

# 経年並びに通トンが PC まくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する実態調査

渡辺 勉\* 後藤 恵一\*\* 箕浦 慎太郎\* 池田 学\*\*

## Evaluation of Service Life of Aged Prestressed Concrete Sleeper

Tsutomu WATANABE Keiichi GOTO Shintaro MINOURA Manabu IKEDA

PC sleepers have been treated as replacement track materials that are replaced each time deformation occurs. For this reason, currently no criteria have been established for quantitative soundness assessment nor for replacement of sleeper. In this research, to establish a new maintenance management system, we collected aged PC sleepers, conducted a survey of aging deterioration, conducted various tests such as bending tests specified by JIS, and evaluated the load-bearing capacity of aged PC sleepers through numerical analyses using a three-dimensional FEM model. Based on these results, a guideline for the service life of PC sleepers was proposed.

キーワード：PC まくらぎ，維持管理，耐用年数，耐用期間，交換基準，数値解析

### 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要素である。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 まくらぎの維持管理は、年1回程度の定期的な徒歩巡回において外観目視検査が行われ、PC まくらぎの表面状態を指標とする基準<sup>1)</sup>に基づき交換の要否を判定する体系となっている。この基準は必ずしもPC まくらぎの耐荷性能とリンクしたのではなく定性的なものであるため、不良と判定されても交換の緊急性は不明である。このため、一般的なPC まくらぎの設計上の耐用年数である50年を超えても供用上問題がなければ使用を継続しているのが実態である。しかしながら、列車荷重や環境作用によりPC まくらぎの経年劣化は確実に進行するため、今後は耐荷性能に問題があるPC まくらぎが増加することが懸念される。

営業線における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非常に限られている。このため、例えばある時期において、既設のPC まくらぎに耐荷性能を満足しない不良PC まくらぎ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。このような状況を回避するため、今後は予め定量的な耐用期間を定め、計画的に維持管理していくことが望ましい。

このような背景から近年筆者らは、新たな維持管理体

系の構築のため、凍害<sup>2)3)</sup>、アルカリシリカ反応<sup>4)</sup>や塩害<sup>5)</sup>などの変状が生じた経年PC まくらぎの実態調査を行っている。これらの研究により、PC まくらぎに変状が生じた場合の性能についてはある程度定量化されてきているが、具体的な耐用年数や耐用期間の提案までは至っていないのが実情である。

以上より、本研究では前述の変状が生じていない経年PC まくらぎを幅広く収集し、以下の点に着目して検討を行うこととした。

- (1) JISに規定される各種力学試験を実施し、PC まくらぎの耐荷力の実態を把握する。
- (2) 数値解析によりコンクリートおよび鋼材の物性が耐荷力に及ぼす影響を評価する。
- (3) PC まくらぎの耐荷力等の実態調査の結果を踏まえて、PC まくらぎの耐用期間の参考値を提案する。

### 2. 力学試験に基づくPC まくらぎの耐荷力評価

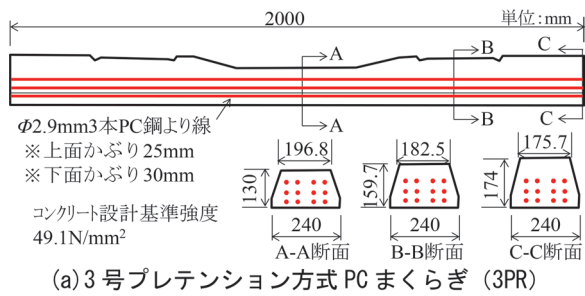
#### 2.1 評価方法

##### 2.1.1 対象としたPC まくらぎ

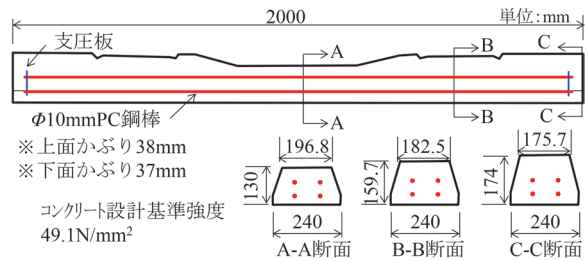
図1に対象としたPC まくらぎを示す。JIS E1201,1202に規定される品形が「3号」で、緊張方式がプレテンション方式(3PR)とポストテンション方式(3PO)のPC まくらぎを対象とした。3号PC まくらぎは直線区間および曲線半径800m以上の曲線区間に敷設され、我が国で最も敷設本数が多い。コンクリートの設計基準強度は $49.1\text{N/mm}^2$ 、使用鋼材は3PR まくらぎでは $\phi 2.9\text{mm}$ -3本鋼より線が12本、3PO まくらぎでは $\phi 10\text{mm}$ のPC鋼棒が4本配置されている。かぶりについては3PR まくらぎは上面かぶりが25mm、下面かぶりが30mm、3PO まくらぎは上面かぶりが38mm、下面かぶりが37mmである。

\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室



(a) 3号プレテンション方式PCまくらぎ (3PR)



(b) 3号ポストテンション方式PCまくらぎ (3PO)

図1 対象としたPCまくらぎ

表1に試験対象としたPCまくらぎの経年別本数を示す。主に都市部の複数の線区に敷設されたPCまくらぎを収集しており、それぞれの本数は、3PRまくらぎは70本、3POまくらぎは65本である。

### 2.1.2 JISに規定される曲げ試験

図2にJIS E1201,1202に規定される曲げ試験の概要を示す。PCまくらぎの設計断面であるレール位置断面とまくらぎ中央断面に対して、正曲げ試験と負曲げ試験をそれぞれ実施する。荷重スパンは700mmである。本試験はPCまくらぎの製造直後の性能確認のために実施される試験であるが、本試験の他にPCまくらぎの力学的性能を定量的に評価でき、かつ適用実績が豊富な試験は存在しないため、本研究では本試験方法を経年PCまくらぎの評価に準用することとした。なお、本JISには規格値として曲げ保証荷重 $P_{cr}$ 、曲げ破壊荷重 $P_u$ が規定されており、それぞれ式(1)、式(2)により算定される値であり、試験では曲げ保証荷重 $P_{cr}$ を荷重した時にひび割れを生じないこと、曲げ破壊荷重 $P_u$ を荷重した時にPCまくらぎが破壊しないことを確認する。

$$P_{cr} = 4 \times (\sigma_{CPr} \times 0.9 + f_{ta}) \times Z/L \quad (1)$$

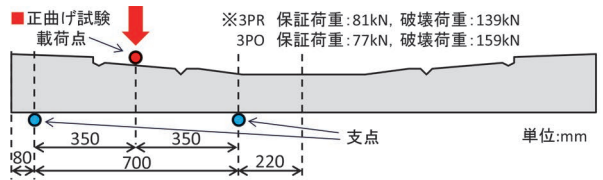
$$P_u = 4 \times 3\sigma_{pe} \times Z/L \quad (2)$$

ここに $\sigma_{CPr}$ は導入プレストレス力によるコンクリート応力、 $f_{ta}$ は許容引張応力度(=3N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{pe}$ :有効プレストレス力によるコンクリート応力(有効率65%)、 $Z$ は断面係数、 $L$ は荷重スパン(=700mm)である。

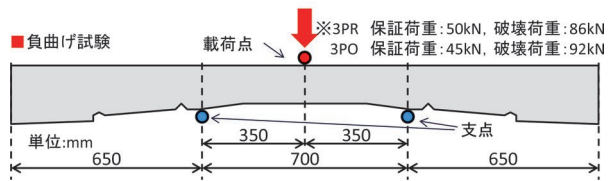
試験結果は、ひび割れ発生荷重と最大荷重で整理した。

表1 対象としたPCまくらぎの経年別の本数

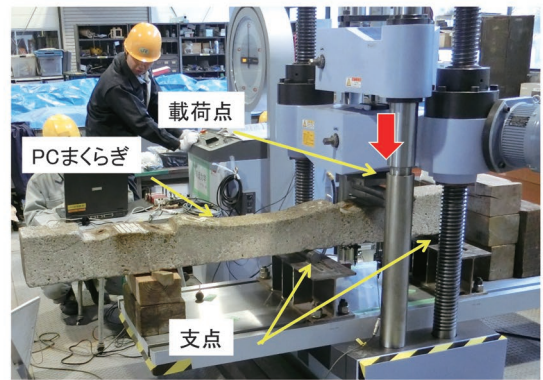
経年(年)	~10	~20	~30	~40	~50	~60	合計
3PR(本)	9	8	9	11	32	1	70
3PO(本)	16	18	10	5	16	0	65



(a) レール位置断面を対象とした正曲げ試験

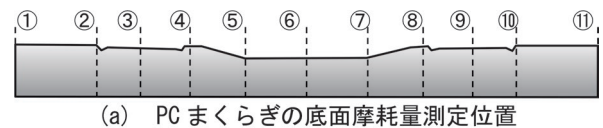


(b) まくらぎ中央断面を対象とした負曲げ試験



(c) レール位置断面を対象とした正曲げ試験の状況

図2 JISに規定される曲げ試験の概要



(a) PCまくらぎの底面摩耗量測定位置



(b) PCまくらぎの底面摩耗量の測定状況

図3 PCまくらぎの底面摩耗量の測定概要

ひび割れ発生荷重は目視でひび割れが発生したと判定した荷重、最大荷重はPCまくらぎが曲げ破壊し荷重が保持できなくなる最大の荷重である。

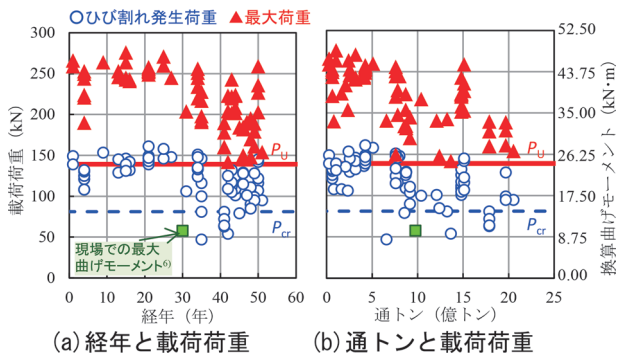


図4 3PR まくらぎにおける正曲げ試験結果

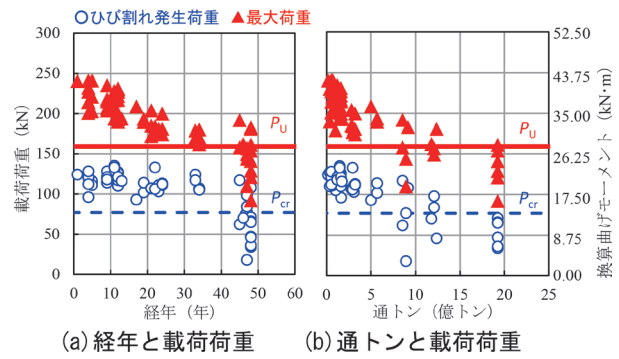


図5 3PO まくらぎにおける正曲げ試験結果

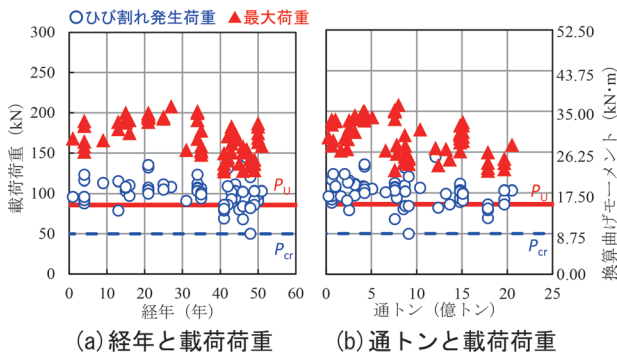


図6 3PR まくらぎにおける負曲げ試験結果

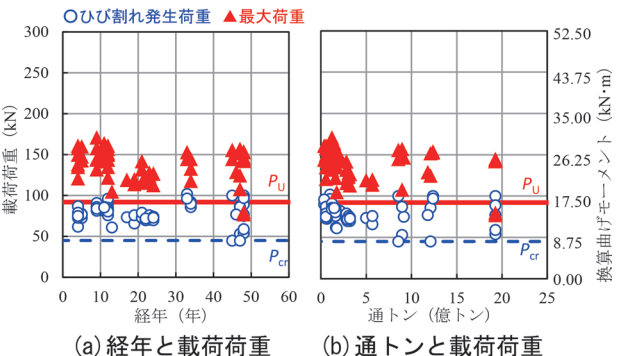


図7 3PO まくらぎにおける負曲げ試験結果

### 2.1.3 圧縮強度試験および静弾性係数試験

PC まくらぎのコンクリート強度と静弾性係数を求めるために、JIS A1108 に規定されるコンクリートの圧縮強度試験および JIS A1149 に規定される静弾性係数試験を実施した。なお、円柱供試体の直径は PC 鋼より線と干渉するため、50mm が最大となる。小径コアの強度を直径 100mm の供試体に補正する方法も提案されているが、本研究では小径コアで得られた値をそのまま評価に用いることとした。

### 2.1.4 PC まくらぎ底面の摩耗量測定試験

図3にPC まくらぎ底面の摩耗量の測定位置を示す。PC まくらぎの底面の摩耗量は、図3に示す11断面に対して、まくらぎ幅方向の3か所測定し、PC まくらぎ1本あたり、33か所の摩耗量をノギスとコの字型に加工した定規を用いて測定した。測定結果は断面ごとの最大摩耗量で整理した。なお、目視で明らかに摩耗が減少した状態ではなく、「欠け」と判断されるものは除外した。

## 2.2 評価結果

### 2.2.1 JIS に規定される曲げ試験

図4および図5に3PR まくらぎおよび3PO まくらぎの正曲げ試験結果を示す。経年と載荷荷重、累積通過トン数（通トン）と載荷荷重の関係をそれぞれ整理した。図の右軸の換算曲げモーメントとは、載荷荷重と載荷ス

パンから求めた曲げモーメントの値である。また、図には JIS に規定される曲げ保証荷重  $P_{cr}$ 、曲げ破壊荷重  $P_U$  を併せて記載した。さらに、収集した PC まくらぎが敷設されていたある線区（在来線の直線ロングレール区間）における PC まくらぎの実測の曲げモーメントの最大値を緑のプロットで示した<sup>6)</sup>。なお、曲げモーメントは PC まくらぎの上縁と下縁に貼り付けた2枚のひずみゲージの実測値から換算して求めた。

図4および図5より、ひび割れ発生荷重は経年30年程度、通トン5億トン程度を超えると JIS の規格値を下回るものが見られる。最大荷重については経年40年程度、通トン8億トン程度で JIS の規格値を下回るものが見られた。また、ひび割れ発生荷重および最大荷重ともに経年や通トンの増加とともに低下する傾向が見られた。なお、PC まくらぎは工場製品で品質管理が徹底されており、製造初期の段階でひび割れ発生荷重や最大荷重にばらつきはあるものの曲げ保証荷重や曲げ破壊荷重などの JIS の規格値を満たさないことはほぼ考えられない。一方で本試験結果より、経年や通トンの増加とともに JIS の規格値と同等あるいは下回る結果も得られたことから、経年による材料劣化や列車荷重の繰返し作用等の影響により、耐荷力が低下している可能性が示唆される。このような低下の要因に関する検証は、後述する3章で数値解析により実施することとした。

さらに、図4において、前述の在来線の直線ロング

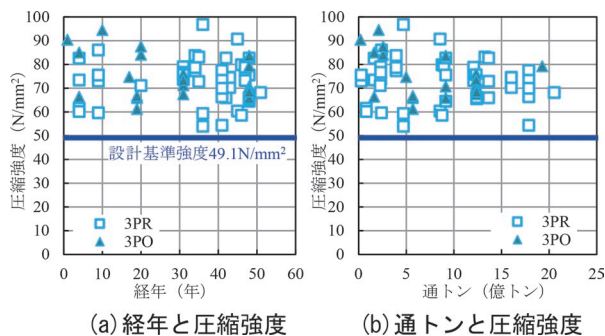


図8 圧縮強度の測定結果

レール区間で実測された最大曲げモーメント<sup>6)</sup>と曲げ試験におけるひび割れ発生時の曲げモーメントを比較すると、前者よりも後者の曲げモーメントの方が小さい結果が数例あることが分かる。このことから、曲げ試験におけるひび割れ発生荷重による曲げモーメントを上回る曲げモーメントが現場のPCまくらぎに発生している可能性があり、現場のPCまくらぎにひび割れ発生の可能性が想定される。そこで、既往の研究において実際の営業線のPCまくらぎに対してひび割れ調査を実施したところ、レール位置断面に曲げひび割れが発生したPCまくらぎが実際に存在することを確認している<sup>7)</sup>。

図6および図7に3PRまくらぎおよび3POまくらぎにおける負曲げ試験結果を示す。負曲げ試験についても正曲げ試験と同様な観点で整理したが、3PRまくらぎについてはすべてのPCまくらぎでひび割れ発生荷重および最大荷重がJISの規格値を上回った。3POまくらぎについてはJISの規格値を下回るものが見られたが、その低下の程度は正曲げよりも小さかった。

### 2.2.2 圧縮強度試験および静弾性係数試験

図8および図9にコンクリートの圧縮強度試験結果と静弾性係数試験結果をそれぞれ示す。3PRまくらぎと3POまくらぎに明確な違いが見られなかったことから同じグラフにプロットした。さらに、同図には、PCまくらぎのコンクリートの設計基準強度49.1N/mm<sup>2</sup>と鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物（以下、設計標準<sup>8)</sup>）に示される設計基準強度に対応した静弾性係数の標準値33kN/mm<sup>2</sup>を示した。図より、すべてのサンプルで圧縮強度は設計基準強度を上回るが、通トンの大きいものほど圧縮強度が全般的に低い傾向にあることが分かる。また、静弾性係数は33kN/mm<sup>2</sup>を中心に、最大で60kN/mm<sup>2</sup>程度、最小で20kN/mm<sup>2</sup>程度であり、大きくばらつくことがわかる。なお、設計標準に示される設計基準強度に応じたコンクリートの静弾性係数の標準値は全国の調査結果の平均的な値であり、骨材の種類と品質の程度、地域により大きくばらつくことが知られている<sup>8)</sup>。

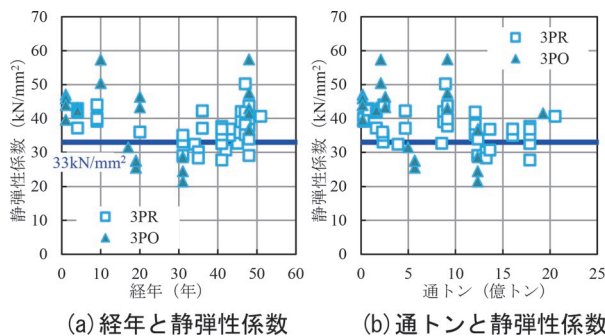


図9 静弾性係数の測定結果

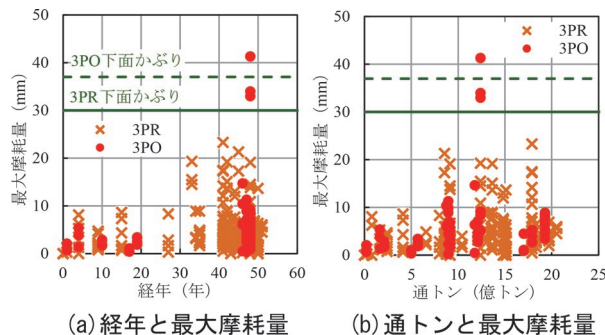


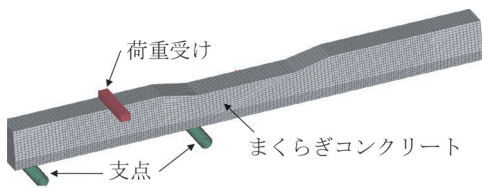
図10 PCまくらぎ底面の摩耗量

### 2.2.3 PCまくらぎ底面の摩耗量測定試験

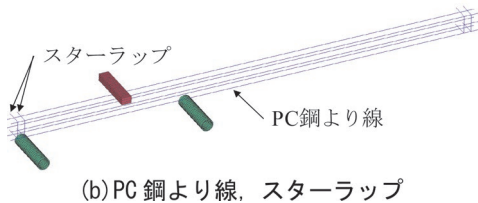
図10にPCまくらぎ底面の摩耗量の測定結果を示す。図より、今回のサンプルでは、3PRまくらぎについては底面のかぶりを超える摩耗量は測定されなかったが、3POについては40mmを超える摩耗量が見られる。なお、このように緊張方式により最大摩耗量に違いが生じた要因については、今回対象としたPCまくらぎ1本1本の敷設箇所を詳細に把握しているわけではないので今回の調査のみでは明らかにすることができない。また、累積通トンの増加とともに最大摩耗量が増加する傾向が見られる。しかしながら、例えば経年40年付近の最大摩耗量に着目すると最大値が23mmであるのに対し、数mmの摩耗しか生じていないものもあり、非常にばらつきが大きいことがわかる。このことから、ある最大摩耗量を閾値として耐用期間を一律に決めてしまうのは合理的ではない可能性があると考えられる。

## 3. 各種パラメータがPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する数値解析による検討

本章では、2章の曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下する要因について、数値解析により検証を行った。ただし、時間の変化に伴う材料劣化を再現したわけではなく、単純にコンクリートやPC鋼材の物性が変化した場合に耐荷力に及ぼす影響を検証した。



(a)まくらぎコンクリート, 支点, 荷重受け



(b) PC 鋼より線, スターラップ

図 11 3PR まくらぎの曲げ試験に関する  
数値解析モデル (1/2 モデル)

### 3.1 解析方法

#### 3.1.1 数値解析モデル

図 11 に数値解析モデルの概要を示す。図 2 に示した 3PR まくらぎの正曲げ試験をモデル化した。

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ていない。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 となった。

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、PC 鋼より線やスターラップの梁要素の節点がコンクリート要素に完全に付着しているものとした。

#### 3.1.2 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の値と設計標準<sup>8)</sup>を参考に設定した。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 12 に本解析で用いた材料モデルを示す。図 12 (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

表 2 解析に用いた材料定数

材料	静弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
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 $\sigma_y$ : 1500.0 最大 $\sigma_u$ : 1998.0	
スターラップ	200.0	0.30	弾性体	
荷重受け・支点	剛体			

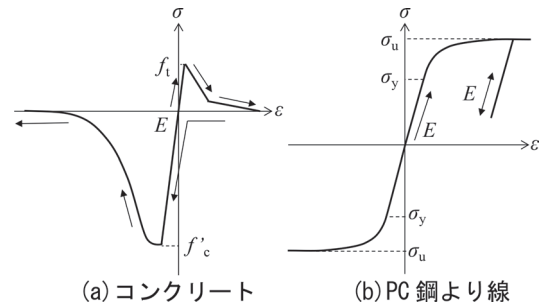


図 12 材料モデル

表 3 解析ケース

着目パラメータ	値
コンクリートの設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	60, 50, 40, 30
PC 鋼より線の強度 ( $\sigma_y$ および $\sigma_u$ に対する倍率)	1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6
有効緊張率 (%)	100, 90, 80, 70, 60

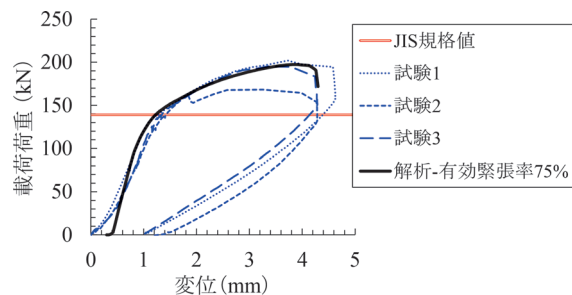


図 13 試験結果と解析結果の比較

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<sup>9)</sup>、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<sup>8)</sup>。図 12 (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。本材料モデルは、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。

#### 3.1.3 JIS の曲げ試験の再現方法

JIS の曲げ試験の再現は 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。なお、PC 鋼より線に導入される緊張力 (28.7kN/本) の有効率 (有

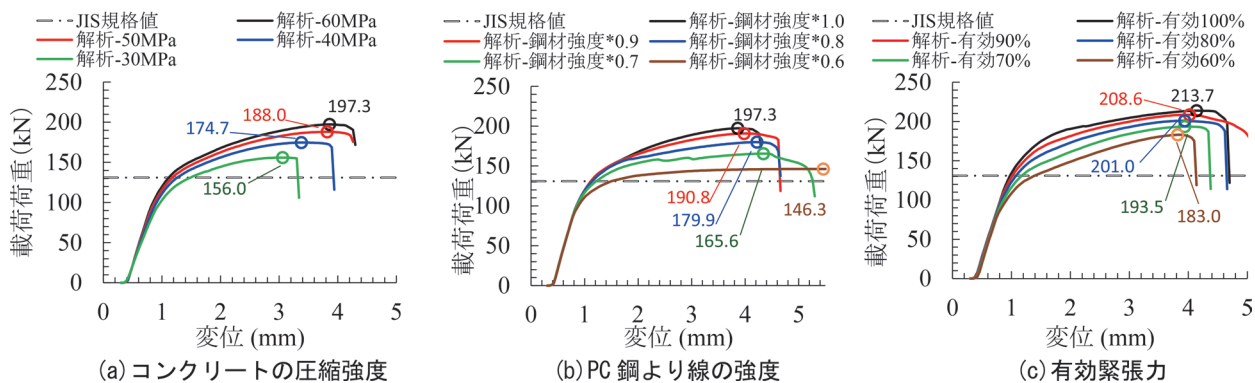


図 14 各種パラメータが耐力に及ぼす影響

効緊張率)は後述する実測結果との整合性より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PCまくらぎに荷重受けおよび支点との接触を考慮し、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、時間積分法には中央差分を用い、その時間刻みは $1.5 \times 10^{-6}$ 秒程度(載荷速度:20mm/sec)とした。

### 3.1.4 解析ケース

表3に解析ケースを示す。コンクリートの設計基準強度、PC鋼材の強度、プレストレス力をパラメータとした。ここでは2章での結果を踏まえて、経年による材料劣化や列車荷重の繰返し作用等によって、これらの値が変動するものと仮に想定した場合に、耐力への影響を検証するために、材料強度を低下させる方向で値を設定した。なお、コンクリートの静弾性係数は設計標準<sup>8)</sup>に基づき、設計基準強度に対応した値を設定した。また、これらの値の低下が複合する場合も当然想定されるが、今回の検討では、まず個々の要因を把握するため、個別に値を変化させることとした。

## 3.2 解析結果

### 3.2.1 数値解析の妥当性

図13に試験結果と解析結果の比較を示す。試験結果は3本のPCまくらぎの試験結果を示した(試験1,2,3)。解析モデルにおける有効緊張率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。図より、表2に示した材料定数を使用することおよび有効緊張率を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(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。なお、PCまくらぎの設計ではPC鋼より線の有効緊張率として65%が使用される<sup>10)</sup>が、65%とすると解析結果は試験結果よりも小さい荷重-変位関係となり、試験結果を精度よく再現することはできなかった。

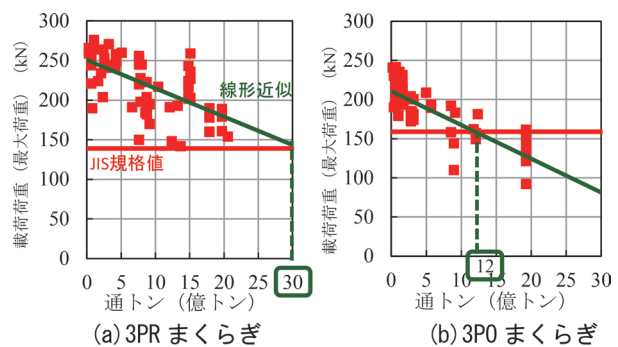


図 15 PCまくらぎの耐用期間の参考値の提案

### 3.2.2 各種パラメータの影響

図14に表3で設定した各種パラメータが耐力に及ぼす影響を示す。当然のことながら、材料強度や有効緊張力(プレストレス力)を減少させれば耐力は低下する。例えば、コンクリートの圧縮強度が $60\text{N/mm}^2$ から $30\text{N/mm}^2$ に低下すると最大荷重は20%程度( $197.3\text{kN} \rightarrow 156.0\text{kN}$ )減少、PC鋼材の強度が60%に減少すると最大荷重は26%程度( $197.3 \rightarrow 146.3$ )減少、有効緊張力が100%から60%に減少すると最大荷重は15%程度( $213.7\text{kN} \rightarrow 183.0\text{kN}$ )減少した。前述の通りPCまくらぎの耐力にはこれらのパラメータの初期強度の違いが大きく影響するが、2章で示した通り、曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下した要因や、PCまくらぎは工場製品であり製造初期でJISの規格値を満足しないことはほぼ考えられないが、サンプルとしたPCまくらぎにはJISの規格値を満足しないものが存在した要因について、これらの材料強度の低下がある一定の影響を及ぼしている可能性が示唆された。ただし、コンクリートやPC鋼材の要因が複合した場合の影響の評価、経年や列車荷重の繰返し作用等に伴う材料強度への影響に関する現象説明や検証は今後の課題としたい。

## 4. PCまくらぎの耐用期間の参考値の提案

図15に2章の評価結果に基づく3PRまくらぎおよび

表4 今回の検討結果に基づく  
3号 PC まくらぎの耐用期間の参考値

種別	耐用期間の参考値 (通トン (億トン))
3PR	30
3PO	12

3PO まくらぎの耐用期間の参考値を示す。ここでは、レール位置断面の正曲げ試験における累積通トンと載荷荷重（最大荷重）の関係に基づき、測定値を線形近似した近似直線がJISに規定される曲げ破壊荷重を下回る累積通トンを耐用期間の参考値を提案することとした。その理由としては、①図4から図7より、経年の増加とともにひび割れ発生荷重及び最大荷重が低下する傾向が見られたが、大都市の高密度線区と地方の閑散線区を同じ経年で管理するのは合理的でないこと、②まくらぎ中央断面の負曲げ試験ではJIS規格値を下回る結果がほとんどなかったこと、③圧縮強度はすべてのサンプルで圧縮強度が設計基準強度を上回っていたこと、④静弾性係数は閾値となる規格値が定められているわけではないこと、⑤PC鋼線が露出するほどの摩耗量が測定されるのは極めて稀であることなどである。

以上の観点から整理したPCまくらぎの耐用期間の参考値を表4に示す。具体的には、3PRまくらぎは、累積通トンで30億トン、3POまくらぎは、累積通トンで12億トンを参考値として提案した。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 経年PCまくらぎ(3PR, 3PO)の曲げ試験を実施した結果、ひび割れ発生荷重および最大荷重ともに経年や通トンの増加とともに低下する傾向にあることを明らかにした。
- (2) 数値解析により各種パラメータが耐荷力に及ぼす影響を検討した結果、材料強度や有効緊張力(プレストレス力)を減少させると耐荷力は低下する。PCまくらぎの耐荷力にはこれらのパラメータの初期強度の違いが大きく影響するが、2章で示した通り、曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下した要因、あるいはPCまくらぎは工場製品であり、製造初期でJISの規格値を満足しないことはほぼ考えられないが、サンプルとした経年PCまくらぎにはJISの規格値を満足できないPCまくらぎが存在した要因について、これらの材料強度の低下がある一定の影響を及ぼしている可能性が示唆された。

- (3) 本研究で実施した経年PCまくらぎの実態調査の結果を踏まえて、PCまくらぎの耐用期間の参考値を提案した。

- ・3PRまくらぎは、累積通トンで30億トン
- ・3POまくらぎは、累積通トンで12億トン

今後も経年PCまくらぎを対象とした調査を行い、経年や累積通トンに伴う耐荷力の変化を継続的に把握し続けるとともに、PCまくらぎの経年劣化現象のメカニズムの解明についても検討を進めていきたい。また、本研究では、あくまでPCまくらぎ1本を対象とした評価結果に基づくものであり、軌道全体の性能に基づくものではない。このため、軌道全体の性能を踏まえたPCまくらぎの交換のタイミングを精査し、より合理的な耐用期間を提案することが今後の大きな課題であると考えている。

## 文献

- 1) 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
- 2) 渡辺勉，後藤恵一，飯島亨，盛田慶：寒冷地におけるAEコンクリートを使用していない経年PCまくらぎの性能評価，第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.377-382，2019
- 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) 箕浦慎太郎，渡辺勉，井上寛美，片山雄一郎：縦ひび割れの発生したPCまくらぎの健全度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1585-1590，2016
- 5) 渡辺勉，後藤恵一，箕浦慎太郎，飯島亨：塩害環境下に敷設された経年PCまくらぎの性能評価，第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.161-166，2020
- 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，第21回鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.21，pp.205-212，2017
- 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（材料・コンクリート構造），Vol.74，No.3，pp.158-175，2018
- 8) 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
- 9) Peter Grassel: CDPM 2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.
- 10) 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