

論文 ポステンションPC桁の塩害劣化と耐荷力

田中良樹*1・河野広隆*2・渡辺博志*3・木村哲士*4

要旨: 塩害劣化がPC桁の耐荷性状に及ぼす影響を明らかにすることを主目的として、日本海沿岸部で34年間実供用され、腐食により著しい損傷が見られたポステンションPC桁を試験体として、載荷試験及び解体調査を実施した。その結果に基づき、PC鋼材の断面残存率とPC桁の破壊形態や残存耐力との関係を示した。また、桁の中で特に腐食し易い箇所、定着部付近への塩分浸透経路等のポステンションPC桁の塩害劣化の特徴を明らかにした。

キーワード: 塩害、ポステンションプレストレストコンクリート、残存破壊抵抗曲げモーメント

1. はじめに

塩害を受けた既設のプレストレストコンクリート(PC)橋の補修、補強、架替を検討する際、橋の残存耐荷力の評価が求められるが、塩害を受けたPC桁の残存耐荷力を適切に評価することは難しいのが現状である。塩害を受けたPC桁の耐荷性状については、これまでも幾つかの調査事例があるが¹⁾、塩害劣化のパターンや程度はさまざまであると考えられ、データの蓄積がまだ少ない状況にある。また、プレテン桁と適用支間が異なり、構造も若干異なるポステンションPC桁(以下ポステン桁)についても塩害劣化と耐荷性状の関係を把握しておく必要がある。今回、日本海沿岸部で34年間実供用されたポステン桁の載荷試験及び解体調査の機会を得た²⁾。

実構造物として供用されたポステン桁の劣化に関する検討や報告としては、グラウトの施工不良に起因する劣化の事例³⁾、塩化物イオンを含有した特殊なグラウトによる早期劣化の事例⁴⁾、グラウト欠陥も含む構造的な欠陥に起因する落橋事例⁵⁾などがある。また、腐食の程度が比較的軽微な場合のポステン桁の載荷試験や解体調査は稀ではない⁶⁾。しかし、日本海沿岸部のように厳しい塩分環境下で、かつ構造物の一部に桁下から海水が直接かかるような環境に置かれていたポステン桁の破壊試験を伴う耐荷性状に関する検討はこれまでほとんど見られない。

ここでは、このような厳しい腐食環境下にお

表-1 試験桁の主な諸元

試験体名	S3	S5
採取位置	第3スパン第3主桁	第5スパン第3主桁
橋梁形式	合成I桁	非合成I桁
	6主桁	5主桁
コンクリート設計基準強度	主桁 39MPa (400kgf/cm ²) 床版 29MPa (300kgf/cm ²)	
主要鋼材	BBRV 9-44φ5	BBRV 4-42φ5
PC鋼材の規格	SWPR1 5mm	
引張強度	1620MPa (16500kgf/cm ²)	
初期導入張力	1130MPa (11500kgf/cm ²)	
有効プレストレス	773MPa	843MPa
竣工年月	1965年3月	
撤去年月	1999年8月	1999年6月

※両スパンとも第1主桁が海側である。

*1 建設省土木研究所 コンクリート研究室 研究員 (正会員)

*2 建設省土木研究所 コンクリート研究室 室長 工修 (正会員)

*3 建設省土木研究所 コンクリート研究室 主任研究員 工修 (正会員)

*4 建設省土木研究所 コンクリート研究室 交流研究員 工修 (正会員)

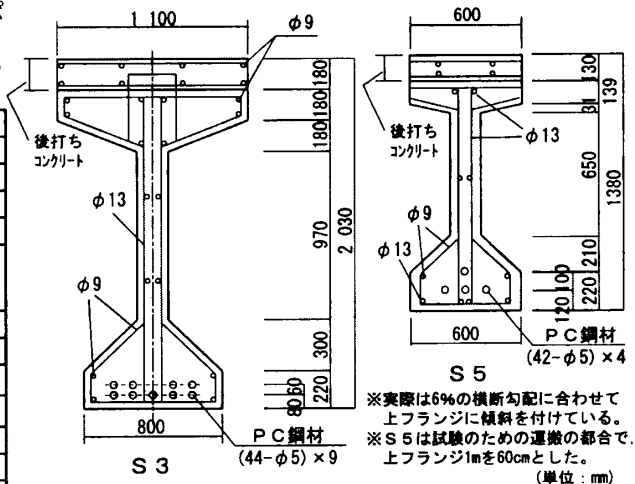


図-1 試験桁の基本断面形状

表-2 コンクリートの圧縮強度試験結果

桁	部位	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	試験数 (体)
S3-G3	床版 ¹⁾	39.3	23.1	3
	主桁陸側	41.5	24.6	3
	桁端北側	44.6	21.2	3
S3-G4	主桁陸側	34.4	22.7	4
S5-G3	床版 ²⁾	18.4	16.0	2
	主桁海側	46.2	25.5	3
	桁端南側	37.3	26.4	3
S5-G4	主桁海側	51.4	23.3	4

- 1) 合成桁の床版場所打ちコンクリート。横断勾配の調整も兼ねる。
 2) 横断勾配の調整用コンクリート。
 3) 桁端は桁端部の充填コンクリート。
 供試体寸法：
 $\phi 68\text{mm} \times 140\text{mm}$
 G3: 試験桁(第3主桁)
 G4: G3直近の第4主桁

けるポステン桁の荷重試験及び解体調査を実施し、塩害劣化の特徴とそれらの耐荷力に及ぼす影響について検討を行った。

2. 試験桁

2.1 一般諸元

試験に用いた2本のPC桁S3, S5は、同一のPC橋(以下K橋)から取り出したものである。図-1に試験桁の基本断面形状を示す。表-1に設計図書による各PC桁の主な諸元を示す。なお、材料試験用の試験片を採取するため、S3, S5の隣の桁(各第4主桁)も一部使用した。

2.2 材料試験結果

表-2にコンクリートコアの圧縮強度試験結果を示す。主桁のコンクリートコアは桁端付近のウェブから採取した。表-3にPC鋼素線の引張試験結果を示す。試験片は、試験桁の隣の桁のうち、比較的かぶりが厚く、外部からの塩化物の浸透が少ないと考えられる桁端部のウェブから傷を付けないよう慎重に採取した。これらの試験片に錆はほとんど発生していなかった。

2.3 損傷と補修

S3, S5は、これまで2度の断面修復と塗装が施されていた。また、S3は劣化が著しいことから、平成3～4年に中間支柱・防護工の設置及び外ケーブル補強が施された。S3は、断面修復の際に数箇所PC鋼素線の破断が確認されており、K橋の中でも最も損傷が著しいと考えられた⁷⁾。

図-2に目視により確認したS3の試験後の破壊位置での腐食状況を示す。この断面でPC鋼

表-3 PC鋼素線の引張試験結果

桁	試験片 No.	引張 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	伸率 (%) ¹⁾
S3-G4	PC1	1760	196	6.92
	PC2	1750	193	7.31
	PC3	1720	197	6.91
	平均値	1743	195	7.05
S5-G4	PC4	1750	201	6.68
	PC5	1730	201	6.47
	PC6	1770	208	5.77
	平均値	1750	203	6.31
	規格値	1620	—	4.0

- 1) 基長:100mm 2) 規格値はSWPR1Aを想定。
 3) 弾性係数は基長間の平均ひずみに基づき算出。

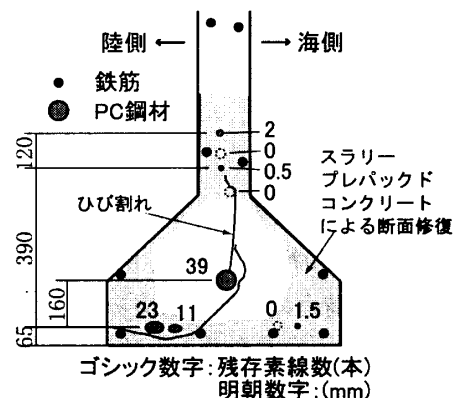


図-2 S3のPC鋼材破断位置の腐食状況

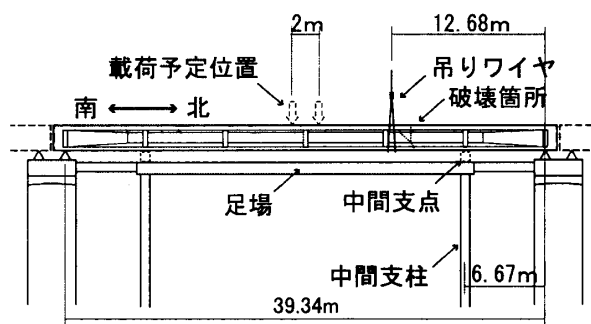


図-3 S3の試験方法

材の著しい断面欠損が見られ、その断面残存率(残存断面積/健全時断面積)は21%であった。一方、S5を取り出した第5スパンでも補修の際にPC鋼素線の破断が第1主桁、第5主桁に見られたが、第3主桁の試験桁S5にはPC鋼素線の破断は確認されていない。

3. 荷重試験

3.1 S3の荷重試験

図-3に試験方法の概略図を示す。当初は支間中央付近で2点荷重する予定であった。試験前に外ケーブルを切断、撤去し、床版、横桁も切断した。次に、南側の中間支点を撤去した。さらに、

表-4 S3の破壊位置の作用力

支持状態	曲げ モーメント (kN-m)	せん断 力 (kN)
単純支持	4360	-274
中間支点支持	-1180	-390
ワイヤ吊り状態	-1130	107

北側支点から11.07m
中間支点は北側のみの場合

北側の中間支点を撤去するため、桁端部をジャッキアップしようとしたところ、支間の1/4点付近でせん断ひび割れが上フランジ近傍まで伸展した。S3が自重を支えられない可能性が高いと考え、支間の1/3

点のところでワイヤで吊り、自重を支えられるまでワイヤを徐々に緩めていくこととした。

図-4に試験後の破断位置付近のひび割れ状況を示す。ワイヤを徐々に緩めていくと、既にせん断ひび割れが見られていた位置でスターラップに沿った曲げひび割れが伸展した。その後、PC鋼材の素線の破断音が数回にわたって発生した後、結局、試験桁が自重を支えられなくなり、載荷を断念した。せん断ひび割れ監視用に取り付けていたワイヤゲージによる変位の変動より、ワイヤを緩める際にせん断ひび割れはほとんど伸展せず、曲げひび割れが伸展していたことが分かった。

3.2 S5の載荷試験

載荷試験は、S5を単純支持して、支間中央付近に2点載荷することによった(載荷点間1.5m)。試験の結果、S5は純曲げ区間内で上縁のコンクリートの圧壊により終局に至った。

3.3 腐食状況と破壊形態

表-4にS3の各支持状態での破断位置の断面力を示す。また、表-5に腐食によるPC鋼材の欠損を考慮したときの曲げ耐力、せん断耐力の計算値を示す。計算方法は道路橋示方書に準じた。計算の特記事項は表-5脚注に示す。なお、残存していたPC鋼材の腐食の程度は素線によって異なっており、現時点では腐食による強度低下の程度が把握できていない。ここでは、鉄筋の

表-5 載荷試験結果

試験桁		S3			S5	
		計算値		実験値	計算値	実験値
腐食状況		腐食なし	腐食あり	腐食あり	腐食なし	軽微な腐食
PC鋼材断面残存率		100%	21.4%	21.4%	100%	99%
ひび割れ発生曲げモーメント Mcr (kN-m)		4770	-1310	-	2010	2140
終局曲げモーメント Mu (kN-m)		21000	4420	4360 以下	6480	6210
せん断 耐力 Vu (kN)	コンクリート負担分	162	167	-	-	-
	スターラップ負担分	184	184	-	-	-
	PC曲げ上げによる寄与	241	53	-	-	-
	プレストレスによる寄与	248	0	-	-	-
	合計	836	404	-	-	-

1)コンクリートの曲げ引張応力度は4MPaとした。

2)計算に用いた材料特性は表-2,3によった。

ただし、腐食ありの計算ではPC鋼材の破断強度を腐食なしの場合の90%とした。

3)S5の曲げひび割れモーメントは荷重変位曲線の傾きの変化から求めた。

4)Mcrは死荷重曲げモーメントが作用している状態を0とした。

5)せん断耐力のうち、コンクリート負担分は断面補修の劣化を考慮していない。

6)せん断耐力のうち、プレストレスによる寄与は2点載荷した場合を想定した。



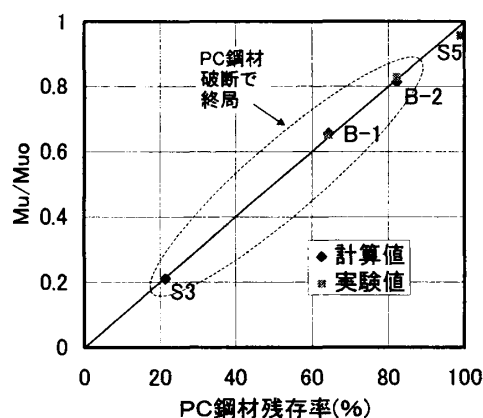
図-4 破壊箇所付近のひび割れ(S3)

場合⁹⁾を参考にPC鋼材の破断強度を腐食なしの場合の90%と仮定した。

S3の破断位置におけるPC鋼材の断面残存率は21%と著しかったため、支間の約1/4の箇所でありながら、PC鋼材の破断を伴う曲げ破壊が生じた。PC鋼材の腐食による強度低下と断面欠損を考慮した終局曲げモーメントMuの計算値4420kN-mは、ほとんど死荷重曲げモーメントMdの値4360kN-mと同程度であった。

一方、S5は腐食の程度が比較的軽微であったため、圧壊による曲げ破壊で終局に至った。表-5に示したように、S5の曲げ耐力(実験値)は腐食を考慮しない場合の曲げ耐力の計算値と概ね一致していた。S5の破壊箇所付近の解体の結果、4本のシースはほとんど腐食せずに健全であり、グラウトも4本全て十分に充填されていた。PC鋼材の外観観察でも腐食による断面欠損はほとんど見られなかった。

図-5に、PC鋼材の断面残存率とMu/Muo



※計算値は表-5と同様の計算による。
図-5 PC鋼材残存率と M_u/M_{uo} の関係

の関係を、文献1)のプレテン桁の結果と合わせて示す。 M_{uo} は腐食していない場合の破壊抵抗曲げモーメントである。健全なPC鋼材を使用していれば極端に鋼材量を減らさない限りは一般にコンクリート上縁の圧壊により終局に至るものと考えられるが、PC鋼材の断面残存率が80%以下に低下するような腐食環境に置かれたPC桁では、PC鋼材の破断で終局に至っている。塩害により腐食したPC鋼材は強度が低下するとともに、著しい伸びの低下が見られ、これがPC桁の破壊形態に影響する場合がある¹⁾。S3の場合、PC鋼材の断面欠損が特に著しい上に、PC鋼材の伸びの低下も生じていたと推察される。

4. 解体調査

4.1 PC鋼材曲げ上げ部の腐食

第5スパンの試験体S5以外の桁の解体を観察したところ、PC鋼材の曲げ上げ部で12本の素線が腐食で破断しているのが見つかった。それ以外の箇所ではPC鋼材の破断が見られなかった。

ポステン桁の塩害劣化の事例では、下フランジ、ウェブともに、スターラップや用心鉄筋は、かぶりが当時3cm程度であったために、ポステン桁の中で早期に腐食が発生し易いと考えられる。PC鋼材のかぶりは一般には鉄筋よりも大きい、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの欠損によりPC鋼材の腐食も生じ易くなる。K橋のような当時のポステンT桁の断面形状の場

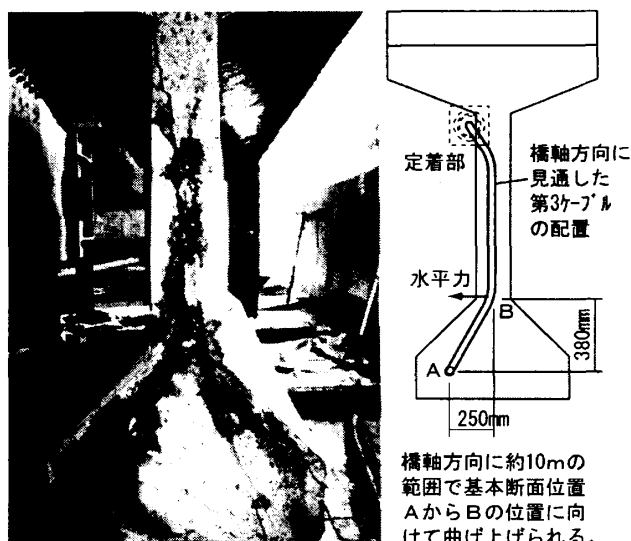


図-6 PC鋼材曲げ上げ部の内部ひび割れ
S3北側支点から6.1mの断面
右後方に北側支点部の横桁の一部が見える

合、幅の狭いウェブにおけるPC鋼材のかぶり(S5のシース位置で5cm程度)は断面に余裕のある下フランジにおけるかぶりよりも小さくなる傾向にある。PC鋼材の曲げ上げ部の中でも、下フランジとウェブの境界部は、特にPC鋼材のかぶりが小さい箇所であると考えられ、部分的には鉄筋のかぶりと同程度になる可能性もあると考えられる。しかも、下フランジの上面は塩分が蓄積し易い傾向にある⁹⁾。これらのことから、鉄筋腐食のある箇所を除くと、PC鋼材の曲げ上げ部は他の部位に比べて腐食が最も生じ易い箇所であると考えられる。

S3の曲げ上げ部の断面で、図-6に示すような鉛直方向の大きな内部ひび割れが伸展していた。1シース内のPC鋼材の束のうち、外部に近い素線の方が腐食がより著しい傾向にある。これは外部からの塩分に起因しているためと考えられる。その腐食による素線の膨張によりコンクリートの内部ひび割れがまず発生し始めると考えられる。曲げ上げ部ではこれに加えて、PC鋼材の緊張によって生じる鉛直力やウェブ面外方向への水平力がこれを助長すると考えられる。S3の鋼材配置の場合、ウェブ面外方向への水平力は最大で約30kNであったと推定される。この水平力の作用位置はPC鋼材の曲げ上げ部かつウェブと下フランジの境界付近であり、上記

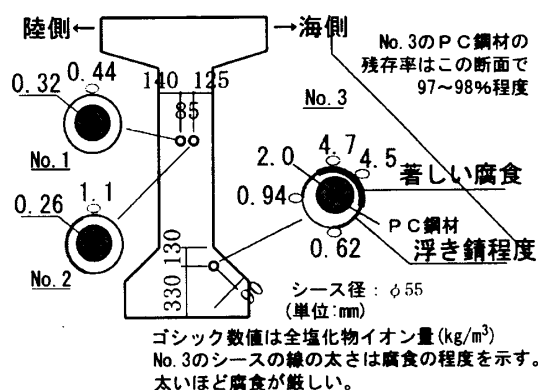


図-7 シース周辺の全塩化物イオン量と鋼材腐食

のPC鋼材の腐食しやすい箇所と同じ位置である。結局、この部位は、腐食の発生が生じ易いだけでなく、ひび割れの伸展が急であることから、塩害による劣化の進行が加速されることが考えられる。

S3の場合、このような曲げ上げ部が周囲の岩礁やコンクリートブロックの形状や位置関係からK橋の中でも直接海水のかかる頻度が最も高い箇所に位置していた。このことが、S3の塩害劣化をさらに厳しいものにしたものと考えられる。

4.2 シース内への塩分浸透

主桁のグラウトはほとんどの範囲で十分に充填されていた。桁端付近で幾つかグラウトが充填されていないものがあったが、桁端部はかぶりが大きいことからPC鋼線の腐食はほとんど見られなかった。一方、グラウトが十分に充填されていても、曲げ上げ部のように塩分量の多い箇所では腐食が著しい状況であった。

図-7はシース周辺の塩分量とシースの腐食状況を示したものである。この図に示した断面は試験桁S3の隣の桁の南側支点から約8mの位置であり、塩分分析に用いるコアをこの断面から橋軸方向に採取した。No.1, 2のシースは周囲に軽微なさびが見られたが、グラウト中の塩分量は 0.3kg/m^3 程度であり、外部からシース中への塩分浸透はなかったものと考えられる。一方、No.3のシースは、かぶりの浅い表側で腐食が進行し、一部に穴が見られる程度であった。その反対側はまだシースの光沢が見られる状況であった。その周辺の塩分量は、表側で $4.5 \sim 4.7\text{kg/m}^3$ 、裏側で $0.62 \sim 0.94\text{kg/m}^3$ であった。腐食限界塩分

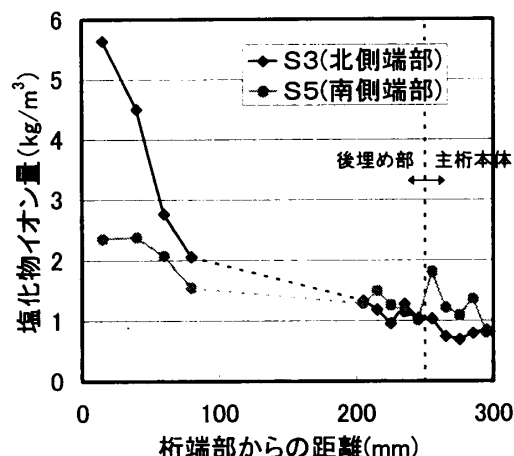


図-8 桁端部における全塩化物イオン量の分布

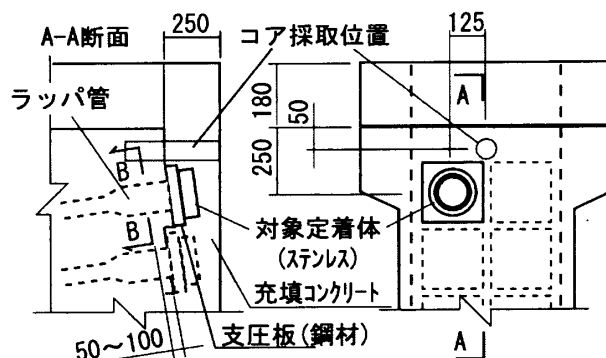


図-9 定着体付近の詳細とコア採取位置(S3の例)

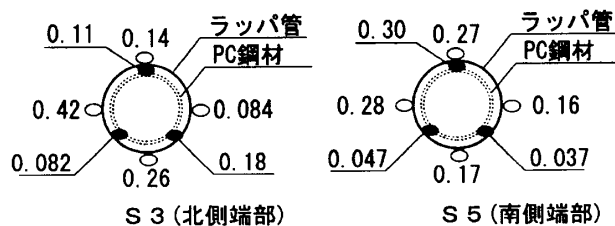


図-10 ラッパ管周辺の全塩化物イオン量測定結果
(図-9のB-B断面の結果)

量は一般に $1.2 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ といわれているが、このシースの場合も、その程度の塩分量を境に腐食が発生していたものと考えられる。No.3のグラウト中の塩分量 2.0kg/m^3 はNo.1,2よりも明らかに多い結果となっていた。シースの腐食による穴やシースの隙間を通して、外部からシース内に塩化物が浸入したものと考えられる。No.1,2ではPC鋼材の腐食が見られなかったが、No.3では質量減少量に基づく平均断面残存率で97~98%程度の腐食が生じていた。

4.3 定着部の腐食

ポステン桁のPC鋼材の防食を考える上で、定着部の防食は重要な課題の一つである。図-8

にS3, S5の定着部付近の塩分測定結果を示す。また、図-9に塩分量測定のためのコアの採取位置を示す。PC鋼材の定着後は定着体の周囲を覆うようにコンクリートが充填されるのが一般的である。この定着部への塩分浸透経路として、充填コンクリートの外側からの塩分浸透拡散と、充填コンクリートと本体の境界面からの塩分浸入が考えられる。今回の調査では、後者の塩分浸透の兆候は確認されず、主として前者の塩分浸透によるものであったと考えられる。このとき、深さ25cm程度でも 1kg/m^3 程度の塩分が浸透していた。定着体付近のPC鋼材には軽微な腐食が見られた。定着体のステンレス部品は浮き錆が一部に見られたが、光沢部分も多く残っていた。図-10に、定着体の裏側に配置されたラップ管の周囲のコンクリート中の塩分量とラップ管内部のグラウト材中の塩分量を示した。この箇所の塩分量はそれと同等の深さの上記コア中の塩分量より少ない傾向にあった。これは定着体の鋼板により塩分浸透経路がある程度遮蔽されていたためと考えられる。なお、S3のコンクリート及びグラウトの初期含有塩分量はこのラップ管周辺の塩分量と概ね同等であったと考えられることから、 0.4kg/m^3 以下であったと考えられ、海砂からの塩化物混入はほとんどなかったと考えられる。

5. まとめ

塩害を受けたポステン桁の載荷試験及び解体調査の結果、以下のことが判明した。

- (1) 支間40mのポステン桁S3は、支間の1/4点付近で曲げひび割れの伸展とPC鋼材の破断が生じ、自重を受け持てない状況になっていた。その破壊箇所付近のPC鋼材は著しい腐食が生じており、断面残存率が21%となっていた。一方、支間20mのポステン桁S5はS3に比べると腐食の程度が軽微であり、載荷試験の結果、一般的な圧壊で終局に至った。
- (2) 当時のポステン桁の断面形状(T桁)の場合、PC鋼材の腐食しやすい箇所は、スターラップ等

の鉄筋腐食の箇所に加えて、PC鋼材の曲げ上げ部の下フランジとウェブの境界付近であると考えられる。また、この箇所では、腐食が生じ易いだけでなく、腐食によるひび割れが、腐食の膨張圧に加え、PC鋼材の緊張力に伴う鉛直分力及び面外方向への水平分力によって断面内部で急激に伸展すると考えられる。

(3) PC桁中の塩分量調査から、ポステン桁特有のPC鋼材定着体付近への塩分浸透過程及びシース内部への塩分浸透過程を把握する上で有用なデータが得られた。このうち、定着体付近の塩化物の存在は、今回の2本のPC桁の場合、充填コンクリートの外側からの塩分の拡散浸透によるものであることが分かった。

謝辞

本試験は塚田幸広所長、高橋孝男建設監督官、横山修司建設監督官、伊藤啓一出張所長をはじめ建設省東北地方建設局酒田工事事務所、同鶴岡国道維持出張所の多大な協力を得て実施できたものである。この場を借りて、関係各位に深く感謝致します。また、S5の載荷試験のためにご協力頂いた斎藤健工場長をはじめ前田製管(株)村上工場の方々及びK橋の撤去業者の方々にも感謝致します。

なお、本試験は(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会と土木研究所が実施している「ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 鈴木雅博: 塩害を受けたプレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, 21-3, pp.973-978, 1999
- 2) 旧暮坪陸橋の現地載荷試験—塩害を受けたポステンションPC桁の耐荷力をみる—, 土木技術資料, 41-10, pp.2-3, 1999.10
- 3) 佐々木慎一, 堺孝司: グラウト不良により劣化したPC橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文報告集, 18-1, pp.1089-1094, 1996
- 4) Morris Schupack: Post-Tensioning Tendons after 35 Years, Concrete International, pp.50-54, March, 1994
- 5) Walter Podolny, Jr.: Corrosion of Prestressing Steels and Its Mitigation, PCI Journal, pp.34-55, Sep.-Oct. 1992
- 6) 例えば, 清水洋一, 八幡泰市, 狩野誠一郎, 須田勤: 36年間供用されたPC桁の性状について, プレストレストコンクリート, 38-1, pp.63-68, 1996.1
- 7) 見波潔, 遠藤繁雄, 上阪康雄: 暮坪陸橋の塩害損傷とその対策, 土木施工, 35-7, pp.9-19, 1994.6
- 8) コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, p.45, 1998.10
- 9) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XIV)—環境条件調査結果2—, 建設省土木研究所共同研究報告書第84号, p.16, 1993.3