

## 主桁間隔の狭いPCI形桁における外ケーブルの桁間定着に関する実験的検討

西日本旅客鉄道(株) 正会員 工修 ○ 湯浅 康史  
 (株)エスイー 葛田 紘一郎  
 ジェイアール西日本コンサルツ(株) 工修 木戸 弘大  
 神戸大学大学院 正会員 工博 森川 英典

Abstract : For strengthening existing PC-I section girders by external cables, the cables are generally anchored to the concrete blocks fixed on each main girder web. However some of railway PC-I bridges have narrow distance between adjacent main girders, then, in this case, the usual anchor blocks cannot be applied. So, this paper describes the original anchorage system which is composed of the concrete block settled at the narrow space between adjacent main girders. The loading tests for specimens considering several parameters were conducted, so that the basic characteristics of anchorage performance were clarified in cooperation with FEM analysis.

Key words : strengthening, external cable method, anchorage, shear transfer strength, PC-I section girder

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート桁において、PC鋼材の腐食や破断が生じて補強が必要となった場合、プレストレスを追加導入する外ケーブル補強が用いられることが多い。PCI形桁に外ケーブル補強を行う場合には、定着体は主桁ウェブ側面にコンクリートなどにより設ける方法が一般に用いられ、ウェブを貫通したPC鋼棒などの緊張力により固定される。しかし、鉄道橋における多主PCI形桁は主桁間隔が狭く、従来の定着体を設けることが困難である。そこで、図-1に示すように、桁間の下フランジ部にコンクリート製の定着体をPC鋼棒で縦締めして構築し、下フランジハンチ面の摩擦抵抗力により外ケーブルの緊張力に抵抗する定着体（以下、桁間定着方式）を考案した。本論文では、この定着体の有効性を縮尺模型による載荷実験により検証し、3次元FEM解析によりプレストレスの伝達状況について確認した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体および載荷実験の概要

供試体は、橋長約45mの単線4主PCI桁橋に桁間定着方式を適用することを想定し、1/2の縮尺で定着体と主桁を切り出した形状・寸法とした。また、載荷は縦型圧縮試験機を用い、供試体は実橋の状態から90°回転させた形で実験を行うこととした。基準供試体(供試体No.1)の形状および拘束・補強治具と載荷の概要を図-2および図-3に示す。主桁および定着体はPC鋼棒の支圧に対する補強鉄筋を除き、ともに無筋コンクリートとした。ハンチ面に垂直力を作用させ、定着耐力をハンチ面での摩擦抵抗により確保するため、実験では以下に配慮した。①主桁ウェブ側面はテフロン板を添付することで定着体と縁を切ることを基本とした。②定着体と反力プレート間で力を伝達させないように隙間を設けた。③主桁ハンチ面はチップング処理を行った。

また、定着体を固定するPC鋼棒（以下、固定用PC鋼棒）を緊張した場合や載荷によって、定着体が主桁を押し広げようとする水平分力が作用することや主桁のひび割れ破壊が想定されたため、図-3に示す拘束・補強治具

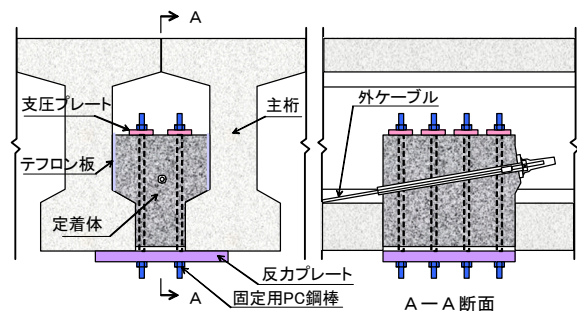


図-1 桁間定着方式の適用イメージ

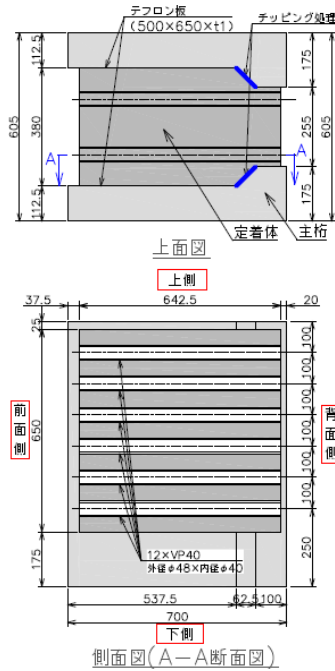


図-2 基準供試体の形状

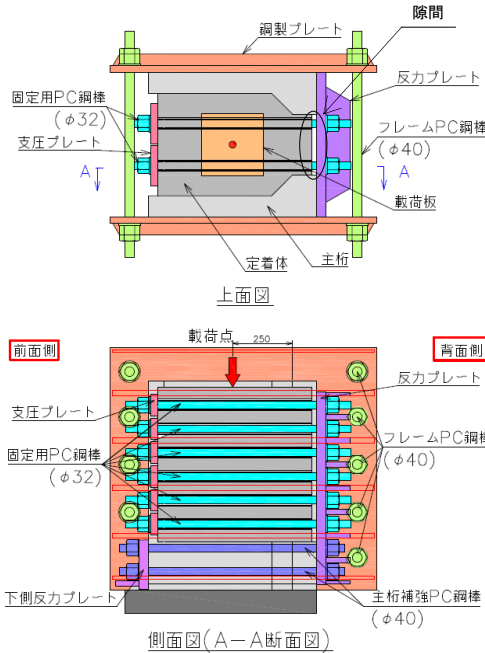


図-3 拘束・補強道具と載荷の概要

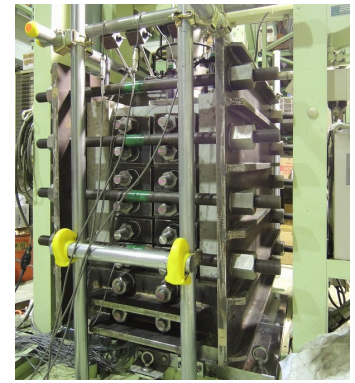


写真-1 載荷実験状況 (前面側)

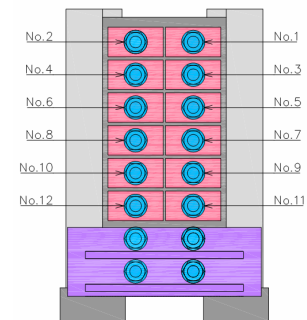


図-4 固定用PC鋼棒位置図

を設けた。水平分力に対しては、主桁両側面に配置した鋼製プレートを合計9本のPC鋼棒(以下、フレームPC鋼棒)で連結して供試体を拘束した。また、主桁のひび割れに対しては主桁下側に4本のPC鋼棒(以下、主桁補強PC鋼棒)を設置し、主桁を拘束して補強した。なお、実橋では外ケーブルを曲げ上げて設置するため、定着体には外ケーブル張力の水平分力のみが作用することとなるが、本実験では定着体に対し鉛直に作用させた。載荷実験状況を写真-1に示す。

### 2.2 固定用PC鋼棒の緊張方法

固定用PC鋼棒の緊張は、PC鋼棒1本あたりの初期緊張力(416.7kN)を有効係数0.6<sup>1)</sup>として定め、各PC鋼棒に対し1回の緊張作業で初期緊張力を導入した。また、緊張作業は図-4に示すNo.1のPC鋼棒から順に行い、グラウトは充填しないこととした。なお、固定用PC鋼棒以外のPC鋼棒は拘束のためであるので、ナットを手締めしたのみで、プレストレスは導入していない。

### 2.3 供試体の種類

定着耐力に影響する要因を把握することを目的とし、供試体を表-1の5種類とした。No.1は基準供試体である。No.2は、主桁ウェブ側面の摩擦の影響を確認するため、主桁ウェブ側面においてテフロン板を用いた縁切りを行わなかった。No.3, No.4は、ずれ止め鉄筋の影響を確認するため、ハンチ面垂直に70mm間隔でD22またはD16のずれ止め鉄筋を16本配置した。No.5はハンチ幅の影響を確認するため、基準供試体のハンチ幅を87.5mmに25mm拡大し、主桁ウェブの幅を低減した。

本実験で使用した鋼材の材料物性、コンクリートの配合を表-2、表-3に示す。なお、本実験において固定用PC鋼棒に導入したプレストレスがハンチ面のみで伝達すると仮定

表-1 供試体一覧

| 供試体 No. | 目標緊張力 (固定用PC鋼棒) (kN) | ウェブ 付着 | ずれ止め 鉄筋    | ハンチ 幅 (mm) | ウェブ 幅 (mm) | ハンチ面 垂直応力 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------------------|--------|------------|------------|------------|--------------------------------|
| 1       | 3000                 | 無      | 無          | 62.5       | 112.5      | 18.5                           |
| 2       | 3000                 | 有      | 無          | 62.5       | 112.5      | 18.5                           |
| 3       | 3000                 | 無      | 有 (D22@70) | 62.5       | 112.5      | 18.5                           |
| 4       | 3000                 | 無      | 有 (D16@70) | 62.5       | 112.5      | 18.5                           |
| 5       | 3000                 | 無      | 無          | 87.5       | 87.5       | 13.2                           |

表-2 鋼材の材料物性

| 鋼材   | 呼び名  | 記号   | 降伏点 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) |
|------|------|------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| PC鋼棒 | φ 32 | B種1号 | 1015                     | 1136                      | 200                        |
|      | φ 40 | B種1号 | 992                      | 1132                      | 200                        |

表-3 コンクリート配合

| 供試体 部位 | 呼び強度 | セメントの 種類 | 水セメント 比 W/C (%) | 粗骨材 最大寸法 Gmax (mm) | スランプ スランプフロー sl (cm) | 空気量 Air (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |        |       |       |              |
|--------|------|----------|-----------------|--------------------|----------------------|-------------|--------------|-------------------------|--------|-------|-------|--------------|
|        |      |          |                 |                    |                      |             |              | 水 W                     | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 高性能 AE減水剤 Ad |
| 主桁     | 40   | N        | 42              | 20                 | 18                   | 4.5         | 49.5         | 174                     | 414    | 842   | 886   | 2.9          |
| 定着体    | 60   | H        | 30              | 20                 | 50                   | 3           | 49           | 185                     | 617    | 755   | 810   | 10.49        |

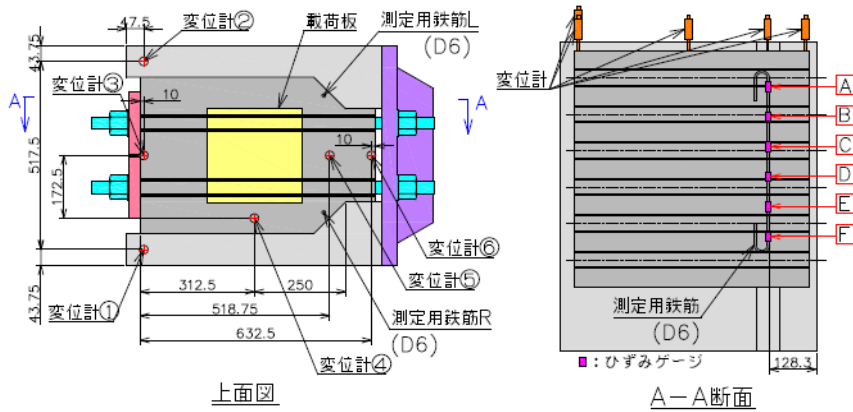


図-5 変位および内部ひずみの測定位置

した場合、ハンチ面に垂直に作用する応力は13~18N/mm<sup>2</sup>となり、既往の実験<sup>1),2)</sup>における応力(0~5N/mm<sup>2</sup>)と比較すると、垂直応力が大きい特徴がある。

## 2.4 測定項目

供試体の挙動を把握するために、载荷荷重、主桁および定着体上面の変位、各PC鋼棒のひずみ、定着体内部のひずみを測定した。ハンチ面での滑動を評価するには、変位は定着体下面で測定することが望ましいが、主桁補強PC鋼棒が設置されているため载荷点側上面で測定した。変位の測定位置を図-5に示す。なお、各PC鋼棒の張力はひずみゲージにより測定した。また、供試体No.3, 5は、定着体内のひずみを測定するため、図-5のように測定用鉄筋(D6)を埋設してそのひずみを測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 固定用PC鋼棒の緊張結果

緊張作業が終了した時点の固定用PC鋼棒の導入緊結張力を図-6に示す。1回だけの緊張作業であったことや支圧プレート設置面の不陸、ナット定着時のなじみなどの影響で、導入緊結張力は目標緊結張力に対してばらつきが生じた。なお、定着体コンクリートの打設から固定用PC鋼棒の緊張までの期間は15日以上であり、いずれの供試体においても固定用PC鋼棒の緊張後、その当日中に载荷実験を行った。

### 3.2 载荷荷重およびひび割れ性状

定着耐力の計算値は以下の2つの方法を定義し算出した。あわせて参考に、はく離開始荷重を算出した。

- ・摩擦耐力：プレストレスにより、ハンチ面に垂直に作用する力に対して摩擦係数(0.6)を乗じた<sup>1)</sup>。
- ・せん断伝達耐力：コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>によりハンチ面のせん断伝達耐力を算出した。(f<sub>cd</sub>=50.3(N/mm<sup>2</sup>), b=1/2, γ<sub>b</sub>=1.0)
- ・はく離開始荷重：载荷によりハンチ面上縁の作用応力度が0N/mm<sup>2</sup>となる载荷荷重を算出した。

载荷実験の結果、主桁が無筋であるためすべての供試体で、写真-2のように主桁のひび割れが生じていたが、図-3に示す拘束・補強治具を設置していたため継続して载荷することができた。しかし、定着体の回転により固定用PC鋼棒とフレームPC鋼棒が接触したため、滑動等による破壊が生じるまでは载荷できなかった。このため、実験における最大荷重は「载荷終了荷重」と称した。実験終了後に、定着体の滑動の有無を目視で確認したところ、いずれの供試体も定着体と主桁で縁切れの形跡は認められず、定着体の滑動は生じなかったものと考えられる。なお、滑動を前提として供試体を計画したが、実験では滑動しなかったため、供試体の条件の違いによる定着耐力の評価は困難であった。

実験結果を表-4に示す。供試体No.1, 2, 5の载荷終了荷重は摩擦耐力やせん断伝達耐力を大きく上回り、

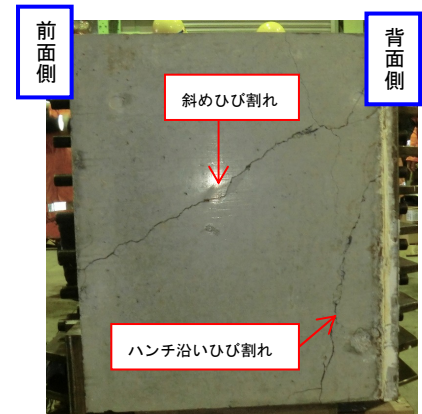


写真-2 载荷実験後の状況

(供試体 No. 1)

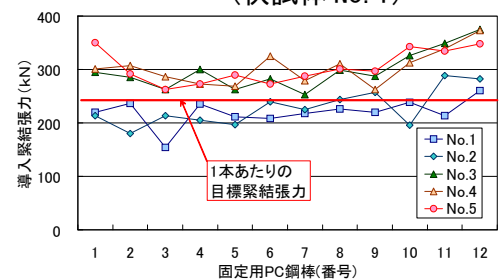


図-6 固定用PC鋼棒の緊張結果



計算値に対して十分な定着耐力を有することを確認した。また、ずれ止め鉄筋を配置した供試体 No.3, 4については、載荷荷重がせん断伝達耐力に達しなかったが摩擦耐力以上の載荷を行い、この範囲において定着耐力を有することを確認した。これより、設計上は摩擦耐力を用いて安全側に定着耐力を評価できると考えられる。一方で、供試体No.1, 2において、載荷終了荷重と定着耐力の計算値の比は1.6~1.9と大きな差異があり、耐力式は過小評価している可能性がある。既往の研究<sup>1)</sup>において、最大荷重はせん断伝達耐力により評価できることが示され、チッピング処理を行った垂直応力1.3N/mm<sup>2</sup>の供試体は、最大荷重とせん断伝達耐力の比が1.3程度であった。本実験ではこの範囲を大きく超える垂直応力(約18N/mm<sup>2</sup>)を与えており、耐力式が過小評価した1つの原因として大きい垂直応力の影響が考えられる。

主桁のひび割れ性状は全供試体において、写真-2のように、下側のハンチに沿うひび割れと前面側の下側反力プレートと背面側の反力プレート上側を結ぶ斜めのひび割れの2つの形式が見られた。

主桁のひび割れ性状は全供試体において、写真-2のように、下側のハンチに沿うひび割れと前面側の下側反力プレートと背面側の反力プレート上側を結ぶ斜めのひび割れの2つの形式が見られた。

### 3.3 荷重変位曲線

定着体前面の変位量から主桁前面の変位量を減じたものを相対変位 (=変位計③-(変位計①+②)/2) とし、荷重と相対変位量の関係を図-7に示す。変位計は上面に設置したため、変位にはハンチ面での滑動の他に、主桁および定着体の弾性変形や回転変形、主桁のひび割れの影響が含まれる。また、供試体No.2において、1200kN付近で変位が減少しているが、これは変位計位置において表面剥離が生じたためである。図-7を見ると、各供試体において載荷に伴い、一時的に荷重が低下して変位が急伸する挙動や剛性の低下が生じていることが確認できる。これらは、その後さらに荷重が増加し続けていることを考えると、主桁の脆性的なひび割れ発生の影響であると推察される。なお、ハンチ面で滑動する際には、荷重の低下とともに変位が急増し、その後荷重が増加しないことが想定される<sup>1)</sup>が、さらに荷重が増加し続けていることから、変位の急増は滑動の影響ではないと考えられる。供試体No.2はその他と比べ、主桁のひび割れが生じた初期の荷重が大きい。No.2は主桁側面にテフロン板を介在させていないため、主桁に作用する力が分散し、ひび割れが生じにくかったものと推察される。また、No.3, No.4については500kNから1000kN程度での変位が小さい。これはずれ止め鉄筋の影響によるものと考えられる。

### 3.4 主桁補強PC鋼棒・フレームPC鋼棒の張力

主桁補強PC鋼棒の4本の全張力と荷重、およびフレームPC鋼棒の全張力と荷重の関係を図-8、図-9に示す。なお、固定用PC鋼棒緊張後の張力を0kNとし、載荷による変化を測定した。また、供試体No.5は測定機器の設定

表-4 実験結果

| 供試体 No. | コンクリート圧縮強度 (材令28日)      |                          | 導入緊結張力 (kN) | 計算値       |              |              | 実測値<br>載荷終了荷重 (kN) |
|---------|-------------------------|--------------------------|-------------|-----------|--------------|--------------|--------------------|
|         | 主桁 (N/mm <sup>2</sup> ) | 定着体 (N/mm <sup>2</sup> ) |             | 定着耐力      |              | はく離開始荷重 (kN) |                    |
|         |                         |                          |             | 摩擦耐力 (kN) | せん断伝達耐力 (kN) |              |                    |
| 1       | 50.3                    | 84.5                     | 2641        | 1120      | 1045         | 1308         | 1993               |
| 2       |                         |                          | 2743        | 1164      | 1065         | 1358         | 1894               |
| 3       |                         |                          | 3576        | 1517      | 2450         | 1771         | 1896               |
| 4       |                         |                          | 3637        | 1543      | 1860         | 1801         | 1793               |
| 5       |                         |                          | 3652        | 1549      | 1455         | 1809         | 1819               |

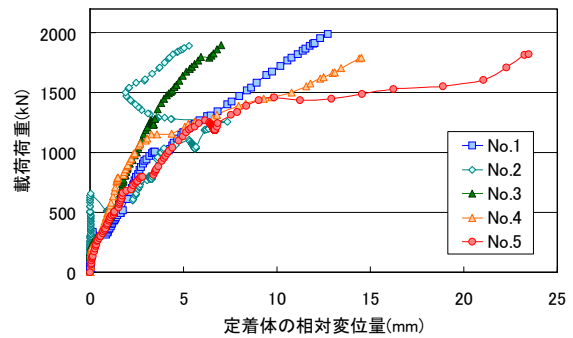


図-7 定着体前面の相対変位 (=③-(①+②)/2)

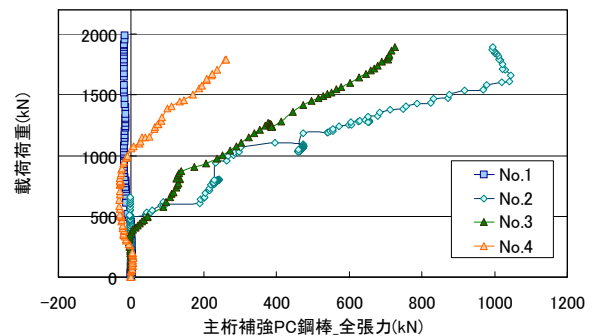


図-8 主桁補強 PC 鋼棒の張力

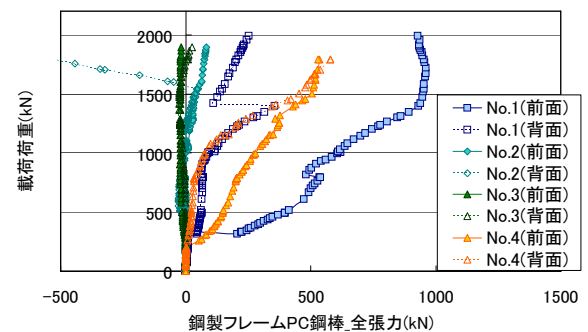


図-9 フレーム PC 鋼棒の張力

不具合により測定できなかった。図-8、図-9をみると、No.2, 3は主桁補強PC鋼棒の張力は500kN付近を境に増大しているが、フレームPC鋼棒の張力は変化が小さい状況であった。一方、No.1, 4は300kN付近でフレームPC鋼棒の張力が増大しているが、主桁補強PC鋼棒の張力は変化が小さい状況であった。载荷中のひび割れの発生状況を確認できなかったため、考察が困難であるが、写真-2に示すように無筋である主桁の破壊形式に依存したものと推察される。なお、主桁補強PC鋼棒の全張力およびフレームPC鋼棒の前面と背面の全張力は、おのおの最大で1000kN, 1200kNの力が作用することを確認した。実構造物での適用の際には、これらを適切に考慮する必要があると考えられる。

### 3.5 定着体内部のひずみ

No.3の定着体の内部ひずみと荷重の関係を図-10に示す。上側に位置するL-B, R-A, R-Bは引張ひずみが発生した。これは、定着体の上側に発生したひび割れによるものと考えられる。下側に位置するR-D, R-E, R-Fは、载荷により圧縮ひずみが漸増するのみであった。ハンチ面で滑動が生じると、圧縮された応力が開放されることが想定されるが、このような挙動が確認できず、滑動は生じていないと推察される。なお、No.5も同様の状況であった。

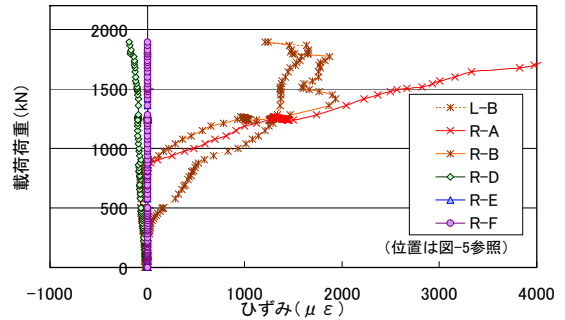


図-10 定着体内部のひずみ (No. 3)

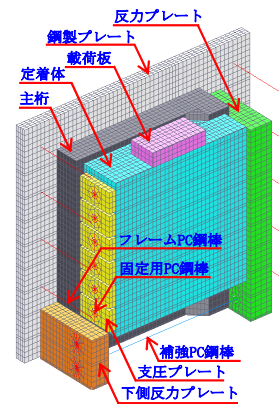


図-11 解析モデル図 (定着体俯瞰図)

表-5 材料特性

| 部材名称             | 弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------------------|---------------------------|-------|
| 主桁部              | 33.1                      | 0.167 |
| 定着部              | 38.5                      | 0.167 |
| PC鋼材(縦締め用 φ32mm) | 200.0                     | 0.3   |
| PC鋼材(拘束用 φ40mm)  | 200.0                     | 0.3   |

## 4. FEM解析概要

### 4.1 定着部の解析モデル

解析モデルは図-11に示すように、対称性を考慮し1/2モデルとした。各材料の寸法や配置、荷重の载荷位置、固定用PC鋼棒の導入プレストレス量などは供試体No.1を再現した。コンクリート部とPC鋼材の材料特性は表-5とし、応力ひずみ関係は線形とした。なお、弾性係数は圧縮強度毎の弾性係数<sup>3)</sup>から線形補間にて算定した。

### 4.2 主桁と定着体の境界条件

主桁と定着体の境界モデルは、図-12のように主桁ウェブと下フランジで異なるモデルを設定した。

境界モデル(A)：主桁ウェブと定着体間との境界は滑面とし、面直交方向にのみバネを設置し、面水平方向は滑りとした。この面直交方向のバネ値はテフロン材料条件から412N/mm<sup>3</sup>とした。

境界モデル(B)：下フランジと定着体間との境界は静止摩擦面としバネを設置した。このバネの概念を図-13に示す。面に直交する力が圧縮力るときには、面内二軸を剛なバネとし抵抗する。一方、面に直交する力が引張力るときには、面内二軸を極めて柔なバネとし、自由端のように挙動するようにした。

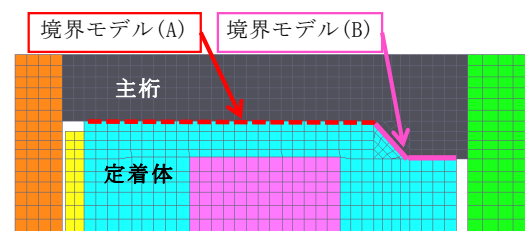


図-12 境界モデル (定着体平面図)

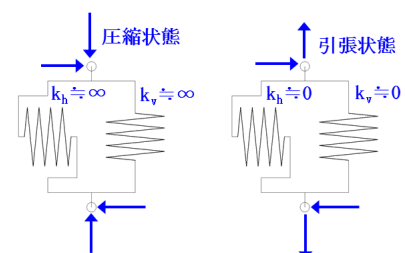


図-13 境界モデル(B)のバネ概念図

## 5. FEM解析結果

### 5.1 定着体の相対変位

定着体の相対変位量について、実験値と解析値の比較を図-14に示す。図より、335kNまで解析は実験を再現でき

ていることが分かる。しかし、実験において335kNで主桁のひび割れによると考えられる大きな変位が発生しており、解析ではコンクリートの応力ひずみ関係を線形としたことから、これ以降は実験を再現できていない。

5.2 プレストレスの伝達経路および伝達量

固定用PC鋼棒のプレストレス導入時のハンチ面周辺の最小主応力の矢線図を図-15に示す。なお、解析では引張応力を正としている。図より、プレストレスはハンチ面だけでなく、下フランジ側面にも伝達していることが分かる。これは、下フランジが反力プレートから受ける強い圧縮力により図-16のように変形しており、定着体と下フランジが圧着されるためであると考えられる。

また、プレストレス導入時のハンチ面と定着体との境界面直交方向の応力分布を図-17に示す。ハンチ面への作用応力は平均で11.1N/mm<sup>2</sup>であった。なお、プレストレスが全てハンチ面で伝達される場合の垂直応力の計算値は18N/mm<sup>2</sup>であり、プレストレスの一部が下フランジ側面を伝達したため、ハンチ面の垂直応力が想定より小さくなったと考えられる。また、下フランジの側面端部に発生した作用応力は平均で11.6N/mm<sup>2</sup>であり、ウェブへの作用応力は10<sup>-7</sup>~10<sup>-6</sup>N/mm<sup>2</sup>オーダーの大きさであった。

6. 結論

桁間定着方式の有効性を確認するため載荷実験を行うとともに、固定用PC鋼棒のプレストレスの伝達について検証するためFEM解析を行い、以下の知見が得られた。

- 載荷実験において、今回の載荷荷重の範囲ではハンチ面での滑動が生じなかったと考えられ、その載荷荷重は摩擦耐力の計算値を大きく上回った。このことから、既往の摩擦耐力式により安全側に定着耐力を評価できると考えられる。また、ハンチ面のせん断伝達耐力が計算値に比べ大きくなった原因の一つとして、作用する垂直応力が大きいことが考えられる。
- 載荷実験において、主桁のひび割れ発生後に供試体を拘束するPC鋼棒に大きな力が発生することを確認した。実構造物への適用の際にはこれを考慮する必要があると考えられる。
- FEM解析において、プレストレスの一部は下フランジ側面に伝達しており、ハンチ面の垂直応力が想定より小さくなることを確認した。

謝辞 本論文をまとめるにあたり、「コンクリート構造物の保守管理に関する調査・検討委員会」((公社)日本材料学会、西日本旅客鉄道(株))の委員各位より多数のご助言を賜りました。深く感謝の意を表します。

参考文献 1) 浅井ら：外ケーブル補強工法定着部に関する検討，土木学会論文集E Vol.63 No.2,223-234,2007.4, 2) 塩川ら：設計せん断伝達耐力式の提案，V-429，土木学会第49回年次学術講演会，1994.6, 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012.3

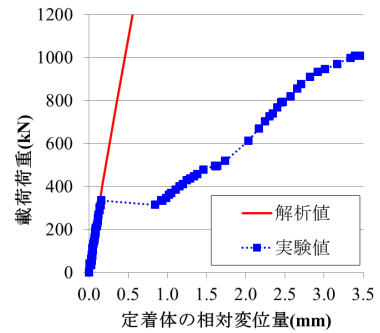


図-14 解析結果と実験値の比較 (No. 1)

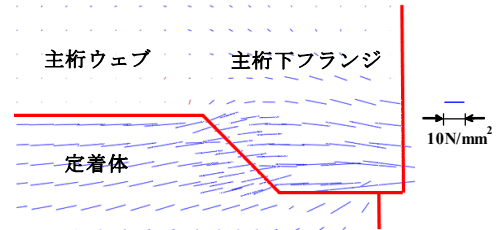


図-15 ハンチ面周辺の最小主応力矢線図

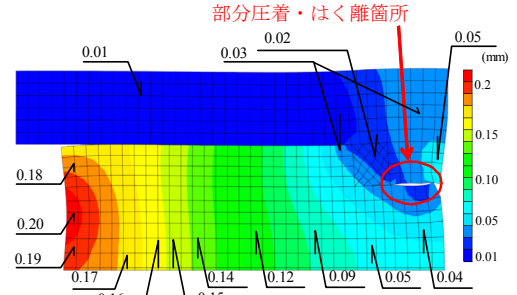


図-16 中央断面変形図

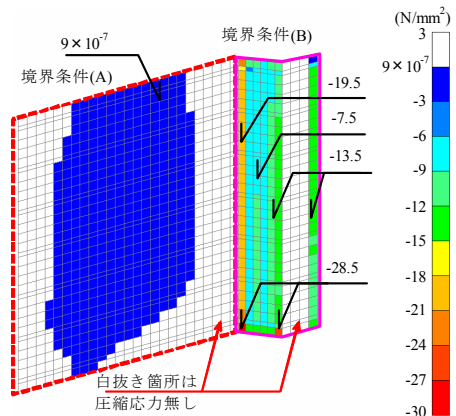


図-17 主桁境界面直交方向応力分布