

経年 PC まくらぎの耐荷力低下に関する検討

鉄道総研 正会員 ○箕浦 慎太郎
 鉄道総研 正会員 曾我部 正道

鉄道総研 正会員 渡辺 勉
 J R 東海 正会員 清水 裕介

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、1950 年代ごろから導入が始まり、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。PC まくらぎの寿命は概ね 30~50 年程度と考えられているが、膨大な本数の PC まくらぎが敷設されているため計画的な維持管理が必要である。近年、鉄道事業者においても、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^{1), 2)}。本研究では、営業線に敷設されていた経年 PC まくらぎに対して各種力学試験を行い、PC まくらぎの力学的な性能評価を行うとともに、耐荷力低下に対する各種パラメータの影響を把握するための数値解析による検討を実施した。

2. 検討方法

2.1 対象まくらぎ 表 1 に対象まくらぎを示す。それぞれ異なる線区から収集された JIS-3 号 PC まくらぎ 165 本である。経年は 1~50 年程度であり、健全な PC まくらぎだけではなく、損傷が発生している PC まくらぎも併せて収集した。図 1 および表 2 に JIS-3 号 PC まくらぎの概要と材料諸元をそれぞれ示す。

2.2 曲げ試験 曲げ試験は JIS E1201 および JIS E1202 により実施した。本論文ではレール位置断面での正曲げ試験を取り上げる。载荷スパンは 700mm である。

2.3 残留プレストレス試験 PC 鋼材の残留プレストレスは、PC まくらぎ端面を研磨してすべての PC 鋼材の長さを測定した後、PC 鋼材をはりだして収縮量を測定し、式(1)により残留プレストレスを算出した。

$$P_r = E \times A \times \Delta L / L \quad (1)$$

ここで、 P_r は残留プレストレス(kN)、 E は PC 鋼材のヤング係数(200kN/mm²)、 A は PC 鋼材の断面積(mm²)、 L は PC 鋼材の長さ(mm)、 ΔL は PC 鋼材の収縮量(mm)である。

2.4 コア圧縮強度試験および静弾性係数試験 コンクリートコアの圧縮強度は JIS A1108、静弾性係数試験は JIS A1149 により実施した。凍害が発生している PC まくらぎのようにコア供試体が採取できない PC まくらぎは除外した。

2.5 数値解析による耐荷力低下に関する検討 PC まくらぎのコンクリートや PC 鋼材をはじめとする各種パラメータの影響を検討するために、図 2 に示すように構造解析ソフトウェア LS-DYNA(Version R7.1.1)を用いて FEM による数値解析モデルを構築した。材料諸元は表 2 のカッコ書きの値である。これらの値は、コア圧縮試験や静弾性係数試験に基づき、後述する曲げ試験結果と整合するように定めたもので、設計値とは異なる。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³⁾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。ここで、PC まくらぎは比較的単純なはり部材であり、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により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 まくらぎ底面の摩耗状態を精緻に評価したいこと、今後 PC まくらぎの経年劣化の検知や劣化予測の検討⁴⁾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を行うことを想定していることなどから、PC まくらぎ全体を FEM でモデル化して検討することとした。

3. 検討結果

3.1 曲げ試験結果 図 3 に曲げ試験結果を示す。同図より、累積通過トン数(以下、通トンという)の増加とともに、ひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重が右肩下がりの傾向が認められる。なお、試験前にひび割れが発生していたものはひび割れ再開荷重をひび割れ発生荷重としてプロットした。プレテンション式とポストテンション式を比べると、ポストテンション式の方が耐荷力低下の度合いが大きいことがわかる。また、凍害が発生していた PC まくらぎについては、少ない通トンで JIS の規格値を下回った。これは PC まくらぎのコンクリートの材料的な劣化が原因と考えられる。

表 1 対象 PC まくらぎ (単位: 本)

形式 3 号	緊張 方法	年代							合 計
		2010	2000	1990	1980	1970	1960	1950	
3 号	プレ	7	8	19	20	43	38	0	135
	ポスト	1	3	3	0	0	23	0	30

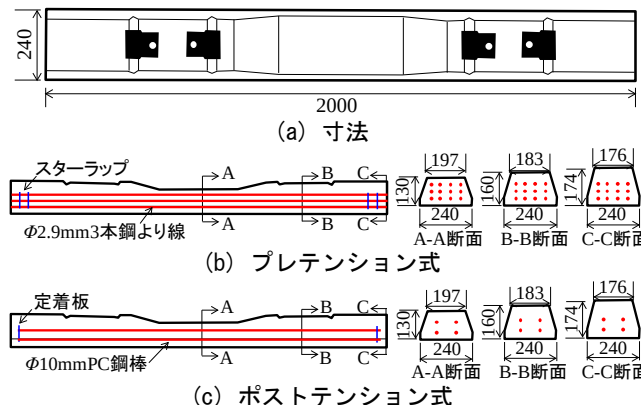


図 1 JIS-3 号 PC まくらぎの概要

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 (60.0)
プレストレス導入時強度(N/mm ²)	39.2
静弾性係数 E_c (kN/mm ²)	33.0 (43.0)
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



図 2 FEM による数値解析モデル

キーワード PC まくらぎ, 軌道, JIS, 経年劣化, プレテンション, ポストテンション

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学研究室 TEL042-573-7290

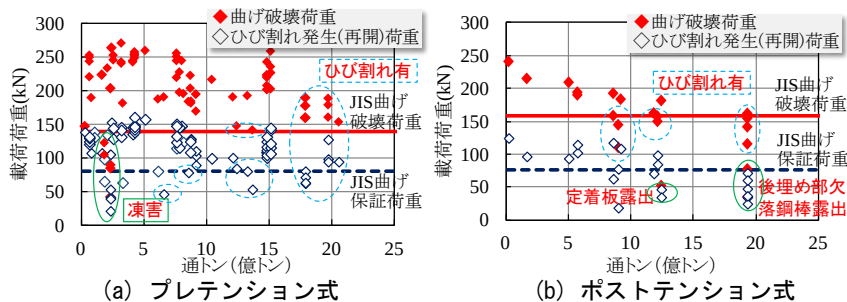


図3 JIS-3号PCまくらぎの曲げ試験結果

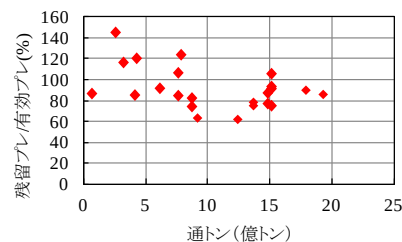


図4 残留プレストレス試験結果(3PR)

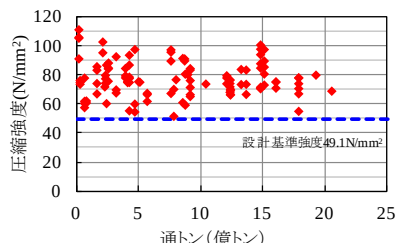


図5 コア圧縮試験結果

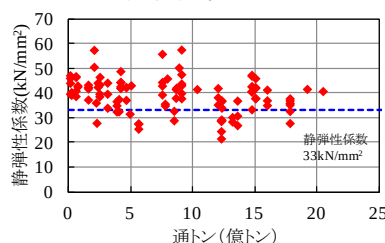


図6 静弾性係数試験結果

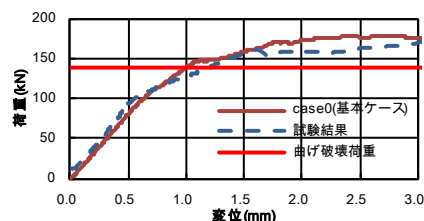


図7 PCまくらぎの荷重変位曲線(正曲げ)

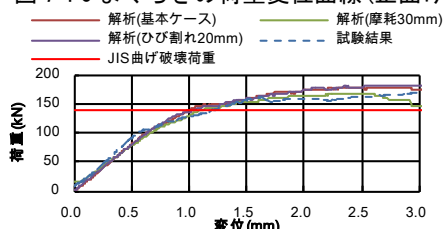


図8 摩耗・ひび割れの影響(正曲げ)

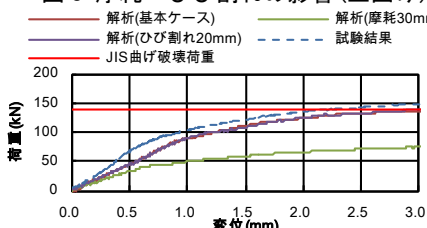


図9 摩耗・ひび割れの影響(負曲げ)

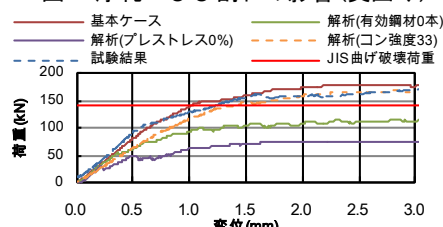


図10 PC鋼材・コンクリートの影響

3.2 残留プレストレス試験 図4に残留プレストレス試験結果を示す。3号プレテンション式について例示した。図より、残留プレストレス力は60%～150%の範囲でばらつくことがわかった。

3.3 コア圧縮強度試験および静弾性係数試験 図5および図6にコア圧縮試験および静弾性係数試験結果をそれぞれ示す。同図にはコンクリートの設計基準強度および設計標準³⁾に示される静弾性係数の値を併せて示した。前述の通り、凍害等の損傷でJISに準拠したコア供試体が採取できないPCまくらぎについては除外した。同図に示すように、コア供試体の圧縮強度はコンクリートの設計基準強度49.1N/mm²を上回った。静弾性係数についても設計標準の値33kN/mm²と概ね同等以上であった。

3.4 数値解析による耐力低下に関する検討 図7にPCまくらぎの荷重変位曲線に関する試験結果と解析結果の比較を示す。対象PCまくらぎは、経年1年の比較的新しい3号プレテンション式PCまくらぎである。図より、試験結果と解析結果は初期勾配やその後の曲線の傾きの変化など概ね一致していることがわかる。この数値解析モデルを基本ケースとし、PCまくらぎの耐力低下に関するパラメータ解析を実施した。

図8及び図9にレール位置断面(正曲げ)とPCまくらぎ中央断面(負曲げ)におけるPCまくらぎの摩耗およびひび割れが耐力低下に及ぼす影響を示す。これらの図より、レール位置断面(正曲げ)では摩耗やひび割れの影響が小さいが、PC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した。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力が低下する。

図10にPC鋼材およびコンクリートの各種諸元が耐力低下に及ぼす影響を示す。解析(プレストレス0%)とはPC鋼材の導入プレストレスが完全に無くなった状態、解析(有効鋼材0本)とは腐食などにより最外縁鉄筋がすべて有効に機能しなくなった状態、解析(コン強度33)とはコンクリート強度および静弾性係数が設計相当の値である状態を想定した。解析(プレストレス0%)および解析(有効鋼材0本)は経年PCまくらぎの実態に比べると極端な例ではあるが、PCまくらぎが健全の状態から経年とともに、PC鋼材の有効プレストレスの減少、腐食等により有効PC鋼材量の減少、コンクリート強度および静弾性係数の減少等によりPCまくらぎの耐力が低下することがわかる。実際のPCまくらぎにおける耐力低下は前述の各種パラメータの複合要因によるものと推察される。

4. まとめ 本研究で得られた知見は以下のとおりである。(1) PCまくらぎのJIS曲げ試験の結果、累積通トンの増加とともに、ひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重が小さくなる傾向にあり、その低下度合いは、プレテンション式よりもポストテンション式の方が大きいことがわかった。これはコンクリートと鋼材の付着機構などの違いによると推察される。(2) PCまくらぎのPC鋼材の残留プレストレス力は60%～150%の範囲に分布した。また、コンクリートコア強度は設計基準強度49.1N/mm²を上回ること、静弾性係数は設計標準の値33kN/mm²と概ね同等以上であることがわかった。(3) 数値解析によるPCまくらぎの耐力低下に関する検討の結果、PCまくらぎのレール位置断面では有効プレストレス力の低下、有効鋼材本数の減少が耐力の低下に大きく影響し、レール位置断面(正曲げ)では変位3mmの時点で、プレストレス0%で約57%、有効鋼材0本で約36%荷重が低下することがわかった。

今後は、解析的な検討から列車による疲労や衝撃の影響についても検討していく予定である。

参考文献 1) 須江政喜他: 既設PCまくらぎの劣化状態に関する研究, J-RAIL2014, S2-4-6, 2014.12 2) 中村貴章他: 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, 2013.9 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造)、丸善、2004 4) 松岡弘大他: 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.947-957, 2015.2