

論文 輪重の発生確率を考慮したPCまくらぎの鋼材疲労寿命評価

後藤 恵一¹・渡辺 勉¹・箕浦 慎太郎¹・池田 学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: goto.keiichi.90@rtri.or.jp

本研究では、PCまくらぎの構成材料であるPC鋼材に着目し、その疲労寿命の観点からPCまくらぎの寿命を評価した。具体的には、列車走行時に発生するPCまくらぎの曲げモーメントを再現可能な車両と軌道間の動的相互作用解析と、曲げモーメントが作用した際のPCまくらぎ中の鋼材応力を評価可能な解析を組み合わせることで、列車走行時のPC鋼材の応力波形を取得する手法を構築した。さらに、この波形を用いて、設計上および実測での輪重発生確率を考慮したPC鋼材の疲労強度を算出し、PC鋼材の疲労寿命を定量的に評価した。その結果、検討対象とした溶接継目部のPCまくらぎのPC鋼材は200年を超える疲労寿命を有しており、非常に限られた条件下ではあるがPC鋼材の疲労破断がPCまくらぎの寿命を決定する可能性は極めて低いことを示した。

Key Words : prestressed concrete sleeper, PC wire, fatigue life, wheel load, numerical analysis

1. はじめに

プレストレストコンクリートまくらぎ（以下、PCまくらぎ）は、近年の鉄道の高速化や快適化に欠かすことのできない軌道の重要な構成要素である¹⁾。PCまくらぎの設計耐用年数は一般に50年程度とされているが²⁾、営業線のPCまくらぎでは既に耐用年数を超えるものもでてきている。そのため、鉄道事業者では今後の計画的な維持管理を目的に、経年PCまくらぎの実態調査や交換基準に関する検討を進めている³⁾⁴⁾。

PCまくらぎは工場製品であることから、中性化や塩害といった材料の耐久性の観点から問題となることは稀であり、耐用年数は主として力学的な観点から定まる。渡辺ら⁵⁾はPCまくらぎの静的な耐荷力（最大荷重）に着目し、営業線から幅広く採取したPCまくらぎの曲げ試験から経年と耐荷力の関係を把握することで、耐用年数の目安を提案している。一方で、PCまくらぎは断面力において変動荷重の占める割合が大きく、繰り返し回数も非常に多いため、耐用年数を評価する上では疲労破壊の観点からの検討、特にPCまくらぎ内部に配置されたPC鋼材の疲労寿命の評価も重要となる⁶⁾。PCまくらぎは通常、列車荷重作用時に断面内に引張応力が発生しないフルプレストレスで設計されているが、実態としてはひび割れを生じているPCまくらぎが少なからず存在する⁷⁾。

よって、PC鋼材の疲労寿命を予測するためには、実際の走行車両やPCまくらぎの敷設環境など、各種条件を反映可能な評価手法を構築する必要がある。

そこで本研究では、図-1に示すように、列車走行時に発生するPCまくらぎの曲げモーメントを再現可能な車両と軌道間の動的相互作用解析手法を構築するとともに、PCまくらぎ内部のPC鋼材応力を評価可能な詳細な数値

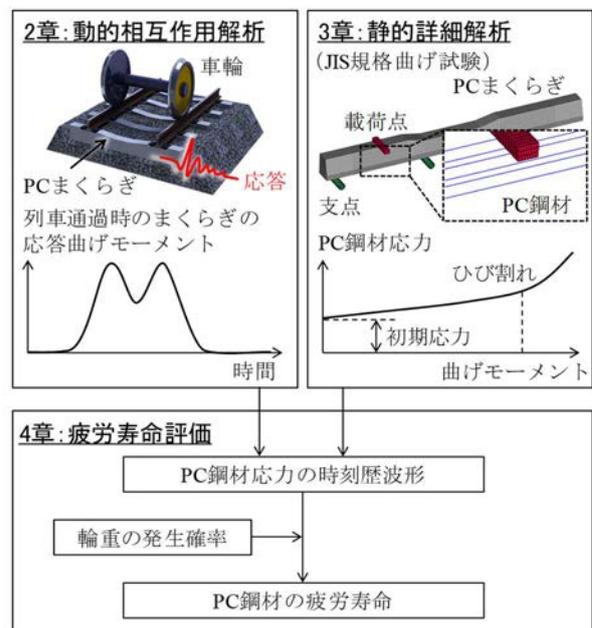


図-1 本論文の構成

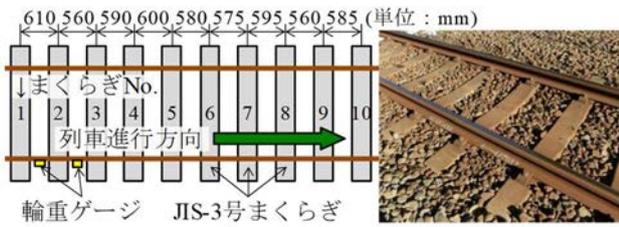


図-2 検討対象区間の概要

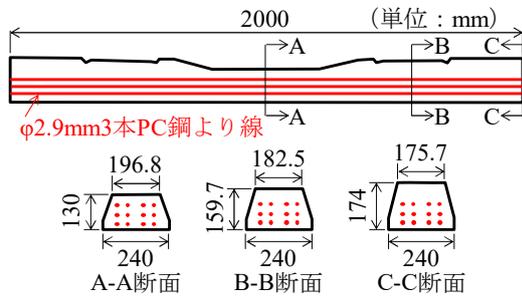


図-3 PCまくらぎ (JIS-3号まくらぎ) の概要

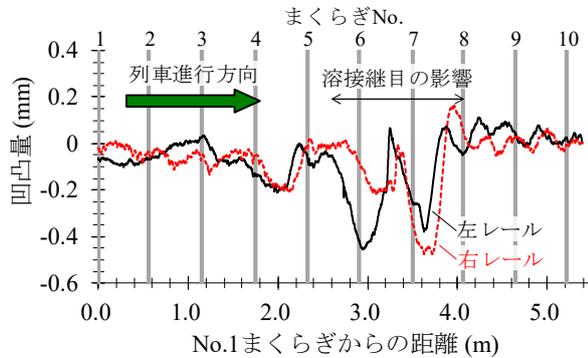


図-4 レール凹凸形状

解析手法を構築した。さらに、両者の結果を組み合わせることで、列車走行時のPC鋼材の応力波形を取得した。加えて、この応力波形に対して設計および実測での輪重発生確率を考慮し、将来にわたるPC鋼材の引張疲労強度を算出することでその疲労寿命を評価した。

2. 車両／軌道間の動的相互作用解析によるPCまくらぎの動的応答評価

本章では、車両と軌道間の動的相互作用解析手法を構築するとともに実測との比較により検証を行い、溶接継目部におけるPCまくらぎの曲げモーメントを評価した。

(1) 検討対象区間および測定の詳細

図-2 および図-3 に検討対象とした軌道構造とPCまくらぎの概要を示す。50kgN レールが敷設され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、3PR) が敷設されている。図-2 には現地で実測したPCまくらぎ間隔も記載するが、設計上の敷設間隔 610mm (25m あたり 41 本) に

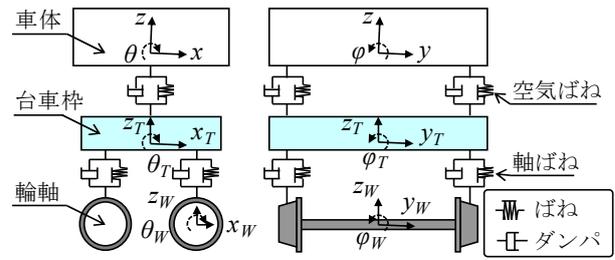


図-5 車両の力学モデル (半車両モデル)

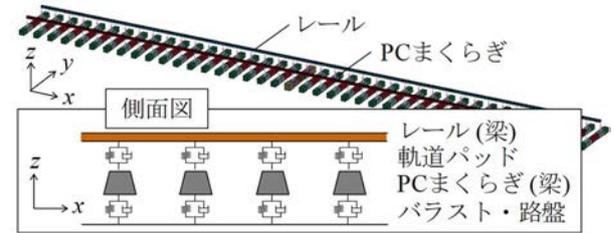


図-6 軌道の力学モデル

対して数十mm単位でばらついていることが分かる。

図-4 に対象区間のレール凹凸を示す。このレール凹凸は長さ 1m のレール頭頂面粗さ測定器を用いて測定した。なお、まくらぎ No.6 と No.7 付近の最大 0.5mm 程度の凹凸は溶接継目の影響である。

列車通過時の測定では PC まくらぎの曲げモーメントを測定した。曲げモーメントは、まくらぎのレール位置の上縁と下縁に貼り付けたひずみゲージから換算して求めた。走行列車は通勤列車と貨物列車である。なお、本測定に関する詳細は参考文献 8) を参照のこと。

(2) 解析方法

a) 車両の力学モデル

図-5 に車両の力学モデルを示す。車両は軌道の動的応答を適切に評価する上で必要最低単位であると考えられる半車両分をモデル化した。本車両モデルでは、半車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、これらをダンパとばねで結合して構築した。車両の走行は各剛体に進行方向 (x 方向) の強制変位を与えて表現した。半車両あたりの自由度は 17 である。車両は通勤車両を想定した。

b) 軌道の力学モデル

図-6 に軌道の力学モデルを示す。レールは梁要素でモデル化し、1レール締結装置あたり 8 分割した。PCまくらぎについても梁要素でモデル化し、1まくらぎあたり 14 分割した。断面諸元についてはまくらぎ中央、レール下位置、まくらぎ端部の 3 断面に分けて入力した。なお、図-2 に示した PCまくらぎの敷設間隔のばらつきについても解析モデル上で再現した。軌道パッドおよびバラスト・路盤は、ばねとダッシュポットによりモデル化した。本研究ではこの軌道を約 24m 分モデル化した。

c) 車輪／レール間の接触モデル

車輪／レール間の接触は鉛直方向のみを考慮した。動

表-1 本検討で用いた各種解析諸元

車両 (半車両モデル)	在来線通勤車両 (静止輪重: 54.3kN) 列車速度: 83km/h
レール	種別: 50kgN レール 軌間: 1067mm 曲げ剛性 EI : 3.94MN*m ² 単位体積重量: 77.0kN/m ³
軌道パッド (軌道片側あたり)	ばね係数: 110MN/m 減衰係数: 30kN*s/m
まくらぎ	種別: JIS-3 号まくらぎ (3PR) まくらぎ間隔: 実測値 (図-2) 弾性係数 E : 33.0GPa 単位体積重量: 23.0kN/m ³
まくらぎ支持ばね (軌道片側あたり)	ばね係数: 68.7MN/m (パラストと路盤の合成ばね) 減衰係数: 98kN*s/m

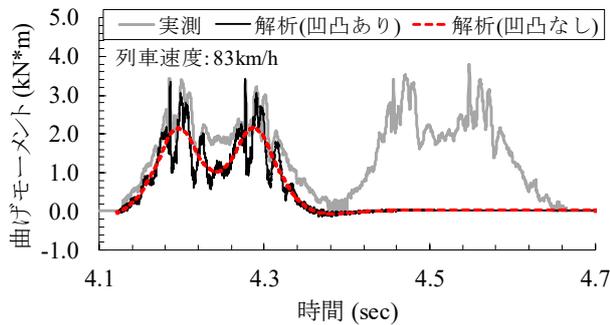


図-7 実測と解析の比較 (No.7まくらぎの左レール位置)

的相互作用力の計算にはペナルティ法を用い、ペナルティ係数はヘルツばね相当値を用いた線形モデルとした。また、レール位置の関数としてレール凹凸量を定義し、接触計算時にこれを考慮することで、レール凹凸を表現した。なお、接触計算点は各車輪中心直下の1点とした。

d) 解析諸元および数値解析法

表-1に本研究で用いた各解析諸元を示す。基本的には検討対象区間での実測値⁹⁾を基に設定し、不明なものについては設計標準²⁾や既往研究⁹⁾を参考に定めた。

時間積分法には陽解法である中央差分法を用い、時間刻みは 1.2×10^{-5} 秒程度とした。本解析には汎用衝撃・構造解析ソフトウェアLS-DYNA (R10.1.0)¹⁰⁾を用いた。

(3) 解析結果

図-7に実測と解析の比較として、No.7まくらぎの左レール位置 (図-2, 図-4参照) の曲げモーメント波形を示す。実測は連続する2台車、解析は1台車 (半車両) が通過した際の結果である。解析についてはレール凹凸の有無の違いについても示した。まず実測結果に着目すると、各台車が通過した際の波形がほぼ同一であることから、PCまくらぎには台車を1単位とした曲げモーメントが繰り返し作用することが分かる。次に解析結果 (凹凸あり) に着目すると、実測の波形形状や最大値等の特徴を精度よく再現できていることが分かる。また、レール凹凸を考慮しなかった場合には、実測値と比較してかい離があることも確認できる。

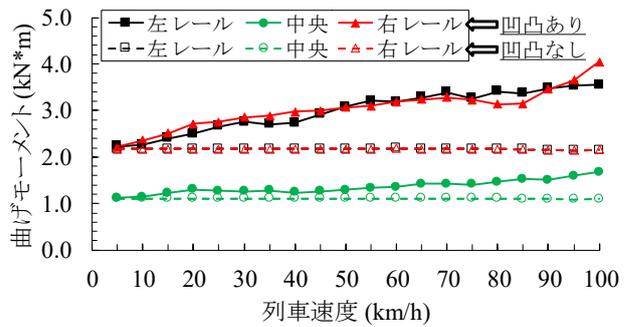


図-8 列車速度の影響 (No.7まくらぎの曲げモーメント)

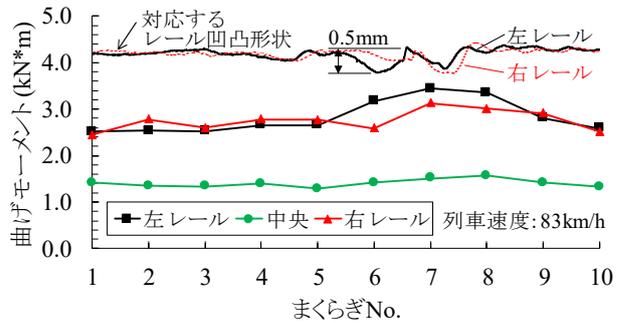


図-9 各まくらぎの各位置での最大曲げモーメント

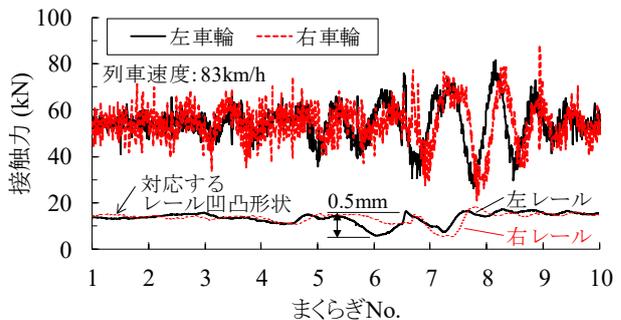


図-10 車輪/レール間の接触力

ル凹凸を考慮しなかった場合には、実測値と比較してかい離があることも確認できる。

図-8に列車速度がPCまくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響を示す。図には左右レール位置およびまくらぎ中央位置での曲げモーメントについて、レール凹凸の有無を比較する形で示した。図より、レール凹凸ありの場合、列車速度が速くなるほど曲げモーメントも増加する速度依存性を確認できる。列車速度が5km/hから80km/hに変化すると、レール位置では約50%、まくらぎ中央位置で約30%応答が増加し、レール位置での速度依存性が大きいことが分かる。一方で、レール凹凸なしの場合は速度依存性が確認できないことから、この速度依存性はレール凹凸に起因するものと推察される。

図-9に列車速度83km/h時の各まくらぎでの最大曲げモーメントを示す。図より、レール凹凸量の大きい溶接継目部のまくらぎ (No.6~No.8) で応答が増大するのに対し、隣接するまくらぎ (No.5やNo.9) では溶接継目から離れたまくらぎと同程度の応答であることから、溶接継目のレール凹凸のまくらぎ応答への影響は局所的なものである。

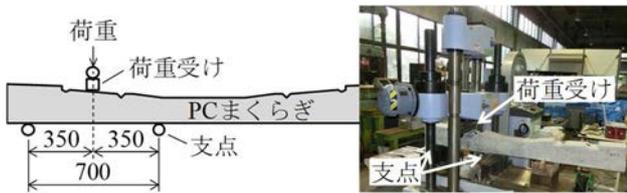
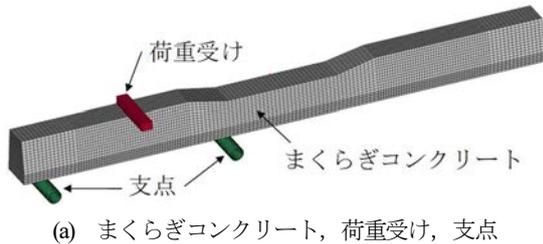
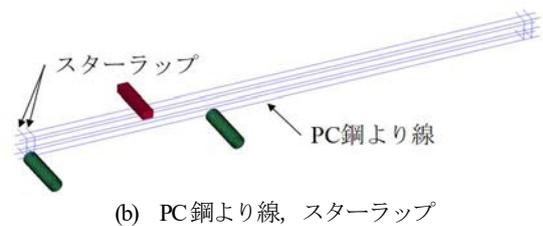


図-11 静的曲げ試験の概要



(a) まくらぎコンクリート, 荷重受け, 支点



(b) PC鋼より線, スターラップ

図-12 3PRの曲げ試験に関する数値解析モデル (1/2モデル)

のであると言える。

図-10 に車輪／レール間の接触力を示す。横軸は図-9と同様にまくらぎ位置で整理した。図より、接触力は静止輪重値 (54.3kN) を中心に上下に振動しており、溶接継目部に近付くほどその振幅が大きくなっていることが分かる。また、長い波長のレール凹凸よりも No.6～No.7まくらぎ間に存在するような短い波長のレール凹凸に接触力が敏感に反応している様子も確認できる。

3. PC まくらぎ単体の静的詳細解析による PC 鋼材の応力状態評価

本章では、PCまくらぎの静的曲げ試験を再現可能な数値解析モデルを構築し、PCまくらぎ内部に配置されているPC鋼材の応力状態を評価した。

(1) 静的曲げ試験の概要

図-11 に JIS E 1201 に規定される PC まくらぎの静的曲げ試験の概要を示す。曲げ試験にはレール位置およびまくらぎ中央位置の 2 種類があるが、本研究ではレール位置のみを対象とした。また、検討対象とした PC まくらぎは 2 章と同様に 3PR であるが未使用品である。

(2) 解析方法

a) 数値解析モデル

図-12 に 3PR の曲げ試験に関する解析モデルを示す。本解析モデルは、まくらぎを構成するコンクリート、

表-2 本解析で用いた材料諸元

材料	弾性係数 E (GPa)	ポアソン 比	圧縮強度 f_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)
コンクリート	35.0	0.20	60.0	3.53
PC 鋼より線	200.0	0.30	降伏 σ_y : 1500.0 最大 σ_u : 1998.0	
スターラップ	200.0	0.30	弾性体	
荷重受け・支点	剛体			

PC 鋼より線、スターラップ、曲げ試験を表現するための荷重受けおよび 2 つの支点からなる。レール締結用の埋込栓やその周辺のスパイラル筋はモデル化しなかった。また、解析時間の短縮を図るために、構造の対称性を考慮した 1/2 モデルとした。

コンクリート、荷重受けおよび支点は 8 節点ソリッド要素で、PC 鋼より線およびスターラップは梁要素でモデル化した。要素積分点は、ソリッド要素には 1 点積分を、梁要素には 4 点積分を適用した。ただし、荷重受けおよび支点については剛体とした。要素サイズは 10mm を基準とし、最大でも 20mm 以下とした。解析モデル全体での総節点数は 42262、総要素数は 34856 であった。

境界条件は、解析モデルの対称境界には面対称を考慮した拘束を行い、荷重受けは鉛直方向 (載荷方向) 以外の自由度を、支点は全自由度を拘束した。PC まくらぎと荷重受け間、PC まくらぎと支点間、面と面の接触を定義した。また、PC 鋼より線およびスターラップの梁要素はコンクリート要素内に埋め込んでモデル化し、付着や滑りを考慮せず、梁要素の節点がコンクリート要素に完全に追従するものとした。

b) 材料定数および材料モデル

表-2 に本解析で用いた材料定数を示す。コンクリートの材料定数は、テストピースの一軸圧縮強度値から設計標準¹⁾を基に設定した。PC 鋼より線の材料定数は、弾性係数およびポアソン比は設計標準の値を、降伏応力および引張強度についてはミルシートから読み取った。

図-13 に本解析で用いた材料モデルを示す。図-13 (a) にコンクリートに関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は圧縮強度に達した後にひずみ増加に応じて徐々に応力が軟化するモデルを²⁾、引張側は引張強度に達した後の軟化曲線をコンクリートの引張破壊エネルギーに基づき 2 直線で近似するモデルとした¹⁾。図-13 (b) に PC 鋼より線に関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。ミルシートから読み取った引張試験力-伸び関係を応力-ひずみ関係に換算して入力した。

c) 静的曲げ試験の再現方法

静的曲げ試験の再現は 2 つのステップで行った。第 1 ステップでは、緊張力に相当する引張応力を各 PC 鋼より線の梁要素に導入し、平衡状態を求めることでプレストレスを考慮した PC まくらぎの応力状態を求めた。な

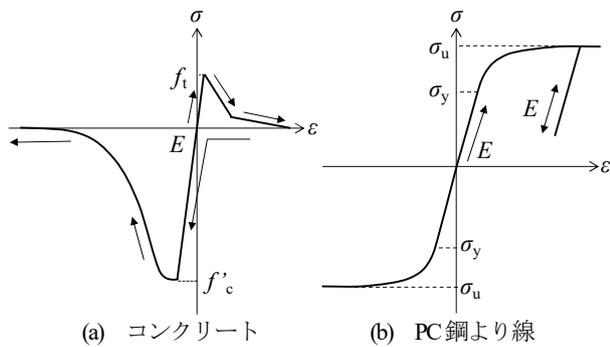


図-13 材料モデル

お、PC 鋼より線に導入される緊張力 (28.7kN/本) の有効率 (以下、有効緊張率) は後述の検討により 75%とした。第2ステップでは、第1ステップで求めた平衡状態のモデルに対し、荷重受けに鉛直方向の強制変位を与えることで曲げ試験を再現した。曲げ試験時の載荷荷重については、強制変位を与える荷重受けの反力から計算した。また、載荷変位については、実際の曲げ試験に合わせて荷重受けの変位とした。なお、実験では荷重急落時に除荷を行っているが、本解析では除荷を行わずにそのまま強制変位を与え続けた。時間積分法には中央差分を用い、その時間刻みは 1.5×10^{-6} 秒程度とした

(3) 解析結果

a) 数値解析の妥当性

図-14 に試験結果と解析結果の比較を示す。図には解析結果として PC 鋼より線の有効緊張力を 100%および 75%とした場合を示す。ここで、有効緊張率 75%は試験結果と解析結果の荷重-変位関係が近くなるように試行錯誤的に決定したものである。なお、PC まくらぎの設計では PC 鋼より線の有効緊張力として 65%が使用される²⁾。図より、有効緊張率を 75%とすることで、PC まくらぎの曲げ試験時のひび割れに伴う剛性低下や耐力力 (最大荷重)、破壊までの荷重-変位関係を精度よく再現可能であることが分かる。図には曲げ保証荷重および曲げ破壊荷重のラインも示しているが、試験結果と解析結果の両者がその荷重を上回っていることも確認できる。

図-15 にひび割れの発生状況の比較を示す。解析結果は最大荷重時の相当塑性ひずみのコンター図である。試験結果と解析結果を比較すると、まくらぎ下端から伸びる3本の大きなひび割れが発生していること、また、その進展が同様の傾向を示していることが分かる。

b) 圧縮強度が耐力に及ぼす影響

既往の研究²⁾により、実物の PC まくらぎのコンクリートの圧縮強度は、設計基準強度 (通常 49.1MPa) と比較して高く、また、大きくばらつくことが示されている。そこで圧縮強度が耐力に及ぼす影響を検討した。図-16 に検討結果を示す。図より、圧縮強度が 50MPa から

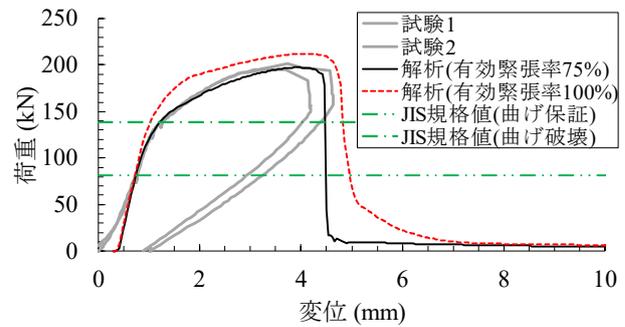
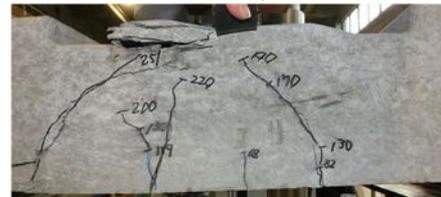
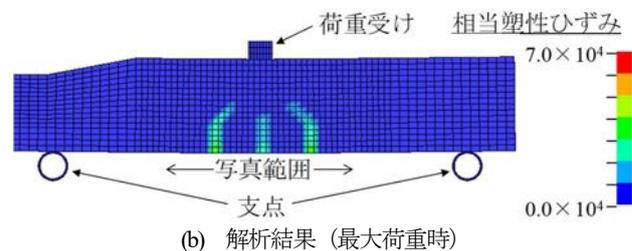


図-14 試験結果と解析結果の比較



(a) 試験結果の例 (試験終了後)



(b) 解析結果 (最大荷重時)

図-15 ひび割れ発生状況の比較 (3PR)

80MPaに 60%増加した場合でも、耐力力は約 12%ほどしか増加しておらず、コンクリート強度が耐力力に及ぼす影響は限定的であることが分かる。

c) PC 鋼より線の応力状態評価

図-17 にコンクリートの圧縮強度 60MPaにおける、曲げモーメントとコンクリート応力の関係および曲げモーメントと PC 鋼より線の引張応力の関係を示す。コンクリート応力については、最初にひび割れが発生する荷重受け直下の引張最外縁のコンクリート要素でのまくらぎ長手方向の応力を、PC 鋼より線についても同様に荷重受け直下の最下段要素の引張応力を示している。図中の曲げモーメントは、図-14 に示す載荷荷重を式(1)により変換して示している。

$$M = P \cdot L / 4 \quad (1)$$

ここで、 M は曲げモーメント(kN*m)、 P は載荷荷重(kN)、 L は曲げ試験の載荷スパン(0.70m)である。

図より曲げモーメントが作用していない状態で、コンクリートに圧縮応力が、PC 鋼より線に引張応力が生じていることが確認できるが、これは PC 鋼より線に導入した緊張力によるものである。曲げモーメントが大きくなるにつれて、コンクリート応力が圧縮域から引張域に移行し、引張強度に達した後はひび割れの発生により応力が減少していく様子が確認できる。また、コンクリートのひび割れ発生に合わせて PC 鋼より線の引張応力が急激に増加する様子も確認できる。本図より、任意の

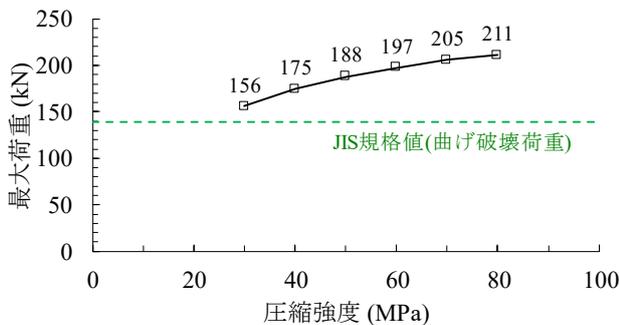


図-16 コンクリートの圧縮強度が耐荷力に及ぼす影響

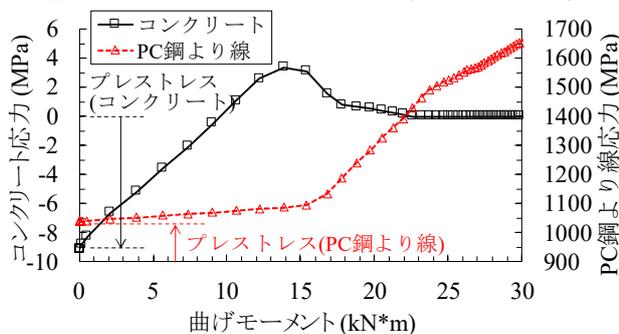


図-17 コンクリートとPC鋼より線の応力状態 ($f_c=60\text{MPa}$)

曲げモーメントが作用した際のPC鋼より線の応力状態を定量評価可能であることが分かる。

4. 輪重の発生確率を考慮したPC鋼材の疲労寿命評価

本章では、前章までの検討結果に加え、輪重の発生確率に関する実測結果に基づき、PC鋼より線の引張疲労強度に着目した疲労寿命評価を行った。

(1) 輪重の実測とその発生確率

輪重の発生実態を把握するため、2章で記載した対象区間において走行列車の輪重を実測した。輪重の測定位置を図-2に示す。輪重測定はレール腹部に設置した輪重ゲージを用いて44日間実施し、通勤列車および貨物列車に対し合計8167列車分を測定した。なお、本測定および測定結果に関する詳細は参考文献8)を参照のこと。

図-18に実測の測定結果として、涌井らの研究⁹⁾(以下、既往研究)で提案されているべき乗則モデルと比較する形で輪重の超過確率分布を示す。実測結果を既往研究のべき乗則モデルと比較すると、本対象区間の輪重の発生実態としては、100kNを超える範囲での超過確率が相対的に低いことが確認できる。同図には、輪重の超過確率分布から求めた輪重の発生確率分布も示す。図より、実測結果については通勤列車および貨物列車の走行に伴う輪重発生確率のピークを確認することができる。

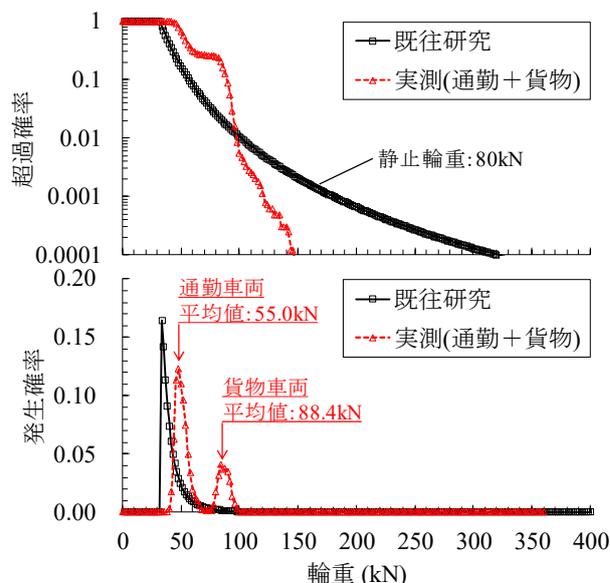


図-18 輪重の超過確率分布と発生確率分布

(2) PC鋼より線の疲労寿命評価

2章、3章および前項の検討結果に基づき、PCまくらぎの敷設環境条件を反映したPC鋼より線の疲労寿命の検討を行った。なお、本研究では、2章で示した検討対象区間(図-2)のうち、最も大きな曲げモーメントが発生した溶接継目部のまくらぎNo.7を対象とした。

図-19に本研究におけるPC鋼より線の疲労寿命の評価フローを示す。まず、2章の動的相互作用解析による列車走行時のPCまくらぎの曲げモーメント波形(図-7)と、3章の静的詳細解析による曲げモーメントとPC鋼より線応力の関係(図-17)から、両者の共通パラメータである曲げモーメントを介して、1台車通過時のPC鋼より線の応力波形を作成する。ここで、走行する車両の輪重は実測結果からも分かるようにばらつくため、その影響を考慮するために、動的相互作用解析から計算された曲げモーメント波形に静止輪重に対する測定輪重の比をかけることで、図-20に示すように実測された輪重範囲での各輪重値に対応するPC鋼より線の応力波形を作成した。なお、PCまくらぎの曲げモーメント波形は、レール凹凸や車輪踏面凹凸、まくらぎの支持状態などの様々なパラメータの影響により変化するが^{2),5),9),10)}、これらの影響は十分に解明されていないため、本研究では簡易に静止輪重に対する測定輪重の比を用いて各輪重値に対応する曲げモーメント波形を作成した。この点については今後の検討課題となる。

得られた各輪重値に対応するPC鋼より線の応力波形はランダム波であることからS-N線図を用いて疲労寿命を検討することができない。そのため、ランダムなPC鋼より線の応力波形をレンジペア法により個々の独立波 $(\sigma_{1,m}, \sigma_{2,m}, \dots, \sigma_{n,m})$ とその繰り返し回数 $(N_{1,m}, N_{2,m}, \dots, N_{n,m})$ に分解し、式(2)に示す修正マイナー則を用い

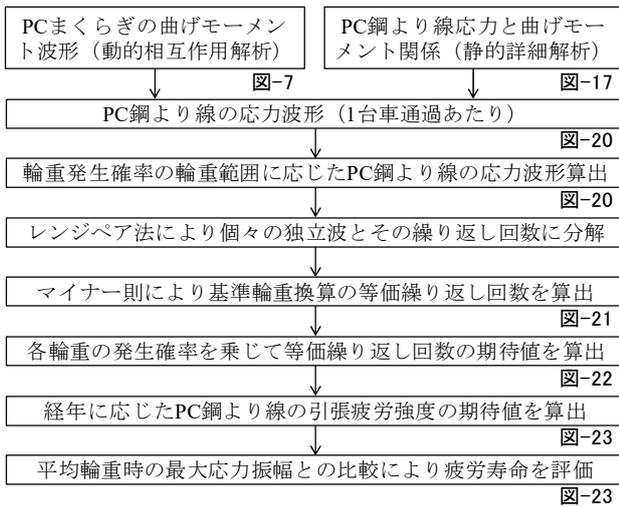


図-19 PC 鋼より線の疲労寿命の評価フロー

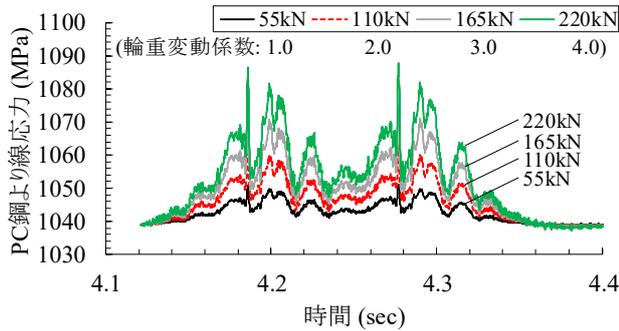


図-20 算出した PC 鋼より線の応力波形の例

て、図-21 に示すように基準輪重での最大変動応力 σ_{max} に換算した各輪重値 P_m における 1 台車通過あたりの等価繰り返し回数 N_m を求める。

$$N_m = \sum_{i=1}^n N_{i,m} \cdot (\sigma_{i,m} / \sigma_{max})^{1/k} \quad (2)$$

ここで、 k は $S-N$ 線の勾配を表す定数であり、本研究では 0.205 とした⁹⁾。図より輪重が 250kN 程度を上回ると、等価繰り返し回数が急増することが確認できるが、これは図-17 から分かるようにコンクリートのひび割れ発生により、PC 鋼より線が負担する応力が急増するためである。

次に、この各輪重値 P_m における 1 台車通過あたりの等価繰り返し回数 N_m に、図-18 の各輪重値における発生確率を掛け合わせることで、図-22 に示す 1 台車通過あたりの等価繰り返し回数の期待値 $N_{m,exp}$ を算出する。図より、等価繰り返し回数の期待値は輪重の発生確率の影響から、既往研究モデルでは高輪重域で、実測については低輪重域で等価繰り返し回数の期待値が大きくなっていることが分かる。

最後に、等価繰り返し回数の期待値 $N_{m,exp}$ の総和 N_{exp} を求め、式(3)を用いて経年ごとの PC 鋼より線の引張疲労強度の期待値 $f_{exp,T}$ を算出する。

$$f_{exp,T} = \frac{10^{\alpha r}}{N_{exp} \cdot 2 \cdot v \cdot j \cdot 365 \cdot T} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{f_{uk}}\right) \quad (3)$$

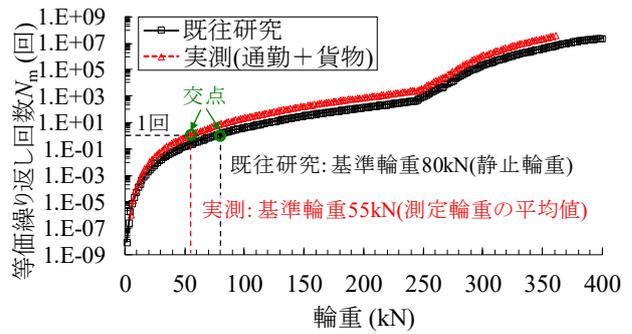


図-21 輪重と基準輪重相当の等価繰り返し回数の関係

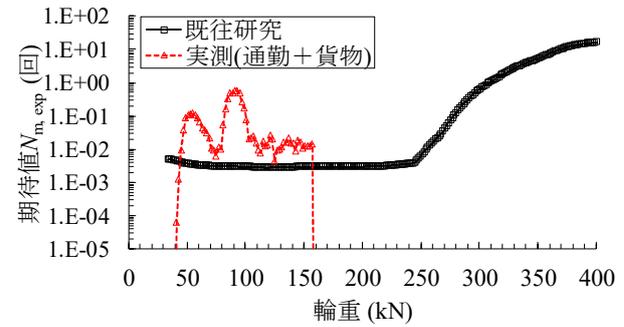


図-22 輪重と等価繰り返し回数の期待値の関係

【検討条件】

- ・列車本数:128本/日, 8両編成
- ・PC 鋼より線の引張疲労強度 f_{uk} :1850MPa
- ・各種安全係数:1.0
- ・S-N線パラメータ α :3.92, k :0.205

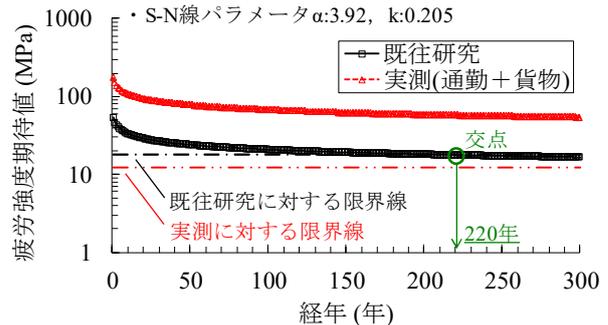


図-23 PC 鋼より線の疲労寿命の評価結果

ここで、 α_r は $S-N$ 線の切片であり、本研究では 3.92 とした⁹⁾。 v は 1 列車当たりの編成車両数 (車両/列車)、 j は 1 日当たりの列車本数 (本/日)、 T は経年 (年)、 σ_{min} は PC 鋼より線の最小引張応力度であり、本研究では図-17 に示す無載荷時でのプレストレスによる引張応力 (1039MPa) とした。 f_{uk} は PC 鋼より線の引張強度の特性値 (1850MPa) である。

図-23 に既往研究モデルと実測を比較する形で PC 鋼より線の疲労寿命の検討結果を示す。ここで各限界値については、基準輪重における最大変動応力 σ_{max} とした。図より、実測を基に算出した PC 鋼より線の引張疲労強度の期待については、経年 300 年においても限界線を大きく上回っており、疲労破断が起こる可能性は極めて低いことが分かる。また、既往研究モデルは実測よりも厳しい結果となっており、220 年で限界線に達するが、設計上の耐用年数 50 年²⁾ および経年 PC まくらぎの曲げ試

験による耐荷力の低下傾向から提案されている目安寿命50～80年⁹⁾と比較すると、PC鋼より線の疲労寿命は3倍程度以上長いことから、PC鋼より線の疲労破断により寿命が決定される可能性は極めて低いと言える。なお、本検討結果は非常に限られた条件下のものであることに注意が必要である。

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 列車走行時に発生するPCまくらぎの曲げモーメントを再現可能な車両と軌道の動的相互作用解析手法を構築し、溶接継目部の実測結果と比較することで本手法の妥当性を確認した。
- 2) JIS規格に規定されるPCまくらぎの静的曲げ試験において、その荷重-変位関係およびひび割れ発生状況を精度良く再現可能な詳細解析手法を構築した。また本手法によりPCまくらぎ内部に配置されたPC鋼より線の応力状態を把握可能とした。
- 3) 上記手法を組み合わせることで、列車走行時のPCまくらぎ中の鋼材応力の動的波形を取得する手法を構築した。これに既往研究および実測に基づく輪重の発生確率を考慮することで、PC鋼より線の疲労寿命を評価可能とした。その結果、本検討対象とした溶接継目部では220年以上の疲労寿命を有しており、PC鋼より線の疲労破断がPCまくらぎの寿命を決定する可能性は極めて低いことを示した。

本研究は非常に限られた条件下での検討である。そのため今後は、PCまくらぎの緊張方式の違い（プレテンション式・ポストテンション式）や線区条件等の違いが疲労寿命に及ぼす影響を検討するとともに、PCまくらぎへの経年の影響（圧縮強度の低下やプレストレスロス、

すり減りによる断面減少）等を包含した、PCまくらぎの総合的な寿命評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 渡辺勉：PC まくらぎ，RRR，Vol.72，No.10，pp.28-31，2015.
- 2) 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.
- 3) 須江政喜：既設PCまくらぎの劣化状態に関する研究，J-RAIL2014，S2-4-6，2014.
- 4) 水野圭太：PCまくらぎの健全度調査，日本鉄道施設協会誌，Vol.55，No.7，pp.512-514，2017.
- 5) 渡辺勉，曾我部正道：営業線に敷設された経年PCまくらぎの耐荷力評価，日本鉄道施設協会誌，Vol.64，No.4，pp.49-52，2018.
- 6) 涌井一，奥田広之：PCマクラギ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.35-54，1997.
- 7) 松岡弘大，渡辺勉，箕浦慎太郎，曾我部正道，面高陽紀：損傷PCまくらぎの振動モード特性と打音による簡易検知手法の開発，土木学会論文集 E2，Vol.75，No.3，pp.158-175，2018.
- 8) 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.
- 9) 鈴木貴洋，石田誠，阿部和久，紅露一寛：レール継目部で生じる輪重変動に関する一考察，鉄道力学論文集，Vol.8，pp.35-40，2004.
- 10) Livemore Software Technology Corporation (LSTC): LS-DYNA Theory Manual, 2019. http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf
- 11) 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），丸善，2004.
- 12) Peter Grassel: CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.

(2020.4.3 受付)

FATIGUE LIFE OF PC-WIRES FOR A PC SLEEPER CONSIDERING OCCURRENCE PROBABILITY OF WHEEL LOAD

Keiichi GOTO, Tsutomu WATANABE, Shintato MINOURA and Manabu IKEDA

In this study, focusing on PC-wire, which is a constituent material of PC sleeper, we evaluate the remaining life of PC-wire from the viewpoint of the fatigue life. Specifically, we develop a method of acquiring the stress waveform of the PC-wires during train running, combining the following methods: a dynamic interaction analysis method between a vehicle and railway track that can reproduce the bending moment of PC sleepers under train load; and a numerical analysis method that can evaluate the tensile stress of PC-wires in the PC sleeper. Furthermore, using this waveform, we calculate the fatigue strength of PC-wires in consideration of the wheel load occurrence probability in design and actual measurement, and quantitatively evaluate the fatigue life of the PC-wires in the future. The result of this study shows that the PC-wires for the PC sleeper at the welded joint have a fatigue life of over 200 years, indicating that the fatigue of the PC-wires is not likely to determine the life of the PC sleeper under the specific condition.