

# PC 栈橋上部工の破壊過程に関する載荷実験

染谷 望\*1・川端 雄一郎\*2・加藤 絵万\*3・村上 裕幸\*4

PC 栈橋は地震動に対する変位抑制効果に優れるため、耐震強化施設で多く採用されている。耐震強化施設では、発災後の緊急物資輸送が求められることから、発災後早期の利用可否判断が要求されることとなる。ここで、PC 栈橋上部工では、主桁間の連結部で曲げモーメントがもっとも大きくなるため、主桁間の連結部では曲げモーメントの伝達を確保するための連結鉄筋を配置する必要がある。現在、入力地震動の増加による鉄筋量の増加に伴い、過去の設計例よりも PC 主桁端部（ハンチ）を大型化する事例が見られている。

本稿では、現行の技術基準により設計された PC 栈橋上部工の地震時の破壊過程を把握することを目的として、PC 主桁および連結部を対象とした実物大試験体の正負交番曲げ載荷試験を実施した結果を報告する。

キーワード：PC 栈橋上部工、連結部、正負交番曲げ載荷試験、断面変化部

## 1. はじめに

プレキャストコンクリート（PC）栈橋上部工は、プレキャスト PC 桁を間詰めコンクリートと横方向プレストレスによって一体構造とし、これを鋼管杭で支持された受け梁上で連結した構造である<sup>1)</sup>。PC 主桁間および受け梁を連結する連結部では、それぞれの主桁端部から突出する鉄筋（連結鉄筋）を重ね継手で連結し、上下部剛結の連続ラーメン構造とするのが一般的である。PC 栈橋は地震動に対する変位抑制効果に優れるため、耐震強化施設で多く採用されている。

ここで、港湾の技術基準（港湾の施設の技術上の基準・同解説、以下、港湾基準と称する）は、平成 19 年に性能規定化が導入され、施設の耐震設計手法が大きく変わった。東日本大震災などの教訓を踏まえて、また、南海トラフ、首都直下型地震に対応すべく平成 30 年に改訂された港湾基準では、耐震設計がさらに見直されるとともに、港湾の利用可否の判定調査などが参考技術資料として取りまとめられた。耐震強化施設では発災後の緊急物資輸送または幹線貨物輸送が求められることから、発災後、早期に施設の利用可否を判断可能な技術が必要とされているが、技術開発はいまだ途上段階である。

PC 栈橋では、地震動が作用した場合、主桁間の連結部（図 - 1）で曲げモーメントがもっとも大きくなる。このため、連結部が所定の曲げモーメントに対して十分に剛に挙動するよう連結鉄筋を十分に配置する必要があるが、近年の入力地震動の増大に伴う鉄筋量の増加に伴い、過去の設計例よりも桁端部を大型化する事例が見られている。例として、図 - 2 に本稿で実施した実験の参考とした PC 主桁の側面図および主桁端部とスパン中央部（標準部）の断

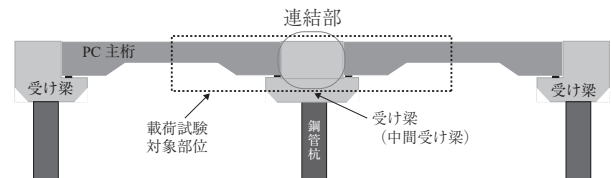


図 - 1 PC 栈橋上部工の概要と載荷試験対象部位

面図を示す。断面図より、スパン中央の桁高が 600 mm であるのに対して、桁端部は 1 050 mm であり、鉄筋の配置に約 2 倍の桁高が必要となっていることが分かる。このような主桁内の断面急変は過度な応力集中などを発生させ、設計では想定していなかった破壊モードを招くおそれがある。このため、施設の利用可否判断に資するデータを取得するためにも、現行の港湾基準で設計される PC 栈橋上部工の破壊過程を把握することが必要とされている。

以上の背景から、本稿では、PC 栈橋上部工の地震時の破壊過程を把握することを目的として、図 - 1 に示す主桁および連結部を対象とした実物大試験体の正負交番曲げ載荷試験を実施した結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

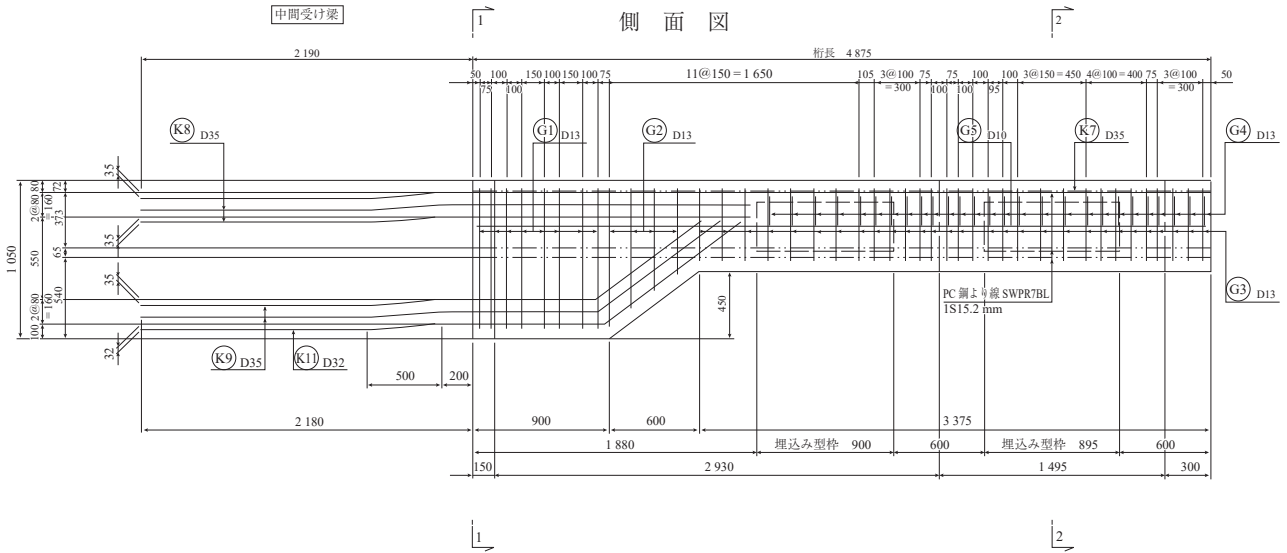
図 - 3 に試験体の形状および寸法を示す。試験体は、ある実際の PC 栈橋上部工を参考にして、主桁スパン中央までをモデル化したプレキャスト PC 桁 2 体と、それらを連結する連結部をモデル化している。試験体の全長は 12 750 mm であり、PC 桁の長さは試験体左右ともに 4 875 mm、連結部は 3 000 mm である。PC 桁および連結部の配筋は、参考とした PC 栈橋上部工と同様とした。また、同

\*1 Nozomu SOMEYA：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域 研究官

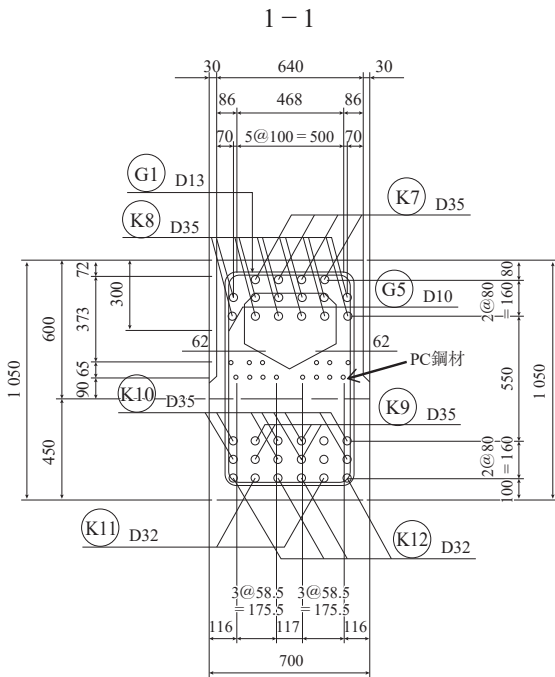
\*2 Yuichiro KAWABATA：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域 主任研究官

\*3 Ema KATO：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域 グループ長

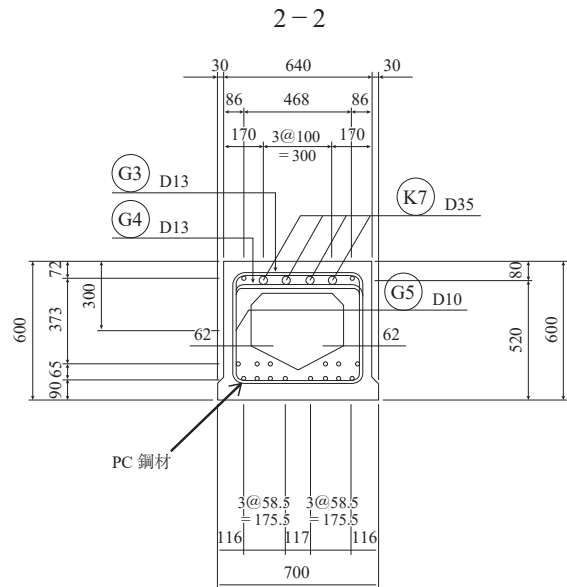
\*4 Hiroyuki MURAKAMI：国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所



(a) 桁側面図



(b) 桁端部断面図



(c) 桁標準部断面図

図 - 2 PC 主桁の側面図及び断面図の一例

じく図 - 3 に、後述する正負交番曲げ荷重試験における変位および鉄筋ひずみの計測箇所を示す。ひずみは、PC 桁では連結鉄筋、PC 鋼より線、およびせん断補強筋、連結部では受け梁から立ち上げた鉄筋にて計測した。また、荷重による PC 桁の変位は、各 PC 桁の荷重点の下面に 2 箇所ずつ設置した。

試験体の作製の流れを図 - 4 に示す。まず、受け梁を作製したのち、PC 桁を受け梁上に架設し、その後、PC 桁間の連結部にコンクリートを打込むことで一体化させた。これらは実際の PC 栈橋の施工工程と同じである。

表 - 1 に荷重試験時のコンクリートの物性値を、表 - 2 に鉄筋や PC 鋼より線の物性値 (実測) を示す。本実験で

用いたコンクリート、鉄筋および PC 鋼より線は、一般に PC 栈橋上部工で用いられるそれらと同程度のものを用いた。

## 2.2 実験方法

図 - 5 に正負交番曲げ荷重試験の状況を示す。各 PC 桁について、試験体中央から 6075 mm (連結部側の PC 桁端部から 4575 mm) の位置に、正負交番で鉛直方向の荷重を与えた。荷重位置は通常の PC 栈橋上部工の支間中央付近を想定して設定しており、地震時の PC 栈橋上部工の水平変位を模擬するため、北側の PC 桁 (以降、N 桁) と南側の PC 桁 (以降、S 桁) で逆方向の荷重を同時に与えた。たとえば、N 桁を + 方向 (下向き) に荷重する場合、同時

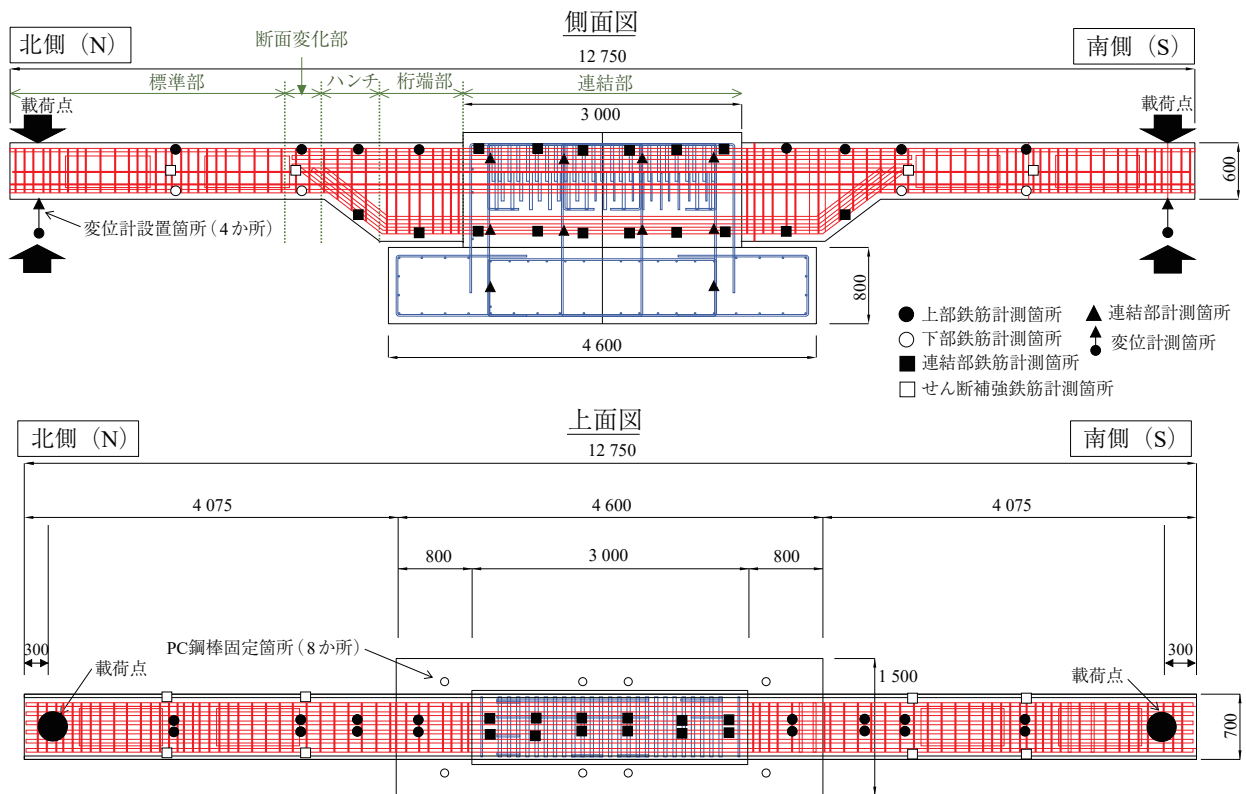


図 - 3 試験体の形状・寸法および計測箇所 (単位: mm)

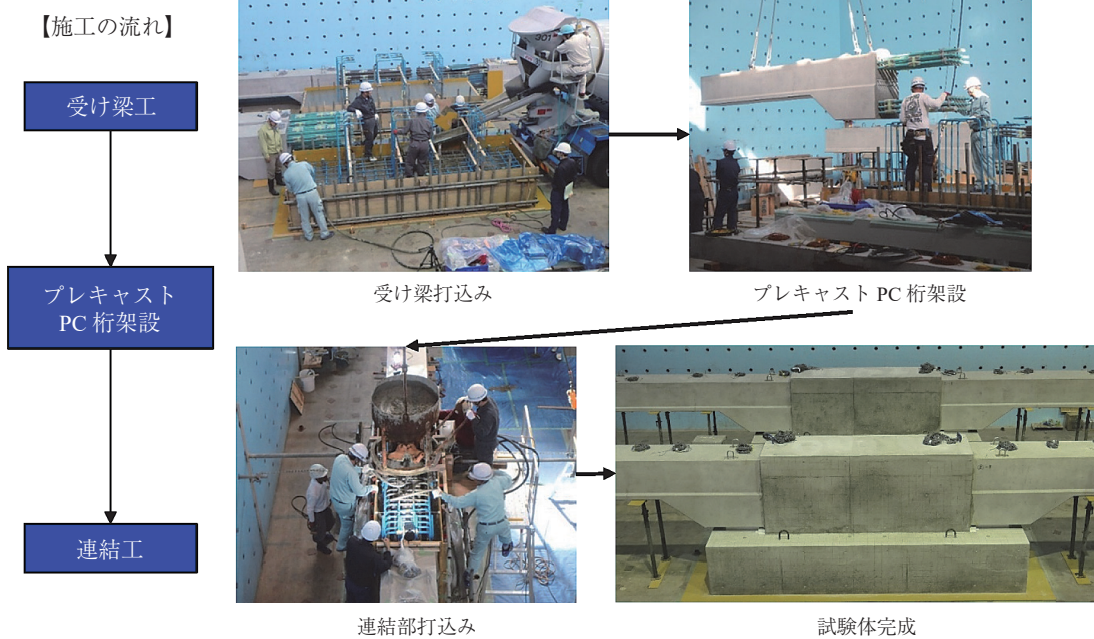


図 - 4 試験体の作製

表 - 1 コンクリートの物性値

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
PC 桁	53.8	37.2
連結部	38.5	34.4
受け梁	38.9	30.3

表 - 2 鉄筋および PC 鋼より線の物性値

種類	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	種類	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D10	568	D32	552
D13	576	D32 (ねじ節鉄筋)	579
D19	569	D35	557
D22	576	D35 (ねじ節鉄筋)	584
D25	568	SWPR7BL 1S15.2	1 975

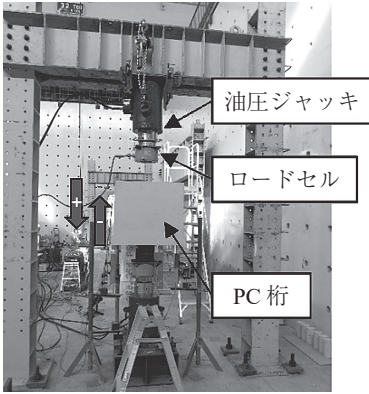
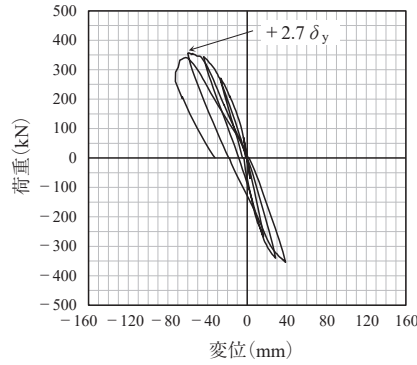
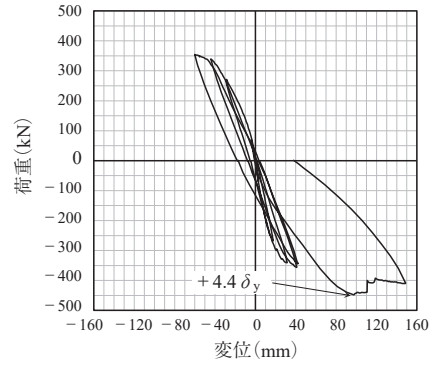


図 - 5 正負交番曲げ载荷試験



(a) N 桁



(b) S 桁

図 - 6 荷重 - 変位関係



(a) N 桁 + 3.3  $\delta_y$  (b) S 桁 + 6.8  $\delta_y$

図 - 7 PC 桁の圧壊

表 - 3 PC 桁標準断面における設計曲げ耐力と最大曲げモーメントの比較

	+ 方向	- 方向
設計耐力 (kN・m)	1 038	1 320
最大曲げ M (kN・m)	1 098 (N 桁)	1 378 (S 桁)
実測 / 設計耐力	1.06	1.04

に、S 桁を - 方向 (上向き) に载荷した。

载荷試験にあたっては、まず N 桁を + 方向に、S 桁を - 方向に同時に载荷し、N 桁の引張側の PC 鋼より線または連結鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の鉛直変位を  $+1\delta_{y-N}$  とした。次に、N 桁を - 方向に、S 桁を + 方向に同時に载荷し、S 桁の引張側の PC 鋼より線または連結鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の鉛直変位を  $-1\delta_{y-S}$  とした。これら  $+1\delta_{y-N}$  と  $-1\delta_{y-S}$  の平均を、基準降伏変位  $1\delta_y$  として設定した。そのうち、降伏変位を  $+2\delta_y$ 、 $-2\delta_y$ 、 $+3\delta_y$ 、 $-3\delta_y$ ... とした正負交番载荷を実施し、各载荷ステップでひび割れ発生状況を確認した。なお、以降では、 $【+n\delta_y】$  は N 桁を + 方向に  $n\delta_y$ 、S 桁を - 方向に  $n\delta_y$  変位させた場合を、 $【-n\delta_y】$  は N 桁を - 方向に  $n\delta_y$ 、S 桁を + 方向に  $n\delta_y$  変位させた場合を示す。いずれの桁についても、荷重の著しい低下、または、桁あるいは連結部に著しい損傷が認められた時点で载荷を終了した。なお、対象構造物の設計計算によれば、PC 主桁の断面変化部で曲げ破壊を生じる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重 - 変位関係

図 - 6 に、荷重 - 変位関係を示す。初回降伏変位は N 桁で  $+1\delta_{y-N}=23.19$  mm (荷重 250 kN)、S 桁で  $-1\delta_{y-S}=21.83$  mm (荷重 228 kN) であり、いずれも引張側の PC 鋼より線のひずみが降伏ひずみに達した時点であった。これらの平均である 22 mm を以降の基準降伏変位  $1\delta_y$  とした。

N 桁では、 $+2.7\delta_y$  で最大荷重 357 kN を示し、そのうち、 $+3.3\delta_y$  で下部の圧壊 (図 - 7(a)) により荷重が低下したため、载荷を終了した。S 桁では、 $+3.0\delta_y$  以降は - 方向への単調载荷としたところ、 $+4.4\delta_y$  で最大荷重 448 kN を

示し、 $+5.0\delta_y$  で上部の圧壊が生じた。その後も载荷を継続したところ、 $+6.8\delta_y$  において図 - 7(b) に示すように S 桁の端部から標準断面へ変化する位置 (図 - 3 に示す断面変化部) にひび割れの進行が確認された。

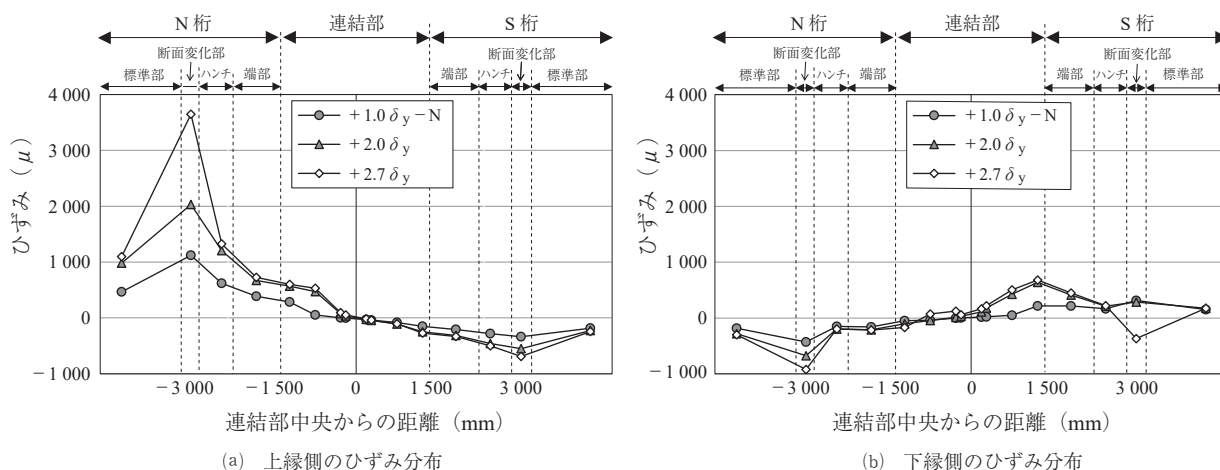
表 - 3 に、PC 桁の標準断面での設計曲げ耐力と、実験で得た最大曲げモーメントの比較を示す。なお、設計曲げ耐力の算定にあたっては、材料特性値として実測値を用いており、部分係数は考慮していない。最大曲げモーメントと設計曲げ耐力の比は N 桁では 1.06、S 桁では 1.04 となり、設計曲げ耐力と最大曲げモーメントはほぼ同程度であった。また、連結部の損傷は小さく、現行の設計法での連結部は十分な耐力を有することが確認された。

#### 3.2 PC 桁および連結部のひずみ分布

図 - 8 に、代表的な载荷ステップにおける PC 桁上部と連結部上部の鉄筋、および PC 桁下部の PC 鋼より線と連結部下部の鉄筋のひずみ分布を示す。

図 - 8(a) に示す試験体上縁側の鉄筋では、N 桁の初回降伏時 ( $+1\delta_{y-N}$ ) は、断面変化部の引張ひずみが降伏ひずみに達した。一方、S 桁では断面変化部の圧縮ひずみが  $-340\mu$  となった。载荷ステップの進行に伴って、N 桁の断面変化部の引張ひずみ、S 桁の断面変化部の圧縮ひずみは増加した。なお、载荷終了時においても、連結部上部の鉄筋ひずみは降伏ひずみに達していなかった。

図 - 8(b) に示す試験体下縁側の PC 鋼より線および鉄筋について、N 桁では载荷ステップの進行に伴って断面変化部において圧縮ひずみが増加した。S 桁の断面変化部では、 $+2.0\delta_y$  まで引張ひずみが増加し、 $+2.7\delta_y$  では圧縮ひずみに転じた。以上のひずみ分布より、N 桁および S 桁のいずれも断面変化部に応力が集中していたことが考えられた。また、同図には示していないが、受け梁から立ち上げた連結部の鉄筋については、N 側では  $-2.0\delta_y$  時に、S 側



(a) 上縁側のひずみ分布 (b) 下縁側のひずみ分布

図 - 8 PC 桁下部の PC 鋼より線と連結部下部の鉄筋のひずみ分布

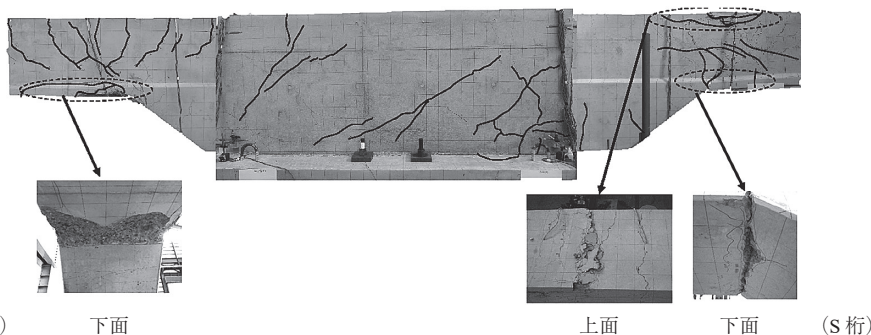


図 - 9 荷重試験終了後の PC 桁、連結部および受け梁のひび割れ状況（あおり補正なし）

では  $+2.0\delta_y$  時に降伏ひずみに達していることが確認された。

### 3.3 試験体の破壊状況

図 - 9 に、荷重試験終了後の PC 桁、連結部、および受け梁のひび割れ状況を示す。連結部でひび割れの発生本数は少なく、ひび割れ幅も小さかった。N 桁および S 桁では、いずれも断面変化部に集中的にひび割れが発生していた。

ここで、平成 11 年の港湾基準に基づいて設計された PC 栈橋上部工について本稿と類似の正負交番荷重試験を実施した大柳らの研究<sup>2)</sup>では、+ 方向荷重時に PC 桁の断面変化部に曲げ破壊が生じており、本稿の N 桁と破壊状況は一致した。一方で、- 方向荷重により終局に至った PC 桁試験体では、連結部と PC 桁端部の境界における下部鉄筋の抜け出しにより荷重の低下が生じており、本稿における S 桁の結果とは異なった。大柳らの研究で用いた試験体は、本稿と比較して PC 桁端部での断面変化は小さい（標準断面高さ 650 mm、桁端部断面高さ 750 mm）。本稿の試験体は、過去の基準により設計された PC 桁および連結部と比較して連結鉄筋の配筋量を増加させているため、主桁端部の断面が大きくなり、かつ端部から標準断面への変化が急勾配となっている。このため、とくに、- 方向の荷重において既往の研究と破壊形態が異なると考えられる。

## 4. まとめ

本稿では、地震動による PC 栈橋上部工連結部の破壊過程の把握を目的として、実物大の試験体の正負交番荷重試験を実施した。その結果、現行の港湾基準により設計した PC 栈橋上部工の PC 桁に鉛直方向の荷重を荷重した場合、上向きおよび下向きのいずれの荷重方向においても、PC 桁の断面変化部での曲げ破壊が生じた。本稿の範囲では、いずれの荷重方向においても、実測曲げ耐力は設計曲げ耐力と同程度となった。また、下向きの荷重を荷重した場合の方が、上向きの荷重を荷重した場合よりも耐力および変形性は向上するが、一方で、上向きの荷重を荷重した場合の PC 桁の曲げ破壊以前に、受け梁から立上げた鉄筋が降伏ひずみに達する可能性があることが分かった。

今後、有限要素解析などを用いて PC 栈橋上部工の破壊過程をより詳細に把握するとともに、発災後の利用可否判断のための点検診断箇所や、損傷の程度を効率的に把握するためのセンサの設置箇所などを検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 谷口正輝, 木村光俊, 加藤克一, 横川勝則: PC 栈橋, もっと知りたい PC 技術, プレストレストコンクリート, Vol.58, No.1, pp.87-90, 2016.
- 2) 大柳修一, 横田 弘, 澤 覚, 森 好生: PC 栈橋の設計・施工に関する共同研究, 一般財団法人 沿岸技術研究センター研究論文集 No.1, 2001.

【2019 年 4 月 23 日受付】