

経年した新幹線用 PC まくらぎの荷重環境の実態調査と  
曲げ耐荷力の評価

渡辺 勉\* 箕浦 慎太郎\* 後藤 恵一\*\*

Survey of Load Condition and Evaluation of Bending Load Capacity  
of Aged Shinkansen Prestressed Concrete Sleeper

Tsutomu WATANABE Shintaro MINOURA Keiichi GOTO

In order to quantify the actual load condition of the prestressed concrete (PC) sleeper for high-speed trains, field measurement tests and numerical analyses were conducted on PC sleepers. As a result, it was clarified that the loading condition of the PC sleepers had a margin of safety compared to the design limit value for cracking due to bending. In addition, the results of the bending tests of the PC sleepers specified in Japanese industrial standard showed that the load capacity of the PC sleepers tends to decrease with age. Although the load capacity of PC sleepers over 50 years old met the standard value of bending fracture load, in some cases this was lower than the standard value of flexural proof load of crack.

キーワード：PC まくらぎ，維持管理，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）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部材である。我が国の 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 まくらぎの設計耐用年数は一般に 50 年とされているが、それを超えて使用されている PC まくらぎが増加しており、PC まくらぎの余寿命評価<sup>1)</sup>や維持管理<sup>2) 3)</sup>に関する研究が進められている。ただし、これらは主に最高速度 160km/h 以下の鉄道（以下、在来線）を対象としたものであり、高速走行する新幹線用の PC まくらぎに関する調査や研究はこれまで数例しかなく<sup>4) 5) 6)</sup>、最新の知見が整理されているとはいえないのが実情である。また、新幹線は毎日始発列車の運行前に保守用車を走行させ、在来線に比べてきめ細かい線路の点検作業が行われているが、PC まくらぎの健全度判定は依然として外観目視が基本であり<sup>7)</sup>、PC まくらぎの耐荷性能等とは必ずしもリンクしない手法が用いられている。このような状況から近年では、PC まくらぎ上面に発生したひび割れとレール締結装置の埋込栓の引抜耐力との相関性に着目し、深層学習を活用してひび割れ長さを自動検出するとともに、埋込栓の引抜耐力を評価する手法に関する検討も始められている<sup>8)</sup>。

一方、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、ある時期において、既設の経年 PC まくらぎに耐荷性能を満足しないもの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、実質的な耐用期間を定量的に定め、計画的に維持管理していくことが望ましい。そこで、本研究では PC まくらぎの新たな維持管理体系の構築に向けて、次の点に着目して検討を行った。

(1) 営業線に敷設された PC まくらぎの曲げモーメントおよび輪重を実測し、荷重環境の実態を調査する。

\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

- (2) 数値解析により PC まくらぎのコンクリートのヤング係数, 軌道パッドのばね定数, バラスト道床のばね定数, 乗車率の各種パラメータが PC まくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響を検証する。
- (3) 既設の経年 PC まくらぎに対して JIS に規定される曲げ試験を行い, 曲げ耐力を評価する。

## 2. 新幹線用 PC まくらぎの荷重環境の実態調査

### 2.1 調査方法

#### 2.1.1 対象とした PC まくらぎ

図 1 に現地測定箇所を示す。当該箇所は、鉄筋コンクリート高架橋上のバラスト軌道（直線）であり、列車は 130～300km/h 程度で通過する。また、PC まくらぎの敷設間隔は 0.58m、レールは 60kg レール(JIS E1101)である。

図 2 に対象とした PC まくらぎを示す。対象とした PC まくらぎは JIS E1201 に規定される PC まくらぎ（品形：3T）であり、PC まくらぎの長さは 2400mm、レール位置断面およびまくらぎ中央断面の大きさはそれぞれ 190mm および 175mm である。また、コンクリートの設計基準強度は 49.1N/mm<sup>2</sup>、PC 鋼より線は  $\phi$ 2.9mm 異形 3 本鋼より線が用いられている。設計においては、列車走行に伴う動的成分を考慮した変動輪重係数を 2 として静止輪重 80kN に乗じた輪重 160kN を設計輪重とし、それに対して断面フルプレストレスを満足するように設計されており、レール位置断面における設計デコンプレッションモーメントは 10.95kN・m、鋼材の降伏モーメントは 32.36kN・m である。

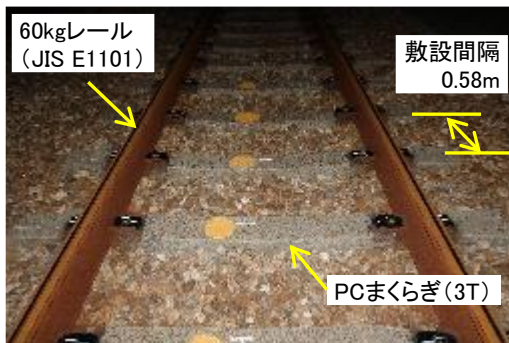


図 1 現地測定箇所（バラスト軌道）

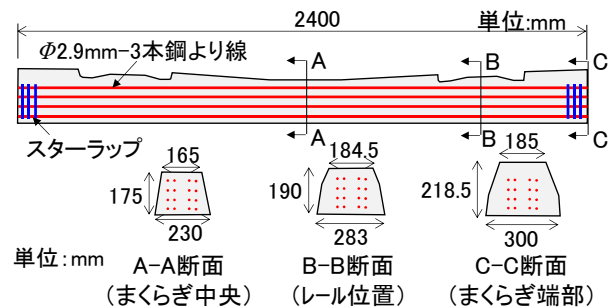


図 2 PC まくらぎ（品形：3T）

#### 2.1.2 輪重および曲げモーメントの測定手法

図 3 に輪重ゲージおよびコンクリートゲージの貼り付け状況を示す。輪重ゲージは三栄インストルメンツ製、コンクリートゲージは共和電業製のものを用いた。コンクリートゲージはレール位置断面における上縁から 20mm、下縁から 15mm 程度断面内側に添付した。このひずみから曲げモーメントに換算した。な

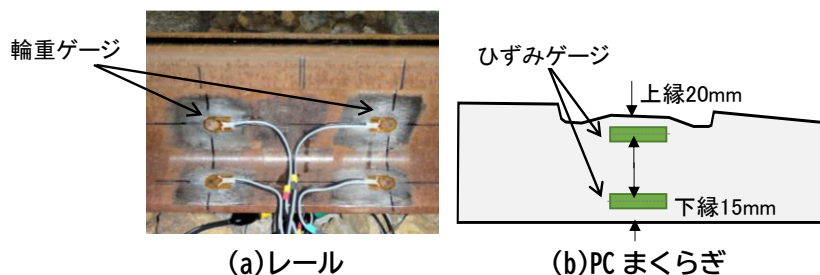


図 3 ゲージの貼り付け状況

お、PC まくらぎは連続 7 本に対して測定を実施した。また、これらのゲージは日本ナショナルインスツルメンツ製のモジュールに接続し、LAN ケーブルを介して PC にデータを収録した。データ収録プログラムは LabVIEW を用いて PC まくらぎの振動加速度をトリガーとして自動収録されるように構築した。サンプリング周波数は 10kHz である。測定した列車の本数は 3 日で合計 204 本である。

## 2.2 調査結果

図 4 に輪重および曲げモーメントの測定結果を示す。なお、曲げモーメントについてはその平均で上位 5 本のまくらぎの曲げモーメントを、5 色に色分けして表示した。輪重は最大で 68.81kN、平均で 60.56kN、PC まくらぎのレール位置断面における曲げモーメントは最大で 3.81kN・m、平均で 1.99kN・m となった。それぞれ設計値と比較すると、輪重は設計輪重 160kN に対してそれぞれ 43%、38%、曲げモーメントは設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・m に対してそれぞれ 35%、18% となり、実測値は設計値に比べて小さいことが明らかとなった。また、輪重および曲げモーメントともに速度依存性は認められないことが分かる。

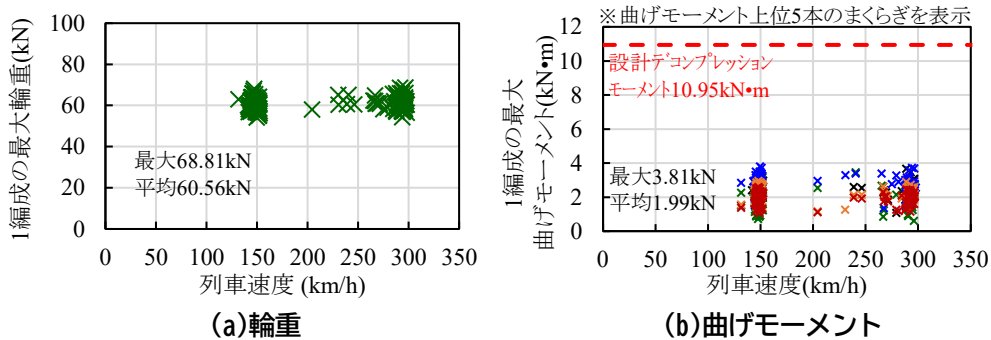


図 4 測定結果

## 3. PC まくらぎの曲げモーメントに関する数値解析による検証

### 3.1 数値解析手法

図 5 に数値解析モデルの概要を示す。ここで対象とする PC まくらぎは 2 章で対象とした PC まくらぎと同じである。数値解析には、鉄道総研が開発した車両と線路構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII<sup>9)</sup>を用いた。車両については、車体、台車、輪軸を剛体とし、それらをばねとダンパーで結合した 3 次元力学モデルであり、1 車両あたり 31 自由度を有する。車両には測定箇所を通過する車両の諸元（静止輪重 56.6kN）を与えた。乗車率は 50%とした。なお、後述する解析ケースにおける乗車率の変更は、車両を構成する車体、台車、輪軸のうち、車体の重量を増減させて行った。また、軌道については、有限要素法によりモデル化した。具体的には、レール、PC まくらぎははり要素、軌道パッドおよびバラスト道床はばね要素としてモデル化した。レールは PC まくらぎとのレール締結位置（軌道パッドで接続）間を 4 つの要素に分割、PC まくらぎは長手方向に 8 つの要素に分割した。なお、測定箇所は高架橋上であるため、高架橋のコンクリート部材は十分に剛であると思なし、バラスト道床を模擬したばね要素の下端の境界条件は固定とした。また、車輪とレール間で発生する変動力を再現するため、車輪が走行するレール頭頂面には、図 5(c)に示すように、実測したレール凹凸を与えた。レール凹凸は原田製作所製の長さ 1m のレール頭頂面粗さ測定器を用いて測定した。

表 1 に材料諸元を示す。材料定数は鉄道構造物等設計標準・同解説<sup>10) 11)</sup>に示される標準的な値を用いた。

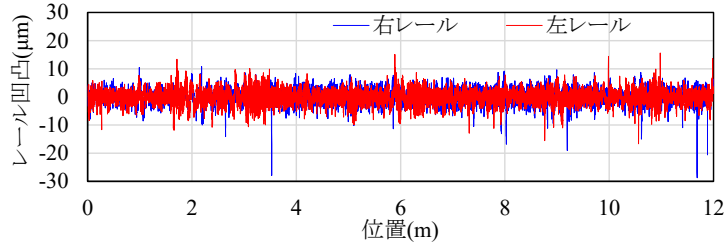
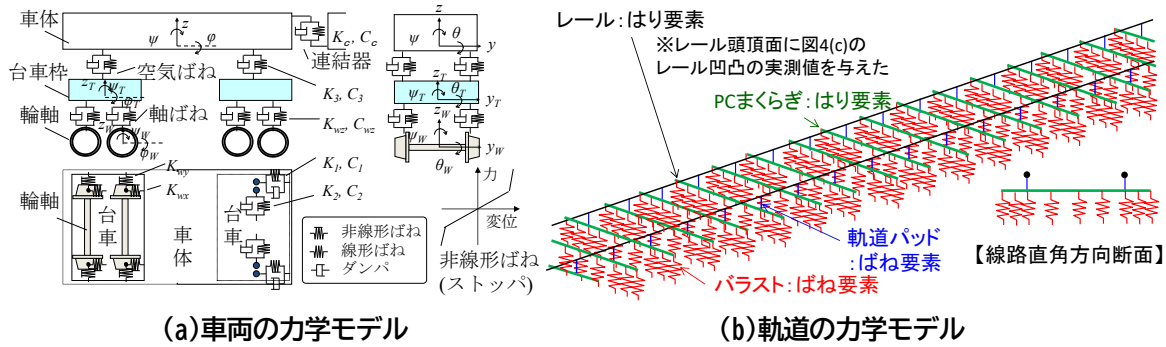


図5 数値解析モデル

表1 材料諸元

|         |  |
|---------|--|
| レール     | 60kg レール, ヤング係数: 200kN/mm <sup>2</sup>                     |
| 軌道パッド   | ばね定数: 50MN/m   |
| PC まくらぎ | 設計基準強度 49.1N/mm <sup>2</sup> , ヤング係数: 33kN/mm <sup>2</sup> |
| バラスト道床  | ばね定数: 200MN/m, 層厚: 250mm                                   |

表2 解析ケース

| パラメータ                              | 定数                             |
|------------------------------------|--------------------------------|
| コンクリートのヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 15, 24, <u>33</u> , 40, 48, 57 |
| 軌道パッドのばね定数 (MN/m)                  | <u>50</u> , 100, 150, 250, 500 |
| バラスト道床のばね定数 (MN/m)                 | 50, 100, <u>200</u> , 300, 500 |
| 乗車率 (%)                            | 0, 50, <u>100</u> , 150        |

※下線を引いた値が基本ケース

表2に解析ケースを示す。定数の変動が想定されるパラメータに着目した。具体的には、PC まくらぎのコンクリートのヤング係数、軌道パッドのばね定数、バラスト道床のばね定数、車両の乗車率をパラメータとした。これらの変動の範囲は既往の研究成果等<sup>1) 10) 11)</sup>を参考に定めた。また、軌道パッドは経年により硬化する<sup>12)</sup>ことを模擬した。なお、各パラメータの具体的な値については現実的に想定される範囲の値を包含できるように、各パラメータの上限值や下限値は想定範囲を超える値であってもあえて設定することとした。

### 3.2 数値解析による各種パラメータの影響の検証結果

図6にPC まくらぎのレール位置断面における曲げモーメントに関する解析結果と測定結果の比較を示す。数値解析と比較した実測データは、測定した204試番のうち、列車速度が300km/hで1編成の曲げモーメントのピークの値を平均したものが概ね図4(b)で示した平均値2.0kN・m程度になる試番を抽出した。図6より、解析結果と測定結果は概ね整合していることが分かる。

図7に各種パラメータがPC まくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響に関する検証結果を示す。図中の赤のプロットが基本ケースである。図7(a)より、ヤング係数の基本ケースである33kN/mm<sup>2</sup>に対して、例えば、ヤング係数が15kN/mm<sup>2</sup>になると曲げモーメントが12%低下、57kN/mm<sup>2</sup>になると6%増加した。また、図7(b)より、軌道パッドのばね定数の基本ケースである50MN/mに対して、軌道パッドのばね定数が500MN/mになると曲げモーメントが50%増加した。さらに、図7(c)より、バラスト道床のばね定数の基本ケースである200MN/mに対して、バラスト道床のばね定数が50MN/mになると曲げモーメントが4%減

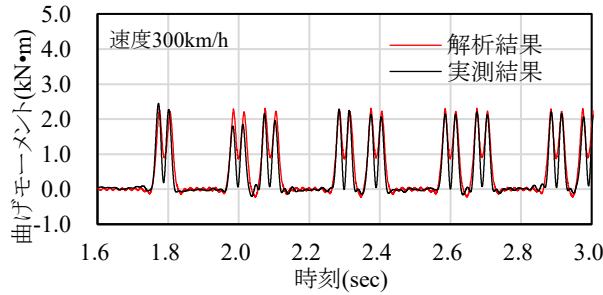


図6 解析結果と測定結果の比較

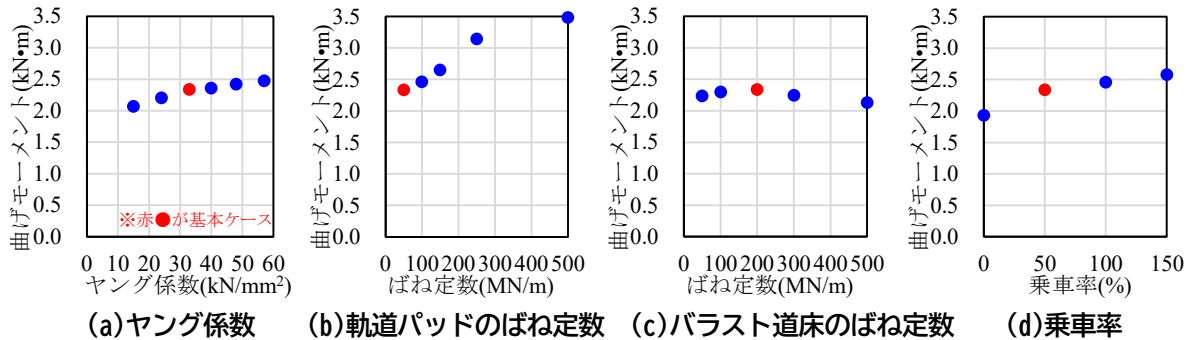


図7 各種パラメータがPC まくらぎのレール位置断面における曲げモーメントに及ぼす影響

少, 500MN/m になると 9%減少した。最後に, 図 7(d)より, 乗車率の基本ケースである乗車率 50%に対して, 乗車率が 0%になると曲げモーメントが 18%減少, 乗車率が 150%になると 11%増加した。

以上の結果より, 各種パラメータの影響で PC まくらぎに発生する曲げモーメントが変動することが分かった。今回の解析で設定した条件下においては, PC まくらぎの曲げモーメントを基本ケースよりも増大させる定数がそれぞれ重畳したとしても曲げモーメントは 4.4kN・m 程度であり, 設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・m を超える曲げモーメントが PC まくらぎに発生する可能性は低いと考えられる。

## 4. 新幹線用 PC まくらぎの曲げ耐力の評価

### 4.1 試験方法

#### 4.1.1 対象とした PC まくらぎ

PC まくらぎの曲げ耐力の評価において対象とした PC まくらぎは, 図 2 に示した品形 3T の PC まくらぎに加えて, 品形 3T と同様に JIS E1201 に規定される, 図 8 に示す品形 3H の PC まくらぎも対象とすることとした。なお, 品形 3H の PC まくらぎは 1972 年に行われた試験車両の速度向上試験の結果<sup>13)</sup>を踏まえて, 設計輪重を 300kN として設計された PC まくらぎであり, 品形 3T に比べて断面が大きくなるとともに PC 鋼より線の本数が 4 本増加している。

表 3 に対象とした PC まくらぎの経年別の本数を示す。経年は 10~60 年で, 同一の路線ではあるが, それぞれ異なる箇所に敷設されていた PC まくらぎである。品形 3T の PC まくらぎは 31 本, 品形 3H の PC まくらぎは 49 本である。

#### 4.1.2 JIS E1201 に規定される曲げ試験

図 9 に JIS E1201 に規定される曲げ試験の概要を示す。レール位置断面の正曲げ試験とまくらぎ中央断面の負曲げ試験を実施するものである。载荷スパンは 700mm である。本試験は PC まくらぎの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

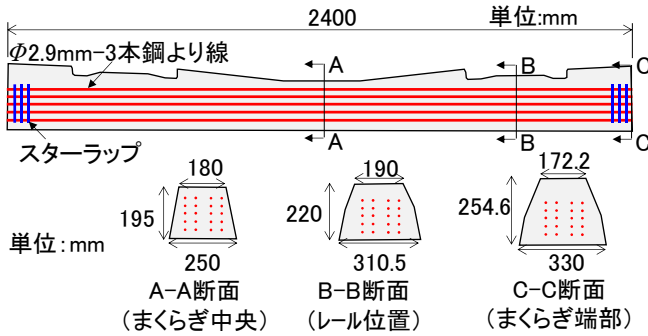


図8 PCまくらぎ(品形:3H)

表3 対象としたPCまくらぎの経年別本数

| 経年(年) | ~10 | ~20 | ~30 | ~40 | ~50 | ~60 | 合計 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 3T(本) | 0   | 3   | 2   | 14  | 8   | 4   | 31 |
| 3H(本) | 0   | 6   | 6   | 18  | 19  | 0   | 49 |

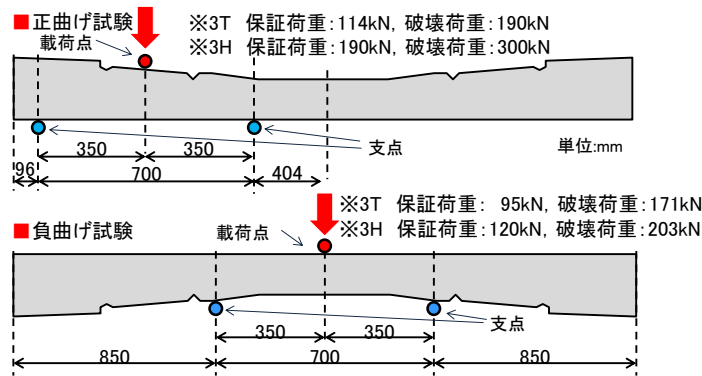


図9 JIS E1201に規定される曲げ試験

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 PC まくらぎの評価に準用することとした。試験実施においては、PC まくらぎの載荷点および支点に該当する位置にマーキングを行い、PC まくらぎの据え付け位置がばらつかないように配慮した。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る。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。

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

$$P_u = 4 \times 3\sigma_{pe} \times Z/L \tag{2}$$

ここに  $\sigma_{CPr}$  は導入プレストレス力によるコンクリート応力、 $f_{ta}$  は許容引張応力度 ( $=3\text{N/mm}^2$ )、 $\sigma_{pe}$  は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 ( $=700\text{mm}$ ) である。品形 3T の PC まくらぎの曲げ保証荷重  $P_{cr}$  および曲げ破壊荷重  $P_u$  の具体的な値は、レール位置の正曲げではそれぞれ 114kN、190kN、まくらぎ中央の負曲げではそれぞれ 95kN、171kN、品形 3H の PC まくらぎのレール位置の正曲げではそれぞれ 190kN、300kN、まくらぎ中央の負曲げではそれぞれ 120kN、203kN であり、品形 3T に比べて品形 3H の PC まくらぎの方が値が大きい。また、試験結果は、ひび割れ発生荷重と終局荷重についてそれぞれ経年と累積通過トン数 (以下、累積通トン) で整理した。これは、PC まくらぎの経年が同じであっても、線区によって通過する列車本数が異なるため、経年だけではなく累積通トンでも評価することとした。ひび割れ発生荷重は目視でひび割れが発生したと判定した荷重、終局荷重は 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とした。

### 4.2 試験結果

図 10 から図 13 に曲げ試験の結果をそれぞれ示す。同図には、前述の曲げ保証荷重と曲げ破壊荷重も合わせて示した。図より、経年や通トンの増加とともにひび割れ発生荷重や終局荷重が低下する傾向が認められる。この傾向は在来線用の PC まくらぎ<sup>1)</sup>と同様の傾向である。また、JIS に規定される曲げ保証荷重および曲げ破壊荷重と比べると、品形 3T の PC まくらぎでは、今回試験したすべての PC まくらぎでそれらの値を満足した。一方、品形 3H の PC まくらぎでは、終局荷重については今回試験したすべての PC まくらぎで JIS に規定される曲げ破壊荷重を満足したが、レール位置断面の正曲げ試験におけるひび割れ発生荷重では、49 本中、経年が 48 年の 2 本（約 4%）の PC まくらぎで満足しない結果となった。さらに、これらの図の右の軸には PC まくらぎに発生する曲げモーメントを示したが、図 6 で示した実際の列車通過時に PC まくらぎに発生する曲げモーメントは、曲げ試験時におけるひび割れ発生荷重に対しては 10 倍程度、破壊荷重に対しては 16 倍程度小さい値であることが分かる。

以上より、現時点では JIS の曲げ破壊に関する規格値を満足しており、直ちに安全性に影響を及ぼす状態ではないと考えられる。ただし、経年や通トンの増加とともに曲げ耐力が低下する傾向にあり、冒頭で述べた通り、ある時期において、耐荷性能を満足しないものが急増かつ連続的に発生することを避けるため、今後は実質的な耐用期間を定量的に定め、計画的な維持管理体系に移行していくことが望まれる。なお、品形 3T に比べて品形 3H の PC まくらぎの方が、定性的ではあるが、特に正曲げ試験において終局荷重にばらつきが大きく、低下の程度も大きい。このような品形の違いが曲げ耐力の低下に及ぼす影響については、敷設環境の違いなどが想定されるが、それらの検証は今後の課題としたい。

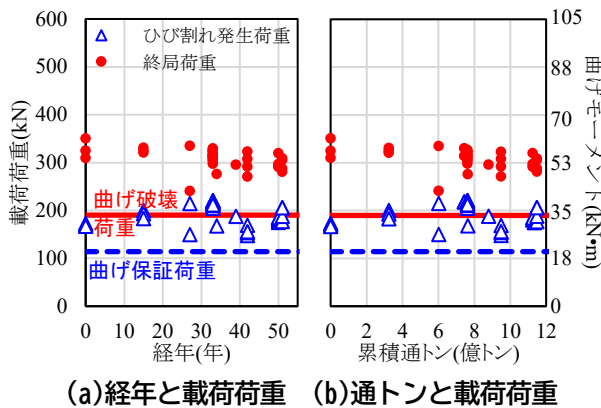


図 10 品形 3T の PC まくらぎの正曲げ試験結果

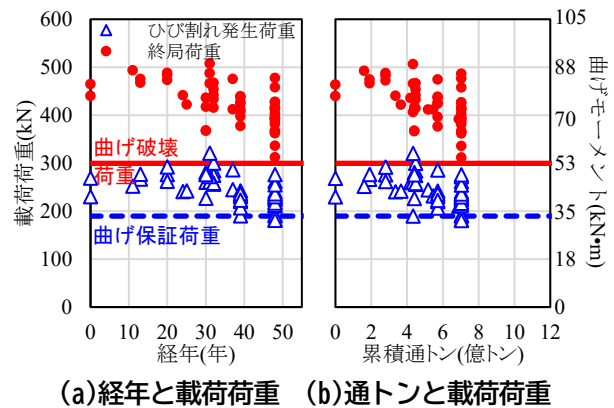


図 11 品形 3H の PC まくらぎの正曲げ試験結果

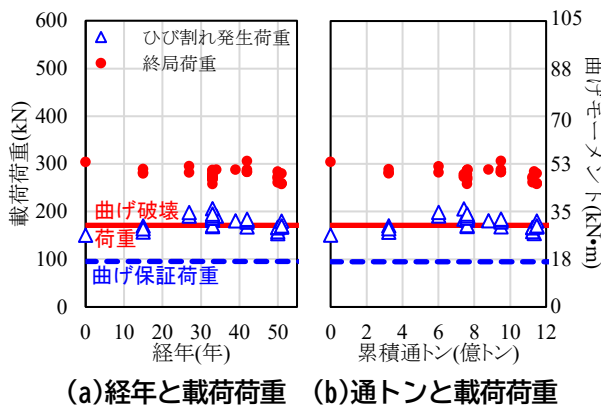


図 12 品形 3T の PC まくらぎの負曲げ試験結果

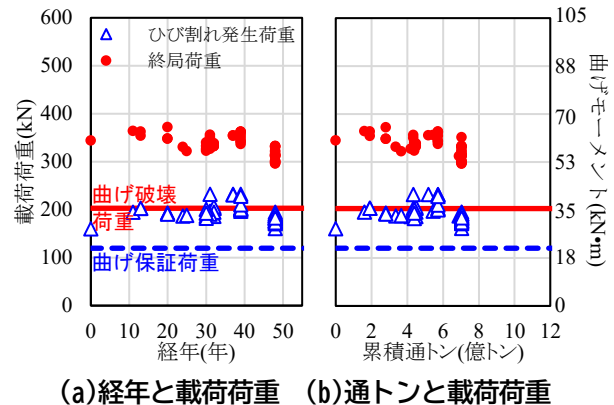


図 13 品形 3H の PC まくらぎの負曲げ試験結果

## 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) PC まくらぎに作用する輪重および発生する曲げモーメントを実測した結果、今回実測した範囲内では、輪重は最大 68.81kN (対設計値 43%)、平均 60.56kN (38%)、曲げモーメントは最大 3.81kN・m (対設計デコンプレッションモーメント 35%)、平均 1.99kN・m (18%) となり、実測値は設計値に比べて小さいことが分かった。また、輪重および曲げモーメントともに速度依存性は認められないことが分かった。
- (2) 数値解析により各種パラメータが PC まくらぎの曲げモーメントに及ぼす影響を検証した結果、今回の解析で設定した条件下においては、PC まくらぎの曲げモーメントを基本ケースよりも増大させる定数がそれぞれ重畳したとしても、設計デコンプレッションモーメント 10.95kN・m を超える曲げモーメントが PC まくらぎに発生する可能性は低いと考えられる。
- (3) 既設の経年 PC まくらぎに対して JIS の曲げ試験を行った結果、在来線の PC まくらぎに関する既往の研究と同様に、経年や通トンの増加とともにひび割れ発生荷重や終局荷重が低下する傾向が認められた。また、PC まくらぎのレール位置断面における正曲げ試験において JIS のひび割れ保証に関する規格値を満足しないものが今回のサンプルの全体の 2%で見られたものの、JIS の曲げ破壊に関する規格値を満足しており、直ちに安全性に影響を及ぼす状態ではないと考えられる。さらに、列車通過時に PC まくらぎに発生する曲げモーメントは、曲げ試験時におけるひび割れ発生荷重に対しては 10 倍程度、破壊荷重に対しては 16 倍程度小さい値であることが分かった。

以上より、経年 50 年程度の PC まくらぎであっても、現時点では JIS の曲げ破壊に関する規格値を満足しており、直ちに安全性に影響を及ぼす状態ではないと考えられる。今後も経年 PC まくらぎを対象とした調査や試験を行い、経年や累積通トンに伴う耐力の変化を継続的に把握し続けるとともに、PC まくらぎの経年劣化現象のメカニズムの解明についても検討を進める予定である。

なお、図 2、図 4、図 5、図 6、図 7、図 8、図 9、表 1、表 2、表 3 は文献 6 からの転載である。

## 謝 辞

本研究における現地試験の実施にあたり、西日本旅客鉄道株式会社の狩野修志氏、吉川秀平氏、井上拓也氏をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- 1) 渡辺勉，後藤恵一，箕浦慎太郎，池田学：経年並びに通トンが PC まくらぎの耐力に及ぼす影響に関する実態調査，鉄道総研報告，Vol.37，No.4，pp.17-23，2023
- 2) 渡辺勉，箕浦慎太郎，松岡弘大，後藤恵一：PC まくらぎの維持管理に関する最近の研究，プレストレストコンクリート，Vol.63，No.2，pp.81-84，2021
- 3) 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
- 4) 日本鉄道施設協会：昭和 61 年度 PC マクラギの耐用寿命の研究 報告書，1992
- 5) 前田昌克，船田智巳：発生 PC まくらぎの耐力評価，土木学会第 60 回年次学術講演会，4-129，pp.257-258，2005
- 6) 渡辺勉，箕浦慎太郎，狩野修志，米川秀繁：新幹線用 PC まくらぎの荷重環境の実態調査と曲げ耐力評価，プレストレストコ

- ンクリート第 31 回シンポジウム論文集, Vol.31, pp.323-328, 2022
- 7) 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
  - 8) 箕浦慎太郎, 渡辺勉：深層学習を活用した PC まくらぎのひび割れ検知手法, 鉄道総研報告, Vol.39, No.9, pp.25-32, 2025
  - 9) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995
  - 10) 国土交通省鉄道局監修, 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）第 III 編 コンクリート構造, 丸善出版, 2023
  - 11) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造）, 丸善出版, 2012
  - 12) 守田武史, 田中靖幸, 横山秀史, 岩田直泰：低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 4-111, pp.221-222, 2005
  - 13) 佐藤吉彦：東海道新幹線において 951 形式試験電車に発生した著大輪重の原因とその対策, 鉄道技術研究報告, No.824, 1972