

PC まくらぎの維持管理に関する最近の研究

渡辺 勉^{*1}・箕浦 慎太郎^{*2}・松岡 弘大^{*3}・後藤 恵一^{*4}

わが国の PC まくらぎは 1951 年から試験敷設が開始されたが、近年では設計上の耐用年数である 50 年を超えるものが増えてきており、定量的な健全度判定基準や交換基準に基づく効率的な維持管理手法の構築が求められている。本稿では、これまで筆者らが実施した PC まくらぎの維持管理に関する研究の概要を紹介する。具体的には、PC まくらぎの主な変状、営業線から経年 PC まくらぎを幅広く収集しマクロな視点から耐用期間を提案した事例や変状の生じた PC まくらぎの性能評価を行った事例などを紹介する。また、目視では確認できないひび割れの検知を目的とした PC まくらぎの打音検査手法についても紹介する。

キーワード：PC まくらぎ、維持管理、鉄道、打音検査

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。わが国の 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¹⁾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ものと想定される。

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限られている。このた

め、たと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に、今後の PC まくらぎの維持管理は、耐荷性能とリンクした定量的な健全度判定基準や交換基準に基づき計画的に実施することが望ましい。

このような背景から筆者らは、今後新たな維持管理体制の構築のため、経年 PC まくらぎの実態調査や交換基準に関する研究を進めている^{2~7)}。本稿では、これまで筆者らが実施した PC まくらぎの維持管理に関する研究や新たに開発した打音検査手法の概要について紹介する。なお、PC まくらぎの交換理由には、PC まくらぎとレールを締結するための部材であるレール締結装置や埋込栓の不良も含まれるが、本稿では対象としないこととする。

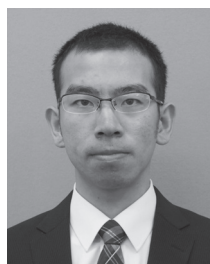
2. PC まくらぎの経年劣化による変状

PC まくらぎは基本的に土木コンクリート構造物と同じ変状が生じる。図 - 1 には PC まくらぎに生じる主な変状の例を示した。図 - 1 (a) は PC まくらぎの表面に発生した各種ひび割れであり、曲げひび割れは車輪やレールの表面の凹凸に起因する衝撃荷重により発生する。また、縦ひ



*1 Tsutomu WATANABE

(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部 主任研究員



*2 Shintaro MINOURA

(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部
副主任研究員



*3 Kodai MATSUOKA

(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部
副主任研究員



*4 Keiichi GOTO

(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道力学研究部 主任研究員



図 - 1 PC まくらぎに生じる主な変状の例

ひび割れはアルカリ骨材反応やエトリンガイトの遅延生成、剥落、スケーリングや微細ひび割れは凍害により発生する。凍害による変状は、とくに AE 剤を使用せずに製造されたプレテンション式の PC まくらぎが寒冷地に敷設された場合に多く見られる変状である³⁾。AE 剤未使用の理由は、PC 鋼より線とコンクリートとの付着力の低下や強度発現の遅れなどに対する懸念であるが、1990 年に JIS E1201 に空気量が規定され、現在では AE 剤が用いられておりプレテンション式の PC まくらぎの耐凍害性は改善されている。

図 - 1 (b) は PC まくらぎの摩耗である。PC まくらぎの摩耗は、列車通過時の動的・衝撃的な作用によって PC まくらぎとバラストの相対運動（擦れる、衝突）により発生する。

図 - 1 (c) はポストテンション方式の PC まくらぎに見られる特有の変状である。具体的には、後埋めモルタルの欠落やかぶり不足などにより支圧板が腐食したことによる端部コンクリートのひび割れ・欠落である。

これらの PC まくらぎに生じうる変状に対し、鉄道総研では『コンクリートまくらぎの健全度の判定手引き』⁸⁾を発刊しており、PC まくらぎの状態に応じた変状原因の検討、健全度のランク付け、変状に対する措置の方法の検討などが行えるようになっている。

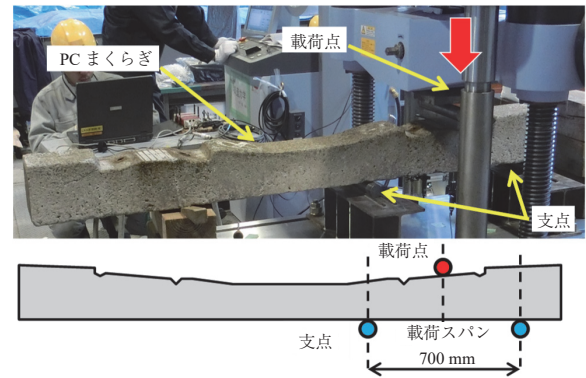


図 - 2 JIS E1201 に規定される曲げ試験の概要

表 - 1 対象とした PC まくらぎの年代別本数

まくらぎ 種別	年代							合計
	2010	2000	1990	1980	1970	1960	1950	
3号	7	8	19	20	43	38	0	135

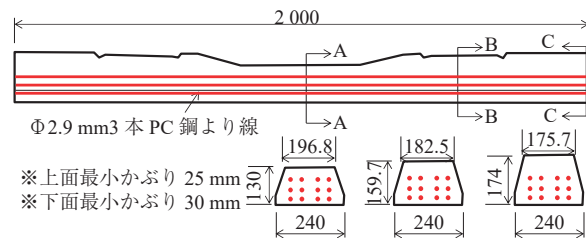


図 - 3 対象とした直線用 PC まくらぎ (3号) の構造概要

3. 経年 PC まくらぎの性能評価

3.1 評価方法

PC まくらぎの維持管理では PC まくらぎ 1 本 1 本の性能を把握し管理することが理想的であるが、現時点ではそこまでの技術レベルに達していないのが実態である。そこで、営業線に敷設された経年 PC まくらぎを幅広く収集し、PC まくらぎの性能をマクロな視点から評価することとした。具体的な評価方法は、図 - 2 に示す JIS E1201 に規定される曲げ試験とした。この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、この試験以外に 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、本試験方法を経年 PC まくらぎの評価に準用した。試験結果は、ひび割れ発生荷重と最大荷重で整理した。なお、本 JIS にはそれぞれの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。

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

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

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_{ta} は引張縁の許容応力度 ($= 3 \text{ N/mm}^2$)、 σ_{pc} : 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（=700 mm）である。

3.2 一般環境に敷設された PC まくらぎの性能評価

(1) 対象まくらぎ

表 - 1 および図 - 3 に対象とした PC まくらぎを示す。JIS E1201 に規定される直線用 PC まくらぎ（3号まくらぎと呼ばれる）135 本を対象とし、前述の曲げ試験を実施した。緊張方式はプレテンション方式である。敷設区間は凍害や塩害などの危険度が低い一般的な環境である。

(2) 曲げ試験結果に基づく耐用期間の検討

図 - 4 に曲げ試験結果に基づく PC まくらぎの累積通トンと載荷荷重の関係を示す。なお、累積通トンとは PC まくらぎ上を通過する列車の重量の総和であり、線区によって大きく異なるが首都圏では年間 2000 万トンを超える高密度線区もある。図 - 4 より PC まくらぎごとにばらつくが、累積通トンの増加とともにひび割れ発生荷重および最大荷重が低下する傾向にあることが分かる。

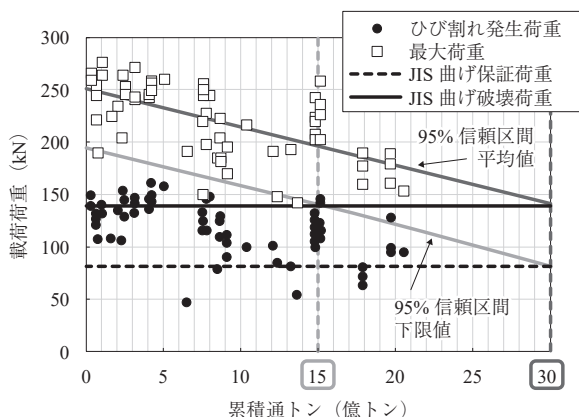


図 - 4 PC まくらぎの曲げ試験結果
(載荷荷重と通過トン数の関係)

これらの試験結果に基づき、PC まくらぎの耐用期間の提案を試みた。具体的には、ひび割れ発生荷重と最大荷重が指標となるが、ここでは最大荷重に着目することとし、図 - 4 に示すように、最大荷重に関する試験結果の 95% 信頼区間の平均値および下限値を示す近似直線を求めた。次に、それらの直線が JIS の規格値である曲げ破壊荷重を下回る累積通トンを耐用期間とすることとした。図 - 4 より、曲げ試験結果の下限値をベースとすると 15 億トン、平均値をベースとすると 30 億トンが耐用年数の目安となることが分かる。JIS の規格値を下回ったとしてもただちに安全性上の問題が発生するわけではないと考えられるが、これらの具体的かつ定量的な累積通トン数を目安に交換計画を策定することが可能である⁹⁾。なお、本稿では紹介を省略したが PC まくらぎの経年に基づいて耐用年数を設定することも可能である²⁾。

3.3 縦ひび割れの発生した PC まくらぎの性能評価

(1) 対象まくらぎ

本節では縦ひび割れが発生した PC まくらぎを対象に評価を実施した。図 - 5 に縦ひび割れ発生状況の例を示す。縦ひび割れは上面だけではなく、側面、底面にも発生して

おり、PC 鋼材に到達しているものも見られる。

(2) ひび割れ発生状況に対応した健全度判定

既往の研究⁶⁾より縦ひび割れの有無による曲げ試験結果に及ぼす影響は小さいことが明らかとなっている。このため、図 - 4 を参考に交換計画を検討可能であるが、これに加えてひび割れによる PC 鋼線の腐食も懸念されることから、ひび割れの幅と深さの評価が重要である。そこで、図 - 6 に示すようにひび割れ幅と深さの関係を整理し、これに基づきひび割れ幅に応じた健全度判定指標の例を表 - 2 のように提案した。これにより、ひび割れ幅に応じた措置の方法を検討することが可能である。ただし、本指標を適用する際には、現場の PC まくらぎを確認する必要があり、今後は効率的にひび割れ状態を把握する手法の開発が望まれる。

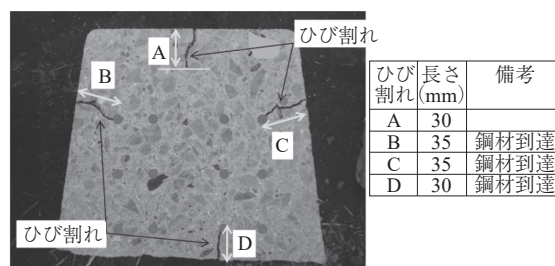


図 - 5 PC まくらぎ断面内の縦ひび割れの発生状況の例

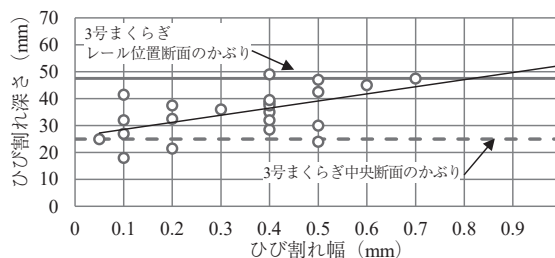


図 - 6 ひび割れ幅とひび割れ深さの関係

表 - 2 縦ひび割れが発生した PC まくらぎの健全度判定指標の例

健全度	判定基準の例		措置の例
	ひび割れ幅 W (mm)	状態	
A	$W \geq 0.5$	連続的に縦ひび割れ 端部に亀甲状ひび割れ	交換を計画
B	$0.5 > W \geq 0.05$	上面や側面に縦ひび割れ	交換（中央断面の場合）を計画 経過観察
C	$0.05 \geq W$	ヘアークラック程度	経過観察
S	健全		

3.4 AE 剤未使用の PC まくらぎの凍害に対する性能評価

(1) 対象まくらぎ

本節で対象とした PC まくらぎは凍害危険度が高い地域に敷設された AE 剤未使用の PC まくらぎを対象とした。2 章で示したとおり PC まくらぎの凍害は、AE 剤未使用のコンクリートを用いて製造された PC まくらぎが寒冷地に敷設された場合に散見されている。図 - 7 に凍害により変状が生じた PC まくらぎの例を示すが、変状の程度はさまざまである。

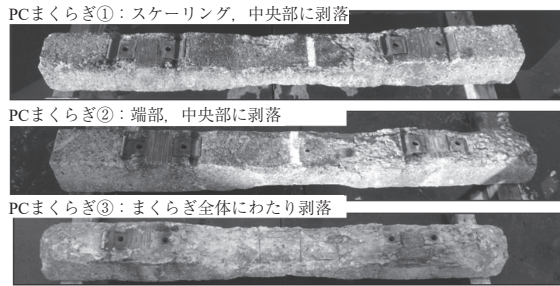


図 - 7 凍害により変状が生じた PC まくらぎの例

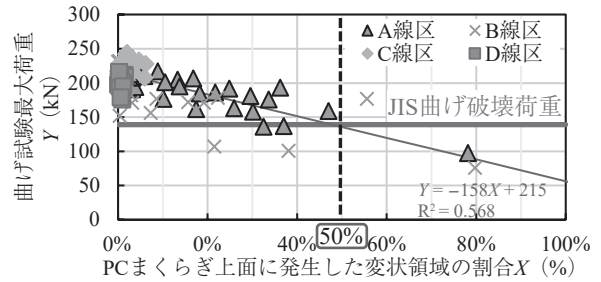


図 - 8 変状領域の割合と曲げ試験時の最大荷重との関係

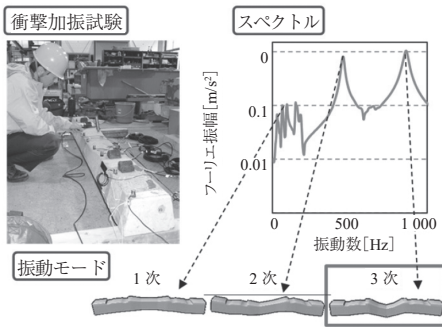


図 - 9 PC まくらぎの振動モード

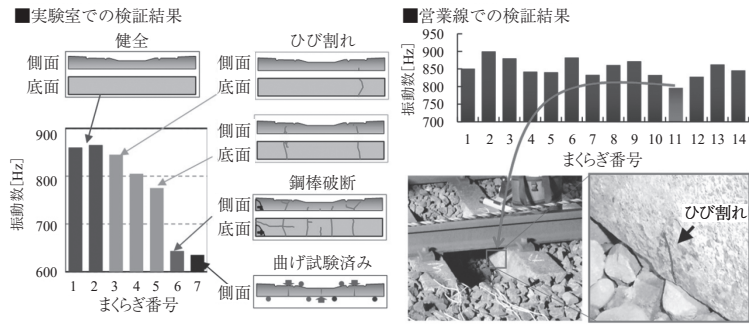


図 - 10 PC まくらぎの打音検査手法の妥当性の検証結果

(2) 凍害による変状領域の割合に対応した健全度判定

凍害による変状は気温や日射などの敷設環境を大きく受けるため、3.1で示したような累積通トン、あるいは経年で耐用期間を評価するのは難しいと考えられる⁴⁾。そこで、PC まくらぎ上面に発生した凍害に起因する剥落、スケールリング、微細ひび割れなどの変状が生じた領域の割合とPC まくらぎの曲げ試験における最大荷重の関係を図-8のように整理した。図-8より、両者には相関性が見られるとともに、凍害による変状がPC まくらぎ上面の50%以上で見られるようになるとJISの規格値である曲げ破壊荷重を下回ることが分かる。これを指標とすれば、凍害が発生したPC まくらぎについては変状領域の割合に応じた健全度判定が可能となる。ただし、本指標を適用する際には、3.3の縦ひび割れのケースと同様に、現場のPC まくらぎを確認する必要がある、今後は効率的にPC まくらぎ上面の状態を把握する手法の開発が望まれる。

4. PC まくらぎの打音検査手法

図-1(a)に示したレール位置断面に発生した曲げひび割れは、PC まくらぎがバラストに埋まっているため、バラストをかき出さないかぎり目視では発見できない変状である。このような目視では確認できないひび割れを検知するため、筆者らは打音による検査手法に関する検討を行っている¹⁰⁾。

図-9にPC まくらぎの振動モードを示す。本手法はPC まくらぎの3次モードの固有振動数が曲げひび割れの発生により低下することに着目したものであり、その妥当性は図-10に示すように実験室のみならず営業線においても実証されている。本手法を用いることにより、PC まくらぎの健全度を定量的に評価することが可能である。

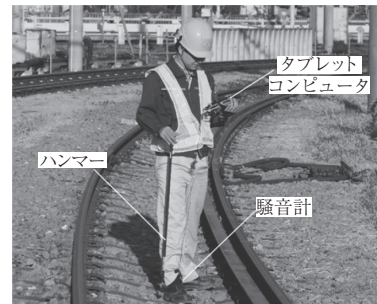


図 - 11 PC まくらぎの打音検査のイメージ

図-11に本手法を実務で適用する場合を想定した打音検査のイメージを示す。装置の構成は長尺のハンマ、ズボンの裾に取り付けたマイクおよびタブレットコンピューターであり、PC まくらぎの打撃、打音収録などの作業を立ったまま進めることが可能である。現在はさまざまな環境下で打音検査を実施し、実用化に向けた課題点の抽出、検証などを行っている。

5. おわりに

本稿では、PC まくらぎの維持管理に関する筆者らの研究概要や新たに開発した打音検査手法について紹介した。PC まくらぎの耐荷力が累積通トン数の増加に伴い低下するマクロな傾向や変状に対応した劣化傾向などの定量化、さらには打音検査手法の開発など、PC まくらぎの維持管理を取り巻く個々の現象解明は進みつつある。定量的な健全度判定基準や交換基準に基づく新たな維持管理体系の構築に向けて、今後も研究の深度化を図っていく所存である。なお、本研究の遂行には鉄道事業者各社様の多大なるご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 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.236-237，2007.3
- 2) 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
- 3) 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.377-382，2019.11
- 4) 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.
- 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.161-166，2020.11
- 6) 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.
- 7) 箕浦慎太郎，渡辺 勉，鈴木大輔，上半文昭：営業線 PC まくらぎの摩耗性譲渡その耐荷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.
- 8) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター：コンクリートまくらぎの健全度の判定手引き，2015.6
- 9) 渡辺 勉，箕浦慎太郎，後藤恵一：曲線区間に敷設された経年 PC まくらぎの性能評価，第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2020），S2-1-6，2020.12
- 10) 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，Vol.74，No.3，pp.158-175，2018.

【2020 年 12 月 24 日受付】

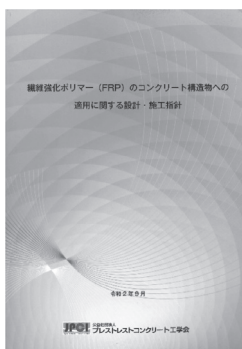


新刊案内

繊維強化ポリマー（FRP）のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針

令和 2 年 9 月

コンクリート構造物の耐久性を向上させるため，腐食が生じない繊維強化ポリマー（FRP）を鉄筋あるいは PC 鋼材の代替材料として適用することが求められてきています。本工学会では，「繊維強化ポリマーのコンクリート構造物への適用に関する委員会」（委員長：睦好宏史 埼玉大学）を 2017 年に設置し，指針の策定に取り組んでまいりました。本指針は，1996 年に刊行された土木学会の指針（案）に基づいて，わが国や欧米の最新の研究成果および本工学会が 2019 年に刊行した「コンクリート構造技術規準－性能創造による設計・施工・保全－」を新たに取り入れたものです。実橋を対象とした試設計，LCC 比較，品質規格試験および各繊維強化ポリマーの特性（炭素，アラミド，ガラス，バサルト）についても詳述されており，最新の技術指針となりますので，是非ご活用ください。



1章	総則
2章	設計，施工，保全の基本事項
3章	材料
4章	作用
5章	性能照査
6章	終局限界状態に対する検討
7章	供用限界状態に対する検討
8章	疲労限界状態に対する検討
9章	耐久性に関する検討
10章	耐震に関する検討
11章	構造細目
12章	施工
13章	保全

<参考資料>

1章	試設計例
	・PC床版
	・PC桁橋3例
	・LCC試算
2章	品質規格・試験
3章	技術資料
	・材料諸元・特性値一覧
	・CFRP ケーブル・ロッド
	・CFRP 格子筋
	・AFRP 異形ロッド
	・AFRP 組紐ロッド
	・BFRP 異形ロッド

（全 356 ページ）

定 価 9,240 円 (税込) / 送料 500 円
 会員特価 7,700 円 (税込) / 送料 500 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会