

新幹線用 PC まくらぎの発生曲げモーメントに関する 各種パラメータの影響

渡辺 勉* 箕浦 慎太郎 (鉄道総合技術研究所) 吉川 秀平 (JR 西日本)

Evaluation of various parameters related to bending moment generated in PC sleepers for Shinkansen
Tsutomu Watanabe*, Shintaro Minoura, (Railway Technical Research Institute)
Shuhei Kikkawa, (West Japan Railway Company)

To quantify the actual load condition of the prestressed concrete (PC) sleeper for high-speed train, field measurement tests and numerical analyses were conducted. As a result, it was clarified that the load condition of the PC sleepers had a margin compared to the design limit value for bending cracks. In addition, the bending moments were calculated considering variations in train speed, boarding rate, rail surface roughness, spring constant of rail pads, Young's modulus of concrete for PC sleepers, and spring constant of track supports. However, it was clarified that the bending moment exceeding the design decompression moment does not occur unless damage such as rail broken occurs.

キーワード : PC まくらぎ, 曲げモーメント, 数値解析, 維持管理
(Prestressed Concrete Sleeper, Bending Moment, Numerical Analysis, Maintenance)

1. はじめに

プレストレストコンクリート製のまくらぎ(以下、PC まくらぎ)は鉄道の高速度化、快適化、安定輸送に欠かすことのできない重要な構成部材である。我が国の PC まくらぎは 1951 年に初めて試験敷設されて以降、現在までの累計敷設本数は国鉄、JR だけでも 4000 万本を超えている。

PC まくらぎの設計耐用年数は一般に 50 年とされているが、近年それを超える PC まくらぎが増えてきており、PC まくらぎの余寿命評価⁽¹⁾や維持管理⁽²⁾⁽³⁾に関する研究が進められている。ただし、これらの研究は主に最高速度 160km/h 以下の在来線を対象としたものであり、高速で走行する新幹線用の PC まくらぎに関する調査や研究はこれまで数例しかなく⁽⁴⁾⁽⁵⁾、最新の知見が整理されているとはいえないのが実情である。また、新幹線は毎日始発列車の運行前に保守用車を走行させ、在来線に比べてきめ細かい線路の点検作業が行われているが、PC まくらぎの健全度判定は依然として外観目視が基本であり、PC まくらぎの耐荷性能などは必ずしもリンクしない手法が用いられている⁽⁶⁾。

一方、PC まくらぎの敷設本数は膨大であるが、一晩の夜間工事で交換できる本数は限られている。このため、ある時期において、既設の PC まくらぎに耐荷性能を満足しないものが急増かつ連続的に発生した場合、交換工事が追いつかなくなり、安全性に影響を及ぼすことが懸念される。近

年、経年 50 年前後の PC まくらぎが増えている実情を踏まえ、営業線の PC まくらぎの荷重環境や PC まくらぎに発生する曲げモーメントを適切に把握し、それらの知見を踏まえた定量的な耐用期間などを定め、計画的な維持管理体制に移行する段階であると言える。そこで、本研究では PC まくらぎの新たな維持管理体制の構築のため、次の点に着目して検討を行った。

- 1) 走行列車の輪重や PC まくらぎの曲げモーメントを実測し、荷重環境を調査する。
- 2) 数値解析により各種パラメータが PC まくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響を検証する。

2. 調査方法

〈2.1〉 対象 PC まくらぎ 図 1 に対象とした PC まくらぎを示す。対象とした PC まくらぎは JIS E1201 に規定される PC まくらぎ(品形 : 3T)であり、PC まくらぎの長さは 2400mm、レール位置断面およびまくらぎ中央断面の高さはそれぞれ 190mm および 175mm である。また、コンクリートの設計基準強度は 49.1N/mm²、PC 鋼より線はφ 2.9mm 異形 3 本鋼より線が用いられている。設計においては、列車走行に伴う動的成分を考慮した変動輪重係数で静止輪重 80kN を 2 倍に割り増した輪重 160kN を設計輪重とし、それに対して断面フルプレストレスを満足するように設計されており、レール位置断面における設計デコンプレ

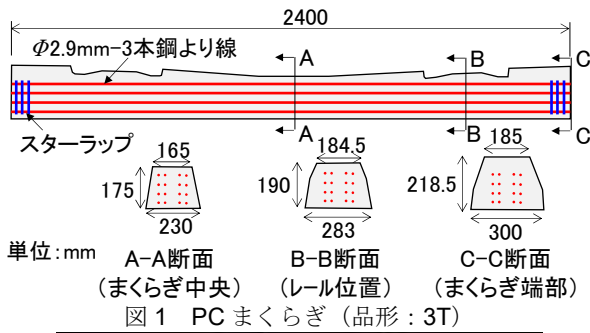


図 1 PC まくらぎ (品形 : 3T)

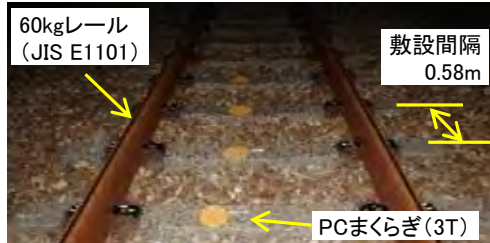


図 2 PC まくらぎの敷設箇所(バラスト軌道)

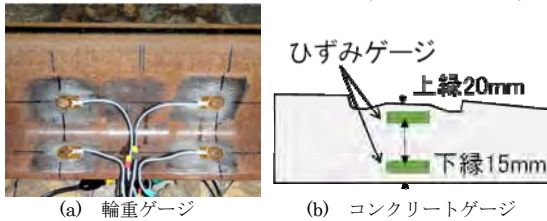


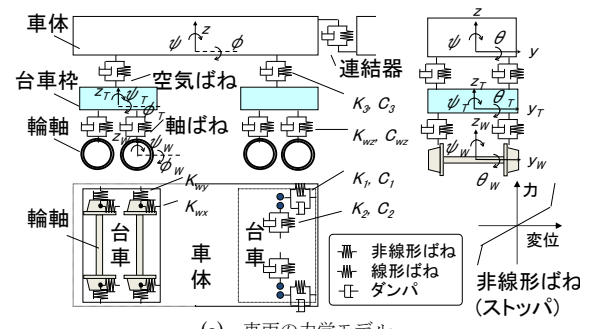
図 3 ゲージの貼り付け状況

ツションモーメントは 10.95kN・m、鋼材の降伏モーメントは 32.36kN・m である。

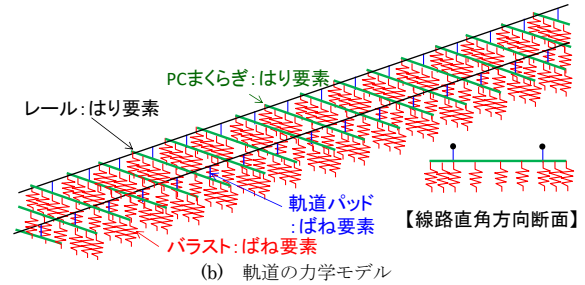
図 2 に PC まくらぎの敷設箇所を示す。当該箇所は鉄筋コンクリート高架橋上のバラスト軌道(直線)であり、列車は 130~300km/h 程度で通過する。また、PC まくらぎの敷設間隔は 0.58m、レールは 60kg レール(JIS E1101)である。

〈2・2〉 輪重および曲げモーメントの測定手法 図 3 に輪重ゲージおよびコンクリートゲージの貼り付け状況を示す。輪重ゲージは三栄インスツルメンツ製、コンクリートゲージは共和電業製のものを用了。コンクリートゲージはレール位置断面における上縁から 20mm、下縁から 15mm 程度断面内側に添付した。このひずみから曲げモーメントに換算した。なお、PC まくらぎは連続 7 本に対して測定を実施した。また、これらのゲージは日本ナショナルインスツルメンツ製の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 を用いて PC まくらぎの加速度をトリガーとして自動収録されるように構築した。サンプリング周波数は 10kHz である。測定列車の本数は 3 日で合計 204 本である。なお、列車速度は輪重のピーク値を車軸通過時刻とみなし、1 台車の 2 軸の通過時刻の差と軸距 2.5m から換算した。

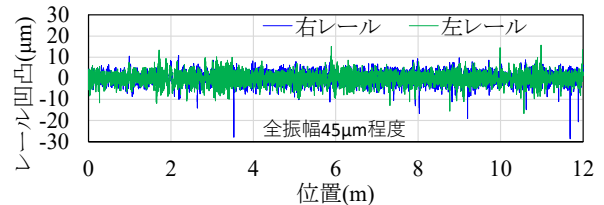
〈2・3〉 数値解析手法 図 4 に数値解析モデルの概要を示す。数値解析には鉄道総研が開発した車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を用了。車両については、車体、台車、輪軸を剛体とし、それらをばねとダンパーで結合した 3 次元力学モデルであり、1 車両あたり 31 自由度を有する。車両には測定箇所を通過する車両の諸元(静止輪重 56.6kN)を与えた。乗車率は 50%とした。



(a) 車両の力学モデル



(b) 軌道の力学モデル



(c) レール凹凸(実測値)

図 4 数値解析モデル

表 1 材料諸元

レール	60kg レール, ヤング係数: 200kN/mm ²
軌道パッド	ばね定数: 50MN/m
PC まくらぎ	コンクリート設計基準強度 49.1N/mm ² , ヤング係数: 33kN/mm ²
バラスト	ばね定数: 200MN/m (層厚 250mm)

表 2 解析ケース

パラメータ	定数
列車速度 (km/h)	200, 250, 270, 300, 320
乗車率 (%)	50, 100, 200
コンクリートのヤング係数(kN/mm ²)	10, 20, 33, 40, 50
軌道パッドのばね定数(MN/m)	50, 100, 150, 250
バラストばね定数(MN/m)	10, 30, 50, 100, 200
レール凹凸 (図 4(c)の凹凸を整数倍)	0(凹凸無), 1倍, 3倍, 5倍

※下線を引いた値が基本ケース

なお、乗車率は、車両を構成する車体、台車、輪軸のうち、車体の重量を増減させて設定した。また、軌道については、有限要素法によりモデル化した。具体的には、レール、PC まくらぎははり要素、軌道パッドおよびバラストはばね要素としてモデル化した。レールは PC まくらぎとのレール締結位置(軌道パッドで接続)間を 4 つの要素に分割、PC まくらぎは長手方向に 8 つの要素に分割した。なお、測定箇所は高架橋上であるため、高架橋のコンクリート部材は十分に剛であると思なし、バラストを模擬したばね要素の下端の境界条件は固定とした。また、車輪が走行するレール頭頂面には、図 4(c)に示す実測したレール凹凸を与えた。レール凹凸は原田製作所製の長さ 1m のレール頭頂面粗さ測定器を用いて測定した。

表 1 に材料諸元を示す。材料定数は鉄道構造物等設計標

表 3 解析ケース(レール継目部の凹凸設定やまくらぎ間隔変更)

パラメータ	定数
在来線レール継目部で測定した実測レール凹凸(図5の凹凸を整数倍)	1倍, 2倍, 3倍, 5倍
まくらぎ間隔 (m)	0.58(25mあたり43本), 0.61(41本), 0.71(35本), 0.81(31本), 1.0(25本)

※ この条件に表2の乗車率, 軌道パッドのばね定数, バラストばね定数を考慮する。コンクリートのヤング係数は表2の基本ケースのみとした。

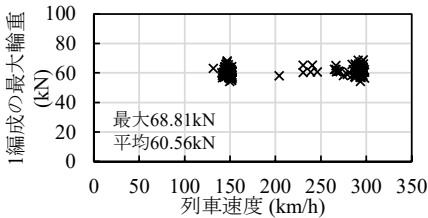


図 6 輪重の実測結果

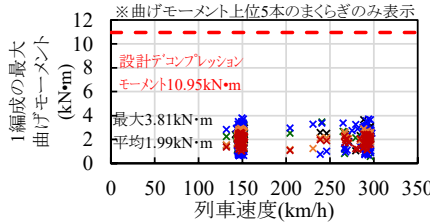


図 7 曲げモーメントの実測結果

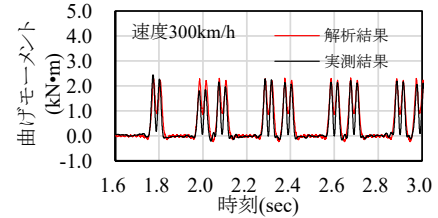


図 5 在来線レール継目部で実測したレール凹凸

図 8 解析結果と実測結果の比較

準・同解説(7)(8)に示される標準的な値を用いた。

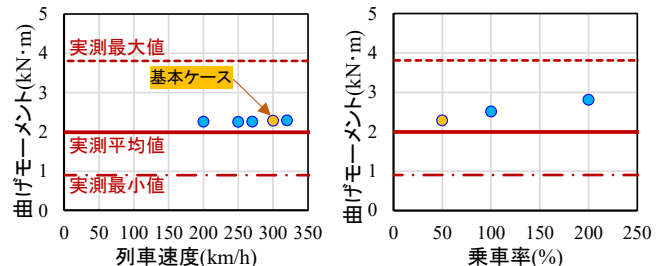
表 2 に解析ケースを示す。定数の変動が想定されるパラメータに着目した。具体的には、列車速度, 乗車率, レール凹凸, 軌道パッドのばね定数, PCまくらぎのコンクリートのヤング係数, バラストばね定数をパラメータとし, 全 6000 ケースである。これらの定数の変動の範囲は既往の研究成果など(1), (7)~(9)を参考に設定した。また, 表 3 に示すように, 在来線のレール継目部で実測したレール凹凸(図 5 参照, 最大振幅 2500 μm)とまくらぎ間隔を設定した。これらは通常の使用状態では想定しづらい条件であるが, 仮にこのような条件となった場合に曲げモーメントに及ぼす影響を検証するために設定した。

3. 調査結果

〈3・1〉 輪重および曲げモーメントの実測結果 図 6 に輪重, 図 7 に曲げモーメントの実測結果をそれぞれ示す。輪重は最大で 68.81kN, 平均で 60.56kN, PCまくらぎのレール位置断面における曲げモーメントは最大で 3.81kN・m, 平均で 1.99kN・m となった。それぞれ設計値と比較すると, 輪重は設計輪重 160kN に対してそれぞれ 43%, 38%, 曲げモーメントは設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・m に対してそれぞれ 35%, 18% となり, 実測値は設計値に比べて小さいことが明らかとなった。また, 輪重および曲げモーメントともに速度依存性はほとんど認められないことが分かる。

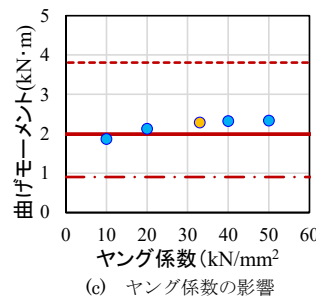
〈3・2〉 数値解析による各種パラメータの影響の検証結果 図 8 に PCまくらぎのレール位置断面における曲げモーメントに関する解析結果と実測結果の比較を示す。数値解析と比較した実測データは, 測定した 204 試番のうち, 列車速度が 300km/h で 1 編成の曲げモーメントのピークの値を平均したものが概ね図 7 で示した平均値 2.0kN・m 程度になる試番を抽出した。図 8 より, 解析結果と実測結果は概ね整合していることが分かる。

図 9 に数値解析による各種パラメータの影響の検証結果を示す。同図(a)~(f)は基本ケースに対するそれぞれのパラメータの影響を示した。図中の黄色いプロットが当該パラ



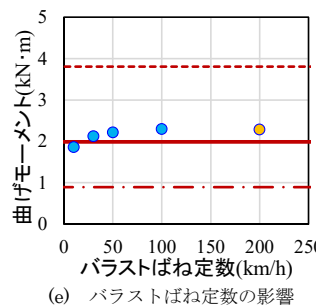
(a) 列車速度の影響

(b) 乗車率の影響



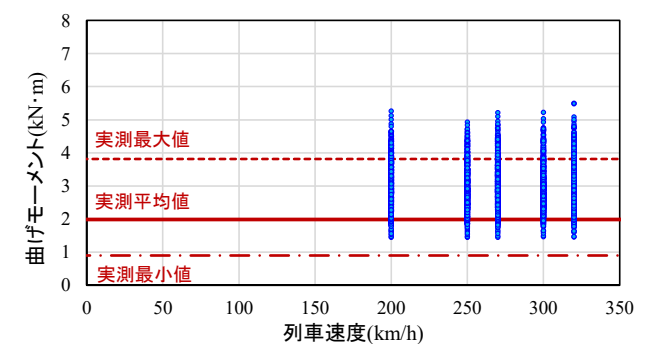
(c) ヤング係数の影響

(d) 軌道パッドのばね定数の影響



(e) バラストばね定数の影響

(f) レール凹凸の影響



(g) 解析結果の総括(表2の全ケース解析結果をプロット)

図 9 数値解析による各種パラメータの影響の検証結果
乗車率 50%, ヤング係数 33kN/mm², 軌道パッドのばね定

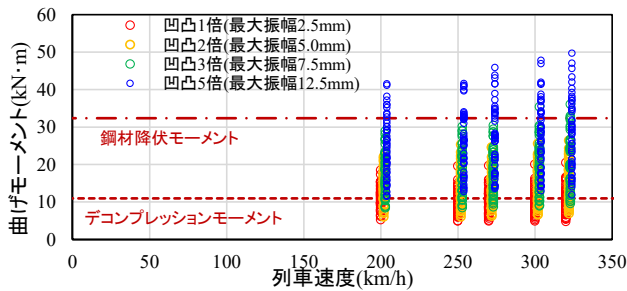


図10 図5に示すレール凹凸を設定した場合の曲げモーメント数 50MN/m, バラストばね定数 200MN/m, レール凹凸1倍(凹凸全振幅 45mm)の条件に対して, 列車速度 300km/hを基本ケースとして列車速度を変化させた結果である。図9(g)はすべての解析結果をプロットした総括図である。図9(a)~(f)より, 列車速度の変化による曲げモーメントへの影響は他のパラメータに比べて小さいこと, 乗車率が増加すると曲げモーメントが増加すること, PCまくらぎのコンクリートのヤング係数の増減に伴い, 曲げモーメントが増減すること, 軌道パッドのばね定数が増加すると曲げモーメントが増加すること, バラストばね定数が減少すると曲げモーメントが減少すること, 凹凸量が増加すると曲げモーメントが増加することなどが分かる。

このように, 各種パラメータの影響でPCまくらぎに発生する曲げモーメントが変動するが, 図9(g)に示す通り, PCまくらぎの曲げモーメントを基本ケースよりも増大させる定数がそれぞれ重畳したとしても, 設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・mを超える曲げモーメントがPCまくらぎに発生する可能性は低いことが明らかとなった。

〈3・3〉 レール凹凸やまくらぎ間隔に関する数値実験結果

図10に図5に示す在来線のレール継目部で実測されたレール凹凸を設定した場合のPCまくらぎの曲げモーメントを示す。実際にはありえないが, レール継目部のように振幅 2.5mm程度のレール凹凸がある場合には, 曲げモーメントが設計デコンプレッションモーメントを超過する可能性があること, 振幅が 7.5mm程度になると鋼材降伏モーメントも超過する可能性があることなどが分かる。また, 図11にはまくらぎ間隔を変更した場合にPCまくらぎに発生する曲げモーメントを示す。図より, まくらぎ間隔が拡大すると曲げモーメントが増加することが分かる。ただし, 今回の条件では, 設計デコンプレッションモーメントを超過する結果とはならなかった。

以上の結果より, 新幹線用PCまくらぎにひび割れや曲げ破壊を発生される要因としては, レール継目部のように局部的に大きな振幅を持つレール凹凸の影響が最も大きいと考えられる。なお, 今回の検討では車輪フラットを対象としていないが, レール凹凸と同様に衝撃荷重を発生させる要因であるため, 今後は車輪フラットの影響についても検証が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

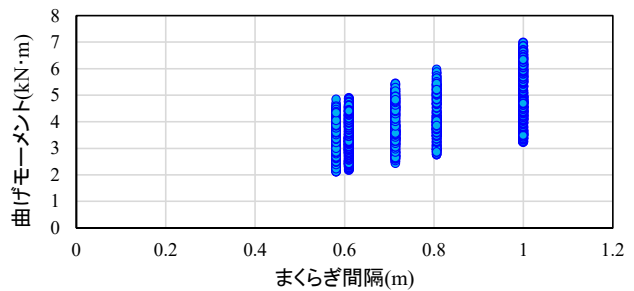


図11 まくらぎ間隔を変更した場合の曲げモーメント

- 1) PCまくらぎに作用する輪重および発生する曲げモーメントを実測した結果, 輪重は最大 68.81kN(対設計値 43%), 平均 60.56kN(38%), 曲げモーメントは最大 3.81kN・m(対設計デコンプレッションモーメント 35%), 平均 1.99kN・m(18%)となり, 実測値は設計値に比べて小さいことが明らかとなった。また, 輪重および曲げモーメントともに速度依存性はほとんど認められないことが分かった。
- 2) 数値解析により各種パラメータがPCまくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響を検証した結果, 現実的に想定される範囲で定数を変動させたが, PCまくらぎの曲げモーメントを基本ケースよりも増大させる定数がそれぞれ重畳したとしても, 設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・mを超える曲げモーメントがPCまくらぎに発生する可能性は低いと考えられる。

以上の検討より, 新幹線用PCまくらぎの荷重環境は設計限界値に比べて余裕のある状態であることが明らかとなった。今後は経年PCまくらぎの耐荷力評価結果なども踏まえて, 合理的な維持管理方法の確立のための検討を継続していきたい。

文 献

- (1) 渡辺勉, 後藤恵一, 箕浦慎太郎: 経年PCまくらぎの余寿命評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.21, pp.496-501 (2021)
- (2) 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 松岡弘大, 後藤恵一: PCまくらぎの維持管理に関する最近の研究, プレストレストコンクリート, Vol.63, No.2, pp.81-84 (2021)
- (3) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 飯島亨, 石田哲也: 凍害を受けたPCまくらぎの実態調査と健全度判定基準の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.665-670 (2020)
- (4) 日本鉄道施設協会: 昭和61年度PCマクラギの耐用寿命の研究 報告書 (1992)
- (5) 前田昌克, 船田智巳: 発生PCまくらぎの耐力評価, 土木学会第60回年次学術講演会, 4-129, pp.257-258 (2005)
- (6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準(軌道編)の手引き, pp.236-237 (2007)
- (7) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善 (2004)
- (8) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(軌道構造), 丸善 (2012)
- (9) 守田武史, 田中靖幸, 横山秀史, 岩田直泰: 低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響, 土木学会第60回年次学術講演会, 4-111, pp.221-222 (2005)