論文 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

渡辺 勉1・箕浦 慎太郎1・後藤 恵一1・松岡 弘大1

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:watanabe.tsutomu.30@rtri.or.jp

本研究では我が国で最も一般的なJIS-3号PCまくらぎが敷設された直線ロングレール区間を対象に、現地測定試験および三次元数値解析により軌道を構成する各種パラメータの影響評価を行った。その結果、実測変動輪重係数は2.0以内に収まること、フルプレストレス状態を超える曲げモーメントが発生する場合があること、連続したPCまくらぎであってもPCまくらぎの支持状態やレール凹凸の影響で曲げモーメントに3倍程度の差が生じることなどを明らかにした。また、数値解析によるPCまくらぎの浮きやレール凹凸量の影響に関する検討結果を踏まえると、PCまくらぎの使用性の照査に用いる設計変動輪重係数2.0は、軌道の各種不整の不確実性を安全側に包含できる係数として概ね妥当な値であることを明らかにした。

Key Words: prestressed concrete sleeper, irregularity, design, wheel load, numerical analysis

1. はじめに

PCまくらぎの設計は、列車走行に伴う衝撃作用の影響を考慮して行われる。衝撃作用の主な要因は車輪フラットやレール継目部の段差(角折れ、目違い)であるが、想定しうる最大の衝撃作用に対してPCまくらぎが曲げ破壊に対する安全性を確保するためには、静的輪重の4倍以上の輪重を考慮する必要があることなどが既往の研究により明らかにされている¹⁾. これをもとに、現在のPCまくらぎの設計における安全性(曲げ破壊)の照査においては、静的輪重からの割増係数(以下、変動輪重係数)として4.0が一般的に用いられている。

一方で、PCまくらぎの設計における使用性(ひび割れ)の照査においては、列車走行に伴う衝撃作用に対してPCまくらぎ断面のフルプレストレス状態を確保するために、変動輪重係数として2.0(レール継目用PCまくらぎは3.0)が一般的に用いられている²³⁹.しかしながら、この変動輪重係数はPCまくらぎ設計当初から慣例的に用いられてきた値であり、その妥当性を検証した例はほとんどないのが実態である。また、PCまくらぎは軌道を構成する1部材であり、その応答はPCまくらぎを支持するバラストや地盤、あるいは車輪踏面やレール頭頂面の凹凸など様々な構成要素の影響を受けて大きく変動することが知られているが⁴、個々の要因について精緻に検討した事例はほとんど見当たらない.

以上のような背景から、本研究では在来線の直線ロン

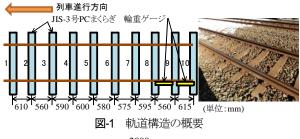
グレール区間を対象として,以下の検討を実施すること とした.

- 1) 列車通過時の輪重, PC まくらぎの曲げモーメント に関する現地測定を実施し、その実態を定量的に把 握する.
- 2) 実現象を再現可能な三次元数値解析モデルを構築し、 レール凹凸や PC まくらぎの支持状態などの各種不 整が PC まくらぎの発生曲げモーメントに及ぼす影 響を定量的に評価する.
- 3) PC まくらぎの設計の使用性の照査において一般的に用いられている変動輪重係数の妥当性を検証する. なお、PCまくらぎの設計においては横圧の影響も併せて考慮するが、後述する現地試験において、本研究で対象とした箇所の横圧が設計横圧40kNの概ね1/4以下であることを確認した上で、本研究における数値解析おいては横圧の影響を考慮せずに検討を行うこととした. 横圧および変動横圧係数等の検証については今後の課題としたい.

2. 検討手法

(1) 検討対象区間の概要

図-1および図-2に本研究で対象とする軌道構造とPCまくらぎの概要をそれぞれ示す.50kgNレールが敷設され



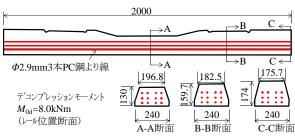
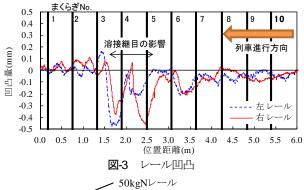
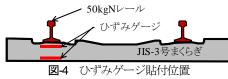


図-2 PCまくらぎ(JIS-3号まくらぎ)の概要



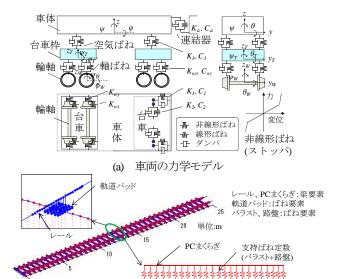


た直線ロングレール区間であり、JISE 1201に規定される 3号プレテンション式PCまくらぎ(以下、3号まくらぎ)が敷設されている。3号まくらぎは直線区間および 半径800m以上の曲線区間に敷設される、我が国で最も敷設本数が多いPCまくらぎである。3号まくらぎは変動輪重係数2.0を考慮した設計輪重160kNに対してフルプレストレスを満足するように設計されており、レール位置 断面におけるデコンプレッションモーメントは8.0kNmである。図-1には現地で実測したPCまくらぎ間隔も記載するが、PCまくらぎの敷設本数は設計上25mあたり41本であるが、敷設間隔は数十mm単位でばらつくことがわかる。

図-3に対象区間のレール凹凸を示す. 長さ1mのレール頭頂面粗さ測定器を用いて測定した. まくらぎ4および5付近の最大0.6mm程度の凹凸は,溶接継目の影響である.

(2) 測定手法

本研究では列車通過時の輪重,PCまくらぎの曲げモーメントを測定した.図-4に3号まくらぎへのひずみゲージ貼付位置を示す.ひずみゲージ(共和電業製)は設計



(b) 軌道の力学モデル 図-5 三次元数値解析モデルの概要

断面であるレール位置断面の上縁および下縁に2枚貼付した.ここで得られるひずみから曲げモーメントに換算した.また,輪重ゲージ(三栄インスツルメンツ製)については、図-1に示すようにまくらぎ8と9の間,まくらぎ9と10の間に設置した.ひずみ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まくらぎの振動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.

測定期間は、PCまくらぎのひずみについては合計3日間183試番、輪重については合計44日間8167試番である. 測定期間中は、軌道整備などPCまくらぎの敷設状態が 人為的な要因で変化する作業は行っていない. なお、走 行列車は、貨物列車と通勤列車である.

(3) 解析手法

a) 三次元数値解析モデル

図-5に三次元数値解析モデルの概要を示す.数値解析には鉄道総研開発の車両と線路構造との動的相互作用解析プログラムDIASTARSIII[®]を用いた.

車両については、車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパーでリンクした三次元力学モデルで、1車両あたり31自由度を有する.列車は車両モデルの端部に設けたばねとダンパーで連結して構成する.本研究では車両は通勤車両(輪重5.5tf程度:定員乗車相当)をモデル化することとした.

軌道については有限要素法により25m程度をモデル化した. レールははり要素でモデル化し, 1レール締結装置あたり20分割するように節点を設けた. なお, PCまくらぎが負担する荷重には静的荷重だけではなく, 車輪

およびレールの凹凸などに起因して発生する動的な変動作用力の寄与も大きい.本研究ではそれらの影響を考慮するために、車輪の走行面となるレールを模擬したはり要素上に図・3に示すレール凹凸を与えた.さらに、既往の車輪凹凸分布に基づき復元した車輪踏面凹凸のも併せて走行面に与えた.PCまくらぎについてもはり要素でモデル化し、1まくらぎあたり37分割するように節点を設けた.なお、図・1に示したようにPCまくらぎの敷設間隔は数十mm単位でばらつくが、解析モデル上は等間隔(25mあたり41本)で配置した.軌道パッドはばね要素とするが、軌道パッドの大きさに応じた荷重分散を考慮するため、ばね要素35要素でモデル化した.バラストおよび路盤は、両者を1つのばね要素に集約してモデル化した。解析モデル全体で節点数は8338節点、要素数は13012要素である.

数値解析はモーダル法により行った.解析におけるモード次数は10kHz程度までの振動を再現できる次数とし、解析時間刻みは0.1msecである.減衰定数は時刻歴応答解析との整合性から0.1とした.

b) 材料定数

表-1に解析に用いた材料定数を示す.各部材とも鉄道構造物等設計標準・同解説^{3x7}や公称値から決まる定数を用いることを基本とした.地盤反力係数については,現地においてPCまくらぎ近傍のバラストを450mm程度除去し,小型FWD(東京測器研究所製)により実測した値を用いた.

c) 解析ケース

表-2に解析ケースを示す. 既往の研究⁹よりレール継目部を除く一般区間においては, PCまくらぎの支持状態やレール凹凸がPCまくらぎの動的応答に及ぼす影響が特に大きいことがわかっており, 本研究でもそれらの知見を参考に軌道構造の不整として, PCまくらぎの支持状態およびレール凹凸をパラメータとして設定した. 数値解析においては, 本研究で測定対象としたPCまくらぎのうち, まくらぎ1,4,10を解析対象とし, 列車速度は85km/h, 通勤列車で乗車率は100%とした.

PCまくらぎの支持状態としては、既往の研究において未検討である、地盤反力係数、PCまくらぎの敷設間隔および浮きまくらぎなどについて検討を行うこととした.浮きまくらぎについては、表・2に示したPCまくらぎを側面から見た配置の通り、CASE1は着目PCまくらぎだけが浮きまくらぎ、CASE2は着目PCまくらぎと隣接するPCまくらぎ2本が浮きまくらぎ、CASE3は着目PCまくらぎに隣接するPCまくらぎに隣接する合計6本のPCまくらぎが浮きまくらぎ、CASE5は着目PCまくらぎの前約5m程度が浮きまくらぎの状態である.浮きまくらぎの範囲はすべて経験的に定めたものであるが、CASE4は溶接継

表-1 材料定数

レール	種別:50Nレール、ヤグ係数Es:200GPa 軌間:1067mm	
軌道パッド	ばね定数 <i>D_P</i> : 110MN/m	
3号 まくらぎ	PC鋼線: φ2.9mm 3本より線12本 長さ L _P : 2000mm, 底面幅 B _P : 240mm 高さ H _P : 170mm(レール下), 150mm(中央) コンクリートヤク [*] 係数 E _C : 33GPa	
バラスト	バラスト厚さ h : 250mm 支持ばね定数 D _B : 180MN/m(1 レール分)	
地盤	地盤反力係数 K ₃₀ : 110MN/m³(実測値) 支持ばね定数 D _S : 111MN/m(1 レール分)	

※バラストと地盤の合成ばね定数 $D_c=1/((1/D_B)+(1/D_S))$

表-2 解析ケース

PCまくらぎ		3号まくらぎ(まくらぎ 1, 4, 10)	
列車速度 V		85km/h	
車体質量 M_C		通勤列車,乗車率 100% (60kg/人)	
地盤反力係数 K ₃₀ (MN/m³)		30, 50, 70, 90, 110, 130, 150	
PCまくらぎ		0.714m~0.556m	
敷設間隔 S(m)		(敷設本数 35~45 本/25m で 1 本刻み)	
浮き まくらぎ**	CASE1	レール方向 □ □ □ □ □ ··· □: 浮きまくらぎ ***	
	CASE2	✓ 着目PCまくらぎ … □ □ □ □ □ □ □ ··· 会会	
	CASE3	✓ 着目PCまぐらぎ … □ □ □ □ □ □ □ ··· ※ ※ ※ ※	
	CASE4	✓ 着目PCまぐらぎ … □ □ □ □ □ □ □ □ □ ···	
	CASE5		
レール凹凸 δ		図-3 に示す凹凸 δ (最大振幅 0.6 mm 程度), 2δ , 3δ , 5δ , 7δ , 10δ , 15δ , 20δ	

※PCまくらぎ敷設間隔:41本/25m(0.641m)

ぎ目前後の浮きまくらぎ、CASE5は橋台とその背面盛土の境界部を想定した。なお、本研究では浮きまくらぎの支持ばね定数は、バラストおよび地盤から構成される支持ばね定数 D_c を0として解析を実施した。

レール凹凸については、図-3に示した実測レール凹凸を全区間において2倍、3倍・・・・206倍としたケースを設定した.

バラスト軌道は定期的に適切な維持管理が行われており、本研究で設定した数値解析上の各種軌道不整は過大であるが、どのような不整の条件であればPCまくらぎにひび割れなどの損傷が発生しうるのか明確にするためこのような条件を設定することとした.

3. 検討結果

(1) 輪重の測定結果

図-6に輪重の測定結果を示す.図より、貨物列車および通勤列車ともにランダムに輪重の著大値が発生していることがわかる.しかしながら、すべての試番において、測定された輪重の値は、3号まくらぎの変動輪重係数2.0

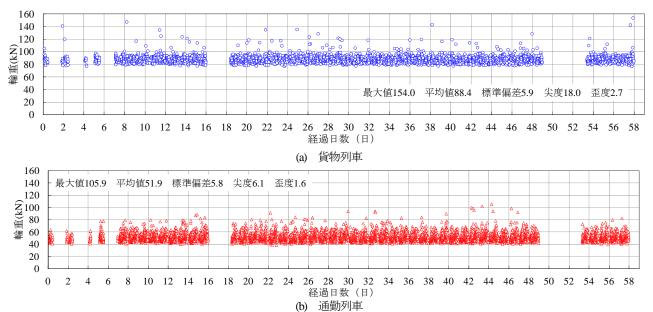
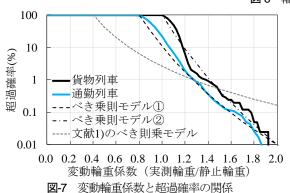


図-6 輪重の測定結果



を考慮した設計輪重160kN以下であることがわかる.

貨物列車の輪重については、最大値154.0kN, 平均値88.4kN, 標準偏差5.9kNとなった. 尖度と歪度の値より, 正規分布と比較して平均値周辺ではピークが鋭く, 裾が右側に広い分布である. 通勤列車の輪重については、最大値105.9kN, 平均値51.9kN, 標準偏差5.8kNとなった. 分布は貨物列車と同様の傾向である.

図-7に変動輪重係数と超過確率の関係を示す. 同図には、涌井らの研究¹において提案されているべき乗則モデルを併せて示した. 変動輪重係数は、通勤列車については定員乗車の静止輪重で実測輪重を除して求めた. 実測された変動輪重係数は、貨物列車については変動輪重係数1.0で超過確率97.6%程度、変動輪重係数1.8で超過確率0.024%程度であり、通勤列車については変動輪重係数1.0で超過確率19.3%程度、変動輪重係数1.8で超過確率0.025%程度であった. 涌井らの研究のべき乗則モデルによる超過確率を比べると、変動輪重係数が概ね1.5よりも大きい範囲では、実測された変動輪重係数の超過確率の方が小さいことがわかる.

さらに、同図には実測された変動輪重係数を近似するように、変動輪重係数0.8、超過確率100%と変動輪重係数2.0、超過確率0.01%の点を通るべき乗則モデル(べき乗

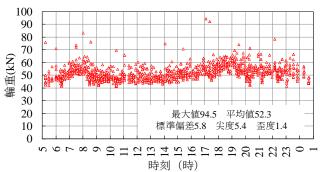


図-8 連続した平日5日間の通勤列車の輪重測定結果

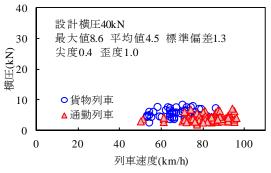


図-9 横圧の測定結果

則モデル①)を、同様に変動輪重係数1.0、超過確率100%と変動輪重係数2.0、超過確率0.01%の点を通るべき乗則モデル(べき乗則モデル②)を示した。変動輪重係数と超過確率の関係をべき乗則でモデル化するのが最も適切かどうかについては議論の余地があるが、今後はこれらのモデルを用いて既設線に敷設されたPCまくらぎの余寿命評価などを行っていきたいと考えている。

図-8に連続した平日5日間の通勤列車の輪重測定結果を測定時刻に対してプロットした結果を示す. 同図より,6時半~8時半,17時半~20時程度の時間帯(通勤通学時間帯)は、その他の時間帯に比べて輪重が平均値で10kN程度大きいことがわかる. これは、通勤通学時間帯で通

まくらぎ No. 10 最大値 10.1 貨物列車のレール 6.7 8.3 7.2 41 7.0 4.1 3.4 3.7 6.9 平均値 位置断面正曲げ 6.3 4.3 4.9 5.0 3.1 4.0 3.0 1.9 2.6 3.2 モーメント(kNm) 標準偏差 0.8 0.3 0.4 0.3 0.7 0.9 0.6 0.4 0.6 0.4 最大値 5.3 2.1 3.1 通勤列車のレール 5.6 4.6 4.7 2.4 3.5 3.0 2.8 平均値 位置断面正曲げ 42 2.0 29 33 1.9 2.6 1.9 1.2 16 3.6 モーメント(kNm) 標準偏差 0.6 0.4 0.8 0.3 0.2 0.3 0.4 0.3 0.3 0.3 貨物平均値と通勤平均値の比率 1.5 1.5 1.4 1.6 1.5 1.6 1.6 1.6 1.6 1.5 12 12 11 11 引張縁3N/mm²-)-(kNm) 引張縁3N/mm² 10 10 9 らぎ1 らぎぎ3 ららぎぎ4 ららぎぎ コンプ。レッションモーメン ままま 9 らぎ1 まま 8 8 らぎ2 らぎ3 ま $\stackrel{\times}{\sim}$ らぎ4 6 ま 6 主 主 らぎ5 ま 5 ŧ らぎ6 まま らぎ6 らぎ7 4 曲げた 4 H ま らぎ7 3 2 3 ま らぎ8 ま Ś らぎ8 2 ₩ らぎ9 らぎ10 まま ま 6 ま らぎ10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 列車速度(km/h) 列車速度(km/h)

表-3 連続10本のPCまくらぎの列車通過時の発生曲げモーメントの測定結果

図-10 各 PC まくらぎの列車通過時の発生曲げモーメントの測定結果

勤列車の乗車率が高いためであると考えられる. また, 著大な輪重は時間帯によらずランダムに発生しているこ とがわかる. 著大な輪重は車輪踏面の平滑状態などの 個々の車両の特性に依存するものであり、乗車率のよう な時間依存性はないためであると推察される. なお, 貨 物列車については時間帯による明確な傾向は見られなか ったため記載を省略した.

(a) 貨物列車

(2) 横圧の測定結果

図-9に横圧の測定結果を示す. 本研究で測定対象とし た区間が直線ロングレール区間であることから、実測さ れた横圧は8.6kN(貨物列車)に留まった. これは、3号ま くらぎの設計横圧40kNの概ね1/4程度である.ここで, 横圧についても輪重と同様の検討が必要であるが、本研 究における測定区間が直線ロングレール区間であり横圧 の絶対値そのものが小さいため、本研究では横圧や変動 横圧係数などに関する検証については今後の課題とする こととしたい.

(3) PCまくらぎの曲げモーメントの測定結果

表-3に本研究で測定対象とした連続10本のPCまくらぎ の列車通過時の発生曲げモーメントの測定結果を示す. 最大値、平均値、標準偏差をそれぞれ整理した. 図-1に 示した通り,連続した10本のPCまくらぎであるが,発 生曲げモーメントはまくらぎごとに異なることがわかる. 溶接継目付近のまくらぎ3,4などは、溶接継目から離れ たまくらぎ8,9,10などと比較して発生曲げモーメント の平均値が2~3倍程度大きいことがわかる. 本研究で測 定した連続10本のPCまくらぎにおいて、最大の曲げモ

ーメントが実測されたのは、溶接継目直近のまくらぎ 3.4ではなく、溶接継目より離れたまくらぎ1の10.1kNm であった. 貨物列車の発生曲げモーメントの平均値で比 較すると、まくらぎ1はまくらぎ8に比べて3.3倍程度大 きな曲げモーメントであることがわかる. これらのばら つきは、レール凹凸量やPCまくらぎの支持状態の違い などの複合要因であると考えられるが、これらの要因分 析を次節において数値解析で実施することとする. また, 貨物列車と通勤列車の発生曲げモーメントの平均値の比 率は、まくらぎごとのばらつきは比較的小さくなり、各 まくらぎともに概ね1.4~1.6程度であった.

(b) 通期列車

図-10に各PCまくらぎの発生曲げモーメントと列車速 度の関係を示す. 各PCまくらぎともに発生曲げモーメ ントの速度依存性は小さいことがわかる. 同図には、3 号まくらぎのデコンプレッションモーメント8.0kNm, 引張縁3N/mm²が発生する曲げモーメント10.9kNmを併せ て示した. 貨物列車については、デコンプレッションモ ーメントを超える曲げモーメント(10.1kNm)が実測され たが、レール位置断面における下縁の引張応力が $3N/mm^2$ となる曲げモーメント10.9kNm以下であるため、 ひび割れは発生しないと考えられる. また, 曲げ破壊に 対しても変動輪重係数4.0を考慮して設計されているた め、安全性上の問題ない. 一方、通勤列車については、 最大でもデコンプレッションモーメントの7割程度の発 生曲げモーメント(5.6kNm)であることがわかる.

(4) 数值解析結果

a) 解析結果と測定結果の比較

図-11にまくらぎ1,4および10における発生曲げモー

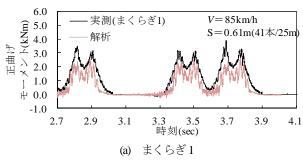
メントに関する時刻歴波形の解析結果と測定結果の比較 を示す. レール位置断面の正曲げモーメントについて示 した. 走行列車は速度85km/hの通勤列車である. 図-1に 示した通り、本研究で測定対象としたPCまくらぎのう ち、まくらぎ1は最も大きな曲げモーメントが測定され たPCまくらぎ、まくらぎ4は溶接継目近傍のPCまくらぎ、 まくらぎ10は溶接継目から最も離れたPCまくらぎであ る. 同図に示すように、まくらぎ4、まくらぎ10につい ては波形の周波数成分に若干の相違がみられるものの、 最大値は捉えられており、数値解析により実現象を概ね 再現可能であると判断することとし、以降のパラメトリ ックスタディは本数値解析モデルをベースに行うことと した. 一方, まくらぎ1については, 解析の方が実測よ りも小さくなっていることがわかる. この要因はPCま くらぎの支持状態の影響と考えられるが、後述するe)レ ール凹凸の影響を評価する際に再度触れることとする.

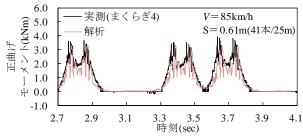
b) 地盤反力係数の影響

図-12に地盤反力係数の影響を示す. 本図には、まく らぎ4および10におけるレール位置断面の正曲げモーメ ントの最大値を地盤反力係数ごとにプロットした. 走行 列車は速度85km/hの通勤列車である. なお, 表-3に示し た「貨物平均値と通勤平均値の比率」に基づき通勤列車 の解析結果に1.6を乗じた値も参考までに示した. 地盤 反力係数が小さくなり、PCまくらぎの支持ばね定数が 小さくなると列車荷重はレール方向に分散されることと なり、PCまくらぎ1本当たりの荷重分担率は低下する. このため、地盤反力係数が $110MN/m^3$ の基本ケースに対 して地盤反力係数が30MN/m³のケースを比較すると、ま くらぎ4では発生曲げモーメントが19%程度低下、まく らぎ10では発生曲げモーメントが14%程度低下した. こ のように、PCまくらぎの支持ばね定数が小さいほど、 PCまくらぎの発生曲げモーメントとしては有利な方向 となるが、道床沈下進み、軌道変位の発生、それらに対 する維持管理や車両動揺などの総合的な観点から,一般 には堅固な地盤によりPCまくらぎを支持することが望 ましい.

c) PCまくらぎの敷設間隔の影響

図-13にPCまくらぎの敷設間隔の影響を示す.本図は、走行列車は速度85km/hの通勤列車である.当然のことながら敷設間隔が大きくなればなるほど、PCまくらぎ1本当たりの荷重分担率は増加する.このため、基本ケースのPCまくらぎ敷設間隔が0.61m(41本/25m)の場合に比べて、0.76m(33本/25m)では発生曲げモーメントが51%程度増加し、0.55m(45本/25m)では発生曲げモーメントが10%程度程度減少した.なお、本研究で実測した軌道では図-1に示す程度にPCまくらぎの敷設間隔にばらつきがあるが、この程度では発生曲げモーメントに対する影響は小さいものと考えられる.





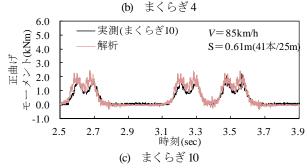


図-11 各 PC まくらぎの発生曲げモーメントに関する時刻歴波 形の解析結果と測定結果の比較(通勤列車)

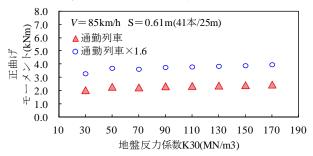


図-12 地盤反力係数の影響に関する解析結果(まくらぎ 10)

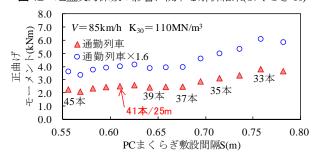
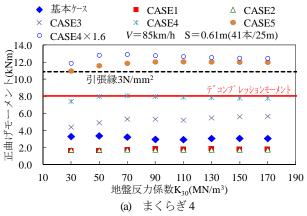


図-13 PC まくらぎ敷設間隔の影響に関する解析結果 (まくらぎ 10)

d) PCまくらぎの浮きの影響

図-14にPCまくらぎ敷設間隔の影響を示す. まくらぎ4, 10におけるレール位置断面の正曲げモーメントの最大値を示した. 走行列車は速度85km/hの通勤列車である.



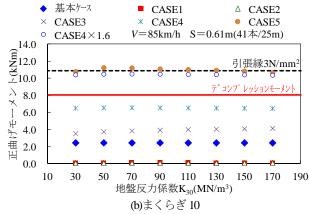


図-14 PC まくらぎの浮きの影響に関する解析結果

まくらぎ4については、着目まくらぎに浮きが発生したと仮定したCASE1、CASE2に着目すると、地盤反力係数が110MN/m³の場合については、基本ケースに対してCASE1では38%程度、CASE2では41%程度発生曲げモーメントが低下した。また、着目まくらぎの前後のPCまくらぎに浮きが発生したと仮定したCASE3、CASE4およびCASE5に着目すると、地盤反力係数が110MN/m³の場合については、基本ケースに対してCASE3では1.7倍程度、CASE4では2.6倍程度、CASE5では4.0倍程度に発生曲げモーメントが増加することがわかる。また、表・3に示した「貨物平均値と通勤平均値の比率」に基づき通勤列車のCASE4の解析結果に1.6を乗じた曲げモーメントは、3号まくらぎのデコンプレッションモーメントおよびレール位置断面における下縁の引張応力が3N/mm²となる曲げモーメント10.9kNmを超過した。

まくらぎ10についても、まくらぎ4に比べて曲げモーメントの絶対値は小さいが概ね同様の傾向となった. CASE5およびCASE4を1.6倍した曲げモーメントは、3号まくらぎのレール位置断面における下縁の引張応力が3N/mm²となる曲げモーメントと同程度となった.

以上のように、当該PCまくらぎに浮きが発生すると発生曲げモーメントが低下し、隣接するPCまくらぎに浮きが発生すると当該PCまくらぎの発生曲げモーメントが増加することがわかった。このため、維持管理においては可能な限り浮きまくらぎを発生させないことが必要であることがわかった。

溶接継目から1.6m(まくらぎ3本分)程度離れているにも関わらず、まくらぎ1で発生曲げモーメントが最大となった要因については、溶接継目における衝撃作用に起因してまくらぎ2およびまくらぎ3の支持ばね定数が経年で低下し、まくらぎ1の荷重分担率が増加したためであると推察される.

e) レール凹凸の影響

図-15にレール凹凸の影響に関する解析結果を示す. 走行列車は速度85km/hの通勤列車である. 同図より, 凹凸量の振幅が大きくなるほど発生曲げモーメントが大き

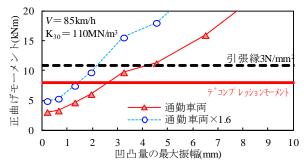


図-15 レール凹凸の影響に関する解析結果(まくらぎ4)

くなることがわかる. 通勤車両では凹凸量の最大振幅が概ね2.6mm程度でデコンプレッションモーメントを, 概ね4.6mm程度でレール位置断面における下縁の引張応力が3N/mm²となる曲げモーメントを超えることがわかる. また,参考データではあるが,通勤車両の発生曲げモーメントを1.6倍すると,凹凸量の最大振幅が概ね1.5mm程度でデコンプレッションモーメントを,概ね2.0mm程度でレール位置断面における下縁の引張応力が3N/mm²となる曲げモーメントを超えることがわかる.

以上のように、本研究で対象とした条件における溶接継目部を含む直線ロングレール区間においては、2mm程度以上を超える凹凸量の場合、レール位置断面における下縁の引張応力が3N/mm²となる曲げモーメントを超える結果となった。なお、通常の維持管理下であれば、2mm程度以上のレール凹凸が生じることは稀である899,100と考えられる.

(5) 変動輪重係数の妥当性

本研究で実測した輪重から求めた変動輪重係数は、貨物列車、通勤列車ともに1.6以内であり、設計で一般的に用いられる変動輪重係数2.0以下となった.しかしながら、3号まくらぎにおいて、車輪フラットに起因してデコンプレッションモーメントを超える曲げモーメントが測定されたこと、PCまくらぎの浮きやレール凹凸量の振幅の増大を想定した数値解析においてデコンプレッションモーメントを超える曲げモーメントが計算されたことなどから、輪車の測定結果のみにより変動輪重係数

を低減するのは適切ではないと考える。また、各種検討結果より、浮きまくらぎの発生、レール凹凸量の振幅の増大(概ね2mm程度以上)、車輪フラットによる衝撃作用がPCまくらぎにひび割れを発生させる主要因であると考えられる。これらは、定期的に適切な維持管理が行ったとしても発生確率が小さくはなるが、発生確率を0にするのは難しい。軌道構造の不整をどこまで考慮するかは設計者の判断に委ねられるところではあるが、現在、PCまくらぎの使用性の照査において慣例的に用いられている変動輪重係数2.0は、前述の不確実性を安全側に包含する値として概ね妥当であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである.

- 1) 50N レールが敷設された直線ロングレール区間のバラスト軌道において実測された輪重の最大値は貨物列車で 154.0kN,通勤列車で 105.9kN となった. 実測変動輪重係数は,車種によらず設計変動輪重係数である 2.0 以下となった. また,横圧は 3 号まくらぎの設計横圧 40kN に対し, 8.6kN(貨物列車)に留まった.
- 2) PC まくらぎの発生曲げモーメントの最大値は、貨物列車でフルプレストレス状態(8.0kNm)を超える10.1kNm,通勤列車ではフルプレストレス状態の7割程度であった。また、レール凹凸量や PC まくらぎの支持状態の違いなどの複合要因により連続した PC まくらぎであっても発生曲げモーメントの平均値は最大で3倍程度の差が生じた。
- 3) 三次元数値解析モデルにより各種パラメータの影響を評価した. PC まくらぎに浮きを想定すると発生曲げモーメントが最大 4 倍程度に増加すること, 走行列車を考慮した発生曲げモーメントの実態と数値解析よりレール凹凸量の最大振幅が 2mm 程度以上を超えると引張縁の応力が 3N/mm² を超える曲げモーメ

ントが発生することがわかった.

4) 直線ロングレール区間に適用する PC まくらぎの使用性の照査において,設計変動輪重係数を 2.0 とすることは,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概ね妥当な値であることがわかった. 今後は,横圧の影響が無視できない区間を対象にPCまくらぎの設計法の妥当性の検証などを行っていきたいと考えている.

参考文献

- 1) 涌井一, 奥田広之: PC まくらぎの限界状態設計法に 関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.34-54, 1997.
- 2) 宮本俊充,渡辺偕年:線路 軌道の設計・管理-,山 海堂,pp.90-131,1980
- 3) 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)」, 丸善, 2012
- 4) 渡辺勉, 松岡弘大, 箕浦慎太郎, 山根寛史: PC まくらぎの動的応答性状に対するレール継目部の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp985-990, 2016
- 5) 涌井一,松本信之,松浦章夫,田辺誠:鉄道車両と 線路構造物との連成応答解析法に関する研究,土木 学会論文集,No.513/I-31,pp.129-138,1995
- 6) 北川敏樹,村田香,長倉清:在来鉄道における車輪・レールの凹凸, J-rail2007, pp.515-518, 2007
- 7) 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)」, 丸善, 2004
- 8) 田中博文,清水惇:波状摩耗管理のための可搬型レール凹凸連続測定装置の実用化,鉄道総研報告, Vol.29, No.8, pp.35-40, 2015
- 9) 小野寺孝行, 大越正裕: レール溶接部頭頂面凹凸量 の推移調査, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 4-098, pp.195-196, 2005
- 10) 三村大輔, 萩原和可子: MTT 保守周期延伸に関する 考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会, VI-274, pp.547-548, 2016

(2017.4.7 受付)

DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF PRESTRESSED CONCRETE SLEEPER IN CONSIDERATION OF VARIOUS TRACK IRREGULARITIES

Tsutomu WATANABE, Shintaro MINOURA, Keiichi GOTO and Kodai Matsuoka

Field measurement test and three dimensional numerical analysis of prestressed concrete (PC) sleepers laid for continuous welded rail section were conducted. As a result, the measured variable wheel load factor was smaller than 2.0, the bending moment exceeding the full prestress condition may be generated in some cases. Furthermore, even with PC sleepers of same type laid continuously, the bending moment was increased more than three times due to the support condition of PC sleeper and rail roughness. Numerical analysis results also revealed that bending moment was increased more than two times due to hanging sleeper, the tensile stress of the PC sleeper exceeded 3N/mm² when the rail raughness was about 2 mm or more. Based on these investigation, the validity of the design variable wheel load factor was proved.