

## 論文 鋼トラスウェブPC橋の圧縮斜材定着部に関する研究

正司 明夫<sup>\*1</sup>・坂西 馨<sup>\*2</sup>・江口 信三<sup>\*3</sup>・園田 恵一郎<sup>\*4</sup>

**要旨：**鋼トラスウェブPC橋において、コンクリート床版と鋼トラス材との接合部はトラス構造において重要な部位である。本接合部の強度特性は軸圧縮・引張特性および曲げ・せん断特性に分けられるが、本研究は主としてコンクリートの支圧強度に支配される軸圧縮特性に着目している。ここで取り上げた圧縮斜材定着構造は鋼管のエンドプレートまたは充填コンクリートを介してコンクリート床版に圧縮力を伝達させる4形式であり、試験計による橋梁での接合部モデルに対する圧縮試験ならびに3次元弾塑性FEM解析により、定着部近傍でのコンクリート床版のひび割れ特性ならびに耐荷力特性について検討した。

**キーワード：**複合橋梁，定着部，ひび割れ，耐荷力

## 1. はじめに

上，下床版をコンクリート製とし斜材を鋼製とした複合トラス橋は，1984年にアルボア橋<sup>1)</sup>が，続いて，最大支間長110mのブローネ橋<sup>2)</sup>がフランスで完成している。我が国においては，那智勝浦道路の木ノ川高架橋<sup>3)</sup>，第二東名高速道路の巴川橋，猿田川橋<sup>4)</sup>が現在施工中である。

本構造は，通常のプレストレストコンクリート橋と比較し，橋梁上部工の自重を軽減させることが可能であり，煩雑となりやすいウェブの施工の省力化が可能となる等の利点を有しており，工費低減あるいは工期短縮が期待できる構造として注目されている。

トラス構造における重要な部位として，鋼トラス部材とコンクリート床版との接合部があるが，わが国ではこの種の複合橋梁の接合部に対する設計規準が確立されておらず，実施設計に当たっては，それぞれの担当機関により提案された接合構造に対する疲労試験や耐荷力試験の実施<sup>5)</sup>によって安全性が確認されているのが現状である。

本研究では，軸引張力に対しては埋め込みPC

鋼棒によるプレストレス力に対処させ，軸圧縮力はフランジと端部充填コンクリートによって対処する工法を考案し，その一段階として，鋼部材からの軸圧縮力によるコンクリート床版内への応力集中をできるだけ少なくさせる定着形式を見出すことを本研究の目的としている。

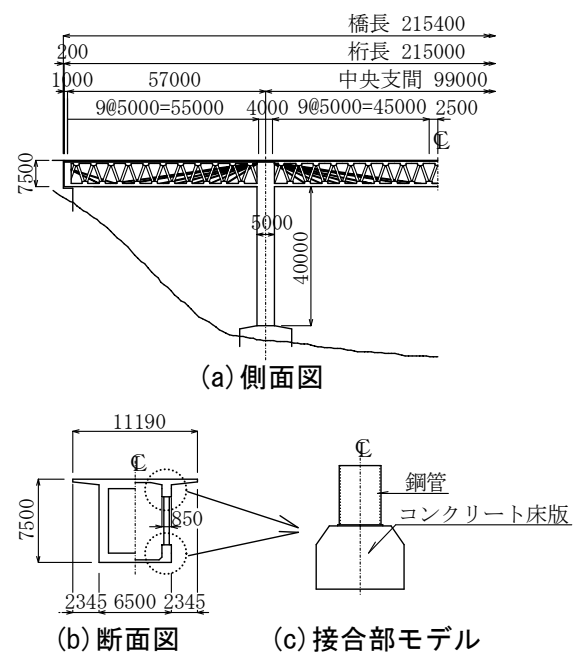


図-1 検討対象橋梁

\*1 オリエンタル建設(株) 本社第2技術部主任研究員 (正会員)

\*2 オリエンタル建設(株) 本社第2技術部 工修 (正会員)

\*3 オリエンタル建設(株) 本社技術研究所 (正会員)

\*4 大阪工業大学 八幡工学実験場教授 工博 (正会員)

本研究の予備作業として、図-1(a)に示す中央径間長 99m の 3 径間連続ラーメン橋を対象に試設計を行い、鋼管径は  $\phi 500\text{mm}$ 、鋼管厚は 9、12mm、ならびに図-1(b)に示すような断面形を得、これに基づいて検討する定着部の構造モデル(図-1(c))を選定した。

## 2. 検討した定着部の構造形式

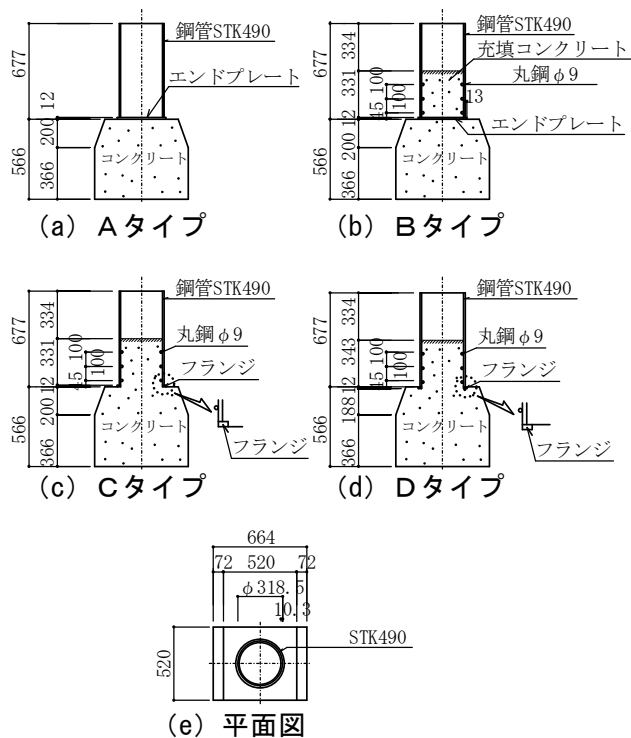


図-2 検討モデル

図-1の試設計橋梁の縮尺 2/3 の定着部の構造モデルを図-2に示す。本検討では、鋼管取り付け部（コンクリート床版上面から 200mm）の圧縮性状の確認が目的であるため、200mm より下面側は、鉛直方向応力が一定となる程度の厚さを確保し、下面側で先行して破壊しないように鉄筋で十分に補強したモデルとした。したがって、床版の変形による影響は考慮していない。

エンドプレートを介して鋼管から床版に圧縮力を伝達する形式を A タイプとし、それに加え、端部の鋼管内にリング状の丸鋼リブを 3 段溶接し、コンクリートを充填したものを B タイプとし、B タイプよりエンドプレートを取り除い

たものを C タイプ、さらに C タイプと同じ形状で、鋼管のフランジ厚をコンクリート床版内に埋め込んだものを D タイプとした。

## 3. コンクリート充填鋼管部の検討

### 3.1 実験概要

鋼管にコンクリートを充填した B, C, および D タイプの鋼管内の丸鋼リブの効果を調べるために、図-1の試設計橋梁の縮尺 1/2 の要素試験モデル(図-3)を用い、5000kN アムスラー試験機で圧縮実験を行った。荷重はコンクリート上端に等分布荷重とし、下端は鋼管のみで支持した。

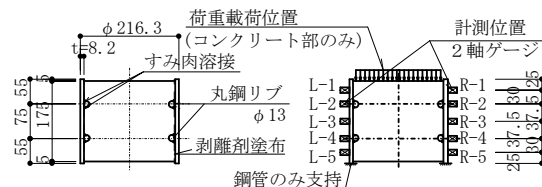


図-3 要素試験体（2段リブ）

### 3.2 使用材料

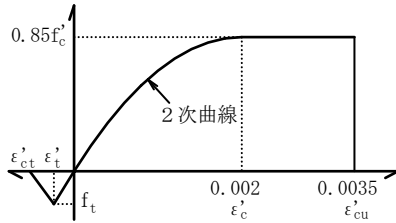
コンクリートの物性を表-1に示す。骨材の最大寸法は 10mm とし、鋼管は STK490、丸鋼は SD345 を使用した。

表-1 コンクリートの物性

| 圧縮強度<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kN}/\text{mm}^2$ ) | ポアソン比 |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 38.9                               | 2.71                               | 26.0                                | 0.19  |

### 3.3 実験結果および FEM 解析結果

汎用ソフト「DIANA」により軸対称 3 次元 FEM 弾塑性解析を行った。コンクリートの 1 軸等価応力-ひずみ関係が図-4 になるような 3 次元構成モデルを用いた。また、tension softening は無視し ( $\varepsilon'_{ct} = \varepsilon'_t$ )、分散ひび割れモデルを使用した。なお、コンクリートの破壊規準には Drucker-Prager 規準と tension cut-off モデルを用いた。鋼管内面と充填コンクリートとの接触面には摩擦伝達を考慮できる interface 要素を導入し、離間時に力を伝達させないようにした。

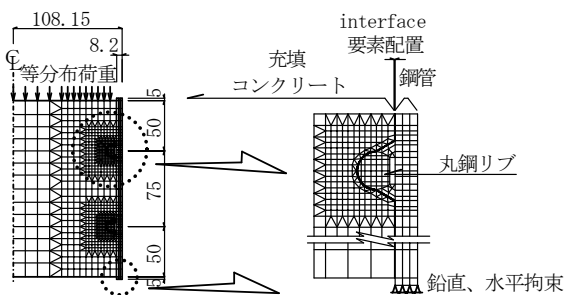


図－4 応力－ひずみ関係

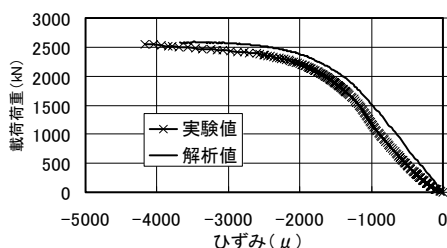
interface 要素とは、要素の中心線に対し、接線方向相対変位を  $\Delta u_t$ 、せん断応力を  $\sigma_t$ 、接線剛性を  $D_t$ 、垂直方向相対変位を  $\Delta u_n$ 、垂直応力を  $\sigma_n$ 、垂直方向剛性を  $D_n$  とした場合、式(1)の応力－相対変位関係で表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_n & 0 \\ 0 & D_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

摩擦伝達はクーロン則に従い、作用するせん断力が摩擦抵抗力を上回った場合、上回ったせん断力に抵抗しないものとした。摩擦係数は実験では剥離剤を塗布したため、小さな値  $\mu=0.01$  とした。要素分割、拘束条件および荷重載荷方法を図－5に示す。鋼管および鉄筋の応力－ひずみ関係は材料試験の結果を用いた。図－6に図－3に示す R-3 の鉛直方向圧縮ひずみの実験結果と解析結果を示すが、両者はよく対応している。



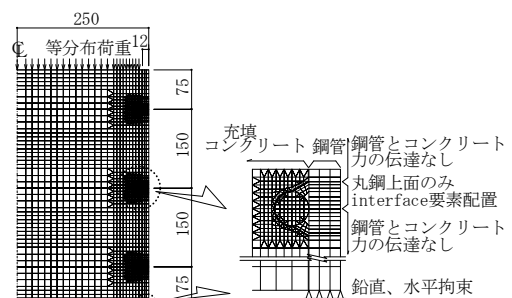
図－5 軸対称3次元FEM要素分割



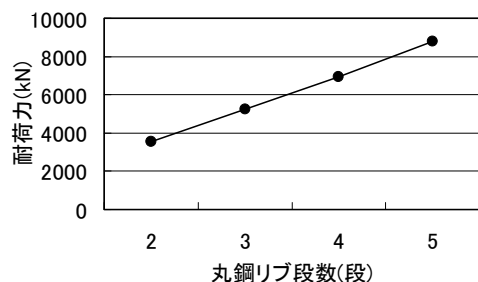
図－6 実験結果と解析結果の比較

### 3.4 実橋梁への適用性

本研究では、1/2 モデルの鋼管径で、静的載荷実験を行ったが、実際の橋梁で丸鋼リブの段数を決定する場合、自己収縮、乾燥収縮や繰り返し応力等で鋼管と充填コンクリート間で肌隙が生じる可能性がある。したがって、この肌隙を考慮しておくことが安全側の設計となるため図－5に示す解析モデルにおいて、鋼管と充填コンクリートが鉛直に接する部分および丸鋼リブの下面は肌隙が生じているものとし、図－7に示す解析モデルを用い、丸鋼リブの段数により、耐荷力がどのように変化するかを調べた。また、肌隙部のモデル化に関しては、荷重の伝達がないものとして、2重節点としている。拘束条件、荷重載荷方法は3.3と同様としたが、充填コンクリートおよび丸鋼リブの耐荷力を算定することが目的であるため、鋼管は弾性部材として取り扱った。コンクリートは圧縮強度  $40\text{N/mm}^2$  とし、3.3と同様の非線形要素とした。解析結果を図－8に示す。図に示すように、解析を行った段数の範囲内では、丸鋼リブの段数と耐荷力が比例しており、設計軸力に対して丸鋼リブの段数を増減させることで対応できることが確認できた。



図－7 解析モデル



図－8 解析結果

## 4. 定着部圧縮試験

### 4.1 使用材料

使用材料は、鋼管は STK490、鉄筋は SD345 とした。実構造物では、通常、設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$  以上のコンクリートが使用されることが考えられるが、本実験では 4 タイプのひび割れ性状および耐荷力の差を明確にするために  $20\text{N/mm}^2$  程度とした。コンクリートの物性を表-2 に示す。

表-2 使用材料

| 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kN/mm}^2$ ) | 摘要      |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------|
| 22.1                        | 2.2                         | 23.0                         | A, Bタイプ |
| 28.7                        | 2.5                         | 25.8                         | C, Dタイプ |

### 4.2 供試体の製作

供試体は、実施工での配置角度を考慮し、供試体を傾斜させコンクリートの打設を行い製作した。

### 4.3 実験方法

図-2 の検討モデルに対して 5000kN アムスラー試験機による圧縮載荷実験を行った。鋼管に一樣な圧縮応力を与えるために硬質ゴム板を載荷面に配置し、局部座屈を防止するために端部を補強した。載荷プログラムは、鋼管内側の応力が一樣とした場合に、コンクリートの目標強度  $20\text{N/mm}^2$  になる荷重 1600kN を基準軸力とし、最初に 400kN での載荷・除荷に続き、1600kN での載荷・除荷の後に、供試体の破壊まで（ただし、試験機的能力まで）単調載荷した。

### 4.4 コンクリート打設方向の影響

B タイプにおける鋼管のひずみの計測点および計測値を図-9、図-10 に示す。

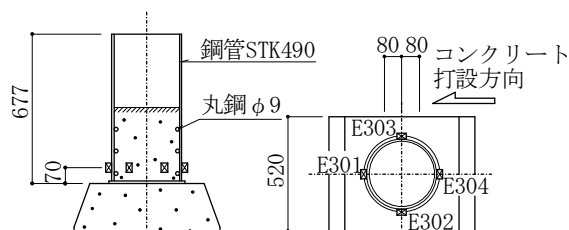


図-9 ひずみ計測点

図-10 より、コンクリート打設時に上面となる部分(E304)においては、鋼管のひずみが他の位置と比較して大きくなっており、鋼管と充填コンクリートが離間していると考えられる。この結果からも、鋼管内にリブとして配置する丸鋼の設計においては界面の肌隙を考慮する必要性が指摘できる。

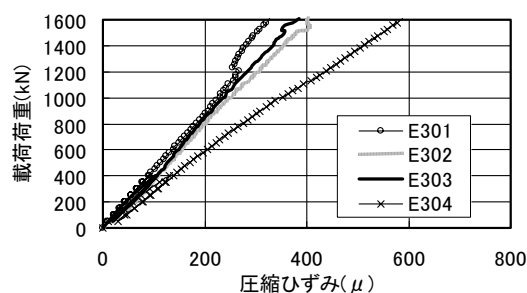


図-10 鉛直ひずみ

### 4.5 コンクリート床版の表面ひび割れ

#### (1) 実験結果と FEM 解析

B タイプにおける最終荷重載荷後のコンクリートのひび割れパターンを図-11 に示す。荷重 1600kN で初期ひび割れが鋼管の円周方向に入った。また、3600kN 時に四隅の法線方向のひび割れを観察した。他のタイプでの円周方向のひび割れ発生荷重は A タイプ 1500kN, C タイプ 2600kN で、D タイプは発生しなかった。四隅の法線方向のひび割れ発生荷重は、A タイプ 2400kN, C タイプ 3600kN, D タイプ 3700kN であった。

鋼管端付近におけるコンクリート床版の表面ひずみの計測点を図-12 に示す。FEM 弾塑性解析には軸対称 3 次元ソリッド要素を用いた。B タイプにおける要素分割、拘束条件、荷重載荷方法を図-13 に示す。

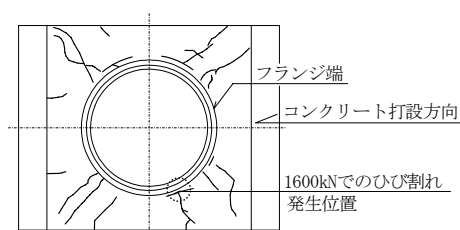


図-11 コンクリート床版表面のひび割れ図

鋼フランジとコンクリート床版の界面には 3.3 と同じ interface 要素を用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係は図-4 に示したものを、コンクリート床版部の tension softening は、 $\varepsilon'_{ct} = \varepsilon_{sy}$  (ただし  $\varepsilon_{sy}$  : 鉄筋の降伏ひずみ) とした。図-14 に B タイプの法線方向ひずみの実験値と解析値の比較を示すが、摩擦係数を  $\mu = 0.01$  としたものがコンクリート打設時の上側に位置する実験値(C103)に最もよく対応していた。載荷荷重 800kN 程度までの解析値が実験値より小さくなっているのは、解析では、粘着力を無視しているためと推察される。なお、コンクリート打設時の上側(C103)と側面(C104)のひずみ値の差はブリージング水等の通過によって発生した空隙によって見かけの摩擦係数に差が生じた結果であると思われる。A タイプ、C タイプは B タイプと同様の傾向を示し、C103 では摩擦係数を  $\mu = 0.01$  とした場合が実験値と解析値がよく対応した。また、D タイプは、摩擦係数を  $\mu = 0.15$  とした場合、実験値と解析値がよく対応した。これは、フランジがコンクリート表面より下にあり、ブリージング水等によって発生する空隙の影響を受けづらくなったためと推察される。

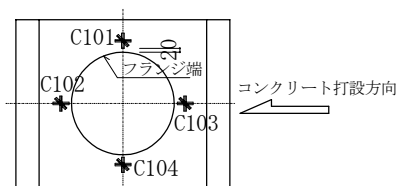


図-12 ひずみ計測点

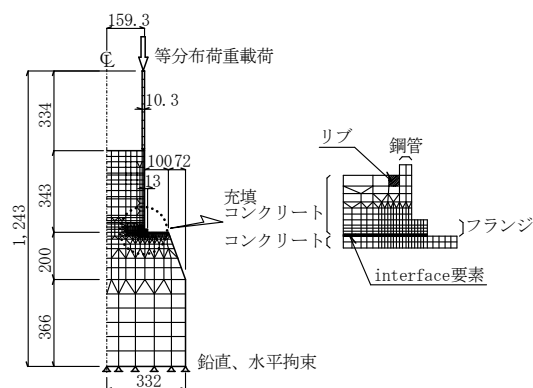


図-13 FEM解析モデル (Bタイプ)

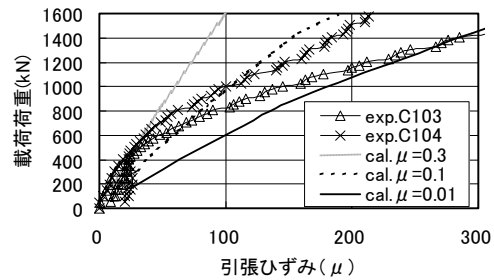


図-14 実験値と解析値の比較 (Bタイプ)

また、実験終了後、A タイプの鋼管を取り外したが、推察どおりコンクリート打設の際に上面となった部分に空隙の発生が偏っていることを確認した。

## (2) 表面ひび割れに対する考察

A, B タイプと C, D タイプはコンクリートの物性が異なるため、実験値を直接比較できない。したがって、FEM 解析により、コンクリートの物性を同一とし、4 タイプの比較を行った。また、摩擦係数は 4.5(1) より A, B, C タイプは  $\mu = 0.01$ 、D タイプは  $\mu = 0.15$  とした。図-15 は鋼管端付近の法線方向の最大引張ひずみである、載荷荷重 1275kN において、A タイプ 280  $\mu$ 、B タイプ 250  $\mu$ 、C タイプ 240  $\mu$  と差があまり生じない結果となったが、D タイプでは 180  $\mu$  と小さい引張ひずみであり、鋼フランジのコンクリート床版内への埋め込みは法線方向の引張ひずみを抑制する効果があることが確認できた。

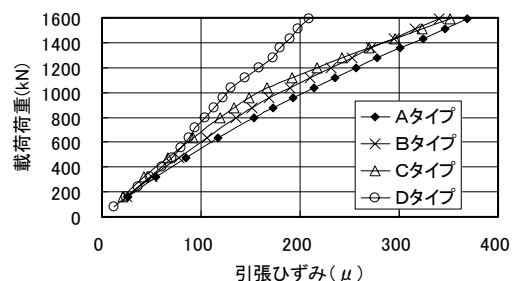


図-15 法線方向引張ひずみ

このような鋼管の法線方向の引張ひずみは鋼管の圧入によるコンクリート表面のいわゆるリップ(lip)変形によるもので、コンクリート床版の縁端形状により影響されると考えられる。

#### 4.6 耐荷力についての考察

床版の鉛直ひずみの計測位置を図-16に示す。また、Aタイプ、Bタイプの載荷荷重 1600kN までの鉛直方向圧縮ひずみを図-17に示す。発生ひずみは、Aタイプでは、鋼管周辺に集中しており、充填コンクリートを設けた Bタイプでは分散効果があることが確認できた。

4タイプとも試験機的能力限界(4700kN)以内では完全破壊には至らなかったが、Aタイプのみ、鋼管が床版内に約 7mm めり込んでおり破壊間近であった。4700kN は鋼管内側の断面積で除すれば約  $60\text{N/mm}^2$  になり、コンクリート強度の 2 倍以上になる。コンクリート標準示方書の支圧強度式で耐荷力を算定した場合 1.63 倍であり、4タイプとも十分な耐荷力を有していることが確認できた。

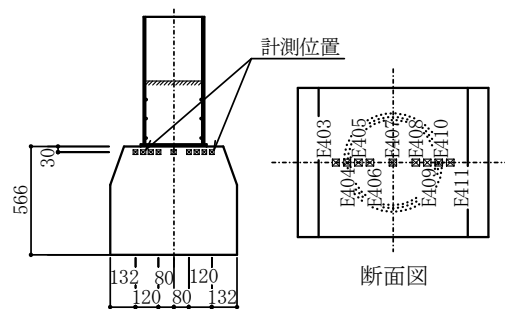
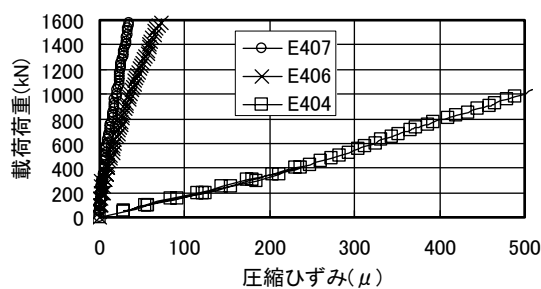
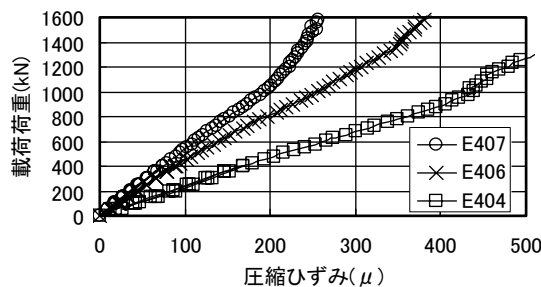


図-16 ひずみ計測位置



(a) Aタイプ



(b) Bタイプ

図-17 鉛直方向ひずみ

#### 5. 結論

本研究では、4タイプの定着構造の圧縮力伝達特性についてモデル実験ならびに FEM 弾塑性解析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 鋼管内面のリブの段数によって軸圧縮力のコンクリート床版への伝達を制御できる。
- (2) 鋼管の定着部近傍でのコンクリート床版表面に発生するひび割れは Dタイプを除き初期には鋼管の円周方向であり、荷重に従って 4タイプともに法線方向に発生する。
- (3) 円周方向の初期ひび割れの原因である法線方向の引張ひずみを小さくするには、(a)鋼フランジ厚の床版内への埋め込み(b)鋼フランジと床版との接触面の摩擦抵抗の増加、などが有効である。ただし、摩擦係数を増加させた場合、耐荷力に関する検討を行う必要がある。
- (4) いずれのタイプでも耐荷力はコンクリート標準示方書に規定されている支圧強度式に基づく算定値より大きかった。

#### 参考文献

- 1) NCB 研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，1996
- 2) Bernard.C et al. : Les viaducs du Boulonnais sur Une procédure de réalisation, Travaux n° 736 , pp.44-57, Nov. 1997
- 3) 山村正人：木ノ川高架橋ー鋼・コンクリート複合トラス橋ー，橋梁と基礎， pp.94，2002-8
- 4) 黒岩正ほか：巴川，猿田川橋の設計ー鋼トラスウェブ PC 橋，プレストレストコンクリート， Vol.41, No.2, pp41-47, 1999.3
- 5) 例えば，二井谷教治ほか：鋼トラスウェブ PC 橋格点部の実験的研究，構造工学論文集， Vol.46A, pp.1509-1490, 2001.3
- 6) 正司明夫ほか：複合トラス橋の圧縮斜材定着部に関する一考察，第 11 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集， pp147-152, 2001.11