

# 凍害環境下における経年 PC まくらぎの性能評価

渡辺 勉\* 後藤 恵一\* 飯島 亨\*\* 盛田 慶\*\*\*

## Performance Evaluation of Aged Prestressed Concrete Sleepers in Cold Regions

Tsutomu WATANABE Keiichi GOTO Tooru IIJIMA Kei MORITA

In order to evaluate the performance of aged Prestressed Concrete (PC) sleepers installed in a region with a high risk of frost damage, we conducted various tests and numerical analyses on load capacity and material deterioration due to frost damage. The results clarify that the sleepers not using the air entraining agent have low frost damage resistance, and that if the scaling is generated throughout sleepers, the bending load resistance becomes less than the minimum required value specified Japanese Industrial Standard. On the basis of these results, we propose a method for evaluating the soundness of PC sleepers with frost damage.

キーワード：PC まくらぎ，維持管理，凍害，スケーリング，数値解析，コンクリートまくらぎ

### 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）は鉄道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 年に東海道本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 3950 万本を超える。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、営業線に敷設された PC まくらぎには経年が 50 年を超えているものも出てきており、近年では木まくらぎの置き換えだけではなく、既存の PC まくらぎの交換比率も増加している。このような実態を受けて、今後の計画的な維持管理のために、経年 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<sup>1)</sup>。

一方、現在の PC まくらぎは AE コンクリートがごく一般的に使用されているが、とくにプレテンション式の PC まくらぎについては、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による製造工程への影響などの懸念から、1990 年に JIS E1201 が制定されるまでは AE コンクリートは使用されていなかった。このような AE コンクリートを使用していない PC まくらぎはわが国の比較的凍害危険度<sup>2) 3)</sup>が高いと想定される地域にも敷設されており、近年これらの一部に凍害による変状が散見されている<sup>4)</sup>。しかしながら、既往の検討<sup>1)</sup>は、主に首都圏の経年 PC まくらぎを対象としており、凍害危険度の高い地域に敷設された経年 PC まくらぎを対象とした体系的な検討は行われていないのが実態である。

そこで本研究では、凍害危険度が高い地域に敷設され、

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室  
 \*\* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室（現 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング）  
 \*\*\* 株式会社安部日鋼工業

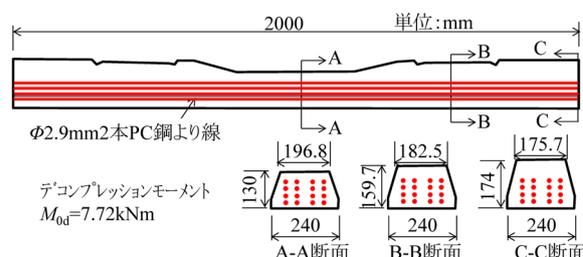


図1 3号プレテンション式 PC まくらぎ (JRS)

表1 コンクリートの諸元

設計基準強度 $f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	49.1
プレストレス導入時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	39.2
静弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	33.0
終局ひずみ $\mu$	3500
曲げ圧縮強度 $f'_{cd}$ (N/mm <sup>2</sup> )	19.6 (= 0.4 $f'_{ck}$ )

かつ AE コンクリートが使用されていない経年 PC まくらぎを対象とし、以下の点について検討を実施した。

- (1) AE コンクリートを使用していない経年 PC まくらぎに対して各種試験を実施し、劣化傾向、コンクリートの耐凍害性や耐荷力などを把握する。
- (2) 凍害（スケーリング）が PC まくらぎの耐荷力に及ぼす影響を数値解析により評価する。
- (3) 以上の結果より、凍害を受けた経年 PC まくらぎの健全度評価方法の参考例を提案する。

### 2. 凍害環境下の PC まくらぎの性能評価試験

#### 2.1 PC まくらぎの概要

図1に本研究で対象とした日本国有鉄道規格（JRS）に規定される3号プレテンション式 PC まくらぎを、表1にそのコンクリートの諸元を示す。表2に対象とした PC まくらぎ（4線区、165本）の一覧を示す。これらは1960年代、1970年代に製造された経年45～55年程度

のPCまくらぎであり、いずれもAEコンクリートが使用されていない。敷設箇所は、内陸部でかつ既往研究のコンクリートの凍害危険度の分布<sup>2)</sup>において、凍害危険度が5段階中、2(軽微)あるいは3(やや大きい)に分類される地域である。

### 2.2 試験項目

表3に試験項目の概要を示す。外観調査では、PCまくらぎの表面を高圧洗浄機で洗浄し、まくらぎの表面状態を目視で観察した。PCまくらぎのコンクリートの耐凍害性を評価するために、PCまくらぎからコアを採取し、凍結融解試験(JIS A1148:2000(A法))と気泡間隔係数測定試験(ASTM C457-16によるリニアトラバース法)を実施した。また、超音波試験機「ハンジットlab」を用いて、PCまくらぎのコンクリートの超音波の伝播速度を、まくらぎ上面と底面を測定面とする対面法で測定した。

さらに、PCまくらぎの力学的な性能評価のために、コンクリートコアの圧縮強度試験(JIS A1108)、静弾性係数試験(JIS A1149)を実施するとともに、PCまくらぎの曲げ試験(JIS E1201)を実施した。また、耐荷力の評価はレール位置断面の正曲げ試験で行った。

### 2.3 試験結果

#### 2.3.1 外観調査

表4に主な変状の発生状況、図2に変状の概要をそれぞれ示す。主な変状は、凍害が原因と考えられるスケーリングおよび微細ひび割れが長手方向に連続するひび割れ(以下、縦ひび割れ)、レール位置断面下縁の曲げひび割れ、まくらぎ底面の摩耗、PC鋼線の露出などの変状が見られた。

#### 2.3.2 凍結融解試験

図3に凍結融解試験結果を示す。A線区、B線区は各2本のPCまくらぎに対して実施した。相対動弾性係数はいずれの供試体も90サイクルまでにひび割れなどが発生し測定が困難となり試験を終了した。土木学会が定める相対動弾性係数の最小限度値<sup>5)</sup>は、条件によるが、300サイクル終了時で60~85%であり、対象とした供試体はいずれも耐凍害性が低いことがわかった。参考までに同図には、現在のPCまくらぎで標準的に使用されるAEコンクリートの試験結果(AE)を合わせて示したが、当然のことながら耐凍害性を有していることがわかる。

#### 2.3.3 気泡間隔係数測定試験

図4にコア中の気泡の粒径ごとの分布を示す。A線区、B線区は2本のPCまくらぎに対して実施した。参考までに同図には、現在のPCまくらぎで標準的に使用されるAEコンクリートの試験結果(AE)を合わせて示した。AEコンクリートの気泡分布は、例えば、粒径125 $\mu$ m以下の気泡がそれぞれの粒径で100~200個であり、微小な気泡が多数存在するのに対し、AEコンクリート

表2 経年PCまくらぎ(3PR)の一覧

製造年	A線区(本)	B線区(本)	C線区(本)	D線区(本)	合計
1963	2	7	0	0	9
1964	0	39	0	0	39
1965	48	0	7	0	55
1966	0	0	42	0	42
1967	0	0	0	4	4
1968	0	0	1	6	7
1969	0	0	0	2	2
1970	0	0	0	3	3
1973	0	4	0	0	4
合計	50	50	50	15	165

表3 試験項目

項目	内容
外観	PCまくらぎ洗浄後、ひび割れ・断面欠損の有無、埋込材の変形状態などを観察
凍結融解	コアを採取し、融解工程終了後、一次共振振動数及び質量を測定(JIS A1148)
気泡間隔係数	コアを採取し、試料作製後顕微鏡観察(ASTM C457-16)
超音波	まくらぎ本体の超音波伝播速度を測定(超音波試験機「ハンジットlab」を使用)
圧縮強度 静弾性係数	コアを採取し、圧縮強度、静弾性係数を測定(JIS A1108, JIS A1149)
曲げ	2点支持、1点載荷の曲げ試験を実施(JIS E 1201)

表4 主な変状の発生状況

変状	A線区(本)/50本	B線区(本)/50本	C線区(本)/50本	D線区(本)/15本
スケーリング	31(62%)	20(40%)	13(26%)	5(33%)
縦ひび割れ	22(44%)	20(40%)	4(8%)	11(73%)
曲げひび割れ	46(92%)	50(100%)	35(70%)	14(93%)
PC鋼線露出	11(22%)	10(20%)	8(16%)	0(0%)

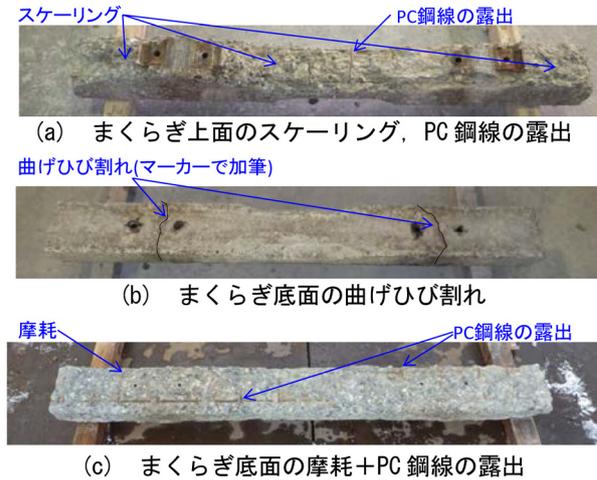


図2 主な変状の概要

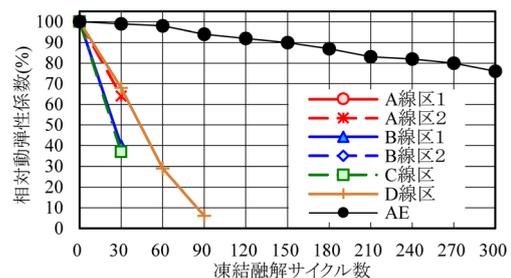


図3 凍結融解試験結果

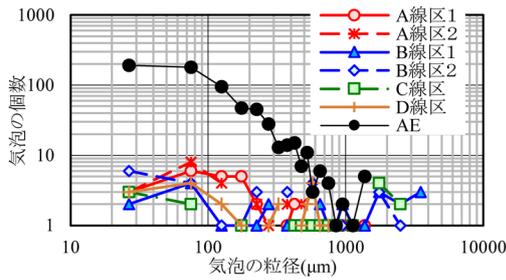


図4 コア中の気泡の粒径ごとの分布

表5 気泡間隔係数

まくらぎ	空気量 A(%)	気泡間隔係数 L(μm)
A 線区 1	1.10	2575
A 線区 2	0.62	1723
B 線区 1	0.35	1233
B 線区 2	0.21	1096
C 線区	0.64	2789
D 線区	0.34	1515
AE	4.4	222

でないコアの気泡はいずれの粒径でも 10 個に満たない。また、表 5 に示す通り、AE コンクリートでないコアの空気量は 0.21 ~ 1.10%、気泡間隔係数は 1096 ~ 2789 μm であった。一般にコンクリートの耐凍害性を高めるには空気量を 3% 以上、気泡間隔係数を 300 μm 以下とすれば優れた耐凍害性が期待できる<sup>6)</sup>とされており、本試験結果からいずれの供試体も耐凍害性が低いことがわかる。一方、現在の PC まくらぎで標準的に使用される AE コンクリート (AE) では、空気量 4.4%、気泡間隔係数 222 μm であり、耐凍害性を有していることがわかる。

### 2.3.4 超音波伝搬速度の測定試験

図 5 に超音波伝搬速度の測定試験結果の例を示す。目視でスケーリングが確認できない部分の伝搬速度は 4.64 ~ 4.94km/s 程度となったが、スケーリングが判別できる部分では 0.33 ~ 2.47km/s 程度に低下した。一方、中央部、端部では一部にスケーリングが発生 (図 5(b),(c)) していてもレール位置断面における伝播速度の低下はそれほど顕著ではなかった。これは、レール位置断面は、軌道パッドやレールに覆われており、日射、凍結融解などの影響を受けにくく、コンクリートが劣化しにくいと推察される。なお、営業線に敷設履歴のない新品の PC まくらぎの伝播速度は 5.00km/s 程度であることを別途実施の試験により確認した。

### 2.3.5 圧縮強度および静弾性係数試験

図 6(a) に圧縮強度試験結果を、図 6(b) に静弾性係数試験の結果を示す。圧縮強度はいずれのコアも PC まくらぎの設計基準強度以上の強度を有していた。また、コンクリートの静弾性係数 (以下、ヤング係数) は、概ね鉄道構造物等設計標準・解説 (コンクリート構造物)<sup>7)</sup> に示される設計基準強度に対するヤング係数 33kN/mm<sup>2</sup> を概ね平均値とする分布であることがわかる。なお、コ

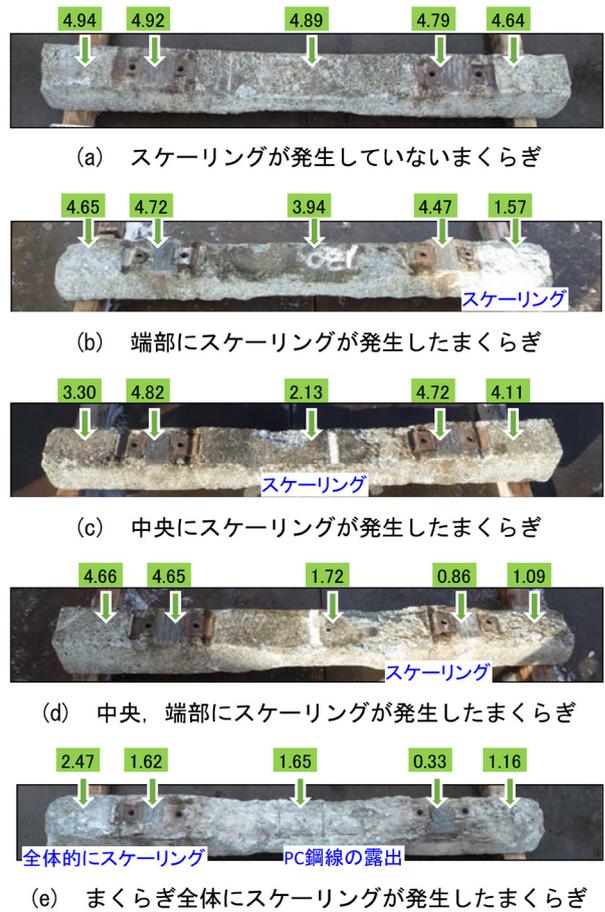


図5 超音波測定結果の例 (単位: km/s)

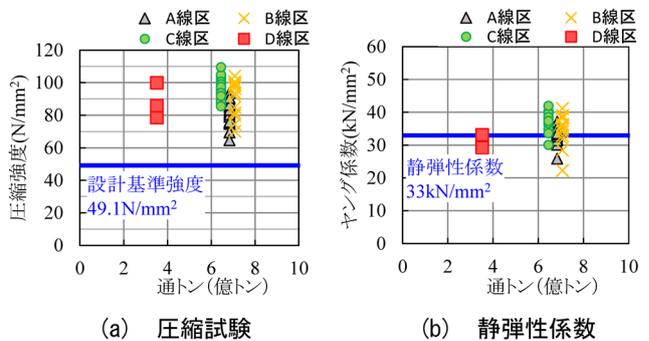


図6 圧縮試験および静弾性係数試験結果

ア採取箇所は、まくらぎ 1 本の中でコアが採取可能な比較的健全な箇所であり、スケーリングなどの変状が発生した箇所は当然のことながらこれらの図の圧縮強度やヤング係数よりも小さい値となると考えられる。

### 2.3.6 曲げ試験

図 7 に曲げ試験結果を示す。レール位置断面の結果を例として示す。表 4 に示したように各種変状が発生したまくらぎであったが、JIS 規格値を満足しないものは 165 本中 7 本 (A 線区で 3 本、B 線区で 4 本) であった。これらはまくらぎ全体にスケーリングが発生 (図 5(e)) するとともに、スケーリングでコンクリートが剥落した部分の PC 鋼線が露出するような状態であった。これら

の変状は、明らかに健全ではないと目視で判別できるレベルの変状であった。一方、中央部、端部の一部にスケーリングが発生（図5(b),(c)）していたとしても、2.3.4項で述べた通りレール位置断面のコンクリートは比較的健全であるため、曲げ破壊荷重の顕著な低下は認められなかったと考えられる。

### 3. 数値解析によるスケーリング範囲がPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響

本章では、スケーリングがPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響を明らかにするため、PCまくらぎ上のスケーリング範囲をパラメータとした曲げ試験に関する数値解析を実施した。対象としたPCまくらぎの断面はレール位置断面とし、まくらぎが下に凸に変形する正曲げで解析を実施することとした。

#### 3.1 解析方法

##### 3.1.1 解析モデルの概要

図8に解析モデルの概要を示す。解析には非線形構造解析用汎用ソフトウェアLS-DYNA(ver R10.1.0)<sup>8)</sup>を用いた。本解析モデルは、PCまくらぎ(3PR)を構成するコンクリート、PC鋼より線、スターラップおよびレール位置断面での正曲げ試験を表現するための荷重点、2つの支点からなる。レール締結用の埋込栓やその周辺のスパイラル筋はモデル化していない。また、解析時間の短縮を図るために、構造の対称性を考慮した1/2モデルとした。荷重点はすべてJIS E 1201に準拠した。

コンクリート、荷重点、支点は8節点ソリッド要素で、PC鋼より線およびスターラップは梁要素でモデル化した。要素サイズは、10mmを基準とし、最大でも20mm以下とした。解析モデル全体での総節点数は42262、総要素数は34856であった。要素積分点に関しては、ソリッド要素には1積分点を、梁要素には4積分点を適用した。また、荷重点および支点要素については剛体とした。

境界条件は、解析モデルの対称境界には面対称を考慮した拘束を行い、荷重点は鉛直方向（荷重方向）以外の自由度を、支点は全自由度をそれぞれ拘束した。PCまくらぎと荷重点間、PCまくらぎと支点間の接触条件は、面と面の接触として定義した。また、PC鋼より線およびスターラップの梁要素はコンクリート要素内に埋め込んでモデル化し、要素間の付着や滑りを考慮せず、梁要素の節点がコンクリート要素の変形に完全に追従するものとした。

##### 3.1.2 材料モデル

表6に材料定数を示す。コンクリートの材料定数は、後述する解析モデル検証用に実施した新品のPCまくらぎ製造時におけるテストピースの一軸圧縮強度および設計標準<sup>7)</sup>に基づき設定した。PC鋼より線の材料定数に

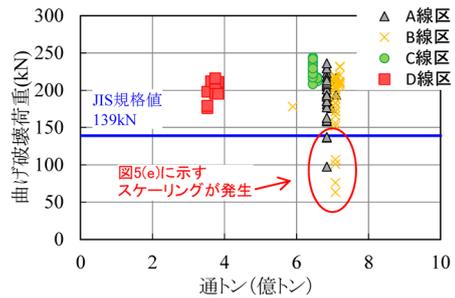
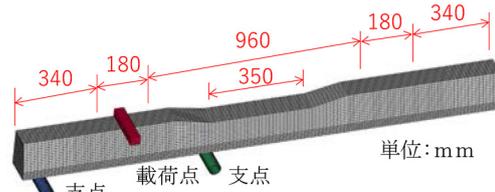
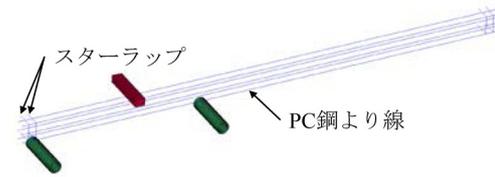


図7 曲げ試験結果



(a) コンクリート

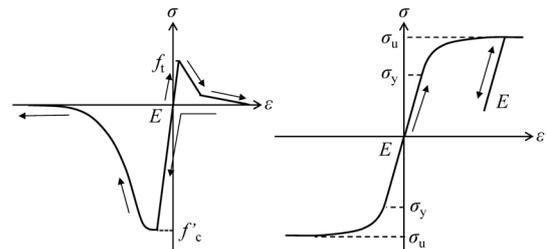


(b) PC鋼より線

図8 解析モデルの概要(1/2モデル)

表6 本解析で用いた材料定数

材料	弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比	圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	35.0	0.20	60.0	3.53
PC鋼より線	203.0	0.30	降伏 $\sigma_y$ : 1522.5 最大 $\sigma_u$ : 1998.0	
スターラップ	200.0	0.30	弾性体	
荷重点・支点	剛体			



(a) コンクリート (b) PC鋼より線

図9 本解析で用いた材料モデル

については、ポアソン比は設計標準<sup>7)</sup>の鋼材の値を用い、弾性係数や引張り/伸びの関係、最大引張力はミルシート<sup>7)</sup>の値を使用した。スターラップは弾性体とし、設計標準に基づいて鋼材の材料定数を設定した。荷重点および支点については剛体とした。

図9に本解析で用いた材料モデルを示す。図9(a)にコンクリートに関する単軸換算の応力-ひずみの関係を示す。圧縮側は圧縮強度に達した後にひずみ増加に応

じて徐々に応力が軟化するモデルを、引張側は引張強度に達した後の軟化曲線をコンクリートの引張破壊エネルギーに基づき2直線で近似するモデルとした<sup>7) 9)</sup>。図9(b)にPC鋼より線に関する単軸換算の応力-ひずみの関係を示す。PC鋼より線の材料モデルは、ミルシートから読み取った引張試験力-伸びの関係を応力-ひずみの関係に換算して入力した。

### 3.1.3 解析手法

数値解析は2つのステップで行う。第1ステップでは、緊張力に相当する引張応力をPC鋼より線に導入し、平衡状態を求めることでプレストレスを考慮したPCまくらぎの応力状態を求めた。第2ステップでは、第1ステップで求めた平衡状態のPCまくらぎに荷点および支点との接触を考慮し、荷点に鉛直方向の強制変位を与えることで曲げ試験を再現した。曲げ試験時の荷重荷重については強制変位を与える荷点の反力から計算した。また、荷重変位については実際の曲げ試験に合わせて荷点の変位とした。なお、時間積分法は陽解法の1つである中央差分法を用い、時間刻みは $1.5 \times 10^{-6}$ sec程度とした。

### 3.1.4 解析ケース

図8のPCまくらぎを基本ケース(CASE0)とし、さらに表7に示すスケーリングの範囲を変化させた4種類の解析ケースを設定した。スケーリング範囲は第2章の調査結果を基に設定することとし、具体的には、解析モデル上のスケーリング範囲を図8(a)に赤字で示した範囲とした。解析上のスケーリングは、健全なPCまくらぎから上面における要素を削除することで表現した。また、スケーリングの深さの影響についても検討するため、PCまくらぎ表面から1層~3層の要素を段階的に削除した解析も実施した。ここで、1層の厚さは概ね10mm程度であり、おおよそ3層がPC鋼より線のかぶり厚に相当する。なお、PC鋼より線に導入される緊張力(28.7kN/1本)の有効率(以下、有効緊張率)は、後述の検討により75%で統一した。

## 3.2 解析結果

### 3.2.1 解析モデルの妥当性

図10に新品のPCまくらぎに対して実施した曲げ試験結果と解析結果の比較を示す。図には解析結果として有効緊張率を100%とした場合と75%とした場合を示す。ここで、有効緊張率75%は試験結果と解析結果の荷重-変位関係が極力近くなるように試行錯誤的に決定したものである。なお、PCまくらぎの設計ではPC鋼より線の有効緊張率として65%が使用される<sup>10)</sup>。図より、有効緊張率を75%とすることで、PCまくらぎの曲げ試験時のひび割れ発生に伴う剛性の低下や耐荷力(最大荷重)、破壊までの荷重-変位関係を精度良く表現可能であることがわかる。ただし、「試験2」については

表7 解析ケース

CASE	スケーリング範囲	スケーリング深さ
健全	なし	0
1	まくらぎ両端部から340mm	1層(10mm) 2層(20mm) 3層(30mm)
2	まくらぎ中央部350mm	
3	まくらぎ両端部から340mm まくらぎ中央部960mm (レール位置を除く範囲)	
4	まくらぎ全体	

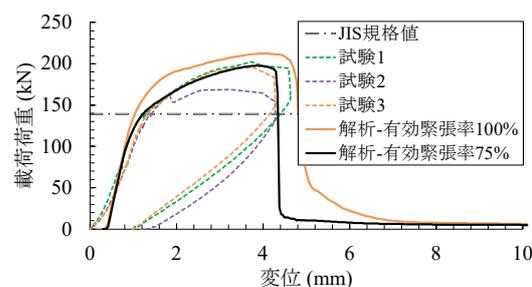


図10 曲げ試験結果と解析結果の比較

変位1.8mm程度で試験結果と解析結果に差異が生じているが、これは荷重中に生じた支点あるいは荷点でのコンクリートのひび割れや、それに伴うPCまくらぎのずれ等が原因と考えられる。

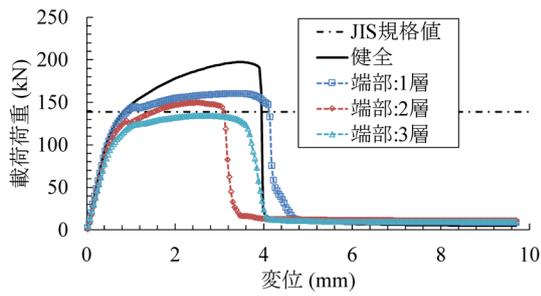
### 3.2.2 スケーリング範囲が耐荷力に及ぼす影響

図11にスケーリング範囲が荷重-変位関係に及ぼす影響に関する解析結果を示す。レール位置断面の正曲げ試験を対象としたため、中央部のスケーリングの影響は当然のことながら小さいが、端部やまくらぎ全体にスケーリングが発生すると耐荷力が低下すること、スケーリングの深さが大きくなると耐荷力が大きく低下すること、PC鋼より線のかぶり厚に相当する厚さでスケーリングが発生するとJISの規格値程度かそれを下回る耐荷力となることなどがわかる。以上の解析結果から、スケーリング範囲に着目することで凍害を受けたPCまくらぎの健全度評価が可能になると考えられる。

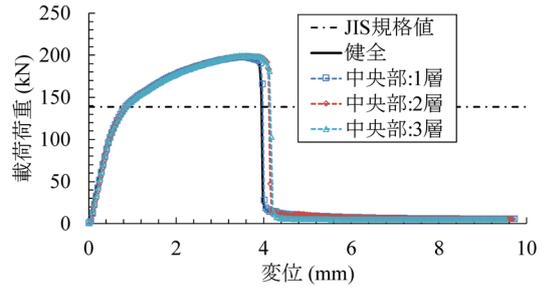
## 4. まとめ

今回対象とした凍害危険度が2および3の地域に敷設されたAEコンクリートを用いていない経年PCまくらぎ(経年45~55年程度)を対象に各種試験および数値解析を実施した。得られた知見は次のとおりである。

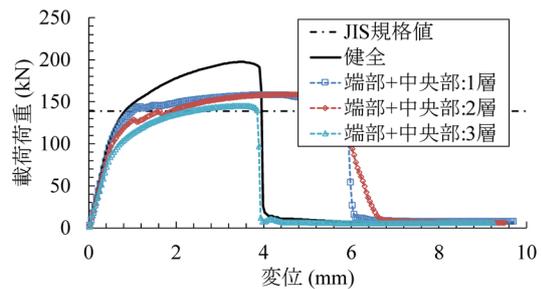
- (1) 主な変状は、凍害が原因と考えられるスケーリングおよび微細ひび割れが長手方向に連続したひび割れ、レール位置断面下縁の曲げひび割れ、まくらぎ底面の摩耗、PC鋼線の露出などであった。
- (2) 凍結融解試験および気泡間隔係数測定試験より、AEコンクリートを使用していないPCまくらぎは耐凍害性が低いことがわかった。



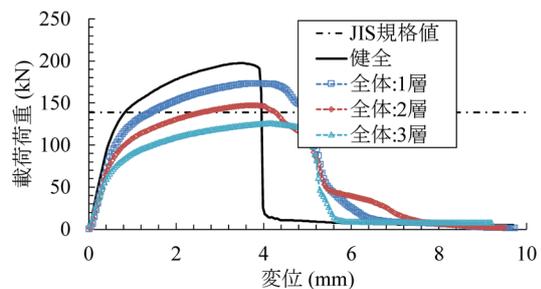
(a) CASE1 (まくらぎ端部スケーリング)



(b) CASE2 (まくらぎ中央スケーリング)



(c) CASE3 (まくらぎ端部+中央部スケーリング)



(d) CASE4 (まくらぎ全体スケーリング)

図 11 スケーリング範囲がPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響

表 8 凍害を受けた経年PCまくらぎの健全度評価方法の参考例

健全度	まくらぎの状態	措置の例
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>まくらぎ全体にスケーリング、断面欠損が発生</li> <li>PC 鋼線やスタップが露出</li> <li>レール締結のためのばね受台やその周囲の断面が欠損</li> </ul>	交換
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>まくらぎ一部にスケーリング、微細ひび割れ、断面欠損が発生</li> </ul>	経過観察
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>まくらぎ一部にスケーリング、微細ひび割れが発生</li> </ul>	経過観察
S	<ul style="list-style-type: none"> <li>健全</li> </ul>	

- (3) スケーリングが発生していない部分の超音波の伝播速度は 4.64 ~ 4.94km/s 程度となった。
- (4) 曲げ試験で JIS 規格値を満足しないまくらぎは、目視で明らかに健全ではないと判別できる程度の変状が発生したまくらぎであった。
- (5) JIS に規定される曲げ試験を再現可能な数値解析モデルを構築した。本モデルを用いてスケーリングの範囲や深さなどのパラメータの影響を検討した結果、スケーリング範囲に着目して凍害を受けた PC まくらぎの健全度を評価できることを明らかにした。
- (6) 以上の結果より、凍害を受けた経年 PC まくらぎに対する実務における健全度評価方法の例を表 8 に整理した。スケーリング範囲により凍害を受けた PC まくらぎの健全度評価が行えると考えられる。

なお、本研究で対象とした AE 剤を使用していない PC まくらぎは、JIS で規定される耐荷力を下回ったものが 165 本中 7 本（この 7 本は連続的に敷設されていたわけではない）であり、現時点では直ちに交換の必要はないと考えられる。今後は調査範囲や数値解析のパラメータを拡大するとともに、経年 PC まくらぎの交換計画に反映させることを検討していきたい。

## 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，Vol.64，No.4，pp.49-52，2018
- 2) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度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
- 3) 成田健，小山慎一郎，三橋博三：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.1，pp.29-38，2008
- 4) 渡辺勉，飯島亨，盛田慶，後藤恵一：凍害環境下における AE 剤を使用していない経年 PC まくらぎの性能評価，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，VI-887，2019
- 5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書【設計編】，丸善，p.165，2017
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 報告書，2016
- 7) 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，2004
- 8) Livemore Software Technology Corporation (LSTC): LS-DYNA Theory Manual, 2019.
- 9) Peter Grassl et al.: CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.
- 10) 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，2012