

バラスト軌道における軌道支持剛性評価方法の開発

中村 貴久* 桃谷 尚嗣* 谷川 光*
吉川 秀平* 木次谷 一平*

Development on the Evaluation Method of Track Support Stiffness of the Ballasted Track

Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA Hikaru TANIGAWA
Shuhei KIKKAWA Ippei KIJIIYA

In the maintenance work of the ballasted tracks, track irregularity is measured just after the repair to manage the finished state. Although the method of mechanically evaluating the supporting state of track has not been sufficiently studied, high quality of the finished state can be expected by managing the track support stiffness. In this report, we investigated the relationship between track support stiffness and track irregularity by field test using handy-type FWD and confirmed that the correlation can be obtained between the track support stiffness immediately after track maintenance and track irregularity progress after track maintenance. In addition, we have developed a device (RFWD) that enable us to perform measurement of the track support stiffness easily and quickly.

キーワード：FWD，バラスト軌道，軌道支持剛性，現地試験，軌道変位

1. はじめに

バラスト軌道は、タイタンパによるつき固め保守の後に、軌道変位を測定して仕上りの状態を管理しているものの、軌道の支持状態を力学的に確認する方法は十分に検討されていない。つき固めの程度を軌道の支持剛性の力学的な観点から管理することができれば、軌道変位進みを抑制でき、保守量の低減が期待できると考えられる。

これまでに、小型FWD¹⁾を用いて、荷重と変位の関係より求める軌道支持剛性を評価する方法を開発し^{2) 3)}、軌道の变形特性との関係を実物大模型試験により検討してきた。その結果、小型FWDを用いた軌道支持剛性評価により、繰返し荷重によってまくらぎ底面と道床面に隙間が生じる「浮きまくらぎ」が、判別できることを示した²⁾。また、バラスト軌道が荷重履歴を受けると、道床状態によらず、荷重-変位関係が非線形性を示し、荷重レベルに応じて軌道支持剛性が変化することがわかった³⁾。さらに道床の厚さや粒度分布が軌道支持剛性に与える影響を検討し、粒度分布が同じ場合は道床厚の影響が小さいことがわかった⁴⁾。

本研究では、つき固め作業の仕上がり状態を力学的に評価するため、小型FWDによる現地測定試験を行い、つき固め保守直後の軌道支持剛性とその後軌道変位の関係を検討した。また、FWDによる測定を簡易かつ迅速に行うことができる装置(RFWD)を開発した。

2. 軌道支持剛性の評価方法の開発

本評価方法は、レールもしくはまくらぎ上で小型FWDによる重錘落下試験を行い、小型FWDに内蔵された荷重計および加速度計より得られる最大荷重と最大変位より軌道支持剛性を算定して、各まくらぎの支持状



図1 軌道支持剛性の測定状況の例

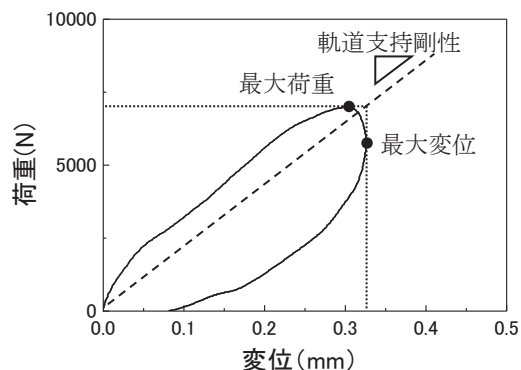


図2 軌道支持剛性の測定例(荷重-変位関係)

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

特集：軌道技術

態を評価するものである（図1および図2）。なお、小型FWDは主に舗装の健全度診断や盛土の締固め管理等に用いられてきたものである¹⁾。

3. 軌道支持剛性の現地測定試験

つき固め保守前後の軌道支持剛性と軌道変位の関係を検討するため、マルチプルタイタンパ（以下、MTT）もしくはバックホウタイタンパ（以下、BHHT）によるつき固め保守の前後に、小型FWDを用いて軌道支持剛性を測定した。

現地測定試験は表1に示す6区間で実施した。試験箇所①～④は高架橋上であり、試験区間⑤および⑥は盛土、切土、トンネルおよび高架橋が隣接する区間である。軌道諸元は、試験区間①～⑥ともレール種別が60kgレールのロングレール、まくらぎ種別がPCまくらぎ、締結間隔が581mmである。軌道支持剛性の測定は全区間のつき固め保守の直前、試験区間①、②、⑤、⑥ではMTTによるつき固め保守の直後、試験区間③および④ではBHHTによるつき固め保守の直後に実施した。なお、試験区間③および④については、BHHT保守の1週間前に道床交換を行っている。測定延長はまくらぎ本数が30～73本分である。軌道支持剛性を測定した区間の構造物条件を表1に示す。

また、軌道状態をより改善するために、つき固め保守後の支持状態を評価した上で、軌道支持剛性の低い箇所を追加でつき固め保守して、その後の沈下進みを評価した。追加のつき固め保守では、MTTのスクイズ機能を使用せずタンピングツールを振動させながらまくらぎ脇に挿入した。軌道支持剛性の測定手順を以下に示す。

- i) 各まくらぎ上（試験区間①、②、③、⑤、⑥）もしくはまくらぎ直上のレール上（試験区間④）にて、小型FWDで軌道支持剛性の測定を行う
- ii) MTTもしくはBHHTによるつき固め保守を行う
- iii) 保守直後に各まくらぎ上もしくはレール上にて、再度、小型FWDで軌道支持剛性を測定する
- iv) 軌道支持剛性の小さい箇所をMTTもしくはBHHTにより追加でつき固め保守する
- v) 追加でつき固めた箇所およびその前後の軌道支持剛性を小型FWDで測定する

3.1 測定結果

表2に、試験区間②における高低変位と軌道支持剛性の相関係数を例として示す。各まくらぎ上で計測した軌道支持剛性を移動平均処理して軌道変位との関係を検討したところ、まくらぎ5本で移動平均処理した結果と、5m弦高低変位の相関係数が最も高かった。そこで、以下では、5m弦高低変位とまくらぎ5本で移動平均処理

した軌道支持剛性の関係を整理することとした。

3.2 保守前の軌道変位と軌道支持剛性の関係

3.2.1 路盤剛性が一樣な場合（高架橋上）

高架橋上の試験区間（①、②、③、④）において、MTTおよびBHHTによるつき固め保守を行う前の高低変位と軌道支持剛性の関係を検討した。

図3および図4に、高低変位進みが比較的大きい2区間（試験区間①および②）におけるつき固め保守前の高低変位と軌道支持剛性の関係を示す。高低変位が大きい箇所では軌道支持剛性が小さく、高低変位と軌道支持剛性の分布形状は類似していることがわかる。また、高低変位が小さい箇所では、軌道支持剛性の値が全体的に高く、軌道変位が大きい箇所では全体的に小さい傾向が見られた。

図5および図6に道床交換を行った1週間経過後の高

表1 軌道支持剛性を測定した区間の構造物条件

試験区間	測定本数	備考	
			①
②	高架橋（本曲線） R=3500m, C=190mm	40本	MTT保守
③	高架橋（直線）	37本	道床交換+ BHHT保守
④	高架橋（直線）	30本	道床交換+ BHHT保守
⑤	トンネル-切土-盛土-高架橋 （緩和曲線内）R=6000m, C=100mm	73本	MTT保守
⑥	橋梁-盛土-切土-トンネル （緩和曲線内）R=6000m, C=100mm	50本	MTT保守

表2 高低変位と軌道支持剛性の相関係数
（試験区間②）

相関係数	軌道支持剛性			
	補正無	移動平均処理		
		5点	7点	9点
5m弦	0.68	0.87	0.59	0.34
10m弦	0.52	0.57	0.53	0.47

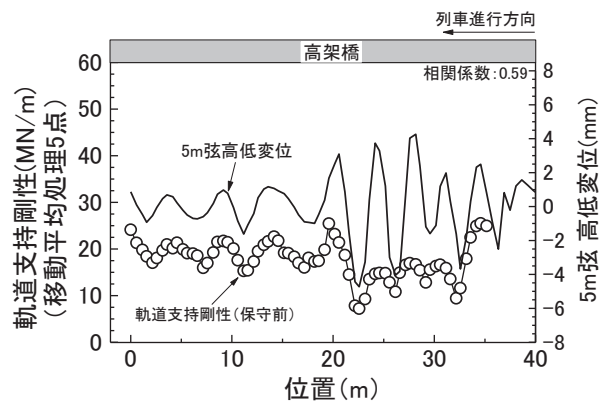


図3 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
（試験区間①：保守前・まくらぎ上で測定）

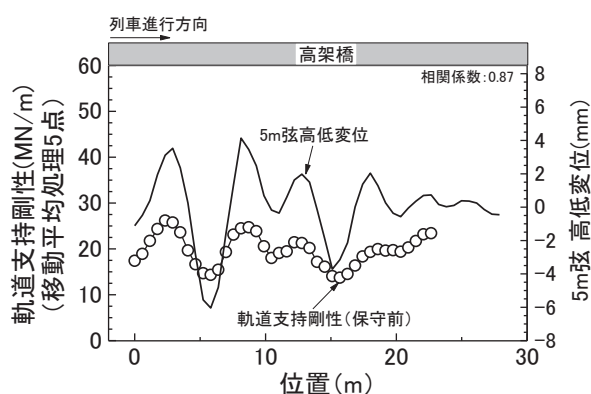


図4 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間②：保守前・まくらぎ上で測定)

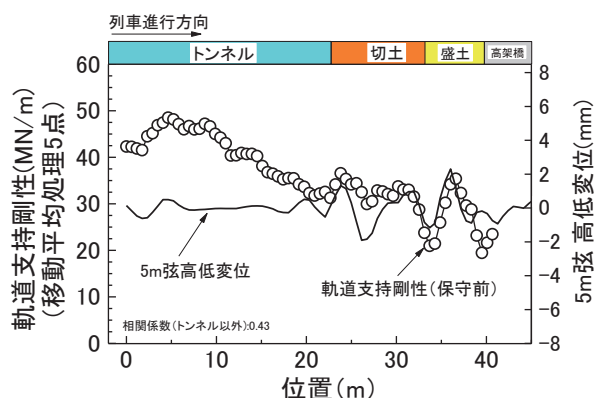


図7 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間⑤：保守前・まくらぎ上で測定)

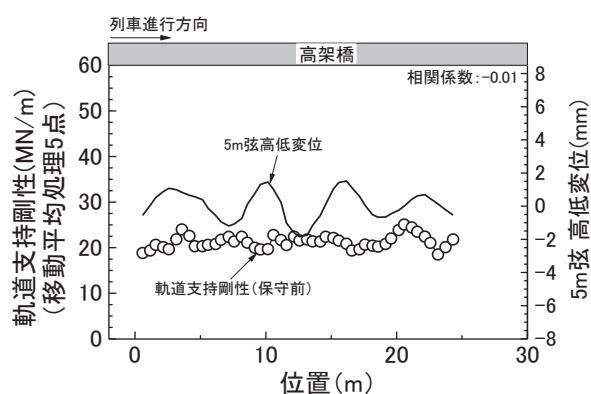


図5 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間③：保守前・まくらぎ上で測定)

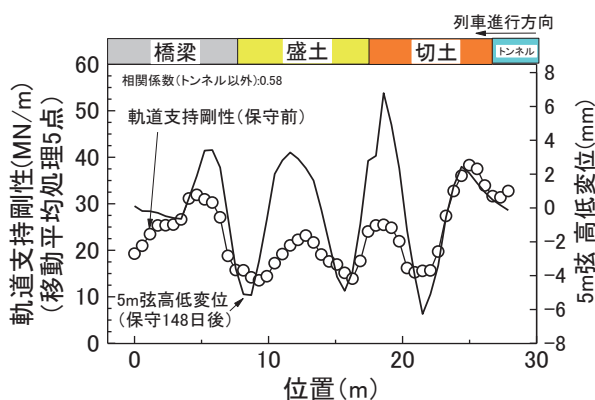


図8 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間⑥：保守前・まくらぎ上で測定)

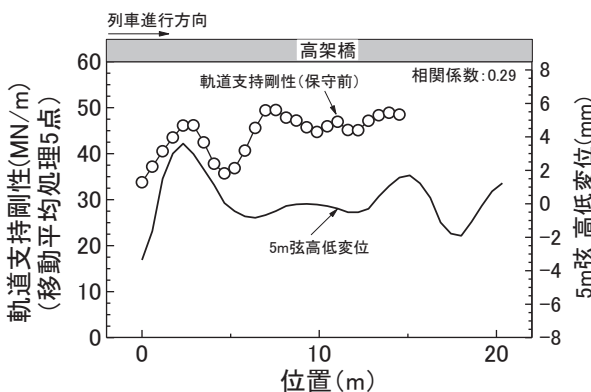


図6 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間④：保守前・レール上で測定)

低変位と軌道支持剛性の分布を示す。まくらぎ上（試験区間③）およびレール上（試験区間④）で測定したどちらの箇所においても、高低変位と軌道支持剛性の分布形状に明確な類似性は見られなかった。

3.2.2 路盤剛性が変化する場合（構造物境界部）

トンネル、切土、盛土、高架橋が隣接し、短い延長内で路盤の剛性の変化が大きい2区間（試験区間⑤および⑥）における、MTTによるつき固め保守前の高低変位

と軌道支持剛性の関係を図7および図8に示す。

図7において軌道支持剛性は、トンネル区間で全体的に大きく、切土区間に向かって徐々に低下する傾向を示し、切土区間および盛土区間では軌道支持剛性が局所的に低下する箇所が確認できる。高低変位は、軌道支持剛性の大きいトンネル区間で小さく、軌道支持剛性の小さい切土区間および盛土区間では大きくなっていることがわかる。トンネル区間の軌道支持剛性が高いのは、路盤剛性が高いためであると考えられる。

図8において軌道支持剛性は、盛土区間の前後の構造物境界部で局所的に低下する箇所が確認できる。高低変位は、軌道支持剛性の小さい切土区間および盛土区間で大きくなっており、高低変位と軌道支持剛性の分布形状は類似していることがわかる。

3.3 保守後の軌道変位と軌道支持剛性の関係

3.3.1 路盤剛性が一樣な場合（高架橋上）

図9および図10に、試験区間①および②において、MTTによるつき固め保守直後に測定した軌道支持剛性とその後の5m弦高低変位を示す。高低変位は保守後数日（2～7日）が経過したものと保守後96日が経過し

特集：軌道技術

たものである。試験区間①および試験区間②とも、保守後数日で高低変位が大きくなっている箇所において、保守96日後にその振幅が大きくなっている。試験区間①では、位置15m～30mの範囲で軌道支持剛性が全体的にやや小さく、振幅も大きくなっており、高低変位も大きいことがわかる。試験区間②では、全体的に軌道支持剛性の振幅が小さく、高低変位も小さいことがわかる。また、どちらの試験区間においても、施工直後の軌道支持剛性の分布と保守後の高低変位は類似した形状であった。

図11および図12に、道床交換から1週間経過後にBHITによるつき固め保守を行った試験区間③および④における、保守直後の軌道支持剛性と5m弦高低変位の関係を示す。試験区間③は保守7日後および保守97日後、試験区間④は保守2日後および保守49日後の高低変位を示している。どちらの試験区間でも、保守後の軌道支持剛性の分布と5m弦高低変位の波形は類似しており、特に、レール上で測定した試験区間④においては、まくらぎで測定した試験区間①～③よりも両者の間に高い相関が見られた。

3.3.2 路盤剛性が変化する場合（構造物境界部）

図13および図14に、試験区間⑤および⑥のMTTによるつき固め保守直後の軌道支持剛性とその後の5m弦高低変位の関係を示す。高低変位は保守2日後と保守後61日後の値を示している。構造物境界部では、軌道支持剛性と5m弦高低変位の相関は小さかった。これは、軌道変位進みが路盤剛性の影響を強く受けることから⁵⁾、構造物境界部では、軌道支持剛性の分布は路盤剛性の変化の影響を強く受けて平均値が変化し、高低変位との相関係数が高くならなかったためと考えられる。ただし、構造物境界部においてもつき固め保守直後の軌道支持剛性が局所的に下がっているところで高低変位が増加していることが確認できる。

3.3.3 標準偏差による軌道支持剛性と高低変位の比較

路盤剛性が均一な高架橋上ではつき固め保守直後の軌道支持剛性と、その後の高低変位の相関係数が高かった。そこで、高架橋上を対象として、つき固め保守直後の軌道支持剛性の標準偏差とつき固め保守後の高低変位の標準偏差の関係を検討した。高低変位の標準偏差は、新幹線の軌道管理で一般的に用いられている σ 値に相当する。

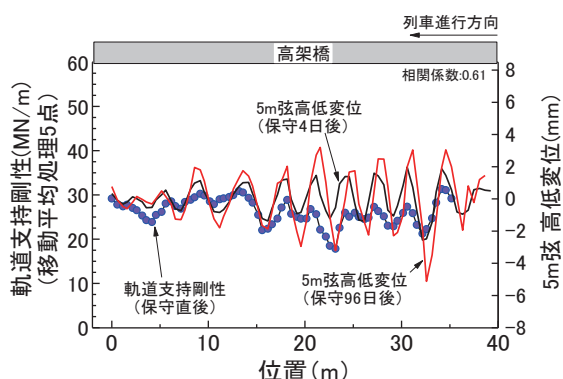


図9 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間①：保守後・まくらぎ上で測定)

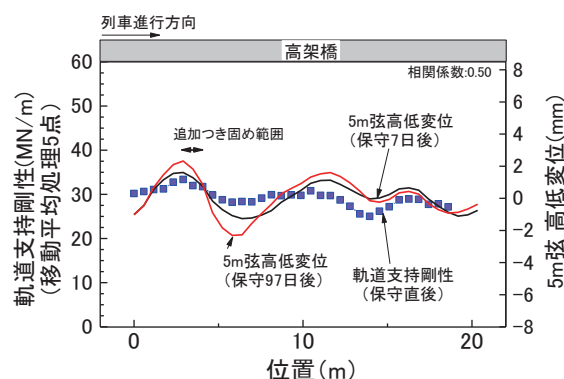


図11 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間③：保守後・まくらぎ上で測定)

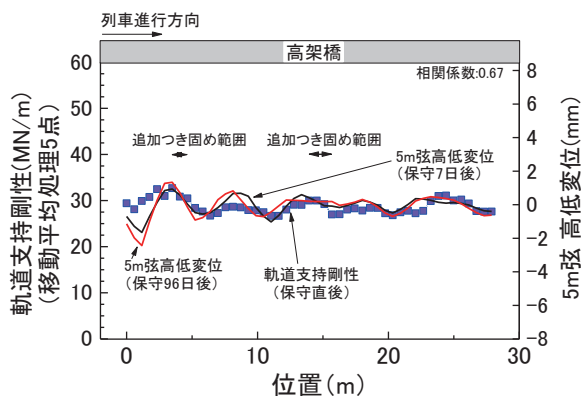


図10 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間②：保守後・まくらぎ上で測定)

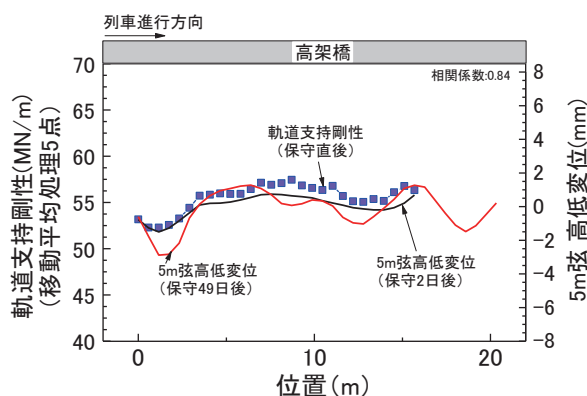


図12 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係
(試験区間④：保守後・レール上で測定)

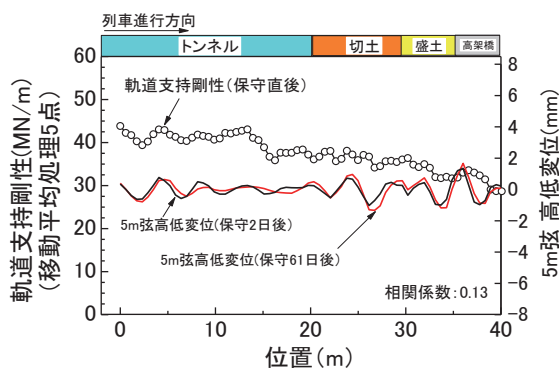


図 13 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係 (試験区間⑤：保守後・まくらぎ上で測定)

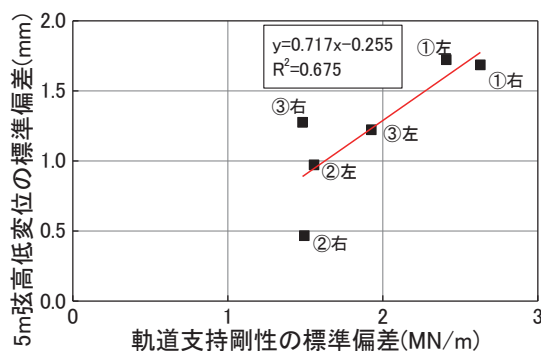


図 15 高低変位と軌道支持剛性の標準偏差の関係 (試験区間①～③)

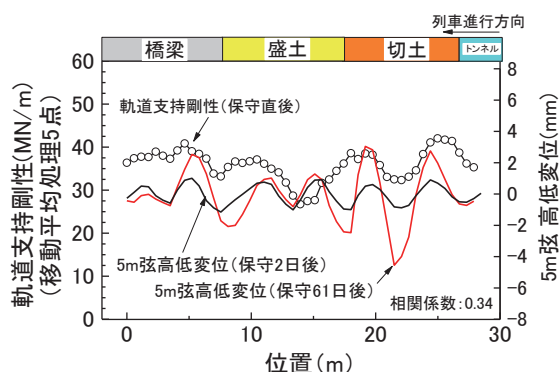


図 14 軌道支持剛性の分布と高低変位の関係 (試験区間⑥：保守後・まくらぎ上で測定)

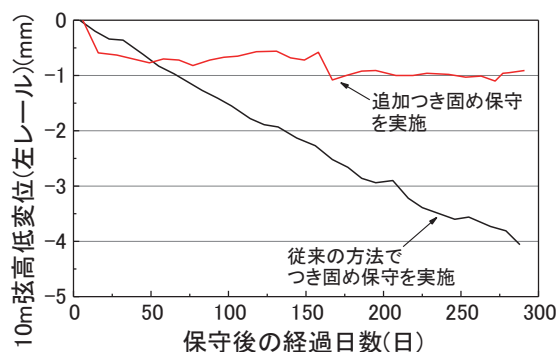


図 16 追加つき固め保守と従来保守の高低変位進み (試験区間②)

図 15 に、試験区間①～③において、MTT によるつき固め保守直後に測定した軌道支持剛性の標準偏差と保守後 96～97 日が経過した 5m 弦高低変位の標準偏差の関係を示す。なお、試験区間④は、保守後の経過日数が他の区間よりも短かったことから、除外することとした。保守直後の軌道支持剛性の標準偏差が大きい区間では、その後の高低変位の標準偏差 (σ 値) も大きくなっていることが確認できる。以上より、つき固め保守後の軌道支持剛性の標準偏差が小さくなるように施工管理することで、保守後の沈下進みを小さくできると考えられる。

3.4 追加つき固めによる高低変位の低減

本評価方法を用いて、つき固め保守の効果をより長く持続させる方法を検討するため、部分的な追加でつき固め保守を行う方法を検討した。保守多投入箇所である試験区間②において、MTT によるつき固め保守直後の軌道支持剛性が小さい箇所に、追加でつき固めを行った。追加つき固め保守を行った箇所の高低変位進みを図 16 に示す。通常の方法でつき固め保守を行った場合よりも、追加つき固め保守を組み合わせることで、高低変位進みが大きく抑制されることを確認した。

4. 軌道支持剛性測定装置の開発

小型 FWD は人力で容易に持ち運びができることから、局所的な軌道支持剛性を測定するには適している。しかし、MTT もしくは BHTT によるつき固め保守を実施した全延長に対して測定するには、測定の速度が遅く、また、作業者が人力で重錘を持ち上げる必要があることから、作業者の負担が大きくなる。そこで、測定速度を向上させるとともに自動で重錘を落下させて測定・収録が可能な軌道支持剛性測定装置を開発した (以下、RFWD)。

RFWD は、载荷機構、制御装置および制御・収録用 PC からなり、短時間で組み立てて軌道に載線することができる。载荷機構は 2 つのユニットからなり、最大 40kN (20kN/ ユニット) の荷重を軌道に作用させることができる。また、人力で本装置の運搬ができるように、組立および取外しが簡易な構造とし、各パーツを 50kg 以下に抑え、30kg を超えるパーツは取っ手を設置して複数人で運搬できるようにした (図 17)。測定時間を短縮するため、载荷機構および制御収録プログラムを簡素化して、一点の測定時間は 10 秒程度と短くした。測定からデータ収録までを一人で実行でき、収録データ

特集：軌道技術

を現場で分析できるプログラムを搭載している。走行機構は、一般的な軽便トロを改造したものであり、現場の軌道上で測定するにあたって、必要な電気絶縁抵抗およびブレーキ性能などを満足している。

実軌道上で測定を行った結果、移動も含めてまくらぎ1本あたり11秒で測定できることを確認した(図18)。



図17 RFWDの組み立て状況



図18 RFWDの外観

5. まとめ

本報告では、小型FWDを用いた現地試験により、軌道支持剛性と軌道変位進みの関係を検討した。また、オンレールで測定・収録を自動で行うことにより測定速度を向上させたRFWDを開発した。得られた結果を以下に示す。

- ・ 現地試験により、つき固め保守前の軌道支持剛性の分布と5m弦高低変位波形は類似した形状を示すことがわかった。
- ・ 路盤の剛性が均一な高架橋上の場合、軌道支持剛性の標準偏差と5m弦高低変位の標準偏差は相関関係にあり、つき固め保守直後に測定した軌道支持剛性から、その後の高低変位進みが大きくなる区間を予測できる見込みが得られた。本評価方法により、つき固め保守直後の軌道支持剛性の分布の標準偏差を小さくすることで、つき固め保守効果を持続させることができると考えられる。
- ・ MTTによるつき固め保守直後の軌道支持剛性が小さい箇所に、追加のつき固め保守を実施したところ、高低変位進みを抑制できることを確認した。
- ・ 路盤剛性が変化する構造物境界部の場合、路盤剛性が低下する切土および盛土部で軌道支持剛性が小さく、高低変位も大きくなった。
- ・ 実軌道上で迅速な測定が可能な軌道支持剛性測定試験機(RFWD)を製作した。RFWDは、1点の測定速度が10秒程度であり、小型FWDよりも大幅に測定時間を短縮することができる。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

謝辞

本検討を進めるにあたり、多大なる協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社に深く謝意を表す。

文献

- 1) 土木学会舗装工学委員会編：FWD及び小型FWD運用の手引き，2002
- 2) 谷川光，中村貴久，桃谷尚嗣：小型FWDを用いた軌道支持剛性評価法における浮きまくらぎの影響の検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.20，2016
- 3) 谷川光，中村貴久，桃谷尚嗣：小型FWDを用いた軌道支持剛性評価法の基礎的研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.19，2015
- 4) 谷川光，中村貴久，桃谷尚嗣：細粒土混入率が高いバラスト軌道の支持剛性評価に関する研究，土木学会論文集E1，Vol.72，No.3，I_141-I_149，2016
- 5) 関根悦夫，村本勝己：営業線路盤の支持力特性に関する研究，鉄道総研報告，Vol.9，No.7，pp.19-24，1995