

論文 エクストラードーズド橋のサドルにおける斜材の付着に関する実験的研究

三加 崇^{*1}・浅井 洋^{*2}・田添 耕治^{*3}・飯島 基裕^{*4}

要旨：エクストラードーズド橋の主塔部に斜材を定着する方法の一つとして簡易サドル構造を提案する。簡易サドル構造は、内管と外管からなる構造で定着具を必要としない。内管と外管は、ずれを生じない構造とし、グラウトとの付着により斜材の張力差を主塔へ伝達させる構造である。エポキシ樹脂、ポリエチレン被覆を覆した PC 鋼より線の付着性能を確認するため、無収縮モルタルとの付着試験を実施し、防錆被覆による差異を明らかにした。また、実橋への適用を考慮してエポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線を 27 本束ねた場合の付着試験を実施し、実験式を提案した。

キーワード：サドル構造, 付着, 表面被覆, PC 鋼より線

1. はじめに

エクストラードーズド橋は、主塔高さが斜張橋の半分程度であり、斜張橋と桁橋の中間に位置する構造である。エクストラードーズド橋の斜材を柱頭部で固定する方法としては、一般的に分離固定方式と貫通固定方式の 2 通りがある。

分離固定方式は、斜張橋で一般的に取り入れられている定着方法であり、主塔部に斜材 1 本ごとの定着部を設置する。通常の内ケーブル、外ケーブルの定着具を使用することができ斜材を個々に固定するため、左右の張力差の対応、斜材の取り替えや再緊張が容易に行える。しかし、定着具の配置や斜材の再緊張、交換などのスペースを確保するために主塔の高さや幅を広げたりする必要がある。

貫通固定方式は、エクストラードーズド橋で多く用いられている方法である。主塔部を貫通して連続したケーブルを配置して定着する構造である。そのため主塔部に定着具を設置するためのスペースが必要なく、主塔部の構造を簡素化することができる。また、主塔部の斜材間隔を小さくできることにより、主塔を高くせずに斜材の偏心量を確保することができる。しかし、斜材の左右の張力差により斜材が滑らない構造

としなければならないこと、斜材の交換などが分離固定方式の方が容易であることが課題として挙げられる。

本論文では、貫通固定方式(以下、サドル構造と称す)について、新しい構造の提案および、斜材の付着性能について述べる。

2. サドル構造

2.1 従来のサドル構造

サドル構造は、主塔本体に埋め込まれる外管と、貫通斜材を保護しグラウト材により一体となる内管、斜材の張力差を内管を通して外管さらには主塔に伝達させる定着体の 3 部材から構成される。(図-1) これまでの構造ではサドル内部における内管と外管の構造については大きな違いは見られないが、定着部の構造について様々提案されている。

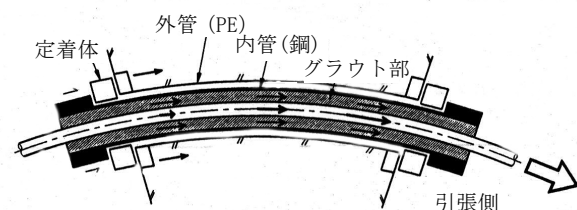


図-1 サドル構造¹⁾

*1 三井住友建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 三井住友建設（株） 技術研究所（正会員）

*3 三井住友建設（株） 九州支店

*4 三井住友建設（株） PC 設計部

例えば、主塔の外側で斜材を定着し、定着部から張力差を主塔に伝達する機構などである。

(図-2)しかし、定着部を構成する部品数が多いことから経済性および施工性の面においても改善する余地が残されている。

2.2 簡易サドル構造

サドル部の要求性能としては、斜材の左右の張力差により斜材が滑らないこと、斜材の防錆が確実にできること、斜材の取り替えが容易であることなどが挙げられる。ここでは、斜材の左右張力差を内管と外管にて受け持つ構造を提案する。

簡易サドル構造は、斜材の張力差をグラウトを介して内管および外管より主塔に伝達させる構造である。そのため斜材とグラウトの付着が重要となる。定着具は必要とせず、外管と内管の摩擦により斜材の定着を行う。大規模地震時には斜材と鋼管の摩擦力で受け持つことが出来ない可能性があるため、内管と外管のズレが生じないように端部をラップ状にし、管同士の間には滑り止めを設置する構造とする。簡易サドル構造を図-3に示す。

また、斜材は風、雨、紫外線、塩分等から保護しなければならない、防錆は2重構造以上とし防錆能力の向上を図る必要がある。保護管による防錆に加えて、充填材の使用、斜材の被覆などが考えられる。これまで防錆加工を施した斜材とグラウトの付着に関する研究については少ない。そこで、簡易サドル構造では斜材とグラウトの付着が重要であることより、防錆処理したPC鋼より線とグラウトとの付着特性について実験を行った。また、実橋への適用を目的として27本を束ねたPC鋼より線の付着特性を確認した。なお、サドル構造の内管は曲率を持っているが、今回は付着性能の確認のために直線の鋼管を使用した。

3. 1本のPC鋼より線による付着試験

3.1 試験体

本実験では、実橋で多く使用されている7本

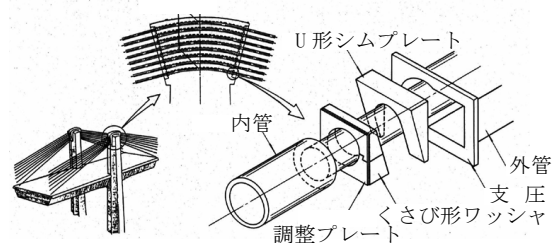


図-2 従来のサドル構造²⁾

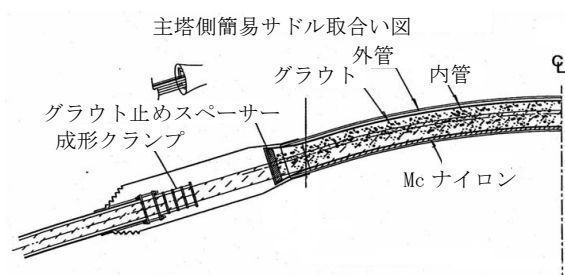


図-3 簡易サドル構造詳細図

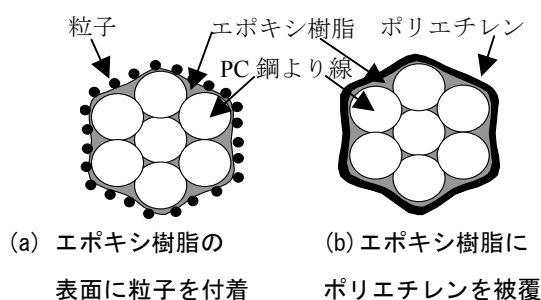


図-4 エポキシ樹脂表面加工形状

より15.2mmのPC鋼より線を使用した。実橋ではPC鋼より線を防錆するために被覆や塗装を行うことがある。一般にエポキシ樹脂を塗装したPC鋼より線が多く使用されている。また、付着力を向上させるために、PC鋼より線のエポキシ樹脂の表面に粒子を付着させてグラウトとの付着力を増加させたり、防錆を強化するためにPC鋼より線にポリエチレン被覆を施す場合がある。(図-4)エポキシ樹脂およびポリエチレン被覆を施した場合には従来のPC鋼より線と比較して凹凸が少なく付着力が低下すること予想される。そこで、PC鋼より線の塗装・被覆による付着特性を把握するために、エポキシ樹脂塗装およびエポキシ樹脂に粒子を付着させた塗装、両方の塗装にポリエチレン被覆(以下PE被覆)を施したものについて付着性能を確認した。パラメーターを表-1に示し、各試験体2本とした。

3.2 実験方法

実験方法としては、長さ 2000mm、外径 101.6mm の鋼管内に試験体を中央に配置し 60N/mm² の無収縮モルタル(W/C=35%)を充填した。

これまでの付着試験は、コンクリートの中に試験体を埋め込み、コンクリートを反力に取ることで試験体を引き抜く方法が行われている。今回は、簡易サドル構造により近い方法において PC 鋼より線と無収縮モルタル・鋼管との付着特性を確認するため、鋼管後部に直接反力を取り、PC 鋼より線を引き抜く方法とした。(図-5)

実験は PC 鋼より線の破断、もしくは緊張荷重の増加が認められなくなるまで载荷を行った。測定は、PC 鋼より線の自由端側移動量、および PC 鋼より線と鋼管のひずみの測定を行った。

3.3 実験結果

(1) 初滑荷重・破断荷重

初滑荷重および破断荷重を図-6に示す。初滑荷重は、土木学会基準における付着強度試験の最小測定値 0.01mm を越えたときの荷重とした。FG は緊張荷重 0.97Pu で初滑を確認し、0.2mm のすべり量で破断した。FB および NS では滑りは確認できなかった。NS, FG, FB は、緊張端側外部で破断した。FGPE, FBPE では、図-7に示すように初滑の確認後に滑り量が増加し破断までは至らなかった。また、すべりはエポキシ樹脂塗装とポリエチレン被覆の間で生じている。以上より PC 鋼より線に PE 被覆を施した場合には、初滑荷重が小さく、緊張荷重が増加しないため、PE 被覆をしたままでサドル部で定着することは難しいことが確認できた。

(2) 付着長

PC 鋼より線と鋼管が一体となって挙動する場合にはお互いのひずみは同じになる。付着長の範囲では PC 鋼より線のひずみは鋼管のひずみに比較して大きくなる。両ひずみが同じになる緊張端側からの距離を付着長とする (図-

表-1 PC 鋼より線塗装・被覆状況

記号	PC 鋼より線塗装・被覆状態
NS	塗装・被覆なし
FG	エポキシ樹脂
FGPE	エポキシ樹脂 + PE 被覆
FB	エポキシ樹脂 + 表面粒子付着
FBPE	エポキシ樹脂 + 表面粒子付着 + PE 被覆

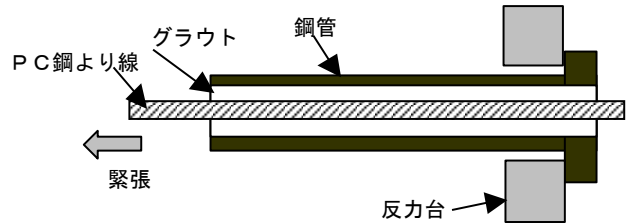


図-5 実験方法

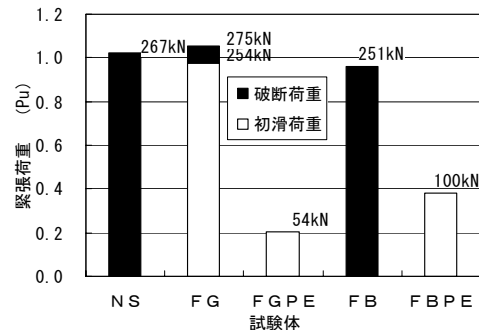


図-6 初滑荷重・破断荷重

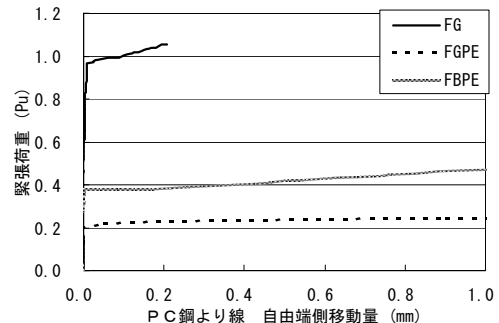


図-7 緊張荷重-移動量

8) 全体の設計付着長は、PC 鋼より線と無収縮モルタルおよび鋼管と無収縮モルタルの設計付着長の和となる。

$$L = L_1 + L_2 \quad (1)$$

$$L_1 = \Delta P / (\pi \cdot \varphi_1 \cdot f_{bod}) \quad (2)$$

$$L_2 = \Delta P / (\pi \cdot \varphi_2 \cdot 0.4 f_{bod}) \quad (3)$$

ここで

L : 設計付着長 (mm)

L_1 : PC 鋼より線と無収縮モルタルとの設計付着長 (mm)

L_2 : 鋼管と無収縮モルタルとの設計付着長 (mm)

ΔP : 緊張荷重 (左右張力差) (kN)

φ_1 : PC 鋼より線の直径 (mm)

φ_2 : 鋼管の内径 (mm)

$f_{bod} = f_{bok} / \gamma_c \leq 3.2$: 設計付着強度 (N/mm²)

γ_c : 材料係数 (1.3 または $f'_{ck} \geq 60$ のとき 1.5)

$f_{bok} = 0.28 f'_{ck}{}^{2/3} \leq 4.2$: 付着強度 (N/mm²)

f'_{ck} : 設計基準強度 (N/mm²)

内管と無収縮モルタルとの付着は丸鋼と同等とし、設計付着強度を異形鉄筋の 40% とした。³⁾

図-9 に緊張荷重と付着長の関係を示す。

NS, FB は、設計付着長を十分満足する。FG は同等もしくは若干、設計付着長を下回る領域がある。FGPE, FBPE では設計以下であった。エポキシ樹脂塗装では、NS に比べて約 2 倍の付着長をとる必要がある。

(3) 付着応力度分布

PC 鋼より線のひずみ変化から式(4)により付着応力度を算定し、各緊張荷重における付着応力度分布を求めた。(図-10, 図-11)

$$\tau_{AB} = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{\ell_{AB} \cdot \varphi} E_S \cdot A_S \quad (4)$$

ここに、

τ_{AB} : A, B 間の付着応力度 (N/mm²)

ε_A : A 点における PC 鋼より線ひずみ

ε_B : B 点における PC 鋼より線ひずみ

ℓ_{AB} : A, B 間の長さ (mm)

φ : PC 鋼より線周長 (mm)

E_S : PC 鋼より線ヤング係数 (N/mm²)

A_S : PC 鋼より線断面積 (mm²)

FGPE, FBPE の付着応力度分布は緊張荷重 0.19Pu では 0.5~1.0N/mm² と小さく、長さ方向に対して同程度の値となった。従って PE 被覆を施すと付着定着は期待できないものと考えられる。NS, FG の付着応力度分布は緊張荷重 0.57Pu で緊張端側で高く、緊張端から 70cm まで発生している。FG は、緊張端側では NS, FB と比較して小さく最大で付着応力度は 6.0N/mm² 程度であり、付着応力度が 130cm まで発生している。

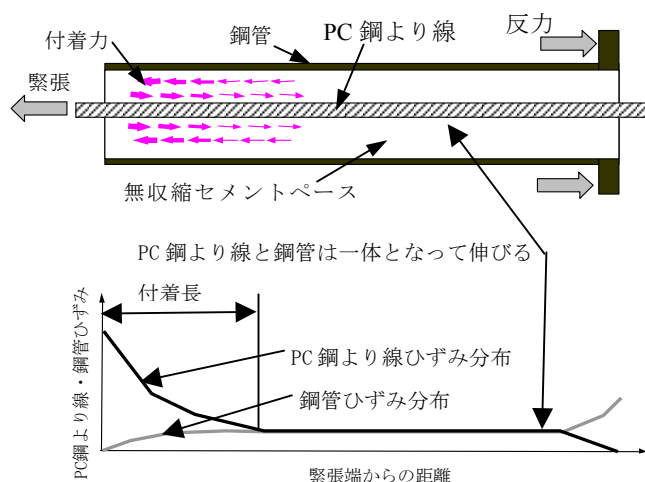


図-8 付着長算出方法

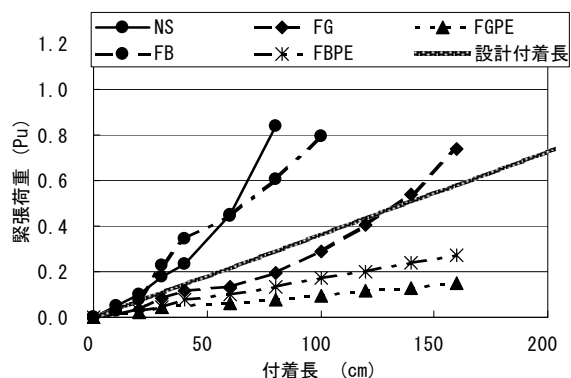


図-9 緊張荷重-付着長

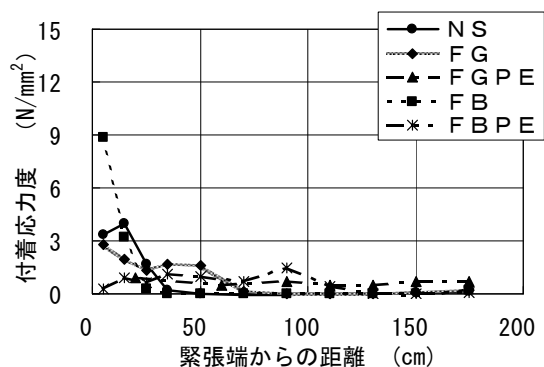


図-10 付着応力度分布 (0.19Pu)

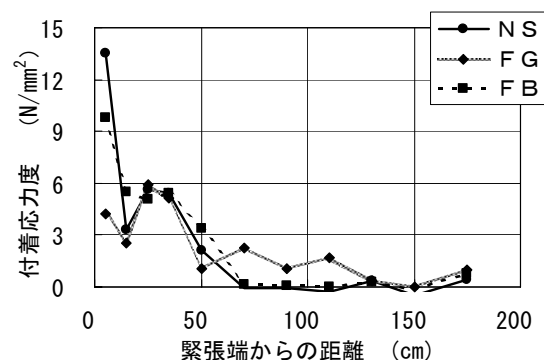


図-11 付着応力度分布 (0.57Pu)

(4) 平均付着応力度分布

付着応力度分布から平均付着応力度を算出する。ここで示す平均付着応力度とは、図－１２に示すように、付着応力度面積と同じ面積を有する矩形を考えたときの付着応力度とする。

図－１３に平均付着応力度分布を示す。なお、ひずみゲージが測定可能であった緊張荷重までの平均付着応力度を示している。

FGPE, FBPE では、平均付着応力度が 1.0N/mm^2 でほぼ一定の値となった。

NS は緊張荷重が増加すると平均付着応力度も増加する傾向にある。FB は緊張荷重が 0.57Pu までは、NS と同等もしくはそれ以上の平均付着応力度を有するが、 6.0N/mm^2 以上の増加は認められない。緊張荷重が大きくなると FB の表面に付着している粒子が無収縮モルタルとの摩擦により減少し、PC 鋼より線の表面が FG に近づくためと思われる。FG は、 $0.07\text{Pu} \sim 0.25\text{Pu}$ では NS と比較して 0.5 倍の平均付着応力度である。

4. 27本のPC鋼より線による付着試験

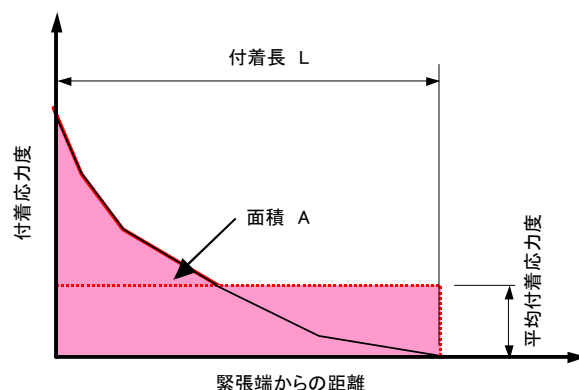
4.1 試験体

支間長 140m のエクストラード橋を想定し、本論文ではこの支間長で実績の多い27本のPC鋼より線における付着特性を確認した。PC鋼より線は、一般的に防錆加工として使用されているエポキシ樹脂を塗装したものを使用した。

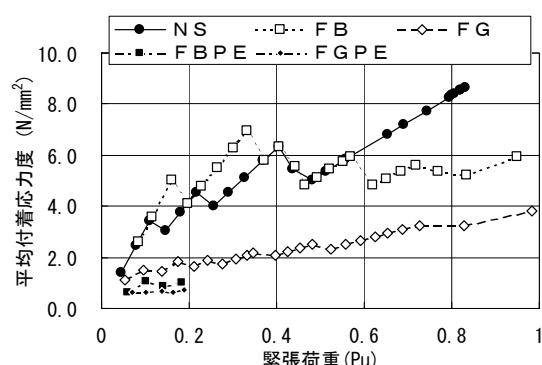
4.2 実験方法

長さ 3.2m 外径 165mm の鋼管に27本のPC鋼より線を中央に配置し無収縮モルタルで充填した。鋼管は $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ 断面のコンクリートブロックに埋め込んだ。これは、鋼管をコンクリートで定着する方法ではなく1本の場合と同様に鋼管に反力を取るために配置したものである。

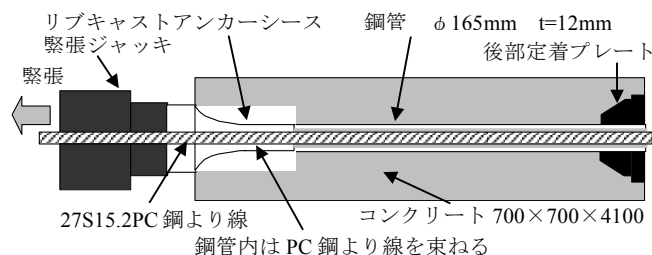
実験概要を図－１４に示す。27本のPC鋼より線のうち、図－１５に示すように外側に配置されるPC鋼より線1本、内側に配置されるPC鋼より線1本にひずみゲージを取り付けた。鋼管表面にもひずみゲージを配置した。PC鋼より線



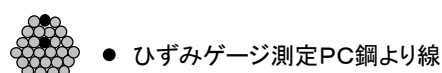
図－１２ 平均付着応力度算出方法



図－１３ 平均付着応力度分布



図－１４ 試験体概要



図－１５ ひずみゲージ位置図

の自由端側において移動量をそれぞれ測定した。

4.3 実験結果

(1) ひずみ分布

PC鋼より線と鋼管のひずみの差を図－１６に示す。1本と27本との違いを比較するために、1本のPC鋼より線の緊張荷重を27倍したときのひずみ分布と比較した。

1本の場合が緊張端から 100cm 程度でひずみが0となっているが、外側では、 120cm 、中側では 140cm と付着長が長い。

(2) 付着応力度分布

1本のPC鋼より線の周長を27倍して付着応力度を算出した付着応力度分布を図-17に示す。付着応力度分布は1本の時と同じく緊張端側が高い。

図-18に1本のPC鋼より線と27本のPC鋼より線の平均付着応力度比を示す。0.07Pu～0.25Puの平均応力度比は0.4から0.7倍である。

エポキシ塗装のPC鋼より線における平均付着応力度の補正について次式を提案する。

$$\tau = \alpha \cdot \beta \cdot \tau_N \quad (5)$$

ここに、

τ : 平均付着応力度(N/mm²)

α : 表面状況による係数

エポキシ樹脂の場合 $\alpha = 0.5$

塗装なし、エポキシ樹脂の表面に粒子を

付着した場合 $\alpha = 1.0$

τ_N : PC鋼より線の平均付着応力度(N/mm²)

PC鋼より線の本数の影響を緊張荷重と平均付着応力度比について次式で表す。

$$\beta = 1.99P + 0.27 \quad (6)$$

ここで

β : 27本の1本に対する平均付着応力度比

P : 緊張荷重(0.07Pu ≤ P ≤ 0.19Pu)

である。

0.19Pu < P ≤ 0.25Puの時は、 $\beta = 0.65$ とする。

5. まとめ

- 1) PC鋼より線と無収縮モルタルとの付着は、PE被覆の場合には、必要な付着は確保できない。PC鋼より線の防錆加工として使用する場合には、簡易サドル部では除去する必要がある。
- 2) エポキシ樹脂に粒子を付着させると、付着力が向上し防錆加工していないPC鋼より線と同等もしくはそれ以上の効果がある。
- 3) エポキシ樹脂のみでは塗装なしのPC鋼より線と比較して2倍の付着長を確保する必要がある。

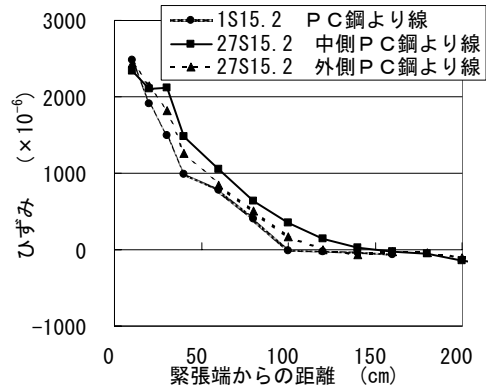


図-16 ひずみ分布(0.35Pu)

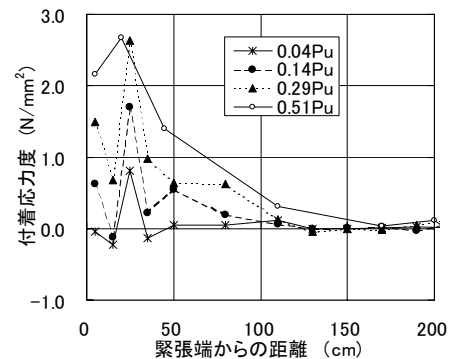


図-17 付着応力度分布

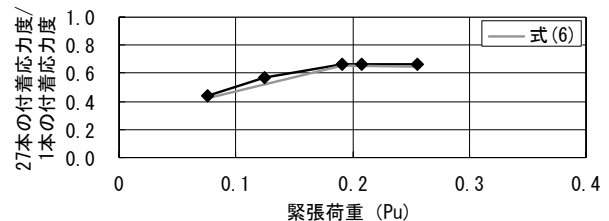


図-18 平均付着応力度分布(本数比較)

- 4) 27本の平均付着応力度は1本の平均付着応力度と比較して0.4～0.65倍になることを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準(案)，2002.11
- 2) 城野 嘉明，春日 昭夫，多久和 勇岡 本 裕明：エクストラドーズドPC橋の計画と設計，橋梁と基礎，1992.12，pp.11～17
- 3) (社)土木学会：平成8年度制定コンクリート標準示方書（設計編），1996.3