

塩害を受けたPC桁の劣化部除去に関する検討

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○ 中村 雅之
 (独)土木研究所つくば中央研究所 正会員 渡辺 博志
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 中村 定明
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 谷口 秀明

1. はじめに

塩害を受けたPC構造物を補修する場合、塩分を含んだコンクリートを完全に除去することはまれである。多くの場合、鋼材腐食の膨張圧により剥離・剥落したコンクリートの除去に加えて、数センチ程度の除去としているのが現状である。塩化物イオン量に応じた除去を行うことは困難であり、マクロセル腐食や再劣化の原因となっている。PC構造物の場合、ポストテンション方式の定着具付近およびプレテンション方式の鋼材定着長付近は塩分が浸透していても除去することができない。また、プレストレスが入っていた塩害劣化していない健全なコンクリートを除去した場合には、プレストレスは失われてしまうことになる。構造上除去できないコンクリートと除去しなければならないコンクリートを見極めて大断面の除去・補修を行うことができれば、補修した部材を新設時に近い状態とすることができ、構造物の長寿命化を図ることができると考えられる。

PC構造物において、PC鋼材を完全に露出させるような大断面の除去については、部材挙動や応力変動等を考慮して行う必要があるが、これまでにデータがない。そこで本研究では、部材断面が小さく断面除去の影響が大きいプレテンションPC桁を対象として、ウォータージェット (以下WJと記す) によるコンクリートの除去を行い、PC桁の挙動と事前の解析結果との整合を確認した。また、大断面修復用の高流動コンクリートの適用性についても検討した。

2. 実験概要

プレストレスを保持したままコンクリートを除去・断面修復を行い、補修材料に対してプレストレスを与えることが可能であるかを検証するために、以下の3つの実験を計画した。実験に使用するプレテンションPC桁の断面を図-1に示す。桁長10.5m、支間10.0mのスラブ橋用の桁である。表-1に3つの実験のパラメータを示す。CASE-1では、載荷試験をおこなってPC桁の基本性能を確認する。CASE-2では、WJはつり時のPC桁の挙動やプレストレスの保持方法を検討し事前解析結果との整合性を確認する。CASE-3ではCASE-2と比較するために、断面修復と外ケーブル補強を行い、補修・補強後のPC桁の挙動を確認してCASE-1と比較する。図-2に試験体と実験CASEを示す。本稿では、以上の3つの実験のうち、CASE-2についての報告とCASE-3の断面修復コンクリートの配合について報告する。

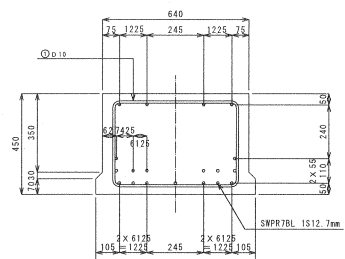
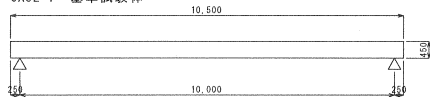


図-1 PC桁断面図

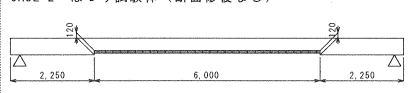
表-1 実験パラメータ

	はつり	断面修復	補強	載荷試験
CASE-1	×	×	×	○
CASE-2	○	×	×	×
CASE-3	○	○	○	○

CASE-1 基準試験体



CASE-2 はつり試験体 (断面修復なし)



CASE-3 はつり・断面修復・補強試験体

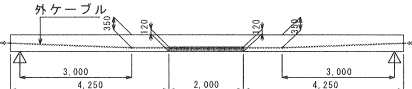


図-2 試験体と実験CASE

3. PC桁のはつり試験

3.1 試験方法

WJによる、はつり試験の手順を図-3に示す。第1段階

60mm, 第2段階 90mm および第3段階 120mm の3段階に分けてはつりを行った。プレストレスの保持と、はつり試験中の安全確保から、桁の変形を抑制するために、90mmのはつり終了後、片側 50kN の載荷を行う。載荷したまま、120mm までのはつりを継続し、はつり完了後除荷を行った。50kN の値は後述する非線形解析による事前検討から決定した。

3.2 ウォータージェットはつり

WJ によるはつりはコンクリート構造物の補修補強に伴うはつりに利用されることが多く、この際に期待されている性能がセレクトイビティ (Selectivity) である。劣化したコンクリートを完全に除去し、健全なコンクリートを残すことができる。WJ を用いたコンクリートはつりでは、コンクリート一軸圧縮強度の 2~4 倍の噴射圧力が必要であり、これ以下の圧力では、はつり能力が急激に低下する。

本実験では、WJ はつり装置・アクアカッター HEV-6000、WJ 高圧ポンプ・パワーバック PP-480/S を使用した。噴射水流は、表-2 の通りとした。ノズルは揺動式とし、桁軸方向に揺動させた。図-4 に実験架台を示す。架台には支点より 1.5m の位置に、主桁を拘束する載荷ジャッキを設置した。図-5 に PC 桁下面と WJ ノズルの位置関係、写真-2 にはつり状況を示す。120mm はつり後の主桁下縁の状況である。下から 2 段目までの PC 鋼より線の露出が確認できる。

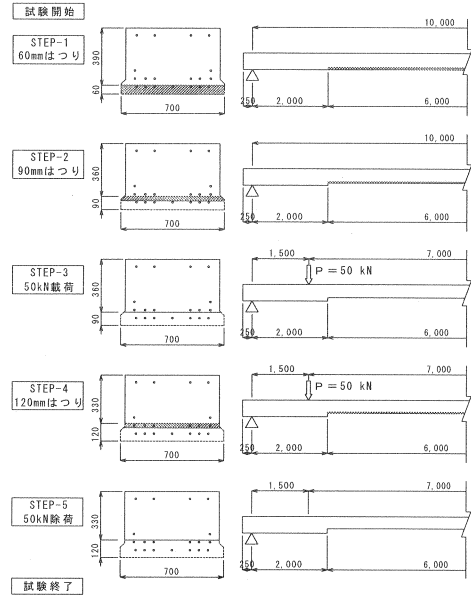


図-3 はつり試験の手順

表-2 噴射水流の設定

項目	設定値	単位
噴射圧力	80	MPa
噴射流量	156	ℓ/min
ノズル径	3	mm
スタンドオフ	30	mm
オシレート角	5	度
振動数	40	回/min
ノズル横行速度	2.5	m/min
パス回数	1	回
進行幅	20	mm/step

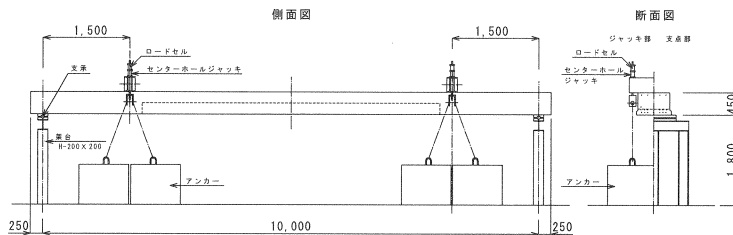


図-4 実験架台

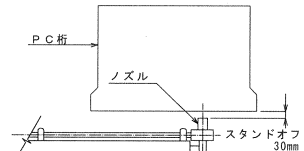


図-5 WJノズルと桁の位置

3.3 測定項目

測定項目は、①はつり深さ、②たわみ、③コンクリートひずみ、④PC 鋼材ひずみ、の 4 項目とした。また、各段階において PC 桁上面のひび割れを観察した。

3.4 解析

非線形 FEM 解析の解析モデルは以下とした。

(1) 解析コード

本解析に用いた解析コードは、汎用非線形構造解析システム DIANA Ver. 8.1 である。

(2) メッシュ分割

メッシュの大きさは、ウォータージェットの 1 回 (1 パス) あたりの標準的なはつり深さの 30mm を基本とした。

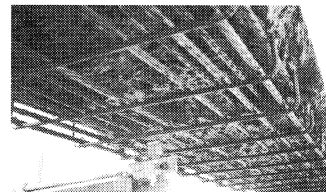


写真-1 120mm はつり後主桁下縁

表-3 解析に用いる材料特性値

(a) コンクリートの特性値				
圧縮強度 f_c	引張強度 f_{tk}	曲げひび割れ強度 f_{ct}	弾性係数 E_c	ポアソン比 ν
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	
50	3.12	2.40	33	0.2
(b) PC 鋼材の特性値				
引張強度 f_t	降伏強度 f_y	弾性係数 E_o	ポアソン比 ν	プレストレス力 σ_{pe}
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)		(N/mm ²)
1850	1554	200	0.3	1110

(3) 材料の構成モデルおよび材料特性

解析に用いた各材料の特性値の一覧表を表-2 に示す。

1) コンクリート

本解析においては、コンクリートの応力-ひずみ関係はバイリニアでモデル化し、破壊基準についてはDrucker-Prager の破壊基準を用いた。また、引張側コンクリートの応力-ひずみ関係はSmeared Crack モデルを適用した。圧縮強度は測定値を用い、ポアソン比は0.2とした。コンクリートの引張強度と部材寸法を考慮した曲げひび割れ強度はコンクリート標準示方書【構造性能照査編】によって求めた。解析に用いるコンクリート引張強度は、部材寸法および収縮の影響を考慮して、曲げひび割れ強度を用いることとした。

2) PC鋼材およびプレストレスカ

PC鋼材の応力-ひずみ関係はトリリニアモデルとした。はつり試験時のプレストレス力はクリープ・乾燥収縮による減少を予想し、初期導入力の60%とした。

3.5 測定結果

(1) はつり深さ

はつり深さ測定結果を図-6 に示す。設計値 60mm および 120mm に対しては、はつり高さの計測値の平均値とほぼ一致したが、90mm に対しては約 13mm 小さい結果となった。なお、解析においては設計値 90 mm を 77 mm に変更して実施した。

(2) 主桁鉛直方向変位

図-7 に鉛直方向の主桁変位を示す。はつり深さ 60mm では試験結果が小さめであるが、77mm および 120mm では解析結果は試験結果と良く一致した。

(3) コンクリート・PC鋼材ひずみ

図-8 に上縁コンクリート表面ひずみ、図-9 に下縁側(下から3段目)のPC鋼材ひずみの解析値と試験結果との比較を示す。コンクリートひずみについては、解析値と試験結果は、良い精度で一致していることが分かる。PC鋼材ひずみについては、片側 50kN の荷重によるひずみの増加量が、測定値と解析値でほぼ一致しており、荷重によるプレストレス調整の可能性が確認できた。また、PC鋼材ひずみに関しては試験結果が解析値より大きい値を示した。これは、解析モデルはコンクリートとPC鋼材を完全付着としたが、若干のすべりが生じたことが考えられる。

(4) ひび割れ

図-10 にはつり試験でのひび割れ状況を示す。図-11 に非線形解析結果によるひび割れ図を示す。はつり試験では、50kN 荷重状態で 120mm はつり終了時はひび割れの発生は見られず、50kN 除荷時に、ひび割れが主桁

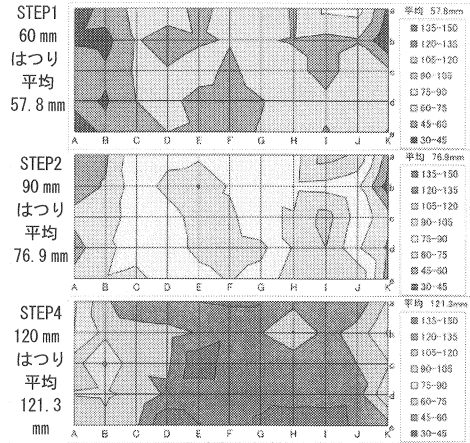


図-6 はつり深さ

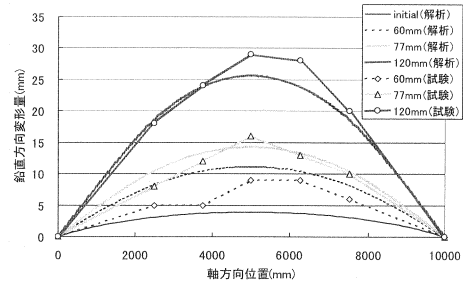


図-7 鉛直方向変位量 (支間中央断面)

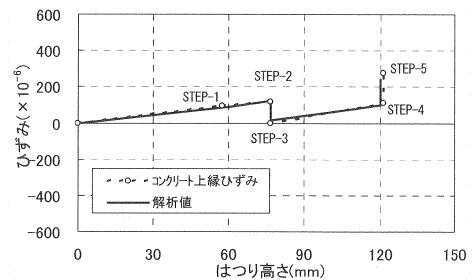


図-8 コンクリート表面ひずみ (支間中央断面)

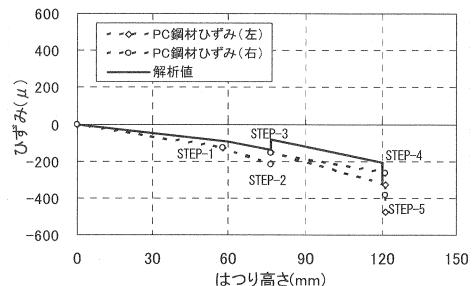


図-9 PC鋼材ひずみ (支間中央断面)

上縁に確認された。ひび割れは、はつり範囲全般にわたって入った。解析では、試験結果と同じく120mmはつり後50kN除荷時でひび割れが発生している。この結果、ひび割れの挙動についても、解析で再現可能であることが確認できた。



図-10 ひび割れ発生状況(120mmはつり時・STEP5 [除荷後])



図-11 非線形解析結果(120mmはつり時・STEP5 [除荷後])

4. 補修材料の選定

PC鋼材を完全に露出させるような大断面修復を行う場合の補修材料は、従来のかぶり部分等の小断面修復を対象としたものでは対応できない。ここでは、PC桁の下面の大断面修復を対象とした高流動コンクリートの適用性を検討した。

高流動コンクリートの主たる要求性能を表-4に示す。検討には写真-2に示す模擬試験体を用いて充填性を確認した。表-4の要求性能を考慮した実験結果をもとに決めた配合を表-5に示す。流動性・ブリーディング・圧縮強度等は表-6に示すような試験結果となっている。

表-4 高流動コンクリートの要求性能

自己充填性	断面寸法、鋼材の最小あき等により自己充填性ランク1が必要である
流動性	流込み位置からの円滑な流入を考慮、スランプフロー650mm前後、V15漏斗時間10~15秒を目安とする
粘着性	打込み後のはつり面との間に空け発生を考慮、ブリーディング率(JIS A1122)は0%を目安とする
初期膨張性	硬化前に打上り面が沈下せず、はつり面に密着できるように初期膨張性が必要である
早強性	供用開始までの日数、施工時の外気温等で決定、実験では材齢7日で折コンクリートと同強とする
付着性	はつり面との付着性は必要であるが、明確ではないため、一般的な1~1.5N/mmを目安とする
ヤング係数、強度	PC桁コンクリートと同等、実験では設計上のヤング係数33kN/mm ² 、圧縮強度50N/mm ² を目安とする
低吸水性	収縮、クリープ変形の小さいものが良いが、具体的ではないので市販品の組み合わせで可能な低吸性を確認する

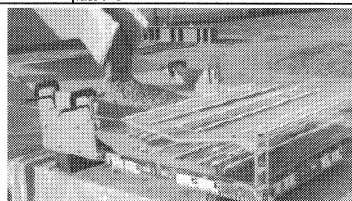


写真-2 模擬試験体での充填性確認

5. まとめおよび今後の課題

以下に本研究の範囲で得られた知見と今後の課題を述べる。

- ① PC桁において大断面をはつりする場合、主桁の変形がPC鋼材の張力変動に及ぼす影響が大きく、この影響を考慮した事前解析が必要である。
- ② 実桁の材料特性を考慮した非線形FEM解析により、はつり試験結果をシミュレーションすることができる。
- ③ はつり時に主桁の変形を拘束することにより、プレストレスを残したまま、大断面のはつりを行うことができる可能性を示した。
- ④ PC桁下面の大断面修復に用いる材料として、高流動コンクリートを適用できる可能性を示した。
- ⑤ 今回の実験は損傷のないPC桁を使用した。実際には塩害を受けたPC桁が対象となるため、劣化が存在するPC桁の解析方法についての検討が必要である。

表-5 高流動コンクリートの配合

区分	W/E (%)	W/P (%)	S/mor (%)	s/a (%)	上段 単位量(kg/cm ³)、下段 絶対容積(L/m ³)									
					P					S				
					W	B	E	LF	S1	S2	G	SP	RS	AL
質量	34.2	30.3	-	-	175	491	20	67	599	267	734	12.1	8.5	0
容積	107.4	93.1	0.48	54.6	175	157	8	25	236	101	280			0.3

E:膨張材, P:粉体, B:結合材, C:セメント, LF:石灰石微粉末, S1:川砂, S2:細砂
SP:高性能AE減水剤, RS:収縮低減剤, AL:発泡剤, NA:消泡剤

表-6 高流動コンクリートの試験結果

SF (mm)	FT50 (s)	TY (s)	Uh (mm)	UT30 (s)	AIR (%)	BL (%)	F7 (N/mm ²)	E7 (N/mm ²)
649	7.6	14	345	8.3	0.6	0.0	73.2	35.5

SF:スランプフロー, FT50:50mm到達時間, TY:漏斗流化時間, Uh:U型充填高さ, UT30:U型充填試験300mm高さ到達時間, AIR:空気量, BL:ブリーディング率, F7:E7材齢7日の圧縮強度とヤング係数(標準水中養生)

6. おわりに

今回は、はつり実験と解析結果が主な報告であった。今後は、はつり後の桁に高流動コンクリートによる断面修復を行い、かつ外ケーブル補強を行った試験体による載荷試験を行う予定である。無補修桁の載荷試験結果と比較し、PC部材の補修方法について提案し、機会を得て報告したい。なお、本研究は著者らが所属する両団体における「PC橋の改造技術に関する共同研究」の活動の一環である。はつり実験では三井住友建設技術研究所の方々にも多大なご支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。