

輪重測定結果に基づく PC まくらぎの疲労寿命評価

後藤 恵一* 渡辺 勉** 箕浦 慎太郎*** 池田 学*

Fatigue Life Evaluation of PC Sleepers Based on Wheel Load Measurement Results

Keiichi GOTO Tsutomu WATANABE Shintaro MINOURA Manabu IKEDA

In this study, we evaluate the remaining life of PC sleepers from the viewpoint of the fatigue life of PC-steels of the PC sleepers. Specifically, we develop a method of acquiring the stress waveform of the PC-steels during train running. Furthermore, using this waveform, we calculate the fatigue strength of the PC-steels in consideration of the occurrence probability of wheel load in actual measurement, and quantitatively evaluate the fatigue life of the PC-steels. The result of this study shows that the PC-steels for post-tension type has a longer fatigue life than those for pre-tension type, and the PC-steels for both types have a fatigue life of over 300 years.

キーワード：PC まくらぎ, 疲労寿命, 輪重発生確率, 緊張方式, 実測, 数値解析

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、近年の鉄道の高速度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が出始めている。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^{例えば3)}。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。ここで、PC まくらぎが受ける断面力は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 鋼材の疲労破断に関する検討が重要となる⁴⁾。しかしながら、使用状態においてフルプレスを仮定するPC まくらぎの設計では、基本的にはその照査を省略することから、PC 鋼材の疲労寿命については不明な点が多い。

そこで本研究では、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手法を構築するとともに、緊張方式の異なる2種類のPC まくらぎについてPC まくらぎ内部のPC 鋼材応力を詳細に評価可能な数値解析手法を構築した。また、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

と実測の輪重発生確率からPC 鋼材の引張疲労強度を算出することでPC まくらぎの疲労寿命を定量評価するとともに、緊張方式の影響についても評価した。

2. PC まくらぎの動的応答評価

本章では、車両と軌道の動的相互作用解析手法を構築するとともに、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。

2.1 検討対象区間および測定概要

図1および図2に検討対象とした軌道構造とPC まくらぎの概要を示す。対象は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号プレテンション式PC まくらぎ（以下、3PR）が敷設されている。また、本研究でのPC まくらぎの疲労寿命評価において比較対象となり、3PRと形状が同一で緊張方式のみが異なる3号アンボンド型ポストテンション式PC まくらぎ（以下、3PO）を図3に示す。

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

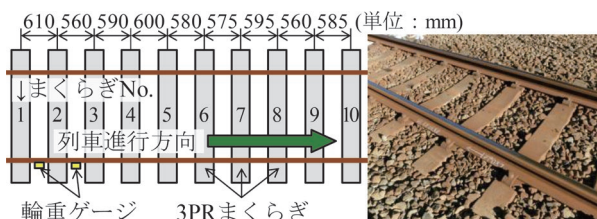


図1 検討対象区間の概要

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室
 ** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
 *** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

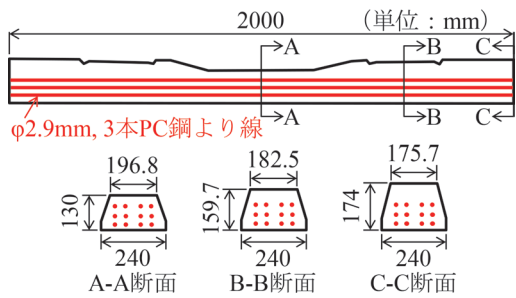


図2 PCまくらぎ (3PR) の概要

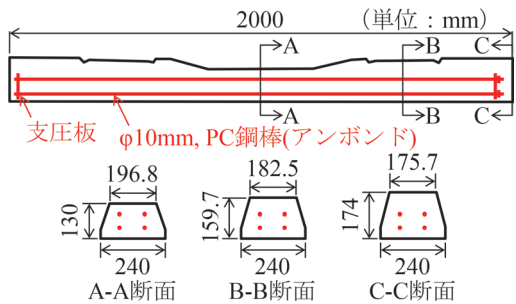


図3 PCまくらぎ (3PO) の概要

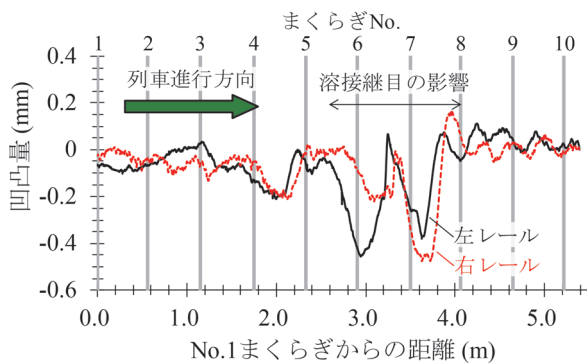


図4 レール凹凸形状

を測定した。曲げモーメントはまくらぎのレール位置の側面（上縁と下縁付近）に貼り付けたひずみゲージ出力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。本測定の詳細は文献5を参照されたい。

2.2 解析方法

2.2.1 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、これらをダンパーとばねで結合して構築した。走行については各剛体に進行方向の強制変位を与えて表現した。車両は通勤車両を想定した。

2.2.2 軌道の力学モデル

図6に軌道の力学モデルを示す。レールおよびPCまくらぎは梁要素でモデル化した。軌道パッド、バラストと路盤は、ばねとダンパー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。

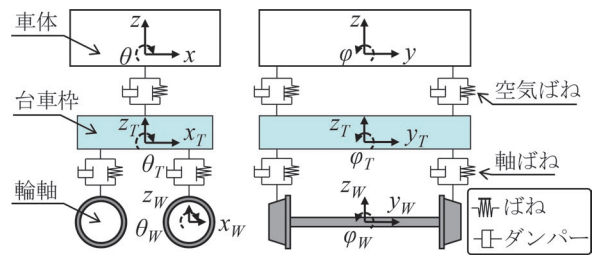


図5 車両の力学モデル (半車両モデル)

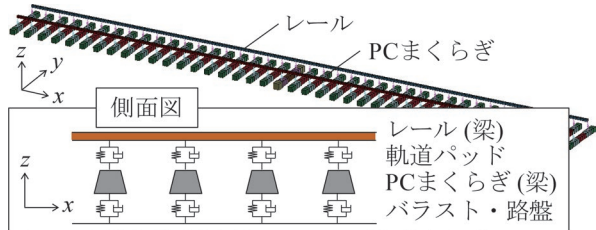


図6 軌道の力学モデル

表1 本検討で用いた解析諸元

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(実測)
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：3PR 間隔：図4(実測) 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(実測) 減衰係数：98kN*s/m

2.2.3 車輪とレール間の接触モデル

車輪とレール間の接触は鉛直方向のみを考慮し、動的相互作用力の計算にはペナルティ法を用いた。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。

2.2.4 解析諸元

表1に本研究で用いた各解析諸元を示す。本諸元は設計図書や対象区間での実測値⁵⁾、既往研究⁶⁾を参考に定めた。

2.3 解析結果

図7に実測と解析の比較例として、No.7まくらぎの左レール位置（図1、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

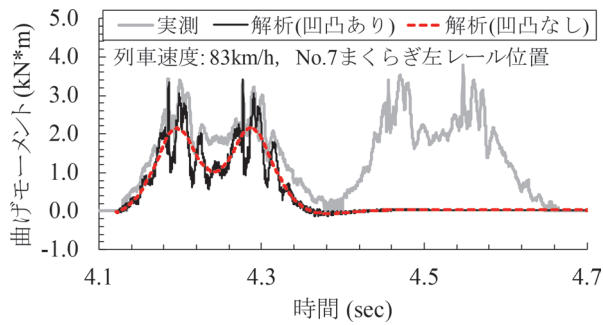


図7 実測と解析の比較 (No.7 まくらぎ)

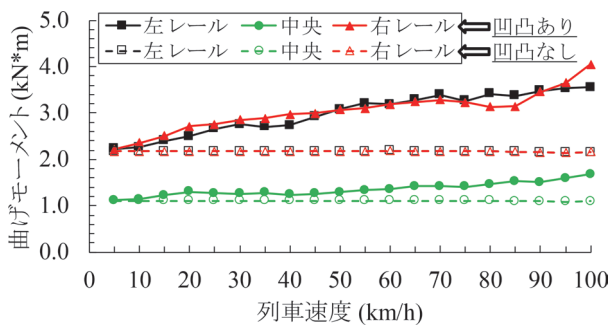


図8 列車速度の影響 (No.7 まくらぎ)

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などの特徴を精度よく再現できていることが分かる。

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。同図より、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が増加する速度依存性を確認できる。

3. 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。

3.1 静的曲げ試験の概要

図9にJIS E 1201, 1202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。検討対象のPC まくらぎは2章で示した3PR（図2）および3PO（図3）である。なお、本試験は新品の各2本に対して実施した。

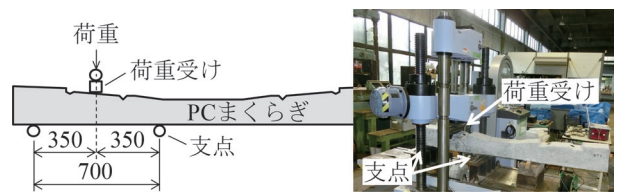


図9 静的曲げ試験の概要 (単位: mm)

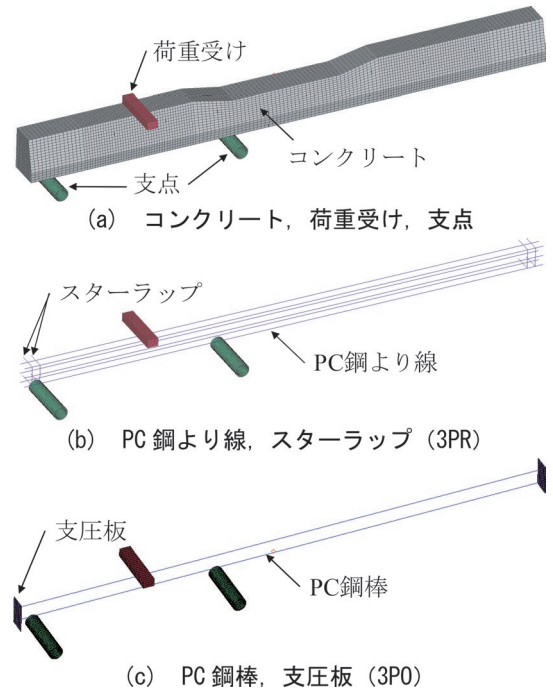


図10 曲げ試験の数値解析モデル

3.2 解析方法

3.2.1 数値解析モデル

図10に3PR および3POの曲げ試験に関する解析モデルを示す。本解析モデルは、PC まくらぎを構成するコンクリート、PC鋼材（PC鋼より線、PC鋼棒）、スターラップまたは支圧板、曲げ試験を表現するための荷重受けおよび支点からなる。構造の対称性を考慮して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鋼材およびスターラップは梁要素で、支圧板はシェル要素でモデル化した。ただし、荷重受けおよび支点は剛体とした。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。また、コンクリートとPC鋼材間の付着については、3PRでは完全付着モデルを、3POではPC鋼棒の軸方向の滑りのみを許容するモデルを用いた。コンクリートと荷重受け間、コンクリートと支点間には面と面の接触を定義した。

3.2.2 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

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	強度 (MPa)
3 P R	コンクリート	35.0	0.20	圧縮側 f_c : 60.0 引張側 f_t : 3.53
	PC 鋼より線 ($\phi 2.9\text{mm}$ 3本)	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
3 P O	コンクリート	34.7	0.20	圧縮側 f_c : 58.4 引張側 f_t : 3.46
	PC 鋼棒 ($\phi 10\text{mm}$)	200.0	0.30	降伏 σ_y : 1200.0 最大 σ_u : 1451.5
	支圧板	200.0	0.30	弾性体

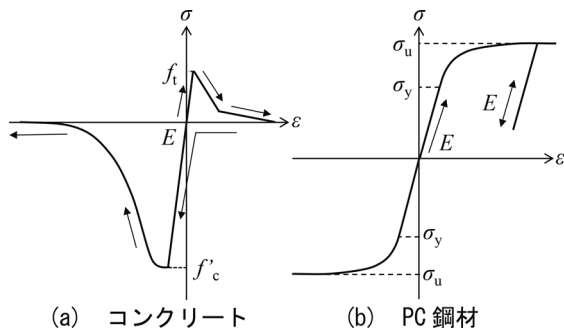


図11 材料モデル

標準²⁾を基に設定した。PC鋼材の材料定数はミルシートから読み取った。なお、PC鋼材に導入される緊張力の有効率は、設計標準²⁾や曲げ試験結果を基に3PRで75%、3POで95%とし、この緊張力に相当する初期引張応力を各PC鋼材要素に与えた。

図11に本解析で用いた材料モデルを示す。図11(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。コンクリートは圧縮破壊および引張軟化を表現可能なモデルとした。図11(b)にPC鋼材に関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。本材料モデルについてはミルシートから読み取って入力した。

3.3 解析結果

3.3.1 解析結果の妥当性検証

図12に試験結果と解析結果の比較を示す。図より、曲げ試験時のひび割れに伴う剛性低下や耐荷力、破壊までの荷重と変位の関係を精度よく再現できていることが分かる。また、図13および図14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。同図より、主要なひび割れの発生本数やその進展傾向が類似していることが分かる。

3.3.2 PC鋼材の応力状態評価

図15に3PRおよび3PO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鋼材の引張応力の関係を示す。コンクリート応力について

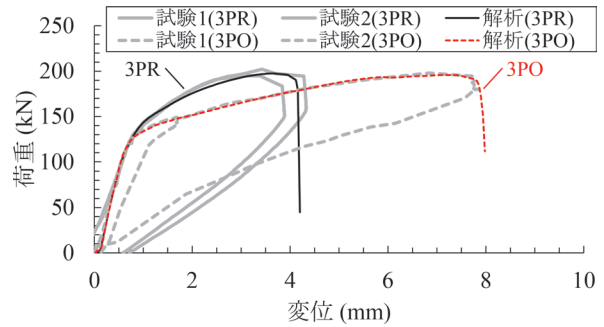
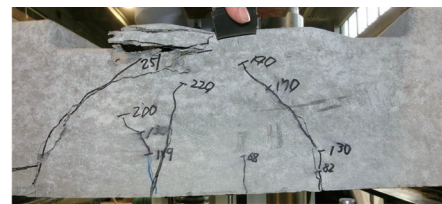
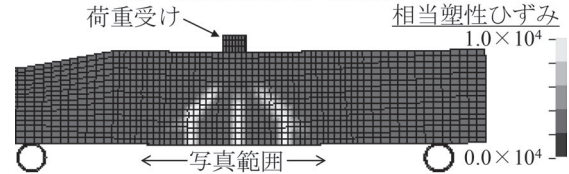


図12 試験結果と解析結果の比較



(a) 試験結果の例 (試験終了後)

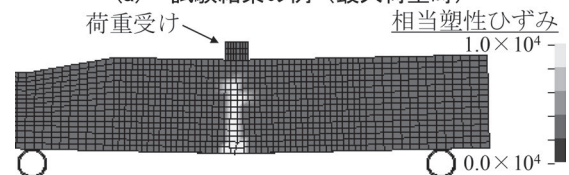


(b) 解析結果 (最大荷重時)

図13 3PRのひび割れ発生状況の比較



(a) 試験結果の例 (最大荷重時)



(b) 解析結果 (最大荷重時)

図14 3POのひび割れ発生状況の比較

は、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鋼材についても最大の引張応力が生じる荷重受け直下の最下段要素の引張応力を示している。図中の横軸の曲げモーメントは図12の載荷荷重を単純梁理論により変換した。図より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で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後にPC鋼材の引張応力が急激に増加する様子も確認できる。このPC鋼材

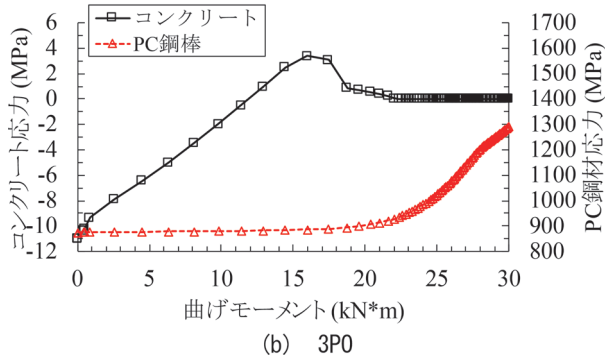
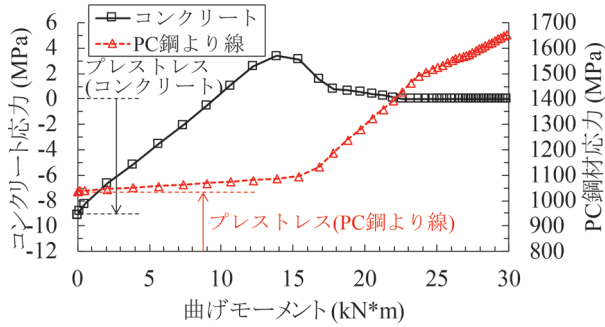


図 15 コンクリートと PC 鋼材の応力状態

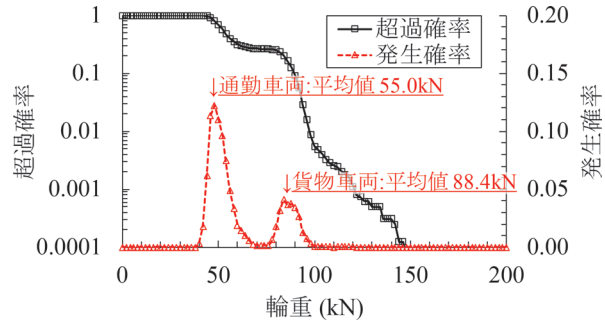


図 16 輪重の超過確率と発生確率

応力の急激な上昇は、3PO よりも 3PR でより早く（より小さい曲げモーメント）から開始されることが分かる。

4. 輪重発生確率を考慮した PC 鋼材の疲労寿命評価

本章では、前章までの検討に加え、輪重の発生確率に関する実測結果に基づき、PC 鋼材の引張疲労強度に着目した PC まくらぎの疲労寿命評価を行った。

4.1 輪重の実態とその発生確率

輪重の発生実態を把握するため、2章の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1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。

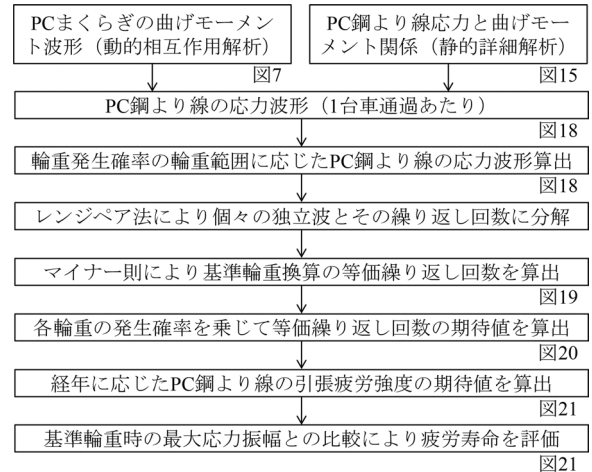


図 17 PC 鋼材の疲労寿命の評価フロー

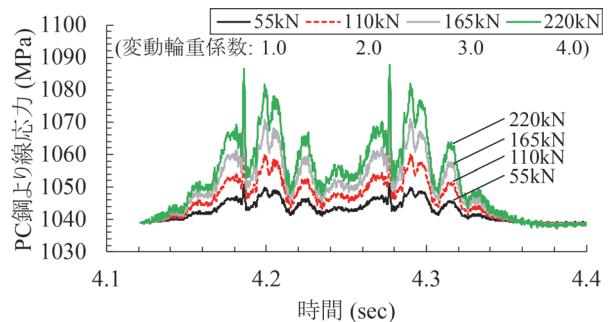


図 18 算出した応力波形の例 (PC 鋼より線)

図 16 に実測の測定結果として輪重の超過確率分布および発生確率分布を示す。通勤列車や貨物列車の走行に対応する発生確率のピークが確認できる。

4.2 PC 鋼材の疲労寿命評価

本研究では、2章の検討対象区間（図1）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 の PC 鋼材を疲労寿命の評価対象とした。図 17 に本研究における PC 鋼材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 鋼材応力の関係（図15）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 鋼材の応力波形を作成する。ここで、走行車両の輪重は実測結果からも分かるようにばらつきがあるため、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、実測された輪重範囲での各輪重値に対応する PC 鋼材の応力波形を作成することとした。図 18 に算出された PC 鋼材の応力波形の例として PC 鋼より線のものを示す。次に、得られた各輪重値に対応するランダムな PC 鋼材の応力波形を、レンジペア法²⁾により個々の独立波 ($\sigma_{1,m}$, $\sigma_{2,m}$, ..., $\sigma_{n,m}$) とその繰

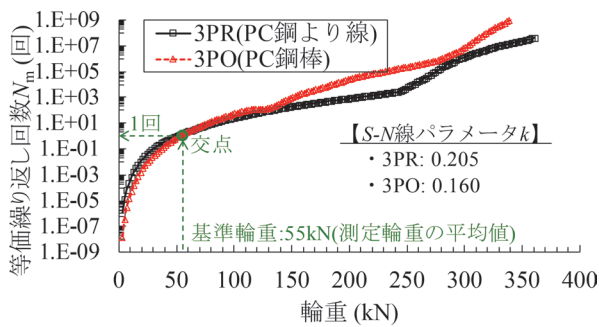


図 19 基準輪重相当の等価繰り返し回数

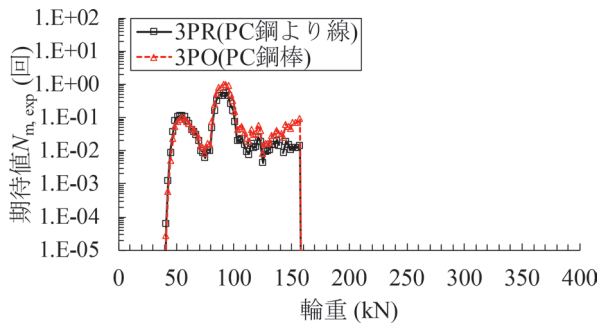


図 20 等価繰り返し回数の期待値

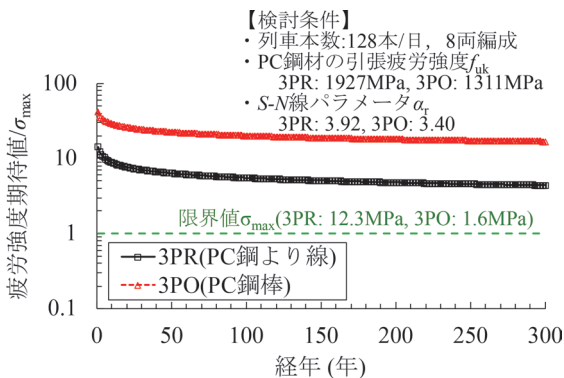


図 21 PC 鋼材の疲労寿命の評価結果

返し回数 ($N_{1,m}$, $N_{2,m}$, ..., $N_{n,m}$) に分解し、さらにマイナー則²⁾を用いて、図 19 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。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 16 の各輪重値における発生確率を掛け合わせることで、図 20 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。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、経年ごとの PC 鋼材の引張疲労強度の期待値を算出する。

図 21 に PC 鋼材の疲労寿命の検討結果を示す。本研究では、PC 鋼材の疲労破断は、PC 鋼材の引張疲労強度の期待値が基準輪重における最大変動応力 σ_{max} に達した際に起こるものとし、図では PC 鋼材の引張疲労強度の期待値を最大変動応力 σ_{max} で割って示している。

図より、ポストテンション式の 3PO がプレテンション式の 3PR より疲労寿命が長く、高い耐疲労性を有していることが分かる。これは、図 15 から分かるように、3PO の方が曲げモーメントの増加に対する PC 鋼材応力の増加量が小さく、変動応力が小さくなることが主要因である。しかし、両者とも経年 300 年においても限界値を大きく上回っており、本研究の検討条件では、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非常に低いものと考えられる。

5. まとめ

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。
- (3) 上記手法から列車走行時の PC 鋼材の応力波形を取得し、この応力波形に対して実測での輪重発生確率を考慮することで PC 鋼材の疲労寿命を評価可能とした。また、検討対象とした溶接継目部では、ポストテンション式がプレテンション式よりも高い耐疲労性を有しているが、両者とも 300 年以上の疲労寿命を有しており、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非常に低いことを示した。

本研究は非常に限られた条件下での検討であるとともに、新品の PC まくらぎを対象にしたものである。そのため今後は、線区条件などの違いが疲労寿命に及ぼす影響を検討するとともに、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、PC 鋼材の腐食）などを包含した、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。

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) 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
- 4) 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.35-54，1997
- 5) 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
- 6) 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