

まくらぎから道床に伝わる動的荷重の測定技術

鉄道力学研究部 軌道力学

研究員 浦川文寛

1. はじめに

バラスト軌道では、列車走行による繰返し荷重が長期的に作用することにより道床部の塑性沈下が累積する「軌道破壊」という劣化現象が避けられず、その維持管理が課題となっている。レールからまくらぎに伝わった列車の動的荷重は、まくらぎ下面において砕石層との接触点を介して道床に伝えられる。まくらぎと道床間の荷重伝達のしくみを解明するために、超薄型の動荷重センサをまくらぎ下面に多数敷き詰めた「センシングまくらぎ」を開発した。本発表では、「センシングまくらぎ」を使った測定方法と軌道での測定結果について紹介する。

2. センシングまくらぎの開発

2.1 センシングまくらぎの概要

図-1にセンシングまくらぎの概略を示す。本まくらぎは薄型PC3号まくらぎの下面に、8 cm × 8 cmサイズの荷重センサを縦25個×横3列に隙間無く貼り付け、まくらぎ下面の接触荷重とその分布を測定するものである。

2.2 測定用薄型PC3号まくらぎの設計・製作

従来品のまくらぎの厚さより 2 cm 薄く、それでいて従来品と同程度の強度を有するまくらぎを新たに測定用として設計、製作した。また、荷重センサについては、まくらぎ下面に一致する金属製ユニット板にてあらかじめ取付けて75個のセンサを一体構造とし、その一体構造をまくらぎ下面に固定することで、取り付け精度を確保した。

2.3 衝撃荷重測定用動荷重センサ

荷重センサには従来より各種のものがあるが、①面的な荷重を測定可能なこと、②8 cm×8 cmのサイズで最大荷重 10 kNまで測定可能なこと、③低周波～数kHzまでの動的荷重を測定可能なこと、④治具を含めた厚さが 20 mm以下であることを考慮し、図-2(1)の piezofilm を用いた超薄型の衝撃荷重センサ¹⁾を採用した。センサ本体は大きさ 60 mm×60 mm の正方形で、その厚さは僅か 4 mm と薄く、センサの片側に固定用金属板を貼り付けることで、ユニット板への脱着を可能としている。もう片側には60 mm×60 mm×10 mmのスペーサーを設け、図-2 (2)のように配線用スペースを確保した。

また、このスペーサーには四つのネジ穴が切っており、配線を行った後に砕石に接する面に80 mm×80 mm×5 mm のアルミ合金製の受圧板を取付ける構造とした (図-2(3))。

2.4 まくらぎの強度試験

JISE1202「ポストテンション式PCまくらぎ」に準じた強度試験を行い、PC3号まくらぎの基準強度を満たしていることを確認した。

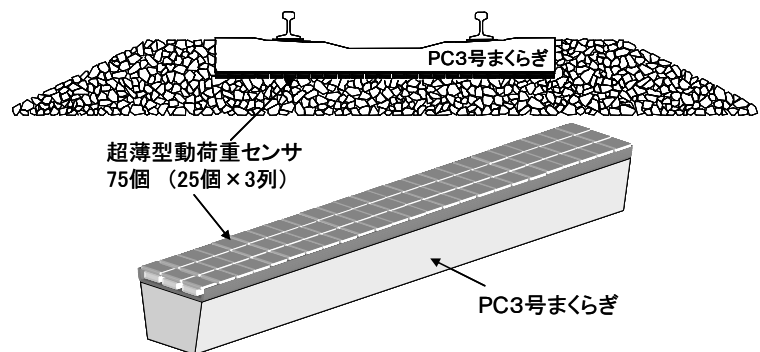


図-1 センシングまくらぎの概略図

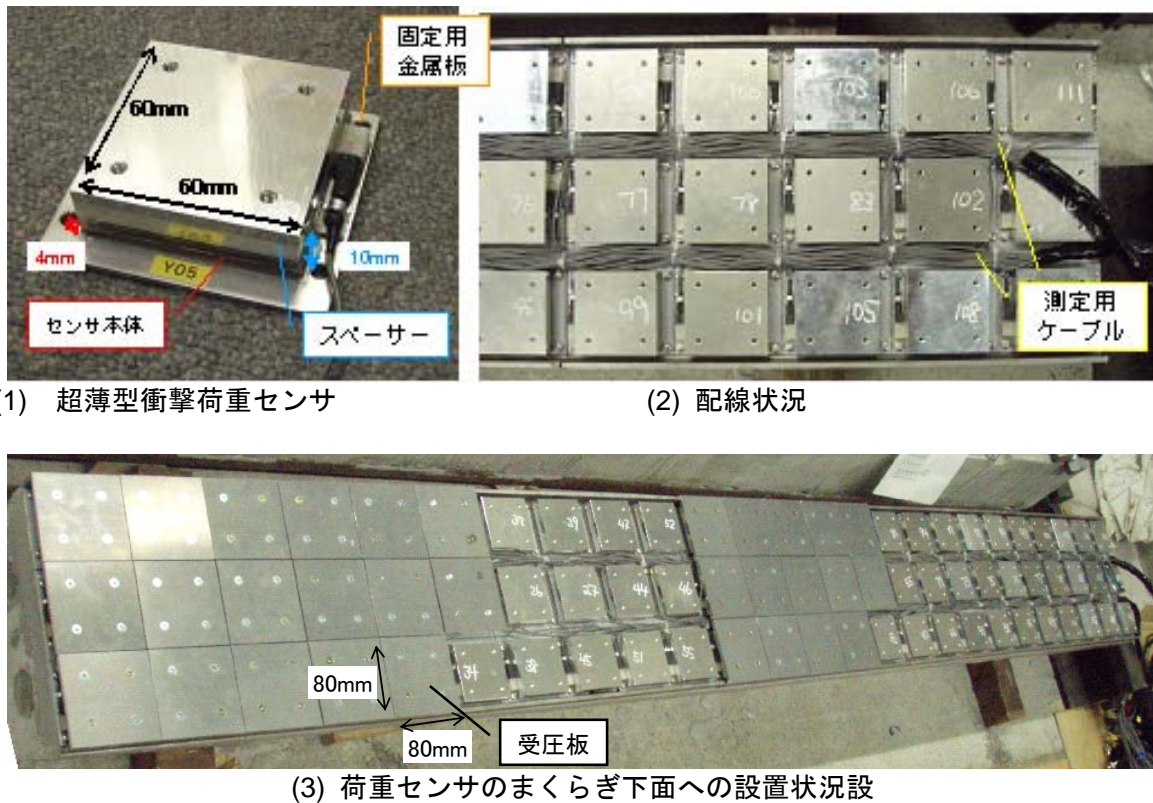


図-2 超薄型衝撃荷重センサとまくらぎ下面への設置

2.5 まくらぎの電気絶縁抵抗試験

センシングまくらぎは、まくらぎ下面に鋼製のユニット板と薄型のセンサを貼り付け、表面にアルミ製受圧板を貼り付けた構造となっているため、現地敷設の前に、電気絶縁抵抗試験を行った。在来線のまくらぎの電気絶縁抵抗値は、信号システムが安定作動する条件として、軌道 1 kmあたり 2.0Ω 以上が必要とされている。試験の結果、乾燥状態および時雨量 180 mmの散水状態において、電気絶縁抵抗の基準を満たしていることを確認した。

3. 営業線での測定の実施

3.1 実施概要

開発したセンシングまくらぎを営業線に設置し、列車走行によるまくらぎ下面の動的荷重を測定した。本まくらぎは寸法・強度とも従来品とほぼ互換であり、既設のまくらぎと入れ替えて通常の締結装置にて軌道に固定するのみで設置が完了する。また、まくらぎ下面の動的荷重とまくらぎの変形モードとの関係を調べるため、図-3 に示すとおり、センシングまくらぎ上面の 8 箇所三軸加速度センサを設置し、振動加速度を同時に測定した。

3.2 遠隔自動測定システム

軌道側からの長期間測定を、安定、安全かつ安価に行うため、図-4 に示すような遠隔自動測定システム²⁾を開発した。本測定システムは、自動測定ツールと AD 変換ボード等の測定モジュールを有する測定用 PC (測定現場に設置) により、トリガ制御により自動で多チャンネル・高速サンプリングの測定を行い (最大 168 ch で 12 kHz までのサンプリングが可能)、それを鉄道総研の監視用 PC から監視・制御を行うものである。本測定は、このシステムを用いて行った。

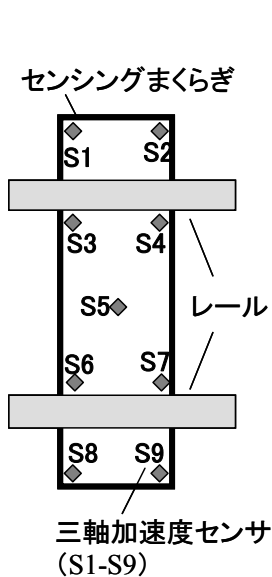


図-3 測点

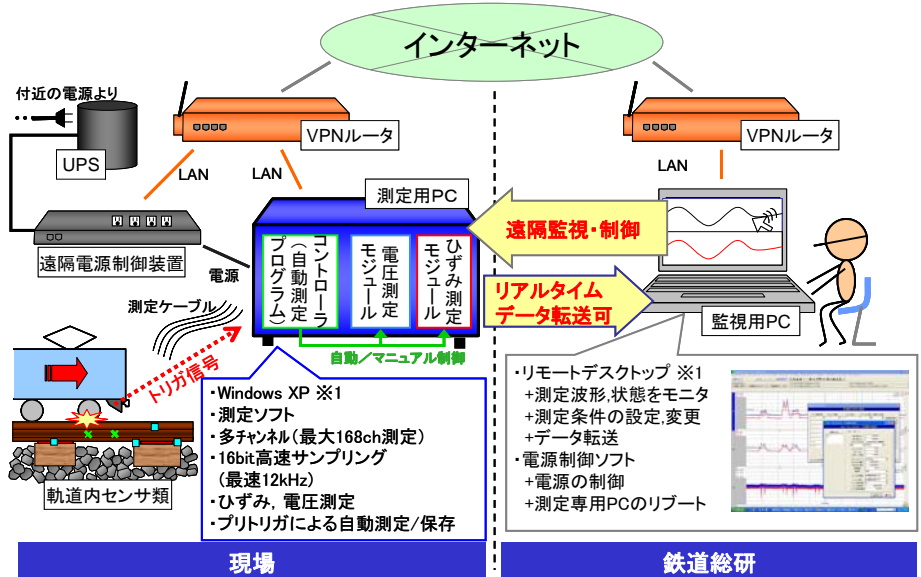


図-4 遠隔自動測定システム概要

4. 測定結果例

以下に、特急車両が速度 125 km/h で通過した際のまくらぎ下面荷重の測定結果の一例を示す。

4.1 時刻歴応答

図-5 上図に先頭台車通過時の、まくらぎ下面荷重の全面の合計値を示す。前後の各 1 車軸通過時に約 0.1 秒間隔で二つのピークが現れており、まくらぎ下面荷重のピーク値は約 23 kN である。図-7 下図はまくらぎ下面荷重がピークとなる、時刻 1 秒から 1.01 秒間でのまくらぎ下面荷重の分布である。まくらぎ左側端面から左レールの間の、センサでは特に荷重が大きく、この部分ではバラストとまくらぎがよく接触していると思われる。右側端面と右レールの間でも、荷重が大きい部分が見られるが、軌間中央付近では、比較的荷重が小さい。

4.2 周波数応答

ここでは、時刻歴の測定値を FFT により周波数別に分解し、まくらぎ振動加速度から算出した変形状とまくらぎ下面荷重の分布を周波数毎に比較検討する。

図-6 は、まくらぎ下面荷重分布とまくらぎの変形状を周波数別に表した図である。まくらぎ変形については、周波数毎に、センシングまくらぎ上に設置した 9 個の加速度センサの Z 軸（鉛直方向）の振幅と、まくらぎ中心のセンサ（S5-Z 軸）からの位相差を与えて時刻歴データに直し、 $t=0$, $t=T/4$, $t=T/2$ (T : 周期) での値をプロットした。まくらぎ下面荷重については、各センサに対してまくらぎ変形と同様に振幅と位相差（S5-Z 軸からの）を与えて算出した値を、センサ毎に青から赤色で描写したものである。なお、荷重と変位の値は、周波数毎に大きく異なるので、周波数毎にレ

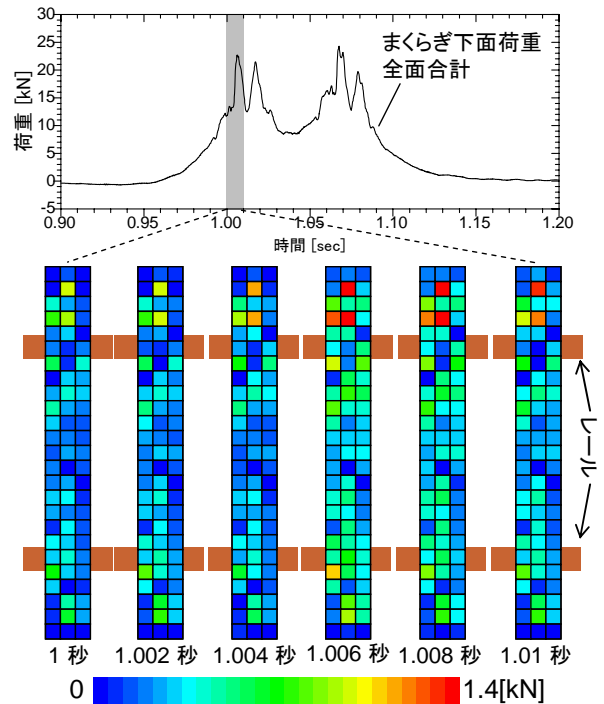


図-5 まくらぎ下面荷重の分布（時刻歴応答）

ンジを調整している。

図-6(1)より、10 Hz と低い周波数では、まくらぎ全体に位相のずれや振幅の差はなく、全体が同時に上下するように振動することがわかる。100 Hz では図-6(2)のように、まくらぎ両端が同位相で大きく振動し、中心の振幅は小さく、1次曲げに近い形で振動し、200 Hz では両端の振幅が大きく、互いに90°位相がずれた状態で、変形を伴って振動する(図-6(3))。周波数が高くなると、複雑な振動の形状が見られるようになり、400 Hz では2次曲げ(図-6(4))、700 Hz では、3次曲げモードのような形状(図-6(5))が現れている。また、まくらぎ下面荷重については、10Hzのような低い周波数では、まくらぎが変形を伴わず全体が同時に上下するため、まくらぎ下面とバラストの接触が良い部分に荷重が集中している(図-6(1))と思われるが、周波数が高くなるにつれ、まくらぎに変形が生じるようになり、まくらぎの変形に伴い荷重の分布が大きく変化することがわかる(図-6(2)~(5))。

5. おわりに

まくらぎから道床に伝わる荷重を測定するため、センシングまくらぎを開発した。このセンシングまくらぎを営業線に設置し、列車通過時のまくらぎ下面荷重の分布を測定した。測定結果から周波数毎のまくらぎの変形と、それに伴うまくらぎ下面荷重の分布の変化を捉えることができた。

今後は周波数、まくらぎ下面荷重、まくらぎ変形モードの関係に着目し、これらがバラストの変形にどのような影響を及ぼすかを明らかにして行く予定である。

参考文献

- 1) 相川明他：超薄型動荷重センサを用いたまくらぎ下面の動荷重分布測定，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，4-071, pp.141-142, 2008.
- 2) 浦川文寛他：軌道動的応答の長期測定を目的とした遠隔自動測定システムの開発，鉄道力学論文集,第13号, pp.23-28, 2009.

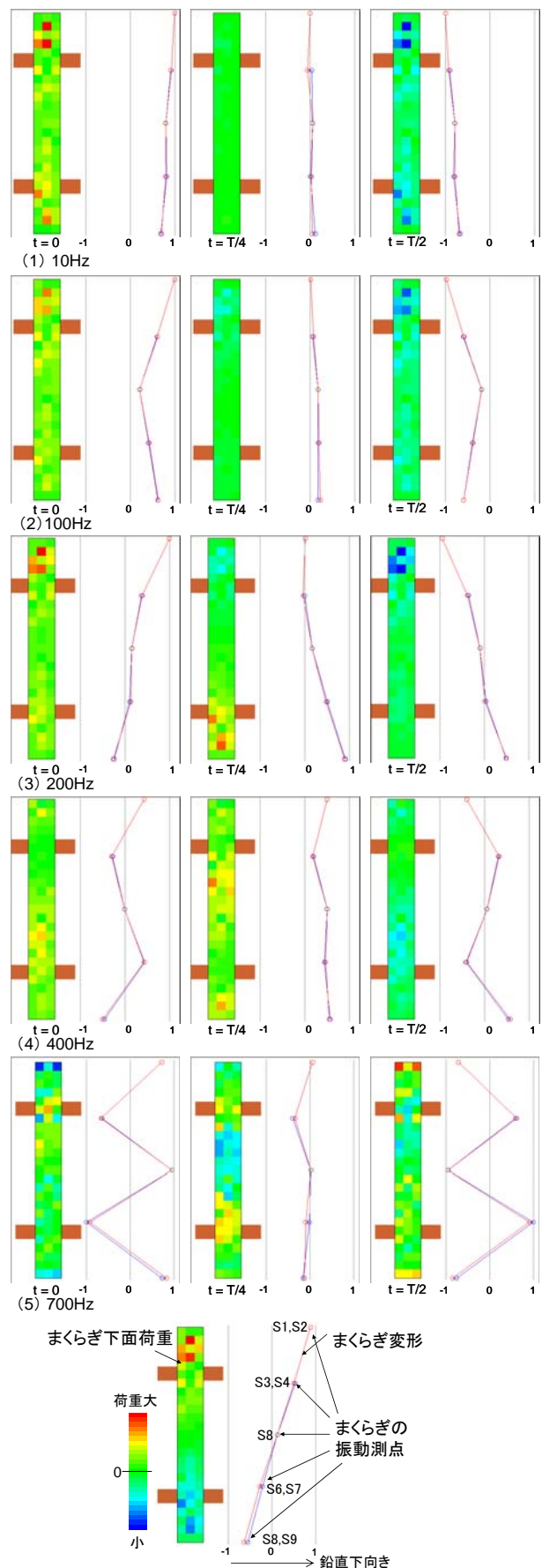


図-6 まくらぎ変形形状と下面荷重の分布