

## 4. 吊橋の架設

### 4.1 吊橋架設の変遷

#### 4.1.1 吊橋の架設概要

古来、眼前の深い渓谷をあるいは数キロにも及ぶ海峡を水に浮かぶことなく、天候に左右されることなく、好きな時間に安全に渡れるようにすることは多くの人々の夢であった。18世紀初頭の鋼の発明、そして19世紀における各種構造理論の発展はこの人類の夢を吊橋の建設という現実が大きく変化させた。

一方そのような吊橋をいかに安価に、しかも短期間に建設するかということは多くの橋梁技術者にとって興味を引きつけられる長年の課題であった。1998年に完成が予定される明石海峡大橋では2基の主塔約5万t、2条の主ケーブル約5万t、4kmに及ぶ補剛桁約8万5000tという膨大な物量の鋼製橋梁上部工を最大潮流速8knot、航行船舶が常時輻輳する国際航路上で9年以内に架設する必要がある、多くの課題とそれらの解決の困難さは容易に想像できる。

一般的に用いられる吊橋架設の手順を図-4.1.1および図-4.1.2に示す。最初、主塔の基礎やアンカレッジ等の下部工工事を行った後、主塔を架設する。次に、兩岸を最初に結ぶパイロットロープを張り渡し、順次ホーリングロープ、キャットウォークロープ、ストームロープを引き出し、キャットウォークシステムを架設する。このシステムを利用して主ケーブルを架設する。次に、主ケーブルにケーブルバンド、ハンガーロープを取り付けこれに補剛桁を架設する。最後に補剛桁上に床版を架設し、吊橋が完成する。この手順の大筋は19世紀後半のNiagara橋（1855年）あるいはBrooklyn橋（1883年）といった著名な橋の建設においてすでに採用されており、吊橋の基本架設要領はこの時代に確立した。

図-4.1.3はManhattan橋（1909年）の補剛桁の架設状況を示す写真である。この時代すでに架設桁の先端に3角デリッククレーンを搭載し、両主塔側から張出し架設を行っている。この図を見るかぎりクレーンの規模、防護工等の安全対策は別として、基本的な架設要領は現在のそれと同じであることがわかる。

近年の吊橋架設においてもこの基本要領に変化はないものの各手順における内容には、多様な技術の進歩、さらに大幅な工程短縮が見られる。例えば、架設機材の大型化、高性能化には目を見張るものがある。それによって長大スパン吊橋の架設が物理的に可能になったことはいうまでもなく、さらにそれらによって架設工事の省力化、安全性の向上が図られたことはまちがいない。大型の橋梁部材を所定の位置に精度良く効率的に架設するため最先端の架設機材が必要とされるが、それらは内燃機関、電動機の発展、およびそれらに密接なつながりを持つ油圧系、電子デバイスの利用による制御技術の進歩によって初めてもたらされた。

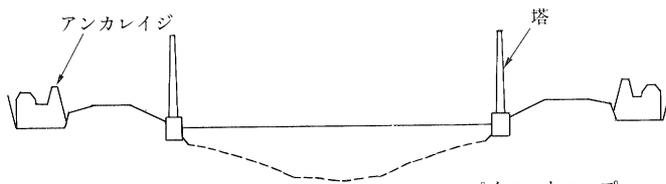
部材を架設していくうえですでに架設の完了している部材と新しい部材との連結は不可避の作業である。ここでも百年前の吊橋架設ではみられなかった技術の進歩が見られる。高力ボルト接合や現場溶接の導入は効率的かつ確実な部材連結を可能ならしめている。

吊橋建設にあたり、その完成形状を設計図面のとおりの決められた形にするため行われる形状管理は架設上の最重要課題である。光波を用いた測量機器や計測データを瞬時に処理するコンピュータの導入はこの形状管理に飛躍的な進歩をもたらした。

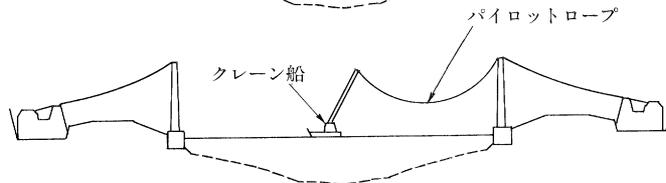
(1) 基礎工事



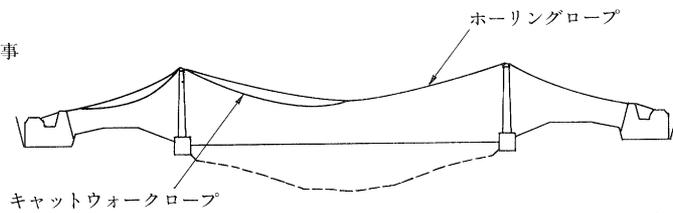
(2) 塔架設およびアンカレイジ工事



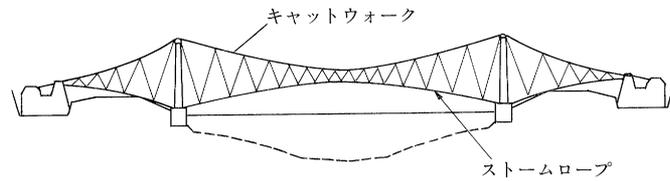
(3) パイロットロープ張渡し工事



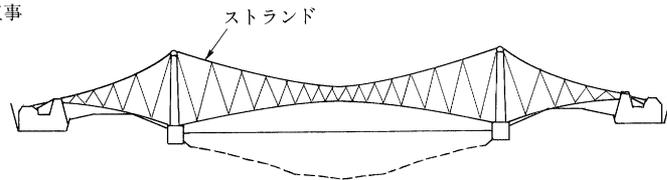
(4) ホーリングロープおよび  
キャットウォークロープ架設工事



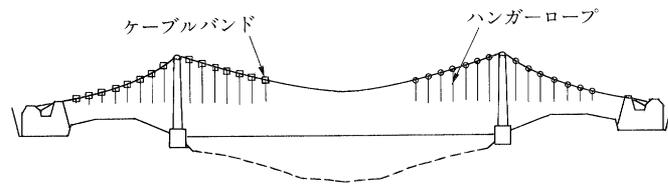
(5) キャットウォーク床組  
およびストームロープ架設工事



(6) 主ケーブル (ストランド) 架設工事



(7) ケーブルバンドおよび  
ハンガーロープ架設工事



(8) 補剛桁および床版架設工事

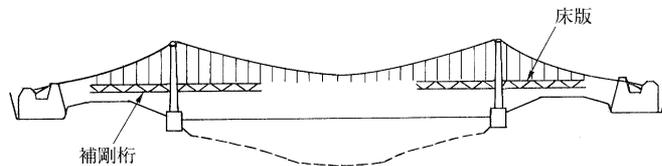


図-4.1.1 吊橋の架設順序概略図

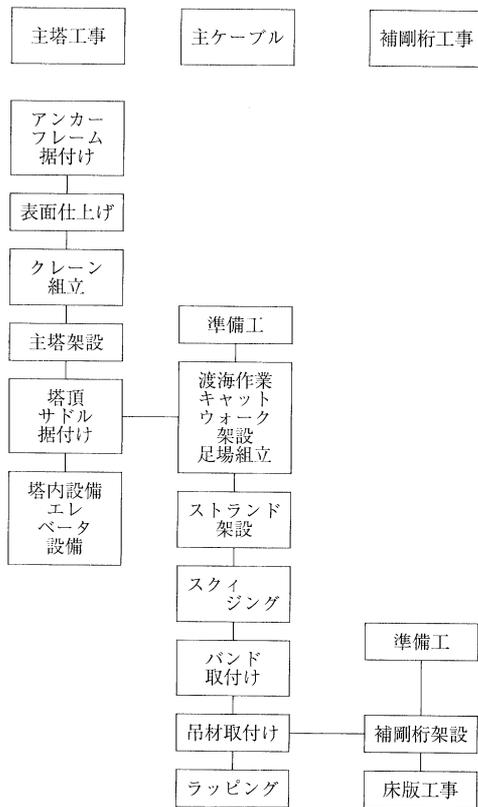


図-4.1.2 吊橋上部工の施工手順

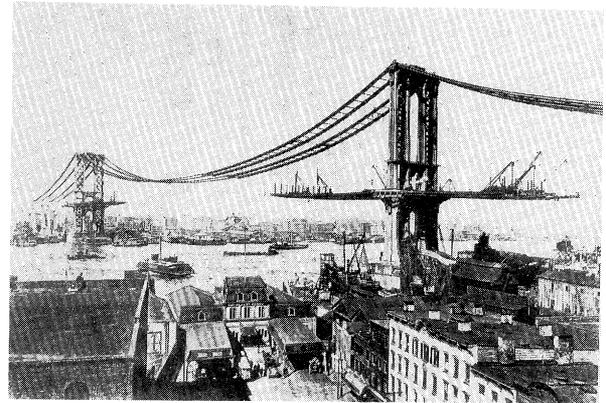


図-4.1.3 Manhattan 橋の補剛桁架設

#### 4.1.2 架設方法の変遷

前節で述べたとおり近代吊橋の架設手順の大筋は 19 世紀後半に確立したと思われる。しかし、その後においても吊橋の主要構造である主ケーブルの架設については主塔や補剛桁の架設と異なり種々の手法が試みられてきた。吊橋架設方法の歴史の変遷を述べるうえでこれらの手法を振り返ることは重要である。

近代工業化時代の初期の吊橋は、主ケーブルとして鉄のバーを連結した鎖を使って建設された。イギリスで最初の吊橋は、支間 21.3 m の歩道橋で、このような鉄のバーを用いて 1741 年 Tees 川に架けられた。アメリカで最初の吊橋は、1801 年 Finley による Pennsylvania 州 Jacob's Creek の支間 21.3 m の吊橋で、鍛鉄製チェーンを用いていた。フランス人技師 Dufour により、1823 年に Geneva に建設された支間 40.2 m の吊橋には鉄製ワイヤーが使用されている。その後アメリカでは、1842 年 Ellet が Philadelphia Fairmount の Schuylkill 川に支間 109.1 m の吊橋を架けている。この吊橋の主ケーブルは平行な鍛鉄製ワイヤーで構成されていた<sup>1)</sup>。

欧米の主たる吊橋の主ケーブルのほとんどがエアスピニング工法（AS 工法）によって架設されてきた。この方法の起源は Rhône 川に架かる吊橋に関する 1831 年の Vicat（フランス）の論文に見ることができる。すなわちループになった等しい長さのいく対ものワイヤーが、別々のリールに巻き取られ、次に各ワイヤーは、細いエンドレスロープにより、片方のアンカレイジから他端のそれへと張り渡し、平行に設置されるというものである<sup>2)</sup>。Chailey は Vicat の方法を改良して、スイスの有名な支間 265.2 m の Fribourg 橋の主ケーブル架設に使用した。この橋の主ケーブルは合計 4 本で各々 1 056 本のワイヤーから成り、1834 年に完成した。さらにこの方法には John Roebling（アメリカ）によって改良が加えられ、1855 年の Niagara 橋ではスピニングホイールを用いた今日のエアスピニング工法と同様の高能率の手法が確立された<sup>3)</sup>。図-4.1.4 は Brooklyn 橋におけるエアスピニングの状況を示したもので 1 輪

のスピニングホイールではあるが基本原理は今日のものとは全く変わらないことがわかる<sup>4)</sup>。ところで、この Brooklyn 橋の主ケーブルに使用されたワイヤーには初めて亜鉛メッキが施されていた。

従来欧米ではワイヤー 1 本 1 本に対してサグ調整を行う高張力フリーハンク工法が取られてきた。わが国では平戸大橋、下津井瀬戸大橋でエアスピニング工法が採用された。これらでは張力を低張力としワイヤーをキャットウォークに着地させ横風の影響を受けず安定した操業を目指している。さらにサグ調整をストランド単位で済ませることやスピニングホイールを 4 輪とすることなどにより効率化を図っている<sup>5)</sup>。

エアスピニング工法が煩雑で現場工程が長期化することがわかっていたのでこれを改善する研究が何十年の間、続けられてきた。Morison (アメリカ) は 1896 年に Hudson 川に架かる 1 006 m の鉄道吊橋建設に長さ調整をした後、ソケット止めした撚り線ロープを工場で作成し、現場へ輸送して架設する方法を提案している<sup>6)</sup>。彼は平行線のワイヤーで構成されるストランド (平行線ストランド) ではリールに巻き付けることが困難であるので輸送が難しいことを指摘している。彼の計画は採用には至らなかったが 20 世紀初頭にフランスのいくつかの小規模吊橋で撚り線ロープが使用された。しかし、この種のロープは平行線ストランドに比べワイヤーを撚り合わせていることから弾性係数が低く、かつ不安定であるため結果的に単位面積当りの強度が小さくなり、大規模吊橋に対しては満足できるものではなかった。John A. Roebling's Sons 社 (アメリカ) ではこの問題を解決するためロープにプレテンション処理を施す方法を開発し、ブリッジストランドとして 1928 年 Quebec の Grand Mere 橋をはじめとする小規模吊橋で採用した。一方、欧州ではロックドコイルストランドが開発され 1929 年ドイツの Rhine 川に架かる 315 m の Cologne-Mulheim 橋に採用された。

構造特性に優れた平行線ストランドを作るに際して、空中のキャットウォーク上で煩雑な作業を長期間にわたって行うエアスピニング工法の困難さを克服するため、架橋地点に隣接する陸上でスピニングを行い完成したストランドをリールに巻き取ることなくキャットウォーク上に移動するランドスピニング工法に関心もたれる時期もあった。1920 年代末、アメリカ Ohio 川に架かる General U. S. Grant 橋、Fort Steuben 橋ではこの工法が採用された。しかしこの方法ではスピニング後のストランドを移動可能とするためストランドの重量が制限を受け、かつ地形的な制約もあり大規模な橋の建設には不向きで、ブリッジストランドが一般に行き渡ってくると急速にその姿を消していった。

1930 年以降に建設された吊橋の主ケーブルは以下の 2 つの工法のいずれかによって架設されている。太径ケーブルの場合には、平行線ストランド方式でエアスピニング工法による現場組立式のもの、そして比較的細径のケーブルの場合には、ソケット止め、プレテンション処理をした撚り線ロープを工場製作し、現場で比較的簡単、かつ迅速に架設する方式のものである。このような経緯を背景として、1959 年 Bethlehem Steel 社 (アメリカ) では撚り線ロープよりむしろ平行線のワイヤーで構成したストランドを工場製作し、ソケット止めを行い適切に荷造りして運搬することができれば構造特性に優れた平行線のワイヤーによるプレハブストランドを現場で迅速に架設できるという発想を持つに至った。

数々の実験を経てこのプレハブストランドを用いた吊橋が 1966 年、Rhode 島 Narragansett 湾の東側水路の Newport 橋に採用されることとなった。採用にあたり事前に実施された入札では平行線ストランドの架設を従来どおりのエアスピニング工法 (AS 工法) によって架設することを標準とするものの、その代替案としてプレハブストランド工法 (PS 工法) を用いて架設することを前提に入札することも許可され、その結果、後者の入札金額が標準金額より約 17.5% 低かったためプレハブストランド工法が採用されることになった。

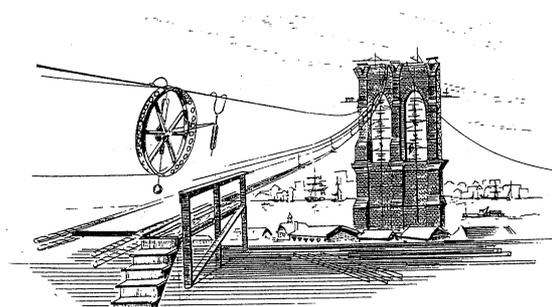


図-4.1.4 Brooklyn 橋のエアスピニング施工状況

わが国では1961年、若戸大橋の主ケーブルを捩り線ロープで架設した後、1968年に金比羅橋、1969年に八幡橋の平行線ストランドをプレハブストランド工法によって架設し、さらに1970年、上吉野川橋において両側2条の主ケーブルを平行線ストランドとし、その1条ずつをそれぞれエアスピニング工法、プレハブストランド工法によって架設し、両工法を比較することが行われた。その後、1973年の関門橋以来、エアスピニング工法で架設された平戸大橋、下津井瀬戸大橋を除くすべての大規模吊橋でプレハブストランド工法が採用されており1998年完成予定の明石海峡大橋でも橋長3910mに対する平行線ストランドがプレハブストランド工法で架設された。一方、近年諸外国の大規模吊橋ではHumber橋をはじめ第2ボスポラス橋（Fatih Sultan Mehmet橋）、Tsing Ma橋（青馬大橋）、Great Belt East橋等、すべてエアスピニング工法で架設されている。

主ケーブル工事を行うにあたってその足場となるキャットウォークは必要不可欠のものである。キャットウォークは主塔間を結ぶ6~12本のキャットウォークロープ上に金網を設置して架設する。このキャットウォークロープは架橋両地点間に張り渡し往復動作のできるホーリングロープに結合して1本ごとに引き出す。ところでこのホーリングロープは架橋両地点間を最初に横断して張り渡す細径のパイロットロープの後端に結合して引き出す。パイロットロープはすべての構造物の中で最初に架橋地点を横断することからその架設は渡海作業と呼ばれる。従来、通常の渡海はロープの一定間隔に浮子と呼ばれる球状の浮体を取り付けロープを水面に浮かせながら船で対岸まで引き出す手法が用いられてきた。この方法では架橋地点下の船舶交通を引出し作業の間、遮断する必要がある。近年架橋地点の海峡が国際航路のような重要航路で、これを一時的とはいえ渡海のために閉塞することが困難な場合が増えてきた。海峡の閉塞時間を極力短くするためロープの先端をフローティングクレーンのフックに取り付け、航路高さを確保しながらロープを空中に引き出す手法が瀬戸大橋の3つの吊橋すべてで採用された。さらに明石海峡大橋ではヘリコプターを利用した渡海作業が実施された。これらの工法では潮流の影響を避けることができるが、新たに風の影響を考慮する必要が生じてきている。

先述のJohn Roeblingは吊橋主ケーブルの防食方法についても現在に至るまで十分通用する卓抜した手法を提案し、特許を得ている。1845年に完成したAllegheny水道橋ではその手法、すなわち平行線のワイヤーを円筒に束ね、外側をワイヤーで強くラッピングし、塗装をする手法を採用している<sup>7)</sup>。図-4.1.5はJohn RoeblingによるBrooklyn橋における主ケーブルラッピングの施工状況を示す絵である。すでにポビン式のラッピングマシンが採用されておりその基本原理が今日のものと同じであることがわかる。なお、Brooklyn橋では初めてラッピングワイヤーに亜鉛メッキ鋼線が採用され、主ケーブルの防食性能は今日まで良好な状態が保たれているようである<sup>8),9)</sup>。

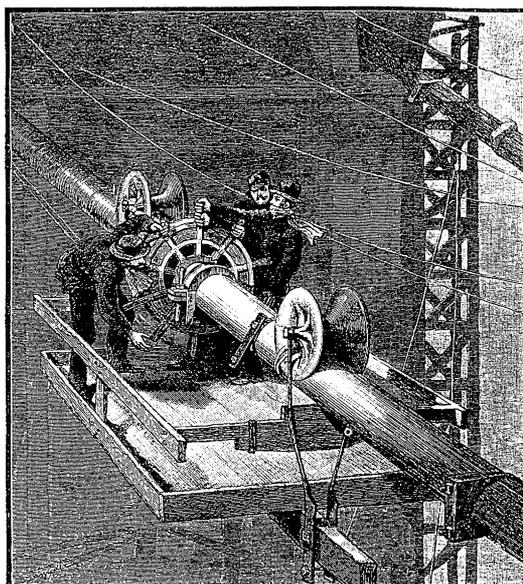


図-4.1.5 Brooklyn橋のケーブルラッピング施工状況

## 4.2 主塔工事

### 4.2.1 概 説

主塔は完成状態で吊橋の鉛直荷重のほとんどを受け、これを下部工へ伝達する構造であり、さらに吊橋における電気設備、維持管理設備の中核として位置付けられる。また、吊橋上部工のうち最初に行われる工事であり、主ケーブル、補剛桁工事における重要なキーステーションとして使用される。

わが国の長大吊橋では地質・地盤の条件を考慮して、下部構造の規模を小さくするため主塔本体の重量の軽減、主ケーブル架設時のセットバックを容易にするためのフレキシビリティの確保、工期の短縮などを目的として鋼製の主塔が多く採用されている。

主塔工事は、下部工との接点である基部と主ケーブルとの接点である塔頂までの塔柱部材の架設に分類される。一方、主塔は膨大な鉛直荷重をスレンダーな塔柱で受けるため、架設時の精度管理が主塔工事の一つの重要な項目となる。また、架設途中では完成系とは異なったフリースタANDING状態であり、風による振動が発生しやすい構造である。このため、架設途中からの制振対策も大切な項目である。

架設方法としては、主塔本体の規模、架設地点の地形、施工期間および経済性を考慮して決定されるが、使用するクレーンの種類としては、クリーパークレーン、タワークレーン、フローチングクレーン、クローラークレーンなどが多く使用されている。

### 4.2.2 主塔基部の架設

長大吊橋の主塔基部は、下部コンクリートに埋め込まれたアンカーフレームと底板・塔柱をアンカーボルトで連結させる構造と、塔柱基部をアンカーボルトもしくはワイヤーで下部工に固定させた後、これをコンクリート内に埋め込む構造に大別される（写真-4.2.1）。

北アメリカの吊橋もしくはアメリカ人設計者の吊橋の場合は前者であり、イギリス人設計者の吊橋の場合は後者が多い。前者の代表としては Golden Gate 橋、Verrazano Narrows 橋、4 月 25 日橋（De Vinte E Cinco De Abril 橋）、日本の長大吊橋などがあり、後者では、Severn 橋、Bosporus 橋、第 2 ボスポラス橋（Fatih Sultan Mehmet 橋）が挙げられる<sup>10),11)</sup>。

また前者は、底板下のコンクリート表面の平面度を十分な精度で仕上げた後、底板・塔基部塔柱を架設する研磨工法（写真-4.2.2）と、底板または底板・塔基部塔柱を十分な精度で架設した後、底板下をモルタルグラウト施工する



写真-4.2.1 第2ボスポラス橋塔基部施工状況  
(第二ボスポラス橋工事写真集)

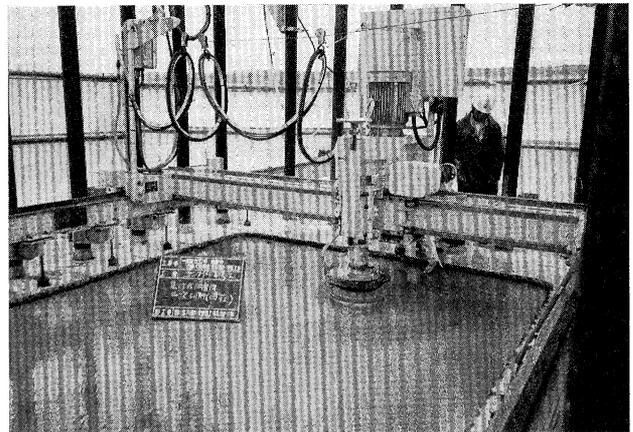


写真-4.2.2 白鳥大橋塔基部コンクリート研磨状況  
(提供：北海道開発局)

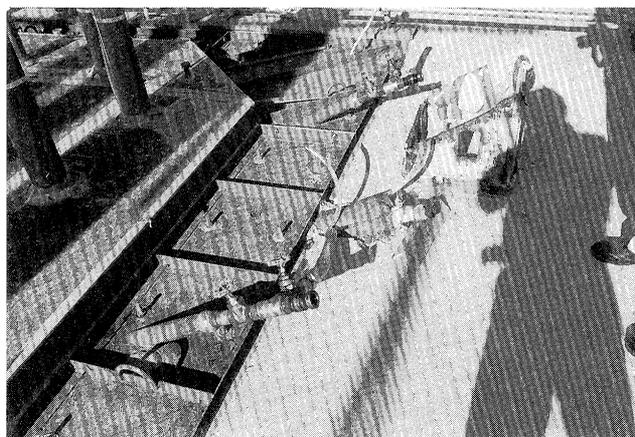


写真-4.2.3 レインボーブリッジ塔基部モルタル充填作業状況  
(提供：首都高速道路公団)

表-4.2.1 アンカーボルト径と導入張力実績表

橋名	アンカーボルト (1塔柱当り)	導入軸力 (1本当り)	管理方法
Verrazano Narrows 橋	54-76φ	41 t	ひずみ計測
関門橋	42-120φ	120 t	23本 ひずみゲージ
平戸大橋	24-100φ	120 t	4本 ひずみゲージ
マタディ橋	30-105φ	150 t	ジャッキ, ダイヤルゲージ
大鳴門橋	42-120φ	250 t	8本 ひずみゲージ
大島大橋	26-120φ	240 t	5本 ひずみゲージ
南備讃瀬戸大橋	46-120φ	400 t	4本 ひずみゲージ
第2ボスボラス橋	168-50φ	140 t	ジャッキ読み
レインボーブリッジ	34-130φ	380 t	8本 ひずみゲージ
白鳥大橋	28-135φ	470 t	8本 ひずみゲージ
明石海峡大橋	60-145φ	530 t	4本 ひずみゲージ

基礎モルタル充填工法に分類される。基礎モルタル充填工法で施工された例としては、George Washington 橋、マタディ橋 (President Mobutu Sese Seco 橋)<sup>12)</sup>、レインボーブリッジ (写真-4.2.3) などがある。

下部構造との連結に使われるアンカーボルトの使用実績と導入軸力を表-4.2.1に示す。これは主塔基部に作用する曲げモーメントによる浮き上りを防止し、基部反力を下部構造に円滑に伝達するためのものである。ボルト軸力は、コンクリートのクリープとボルトのリラクセーションにより徐々に減少するため、この軸力減少を考慮したものが架設時に導入され、架設時の重要な管理項目の一つとして挙げられる。

#### 4.2.3 塔柱の架設

世界の主要吊橋の主塔の施工年表を表-4.2.2に示す。

これによると塔柱の架設は、使用される架設クレーンの種類により、以下のように分類される。

##### (1) クリーパークレーン工法

クリーパークレーン工法は、架設の進捗に伴い主塔の高さが上昇するのに追従し主塔に取り付けたガイドレール上をせり上がっていく装置を持った移動式クレーンにて架設する工法である。クレーン反力を主塔にとるため、架設途中における主塔の鉛直度管理が重要となるが、クレーンそのものは比較的軽量で、他の橋梁への転用も可能である。この工法をさらに細分化すると以下ようになる。

表-4.2.2 主要吊橋の主塔架設クレーン

完成年	橋名	国名	中央径間長 (m)	塔高 (m)	施工法	骨組, 断面形状	備考
1903	Williamsburg 橋	アメリカ	488	93	定置式ガイデリック	トラス	
1926	Benjamin Franklin 橋	アメリカ	533	104	クリーバークレーン	トラス	
1931	George Washington 橋	アメリカ	456	171	クリーバークレーン	トラス	
1936	Oakland Bay 橋	アメリカ	850	140	クリーバークレーン	トラス, 十字形	
1937	Golden Gate 橋	アメリカ	1 280	210	クリーバークレーン	複合, 十字形	
1939	Bronx-Whitestone 橋	アメリカ	701	106	クリーバークレーン	ラーメン, T形	
1949	Tacoma Narrows 橋	アメリカ	853	140	クリーバークレーン	複合, 十字形	
1951	Delaware Memorial 橋	アメリカ	655	127	クリーバークレーン	ラーメン, T形	
1957	Mackinac 橋	アメリカ	1 158	157	クリーバークレーン	ラーメン, 十字形	
1957	Walt Whitman 橋	アメリカ	610	107	クリーバークレーン	ラーメン, 長方形	
1962	若戸大橋	日本	367	79	クリーバークレーン	ラーメン, 長方形	
1964	Forth Road 橋	イギリス	1 006	148	クリーバークレーン	トラス, 長方形	
1964	Verrazano Narrows 橋	アメリカ	1 298	192	クリーバークレーン	ラーメン, T形	
1966	Severn 橋	イギリス	985	122	クリーバークレーン	ラーメン, T形	
1966	4月25日橋	ポルトガル	1 013	191	クリーバークレーン	トラス, 十字形	
1973	南海大橋	韓国	404	60	フローチングクレーン	ラーメン, 長方形	
1973	Bosporus 橋	トルコ	1 074	165	クリーバークレーン	ラーメン, 長方形	
1973	関門橋	日本	712	134	(下関側) クリーバークレーン (門司側) タワークレーン	トラス, 長方形	
1977	平戸大橋	日本	465	78	フローチングクレーン	ラーメン	
1983	因島大橋	日本	770	136	クリーバークレーン	トラス	
1983	マタディ橋	ザール	520	96	トラッククレーン	ラーメン	
1985	大鳴門橋	日本	876	126	クリーバークレーン	トラス	
1987	大島大橋	日本	560	88	クリーバークレーン	ラーメン	
1993	下津井瀬戸大橋	日本	940	138	クリーバークレーン	ラーメン	(2P) (3P)
1988	北備讃瀬戸大橋	日本	990	161 170	クリーバークレーン クリーバークレーン	トラス	(2P) (3P)
1988	南備讃瀬戸大橋	日本	990	180 171	クリーバークレーン タワークレーン	トラス	(5P) (6P)
1988	第2ボスポラス橋	トルコ	1 090	111	クローラクレーン	ラーメン	
1993	レインボーブリッジ	日本	570	119 117	フローチングクレーン	ラーメン	(芝浦) (台場)
1997	白鳥大橋	日本	720	128 131	クローラクレーン	ラーメン	(3P) (4P)
1998	明石海峡大橋	日本	1 990	283	タワークレーン	トラス	
1998	来島海峡第一大橋	日本	600	111 144	タワークレーン	ラーメン	
1998	来島海峡第二大橋	日本	1 020	165 142	タワークレーン	ラーメン	
1998	来島海峡第三大橋	日本	1 030	178 175	タワークレーン	ラーメン	

①両塔柱の内側に梁を渡し、この上にクレーンを設置するタイプ:

Golden Gate 橋 (写真-4.2.4), George Washington 橋, Verrazano Narrows 橋<sup>10)</sup>

②塔柱自体をフレームで囲みさらに両塔柱のフレームを梁で渡し、クレーンを設置するタイプ:

Forth Road 橋 (写真-4.2.5), Severn 橋<sup>10)</sup>

③塔柱内部にクレーンシャフトを設置するタイプ：

Oakland Bay 橋 (写真-4.2.6)<sup>10)</sup>

④塔柱側面に梁を渡し、この上にクレーンを設置するタイプ：

関門橋 (下関側)<sup>13)</sup>，因島大橋<sup>14)</sup>，大鳴門橋<sup>15)</sup>，南備讃瀬戸大橋 (5 P)<sup>17)</sup> (写真-4.2.7)，下津井瀬戸大橋<sup>16)</sup>，北備讃瀬戸大橋<sup>18)</sup>

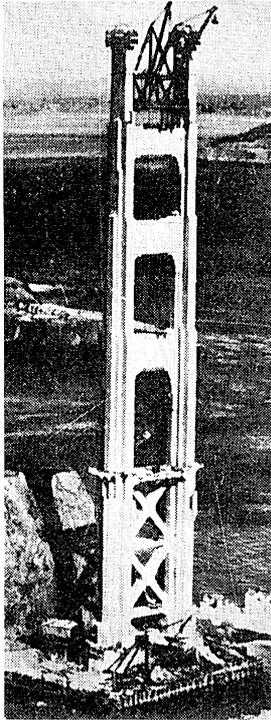


写真-4.2.4 Golden Gate 橋  
の架設クレーン (神戸市調査月報)

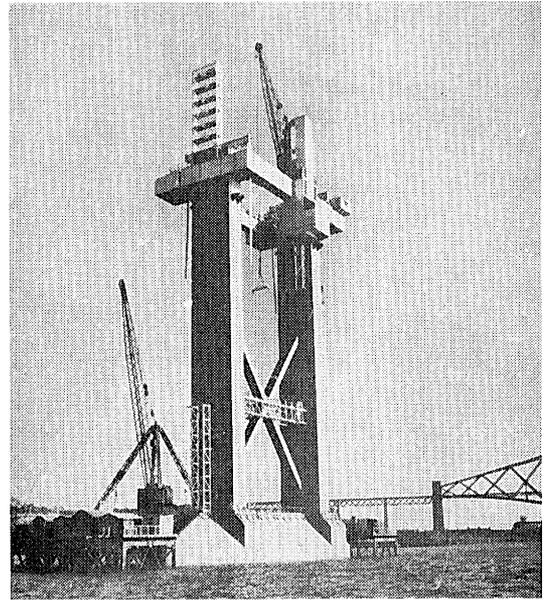
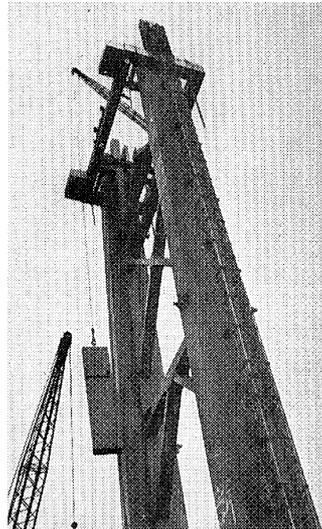


写真-4.2.5 Forth Road 橋の架設クレーン (神戸市調査月報)

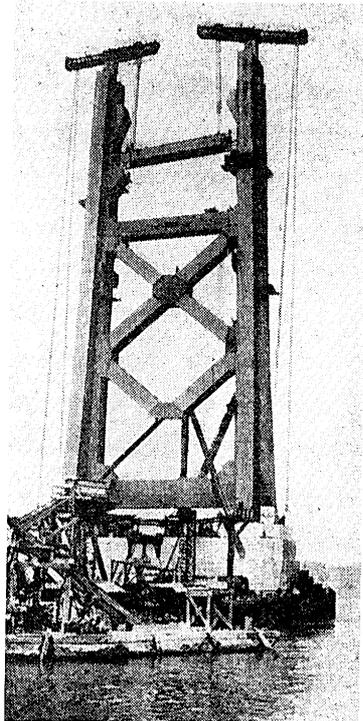


写真-4.2.6 Oakland Bay 橋の架設クレーン  
(神戸市調査月報)



写真-4.2.7 南備讃瀬戸大橋 5 P の架設クレーン  
(提供：本州四国連絡橋公団)

### (2) タワークレーン工法

タワークレーン工法は、塔と完全に独立したタワークレーンを設置して、塔の架設に伴い、クレーン本体もせり上がりを行っていくことにより主塔を架設していく工法である。主塔に直接機械設備を取り付ける必要がないため、架設途中における主塔の鉛直度管理が容易であり、施工法にも優れるが、タワークレーンの基礎工事やタワークレーン本体に多大な費用を要するという短所がある。

適用例としては、関門橋（門司側）<sup>10)</sup>、南備讃瀬戸大橋（6P）<sup>17)</sup>、明石海峡大橋（写真-4.2.8）、現在施工中の来島第一・二・三大橋が挙げられる。

### (3) 汎用クレーン工法

塔基部に設置したトラッククレーンやクローラークレーンなどの汎用クレーンを使用する工法で、マタディ橋（President Mobutu Sese Seco 橋）<sup>12)</sup>、第2ボスボラス橋（Fatih Sultan Mehmet 橋）（写真-4.2.9）、白鳥大橋などの施工例がある。

### (4) フローチングクレーン工法

製作工場あるいは架設地点付近の地組ヤードであらかじめ組み立てられた塔部材を一括、もしくは主塔本体を各ブロックごとに分割し、分割された各ブロックをフローチングクレーンで架設する工法であり、大幅な工期短縮が計れるが、フローチングクレーンの吊上げ揚程に限界があり、



写真-4.2.8 明石海峡大橋の架設クレーン  
（提供：本州四国連絡橋公団）



写真-4.2.9 第2ボスボラス橋の架設クレーン  
（第二ボスボラス橋工事写真集）

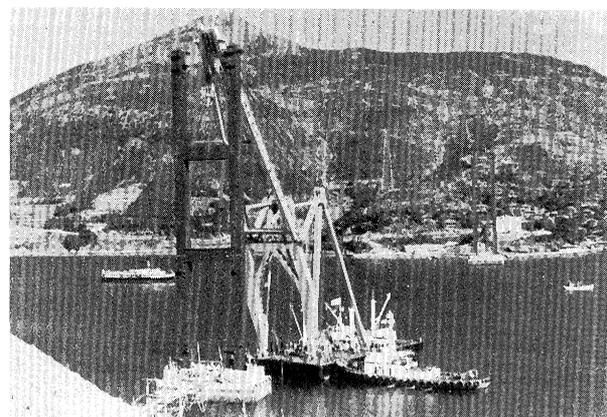


写真-4.2.10 南海大橋主塔の架設

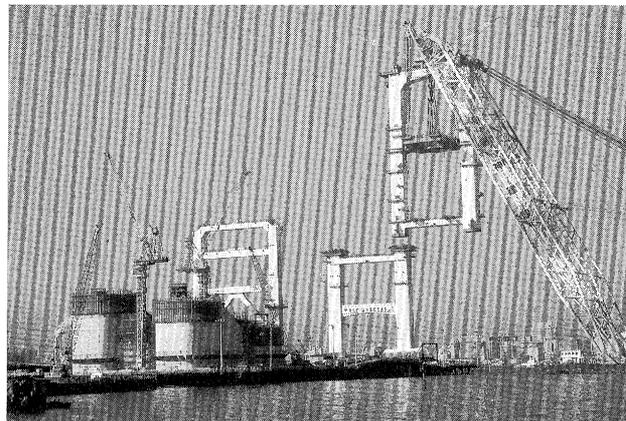


写真-4.2.11 レインボーブリッジ主塔の架設  
（提供：首都高速道路公団）

主塔 100 m 以下程度の中規模な吊橋（中央支間長 500 m ぐらい）に多く使用されている。

適用例としては、南海大橋（写真-4.2.10）、平戸大橋<sup>19</sup>、レインボーブリッジ（写真-4.2.11）などがある。

#### (5) 設置クレーン工法

門形クレーン、走行クレーンなどの設置クレーンにより架設する工法で塔高の低い主塔で採用された例がある。

吊橋の主塔の架設工法は、施工高さが高くなるため、クリーパークレーン工法がオーソドックスなスタイルであるが、近年のクレーン技術の発展に伴う大型化によりタワークレーン、汎用クレーン、フローティングクレーンなどの工法が可能なものとなってきたと言える。

また、現場継手は 1960 年初頭まではリベットであったが、それ以降日本、アメリカなどでは高力ボルト、イギリスでは引張りボルトでの接合方式が採用されている。またリベットから高力ボルトへの変換時期であった Verrazano Narrows 橋では、工場での連結はリベット、現場では高力ボルトという例もある。

近年では景観面の要求から現場溶接が採用される例（レインボーブリッジ、白鳥大橋）もでてきている。

#### 4.2.4 精度管理

吊橋の主塔は主ケーブル反力として非常に大きな鉛直荷重を受け持つ構造であり、長大化に伴いこの鉛直荷重はますます大きなものとなってくる。したがって主塔の鉛直度と継手面の平坦度は非常に重要な要素であり、主塔の耐荷力にも大きな影響を与えるものである。したがって製作時から非常に厳しい精度が要求されている。

架設現地においては塔基部での平坦度・水平度などと、継手部の隙間の精度管理が挙げられる。

塔基部の施工法により管理する位置が変わるが、研磨工法の代表である Golden Gate 橋<sup>10</sup>ではコンクリート表面で 0.8 mm、底板表面で 0.08 mm の精度が要求されており、Verrazano Narrows 橋でもコンクリート表面で +0、-1.6 mm の要求であった。

継手部の隙間では、リベット接合の George Washington 橋で 0.076 mm、Golden Gate 橋で 0.15 mm 以下であった。これらは表-4.2.3 に示す本四公団の基準値と比べても同程度のものである。

#### 4.2.5 制振対策

1961 年、Forth Road 橋の工事において 10 m/s 以下の低風速で主塔に倍振幅 2.3 m の振動が発生した。この振動は継手強度にも影響を与えるほどの大きなものであった。またこの振動は独立状態である主塔の架設期間中だけであり、ケーブル工事で降全く発生しないものであった。この振動は、渦励振というある限定的な風速でしか発生しないものであり、以降、このような長大吊橋の主塔においては、事前に風洞実験が実施されこれに基づいた制振対策が施されてきている。

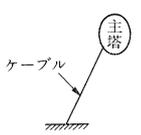
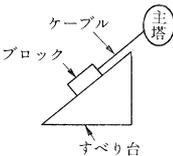
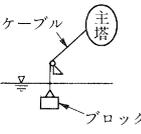
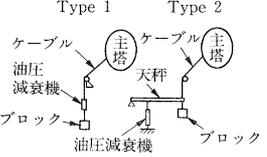
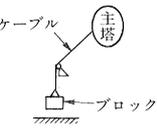
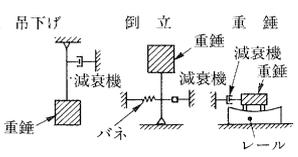
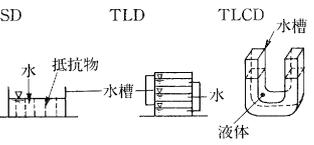
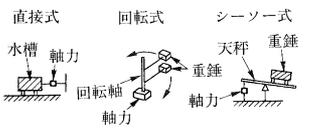
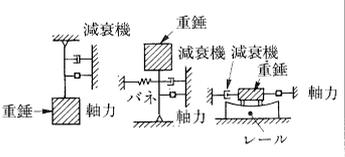
Forth Road 橋をはじめ瀬戸大橋までの主塔では、直接塔からワイヤーを張り渡す形式の対策を用いていた。この形式にはワイヤーを直接固定しワイヤーのヒステリシスで制振するタイプ、ワイヤーの先におもりを連結しおもりの上下動を加味して制振するタイプなどがある。

近年、この制振技術の研究が盛んに行われ、主塔の固有振動数に同調させたパッシブ型の制振装置を塔に設置する方法（TMD、写真-4.2.12）、さらに塔の振動数の変化に対応したり、数種類の振動数に対応できるように装置自体の振動数を調整し最適な状態で制振するアクティブ型の制振装置を設置する方法（AMD、写真-4.2.13）が採用され

表-4.2.3 本四基準主塔架設精度（本州四国連絡橋公団）

		架 設 精 度
コンクリート 研磨仕上げ面	仕上げ面高さ	± 1 mm
	平面度	1 mm 以下
	うねり	0.5 mm/m
	傾斜度 (鉛直度)	± 1 / 10 000
現 場 継 手 タ ッ チ 面	最大隙間	0.04 mm (塔壁 50%, 縦リブ 25%) 最大 0.2 mm 未満
塔 全 体	鉛直度	H/5 000 H:塔高 (m)

表-4.2.4 制振対策の実績

名 称	制 振 概 要	モ デ ル 図	吊 橋 実 績	
直	ケーブルステイ	ケーブルを張ることで、振動系を変化させるとともに、変位を拘束する張力変化によるヒステリシスでエネルギーを吸収する。		Severn 橋 Bosporus 橋
	スライディングブロック	ケーブルを張ることで、振動系を変化させるとともに、変位を拘束する。張力変化によるヒステリシスとブロックと滑り台の間のクーロン摩擦によりエネルギーを吸収する。		Forth Road 橋 平戸大橋 因島大橋 (3P) 関門橋 大島大橋 北備讃瀬戸大橋 (2P) 南備讃瀬戸大橋 (6P)
接	水中ブロック	ケーブルを張ることで、振動系を変化させるとともに、変位を拘束する。張力変化によるヒステリシスとブロックと水の間の摩擦によりエネルギーを吸収する。		南海大橋
	ダンパー重錘	ケーブルを張ることで、振動系を変化させるとともに、変位を拘束する。張力変化によるヒステリシスと油圧減衰機の油の粘性抵抗によりエネルギーを吸収する。		因島大橋 (2P) 大鳴門橋 下津井瀬戸大橋 北備讃瀬戸大橋 (3P) 南備讃瀬戸大橋 (5P) 横浜ベイブリッジ (面外)*
式	半質量ダンパー	ケーブルを張ることで、振動系を変化させるとともに、変位を拘束する。振動系の半周期にダンパーブロックが振動系に関与し、残りの半周期で無関与となる。この作用による非線形性による減衰力を付加する。		岩黒島橋 (2P)*
	パッシブ型 TMD (振り子式)	主塔の固有周期に同調させた振り子の振動によりエネルギーを吸収し減衰させる。減衰機には油圧ダンパー粘性液体、粘弾性体のせん断変形などを利用。		レインボーブリッジ (台場) 明石海峡大橋** 来島第二・三大橋 名港西大橋*, 花畔大橋* 岩黒島橋 (3P)* 横石島橋* 横浜ベイブリッジ (面内)*
間	パッシブ型 TMD (同調液体ダンパー)	容器に入った液体が振動により動揺し、重心が移動する。この重心移動によりエネルギーを吸収し減衰力を与える。減衰性は水槽内部の抵抗物や水槽壁と液体の摩擦などを利用。		生口橋* 幸魂橋*
	アクティブ型 (AMD)	主塔の振動を検出し、空気力と逆方向の力を与えられるような制御力をもつ装置により抑制力を与え制振する。制御力はすべて動力で行う。		レインボーブリッジ (芝浦) 明石海峡大橋
式	ハイブリッド型 (HMD)	主塔の振動を検出し、空気力と逆方向の力を与えられるような制御力をもつ装置により抑制力を与え制振する。制御力は装置自体のもつ復元力とそれを補う動力で行う。		レインボーブリッジ (台場) 白島大橋 来島第三大橋

\* : 斜張橋      \*\* : 完成後も利用しているもの

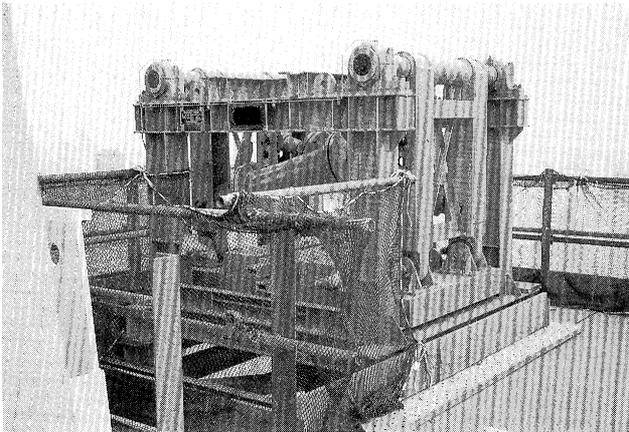


写真-4.2.12 TMD型制振装置 (レインボーブリッジ)  
(提供：首都高速道路公団)

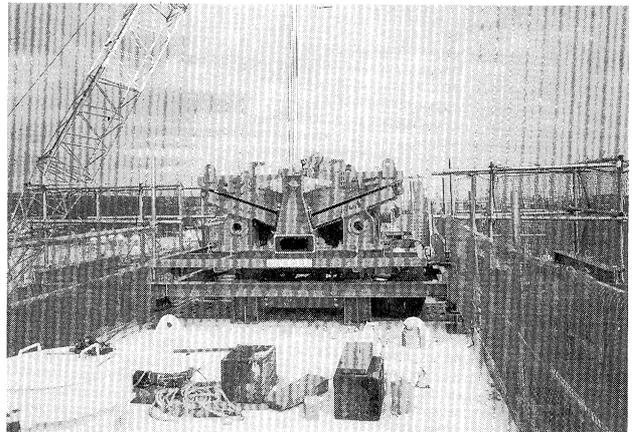


写真-4.2.13 AMD型制振装置 (白鳥大橋)  
(提供：北海道開発局)

ている。明石海峡大橋では、事前の風洞実験で主塔架設時ばかりでなく主ケーブル架設中、さらに完成状態でも渦励振の発生が予想されたため、架設時にはパッシブ、主塔の独立完成～主ケーブル架設中ではパッシブとアクティブの供用、完成時にはパッシブで制振することとなっている。

制振対策の実績を表-4.2.4 に示す。

### 4.3 主ケーブル工事

#### 4.3.1 概 説

主ケーブル工事は、これに先行する主塔架設工事を引き継ぎ、後に控える補剛桁架設工事に引き渡してゆく工事で、本工事の出来上がりいかんが完成時の橋体そのものの形状・精度を左右するものである。また、主ケーブルは、死荷重および変動荷重を張力として負担し、主塔あるいはアンカレイジに伝達する役目を果たしており、吊橋で最も要となる構造といえる。

このように、吊橋の重要な役割を担う主ケーブルの架設工事は、準備工事と主ケーブル架設そして主ケーブル架設以後の工事に大きく分類される。準備工事は、架橋地点をパイロットロープで初めて線として結ぶ渡海作業と、その後形成するホーリングシステムを用いた架設設備（キャットウォーク）の設置であり、主ケーブル架設は、主ケーブルを構成する複数ストランドを架設する繰返し作業である。また、後作業は、スキズ、ケーブルバンド架設、ハンガーロープの架設など補剛桁架設につなぐ作業と、補剛桁架設後に実施するラッピング、塗装作業からなる。

図-4.3.1 に主ケーブル工事のフローを示す<sup>20)</sup>。

主ケーブル工事は、国内外を問わず上記フローでの施工例が大半である。特に国内では、1961年に主ケーブルが

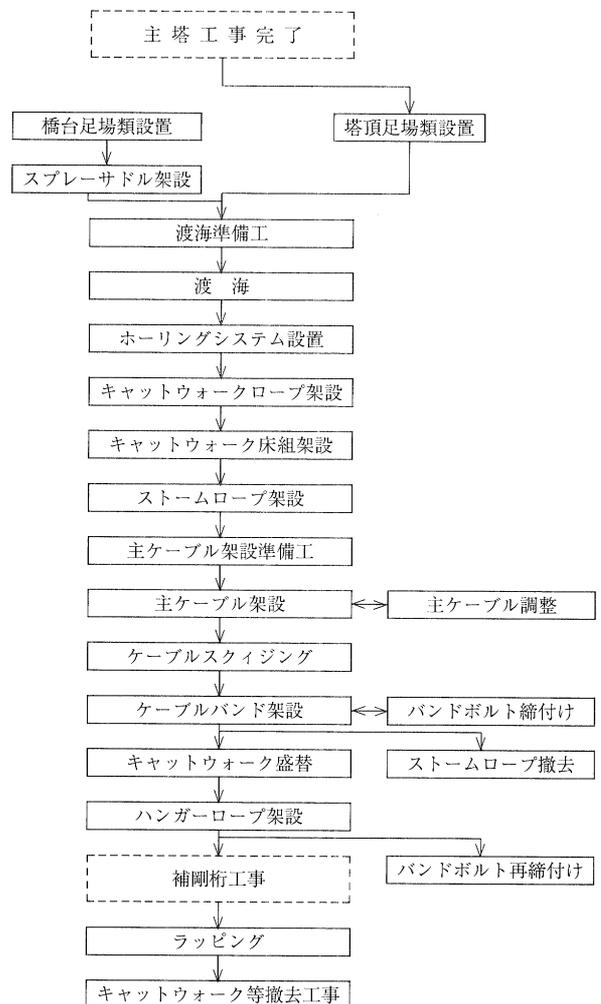


図-4.3.1 ケーブル工事フロー図  
(川田忠樹：現代の吊橋)

架設された若戸大橋 (367 m)<sup>21)</sup>で各工種の調査研究がなされ、現在の主ケーブル技術の基礎を築いたといえる。また、後述する主ケーブル架設については、1970年に上吉野川橋 (253.5 m)<sup>22)</sup>において、平行線ケーブル架設工法のエアスピニング工法とプレハブストランド工法の両者が2条の主ケーブルのそれぞれで施工され、主ケーブル架設技術の礎となったといえる。

### 4.3.2 渡海作業

渡海作業は、主塔架設まで架橋地点の両岸で点として行われていた工事を、パイロットロープを張り渡すことで初めて線として結ぶ作業である。パイロットロープには、通常20～30 mm φの小径ロープを使用する。

本作業は、架橋地点での潮流、船舶の航行状況、気象条件、橋の規模等を十分考慮して、工法を選定する必要がある。工法としては、海中渡海工法、海上渡海工法、空中渡海工法の3種類がある。

図-4.3.2に、各工法の概要図を示す。

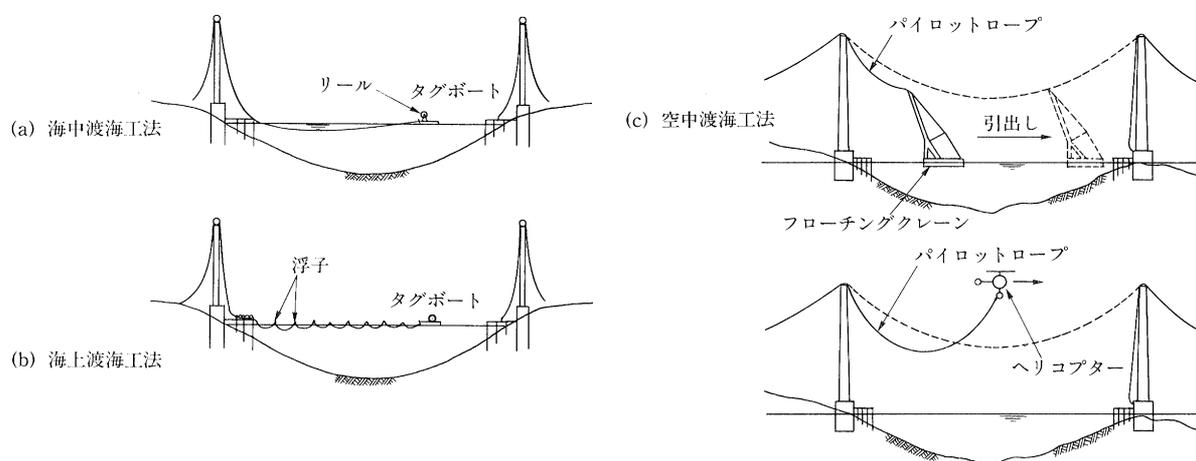


図-4.3.2 渡海工法の概要 (川田忠樹：現代の吊橋)

#### (1) 海中渡海工法

本工法は、パイロットロープを徐々に海中に落としながら曳船で引き出す方法である。設備や工法の面では、簡単で有利であるが、海底地形・潮流の良好な条件、航行船舶の規制など制約条件が多く、国内での渡海作業において実施例はない。海外ではこれらの制約条件を満足する場合に広く採用されている。

#### (2) 海上渡海工法

一般的には、パイロットロープに適切な間隔で浮子を取り付け、水面に浮かべた状態で海上を曳船にて引き出し、張り渡す方法である。パイロットロープとして、水に浮くロープを用いることもある。

比較的短時間に、安全確実に実施できるが、潮流の転流時を選び、航路閉鎖をする必要がある。わが国では、若戸大橋、関門橋 (712 m)<sup>13)</sup>、因島大橋 (770 m)<sup>14)</sup>、レインボーブリッジ (570 m)<sup>23)</sup>、白鳥大橋 (720 m) など実施例は多い。

#### (3) 空中渡海工法

パイロットロープを水面につけることなく、空中に張り渡したまま引き出す方法である。送電線の張り渡しでは、風、気球等を用いる例もあるが、吊橋渡海の場合、安全性、確実性の面から大型フローティングクレーンによるものが多い。これは、パイロットロープの先端をフローティングクレーンのブーム先端に取り付け、バックテンションを与えながらロープをフリーハンク状態で引き出すものである。航路を閉鎖する必要がなく、潮流の影響も受けにくい。た

だし、航路制限高を常に確保するためのロープ形状管理（張力管理）が必要となる。

実施例として、南北備讃瀬戸大橋（990 m）、下津井瀬戸大橋（940 m）がある<sup>24</sup>（写真-4.3.1）。なお、現在建設中の明石海峡大橋（1 990 m）では、さらに厳しい航行船舶の条件を克服するため、ヘリコプターによる空中渡海が実施された。本工法によれば、航行船舶に全く影響を与えず、ごく短時間での渡海が可能となる。ただし、パイロットロープは、軽量高張力ロープを用いるため、他工法で使用するロープに比べて径はさらに小さくなる。

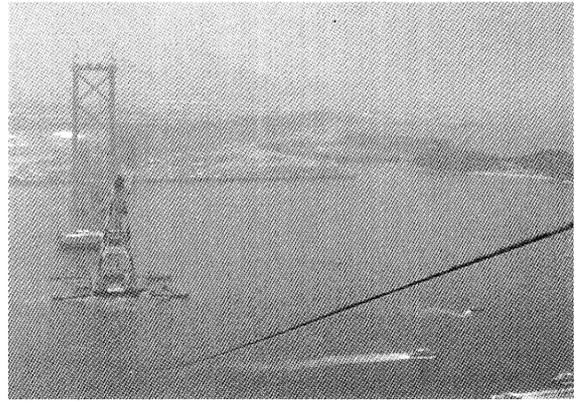


写真-4.3.1 フローチングクレーンによる渡海  
（南備讃瀬戸大橋）（提供：本州四国連絡橋公団）

### 4.3.3 架設設備の設置

主ケーブル架設の準備工事として、架設設備を設置するが、これにはホーリングシステムとキャットウォークシステムがある（橋台、塔頂での足場、クレーンの設置はここでは省く）。

#### (1) ホーリングシステム

ホーリングシステムとは、兩岸のアンカレイジ間に、主塔上を通して張り渡されたロープによる運搬設備である。ホーリングシステムの形式としては、①ホーリングロープを、ループ形状につなぎ、これを駆動装置を通してエンドレスに動かす方式（ループ式）と、②ホーリングロープを、兩岸に配した大型ウインチに巻き付け、両方のウインチでホーリングロープを往復動作で動かす方式（レシプロ式）の二通りの形式がある。

図-4.3.3 に両システムの概念図を示す。

ホーリングロープの径は、橋の規模、張り渡し張力によって異なるが、通常 30～50 mm  $\phi$  程度である。これの架設手順は以下のとおりである。

- ① 渡海作業によって主塔上を通して両アンカレイジ間に張り渡されたパイロットロープの片端にホーリングロープの始端を接続する。
- ② このパイロットロープを対岸の大型ウインチで巻き取ってホーリングロープを全長にわたって引き出す。
- ③ このホーリングロープにロープ引出し用キャリア（あるいはストランド引出し用キャリア）を取り付けて、ホーリングシステムは完成する。

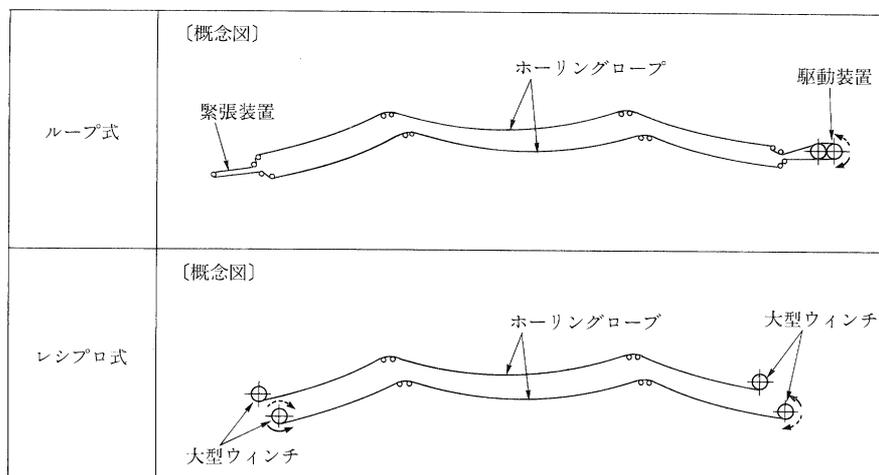


図-4.3.3 ホーリングシステム概念図

- ④ 2本目以降のホーリングシステムは、ここで完成したホーリングシステムを用いて引き出す。後述するキャットウォークロープも同じ要領で架設する。

以上はレシプロ式の場合である。ループ式ホーリングシステムの場合は、上記要領で2本のホーリングロープを引き出し、ロープに適切な張力を与えるための緊張装置、長さ調整装置および駆動装置を配備し、ループ状につないでシステムとして形成する。

なお、上記要領の中で、パイロットロープで引き出せるロープの径は、ロープの強度上制限があるため、これがホーリングロープ径に満たない場合は、上記引出し作業の繰返して徐々にロープ径を大きくし、最終的にホーリングロープを引き出すことになる。

ループ式ホーリングシステムでは、駆動装置のシーブ摩擦力によって、エンドレスのロープが動くため、ロープ挙動の連続性は良いが、大きな張力の導入には難がある。一方、レシプロ式ホーリングシステムでは、ウインチ原理と同様であるため、速度を落とせば、大きな張力が確保できるが、兩岸の2台の機械を連動させる必要があるため、連続性の確保に注意を要する。両者の利点を生かして、比較的小規模の吊橋やエアスピニング工法では、ループ式が採用されており、キャットウォークロープやストランドの引出しに大きな張力を要する場合は、太径ロープを用いたレシプロ式が採用されている。ループ式の実施例は、国内では関門橋、因島大橋、白鳥大橋などがあり、さらに海外では大半の吊橋で実施されている。レシプロ式の実施例は、大鳴門橋、南備讃瀬戸大橋などが挙げられる。

## (2) キャットウォークシステム

キャットウォークシステムは、ロープを張り渡したワイヤーブリッジ形式の非常にたわみやすい構造物であるが、主ケーブル架設時の作業足場となるばかりでなく、スキズ、ケーブルバンド架設、ハンガーロープ架設、ラッピング作業等の足場としても利用する重要構造物である。したがって、設計上、上記の作業性を重視することは当然ながら、たわみやすさに起因する耐風安定性に大きな配慮を払う必要がある。架設においては、その形状管理を十分に行い、主ケーブルの架設精度に影響を及ぼさないようにする必要がある。この観点から、通常、キャットウォークシステムは、キャットウォークロープ+床組に加えてストームロープを設けて、剛性を増す構造としている。キャットウォークシステムの形式は、キャットウォークロープとストームロープを結ぶストームハンガーの取付け形状から、ダイアゴナルハンガー形式とバーチカルハンガー形式に分けられる。図-4.3.4に両者の形式を示す。前述の上吉野川橋では、2条の主ケーブルのキャットウォークシステムとしてこの両者が用いられ、その施工性、挙動などが調査された。そして、耐風安定性や剛性の面からは、ダイアゴナルハンガー形式が有利であり、形状調整等の施工面からは、バーチカルハンガー形式が有利といわれている。

### 1) キャットウォークロープの架設

キャットウォークのロープ径は、橋体規模、キャットウォークシステム構造によって異なるが、通常30~60mmφ程度が使用される。また、その本数はキャットウォーク1連当りで6本から12本程度で構成される。ロープの架設

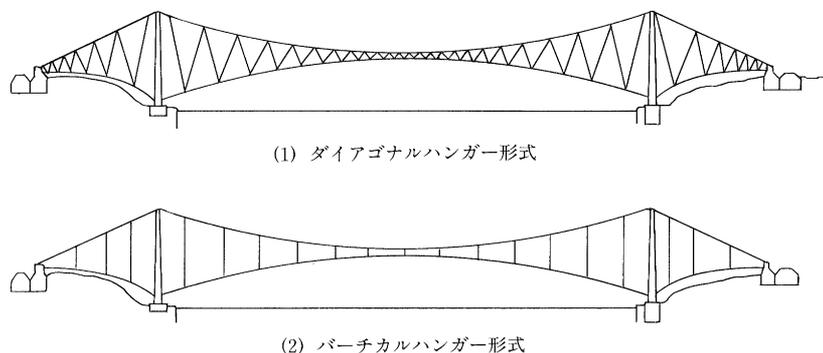


図-4.3.4 キャットウォークシステムの形式（川田忠樹：現代の吊橋）

法は種々あるが、主な架設法としては、水中引出し法、フリーハング工法、サスペンダー工法がある。

図-4.3.5に、フリーハング工法およびサスペンダー工法の概念図を示す。

① 水中引出し法

渡海工法のうちの海中渡海工法と同様の方法で、キャットウォークロープ自体を曳船で引き出す工法である。この工法は、水上規制を施しても、航行船舶に影響を及ぼさない水域でのみ可能な工法である。また、ロープが水中にいったん没するため、架橋地点が海の場合は、防食上の問題が残る。国内の近年における長大吊橋の架設では、本工法の実施例はない。海外では、Golden Gate 橋<sup>25)</sup>、Mackinac 橋<sup>26)</sup>など数多く実施されている（写真-4.3.2）。

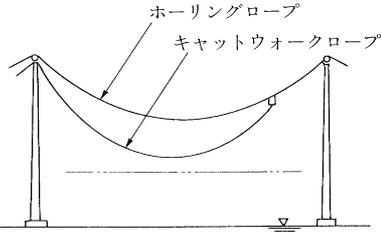
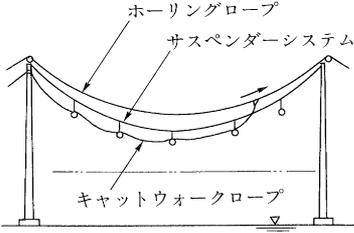
② フリーハング工法

本工法は、キャットウォークロープのリールを橋台上のアンリーラーにセットし、ロープ先端をホーリングシステムのロープキャリアに取り付けて、アンリーラーでロープにバックテンションを与えつつ、ロープをフリーハングの状態を引き出すものである。設備の構成が単純で、力のやりとりが明確であるが、スパンが長大化した場合、航路制限高を確保するために、ホーリングロープ、キャットウォークロープとも大きな張力が必要となり、設備が大型化することはまぬがれない。したがって、このような場合のホーリングシステムとしては、レシプロ式が適しているといえる。

本工法の実施例としては、ホーリングシステムをループ式とした関門橋、因島大橋、レシプロ式とした大鳴門橋<sup>15)</sup>、南備讃瀬戸大橋、下津井瀬戸大橋、明石海峡大橋がある。

③ サスペンダー工法

本工法も、キャットウォークロープのリールを橋台上のアンリーラーにセットし、ロープ先端をホーリングシステムのロープキャリアに取り付けて、アンリーラーでロープにバックテンションを与えながら引き出す点は、フリーハング工法と変わらないが、張力の増大化を防ぐ目的で、別途主塔間に、軌条となる静索（トラックケーブル）を張り渡し、これに複数のサスペンダーと称する引出しローラーを等間隔に吊るし、この上にキャットウォークロープを引き出すものである。これによって、キャットウォークロープの引出し張力の軽減が図られ、ホーリングシステムの設

	a) フリーハング工法	b) サスペンダー工法
工法概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャットウォークロープの先端をホーリングロープと接続し、ロープ下端を航路限界高以上に保ちながら、ホーリングロープの走行とキャットウォークロープの送出しを同調させて径間を引出し架設する。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャットウォークロープの中間を保持するサスペンダーシステムを設置し、サスペンダー上を引出し架設する。</li> </ul> 
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>架設システムがシンプルである。</li> <li>架設管理が明確。</li> <li>耐風安定性が良い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>航路限界高の確保が確実。</li> <li>ホーリングシステム規模（ロープ、設備）がフリーハング工法より小。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホーリングシステム規模（ロープ、設備）が大。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>サスペンダーシステムの架設撤去が必要。（設備大、工程大）</li> <li>耐風安定性に疑問。</li> <li>架設管理に要注意。</li> </ul>

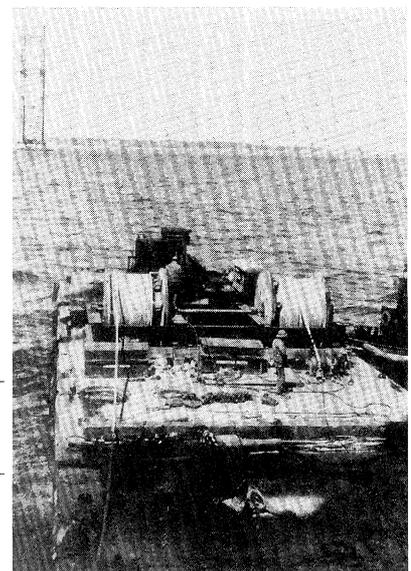


写真-4.3.2 キャットウォークロープの水中引出し（Mackinac 橋）

図-4.3.5 キャットウォークロープ架設工法の概要

備，ロープ等の軽量化が可能となる。しかし，設備が複雑化するため，引出し中に予想されるトラブル回避方法等の検討を十分に行っておく必要がある。

本工法の実施例としては，ホーリングシステムをループ式とした北備讃瀬戸大橋がある<sup>24)</sup>。

## 2) 床組の架設

キャットウォークシステムの床組構造は，金網，落下防止用ネット，横梁材，手すり等から構成されるが，これらの架設工法としては，一般に，塔頂で組み立てキャットウォークロープ上を滑らせて架設する滑り出し工法と，作業台車を用いて組み立てる台車工法とがある。図-4.3.6に両工法の概念図を示す。

### ① 滑り出し工法

塔頂の作業場にて，順次床組構造部材を組み立て，ロープの勾配を利用して滑り出させながら，床組を形成する工法である。塔頂付近の急傾斜部は，床組が急激に滑らないよう，塔頂から床組後端をロープで引きながら，また，中央寄りの緩傾斜部は，ホーリングロープで床組先端を引っ張りながら滑らせる。本工法は，国内では，下津井瀬戸大橋を除くほとんどの吊橋において採用している。本工法では，滑りやすくするため，床組をロープの下に吊るす例がある。国内の若戸大橋のほか，ほとんどの海外吊橋でこの方法が採用されている（写真-4.3.3）。

### ② 台車工法

本工法は，キャットウォークロープを軌道とした走行台車を組み立て，これをホーリングシステムとつないで主塔部で材料を供給しながら，スパン中央から順次床組を組み立ててゆくものである。国内では，下津井瀬戸大橋でこの方法が採られた。

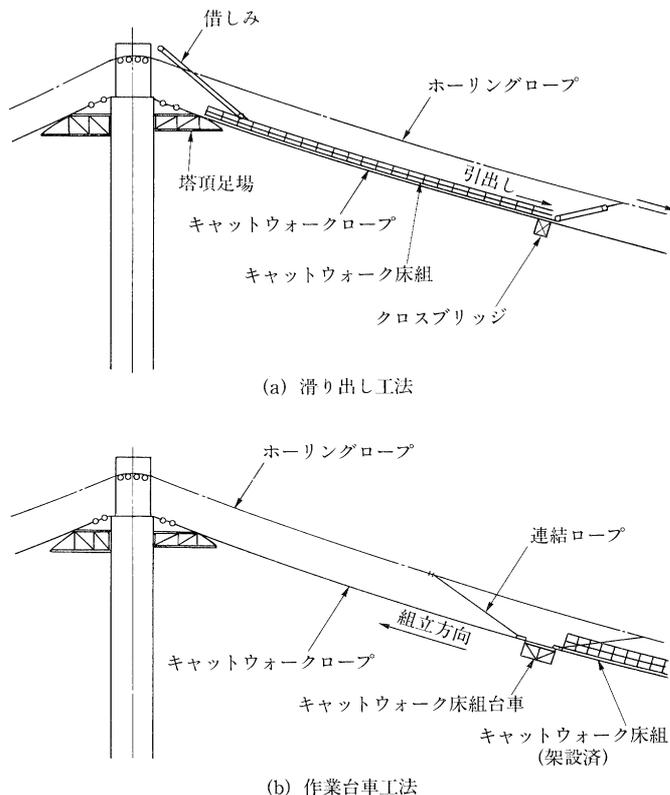


図-4.3.6 床組架設の概要（川田忠樹：現代の吊橋）

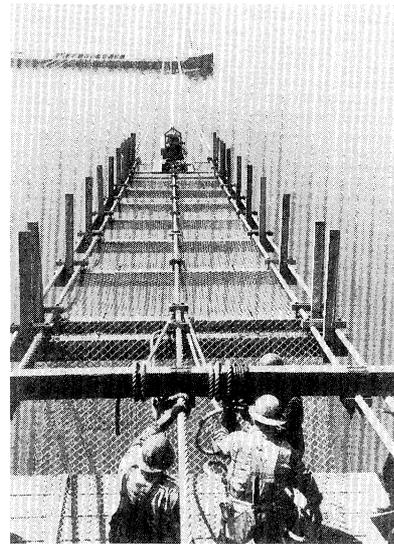


写真-4.3.3 床組ロープに吊るした滑り出し工法（Mackinac 橋）

## 4.3.4 主塔（塔頂サドル）のセットバック

主塔（塔頂サドル）のセットバックは，橋体完成時に主塔が鉛直状態となり，所定のスパンが得られるよう，あら

かじめ塔頂サドル位置を側径間側に所定量広げておくものである。もちろん、その量は架設時形状計算によって算定しておく。本作業は、橋体の完成形状の精度に大きく影響するため、十分な管理をする必要がある。

セットバックの方法は、塔頂サドルの底面をローラー式またはスライド式とし、主塔は直立のまま、サドルだけをセットバックする方法と、主塔のフレキシビリティーを利用し、主塔自体を側径間側に倒すフレキシブルタワー式がある。フレキシブルタワー式には、キャットウォークとは別系統で、主塔を引っ張るトラクションロープを設置するトラクションロープ方式と、ストームロープに導入する張力を変えることで、キャットウォークロープの張力に差を生じさせ、主塔を倒す方法とがある。塔頂サドルをスライド式とした例では若戸大橋が挙げられ、ローラー式は、海外吊橋に多く見られる。また、フレキシブルタワー式としては、関門橋でトラクションロープ方式が、因島大橋以後の本四橋では、キャットウォークシステムによる方式が採用された。

#### 4.3.5 主ケーブルの架設

ここでは、近年の長大吊橋の大半で採用されている平行線ケーブルの架設工法について述べる。

平行線ケーブルの架設工法としては、エアスピニング工法（AS工法）とプレハブストランド工法（PS工法）がある。上吉野川橋で両工法を実施し、種々の調査比較がなされたのは、前述のとおりである。両工法の選定にあたっては、架橋地点の地形条件、工程、工費等が比較の対象となるが、AS工法が海外の長大吊橋の主流を占めてきたのに対し、AS工法の欠点のいくつかを補うPS工法が、国内のそれ以降の吊橋で採用されている。

##### (1) エアスピニング工法（AS工法）

John A. Roebling によって今日の手法が開発された AS 工法は、図-4.3.7にその原理を示すように、糸巻の要領で、兩岸アンカレイジに固定されるストランドシュー間にワイヤーを繰り返し巻き付け、最後にワイヤーの始端と終端をつなぎエンドレスのループ状にして束ねて、1本のストランドとする工法である。本工法は、欧米吊橋の架設の主流をなしており、ワイヤーの引出し張力を、主ケーブルの完成時張力よりやや高め（150～200 kgf/本）とし、引き出されたフリーハングのワイヤーを、1本ずつのサグを調整して品質管理を行ってきた。この方法では、引出し済みのワイヤーも引出し中のワイヤーもフリーハング状態でキャットウォークの上空にあるため、風の影響を受けやすい工法と言える（写真-4.3.4）。また、1ストランド分の架設終了時には、シェイクアウトと呼ばれるストランドの成形

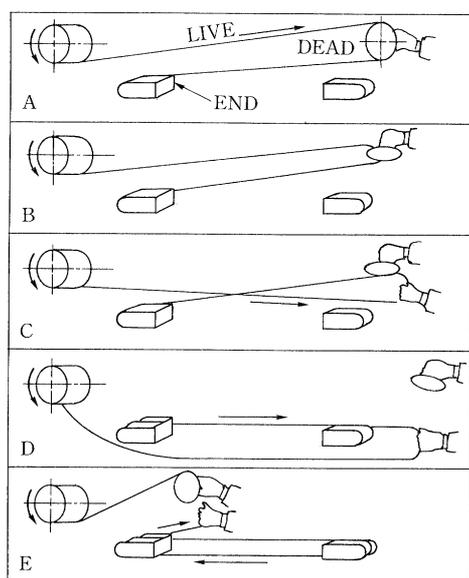


図-4.3.7 エアスピニング工法の原理

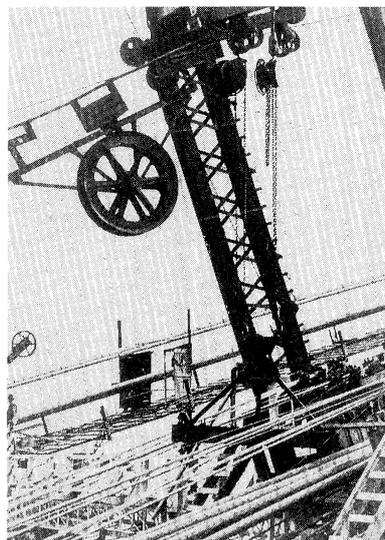


写真-4.3.4 スピニング状況（Golden Gate 橋）

作業をする必要があり、これも多大な労力を要する作業である。この方法は上吉野川橋で採用されたが、これに対し、その後わが国で採用（開発）された AS 工法は、低張力工法と呼ばれ、主ケーブルの完成時張力より、かなり低い張力（50 kgf/本程度）でワイヤーを引き出し、キャットウォーク上に複数配備したケーブルフォーマー内に、順次着地させてゆく方法である。これによれば、ワイヤーは引出し後すぐにフォーマー内に収まるため、風の影響を受けにくく、フォーマー内でワイヤーが整然と並ぶため、1本ずつのサグ調整およびシェイクアウトも不要となり、施工の効率化が図れる利点がある。国内実施例として、平戸大橋（465 m）、下津井瀬戸大橋（940 m）がある（写真-4.3.5）。

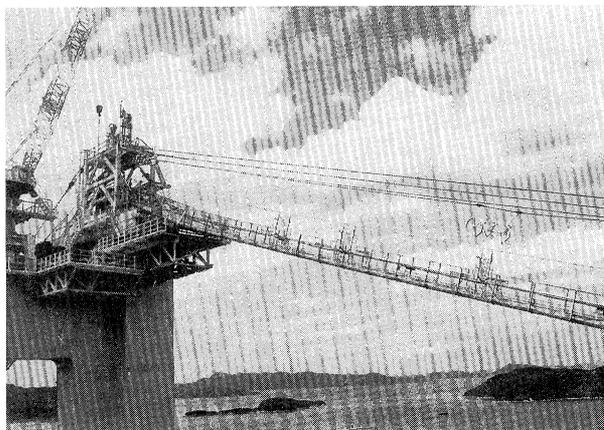


写真-4.3.5 スピニング状況（下津井瀬戸大橋）  
（提供：本州四国連絡橋公団）

いずれの方法も、基本的には、ワイヤーリールをアンカレイジに配備したアンリーラーにセットし、ホーリングシステムによって兩岸間を行き来するスピニングホイールと呼ばれる車輪にワイヤーを掛け、1度の引出しで、デッドワイヤー、ライブワイヤーの2本が架設されることになる。スピニングシステムとしては、スピニングホイールとアンリーラーを複数個配置して、1度に多数本の引出しも可能である。これらの構成は、地形やアンカレイジ形状の条件や、求められる工程、工費比較等で決定されることになる。

## （2）プレハブストランド工法（PS 工法）

PS 工法は、あらかじめ工場でワイヤーを束ね、プレハブストランドとして製作したものをリールに巻き取り、輸送後、現場でストランド単位で引き出す工法である（写真-4.3.6、写真-4.3.7）。本工法は、AS 工法のワイヤー単位の架設という煩雑さを解決するため、Leonhalt が提案した六角形の最小空隙ストランドが注目を浴び、アメリカでその工場製造法が開発され実用化した。これは、アメリカの Newport 橋（1969 年完成）で初めて採用された。その頃、わが国では金比羅橋（1968 年<sup>27)</sup>、<sup>28)</sup>、八幡橋（1969 年<sup>29)</sup>が相次いで PS 工法で架設された。完成年で見れば、PS 工法の採用は、日本の方が早かったといえる。

PS 工法は、ストランドリールを、アンカレイジに配備したアンリーラーにセットし、プレハブストランドの先端をホーリングロープのキャリアに取り付けて引き出す。引出し速度は、30～40 m/分と AS 工法に比べ、きわめて遅いが、1度の引出しで、多数本のワイヤーが引き出されること、キャットウォーク上に複数個並べたローラー上に着地させながら引き出すため、風の影響を受けにくいこと等の理由で、工程的には、AS 工法より有利な工法といえる。

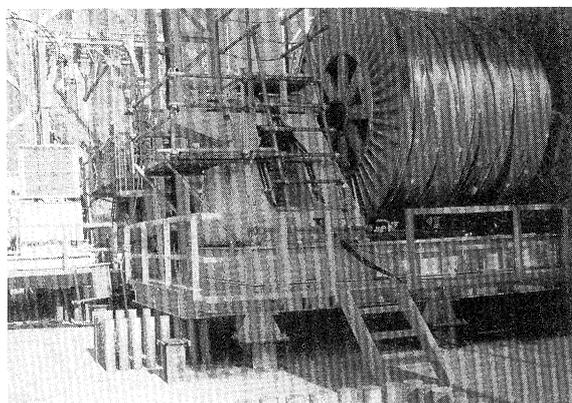


写真-4.3.6 プレハブワイヤーストランドのリール  
（南備讃瀬戸大橋）（提供：本州四国連絡橋公団）

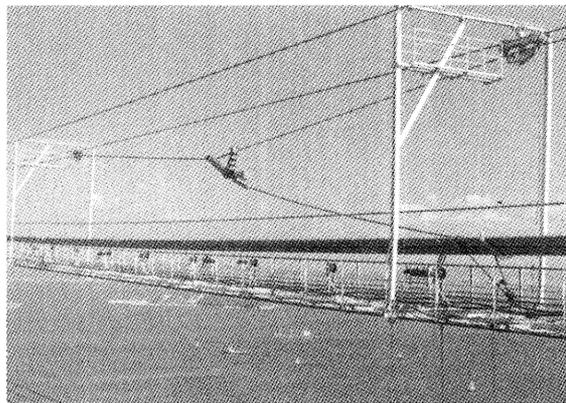


写真-4.3.7 プレハブワイヤーストランド引出し状況  
（南備讃瀬戸大橋）（提供：本州四国連絡橋公団）

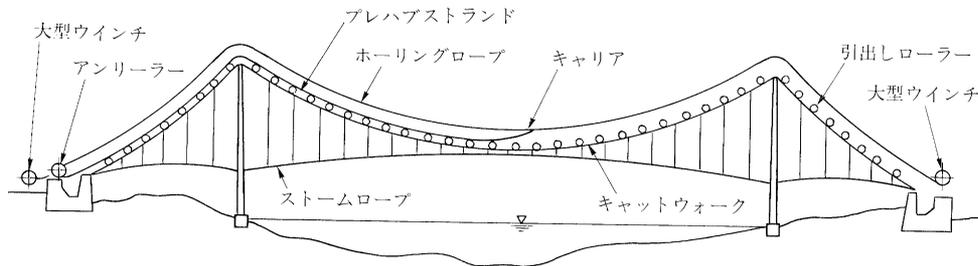


図-4.3.8 プレハブワイヤーストランド架設要領例図

表-4.3.1 プレハブワイヤーストランドの構成と長さの変遷

橋名	完成年	PWSのサイズ	PWSの長さ
Newport橋	1969	PWS 61	約1380 m
関門橋	1973	PWS 91	1162 m
因島大橋	1983	PWS 127	1360 m
大鳴門橋	1985	PWS 127	1722 m
北備讃瀬戸大橋	1988	PWS 127	1659 m
南備讃瀬戸大橋	1988	PWS 127	1780 m
明石海峡大橋	建設中	PWS 127	4073 m

図-4.3.8に、PS工法のプレハブストランド架設要領例を示す。

PS工法の利点を有効に活かすには、プレハブストランドを構成するワイヤー本数を増やすことが、効果的であることは言うまでもない。現在のプレハブストランドは、127本の正六角形構成であるが、Newport橋では、61本（正六角形）構成であったものを、関門橋で91本に増やし、因島大橋以降、127本構成が確立した。また、長さについては、吊橋の長大化とともに、プレハブストランドも長尺化し、明石海峡大橋では、4000mを超えるプレハブストランドの製作、輸送、架設（引出し）が可能となった。表-4.3.1に、プレハブストランドの構成本数と長さの変遷を示す。

国内では、平戸大橋、下津井瀬戸大橋を除くすべての長大吊橋が、PS工法によるものであり、本工法の架設技術は、日本で熟成したといえる。海外では、上述のNewport橋および2nd Chesapeake橋でPS工法が採用されている。

#### 4.3.6 主ケーブル架設後の作業

AS工法、PS工法にかかわらず、架設が完了した主ケーブルを構成するプレハブストランドが六角形に配列されたままであるので、これを均一で緻密な円形断面にし、補剛桁架設に備える必要がある。これらの作業が、スキズ、ケーブルバンド架設、ハンガーロープ架設である。また、補剛桁架設後は、主ケーブルの防食を目的として、ラッピングおよび主ケーブル塗装作業が行われる。

##### (1) スキズ、ケーブルバンド架設、ハンガーロープ架設

スキズは、主ケーブル架設完了後、これを空隙率20%程度の円形断面にまとめる作業である。スキズは、ストランド自体の配列の乱れを整えるプレススキズと、主ケーブル断面内の6方向から油圧ジャッキで締め付け、円形断面にする本スキズとからなる。これは、アメリカ、ヨーロッパ、わが国とも、時代にかかわらず、大差ない方法で行われている（写真-4.3.8）。

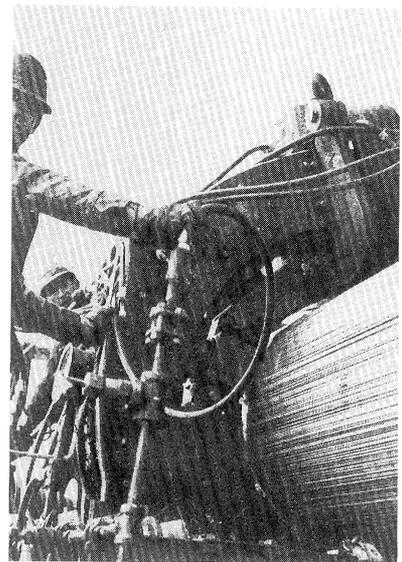


写真-4.3.8 スキジング（Golden Gate橋）

ケーブルバンド架設は、ケーブルバンドから吊るすハンガーロープおよび補剛桁が、設計どおり正確に取り付けようように、ケーブルバンドを主ケーブルの所定の位置に精度良く取り付ける作業である。ケーブルバンドは重量物であるので、専用の架設台車で塔頂から運搬するのが常である。架設後は直ちに、ケーブルバンドボルトの締付けを行う。ケーブルバンドボルトの締付け力は、補剛桁の荷重によるケーブルバンドの滑動に対する抵抗力を確保するものである。締付けは複数の油圧ジャッキを用い、一つのケーブルバンド内のすべてのボルトに均等に十分な締付け力が導入されるよう、十分な管理を行う。

ハンガーロープ架設は、補剛桁架設に備え、ケーブルバンドにハンガーロープを取り付けておくものである。ハンガーロープ長は、路面の完成形状の精度をより向上させるため、主ケーブル架設後に実際の主ケーブル形状を反映して決定される。

## (2) ラッピング

ラッピング<sup>9)</sup>は、主ケーブルの防食を目的として行われるが、John Roebling が考案したワイヤーラッピングが現在でも主流となっている。この作業では、ラッピングワイヤーを巻き付けたボビンをセットしたラッピングマシンが、主ケーブル円周方向に回転し、ラッピングワイヤーに所定の張力を導入しながら、主ケーブルにワイヤーを巻き付けていくものである。ラッピングワイヤーは通常 3~4 mm φ で、ワイヤー張力は、150~200 kgf/本である。

表-4.3.2 に、実施例の一部を示す。

ラッピングの実施例としては、このほかに樹脂ラッピングおよびゴムラッピングがある。前者の例として、Newport 橋、後者の例として 2nd Chesapeake 橋がある。

表-4.3.2 ラッピングの実施例

橋 名	ラッピングワイヤー張力	ラッピングワイヤー径
Verrazano Narrows 橋	136 kgf	3.83 mm
George Washington 橋	182 ~ 228	3.83
若 戸 大 橋	150	4.02
関 門 大 橋	150	4.00
因 島 大 橋	140 ~ 170	4.00
大 鳴 門 橋	200 ~ 230	3.50
本 四 瀬 戸 大 橋	200 ~ 230	4.00

### 4.3.7 施工管理

主ケーブル架設における、施工管理項目としては、主ケーブル架設時のプレハブストランドのサグ管理とその調整が最重要であろう。この場合、同時に主塔の倒れ、プレハブストランド張力も管理対象となる。これらの管理は、プレハブストランドが、温度影響を受けにくい夜間に行われるのが、通常である。図-4.3.9に、橋全体の形状測量要領例を示す。また、一連の主ケーブル工事の流れの中では、主ケーブル径、主ケーブル空隙率、ケーブルバンドボルト締付け力なども管理する必要がある。ケーブルバンドボルト締付け力については、導入直後だけでなく、その後の経時的な軸力変化の管理も重要な項目である。とりわけ、補剛桁取付け後は、補剛桁の荷重による主ケーブル張力が増加し、主ケーブル空隙率の減少による主ケーブル径の細りで、ボルトの締付け力が大幅に減少するので、注意を要する。

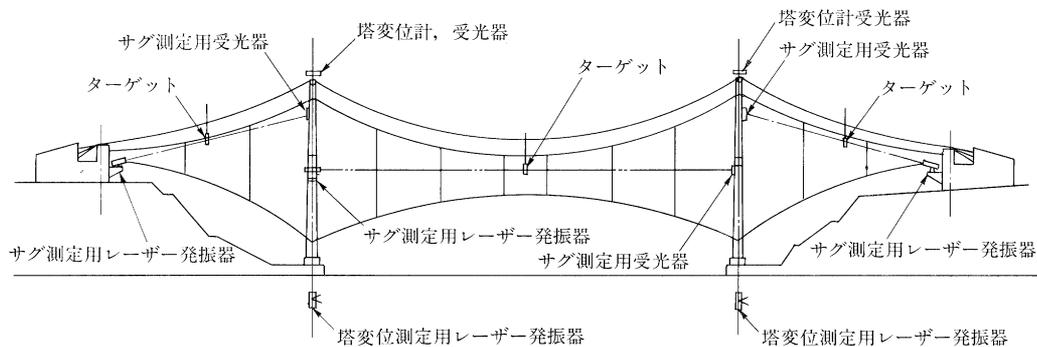


図-4.3.9 ケーブル形状計測要領例図

### 4.3.8 中小吊橋の架設

前項までに述べた長大吊橋時代以前に普及した中小吊橋は、スパイラルロープ、ストランドロープ等を用いたロープタイプケーブルが多い。これらについても、同様の施工フローで架設される場合もあるが、規模が小さいこと、山間部に位置することが多いこと等から、キャットウォークを用いずに直接架設する例も多い。

これらについては、以下のような方法が採られた。

#### (1) ウインチによる方法

図-4.3.10(1)に示すように、ウインチロープを各径間に引き出し、先端をロープのソケットに連結してウインチロープを巻き取ることによって、対岸まで引き出す方法で、ごく小規模な吊橋に用いられる最も簡単な方法である。

#### (2) ホーリングシステムによる方法

図-4.3.10(2)に示すように、各径間にホーリングロープ（動索）をエンドレスに、または往復可能なように張り渡し、キャリアにロープソケットを取り付け、リールにブレーキをかけながら、ホーリングロープを駆動して対岸まで引き出す方法である。

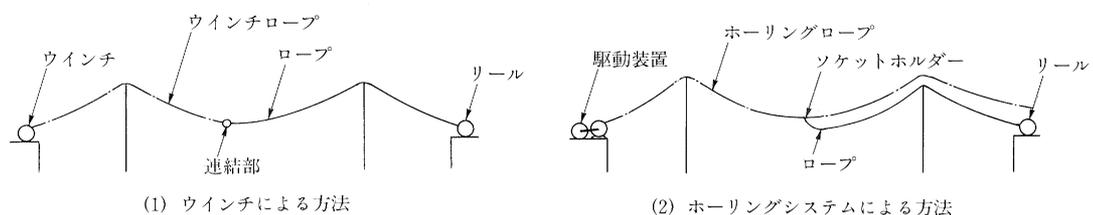


図-4.3.10 中小吊橋の架設要領例

## 4.4 補剛桁工事

### 4.4.1 概 説

補剛桁は、ストランドの架設が完了しケーブルバンドを取り付け吊材の吊り下げが完了した後、架設が開始される。補剛桁の架設計画では、新たに架設される補剛桁の偏心荷重によって主ケーブル、主塔、およびすでに架設した補剛桁に生じる変形量や応力が小さく、無理の生じないようにすることを基本に補剛桁の形式、地理的条件、施工性、安全性、さらには耐風安定性にも配慮して以下に述べる 1) 架設単位、2) 架設機材、3) 架設順序、4) 連結方法の各分類の中から適切な組合せを選択する。

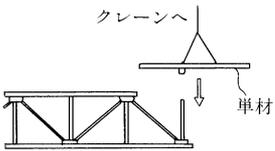
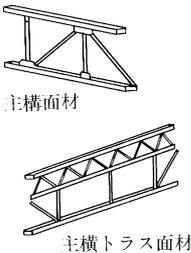
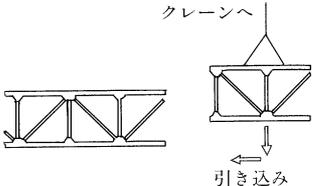
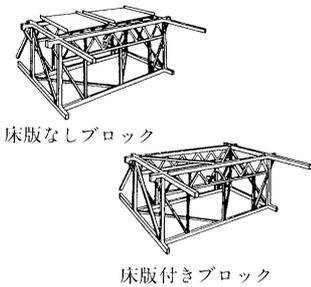
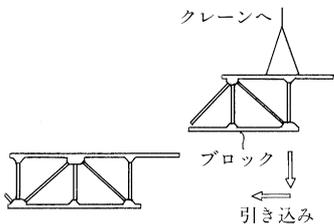
### 4.4.2 架 設 単 位

補剛桁の架設工法を架設単位となる部材の形状、寸法によって分類した場合、単材架設工法、面材架設工法およびブロック架設工法などがあり、実際には併用されることが多い。表-4.4.1 に補剛トラス形式の架設単位の形状および特徴を示す。なお、補剛箱桁形式については、主にブロック架設工法で架設されている。

#### (1) 単材架設工法

補剛トラスを構成する部材を単品の状態で現場に搬入し、これらを 1 部材ずつ組み立てていき補剛トラスを形成す

表-4.4.1 架設単位による工法比較

工法	架 設 単 位	架 設 要 領	特 徴
単材架設工法			<ul style="list-style-type: none"> <li>① 架設機材が小規模でよい。</li> <li>② 架設地点の地形に制約を受けることが少ない。</li> <li>③ 現場添接箇所が多いので、架設誤差が入りやすい。</li> <li>④ 架設工期が長くなる。</li> </ul>
面材架設工法			<ul style="list-style-type: none"> <li>① 架設機材は比較的大型となる。</li> <li>② 架設地点の地形に制約を受けることが少ない。</li> <li>③ 現場添接箇所が少なくなるので、架設誤差が比較的少ない。</li> <li>④ 架設工期を短縮できる。</li> </ul>
ブロック架設工法			<ul style="list-style-type: none"> <li>① 架設重量が大きいことにより、架設機材が大規模になる。</li> <li>② 架設地点の地形条件や海面の使用条件などから、制約を受けることが多い。</li> <li>③ ブロックは工場で組み立てられるので、架設精度の向上が期待できる。</li> <li>④ 現場で取り扱う部材数が少ないことにより、工期が短縮される。</li> </ul>

る工法である。部材重量を最小単位で取り扱うため、比較的小規模な運搬設備、架設機材で済む反面、部材数が多くなり工期が長くなる。

### (2) 面材架設工法

補剛トラスを構成する主構と主横トラスを工場または組立ヤードで面材として組み立て、現場へ搬入し架設する工法である。なお、一面材の構成は、現場添接部の位置によって多少異なるが、ほぼ表-4.4.1に示す形状で、主構の長さは通常2パネル分ぐらいのものが多く、

わが国における長大吊橋の補剛トラスの架設は、トラベラークレーンによる面材架設が主流をなしており、施工実績は若戸大橋<sup>21)</sup>以来、関門橋<sup>13)</sup>、因島大橋<sup>14)</sup>、大鳴門橋<sup>15)</sup>、南北備讃瀬戸大橋<sup>24)</sup>、レインボーブリッジなど多数である。なお、現在施工中の明石海峡大橋の架設もトラベラークレーンによる面材架設工法で計画されている。

### (3) ブロック架設工法

補剛桁を橋軸直角方向に輪切りにした架設単位を大型台船などにより架設地点まで運搬し、そのまま吊り上げ架設する工法で、補剛桁を吊り上げる方法としてはケーブル上に設置したリフティングクレーンによる方法、大型フローティングクレーンによる方法およびケーブルクレーンによる方法がある。なお、補剛箱桁形式の場合は、リフティングクレーンによるブロック架設工法が一般に行われるが、此花大橋<sup>30)</sup>で唯一大型フローティングクレーンによるブロック架設工法が行われた。また、中小吊橋では、ケーブルクレーンによるブロック架設工法も行われている。施工例としては、信喜橋<sup>31)</sup>などがある。

ブロック架設工法は、単材および面材工法に比べて、現場作業が少なく安全で工程的に有利となるが、架設直下の海面から架設ブロックを吊り上げるので必然的に航路制限を伴う。このため、わが国での施工実績は、リフティングクレーンによる架設が平戸大橋<sup>19)</sup>、大島大橋<sup>32)</sup>など数橋で、大型フローティングクレーンによる架設が南備讃瀬戸大橋や下津井瀬戸大橋の塔付き部大ブロックおよび此花大橋の3橋にすぎない。しかし、現在施工中の明石海峡大橋では、中央径間、側径間の塔付き部と橋台部の合計6ブロックを大型フローティングクレーンによるブロック架設、白鳥大橋では、リフティングクレーンによるブロック架設で計画されている。なお、諸外国<sup>33),34)</sup>においては、リフティングクレーンによるブロック架設工法が主流でSevern橋、Humber橋、Verrazano Narrows橋、第2ボスポラス橋など多数の実績がある。

#### 4.4.3 架設機材

補剛桁の架設には種々の機材が必要となるが、架設用クレーンの種類によりトラベラークレーン工法、リフティングクレーン工法、フローティングクレーン工法、ケーブルクレーン工法などに分類される。

このほかに架設クレーンによる分類とは、多少異なるが送り出し工法がある。

以下にこれらの工法の特徴を示す。

##### (1) トラベラークレーン工法

この工法は、主に面材または単材架設の場合に採用され、既設の補剛桁上に据え付けたトラベラークレーンにより順次架設しながら前進していく工法であり、主塔部および橋台部などから張出し架設する場合に適用される。

写真-4.4.1にトラベラークレーンの一例を示す。

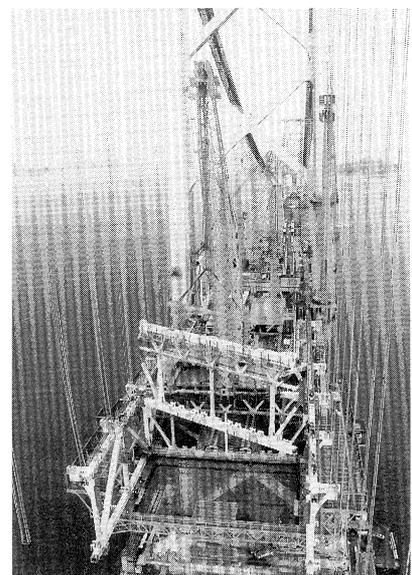


写真-4.4.1 トラベラークレーン工法

## (2) リフティングクレーン工法

この工法は、主ケーブルの上にクレーンを設置して補剛桁を架設する吊橋独特の架設工法である。補剛桁架設位置の主ケーブル上に部材吊上げ用のリフティングクレーンを固定し、台船により、架設直下まで海上輸送されてきたブロックを吊り上げ、所定の位置に架設する工法である。

この工法は、海面使用の制限がなく、海象・気象条件が比較的穏やかな場合にきわめて有効である。なお、諸外国では、この工法が主流となっている。写真-4.4.2にリフティングクレーン工法の一例を示す。

## (3) フローチングクレーン工法

海面上に据え付けたフローチングクレーンにより、大型台船で海上輸送されてきたブロックを直接吊り上げて架設する工法である。ただし、大幅な航行規制の必要性および海象・気象条件の影響が大きいことなどから、吊橋の全長にわたりこの工法が採用されたのは此花大橋1橋である。

この工法は、主にトラベラークレーンで架設ができない主塔付近の数パネルをブロック化し、大型フローチングクレーンで一括架設することなどにより工期短縮を図ることを目的に行われる。写真-4.4.3にフローチングクレーン工法の一例を示す。

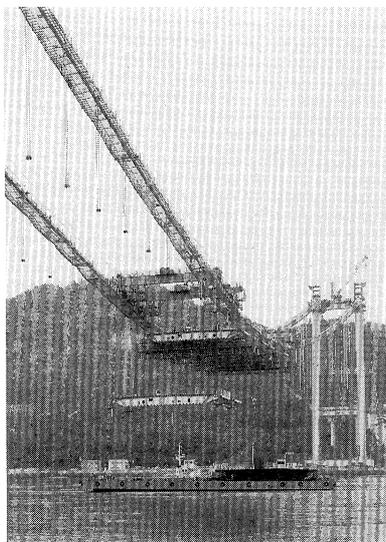


写真-4.4.2 リフティングクレーン工法

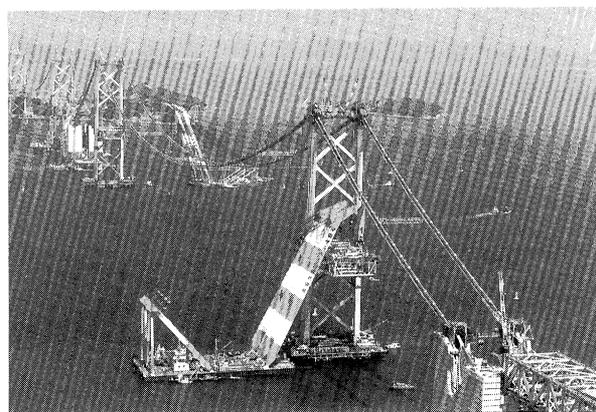


写真-4.4.3 フローチングクレーン工法

## (4) ケーブルクレーン工法

両主塔間にケーブルクレーンを設置し、この設備を用いて部材を運搬し組み立てる工法である。この工法は、一般に単材、比較的小規模な面材架設あるいは箱桁形式のブロック架設に適用されるため、主に中小吊橋の架設に用いられている。代表的な施工例としては、補剛トラスを面材で架設した若戸大橋の中央径間と箱桁をブロックで架設した信喜橋などがある。

## (5) 送り出し工法

送り出し工法の特徴は、図-4.4.1に示すように主塔付近の水切りヤードで補剛桁の架設、既設の補剛桁と本添接、吊材への仮定着、補剛桁の送り出しまでの全作業が行えることである。

送り出し工法の施工実績としては、国内外で大渡ダム大橋1橋のみである。なお、本工法の詳細は、文献34)を参照されたい。

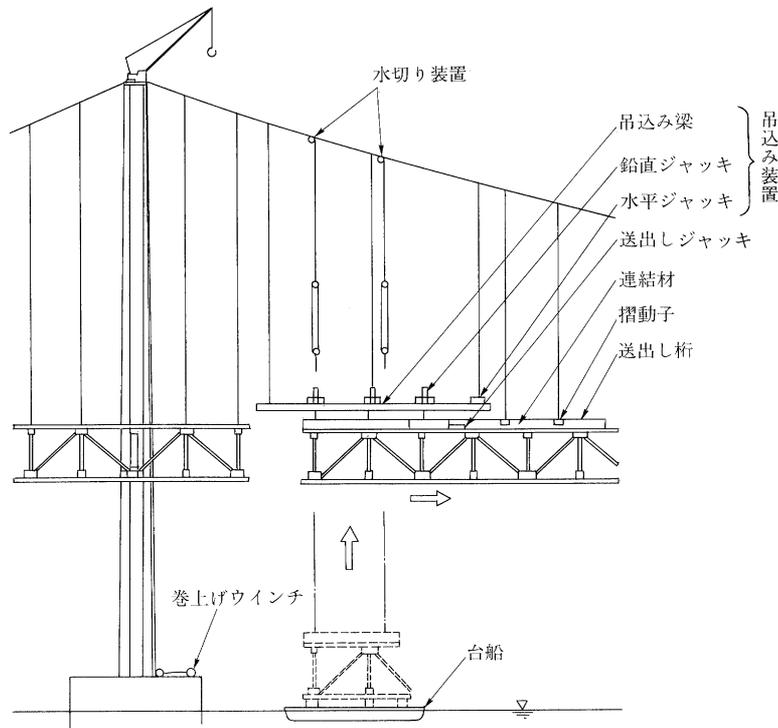


図-4.4.1 送り出し工法概要図

#### 4.4.4 架設順序

補剛桁の架設順序は、架設途中での主塔および補剛桁の応力・変形などの構造特性、人員・機材配置、部材の運搬経路および海象・気象条件などを総合的に判断して決定しなければならない。

補剛桁の架設進行方向の代表的なものを、表-4.4.2 に示す。①は両主塔を起点として、中央部あるいは両橋台に向かって張り出していく方法であり、②は逆に中央径間中央部および両橋台部を起点として、両主塔に向かって架設していく方法である。また、③は①、②の折衷案である。

①の場合、架設途中での主ケーブルや補剛桁の変形が大きいいため、架設ヒンジの設置あるいは吊材張力の調整などの工夫を必要とする。また、単材、面材、ブロックのいずれの工法においても施工が可能であり、使用機械設備の面からも制限されることが少ないことから、諸外国のみならず、わが国でも施工実績は多い。

Forth Road 橋では、現場の近くに補剛桁を立体組する場所がないため、50 km 遠方にある飛行場跡を作業基地とし、そこから部材を運び込み、床組上のトラベラークレーンにより単材架設している。

②の場合、中央径間中央付近の数ブロックを架設するだけで、主ケーブルの形状がほぼ安定し、その後架設される補剛桁の連結がスムーズに行えるため、全ヒンジ工法を採用している諸外国で多くみられる方法である。わが国での施工実績は単径間吊橋の平戸大橋および大島大橋など数橋である。

Verrazano Narrows 橋では、作業基地を New Jersey 州の Pennsylvania 鉄道の Greenvillyard とし、ここで補剛トラス 4 パネル分 (180 t~390 t) の立体組が行われ、順次 2 隻の台船に載せ架設地点まで運び、図-4.4.2 に示すように主ケーブル上の 2 基のリフティングクレーンで直接吊り上げられた。

若戸大橋は、塔付き部 3 パネルを架設した後、主ケーブルの形状の安定を図るために中央径間中央部 12 パネルの架設を行い、その後、①と同様に両主塔を起点として中央径間中央あるいは橋台部に向かって架設が行われた。

表-4.4.2 架設順序の分類

架設進行方向	特 徴	既 往 例
<p>① 主塔部より中央径間中央あるいは橋台部に向かって架設</p> 	<p>(1) 塔基部がすべての作業基地となるため、使用機材の共用が図れる。                  (2) 架設途中での主ケーブル、補剛桁の変形が大きく、架設ヒンジの設置位置あるいは架設先端のハンガー張力の調整等若干の工夫を必要とする。</p>	<p>1. Golden Gate 橋 (アメリカ)                  2. Mackinac 橋 (アメリカ)                  3. Forth Road 橋 (イギリス)                  4. Delaware Memorial 橋 (アメリカ)                  5. 関門橋                  6. 因島大橋, 大鳴門橋                  7. 南北備讃瀬戸大橋                  8. レインボーブリッジ</p>
<p>② 中央径間中央部と橋台部より主塔部に向かって架設</p> 	<p>(1) 中央径間中央の数ブロックを載荷するだけで主ケーブルはほぼ安定するため、諸外国の全ヒンジ工法で多くみられる。                  (2) 中央径間の架設は足場のない空中での作業となるため、作業性が悪い。                  (3) 閉合までは宙吊りの状態となるため、耐風安定性にかける。                  (4) トラベラークレーンなどの補剛桁上に据え付ける機械設備は、組立てできないため使用できない。</p>	<p>1. Verrazano Narrows 橋 (アメリカ)                  2. Severn 橋 (イギリス)                  3. Humber 橋 (イギリス)                  4. 第2ボスポラス橋 (トルコ)                  5. Oakland Bay 橋 (アメリカ)                  6. 南海大橋 (韓国)                  7. 大島大橋</p>
<p>③ 中央径間は主塔部より中央部へ側径間は橋台部より主塔部へ向かって架設</p> 	<p>(1) 橋台と塔基部がすべての作業基地となるため、作業が軽便しない。また、側径間の架設は、一般的に上り勾配で行える。                  (2) 橋台までの部材搬入が可能な場合に有利となる。</p>	<p>1. 明石海峡大橋</p>



図-4.4.2 Verrazano Narrows 橋の補剛桁の架設

#### 4.4.5 補剛桁の連結方法

補剛桁を順次架設していく場合、既設桁との連結を剛結あるいはヒンジとするかにより、そのときの主ケーブルの形状および吊材、補剛桁などの応力に大きな差が生じる。このため、補剛桁の連結方法を決定する場合には、架設の諸条件のほかに、架設途中での吊材、補剛桁の応力および縦断勾配、耐風安定性などを考慮して決定しなければならない。

補剛桁の連結方法としては、大きく全ヒンジ工法と逐次剛結工法の2種類に分類される。以下にこれらの連結方法の特徴を示す。

##### (1) 全ヒンジ工法

従来から諸外国で多く採用されており、図-4.4.3に示すように補剛桁の全ブロックが吊材に取り付けられるまで無補剛状態にしておく工法である。架設途中の挙動が単純で、架設計算も比較的容易であり、部材に特別な架設補強を必要としないなどの長所がある反面、架設途中では補剛桁のねじれ剛性がほとんどないため、耐風安定性を向上させるための対策が必要となる。風による被害の例としては、Forth Road 橋<sup>15)</sup>で架設時に31 m/sの風で上下振動が発生しトラス弦材を損傷している。

わが国での施工例としては、中小の吊橋を除いて若戸大橋の例があるのみで、関門橋以後は次の逐次剛結工法が主流となっている。

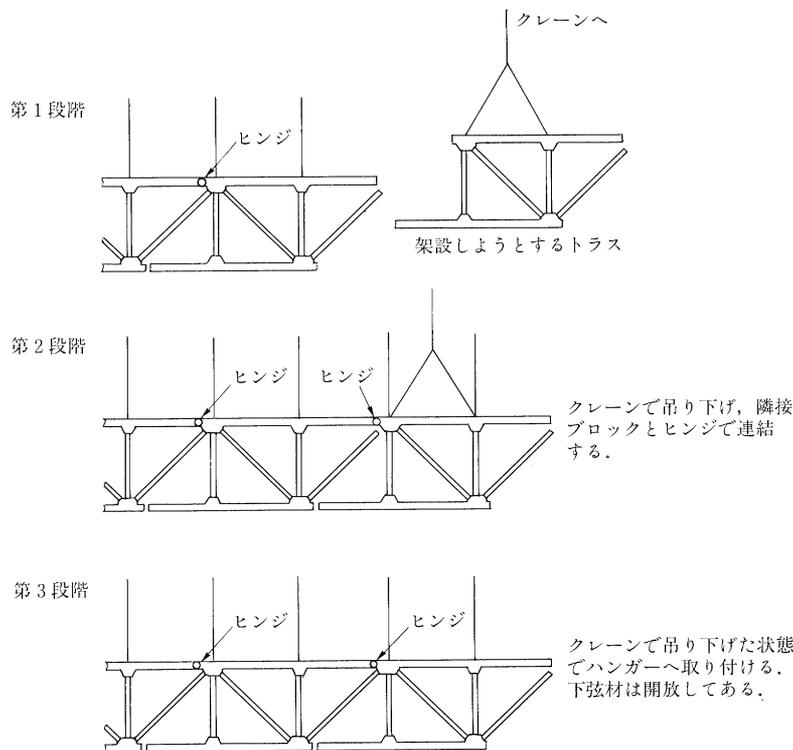


図-4.4.3 全ヒンジ工法

##### (2) 逐次剛結工法

逐次剛結工法は、図-4.4.4に示すように主構、主横トラスおよび上・下横構などの架設部材を既設部材に本添接（剛結）した後に吊材を引き込んで定着する工法である。この工法の特徴は、補剛桁が連続し剛性が高くなるため、架設時の耐風安定性が良くなること、無応力状態で本添接が行えるので架設誤差が小さいことである。しかし、架設途中に主ケーブルは大きく変形するが、補剛桁の剛性が高いため、補剛桁および架設先端部の吊材に一時的な過応力

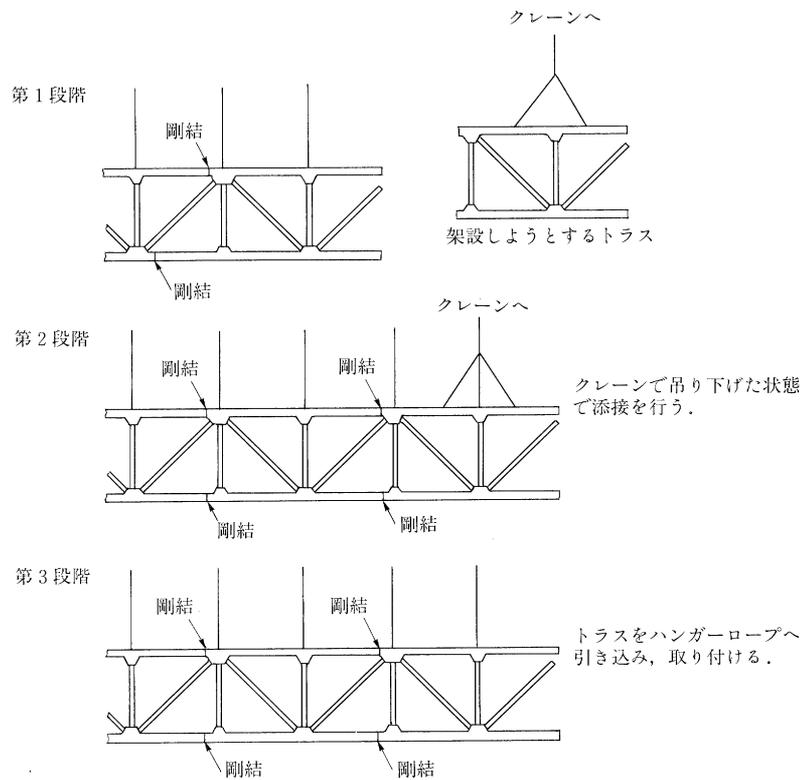


図-4.4.4 逐次剛結工法

が発生する。このため、場合によっては、架設応力が部材の許容応力を超過することがあり、部材補強などが必要となる。

逐次剛結工法には、架設ヒンジを有する逐次剛結工法と架設ヒンジを用いない逐次剛結無ヒンジ工法があり、両者の特徴を以下に示す。

#### ① 架設ヒンジを有する逐次剛結工法

架設ヒンジを有する逐次剛結工法は、全ヒンジ工法と逐次剛結工法の折衷案として考えられた工法である。これは、補剛桁の応力超過区間に架設ヒンジを設けて架設時の作用モーメントを減少させるものであるが、実橋ではこれらと合わせて、架設先端部材（吊材、主構斜材）の応力緩和のために設けられる例が多い。逐次剛結工法を初めて採用したのは、Delaware Memorial 橋で中央径間に2個、側径間に1個の架設ヒンジが設置された。なお、わが国では、関門橋、平戸大橋、因島大橋で採用され、中央径間に架設ヒンジを2個設置してこれらの架設応力の緩和に努めた。

しかし、吊橋の規模が大きくなると架設部材重量が増大し、トラベラークレーンの重量も増大するため、架設ヒンジが非常に多くなるが、角折れによる部材運搬への支障、ヒンジ部に特別な耐風養生などの対応が必要となる。このため、大鳴門橋以後は、次の逐次剛結無ヒンジ工法が主流となっている。

#### ② 逐次剛結無ヒンジ工法

逐次剛結無ヒンジ工法は、補剛桁先端部分の吊材に集中する張力を2本以上の吊材に分散することにより、吊材の過応力の発生を防止する工法である。ただし、主構の上・下弦材、斜材の断面が場合によっては架設応力で決定される。

#### 4.4.6 精度管理

補剛桁は、架設開始から閉合まで各架設段階で大きな変形が生じるため、架設途中での安全性の確認を行うために形状管理を実施している。

補剛桁の架設時の精度管理項目としては、一般に以下の項目について補剛桁が数パネル架設されるごとに理論値との比較を行い架設途中での精度確認を行う。

- ① ケーブルサグ
- ② 主塔の倒れ
- ③ 補剛桁の縦断高さおよび水平変位
- ④ スプレーサドルの移動量
- ⑤ 架設ヒンジの開き量

精度管理の計測は、一般に温度変化の影響が少ない夜間に行われる。また、上記の精度管理項目と合わせてケーブルの表面温度の計測を行い温度補正を行っている。

因島大橋では、このほかに架設段階の部材応力測定および振動測定が行われている。

#### 4.4.7 南備讃瀬戸大橋の補剛桁の架設概要

補剛桁の架設工法としては、これまで述べた工法の組合せにより種々のものが考えられるが、塔付き部大ブロックを大型フローティングクレーンでブロック架設した後、主塔部より両側に向かってトラベラークレーンを用いて面材による張出し架設を行った本州四国連絡橋の南備讃瀬戸大橋<sup>35)</sup>について、その架設手順を概説する。

南備讃瀬戸大橋は、中央径間 1100 m の 3 径間連続吊橋で道路鉄道併用橋である。また、補剛桁の架設は、1986 年 3 月に着手し、1987 年 7 月に補剛桁の閉合が行われた。

##### (1) 架設工法の選定

架設工法は、主に下記の事項を考慮して決定された。

- ① 架橋地点が航路上となるため、部材の水切りなどは主塔付近の特定海域に限定された。
- ② 全体工程から見て、工期短縮を図る必要があった。
- ③ 列車の走行性を考慮して連続補剛桁形式を採用しているため、中間支点となる主塔付近は、一般部と比べて部材断面が大きく、部材重量も重くなっている。

これらの条件を考慮して検討した結果、一般部については、従来より実績のある面材を主体とした逐次剛結無ヒンジ工法による主塔部からの張出し架設が採用された。また、主塔部については、一般部より重量が重く、面材で架設する場合、架設機材が大型になるなどの理由により、中央径間、側径間ともそれぞれ 4 パネルを 1 ブロックとして、大型フローティングクレーンによる一括架設が行われた。

##### (2) 主塔部の大ブロック架設

主塔部は、中央径間、側径間ともそれぞれ 4 パネルを 1 ブロックとし、3500 tf 吊級および 3000 tf 吊級の大型フローティングクレーンにより直接吊り曳航して架設が行われた。なお、架設ブロック重量は、最大で約 1500 tf である。

##### (3) 一般部のサイクル架設

中央径間、側径間をそれぞれ張出し架設する場合、架設バランスが問題となる。このため、中央径間の架設は、パネル数が多く工程上のクリティカルになるため、最速工程で行われるが中央径間の進行に対して側径間をどのように進めるかは、吊橋全体系の力学的なバランスを考慮して慎重に決定しなければならない。特に本橋の場合、連続補剛桁であることから、補剛桁の勾配および部材力、吊材張力などに留意して中央径間と側径間のバランスを考えて架設が行われた。

部材は架設工程に合わせて、2 パネルごとに 3000 tf 級台船にて各橋脚に係留し、橋上水切りクレーン（側径間は

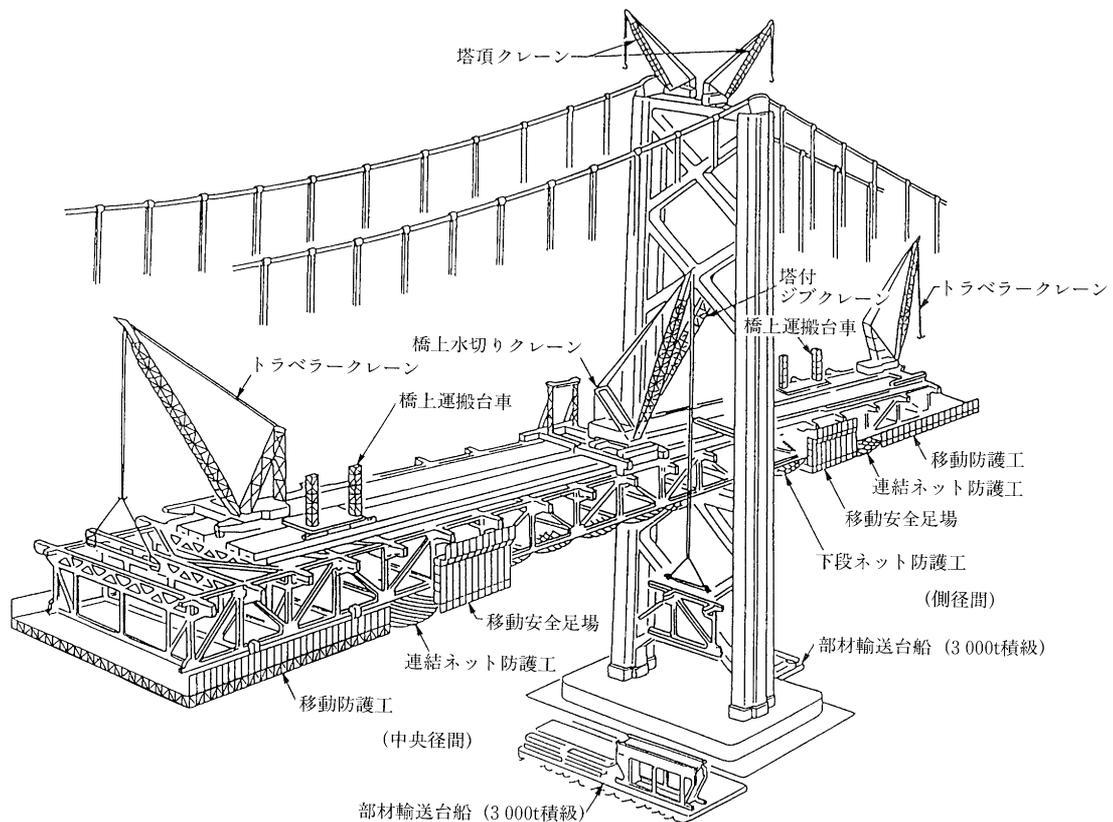


図-4.4.5 一般部サイクル架設概要図

塔付きジブクレーン)で水切り後、橋上の塔付近に設置した面材立掛架台上に仮置きする。先端の架設工程に合わせて運搬台車に載せて架設先端部まで運搬し、トラベラークレーンにて①主構2面、②主塔側主横トラス、上・下横構、付属物、③架設先端側主横トラス、上・下横構、付属物、④鋼床版の順序で架設を行った。また、②および③の完了時に、ハンガーブラケット(本橋の吊材定着部は、ブラケット構造となっている)下面に取り付けた引込み装置により吊材の定着が行われた。

面材架設のサイクル工程は、開始当初が1サイクル当り約14日であったが、作業の習熟・作業手順の見直しなどにより、最盛期には標準9日で架設が行われた。

図-4.4.5に、一般部サイクル架設要領図を示す。

#### (4) 補剛桁の閉合

閉合は、最初に側径間橋台側の閉合を行い、その後、中央径間の閉合が行われた。

#### (5) 吊材の引込み

吊材引込み格点数は、中央径間が最大3格点、側径間が最大2格点である。このような、多格点引込みを同時にしかも的確に行うために、引込み操作は移動防護工上に設置した操作盤にて集中して行われた。また、引込み装置に取り付けられた計測機器により引込み量と引込み力を計測し、移動防護工上のパソコン画面上で理論値と比較することにより引込み作業の管理がなされた。

引込み力は、1格点当り500tfを超える大きな値も実測されたが、すべて許容張力533tf以内で引込みが行われた。また、引込み量は、中央径間の架設初期において急激に増加し、最大2.7m程度まで達したが、架設の進展に伴って漸減している。引込み量、引込み力とも理論値と実測値との誤差は約10%であった。

## 参考文献 (4章)

- 1) Durkee (清水 訳): 吊橋ケーブルの建設法の発展について, International Symposium on Suspension Bridges, Lisbon (吊橋の国際会議論文集, 長大橋技術研究会), 1966
- 2) Bender: Historical Sketch of the Successive Improvements in Suspension Bridges of the Present Time, Transactions, ASCE, Vol. 1, 1867
- 3) Bowden・Seely: George Washington Bridge, Construction of the Steel Superstructure, Transactions, ASCE, Vol. 97, 1933
- 4) Shapiro: A Picture History of the Brooklyn Bridge, Dover Publications, Inc., 1983
- 5) 奥川: ケーブルの製作・架設, 橋梁と基礎, 1988.8
- 6) Morison: Suspension Bridges—A Study, Transactions, ASCE, Vol. 36, 1896
- 7) Steinman: The Builders of the Bridge, Harcourt, Brace Jovanovich, Inc., 1945
- 8) Seely・Ammann・Gray・Wessman: Technical Survey—Brooklyn Bridge after Sixty Years, Transactions, ASCE, Vol. 112, 1947
- 9) 保田・鈴木・木村: 吊橋ケーブルの防食方法の検討, 本四技報, Vol. 16, No. 61, 1992.1
- 10) 神戸市企画局調査部: 海外長大吊橋の上部工事(III), 神戸市, 1967.6
- 11) IHI 橋梁事業部: Bosphorus プロジェクト報告, 石川島播磨重工技報, 1989.2
- 12) 土木学会マタダイ橋工事誌編集委員会: マタダイ橋工事誌, 土木学会, 1986.6
- 13) 日本道路公団: 関門橋工事報告書, 土木学会, 1977.3
- 14) 本州四国連絡橋公団: 因島大橋工事誌, 1985.9
- 15) 本州四国連絡橋公団: 大鳴門橋工事誌, 1987.3
- 16) 滝沢・渡辺・下山・福谷・富塚: 下津井瀬戸大橋主塔工事, NKK 技報, 1985.9
- 17) 山中・林・金崎: 南備讃瀬戸大橋塔製作・架設, 本四技報, 1986.7
- 18) 山中・栗原: 北備讃瀬戸大橋塔架設工事, 本四技報, 1985.10
- 19) 長崎県土木部: 平戸大橋工事報告書, 1978.3
- 20) 川田: 現代の吊橋, 理工図書, 1987
- 21) 日本道路公団福岡支社: 若戸橋工事報告書, 土木学会, 1964.2
- 22) 建設省: 上吉野川, 建設省, 1968.10
- 23) 首都高速道路公団: レインボーブリッジケーブル工事記録写真集, 1994
- 24) 本州四国連絡橋公団: 瀬戸大橋工事誌, 1988.10
- 25) Cassidy: SPANNING THE GATE —The Golden Bridge—
- 26) Lawrence: Mighty Mac —The Official Picture History of The Mackinac Bridge, Wayne State Univ. Press, 1958
- 27) 日本橋梁建設協会 編: 鉄骨橋梁年鑑, 1968
- 28) 相良: 平行線ケーブルの歩み, 道路, 1968.11
- 29) 三田村ほか: パラレルワイヤーストラッド工法による八幡橋の施工, 橋梁と基礎, 1969.8
- 30) 松村・石田・荻原: 北港連絡橋(仮称)の架設および各種測定, 橋梁と基礎, 1988.3
- 31) 岩城・南・池内・佐藤: 信喜橋の振動特性, 三井造船技報, 1980.10
- 32) 本州四国連絡橋公団: 伯方・大島大橋工事誌, 1989.9
- 33) 長大橋技術研究会: 長大橋の架設資料(海外の吊橋), 1972
- 34) 田中: 吊橋補剛桁の送り出し工法, 橋梁と基礎, 1992.8
- 35) 奥田: 南備讃瀬戸大橋補剛桁工事, 本四技報, 1988.7
- 36) 土木学会構造工学委員会: 建造物の振動制御, 1991.7
- 37) 平井: 鋼橋 III, 技報堂出版, 1967.9
- 38) 長大鋼橋研究会: 吊橋の実績調査報告, 建設コンサルタンツ協会近畿支部, 1991.6
- 39) 神戸市企画局調査部: 海外長大吊橋の上部工事 (II)—ケーブル関係—, 1969
- 40) 建設省本四道路調査事務所: 世界長大吊橋概要, 1968.2
- 41) 本州四国連絡橋公団・海洋架橋調査会: 世界の長大橋, 1983.8
- 42) 澤井 編著: 新体系土木工学 42 橋梁上部構造(II)—吊橋—, 技報堂出版, 1986.3
- 43) 長大橋技術研究会: 長大吊橋の架設, 1976