

凍害を受けた PC まくらぎの耐荷力に関する解析的検討

○ [土] 箕浦 慎太郎 [土] 渡辺 勉 [土] 後藤 恵一 (鉄道総研)

Analytical Study on Loading Capacity of PC Sleepers Affected by Frost Damage

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

In areas with a high risk of frost damage, some PC sleepers are currently suffering from frost damage. In previous studies, it was confirmed that the loading capacity of PC sleepers decreases due to frost damage. However, since there are innumerable deformation patterns of frost damage, examination of how each deformation affects the load bearing capacity is not enough. Therefore, in this study, we conducted a study using a numerical analysis model that reproduced various deformations caused by frost damage. As a result, it was confirmed that the influence of scaling near the rail position was relatively large. It was also shown that the bending loading capacity can be evaluated by focusing on the natural frequency of the third vibration mode.

キーワード: PC まくらぎ, 凍害, スケーリング, 耐荷力, 数値解析, 固有振動数

Key Words: PC sleeper, Frost damage, Scaling, Loading capacity, Numerical analysis, Natural frequency

1. はじめに

プレストレストコンクリート製まくらぎ (以下, PC まくらぎ) は, 現在の鉄道の安全・安定輸送に貢献する重要な軌道部材である. 現在製造されている PC まくらぎには, 一般的に AE 剤と呼ばれる混和剤が使用されている. AE 剤を使用すると, コンクリート中に多くの独立した気泡が発生し, これによりコンクリートの耐凍害性を向上させることができる. しかしながら, PC まくらぎが JIS に規格化される 1990 年以前には, コンクリート強度の低下や鉄筋との付着強度の低下への懸念から, AE 剤が使用されていない PC まくらぎが製造され, 凍害危険度の高い地域に敷設されるケースもあった. 現在ではそのような PC まくらぎの一部に, スケーリング (コンクリート表面の剥離) など凍害と考えられる変状が散見されている.

図 1 に凍害を受けたとみられる PC まくらぎ (以下, 凍害 PC まくらぎ) の例を示す. 図に示すように, 凍害危険度の高い地域に敷設された一部の PC まくらぎには, 鋼材が露出しているようなものもある. このような PC まくらぎでは, 耐荷力が著しく低下し交換が必要な状態となっている恐れがある. しかしながら, 凍害が PC まくらぎの耐荷力に及ぼす影響についての体系的な調査研究は, これまでほとんど行われていない.

図 2 に過去に実施した凍害 PC まくらぎに関する調査結

果 (PC まくらぎ上面のスケーリング面積とレール位置での正曲げ試験の曲げ破壊荷重との関係) を示す²⁾. この結果

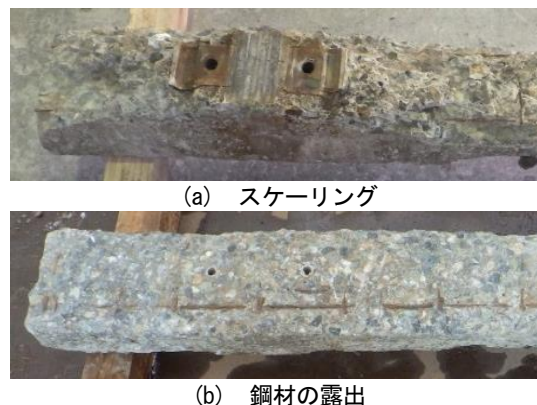


図 1 凍害 PC まくらぎの例

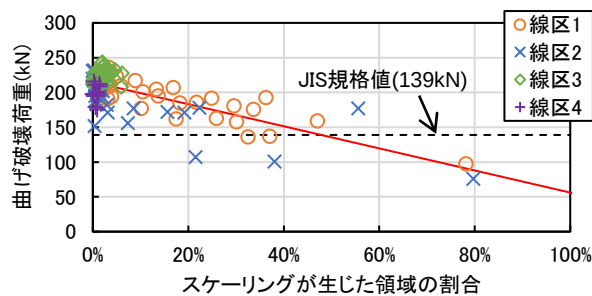


図 2 PC まくらぎ上面のスケーリング面積と曲げ破壊荷重 (正曲げ) の関係²⁾

は、凍害危険度の比較的高い4つの線区に敷設されていたPCまくらぎを収集し、曲げ試験及び外観調査を行ったものである。これにより、PCまくらぎのスケーリングはバラストに埋まっていない上面に発生しやすいこと、上面に発生するスケーリング面積と曲げ耐力の間に関係性があることを明らかにした。しかしながら、スケーリングが発生する位置や深さが耐力に及ぼす影響については不明な点が多い。

一方で、筆者らはPCまくらぎの曲げ性能を、打音試験により取得したPCまくらぎの固有振動数から評価する手法を提案している³⁾。具体的には、PCまくらぎの固有振動数の低下を捉えて曲げひび割れの有無等を評価するものである。この手法を凍害まくらぎに適用すれば、目視によらず定量的に曲げ性能の評価が行えるものと考えられるが、そのためにはスケーリング面積、位置が固有振動数および曲げ耐力に及ぼす影響を事前に把握しておく必要がある。

以上のような背景から、本研究ではPCまくらぎのスケーリングを再現した3次元非線形FEMモデルを構築し、以下の点に着目して解析的な検討を行うこととした。

- ①PCまくらぎのスケーリングの発生位置及び深さが曲げ耐力の低下に及ぼす影響を評価する。
- ②スケーリングを再現したPCまくらぎの固有振動数の低下が曲げ耐力の低下に及ぼす影響を評価する。

2. 解析手法

2.1 対象まくらぎ

図3に今回の解析で対象としたJIS E1201に規定されたプレテンション式PC3号まくらぎ(3PR)を示す。このまくらぎは直線区間および半径800m以上の曲線区間に敷設されるまくらぎである。なお、凍害PCまくらぎの実態調査で対象としたPCまくらぎは国鉄規格(JRS)の3号PCマクラギであるが、その形状および敷設対象箇所はJISのPC3号まくらぎと同一である。

2.2 解析モデル

図4に解析モデルを示す。本解析は汎用構造解析ソフトウェア“LS-DYNA”(Ver. R10.1.0)により実施した。解析ではコンクリートを6面体ソリッドモデルで、PC鋼より線及びスターラップを梁要素で、曲げ試験の支点及び疑似支点をシェルでモデルした。なお、疑似支点とは、荷重開始前においてPCまくらぎの要素を安定させるために設けた要素であり、荷重開始後にはPCまくらぎは疑似支点から離れる。解析モデルの節点数は11725、要素数は9358である。PC鋼より線及びスターラップの要素は、コンクリート要素と節点を共有させ、付着や滑りは考慮せずコンクリートに完全に追随するモデルとした。プレストレスについては、PC鋼より線の梁要素に導入プレストレス力に応じた初期応力をあらかじめ与えることで再現した。支点及び荷重点は剛体とし、コンクリート表面との接触を考慮できるモデルとした。モデルは対称性を考慮した1/2モデル

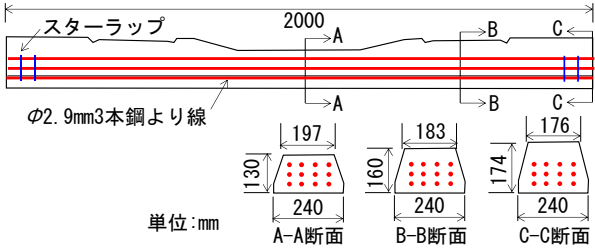


図3 JIS プレテンション式PC3号まくらぎ(3PR)

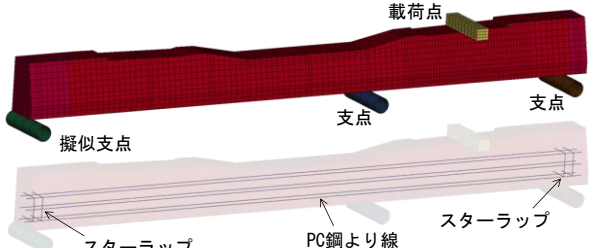


図4 解析モデル(1/2モデル)

表1 材料諸元

名称	コンクリート	PC 鋼より線	スターラップ
弾性係数 E (kN/mm ²)	33.0	200	200
ポアソン比	0.2	0.3	0.3
密度 (kN/m ³)	23.0	77.0	77.0
一軸圧縮強度 f_t (N/mm ²)	80.0	—	—
一軸引張強度 f_c (N/mm ²)	4.27	—	—
降伏強度 (N/mm ²)	—	降伏 σ_y : 1522.5 最大 σ_u : 1998.0	345.0

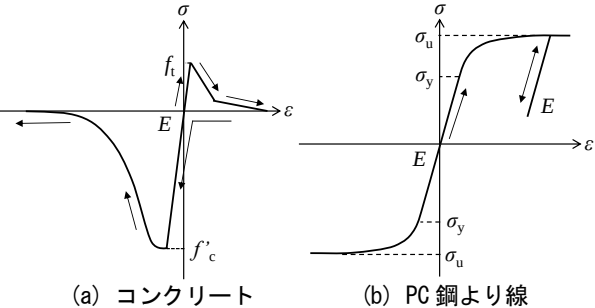


図5 応力-ひずみ関係

とした。

表1に数値解析で使用した材料諸元を、図5にコンクリート及び鋼材の応力-ひずみ関係を示す。PCまくらぎのコンクリートの弾性係数及び圧縮強度については、既設PCまくらぎの実態調査で実施した材料試験の結果²⁾を参照にし、引張強度は鉄道構造物等設計標準・解説(コンクリート構造物)(以下、コンクリート標準)⁴⁾に記載された引張強度の特性値の算出方法により求めた。今回の解析では、曲げ試験時に発生するコンクリートのひび割れや圧壊を再現可能なモデル⁵⁾とし、引張軟化特性については、コンクリート標準⁴⁾に基づいて設定した。PC鋼より線の応力ひずみ関係はミルシートから作成し、スターラップはパイリニアモデルとした。

2.3 解析手法

図6にJISに規定されたレール位置での正曲げ試験方法

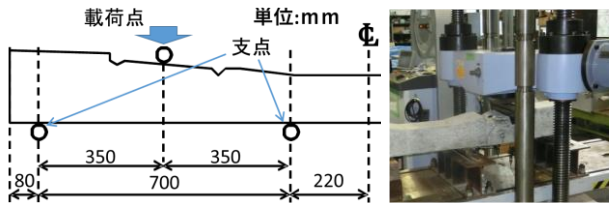


図6 レール位置での正曲げ試験方法 (JIS)

を示す。解析では、図6に示す曲げ試験を再現し、各スケーリング状態での曲げ破壊荷重を調査した。同時に固有値解析も実施し、各スケーリング状態での曲げモードとその固有振動数を取得した。曲げ試験時の载荷荷重は载荷点とPCまくらぎ上面のコンクリートの接触力とし、変位は载荷点直下のPCまくらぎ底面の要素の変位とした。

2.4 解析ケース

図7に各解析ケースで想定したスケーリング位置を示す。解析では、スケーリングの無い状態のPCまくらぎを基本ケースとし、一部の要素を削除することでスケーリングによる有効断面の減少を再現した。要素を削除する位置は、図7に示すようにPCまくらぎの上面のショルダー部を2分割、レール位置を3分割、PCまくらぎ中央部を3分割した位置とし、それぞれ上端から10mm及び20mmに相当する要素を削除した。なおショルダー部に関しては、過去に実施した実態調査において特にスケーリングが発生しやすいことが確認されたことから²⁾、上端から30mmに相当する要素まで削除したモデルによる解析も実施した。

3. 解析結果

3.1 解析結果の妥当性の確認

図8に基本ケースでの荷重変位曲線を示す。参考として、実際に新品の3PRを使用して実施した曲げ試験結果も併せて示す。この図より、解析モデルはひび割れ発生による剛性の低下や最大荷重、破壊による荷重の低下をおおむね再現可能であることが確認された。最大荷重後では、試験結果と比較して解析結果は耐力力が急速に低下しているが、これは今回の解析では、解析中に圧壊に至ったと判定されたコンクリート要素は削除されるようにモデル化されていることが要因の一つと考えられるが、詳細については今後の課題としたい。以降の解析結果では、荷重変位曲線で得られた最大値を曲げ破壊荷重とする。

3.2 スケーリングと曲げ破壊荷重の低下の関係

図9に各解析ケースでの曲げ破壊荷重を示す。ショルダー部のスケーリング（図9(a)）については、はレール位置での正曲げの曲げ破壊荷重には影響が小さく、スケーリング深さ20mmまでは耐力力の低下はほとんど見られず、レール位置に近いショルダー②で深さ30mmのケースでも曲げ破壊荷重は184.7kNであり、基本ケース（曲げ破壊荷重：204.4kN）と比較して約9.6%の低下にとどまった。レール位置でのスケーリング（図9(b)）については、レール②でスケーリング深さ20mmのケースでは曲げ破壊荷重が159.4kNとなり、基本ケースと比較して22.0%の低下と

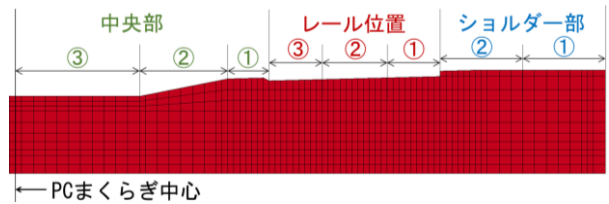


図7 各解析ケースで想定したスケーリング位置

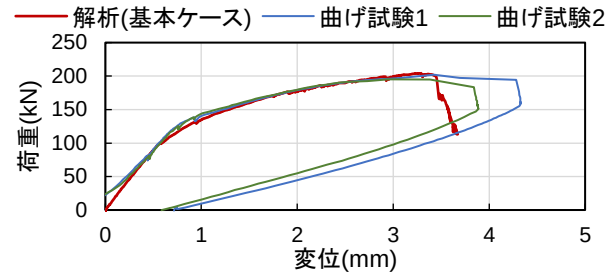
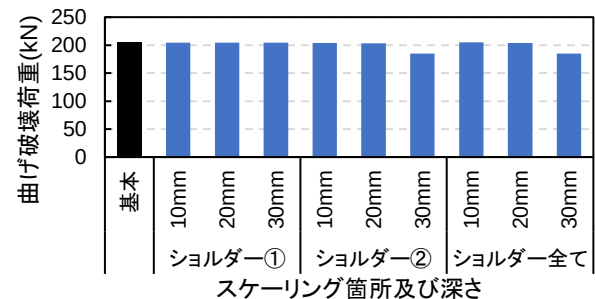
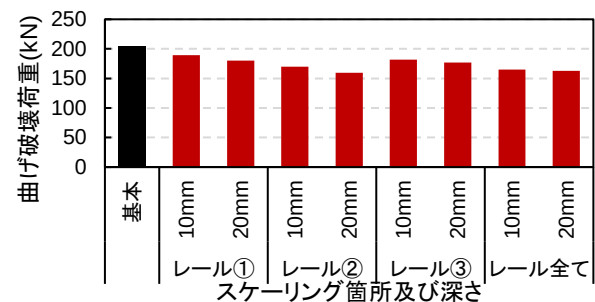


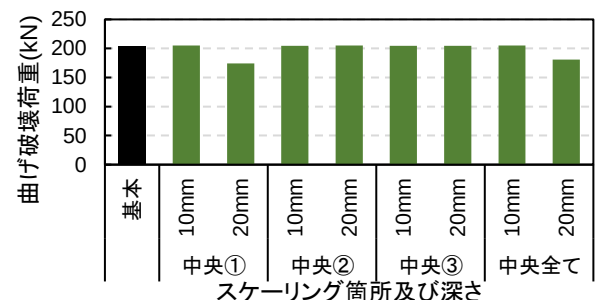
図8 基本ケースでの荷重変位曲線



(a) ショルダー部のスケーリング



(b) レール位置でのスケーリング



(c) PCまくらぎ中央部でのスケーリング

図9 各解析ケースでの曲げ破壊荷重

なっていた。他のケースでも10mmのスケーリングの段階から曲げ破壊荷重が低下しており、耐力力への影響が大きかった。これは、PCまくらぎの曲げ試験では、コンクリートの圧壊により破壊に至るケースが多く、圧縮縁となるレール位置付近の上面のコンクリートが減少したことが曲げ破壊荷重の低下につながったためと考えられる。PCまくら

らぎ中央部(図9(c))については、スケーリング深さ10mmではどの位置でも耐力にはほとんど影響がなく、レール位置に近い中央①で深さが20mmのケースは曲げ破壊荷重が174.3kNであり、基本ケースと比較して約14.7%曲げ破壊荷重が低下した。以上より、凍害PCまくらぎの健全度評価においては、レール位置付近のスケーリングの有無が重要であると考えられる。

3.3 固有振動数と曲げ破壊荷重関係

図10にPCまくらぎの曲げ振動モード形状を、図11に各スケーリング状態での固有振動数と曲げ破壊荷重の関係を振動モードごとに示す。図11中には最小二乗法により求めた回帰直線も併せて示す。図11(a)より、曲げ破壊荷重への影響が大きいレール位置でスケーリングが発生しても、1次モードの固有振動数はほとんど低下しなかった。一方、図11(c)の3次モードでは、レール位置が振動の腹となっており、ばらつきはあるものの固有振動数の低下とともに曲げ破壊荷重が低下する傾向が得られた。このことから、打音試験においてPCまくらぎの3次モードの固有振動数に着目することで、凍害PCまくらぎの曲げ耐力を評価できる可能性があることが分かった。

4. まとめ

本研究では、PCまくらぎに発生したスケーリングの位置及び深さが、PCまくらぎの曲げ耐力に与える影響を数値解析により評価した。また、打音による耐力評価のための基礎検討として、スケーリングの程度とPCまくらぎの固有振動数の関係の調査も併せて実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) ショルダー部及びまくらぎ中央部のスケーリングを再現した解析では、正曲げ試験での曲げ破壊荷重への影響は限定的であった。
- 2) レール位置に生じたスケーリングを再現した解析では、正曲げ試験の曲げ破壊荷重の低下への影響が大きく、レール直下でスケーリング深さ20mmのケースでは、健全時と比較して約22.0%耐力が低下することが確認された。このことから、凍害PCまくらぎの健全度評価では、レール位置付近でのスケーリングの有無が重要であると考えられる。
- 3) 各スケーリング状態でのPCまくらぎの固有振動数と曲げ破壊荷重の関係においては、3次の曲げ振動モードの固有振動数の低下に伴い曲げ破壊荷重が低下する傾向にあり、3次モードの固有振動数に着目することで、打音試験等により凍害PCまくらぎの耐力が評価できる可能性があることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 長谷川寿夫:コンクリートの凍害危険度の算出と水セメント比限界値の提案, セメント技術年報, Vol.29, pp.248-253, 1975
- 2) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 飯島亨, 石田哲也: 凍害を受けた

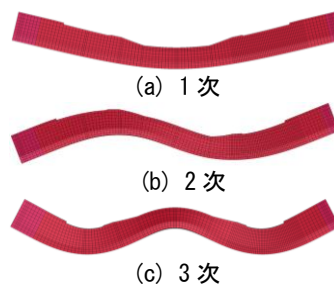


図10 PCまくらぎの曲げ振動モード形状

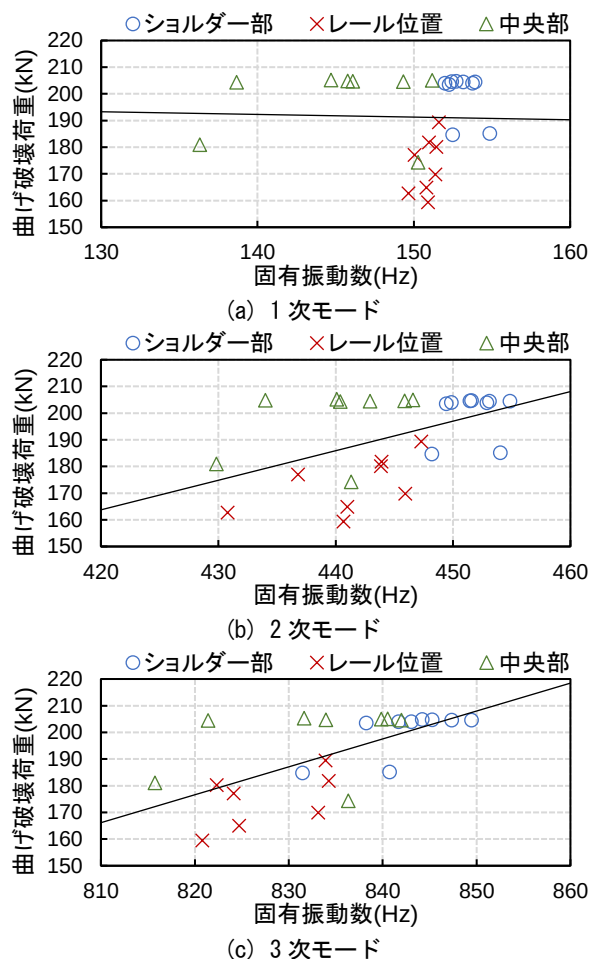


図11 固有振動数と曲げ破壊荷重

PCまくらぎの実態調査と健全度評価基準の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.659-664, 2020

- 3) 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, Vol.74, No.3, pp.158-175, 2018
- 4) 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), 丸善出版, 2004.
- 5) Peter Grassl et al.: CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.7