

論文 鋼材腐食させた PC はりのプレストレスおよびせん断耐荷特性に関する実験的検討

橋野 哲郎*1・田邊 睦*2・柘植 啓亮*3・山本 貴士*4

要旨: 桁端部におけるグラウト充填不良部を再現したポストテンション方式 PC はり部材について、電食によって PC 鋼材およびシースを腐食させた後に静的載荷試験を実施した。その結果、グラウト充填の境界部付近において PC 鋼材が著しく腐食すること、腐食によるプレストレス減少は PC 鋼材自体の断面減少に加えてコンクリートの腐食ひび割れの影響を受けることが示された。また、計算上、せん断破壊となるように設計したグラウト充填不良供試体について、PC 鋼材が腐食していない場合、載荷試験の結果は曲げ破壊となったが、PC 鋼材が腐食している場合、せん断破壊となることがわかった。

キーワード: ポストテンション方式 PC はり, グラウト充填不良, 鋼材腐食, プレストレス, せん断

1. はじめに

プレストレスコンクリート（以下、PC）橋は、緻密な高強度コンクリートを使用し、プレストレスの導入によってひび割れが制御されているため、外部からの劣化因子の侵入に対して高い抵抗性を有している。また、ひび割れが発生しない条件下では、荷重によるひずみ変動が小さく疲労耐久性にも優れた構造であり、長期にわたる使用においても健全なものが多い。一方で、過去に建設されたポストテンション（以下、ポステン）PC 橋の一部では、グラウト材料の品質や施工技術が不十分であったことからシーす内にグラウトが完全に充填されておらず、凍結防止剤を含む水の浸入によって PC 鋼材に腐食や破断が生じることが報告されている²⁾。

グラウト充填不良部において PC 鋼材およびシーすが腐食した場合、PC 鋼材自体の腐食による断面減少とともにコンクリートに腐食ひび割れが発生する。既設ポステン PC 桁において、これらの変状は桁端部の PC 鋼材曲げ上げ部において多く生じているが、桁端部はせん断力の影響が大きく、プレストレスが部材のせん断耐力に寄

与している。グラウト充填不良を模擬したポステン部材の PC 鋼材やシーすを腐食させ、コンクリートのひび割れや耐荷性能に与える影響について検討された研究は多数報告されているが³⁾、これらの事例はケーブルが直線配置された場合が多く、グラウト充填不良が生じやすい桁端部での検討が十分なされているとは言い難い。

本研究では、桁端部におけるグラウト充填不良部を再現したポステン PC はり部材の PC 鋼材およびシーすを電食により腐食させ、PC 鋼材の腐食や腐食ひび割れが進展する過程とプレストレスの関係について検討するとともに、静的載荷試験により、せん断耐荷性能を確認した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験に使用した供試体の概要を図-1 に示す。供試体は、全長 2200mm、断面 220mm×300mm のポステン PC はり部材とした。並列配置した 2 本のシーす（鋼製、内径φ28mm、外径φ32mm）内に、7本より PC 鋼線（φ15.2mm）を配置し、片側を曲げ上げ定着した。シーすのかぶりや

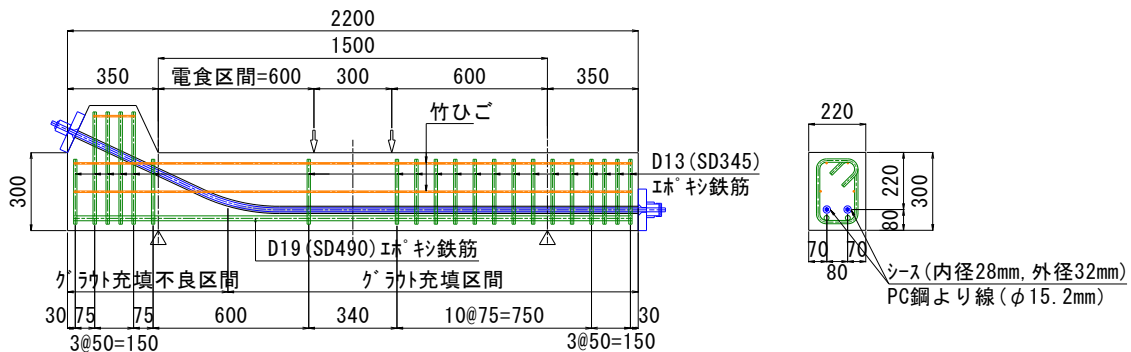


図-1 供試体概要 (単位: mm)

*1 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木技術部 (正会員)
 *2 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木技術部 修士(工学) (正会員)
 *3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻
 *4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

シーす間の離れ、PC 鋼材の曲げ上げ角度は、1960 年代から 1970 年代に建設された T 桁橋を参考に決定し、PC 鋼材 1 本あたりの目標導入緊張力は、引張強度の約 50% にあたる 128kN とした。

PC 鋼材曲げ上げ側のせん断スパン内にはせん断補強筋を配置せず、反対側のせん断スパン内には、D13 (SD345 エポキシ樹脂塗装鉄筋) の矩形スターラップを 75mm 間隔で配置した。軸方向鉄筋には、D19 (SD490 エポキシ樹脂塗装鉄筋) を 2 本配置した。また、これらを組み立てるために竹ひごを用いた。本研究では、後述するように電食によって腐食促進試験を実施したが、PC 鋼材およびシーすの腐食がプレストレスや部材の耐荷特性に与える影響を把握することが目的であることから、他の材料の腐食の影響を極力省くために、これらの材料には防錆塗装が施されたものや非鉄性の材料を用いた。

コンクリートおよびグラウトの配合をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。コンクリートには電食を効率的に進めるために 10kg/m³ の NaCl を混入した。グラウトは超低粘性型のプレミックス材を用いた。

表-1 コンクリート配合

W/C	単位量(kg/m ³)					
(%)	W	C	S	G	Ad	NaCl
41.0	174	424	732	931	10.61	10

表-2 グラウト配合

W/P	単位量(kg/m ³)	
(%)	W	P
33.75	501	1486

表-3 実験要因

供試体	グラウト	PC 鋼材およびシーす腐食
No.1	充填	無
No.2	充填不良	無
No.3	充填不良	有(目標質量減少率 10%)

2.2 実験要因

実験要因を表-3 に示す。実験要因は、グラウトの充填状況および PC 鋼材とシーすの腐食とした。部材全長にわたりグラウトを完全に充填し PC 鋼材およびシーすを腐食させない健全供試体 (以下、供試体 No.1) を 1 体、PC 鋼材曲げ上げ部にグラウトを充填せず PC 鋼材およびシーすを腐食させない供試体 (以下、供試体 No.2) を 1 体、PC 鋼材曲げ上げ部にグラウトを充填せず PC 鋼材およびシーすを腐食させる供試体 (以下、供試体 No.3) を 1 体、合計 3 体の供試体を製作した。

2.3 実験方法

曲げ上げ部でのグラウト充填不良を起因とした PC 鋼材およびシーすの腐食を再現するために、供試体 No.3 は電食による腐食促進試験を行った。電食は、自然環境下で生じる腐食と、腐食生成物、腐食の形態あるいはコンクリートに発生するひび割れなどの観点で相違する点が多いが、PC 鋼材およびシーす腐食による断面減少やコンクリート表面に発生するひび割れがプレストレスや部材の耐荷性能に与える影響を把握することが本実験の主目的であるため、腐食箇所や期間の制御が可能な電食を採用し、目標質量減少率は 10% とした。

電食回路図を図-2 に示す。電食範囲は PC 鋼材曲げ上げ部側のせん断スパン 600mm とした。電食範囲には 3%NaCl 水溶液を含んだ脱脂綿を挟んで銅板を設置した。2 本の PC 鋼材それぞれに電源を接続し、PC 鋼材を陽極、銅板を陰極とする回路を形成して直流電流を通电した。PC 鋼材 1 本当たりの電流量は、既往の研究⁴⁾により得られた積算電流量と腐食量の関係式を参考に、約 25 日間の通電で目標質量減少量に到達する 0.2 (A) とした。また、電食中はグラウト充填不良部に 3%NaCl 溶液を充填することで通電効率を高めた。なお、供試体 No.2 は電食を行わないが、クリープや乾燥収縮による影響を揃えるために、水を含んだ脱脂綿を挟んだ銅板の設置やグラウト充填不良部への水の充填など、供試体 No.3 と同じ湿潤条件にて保管した。

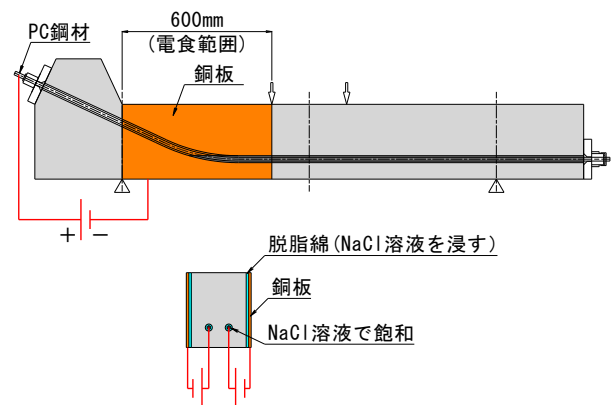


図-2 電食回路図

腐食促進試験後に荷重試験を行った。荷重試験はスパン 1500mm に対して、曲げスパン 300mm、せん断スパン 600mm の対象 2 点集中荷重単調荷重とした。支間中央部における PC 鋼材の有効高さ 220mm と、せん断スパンの比は 2.73 である。本研究は、せん断耐荷特性に着目した実験であるため、せん断スパン比が概ね 2.5 以下のディープビーム構造では、ストラットタイが形成されることによってコンクリートのせん断耐力が増加すること、また、せん断スパン比が概ね 5.5 以上では曲げ破壊形態

となることを考慮したものである。

載荷試験の終了後、供試体を部材軸方向に約 200mm ごとに切断して PC 鋼材を取り出し、JCI-SC1 法に基づいて濃度 10% のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬し、ブラシ処理により腐食生成物を除去した後に、質量測定と腐食状況を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 腐食促進試験

供試体 No.3 における腐食促進試験期間中の腐食ひび割れ進展状況を図-3 に示す。通電開始 2 日後にグラウト充填の境界部よりひび割れが発生した後、通電開始 3 日後には電食範囲の全域にシースに沿って進展した。その後は主に充填部である中央側にひび割れが進展し、充填不良部である曲げ上げ定着側への進展は顕著でなかった。供試体中央側では、グラウトが充填されているため、空隙がある場合よりも腐食膨張圧がコンクリートに伝達しやすかったと考えられる⁵⁾。

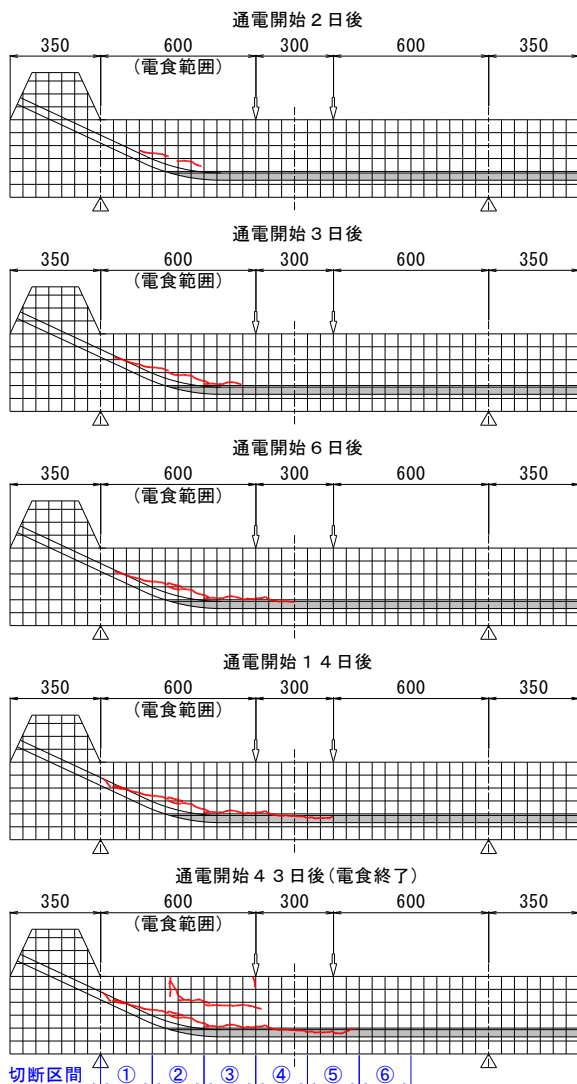


図-3 電食によるひび割れ進展図

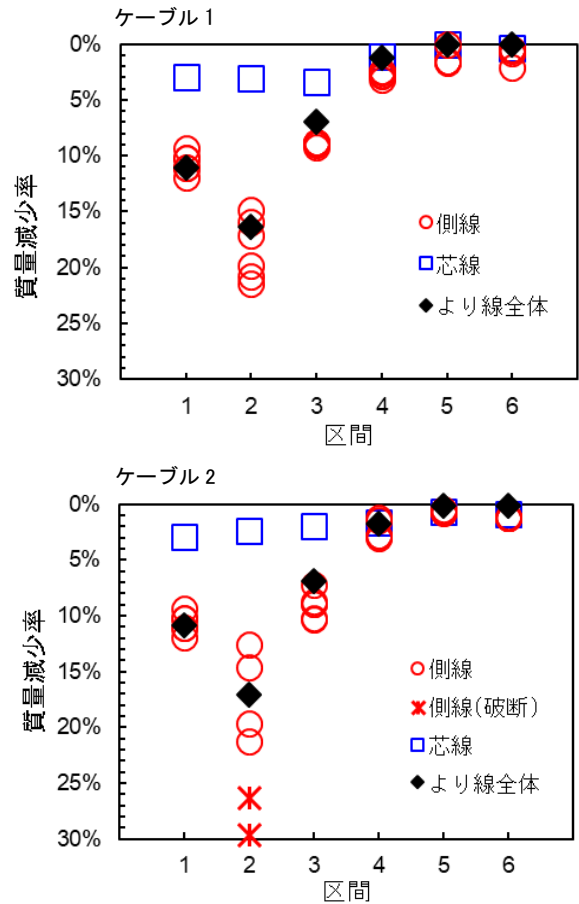


図-4 PC 鋼材の質量減少率

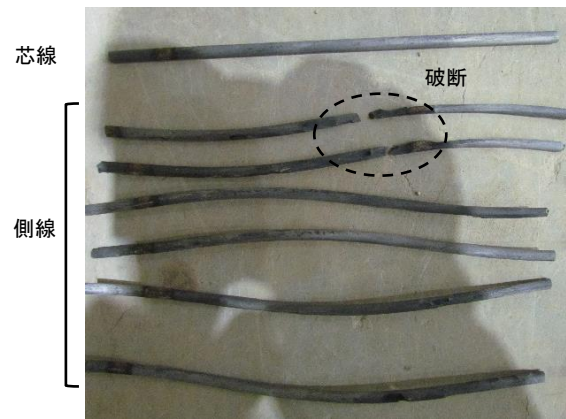


写真-1 PC 鋼材の状況 (ケーブル 2 区間②)

供試体 No.3 の 2 本の PC 鋼より線 (ケーブル 1 およびケーブル 2) について、図-3 に併記した切断区間毎の PC 鋼材質量減少率を図-4 に示す。質量減少率は供試体から取り出して除錆した PC 鋼より線の質量と健全な PC 鋼より線の質量の比であり、切断した長さ約 200mm の区間の平均値である。7 本より線全体の質量減少率のほか、素線 1 本ごとの質量減少率も算出した。なお、ケーブル 2 は区間 2 において、腐食促進試験時に 1 本、載荷試験時に 1 本の素線が破断した。

図-4 より、区間毎の PC 鋼より線全体の質量減少率

について、電食範囲である区間①～③を比較すると、グラウト充填部と充填不良部の境界部となる区間②が最も大きく、次いで充填不良部の区間①、充填部の区間③の順であった。電食範囲外である区間④～⑥では、電食範囲と隣り合う区間④において若干の減少が確認されたが、区間⑤および区間⑥は、ほとんど減少していなかった。区間①～③について、7本のうち中央の1本の素線（以下、芯線）は2%～3%程度の減少率であり区間毎の差も小さいが、表面の6本の素線（以下、側線）は、芯線に対して減少率が大きく、さらに、側線ごとのバラツキが大きいことがわかる。特に区間②でその影響が顕著である。腐食促進試験および荷重試験で側線の破断が確認されたケーブル2の区間②を拡大したものを写真-1に示す。腐食は区間内で一様に生じておらず、局所的にPC鋼材が減肉していることがわかる。また、破断した側線の破断位置を計測したところ、グラウト充填部と充填不良部の境界面と一致した。電気抵抗が大きく変化するグラウト充填部と充填不良部の境界面付近の局所的な範囲において、著しく腐食が進行する可能性が高いと考えられる。

本研究では、PC鋼材曲げ上部側端部にロードセルを設置し（写真-2）、電食中の緊張力を常時計測した。図-5に供試体 No.2 および供試体 No.3 の腐食促進試験中のPC鋼材端部緊張力の推移を示す。供試体 No.3 では、通電開始2日後にひび割れが発生した。その後、端部の緊張力低下が腐食量と同じになると考えた場合に対して、当初に計画した電流量では端部緊張力の減少が想定通りに進捗していなかったため、通電開始18日後に電流量を0.2(A)から0.4(A)に調整した。通電開始45日後に供試体 No.3 のケーブル2において側線1本が破断し、これにより、2本のPC鋼より線の平均の端部緊張力の減少率が15%程度に達したため同日に電食を終了した。

図-5より、電食を行わないものの供試体 No.3 と同じ湿潤条件とした供試体 No.2 では、養生期間を通じて緊張力の減少が確認されなかった。側面に設置した脱脂綿やグラウト充填不良部への給水により、期間中にクリープ・乾燥収縮による緊張力の減少が生じなかったと考えられる。供試体 No.3 では、通電開始より緊張力が減少し、ケーブル2の側線破断直前までの端部緊張力の減少率は、ケーブル1で7.8%、ケーブル2で6.4%、平均で7.1%であった。同じ給水条件の供試体 No.2 でクリープ・乾燥収縮による緊張力の減少が生じていないと考えることができることから、供試体 No.3 に生じた緊張力の減少は、PC鋼材の腐食による断面積の減少や、ひび割れの発生による躯体コンクリートの剛性低下が要因であると言える。

供試体 No.3 の端部緊張力の変化率と積算電流量の関係を図-6に示す。端部緊張力の減少挙動は、積算電流

量に対して直線的ではなく、電食開始初期に生じた減少が、積算電流量=20(A・h)頃を境に緩やかとなり、再び積算電流量=200(A・h)頃より急になっていることがわかる。図-7は、電食中に生じたひび割れについて、ひび割れ延長と積算電流量の関係を示したものである。図-6と同様に電食開始初期に生じた減少が、積算電流量=20(A・h)頃および220(A・h)頃に変化を示している傾向にある。このことより、供試体 No.3 における端部緊張力の減少挙動は躯体コンクリートのひび割れ進展挙動と関係が深いことがわかる。



写真-2 端部緊張力の計測状況

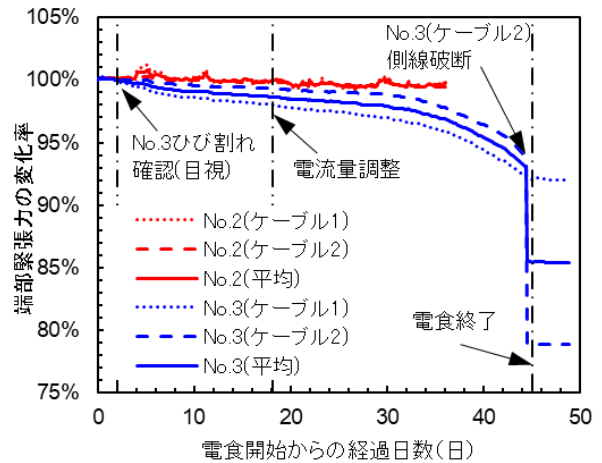


図-5 腐食促進試験中の端部緊張力の推移

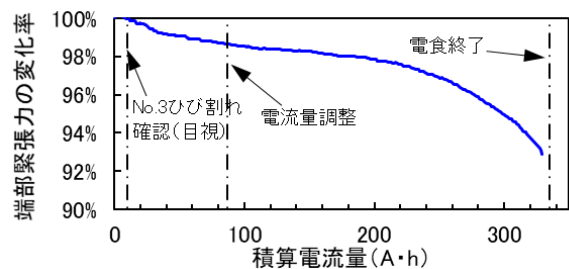


図-6 端部緊張力と積算電流量の関係

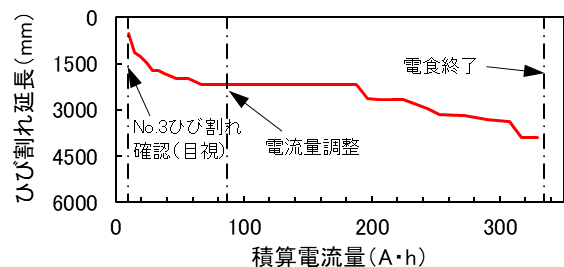


図-7 ひび割れ延長と積算電流量の関係

3.2 荷重試験

荷重試験にあたり、PC 鋼材の実緊張力およびコンクリートの実圧縮強度 (No.1=47.4N/mm², No.2=43.6N/mm², No.3=43.6N/mm²) を考慮して各供試体の耐力計算を行った。表-4 に曲げ耐力およびせん断耐力の計算値を示す。せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に基づく式により算出した。PC 鋼材曲げ上げ側のせん断耐力は、図-8 に示すように、荷重点と支点を結ぶ面を仮想せん断破壊面と想定し、この破壊面と PC 鋼材の交差する断面での条件を元に算出した値である。なお、曲げ耐力は支間中央部の値を示す。PC 鋼材水平配置側のせん断耐力と曲げ耐力の比は 2 程度、PC 鋼材曲げ上げ側のせん断耐力と曲げ耐力の比は 0.7~0.8 程度であり、全ての供試体において計算上、PC 鋼材曲げ上げ側でのせん断破壊型を想定した。

表-4 各供試体の耐力計算値

供試体	P_M^{*1} (kN)	P_{V1}^{*2} (kN)	P_{V2}^{*3} (kN)	P_{V1}/P_M	P_{V2}/P_M
No.1	457.6	368.5	903.1	0.805	1.974
No.2	446.7	356.4	898.2	0.798	2.011
No.3	441.1	324.6	890.1	0.736	2.018

※1 曲げ耐力 (支間中央部)

※2 せん断耐力 (PC 鋼材曲げ上げ側)

※3 せん断耐力 (PC 鋼材水平配置側)

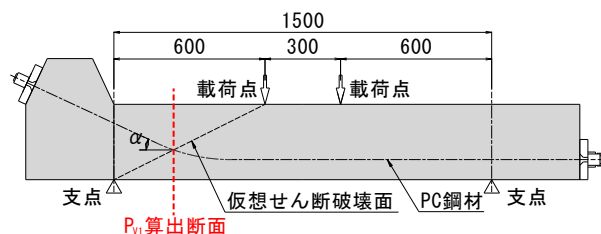


図-8 せん断耐力 (PC 鋼材曲げ上げ側) 算出断面

図-9 に荷重試験の荷重変位関係を、図-10 にひび割れ状況および破壊状況を示す。供試体 No.1 および供試体 No.2 について、最終的な破壊形態は支間中央上縁コンクリートの圧壊による曲げ破壊となった。供試体 No.3 については、荷重 426.9kN にて側線 1 本が破断すると同時に、PC 鋼材曲げ上げ側に生じていた斜めひび割れが破壊面となることでせん断破壊に至った。PC 鋼材曲げ上げ側にはせん断補強筋を配置していないため、コンクリートの負担とプレストレスの鉛直方向成分によってせん断力に抵抗しているが、このうち、荷重による張力増加に伴う側線の破断によってプレストレスの鉛直方向成分が急激に低下した影響が大きいと推察される。供試体 No.1 と供試体 No.2 の荷重初期の剛性を比較した場合に明確な差は無いが、供試体 No.3 は他の 2 体と比較して、荷重初

期の剛性が小さい。これは、腐食によって生じたひび割れの影響によって躯体コンクリートの剛性が低下していたためであると考えられる。

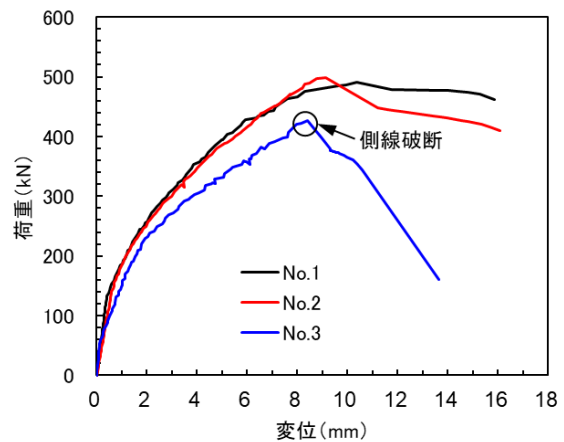


図-9 荷重変位関係

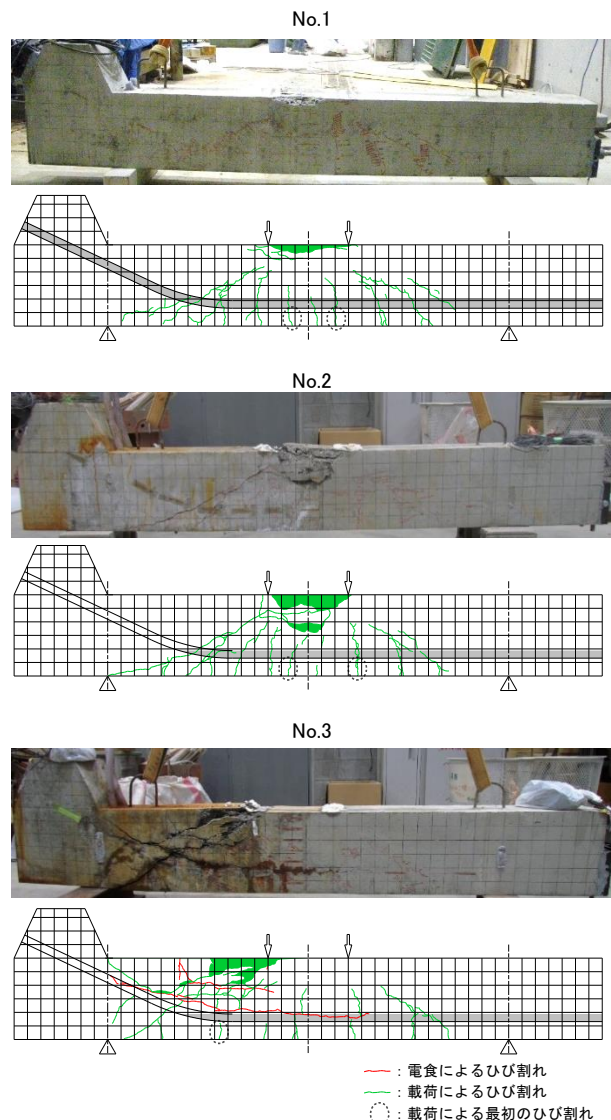


図-10 ひび割れ状況および破壊状況

供試体 No.1 および供試体 No.2 では、供試体中央の荷重初期の剛性を比較した場合に明確な差は無いが、供試体 No.3 は他の 2 体と比較して、荷重初

び 140kN 時に最初の曲げひび割れが発生し、250kN 頃より曲げひび割れの先端が荷重点に向かって斜め方向に傾きはじめた。これに対して供試体 No.3 では、40kN 時に最初の曲げひび割れが荷重点より外側の PC 鋼材曲げ上げ部付近の下縁より発生した。その後、供試体 No.1 および供試体 No.2 と同様に 250kN 頃に斜めひび割れが確認されたが、曲げひび割れ先端が傾斜するものではなく、腐食ひび割れ部より発生した。また、曲げひび割れについても腐食ひび割れの上下で連続せずに進展した。要因として、PC 鋼材の腐食による緊張力の減少や腐食ひび割れの発生に起因する鉄筋やシースの付着切れによって部分的にプレストレスが減少したこと、腐食ひび割れの影響で荷重に対する断面の一体性が損なわれたことなどが考えられる。

全供試体において、250kN 以降は PC 鋼材曲げ上げ側で斜めひび割れが進展した。図-11 は、各供試体の PC 鋼材曲げ上げ側において支配的となった斜めひび割れについて、ひび割れ幅の推移を示したものである。最終的にせん断破壊となった供試体 No.3 の進展が著しいことから、図-9 の荷重変位関係に示す 250kN 以降の、他の 2 体よりも顕著な剛性低下は、斜めひび割れ部での変形が大きかったことに起因していると考えられる。共に曲げ破壊となった供試体 No.1 と供試体 No.2 を比較した場合には、供試体 No.2 のひび割れ幅が大きいことがわかる。供試体 No.2 は電食によって PC 鋼材腐食や腐食ひび割れを生じさせていないものの、曲げ上げ部より上方のグラウトが充填されていないため、斜めひび割れ面を横切る PC 鋼材がコンクリートと付着していないことが影響したものと考えられる。

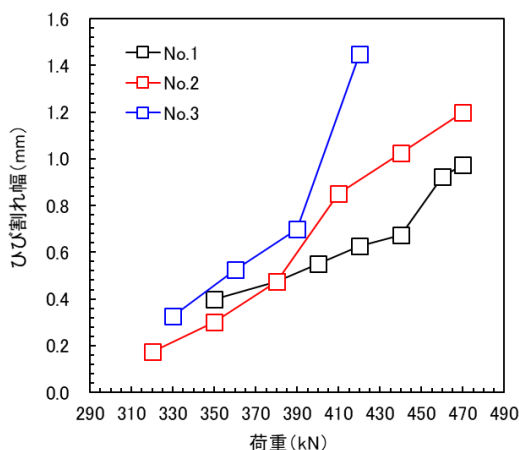


図-11 斜めひび割れ幅の推移

4. まとめ

本研究では、グラウト充填不良部を有するポストテン PC はり部材を製作し、PC 鋼材の腐食や腐食ひび割れの進展とプレストレスの関係およびせん断耐荷性能を確認した。本研究の範囲内で得られた知見をまとめる。

- (1) 電食によるひび割れはグラウト充填の境界部付近より発生し、充填部側に進展する傾向にある。また、腐食による PC 鋼材の質量減少もグラウト充填の境界部付近が最も大きく、芯線よりも側線の減少が大きい。さらに、側線ごとのバラツキも大きく、局所的な減肉を生じる。
- (2) 腐食による PC 鋼材自体の断面減少とともに腐食ひび割れの発生による躯体コンクリートの剛性低下によって緊張力が減少し、積算電流量に対して直線的とならない緊張力の減少挙動は、腐食ひび割れを延長で評価した場合の進展挙動と関係が深い。
- (3) 計算上のせん断耐力と曲げ耐力の比が 0.7~0.8 程度でグラウト充填不良部を有していても、PC 鋼材が健全であれば曲げ破壊となる。一方で、PC 鋼材が腐食している場合には、荷重による張力増加によって素線が破断することでプレストレスの鉛直方向成分が低下し、せん断破壊する可能性が示された。
- (4) グラウトが充填され PC 鋼材が健全な供試体とグラウト充填不良部を有するが PC 鋼材が健全な供試体は、共に曲げ破壊となったが、荷重荷重によって生じる斜めひび割れ幅は後者の方が大きくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 例えば原幹夫, 濱岡弘二, 天谷公彦: 建設から 60 余年が経過したポストテンション方式 PC 橋の健全度調査, 第 24 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.463-468, 2015
- 2) 例えば小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介: 妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎, Vol.45, No.9, pp.32-38, 2011
- 3) 例えば横田敏広, Isuru WIJAYAWARDANE, 睦好宏史: 腐食した PC 鋼材を有する PC 梁の耐荷力特性と解析的性能評価手法の検討, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.218-233, 2018
- 4) 奥野喜久, 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章: アンボンド PC 梁の曲げ耐荷性能に与える PC 鋼材腐食の影響, 第 20 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.33-38, 2011
- 5) 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章, 鈴木裕典: 鋼製シースの腐食による PC のひび割れ発生性状に関する一考察, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.4, pp.348-362, 2017
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善出版, pp.430-432, 2017