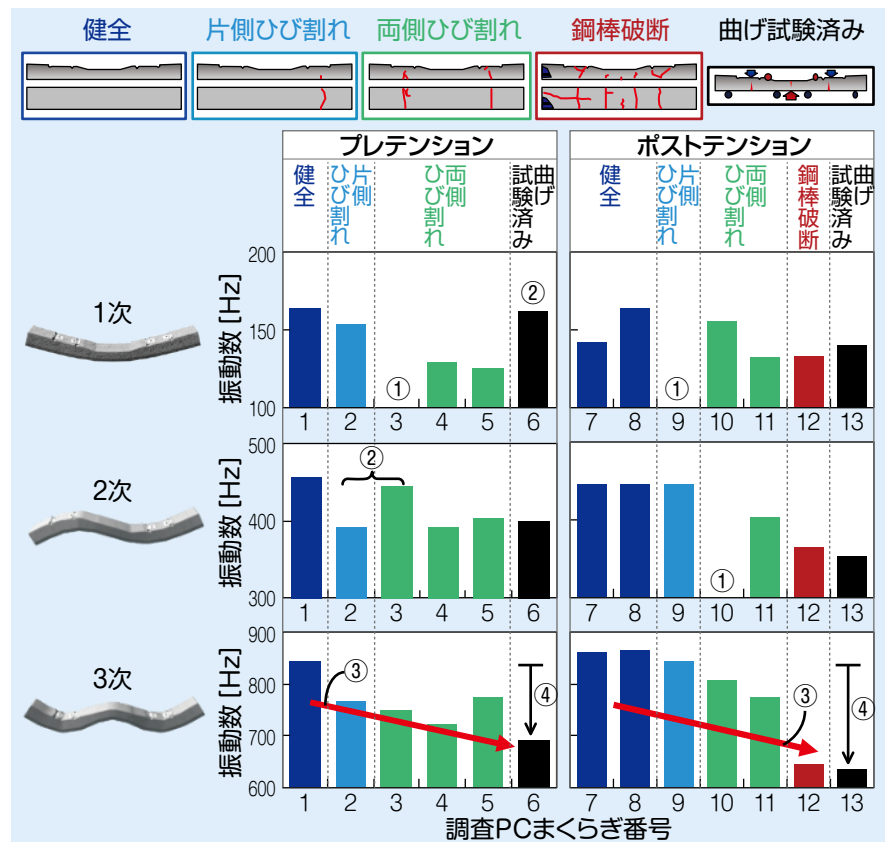


図4 PCまくらぎの損傷と固有振動数の関係

### 打音による損傷まくらぎの検知

これまでPCまくらぎの損傷と振動の関係について説明しましたが、振動測定ではPCまくらぎに加速度計を設置する必要があります。膨大な数のPCまくらぎの検査を行うためには、測定に要する手間は可能な限り小さくする必要があります。ここで、センサーを設置する必要のない、打音を用いた損傷PCまくらぎの検知手法について検討しました。すなわち、PCまくらぎをたたいた際に発生する3次モードの振動を、空気を介して伝播した打音から推定します。これにより3次モードの固有振動数を推定し、その低下からひび割れなどの損傷を有するPCまくらぎを検知します。

打音によりPCまくらぎの3次モードの固有振動数を推定できるかを検証するために、ハンマーでPCまくらぎをたたいた際の加速度と打音を、PCまくらぎに設置した加速度計とPCまくらぎから10cm程度の位置で騒音計

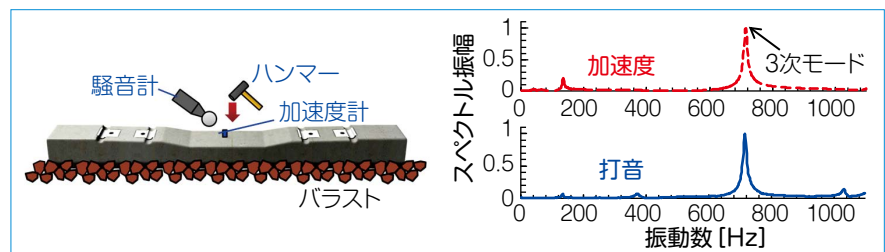


図5 衝撃加振時における加速度と打音のスペクトルの比較

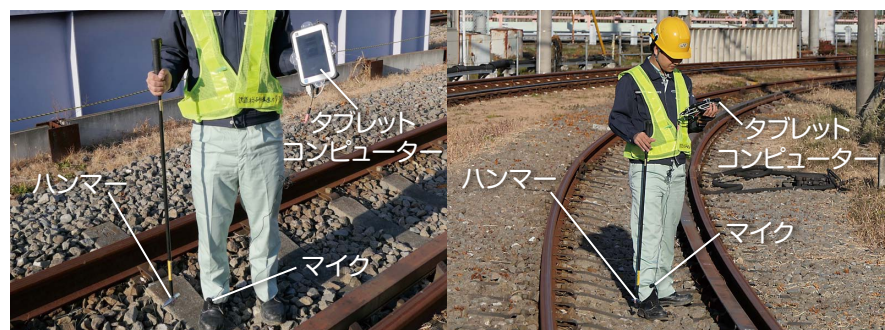


図6 打音による損傷PCまくらぎ検知のイメージ

により測定しました(図5)。得られた加速度と打音の波形をフーリエ変換し算出したスペクトルを比較したところ、図5に示すようにいずれの測定方法でもPCまくらぎの3次モードのピークが一致しました。したがって、マイ

クにより打音を測定することで設置の手間なくPCまくらぎの3次モードの固有振動数を推定できることがわかります。これにより、測定に最低限必要な道具はハンマー、マイクおよびタブレットコンピュータのみとなります。





図7 実路線での打音試験とひび割れ確認

また、マイクをズボンの裾に取り付けることで、効率的に作業を進めることが可能です(図6)。

なお、損傷を有するPCまくらぎについても同様の試験を実施しており、打音により推定した3次モードの固有振動数から損傷したPCまくらぎを検知できることを確認しています<sup>2)</sup>。

### 実路線での検証

これまでの試験は支持条件や環境条件が整備された中で実施してきましたが、実環境では他の軌道部材や敷設環境なさまざまな因子が影響を及ぼす可能性があります。そこで実環境における提案手法の有効性を検証するため、在来線のPCまくらぎを対象に、実路線での打音試験と損傷PCまくらぎ検知を実施しました。なお、いずれのPCまくらぎも上面にひび割れはみられなかったため、固有振動数が低い場合は、レール下にひび割れが生じていると予測できます。

測定した打音からPCまくらぎの3次モードの固有振動数を推定しました。得られたまくらぎの固有振動数を比較すると、まくらぎ番号11が他のまくらぎよりも低いことがわかります(図7)。このまくらぎ番号11について、レール下断面のひび割れの有無を確認

するため、まくらぎ周辺のバラストをかき出しひび割れ状況の確認を行いました。図7に示すように、レール下断面の下部に微細なひび割れが生じていることがわかります。この結果から、提案手法により少なくとも損傷を有するPCまくらぎを実路線で検知できることが確認できます。他のPCまくらぎについても片側のレール下断面のバラストをかき出し、ひび割れ確認を行いました。調査の範囲内でひび割れが生じていないことを確認しています。

ここでは調査したPCまくらぎは、固有振動数の相対比較により損傷の有無を判断しました。このような相対評価でも、状態の悪いPCまくらぎから順番に交換していく場合、優先順位の決定に十分活用することができます。また、損傷の有無を相対評価ではなく絶対評価により判断するための固有振動数のしきい値についても合わせて検討を進めています。とくに、これまで多く測定してきたJIS3号PCまくらぎについては、ひび割れの有無を判断する大まかなしきい値の設定が可能になりつつあります。

### おわりに

経年により劣化・損傷したPCまくらぎを打音により検知する手法につい

て紹介しました。これまでの検討はおもにJIS3号PCまくらぎを対象として実施してきましたが、我が国のPCまくらぎの種類はJISに規定されたもので17種、JIS以外のものを含めると、数百種にのぼるといわれます<sup>1)</sup>。提案手法の多品形への対応として、JIS6号や継目用などを含めた8種類のPCまくらぎを対象に現在、同様の検討を実施しています。加えて、損傷PCまくらぎの絶対評価を行うためのしきい値についても検討しており、多品形に対応した損傷PCまくらぎ検知システムの構築を進めています。そのほか、現場で簡便に利用していくため、測定・分析・判定・記録を一括して行うシステムの開発とそれを有したタブレットPC型の試作機の製作を実施しています。今後も開発および実用化を進めていくことで、鉄道の安全を支える一助になれば幸いです。【RRR】

### 文献

- 1) 渡辺勉：PCまくらぎ，RRR，Vol.72，No.10，pp.28-31，2015
- 2) 松岡弘大，渡辺勉，箕浦慎太郎，曾我部正道，面高陽紀：損傷PCまくらぎの振動モード特性と打音による簡易検知手法の開発，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol.74，No.3，pp.158-175，2018