

論文 営業線 PC まくらぎの摩耗性状とその耐荷力への影響に関する検討

箕浦 慎太郎^{*1}・渡辺 勉^{*1}・鈴木 大輔^{*2}・上半 文昭^{*3}

要旨: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量の実態調査を行い、PCまくらぎの摩耗パターンが概ね5つに分類されること、累積通過トン数や経年の増加とともに摩耗量が増大すること、概ね50年で摩耗量は30mm程度以内に収まることを明らかにした。また、数値解析によりPCまくらぎ底面の摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響を検討した結果、まくらぎ中央断面については摩耗の影響が大きく、摩耗30mmで48%程度の荷重低下(鉛直変位3mm)、レール位置断面についてはPCまくらぎ底面の摩耗よりも鋼材の本数、プレストレスの有効率の方が影響が大きいこと等を明らかにした。

キーワード: PCまくらぎ, 経年劣化, 摩耗, 耐荷力, 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まくらぎという)は、輸送の高速化・快適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。ロングレールに生じる大きな温度軸圧縮力に対して軌道を安定させる観点からも、重量があり締結力の大きなPCまくらぎは広く用いられている。PCまくらぎの導入は、1951年の東海道本線への採用以降、1961年の東海道新幹線への大量投入(2年で160万本を生産)を契機に広く進んだ。

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。PCまくらぎの寿命は30~50年程度と考えられているが、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。なお、この需要には近年の地震時の脱線、逸脱防止対策の観点からのPCまくらぎ交換も含まれていると考えられる。

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となることは稀である(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が行える⁴⁾。一方、力学的な観点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、プレテンション式まくらぎではプレストレスの伝達に関して問題が、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

(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)}。本研究で対象とする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。相対運動を生じさせる要因としては、列車の静的な軸重相当の力だけではなく、車輪

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
	フレッティング摩耗	振動	PC鋼材偏向部等
液体	キャビテーション摩耗	流れ	水路・ダム等
固体+液体	エロージョン摩耗	流れ	水路・ダム等

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 工修 (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 潤滑材料 工修

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工博

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。以上のように作用要素や作用力の特徴を考慮すると、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) 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。発生箇所は 4 か所で各箇所十数本ずつである。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。

(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。

詳細測定方法は、摩耗量測定用器具を用いて PC まくらぎの底面を 2cm 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 回繰返し、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 本中、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。簡易測定では簡易測定は 50 本すべてのまくらぎに対して実施した。

2.2 検討結果

(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。

(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

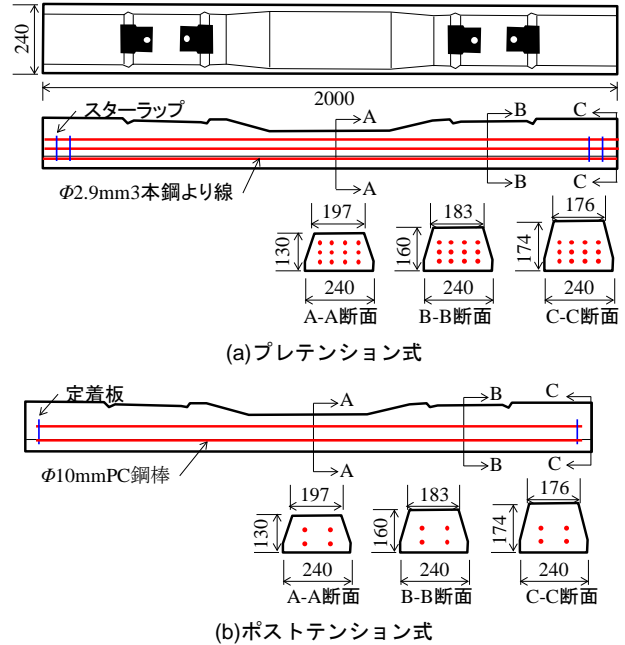


図-1 JIS 規格 3 号 PC まくらぎの概要

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

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。

(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つ

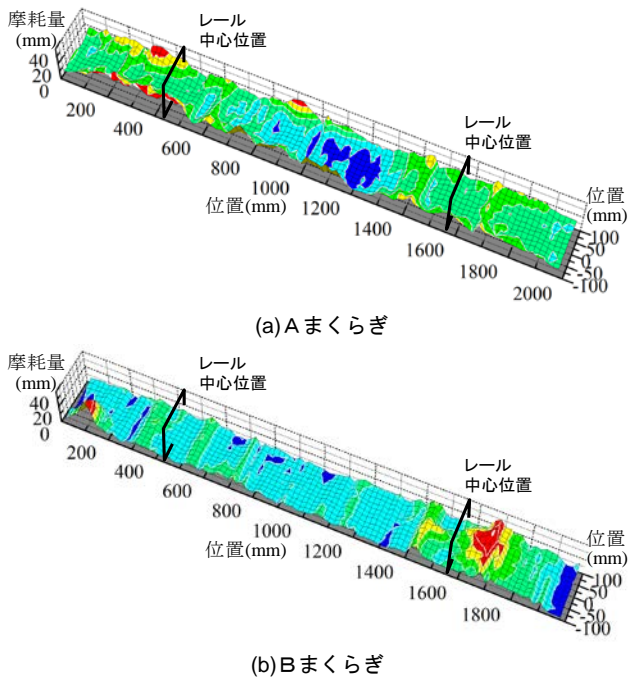


図-3 摩耗量の詳細測定結果

た。摩耗パターンは走行列車、線路線形、累積通過トン数をはじめとする 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。

(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。最大摩耗量は PC まくらぎの局所的な断面欠損等に伴う著大値はあるものの、概ね 30mm 程度であることがわかる。

(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。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る。概ね 30 年で最大摩耗量が平均で 5~10mm 程度、局所的には 20mm 程度に、50 年で平均 5~15mm 程度、局所的には 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力低下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低下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可

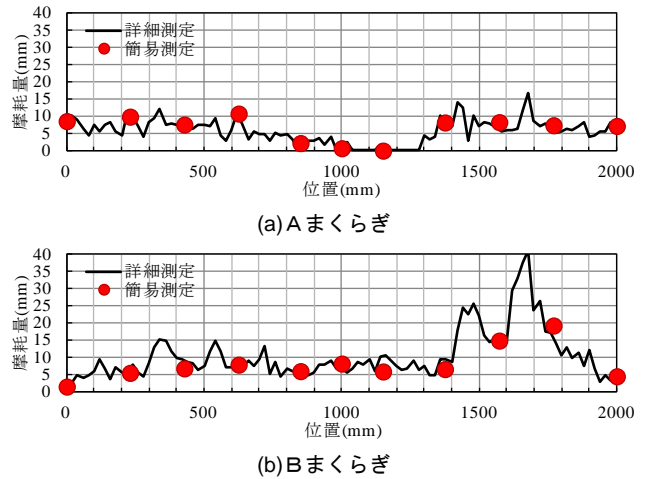


図-4 まくらぎ中心線における摩耗量の簡易測定結果

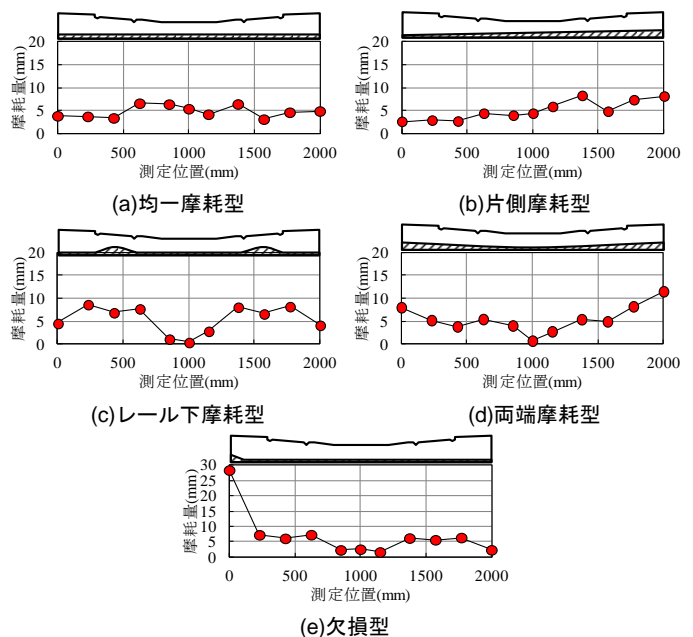


図-5 PC まくらぎの摩耗パターンの分類

能である。しかしながら本研究では、PC まくらぎ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

(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。

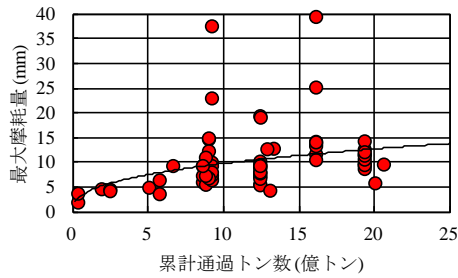


図-6 最大摩耗量と累積通過トン数の関係

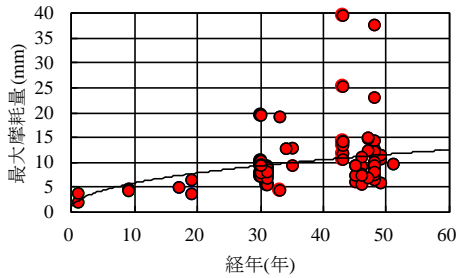


図-7 最大摩耗量と経年の関係

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、概ね載荷点直下の鉛直変位 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。具体的には、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、載荷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、載荷開始前において PC まくらぎの要素を安定させるために設けた要素であり、載荷開始後は支点間で PC まくらぎの要素は正曲げを受け、擬似支点からは離れる。数値解析モデルの節点

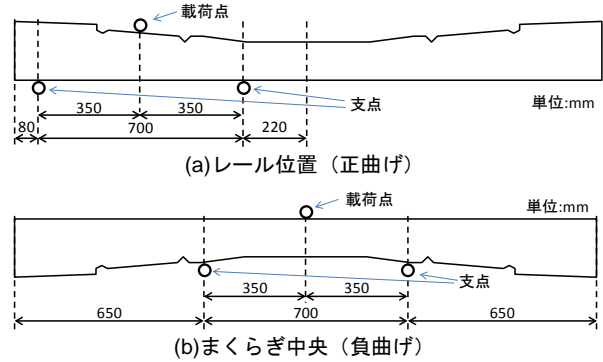


図-8 まくらぎの曲げ試験の載荷方法

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

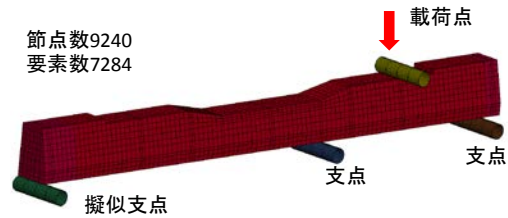


図-9 FEM による数値解析モデルの概要

数は 9240 点、要素数は 7284 要素となった。

(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）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、数値解析上での載荷試験における荷重変位曲線が、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。荷重は載荷荷重、変位は載荷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、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) 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低下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 まくらぎの底面を 10mm ずつ、最大 30mm 減ら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樣に摩耗したケース(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樣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、レール位置載断面での載荷試験では、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 まくらぎ下部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載荷試験では、PC まくらぎ上部の外側の 2 本の鋼材と、PC まくらぎ上部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

(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-12 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。

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定した⁸⁾

表-5 解析ケース

ケース番号	端部の 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 導入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

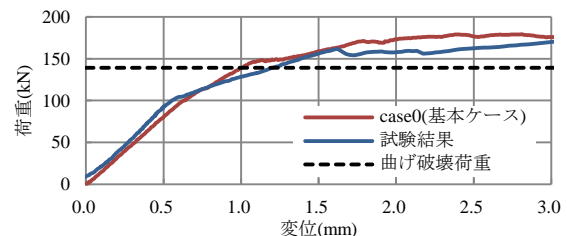


図-10 PC まくらぎの荷重変位曲線
(レール位置断面、正曲げ)

(2) PC まくらぎ底面の摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響

図-11 に PC まくらぎ底面の摩耗が耐荷力低下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。同図に示すように、レール位置断面(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ためである。一方、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こととなる。このようにレール位置断面(正曲げ)では摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響が小

さいことがわかったので、その他の耐力低下の要因を次項で検討した。

(3) PC 鋼より線の本数が耐荷力低下に及ぼす影響

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。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。最下縁の 4 本の鋼材がすべて有効に機能しなくなった場合で、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。

(4) 導入プレストレスの有効率が耐荷力低下に及ぼす影響

図-13 に PC まくらぎの導入プレストレス量が耐荷力低下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。

4.まとめ

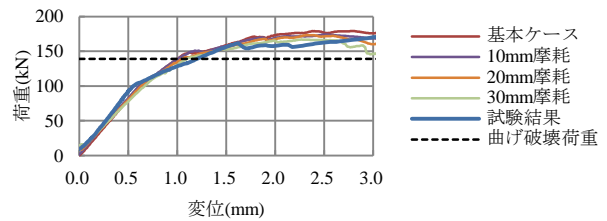
本研究では、在来線に敷設されていた既設の 3 号 PC まくらぎを対象に底面の摩耗の実態調査を行い、PC まくらぎの底面の摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響について数値解析による基礎的検討を行った。得られた知見を整理すると以下のとおりとなる。

- 1) PC まくらぎの摩耗パターンは、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荷力低下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。

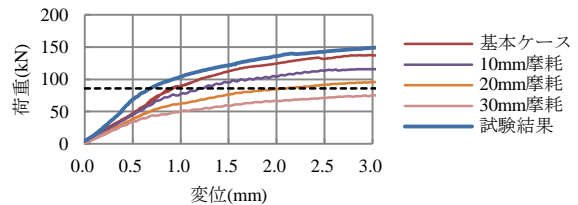
今後は、PC 摩耗パターンが耐力低下に及ぼす影響、PC まくらぎの摩耗が PC まくらぎの固有振動数変化に及ぼす影響、PC まくらぎのひび割れの影響、衝撃荷重の影響等について検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

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



(a) レール位置断面(正曲げ)



(b) まくらぎ中央断面(負曲げ)

図-11 摩耗が耐荷力低下に及ぼす影響

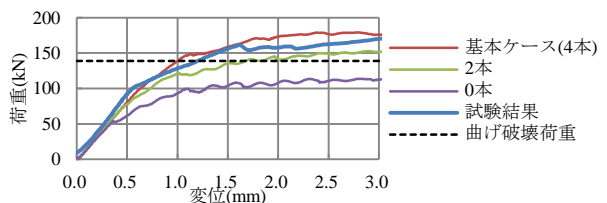


図-12 PC 鋼より線の本数の影響(正曲げ)

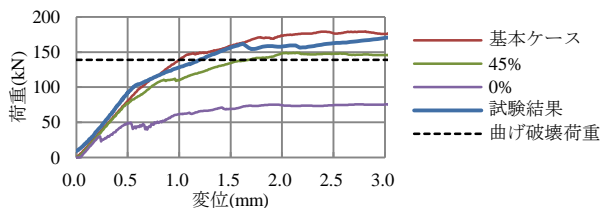


図-13 導入プレストレスの影響(正曲げ)

- 2) 中村貴章，田淵剛：PC まくらぎの現状評価，(公社)土木学会，土木学会第 68 回年次学術講演会，pp.1041-1042，2013.9
- 3) 須江政喜，奥村悠樹，堀雄一郎：既設 PC まくらぎの劣化状態に関する研究，土木学会，第 21 回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2014)，2014.12
- 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-34，1997
- 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.17~27,1993.10
- 6) コンクリート診断技術' 12[基礎編]，(公財)日本コンクリート工学会，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_957，2015.2
- 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，2012
- 9) 高原清介：新軌道材料，pp.543-550，鉄道現業社，1985