

塩害により撤去されたPC橋の耐荷力評価

松沢政和* 木村嘉富** 花井 拓*** 本間英貴****

1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な数の橋梁の高齢化が進展する中で、様々な劣化要因による損傷事例が報告されている。これらの損傷に対して合理的かつ適切に維持管理を行っていくために、検査技術や評価手法の確立が求められている。しかし、劣化損傷や変状の要因が多岐にわたるとともに、橋梁の構造特性や周辺環境、交通量等によっても耐荷性能や耐久性能に与える影響が大きく異なる。劣化損傷を適切に評価する手法を確立していくためには、これらの劣化損傷等に関するデータの蓄積が必要不可欠である。(独)土木研究所では、劣化損傷の生じた実橋の実態や耐荷性能を把握すべく、撤去された橋梁について非破壊検査や載荷試験、解体調査を実施している。これらの取り組みを臨床研究と称し、検査技術や評価手法の確立に向けて研究を行っている。

本論では、塩害により鋼材腐食の生じたポストテンションPCT桁の載荷試験を実施し、せん断耐荷性状に着目した耐荷力評価に関する検討結果について報告する。

2. 撤去桁の概要

2.1 橋梁概要

表-1に本橋の主な橋梁諸元を示す。本橋は石川県宝達志水町の主要地方道金沢田鶴浜線の相見川を渡河する自歩道橋（能登海浜自転車道線）である。能登有料道路の本線（上り線）に隣接し、海岸線より約90mの位置に架かる2連の単純ポストテンションPCT桁橋である（写真-1）。

過去2度の詳細調査により塩害による鋼材腐食により剥落や浮きが桁全体に確認され、はつり調査において全PC鋼材8本のうち2本にて一部素線破断が確認された。そのため、ライフサイクルコスト（LCC）比較により架替えが優位と判断さ

れ、供用から38年経過した後撤去された。

2.2 試験体概要

本載荷試験は第一径間の支間長19.2mのG1桁を用いて実施した。本試験体の標準断面図を図-1に示す。また、本研究にて実施した調査及び試験項目を表-2に示す。なお、損傷状況調査以外の試験は、載荷試験後に実施した。

表-1 橋梁諸元

橋 梁 名	相見川海浜橋（自歩道）
架 橋 位 置	石川県宝達志水町（海岸線より90m）
路 線 名	主要地方道 金沢田鶴浜線 （管理：石川県）
橋長・支間長	44.0m（支間長19.2m+23.24m）
橋 梁 形 式	単純ポストテンションPCT桁橋
適用示方書	S43 PC道路橋示方書（竣工年より推定）
竣 工 年	昭和47年(1972年)
撤 去 年	平成22年(2011年)供用後38年経過



写真-1 撤去前の状況

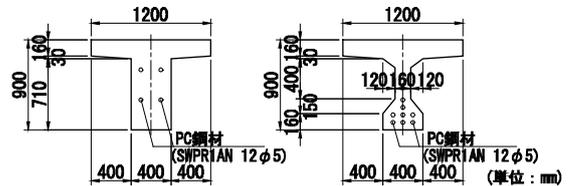


図-1 標準断面図

表-2 調査及び試験項目

損傷状況調査 材料試験	外観目視	
	コンクリート	圧縮強度試験
		割裂引張強度試験
		中性化深さ測定
		塩化物イオン測定
鋼材	引張強度試験	
	断面減少率	
	質量減少率	
載荷試験	中央：曲げ載荷、桁端：せん断載荷	

Evaluation of Load Carrying Capacity using Prestressed Concrete Bridge demolished because of Chloride Induced Deterioration

2.2.1 試験体の損傷状況調査

図-2に載荷試験前の損傷図を示すが、桁全体に損傷が確認できるものの、桁の両側面及び起終点にて損傷の程度が異なり、山側及び終点（橋台側）の損傷が顕著であった。なお、載荷試験前にX線によるグラウト充填度調査を実施したが、上縁定着部付近で一部未充填が確認されたものの、比較的充填状況は良好であった。

2.2.2 材料試験結果

載荷試験後に実施したコンクリートの材料試験結果の平均値を表-3に示す。当時の設計資料によるコンクリートの設計基準強度40N/mm²に対し、圧縮強度試験の平均値は58.9N/mm²であった反面、静弾性係数は道路橋示方書に示されている値に対し低い値となった。なお、鋼材に関してはPC鋼材及び鉄筋ともに規格値以上であった。

材料試験に用いたコアの中性化深さは表-4に示すとおり、海側では中性化は確認されず、山側は部分的に26mmまで進行している箇所もあるが、平均値は10mm程度であった。

図-3に塩化物イオン濃度分布を示す。PC鋼材位置における塩化物イオン濃度は、損傷の顕著な終点側の下面が最も高く、約2.5kg/m³であった。比較的健全な起点側では、PC鋼材位置では最大でも0.3kg/m³程度（山側の側面）であった。山側が高い要因としては、桁内側であるために桁外側に比べ雨水等により付着塩分が洗い流されないためと考えられる。また、特に山側や終点側では表面付近の濃度が小さい傾向にあり、中性化による塩分濃縮^{*}が生じたと考えられる。

図-4に終点側のPC鋼材にて破断が確認された箇所における各鋼材の素線12本の断面減少率及び質量減少率を示す。ここで、断面減少率は50mmピッチにてノギスを用い計測した各試験体全長30cmの平均値である。破断が確認された箇所は全て終点側の桁端であり、破断した鋼材の配

置位置は最下段（PC6、PC8）及び下段より2段目の山側（PC5）のPC鋼材であった。シー스가腐食損失しPC鋼材が複数個所で断続的に破断していたPC8の減少率が40%~70%と最も大きく、PC5にて破断が確認された素線を除いて、PC5とPC6は概ね10%前後の減少率であった。

表-3 材料試験結果（コンクリート）

	試験値	標準値（道路橋示方書）
圧縮強度（N/mm ² ）	58.9	40
引張強度（N/mm ² ）	3.16	2.69
静弾性係数（kN/mm ² ）	21.6	31.0

表-4 中性化深さ測定結果（mm）

	圧① （海側）	圧② （山側）	圧③ （海側）	割① （海側）	割② （山側）	割③ （海側）
最大	0	26	0	0	13	0
最小	0	6	0	0	4	0
平均値	0	11	0	0	8	0

※「圧」は圧縮強度試験、「割」は割裂強度試験コアを示す。

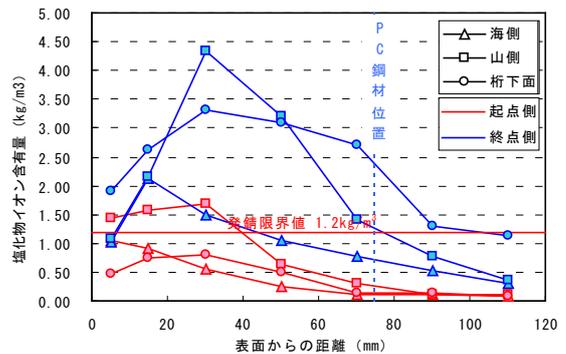


図-3 塩化物イオン濃度分布

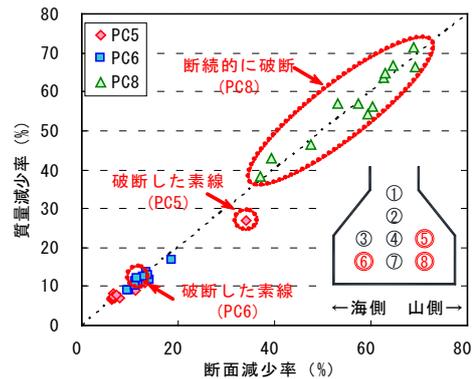


図-4 断面減少率と質量減少率の関係

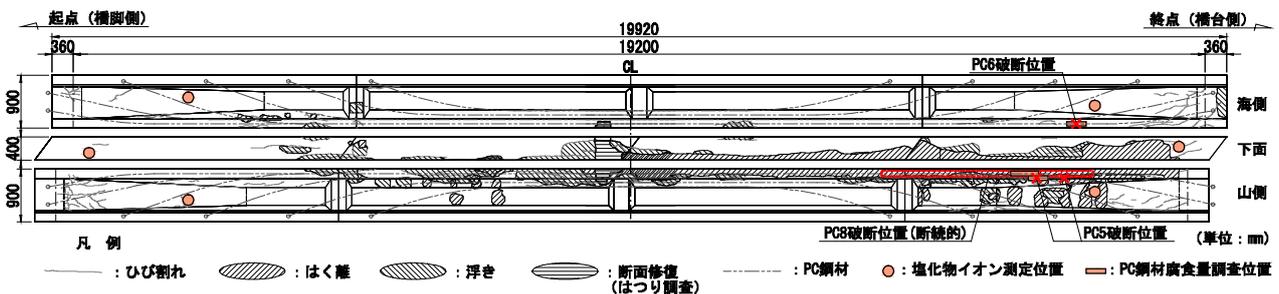


図-2 載荷試験前の損傷図

*土木用語解説：中性化による塩分濃縮

3. 曲げせん断特性に着目した載荷試験

3.1 載荷試験方法

載荷方法は図-5に示すとおり、支間中央にて曲げ載荷及び各桁端にて1回ずつのせん断載荷（以降、起点側桁端部：せん断載荷試験-1、終点側桁端部：せん断載荷試験-2）の計3回の載荷試験を行った。曲げ載荷試験は支間中央の残存プレストレス量の確認を目的としてひび割れ発生荷重までとした。せん断載荷試験のせん断スパン比 a/d は、斜めひび割れが確認されるように設定するとともに、人工的に鋼材を腐食劣化させた供試体を用いた既往の研究¹⁾と同程度 ($a/d \approx 3.0$) とした。

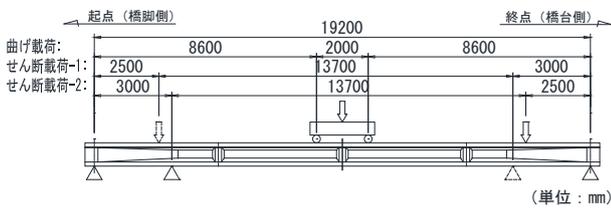


図-5 載荷試験方法

3.2 載荷試験結果

図-6にせん断載荷試験における荷重-変位曲線を示す。せん断載荷試験-1は、後述するせん断ひび割れが確認された後、荷重-変位曲線にてPC鋼材の降伏の予兆が確認されたため、せん断載荷試験-2への影響を勘案し、500kNで除荷した。せん断載荷試験-2は、曲げひび割れ発生荷重まではせん断載荷試験-1と概ね同様の挙動を示したが、以降はせん断載荷試験-1より大きな変形を呈しながら、最大荷重575kNを計測した。なお、最大荷重時にて圧縮側コンクリートの圧壊は生じていないが、最大荷重計測以降にPC鋼材の破断音が数回確認されていることから最大荷重は曲げに相当するものと推察される。

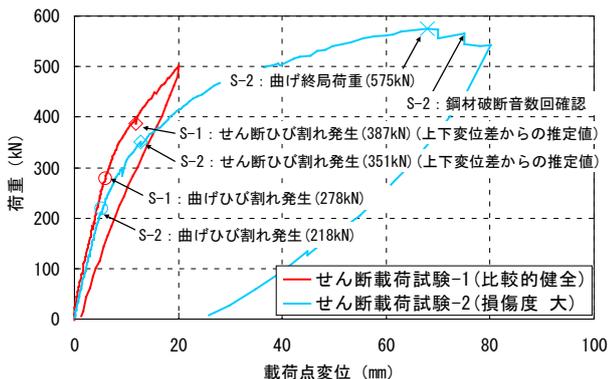


図-6 荷重-変位曲線（せん断載荷試験）

3.3 残存プレストレス量に関する考察

各載荷試験の曲げひび割れ発生荷重から推定した残存プレストレスと表面損傷度（後述）を表-5に示す。健全時の計算は、導入緊張力を当時の適用示方書の導入時における許容引張応力度相当 ($1,260\text{N/mm}^2$) とし有効プレストレスを算出した。ここで、コンクリートの圧縮強度及び引張強度は材料試験結果を用い、弾性係数は圧縮強度試験値から道路橋示方書にて設定した。また、表面損傷度は各載荷区間（曲げ：等曲げ区間、せん断：せん断スパン内）における上フランジを除いた桁の表面積に対する損傷面積（浮き・剥離のみ）の比率とした。プレストレス減少率は部位により異なり、PC鋼材の破断が確認されていない起点側の桁端ではプレストレス減少率は比較的小さく、良好なグラウトの充填によりコンクリートとPC鋼材との一体性が確保されていたためと考えられる。また、プレストレス減少率とコンクリート表面の損傷度にある程度相関が確認された。

表-5 曲げひび割れ発生荷重による残存プレストレスの推定値と表面損傷度

	プレストレス力 (kN) *			表面損傷度
	健全 (計算値)	実験値	減少率	
曲げ載荷試験	1,568	1,188	24%	27%
せん断載荷試験-1	958	906	5%	0%
せん断載荷試験-2	970	738	24%	22%

*プレストレス力は各曲げひび割れ発生位置での推定値

3.4 各耐荷力に関する考察

各耐荷力を荷重に換算した計算値と実験値の比較を表-6に示す。なお、各耐荷力の計算値は曲げひび割れ発生荷重より推定したプレストレス減少率相当に鋼材断面が腐食していたと仮定して算出している。

せん断ひび割れ発生荷重については、両せん断試験ともに明確なせん断ひび割れが目視にて確認できなかったため、既往の研究¹⁾にて概ねせん断ひび割れ発生荷重を抽出できた一手法として、試験体上下に設置した変位計の差が増大する荷重をせん断ひび割れ発生荷重 (P_{Vcrexp}) とした。せん断ひび割れ耐力の計算値 (V_{creal}) は、せん断補強鉄筋を用いていないRCはりのせん断強度²⁾ (V_o)、デコンプレッションモーメントをせん断スパンで除したプレストレスによるせん断耐力増加分³⁾ (V_{pd}) 及びプレストレスの鉛直分力 (V_{pv}) の和とした。また、既往の研究¹⁾と同様にかぶり部分にもはく離

が生じず、一体となって抵抗したとして計算した。せん断ひび割れ発生荷重においては、実験値が計算値の8割程度となった。この結果に対して明確な理由の解明には至っていないが、本来対象とすべきせん断ひび割れ発生荷重より小さい荷重値を抽出した可能性や、せん断スパン内にてウェブ厚が変化していることなどが要因として考えられる。また、海外における曲げせん断ひび割れ発生時のせん断耐力評価式⁴⁾には V_{pv} を考慮していないものもあり、これに準じた場合には概ね実験値と計算値が一致するが、海外の評価式や V_{pv} の取扱いに関する検証が十分ではなく、今後の課題である。

曲げ破壊耐力(M_{ucal})の算出に際しては、各材料試験結果を用い、PC鋼材の降伏強度は引張強度の93%⁵⁾とした。斜引張破壊耐力(V_{ucal})は、前述の V_{creal} を有効高にて算出し、それに圧縮斜材角45度と仮定したトラス理論に基づくせん断補強鉄筋負担分⁵⁾(V_s)の和とした。なお、 V_s は該当するせん断補強鉄筋の断面減少率測定結果を考慮した値である。せん断載荷試験-2にて確認された最大荷重は、曲げ破壊耐力の計算値とほぼ一致したが、今後解体調査にて当該部位における鋼材の実断面減少率との相関を確認する予定である。

表-6 各耐力における実験値と計算値の比較

			せん断載荷試験-1	せん断載荷試験-2
計算値 ^{※1} (kN)	せん断ひび割れ	P_{Vcreal} (①)	513 (377) ^{※2}	430 (324) ^{※2}
	せん断破壊	P_{Vucl} (②)	707	601 ^{※3}
	曲げ破壊	P_{Mucl} (③)	702	572
実験値 (kN)	せん断ひび割れ	P_{Vexp} (④)	387	351
	最大荷重	P_{uexp} (⑤)	—	575
比率 (実験値/計算値)		$P_{Vc}/④/①$	0.75 (1.03) ^{※2}	0.82 (1.08) ^{※2}
		$P_{Vu}/⑤/②$	—	0.96
		$P_{Mu}/⑤/③$	—	1.01

※1 計算値は自重による断面力を控除した値

※2 ()内は V_{pv} を考慮しない場合の値

※3 山側のせん断補強鉄筋の断面減少率測定：24% (海側：健全)

4. まとめ

実橋を用いた載荷試験結果から、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本試験体において残存プレストレスは各部位により異なり、外観の損傷度と残存プレストレスとの関係にある程度相関が確認された。
- 2) 本載荷試験にて実施したせん断ひび割れに着目した検討においては、種々の要因により、実験値と計算値に乖離が生じたと考えられる。さらに、曲げせん断ひび割れ発生時の V_{pv} の取扱い等についても検証を行う必要がある。
- 3) せん断載荷時に確認された最大荷重は、プレストレス減少率相当に鋼材の断面減少が進行していたと仮定した場合の曲げ破壊耐力の計算値と概ね一致した。

謝 辞

本研究にあたり、本試験体の提供に快諾頂いた石川県の関係各位をはじめ、本臨床研究にご協力頂いた皆様に対し、ここに心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (独)土木研究所：既設コンクリート道路橋の健全性評価に関する研究、重点プロジェクト研究報告書、2010
- 2) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、Vol.372/V-5、pp.167～176、1986
- 3) 建設省土木研究所、プレストレスコンクリート建設業協会：高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書、共同研究報告書第138号、1995
- 4) F・ソーコ：プレストレスコンクリート-1.基礎編、鹿島出版社、pp.38～42、1982
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編、2012

松沢政和*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ交流研究員
Masakazu MATSUZAWA

木村嘉富**



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員
Yoshitomi KIMURA

花井 拓***



本州四国連絡高速道路株式会社社長大橋技術センター総括・防食グループ (前 独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ主任研究員)
Taku HANAI

本間英貴****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ主任研究員
Hidetaka HONMA