

# 論文 腐食ひび割れが生じたポストテンション方式 PC はりの曲げ耐荷性能

近藤 拓也\*1・山本 貴士\*2・高谷 哲\*3・宮川 豊章\*4

**要旨:** コンクリート中に塩分を混入し、10年間存置した結果腐食ひび割れが発生しているポストテンション方式 PC はり供試体の曲げ載荷試験を実施し、塩分を混入していない供試体との曲げ耐荷性能の比較を行った。最大荷重や最大荷重時変位には明確な相違は認められなかったものの、最大荷重を示した後、軸方向に腐食ひび割れの生じている供試体は、腐食ひび割れ幅の開口変位および残留変位が大きくなる傾向となり、軸方向ひび割れを挟んで重ねはりのような挙動を示すことが分かった。

**キーワード:** ポストテンション方式 PC はり, シース腐食, 腐食ひび割れ, 残留変位, エネルギー

## 1. はじめに

プレストレストコンクリートは、圧縮強度が大きいコンクリートが使用されるため、耐久性に富んだ構造物となる。しかし近年、塩害環境に架設された PC 構造物について、腐食が原因で発生したと考えられるひび割れが発生する現象が認められている<sup>1)</sup>。

特に長大橋梁を中心として使用されるポストテンション方式 PC はり部材については、コンクリートの中性化や塩害が原因で発生する腐食ひび割れについて、鋼製シースの寄与が大きいことを筆者らは指摘している<sup>2)</sup>。これは、シース内部の PC 鋼材の腐食とは無関係にコンクリートにひび割れが発生している可能性を示すものである。PC 鋼材が腐食したポストテンション方式 PC はり部材の曲げ耐荷性能については研究事例が多く存在する<sup>3)</sup>ものの、シース腐食が原因でひび割れが生じた PC はり部材の曲げ耐荷性能についての研究事例は皆無に近い。このような腐食ひび割れが発生した PC はり部材は適切な処置を行う必要があり、鋼製シースの腐食を原因とするひび割れ発生時の曲げ耐荷性能を明らかにすることが、措置後の PC 桁の曲げ耐荷性能を把握する上で非常に重要である。

そのため、本論文では約 10 年間存置した後、鋼製シースに沿ってひび割れが発生した梁供試体を用いて曲げ載荷試験を実施し、ひび割れが生じていない供試体と比較し得られた知見について述べる。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験要因

本試験における試験要因を表-1 に示す。シース内のグラウト充填状況は、等曲げ区間内のグラウト充填有無

表-1 試験パラメータ

供試体名	PC 鋼材	初期鋼材質量減少率 (%)	等曲げ区間グラウト	載荷材齢
B0-1-0	鋼棒	0%	充填	0年
B0-1-10	鋼棒	0%	充填	10年
B1-1-0	鋼棒	1%	充填	0年
B1-1-10	鋼棒	1%	充填	10年
B1-2-0	鋼棒	1%	空隙	0年
B1-2-10	鋼棒	1%	空隙	10年
W0-1-0	鋼より線	0%	充填	0年
W0-1-10	鋼より線	0%	充填	10年
W1-1-0	鋼より線	1%	充填	0年
W1-1-10	鋼より線	1%	充填	10年
W1-2-10	鋼より線	1%	空隙	10年

表-2 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント
グラウト	早強ポルトランドセメント + ナフタリンスルホン酸系化合物を主成分とした混和剤
PC 鋼棒	B 種 1 号 SBPR13mm 930/1080
PC 鋼より線	SWPR7BN 7 本より 12.7mm
シース	鋼スパイラルシース φ 20mm

をパラメータとし、せん断スパンについては、グラウトを完全に充填した。また、等曲げ区間内の PC 鋼材腐食が曲げ耐荷性能に与える影響を検討するため、事前に等曲げ区間内の PC 鋼材をそれぞれ塩水噴霧により腐食さ

\*1 西日本旅客鉄道 (株) 鉄道本部施設部土木技術課 修士 (工学) (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士 (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助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工学博士 (正会員)

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (cc/m <sup>3</sup> )
		W	C	S	G	
44	45	180	409	761	969	1023

表-4 グラウト配合

C(kg/m <sup>3</sup> )	W(kg/m <sup>3</sup> )	混和剤(g/m <sup>3</sup> )
10	3.5	150

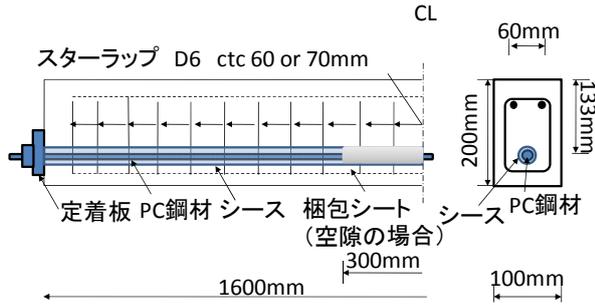


図-1 供試体概要図

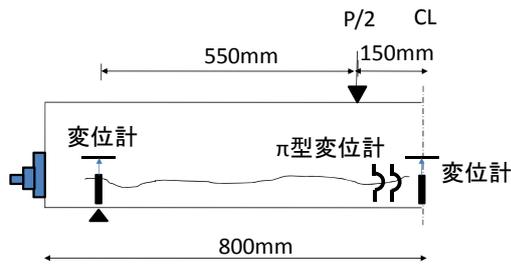


図-2 载荷概要

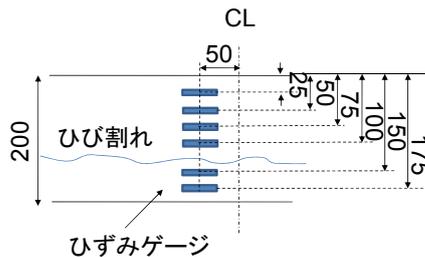
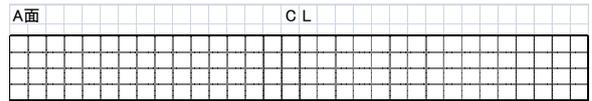


図-3 等曲げ区間内ひずみ分布測定概要  
(図中単位は mm)

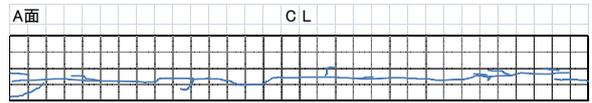
せた。载荷時期については、打設後 30 日程度と 10 年の 2 種類とし、腐食による PC 梁の曲げ耐荷性状の影響を確認した。

## 2.2 供試体概要

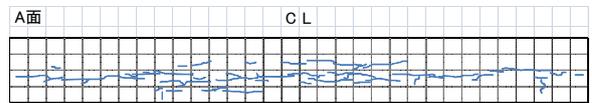
本供試体の使用材料を表-2、コンクリートの示方配合を表-3、グラウト配合を表-4 に示す。なお、内的塩害を模擬するため、B1 および W1 シリーズ供試体には NaCl を細骨材重量の 5% 程度混入し、細骨材の一部として配合した。



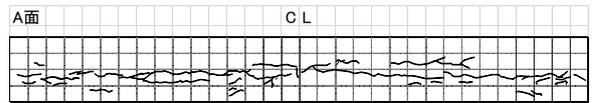
(a) B0-1-10, W0-1-10



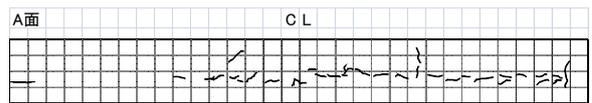
(b) B1-1-10 (NaCl 混入)



(c) B1-2-10 (NaCl 混入)



(d) W1-1-10 (NaCl 混入)



(e) W1-2-10 (NaCl 混入)

図-4 10 年後供試体側面の外観状況例

供試体形状は図-1 に示すように、100×200×1600mm の矩形断面供試体とし、曲げ破壊が先行するようにスターラップ (SD295A D6 を使用) を PC 鋼棒使用供試体では 70mm 間隔, PC 鋼より線では 60mm 間隔で配置した。プレストレスは、コンクリートが目標圧縮強度である 50N/mm<sup>2</sup> に到達したことを確認し、PC 鋼材の引張強度の 70% を目標として導入した。

等曲げ区間にグラウト空隙を有する供試体は、PC 鋼材の周辺部にポリエチレン製梱包シートを巻くことにより空隙部を模擬した。



(a) W1-1-10 (b) W0-1-10  
図-5 解体後のコンクリート内部状況の例



図-6 コンクリート断面状況の例

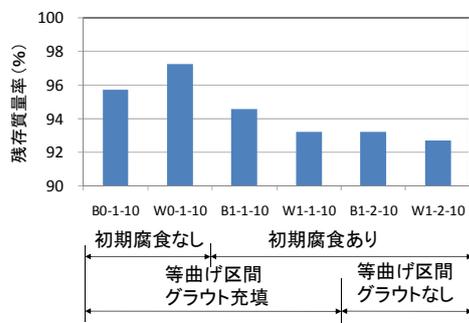


図-7 10年後のPC鋼材の残存質量率

表-5 10年後のPC鋼材の直径

	標準径/外径 (mm)	平均径 (mm)
B0-1-10	13.0	12.71
B1-1-10		12.66
B1-2-10		12.54
W0-1-10	12.7	12.51
W1-1-10		12.45
W1-2-10		12.41

## 2.3 測定概要

### (1) 曲げ載荷試験時

曲げ載荷概要図を図-2に示す。スパン1400mmに対して、曲げスパン300mm、せん断スパン550mmの対称2点一方向繰返し載荷を行った。最大荷重Pm到達までは5kN毎の繰返し載荷、最大荷重到達以降は、荷重が0.8Pmに到達するまで適宜、載除荷を行った。

支間中央および両支点には変位計(中央:容量100mm, 支点:容量50mm)を設置した。ひび割れ発生荷重を特定するために、等曲げ区間底面にひずみゲージ(60mm)を50mm間隔で千鳥状に貼り付けた。等曲げ区間内における高さ方向の発生ひずみを測定するため、図-3に示

すように支間中央から50mm離れた位置で、高さ方向25mm間隔にひずみゲージ(60mm)を貼り付けた。また、供試体側面に50mm×50mm間隔でメッシュを描き、最大荷重に達するまでひび割れ観察を行った。

### (2) 曲げ載荷試験終了後

曲げ試験終了後、供試体を解体しシースおよびPC鋼材を取り出した。また、取り出したPC鋼材については、JCI-SC1法に基づき錆を除去した後、質量を測定した。また10mm間隔で全長にわたり直径を測定した。

## 3. 試験結果

### 3.1 腐食状況

10年後の供試体外観状況の例を図-4に示す。NaClを混入している供試体では、シースに沿ったひび割れが発生しているが、NaCl無混入供試体にはコンクリートにひび割れが発生していない状況が分かる。なお腐食ひび割れ幅は0.1~0.5mm程度であり、供試体上面および底面にはひび割れは発生していなかった。

供試体コンクリート除去後の内部状況を図-5に示す。NaCl混入供試体はシースが腐食により大部分が消失し、内部のPC鋼材表面が腐食している状況が確認できた。一方、NaCl無混入供試体ではシースに腐食は確認できなかった。同一要因で作成した別の供試体の断面切断状況を図-6に示す。ひび割れはシースを原点とし放射状に外側に向かい発生している状況が確認できる。これらより本供試体に発生しているひび割れの主要原因は、シース腐食によるものと考えられる。

試験後に供試体から採取したPC鋼材の残存質量率を図-7に、鋼材断面の平均値を表-5に示す。なお、取り出したPC鋼材質量と、長さで単位体積質量(PC鋼より線:0.774kg/m, PC鋼線:1.04kg/m)の積から求まる質量の比を残存質量率と定義した。この値はプレストレス導入時に予め塩水散布により行った質量減少も含んだ値であるため、グラウト充填区間では腐食の進行が緩やかであったものの、グラウト未充填箇所ではグラウト充填箇所と比較し、腐食が進行したものと考えられる。

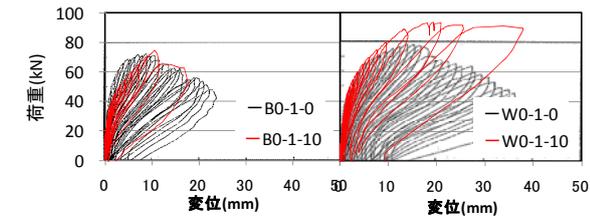
### 3.2 曲げ載荷試験

#### (1) コンクリートの圧縮強度

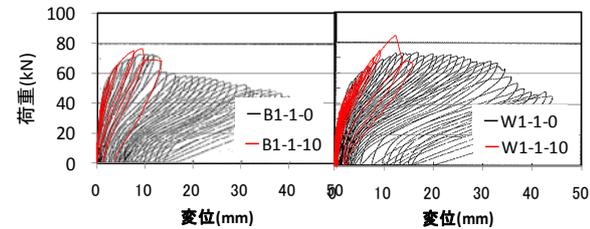
材齢28日でのコンクリートの圧縮強度は53~55N/mm<sup>2</sup>、弾性係数は37~48kN/mm<sup>2</sup>の範囲であった。

#### (2) 残存プレストレス量

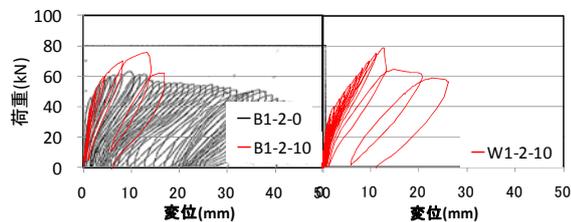
目視観察および底面に貼り付けたひずみゲージで確認できたひび割れ発生荷重から残存プレストレス量を計算すると、導入時のプレストレス量の約60%であった。通常、長期間におけるプレストレスの有効率は80~85%程度であるため、プレストレスの損失が若干大きいことが分かる。これは、腐食ひび割れによりプレストレス伝



(a) NaCl 無混入・等曲げ区間グラウト充填



(b) NaCl 混入・等曲げ区間グラウト充填



(c) NaCl 混入・等曲げ区間グラウトなし

図-8 曲げ載荷時の荷重-変位関係

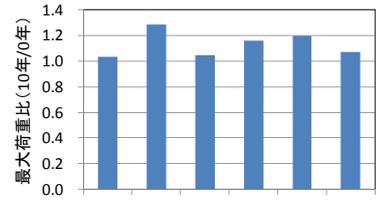
達が阻害されたことが一因と考えられる。

### (3) 荷重-変位関係

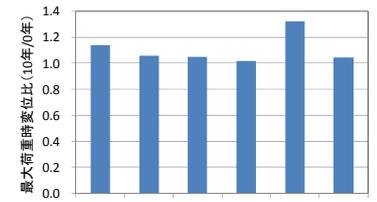
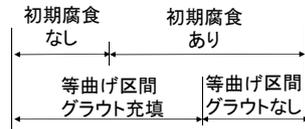
荷重-変位関係を図-8 に示す。また、最大荷重および最大荷重時の変位について、打設直後の載荷と 10 年暴露供試体の比較を図-9 に示す。なお、W1-2-10 供試体は打設直後供試体がないため、W1-1-0 供試体との比を示す。これらより、最大荷重や最大荷重時変位は、シーラ腐食ひび割れがあっても低下していない。むしろ、コンクリート強度の増加で最大荷重が増加するものもあった。

また、部材靱性を評価するため、部材載荷時に消費するエネルギーの累積値と、各グループで示す最大変位の関係を図-10 で示す。なお消散エネルギーは、曲げ載荷時に得られる荷重-変位曲線履歴ループの囲む面積とした。グラウトがスパン全長にわたり充填されている供試体の消散エネルギーは、材令 30 日で載荷した供試体と比較し材令 10 年供試体は最大荷重以降同等もしくは低下傾向を示した。これは、グラウト強度の増加に起因するものと考えられ、定着部やせん断スパン内の付着がより強固になり、曲げひび割れの分散性が良くなることから、局所的に破壊が集中することを防いでいるものと考えられる。

### (4) 側面ひずみ



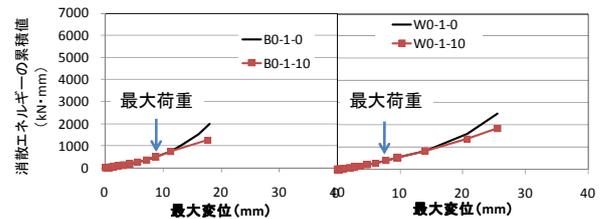
B0-1 W0-1 B1-1 W1-1 B1-2 W1-2



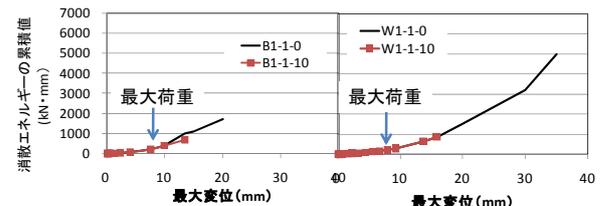
B0-1 W0-1 B1-1 W1-1 B1-2 W1-2



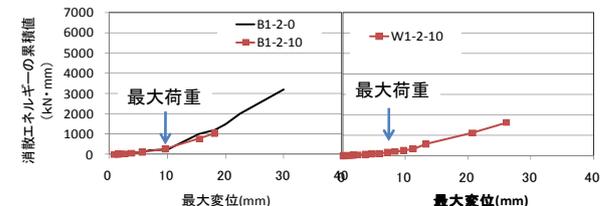
図-9 最大荷重および変位の比較



(a) NaCl 無混入・等曲げ区間グラウト充填



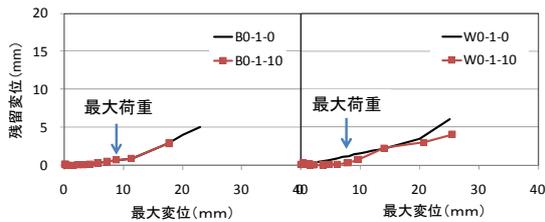
(b) NaCl 混入・等曲げ区間グラウト充填



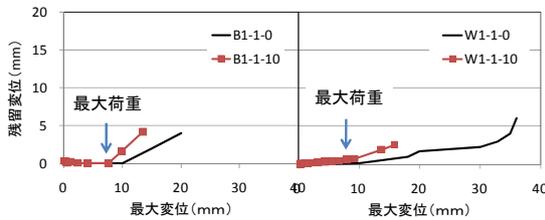
(c) NaCl 混入・等曲げ区間グラウトなし

図-10 消散エネルギー累積値と最大変位の関係

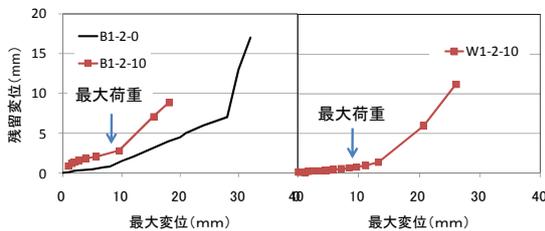
等曲げ区間に貼り付けたひずみゲージから、曲げひび割れ発生以前では、腐食ひび割れの有無によらず、等曲げ区間内の高さ方向ひずみ分布は直線関係を示した



(a) NaCl 無混入・等曲げ区間グラウト充填



(b) NaCl 混入・等曲げ区間グラウト充填



(c) NaCl 混入・等曲げ区間グラウトなし

図-11 残留変位と最大変位の関係

ことを確認した。曲げひび割れ発生以前であれば、腐食ひび割れの影響とみられるプレストレスの減少で曲げひび割れ発生荷重は減少している可能性はあるものの、腐食ひび割れ内における骨材のかみ合わせ効果などで、断面の平面性は保持されていると考えられる。

#### (5) 復元特性の評価

部材の復元特性を評価するため、各載荷ループで示す最大変位と除荷時の残留変位の関係を図-11に示す。

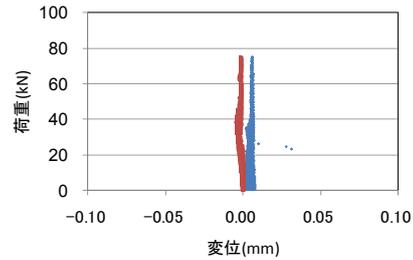
腐食による軸方向ひび割れが発生していない供試体では、経年による挙動変化は認められない。軸方向ひび割れが発生している供試体では、最大荷重に達した後、残留変位が大きくなる傾向を示した。

等曲げ区間内に取り付けた腐食ひび割れを挟んで取り付けたπ型ゲージの挙動を図-12に示す。腐食ひび割れが生じた供試体では、最大荷重以降ひび割れ部の開口変位が増減している。

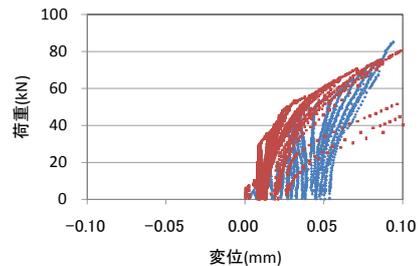
これらのことから、大変形領域では、腐食ひび割れ面でのずれ変位が大きくなり、除荷時に腐食ひび割れ面でのかみ合わせが障害となり復元特性が低下し、重ねはりのような挙動になると考えられる。

#### (6) 曲げひび割れ特性

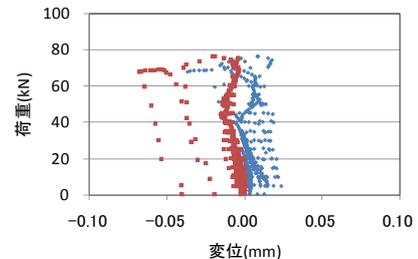
図-13は、腐食ひび割れが生じた供試体の曲げ載荷終了後の外観状況を示す。通常曲げひび割れは底面から発



(a) B0-1-10 (NaCl 無混入・等曲げ区間グラウト充填)



(b) W1-1-10 (NaCl 混入・等曲げ区間グラウト充填)



(c) B1-1-10 (NaCl 混入・等曲げ区間グラウト充填)

図-12 荷重と腐食ひび割れ部開口変位の関係

生するが、シーす位置に発生している腐食ひび割れからも曲げひび割れが進展していることが分かる。これは、コンクリート表面から確認できない内部の腐食ひび割れからひび割れが進展したものと考えられる。

#### (7) 腐食ひび割れが生じた PC はりの耐荷性能

今回行った試験から、腐食ひび割れは発生しているものの、PC 鋼材の腐食が軽微な場合におけるポストテンション方式 PC はりの最大荷重以前の荷重-変位関係および最大荷重については、腐食ひび割れが生じていないはりとほぼ同等の挙動を示すことを確認した。ただし、曲げひび割れについては、必ずしも引張側底面からひび割れが進展しないため、曲げひび割れ発生荷重以上の荷重が載荷された場合のひび割れ挙動は注意する必要がある。

最大荷重以降における、腐食ひび割れを生じた PC はりでは、プレストレス伝達能力は変化しないものの、プレストレス断面内の荷重伝達機能の喪失が原因と考えられる残留変形の増加傾向が示された。地震等の偶発的な著大荷重が作用した後、死荷重時のはり変位が増大する可能性があるため、高速鉄道等変位が制限される PC

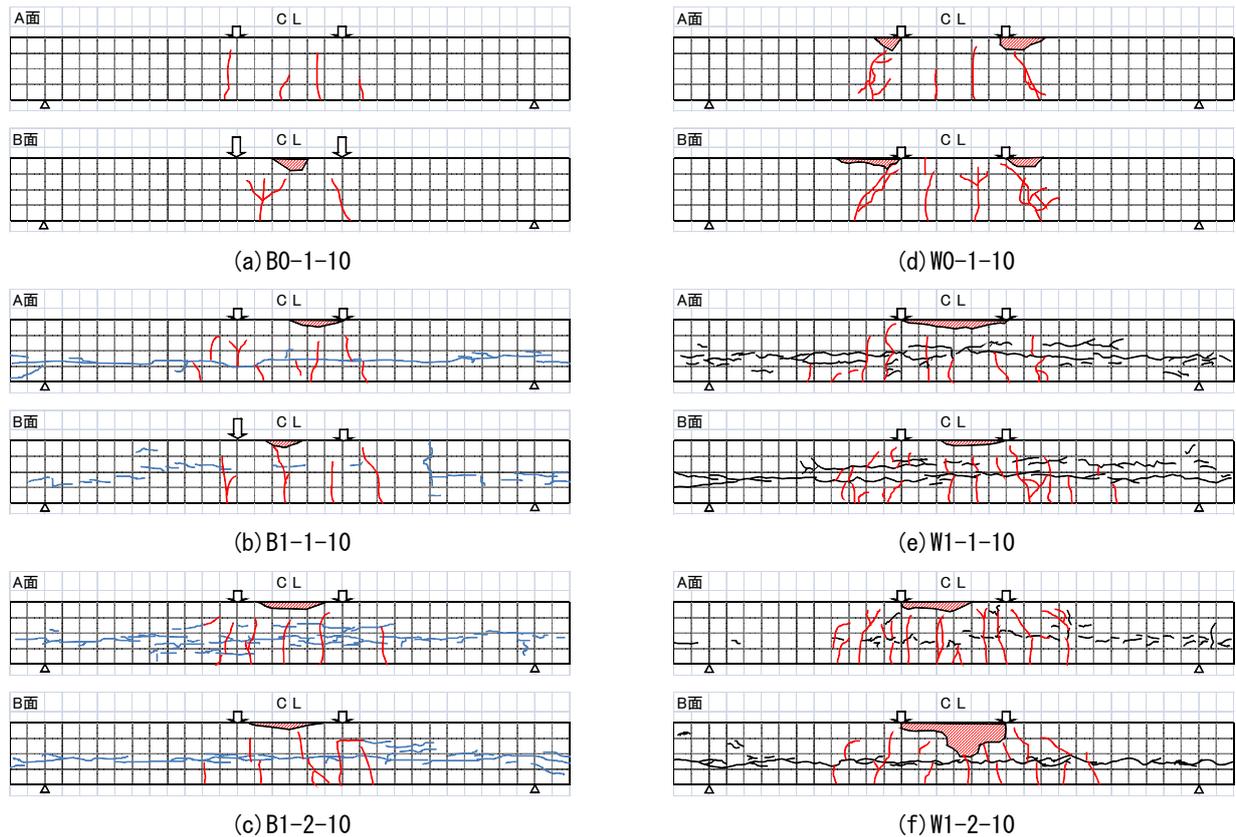


図-13 荷重試験後のひび割れ図  
(図中赤線が曲げ荷重試験後に発生したひび割れ)

構造物では、PC 鋼材の腐食保護観点以外からも、ひび割れ注入等の措置を行う必要性を示す結果であるといえる。

#### 4. まとめ

10年間間置きし、主としてシース腐食が原因で軸方向にひび割れを生じたポストテンション方式 PC 供試体を用い、曲げ荷重試験を実施した。その結果得られた成果について下記に示す。

- (1)同一諸元で作成した供試体の場合、腐食ひび割れの有無により最大荷重および最大荷重時変位、および最大荷重以降の消散エネルギーの累積値に大きな差は認められなかった。
- (2)腐食ひび割れが発生した供試体において、最大荷重以前では腐食ひび割れ部の開口変位および残留変位は腐食ひび割れが発生していない供試体とほぼ同等の挙動を示した。しかし最大荷重以降では、腐食ひび割れ部の開口変位が大きくなること、および残留変位が大きくなることを示した。そのため、最大荷重以降、腐食ひび割れを挟んで重ねはりの挙動を示す可能性を示した。
- (3)腐食ひび割れが発生した供試体では、曲げひび割れが

腐食ひび割れを原点として進展する場合があることを示した。

#### 謝辞

本供試体の作成を行った京都大学大学院修了生 阪上啓祐氏（現清水建設（株））に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えば田中良樹，河野広隆，渡辺博志，木村哲士；ポストテンション PC 桁の塩害劣化と耐荷力，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.781-786，2000.7
- 2) 近藤拓也，鈴木佑典，高谷哲，山本貴士，宮川豊章；ポストテンション方式 PC 桁の腐食ひび割れに関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.299-304,2010
- 3) 例えば上原子晶久，岩城一郎，鈴木基行；塩害による鋼材腐食を考慮した実PC 上部工の構造性能評価，コンクリート工学年次学術論文集，Vol.31，No.2，pp.1525-1530，2009.7