

論文 凍害を受けた PC まくらぎの実態調査と健全度評価基準の検討

箕浦 慎太郎*1・渡辺 勉*2・飯島 亨*3・石田 哲也*4

要旨: 鉄道軌道の重要な構成部材である PC まくらぎは、過去に AE 剤未使用のものが凍害の危険度が高い地域にも多数敷設されており、現在ではその一部にスケーリング等の変状が確認されている。本研究では、凍害を受けた PC まくらぎの効果的な維持管理を行うために、凍害危険度が高い地域に敷設された PC まくらぎの実態調査と健全度評価基準の検討を行った。実態調査の結果、一部の PC まくらぎに凍害により曲げ耐力が JIS 規格値を下回るものが確認された。また、PC まくらぎのスケーリングの発生範囲と曲げ耐力の相関が高いことを明らかにするとともに、凍害を受けた PC まくらぎの健全度評価基準の例を提案した。

キーワード: PC まくらぎ, 凍害, 耐力, スケーリング, 健全度評価

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。国内での PC まくらぎの導入は 1961 年に東海道新幹線への大量投入を契機に広く進み、現在までの累計敷設本数は国鉄・JR のみでも 3950 万本を超える。PC まくらぎの設計耐用年数は一般的に 50 年とされているが、近年では営業線にてそれを超えるものも出てきており、木まくらぎの置き換えだけでなく既設 PC まくらぎの交換需要も増加している。このため鉄道事業者などにおいては、維持管理の効率化のために既設 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^{例えば, 1), 2)}。

現在製造されている PC まくらぎは AE 剤が一般的に使用されているが、特にプレテンション式の PC まくらぎにおいて、1990 年に JIS E1201 が制定されるまでは、コンクリート強度や鋼材の付着力の低下への懸念から AE コンクリートが使用されていなかった。このような PC まくらぎは比較的凍害危険度が高いと想定されている地域³⁾にも敷設されており、近年ではこれらの PC まくらぎの一部に凍害によると思われる変状が散見されている。AE 剤未使用の PC まくらぎは現在も日本各地に敷設されており、今後も凍害により交換が必要となる PC まくらぎは発生し続けると予想される。しかしながら、凍害による PC まくらぎの変状に関する体系的な検討は行われておらず、交換の基準は各現場の判断に拠っているのが現状である。このため、鉄道軌道の効果的な維持管理のためには凍害危険度の高い地域の既設 PC まくらぎの実態調査とそれに基づく健全度の評価基準の検討が必要となる。筆者らは、凍害を受けた PC まくらぎの実態調査を進めており、スケーリングの発生位置範囲が凍

害を受けた PC まくらぎの耐力評価において重要な指標であることを明らかにしてきた⁴⁾。ただし、これらの検討は定性的な評価にとどまっているのが実態である。また、通常 PC まくらぎの検査は徒歩巡視等の際に目視で行われるため、健全度の判定基準の制定のためには PC まくらぎの耐力と外観上の変状（スケーリング）の関係について、定量的に整理することが実務で活用することを想定した場合に重要となる。

そこで本研究では、PC まくらぎの健全度評価の指標として曲げ耐力に着目し、実際に凍害の危険度が高い地域において営業線に敷設されている PC まくらぎを対象とした各種試験を実施して、その実態を整理した。さらに、PC まくらぎの曲げ耐力と PC まくらぎ表面のスケーリングの程度や位置に着目し、凍害を受けた PC まくらぎの目視による健全度の評価基準に関する検討を行った。

2. 性能評価試験

2.1 対象 PC まくらぎ

図-1 に本研究で対象とした PC まくらぎ(PC3 号まくらぎ)を示す。対象とした PC まくらぎは日本国有鉄道規格(JRS)に規定される 3 号プレテンション式 PC まくらぎ(3PR)である。この種類の PC まくらぎは直線区間および

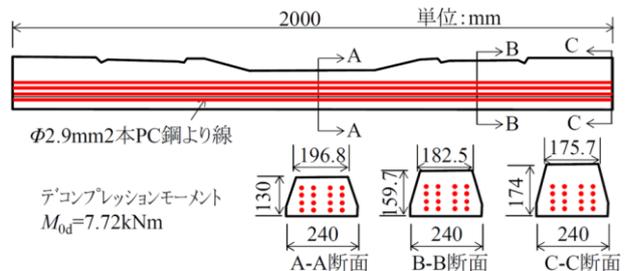


図-1 PC3 号まくらぎ

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工修 (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工博 (正会員)

*3 (株)ジェイアール総研エンジニアリング 材料技術部 (正会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

半径 800m 以上の曲線区間に敷設されるものである。

表-1 に現場から収集した PC まくらぎの一覧を示す。本研究では 4 線区から合計 165 本の PC まくらぎを調査した。対象とした線区は内陸部であり、既往の研究のコンクリートの凍害危険度の分布³⁾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

(1) 外観調査

図-2 に外観調査で作成した外観調査図の例を示す。PC まくらぎの外観上の変状を調査するために、収集した PC まくらぎを高圧洗浄機で洗浄したのち、各面に生じたスケーリングやひび割れ、PC 鋼より線の露出等の変状を確認し、外観調査図にスケッチした。外観調査は対象とした 165 本全ての PC まくらぎに対して行った。

(2) 材料試験

PC まくらぎの材料的な性能評価のために、まくらぎシヨルダ一部 (PC まくらぎの端部) もしくは中央部の上面のコンクリートコアが採取可能な箇所にて $\phi 50\text{mm}$ のコアを採取し、圧縮強度試験 (JISA108) 及び静弾性係数試験 (JIS A1149) を実施した。本試験は調査対象の PC まくらぎから合計 48 個のコア (線区 1 : 16 個, 線区 2 : 13 個, 線区 3 : 16 個, 線区 4 : 3 個) を採取して行った。

PC まくらぎの耐凍害性を評価するために、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、気泡間隔係数及び空気量を調査した。なお測定に際しては、PC まくらぎの粗骨材の最大寸法 (25mm) よりトラバース長を 2609.6mm と設定した。本試験は調査対象の PC まくらぎのうち 6 本 (線区 1 : 2 本, 線区 2 : 2 本, 線区 3 : 1 本, 線区 4 : 1 本) に対して行った。また、比較のために AE 剤を使用した新品の PC まくらぎについても調査した。

(3) 曲げ試験

図-3 に PC まくらぎの曲げ試験方法を示す。凍害による変状が発生した PC まくらぎの耐荷力を評価するために、JIS E 1201:1997 に規定されたレール位置 (正曲げ) および PC まくらぎ中央部 (負曲げ) での曲げ試験を実施した。JIS では、曲げ保証荷重 (ひび割れが発生しない荷重) と曲げ破壊荷重が規定されているが、本試験では曲げ破壊荷重により評価した。なお今回対象とした PC まくらぎは日本国有鉄道規格 (JRS) に基づき製造された 3 号 PC まくらぎであるが、その敷設範囲は現行の JIS に規定された 3 号 PC まくらぎと同じであり、形状もほぼ同じであることから、耐荷力は JIS で規定されている方法及び基準値で評価した。本試験は調査対象の PC まくらぎのうち 125 本 (線区 1 : 41 本, 線区 2 : 35 本, 線区 3 : 38 本, 線区 4 : 11 本) に対して行った。

表-1 調査対象 PC まくらぎ

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

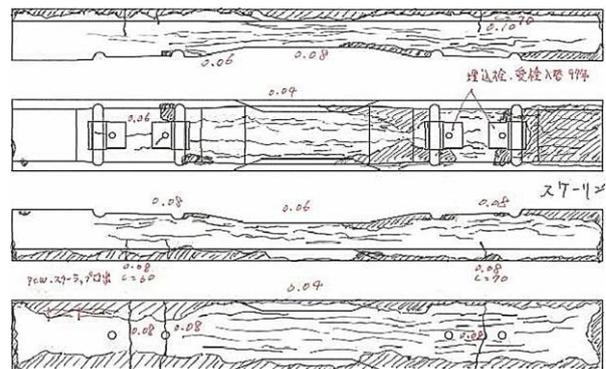
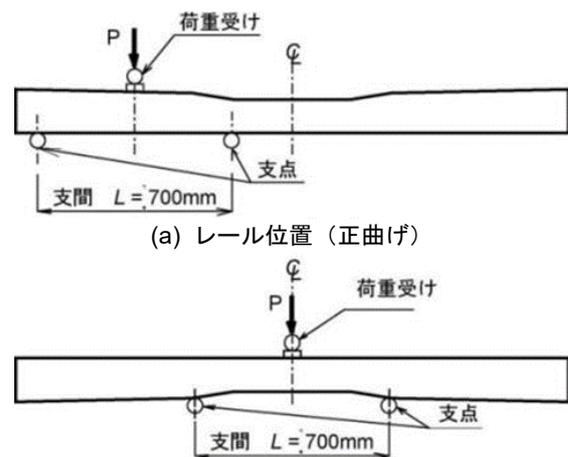


図-2 外観調査図の例



(a) レール位置 (正曲げ)
(b) PC まくらぎ中央部 (負曲げ)
図-3 PC まくらぎの曲げ試験方法

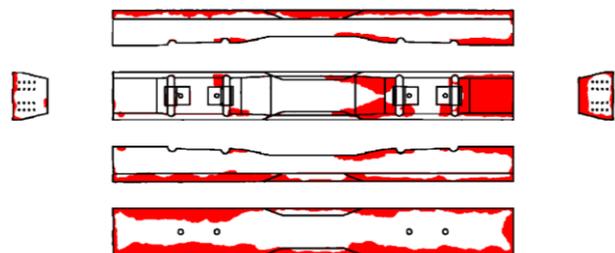
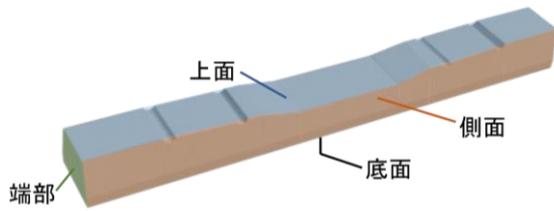


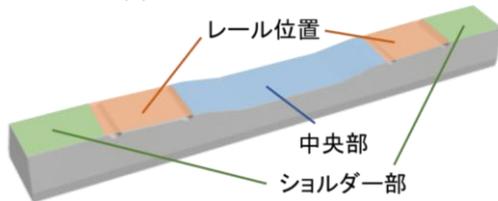
図-4 外観調査図からスケーリング発生箇所のみを抽出した例 (赤い部分がスケーリング)

(4) スケーリング面積

図-4 に外観調査図からスケーリング発生箇所のみを抽出した例を示す。スケーリングの発生量を定量的に把握するために、外観調査で作成した外観調査図を画像処理することでスケーリング面積 (スケーリングが生じた



(a) PC まくらぎの各表面



(b) PC まくらぎの部位

図-5 PC まくらぎの表面及び部位の分類

領域の面積)を求めた。具体的には、まず、外観調査図をスキャンして画像データに変換したのち、画像データのゆがみやサイズのばらつきを補正した。次に、補正後の画像のスケールリングが発生している位置を塗りつぶし、その部分だけを抽出して面積を計測することでスケールリング面積を求めた。スケールリング面積はPC まくらぎの表面積に対する割合で評価した。なおスケールリング面積を求める際に、上面と側面などPC まくらぎの角部で重複している部分があるが、本論文では修正せずそのままの値を用いた。

図-5にPC まくらぎの表面及び部位の分類を示す。スケールリングがPC まくらぎのどの面に発生しやすいかを把握するために、各面ごとにスケールリング面積を算出した。また、PC まくらぎ上面については、ショルダー部、レール位置付近、中央部の3か所に分けて、それぞれのスケールリング面積も算出し、各部でのスケールリング面積がPC まくらぎの耐荷力に与える影響を評価した。

3. 試験結果

3.1 外観調査

表-2に今回調査したPC まくらぎの変状の内訳を、図-6にPC まくらぎの変状の例を示す。調査対象のまくらぎの多くにスケールリングやひび割れが発生しており、一部のまくらぎではPC 鋼より線が露出していた。このようなPC まくらぎの耐荷力が大きく低減している可能性がある。

3.2 材料試験

図-7にコンクリートの圧縮強度試験結果とPC まくらぎの経年の関係を、図-8にコンクリートの静弾性係数試験結果と経年の関係を示す。圧縮強度はいずれも設計基準強度(49.1N/mm²)を上回っていることが確認された。また、静弾性係数は、鉄道構造物等設計標準・同解析(コンクリート構造物)⁹⁾に示される、設計基準強度に対する静弾性係数(33kN/mm²)と同程度の値となってい

表-2 PC まくらぎの変状の内訳

変状	線区1 (本)/50本	線区2 (本)/50本	線区3 (本)/50本	線区4 (本)/15本
スケールリング	31	20	13	5
縦ひび割れ	22	20	4	11
曲げひび割れ	46	50	35	14
PC 鋼より線露出	11	10	8	0



(a) スケールリング



(b) 曲げひび割れ



(c) PC 鋼より線の露出

図-6 PC まくらぎの変状例

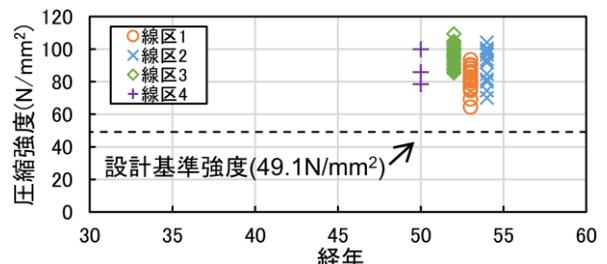


図-7 圧縮強度試験結果

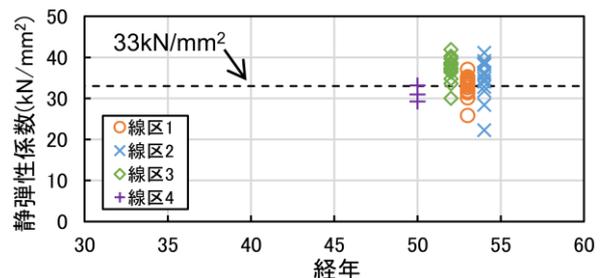
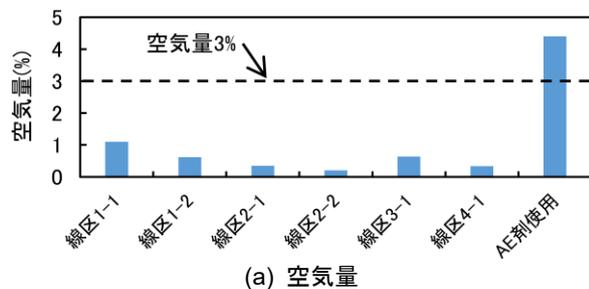


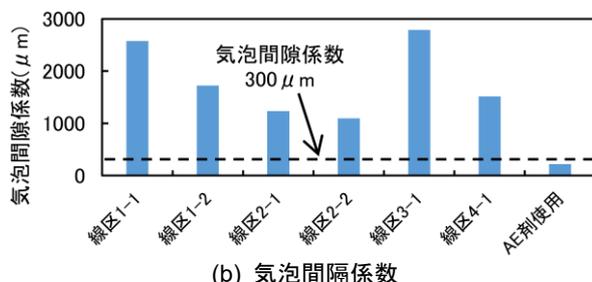
図-8 静弾性係数試験結果

た。また、圧縮強度及び静弾性係数と経年の関係では、明確な相関性は確認できなかった。なお、本試験で用いたコンクリートコアは、PC まくらぎのコンクリートが比較的健全な箇所採取しており、コアの採取ができないスケールリングやひび割れが発生している箇所では、これらの図で示す圧縮強度及び静弾性係数よりも低い値を示す可能性がある。

図-9に気泡間隔係数測定試験の結果を示す。一般的に、硬化後のコンクリートの空気量を3%以上、気泡間隔係数を300μm以下とすれば優れた耐凍害性が期待できる⁹⁾とされている。AE剤を使用したPC まくらぎは空気



(a) 空気量



(b) 気泡間隔係数

図-9 気泡間隔係数測定試験

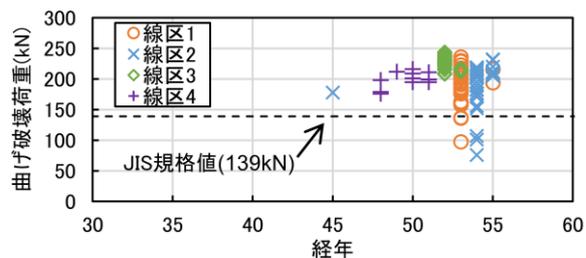
量、気泡間隔係数共にこの基準を満たしていることが確認されたが、今回調査対象とした経年 PC まくらぎはいずれの値も満たしていなかった。

3.3 曲げ試験

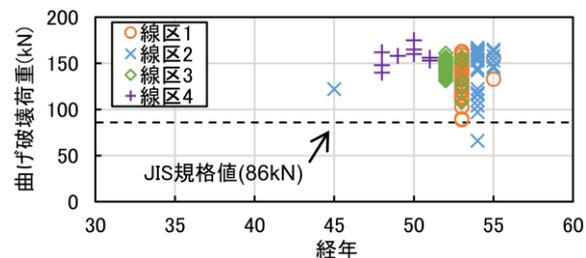
図-10にレール位置及びPC まくらぎ中央での曲げ試験の結果とPC まくらぎの経年の関係を示す。PC まくらぎの破壊形態はすべてコンクリートの圧壊によるものであった。線区3及び線区4ではすべてのPC まくらぎがJISで規定された曲げ破壊荷重(正曲げ: 139kN, 負曲げ: 86kN)を上回ったが、線区1及び線区2では規格値を下回ったPC まくらぎがあった。これらのPC まくらぎは、図-6に示すようなPC まくらぎ全体にスケーリングが生じ、PC 鋼より線が露出するような状態であった。PC まくらぎは通常隣接して敷設されたものが連続して損傷していない限り直ちに安全性に問題が生じるというものではないが、このようなPC まくらぎは早急に交換することが望ましい。一方、線区3ではすべてのPC まくらぎで曲げ破壊荷重(正曲げ)が200kN以上となっていた。線区3のPC まくらぎが敷設されていた現場は、山間部で日射が当たりにくい場所であったため、凍害による変状が少なかった可能性がある。曲げ破壊荷重と経年の関係については、圧縮強度及び静弾性係数と同様に明確な傾向は得られず、また、同じ線区においてもばらつきが大きい。凍害による変状は気温や日射などの周辺環境の影響を受けるため、経年だけで評価するのは難しいと考えられる。

3.4 スケーリング面積

図-11にスケーリング面積と経年の関係を示す。線区1及び線区2においては、変状の大きいPC まくらぎだと全体の約50%、上面の約80%にスケーリングが生じているものがあった。

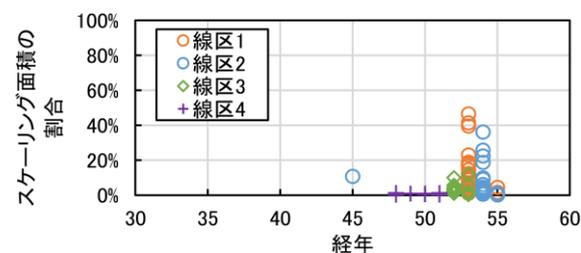


(a) レール位置 (正曲げ)

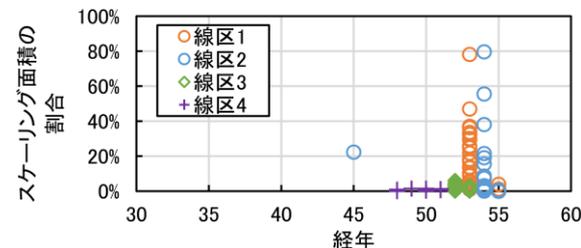


(b) PC まくらぎ中央 (負曲げ)

図-10 曲げ試験結果



(a) 全表面



(b) PC まくらぎ上面のみ

図-11 スケーリング面積と経年の関係

図-12にPC まくらぎ各面でのスケーリング面積の平均値を、図-13にPC まくらぎ上面の各部でのスケーリング面積の平均値を示す。図-12より、特にスケーリング面積が比較的大きい線区1及び線区2において、PC まくらぎ上面及び端部にスケーリングが発生しやすいことが確認された。これにより目視で確認可能な上面のみでもある程度診断が可能であると考えられる。また図-13よりショルダー部で特にスケーリングが発生しやすく、レール位置では比較的スケーリング面積が少ないことが確認された。レール位置では締結装置や軌道パッド等で保護されているため、比較的進行が遅いと考えられる。PC まくらぎのスケーリングはまず端部に生じ、劣化が進行するとレール位置でもスケーリングが発生すると考えられる。

図-14にスケーリング量とレール位置での曲げ破壊

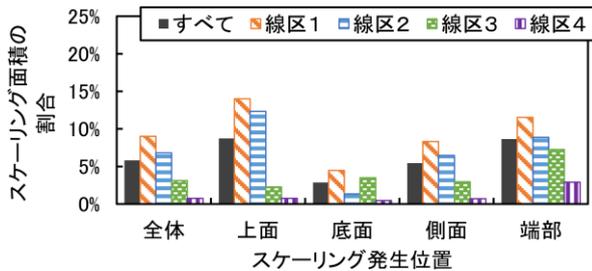


図-12 PC まくらぎの位置ごとのスケーリング面積

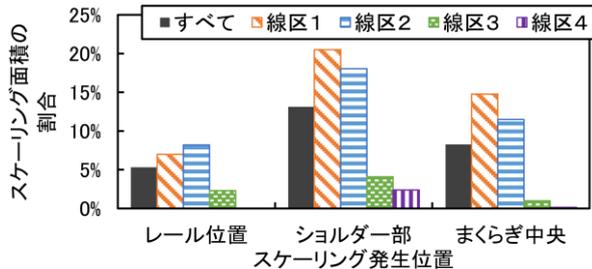
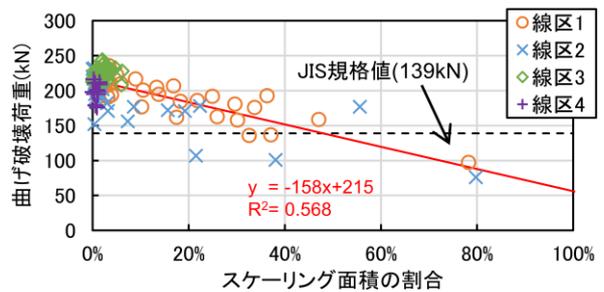


図-13 PC まくらぎ上面での各部のスケーリング面積

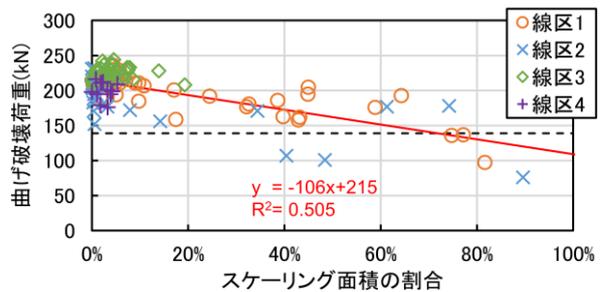
荷重（正曲げ）の関係を示す。また図中に4線区すべてのデータから最小二乗法により求めた回帰直線も併せて示す。図から、PC まくらぎ上面のスケーリング面積が増加するとともに曲げ破壊荷重が低下し、上面全体の50%程度までスケーリングが生じると曲げ破壊荷重が JIS 規格値を下回るといった傾向が得られた。一部の PC まくらぎでは20%以下でも JIS 規格値を下回ったものがあったが、前述のとおり連続的に PC まくらぎの損傷が生じていなければ直ちに問題にはならないため、今回は平均的な値で評価することとした。また、PC まくらぎの上面ショルダー部及び中央部でのスケーリング面積が増大しても曲げ破壊荷重の低下は比較的緩やかであるが、レール位置でのスケーリング面積が増加すると急激に曲げ破壊荷重が低下する傾向が得られた。これは、PC まくらぎ上面のレール位置のコンクリートは曲げ破壊に対して圧縮縁となるためであると考えられる。

図-15にスケーリング量とPC まくらぎ中央部での曲げ破壊荷重（負曲げ）の関係を示す。PC まくらぎ中央部においても正曲げ試験の結果と同様スケーリング面積に応じて曲げ破壊荷重が低下する傾向が得られたが、PC まくらぎ上面中央部のスケーリング面積が増加しても、曲げ破壊荷重は大きくは低下しなかった。これは、PC まくらぎ上面は負曲げの引張端となり、PC 鋼より線が応力を負担したためと考えられる。ただし、スケーリングの進行により PC 鋼より線が露出し、それにより PC 鋼より線に腐食や破断が発生すると曲げ耐力は大きく低下する恐れがあるため注意する必要がある。

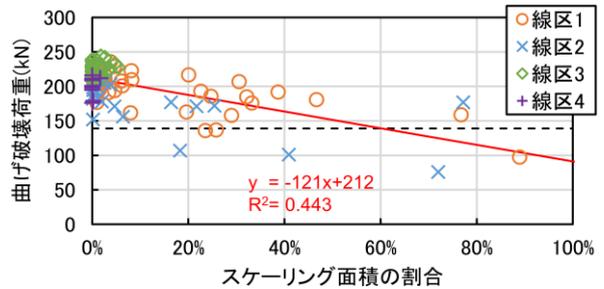
以上のことから、PC まくらぎのスケーリングの発生範囲と曲げ耐力の相関が高いことを明らかにした。これらの点に着目することにより PC まくらぎの健全度を簡



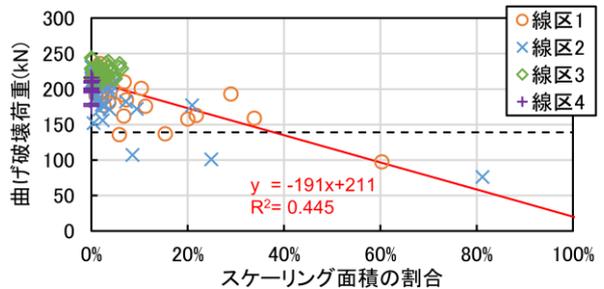
(a) PC まくらぎ上面のスケーリング面積



(b) PC まくらぎ上面ショルダー部でのスケーリング面積



(c) PC まくらぎ上面中央部でのスケーリング面積



(d) まくらぎ上面レール位置でのスケーリング面積
図-14 スケーリング面積と曲げ破壊荷重(正曲げ)の関係

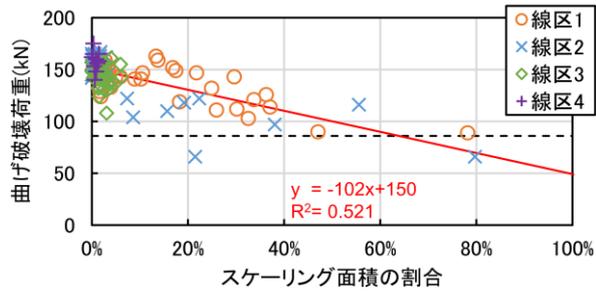
易に評価できると考えられる。

3.5 PC まくらぎの健全度評価の基準の提案

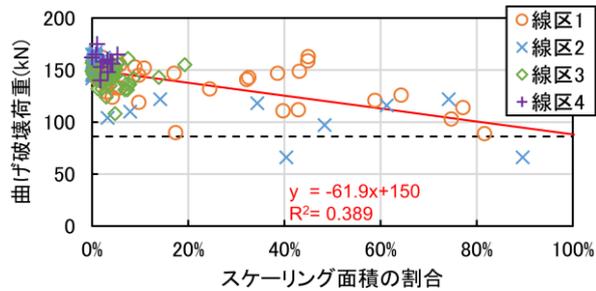
表-3に上記の結果を基に作成した凍害 PC まくらぎの健全度評価基準の案を示す。以上の結果より、徒歩巡視等の際の目視検査によって得られた PC まくらぎ上面のスケーリング面積と発生位置の情報から曲げ耐力の診断が可能であり、これに基づく健全度判定が行えると考えられる。

4. まとめ

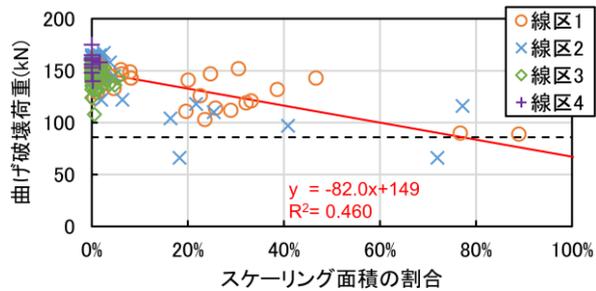
本研究では、凍害の影響を受けた PC まくらぎの実態調査と健全度評価指標の検討を実施した。得られた知見



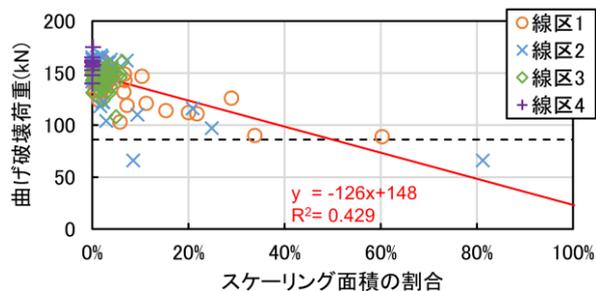
(a) PC まくらぎ上面のスケーリング面積



(b) PC まくらぎ上面ショルダー部でのスケーリング面積



(c) PC まくらぎ上面中央部でのスケーリング面積



(d) PC まくらぎ上面レール位置でのスケーリング面積

図-15 スケーリング面積と曲げ破壊荷重(負曲げ)の関係

を以下に示す。

- 凍結融解試験および気泡間隔係数測定試験の結果より、AE 剤未使用の PC まくらぎは AE 剤を使用した PC まくらぎと比べて、耐凍害性が低い可能性がある。
- 凍害の影響を受けた PC まくらぎの中には、PC まくらぎ全体にスケーリングやひび割れが生じていたケースや、PC 鋼より線の露出や認められるなど損傷が著しいもの見られた。
- 凍害による変状の大きな PC まくらぎの曲げ耐荷力は JIS 規格値を下回っていた。しかしながら、各 PC まくらぎの敷設環境の違いから、経年との間には明確

表-3 PC まくらぎの健全度評価基準の例

健全度	PC まくらぎの状態	措置の例
A	<ul style="list-style-type: none"> PC まくらぎ上面の 50%以上でスケーリング・断面欠損 レール位置でスケーリング・断面欠損 PC 鋼材やスターラップが露出 レール締結装置のばね受台や埋込栓の破損 	交換
B	<ul style="list-style-type: none"> レール位置以外でスケーリング (PC まくらぎ上面の 50%以下) 	経過観察
C	<ul style="list-style-type: none"> ショルダー部の一部にスケーリング 微細なひび割れが発生 	経過観察
S	<ul style="list-style-type: none"> 健全 	なし

な相関性は確認できなかった。

- PC まくらぎのスケーリング面積及び位置の評価結果から、スケーリングは PC まくらぎ上面のショルダー部に発生しやすいことが確認された。
- スケーリング面積の増加に応じて PC まくらぎの曲げ耐荷力が低下し、上面の約 50%にスケーリングが発生すると正曲げの耐荷力が JIS 規格値を下回る傾向があることが確認された。また、PC まくらぎの正曲げの耐荷力の低下に対しては、レール位置でのスケーリングの影響が大きいことが確認された。

参考文献

- 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
- 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, Vo.64, No.4, pp.49-52, 2018.4
- 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
- 渡辺勉, 後藤恵一, 飯島亨, 盛田慶: 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, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, Vol.28, pp.377-382, 2019
- 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
- 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