

斜張橋ケーブルの押込み架設工法に関する考察

A study on the cable erection methods by pushing-in for cable-stayed bridge

清水健介*, 木田哲量**, 矢野喜久***, 島田智之***, 大滝政博****, 喜多知宏*****

Kensuke SHIMIZU, Tetsukazu KIDA, Yoshihisa YANO, Tomoyuki SHIMADA, Masahiro OOTAKI, Tomohiro KITA

* 日本大学大学院生産工学研究科土木専攻 (博士後期) (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

JFE工建 (株) 橋梁・構造計画部 (〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-1)

** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

*** JFEエンジニアリング (株) 建設部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)

**** テクニカルリンク (株) (〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央3-2-1)

***** コスモ技研 (株) システム部 (〒550-0005 大阪市西区西本町3-1-43)

The pushing -in method that was developed as a method of introducing tension into the cables of a cable-stayed bridge forms a flow of force that differs from that of the pulling method according to the location where the pushing reaction force is taken because it pushes from above the cable anchor point. So the state of stress in both cases during the erection was verified by performing numerical analysis and in-situ measurements. The report also presents research on a new anchor structure for a single-plane cable in order to perform work more efficiently inside a narrow anchor chamber.

Key Words: cable-stayed bridge, cable pushing -in method of erection, cable anchor part, finite element methods, a measure of stress

キーワード: 斜張橋, ケーブル押込み架設工法, ケーブル定着部, 有限要素法, 応力測定

1. まえがき

斜張橋ケーブルの張力導入方法は、これまで定着構造体下端よりケーブルを引込む架設工法 (以下引込み工法という) で実施されてきた。しかし、この引込み工法は2.で示す多くの問題が存在する。これらは設備や工法および将来に向けたメンテナンスだけの問題ではなく定着部の構造や位置およびケーブルソケットの大きさ等によるものもあり、総合的に解決する必要がある。そこで、筆者等はこの問題を次の2つの観点から解決する方法を検討した。

- ① 新工法の開発による解決策 (引込み工法から押込み工法へ)
- ② 構造設計上の解決策 (定着構造体のコンパクト化に関する研究)

上記の①押込み工法はデッキ上よりケーブルを押込む架設工法 (以下押込み工法という) で、すでに平成6年に竣工した鶴見つばさ橋工事⁵⁾⁶⁾⁷⁾に適用され、その後、府中四谷橋、南本牧橋、新那珂川大橋、美原大橋⁸⁾等の一面吊ケーブル斜張橋に実施されてきた。一方、二面吊りケーブルへの適用は、3.2で述べるように、ケーブル角度追従機能を有する押込み装置の開発が難しかったことやケーブル定着構造・位置との関係から施工が難しく採用されてこな

かった。しかし、写真-1に示すように大師橋の最上段ケーブルの定着構造体が下部工と干渉する問題が発生し、引込み工法での施工が不可能となった。そのため、大師橋は初の2面吊ケーブルに押込み工法を用いた橋梁となった。本編ではこの大師橋の施工例を示しながら適用時の問題点と解決の方向を考察した。また、大師橋をモデルにFEM解析にて応力レベルや応力の流れを把握し、同時に現場計測を実施して、ケーブル押込み時と定着時 (引込み時に相当) の応力比較の検証結果も考察した。



写真-1 橋台とケーブル定着部

次に4項では(2)定着構造体のコンパクト化に関する研究について美原大橋をモデルに、種々の定着タイプを抽出し、

FEM解析で応力レベルや応力の流れを検証し、コンパクトな定着構造体を提案する。

このように、2つの観点からケーブル架設における具体的な問題点を解決する施工方法・構造設計等について研究開発した。

2. 引込み工法の問題点

斜張橋ケーブルの架設に引込み工法を採用した場合、問題となる事項は以下の通りである。

2.1 一面吊りケーブルの場合

- ① 定着室内で定着構造体の占める割合が大きいため、工場および現場での作業性に問題が多い(写真-2(a)～(c)参照)。
- ② 引込み装置は細長く(約4～6m)、重い(約50～60kN)ため、上下フランジの開孔¹⁾²⁾³⁾⁴⁾や横リブの切欠き等が必要となる(図-1、写真-2(a),(d)参照)。
- ③ 上記②項より、狭隘部(特に、下フランジ開孔部)からの引込み設備の出し入れや盛替え作業等に重機

が使用できず、作業性・安全性に問題が多い。

- ④ 写真-2(d)に示すように、引込み設備のテンションロッド、作業足場、設備盛替え軌条等が、桁下空間の建築限界を侵すことがあり、特に、航路上・線路上・道路上での架設には配慮が必要となる。

- ⑤ 最上段ケーブルについては、引込み設備と下部工の干渉問題が発生する場合があるので、設計・計画時に十分な配慮が必要である。

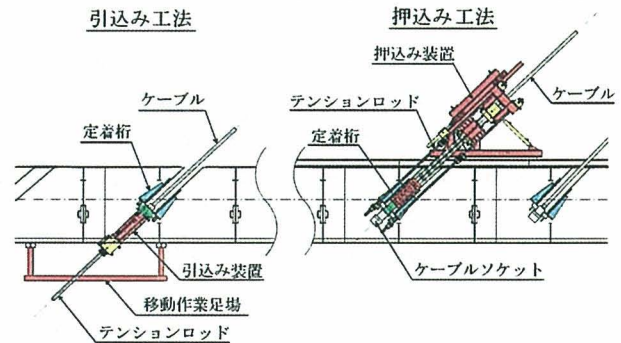
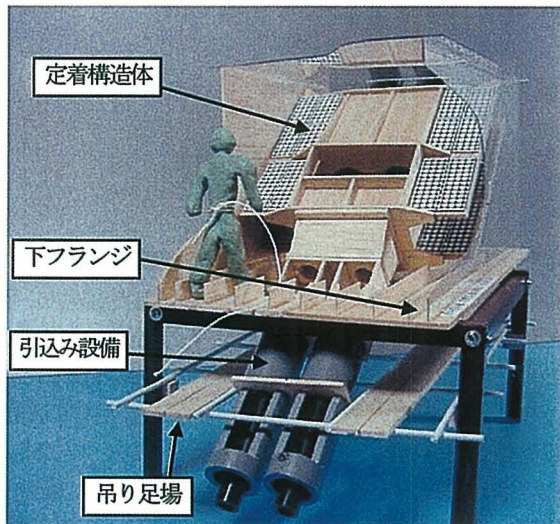


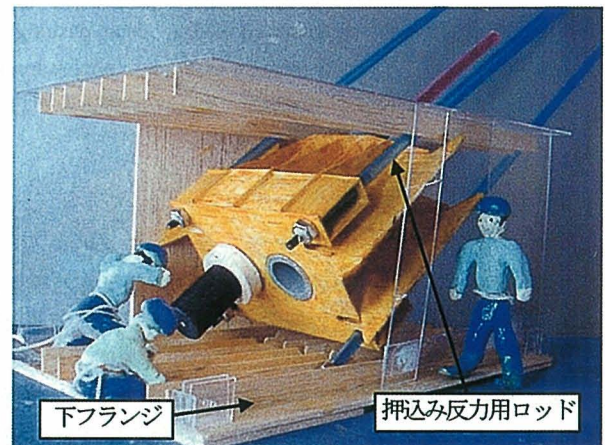
図-1 張力導入方法の比較図

2.2 二面吊りケーブルの場合

- ① 図-2に示すパイプアンカー方式、またはブラケット方式の場合も、上記④・⑤項(写真-1参照)と同じ問題が発生する。



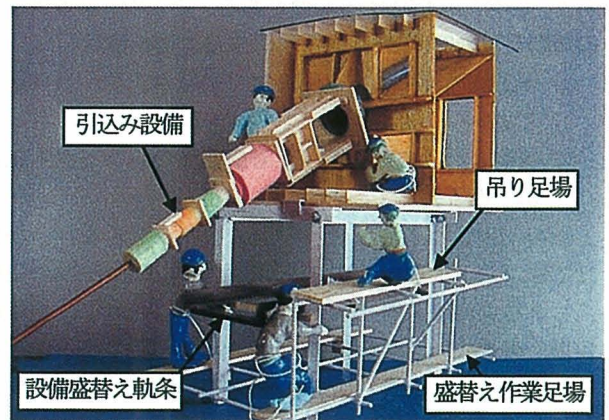
(a) 府中四谷橋(引込み工法採用)



(b) 府中四谷橋(最上段ケーブルのみ押し込み工法採用)



(c) 美原大橋(押し込み工法採用)



(d) 湘南銀河大橋(引込み工法採用)

写真-2 一面ケーブル定着部構造の代表例

② 引込み設備の組解との関係からケーブルより外側のデッキプレートやフェアリング等は、後架設とする場合が多い。それによって、以下の問題が発生する。

- ・張出し側に作業床がないため、ケーブル架設時の作業性・安全性に問題が多い。
- ・後架設部材は、ケーブルの山越し架設やケーブル間への挿入作業が発生し、重機の取り扱い、ケーブルとの接触問題に配慮が必要。
- ・作業工程が複雑となる

③ 張出し部材を先行架設した場合の問題として

- ・引込み設備の組解用特殊吊り天秤が必要となる。天秤を使用しない場合は、盛替え台車または、移動足場が必要となる。
- ・足場設備が複雑になり特に移動足場は張出し量が大きくなる。

④ 上下作業が多い。

以上のように、引込み工法には色々な問題が存在する。

3. 二面吊りケーブルへの押込み工法の適用

3.1 概要

斜張橋ケーブルの定着構造体は、ケーブル形状（一面か二面）や主構造形状によって、様々なタイプが採用されている⁹⁾。図-2は二面吊りケーブルの代表的な定着構造でパイプアンカー方式と呼ばれ、これ以外のブラケット方式も含め、従来から引込み工法によってケーブル架設が行われてきた。これらの定着構造体は、いずれもフェアリングより内側に取付くため、2.2項で述べた複数の問題点との絡みや架設条件から施工を難しく複雑化しているのが現状である。この引込み作業をデッキ上からの押込み作業に変更することが出来れば、問題点は減少するのではないかと想定できる。そこで今回、大師橋の最上段ケーブルに押込み工法が採用されたことにより、全ケーブルへの適用性を前提に、押込み反力の取り方、伝達方法、主構造への影響等について研究し、また、実橋による押込み時の応力状態を計測しFEM解析との検証を行うことにした。

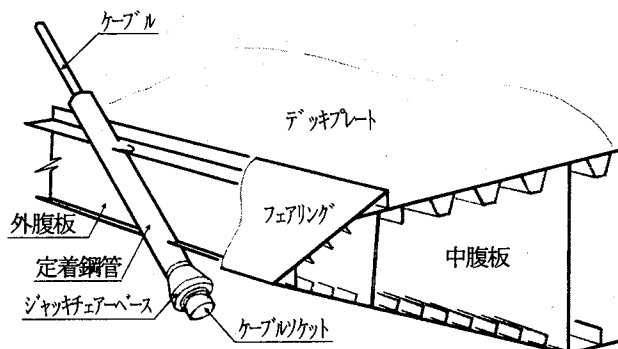


図-2 二面吊りケーブルの代表的な定着構造

3.2 押込み工法を適用するための検討項目

図-3は鶴見つばさ橋で開発した押込み装置を示す。これは、4本のテンションロッド（以下、反力ロッドという）を定着構造体下端にナット固定し、押込み反力を中腹板に伝達させていく方式で一面吊りケーブルのみに適用されてきた。この装置を二面吊りケーブルに適用させるためには、反力ロッドをどこに固定するか、ケーブル角度が三次元的に変化する問題をどのように装置化するか等の二つに尽きる。後者の装置については、美原大橋で開発済みとなったため省略し、前者をどのように解決するかについて、以下の項目を網羅しながら検討することとした。

(1) 既存定着構造体タイプへの適用に関する検討

- a. 大師橋最上段ケーブルの応急処置としての検討
- b. 全ケーブルへの適用に関する検討

(2) 新設橋梁に向けての新定着方式の提案

すなわち、(1)項のa.は応急処置であることから大師橋専用のものであり、今後の計画橋梁に適用させるためにはb.項の検討が重要となってくる。b.項に多くの問題がある場合は、(2)項にて新定着方式を提案する。

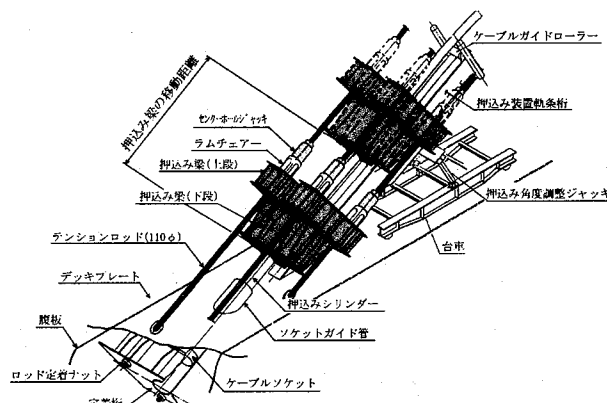


図-3 定着桁に押込み反力を伝達させる方法

3.3 既存定着構造体タイプへの適用に関する検討

3.3.1 押込み時の反力ロッド固定位置とその構造

押込み反力は、どこで取るか、どこへ力を伝達させていくか、また、その構造はどうあるべきか等については、押込み装置の反力ロッドの位置と主構造との関係で決まる。主な反力受け方法には、①桁内のケーブル定着梁で受ける方法、②パイプ上端に反力受けブラケットを設置する方法、③腹板付き反力受け部材（吊りピース）で受ける方法の3とおりが考えられる。図-2に示すような二面吊りケーブルの一般的な定着方法の場合は、上記③項は力を直接腹板に伝達できることから最も合理的な方法といえるが、押込み装置の反力ロッドの本数や位置との関係から、必ずしも適するとは限らない。大師橋は製作途中での工法変更があったことから材料手配に問題があり、この方法は採用できず図-4に示すような3タイプが提案された。それに吊りピースタイプを加え、押込み反力伝達構造として、図-4に示す4タイプについて、応力の確認を行った。なお、C1は四隅

に反力ロッド孔を設けたブラケットタイプ、C2は反力ロッドが入る程度の細径パイプを溶接したロケットタイプ、また、C3は極厚プレートに円形にプレスしパイプ本体と溶接した突き合せタイプを示す。

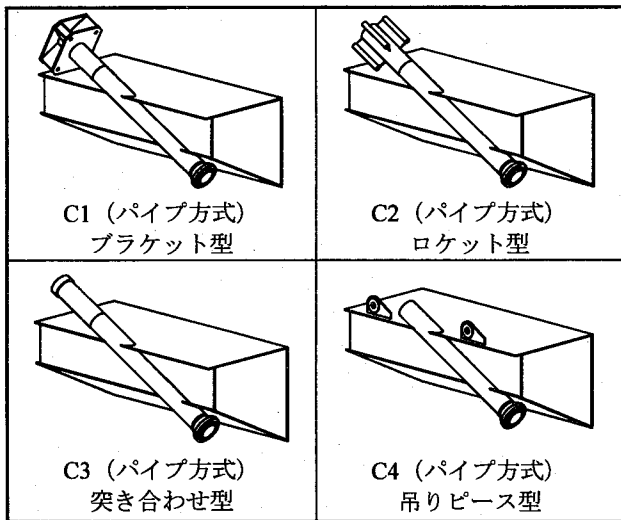


図4 押込み反力伝達構造の種類

3.3.2 主桁側定着部のFEM解析

斜張橋のケーブル定着部は応力の流れが複雑であるために設計方法も確立しているとは言えない。そのため、定着構造の種類や形状の違いにより発生する応力の大きさを考慮せず、既存橋梁の設計法を参考にして設計しているのが現状である¹⁰⁾¹¹⁾。ゆえに、設計法の検証を兼ねてFEM解析により部材の照査を行っている¹²⁾¹³⁾。

そこで、二面吊りケーブルへの押込み工法を適用するに当たって、引込み時と押込み時の応力の流れやレベルの違いを確認するためFEM解析を実施した。

図-4に示すC1～C3は、主構造に対してはパイプを介して力の伝達が行われているので応力の流れが同じであるが、押込み装置からの反力の受け方が異なる。C4は主構造に反力受けを設けた事により、ダイレクトかつシンプルに力を伝達することができる。

従って、解析モデルはC1～C3タイプ共通の定着管先端の無いモデルとC4タイプの2ケースとし、C1～C3のパイプ先端の反力受け部は別のモデルとして解析した。

(1) 解析モデル

FEM解析に用いた主桁側ケーブル定着部の全体モデルと定着腹板のみを取り出したモデルを図-5に示す。

(2) 載荷荷重

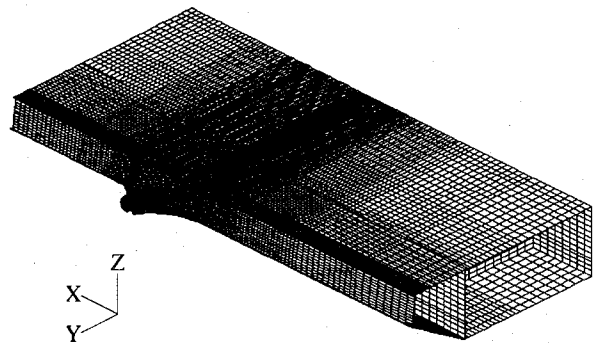
FEM解析に用いる載荷荷重（ケーブル張力）は、ケーブル引込み時およびケーブル押込み時とも、設計引込み張力相当の $P=4900\text{kN}$ を定着管下端および上端に載荷した。

(3) 解析結果の比較

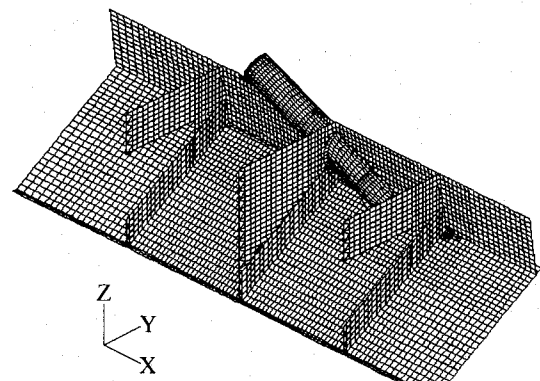
a. ケーブル定着部の応力の流れ

- ① ケーブル引込み時のケーブル張力による応力の流れは、大師橋のようなパイプアンカー形式の場合、文

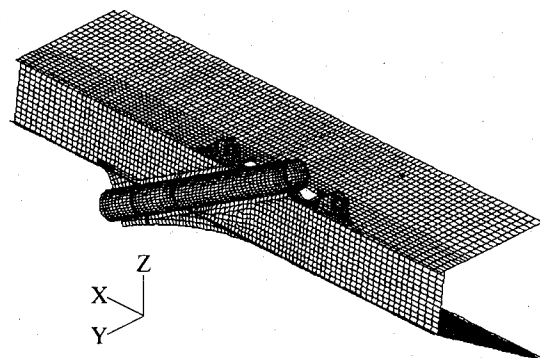
献によると¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾、定着管→定着腹板・下フランジ→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達される。本解析においても同様の結果となった。ただし、定着管から直接下フランジへ流れる応力は小さい(1割程度)。



(a) 全体モデル



(b) 定着腹板 (C1～C3)



(c) 定着腹板 (C4)

図-5 主桁側ケーブル定着部FEM解析モデル

- ② ケーブル押込み時の解析結果による応力の流れは、C1～C3タイプの場合、定着管→外腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達され、ケーブル張力の載荷位置がパイプ下端からの圧縮力かパイプ上端からの引張力かの違いだけで、ケーブル引込み架設時とほぼ同じような流れ方である。ただし、上フランジと定着管は開口により一体となっていないため、定着管から上フランジへの直接的な応力の流れはない。
- ③ C4タイプの場合は、吊ピース→外腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達され、定着管には応力は発生しない。

b. 定着部の応力レベル

図-6に定着腹板のケーブル引込み時およびケーブル押込み時の応力を示す。

- ① C1～C3タイプの解析による応力度は、ケーブル引込み時もケーブル押込み時も同レベルの応力である。ただ、最大応力発生位置は、ケーブル引込み時の場合は定着腹板下フランジ付近であり、ケーブル押込み時の場合は定着腹板上フランジ付近である。
- ② C4タイプの場合、ケーブル押込み時に吊ピースから腹板へ移行するフィレット部付近で、C1～C3タイプに比べて1.5倍程度の応力が発生する。これは、断面急変に対してフィレットにより応力集中を緩和しても、まだ応力レベルは高い状態であることを示している。
- ③ C1～C3タイプのケーブル押込み時には、定着管と上フランジが交差する付近の定着腹板において(①の最大応力発生位置)、開口による断面急変のため、応力集中がみられ局部的に許容値 $1.1\sigma_a=231\text{N/mm}^2$ を超えているが、降伏点(355N/mm^2)以下であったため、押込み時の架設計画は安全であると判断した。
- ④ C1～C4全タイプにおいては、一部応力レベルが高い箇所があるが、許容値 $1.1\sigma_a=231\text{N/mm}^2$ 以下である。

c. 反力受け部の応力レベル

ケーブル押込み時の反力受け部材図-4のC1～C3パイプ先端部に対しても、応力レベルを確認するためFEM解析を実施した。その結果を以下にのべる。

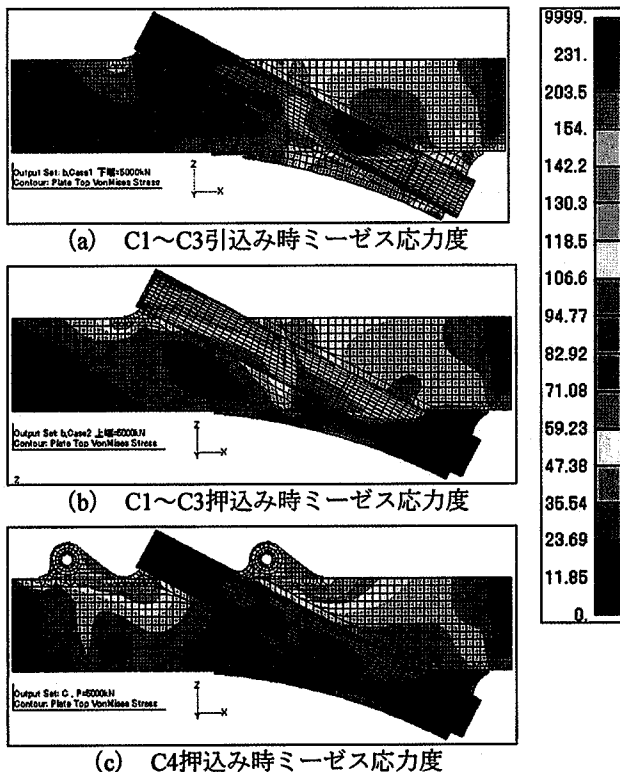


図-6 定着腹板の応力レベル

- ① C1タイプの発生応力は、許容値 $1.1\sigma_a=280.5\text{N/mm}^2$ 以下であった。

- ② C2タイプについては定着管に板曲げによる許容値を超える応力が発生するため、パイプ厚を相当厚くする必要がある。

- ③ C3タイプについては突き合わせパイプに許容値を超える応力が発生するため、突き合わせパイプ厚を厚くして、支圧面積を大きくする必要がある。

- ④ b.で述べたC4タイプについては、吊りピースのピン孔周辺に局部的に降伏点(355N/mm^2)に近い値が発生するため寸法および補強版を相当大きく(強度が約2倍弱)する必要がある。

上記①～③に示すように、大師橋では最も問題点の少ないC1タイプを採用した。

3.3.3 大師橋の応力測定

大師橋のケーブルは引込み工法により架設されている。ただ、橋台側桁端付近に取り付く最上段ケーブルだけは、定着部が橋台のすぐ近くにあり、ジャッキ引込みの作業空間を確保出来ないため、押込み工法によりケーブル架設された。そこで、架設時の実橋の応力状態を知る貴重なデータの収集と、そのデータを基に本研究で実施したFEM解析結果の妥当性を検証するため、押込み時の応力測定ならびに、ケーブル定着時(引込み時に相当)の応力測定を実施した。写真-3に大師橋の押込み工法によるケーブル架設の状況を示す。

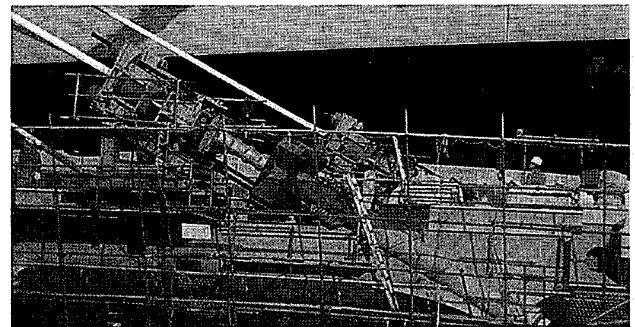


写真-3 押込み工法によるケーブル架設

(1) 測定箇所

測定位置は定着構造体の部材設計において、大きな応力が発生する定着管上部と下部に一軸ゲージを、フィレット部およびその周辺、下フランジとダイヤフラムの定着管近傍には最大応力を計算するために、三軸ゲージを貼り付けた(図-7参照)。

(2) 測定結果

測定は架設工程に合わせて、ケーブル架設開始から定着までの4日間のひずみを連続して測定した。表-1にケーブル架設の作業工程を、それに連動する形で代表として定着管のひずみ変化を図-8に示す。このひずみ変化の中で、明確にひずみ値の変動が現れているところは、21日の1960kN押込み時と25日の5243kN押込み時である。その中間の22日～24日の3日間は他のケーブル架設作業と温度変

表-1 ケーブル架設の作業工程

日	時	作業内容	荷重
2月21日	08:46	イニシャル測定	0 kN
	11:06	1次引込み開始	98 kN (引込)
	14:00～ 14:40	テンションロッド 開始 設置 中断	98 kN (引込)
	15:24	押込み作業 開始	—
	15:39	押込み作業	176 kN (押込)
	15:53	押込み作業	1960 kN (押込)
	16:23	定着	1862 kN (定着)
2月25日	11:23	押込み作業 開始	—
	11:24	押込み作業	1960 kN (押込)
	11:47	押込み作業	5243 kN (押込)
	11:56	定着	4802 kN (定着)

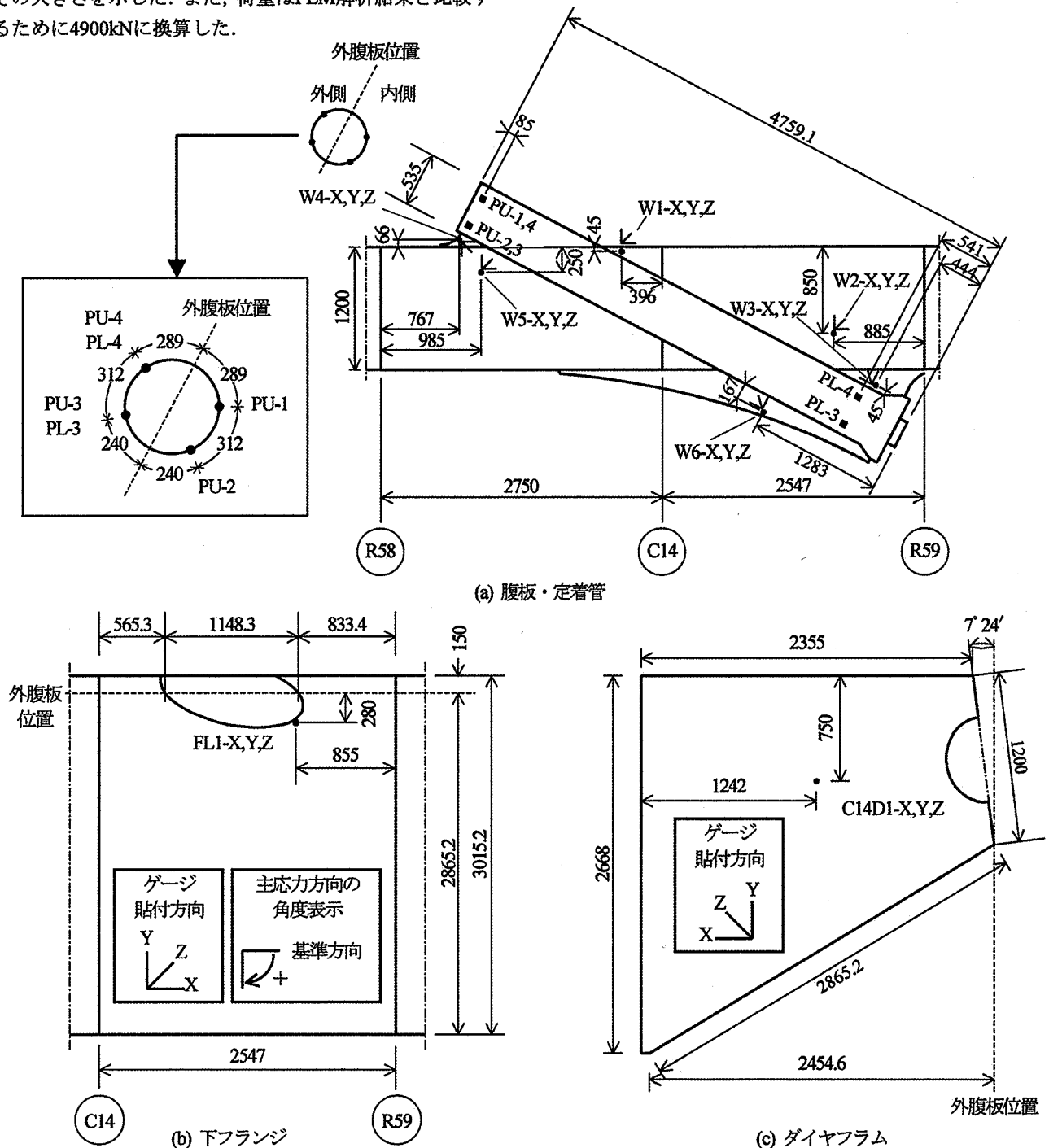
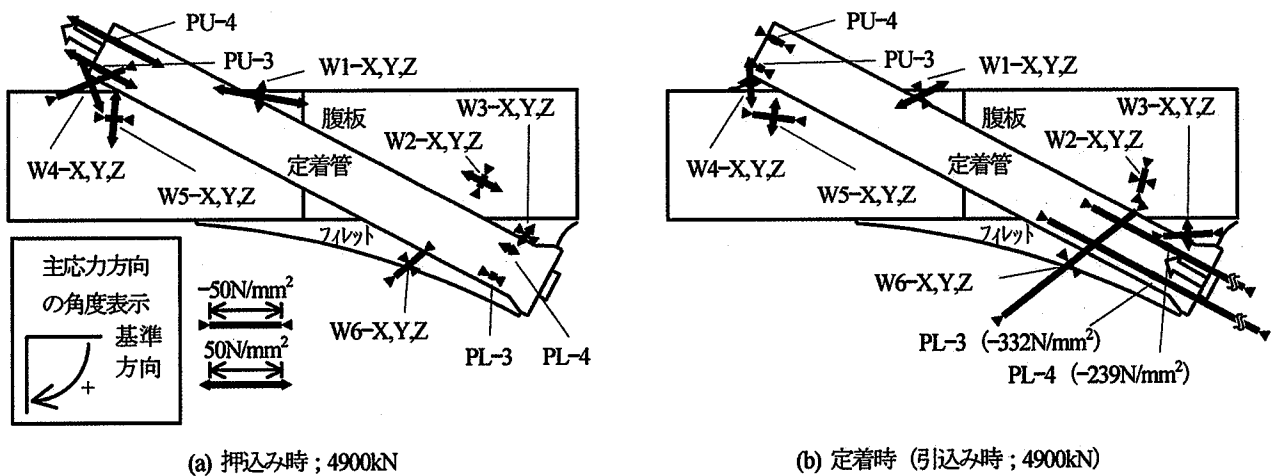
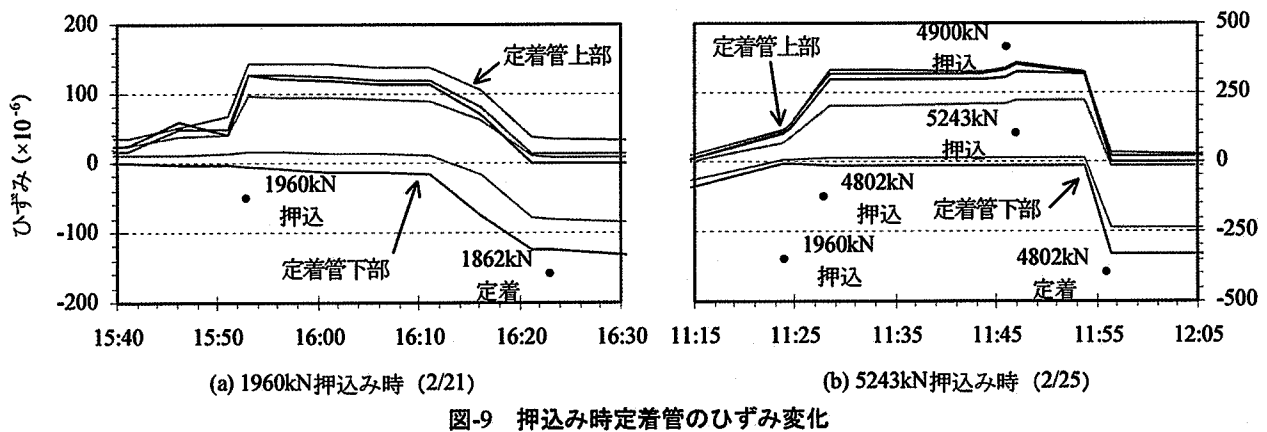
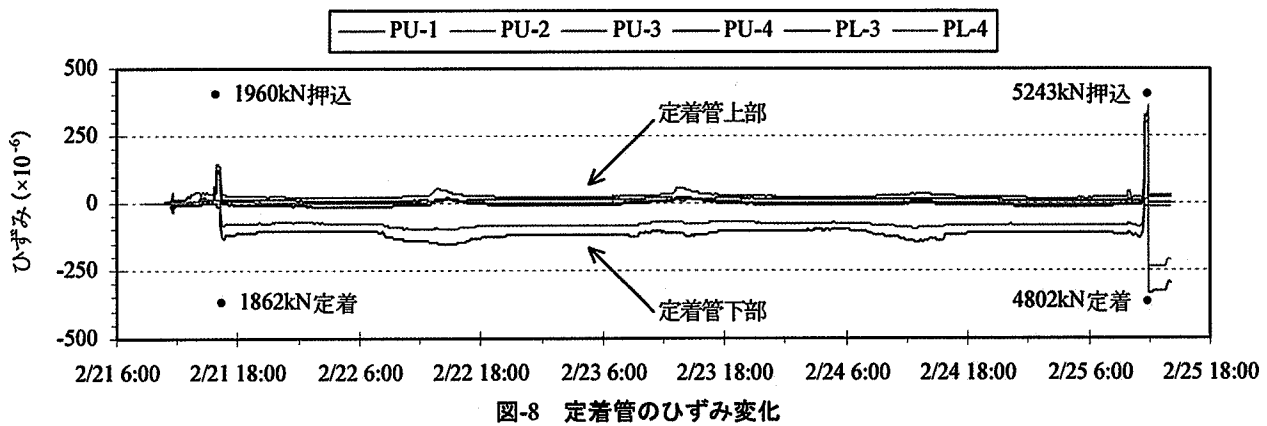


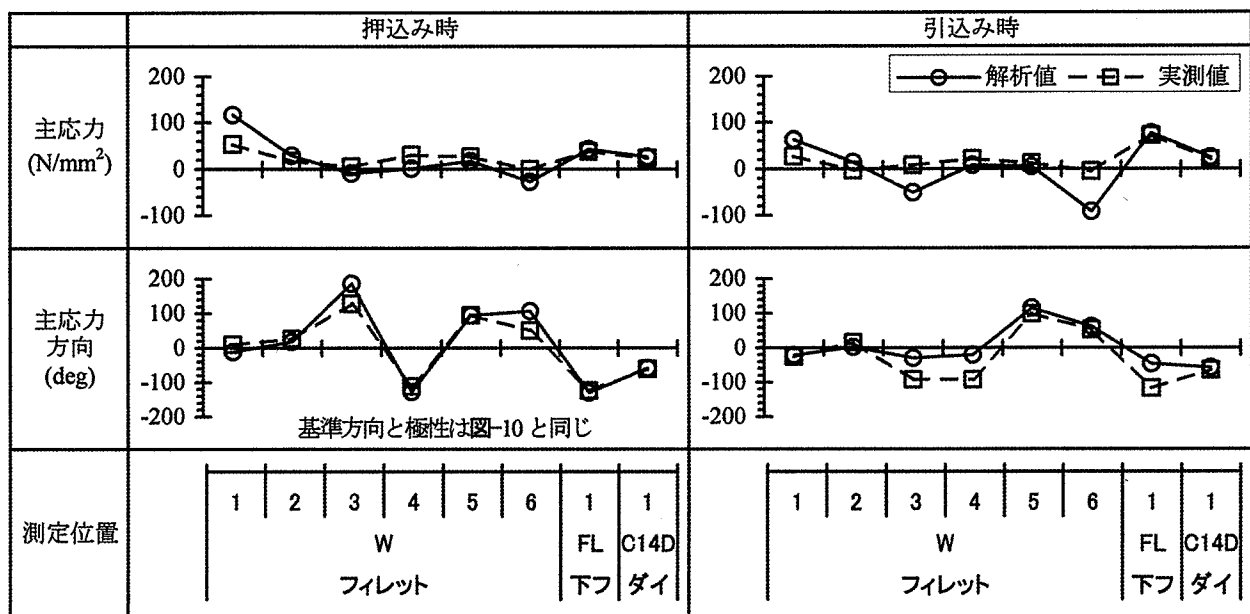
図-7 ケーブル定着桁のひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)



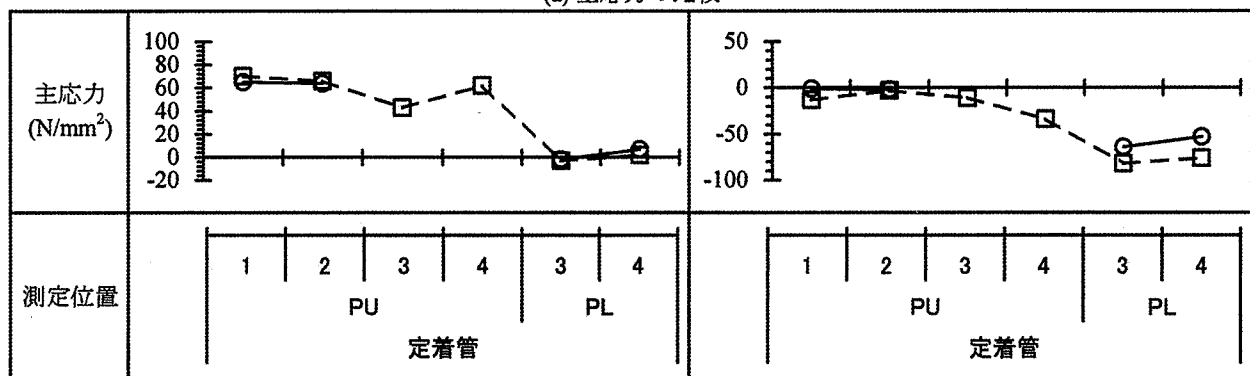
3.3.4 主析側定着部の応力比較

実測値とFEM解析値を比較する。図-11に押込み時と引込み時の結果を示す。この結果から、押込み時・引込み時ともに全体的な傾向は応力・主応力方向いずれも実測値と解析値とは良く合っている。しかし、引込み時のフィレット

ト部 (W3,W6) と定着管下部 (PL-3,PL-4) はFEM解析値とやや異なる値を示した。この定着管下部付近は引込み時の引張荷重が圧縮力として直接加えられる定着管下端に最も近く、荷重方向のわずかな誤差が他の測定点よりも影響を受けやすいためと考えられる。



(a) 主応力の比較



(b) 1軸応力の比較

図-11 押込み時と引込み時の結果

3.4 考察

- ① 押込み工法による定着部の応力の流れや応力レベルは、引込みと同様の結果でありケーブル架設時に配慮する必要は無く、引込み工法と同等と考えられる。
- ② FEM解析による解析結果は実測結果と良好な一致をみた。従って、FEM解析結果の妥当性を確認することができた。また、大師橋の設計計算書をもとに引込み時の定着部応力とも比較をしたが、腹板および定着管については、FEM解析値はかなり小さめで（設計値の約6〜8割）、設計計算は十分安全サイドの設計をしていることも明らかとなった。
- ③ 吊りピース方式は、その形状がファイレット部の局部応力を緩和させるために非常に大きくなる。そのため、架設後の有効利用は難しく、切断撤去することが望ましい。
- ④ パイプアンカー上端で反力を取る方法は、パイプ長が長くなり主桁本体と一体になった場合、輸送上の問題が発生する。従って、本方式を採用する場合は現場接合方式となる。
- ⑤ 以上のことから、C1〜C3方式は応急処置用として有効であるが、全ケーブルへの適用は問題が多い。

3.5 新定着方式の提案

二面吊りケーブルの架設とメンテナンスがスムーズに行える定着構造体を図-12で提案する。このタイプは一面吊りケーブルと同様に定着室を設け、4項で述べるT6タイプとの構成によって簡素化したものである。ケーブルの架設はすべてデッキ上からの押込み工法としている。点線のフェアリング形状は大師橋の現況を示し、実線は提案ラインを表している。写真-4はケーブル角度のきつい最下段ケ

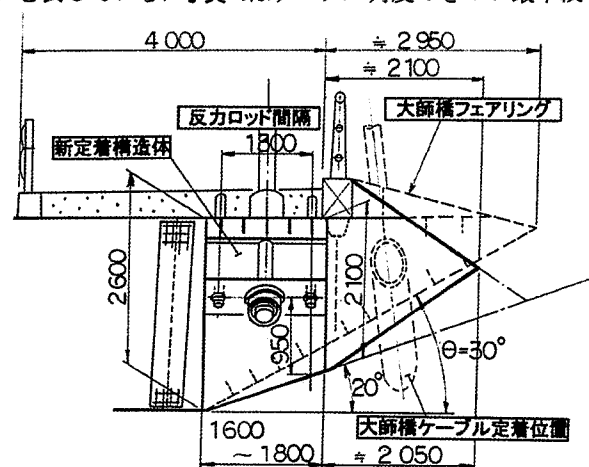


図-12 大師橋への新定着構造体適用（案）

ケーブルからケーブル角度の緩やかな最上段ケーブルの定着構造体の取付け状況を示している。いずれも押込み架設時のケーブル定着作業は問題なく実施できるが、メンテナンス作業に関しては最下段ケーブル部のみに作業空間が少ないため問題が発生する。その解決策として下フランジ立上げ角度 $\theta = 30^\circ$ を 20° 位にすれば作業空間が広くなり作業性が向上することが判明した。写真-4では下フランジ立上げ角度 30° （青色）と 20° （緑色）の室内空間の違いを示している。

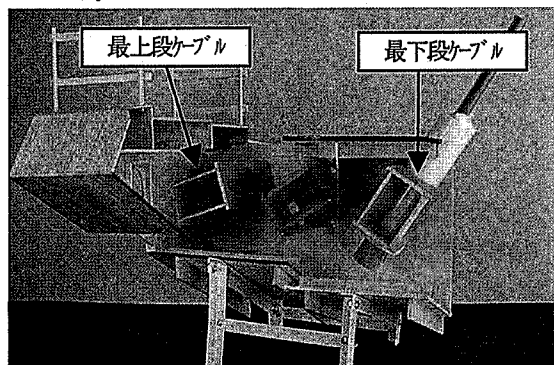


写真-4 ケーブル角度と定着構造体の関係

今までの押込み工法は引込み工法と同様に、一次引込み作業は定着構造体下端から行ってきた。これをデッキ上から一次押込みのできる装置（図-13参照）を開発することによって、定着作業以外のすべての作業はデッキ上から行えるように簡素化された。

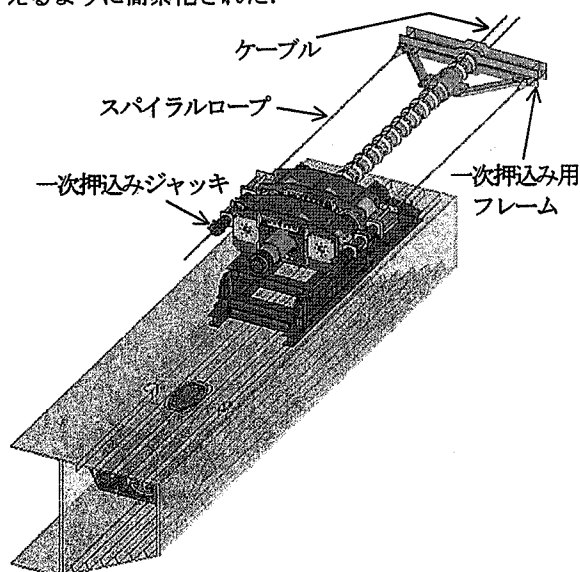


図-13 新押込み装置

4. 一面吊りケーブルの定着構造のコンパクト化

4.1 定着構造体のコンパクト化の条件

押込み工法はケーブルの定着部が桁内または桁外にあっても、ケーブルソケットを定着させる過程において、全てデッキ上または、定着点延長線上から押込み定着させるものである¹⁴⁾¹⁵⁾。従って、桁下の緊張方向に支障となる構造物が存在する場合に適し、橋梁以外の全ての構造物にも

適用できるとしている¹⁶⁾。近年の斜張橋は、偏平な主桁断面が多く写真-2(a)～(c)に示すように橋軸方向へストレートに通行が出来なく、マンホールを介して迂回する構造が増えてきた。現場の作業性や将来のメンテナンス作業を考えると定着室は広くしておきたい。そこで、美原大橋をモデルに以下の条件をベースに定着構造体のコンパクト化の研究を行った。

- ① ガイド管を主要構造物と考え、ガーダーとの組合せによって強固な定着構造体を作り上げる。
- ② 押込み用反力ロッドを4本から2本に変更し、薄型タイプの定着構造体を作り上げる。
- ③ メンテナンスが容易にできる定着構造体とする。
- ④ ケーブルの一次引込みを定着部下端から行わず、デッキ上から押込めるようにする。

4.2 ケーブル主桁側定着部のFEM解析

—美原大橋をモデルとした新定着構造の開発—

美原大橋の定着桁のように一面吊りケーブルに用いられるアンカーガーダー形式の定着構造体は、応力の流れはシンプルであるが、構造が複雑で重厚長大となっているのが現状である。そこで、定着桁構造のコンパクト化に向け、従来のアンカーガーダー形式とパイプアンカー形式を組み合わせ、図-14の7タイプを提案した。この7タイプのFEM解析モデルを作成して、引込み時および押込み時のFEM解析を実施し、主桁側定着部の応力レベルおよび応力の流れを検証した。

梁方式	
T1 アンカーガーダー型	
パイプ方式	
T2 I断面型	T3 I断面V型
T4 I断面逆V型	T5 T断面型
T6 箱断面型	T7吊ビーム型

図-14 ケーブル定着構造体の種類

(1) 解析モデル

FEM解析に用いた主桁側ケーブル定着部の3次元解析全体モデルを図-15に示す。

定着構造体の拡大モデル図は代表的構造として、美原大橋で使用したアンカーガーダー形式 (T1 図-16a) と、橋軸方向の移動を考慮してコンパクト化したI形断面定着構造体のパイプアンカー形式 (T2 図-16b)、面外剛性を高めた箱形断面定着桁のパイプアンカー形式 (T6 図-16c) の3タイプを示す。

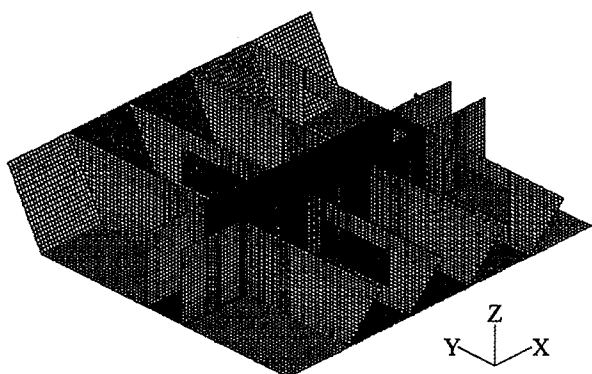


図-15 美原大橋全体モデル

(2) 載荷荷重

FEM解析に用いる載荷荷重 (ケーブル張力) は、ケーブル引込み時およびケーブル押込み時とも設計定着荷重として、 $P=6000\text{kN}$ とした。T1およびT6タイプはテンションロッド定着位置およびケーブル定着位置に載荷、また、T2～T5タイプは定着管下端および上端に載荷、T7タイプは引込み時は定着位置に、押込み時は吊ピースに載荷した。

(3) 解析結果と比較

ケーブル張力はケーブル定着管に作用する軸方向力が、定着梁部材から中腹板を介して、橋軸方向力と鉛直力に分かれて主桁へと伝達される。その応力の流れと応力レベルの解析結果を以下に示す。

a. ケーブル定着部の応力の流れ

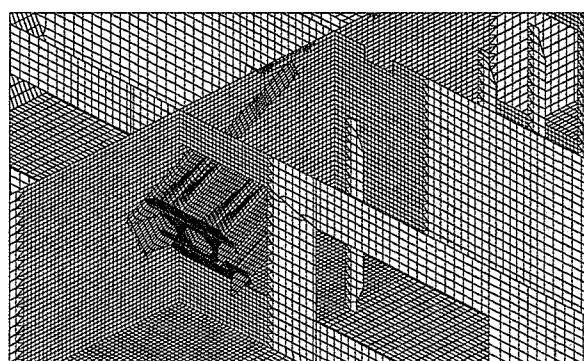
- ① T1およびT6タイプは引込み時、押込み時ともに、定着桁→中腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達される。
- ② T2～T5タイプは、定着管→定着桁→中腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達される。
- ③ T7タイプは、引込み時は定着管→定着桁→中腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達され、押込み時は吊ピース→中腹板→上下フランジ・ダイヤフラムへと伝達される。

b. 定着部の応力レベル

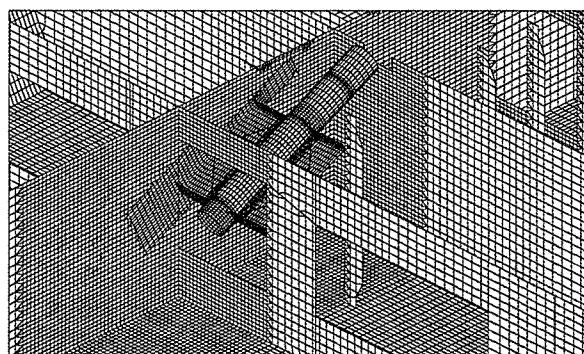
図-17にケーブル押込み時の定着腹板の応力を示す。

- ① T1タイプは引込み時、押込み時とも応力レベルが低く許容値 $1.1\sigma_a=231\text{N/mm}^2$ 以下である。

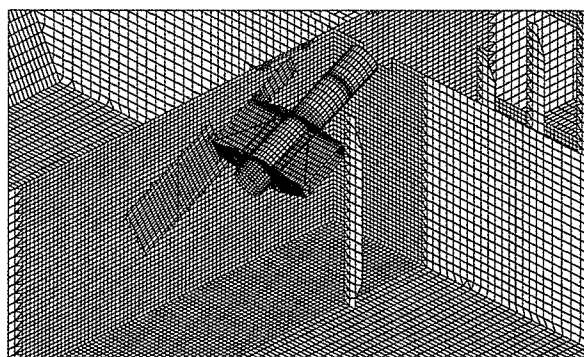
- ② T2～T5タイプは定着梁と接する中腹板裏側に補強リブ等で対処する必要がある。また、中腹板と横リブ (ダイヤフラム) 取付け位置、もしくは中腹板と定着桁上フランジとの接点に応力集中がみられ、T3タイプ押込みおよびT4タイプ引込みで局部的に許容値 $1.1\sigma_a=231\text{N/mm}^2$ をわずかに超える箇所があり、中腹板厚を増厚する必要がある。
- ③ 箱形断面の腹板間隔はT6の場合0.25mであるが (定着管径550mm)、定着管に納まりかつ製作上問題のない間隔 (約0.35m) まで広げれば、さらに応力が緩和されて有利である。
- ④ T7タイプは、引込み時は問題ないが、押込み時は吊ピースと腹板とのフィレット部に応力集中が発生することにより、許容応力度 $1.1\sigma_a=231\text{N/mm}^2$ に等しい応力が発生する。そのため、吊ピース取付け付近の腹板を増厚する必要がある。



(a) アンカーガーダー形式 (T1)



(b) I形断面定着構造体パイプアンカー形式 (T2)



(c) 箱形定着構造体パイプアンカー形式 (T6)

図-16 主桁側ケーブル定着部FEM解析モデル

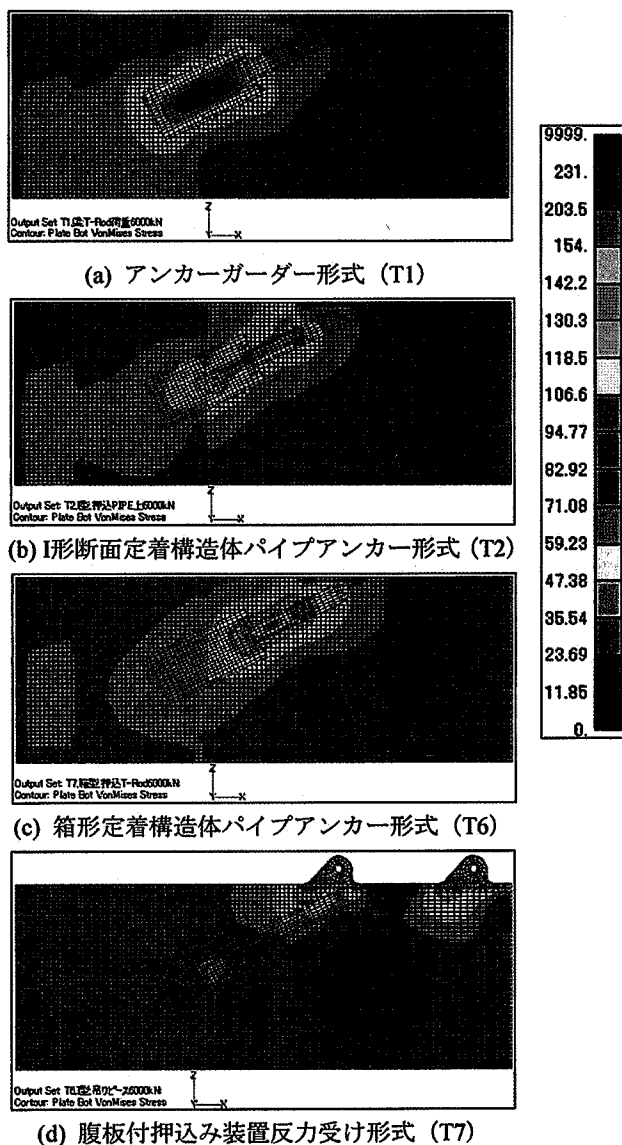


図-17 ケーブル押し込み時の定着腹板応力（ミーゼス応力）

4.3 定着構造体の箱桁内空間と重量比較

美原大橋の定着構造体（写真-2(C)）と、コンパクト化したタイプ（写真-5）との大きさ比較を模型で示す。これらのタイプはいずれも定着構造体の下端で反力ロッドをナット固定する方法を用いたが、T7タイプのように腹板線上にピースを取付け反力を直接腹板に伝達する方法は力学的には最も優れている。しかし架設後、このピースの有効利用は寸法的にも位置的（車道側への残置となる可能性が多い）にも問題があり、撤去の方向で考えざるを得ない。従って、T6タイプは最もコンパクトであり、また、写真-6に示すようにメンテナンス用機材の取付けや作業性にも問題がないことから推奨できる構造といえる。

以上の結果から、美原大橋の定着構造体（T1タイプ）と、コンパクト化されたT6タイプとの重量比較を表-2に示す。そのときの計算仮定は以下のとおりとした。

- ① ケーブル定着構造体の数量は、美原大橋の総ケーブル数64本と同じとした。

- ② 美原大橋の定着構造体の重量は設計図から算出した。ただし、ガイド管重量はスケールアップ長による概算重量とした。
- ③ T6タイプのパイプ重量は、美原大橋のガイド管の長さと同じとした。（実際は定着構造体がコンパクト化されたため、定着位置がデッキ面に近づき重量も軽くなる）。
- ④ T6タイプの各ケーブル別定着構造体の重量は、ケーブル張力の大きい定着構造体の重量を求めたのち、各ケーブルの定着構造体重量比を使って換算した。

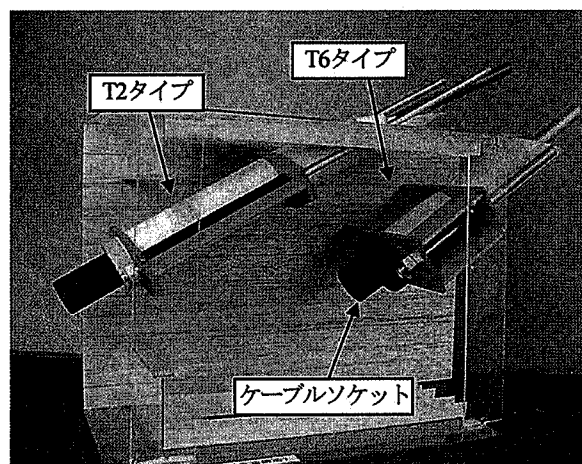


写真-5 新定着構造体（美原大橋と同じ桁高）

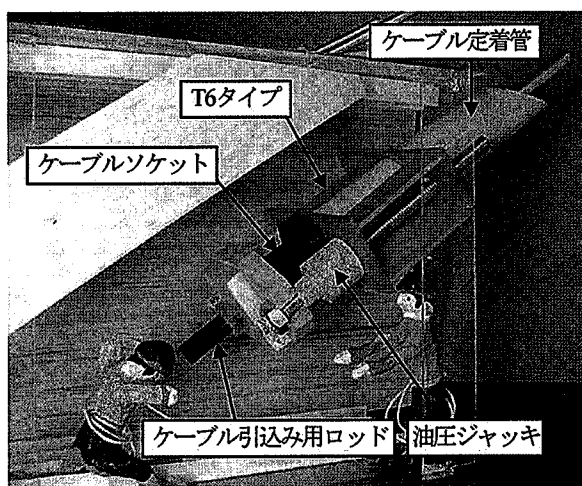


写真-6 T6タイプのメンテナンス機構

表-2 定着構造体の概算重量比較

	定着構造重量	パイプ重量	計(kN)
美原大橋	約1600	約 300	190
T6タイプ	約 400	約 400	800
差	約-1200	約+100	-1100

4.4 考察

- ① 一面吊りケーブルにT6タイプを採用することにより、応力レベルを抑えながらコンパクトな定着構造体を

造り上げることが可能となった。FEM解析時は箱桁の腹板間隔を250mm、腹板高を1000mmとしたが、パイプ径によっては腹板間隔を350mmまで広げることができる。さらに応力伝達をスムーズにする方法として、定着腹板をパイプに対して「ハ」の字に構成すれば応力レベルはより改善されるものと思われる。

- ② いずれの定着構造体タイプも、定着位置をデッキ面に近づけることができ、定着室内を広くすることができる。特に、T6タイプはコンパクトで作業空間を広くとることができる。
- ③ 既存のT1タイプとT6タイプとで約1100kNの重量差が生じた。この重量減は、あらゆる工種にプラス要因として波及し、経済効果が計り知れない程大くなるものと思われる。
- ④ 引込み設備を固定するために必要なジャッキチェアベースは、新押込み工法を採用することによって不要となり経済性はさらにアップする。
- ⑤ 押込み装置のコンパクト化によって、定着室の腹板間隔（1.7～1.8m位まで）を狭くすることができる。

5. あとがき

本研究において、ケーブル押込み時と引込み時の応力の流れや応力レベルをFEM解析と現場計測にて明らかにし、安全性も含め比較検証した。ケーブル定着部のコンパクト化と二面吊りケーブルへの押込み工法の適用は、今後の斜張橋架設技術の発展には欠かすことのできないテーマとなっていたが、今回の研究によって、これらは解決できた。この提案が、今後の斜張橋建設計画に参考になれば幸いである。

謝辞

最後に、本研究を行うに当たり、協力頂いた関係各位に心より謝意を表すとともに、本研究が橋梁建設における様々な問題解決の糸口になれば幸いである。

参考文献

- 1) 牧野文雄, 相原弘, 佐々木恒容: 淀川橋梁(斜張橋)の実施設計と製作, 橋梁と基礎, pp.32-36, 1986.6
- 2) 牧野文雄, 桑田幹雄, 柴田隆夫, 花岡恒司: 淀川橋梁(太径ケーブル斜張橋)の架設, 橋梁と基礎, pp.3-4, 1987.
- 3) 明石行雄, 小島治雄, 井出俊也, 森滝義, 酒井洋典, 磯江暁: さぬき府中湖橋の設計と架設(下), 橋梁と基礎, pp.35-36, 1992.10
- 4) 清見博英, 加藤静雄, 石田五郎, 島田智之: 美原大橋上部工の設計と施工(上), 橋梁と基礎, Vol.38, pp.5-10, 2004.7

- 5) 伏見敏男, 伊東昇, 牧田篤弘, 寺島善宏: 鶴見航路横断橋梁上部構造の施工, 橋梁と基礎, pp.6-9, 1994.10
- 6) 清水健介, : 鶴見つばさ橋の架設工事, 日本鋼管工事技報No.50, pp.39-44, 1995
- 7) 清水健介, 佐藤宏, 木田哲量: 斜張橋ケーブルの押込み工法の開発, 日本大学生産工学部第37回学術講演会(2004-12-4), pp.71-74
- 8) 清見博英, 加藤静雄, 石田五郎, 島田智之, 並木祐治: 美原大橋上部工の設計と施工(下), 橋梁と基礎, Vol.40, pp.15-20, 2004.9
- 9) 土木学会 鋼構造委員会 鋼構造進歩調査小委員会(編): 鋼斜張橋一技術とその変遷一, 土木学会, 鋼構造シリーズ5, pp.30-33, 1990.
- 10) 近藤和夫, 小松定夫, 小林紘士, 井上洋里, 松川昭夫: 豊里大橋(斜張橋)のケーブル定着部の設計について, 土木学会論文集, No.192, pp.1-11, 1971.8
- 11) 加藤信夫, 飯岡 豊, 川人達男: 名港西大橋(上部工)の設計, 橋梁と基礎, Vol.17, pp.23-24, 1983.12
- 12) 松井邦夫, 梶川靖治, 森谷久吉, 岩崎祐治, 新井伸博, 木元輝幸: 複合斜張橋・生口橋の斜ケーブル定着部の設計, 川田技報, Vol.10, pp.73-74, 1991.1
- 13) 檜山義光, 横山正則, 太田哲司, 井ヶ瀬良則, 宮崎正仁: 名港大橋上部工の設計・施工(上), 橋梁と基礎, Vol.28, pp.7-8, 1994.11
- 14) 清水健介ほか5名, 特許 第2727533号, 橋梁吊りケーブルの張力装置導入装置
- 15) 滝井良一, 特許 第3520029号 ケーブル引込み方法及びその引込み装置
- 16) 滝井良一, 特願2004-316366 吊りケーブルの押込み方法及び押込み装置

(2005. 9.10 受付)