

荷重環境の実態調査に基づく低廉な縦まくらぎの開発

渡辺 勉* 箕浦 慎太郎*
面高 陽紀** 神津 大輔**

Development of Longitudinal Sleeper of Reasonable Cost Based on Survey of Wheel Load Condition

Tsutomu WATANABE Shintaro MINOURA
Akinori OMODAKA Daisuke KOZU

In this research, the variable wheel load factors for locomotive and commuter train were proposed from the field test of wheel load on the continuous welded rail section. Concretely, in the section where the locomotives run, the proposed factor is 2.0 and in the section where the only commuter trains run, that is 1.6. Based on these factors, new type of longitudinal sleeper was developed. The section height of the sleeper is 10~20mm thinner than conventional "Ladder sleeper". In addition, we conducted full-scale train running tests, and clarified that the sleeper has an effect of suppressing the dynamic vertical displacement by 25% compared with JIS type 3 sleeper.

キーワード：縦まくらぎ，PCまくらぎ，低廉化，バラスト軌道，変動輪重係数，衝撃

1. はじめに

縦まくらぎとは、レールと平行に配置された2つの梁とそれらを繋ぐ部材で構成されるまくらぎであり、鉄道総研では図1に示すように、プレストレストコンクリート製の縦梁と鋼製の継材から構成されるはしご状の縦まくらぎであるラダーマクラギを1999年に実用化した¹⁾。ラダーマクラギの設計においてはPCまくらぎの設計²⁾と同様に、設計輪重(80kN)に対して変動輪重係数(使用性=2.0, 安全性=4.0)を乗じることにより列車走行による動的・衝撃作用の影響を考慮している。また、まくらぎの支持状態については線路長手方向に長尺であることから、まくらぎの一部にバラスト不支持区間(以下、不支持区間。現在では一般に2締結1.25m)を設定し、軌道状態が通常より悪化した場合においてもコンクリートの引張強度 3N/mm^2 を考慮したひび割れ発生モーメント(使用性)および終局モーメント(安全性)を超過しないように設計されている^{3) 4)}。

一方、近年では車両の軽量化、ロングレール化、軌道整備および車両整備技術の向上等により、列車走行に伴ってまくらぎに作用する荷重が軽減されつつある実態⁵⁾を踏まえ、上記の変動輪重係数および不支持区間長を緩和できる可能性があると考えられる。しかしながら、使用性の照査に用いる変動輪重係数2.0は実際の軌道の各種不整の不確実性を安全側に包含する値として妥当で

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

** 東日本旅客鉄道株式会社

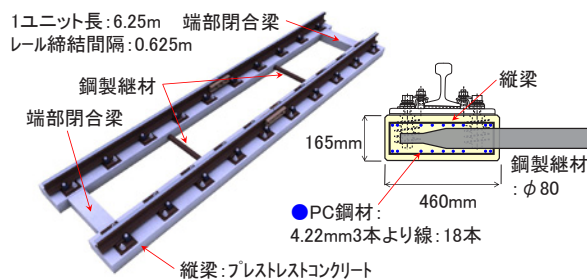


図1 標準的なラダーマクラギ (バラスト軌道用) の概要

あるという既往の研究⁶⁾もあるため、設計条件の緩和については慎重な検討が必要である。以上のような背景から本研究では以下の検討を実施した。

- (1) 在来線の直線ロングレール区間における現地試験に基づき変動輪重係数を設定し、縦まくらぎの合理的な設計を行う。
- (2) 縦まくらぎの曲げモーメントに対する各種パラメータの影響を数値解析により評価する。
- (3) 実物大の列車走行試験を実施し、縦まくらぎの基本特性を把握する。

2. 縦まくらぎの設計

2.1 設計方法

2.1.1 設計応答値の算定

図2に縦まくらぎの応答値算定に関する解析モデルを示す。レール、縦梁、継材、端部閉合梁ははり要素で、

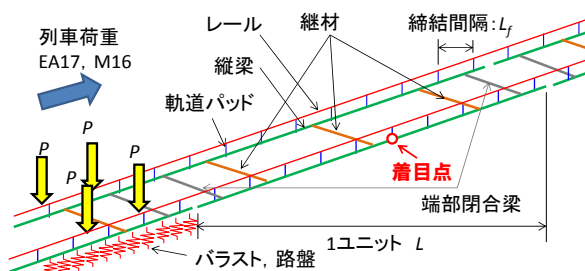


図2 縦まくらぎの応答値算定のための解析モデル



(a) 輪重測定用ゲージ (b) 測定線区

図3 輪重測定方法の概要

軌道パッド、バラスト、路盤はばね要素でモデル化した。ここで、すべての要素は線形要素である。また、列車荷重⁷⁾はEA17およびM16とした。これらの列車荷重に変動輪重係数 W_v を乗じて動的・衝撃作用の影響を考慮した設計応答値を求める。

図3に輪重測定方法と測定線区の概要を示す。測定には輪重測定用ゲージ（三栄インスツルメンツ製）を用いた。同ゲージを日本ナショナルインスツルメンツ製の計測モジュールに接続し、LANケーブルを介してPCに収録した。データ収録プログラムはLabVIEWを用いるとともに、輪重測定用ゲージから30m程度離れたPCまくらぎに設置した加速度計をトリガーとして自動収録されるようにシステムを構築した。ここで実測された輪重と設計輪重から変動輪重係数を評価する。測定線区は50kgNレールが敷設された直線ロングレール区間であり、JIS E 1201に規定される3号まくらぎが敷設されている。走行列車は一般的な通勤列車（以下、電車）と電気機関車が牽引する貨物列車（以下、機関車）である。

2.1.2 設計限界値の算定

使用性および安全性に関わる要求性能を設定し、それぞれの性能項目は使用性については縦梁のひび割れ、安全性については縦梁の曲げ破壊とした。今回の縦まくらぎの設計においては断面フルプレストレスで設計することとし、設計限界値は使用性がデコンプレッションモードとした。安全性については鋼材降伏モーメントとコンクリートが圧壊する圧壊モーメントをそれぞれ算出し小さい方を設計限界値とした。それらの算定においては、鉄道構造物設計標準・同解説（コンクリート構造物）⁸⁾に準じた。

2.1.3 数値解析における解析ケース

表1に解析ケースを示す。縦まくらぎの設計に影響を

表1 解析ケース

ケース	不支持区間長	K_{30} (MN/m ³)	列車荷重	L_f (mm)	L (m)	変動輪重係数 W_v (使用性)
E0-1	なし	30	EA17	625	6.25	2.0
E1-1	1締結	30	EA17	625	6.25	2.0
E1-2	1締結	70	EA17	625	6.25	2.0
E1-3	1締結	110	EA17	625	6.25	2.0
E2-1	2締結	30	EA17	625	6.25	2.0
E1-4	1締結	30	EA17	750	6.00	2.0
E1-5	1締結	30	EA17	800	6.40	2.0
M0-1	なし	30	M16	625	6.25	2.0
M0-2	なし	30	M16	625	6.25	1.6
M2-1	2締結	30	M16	625	6.25	2.0

※列車速度は120km/hを基本とした。
 ※縦梁高さ H は145mm, 155mm, 165mmとした。
 ※安全性に関する変動輪重係数は4.0とした²⁾。

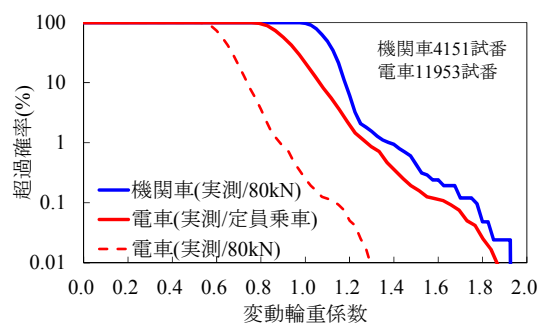


図4 変動輪重係数とその超過確率の関係（現地試験結果）

及ぼすパラメータに着目して解析ケースを設定した。具体的には、列車荷重、縦梁の不支持区間長、地盤反力係数 K_{30} 、レール締結間隔 L_f 、縦梁断面高さ H 、変動輪重係数、列車速度である。なお、以下に示す5点は従来のラダーマクラギと同様の条件とし、①縦まくらぎの縦梁の幅は460mm、②軌道パッドのばね定数は60MN/m、③バラスト厚は250mm、④コンクリートの設計基準強度は50N/mm²、⑤PC鋼線は $\phi 4.22$ mmの3本より線とした。なお、縦梁の最小断面高さ145mmは、埋込栓やショルダーなどの埋込材がPC鋼線よりもかぶりコンクリート側に突出しない最小の値である。

2.2 現地試験結果に基づく変動輪重係数の設定

図4に変動輪重係数とその超過確率の関係を示す。測定期間は合計44日間で機関車は4151試番、電車は11953試番である。なお、測定期間中は軌道整備など軌道状態が人為的な要因で変化する作業は実施していない。図4より、機関車については変動輪重係数 W_v を2.0に設定すれば安全側であることがわかる。一方、電車については定員乗車の重量をベースとして変動輪重係数を算出すると概ね1.9以内となるが、ラダーマクラギの設計輪重である80kNをベースに変動輪重係数を算出すると、1.3以内に収まることがわかる。本研究では、近年

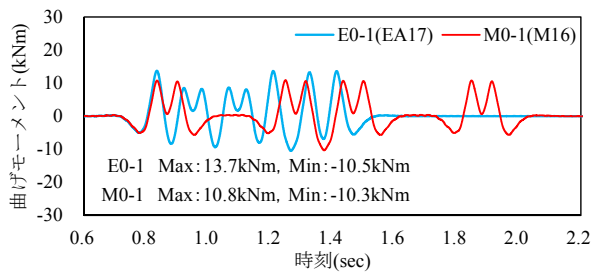


図5 曲げモーメントの時刻歴波形 (H=165mm)

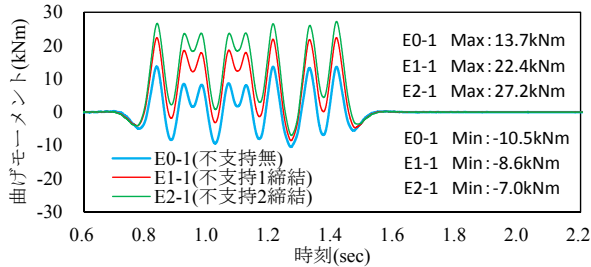


図6 縦梁の不支持区間長の影響 (H=165mm)

の電車（通勤車両）の軽量化の実態を考慮し，設計輪重と実測に基づく1.3に対して安全率1.2程度を見込むこととし，電車については変動輪重係数 W_v を1.6とすることとした。

2.3 各種パラメータの影響評価

2.3.1 設計応答値への影響

図5に曲げモーメントの時刻歴波形を示す。着目点は図2中に示す位置である。以下に述べる結果は変動輪重係数を乗じた結果である。図5より，1軸ごとにピークが生じること，ケースE0-1のE荷重とA荷重の連結部，M荷重の連結部において負曲げが大きくなること等がわかる。また，列車荷重M16と比較して列車荷重EA17では1.3倍程度の正曲げモーメントが生じるが，負曲げの最大値は概ね同程度であることがわかる。

図6に縦梁の不支持区間長の影響を示す。縦梁の不支持区間が長くなるほど正曲げモーメントが増加し，負曲げモーメントが低下することがわかる。具体的に最大値で比較すると，不支持区間がない一様支持に比べて，2締結不支持で2.0倍程度，1締結不支持で1.6倍程度増加する結果となった。

図7に地盤反力係数 K_{30} の影響を示す。地盤反力係数が増加するほど曲げモーメントが低下することがわかる。具体的に最大値で比較すると， $K_{30}=30\text{MN/m}^3$ に比べて， $K_{30}=110\text{MN/m}^3$ で0.8倍程度， $K_{30}=70\text{MN/m}^3$ で0.9倍程度に減少する結果となった。

図8にレール締結間隔の影響を示す。レール締結間隔が増加するほど正曲げモーメントが増加し，負曲げモーメントが低下することがわかる。具体的に最大値で比較すると，レール締結間隔625mmに比べて締結間隔800mmで1.2倍程度，締結間隔750mmで1.1倍程度に

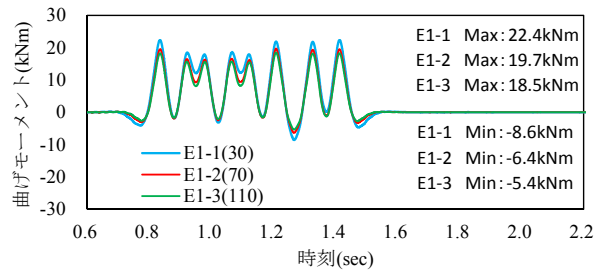


図7 地盤反力係数 K_{30} の影響 (H=165mm)

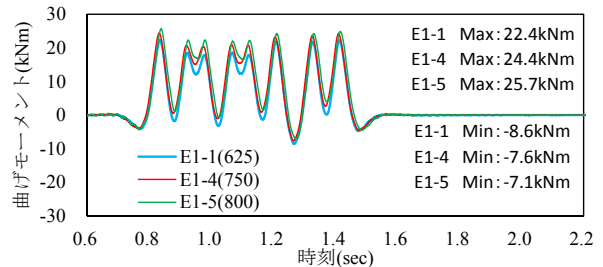


図8 レール締結間隔の影響 (H=165mm)

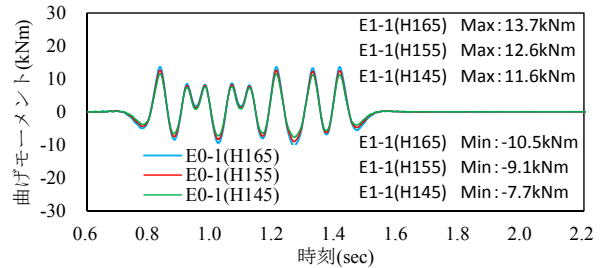


図9 縦梁断面高さの影響 (H=165mm)

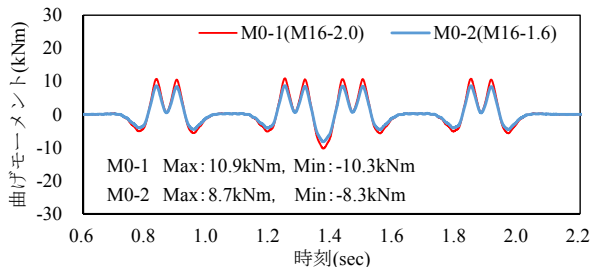


図10 変動輪重係数の影響 (H=165mm)

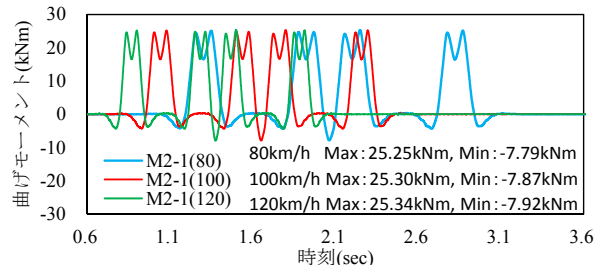


図11 列車速度の影響 (H=165mm)

増加する結果となった。

図9に縦梁断面高さ H の影響を示す。縦梁断面高さが小さくなるほど曲げモーメントが低下することがわかる。具体的に最大値で比較すると，縦梁断面高さ $H=165\text{mm}$ に比べて $H=155\text{mm}$ で0.9倍程度，

特集：鉄道力学

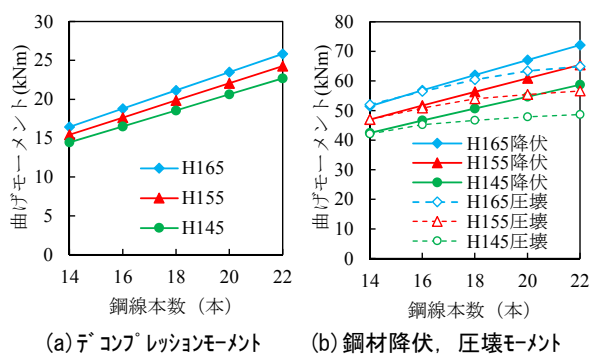


図 12 縦梁断面高さおよび PC 鋼線本数が設計限界値に及ぼす影響

H=145mm で 0.8 倍程度に低下する結果となった。
 図 10 に変動輪重係数の影響を示す。応答値は図 2 で示した解析モデルで求めた結果に変動輪重係数を乗じて算出している。このため当然のことながら、変動輪重係数 W_v を 1.6 として求めた曲げモーメントは変動輪重係数 W_v を 2.0 として求めた曲げモーメントの 0.8 倍となった。

図 11 に列車速度の影響を示す。同図に示すように、120km/h に加えて 80 および 100km/h のケースも解析したが、値に大きな違いは見られず、縦梁の曲げモーメントについて、速度依存性はほとんどない結果となった。

以上の検討より、縦まくらぎの曲げモーメントについては、縦梁の不支持区間長の影響が最も大きいことがわかった。ここで、実際の営業線における縦まくらぎの支持状態は一様支持に近いという報告³⁾もあるが、支持状態が通常より悪化することを想定すべきである。そこで、本研究では現在のラダーマクラギの設計で用いられる不支持区間長である 2 締結よりは条件を緩和するが、一様支持とするのではなく安全側の評価とするため不支持区間を 1 締結不支持とすることとした。また、地盤反力係数 K_{30} についてはより軟弱な 30MN/m^3 とし、レール締結間隔については、締結数を従来から減らし低廉化および保守省力化を図る目的で 750mm とすることとした。

2.3.2 設計限界値への影響

図 12 に縦梁の断面高さおよび PC 鋼線本数が設計限界値に及ぼす影響を示す。現在のラダーマクラギの縦梁断面高さ 165mm, PC 鋼線本数 18 本を基本に比較すると、デコンプレッションモーメントについては、縦梁断面高さが 10mm 小さくなると 6% 程度小さくなる。鋼材降伏モーメントおよびコンクリート圧壊モーメントについては、縦梁断面高さが 10mm 小さくなるとそれぞれ概ね 10 ~ 12% 程度低下することがわかる。また、PC 鋼線本数が 2 本増加すると、デコンプレッションモーメントおよび鋼材降伏モーメントについては 10% 程度増加、コンクリート圧壊モーメントについては 3 ~ 5% 程度増加する結果となった。

表 2 縦まくらぎの照査結果

(a) 機関車 EA17 (変動輪重係数 $W_v=2.0$)

高さ (mm)	使用性 $W_v=2.0$				安全性 $W_v=4.0$			
	PC 鋼線本数 (本)				PC 鋼線本数 (本)			
145	1.17	1.04	0.94	0.86	1.12	1.09	1.06	1.05
155	1.19	1.06	0.96	0.87	1.08	1.02	0.996	0.98
165	1.21	1.08	0.97	0.88	1.05	0.99	0.94	0.92

(b) 電車 M16 (変動輪重係数 $W_v=1.6$)

高さ (mm)	使用性 $W_v=1.6$				安全性 $W_v=4.0$			
	PC 鋼線本数 (本)				PC 鋼線本数 (本)			
145	0.97	0.85	0.75	0.68	1.07	0.996	0.97	0.94
155	0.98	0.86	0.77	0.69	1.04	0.96	0.91	0.88
165	1.00	0.87	0.78	0.70	1.03	0.94	0.88	0.83

※ 不支持区間 1 締結, 地盤反力係数 $K_{30}=30\text{MN/m}^3$, レール締結間隔 750mm
 ※ 材料係数 $\gamma_c=1.3$, 軌道部材係数 $\gamma_b=1.1$, 軌道構造係数 $\gamma_l=1.2$ を考慮

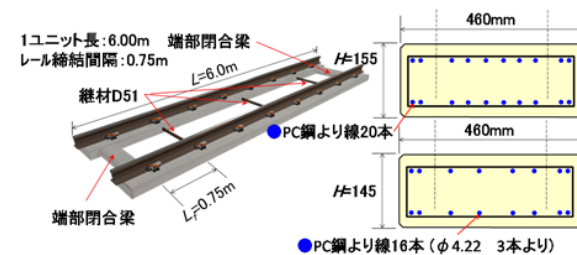


図 13 在来線直線ロングレール区間用縦まくらぎの概要

2.4 在来線の直線ロングレール区間の荷重環境に基づく縦まくらぎの提案

表 2 に縦まくらぎの照査結果を示す。2.3 節の検討結果に基づき設計条件は、縦梁の不支持区間 1 締結, 地盤反力係数 $K_{30}=30\text{MN/m}^3$, レール締結間隔 750mm である。なお、材料係数 γ_c は 1.3, 軌道部材係数 γ_b は 1.1, 軌道構造係数 γ_l は 1.2 とした。表 2 より、設計列車荷重を EA17 とする場合には縦梁の断面高さを 155mm, PC 鋼線の本数を 20 本, 設計列車荷重を M16 とする場合には縦梁の断面高さを 145mm, PC 鋼線の本数を 16 本とする縦まくらぎが最も合理的であることがわかる。

なお、これらの縦まくらぎは在来線の直線ロングレール区間の現地試験結果に基づき決定したものであり、敷設区間は在来線の直線ロングレール区間に限定されるものである。

3. 在来線直線ロングレール区間用の縦まくらぎの列車走行試験

3.1 縦まくらぎの概要

図 13 に 2 章において開発した縦まくらぎの概要を示す。縦梁の断面高さが 145mm と 155mm の 2 タイプで

ある。なお、継材は従来のダラーマクラギではφ80mmの鋼管であったが、縦まくらぎの低廉化の観点から JIS G3112 に規定される鉄筋コンクリート用棒鋼である径 D51、鋼種：SD345（以下、D51）を用いた。D51 の適用性については、数値解析で曲げ降伏モーメントに対して十分小さな応答値となること、引抜耐荷力については引抜試験を実施し直線用 PC まくらぎの 3 号まくらぎの設計横圧に対して十分余裕のある引抜耐荷力を有することを別途確認した。ただし、実際の現場で継材に D51 を用いる場合には防錆処理等が必要になると考えている。

3.2 列車走行試験方法

図 14 に縦まくらぎの列車走行試験の概要を示す。2 章で設計した縦まくらぎを鉄道総研内の試験線に敷設し、実物大列車を用いた走行試験を実施した。縦梁断面高さが 155mm のタイプ（縦まくらぎ①）と 145mm のタイプ（縦まくらぎ②、③）を敷設した。試験線内であるため最高速度は 40km/h に留まるが、縦まくらぎの基本特性を把握するために列車走行試験を実施した。なお、継材 D51 にはエポキシ粉体塗装を行った。

図 14 (b) に測点の配置状況を示す。変位測定点は合計 14 点、曲げモーメントは 4 点とした。測定機の仮設状況は図 14 (d) に示す通りで、曲げモーメントは縦まくらぎの縦梁に添付したひずみゲージのひずみ量から換算した。また、列車通過時の動的変位の測定は、図 14 (d) 中の格子模様を描いたターゲットを遠隔からカメラで撮影し、サンプリングモアレ法により変位を取得する非接触微小変位測定システムを用いた⁹⁾。また、図 3 (a) と同様の方法で輪重を測定した。

3.3 列車走行試験結果

3.3.1 輪重、縦梁の曲げモーメントの測定結果

図 15 に輪重と測定 M1 から M4 における曲げモーメントの最大値と時刻歴波形を示す。図 15 (a) および (b) より、走行列車の輪重は 60kN 程度、曲げモーメントはレール継目部直下の測点 M3 で最大 10.5kNm 程度となった。レール継目部以外の測点の曲げモーメントは概ね 2.0 ~ 4.0kNm 程度となった。測定の際はレール継目部の方が一般部よりも大きいことがわかる。また、縦まくらぎ②と縦まくらぎ③の支持条件は概ね同じであると考えられることから、レール継目部では一般部の 3 倍程度の輪重が縦まくらぎに作用していると推察される。

図 15 (c) に測点 M3 および測点 M4 の曲げモーメントの時刻歴波形を示す。同図より、レール継目部直下の測点 M3 ではパルス状の波形が認められる。これはレール継目部と車輪が衝突することにより発生した衝撃荷重の影響であるが、測点 M3 から 3m 程度離れた測点 M4 でも同パルスが発生したほぼ同じ時間でパルス状の波形



図 14 縦まくらぎの列車走行試験の概要

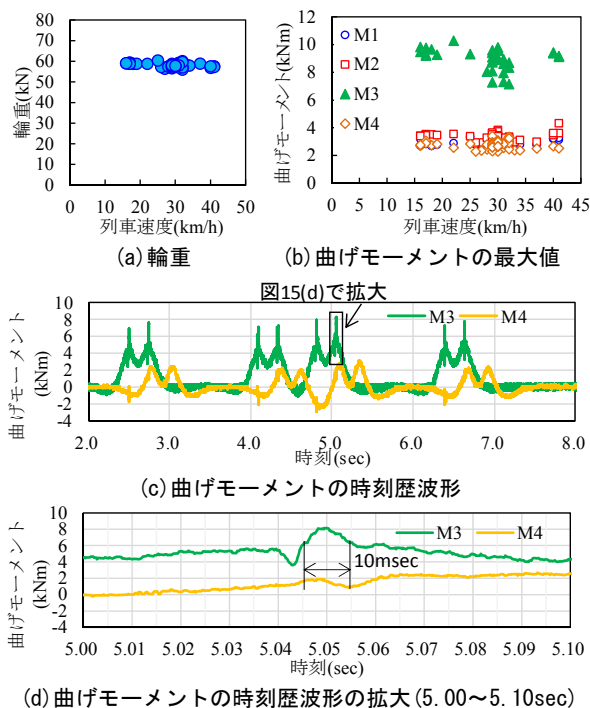


図 15 輪重と曲げモーメントの測定結果

を認めることができる。図 15 (d) は測点 M3 の 5.00sec から 5.10sec 付近の曲げモーメントの時刻歴波形の拡大図であるが、衝撃荷重の作用時間は概ね 10msec 程度となった。

特集：鉄道力学

3.3.2 縦まくらぎの動的上下変位の測定結果

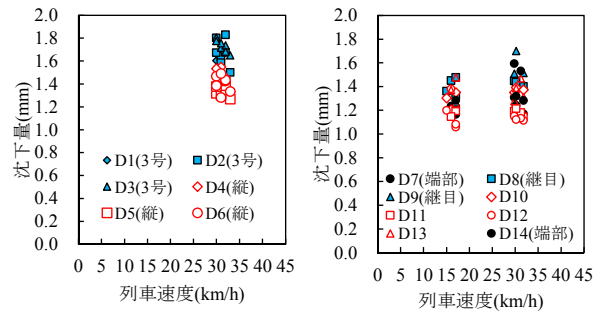
図16に列車通過時の縦まくらぎの動的上下変位の測定結果を示す。図16(a)には縦まくらぎ①と隣接する3号まくらぎの上下変位を示した。図より、3号まくらぎの変位量は最大で1.9mm程度であるのに対し、縦まくらぎは最大1.5mm程度であり、縦まくらぎにより動的上下変位が抑制されていることがわかる。また、図16(b)には縦まくらぎ③の上下変位を示した。レール継目部や縦まくらぎの端部においては相対的に上下変位が大きい傾向にあることがわかる。それらの最大値は1.7mm程度であり、前述の3号まくらぎよりも変位抑制効果がある結果となった。以上より、鉄道総研内の試験線における限られた測定結果ではあるが、縦まくらぎは3号まくらぎに比べて、列車通過時の動的上下変位の抑制効果があることが実証された。

4. まとめ

本研究では、在来線の直線ロングレール区間における現地試験に基づき変動輪重係数を設定し、縦まくらぎの合理的な設計を行うとともに、数値解析により縦まくらぎの曲げモーメントに対する各種パラメータの影響を評価した。また、新たに設計した縦まくらぎを製作し、実物大の列車走行試験を実施し、縦まくらぎの基本特性を把握した。

以上の検討より得られた知見は以下の通りである。

- (1) 在来線の直線ロングレール区間の輪重測定結果に基づき、縦まくらぎの使用性の照査に用いる変動輪重係数を提案した。具体的には機関車に対しては2.0、電車に対しては1.6である。
- (2) 従来のラダーマクラギの断面高さ(165mm)よりも10mmおよび20mmだけ薄型化した2種類の縦まくらぎを開発した。具体的には、設計列車荷重をEA17とする場合には縦梁断面高さ155mm、PC鋼線20本、設計列車荷重をM16とする場合には縦梁断面高さ145mm、PC鋼線16本とする縦まくらぎである。また、レール締結間隔については、締結数を従来から減らし低廉化および保守省力化を図る目的で750mmとした。
- (3) 数値解析により縦まくらぎの曲げモーメントに対する各種パラメータの影響を評価し、不支持区間長の影響が最も大きいことを明らかにした。
- (4) 実物大の列車走行試験を実施し、提案する縦まくらぎが3号まくらぎに対して25%程度動的上下変位



(a)縦まくらぎ①と3号まくらぎ (b)縦まくらぎ③

図16 動的上下変位の測定結果

抑制効果があること等の基本特性を把握した。

なお、今回提案した縦まくらぎは直線ロングレール区間の現地試験結果に基づくものであり、敷設区間は在来線の直線ロングレール区間に限定されるものである。

文 献

- 1) 渡辺勉, 後藤恵一, 涌井一: 軌道の性能向上を目指して - ラダーマクラギの開発 -, RRR, pp.12-15, 鉄道総合技術研究所, 2016
- 2) 渡辺勉, 箕浦慎太郎: PC まくらぎ, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.84-87, 2015
- 3) 井上寛美, 曾我部正道, 松本信之, 涌井一: ラダーマクラギの開発と限界状態設計法, 鉄道総研報告, Vol.10, No.9, pp.27-32, 1996
- 4) 浅沼潔, 松本信之, 奥田広之, 涌井一: プエプロ実験線の重軸重列車走行におけるバラスト・ラダー軌道の耐久性・保守省力効果, 鉄道総研報告, Vol.16, No.2, pp.45-50, 2002
- 5) 須江政喜, 澁谷聡一, 堀雄一郎, 小野寺孝行: 営業線軌道におけるまくらぎ作用荷重特性等に関する調査, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.19, No.19, pp.79-82, 2015
- 6) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 後藤恵一, 松岡弘大: 各種不整を考慮したPCまくらぎの動的応答特性に関する研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.205-212, 2017
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 2012
- 8) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004
- 9) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 後藤恵一, 徳永宗正, 上半文昭: 画像解析に基づくコンクリート構造物のひび割れ検知手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.35-40, 2017