

新幹線用 PC まくらぎに生じた縦ひび割れの実態と耐荷力との関係

箕浦 慎太郎* 渡辺 勉 (鉄道総研)
吉川 秀平 (JR 西日本)

Study on the Actual State of Longitudinal Cracks in PC Sleepers for Shinkansen and Effect on its Load-bearing Capacity

Shintaro Minoura*, Tsutomu Watanabe, (Railway Technical Research Institute)

Shuhei Kikkawa, (West Japan Railway Company)

For effective maintenance of PC Sleepers for Shinkansen with cracks in the longitudinal direction (longitudinal crack), we investigated the occurrence of longitudinal cracks and evaluated their effects on load-bearing capacity. As a result, it was confirmed that longitudinal crack tends to occur near the center of the top and bottom surfaces and plastic dowels for fastening system. In addition, it was clarified that the fracture load of the plastic dowel decreased as the crack length in the longitudinal direction of the sleeper increased.

キーワード : PC まくらぎ, 縦ひび割れ, 新幹線, 画像処理, 健全度評価
(PC sleepers, longitudinal crack, Shinkansen, image processing, soundness evaluation)

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安全性の向上に欠かせない軌道の重要な構成要素である。PC まくらぎの導入は, 1961 年の東海道新幹線への投入を契機に広く進み, 近年では木まくらぎの置き換えのみではなく, PC まくらぎから PC まくらぎへの交換需要も増加している。そのため, 既設 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)}。新幹線用 PC まくらぎの一部では, PC まくらぎ長手方向のひび割れ (以降, 縦ひび割れ) の発生が確認されており, これらの PC まくらぎを対象とした効果的な維持管理法が求められている。この縦ひび割れの発生原因は, 既往の在来線用の PC まくらぎを対象とした調査³⁾により, アルカリ骨材反応等の材料に起因するものであることが明らかにされている。また, 曲げ耐荷力への影響は限定的であることも分かっている。一方で, 新幹線用の PC まくらぎに関しては体系的な調査はほとんど行われておらず, 在来線と同様の考え方で維持管理が可能かどうかを確認する必要があった。また, 既往の研究では縦ひび割れの発生状況 (長さ, 幅, 位置) 等について定量的かつ詳細な検討は行われておらず, より詳細な検討が求められていた。さらに, 2 本のレールの軌間保持性能に関して重要な構成要素である PC まくらぎの埋込栓の引抜耐力に対する縦ひび割れの影響評価についても十分とは言えないものであった。

そこで本研究では, 縦ひび割れの発生した新幹線用の PC

まくらぎを対象とした詳細な調査を実施し, 縦ひび割れの発生状況や曲げ耐荷力, 埋込栓引抜耐力に対する影響を評価することとした。

2. 調査方法

〈2-1〉 調査対象 PC まくらぎ 表 1 に調査のために収集した PC まくらぎの製造年と回収時点 (2021 年) での経年及び本数を示す。今回の調査では, 営業線に敷設されていた新幹線用の PC まくらぎ (JIS 3H まくらぎ) を合計 70 本収集し, 耐荷力評価試験及びひび割れ調査を実施した。このうち, 合計 43 本の PC まくらぎに対して, 後述する PC まくらぎの曲げ試験を, 37 本の PC まくらぎに対して埋込栓引抜試験を, 70 本すべての PC まくらぎに対して外観調査図の作成を実施した。

表 1 調査対象 PC まくらぎの製造年, 経年, 本数

製造年	経年 [年]	本数 [本]	曲げ試験 実施本数 [本]	埋込栓引抜試験 実施本数 [本]
2010	11	1	1	1
2008	13	2	2	2
2001	20	3	3	2
1997	24	1	1	0
1996	25	1	1	1
1991	30	4	4	3
1990	31	3	3	3
1989	32	5	5	3
1984	37	2	2	2
1982	39	7	7	7
1973	48	14	14	13
不明		27	0	0
合計		70	43	37

〈2・2〉 PC まくらぎの耐荷力試験方法 図 1 に PC まくらぎのレール位置での正曲げを対象とした曲げ耐荷力試験方法の例を、図 2 に埋込栓引抜試験の例を示す。今回の調査では、対象とする PC まくらぎの曲げ耐荷力及び埋込栓引抜耐力を調査するための試験を実施した。試験方法は JIS E 1201 に規定されたレール位置での曲げ試験及び埋込栓の引抜試験による方法とした。埋込栓引抜試験については、まくらぎ 1 本あたり 2 回実施した。

〈2・3〉 画像処理を活用した縦ひび割れの実態調査方法

図 3 に外観調査図の例を示す。調査対象とした PC まくらぎのひび割れ発生状況を把握するために、まずは図 3 に示すような外観調査図を作成し、ひび割れの位置を記録した。なお、外観調査図の作成の際にはひび割れの位置等に誤差を含むと考えられるが、ひび割れの発生位置の大まかな傾向については把握可能であると考えられる。今回の画像処理においては、まず PC まくらぎの表面ごと（上面、各側面、底面）に分割し、それぞれの面で生じた縦ひび割れの発生位置と長さを調査した。元となる外観調査図には作図の際に若干の歪みやサイズの違いが生じたものもあり、すべての外観調査図のサイズ等が一致しているわけではなく、

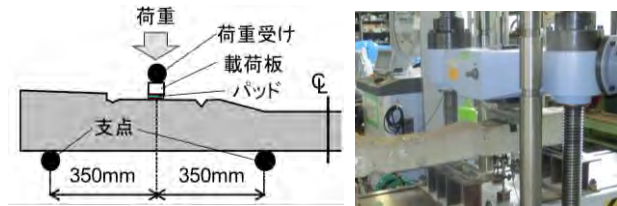


図 1 PC まくらぎのレール位置での正曲げ試験方法

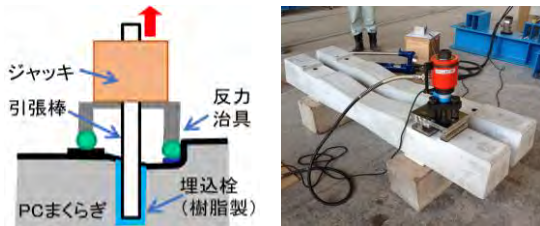


図 2 埋込栓引抜試験方法

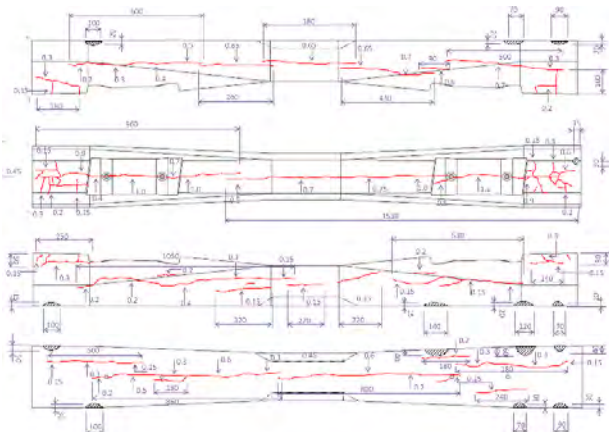


図 3 PC まくらぎの外観調査図の例

若干の誤差を含む。画像処理では、各表面への分割の際にこれらの誤差を補正し、その後ひび割れ発生位置と長さの推定を行った。

図 4 に各面の PC まくらぎの外観調査図からひび割れの部分のみを抽出した例を、図 5 に本調査でのひび割れ長さの考え方を示す。外観調査図では、ひび割れの発生位置を赤い線で記載しており、画像処理では画像の色情報(RGB 値)に基づいて赤い線の部分のみを抽出した。調査対象の PC まくらぎに生じたひび割れの発生形態には、さまざまな幅や長さのものが見られた。また、同じ面であっても、1 本のひび割れだけではなく、並行して複数のひび割れが生じているケースも見られた。今回の調査では、ひび割れの発生状況を定量化し、それが耐荷力へ与える影響を調査するために、まずは基礎的な検討として、並行に生じたひび割れの影響やひび割れ幅は考慮せず、PC まくらぎの長手方向にどの程度ひび割れが発生しているかのみに着目した。具体的には、図 5 に示すように、ひび割れを PC まくらぎの長手方向に投影し、その延長をまくらぎ長手方向のひび割れ長さとした。並

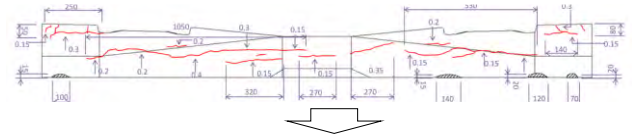
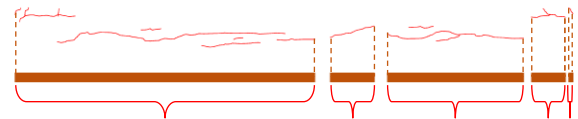


図 4 ひび割れのみを抽出した例



まくらぎ長手方向のひび割れ長さ
図 5 本調査でのひび割れ長さの考え方

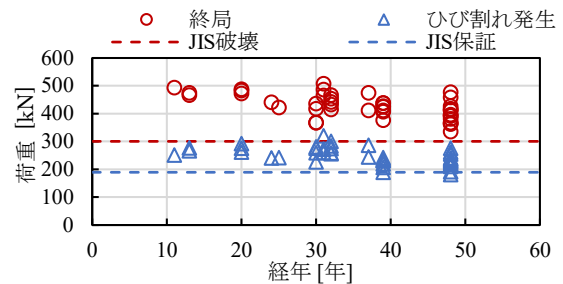


図 6 レール位置での正曲げ試験結果

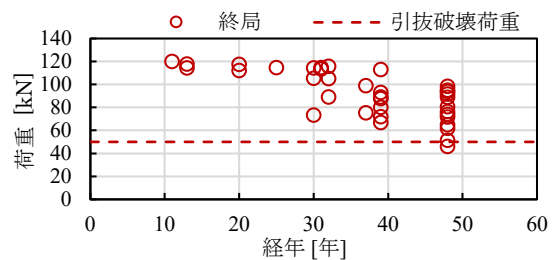


図 7 埋込栓引抜試験結果

行に生じるひび割れの影響やひび割れ幅の影響については今後の課題としたい。

3. 調査結果

〈3・1〉 耐力試験結果 図 6 にレール位置での正曲げ試験結果を、図 7 に埋込栓引抜試験結果を示す。図中の JIS 破壊及び JIS 保証とは、新品の PC まくらぎに対して、この荷重以下で破壊またはひび割れ発生に至ってはならないと JIS で規定されている荷重である。正曲げ試験及び埋込栓引抜試験結果では、ばらつきが大きいものの、経年の増加に伴い耐力が低下する傾向がみられた。正曲げ試験では、すべての PC まくらぎで終局時の荷重は JIS に規定された破壊荷重を上回った。

〈3・2〉 ひび割れ抽出結果 図 8 に各外観調査図から抽出したすべてのひび割れを 1 枚の外観調査図上に重ねて表示したものを、図 9 に今回対象とした PC まくらぎの各表面でのひび割れの発生頻度を示す。図 9 では、PC まくらぎのどの位置でひび割れが生じやすいのかを定量的に把握するために、PC まくらぎの表面を一定の面積の領域で分割し、各領域においてひび割れが生じていた PC まくらぎの本数をカウントし、発生頻度を確認した。図 9 において、発生頻度はグレースケールで表示しており、白に近いほど頻度が高いことを示している。これらの図より、縦ひび割れは PC まくらぎの上面及び下面のレール方向に対しての中心位置付近に集中して生じることがわかる。特に上面の埋込栓付近に縦ひび割れが生じやすいことが確認できる。また、亀甲状のひび割れはその多くが上面ショルダー部付近で生じており、それ以外の箇所ではほとんど生じていないことが確認できた。以降の検討では、縦ひび割れが比較的発生しやすく、現場での目視による確認も容易な PC まくらぎ上面に生じたひび割れに着目して検討を行うこととする。

〈3・3〉 まくらぎ長手方向のひび割れ長さ 図 10 に PC まくらぎの上面に生じたまくらぎ長手方向のひび割れ長ささと経年の関係を示す。図より、経年が 39 年の PC まくらぎや 48 年の PC まくらぎでは、まくらぎ長手方向のほぼ全域にひび割れが生じているのがみられるが、30 年以下の PC まくらぎでは 400mm 以上ひび割れが発生したものが存在せず、経年 48 年の PC まくらぎでもひび割れがほとんど発生していないものがあった。これらのことから、PC まくらぎ上面のひび割れは経年により増加する傾向にあるものの、すべての PC まくらぎに縦ひび割れが発生するわけではないことが確認された。なお、国内の在来線や海外での既往の研究においては、縦ひび割れがアルカリ骨材反応 (ASR) や遅れエトリングイト生成 (DEF) などといった、PC まくらぎの材料に起因して生じることが報告されている^{3),4),5)}。

図 11 に PC まくらぎ上面に生じたまくらぎ長手方向のひ

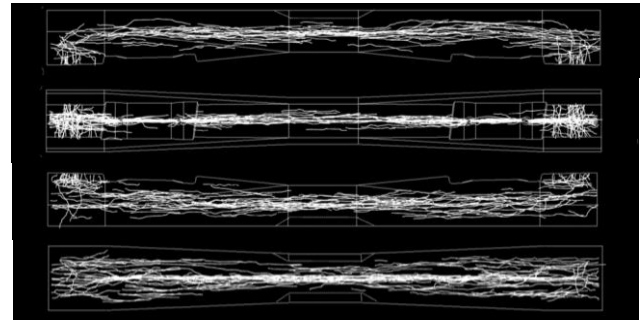


図 8 全ての外観調査図のひび割れを重ねて表示

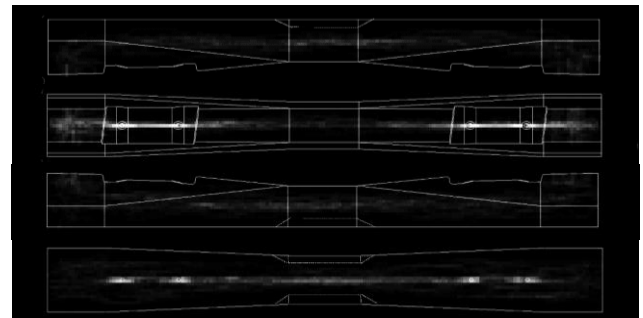


図 9 PC まくらぎ表面の各領域でのひび割れ発生頻度

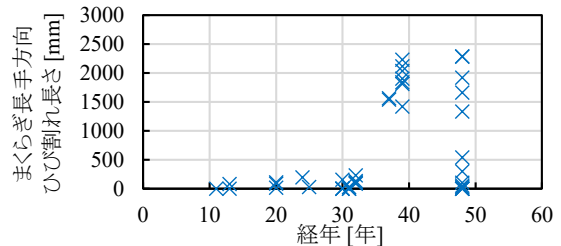
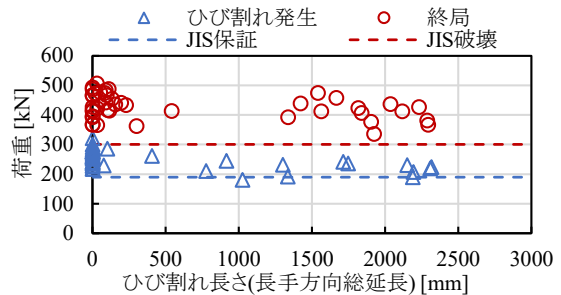
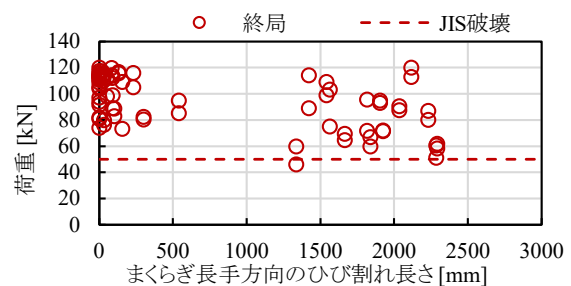


図 10 まくらぎ長手方向のひび割れ長さ (上面) と経年の関係



(a) レール位置正曲げ試験



(b) 埋込栓引抜試験

図 11 まくらぎ長手方向のひび割れ長さ (上面) と各試験結果との関係

び割れ長さとして、PC まくらぎ 14 本のみを対象として、PC まくらぎ上面に生じたまくらぎ長手方向のひび割れ長さとして、埋込栓引抜試験結果とまくらぎ長手方向のひび割れ長さとの関係を示す。正曲げの試験結果では、まくらぎ長手方向のひび割れ長さとの間に明確な関係は確認できなかった。埋込栓引抜試験結果とまくらぎ長手方向のひび割れ長さとの関係では、ひび割れ長さが約 1400mm と約 2300mm のケースで JIS に規定された破壊荷重と同程度以下となるものがみられるなど、ひび割れ長さの増加に伴い終局時の荷重が低下したケースも見られたものの、ばらつきが大きい。また、埋込栓引抜試験結果は経年の増加に伴い終局時の荷重が低下する傾向もみられており、この図のみでは経年とひび割れ長さのどちらの影響が大きいかは判断できない。

図 12 に経年 48 年の PC まくらぎ 14 本のみを対象として、PC まくらぎ上面に生じたまくらぎ長手方向のひび割れ長さとして、埋込栓引抜試験結果とまくらぎ長手方向のひび割れ長さとの関係を示す。正曲げ試験結果については、終局時の荷重とひび割れ長さの相関係数は -0.334 であり、ばらつきが大きく明確な傾向は確認できなかった。一方で、埋込栓引抜試験結果については、終局時の荷重とひび割れ長さの相関係数が -0.772 であり、ひび割れ長さの増加に伴い耐荷力が低下する関係が確認できた。このように、埋込栓の健全度は経年及びまくらぎ長手方向のひび割れの長さから推定できる可能性があり、目視検査や画像解析的手法等による PC まくらぎ上面のひび割れ調査により、埋込栓の健全度を定量的に評価できる可能性が示された。

4. まとめ

本研究では、縦ひび割れの発生した新幹線用の PC まくらぎを対象とした詳細な調査を実施し、縦ひび割れの発生状況や曲げ耐荷力、埋込栓引抜耐力に対する影響を評価した。得られた知見は以下の通りである。

1. 縦ひび割れが発生した PC まくらぎに対して、外観調査図を作成し、それを画像処理することによりひび割れ発生状況の分析を実施した。その結果、縦ひび割れは上面及び下面のレール方向に対する中心位置付近に集中して生じること、特に上面の埋込栓付近に縦ひび割れが生じやすいことを確認した。また、亀甲状のひび割れはその多くが上面ショルダー部付近で生じることが明らかとなった。
2. PC まくらぎ上面のまくらぎ長手方向のひび割れ長さとして、埋込栓引抜試験結果とまくらぎ長手方向のひび割れ長さとの関係を調査した結果、経年が 39 年の PC まくらぎや 48 年の PC まくらぎでは、まくらぎ長手方向のほぼ全域にひび割れが生じているものがあるなど、ひび割れ長さは経年により増加する傾向にあった。しかしながら、すべての PC まくらぎに縦ひび割れが発生するわけではなく、経年 48 年のものでもほとんどひび割れが生じていないものもあった。
3. PC まくらぎ上面のまくらぎ長手方向のひび割れ長さ

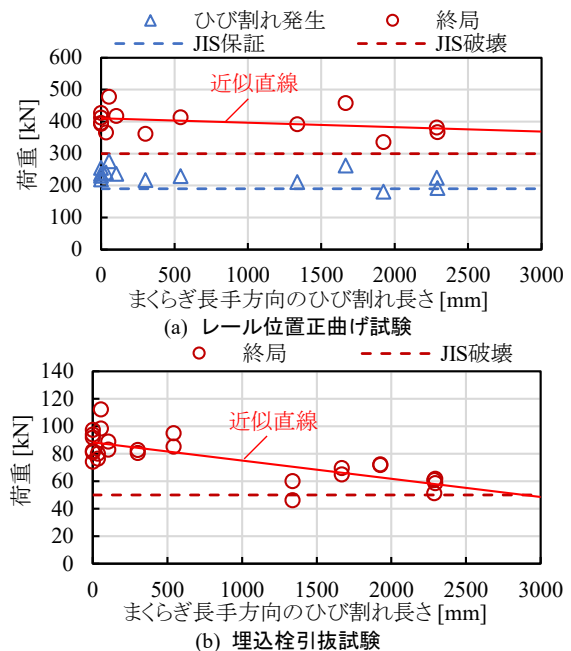


図 12 まくらぎ長手方向のひび割れ長さ(上面)と各種試験結果との関係(経年 48 年のみ)

と曲げ耐荷力、埋込栓引抜耐力との関係を調査した結果、経年による影響もあり、明確な傾向は確認できなかった。一方で、経年 48 年の PC まくらぎのみを対象とすると、まくらぎ長手方向のひび割れ長さの増加とともに埋込栓の破壊荷重が低下する傾向があり、ひび割れの長さから埋込栓の健全度を定量的に評価できる可能性が示された。

今後もこれらの調査を継続し、耐荷力の推定精度の向上を図るとともに、今回用いた PC まくらぎの外観調査図ではなく撮影画像からひび割れの位置、長さ、幅等を取得する手法の開発を行い、縦ひび割れが生じた新幹線用 PC まくらぎの維持管理の効率化に取り組む予定である。

文 献

- (1) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 鈴木大輔, 上半文昭: 営業線 PC まくらぎの摩耗性状と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
- (2) 渡辺勉, 後藤恵一, 箕浦慎太郎: 経年 PC まくらぎの余寿命評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 21 巻, pp.496-501, 2021.10
- (3) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 井上寛美, 片山雄一朗: 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
- (4) Anupam, A., Koji, M., Kohei, N., Shingo, A., Seishi, G.: Investigation on possible causes of expansion damages in concrete - a case study of sleepers in Indian railways, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.3, No.1, pp.49-66, June 2017.
- (5) Rajamurugan, S., Koji, M., Kohei, N., Anupam, A.: Visual investigation method and structural performance evaluation for def induced damaged Indian railway PC sleepers, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.4, No.2, pp.103-115, December 2018.