

超長大吊橋ケーブル架設技術 — 明石海峡大橋ケーブル工事 —

Cable Erection Technology for World Longest Suspension Bridge

武野 優⁽¹⁾ 細川 淑⁽²⁾ 岸 康弘⁽³⁾ 奥本 武司⁽³⁾
Masaru TAKENO Hajime HOSOKAWA Yasuhiro KISHI Takeshi OKUMOTO

吉岡 卓治⁽⁴⁾
Takuji YOSHIOKA

抄 録

現在建設中の明石海峡大橋は、完成すれば全長3910mの世界最長吊橋となる。そのケーブルは、直径約1.1m、総重量約50500tにも及び前例のない大規模なものである。新日本製鐵はこのケーブルの設計・製作法の開発を永年進めてきており、PPWS工法、180kgf/mm²級高強度ワイヤを実現させてきた。一方、施工法でも様々な開発的取組みを続けてきた。これら施工にかかわる技術を中心にケーブル工事の施工概要をまとめた。

Abstract

Akashi Channel Bridge now under construction will become the world longest suspension bridge on its completion, having an overall length of 3,910 meters. The cable being used has about 1.1 meters in diameter and weighs about 50,500 tons in all which is of an unprecedented large-scale. Nippon Steel has been studying on designing and manufacturing this cable for a long time, and developed the PPWS constructing method together with the high-strength steel wire of a 180kgf/mm² grade. On the other hand, Nippon Steel has been also buckling down to the development of various execution methods of construction works. In this paper, the execution of the cable construction works, mainly the technology with regard to the cable laying execution, is outlined.

1. 緒 言

明石海峡大橋は、本州四国連絡橋の神戸・鳴門ルートのうち神戸市垂水区と淡路島の兵庫県津名郡淡路町との間の明石海峡に架かる全長3910m、中央支間長1990mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋であり、完成時は世界最大の吊橋となる。表1に示すように現在、アジア、ヨーロッパを中心にいくつかの長大吊橋が建設中であるが、中でも群を抜く巨大構造物といえる。

本橋は、1987年5月に現地工事が着手され、1998年春の開通を目指して現在最終段階の工事に入っている。

ケーブル工事は1991年7月に本四公団より新日本製鐵、神戸製鋼所の共同企業体で受注し、1995年12月までに前期工事を完了し、現在新たに受注した後期工事を遂行中である。

本橋の側面図を図1に示す。約87000tの補剛桁を支えるケーブルは、直径約1.1m、総重量約50500tという前例のない大規模なものである。その規模の巨大さゆえに全体系の計画、設計段階から新技

術の導入が不可欠とされ、特に引張強度180kgf/mm²級重鉛めつき鋼線の開発、適用は、全体系の設計合理化とともに工費削減、工程短縮に大きく寄与している。

また、施工においても新日本製鐵が長年押し進めてきたPPWS工法が本橋においても採用され、まさに従来から培ってきた技術の集大成といえるものである。ここに、ケーブル架設工事における特徴的部分を報告する。

2. 明石海峡大橋ケーブル工事の概要

本橋のケーブル工事の内容及び工事工程を表2、図2にまとめる。また、表3にケーブル諸元を示す。

3. ヘリコプターによるパイロットロープの渡海

3.1 施工概要

ケーブル工事は、主塔とケーブルを定着する橋台が完成した後、工事に着手する。工事の第1段階はこの主塔、橋台を結ぶ全径間に

*⁽¹⁾ 元 鉄構海洋事業部 明石海峡大橋プロジェクト班 班長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 橋梁構造部 部長代理

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 橋梁構造部 掛長

*⁽⁴⁾ 鉄構海洋事業部 橋梁構造部

表 1 世界の長径間吊橋

順位	橋名	中央支間長 (m)	ケーブル概算重量 (t)	完成年	国名
1.	明石海峡大橋	1 990	50 500	建設中	日本
2.	グレートベルト東道路橋	1 624	19 000	建設中	デンマーク
3.	ハンバー橋	1 410	11 000	1981	イギリス
4.	江陰長江公路橋	1 385	16 800	建設中	中国
5.	青馬大橋	1 377	28 000	建設中	香港
6.	ベラザノナロウズ橋	1 298	34 700	1964	アメリカ
7.	ゴールデンゲイト橋	1 280	19 500	1937	アメリカ
8.	ヘーガクステン橋	1 210	8 000	建設中	スウェーデン
9.	マキノ橋	1 158	10 100	1957	アメリカ
10.	南備讃瀬戸大橋	1 100	20 000	1988	日本

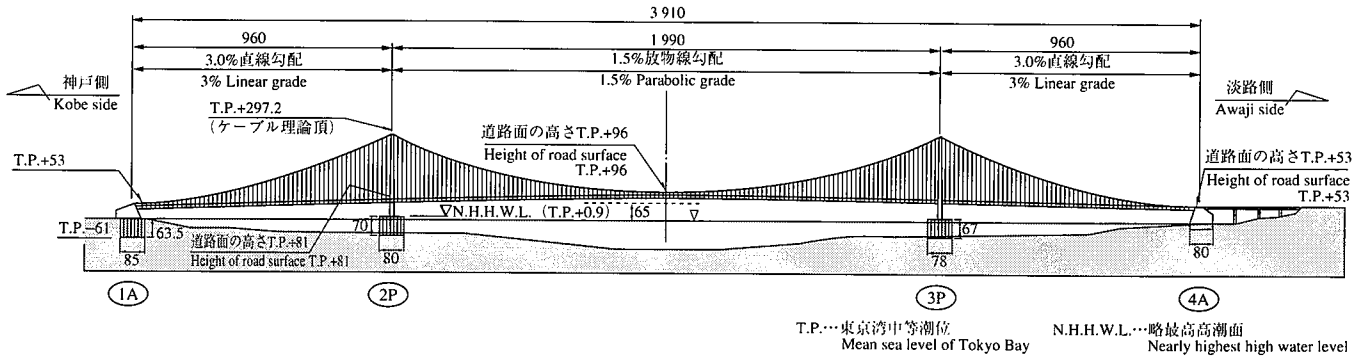


図 1 明石海峡大橋側面図

表 2 工事内容

工種	数量	重量 (t)
塔頂サドル製作・架設	4基	約 620
スプレーサドル製作・架設	4基	約 1 390
ケーブルストランド製作・架設	580ストランド	約 50 460
ケーブルスクイズ	1式	
ケーブルバンド製作・架設	550個	約 2 300
ハンガーロープ製作・架設	1 068本	約 2 050

表 3 ケーブル諸元

亜鉛めっき鋼線	引張強さ	180~200kgf/mm ²
	線径	φ 5.23mm
ストランド	構成素線数	127本/ストランド
	単位重量	21.36kg/m
ケーブル	ストランド数	290ストランド
	一般部直径	1 122mm

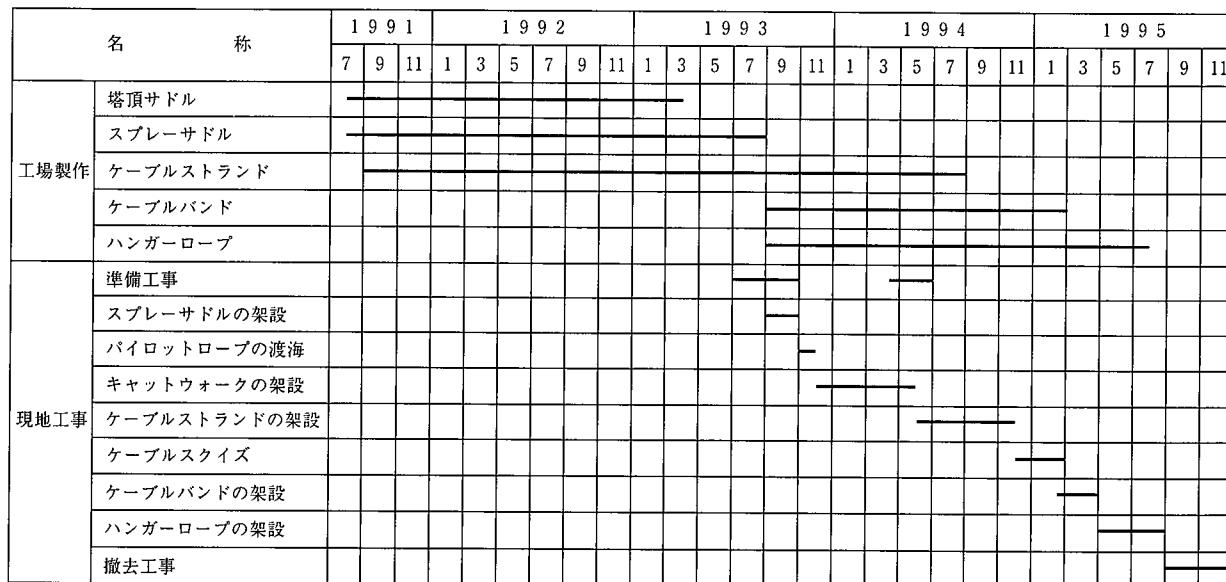


図 2 工事工程

足掛かりとなるパイロットロープを張り渡すことから始め、これを利用してロープ駆動系(ホーリングシステム)の設置、キャットウォークの架設、ケーブルの架設と推移していく。

従来、パイロットロープは海面を使用して、タグボートまたは大型フローティングクレーンにより引き出し、架設されてきた。しかし、明石海峡は、航行船舶が1日に1400隻以上になる頻繁な海上交通を有するとともに、海峡自体が広域、かつ、急潮流などの厳しい自然条件であることから、海面を使用せず、大型ヘリコプターによる空中架線方法をとった。

本工事は、1993年11月10日に実施したものであるが、図3に示すように、大型ヘリコプターにパイロットロープを巻いたリールをセットした延線機を吊り下げ、主塔間及び各橋台・主塔間に延線機からパイロットロープを繰り出しながら張り渡しを行った。使用した大型ヘリコプターの一般性能は、図4に示すとおりであり、また、張り渡されたパイロットロープは図5に示すφ10のポリアラミド繊維ロープである。長径間のヘリコプター渡海が実現した背景には、このような商業用の大型ヘリコプター及び超軽量・高強度の新素材ロープの出現があったといえる。

3.2 技術課題とその対応

ヘリコプターを利用してロープを延線架空する方法は、電線の張り渡し等には既に実績があるが、第三者への影響が甚大な環境のもとで施工するには、パイロット及び延線機操作員の操縦技術のみに頼ることは危険であり、本工法を採用するにはリスクが大きすぎると考えられた。確実に施工するための定量的技術蓄積は避けられ

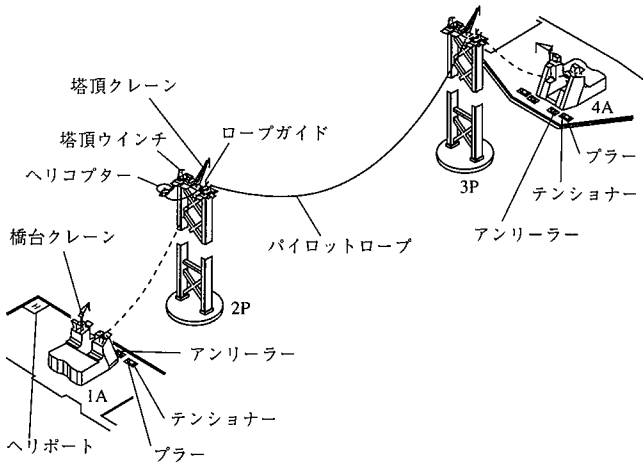
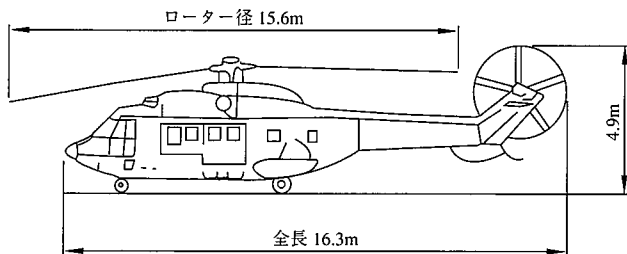


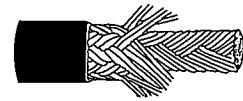
図3 渡海要領



ヘリコプター諸元

エンジン 1 500PS×2基 有効搭載量 4 180kg
 客席数 最大20名 最大スプリング吊下げ重量 4 500kg

図4 大型ヘリコプター



形式	構造	材 質			特性
008B-BC		内層：アラミド繊維 中層：ポリエステル繊維 外層：ウレタン樹脂 (# 129)			非自転型 防水構造
直径 (標準) (mm)	内層アラミド織 維径(ブレード) (mm)	外層厚(ウレ タン+繊維) (mm)	アラミド織 維断面積 (mm ²)	質量 (g/m)	引張強さ kN(tf)
10	8.0	1.0	25.9	91.7	46.1 (4.70)

図5 パイロットロープ仕様

ず、想定された課題に対し種々の実験等を行い、一つ一つの問題を定量的に把握した。

3.2.1 延線機システム

今回採用した延線機は、図6に示すようにディスクブレーキを油圧制御し、張力コントロールする方式のもので、軽量化のため極めて簡明な機構となった。これを利用するにあたり、ロープの高速繰り出し性能、張力制御の確実性に関する実験を行った。繰り出し安定性は、ロープの巻き付け張力と繰り出し速度のファクターによるものと考えられ、結果的には巻き付け張力200kgf、繰り出し速度150~200m/分で実施するものとした。また、張力と油圧との関係を計測した結果、油圧制御により十分運転できることが確認できた。

3.2.2 ヘリコプターの牽引力

今回使用した大型ヘリコプターでは鉛直荷重に対する最大重量等が設計上規定されているが、一方で、ロープの延線のように水平方向の牽引力については、十分定量的に把握されていない。そこで、図7に示すような牽引力実験を行い、図8に示すようなロープ張力と限界牽引力角との関係を求めた。図中の計算値は、単純な力の釣合から求めたものであるが、ホバリングした静止状態にあることもあり、実験結果にかなり対応したものとなっている。これを基にし

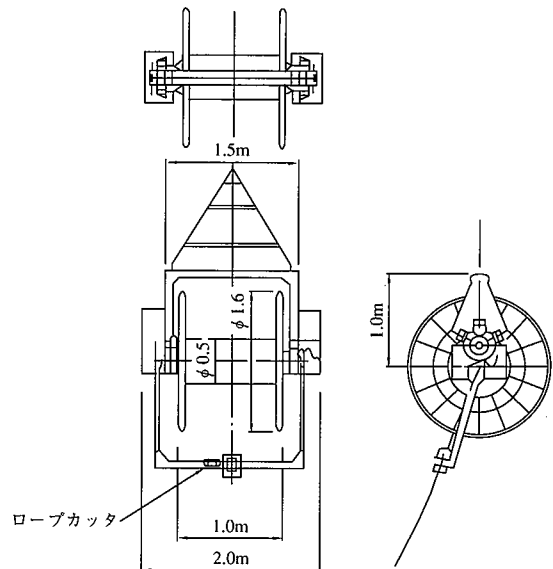


図6 渡海用延線機

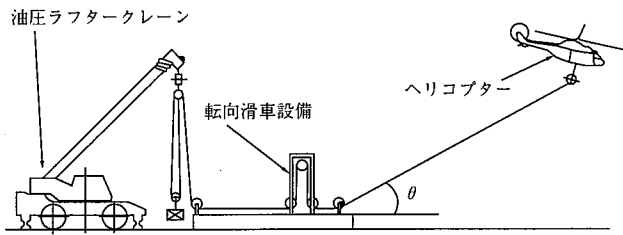


図7 ヘリコプターの牽引力実験

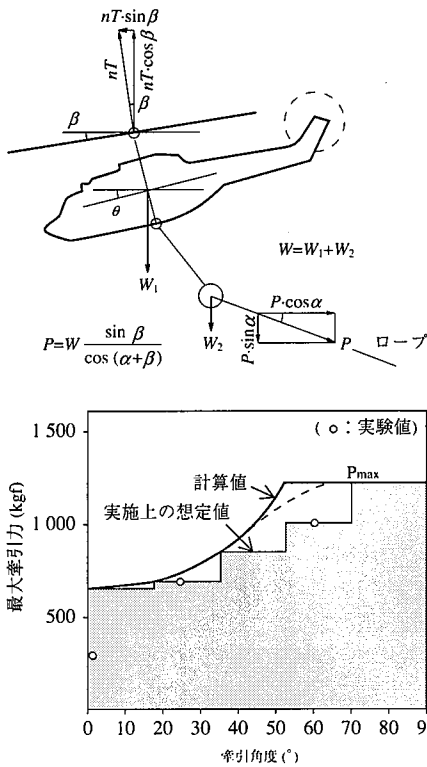


図8 ヘリコプター牽引張力と角度の関係

て、実際の延線張力などの実施計画を行った。

3.2.3 全体システムの設定

上記の固有データを基に最終的な全体システムとしての確認実験は、図9に示すように2隻のFC(float crane)船を利用して行った。本実験の主目的はどのような延線方法で、どのようなサグコントロールができるかであったが、これは、延線機の運転パターンをどのように設定するかに大きなウェイトがかかっている。短径間の延線飛行であれば、最初から最後まで最大張力を保持しながら、飛行

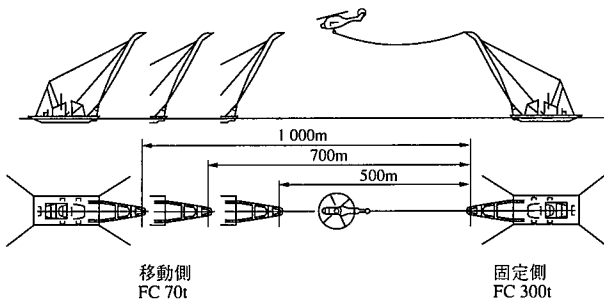


図9 全体システムの確認実験

するのも可能であるが、本橋のような長径間では、操縦上難しく、何回かの張力の切り替えが必要である。

しかし、張力の切り替えに当たり、タイミングのズレ、張力制御の誤差などの集積によっては、航路限界を侵してしまうような事態も想定される。図10は、飛行距離と設定張力との関係を示したものであるが、図中(A)のパターンでは、上記の誤差によるロープ変動が大きく限界値を割り込んでしまう恐れがある。実際に実験でこのような運転をすると、ロープが海面についてしまう場合もあった。(B)のパターンのように早めの切り替えにより、安定したサグコントロールが確認され、実施計画に大きく前進することができた。

以上のような定量的確認実験を基に、実施計画にあたっては、張力切り替えのロープマークを付けるなど更に確実性を考慮し、事前の現地での総合リハーサル等を行って本番に挑み、3径間の渡海を約3時間という短時間のうちに成功させることができた。

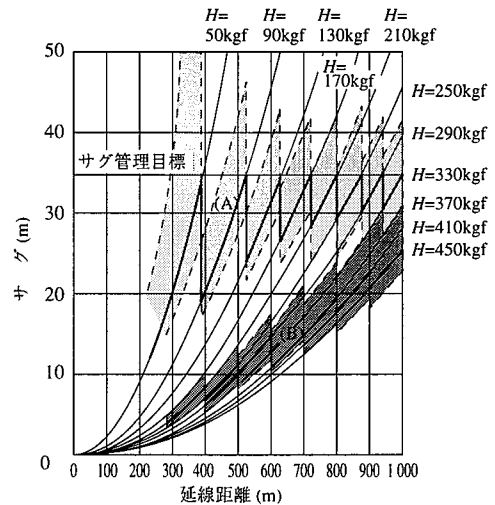


図10 ロープ張力の設定

4. キャットウォークの架設

4.1 ストームロープを省略したキャットウォーク構造の開発実験

本橋のキャットウォークは、従来と同様に設計を進めると1000m級の吊橋のものと比較しても膨大な規模となり、工期短縮・工費削減の立場から、最もドラシックな合理化案としてストームシステムを取り去る方法が提案された。ストームシステムは、耐風安定性の向上が主な機能であるが、プレストレスを導入することにより、以下の機能も併せて持っており、安全性確保の面から動的・静的に十分な検討を進めていき、最終的に省略化を決定するに至った。以下に、主要な検討課題を示す。

- (1) 作業時の耐風安定性を高める。
- (2) 作業時の鉛直剛性を高める。
- (3) 側径間において主塔のセットバックを行う。
- (4) 床組をケーブル架設線に沿った形状に調整する。

4.1.1 静的な変形状態の確認

ストームシステムは、床組と逆形状に張り渡すことにより、吊り材を介して床組を固定し、風荷重や床組の荷重に対し、変形を抑制する効果を持っている。ストームシステムを省くに当たっての変形性能低下の影響を定量的に評価していった。

(1) 暴風時変位 風荷重を受けた際の、床組のねじれ量や横変位に着目し、載荷実験及び解析を行った結果、図11の関係を得た。床組の傾斜角はストームシステム省略時に25%程度増加し、結果として坑力増加を招くこととなる。一方、クロスブリッジの間隔を狭めればこの傾斜角は抑えられることから、設計的には十分対応可能となった。また、横変位量はストームシステム有りの場合、中央径間中央で、最大66.2m、省略時に107.3mと著しく増大するという結果が得られたが、2連の床組全体が横スライドするだけで全体系が転倒するような発散状態とはならないと判断された。

(2) 鉛直変位 床組上にストランドを引き出した際に、径間の半ばまで来ると自重によって床組の形状が大きく崩れ、既設ケーブルと干渉することが明らかになり、鉛直剛度が不足することが確認できた。しかし、床組を既設ケーブルとワイヤで連結し、両方の形状変化を一体化することで対応が可能であると考えられた。

4.1.2 耐風安定性の確認

ストームシステムを省略した際の床組の耐風安定性を確認するために、1/10の床組部分模型を製作し、自由振動試験、空気力試験を実施した。自由振動試験はストームシステムの無いキャットウォーク床組では傾斜量が大きくなるのが想定されたため、従来より大きな迎角を想定して実施した。ばね支持試験時の結果を図12に示すが、あらゆる風速で空気力試験の結果を用いた準定常理論と良く一致し、空力的にキャットウォークは十分安定な構造断面であることが改めて裏付けられた。

4.1.3 動的安定性の確認実験

ストームシステムのキャットウォークの振動特性への影響を把握すべく、キャットウォーク模型を用いた振動試験を実施した。試験はキャットウォーク模型の一点に加振機を連結し加振する共振試験

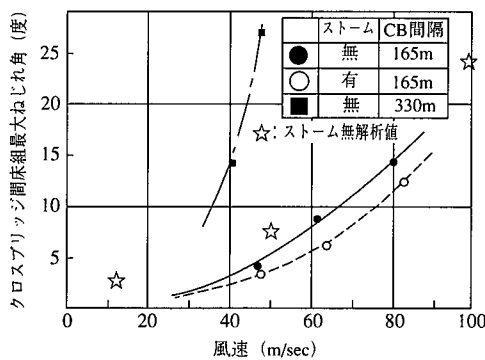


図11 クロスブリッジ間床組の最大ねじり角

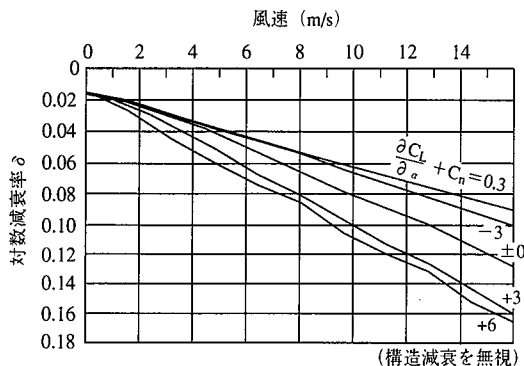


図12 ばね支持試験結果

と、共振周波数において自由振動に移行させる自由振動試験とした。また、キャットウォークのクロスブリッジ間に挟まれた局所の床組に強制的にねじれを与え、この部分の自由振動を計測する試験も行った。

図13にストームロープの有無による共振状態のモード図及び共振周波数を示す。ストームシステムを取り付けることにより省略系より5~20%の振動数の向上がみられ、かつ応答振幅が低減されている効果に分かる。しかし、計測した対数減衰率にはほとんど差異がなく、システム全体の動的安定性は静的に評価可能であり、省略の阻害要因にならないことが確かめられた。

一方、床組を局部的に自由振動させる試験においては、図14に見られるように明らかにストーム有りの方が大きな減衰を示した。床組の局部振動が吊り材とストームロープを介して全体系に伝播され、見かけ上大きな減衰が得られているものと思われる。床組の局

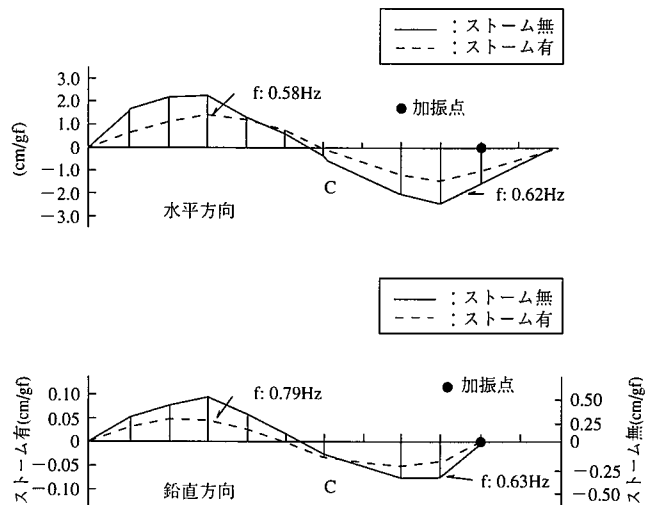


図13 共振モードと共振振動数の一例

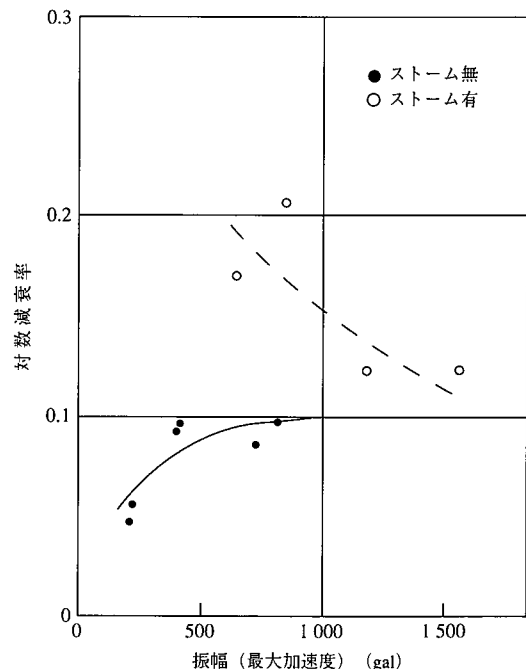


図14 ねじり振動の対数減衰率

部振動に対しては、何らかの対策を施す必要があると考えられた。

4.2 ストームロープ省略キャットウォークの設計概要

4.2.1 高強度スパイラルロープの採用

本橋は規模の巨大さのため、前述したようなストームシステムの省略化を図っても、中央径間キャットウォークロープ(以下、CWRと記す)にはまだ太径のロープが必要とされた。このため、CWR用ワイヤの高強度化に取り組み、新日本製鐵とロープメーカーの共同開発により200kgf/mm²ワイヤを開発し採用した。一方、リールに巻き付けられたロープのアンリーリング性は、ロープが多層巻きとなるほど高張力下における層間でのロープの段落ちが発生し、展開性の悪化、安全性の低下が生じる。この問題を懸念して、ロープ構造は従来のストランドロープ(IWRC 6×37)から断面充実率を上げたスパイラルロープ(1×127)とした。

4.2.2 全体システムの設計

(1) 主塔のセットバック方法

図15にキャットウォーク一般図を、表4に各径間の構成を示す。ストームシステムを省いたキャットウォークの設計で最も問題となるのは、従来側径間ストームロープの導入張力で調整してきた主塔のセットバックの方法であったが、本橋では中央径間と側径間のキャットウォーク重量のバランスで対応した。この方法として、前述したように中央径間で高強度CWRを採用し極力重量低減を図った上で、側径間ではCWRの強度を従来並み(160kgf/mm²)とし、逆に太径のロープを使用した。これで調整しきれないアンバランス力については、床組上の付帯設備重量で調整することとした。実際のキャットウォークの形状調整作業においては、微妙な重量調整に細径のロープを使用し作業的にはかなりの労力を伴ったが、計画時から入念な重量精算を行うことで精度良く実施できた。

(2) クロスブリッジの配置

クロスブリッジの配置は、東西ケーブルでの作業連携という作業性の問題とともに、前述したようにキャットウォーク全体のねじれ安定性に大きくかかわっている。そこで、従来より間隔を密にすることとし、中央径間ではクロスブリッジを11基配置(12分割約165mピッチ)、側径間では5基配置(6分割約155mピッチ)とした。

(3) 制振対策の採用

前述したように、ストームシステムの省略によりキャットウォークでの作業等による局所的な外力に対しては揺れやすいことが明らかになった。この振動がホーリングシステムの脱索等、ケーブル架設に支障をきたさないように、キャットウォークの局部剛度を向上

させる制振対策を施した。対策は図16に示すように、クロスブリッジから上下に取り付けたフレームから斜めに床組へスティワイヤを張った制振スティ方式と、クロスブリッジ両端に回転式の粘性ダンパを設置し、これと床組をワイヤで連結させた回転ダンパ方式の2案を併用した。制振スティ方式は、主に床組のねじれ振動に対して面外剛度を付加する効果を狙い、全橋のクロスブリッジ部に配置した。一方、回転ダンパ方式は床組の水平振動に対して減衰を付加する方式として、主に過去のケーブル架設時に水平振動が観測された中央径間中央近傍に配置した。ワイヤの固定位置は制振対象モードを考慮して定めた。本対策の効果は予め1/3縮尺模型を用いた確認実験を実施した上で、実機の設計に反映させている。

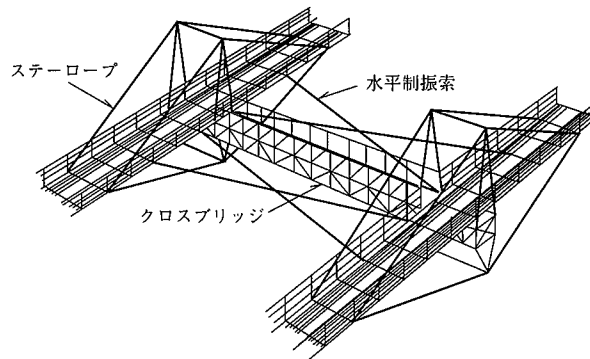


図16 制振装置概要図

4.3 分割流しによるキャットウォーク床組の架設

CWR上に設置する床組は、従来架設台車を用いて短いパネルごとに取付を行う方法や塔頂でコイル巻きされた金網を連結しながら、連続的に流す工法がとられていた。本橋では架設距離が長いいため、台車による工法では往復の時間ロスが大きくなり、また、一括した床流しでは、床とロープの摩擦係数が大きくなりすぎ、引き出しが困難となっていた。そこで、塔頂から流しながら組み上げた適当な長さの床組を単位として、所定位置まで流す分割流し工法を採用することとした(写真1参照)。この工法の課題は、床組とロープの摩擦

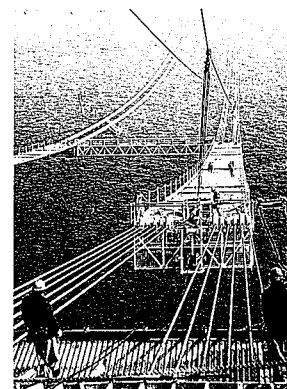


写真1 床組分割流し工法

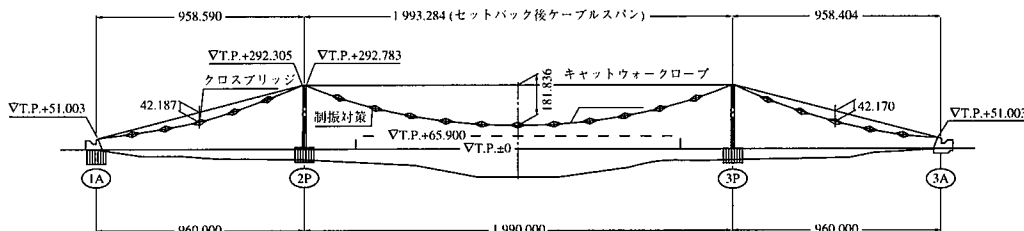


図15 キャットウォーク一般図

表4 キャットウォークロープ諸元

種別	区別	ロープ構成	ロープ規格	保証破断力	単位重量
キャットウォークロープ	中央径間	52mm×12本	1×127スーパーハイテンワイヤ	290 t × 12 = 3 480 t	13.6kg/m/本
	側径間	64mm×12本	1×169 A級 2種	371 t × 12 = 4 452 t	20.5kg/m/本

力を把握して適切な分割長を定めることと、床組の取付のために作業員を輸送する小型台車を安定して運行させることであった。これに対し、摩擦力を従来の床流しの実績から推定し、分割長を単位クロスブリッジ間隔である約160mとして対応した。移動用の台車は移動速度の微妙な調整が可能なホーリングシステムによる運転を主とし、塔頂からのウインチロープによる惜しみを安全対策として設けることとした。実際の摩擦力は予想したレベルより少し大きく、ウインチの能力が限界に近くなる場合もあったが、全体としては、スムーズな床組の架設を実現し、従来の架設実績と遜色ない施工速度が達成できた。

5. ケーブルストランドの架設

5.1 2ライン引き出し工法

5.1.1 ホーリングシステム

図17にストランド架設の全体要領を示す。各ストランドは舞子側の1A橋台後方に設置したアンリーラから、キャットウォーク上を対岸の4A橋台まで引き出される。この引き出し設備がホーリングシステムである。ホーリングシステムにはループ式と単線式があるが、CWRの架設時の高張力に対応できる単線式ホーリングシステムを採用した。

本方式は、既に瀬戸大橋等で実績があるが、引き出しスピードが架設工程を決定付けるため最も注意を払う設備の一つである。表5、6にプラー、テンショナーの能力を示すが、最大90m/分の速度が出るような、従来の設備の数倍の能力を有するものとした。

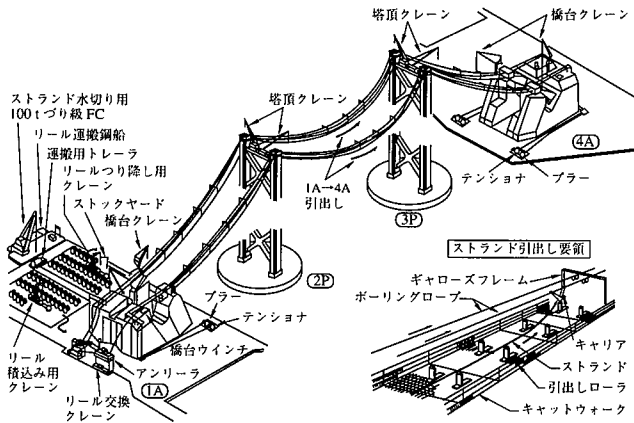


図 17 ストランドの架設要領

表 5 プラーウインチの能力

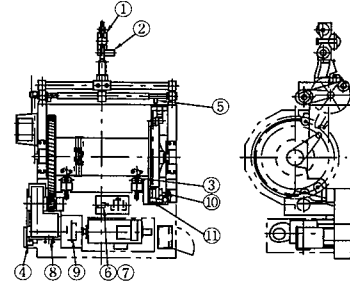
	CWR架設時		PWS架設時		PWS架設時 (キャリアバック時)	
	巻込み	惜しみ	巻込み	惜しみ	巻込み	惜しみ
ロープ張力	max..55t	max..35t	max.25t	max.15t	max.15t	max.15t
ロープ速度	0~30m/min		0~60m/min		0~90m/min	

表 6 テンショナーウインチの能力

	CWR架設時		PWS架設時		PWS架設時 (キャリアバック時)	
	巻込み	惜しみ	巻込み	惜しみ	巻込み	惜しみ
ロープ張力	max..35t	max..35t	max.25t	max.15t	max.15t	max.15t
ロープ速度	0~30m/min		0~60m/min		0~90m/min	

全体システムの決定までには、アンリーラを両岸においた方式、中央径間中央で折り返すダブルループ方式等を検討したが、更なる工期短縮の条件などから上記の単線式ホーリングロープを片側2ライン配置し、一方向から引き出す方式とした。

ホーリングシステムを構成する各ウインチの駆動方式は、高張力、高速度に十分対応できることを確認の上、直流電動機によるものとした。また、特に本設備の設計にあたっては、“明石海峡大橋上部工架設用機械設備安全指針(案)”により安全アセスメントを行い、故障、誤作動等の対策を明確にし設計に反映した。この安全装置の一覧を図18に示す。



安全装置一覧表

符号	名称	形式	目的及び作動
①	ロープ張力検出装置	ロードセル	操作盤上に張力を表示するとともに張力の異常を検知する。 設定値以上又は以下の張力を検知した場合、「張力高」又は「張力低」のランプとブザーにより警報を発生し、同時にブレーキを動作させ自動停止する。
②	ロープ長さ及び速度検出装置	パルス発信器	操作盤上に速度を表示するとともに速度の異常を検知する。 操作盤上にロープ長を表示するとともに巻込または巻出限界を検知する。 低、中、高速の各運転モードにそれぞれ設定された速度に対し、オーバースピードを検知した場合「速度異常」のランプとブザーにより警報を発生し同時にブレーキを動作させ自動停止する。
③	過巻込、過巻出防止装置	タッチローラ式 リミットスイッチ	ロープ巻取径を検出し、設定値に達した場合「巻込限」「巻出限」のランプとブザーにより警報を発生し、同時にブレーキを動作させ自動停止する。
④	オーバースピード検出装置	遠心力速度 スイッチ	上記2項の速度異常検出回路のバックアップである。減速機入力軸の回転数が最高回転数に達した場合「速度異常」のランプとブザーにより警報を発生し同時にブレーキを動作させ自動停止する。
⑤	ロープシフト行過ぎ防止装置	ローラレバー式 リミットスイッチ	ロープシフトの行過ぎを検知すると、「シフト行過」のランプとブザーにより警報を発生しスクリューを直ちに反転する。
⑥	ディスクブレーキ開放油圧ユニット 圧力検出器	圧力スイッチ	油圧が、設定値以下の場合「油圧低下」のランプとブザーにより警報を発生し、同時にブレーキを動作させ自動停止する。
⑦	ディスクブレーキ開放油圧ユニット 温度検出器	温度スイッチ	油圧ユニットの油温が、適正温度以上の場合、「油温高」のランプとブザーにより警報を発生する。
⑧	変速ポジション確認装置	ローラレバー式 リミットスイッチ	減速機の変速ポジションを確認し変速ポジションを操作盤上に表示する。
⑨	電磁ブレーキ	電磁式	ブレーキ力150%
⑩	ディスクブレーキ	ディスク式	ブレーキ力125%
⑪	パーキングブレーキ	ラチェット式	休止時の荷重保持

図 18 プラー・テンショナーの安全装置

5.1.2 架設工程等

架設中盤以降は、1ケーブルあたり4本のストランドの架設が可能になり、グロス約4.5か月で50000tを越えるストランドの架設を終えることができた。特にその中盤以降は、引き出し作業が完全にクリティカルパスとなり、設備のトラブル等が直接工程の遅延に結びつくことになったが、特筆すべきは、一度もホーリングロープの曳索ガイドローラーからの脱索等がなかったことである。これは前述したキャットウォークの局部制振対策とともに、ガイドローラーに関する従来の方式を転換し、常に下方支持ローラに反力をもたせるような方式にしたことと、先端キャリアの軽量化に努めたことによるものと考えている。(写真2参照)

5.2 仮引きシステムの開発

仮引き装置は橋台及び塔頂ベント上に設置され、CWR及びストランド引き込み、定着作業に使用される。

従来、仮引き装置としては、10m以内の引き込みストロークであることから油圧シリンダーにより伸縮する油圧方式とベント側面に滑車、シーブ等を据え付け、ウインチで引き込むウインチ方式が採用されてきた。本橋では仮引き力が従来の約2倍の70t、ストロークは約20mとなることから従来方式では対応が難しく、初めて直引き電動ウインチ方式を採用することとした。

直引き電動ウインチ方式は図19に示すようにモーター、減速機、ドラム、操作盤と装置全体がシンプルであり、ローラー類が少ないことからウインチロープが細径で済み、仮引きストロークも長く取れる利点がある。装置の開発、製作にあたっては、特に安全装置の

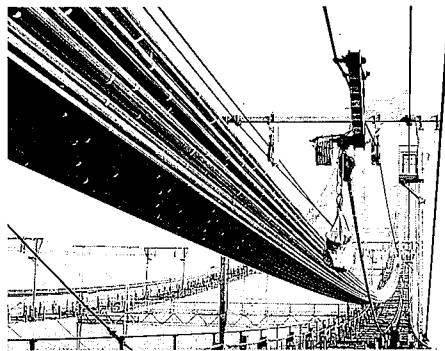


写真2 ストランド引出し状況

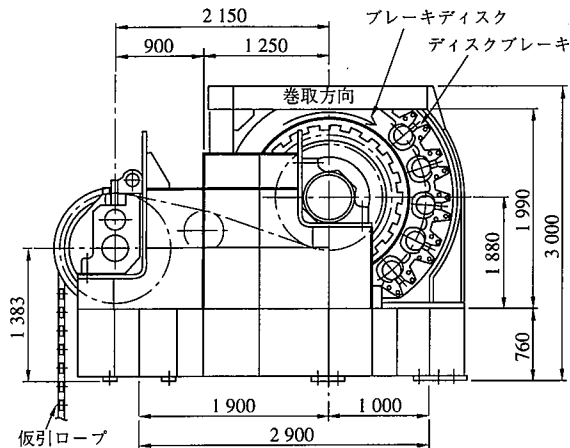


図19 仮引装置

充実を図った。特筆すべき事項としては、ウインチでは余り見かけない2系統のブレーキ(電磁ブレーキ+ディスクブレーキ)を盛り込み、CWR及びストランドのフリーハンク時の安全性を確保したことである。また、運転操作は作業場所近傍で操作可能な遠隔操作盤で行い、仮引き張力、引き込み速度を表示するとともに、ドラム巻き付け状態をテレビカメラで監視できるようにして安全対策にも万全を期した。

5.3 仮引きクランプの小型化

ストランド仮引き時のクランプは従来Uボルトと一面くさびを用いた方式をとっていたが、本橋では張力が2倍以上の70t近くにも及ぶため、図20に示すような、二面くさびと高力ボルトを組み合わせた方式を用いた。また、衝撃などによるストランドの素線再配列・張力変動で固縛力が低下しないよう、くさび面に高硬度のクロムめっき処理を施して確実にくさび効果が得られるようにした。

これにより十分なクランプ力が得られ、かつ小型化できたことで施工性が大幅に改善され、ストランド施工の高速化に対応できた。

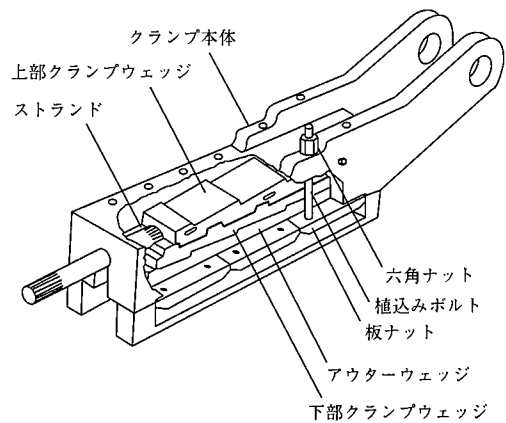


図20 仮引クランプ構造図

6. スクイジングマシンの開発

架設されたストランド群は、最大径φ1400mm程度の六角形断面を形成しており、これをスクイジングマシンによりφ1100程度の円形断面に締め付ける。

本橋使用のスクイジングマシンは、図21に示すようにジャッキ最

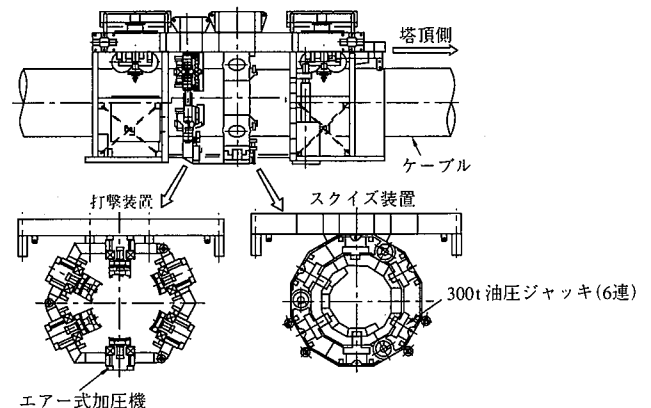


図21 スクイジングマシン

大推力300 t × 6 方向とし、必要に応じて単動から6 連動まで選択可能な構造とした。油圧ポンプユニットは高圧、低圧の切り替えが自動的にでき、シューがケーブルに接触するまでは高速作動とし作業時間の短縮を図った。また、シュー本体については形状、材質、面圧の変化によるケーブル損傷状況の違い等を模擬的なスクイズ実験により確認、改善して詳細構造を決定した。

従来、締付時にケーブル表面を木製カケヤで叩くことにより、ワイヤ間の摩擦抵抗を減少させ締め付け効果を高めていたが、今回エアノッカーを利用した機械式打撃装置を開発した。その効果は実験的に確認され、図22に示すような人力によるのと変わらない効果が得られた。

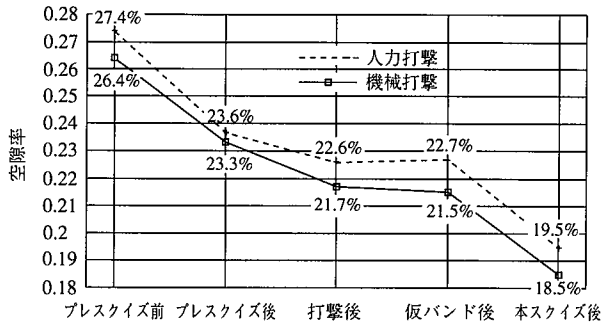


図 22 打撃装置の効果

また、本橋の素線は従来の引張強度160kgf/mm²から180kgf/mm²へと強度アップしているため、架設ストランドの型くずれや交差が減少し平行度が向上したと推定されるが、他橋でのスクイズ実績に比べ表面傷、型くずれ、交差等が少なく、スクイズングマシンの開発成果が十分発揮されている。

7. ケーブルバンド、ハンガーロープの架設

7.1 新形式バンド・ハンガーシステムの開発

従来のハンガーは、ワイヤロープ(構造用CFRCロープ)に《素線の亜鉛めっき+塗装》という防食仕様で、ケーブルバンドに鞍掛けして定着してきた。しかし実際には、凹凸のあるロープ表面に塗膜による防水層を作ることは不可能で、内部滞水は免れない。そのため、CFRCロープを十分に点検、維持管理していくことは実務上困難である。また、風による橋軸直角方向の水平変位が大きいため、ソケット口元部には曲げに対して高い疲労強度を要求される。

この2点の課題を解決するハンガーロープとして、塗装不要で防錆、維持管理の上で優れており、高い曲げ疲労強度を有する新日本製鉄開発製品NEW-PWS(ポリエチレン被覆ケーブル)を採用することとした。しかし、被覆ケーブルは、ケーブル径程度の小径に曲げられないため、図23に示すように鞍掛けしないで定着できるピン定着式のケーブルバンドを考案した。構造的には、両端をピン定着する方法を取り、上弦材の幅に2枚のピンプレートに配置したバンド形式とした。また、短尺ハンガーには、橋軸直角方向水平変位に追従できるようにピン部に球面体を埋め込んだユニバーサルジョイントを配置した。

7.2 架設台車を使用したケーブルバンドの架設

ケーブルバンドは塔頂で台車に積み込み、主ケーブル上を架設地点まで運搬・架設するが、本橋ではバンド個数が540基と多く、運搬距離は最大で1000m(従来の2倍以上)となり、作業効率が低下し

てしまう。そのため、図24に示すように架設用と運搬用と2種類の台車に分けて対応した。

ここで、バンドには下部にピンプレートがあるため、運搬台車の重心を高くして、キャットウォーク床面とのクリアを確保する必要があった。そのため、運搬台車は、走行用ローラーを増やしてボギー形式とするとともに、スプリング付きのアウトリガーの設置、樹脂性ローラーの採用により、高速移動での走行安定性と小型軽量化を図った。このように、作業上クリティカルとなっていた台車へのバンドセット、運搬を別台車に役割分担させたことで、大幅な架設時間の短縮が達成され、全バンドの架設を3週間という短期間で完了できた。

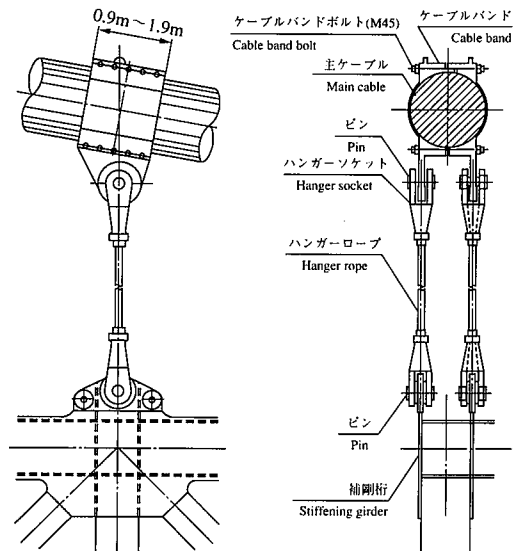


図 23 ケーブルバンド・ハンガー構造図

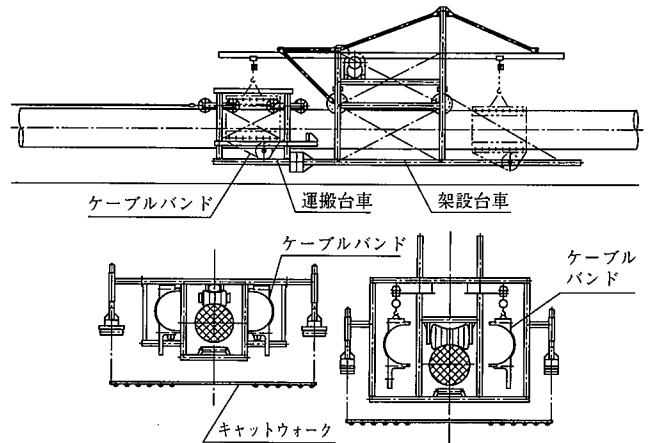


図 24 バンド台車

7.3 超音波ボルト軸力計による軸力管理

ケーブルバンドは、桁の荷重をケーブルに伝達する重要な役割を持っており、所定の滑り安全率を確保できるように、その取り付けボルトは厳密な軸力管理が必要である。この軸力管理は、架設完了後も軸力の低下が認められれば再締め付けが必要なため、引き続き行われる。

従来の軸力測定方法は、ボルト伸び測長器(マイクロメータ式)を

使用してボルトの伸びを計測し、伸び-軸力の関係からボルト軸力を算出していた。

本橋では前述したようにバンドをピン定着方式としたことにより、測定器の取付が難しいことと7000本からなるボルトの軸力管理をより合理化するため超音波による軸力測定法を検討し、若干曲がりの入ったボルトに対しても安定した軸力測定を行える図25のシステムを開発した。

これは、音波を片端から発信、他端で受信することで、ボルトの軸力無付加時と軸力付加時との伝搬時間を計測し、長さに換算する

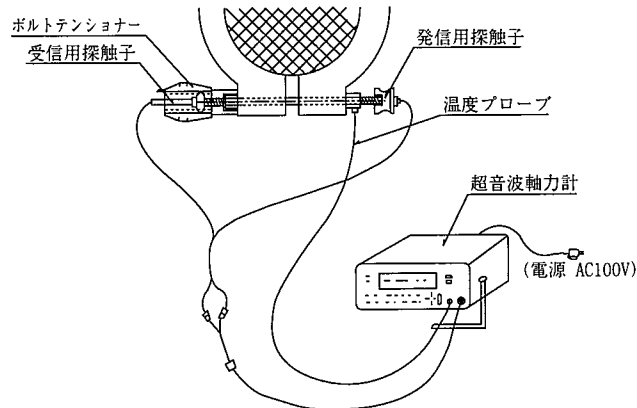


図25 超音波ボルト軸力計測システム

ことで軸力を算定する手法である。

この方式により、小型の軸力計のみで軸力測定、測定結果の処理を可能とした。今回、供用開始までに7000本のボルトを4回増し締めしたが、ボルト端面に探触子を当てるだけで軸力測定ができることで、作業の単純化、大幅な工程短縮を実現できた。

7.4 被覆PWSハンガーの架設

従来のCFRCロープは、より線のため柔軟性があり、取扱いも容易であった。また、架設完了後に現場塗装をすることで、架設時の外観損傷も少なかった。これに対して本橋の被覆ハンガーは単位重量が大きく、可とう性が小さいため架設作業中の取扱いが難しい。また、最終完成品の状態で架設を行うため、汚れ、損傷に対しても十分な養生方法、補修手順を吟味する必要があった。

一方、材料的な特性のみでなく、最長200mと長尺であり、総本数も1000本以上と膨大な架設本数となり、規模の巨大さからくる難しさもあった。

そのため、ハンガー長に応じて架設位置までの運搬、定着方法を以下のように分けて対応した。

7.4.1 吊り下げ運搬工法

塔付近のハンガーは、特に長尺となり、床組上からの架設が難しい。そのため、塔下に据えたアンリーラから塔頂クレーンによりハンガーを展開し、ゴンドラを介し鉛直に吊り下げたまま架設位置まで運搬する工法を採った(写真3参照)。

この工法の利点は、被覆部の損傷が少ないこと、運搬がスムーズに行えることが挙げられる。またバンドへの定着もチェーンブロッ

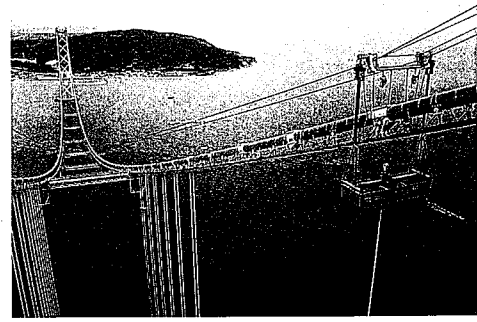


写真3 ハンガー架設状況

クの巻き込み、巻き出しによりバンド直下から架設できるため、ロープに無理な曲げを加えず、損傷も少ない。

7.4.2 キャットウォーク床組上引き出し工法

上記の方法では、クロスブリッジをかかわることが困難なため、塔付き以外のハンガーは床組上に引き出しローラーを配置して運搬した。この方法では、リールに巻いたときのハンガー巻き癖対策とローラー部の養生がポイントとなる。このため工場においてハンガーの展開試験を行い、引き出し張力、ローラーの設置間隔を検討して、うねりの発生を防止した。

また、ソケットはバンド下部にピン固定するため、バンド上面に天秤を設置して確実なアンカーを取り、ソケット胴部の架設治具で微調整した。この方法により、床開口部から吊り下げた状態での位置決め、ピン挿入を床面上から安全に進めることができた。

一方、短尺ハンガーは、運搬距離が長い工程上クリティカルとなる。そのため、100m以下のハンガーについては、1格点2本を1リールに巻いて現場搬入し、2本同時の運搬、定着を行う方法を採用した。

8. 結 言

本橋は、我が国橋梁業界の夢のプロジェクトであり、新日本製鐵としても、20年以上にわたり様々な製品開発・施工法等、開発・検討を行ってきた。

また、瀬戸大橋をはじめとする長大吊橋プロジェクトに長年にわたって参画し、膨大な技術蓄積を得ることができたことが、この世界最大の吊橋実現の原動力となったといえる。

長きにわたり御指導を賜った本州四国連絡橋公団の方々、及び今までに推進してきた吊橋ケーブルの製作・施工等に御協力頂いたすべての方々に心より謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 新日本製鐵・神戸製鋼所：明石海峡大橋ケーブル工事工事報告書。1996
- 2) 河口 ほか：本四技報 明石海峡大橋のバンド・ハンガー構造。1994
- 3) 河口 ほか：本四技報 明石海峡大橋のキャットウォーク構造。1995
- 4) 保田 ほか：橋梁と基礎 明石海峡大橋におけるヘリコプター渡海。1994