

経年 PC まくらぎの摩耗性状と耐荷力への影響

箕浦 慎太郎* 渡辺 勉*
曾我部 正道** 鈴木 大輔***

Study on Abrasion Property of Prestressed Concrete Sleeper and its Influence on Loading Capacity

Shintaro MINOURA Tsutomu WATANABE
Masamichi SOGABE Daisuke SUZUKI

In this study, a survey of the bottom wear of prestressed concrete sleepers (PC sleeper) used in conventional lines was conducted. The survey revealed that the abrasion of PC sleepers can be classified into five patterns and the wear amount is increased with the gross passing tonnage and aging. In addition, numerical analysis was executed to clarify the effects of the loading capacity of PC sleepers. The result of the analyses shows that abrasion reduces the loading capacity of negative bending at the cross-section of the center of the sleeper. Furthermore, the loading capacity is strongly affected by the number of valid prestressing steel wires and the effective prestressing force.

キーワード：PC まくらぎ，経年劣化，摩耗，耐荷力，数値解析，維持管理

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 まくらぎという）は、列車の高速化や軌道の強化に欠かせない近代軌道の重要な構成要素となっている。現在のPC まくらぎの生産量は、JR だけでも年間約 50 万本に達するが¹⁾、単純な木まくらぎの置き換えだけではなく、既存の PC まくらぎの交換の比率も増加している。計画的な設備投資の観点から、各社では PC まくらぎの交換需要が増加しつつある。

以上のような背景から、経年 PC まくらぎの実態調査や交換基準に関する検討が進められている^{2) 3)}。PC まくらぎは、本体が工場製品であることから、中性化や塩害といった材料耐久性の観点から問題が発生することは稀である（生産初期のまくらぎには、アルカリ骨材反応が見られる場合がある）。このため、交換基準は、主として力学的な観点から定まることとなる。涌井らは車輪とレール間に生じる衝撃パルスに基づき、PC まくらぎの破壊メカニズムを解明しており、これに基づけば衝撃荷重の発生確率や疲労等の観点から十分な検討を行うことができる⁴⁾。一方、力学的な影響を考える上でもう一つ重要な点は、経年によるまくらぎ下面の摩耗である。PC まくらぎが摩耗した場合、断面減少に伴う曲げ保証荷重、曲げ耐力の減少だけでなく、鋼材かぶりの減少も懸念される。鋼材かぶりが減少した場合、プレテンシヨ

ン式まくらぎではプレストレスの伝達に関する問題が、ポストテンション式まくらぎでは定着板や定着具の露出等の問題が懸念されることとなる。既往の研究では、こうした PC まくらぎの摩耗に関する定量的な研究事例が無いことから、本研究では下記の 3 点を目的として検討を行うこととした。

- (1) PC まくらぎの底面の摩耗量の実態調査を行い、摩耗性状を把握する。
- (2) 摩耗形態をパターン化し、摩耗量と累積通過トン数の関係を概観する。
- (3) PC まくらぎの摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響を数値解析により検討する。

2. 営業線 PC まくらぎの摩耗性状

2.1 検討方法

2.1.1 PC まくらぎ摩耗

コンクリートの摩耗について、作用要素ごとの相対運動に着目して分類すると、表 1 に示すようになる^{5) 6)}。

表 1 コンクリートの摩耗の分類

作用要素	名称	相対運動の種類	例
固体	すべり摩耗	すべり	タイヤ/路面等
	転がり摩耗	転がり	タイヤ/路面等
	衝撃摩耗	衝撃・衝突	タイヤチェーン、スパイクタイヤ/路面等
	フレットイング摩耗	振動	PC 鋼材偏向部等
液体	キャビテーション摩耗	流体	水路・ダム等
固体+液体	エロージョン摩耗	流体	水路・ダム等

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室
** 前 鉄道力学研究部
*** 材料技術研究部 潤滑材料研究室

特集：鉄道力学

PCまくらぎ下面の摩耗は、主にPCまくらぎ(コンクリート)とバラスト(岩石)との相対運動で生じるものである。この相対運動の要因としては、列車の静的な軸重相当の力だけではなく、車輪フラットやレール凹凸に起因する衝撃力も含まれる場合がある。以上のようにまくらぎ下面の摩耗は厳密には種々の要因が含まれるが、主として表1に示す衝撃摩耗に相当すると考えられる。

2.1.2 調査対象 PC まくらぎ

図1に3号PCまくらぎの概要を、表2に各種材料諸元をそれぞれ示す。今回対象としたPCまくらぎは、営業線に敷設されていた在来線用3号PCまくらぎ(JIS E 1201, 1202) 50本とした。3号PCまくらぎは直線及び半径800m以上の曲線に用いられるPCまくらぎである。プレテンションとポストテンションの緊張方式の違いはあるが、形状は同じであるので、緊張方式の違いによる摩耗量への影響は無いものとして両者を区別せずに取り扱った。

2.1.3 摩耗量の測定方法

本研究では、まくらぎの摩耗量の測定を詳細測定方法と簡易測定方法の2種類の方法で実施した。

詳細測定方法とは、摩耗量測定用治具を用いてPCまくらぎの底面を20mmピッチで撮影し、摩耗量を取得するものである。具体的には、撮影した画像データをパソコン上で座標解析を行うことにより摩耗量を取得する。この操作を100回繰返すことで、2000mm×240mmの底面を有するPCまくらぎに対して20mm×10mmの解像度で、3次元の摩耗量分布を可視化することができる。詳細測定は50本のまくらぎのうち、目視で明らかに摩耗量が大きいと識別できる4本のまくらぎに対して実施した。

簡易測定方法は、図2に示すような11断面において幅方向3点の摩耗量をノギスによって測定するものである。前述の詳細測定方法は相当な労力を要するため、簡易測定も併せて行った。簡易測定は50本すべてのまくらぎに対して実施した。

2.2 検討結果

2.2.1 詳細測定方法による摩耗量の測定結果

図3に詳細測定による3号PCまくらぎの摩耗量測定結果を2例示す。便宜上、Aまくらぎ、Bまくらぎと定義する。黒枠で囲った部分がレールの中心位置である。同図に示すように詳細測定により長手方向の摩耗量の分布を精緻に把握することができる。Aまくらぎでは、レール中心位置付近において30mm程度の摩耗量で、まくらぎ中央においては数mm～10mm程度の摩耗量となっていることがわかる。Bまくらぎでは、Aまくらぎよりも平均的に摩耗量は小さいが局所的に30mmを超える場合があることがわかる。

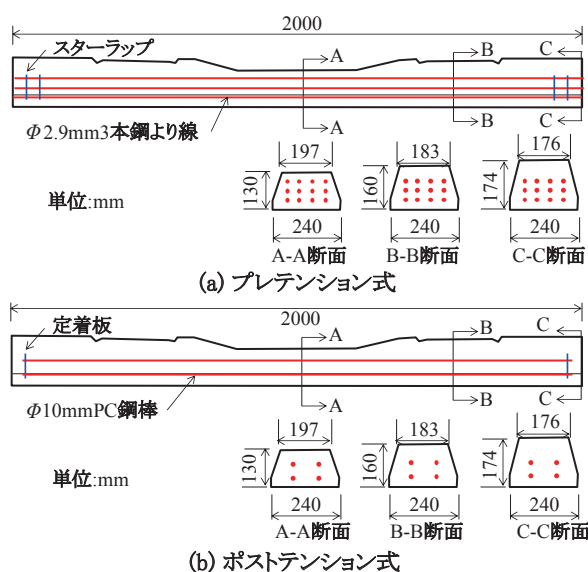


図1 JIS規格3号PCまくらぎの概要

表2 材料諸元

(a) コンクリート

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	49.1
プレストレス導入時強度 (N/mm ²)	39.2
ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	33.0
終局ひずみ μ	3500
曲げ圧縮強度 f'_{cde} (N/mm ²)	19.6 (=0.4 f'_{ck})

(b) 諸元

	鋼材			レール下断面	
	種類, 本数	導入緊張力 (kN/本)	有効率 (%)	高さ (mm)	幅 (mm)
3PR	φ2.9-3本より線, 12本	28.7	65	160	240
3PO	PC鋼棒φ10, 4本	72.6	80	160	240

※ 3PRはプレテンション方式
 ※ 3POはポストテンション方式
 ※ 鋼材の弾性係数 $E_s = 200$ (kN/mm²)

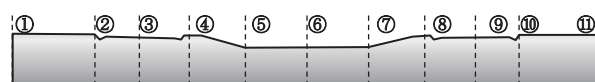


図2 PCまくらぎの摩耗量の簡易測定断面

2.2.2 簡易測定方法による摩耗量の測定結果

図4にPCまくらぎの幅方向の中心線における摩耗量の簡易測定結果を示す。簡易測定のプロットは11点であるが、合わせて詳細測定の結果も示した。同図に示すように、簡易測定では詳細測定結果を概ねトレースできていることがわかる。局所的な値は欠落する場合もあるが、PCまくらぎ全体の摩耗パターンをとらえるには十分であると考えられる。以降の摩耗パターンの分類及び摩耗量の累積通過トン数との関係は、簡易測定の結果をベースとして行うこととする。

2.2.3 摩耗パターンの分類

図5にPCまくらぎの長手方向の摩耗パターンの分類及び代表的な摩耗形状を示す。摩耗パターンとしては、均一摩耗型、片側摩耗型、レール下摩耗型、両端摩耗型、欠損型の概ね5つのパターンに分類できることがわかった。摩耗パターンは走行列車、線路線形、累積通過トン

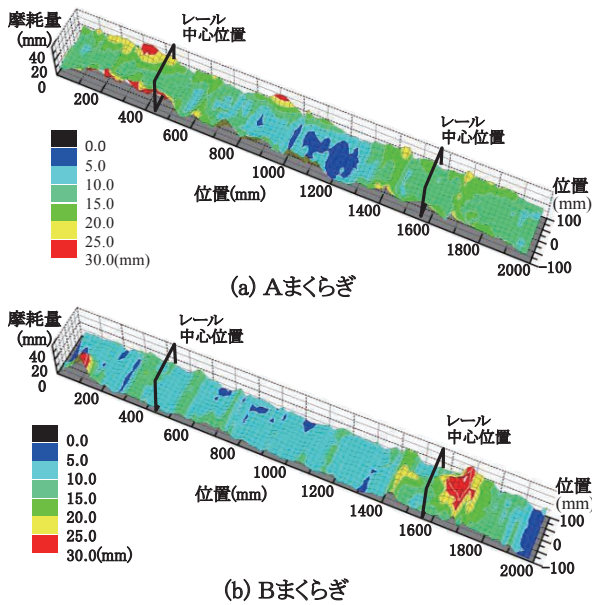


図3 摩耗量の詳細測定結果

数をはじめとするPCまくらぎの各種敷設条件の影響を受けるものと想定されるが、詳細な分析については今後の課題としたい。

2.2.4 最大摩耗量と通過トン数の関係

図6にPCまくらぎの最大摩耗量と累積通過トン数の関係を示す。最大摩耗量は簡易計測で得られた摩耗量の最大値を採用した。累積通過トン数の増加とともに最大摩耗量が増加する傾向にあることがわかる。また最大摩耗量はPC鋼棒の露出及び破断を伴う40mm程度のものもみられたが、概ね30mm程度であることがわかる。

2.2.5 最大摩耗量と経年の関係

図7にPCまくらぎの最大摩耗量と経年の関係を示す。経年はまくらぎ製造年からの年数である。最大摩耗量は簡易計測で得られた摩耗量の最大値を採用した。図より、経年の増加とともに最大摩耗量が増加する傾向にあり、概ね30年で最大摩耗量が平均で5～10mm程度、一本のまくらぎ中の一部の部位では20mm程度に、50年では平均5～15mm程度、一部の部位では30～40mm程度となることがわかる。これらの摩耗量に関する実態調査結果をベースとして、次章以降で数値解析による耐荷力に関する検討を行うこととする。

3. PCまくらぎの摩耗による耐荷力への影響

本章では、底面が摩耗したPCまくらぎについて、その摩耗量が耐荷力に及ぼす影響について数値解析による検討を行うこととした。PCまくらぎは比較的単純な形状の棒部材であり、力のつり合い条件、変形の適合条件、材料構成則を用いて机上の検討でも容易に耐荷力の算定が可能である。しかしながら本研究では、PCまくらぎ

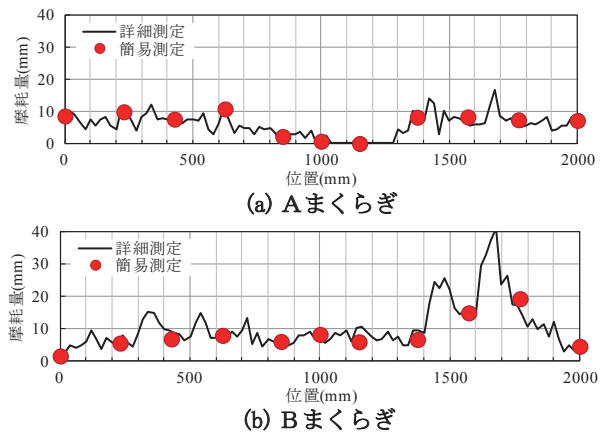


図4 まくらぎ中心線における摩耗量の簡易測定結果

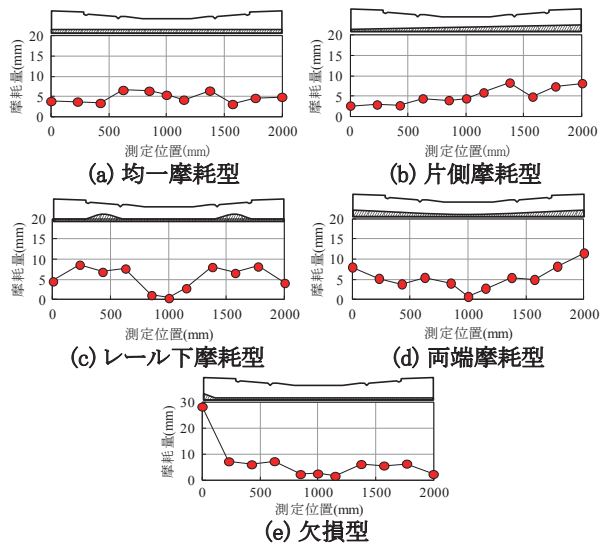


図5 PCまくらぎの摩耗パターンの分類

の摩耗パターンや底面の摩耗状態のばらつき等の影響を精緻に評価したいこと、今後、劣化検知や劣化予測の検討を行うために、PCまくらぎの摩耗による固有振動数の変化に着目した検討⁷⁾を行うことを想定していること等から、PCまくらぎ全体をFEMでモデル化した上で検討を進めていくこととした。

3.1 検討方法

3.1.1 PCまくらぎの数値解析モデル

検討対象としたPCまくらぎは第2章で調査を行った3号PCまくらぎのうちプレテンション方式とした。

図8にJISに規定されたPCまくらぎの曲げ試験の載荷方法を示す。載荷スパンは700mmでPCまくらぎのレール位置断面及び中央断面の2箇所に対して曲げ試験を実施することが規定されている。実際の荷重状態を考慮し、レール位置断面では正曲げ、まくらぎ中央断面では負曲げの試験を実施する。

表3にJISに規定された曲げ保証荷重及び曲げ破壊荷重をそれぞれ示す。これらの値の算出方法は、曲げ保証

特集：鉄道力学

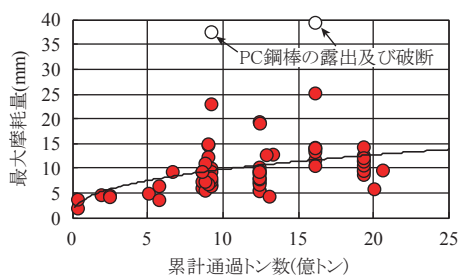


図6 最大摩耗量と累積通過トン数の関係

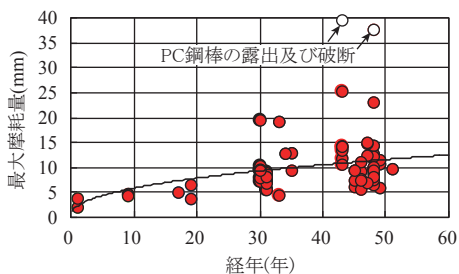


図7 最大摩耗量と経年の関係

荷重については、導入プレストレスの有効率90%でコンクリートに引張縁応力度 3.0N/mm^2 を発生させる荷重として算定されている。また、曲げ破壊荷重については、有効プレストレス（導入プレストレスの65%）による応力の3倍から求められる荷重として設定されている。なお、図10で後述するが、JIS曲げ試験により得られた荷重変位曲線を見ると、概ね荷重点直下の鉛直変位3mm程度で勾配がフラットになることから、本研究では鉛直変位3mmの荷重を最大荷重と定義することとした。

図9にFEMによる数値解析モデルの概要を示す。数値解析は、構造解析ソフトウェアLS-DYNAを用いた陽解法により行った。PCまくらぎの対称性を考慮してまくらぎ長手方向に対する1/2モデルとし、PCまくらぎのコンクリートは6面体ソリッド要素、PC鋼より線とスターラップはビーム要素としてモデル化した。また、コンクリートとPC鋼より線及びスターラップは完全付着となるようにモデル化した。さらに、荷重点及び支点は剛体シェル要素としてモデル化した。PCまくらぎの高さについては、実際のPCまくらぎの摩耗量の簡易計測結果を反映させた。コンクリートについては、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）⁸⁾に示す引張軟化特性とし、PC鋼より線については、同書に示すPC鋼線、PC鋼より線およびPC鋼棒1号の応力-ひずみ曲線とした。

なお、図9中の擬似支点とは、荷重開始前においてPCまくらぎの要素を安定させるために設けた要素である。数値解析モデルの節点数は9240点、要素数は7284要素である。

3.1.2 数値解析モデルの妥当性の評価方法

数値解析モデルの妥当性の評価方法は、次に示す2段階で行った。まず、数値解析上で導入プレストレス力によりPCまくらぎに発生する縁応力（以下、解析縁応力）

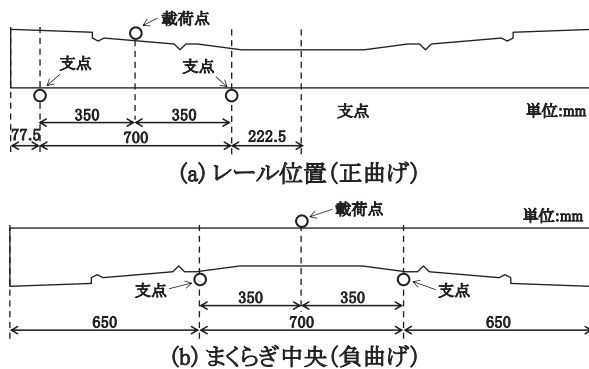


図8 まくらぎの曲げ試験の荷重方法

表3 曲げ破壊荷重

断面	曲げ保証荷重 (kN)	曲げ破壊荷重 (kN)
レール位置断面	81	139
まくらぎ中央断面	50	86

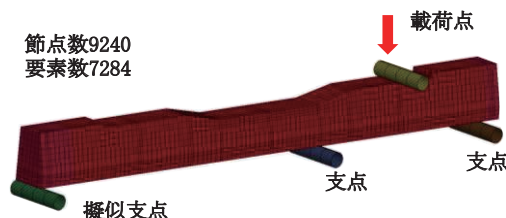


図9 FEMによる数値解析モデルの概要

が、JISに規定された鋼材の緊張力により実際のPCまくらぎに発生する縁応力（以下、JIS縁応力）と整合していることにより評価した。なお、解析縁応力は各断面の上縁及び下縁要素の最小主応力とした。また、JIS縁応力の値は、次の式(1)により算定した。

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M_p}{I} \cdot y \quad (1)$$

ここに、 σ は縁応力度、 P は緊張力（ $28.7\text{kN} \times 12$ 本）、 A はPCまくらぎ断面積、 M_p は緊張力による曲げモーメント（緊張力 $P \times$ 鋼材偏心量 e ）、 I は断面二次モーメント、 y は中立軸から断面上縁又は下縁までの距離である。

次に、数値解析上で荷重試験を行い、得られた荷重変位曲線が実物のPCまくらぎを用いて実施したJIS曲げ試験における荷重変位曲線と整合していることを確認した。荷重は荷重点荷重、変位は荷重点直下の鉛直変位である。表4に数値解析に用いた材料諸元を示す。PCまくらぎに用いられるコンクリートの実際の圧縮強度は、設計基準強度以上の強度を有していると想定される。このため、数値解析に用いる材料諸元については設計値を用いずに、JIS曲げ試験後の実際のPCまくらぎから採取した円柱供試体を用いて、JIS A 1108に準拠した方法により、コンクリートの圧縮強度とヤング係数を求めることとした。鋼材については比較的材料諸元にばらつきが小さいと想定されるため、公称値をそのまま数値解析に用いた。

3.1.3 解析ケース

表5に解析ケースを示す。PCまくらぎの摩耗が耐荷力に及ぼす影響を検討するために、第3章の調査結果を参考に、case0を基本ケースとしてPCまくらぎの底面が10mmずつ、最大30mm摩耗したモデルを作成し解析を行った(case1-1～case1-3)。なお、前述の調査結果より、PCまくらぎの摩耗パターンは5つに分類できることを明らかにしたが、ここでは、基礎的な検討として、PCまくらぎの底面が一様に摩耗したケース(均一摩耗型)を想定して検討を行うこととした。また基本ケースのプレストレス量は初期導入量の70%とし⁹⁾、定着長等は考慮せず一様にプレストレスが作用するものとした。

PCまくらぎの摩耗により、鋼材の腐食、導入プレストレスの減少やプレストレスの伝達の問題などが発生する可能性があるため、本解析ではPCまくらぎの鋼材を減少させたモデルによる検討(case2-1,case2-2)やプレストレスを減少させたモデルによる検討(case3-1～case3-3)も併せて行った。鋼材を減少させたモデルによる検討について、レール位置断面での载荷試験では、PCまくらぎ下部の鋼材のうち外側の2本を取り除いたケース(2本減)と、PCまくらぎ下段の鋼材をすべて取り除いたケース(4本減)を用意した。同様にまくらぎ中央断面での载荷試験では、PCまくらぎ上部の外側の2本の鋼材と、PCまくらぎ上段の鋼材をすべて取り除いたケースを用意した。

3.2 検討結果

3.2.1 解析手法の妥当性

表6に導入プレストレスによるPCまくらぎの縁応力の比較を示す。多少のばらつきはあるものの、数値解析によりJIS縁応力の値を概ね再現できたことがわかる。

図10にレール位置断面(正曲げ)における荷重変位曲線を示す。同図に示すように、初期の勾配やその後の曲線の傾きの変化状況等、実物のPCまくらぎを用いて実施したJIS曲げ試験の荷重変位曲線と数値解析による荷重変位曲線は概ね一致していることがわかる。また、変位3.0mmにおける荷重で比較するとJIS曲げ試験は170kN、数値解析は168kNで概ね一致した。これらの値はJISで規定される曲げ破壊荷重を上回っていることがわかる。なお、PCまくらぎ中央断面(負曲げ)においても、後述する図11(b)で示すとおり、数値解析と試験結果の差は変位3mmで約8%程度となっていた。以下の検討では、この基本ケースをベースにパラメータスタディを実施した。

3.2.2 PCまくらぎ底面の摩耗が耐荷力に及ぼす影響

図11にPCまくらぎ底面の摩耗が耐荷力に及ぼす影響を示す。レール位置断面(正曲げ)及びまくらぎ中央断面(負曲げ)での荷重変位曲線で比較した。レール位

表4 数値解析に用いた材料諸元

名称	コンクリート	PC鋼より線 (2.9mm 3本より)	スターラップ (φ4)
ヤング係数 (kN/mm ²)	43*	200	200
ポアソン比	0.2	0.3	0.3
密度 (kN/m ³)	23	77	77
一軸圧縮強度 (kN/mm ²)	60*	—	—
一軸引張強度 (kN/mm ²)	3.5***	—	—
断面積 (mm ²)	—	19.82	12.56
初期引張応力 (N/mm ²)	—	1448	—

※ JIS A 1108により求めた
 ※※一軸圧縮強度より算出した⁸⁾

表5 解析ケース

ケース番号	下段のPC鋼より線本数 (本)	導入プレストレスによる 応力		まくらぎ 摩耗量 (mm)
		(N/mm ²)	初期導入量比 (%)	
case0	4	20090	70	0
case1-1	4	20090	70	10
case1-2	4	20090	70	20
case1-3	4	20090	70	30
case2-1	2 (2本減)	20090	70	0
case2-2	0 (4本減)	20090	70	0
case3-1	4	0	0	0
case3-2	4	12915	45	0

表6 プレストレスによるPCまくらぎの縁応力

	まくらぎ中央		レール位置	
	上縁	下縁	上縁	下縁
解析縁応力 (N/mm ²)	14.10	8.77	6.80	12.0
JIS縁応力 (N/mm ²)	14.53	9.20	6.53	12.9
差 (%)	-3.0	-4.7	4.1	-7.0

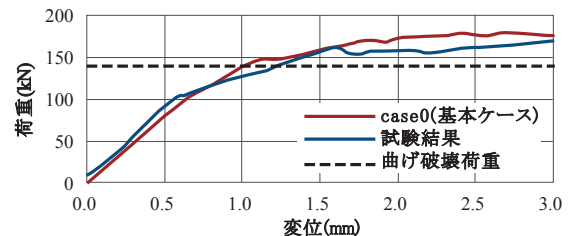


図10 PCまくらぎの荷重変位曲線
(レール位置断面、正曲げ)

置断面(正曲げ)では摩耗の影響が小さく、まくらぎ中央断面(負曲げ)では摩耗の増加に伴って最大荷重が低下することがわかる。具体的には、30mm摩耗した正曲げでは10%程度の最大荷重の低下(変位3mm)、負曲げでは48%程度の最大荷重の低下が見られた。これは底面が摩耗したとしても、正曲げのレール位置断面においては、コンクリートの圧縮縁から鋼材までの距離は変わらないが、負曲げについてはコンクリートの圧縮縁から鋼材までの距離が短くなるため耐荷力が低下するためである。このようにレール位置断面(正曲げ)では摩耗が耐荷力に及ぼす影響が小さいことがわかる。

3.2.3 PC鋼より線の本数が耐荷力に及ぼす影響

図12にレール位置断面(正曲げ)におけるPC鋼よ

特集：鉄道力学

り線の本数の影響を示す。PC まくらぎのひび割れに起因して鋼材が腐食し有効に機能しなくなった場合を想定した。この図より、鋼材本数の減少によって最大荷重の低下が見られることがわかる。最下段の4本の鋼材がすべて有効に機能しなくなった場合では、基本ケースに比べて35%程度の最大荷重の低下が見られた。

3.2.4 導入プレストレスの有効率が耐力に及ぼす影響

図13にPC まくらぎの導入プレストレス量が耐力に及ぼす影響について示す。同図のように、導入プレストレスの減少により最大荷重の低下が見られた。導入プレストレスの有効率が45%になると16%、有効率が0%になると57%の最大荷重の低下が見られた。なお、今回の解析では、すべてのケースにおいてPC鋼より線が降伏する前にコンクリートの圧壊が生じていた。

4. まとめ

本研究では、在来線に敷設されていた既設の3号PCまくらぎを対象に底面の摩耗の実態調査を行い、PCまくらぎの底面の摩耗が耐力に及ぼす影響について数値解析による基礎的検討を行った。得られた知見を整理すると以下のとおりとなる。

- (1) PCまくらぎの摩耗パターンは、均一摩耗型、片側摩耗型、レール下摩耗型、両端摩耗型、欠損型の概ね5つのパターンに分類できることがわかった。
- (2) PCまくらぎの累積通過トン数の増加とともに最大摩耗量が増加する傾向にあることがわかった。最大摩耗量は局所的な断面欠損等に伴う著大値はあるものの、概ね30mm程度以内であることがわかった。
- (3) PCまくらぎの経年の増加とともに最大摩耗量が増加する傾向にあることがわかった。概ね30年で最大摩耗量が平均で5~10mm程度、50年で最大摩耗量が平均で5~15mm程度であった。
- (4) PCまくらぎの底面の摩耗は、まくらぎ中央断面の耐力に大きな影響を及ぼすことがわかった。レール位置断面においては、摩耗よりも腐食等に起因する鋼材本数やプレストレスの有効率の減少の影響の方が大きいことがわかった。

今後は、PC摩耗パターンが耐力に及ぼす影響、PCまくらぎの摩耗がPCまくらぎの固有振動数変化に及ぼす影響、PCまくらぎのひび割れの影響、衝撃荷重の影響等について検討を行っていきたいと考えている。

文献

1) PCまくらぎ工業会：PCまくらぎ，プレストレストコンクリート，Vol.33，特別号，1991

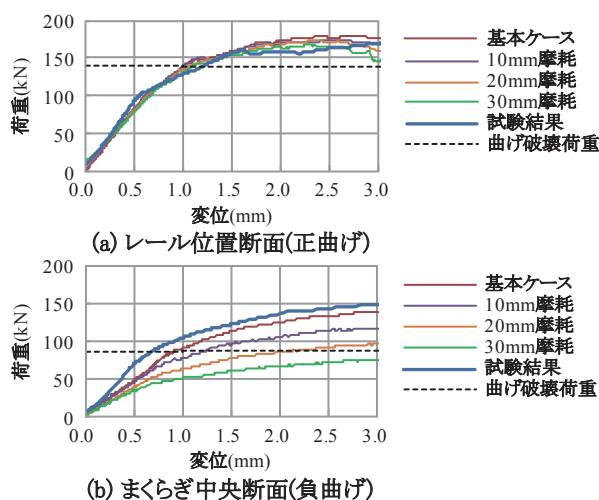


図11 摩耗が耐力に及ぼす影響

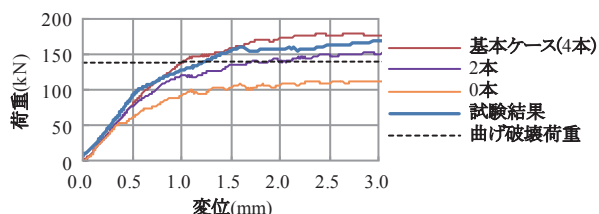


図12 PC鋼より線の本数の影響 (正曲げ)

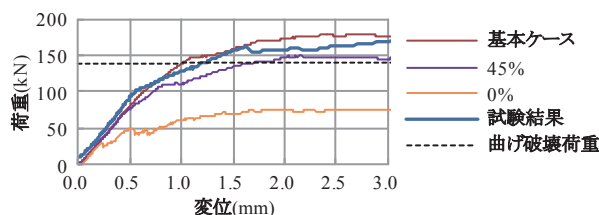


図13 導入プレストレスの影響 (正曲げ)

- 2) 中村貴章，田淵剛：PCまくらぎの現状評価，土木学会第68回年次学術講演会，pp.1041-1042，2013
- 3) 箕浦慎太郎，渡辺勉，鈴木大輔，上半文昭：営業線PCまくらぎの摩耗性状とその耐力への影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1345-1350，2015
- 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) 堀口敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.31，No.10，pp.17-27，1993
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，pp.26-28，2012
- 7) 松岡弘大，渡辺勉，徳永宗正，曾我部正道：高次の振動モードに基づくPCまくらぎの損傷検知，土木学会論文集A2分冊(応用力学)，Vol.70，No.2，pp.I_947-I_957，2015
- 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)，丸善出版，2004
- 9) 高原清介：新軌道材料，鉄道現業社，pp.543-550，1985