

曲線区間に敷設された経年PCまくらぎの性能評価

○ [土] 渡辺 勉 [土] 箕浦 慎太郎 [土] 後藤 恵一（鉄道総合技術研究所）

Performance evaluation of aged prestressed concrete sleepers installed in curve section

○Tsutomu Watanabe, Shintaro Minoura, Keiichi Goto, (Railway Technical Research Institute)

Since PC sleepers are easily replaced compared to civil engineering structures, there has been little systematic examination of material deterioration so far. In this research, aged sleepers specified by JIS E1201 and E1202 installed in curve sections are examined. Bending tests, concrete compressive strength tests and wear measurement tests on the bottom of the sleepers are conducted. Using these results, we propose the replacement period of the aged PC sleeper, based on the bending load capacity. Specifically, we propose as the replacement period the accumulated tonnage of 2 billion tons and 500 million tons, for 6PR-sleeper and 6PO-sleepers respectively.

キーワード: PC まくらぎ, 維持管理, 耐用期間, 経年劣化, 曲線

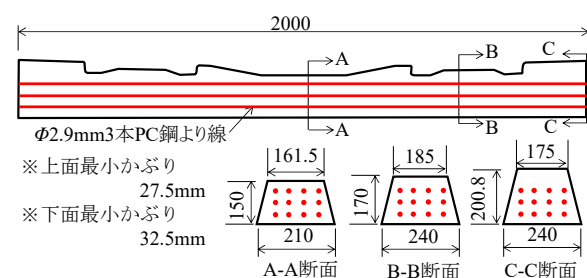
Key Words: Prestressed concrete sleeper, Maintenance, Lifetime, Aging degradation, Curve section,

1. はじめに

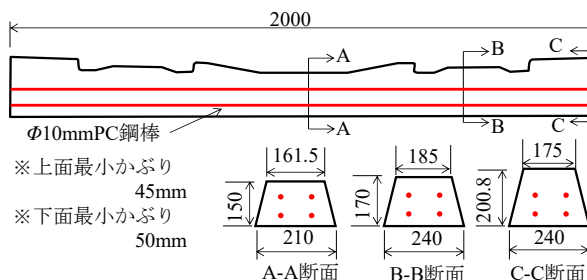
プレストレストコンクリート製のまくらぎ(以下, PC まくらぎ)は, 鉄道の高速度化や快適化に欠かすことのできない重要な構成要素である。我が国の PC まくらぎは, 1951 年に東海道線に初めて試験敷設されて以降, 現在までの累計敷設本数は国鉄, JR だけでも約 4000 万本である。PC まくらぎの設計耐用期間は一般に 50 年とされているが, 営業線においてはそれらを超えるものも出てきており, 近年では木まくらぎの交換だけではなく, 既設の PC まくらぎの交換比率も増加している。

PC まくらぎは工場製品であり, 製造時の品質確保が確実に行われるとともに, 軌道変位やレール凹凸等の各種軌道不整に起因する動的・衝撃の影響を安全側に包含する設計がなされており¹⁾, 設計耐用期間を迎えても安全性上問題なく営業線で使用されている実態がある。しかしながら, 常に列車荷重の繰返しと日照, 雨, 雪などに曝される過酷な環境に敷設されているため, コンクリートや PC 鋼材の疲労の影響, 材料的な劣化の影響などによって半永久的に使用し続けるのは不可能である。そこで, 筆者らは今後の PC まくらぎの計画的な維持管理のため, 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^{1)~4)}。具体的には, 現在営業線に敷設されている PC まくらぎを幅広く収集し, 今後の耐荷力の変化の傾向をマクロな視点で把握することを目的に, JIS に規定される性能評価試験をベースに経年 PC まくらぎの耐荷力評価を行っている。

本研究では, これまで評価が行われていなかった JIS E1201 および JIS E1202 に規定される曲線用 PC まくらぎを対象として, 各種性能評価試験を実施し, 耐用期間の評価を行うこととした。なお, 本研究で取り扱う PC まくらぎは凍害²⁾, 塩害³⁾およびアルカリ骨材反応⁴⁾などの材料的な劣化が発生した PC まくらぎは対象外とした。



(a) 6号プレテンション式 PC まくらぎ (6PR まくらぎ)



(b) 6号ポストテンション式 PC まくらぎ (6PO まくらぎ)

図1 曲線用 PC まくらぎの概要 (単位: mm)

2. 評価方法

2.1 対象 PC まくらぎ

図 1 に本研究で対象とした曲線用 PC まくらぎの概要を示す。具体的な品形は「6 号」であり、プレテンション式(以下, 6PR まくらぎ)とポストテンション式(以下, 6PO まくらぎ)の 2 種類の 6 号 PC まくらぎを対象とした。ポストテンション式においてはアンボンド工法が採用されており, コンクリートと PC 鋼材の付着は切れている。使用鋼材は, 6PR まくらぎでは $\phi 2.9\text{mm}$ ・3 本鋼より線が 12 本, 6PO 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, 6PR まくらぎは上面最小かぶりが 27.5mm, 下面最小かぶりが 32.5mm, 6PO まくらぎは上面最小かぶりが 45mm, 下面最小かぶりが 50mm である。

6 号まくらぎは鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造⁹⁾では適合みなし仕様に規定される PC まくらぎであり, 敷設区間は半径 240m 以上 800m 未満の曲線とされている。直線用の PC まくらぎ(品型「3 号」)と比べると設計横圧が 1.5 倍(60kN)であり, まくらぎ中央断面(図 1 中の A-A 断面)で 20mm, レール位置断面(図 1 中の B-B 断面)で 10mm 程度断面高さが大きくなっている。

表 1 に試験対象とした 6PR まくらぎおよび 6PO まくらぎの経年別の本数を示す。それぞれ異なる線区から収集された経年 PC まくらぎで, 6PR まくらぎは 104 本, 6PO まくらぎは 16 本である。

2.2 JIS に規定される曲げ試験

図 2 に JIS E1201 および JIS E1202 に規定される曲げ試験の概要を示す。レール位置断面を対象とした正曲げ試験とまくらぎ中央断面を対象とした負曲げ試験を実施するものである。載荷スパンはどちらの試験も 700mm と規定されている。本試験は本来であれば PC まくらぎ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にした。なお, 本 JIS には基準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} を載荷した時にひび割れを生じないこと, 曲げ破壊荷重 P_u を載荷した時に PC まくらぎが破壊しないことを確認する。

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

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

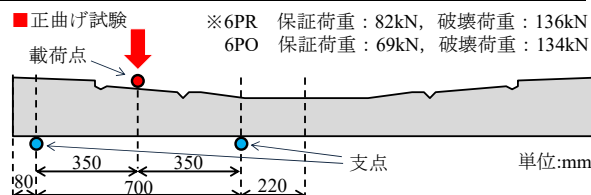
ここに σ_{CPr} は導入プレストレス力によるコンクリートの応力, f_{ia} は引張縁の許容応力度(=3N/mm²), σ_{pe} : 有効プレストレス力によるコンクリート応力(有効率 65%), Z は断面係数, L は載荷スパン(=700mm)である。

試験結果は, ひび割れ発生荷重と最大荷重で整理した。ひび割れ発生荷重とは目視でひび割れが発生したと判定した荷重, 最大荷重とは 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。

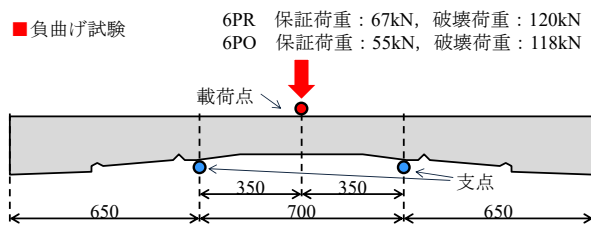
2.3 コンクリートコア圧縮強度試験および静弾性係数試験

表 1 試験対象とした PC まくらぎの経年別の本数

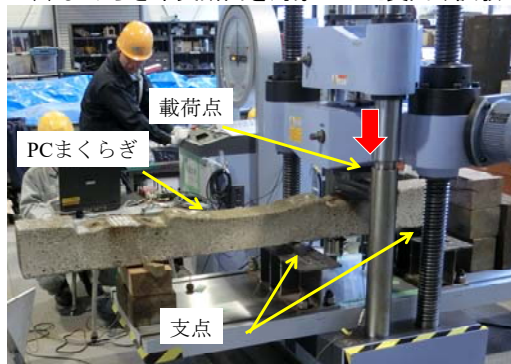
経年 (年)	~10	~20	~30	~40	~50	~60	合計
6PR(本)	0	1	0	24	79	0	104
6PO(本)	0	2	2	9	3	0	16



(a) レール位置断面を対象とした正曲げ試験

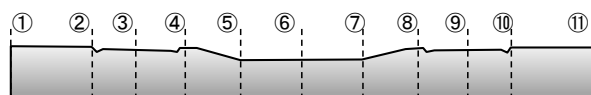


(b) まくらぎ中央断面を対象とした負曲げ試験



(c) レール位置断面を対象とした正曲げ試験の実施状況

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



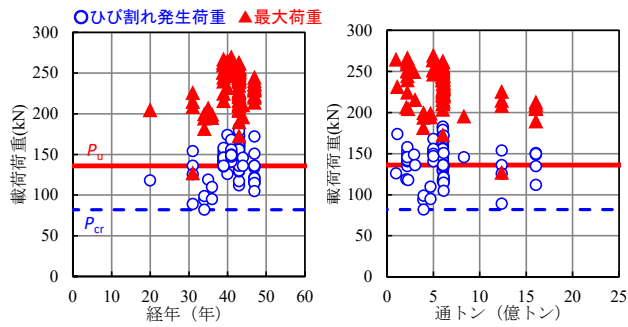
(b) PC まくらぎの底面摩耗量の測定状況

図 3 PC まくらぎの底面摩耗量の測定概要

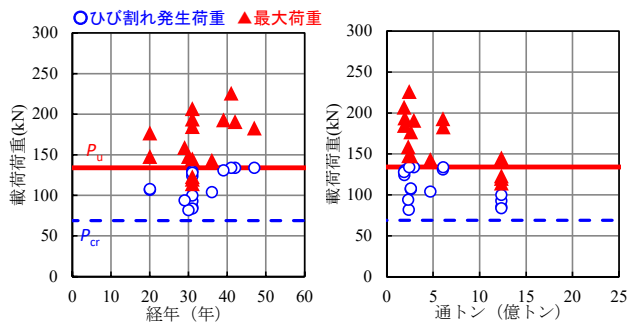
PC まくらぎのコンクリート強度と静弾性係数を求めるために, JIS A1108 に規定されるコンクリートコア圧縮強度試験および JIS A1149 に規定される静弾性係数試験を実施した。なお, 円柱供試体の直径は PC 鋼より線と干渉するため, 50mm が最大となる。小径コアの強度を直径 100mm の供試体に補正する方法も提案されているが, 本研究では小径コアで得られた値をそのまま評価に用いることとした。

2.4 PC まくらぎ底面の摩耗量測定試験

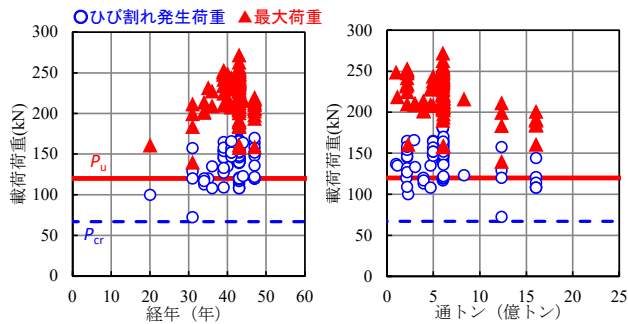
図 3 に PC まくらぎ底面の摩耗量の測定位置を示す。PC



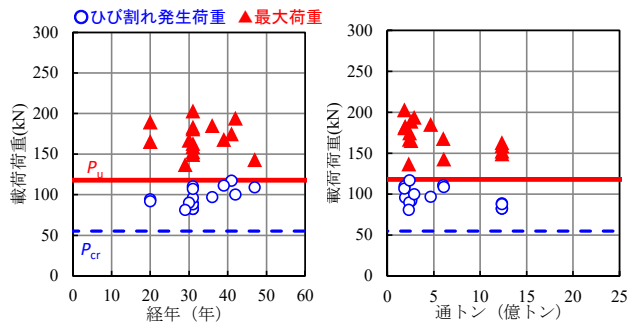
(a) 経年と載荷荷重の関係 (b) 通トンと載荷荷重の関係
図4 6PR まくらぎにおける正曲げ試験結果



(a) 経年と載荷荷重の関係 (b) 通トンと載荷荷重の関係
図5 6PO まくらぎにおける正曲げ試験結果



(a) 経年と載荷荷重の関係 (b) 通トンと載荷荷重の関係
図6 6PR まくらぎにおける負曲げ試験結果



(a) 経年と載荷荷重の関係 (b) 通トンと載荷荷重の関係
図7 6PO まくらぎにおける負曲げ試験結果

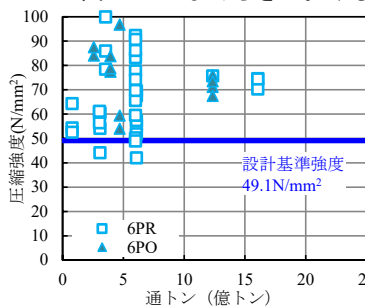


図8 圧縮強度

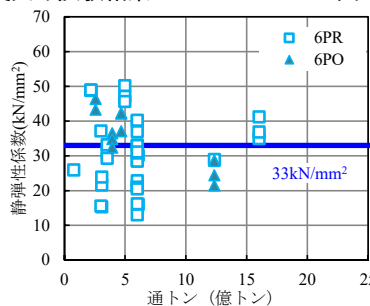


図9 静弾性係数

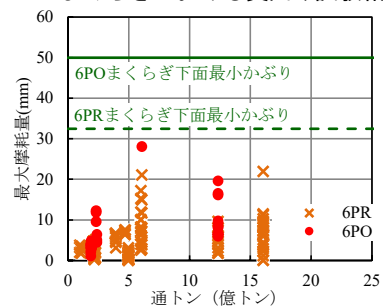


図10 PC まくらぎ底面の摩耗量

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箇所測定し、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簡易に測定した。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ですり減った状態ではなく、「欠け」と判断されるものは除外した。

3. 評価結果

3.1 JISに規定される曲げ試験

図4および図5に6PR まくらぎおよび6PO まくらぎにおける正曲げ試験結果を示す。経年と載荷荷重、累積通トンと載荷荷重の関係をそれぞれ整理した。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。図より、ひび割れ発生荷重を見るとすべてのPC まくらぎで曲げ保証荷重を上回った。最大荷重については6PR まくらぎで2本、6PO まくらぎで1本曲げ保証荷重を下回るものが見られた。また、列車荷重の繰返しによるPC 鋼材やコンクリートの疲労の影響等により、経年および累積通トン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ことが予想されたが、累積通トンについては想定通り累積通トン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、経年については、今回のサンプルでは、その傾向が明確に把握することはできないことがわかる。

図6および図7に6PR まくらぎおよび6PO 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、すべてのPC まくらぎでひび割れ発生荷重が曲げ保証荷重 P_{cr} を上回るとともに、最大荷重が曲げ破壊荷重 P_u を上回った。

3.2 コンクリートコア圧縮強度試験および静弾性係数試験

図8および図9にコンクリートコア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。ここでは、曲げ試験において、経年に伴い載荷荷重が減少する明確な傾向が見られなかったことから、通トンに着目して整理することとした。また、6PR まくらぎと6PO 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^2 と鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造⁶⁾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^2 を示した。図より、圧縮強度については大半のサンプルは設計基準強度を上回るものの、設計基準強度を下回るものも一部見られた。また、静弾性係

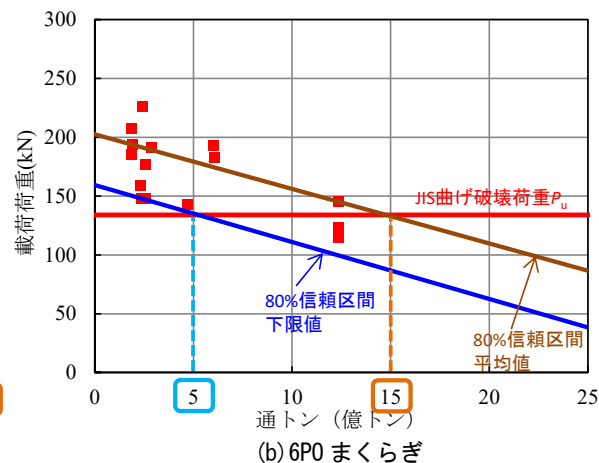
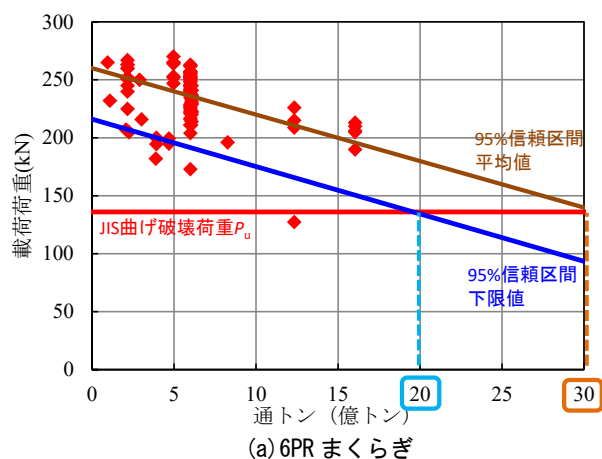


図 11 曲線用 6PR まくらぎおよび 6PO まくらぎの耐用期間の目安(レール位置の正曲げ試験結果に基づき提案)

数については 33kN/mm^2 を中心に、最大で 50kN/mm^2 程度、最小で 13kN/mm^2 程度であり、大きくばらつくことがわかる。なお、コンクリートの静弾性係数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ものである⁶⁾。

3.3 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、6PR まくらぎおよび 6PO まくらぎの底面最小かぶりを超える摩耗量は測定されなかった。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にあるが、累積通トン 6 億トン程度で 28mm 程度の摩耗が生じている箇所も見られた。

4. 評価結果に基づく曲線用 6PR まくらぎおよび 6PO まくらぎの耐用期間の目安の提案

図 11 に、3 章の評価結果に基づく曲線用 6PR まくらぎおよび 6PO まくらぎの耐用期間の目安を示す。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、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目安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 に示した結果より、経年と載荷荷重の関係を整理したところ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明確な傾向が見られなかったこと、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見られなかったこと、③圧縮強度および静弾性係数試験の結果はあくまでコンクリートコアを対象とした要素試験の結果であり、PC まくらぎ全体の性状を示す指標とは言い切れないこと、④PC 鋼線が露出するほどの摩耗量が測定されなかったことなどである。

具体的な耐用期間の目安は以下の通りである。

- ①曲げ試験結果の下限値をベースとした耐用年数の目安
 - ・6PR まくらぎは、累積通トンで 20 億トン
 - ・6PO まくらぎは、累積通トンで 5 億トン
- ②曲げ試験結果の平均値をベースとした耐用年数の目安
 - ・6PR まくらぎは、累積通トンで 30 億トン
 - ・6PO まくらぎは、累積通トンで 15 億トン

なお、6PO まくらぎについては、現在のサンプル数で

95%信頼区間を設定すると、推定区間の下限値が累積通トン 0 億トン以前で JIS 規格値を下回ったため、推定精度を 80%に緩和した。

5. まとめ

本研究では JIS E1201 および JIS E1202 に規定される曲線用 6PR および 6PO まくらぎを対象として、各種性能評価試験を実施し、マクロな視点から耐用期間の目安の提案を試みた。具体的には以下の通りである。

- ①曲げ試験結果の下限値をベースとした耐用期間の目安
 - ・6PR まくらぎは、累積通トンで 20 億トン
 - ・6PO まくらぎは、累積通トンで 5 億トン
- ②曲げ試験結果の平均値をベースとした耐用期間の目安
 - ・6PR まくらぎは、累積通トンで 30 億トン
 - ・6PO まくらぎは、累積通トンで 15 億トン

今後はサンプル数を増やし、精度向上を図るとともに、他品型のまくらぎへの展開や凍害、塩害地域などの特殊環境下に敷設された PC まくらぎの耐用年数についても検討を進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) 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, Vo.64, No.4, pp.49-52, 2018.4
- 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, プレストレストコンクリート工学会第 28 回シンポジウム論文集, pp.377-382, 2019.11
- 3) 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, プレストレストコンクリート工学会第 29 回シンポジウム論文集, pp.377-382, 2020.11
- 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) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, 2012.1
- 6) 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