

塩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**
 箕浦 慎太郎* 飯島 亨***

Performance Evaluation of Aged Prestressed Concrete Sleepers in Areas under High Risk of Salt Damage

Tsutomu WATANABE Keiichi GOTO
 Shintaro MINOURA Toru IJIMA

There has been little systematic examination of material deterioration about PC sleepers. This research examines aged sleepers placed in a region under a high risk of salt damage. Various tests and numerical analysis on load capacity are conducted. The result clarifies that even sleepers laid near the coastline do not need to be replaced immediately because the load-bearing capacity of sleepers satisfies the JIS. However, since chloride ion concentration exceeds 1.2kg/m^3 , there is a risk of steel wire corrosion, and it is estimated that the replacement time of sleepers becomes than ones in general environments.

キーワード：PC まくらぎ，維持管理，塩害，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のまくらぎ（以下、PC まくらぎという）は、鉄道の高速度化、快適化、安定輸送に欠かすことのできない重要な構成要素である。我が国の PC まくらぎは、1951 年に初めて試験敷設されて以降、2019 年度末までの累計敷設本数は国鉄、JR だけでも 4000 万本を超えている。

PC まくらぎの維持管理は、年 1 回程度の定期的な徒歩巡回において外観目視検査が行われ、PC まくらぎの表面状態を指標とする基準¹⁾に基づき交換の要否を判定する体系となっている。この基準は必ずしも PC まくらぎの耐荷性能とリンクしたのではなく定性的なものであるため、不良と判定されても交換の緊急性は明確でない。このため、一般的な PC まくらぎの設計上の耐用年数である 50 年を超えても供用上問題がなければ使用を継続しているのが実態である。

営業線における PC まくらぎの敷設本数は膨大であるが、一晩の夜間工事で交換できる本数は限られている。このため、例えばある時期において、既設の PC まくらぎにおいて耐荷性能を満足しない不良 PC まくらぎが急増かつ連続的に発生した場合、交換工事が追いつかなくなることが懸念される。このような状況を回避するために、今後の PC まくらぎの維持管理は、耐荷性能とリンクした定量的な健全度判定基準や交換基準に基づき計画的に実施することが望ましい。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
 ** 鉄道力学研究部 構造力学研究室
 *** 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング



図1 PC まくらぎの塩害の例

このような背景から筆者らは、新たな維持管理体系の構築のため、経年 PC まくらぎの実態調査や交換基準に関する研究を進めている^{2)~5)}。本稿で対象とする PC まくらぎの塩害については、図 1 に示すように海岸付近の線区や海岸付近の河川を横断するトンネル、さらには都市地下鉄の河川直下のトンネル区間などで確認された事例⁶⁾があるが、塩害環境下を対象とした体系的な検討が行われていないのが実態である。そこで本研究では、塩害が特に厳しいと想定される海沿いの線区に敷設された経年 PC まくらぎを対象とし、各種性能評価試験や数値解析により劣化傾向や耐荷力評価を行うこととした。なお、PC まくらぎの製造方法はプレテンション方式とポストテンション方式の 2 種類があるが、本研究ではプレテンション方式で製造された PC まくらぎを対象とした。

2. 経年 PC まくらぎの性能評価

2.1 対象 PC まくらぎ

図 2 に対象とした PC まくらぎを示す。日本国有鉄道規格 (JRS) で規定されたプレテンション式の 3 号 PC まくらぎ (3PR) および 6 号まくらぎ (6PR) を対象とした。3PR は直線および半径 800m 以上の曲線区間に、6PR は

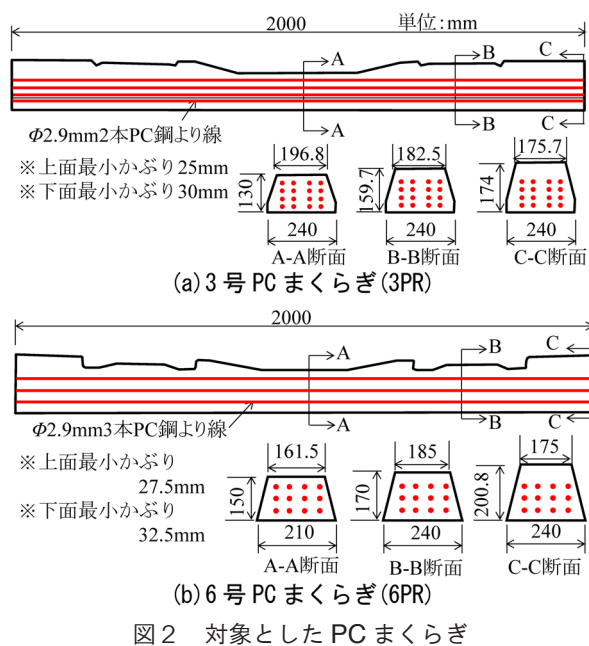


図2 対象とした PC まくらぎ

曲線半径 240m 以上 800m 未満の曲線区間に用いられる。なお、3PR に使用される PC 鋼より線は 2 本より線となっているが、1970 年頃から 3 本より線に変更されている。

表 1 にコンクリートの諸元、表 2 に評価した経年 PC まくらぎの一覧を示す。敷設箇所の海岸線からの距離は 100 ～ 150m である。なお、比較用に同じ線区で海岸線からの距離が 2000m ～ 3000m の範囲の PC まくらぎも対象とした。

2.2 試験項目

表 3 に試験項目を示す。まず、PC まくらぎのコンクリートのひび割れ、断面欠損や錆汁の有無を把握するため、PC まくらぎ表面を高圧洗浄機で洗浄したうえで、外観調査を実施した。また、PC まくらぎの力学的な性能評価のために、PC まくらぎの曲げ試験 (JIS E1201) を実施した。なお、耐荷力の評価はレール位置断面の正曲げ試験で行った。さらに、PC 鋼より線の腐食状況は、PC まくらぎを破壊し、PC 鋼より線をコンクリート内部から取り出し、目視で確認した。コンクリート中の塩化物イオン濃度は、各箇所でもっと古い PC まくらぎから 3 本程度抽出し、PC まくらぎの左・右レール位置断面、中央断面の合計 3 断面において、深さ方向に 10mm ピッチで 50mm までドリル削孔を行い、得られた試料粉に対して「電量滴定式全塩分迅速測定器」を用いて求めた。なお、PC まくらぎから採取したコア供試体より中性化深さを測定したが、すべての PC まくらぎで中性化は見られなかった。

2.3 試験結果

2.3.1 外観調査

図 3 に外観調査により確認された主な変状を、表 4 に箇所別の発生状況をそれぞれ示す。PC まくらぎに見られ

表 1 コンクリートの諸元

設計基準強度 f_{ck} (MPa)	49.1
プレストレス導入時強度(MPa)	39.2
静弾性係数 E_c (GPa)	33.0

表 2 経年 PC まくらぎの一覧

箇所	海岸線からの距離(m)	3号 PC まくらぎ (3PR)		6号 PC まくらぎ (6PR)	
		経年(年)	本数(本)	経年(年)	本数(本)
A	100	47	1	47	20
		48	7		
B	100	-	-	39	2
				44	3
C	100	44	1	39	1
		45	2	41	3
		51	1	42	1
		52	1	44	1
		53	1	-	-
D	150	-	-	38	15
A+B+C+D			17		46
E	2000	-	-	40	10
F	3000	48	3		
		49	2		
		50	6		
		51	4		
E+F			15		10
合計			42		56

表 3 試験項目

項目	内容
外観調査	ひび割れ、断面欠損、錆汁等の有無を調査
曲げ試験	2点支持、1点载荷の曲げ試験を実施 (JIS E 1201)
PC 鋼より線の腐食状況調査	PC まくらぎを破壊し、腐食状況を目視で確認。
塩化物イオン濃度測定試験	ドリル粉から測定。電量滴定式全塩分迅速測定器(中研コンサルタント)を使用。

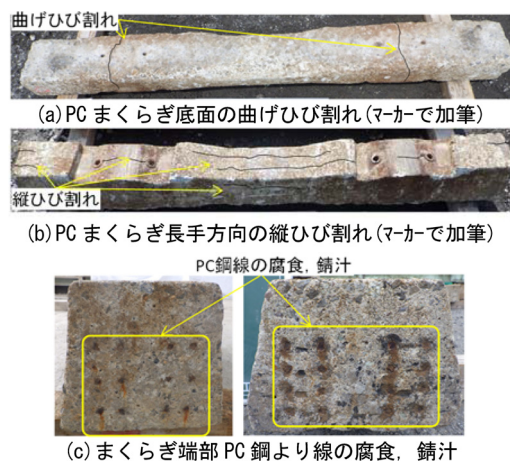


図 3 主な変状の概要

表 4 箇所別の変状発生状況

箇所	曲げひび割れ		縦ひび割れ	
	3PR(本)	6PR(本)	3PR(本)	6PR(本)
A	10 (100%)	2 (10%)	5 (100%)	16 (80%)
B	-	1 (14%)	-	2 (28%)
C	0	0	0	0
D	-	0	-	0
E	-	0	-	0
F	14 (93%)	-	11 (73%)	-

※同表中の「-」は、調査対象まくらぎが無いことを示す。

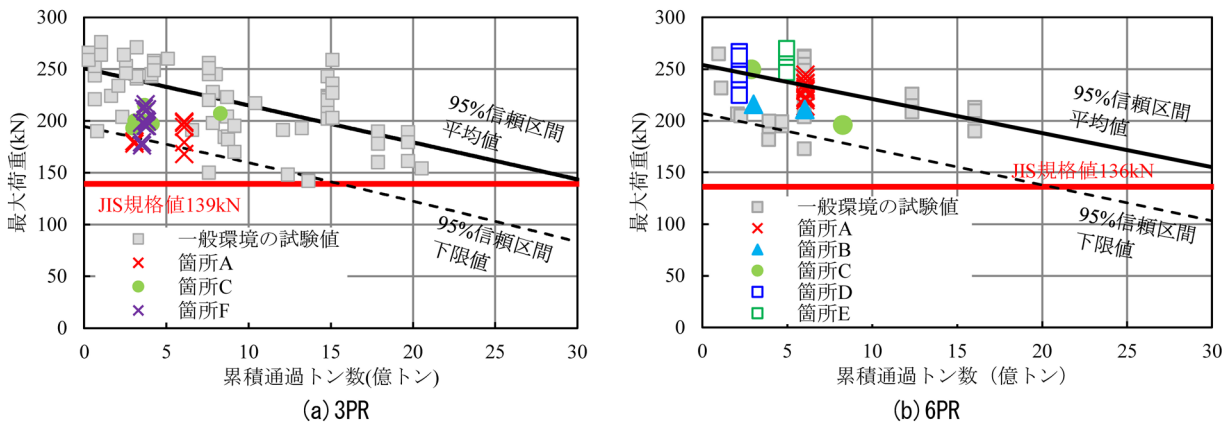


図4 曲げ試験結果（累積通トンと最大荷重の関係）

た主な変状は、レール位置断面の曲げひび割れ、PC まくらぎ長手方向に連続する縦ひび割れ、PC まくらぎの端部におけるPC 鋼より線の腐食、錆汁であった。図1に示したような端部のコンクリートが剥落した変状は見られなかった。曲げひび割れは列車からの衝撃荷重、縦ひび割れはアルカリ骨材反応やエトリングaitの遅延生成⁷⁾などが原因で発生する。また、ほぼすべてのPC まくらぎの端部でPC 鋼より線の腐食とそれに伴う錆汁が見られた。これはPC まくらぎの製造時にモルタルなどで行った端面の防錆処理が経年により剥がれ、PC 鋼より線が露出したためである。なお、このモルタルは厚さが数mmであり、PC 鋼より線の方がモルタルよりも先に腐食して膨張したためにモルタルが剥がれた可能性も考えられる。

2.3.2 曲げ試験

図4に曲げ試験結果を示す。横軸を累積通過トン数、縦軸をJIS E1201の曲げ試験を行った際の最大荷重とした。同図には、海岸線から離れた一般環境の試験値²⁾とそれに基づく近似曲線と95%信頼区間の下限値を示した。限られたサンプル数ではあるが、同図より、対象とした7箇所のPC まくらぎの曲げ試験結果は、ひび割れの有無に関わらず、一般環境の試験結果のばらつきの範囲内に概ね収まることが分かる。ただし、今回の海岸線からの距離が100m～150mのサンプル(箇所A,B,C,D)については、一般環境の試験結果のばらつきに比べると最大荷重が低い傾向にあるものもあるため、既往研究^{2) 3)}で提案されているマクロな視点で耐用期間を決定する場合には、95%信頼区間の下限値を目安にする方が望ましいと考えられる。

2.3.3 PC 鋼より線の腐食状況調査

図5にPC 鋼より線の腐食状況の例を示す。箇所DのPC まくらぎの表面側の6本のPC 鋼より線を示した。同図より、PC 鋼より線はPC まくらぎの端部から最大で700mmの範囲で部分的に錆びが発生していること、PC まくらぎ中央部では見られないことなどが分かる。腐食の程度は断面減少を伴わない錆であった。なお、一般環境のPC まくらぎの腐食調査では、100mmを超え

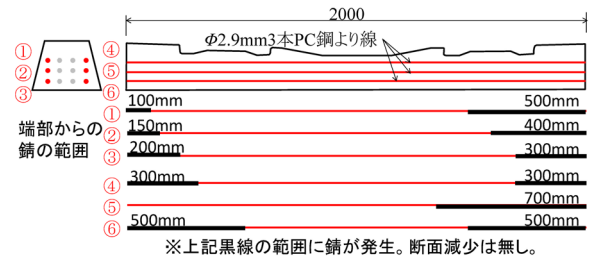


図5 PC 鋼より線の腐食状況の例（箇所D）

る深さの腐食は確認されておらず²⁾、海岸線から150mという敷設箇所の影響が大きいと推察される。また、端部を中心に腐食が見られるのは、図3や2.3.1項に示したように、PC 鋼より線が端部で露出したことが原因の1つと考えられる。これは、鉄筋コンクリート構造物などにおいて一般的に見られるコンクリート表面からの塩化物イオンの浸透による鋼材腐食とは異なるものである。なお、1970年代前半頃まで、φ2.9mm-2本より線を用いたプレテンション方式のPC まくらぎは、PC 鋼より線表面を強制的に錆びさせ、表面を粗くすることによりコンクリートとの付着を確保していた。このため、2本より線のPC まくらぎについては、錆付けによりPC 鋼より線全体が錆びており、飛来塩分による錆か、製造上の錆かを識別することは困難であった。

2.3.4 塩化物イオン濃度測定試験

図6にPC まくらぎの塩化物イオン濃度測定試験の結果を示す。資料は各PC まくらぎの3断面で採取したが、それらの最大値を示した。また、鉄道構造物等設計標準・同解説⁸⁾(以下、鉄道標準)に示される塩化物イオン濃度の制限値1.2kg/m³、コンクリート標準示方書⁹⁾(以下、学会示方書)に示される式からコンクリートの水セメント比を0.35として算出した鋼材腐食発生濃度2.35kg/m³、PC まくらぎの最小かぶり25mmを付記した。限られたサンプル数ではあるが、図6より、海岸線からの距離が100m程度の箇所A,Cの塩化物イオン濃度の実測値は、最小かぶり25mmにおいて1.2kg/m³を超えること、箇所Bの実測値は2.35kg/m³を超えることが分かる。また、

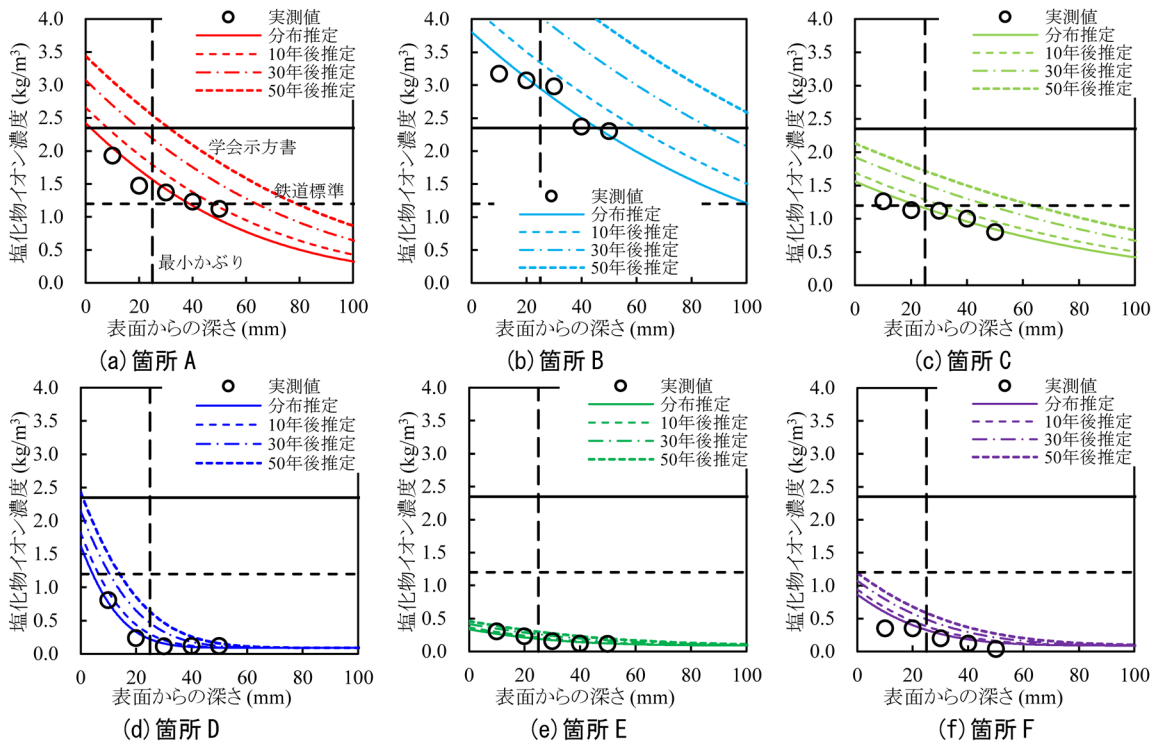


図6 塩化物イオン濃度測定結果と分布推定

PC 鋼より線が端部で露出したことによる腐食は、図5のように、海岸線からの距離が150mの箇所Dで認められた。この箇所のコンクリート中の塩化物イオン濃度の実測値は 1.2kg/m^3 を下回るが、海岸線からの距離が2000m以上の箇所E,Fと比べて、コンクリート表面付近では明らかに高くなる傾向があり、PC 鋼より線の腐食は海からの飛来塩分の影響も大きいと推察される。

図6には、式(1)に基づき算定した塩化物イオン濃度の分布推定曲線と、調査から10, 30, 50年後の分布推定曲線を併せて示す。本研究では、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が経時的に変化することを考慮し、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が時間の平方根に比例して増加するとして Fick の拡散方程式を解いた式(1)を用いた^{8) 10)}。ここでは実測値との誤差の二乗和が最小になるように表面塩化物イオン濃度係数と塩化物イオンの拡散係数を設定した。

$$C(x,t) = S\sqrt{t} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x\sqrt{t}}{2\sqrt{Dt}} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right\} \right] \quad (1)$$

ここに、 C : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3), S : 表面塩化物イオン濃度係数 ($\text{kg/m}^3/\sqrt{\text{年}}$), x : コンクリート表面からの深さ (mm), t : 経年 (年), D : 塩化物イオンの拡散係数 ($\text{mm}^2/\text{年}$), erf : 誤差関数である。これらの推定結果より、海岸線からの距離が100m程度の地域ではコンクリート中の塩化物イオン濃度が増加を続け、PC 鋼より線の腐食の危険性が高まっていくこと、海岸線から2000~3000m以上離れれば現状から50年が経過してもPC 鋼より線の塩害による腐食の可能性は小さいことなどが分かる。

3. 塩害によるPC 鋼材の腐食がPC まくらぎの耐力に及ぼす影響に関する数値解析的検討

3.1 検討方法

3.1.1 解析モデル

図7に汎用非線形構造解析ソフトウェアLS-DYNAによる解析モデルを示す。JIS E1201に規定される曲げ試験を再現する解析モデルである。対象としたまくらぎは3PRである。解析モデルはコンクリート、載荷点および支点を8節点ソリッド要素で、PC 鋼より線およびスタラップは梁要素でモデル化した。要素サイズは10mmを基本とし、最大でも20mm以下とした。なお、載荷点および支点は剛体とした。境界条件は、載荷点は鉛直方向(載荷方向)以外の自由度を、支点は全自由度を拘束した。PC 鋼より線とコンクリートは完全付着とした。

3.1.2 材料モデル

表5に本解析で用いた材料定数を示す。コンクリートについては、既往の研究²⁾より圧縮強度を60MPaとし、その他のパラメータは鉄道標準⁸⁾に基づき圧縮強度に対応した値とした。PC 鋼より線の材料定数はミルシートの値とし、緊張力の有効率は既往の研究²⁾より75%とした。また、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。

図8に材料モデルを示す。図8(a)にコンクリートの単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。コンクリートは圧縮破壊および引張軟化を表現可能なモデルとした。図8(b)に

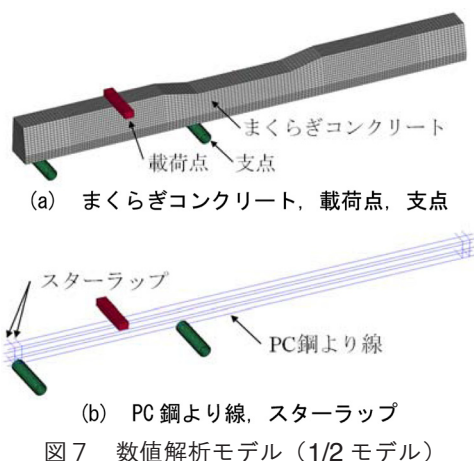


図7 数値解析モデル (1/2 モデル)

PC鋼より線に関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。本材料モデルは、ミルシートから読み取った引張試験力と伸びの関係を、応力とひずみの関係に換算することで得た。また、PC鋼より線の破断は考慮せず、引張応力が引張強度に達した後はひずみのみが増加するものとした。

3.1.3 解析ケース

表6に解析ケースを示す。PC鋼より線の強度とPC鋼より線の消失を想定した。具体的には、PC鋼より線の引張強度を健全な状態から0.6～0.9倍(0.1刻み)の範囲で低減させた。また、PC鋼より線の消失は、最上段、最下段すべておよび全段のPC鋼より線、PCまくらぎ端部から100mm、150mm、200mmの長さで消失した場合を想定した。なお、PC桁ではあるが、既往の研究¹¹⁾ではここで設定した解析ケースのようなPC鋼より線の腐食に伴う引張強度の低下やPC鋼より線自体の消失が示されている。

3.2 検討結果

図9に各解析ケースの解析結果をまとめて示す。荷重-変位関係で整理した。

図9(a)に健全な状態における解析結果と、新品の3PRに対してJIS E1201の曲げ試験を実施した際の試験結果(2体)を示す。同図より、本解析モデルは試験において最大荷重に至るまでの荷重変位曲線をトレースできており、試験結果を精度よく再現できていることが分かる。

図9(b)にPC鋼より線の強度低下の影響に関する解析結果を示す。同図より、PC鋼より線の強度低下に伴い、最大荷重が低下することが分かる。健全な状態における最大荷重197.4kNに対し、例えば、PC鋼より線の引張強度が0.8になると180.2kN、0.6倍になると146.4kNとなった。ただし、引張強度が0.6倍に低下したとしてもJISの規格値(139kN)は満足した。

図9(c)にPC鋼より線の消失の影響に関する解析結果を示す。同図より、PC鋼より線の消失により最大荷重が大幅に低下することが分かる。ただし、本解析はレール位置断面の正曲げ試験であるため、最上端のPC鋼より

表5 解析で用いた材料定数(健全)

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	
載荷点・支点	剛体			

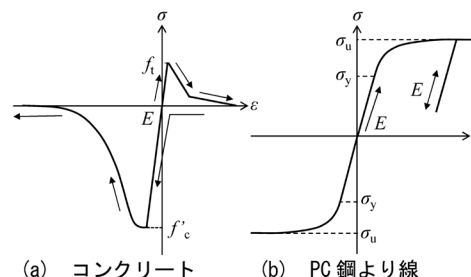


図8 解析で用いた材料モデル

表6 解析ケース

ケース	解析パラメータ
PC鋼より線の強度	・引張強度を0.6～0.9倍(0.1刻み)に低減
PC鋼より線の消失	・最上段すべて消失 ・最下段すべて消失 ・全段すべて消失 ・全段のPC鋼より線が端部から100mm, 150mm, 200mm消失

り線の消失の影響は限定的である。最下段のPC鋼より線がすべて消失した場合、最大荷重は110.2kNにまで低下し、JIS規格値を満足できなくなる。また、すべてのPC鋼より線が消失すると最大荷重は27.3kNにまで低下し、耐荷性能をほとんど有しないことが分かる。

図9(d)にPC鋼より線が端部から100mm、150mm、200mm消失した場合の解析結果を示す。同図より、100mm消失した場合には最大荷重は低下するが193.3kNであり、JISの規格値は満足することが分かる。また、150mm、200mm消失した場合には、PC鋼線の消失範囲が支点よりも載荷点側になり、ひび割れが発生すると無筋コンクリート部分における脆性的な破壊形態となるため、最大荷重はそれぞれ大幅に低下し、JISの規格値を満足できないことが分かる。

4. まとめ

本研究では、塩害環境下の経年PCまくらぎを対象とし、各種性能評価試験や数値解析により劣化傾向や耐力評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 今回調査で見られた主な変状は、レール位置断面の曲げひび割れ、PCまくらぎ長手方向に連続する縦ひび割れ、PCまくらぎの端部におけるPC鋼より線の腐食、錆汁であった。
- 2) JIS E1201の曲げ試験の結果、JISの規格値を満足

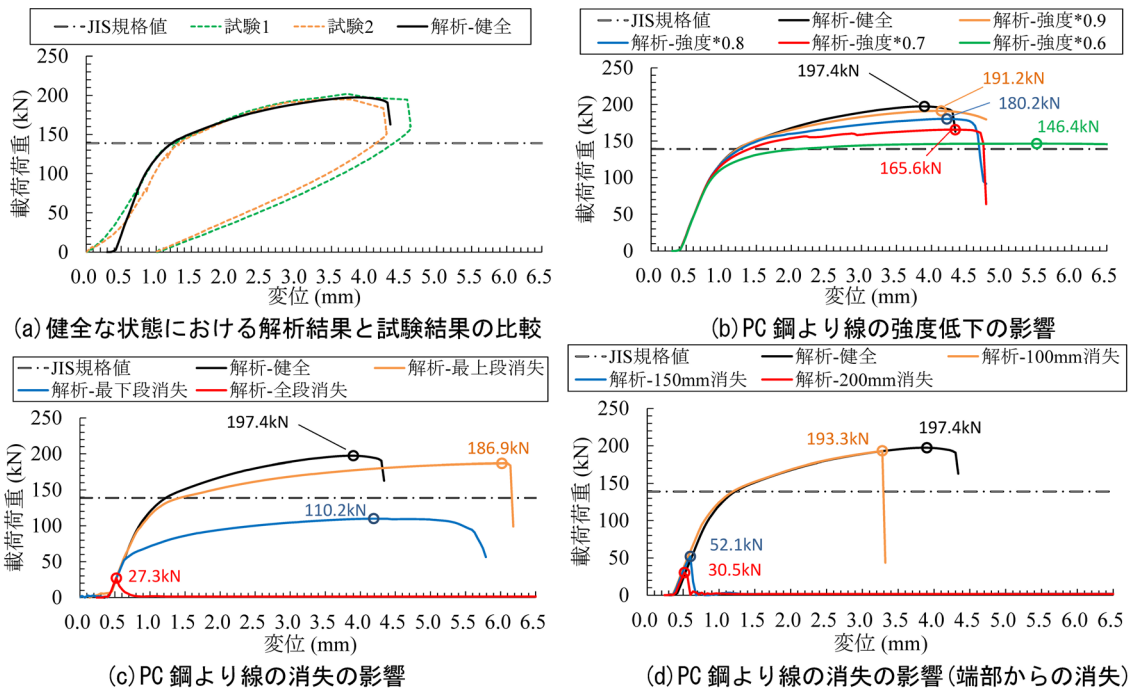


図9 解析結果

することが分かった。ただし、海岸線からの距離が 100m ~ 150m のサンプルについては、一般環境の試験結果のばらつきに比べると最大荷重が低い傾向にあるため、既往研究^{2) 3)} で提案されているマクロな視点で耐用期間を決定する場合には、95% 信頼区間の下限値を目安にする方が望ましいと考えられる。

- 3) 海岸線からの距離が 100m 程度に敷設された PC まくらぎでは、PC まくらぎの最小かぶり 25mm の位置における塩化物イオン濃度は 1.2kg/m^3 を超え、最大で 3.0kg/m^3 程度であったが、前述の通り JIS の曲げ破壊に関する規格値は満足した。
- 4) 海岸からの距離が 150m 程度に敷設された PC まくらぎは、経年による PC まくらぎ端部の PC 鋼より線の露出と飛来塩分の影響により、PC 鋼より線端部から最大 700mm 程度まで腐食が見られたが、腐食は部分的であり、PC 鋼より線の断面減少は見られなかった。
- 5) 数値解析により、PC 鋼より線の強度低下や消失がレール位置断面の耐荷力に及ぼす影響を評価した結果、PC 鋼より線が最下段や端部から 150mm 以上で消失すると JIS の曲げ破壊に関する規格値を満足できないことを明らかにした。

以上より、海岸線付近に敷設された経年 40 年程度以上の PC まくらぎであっても直ちに交換の必要はないと考えられる。ただし、塩化物イオン濃度の分布を推定すると、海岸線からの距離が 100m 程度の地域では塩化物イオン濃度の増加により、PC 鋼より線の腐食の危険性が高まり、PC まくらぎの耐荷力の低下が懸念されるため、一般環境よりも交換時期は早まるものと推測される。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，pp.236-237，2007
- 2) 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
- 3) 渡辺勉，箕浦慎太郎，後藤恵一：曲線区間に敷設された経年 PC まくらぎの性能評価，第 27 回 鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2020），S2-1-6，2020
- 4) 箕浦慎太郎，渡辺勉，井上寛美，片山雄一郎：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
- 5) 箕浦慎太郎，渡辺勉，飯島亨，石田哲也：凍害を受けた PC まくらぎの実態調査と健全度判定基準の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.665-670，2020
- 6) 星幸江，武藤義彦，吉浦聖，横川勝則，板橋正春：耐塩害性防振まくらぎの開発，土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-494，pp.987-988，2015
- 7) 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター：コンクリートまくらぎの健全度の判定手引き，2015
- 8) 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
- 9) 土木学会コンクリート委員会：2017 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018
- 10) 川村 力，谷村 幸裕，曾我部 正道，鳥取 誠一，長谷川 雅志，東川 孝治：鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.193-204，2005
- 11) 武田 健太，田中 泰司，下村 匠，山口 貴幸，陸 賢，井林 康，村上 祐貴：塩害劣化したプレテンション式 PC 桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.71，No.4，pp.303-322，2015