# 論文 PCa 曝露試験計画および既製杭の曲げ破壊に関する基礎的実験

濵本 朋久\*1・井川 秀樹\*2・畑 実\*3・安部 俊介\*4

要旨:市町が管理する高度経済成長期に建設された大量の施設も耐用年数を超過しており,劣化損傷が進行 しているコンクリート造施設も加速度的に増加しているのが現状である。また,経年劣化で鉄筋が露出した 小規模な鉄筋コンクリート造施設では,目視による損傷範囲のみが記録され,更新対策の優先順位を評価し ている。そこで本研究では,プレキャストコンクリートの耐塩害性に着目した優位性を検証する目的で,沿 岸部において曝露試験を詳細に計画した。加えて,既製杭である PHC 杭の軸力を考慮しない曲げ破壊実験を 実施し,基礎資料として最大曲げ耐力を確認した。さらに,3次元有限要素解析による概略検証も実施した。 キーワード:プレキャストコンクリート,曝露試験計画,既製杭,曲げ破壊実験,3次元有限要素解析

#### 1. はじめに

国民生活の社会経済活動は,道路・鉄道・港湾・空港 等の産業基盤、上下水道・公園等の生活基盤、治山・治 水の国土保全基盤などの社会基盤によって支えられてい る。わが国では、1964(昭和39)年に開催された東京オ リンピックと同時期に整備された東京都道首都高速1号 線など、高度成長期以降に集中的に整備された社会基盤 が高齢化している。例えば、建設後50年の耐用年数と仮 定した道路橋(橋長 2m 以上)の割合は、加速度的に増 加している。地方の自治体では、建設年度や構造形式等 の施設諸元や、老朽化による劣化損傷の進展状況など、 維持管理に必要な情報が不明な施設も多く存在しており、 鋭意長寿命化計画を進めているのが現状である。ここで, コンクリート造施設の老朽化による劣化損傷の要因とし て, 塩害・中性化・アルカリ骨材反応 (ASR)・凍害・疲 労などが報告されている。これに加えて、コンクリート 施設の建設場所や環境条件なども劣化損傷の進展に大き く影響していると考える。

一方で、前述した劣化損傷の要因において、わが国の 地理的・地形的な特色から、塩分の影響を受ける海岸線 へのコンクリート造施設が多く建設されている。しかし、 海岸線の道路施設や港湾・海岸施設では、経済的な観点 から現場打ちコンクリート造が採用され、鉄筋コンクリ ート(以下, RC)造施設が数多く建設されているのが現 状である。また、沿岸部においては供用 50 年未満で塩害 等により早期劣化する場合も多く報告されている<sup>1)</sup>。こ れらの対策として劣化損傷の実態調査<sup>2)</sup>や飛来塩分量の 調査結果による近似式の算定<sup>3)</sup>などの研究が実施されて いるが、未だ抜本的な解決には至っていない。さらに、 著者らは、水結合材比が比較的小さなプレキャストコ

ンクリート(以下, PCa)において,管理された工場で高 品質のコンクリートが製造できる点に着眼し、高い耐久 性を有する PCa 部材を海岸施設である RC 造施設に適用 することで、耐用年数を長期化できると考えている。こ の PCa を採用することで、急速施工に優れた工期短縮も 可能である。これらより、設計段階において、経済性の 評価に加えて、PCa 造施設の耐塩害性や工期短縮などの 優位性も重要な評価指標と考える。また、コンクリート 混和材としてフライアッシュ(以下, FA)や高炉スラグ 微粉末(以下, BFS)を用いることで、コンクリートの耐 塩害性向上が報告されている4)・5)。それらを参考にして, セメントを全く使用しない長寿命化コンクリートの開発 も進めている。しかし、実務設計において、長寿命化 を目標にしているにも関わらず、内在塩分量などによる 劣化損傷への影響や飛来塩分による耐久性の低下指標を, 設計の段階から十分に検討されていないのが現状である。 さらに, 塩害などの環境条件が非常に厳しく, 老朽化し ている小規模な RC 造桁橋などに対する長寿命化対策は, PCa 部材の適用も有益な一方策と考えている。

そこで本研究では、PCaの耐塩害性に着目した優位性 を検証する目的で、沿岸部において曝露試験の計画を実 施する。また、既製杭である PHC 杭の軸力を考慮しない 曲げ破壊実験を実施し、最大曲げ耐力を確認する。さら に、3 次元数値解析による概略検証も実施する。今後は、 曝露試験の結果を実験や3 次元数値解析に反映し、塩害 などの劣化損傷による PCa 部材の断面減少を考慮した残 存寿命予測手法を検討する予定である。

#### 2. 曝露試験計画の概要

まず、PCaの耐塩害性に着目した優位性を検証する目

\*1 西日本工業大学工学部 総合システム工学科土木工学系准教授 博士(工学) (正会員) \*2 日本ヒューム(株) 技術研究所長 博士(工学) (正会員) \*3 日本ヒューム(株) 技術研究所 課長 (正会員) \*4 西日本工業大学大学院 環境システム分野 的で,沿岸部において曝露試験を計画する。これは,沿 岸部の施設設計における長寿命化対策の基礎資料と考え ている。以下に,計画の概要を示す。

## 2.1 使用材料の選定と配合計画

試験体を製作する材料を,表-1 に示す。また,曝露 試験体の配合を表-2に, PCH杭の配合を表-3に示す。 試験体 No.1 の配合条件はボックスカルバートなどに用 いられる PCa の配合で、No.2 の配合条件はセメントを用 いない長寿命化コンクリートで, No.3 の配合条件はレデ ィーミクストコンクリート(普通 24-8-15-N)とした。No.1 およびNo.2の空気量は2%とし, No.3の空気量は4.5% とした。設計基準強度は No.1 および No.2 では一般的な PCa 造施設を想定して 50.0 N/mm<sup>2</sup> とし, No.3 では一般的 に RC 造施設に使用されるレディーミクストコンクリー トの 24.0 N/mm<sup>2</sup>を採用した。ここで, 既製杭である PHC 杭に関しては,設計基準強度を105.0 N/mm<sup>2</sup>としている。 これは、曝露試験体で設定している設計基準強度 50.0 N/mm<sup>2</sup>に対して大きな強度であるが、想定外の外力を考 慮するために必要な PCa 部材であり、曝露試験体に比べ て水結合材比(W/B)が小さく、耐塩害性や劣化損傷に 対しても安全側と考えている。

#### 2.2 曝露試験体の製作方法

曝露試験体は直径: $\phi 100 \text{ mm} \cdot \text{a}$ さ:H=200 mmのテ ストピースとし,試験体成形後は蒸気養生を施す。蒸気 養生条件は,前置き 4 時間-昇温 20 °C/h-最高温度 65 °C · 4 時間保持-自然降温とする。蒸気養生を行う目 的は,PCaを想定するためである。ただし,試験体 No.3 については標準養生とする。内在塩化物量は,JISA 5308 「レディーミクストコンクリート」の基準に従い,塩化 物イオン量で 0.3 kg/m<sup>3</sup>とする。みがき棒鋼は,JISA 6205 「鉄筋コンクリート用防せい剤」の規格に準拠し,試験 体にかぶりを 30 mm として高さ方向に封入する。ただし, みがき棒鋼の数量は 1 本/1 試験体とする。

## 2.3 試験方法

試験方法として,フレッシュコンクリートの試験・塩 化物浸入深さおよび中性化深さ測定試験・鉄筋腐食測定 試験・圧縮強度試験を実施する計画である。まず、フレ ッシュコンクリートの試験として、コンクリートのスラ ンプ・スランプフローおよび空気量試験は、JISA1150 お よび JISA1128 に準拠して実施する。塩化物浸入深さおよ び中性化深さ測定試験として、塩化物イオン分布の測定 は供試体を割裂し、割裂面に 0.1mol/1 硝酸銀溶液を噴霧 し、表面から変色した部分までの 5 点以上を測定して平 均する (JSCE-G573-2013)。中性化深さ測定試験として、

表-1 使用材料の種類と品質

材料名	記号	種類および物性値
	С	普通ポルトランドセメント
セメント		密度3.16g/cm <sup>3</sup>
		JIS A 6201 (Ⅱ種)
フライチッシュ	FA	密度3.01g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ	DEC	JIS A 6206(粉末度4000)
微粉末	BFS	密度2.91g/cm <sup>3</sup>
シリカフュー	a F	JIS A 6207
4	SF	密度2.30g/cm <sup>3</sup>
水酸化	CU	JIS R 9001 特号
カルシウム	СН	密度2.32g/cm <sup>3</sup>
	<b>S</b> 1	砕砂, 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> ,
如四十十		吸水率1.63%,粗粒率2.85
7世月 121	S2	砕砂, 表乾密度2.62g/cm3,
		吸水率0.61%,粗粒率2.79
	G1	砕石1505, 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> ,
<b>約</b> 图 4 1		吸水率0.32%, 粗粒率6.62
伯月初	G2	砕石2005, 表乾密度2.72g/cm <sup>3</sup> ,
		吸水率0.48%, 粗粒率6.60
高強度混和材	Ad	密度2.73g/cm <sup>3</sup>
膨張材	FX	JIS A 6201 (石灰系)
形死的	LA	密度3.20g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP1	高性能AE減水剤
	511	コンクリート製品用ポリカルボン酸系
	SP2	AE減水剤
		リグニンスルフォン酸系
	SP2	高性能减水剤
		コンクリート製品用ナフタレン糸

表-2 曝露試験体の配合

No	Gmax	SLF	W/B	s/a					単	位量(kg	/m <sup>3</sup> )				
110.	(mm)	(cm)	(%)	(%)	W	С	FA	BFS	SF	CH	EX	S1	G1	Sp1	Sp2
1	15	45±10	38.0	45.0	160	400	—	—	—	—	20	810	1009	3.60	—
2	15	45±10	21.0	45.0	116	-	176	265	32	21	57	794	989	10.18	—
3	15	8±2.5	55.7	46.1	165	297		_	_	—		841	998	—	4.16

表-3 PHC杭の配合

Na	Gmax	SL	Air	W/B	s/a			単位量	(kg/m <sup>3</sup> )		
NO.	(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	Ad	S2	G2	Sp3
4	20	5±2	2±1.0	21.7	40.0	130	500	100	687	1069	10.8



写真-1 曝露場所イメージ

試験体 No.	Д	縮強度	静弾性 係数
	材齢	$(N/mm^2)$	(kN/mm <sup>2</sup> )
基準値	直	50.0	33.0
No.1	1	29.5	
	7	49.6	33.4
	14	55.5	
	1	31.0	
No.2	7	50.3	35.3
	14	59.9	

割裂した試験体のもう一方にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を噴霧して中性化深さを測定する。なお, 塩化物イオン分布を測定する供試体は内在塩化物が無い 試験体とする。また,塩化物浸入の拡散係数を求める場 合には,電子線マイクロアナライザー分析を実施する。 鉄筋腐食測定試験として,所定材齢の試験体を割裂し, 中の鉄筋を取り出して腐食部分をトレースして面積を求 め,鉄筋の表面積の割合で示す。鉄筋腐食量を測定する 試験体は内在塩化物を含む試験体とする。圧縮強度試験 として,曝露試験体は直径: $\phi$ 100 mm・高さ:H = 200 mmのテストピースに詰め,JISA 1108 に準拠して圧縮 強度試験を実施する。

## 2.4 曝露環境の設定

曝露環境は,海上大気中・飛沫帯・海中の3区分とす る。試験体を曝露する場所のイメージを,**写真**-1 に示 す。試験項目の内在塩分とは,試験体に予め塩化物を混 入する環境を想定した。これは,海砂などの使用による 複合劣化損傷を想定した環境で,曝露期間を短縮する目 的も有する。塩分浸透とは,塩化物の浸入を定期的に調 べる目的である。鉄筋腐食とは,試験体内部のみがき棒 鋼(φ10 mm)の腐食を調べる目的である。

表一4	曝露試験体の数	量

コンクリート種類		No.1		No.2		No.3	
試験項目							
内在	塩分	無	有	無	有	無	有
	3ヶ月	3		3		3	
	6ヶ月	3		3		3	
	1年	3		3		3	
塩分浸透	2年	3		3		3	
	3年	3		3		3	
	5年	3		3		3	
	10年	3		3		3	
	1年	3	3	3	3	3	3
鉄筋腐食	2年	3	3	3	3	3	3
	3年	3	3	3	3	3	3
	5年	3	3	3	3	3	3
	10年	3	3	3	3	3	3
合 計(本)			1537	k×3⊠	(分=4	159本	

#### 表-6 遠心成形条件

		低速	中速	高速	⊿≞⊥
遠心力	(G)	5	10	25	ΠĒΙ
回転数	(rpm)	500	700	1150	
時 間	(分)	3	2	4	9

## 2.5 試験体の計画数量

本曝露試験で製作する試験体の計画数量を,表-4 に 示す。試験体は,合計459本を製作する計画である。

## 2.6 試験体の配合設計時諸元

曝露試験体は 2021 年 2 月に作製し,養生期間を経て 2021 年 4 月から曝露試験を開始する予定である。表-5 に試験体 No.1 と No.2 について配合設計を行ったときの 諸元値を参考に示す。なお,試験体 No.3 については JIS 工場よりレディーミクストコンクリートを購入する予定 である。

#### 3. 既製杭の曲げ破壊実験条件

既製杭である PHC 杭の軸力を考慮しない曲げ破壊実 験を実施し,沿岸部の施設設計における基礎資料として 最大曲げ耐力を確認する。今後は,PCa 部材の曲げ破壊 実験および3次元数値解析モデルを構築する基礎資料に, 曝露試験の結果を反映し,塩害などの劣化損傷による PCa 部材の断面減少を考慮した残存寿命予測手法を検討 する予定である。

## 3.1 設計基準強度および製作方法

既製杭である PHC 杭では,設計基準強度を 105.0 N/mm<sup>2</sup>としている。PHC 杭は A 種・杭径: $\phi$ =300 mm・ 部材厚:t=60 mm・杭長:L=8.0 m・有効プレストレス 量:4.0 N/mm<sup>2</sup>とし,JISA 5378-2016「プレキャストプレ ストレストコンクリート製品」に準拠した。**表**-3 の配 合でコンクリートを混練し,型枠に投入した後にプレス







図-2 ひずみゲージの配置

トレスを導入した上で, **表**-6 に示す遠心成形条件で成 形した。遠心成形後, 蒸気養生(前置き 2 時間-昇温 20 ℃/h-最高温度65 ℃・3 時間保持-自然降温)を施し, 翌日脱型した。ただし,曲げ破壊試験を実施する PHC 杭 は,製作後約2年半が経過した供試体である。なお,PHC 杭の圧縮強度は,JIS A 1136 に準拠して遠心力成形した 供試体により管理している。

## 3.2 曲げ試験方法および計測方法

PHC 杭の軸力を考慮しない曲げ試験は,JIS A 5363-2016 (プレキャストコンクリート製品一性能試験方法通 則) およびJIS A 5373-2016 (プレキャストプレストレス コンクリート製品一附属書 E) に準じ,2点支持,2点載 荷の単純梁方法として実施した。試験状況を,図-1 お よび写真-2 に示す。また、ロードセルにより載荷荷重 を、変位計により載荷点変位をそれぞれ測定した。コン クリートのひずみをひずみゲージにより測定した。表-7 に、使用機器を示す。曲げ試験機の最大能力は、1,000 kN である。デジタル測定器は UCAM-10B で、ワイヤレ スストレインゲージは KC-70-120-A1-11 で、変位 計は DT-50A を使用した。さらに、ひずみゲージの配置 を、図-2 に示す。なお、支点部には緩衝用ゴム(厚さ: t=10 mm)を設置した。

## 4. 実験結果および数値解析の概略検証

PCa部材の基礎的実験として,既製杭であるPHC杭の曲げ破壊実験を実施した結果および考察を,以下に示す。



写真-2 PHC杭の曲げ試験状況

表--7 使用機器

機器名	型式または能力	製造会社		
曲げ試験機	最大能力1000 kN	森試験機製作所		
デジタル	LICAM-10P	(株) 土和電業		
ひずみ測定機	OCAW IOB	(14)六百电米		
ワイヤス	KC = 70 = 120 = 11 = 11	(株) 土和雷業		
トレインゲージ	KC /0 120 AI II	(117) 六百世未		
変位計	DT - 50A	(株) 共和電業		

加えて,3次元数値解析による基礎的実験との比較検討 も実施した。

## 4.1 実験結果および考察

本曲げ破壊試験では、終局状態(鋼棒の破断時・コン クリートの圧壊時・せん断破壊時)に至るまで載荷を実 施した。また、ひび割れ発生時の状況を写真-3に示し、 終局時の状況を写真-4 に示す。さらに、荷重と引張側 ひずみの関係を、図-3に示す。この図より、ひずみゲ ージ⑥が 25.6 kN で、ひずみゲージ④が 36.0 kN で、ひず みゲージ⑦が 42.0 kN で欠損した。荷重と圧縮ひずみの 関係を, 図-4 に示す。この図より, ひずみゲージ②が 50.6 kN で欠損した。これらより、ひび割れ発生時の荷重 は 25.6 kN であり、その時の引張側ひずみ平均値は 202.3×10-6となり、 圧縮側ひずみ平均値は-245.0×10-6と なった。JIS 管理を上回り安全側の結果となった。次に、 終局時の荷重は 50.6 kN であり、その時の引張側ひずみ 平均値は 105.0×10<sup>-6</sup> となり, 圧縮側ひずみ平均値は-1467.0×10-6 となった。JIS 管理を上回り安全側の結果と なった。ただし、弾性範囲内の変位が大きい傾向ではあ るが、安定して荷重が保持されており、一般的な杭構造 として良好な変形性能が確認された。本曲げ破壊実験で は、主鉄筋である鋼棒のひずみ測定は実施できなかった が、今後の追加実験では実施する予定である。

#### 4.2 数値解析条件およびモデル化

本数値解析では、3 次元 FEM の汎用ソフトウェアで ある DIANA 10.4<sup>7)</sup> を適用する。数値解析モデルの断面 条件はコンクリートの外径  $\phi$  = 300 mm・部材厚 t = 60 mm



写真-3 ひび割れ発生時の状況



図-3 荷重-引張側ひずみの関係

・全長L=8.0mとし、2点支持および2点載荷とし、可 能な限り曲げ破壊実験の供試体を再現した。解析条件を, 以下に示す。まず,図-5および図-6に示すように、中 空断面を有する3次元有限要素のモデルは、コンクリー トを8節点アイソパラメトリックソリッド要素(8積分 点) でモデル化し, 鉄筋は梁要素(1積分点) でモデルを 構築した。鉄筋要素の結合条件として、完全付着である 埋め込み鉄筋とした。鉄筋およびコンクリートの応力と ひずみの関係は、本来ひび割れを考慮した非線形性を設 定する必要があるが, 概略検証として弾性でモデル化し た。非線形性のモデル化は今後検討する予定である。コ ンクリートの設計基準強度: σck は 105.0 N/mm<sup>2</sup>とし, 鋼棒は径: φ7.1 mm を6本配置した。スパイラル筋は, 径: φ3.2 mm とした。材料定数として, 弾性係数はコン クリートを 4.0×10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup>とし、鋼棒と鉄線を 2.0×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>とした。ポアソン比はコンクリートで 0.20,鉄筋 で 0.30 とした。コンクリートの単位体積重量は, 23.0 kN/m<sup>3</sup>とした。鋼棒・鉄線の単位体積重量は,77.0 kN/m<sup>3</sup> とした。鋼棒の有効プレストレスは、軸力として考慮し た。支点条件として, 左側は水平・鉛直変位を固定し, 右側は鉛直変位のみ固定とした。本モデルの境界条件は, 支点下面を鉛直方向に固定とした。さらに、螺旋状のス パイラル筋は、支間中央部の曲げによる変位に着目して いるため、便宜上、標準部の100 mm 間隔を考慮した円



写真-4 終局時の状況





形のフープ筋としてモデル化した。

## 4.3 数値解析結果および概略検証

図-5 に示すコンクリートのモデルと図-6 に示す鉄 筋のモデルによる数値解析結果として、実験で確認した 荷重を作用させたひび割れ発生時の変位を、図-7 に示 す。この図から、支間中央部の変位は3.9mmとなった。 また、実験結果と数値解析結果における荷重と変位の関 係を、図-8 に示す。この図から、ひび割れ発生時の変 位は、実験結果に比べて約78.9%程度小さくなった。こ れは,ひび割れ発生時までを弾性範囲内と想定した本数 値解析モデルとは異なる結果となった。この原因として, 本実験の供試体である PHC 杭は製作後約2年半が経過 しており,実験時に圧縮強度試験や割裂引張強度試験を 実施していないことが考えられる。加えて、本概略検証 に関する数値解析と実験の大きな相違点は支点部の境界 条件と考え、載荷時における支点部のずれも影響してい る可能性が考えられる。加えて,本曲げ破壊実験で使用 した供試体に関して、PHC 杭の製作が遠心力成形である ことから、供試体の内側と外側で強度が異なると考えら れ,供試体における断面内の強度不均一性が本数値解析 で考慮できていないことも要因の一つと考えられる。こ れらは、今後の実験や数値解析における改善点と考え、 追加実験を踏まえて考察する予定である。



図-5 コンクリートのモデル化



図-7 ひび割れ発生時の変位

## 5. 結論

本研究では、PCaの耐塩害性に着目した優位性を検証 する目的で,沿岸部において曝露試験の詳細な計画を実 施した。また, 既製杭である PHC 杭の軸力を考慮しない 曲げ破壊実験を実施した。さらに、3 次元数値解析によ る概略検証も実施した。本研究で得られた知見を、以下 に示す。

- (1) PCa の耐塩害性に着目した優位性を検証する目的 で,沿岸部において曝露試験計画を詳細に実施し, 2021 年 4 月から試験体の**曝**露(環境: 海上大気中・ 飛沫帯・海中)を開始する予定である。
- (2) 既製杭である PHC 杭の軸力を考慮しない曲げ試験 を実施した結果、弾性範囲内の変位が大きい傾向 ではあったが、JIS 管理における一般的な杭構造と して良好な変形性能が確認された。
- (3)3 次元の数値解析モデルを構築し、曲げ破壊実験結 果との概略検証を実施した結果、ひび割れ発生時 の変位は、実験結果に比べて約78.9%程度小さく なった。この原因として、本実験の供試体では強度 発現時における圧縮強度試験などが未実施であり, 加えて載荷時における支点部のずれや供試体断面 内の強度不均一性も影響している可能性が考えら れる。

今後は、PCa の曝露試験による耐塩害性に関する知見 を定期的に検証する予定である。また、本実験の改善点 を考慮した既製杭の曲げ破壊実験を追加する予定である。 さらに,3次元数値解析のモデル化においては,コンク



図-6 鉄筋のモデル化



図-8 荷重-変位の関係

リートのひび割れを考慮した非線形性や付着すべりの影 響を考慮したモデルを構築する予定である。

### 参考文献

- 1) 高橋 毅,田中泰司:新潟県沿岸部における橋梁の塩 害劣化の実態分析,コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.829-834, 2013.7.
- 2) 加藤丈和,松山公年:道路橋の塩害対策に関わる電 気防食の追跡調査,土木学会関東支部新潟会研究調 查発表会, Vol.30, pp.350-353, 2012.11.
- 3) 中谷昌一, 玉越隆史, 内田賢一, 廣松 新, 池田明寛: コンクリート橋の塩害対策資料集ー実態調査に基 づくコンクリート橋の塩害対策の検討-,国土交通 省国土技術政策総合研究所, pp.38-108, 2002.11.
- 4) 上田隆雄,田中慎吾,進藤義勝,七澤 章:フライア ッシュの混和が塩害によるセメント硬化体中の鉄 筋腐食環境に与える影響,土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.255-267, 2010.7.
- 5) 檀康弘:高炉スラグ微粉末,コンクリート工学 Vol.52, No.5, pp.387-392, 2014.
- 6) 畑 実, 杉本克美, 林 悦朗, 宮澤慎吾: 遠心成形硬 化体の耐塩害性と耐硫酸性に関する基礎研究、土木 学会第 75 回年次学術講演会, V-9, 2020.9.
- 7) TNO Building and Construction Research : User's Manual of DIANA Finite Element Analysis, 2020.