

# 塩害を受けたポストテンション PCT 桁の臨床研究 — PC 鋼材の付着特性に着目した載荷試験 —

松沢 政和\*1・木村 嘉富\*2・本間 英貴\*3・花井 拓\*4

鋼材腐食の生じた PC 橋の曲げ耐荷性状は、撤去した PC 桁の載荷試験により PC 鋼材の残存率を用いておおむね推定できることが明らかになっているが、せん断に関する耐荷力評価手法についてはまだ十分な知見が得られていない。

既往の研究において、人工的に腐食を促進させた供試体を用いてせん断耐力評価手法に関する研究<sup>1)</sup>を実施し、斜めひび割れ発生荷重に着目して鋼材腐食程度を勘案することにより比較的精度よく耐荷力を推定できる可能性が示されている。その研究の一環として、塩害により撤去されたポストテンション PC 桁の載荷試験を実施し、残存耐荷力を把握するとともに、実部材への適用性について検証した<sup>2)</sup>。このせん断耐力に着目した載荷試験にて、曲げひび割れ発生荷重から推定した残存プレストレスは桁の損傷程度により異なり、腐食や破断が生じた箇所からある程度離れた位置ではコンクリートと PC 鋼材の付着によりプレストレスが確保されることが確認された。そのため、同一の桁にて定着部を切断したのち載荷試験を実施し、付着特性に着目した検討を行った。桁切断前の載荷試験結果から鋼材断面減少率を仮定した計算値と曲げひび割れ発生荷重およびせん断ひび割れ発生荷重はおおむね一致したものの、最大荷重は PC 鋼材とコンクリートの付着切れの影響により計算値の 8 割程度となった。そこで、簡便かつ実用的な手法として、PC 鋼材の実断面減少率を用いて付着切れが生じた PC 鋼材から算出された曲げ破壊耐力を 50 % に低減することにより、実験値（最大荷重）を再現することができた。

キーワード：塩害、鋼材腐食、ポストテンション、付着特性、載荷試験

## 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なかで、さまざま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、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 桁の付着特性に着目した載荷試験結果について報告する。

## 2. 撤去桁の概要

### 2.1 橋梁概要

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 90 m 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）。表 - 1 に本橋の主な橋梁諸元を示す。過去 2 度の詳細調査にて塩害による鋼材腐食に起因するはく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。



写真 - 1 撤去前の状況

### 2.2 試験体概要

撤去された主桁のうち、載荷試験は第 1 径間の支間長 19.2 m の G1 桁（海側）を用いて実施した。載荷桁の標準断面を図 - 1 に示す。

\*1 Masakazu MATSUZAWA：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

\*2 Yoshitomi KIMURA：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

\*3 Hidetaka HONMA：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

\*4 Taku HANAI：本州四国連絡高速道路(株) 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）

表 - 1 橋梁諸元

橋梁名	相見川海浜橋 (自歩道橋)
架橋位置	石川県宝達志水町 (海岸線より 90 m)
路線名	主要地方道 金沢田鶴浜線 (管理: 石川県)
橋長・支間長	44.0 m (支間長 19.2 m + 23.24 m)
橋梁形式	単純ポステンション 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)
補修履歴	なし
点検履歴	平成 19 年 点検・調査 平成 21 年 詳細調査
撤去年	平成 22 年 (2011 年) 供用後 38 年経過

表 - 2 材料強度試験結果

(a) コンクリート				
	試験値	標準値 (道路橋示方書)		
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	58.9	40		
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.16	2.69		
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	21.6	31.0		
(b) 鋼材				
	鉄筋 (SD295)		PC 鋼材 (SWPR1AN 12 φ5)	
	試験値	規格値	試験値	規格値
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	373	295	1 675	1 400
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	553	440	1 806	1 600
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	213	200	203	200

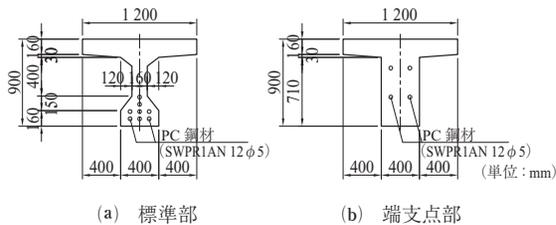


図 - 1 標準断面

図 - 2 に載荷試験前の損傷状況図を示す。桁全体に損傷が確認できるものの、桁の両側面および起終点にて損傷の程度が異なり、山側および終点 (橋台側) の損傷が顕著であった。また、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、図 - 3 に示すように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。

表 - 2 に載荷試験後に実施したコンクリートおよび鋼材の材料試験結果を示す。当時の設計資料によるコンクリートの設計基準強度 40 N/mm<sup>2</sup> に対し、圧縮強度試験の平

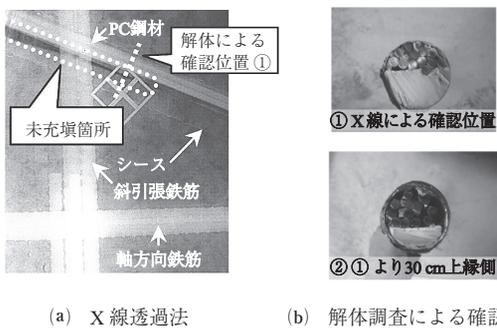


図 - 3 グラウト充填状況 (上縁定着部付近のウェブにて撮影)

均値は 58.9 N/mm<sup>2</sup> 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。鋼材については、鉄筋、PC 鋼材ともに規格値以上の値であった。

### 3. 曲げせん断耐荷特性に関する載荷試験

#### 3.1 曲げせん断耐荷特性に関する載荷試験概要

載荷方法は図 - 4 に示すとおり、支間中央にて曲げ載荷および各桁端にて 1 回ずつのせん断載荷 (以降、健全側: せん断載荷試験 -1, 損傷側: 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、せん断載荷試験のせん断スパン比は、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<sup>1)</sup>と同程度 ( $a/d \approx 3.0$ ) とした。なお、本試験体におけるせん断ひび割れ発生荷重に着目した耐荷特性については、文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

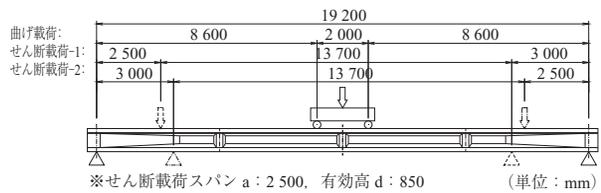


図 - 4 曲げせん断耐荷特性に関する載荷試験方法

#### 3.2 残存プレストレス量に関する検討

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を表 - 3 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

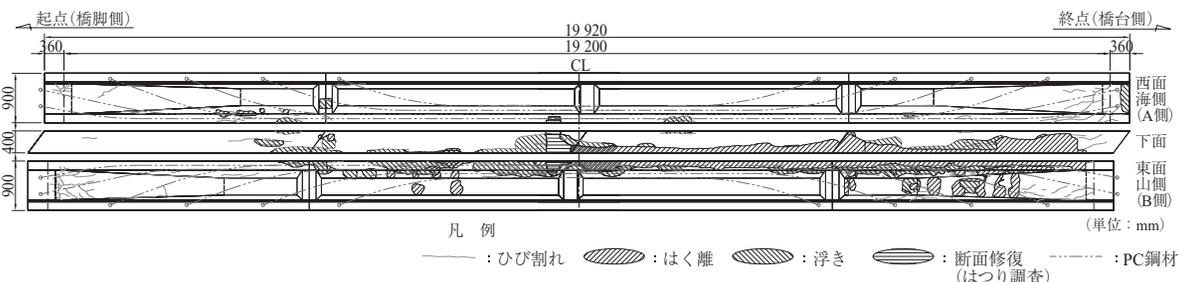


図 - 2 載荷試験前の損傷状況

表 - 3 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	
曲げ荷重試験	1 568	1 188	24 %	27 %
せん断荷重試験-1	958	906	5 %	0 %
せん断荷重試験-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

引張応力度相当 (1 260 N/mm<sup>2</sup>) として有効プレストレスを算出し、コンクリートの圧縮強度および引張強度は材料試験結果を用いた。また、表面損傷度は各荷重区間 (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・はく離のみ) 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 鋼材との付着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との関係にある程度相関が確認された。

### 3.3 最大荷重と計算値の比較

図 - 5 にせん断荷重試験の荷重 - 変位曲線を示す。せん断荷重試験-1 は、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、せん断荷重試験-2 への影響を勘案し、500 kN で除荷している。せん断荷重試験-2 は、曲げひび割れ発生荷重まではせん断荷重試験-1 とおおむね同様の挙動を示したが、それ以降はせん断荷重試験-1 より大きな変形を呈しながら、最大荷重 575 kN 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。

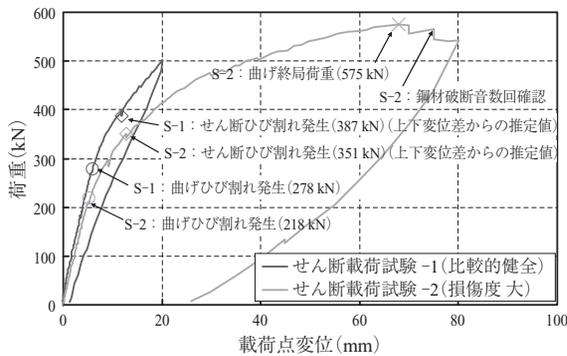


図 - 5 荷重 - 変位曲線 (せん断荷重試験)

せん断荷重試験-2 において確認された最大荷重について、計算した曲げ破壊耐力および斜引張破壊耐力から逆算した荷重値との比較を表 - 4 に示す。なお、曲げひび割れ発生荷重から推定したプレストレス減少率相当に鋼材の断面腐食が進行していたと仮定して算出した。曲げ破壊耐力算出に際しては、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 %<sup>3)</sup> とした。斜引張破壊耐力は、

表 - 4 最大荷重時における実験値と計算値の比較

	計算値 $P_{cal}$ (kN)		実験値 $P_{exp}$ (kN)	比率 ( $P_{exp}/P_{cal}$ )
	曲げ破壊	斜引張破壊		
せん断荷重試験-2	572	601	575	1.01 (0.96)

\* ( ) 内は斜引張破壊から逆算した荷重値との比率を示す。

せん断補強鉄筋を用いていない RC はりのせん断強度<sup>4)</sup>、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<sup>5)</sup>、プレストレスの鉛直分力および圧縮斜材角 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<sup>3)</sup> の和から算出した。実験値は鋼材断面減少を仮定した曲げ破壊耐力の計算値とほぼ一致していたが、今後解体調査により実際の断面減少率を確認する予定である。

## 4. PC 鋼材の付着特性に関する荷重試験

### 4.1 PC 鋼材の付着特性に関する荷重試験概要

曲げせん断耐荷特性に着目した荷重試験結果から、良好なグラウトにてコンクリートと PC 鋼材との付着が確保されていたれば、破断が確認された箇所からある程度距離が離れた箇所ではプレストレスが保持されることがわかった。この付着特性に着目して、前節のせん断荷重試験後に両端をワイヤソーにて PC 鋼材ごと切断し、荷重によるひび割れがほぼ生じていない支間中央部にて定着部がない状態で荷重試験を実施した。桁切断は図 - 6 に示す位置とし、すべての PC 鋼材の定着部が存在しない試験体とした。また、桁切断の前後にてプレストレス損失による挙動を計測するため、同図に示す位置にてコンクリート表面のひずみ計測を実施した。なお、試験装置の都合上、切断後から荷重試験実施まで 8 ヶ月程度期間を要したため、その間常時ひずみ計測を行なった。同図にて以降に示すひずみゲージ番号および PC 鋼材番号を示す。

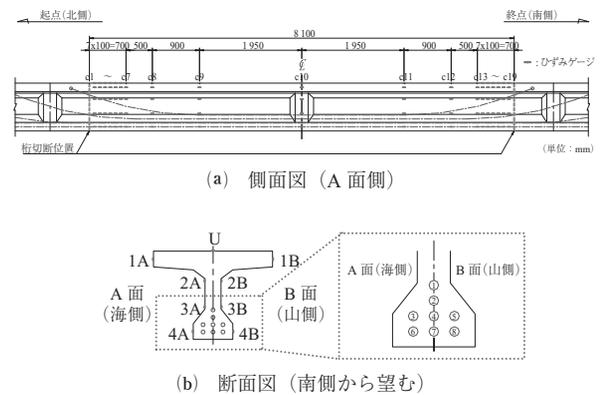


図 - 6 切断位置およびコンクリート表面ひずみ計測位置

荷重試験は図 - 7 に示すとおり、曲げひび割れを確認するためにできるだけ支点と荷重点の距離を確保し、支間中央の 1 点荷重とした。また、桁端部のプレストレス損失に対する配慮に加え、桁端部で破壊することを避けるため、定着長を十分に確保し、支点は切断位置から 1 m 程度とした。なお、PC 鋼材に引き込み量計測のための変位計を設

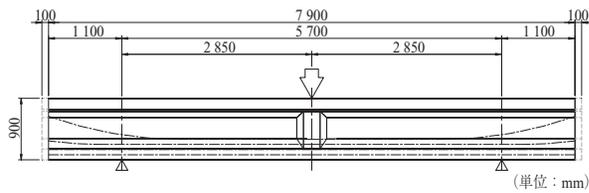


図 - 7 付着特性に関する載荷試験方法

置するため、端部を 10 cm 程度再度切断し整形している。

4.2 桁切断におけるコンクリートおよび PC 鋼材の挙動

切断直後における桁下縁のコンクリート表面ひずみの挙動を図 - 8 に示す。桁端部付近にて切断によってプレストレス損失によるコンクリート表面のひずみの挙動が確認された。プレテンション部材のプレストレス分布は、65 φ (φ : 鋼材の直径) の範囲にて部材端で 0 となる二次放物線と考えてよいことが道路橋示方書<sup>3)</sup>の解説に記されている。このことから、本試験体においてグラウトが確実に充填されていてプレテンション部材と同等と仮定すれば、プレストレス損失の範囲は素線径 5 mm で評価すると 325 mm、鋼材束 12 φ 5 mm の外接円 (約 20 mm) で評価すると 1.3 m 程度となる。本試験体は支間中央部付近ではひずみがほとんど変動しなかったものの、切断面から 2 m 程度の範囲で比較的大きなひずみの挙動が確認された。これは写真 - 2 に示すように PC 鋼材がばらけて外接円が大きくなっていることや部分的なグラウト充填不足、ワイヤソーによる切断時の振動による影響と考えられる。

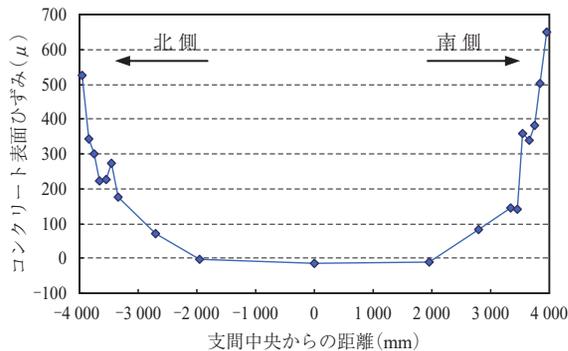


図 - 8 切断直後における桁下縁のコンクリート表面ひずみ

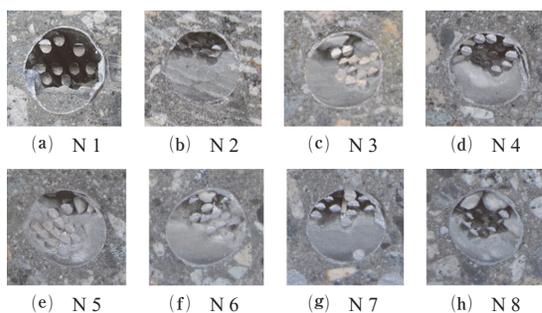
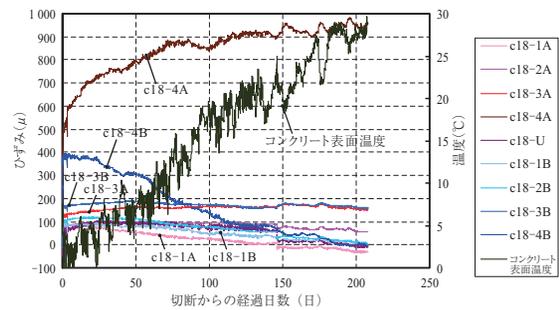


写真 - 2 切断直後における PC 鋼材の引き込み状況 (北側)

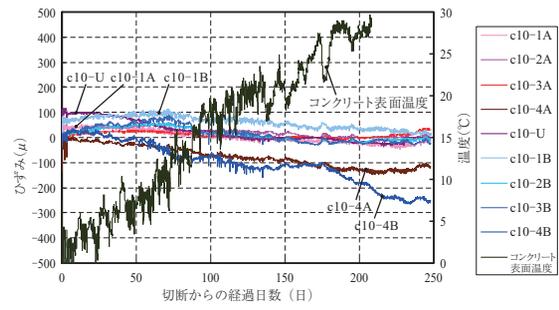
写真 - 2 は切断直後における北側の PC 鋼材の引き込み状況である。上縁定着付近の曲げ上げ部にて切断した N1

(図 - 6 の北側 (N) 切断面における鋼材 1) の断面におけるシース内はグラウトがほぼ充填されておらず、PC 鋼材の切断面が鋭角になっており、PC 鋼材が引き込まれつつ切断されたことが確認できる。その他の PC 鋼材は、シース上縁側にてやや空隙が確認できるが、充填状況はほぼ同程度であった。

切断後からのコンクリート表面ひずみの経時変化を図 - 9 に示す。桁端部付近のひずみ計測については、載荷試験準備の都合上、載荷試験 40 日前に計測を終了している。ひずみの経時変化は切断後も徐々に変化が確認された。北側端部の PC 鋼材の引き込み量計測の結果を図 - 10 に示す。上縁定着部付近で切断した PC 鋼材にて最大で 15 mm 程度の引き込みが確認された。なお、引き込み量には切断後から経時的に大きな変化は確認されなかったため、切断から 150 日にて計測を終了している。



(a) C18 計測位置 (南側切断位置から 20 cm の位置)



(b) 支間中央部

図 - 9 桁切断後のコンクリート表面ひずみの経時変化

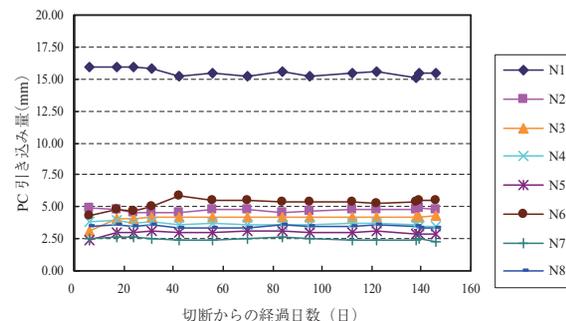


図 - 10 桁切断後における PC 鋼材の引き込み量 (北側)

4.3 PC 鋼材の付着に関する検討

付着特性に着目した載荷試験の荷重 - 変位曲線を図 - 11 に、載荷試験時に発生したひび割れ図を図 - 12 に

○ 研究報告 ○

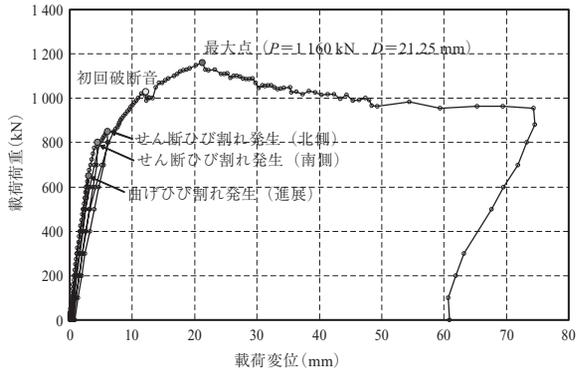


図 - 11 荷重 - 変位曲線 (付着特性に関する载荷試験)

示す。前節の支間中央部における载荷試験時にて発生していたひび割れから载荷荷重 650 kN にて曲げひび割れの進展が確認された。その後、载荷荷重 800 kN でせん断ひび割れが確認され、1160 kN で最大荷重が確認されたのち、荷重は徐々に低下したものの、脆性的な破壊には至らずある程度荷重を保持したまま変位が増加した。

PC 鋼材の付着切れを簡易的に計測するため、桁端部の PC 鋼材に変位計を設置し、载荷中の引き込み量を計測した結果を図 - 13 に示す。N1 および N3, S2, S5 を除き、最大荷重近くまではほぼ引き込み量に変化はなく、最大荷重計測後に荷重が徐々に低下していくとともに、引き込み量も増加していった。なお、引き込み計測にあたり接触式の変位計を設置する必要があったため、各シースにつき 1 本の素線を対象に引き込み計測を行ったが、別途デジタルカメラを用いた光学的全視野計測<sup>6)</sup>にて N3 および N4, N6, N7 を対象にシース内すべての鋼材にて引き込み計測を実施した。光学的全視野計測による計測状況を写真 - 3 に、本手法による N4 の計測結果を図 - 14 に示す。また、写真 - 4 に载荷試験前後の切断面の PC 鋼材の状況を示す。なお、载荷試験後の写真にてスプレーを施しているが、光学的全視野計測による計測精度を上げるための工夫である。図 - 14 や写真 - 4 からわかるように、同一シース内の PC 鋼材において引き込み量に差が確認されたものがあった。この要因の特定には至っていないが、解体調査にて各鋼材の位置や腐食破断状況、グラウト充填状況との相関

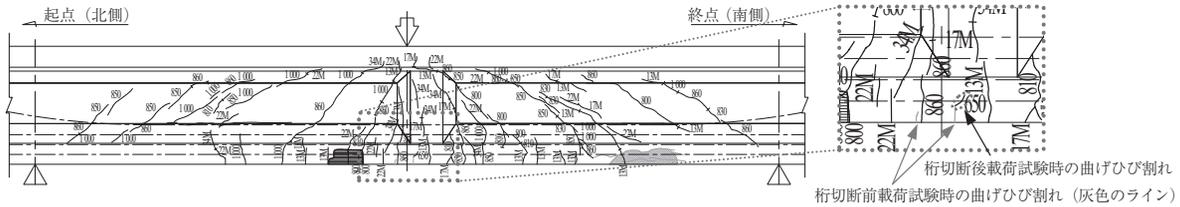
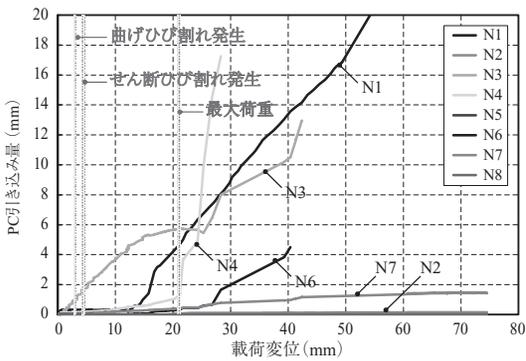
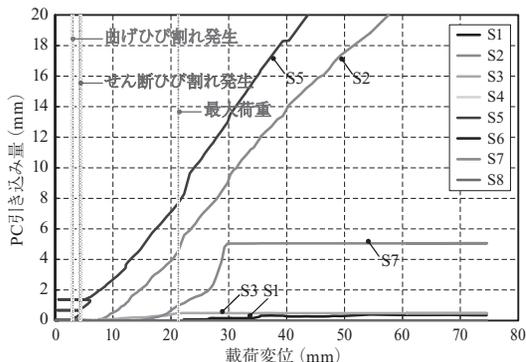


図 - 12 载荷試験中のひび割れ図 (A 面)



(a) 北側桁端部の PC 鋼材引き込み量



(b) 南側桁端部の PC 鋼材引き込み量

図 - 13 载荷時の引き込み量

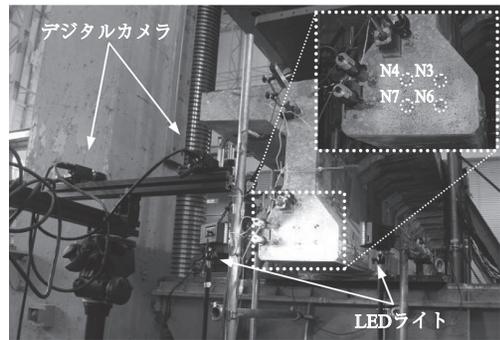


写真 - 3 光学的全視野計測による計測状況

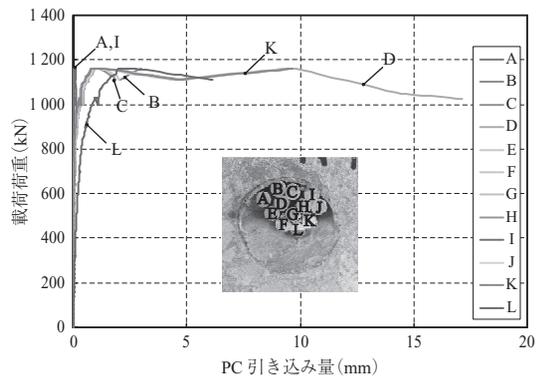


図 - 14 光学的全視野計測による载荷時の引き込み量 (N4)

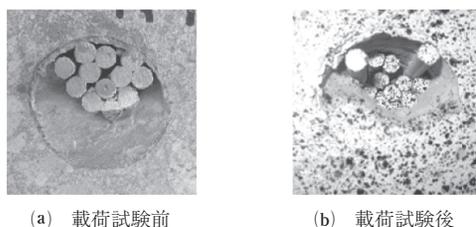


写真 - 4 載荷前後におけるPC鋼材の引き込み状況 (N4)

について今後確認する予定である。

各イベントにおける計算値と実験時の比較を表 - 5 に示す。表中の計算値は、鋼材腐食や桁切断によるプレストレスの減少がないと仮定した健全時の場合と前節同様に鋼材腐食による断面減少が24% (表 - 3) とした場合について示す。また、せん断ひび割れ発生荷重の計算値は、前述の斜引張破壊耐力の計算値におけるせん断補強鉄筋負担分以外の総和として算出した。なお、プレストレスによるせん断耐力増加分は、道路橋示方書や土木学会式では上限値を安全側に評価しコンクリート負担分相当 (1.0) としているが、既往の研究成果<sup>5)</sup> から上限値を1.5とした。

表 - 5 各イベントの実験値と計算値の比較

	計算値 $P_{cal}$ (kN)		実験値 $P_{exp}$ (kN)	比率 $(P_{exp}/P_{cal})$
	健全時	鋼材減少		
曲げひび割れ発生荷重	785	622	650	0.83 (1.05)
せん断ひび割れ発生荷重	812	762	800	0.98 (1.05)
最大荷重 (曲げ破壊)	1 733	1 360 (1 131)	1 160	0.67 (0.85) (1.03)

※( )内は鋼材断面減少を仮定した計算値との比率を示す。  
 ※( )内は実際に計測したPC鋼材の断面減少率を用いて付着切れしたPC鋼材から算出された曲げ破壊耐力を50%に低減した値  
 (PC 1~PC 4: 腐食無, PC 5: 0.9%, PC 6: 2.7%, PC 7: 7.4%, PC 8: 全素線破断)

曲げひび割れおよびせん断ひび割れ発生時における荷重は、前節の載荷試験にて確認されたプレストレス減少率を鋼材断面減少率と仮定した場合とおおむね一致した。曲げひび割れ発生荷重までは、N3を除きPC鋼材の引き込みが確認されていないことから、曲げひび割れ発生までは少なくともPC鋼材とコンクリートの付着が確保されていたことが窺える。一方、最大荷重は、鋼材断面減少を仮定した場合の8割程度となり、付着切れによりPC鋼材が引き込まれたためと考えられる。そこで、簡便かつ実用的な手法として、実際に計測したPC鋼材の断面減少率を用いて最大荷重に達する前に何れかの桁端部にて比較的大きな引き込みが確認されたPC鋼材4本 (N1, N3, S2, S5) から算出された曲げ破壊耐力を低減して曲げ耐力を算出した。その結果、PC鋼材の実断面減少率を用い、かつ上記鋼材から算出された曲げ破壊耐力を50%に低減することにより実験値を再現できた。なお、これは比較的グラウト充填状況が良好な桁を切断した試験体に対して、切断面から載荷点までの距離を4m程度として得られた実験結果である。したがって、実橋への適用に際しては、鋼材腐食や破断が確認された箇所と着目部位の位置関係やグラウト充

填状況も含めて検討する必要がある。

## 5. ま と め

撤去桁を用いた臨床研究として、載荷試験により残存耐荷力の把握をするとともに、主にPC鋼材の付着特性に着目した検討を行った。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 桁切断前の本試験体において、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) ワイヤソーにより切断した本試験体のプレストレス損失範囲は、切断面から2m程度であり、支間中央部におけるプレストレスの損失は確認されなかった。
- 3) 定着を切断した載荷試験の破壊形態は、脆性的な破壊に至らずある程度荷重を保持したまま変位が増加した。
- 4) 曲げひび割れ発生荷重までは、一部のPC鋼材を除き、付着切れに起因するPC鋼材の引き込みは確認されず、付着によりプレストレスが保持されていた。
- 5) 付着に着目した載荷試験における曲げひび割れ発生荷重およびせん断ひび割れ発生荷重は、切断前の載荷試験にて確認された曲げひび割れ発生荷重から推定したプレストレス減少率を鋼材腐食による断面減少率と仮定した場合の計算値とおおむね一致したが、最大荷重は計算値の8割程度となった。
- 6) 付着に着目した載荷試験の最大荷重は、PC鋼材の実断面減少率を用いて引き込みが確認されたPC鋼材から算出された曲げ破壊耐力を50%に低減することで再現することができた。

## 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、長崎大学および佐賀大学のほか計測にご協力いただいた皆様に対し、ここに心より感謝の意を表す。

## 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) 松沢政和、木村嘉富、花井 拓：塩害を受けたポストテンションPCT桁の曲げせん断耐荷性状に関する載荷試験、土木学会第67回年次学術講演会、V-262, pp.523-524, 2012
- 3) 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
- 4) 二羽淳一郎、山田一宇、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
- 5) 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
- 6) 出水 享、松田 浩、伊藤幸広、木村嘉富：デジタル画像相関法を用いた撤去PCT桁橋の載荷試験時における変位、ひずみ、ひび割れ計測、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012

[2013年2月25日受付]