

# 小田原港橋におけるサドル構造に関する研究

木水 隆夫\*<sup>1</sup>・松井 保幸\*<sup>2</sup>・春日 昭夫\*<sup>3</sup>

## 1. 序 論

近年、コンクリート斜張橋の発展にはめざましいものがある。国内では最大支間が 250 m を超え、国外では 500 m とその長大化はますます進む傾向にある。その中で、斜材を主塔位置でサドル構造にした例は国外では多いが、国内では初期の鋼斜張橋に見られるだけである。コンクリート斜張橋の場合、サドル構造を採用することにより主塔における斜材の定着装置が不要となる。そして、定着装置の大きな切欠き部によって主塔の配筋が複雑になり施工性が低下するのを防ぐことができる。しかしながら、サドル部の斜材がクリープや地震に対して滑らないように設計する必要がある。

小田原港橋は世界初のエクストラード PC 橋で、国内の PC 橋では初めて主塔にサドル構造を採用した<sup>1),2)</sup>。エクストラード PC 橋は、主塔高さが斜張橋の半分程度であり、鉛直方向の荷重に対してより主桁が抵抗する。そして、柱頭部における外ケーブルとしての斜材の偏心量を増すために、斜材をできるだけ塔頂部に集めた配置とし、斜材の取替えが可能なように二重管構造のサドルになっている。サドル構造の要求性能としては、斜材の張力が降伏点付近に達しても健全であるということがあげられる。また、サドル部における左右の斜材張力差を固定する定着機構についても、設計値に対してある程度の安全率が必要となる。

以上のことから小田原港橋では、密に配置された斜材を支持して二重構造となっているサドル部および、張力差を固定する定着機構の安全性を検証し、実橋における最適な構造を選定すべく、実物大模型試験を行った。本論文では、その試験結果を基に設計の妥当性を確認し、同じような性能が要求される構造に対しての一考察となるよう検討している。

## 2. 小田原港橋の概要<sup>1),2)</sup>

小田原港橋は、図-1 に示すように中央支間長が 122

m の 3 径間ラーメン橋で、通常は主桁内に配置される外ケーブルを、主塔を設けて主桁の上側に出したエクストラード PC 橋である。そして、構造的かつ経済的な有利性を発揮するために採用されたサドル構造は、本橋の大きな特徴の一つになっている。図-2 にサドル部の詳細と左右の斜材 (19φ15.2 mm) の張力差を固定する定着機構を示す。サドル部における斜材の間隔は 30 cm とせまくなっており、発生する鉛直力はその間のコンクリート ( $f_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$ ) によって主塔・橋脚へと伝達する。このとき、斜材の取替えが容易なように、外管の形状が鍵穴形になっていることによる応力がコンクリートに生じる。また、クリープ、乾燥収縮、地震により発生するサドル部における斜材の左右の張力差は、ストランド→グラウト→サドル部定着体→プレート→主塔コンクリートと伝達される。施工はワーゲンによる張出し施工であるが、斜材の緊張が終わるとサドル部だけグラウトを行い定着機構を組み立てて、施工時の張力差にも対応できるようになっている。

## 3. 供試体の設計

### 3.1 サドル部の設計

文献 1) に示すように、実橋のサドル部は 2 次元 FEM 解析で設計を行っている。そして、コンクリートに発生する応力度が設計荷重時の許容値以下になるよう、PC 鋼棒で補強している。基本的には供試体の設計も 2 次元 FEM 解析によるが、局所的な支圧応力については面接触問題の FEM 解析<sup>3)</sup>を行う。

試験は、斜材の角度が最も大きな最下段の斜材 ( $\alpha=20^\circ$ ) を取り出して行うが、斜材と斜材の間のコンクリートの挙動を把握するために外管を 2 本配置とし、上側にのみ斜材を設置した供試体とする。そして、実橋の鉛直力を再現するために供試体に上の 6 本分の斜材張力の鉛直方向分力 850 tf を導入する。図-3 に供試体の全体および局部 FEM 解析モデルを示す。全体モデルはコンクリートのみとし、主として供試体の応力状態が実橋

\*<sup>1</sup> Takao KIMIZU : 日本道路公団 東京第一建設局構造技術課 課長代理

\*<sup>2</sup> Yasuyuki MATSUI : 日本道路公団 企画部企画課 (前: 東京第一建設局構造技術課)

\*<sup>3</sup> Akio KASUGA : 住友・鹿島建設共同企業体

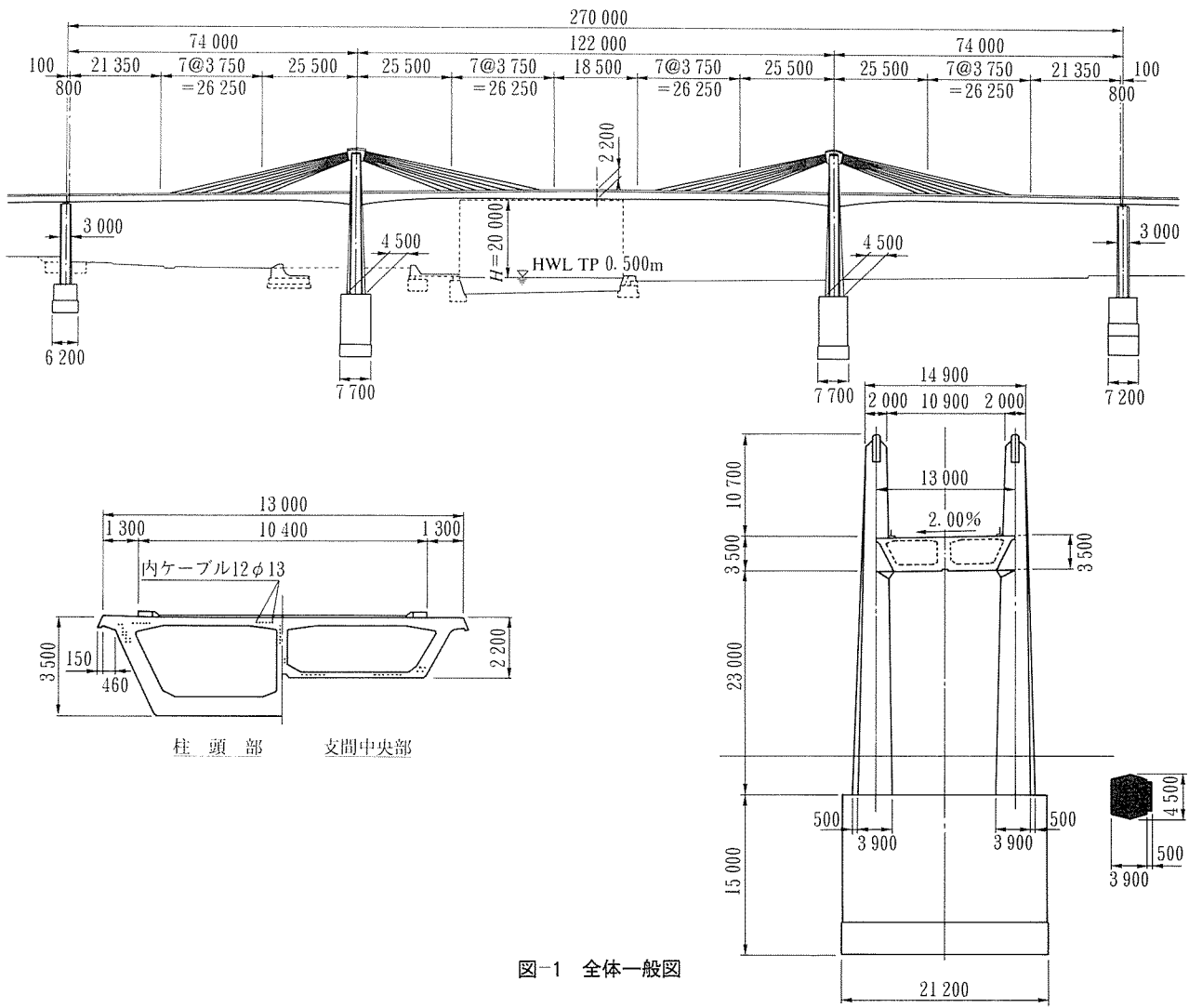


図-1 全体一般図

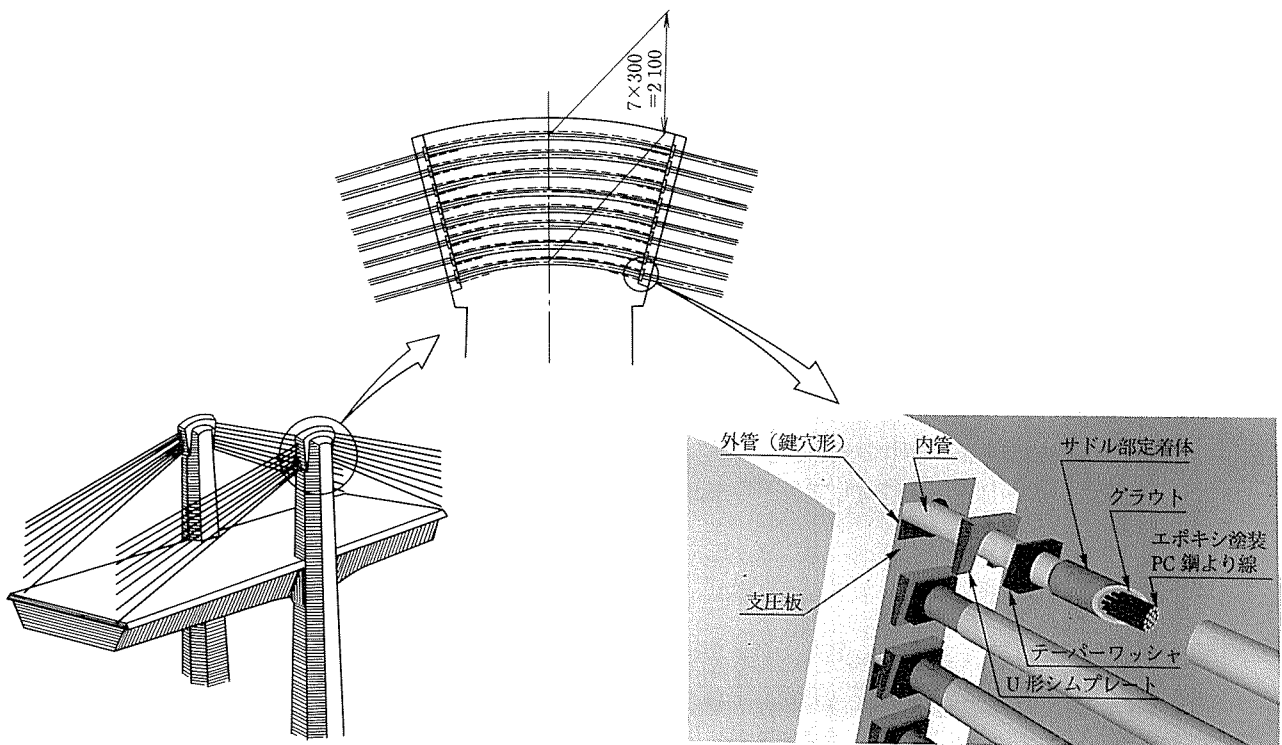


図-2 斜材の左右張力差を固定する機構

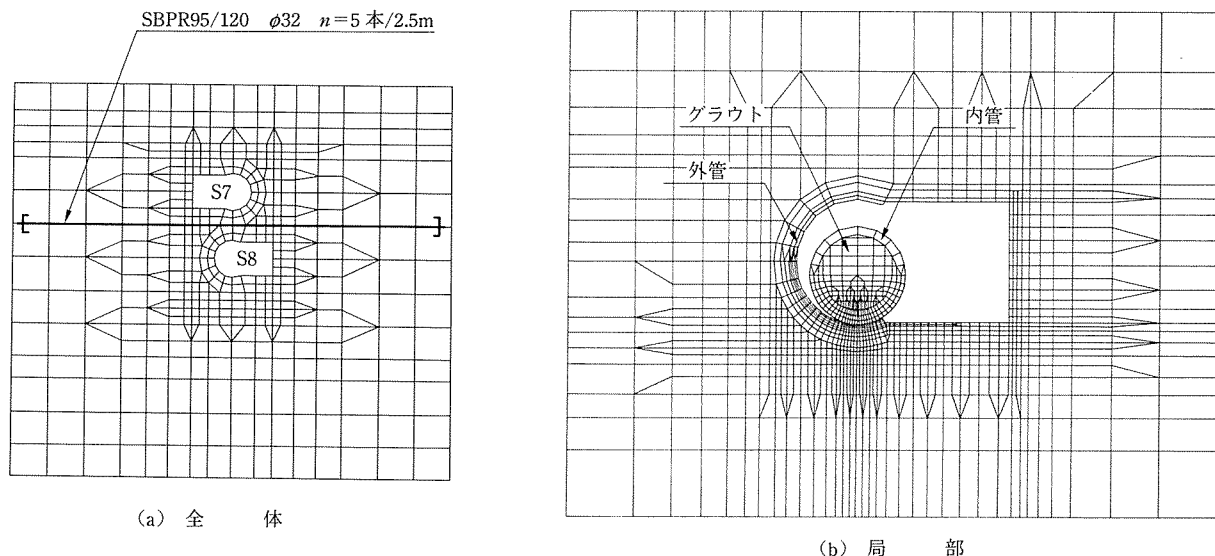


図-3 供試体の FEM モデル

表-1 実橋モデルと試験モデルの応力度

|  | 要素 | 試験モデル | 実橋モデル |
|--|----|-------|-------|
|  | 1  | -37   | -37   |
|  | 2  | 132   | 137   |
|  | 3  | 137   | 138   |
|  | 4  | -21   | -22   |
|  | 5  | -25   | -23   |
|  | 6  | -18   | -14   |

のものをシミュレートしているかどうかを確認する。したがって、2本の外管の間にも実橋と同じレベルのPC鋼棒の補強を行う。また、局部モデルは、内管が鋼管の場合の直下の支圧応力や割裂に対す検討を行うためのもの、鋼製の外管も考慮したものとなっている。

表-1に実橋モデルと試験モデルの各要素の応力度を示す。試験がよく実橋をシミュレートしていることがわかる。また、局部モデルによるFEM解析では、斜材張力が $0.6 f_{pu}$ 時は内管と外管は1節点でしか接触していないが、 $f_{py}$ 時には3節点で接触するという結果を得た。しかしながら、接触面直下のコンクリート支圧応力が、外管厚さが5mmの時には設計基準強度 $350 \text{ kgf/cm}^2$ を上回り、10mmの時には $280 \text{ kgf/cm}^2$ となることから、供試体では10mmを採用し、試験終了後に供試体をカットしてこの付近のコンクリートの状態を観察することとした。

### 3.2 内管の設計

サドルの内管の役割は、最大で40tfある左右の斜材の張力差を固定できる機構ならびにグラウトのシースである。これらの条件を満足するものとして、内管自体を

鋼製とし張力差をとらせるとともに、シースの役目をはたすTYPE1と、サドルの外側のアンカーに張力差をとらせ、シースには高密度ポリエチレン管を用いたTYPE2が考えられた。それらの概念図を図-4に示す。

次に、内管のグラウト材であるが、基本的には付着を期待する部分には高強度セメントグラウト、それ以外には一般部も含めて延性のあるポリマーセメントグラウトとする。特に、TYPE1については高強度セメントの

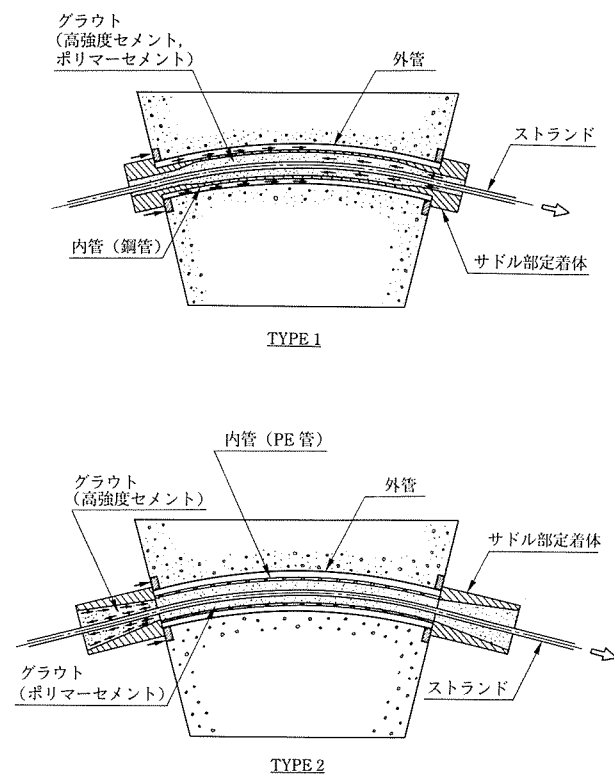


図-4 内管の概念図

かわりに、圧縮強度は低いが付着強度が大きなポリマーセメントグラウトを使用した場合も考えられる。グラウト材のうち、高強度セメントは無収縮でノンブリージングであること、28日の圧縮強度が600 kgf/cm<sup>2</sup>以上であることが要求される。また、ポリマーセメントは、高強度セメントと同様に無収縮でノンブリージングであることが求められるが、28日強度は通常のPC鋼材のグラウト規準に基づいて200 kgf/cm<sup>2</sup>以上とした。そして、40 tfの張力差と斜材の振動に起因する2次曲げによってTYPE 1の鋼管のひずみが800 μになることから、グラウトにひび割れを生じさせないためには1000 μ程度の伸びに追従できる延性が必要となる。以上より、高強度セメントグラウトとしては、プレミックスタイプのグラウト用無収縮セメントを用いる。これは水セメント比が37%で、標準養生での28日圧縮強度が約750 kgf/cm<sup>2</sup>になる。また、ポリマーセメントグラウトとしては、文献4),5)により事前に要求性能を満たす配合を検討した結果、表-2に示すような配合を得た。

表-2 ポリマーセメントの配合

| セメント/ポリマーエマルジョン (重量) | ポリマーセメント (%) | 水セメント比 (%) | 単位容積重量 (kgf/L) |
|----------------------|--------------|------------|----------------|
| 100/58               | 25           | 33         | 1.79           |

内管の設計において、グラウトとストランドや内管の付着の検討を行った。小田原港橋の斜材には、ストランドの付着性能を高めるために表面処理を施したエポキシ塗装PC鋼より線を採用している。このエポキシ塗装PC鋼より線の付着伝達長の算出には文献6)による式を用い、ストランドがサドル部で一方向にかたまって配置されることを考慮して、その有効周長を1/3に低減し

ている。その結果、40 tfの張力差に対して2種類のグラウトによる付着伝達長は大きな違いはなく、20 cm前後となった。また、内管の付着伝達長は文献7)の普通丸鋼の許容付着応力度を用いて算出し、同じ理由から内管の有効周長を1/2に低減している。そして、高強度セメントグラウトでは付着伝達長が85 cm、ポリマーセメントグラウトでは240 cmという結果を得た。TYPE 1の内管の場合は、グラウト区間が3 mほどあり、ポリマーセメントを用いた場合でも付着伝達長以上である。TYPE 2の場合は定着部の内側をテーパにしてくさび効果を期待するため、ストランドの付着伝達長からその長さを30 cmとした。

#### 4. 試験方法と結果

##### 4.1 試験概要

本試験の目的は、FEM解析や現行の示方書等で設計を行ったサドル部やサドル部の定着機構が十分な耐力を有していることと、実橋に採用する構造を選出すること、そして、実物大の供試体を施工・解体することによって、その施工性や局部的な損傷具合を調べることにあつた。図-5に供試体の構造図を、写真-1に全景を示す。試験は、まずサドル部の定着機構の載荷試験を行い最後の定着機構のタイプを使って、そのままサドル部の載荷試験に移る。そして、試験終了後、供試体をワイヤーソーイングで切断してコンクリートの充てん状況や局部的な損傷を調査する。

##### 4.2 サドル部の定着機構の載荷試験

内管の供試体は表-3に示す3タイプとした。試験は、TYPE 1-1, TYPE 1-2, TYPE 2の順で行うが、ひとつのタイプの試験が終了するとそれを撤去し、次のタイ

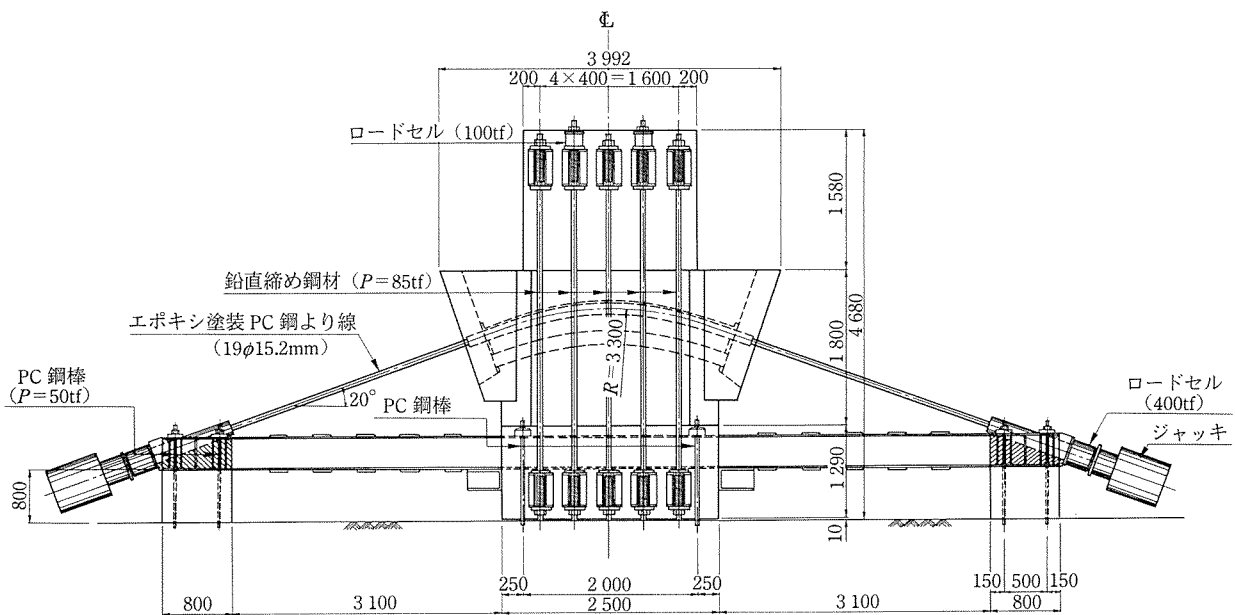


図-5 供試体構造図

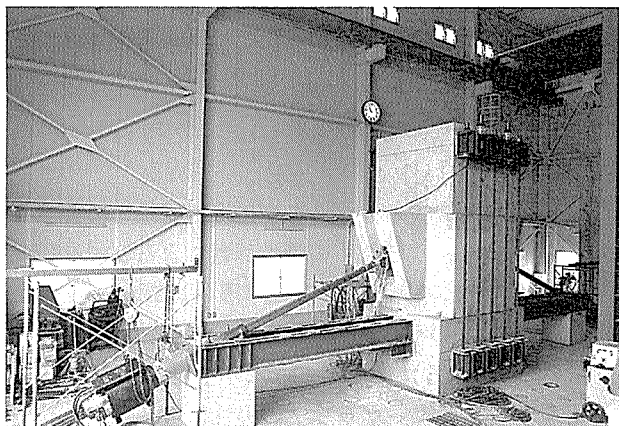


写真-1 供試体全景

を架設・緊張する。そして、TYPE 2 が終了すると次のサドルの荷重試験へと移行する。図-6 にそれぞれの内管のタイプの構造詳細図、また、図-7 には試験の

荷重手順を示す。最初に、左右同時に 260 tf まで緊張した後、内管のグラウトを行う。その後、左側を 225 tf までゆるめる。これは、クリープ・乾燥収縮による張力差を模擬したものである (STEP 1)。次に、右側を 260 tf から 270 tf に増加・減少を 10 回繰り返す (STEP 2)、そのまま、右側だけ 360 tf ( $0.9f_{py}$ )、あるいは、定着機構が破壊する最大張力差まで緊張する (STEP 3)。

表-4 にグラウト材の試験結果を示す。実橋においては、コンクリート打設やワーゲン移動などによってサイクル工程の中で左右の張力差が生じてくることや、試験の工程などの理由から材令 7 日~11 日で荷重試験を

表-3 内管の供試体

|          |     | 内管の仕様      | グラウト材    |
|----------|-----|------------|----------|
| TYPE 1-1 |     | 鋼管         | 高強度セメント  |
| TYPE 1-2 |     | 鋼管         | ポリマーセメント |
| TYPE 2   | 定着部 | 鋼管         | 高強度セメント  |
|          | その他 | 高密度ポリエチレン管 | ポリマーセメント |

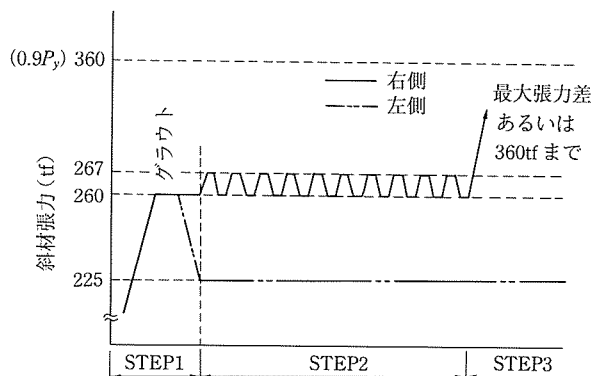


図-7 荷重手順

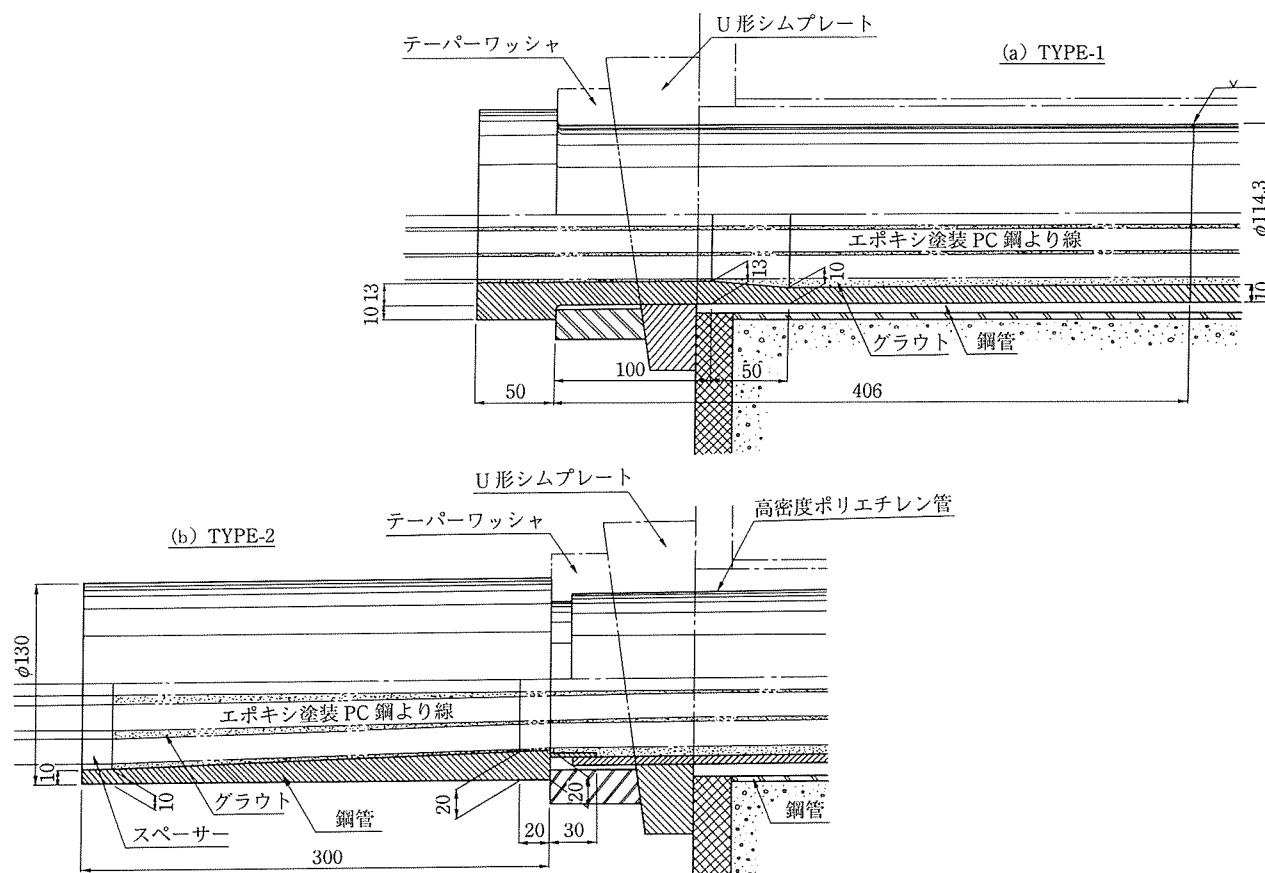


図-6 内管詳細図

表-4 供試体およびグラウトの試験結果  
(kgf/cm<sup>2</sup>)

|          | 材令(日) | 圧縮応力度 | 割裂強度 | 弾性係数    |         |
|----------|-------|-------|------|---------|---------|
| コンクリート   | 28    | 382   | -    | -       |         |
| TYPE 1-1 | 11    | 496   | 25   | 113 100 |         |
| TYPE 1-2 | 7     | 113   | 23   | 43 750  |         |
| TYPE 2   | 定着部   | 7     | 532  | 21      | 123 000 |
|          | その他   | 7     | 110  | 16      | 43 400  |

行っている。

図-8は、TYPE 1-1、TYPE 1-2の内管のひずみ分布である。また、図-9は、それぞれのA点、B点、C点およびD点におけるひずみの増加を示したものである。TYPE 1-2のC点はやや線形的でないものの、いずれのタイプのグラウトもひずみが荷重の増加にと

なっておおむね線形的に変化しており、内管とグラウトの付着が健全であることを示している。STEP 1で左側の緊張力をゆるめたため圧縮ひずみが生じ、STEP 3で右側の緊張力を増加するにしたがい引張ひずみが内管全体へと分布していく。TYPE 1-1とTYPE 1-2でひずみの分布状態が違うが、この中には、緊張力によるひずみ分布の変化、グラウトの弾性係数によるひずみ分布の違い、そして、内管と外管の摩擦の影響が組み合わさっている。このうち、グラウトの弾性係数の違いによる影響を検証するため、図-10に示す簡単なモデルでFEM解析を行った。グラウトの弾性係数を変化させていくと、図に示すようにひずみのピークが緊張側から奥の方へ移動していくのがうかがえる。これは付着伝達長がグラウトの弾性係数の関数になっており、TYPE

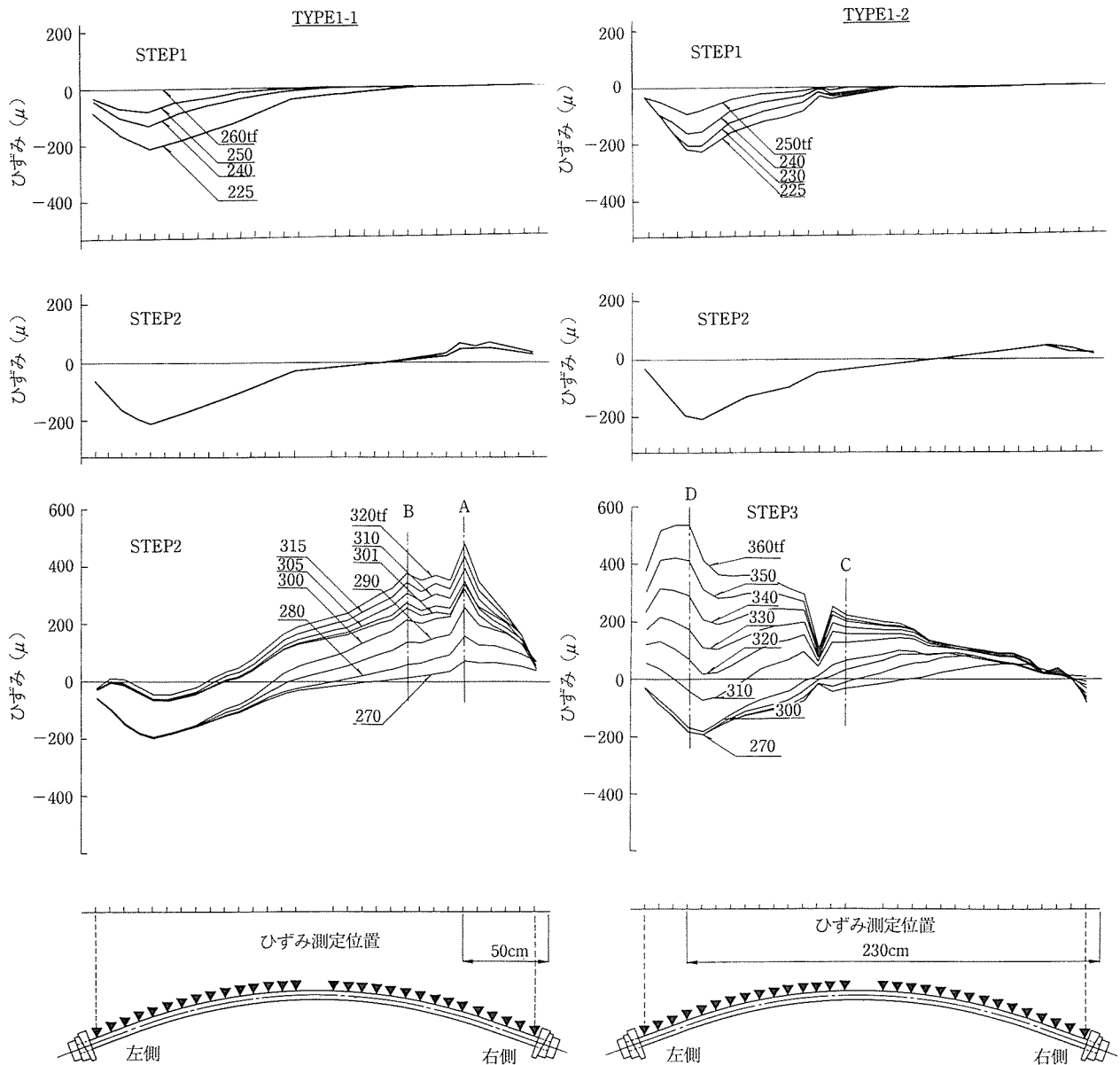


図-8 TYPE 1の内管のひずみ分布

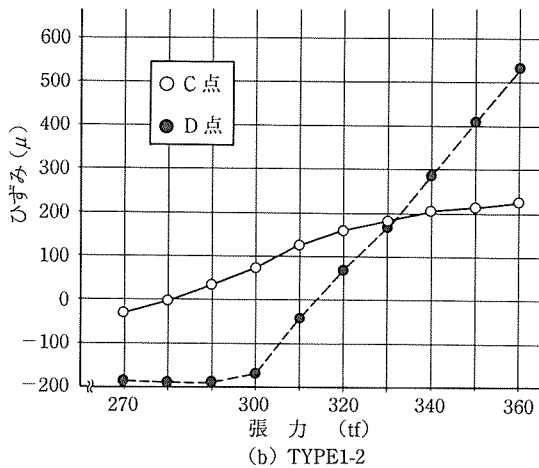
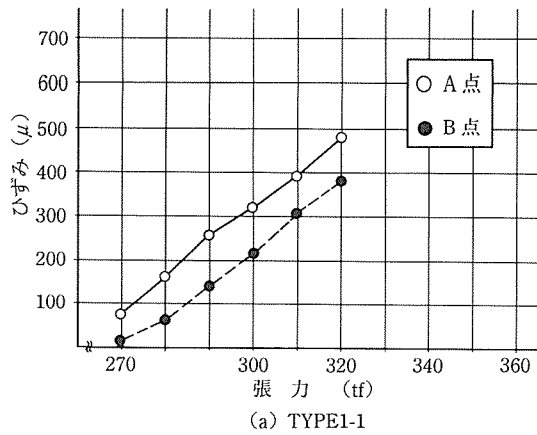


図-9 A点, B点, C点, D点におけるひずみの増加量

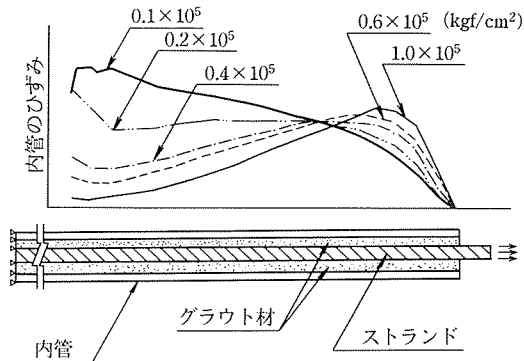


図-10 内管の簡易 FEM モデル

1-2の場合、付着伝達長が240 cmと長いので左側でひずみが圧縮から引張へ転じている。本来なら、TYPE 1-1のA点の左側でもA点と同じ程度のひずみ増加が生じるのであるが、内管と外管の摩擦によりそれが低減されているためTYPE 1-1とTYPE 1-2でひずみ分布状態が異なってきたものと考えられる。また、ひずみの最大点までの距離が付着伝達長となるので、A点まで50 cm、D点まで230 cmと計算値に近い値となった。よって、設計で仮定した有効周長の低減は妥当であると言える。以上によりTYPE 1の内管については、い

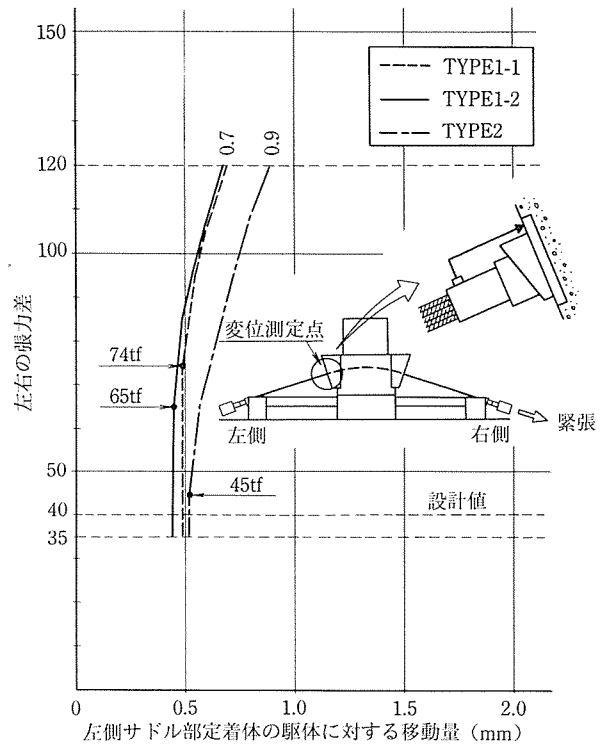


図-11 張力差と左側サドル部定着体の移動量の関係

れのグラウト材を使用しても問題ないと思われる。

図-11は、左右の張力差と左側サドル部定着体の駆体に対する移動量の関係である。左側を225 tfに減少させ、35 tfの張力差を発生させた後右側を緊張していくと、TYPE 1-1では74 tf、TYPE 1-2では65 tf、TYPE 2では45 tfまで左側の定着体が移動しない。これは、内管と外管の間の摩擦力によるため、この摩擦力は設計では考慮していないが、斜材張力の鉛直方向力が170 tfあるので、摩擦係数は0.3~0.4であると推定できる。TYPE 2についてはストランドの付着分布は計測していないが、最大張力差に対してもストランドの引込みは生じていない。これは、TYPE 2の定着体内部をテーパ状にしているため、くさび効果により最大張力差が増加したと思われる。本構造の破壊モードとしては、シムプレート等の破壊か付着力の低下の2つが考えられるが、本試験ではいずれのモードも発生せず、TYPE 1, TYPE 2の内管とも試験を行った最大張力差は120 tfであり、設計値に対する安全率は120 tf/40 tf=3.0までは確認されたことになる。

以上より、いずれのタイプも実橋での張力差を固定する定着機構として十分適していると言えるが、経済性や架設時・取替え時の施工性を考えて、TYPE 2を実橋で採用することとした。

#### 4.3 サドル部の載荷試験

サドル部に発生する応力としては図-12に示すようなものがある。これらの応力のうち、引張力  $T_1, T_2, T_2'$ ,

$T_2''$  に対しては PC 鋼棒により補強を行い、設計時に許容値内におさまるようにしている。試験では、 $0.9 f_{py}$  の斜材張力に対してサドル部が健全であることを確認するとともに、2本の外管の中間に設置した3軸モーロドゲージにて鉛直方向のコンクリート圧縮応力度を測定する。図-13に、載荷要領を示すが、TYPE 2の試験で用いた斜材の張力を左右 225 tf に合わせた後、同時に

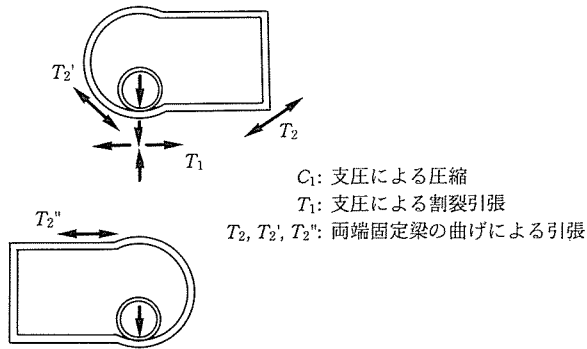


図-12 サドル部に発生する応力

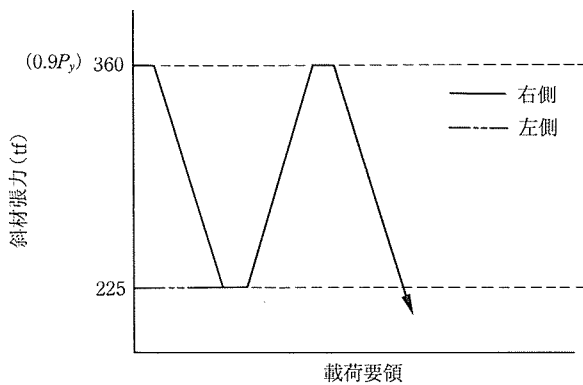


図-13 載荷要領

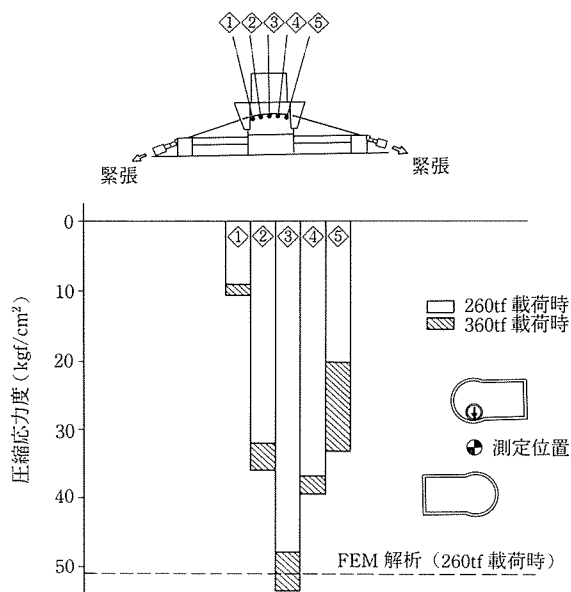


図-14 外管の間のコンクリート圧縮応力度

360 tf まで載荷する。

図-14に外管の間のコンクリート圧縮応力度を示すが、供試体の全体 FEM 解析における同位置の値と 260 tf 載荷時の最大値はほぼ一致している。そして、サドル部は  $0.9 f_{py}$  (360 tf) の張力に対しても健全であり、試験終了後に供試体を切断したが、局所的な損傷などは認められなかった。

## 5. 結 論

小田原港橋で採用されるサドル部と左右の張力差を固定する定着機構の安全性を検証するために、実物大模型試験を行った。その結果、以下に示すような結論が得られた。

- 1) FEM 解析や現行の示方書等で設計を行ったサドル部やサドル部の定着機構は、 $0.9 f_{pu}$  の斜材張力でも破壊せず十分な安全性を有していると言える。
- 2) 小田原港橋のようにサドル部でストランドが一方方向にかたよって配置される場合は、グラウトとストランドや内管の付着伝達長の算出においてそれらの有効周長の低減を行う。
- 3) 本試験で提示した3タイプのサドル部の定着機構はいずれも実橋に適用可能である。しかしながら、内管の経済性や架設時・取替え時の施工性を考慮して、サドルの外側のアンカーに張力差をとらせ、シースには高密度ポリエチレン管を用いたタイプを採用することとした。
- 4)  $0.9 f_{py}$  の斜材張力においてサドル部は健全であり、供試体を切断しても局所的な損傷等は見受けられなかった。

今後、グラウト材の付着強度をパラメータとした付着伝達長の定量的な把握や、内管内のストランドの配置による有効周長の低減の影響などを解明し、合理的にサドルの設計が行えるような研究が必要と思われる。

## 謝 辞

本橋の設計・施工につき、貴重なご助言をいただいた日本大学の山崎教授を委員長とする技術検討委員会の諸先生方に誌上を借りてお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 城野嘉明, 多久和勇, 春日昭夫, 岡本裕昭: エクストラード PC 橋の計画と設計, 橋梁と基礎, pp. 11~17, 1992.12
- 2) 小野寺勇, 今泉安雄, 春日昭夫, 岡本裕昭: エクストラード PC 橋の計画と設計 (西湘バイパス小田原港橋), プレストレストコンクリート, Vol. 35, No. 3, pp. 49~58, 1993
- 3) N. Okamoto, M. Kakazawa: Finite Element Incremental Contact Analysis with Various Friction



- tional Conditions, International Journal of Numerical Mathematics Engineering, Vol. 14, pp. 337~357, 1979
- 4) 小林剛, 児玉一吉, 坪野秀良, 岡田清: ケーブルグラウト材としてのポリマーセメントの特性について, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集 (V), pp. 263~264, 1983
  - 5) 能登谷恭一, 春日昭夫, 森脇貫志, 白井信行: 超微粒子ポリマーを用いたポリマーセメントスラリーの斜材グラウトとしての基礎性状, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集 (VI), pp. 268~269, 1994
  - 6) T. E. Cousins, D. W. Johnston, P. Zia : Transfer and Development Length of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strand, PCI Journal, pp. 92~103, 1990, 7, 8
  - 7) コンクリート標準示方書 (平成 3 年版) 設計編, 土木学会

【1994 年 1 月 18 日受付】