

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

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(工学) ○渡辺 勉
 (公財)鉄道総合技術研究所 博士(工学) 後藤 恵一
 (公財)鉄道総合技術研究所 飯島 亨
 (株)安部日鋼工業 正会員 盛田 慶

Abstract : In this research, aged PC sleepers placed in a region with a high risk of frost damage were examined. Various tests and numerical analysis on load capacity and material deterioration due to frost damage were conducted, and the effects of various parameters were evaluated. As a result, it was clarified that the sleepers not using the air entraining agent had low resistance to frost damage, and that if the scaling generated throughout the sleepers, the bending load resistance was less than the Japanese Industrial Standard (JIS) value. Furthermore, based on these results, we proposed a method for evaluating the soundness of PC sleepers with frost damage.

Key words : Prestressed concrete sleeper, Maintenance, Frost damage, Numerical analysis

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)は近年の鉄道の高速度化や快適化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3900万本を超える。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、営業線においてはそれらを超え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。このため鉄道事業者などにおいては、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^{たとえば、1)}。

一方、現在のPCまくらぎについては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PCまくらぎはわが国の比較的凍害危険度²⁾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。しかしながら、既往の検討は、主として首都圏の経年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、凍害危険度の高い地域に敷設され、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、①AE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。また、②数値解析により凍害(スケール)がPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響を評価する。③これらの結果より、AEコンクリートを使用していない経年PCまくらぎに対する実務における性能評価の着眼点を提案する。

2. 経年PCまくらぎの性能評価試験

2.1 対象PCまくらぎ

図-1に対象としたPCまくらぎを示す。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

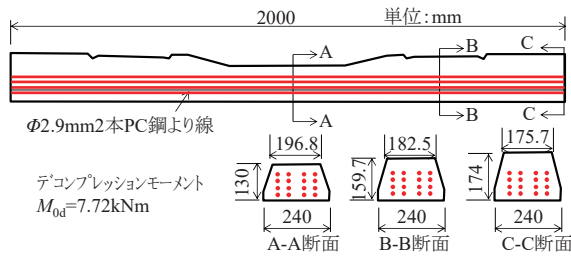


図-1 3号プレテンション式PCまくらぎ(JRS)

PCまくらぎ(3PR)である。表-1にコンクリートの諸元、表-2に対象としたPCまくらぎ(4線区:合計165本)の一覧を示す。敷設箇所は内陸部でかつ既往の研究のコンクリートの凍害危険度の分布²⁾に基づく、凍害危険度が2および3に分類される地域である。

2.2 試験項目

表-3に本研究で実施した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、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「パンジットlab」を用いて、経年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、経年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

(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ルンおよび微細ひび割れが長手方向に連続したひび割れ(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) 凍結融解試験および気泡間隔係数測定試験

図-3および表-5に凍結融解試験結果を示す。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分かった。表-6に気泡間隔係数測定試験の結果を示す。空気量は0.21~1.10%、気

表-1 コンクリートの諸元

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

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
外観調査	ひび割れ・断面欠損の有無、埋込材の変形状態などを観察
凍結融解試験	コアを採取し、融解工程終了後、一次共鳴振動数及び質量を測定(JIS A1148)
気泡間隔係数試験	コアを採取し、試料作製後顕微鏡観察(ASTM C457-16)
超音波測定	まくらぎ本体の超音波伝播速度を測定(超音波試験機「パンジット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)
曲げ試験	2点支持、1点载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
スケールン	31	20	13	5
縦ひび割れ	22	20	4	11
曲げひび割れ	46	50	35	14
PC鋼線露出	11	10	8	0

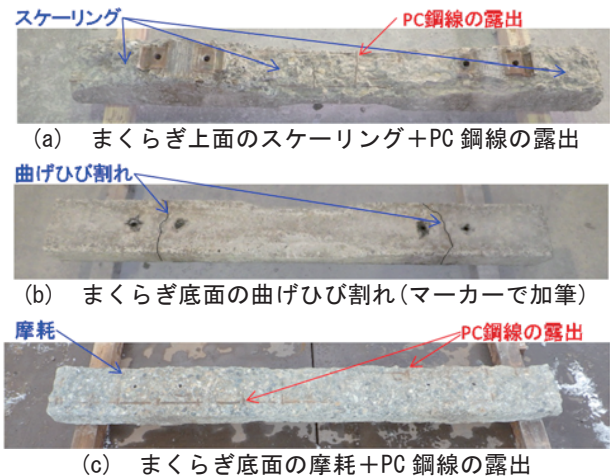


図-2 主な変状の概要

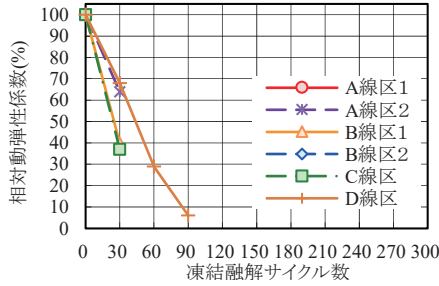


図-3 凍結融解試験結果

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³⁾とされており、本試験結果からもいずれの供試体も耐凍害性が低いことが分かる。

(3) 超音波の伝播速度測定試験

図-4に超音波の伝播速度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播速度は4.64~4.94km/s程度となったが、スケーリングと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、端部の一部にスケーリングが発生(図-4(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。

まくらぎ	製造年	試験開始時動弾性係数 平均値 E_D (kN/mm ²)	耐久性指数 平均値 DF	試験終了時の質量減少率 平均値 W_n (%)
A線区1	1965	36.6	2	-0.5
A線区2	1965	42.9	7	4.1
B線区1	1973	42.9	2	4.4
B線区2	1964	40.8	4	2.0
C線区	1965	44.7	4	-0.5
D線区	1968	37.8	7	0.8

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

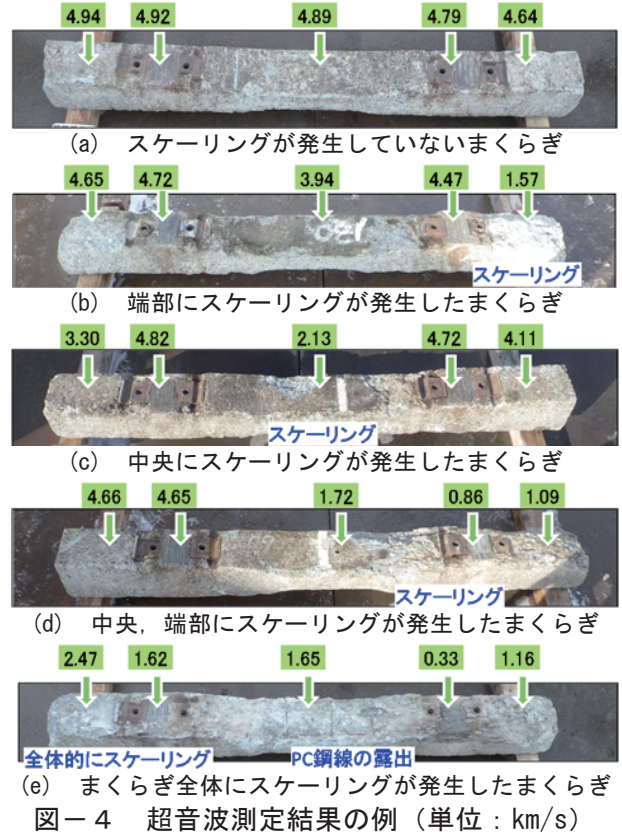


図-4 超音波測定結果の例 (単位: km/s)

(4) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

図-5に圧縮強度試験結果を、図-6に静弾性係数試験結果を示す。なお、グラフの横軸の通トンとは、PCまくらぎ敷設後に列車から作用した荷重の総和を示す累積通過トン数(以下、通トン)とした。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、ヤング係数は、鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)⁴⁾に示される設計基準強度に対するヤング係数33kN/mm²を概ね平均とするばらつきであることが分かる。なお、コア採取箇所は、まくらぎ1本の中でコアが採取可能であり、コンクリートが比較的健全な箇所、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。

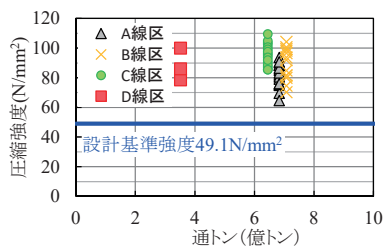


図-5 圧縮強度試験結果

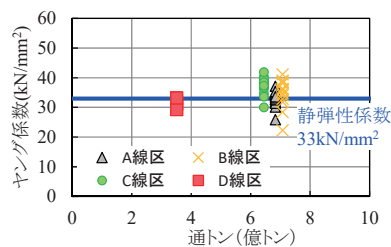


図-6 静弾性係数試験結果

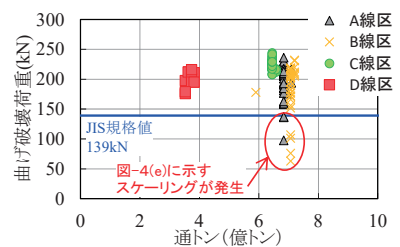


図-7 曲げ試験結果

(5) 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A線区で3本、B線区で4本であった。これらのまくらぎはまくらぎ全体にスケーリングが発生(図-4(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、目視で明らかに健全ではないと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-4(b),(c))していたとしても、2.3(3)でも示し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. スケーリングがPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する数値解析的検討

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検討を実施することとした。

3.1 解析方法

(1) 数値解析モデル

図-8に数値解析モデルを示す。非線形構造解析用汎用ソフトウェアLS-DYNA(ver R10.1.0)⁵⁾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。荷点条件はすべてJIS E 1201に準拠した。

コンクリート、荷点、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。ただし、荷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、荷点は鉛直方向(荷点方向)以外の自由度を、支点は全自由度をそれぞれ拘束した。PCまくらぎと荷点間、PCまくらぎと支点間の接触条件は、面と面の接触を定義した。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は考慮せず、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。

(2) 材料物性モデル

表-7に本解析で用いた材料定数を示す。コンクリートの材料定数は、後述する解析モデル検証用を実施した新品の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⁴⁾に基づき設定した。PC鋼より線の材料定数については、ポアソン比は設計標準の鋼材の値を用い、弾性係数や引張力/伸びの関係、最大引張力はミルシートの値を使用した。スターラップは弾性体とし、設計標準に基づき鋼材の材料定数を設定した。荷点および支点については剛体とした。

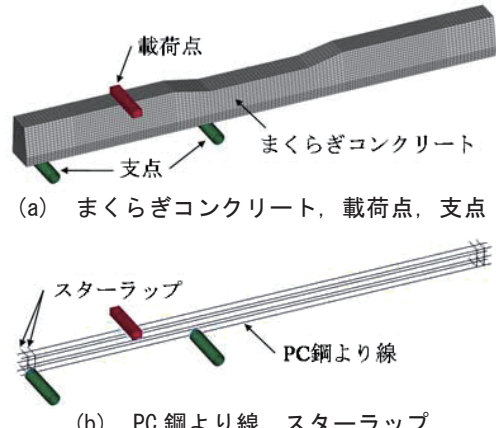


図-8 数値解析モデル (1/2 モデル)

表-7 本解析で用いた材料定数

材料	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 f _c (MPa)	引張強度 f _t (MPa)
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 σ _y : 1522.5 最大 σ _u : 1998.0	
スターラップ	200.0	0.30	弾性体	
荷点・支点	剛体			

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^{4),6)}。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。

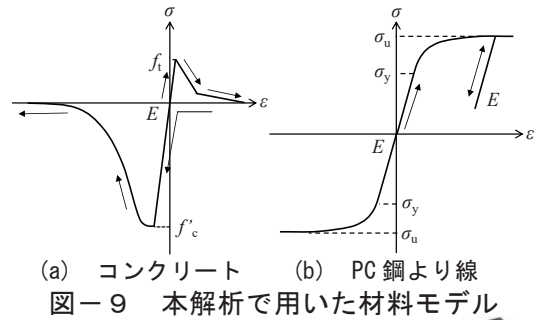


図-9 本解析で用いた材料モデル

(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まくらぎに荷重点および支点との接触を考慮し、荷重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重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重点の変位とした。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 1.5×10^{-6} sec程度とした。

(4) 解析ケース

図-8のPCまくらぎに加え、図-10に示すスケーリングの範囲を変化させた4種類のモデルを作成した。スケーリング範囲は第2章の調査結果を基に設定したものであり、解析上のスケーリングは、健全なPCまくらぎから上面、側面、下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。

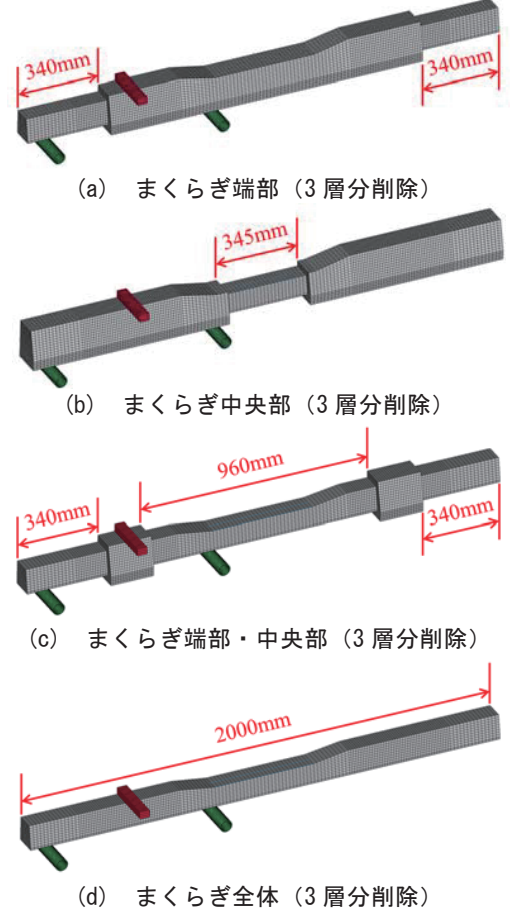


図-10 スケーリングの範囲 (3層)

3.2 解析結果

(1) 数値解析の妥当性

図-11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⁷⁾。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分かる。

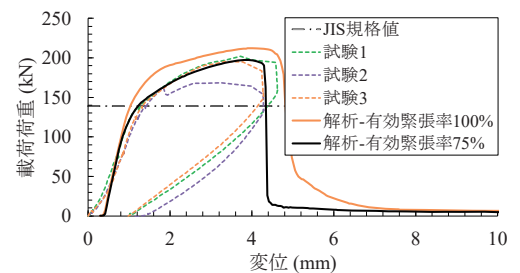


図-11 試験結果と解析結果の比較

(2) スケーリング範囲が耐力に及ぼす影響

図-12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の規格値の1/2以下の耐荷力となることなどが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた知見は次のとおりである。1)凍結融解試験および気泡間隔係数測定試験より、AE剤を使用していないPCまくらぎは耐凍害性が低いことがわかった。2)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。3)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。4)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、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。以上の結果より、表-8に凍害を受けた経年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整理した。

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150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。

参考文献

- 1)渡辺勉他：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
- 2)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
- 3)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
- 4)鉄道総合技術研究所：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
- 5)Livemore Software Technology Corporation (LSTC): LS-DYNA Theory Manual, 2019.2
- 6)Peter Grassl et al.: CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.7
- 7)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造），丸善，2012

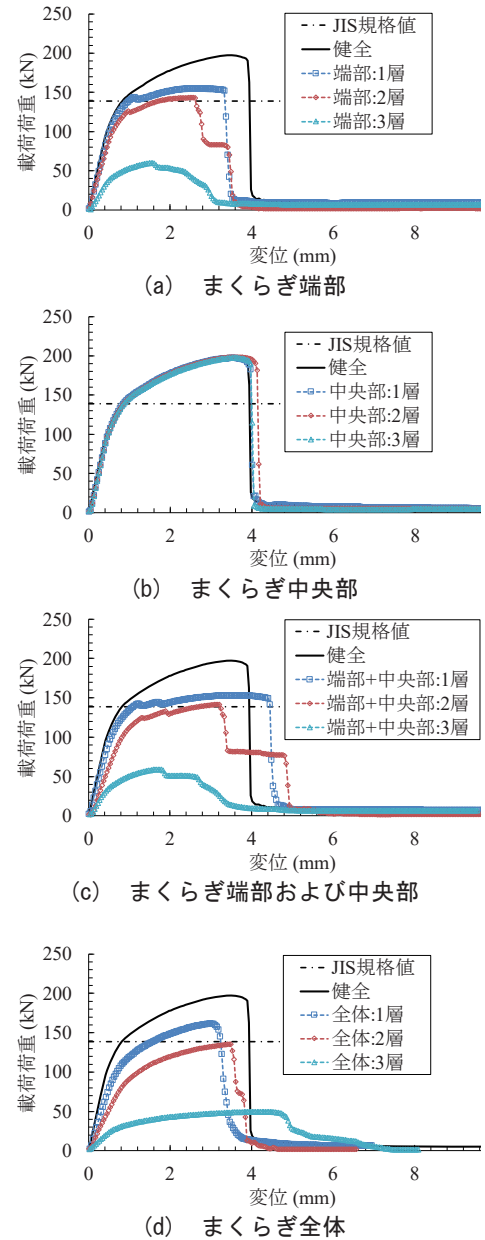


図-12 スケーリング範囲の影響に関する数値解析結果（有効緊張率 75%）

表-8 凍害を受けた経年PCまくらぎの健全度評価方法の例

健全度	まくらぎの状態	措置の例
A	・PC鋼線やスカーフが露出 ・まくらぎ全体にスケーリング，断面欠損が発生 ・レール締結のためのばね受台やその周囲の断面が欠損	交換
B	・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	経過観察
C	・まくらぎ一部にスケーリング，微細ひび割れが発生	経過観察
S	・健全	