

## 報告 海洋環境下に建設された PC 箱桁橋のひび割れ事例の検証

平安山 良和<sup>\*1</sup>・松下 博通<sup>\*2</sup>・大城 武<sup>\*3</sup>

**要旨**：海洋環境下に建設された PC 箱桁橋は長大橋が多く、耐久性が損なわれた場合には、その補修規模が大きくなり莫大な費用を要する。今後建設される PC 箱桁橋においては、ひび割れ幅の抑制、あるいはひび割れの発生抑制を考えて行くことが重要である。本報告は、過去に建設された橋梁からひび割れが認められた橋梁をモデルに、ひび割れパターンを分類し、それぞれに要因を挙げ、FEM 解析により検証を行い、今後計画される PC 箱桁橋におけるひび割れ幅抑制対策の提案を行うものである。

**キーワード**：海洋環境, PC 箱桁橋, 下床版, 定着部, ひび割れ

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC と記す。）橋は、高耐久性性状から海洋環境下でも数多く建設されてきた。特に箱桁橋は、長支間化が可能なことから長大橋が多く、社会資本としての役割を担ってきた。それらの構造物が耐久性を損ない補修を余儀なくされた場合には、大型構造物であるが故に莫大な費用を要する。したがって、今後建設される橋梁においては、耐久性を損なわないように配慮する必要があるものの、過去に建設された PC 箱桁橋の幾つかの橋梁では下床版にひび割れが確認されている。

PC 部材は、コンクリート部材の引張応力を抑制することができ構造的なひび割れが発生しにくいものである。しかしながら、PC 橋においても、鉄筋コンクリート（以下、RC と記す。）構造の部位が存在することやまた乾燥収縮や水和熱に伴うひび割れなど、完全にひび割れの発生を防ぐことは容易ではない。さらに、海洋環境下におけるかぶりは大きく設定されており鋼材の有効高さが小さいためひび割れが発生しやすく、表面におけるひび割れ幅も大きくなる。

平成 14 年 3 月の道路橋示方書・同解説の耐久性の検討における塩害の影響による最小かぶり

は、ひび割れを想定していないものである。

一方、既往の研究では、ひび割れ部の中性化領域において塩化物イオン量がひび割れのない一般部よりも少なかったという報告<sup>1)</sup>もある。このように、現段階では、海洋環境における許容ひび割れ幅がどの程度なのか明らかではない。

今後建設される橋梁においては、ひび割れ発生後の耐久性を考える前にひび割れ幅の抑制、あるいはひび割れの発生抑制を考えていくことが重要である。

プレストレスト・コンクリート建設業協会九州支部では、PC 箱桁橋の構造性能について、過去に建設された多くの橋梁のうち、主桁外面にひび割れが認められた橋梁をモデルに、ひび割れパターンを分類し、それぞれに要因を挙げ、FEM 解析によりその検証を行い、今後建設される橋梁に対して対策の提案を行うための検討会を開催した。本稿は、その検討内容の一部を報告するものである。

### 2. ひび割れのパターンと発生要因

PC 箱桁橋の主桁外面にひび割れが確認された 4 橋からひび割れパターンは、下床版軸方向のひび割れ、下床版斜め方向のひび割れ、桁端部ウ

\*1 (株) ピーエス三菱 九州支店 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

\*3 琉球大学名誉教授 Ph.D. (正会員)

エブ側面のひび割れの3つに分類することができた。

### 2.1 下床版橋軸方向のひび割れ

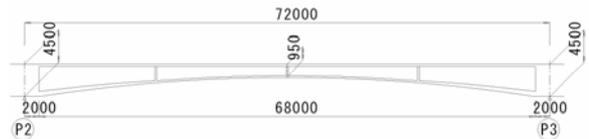
A橋は、図-1に示すように桁高変化のある3室箱桁橋である。ひび割れ状況を図-2に示す。下床版上縁ではウェブ近傍に、下縁ではウェブ間中央に橋軸方向のひび割れが認められた。

ひび割れの要因は、ひび割れ状況と図-1(b)に示される下床版内のPC鋼材配置から、図-3に示すPC鋼材の曲率変化のため発生する腹圧力によるものである可能性が考えられる。

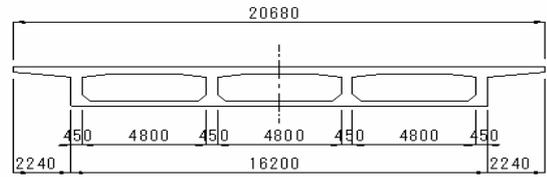
一方B橋は、プレキャストセグメントマッチキャスト工法5径間連続箱桁橋である。プレストレスの導入方法は、内ケーブル工法と外ケーブル工法の併用である。図-4は、ひび割れ状況である。ひび割れは、側径間の3セグメントと4セグメントの下床版下面ほぼ構造中心に継目を跨ぐ橋軸方向の連続したひび割れが認められ、3セグメントと4セグメントの目地を跨いで連続していることから、支保工上のセグメントを緊張し一体化した後に発生したものである。

B橋のひび割れの要因は、図-4の断面図のPC鋼材配置および桁高変化のほとんどないことからPC鋼材の腹圧力による可能性は小さい。

外ケーブル工法は、内ケーブル工法に比べ偏心量がとれないためプレストレスによる軸力で補う必要があり大きくなる傾向がある。一般的な内ケーブル方式では、主桁断面に2~4N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮力が作用しているがB橋では、ひび割れ発生箇所において死荷重時に6N/mm<sup>2</sup>と大きな圧縮応力度が主桁下縁に作用していることが構造計算報告書から確認されている。さらに

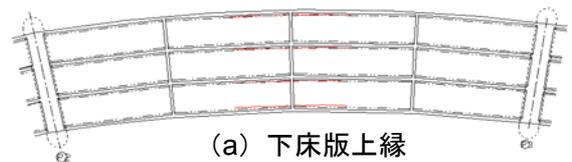


(a) 側面図

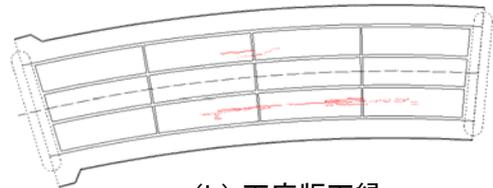


(b) 断面図

図-1 A橋一般図

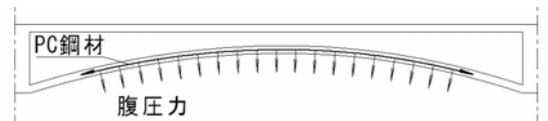


(a) 下床版上縁

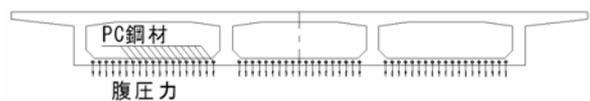


(b) 下床版下縁

図-2 A橋ひび割れ図

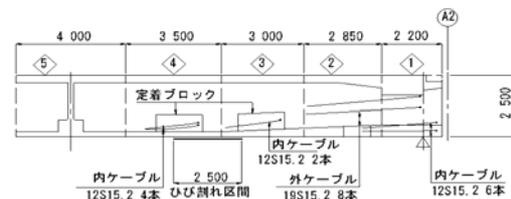


(a) 側面図

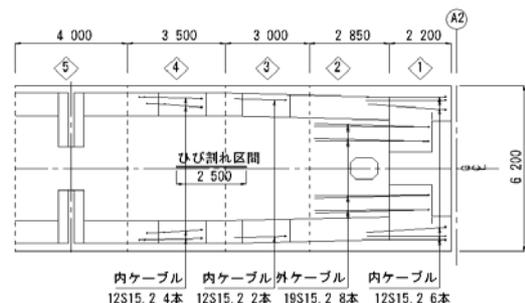


(b) 断面図

図-3 PC鋼材による腹圧力

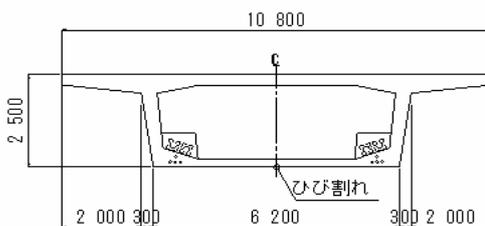


(a) 側面図



(b) 平面図

図-4 B橋ひび割れ図



(c) 断面図

ひび割れの付近には、内ケーブルの定着突起があり外ケーブルの圧縮力によるポアソン効果と併せた影響が要因として考えられる。

## 2.2 下床版斜め方向のひび割れ

C橋は、橋長 1450m のうち桁長 240m の PC4 径間連続箱桁橋である。図-5(a)に側面図を、(b)に断面図を示す。架設方法は、架設桁による張出架設方法であり、主桁はプレキャストセグメントマッチキャスト・ロングライン方式で製作された。C橋の下床版には、写真-2のような斜め方向のひび割れが発生しており、図-6のひび割れ図に示すように、ひび割れ発生位置は下床版の PC 鋼材定着突起部近傍である。

発生したひび割れから、ひび割れ発生の主要因は、PC 鋼材定着突起部の局部応力による可能性が高い。

## 2.3 桁端部ウェブ側面のひび割れ

D橋は、PC5 径間連続変断面 3 室箱桁橋である。桁端部の PC 鋼材定着部近傍にひび割れが認められた。図-7 はひび割れ図であり、写真-3 はひび割れ状況写真である。ひび割れは、桁端の PC 鋼材定着部近傍からウェブ側面に橋軸や斜め方向に進展している。図-7 中の定着体位置はかぶりを確保するため、大きな箱抜きをしており、定着部付近の無筋部からひび割れが進行している。主要因としては、桁端定着部の局部応力による可能性が高い。

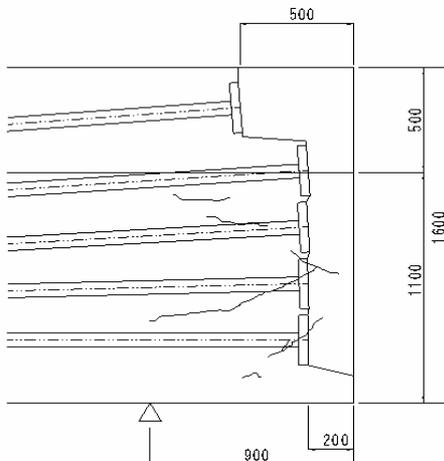
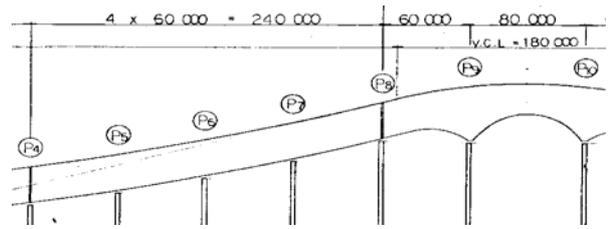
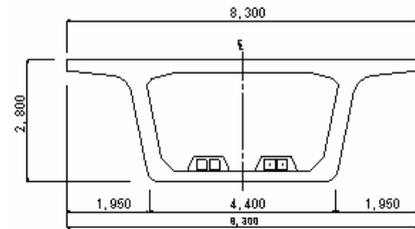


図-7 D橋桁端部のひび割れ図



(a)側面図



(b)断面図

図-5 C橋一般図

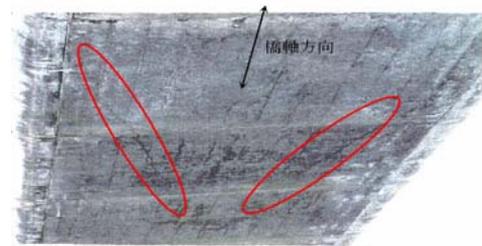


写真-2 C橋斜めひび割れ

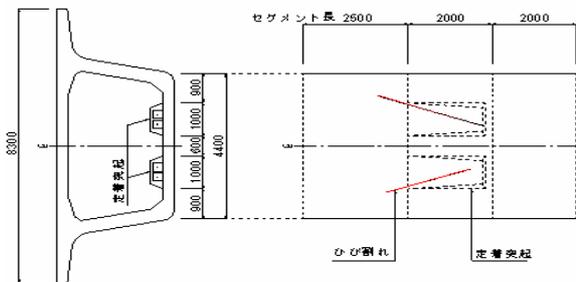


図-6 C橋ひび割れ図



写真-3 D橋桁端部のひび割れ

### 3. 解析的検証

ひび割れパターンから以下の 4 つの要因が挙げられた。要因ごとにそれぞれの橋梁をモデルに FEM 解析により検証を行う。

#### 3.1 PC 鋼材の腹圧力による検証

A 橋を対象に腹圧力に対する FEM 解析を行った。荷重は、プレストレス力を定着部位置に集中荷重 (1275kN/本) として、腹圧力を分布荷重 ( $P/R=1275/222.2=5.7\text{kN/m}$ ) として図-8 のように載荷した。ここで、 $R(=222.2\text{m})$  は曲率半径である。下床版上縁では、図-9 に示すように、ウェブ近傍の全区間に渡り  $2.3\text{N/mm}^2$  程度の引張応力が橋軸直角方向に発生している。

下床版下縁では、図-10 に示すように、床版中央付近の全区間に渡り  $1.1\sim 1.9\text{N/mm}^2$  の引張応力が橋軸直角方向に発生している。

以上の結果より、ひび割れが発生するほどの引張応力度ではないが、下床版上縁および下縁ともに実構造物に生じたひび割れ状況とよく一致することが確認できた。腹圧力のみでは、ひび割れが発生するとは言い難く、腹圧力は要因の一つであるものと考えられる。

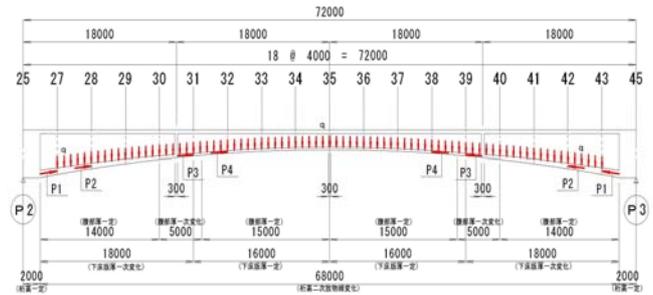
#### 3.2 外ケーブルの影響の検証

図-11 に示す解析モデルは、前述の図-4 に示すひび割れが発生した 3 セグメントとした。載荷荷重は、表-1 に示す死荷重時の応力度を平面保持の仮定のもとモデル要素面積に乗じて節点荷重として与え、定着突起には、プレストレス力 ( $P=1900\text{kN}$ ) を与えた。

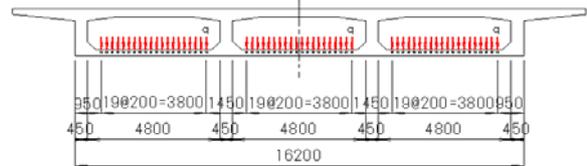
結果は、図-12 に示すように完成形においては、特に問題となることはないものの、当該セグメントに定着する内ケーブル鋼材の緊張前では、図-12 (a) に示す下床版に  $3.0\text{N/mm}^2$  程度の引張力が生じている。このことから施工中にひび割れが発生した可能性が考えられる。

表-1 死荷重時の応力度

	上縁 ( $\text{N/mm}^2$ )	下縁 ( $\text{N/mm}^2$ )
桁端側	3.69	4.19
支間中央側	4.26	6.11



(a) 側面図



(b) 断面図

図-8 A橋荷重

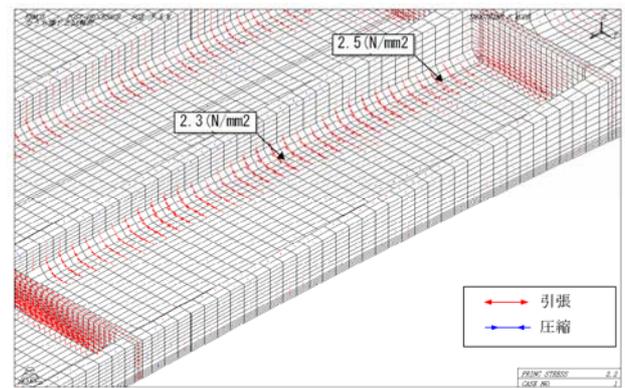


図-9 A橋解析結果 (下床版上縁)

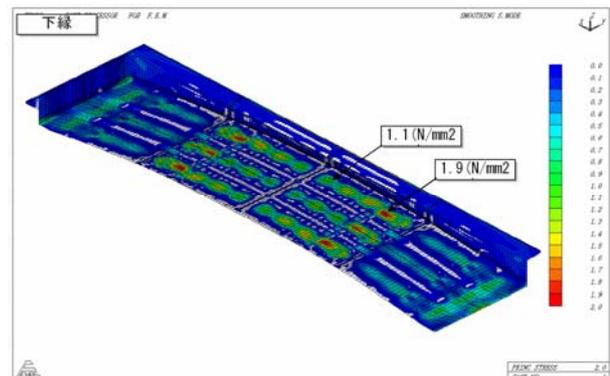


図-10 A橋解析結果 (下床版下縁)

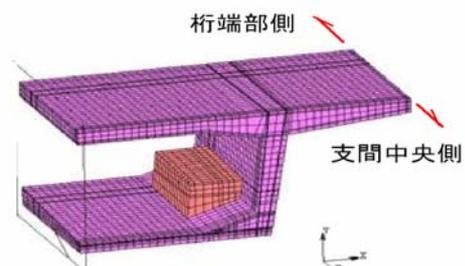
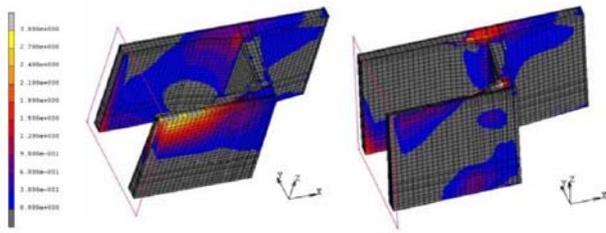


図-11 B橋解析モデル



(a) 内ケーブル緊張前 (b) 完成系

図-12 B橋解析結果

### 3.3 PC 鋼材定着突起部の局部応力の検証

図-13 のように C 橋の下床版の定着部付近をモデルに、PC 鋼材の緊張力  $P$  ( $=1275\text{kN/本}$ )、腹圧力 ( $=P/R=1275/7.0=182\text{ N/mm}^2$ ) を与えた。

図-14 は、床版下面を下から見た結果である。定着位置下面で橋軸方向に  $2.4\text{N/mm}^2$  の最大引張応力が生じ、そこから定着体背面へ斜め方向の引張応力が生じている。また、定着突起間の床版部においては、橋軸直角方向の引張応力が  $0.8\text{N/mm}^2$  発生している。

解析結果と実際のひび割れ発生箇所および方向がよく一致しており、定着位置背面より斜方向へ生じるひび割れの要因が確認できた。

### 3.4 PC 鋼材端部定着部の局部応力の検証

D 橋の解析モデルは、図-15 に示す定着部箱抜きを考慮し、荷重は、緊張力 ( $P=1650\text{kN/本}$ ) を定着体面積に分配し载荷した。

図-16 に解析結果を示す。桁端部の定着部付近では、PC 鋼材の緊張力による複雑な局部応力が生じ、定着箱抜き部の深さと一致するウェブコンクリート表面には、 $8\sim 9\text{N/mm}^2$  の引張応力が発生することが認められた。

一般にこの引張応力に対する補強としては、道路橋示方書 6.6.7「PC 鋼材の定着」および 6.6.8「定着具付近の補強」に準拠し、補強筋や PC 鋼材定着具からのコンクリート縁端距離を考慮した上で、定着具部位の安全性を確保している。しかしながら、D 橋は側径間支間長が長いことから、定着する PC 鋼材の本数も多く、導入するプレストレスが大きくなる。本解析結果の引張応力が生じ、プレストレス導入時に微細な初期

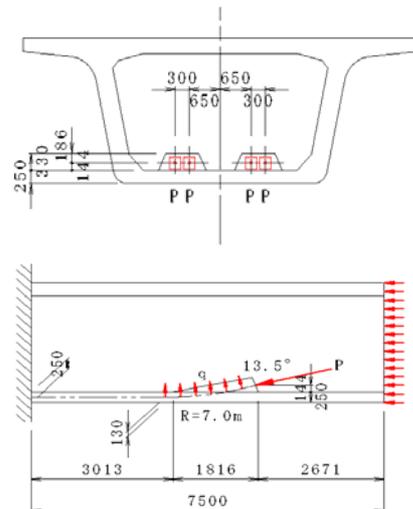


図-13 C橋荷重図

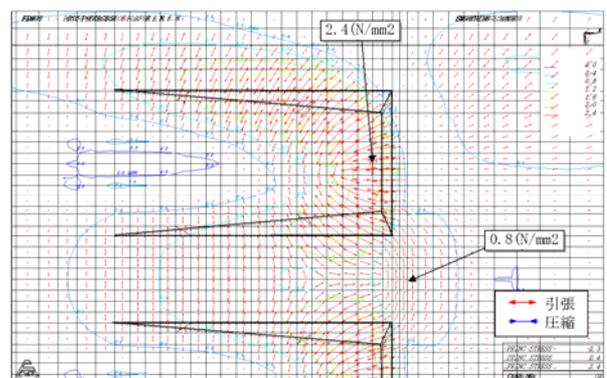


図-14 C橋解析結果 (下床版下縁)

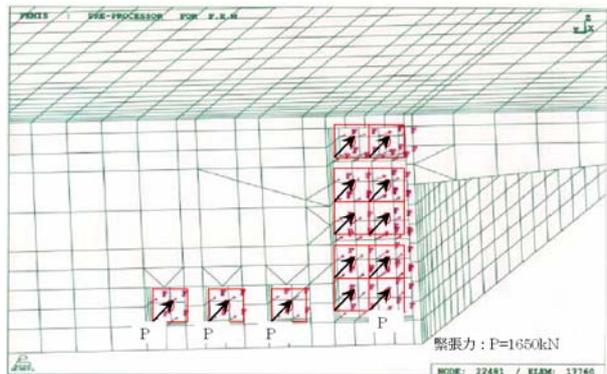


図-15 D橋荷重図

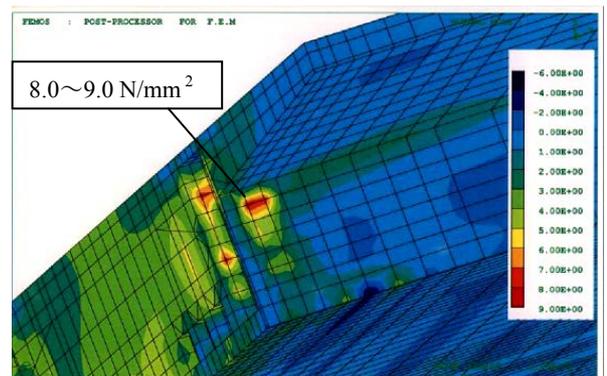


図-16 D橋解析結果

ひび割れを起こした可能性がある。その後温度や乾燥収縮の影響でひび割れが進展したものと推定される。

#### 4. まとめ

検証した結果を以下にまとめる。併せて箱桁橋における PC 鋼材定着に起因するコンクリートの引張応力を低減するための方策を挙げる。ただし、方策の検証は今後行う予定である。

##### 4.1 下床版の橋軸方向ひび割れについて

- (1) 主桁形状が変断面の場合、下床版に配置された PC 鋼材の緊張力に起因する腹圧力で下床版に曲げが発生し、引張応力が発生することが分かった。図-17 の様に PC 鋼材をなるべくウェブ側に寄せて配置し、腹圧力による曲げモーメントの低減を図る。

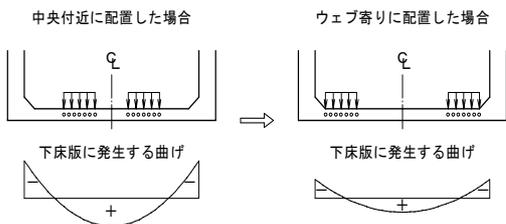


図-17 下床版に配置する PC 鋼材の配置

- (2) 外ケーブル工法を採用している場合は、軸力が比較的多く導入され、緊張順序によっては、コンクリートに引張応力が発生する可能性があることが分かった。FEM 解析等で確認することが望ましい。

##### 4.2 下床版の斜方向ひび割れについて

突起に定着した PC 鋼材のプレストレス力により発生する引張応力で、下床版に斜方向のひび割れが発生する可能性があることが分かった。定着突起付近のコンクリートの引張応力低減を図る対策として次のことが挙げられる。

- (1) 突起一箇所に定着する PC 鋼材を少なくし、プレストレス力によるコンクリートへの負荷を減ずる。
- (2) プレストレス力による定着部コンクリート

の負担面積を増やし、応力分散を図る。

図-18 のように、定着突起を独立させず連続した突起形状や図-19 のようにウェブに一体化させた突起形状とする。

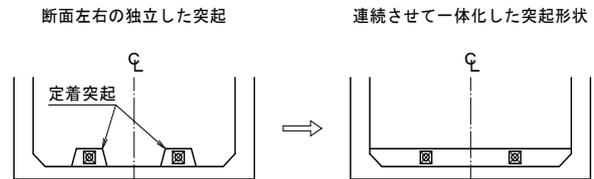


図-18 連続した突起形状への変更

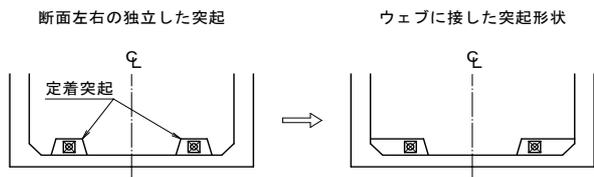


図-19 ウェブ一体型突起形状への変更

##### 4.3 主桁端部定着のひび割れについて

- (1) 桁端部定着体近傍には局部応力が発生することが分かった。図-20 のように PC 鋼材定着体の断面縁端からの距離を充分確保する必要がある。

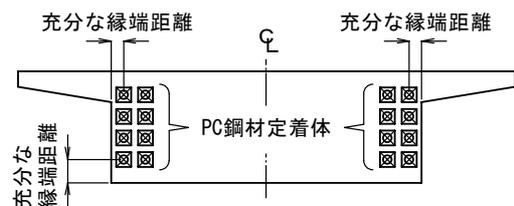


図-20 定着体の縁短距離

- (2) 特にスパイラル筋についてはその補強効果が優れている事が分かっており、必要に応じて採用すると良い。場合によっては、FEM 解析等により、必要な補強鉄筋量を算出する。

#### 参考文献

- 1) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志: 実構造物コンクリートのひび割れ部における塩分浸透, 土木学会論文集, Vol. 62, No1, pp38-51, 2006, 2