

### 3. 製作と架設

#### 3.1 製作

斜張橋に限らず、最近の橋梁は長大化の傾向が著しく、また都市部においては線形が複雑化するとともに景観に対する配慮などから、さまざまな形式の橋梁が出現している。斜張橋は主桁と塔とをケーブルで結んだ不静定構造物であるが、特に最近ではケーブル段数の多いマルチケーブル形式が一般的であり、製作においてもこれまで以上の高度な技術が要求される。さらに、斜張橋としての構造特性を製作に十分に反映させるためには、設計・製作・架設の3者が一体となった技術協力体制も不可欠である。

一方、人的資源を含めた工場環境も著しく変化しつつある。かつては優れた技能と豊富な経験を有する熟練工によって支えられていた橋梁の製作は、高学歴化と第三次産業への労働人口の移動が進むなかで、熟練技能工の確保が限界になってきたため、工場においては作業者の高齢化という問題が生じている。このような背景のもと、橋梁業界では過去に蓄積した豊富な製作技術を駆使し、製作工程ラインを機械化、作業の単純化や標準化などにより、品質と精度の維持向上を図っている。

##### 3.1.1 製作設備の自動化と製作手順の合理化

少量多品種で自動化が困難といわれた橋梁の製作も、最近では自動原寸やNC加工を中心として自動化、合理化が急速に進められている。工場ではNCマーキング・切断機、NCボール盤をはじめ、溶接ロボット、組立装置、歪取り装置などの設備が導入・設置されてCAD/CAMを利用した一貫生産システムに移行し、さらに生産の合理化が図られている。図-3.1にCAD/CAM一貫生産システムの例を示すが、このような設備の近

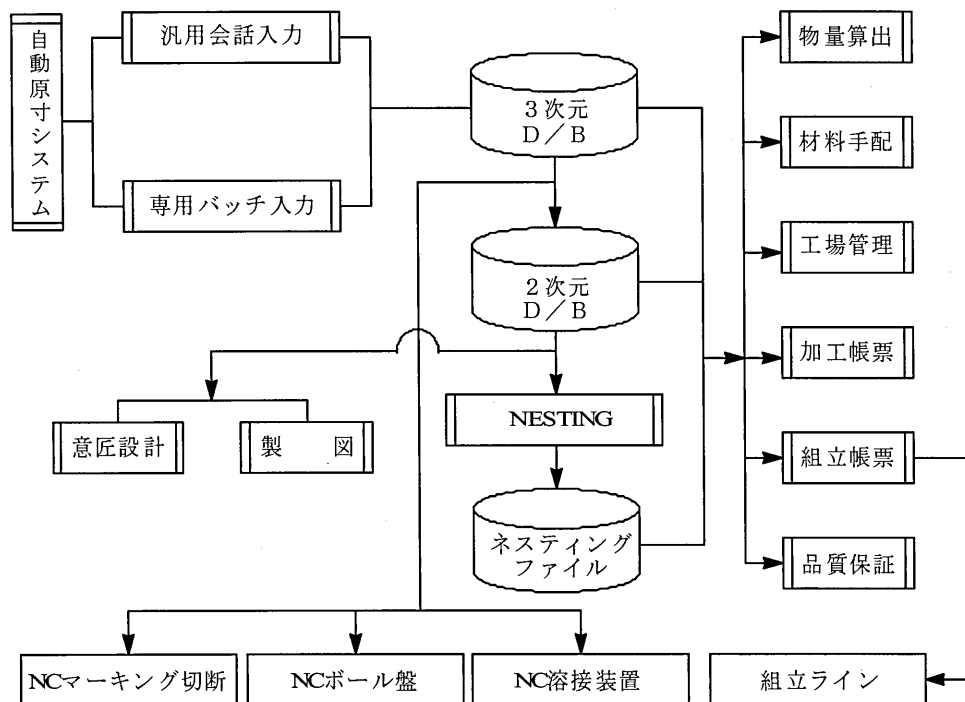


図-3.1 CAD/CAM一貫システム

代化、自動化に伴い、原寸をはじめとして加工・組立・溶接・仮組立・塗装の各工程にも生産体制の再編成が行われている。以下では製作設備の近代化、自動化の概要と生産体制の変遷について、NC化を中心に述べる。

#### (1) 原寸

本来原寸作業は、FULL SCALE DRAWINGと言われるように、製作加工するものの形状を広大な原寸場に実寸法で描いて原寸展開を行い、微妙な取り合いを確認しながら各部品の形状を定義する工程で、次の役割を意図している。

- ① 各部材の取り合い関係に不都合はないか、施工上の支障はないかなどの検討。
- ② 施工要領を反映させた部材形状の定義、および定規・型板・角度型などの加工用資料の作成。
- ③ 加工以降の工程で必要とする帳票類の作成。

現在では、従来の床下ろしによる現尺原寸に替わって、コンピュータを利用した自動原寸が採用されてきている。これはコンピュータを利用した図形処理技術の発達により、作成した生産情報を一元的に集中管理することができるようになったことによるもので、さらに電算処理されて構築されたデータベースをもとにして各種のNC機器を作動させるとともに、仮組立、検査などに必要な帳票の出力もできるようになってきている。このようなデータベースは今後とも適用対象が拡大され、ますます多面的に利用されるものと考えられる。また、3次元図形情報処理技術の発展により、立体的に取り合い関係の確認が出来るようになっている(図-3.2 参照)。

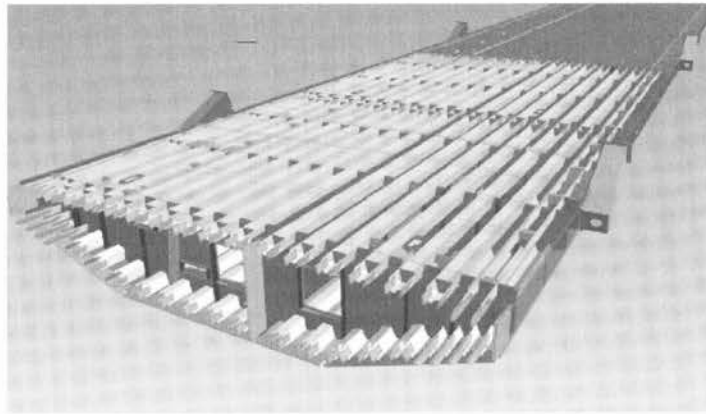


図-3.2 3次元図形処理例(鷹島肥前大橋)

#### (2) 加工

従来は原寸の工程で作成したフィルム型、定規などを用いて鋼板、形鋼などの加工対象部材に切断線、取付線、仕上げ線、継手形状、孔位置のような加工、組立作業に必要な事項を転記していたが、NC化により原寸で作成した図形情報を変換して、そのまま数値データとしてNC加工機器に転送されることにより、原寸と加工の工程が連動されてきている。

また、NC加工機器による加工によって、部品の加工精度向上が図られている。

#### (3) 組立

切断・孔明け加工された部品が組立工程に送られ作業が開始される際、部品の確認を行うための資料として部品表をもとにしているが、この部品表の作成においても従来は原寸作業の中で図面を確認しながら一品ずつを大ブロック別、ロット別に抽出する必要があった。しかし、自動原寸の適用により、構築したデータベース中の部品を自動的にまとめて組立工程に転送し、その部品の組立状況を確認することにより工程の進捗管理ができるようになってきている。

#### (4) 溶接

溶接ロボットの開発により、電流・電圧、溶接速度、脚長などの溶接条件が自動的に管理できるようになり、さらに3次元図形情報処理技術とセンシング技術の応用開発により、部材とロボットとの干渉を認識するため、比較的複雑な構造においても自動的に溶接ができるようになってきている。

#### (5) 仮組立

仮組立工程は全面的な自動化や装置化が困難な工程ではあるが、原寸時の3次元化に加え、3次元計測とシ

ミュレーションを組み合わせることにより、実際に部材を組み立てることなくコンピューター上で実仮組立と同等の出来形情報を得ることも可能となってきた。現状は一般的な鋸桁や箱桁が適用対象となっているが、部材形状や運用の工夫によっては斜張橋のような大型構造物への適用も可能である。

### 3.1.2 製作精度と品質管理

#### (1) 全体形状管理

斜張橋の応力状態はケーブル張力によって決定されるので、ケーブルに導入される張力の精度確保は斜張橋施工上の最重要課題といえることができる。主桁と塔にはこのケーブル張力による大きな曲げモーメントと軸圧縮力が作用するので、工場製作時には曲げモーメントに対するたわみキャンバーとともに、軸圧縮力に対する部材軸方向のキャンバーも考慮することが必要となる。ケーブルに所定の張力を導入するためには、工場製作における主桁と塔の全体組立時の形状精度についての十分な管理が不可欠である。

斜張橋は主桁と塔より構成される立体構造物であるため、これを工場で立体的に仮組立することが困難なこと、また斜張橋には長大橋が多く、これらを数社で分担して製作することが多いために全橋一括仮組みが困難であることなどから、平面組みでの分割仮組立となる場合が多い。このため、一般的に分割仮組立の境界となるブロックは、これを狭む両側の仮組立に組み込むこと（重複仮組立）により、取り合い精度の確認を行うとともに、これら分割仮組立データから全体形状を机上で数値シミュレーションすることによって橋梁全体の精度確保を図っている。図-3.3に多々羅大橋で採用された仮組立の精度基準を示す。

#### (2) ケーブル定着部の製作

斜張橋に特有の構造としてケーブル張力を主桁および塔に伝達するケーブル定着部があるが、この部分は構造が複雑な上、板厚が厚く、溶接量も多いため製作における作業性が悪い。このため、溶接による変形が生じ易く精度確保が困難な上ラメラティアなどの溶接欠陥も発生し易いことから、これらを配慮して以下のような種々の工夫がなされている。

まず、ケーブル導入張力の精度確保の面からは、ケーブルソケットと定着部の間にフィラーを挿入して、製作および架設誤差を吸収するのが一般的になっている。また、ケーブルソケット部の2次曲げによる付加応力を低減し、ケーブルの疲労耐力を向上させるためにケーブル定着部の角度精度が重要であるが、フィラーをテーパ加工して誤差吸収をはかった例やベアリングプレートタイプの支圧板を用いて2次応力の発生を避けた例などがある。さらに、溶接品質の確保、施工性を向上させるため、製作開始前に、モックアップを作成し、組立手順・開先形状等の溶接施工性の確認を行ったり、拘束の大きい箇所には、耐ラメラティア鋼板を使用したりして溶接欠陥の発生防止を図っている。その他に、ケーブルを定着するためのアンカーブロックを主桁あるいは塔と高力ボルトで連結し組み込む例も多い。

#### (3) 溶接と検査技術

最近の大ブロック架設の増加あるいは景観への配慮から、斜張橋の主桁および塔の継手に従来のボルト継手に代わって溶接継手が採用されるケースが増えており、これに伴って、溶接技術の面でも変化が生じている。すなわち、従来では良好な外観と溶接ビードの内部品質が確保されればよいとされた溶接にキャンバーの出来形精度、特に、塔の鉛直度の精度確保が非常に重要となってきた。そこで、溶接収縮量を大幅に減らした狭開先溶接継手、収縮量のバラツキが小さく安定した品質の得られる溶接法などの研究が行われている。

また、道路・鉄道併用橋の瀬戸大橋においては主構造材のかど溶接継手での微小ブローホール防止技術と高精度でかつ記録性のある超音波探傷技術の開発・実用化が行われた。これを契機として、最近では溶接部の完全溶込み突合せ溶接継手の内部さび検査に、放射線被曝の安全管理を必要とする放射線検査に代わって、超音波自動探傷検査（AUT）が採用される傾向にある（図-3.4）。

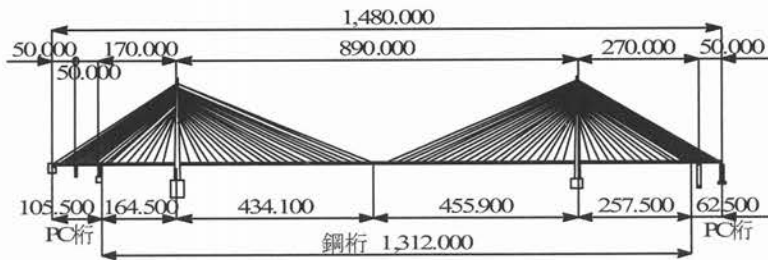
主桁に適用した許容差

(1) 支間長 ( $\delta=10+L/10$ を適用する)

L =164.5mに対して  $\delta \leq \pm 26\text{mm}$

L =890.0mに対して  $\delta \leq \pm 99\text{mm}$

L =257.5mに対して  $\delta \leq \pm 36\text{mm}$



(2) 中央径間ブロック長

( $\delta=5+L/10$ を適用)

L =434.1mに対して  $\delta \leq \pm 48\text{mm}$

L =455.9mに対して  $\delta \leq \pm 51\text{mm}$

(3) その他主桁に適用した許容差

要求項目	許容差(mm)	備考
ウェブ間隔	$\pm (3+B/2)$	B (m) : 設計ウェブ間隔
デッキプレート幅	$\pm 10$	
桁高	$\pm 3$	
ウェブの鉛直度	$3+H/1000$ (6mm)	H (mm) : 設計ウェブ高
主桁のキャンバー	$L \leq 20\text{m}$ $\pm 5$ $20\text{m} < L \leq 40\text{m}$ $-5 \sim +10$ $40\text{m} < L \leq 80\text{m}$ $-5 \sim +15$ $80\text{m} < L \leq 200\text{m}$ $-5 \sim +25$ 隣接する格点位置での差 $\pm 5$	L : 仮組長さ
ケーブル中心間隔	$\pm 7.5$	

(4) 塔に適用した許容差

要求項目	許容差(mm)	備考
全高	$\pm 1 \times N$ (22mm)	N : ブロック数(22)
鉛直度	1/10,000	
水平継手のメタルタッチ	0.2	

図-3.3 仮組立の精度基準の例(多々羅大橋)

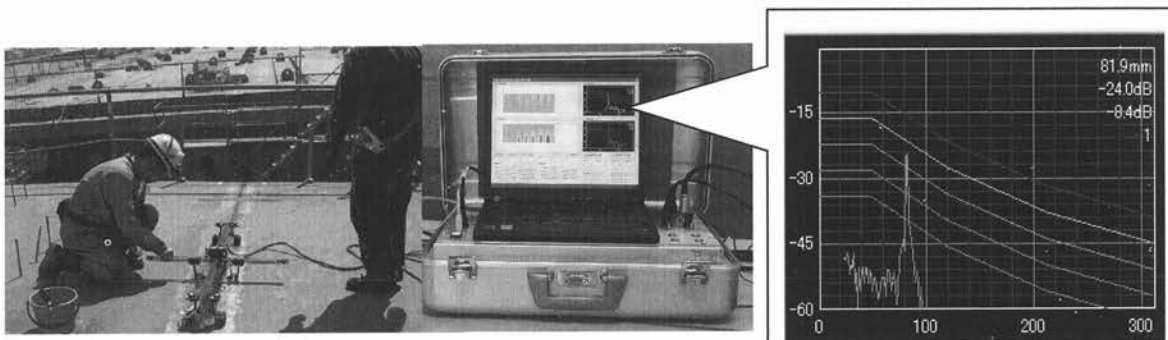


図-3.4 自動超音波探傷試験の例

### 3.1.3 工場での大ブロック化

橋梁の製作においては、基本的には部材製作後に仮組立工程を設け、部材の出来形精度の検証を行い、一旦解体の後に塗装を施工し、架設現地へ単部材で輸送するのが従来からの標準的な工程である。しかし、海上部や河口部に架ける橋梁については、大型フローティングクレーンによる大ブロック架設が採用されることが多い。工場での大ブロック化のメリットとして以下のことがあげられる。

- ① 工場で大ブロック化することにより、現場工程の短縮が図れる。
- ② 組立作業の大半を地上で行うことにより安全性が確保できる。
- ③ 工場常設設備の活用によるコスト縮減が図れる。
- ④ 施工管理体制が十分に確立された工場作業が大半であり、構造物全体の品質の向上が図れる。特に、上塗り塗装まで工場で施工することによる塗装品質の向上、継手品質の向上、さらには構造物全体の出来形寸法精度の向上などが期待される。

工場での大ブロック地組立の状況に対応して、工場製作設備も一般的な部材製作設備とは質を異にし、大重量かつ超長尺の橋梁を一体で組立て、さらに超大型のフローティングクレーンやデッキバージが接岸できる岸壁を有するヤードの確保が課題となり、その選定にあたって現場の立地条件、部材寸法・重量等の条件などを検討する必要がある。

大ブロックの浜出し、輸送、架設途中では、完成時と異なる応力状態が生じるため、設計時には工程を考慮した検討が必要であり、大幅な橋体補強、治具などが必要になる場合があるので十分な事前検討が必要である。

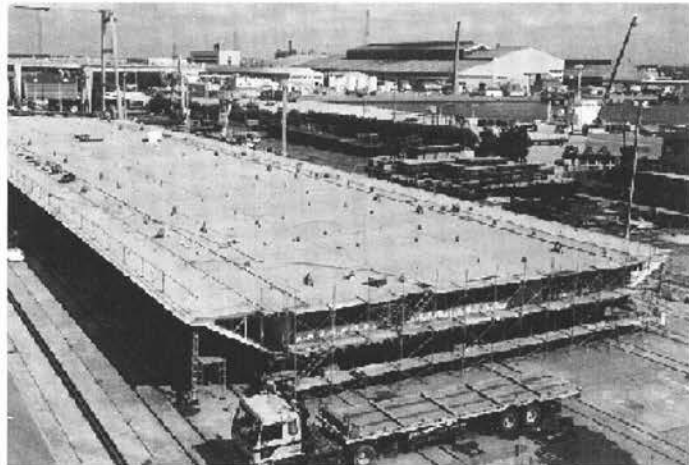


図-3.5 工場地組立の例(多々羅大橋)

## 3.2 架設<sup>1)~8)</sup>

斜張橋の架設工法は橋梁の規模とケーブル形式さらに構造解析技術に関連しながら時代とともに変遷してきた。特にコンピュータの発達と平行線ケーブルの出現は支間の長大化とケーブル形式の変革を促し、それに整合するように施工用機械の開発が進んで著しい工法の変化が生じた。

1950年代から1970年代の前半にかけては支間長300m以下の斜張橋が殆どでケーブルも段数の少ない大断面のものが多かった。今日数多く見られるマルチケーブル形式は1967年Friedrich-Ebert橋で初めて採用されたが、それが本格的に使用されるようになったのは1974年以降でKöhlbrand橋、Saint-Nazaire橋、かもめ大橋、Zarate-Brazo Largo橋、Rande橋など、徐々にその数が増えてきた。これはその頃からコンピュータの発達が進み、また高強度の平行線ケーブルが使用されはじめたためである。1980年代に入ると斜張橋の支間は飛躍的に長大化し、ケーブルもその大多数のものがマルチケーブル形式を採用するようになった。これに伴い塔高さ、架設時主桁の張り出し長、ケーブル長さや段数も増大し、架設工法も急激に変化してきた。1990年代以降になると複合斜張橋も含めて支間長は500mを超え、現在はSutong橋やStonecutters橋など1000m超となり、これは吊橋の領域に達する規模と言えるであろう。

以上のことから斜張橋の架設工法については、1990年までを創生期、発展期とし、それ以後の成熟期に分けて記述することとする。ここで、斜張橋施工工法変遷についての要因をまとめると以下のようになる。

- ① 斜張橋の規模が大きくなった。
- ② ケーブル配置にマルチケーブル形式を採用することが多くなった。
- ③ 平行線ケーブルの採用が増え、その品質向上とともに太径ストランドの使用が多くなった。
- ④ コンピュータの性能向上に伴ない、架設解析技術が発達した。
- ⑤ フローティングクレーンや自走クレーンなどの架設用大型機械が開発され、吊り作業能力が著しく向上した。
- ⑥ センターホールジャッキをはじめとする張力導入器具の開発が進み、大きな引き込み力が得られる様になった。

### 3.2.1 創生期、発展期の架設工法(1950年代～1990年ごろまで)

この時期の斜張橋はヨーロッパ諸国で多数架けられたが、中支間程度の橋梁がほとんどで、ケーブル形式も段数の少ないものが多く、塔および主桁の構造も比較的小規模であった。そのため塔と主桁の架設に関しては特に注意を払う必要はなく、ケーブル架設に多くの工法が考案され実施された。この時期のケーブル架設に関する一般的な方法は次のようである。

ケーブルは完成時の張力をもとにその長さを決めているので無応力状態では主桁の取付点に対して見掛け上縮んでいることになる。このことからどのようにしてケーブル端部と主桁取付点との間隔を引きつけながら架設するかが問題となる。無応力状態のケーブルではこの縮み量は主桁の高さ方向に計算すると一般に0.5～2m程度になる(図-3.6参照)。この高さの差を埋める方法として、引込み力に見合ったジャッキを使用して縮み量を0にするか、主桁をジャッキアップするか、あるいは塔頂サドルを予め低くしておくかの3つの方法が考えられる。ジャッキ案については、この当時には現在使用されているような性能の良いジャッキが少なかったため、単独での張力導入作業は困難であった。

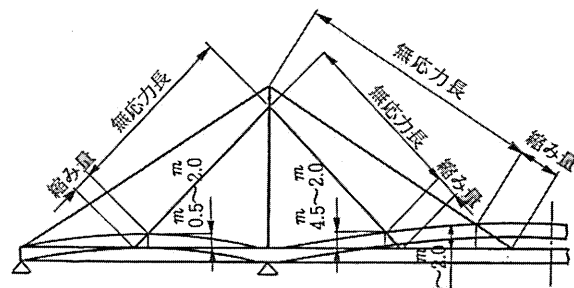


図-3.6 無応力時のケーブル長

それに加えて段数の少ないケーブルの場合にはケーブル断面が大きくなり、それを引込むためのジャッキを配置するのに構造的な問題があった。そのため主桁のジャッキアップダウン又は塔頂サドルを押し上げる方法が多く採用され、ジャッキはその補助手段として使用されることが多かった。またジャッキ能力を補足するために、部材の先端を持ち上げた状態でケーブルを取付けた後、部材の自重を利用して部材の先端を下げる方法なども実施された。以上がこの時期におけるケーブル架設の主流であった。なお、この時期にジャッキのみで張力導入を行った実施例としてはFriedrich-Ebert橋、尾道大橋などがある。Strömsund橋、Ludwigshafen橋、かもめ大橋などはジャッキアップ工法との併用で行われている。

1980年代になると、わが国をはじめヨーロッパ以外の国でも長大斜張橋が多数架けられるようになった。しかもその構造は大型化し、ケーブルのみならず塔および主桁の架設も従来の規模を上回る作業内容が要求されるようになってきた。そのため大型架設機械を用いた種々の工法が考えられ実施されるようになった。

一般的に斜張橋の施工は橋上クレーンなどによりケーブルを斜め吊りし、センターホールジャッキを使用し

て所定の張力が得られるまでケーブルを緊張する。このように斜張橋はケーブルエレクション斜吊り工法の仮設備(塔およびケーブル)がそのまま、本体構造に置きかわったものと考えることができる。このような工法が採用されるようになったのはマルチケーブル形式の採用によりケーブル断面がコンパクトになったこと、センターホールジャッキの性能が向上したことが大きな要因である。このように現代の斜張橋はその構造特性が十分に発揮されるような工法で架設されるようになった。

### 3.2.2 成熟期の架設工法(1990年代～)

1990年代以降は、先に述べたように中央支間長が1000mを超え、今後斜張橋を計画するにあたって鋼材・ケーブルの材質、経済性等の条件から規模的にそろそろ限界が見えてきたこと、経済性、径間割の特性や合成構造・方法の確立などにより長大斜張橋においても複合構造が数多く採用されたこと、さらに施工機械についても4000t吊クラスフローティングクレーン、1400t引クラスのセンターホールジャッキ、高さ300mのタワークレーン、大型の自走クレーンなどが揃い、ほぼ架設工法も確立されたことから、1990年代以降を斜張橋の成熟期と呼ぶこととする。

通常、斜張橋の施工計画を行う上でその規模が大きいくらい、最初に考慮すべきことは耐風安定性であり、中央径間張出し時の安定性と側径間の早期における結合が重要である。前者に対しては架設機材を配置した場合の風洞試験・解析、主桁・フェアリング・付属物の形状配置を検討する方策で、後者に対しては側径間にベントを設置し、陸上部のクレーン架設またはフローティングクレーンによる大ブロック架設を行い側径間先行架設する工法やバランス架設期間を短くする工法を検討することで対処している。多々羅大橋の生口島側側径間では大ブロック一括架設工法が、大三島側側径間では最終部材をフローティングクレーンにて架設するバランス工法が行われた。

鋼桁とコンクリート床版を合成した複合斜張橋は、国内において事例はまだ少ないが、海外においては多く採用されている。特に1986年のAlex Fraser橋、Bayview橋の完成以後、2主桁とプレキャストコンクリート床版を合成させた長大スパンの斜張橋が増えてきている。

### 3.2.3 各部材の架設工法

斜張橋は主桁、塔、ケーブルから構成されており、その架設はそれぞれ関連しあっているが、ここでは塔、主桁、ケーブルの3項目に分けて説明することとする。

#### (1) 塔

塔の架設は塔の構造、大きさと重量、使用するクレーン(海上の場合フローティングクレーン)、工事用地(海上の場合占有面積)、交通規制(海上の場合、航路規制)、作業時間帯、気象、環境問題など諸条件が密接に関連する。ここでは架設手順に従って塔先行架設と主桁先行架設の2つに分けて記述する。

##### 1) 塔先行架設

塔全体を主桁の架設に先行して一括または分割架設するものである。この工法を採用する最大の理由は、大型のフローティングクレーンを利用して、

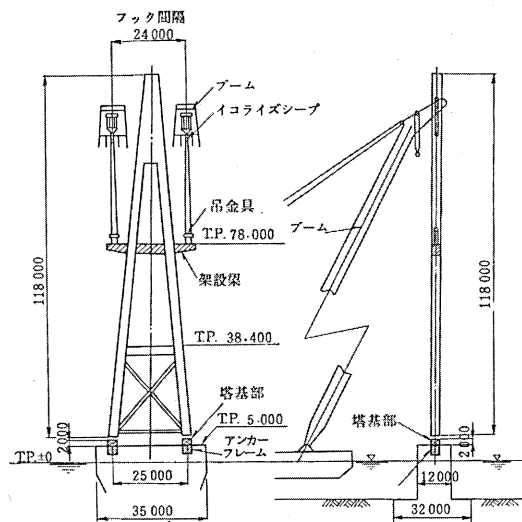


図-3.7 フローティングクレーンによる一括架設

短期間に架設が行えるところにある。実施例としては名港西大橋、生口橋などがある。図-3.7はフローティングクレーンによる一括架設の要領の一例を示す。

次にタワークレーンを使用して、単材架設する工法も実施されている。近年タワークレーンの能力が向上し、300mの揚程を有するものもある。

塔架設を先行または主桁架設と並行して行う工法が、Nanjing No.3橋(図-3.8)で行われた。

2) 主桁先行架設

フローティングクレーンの能力が不足する場合、塔を主桁の位置より下の部分と上の部分に分割し、塔の下部を架設(フローティングクレーンにより一括架設することが多い)した後、主桁を先に架設する。その後、主桁上にタワークレーンや自走クレーンを配置し、塔の上部をブロック架設する工法で、今までに実績が最も多い。国内実施例としては多々羅大橋(図-3.9)、名港中央大橋、東神戸大橋、鶴見つばさ橋、横浜ベイブリッジ、天保山大橋、櫃石島橋、岩黒鳥橋など数多くある。

なお1本柱形式の場合には、クリーパークレーンによるせり上げ工法を用いることもある。この実施例としては荒川大橋、大和川橋梁などがある。

図-3.10はこれらの要領の一例を示したものである。



図-3.8 Nanjing No.3橋塔架設



図-3.9 多々羅大橋塔架設

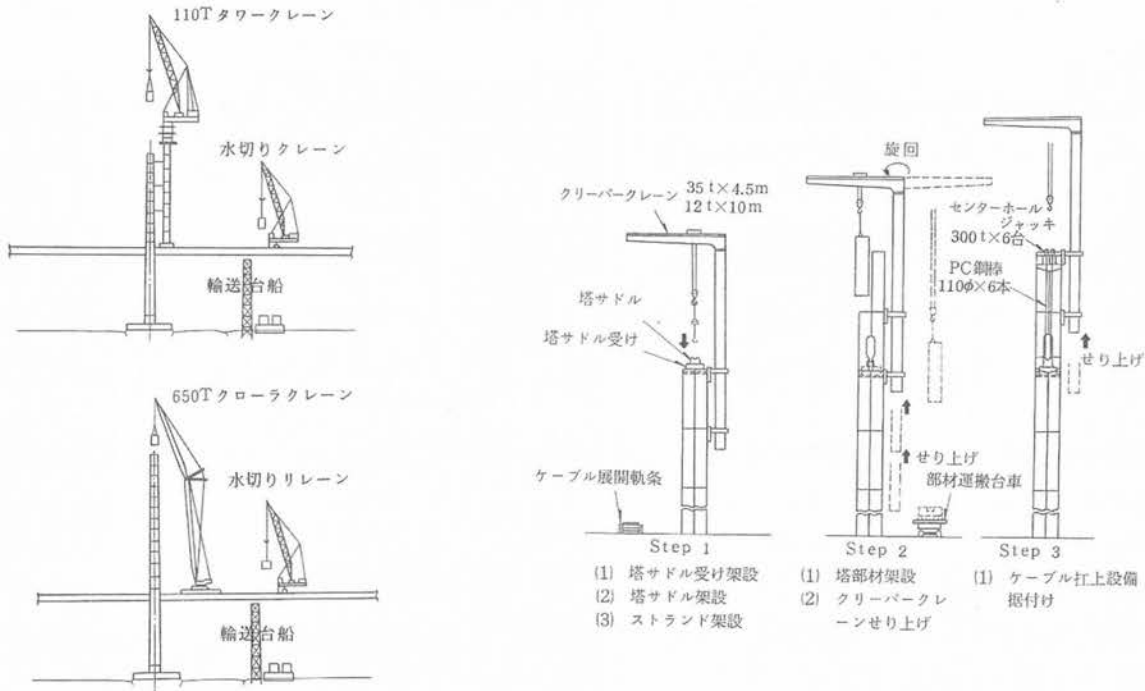


図-3.10 種々のクレーンによる塔架設



(2) 主桁

主桁の架設は現地の施工条件、主桁およびケーブルの形式と配置、環境問題、工程などにより大きく変化するため、工法の選定にあたっては慎重な検討が必要である。これまでに施工されてきた方法をまとめると、側径間先行架設、バランスング架設、オールステーシング架設の3工法に分類される。表-3.1は分類別橋梁を示す。

表-3.1 主桁の架設工法の分類

架設工法	橋梁名
側径間先行架設工法	Saint Nazaire 橋, Luling 橋, Tjörn 橋, Duisburg-Neuenkamp 橋, 珍島橋, Zérate-Brazo Largo 橋, Knie 橋, Erskine 橋, Bratislava 橋, Severin 橋, Donaubrücke-Deggena 橋, 突山橋, Leverkusen 橋, Speyer 橋, Ewijk 橋, Friedrich-Ebert 橋, Oberkassel 橋, Rees Kalkar 橋, Save 橋, Papineau Linz 橋, Willems 橋, Kap Shui Mun 橋, Binh 橋, 横浜ベイブリッジ, 櫃石島橋, 岩黒島橋, 名港西大橋, 天保山大橋, 多々羅大橋 (生口島側), 尾道大橋, 水郷大橋, 荒川大橋, 石狩河口橋, 秩父橋, 永歳橋, 鷹島肥前大橋
バランスング工法	Rande 橋, Köhlbrand 橋, Ludwigshafen 橋, 大和川橋梁, 名港中央大橋, 女神大橋
オールステーシング工法	豊里大橋, 末広大橋, かもめ大橋, 六甲大橋, 藤戸橋, 日の浦橋, 幸魂橋, サンプリッジ, 常吉大橋, 是政橋2期

1) 側径間先行架設工法

図-3.11, 3.12 に示すように、側径間の主桁を先ず架設し、それから中央径間主桁を張出し架設する工法である。側径間主桁を先行架設することにより、架設途中の安定性が増し、作業を効率的に行うことができる。長大橋では有効な工法であり、よく採用される工法で実績も多い。側径間主桁の架設をどのような方法で行うかは現地の条件によるが、ステーシングの設置が可能な場合、大型自走クレーンによる単ブロック架設またはフローティングクレーンによる大ブロック架設がよく用いられる。

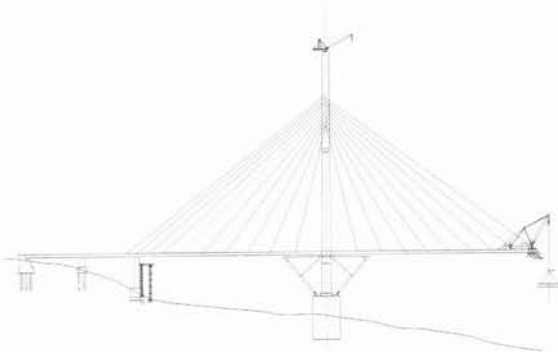


図-3.11 側径間先行架設工法の例



図-3.12 多々羅大橋 側径間先行架設

## 2) バランシング工法

図-3.13 に示すように、ケーブルで支持しながら、中間橋脚から、側径間および中央径間に向かってバランスさせながら張出す工法である。

本工法は左右のバランスを取りながら主桁を架設していくため、中間支点上の固定度を大きくし、作業中の安全性の確保が重要である。また、架設途中での耐風安定性の検証、地震時の安全性の照査が必要で、工期も長くなる。バランシング架設の代表例としては、表-3.1 に示される数橋がある。

## 3) オールステージング工法

側径間、中央径間ともすべてステージング工法で架設した後、ジャッキ設備によりケーブルを引き込み・定着する。または、ステージング上の主桁をジャッキで上昇させ、この状態でケーブルを架設し、そして主桁を降下させる。本工法はステージング設備は増えるが、主桁の形状管理が容易であり、ケーブルの架設作業ヤードが橋上に確保できる特徴がある。

## 4) 送り出し工法

長大斜張橋では稀なケースであるが、送り出し工法の実績もある。フランスの Millau 高架橋は、橋長 2460m、8 径間連続 (204+6×342+204m) 高低差のある広大な溪谷を跨いでいる。両端部で地組した主桁(一部、塔、ケーブルを含む)部材を、橋脚及びステージング上に配置した油圧装置で送り出した。最大橋脚高さ 245m 上での架設作業のため、作業区域を両端部ヤード、橋脚とステージング上に集中して施工された。

## (3) ケーブル

日本国内における鋼斜張橋においては、被覆平行線ケー

ブルが主流であったが、現地施工型ノングラウトタイプケーブルの実績も出始めた。この 2 タイプについて、架設概要を紹介する。

### 1) 被覆平行線ケーブルの架設

#### a) ケーブル展開・定着作業

使用する機材により、塔頂クレーンによる方法と橋上クレーンによる方法に分類される。

図-3.16 に示すように塔頂クレーンまたはタワークレーンによりケーブルを引き上げた後、塔内に設けた引き込み装置を用いてケーブルを定着させる方法である。実施例が多く一般的な工法と考えられる。

図-3.17 に示すように橋上に自走クレーン車を準備し、これで張り渡す方法である。上段に行くほどクレーンの吊能力が低下するので塔頂付近にケーブル吊込み治具を取り付け、この装置の助けを借りて装着させる場合もある。この方法は、クレーンの配置により橋上の作業域が狭くなり、揚程が大きくなるとクレーン能力も大きくなる。施工条件により、中小規模の斜張橋に採用される方法である。

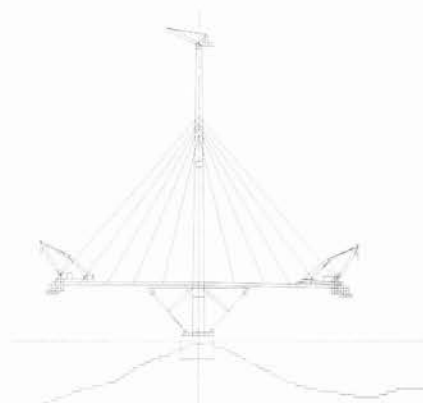


図-3.13 バランシング工法の例



図-3.14 オールステージング工法の例



図-3.15 Millau 高架橋送り出し工法の例

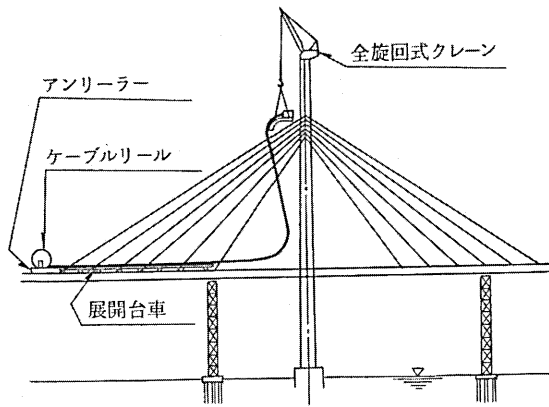


図-3.16 塔頂クレーンによるケーブル架設

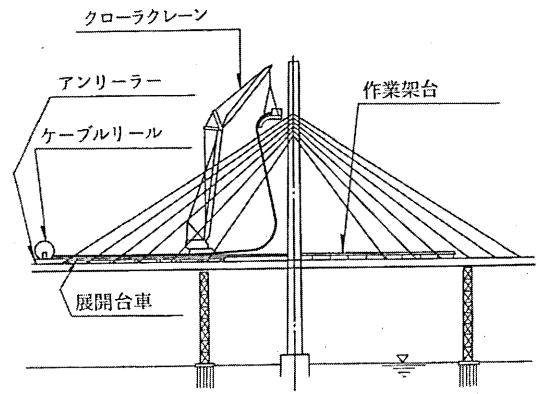


図-3.17 橋上クレーンによるケーブル架設

b) 張力導入作業

基本的にはケーブルの長さを調整して張力を導入する作業のことである。長さの調整にはシム(張力調整用鋼材)が用いられる。以下に張力導入方法について記述する。

① ジャッキ設備による方法

主桁側または塔側ケーブル定着部に取付けたジャッキ設備により、ケーブルを引き込む方法であり、国内外でもっとも一般的な工法である。主桁側に引き込み設備を配置した場合はワーキングスペースが広く、機材の配置がしやすい。塔側に配置した場合は塔内での設備移動がしやすい。国内での実績は前者の方が多い。

主桁側にジャッキ設備を設けた場合の、ケーブル引込み手順を図-3.18に示す。予め定着桁にジャッキ設備、ケーブルソケット先端にテンションロッドとPC鋼より線を連結する。ケーブルソケットをウインチにて定着部近傍まで引き込む(1次引き込み：能力40t程度)。次にセンターホールジャッキと先端に取付けたクランプにて、PC鋼より線を引っ張る(2次引き込み：能力130t程度)。最終的にセンターホールジャッキにてテンションロッドを引っ張る(3次引き込み：能力1200t程度)。この時点でケーブルソケットは設計位置まで引込まれている。この後、定着座金とシムを挿入し、センターホールジャッキを解放してケーブル定着作業は完了する。

桁側引き込みにおいて、引き込みとは逆に押し込む方法で定着する工法が考案された。押し込み装置は2台のジャッキを組み合わせたもので、段付きシリンダーを1段ずつ繰り返して押し込み、定着座金とシムを挿入する。定着部のワーキングスペースや桁下空間に制約がある場合、特に有効な工法である。鶴見つばさ橋、府中四谷橋、美原大橋、那珂川橋等で実績がある。

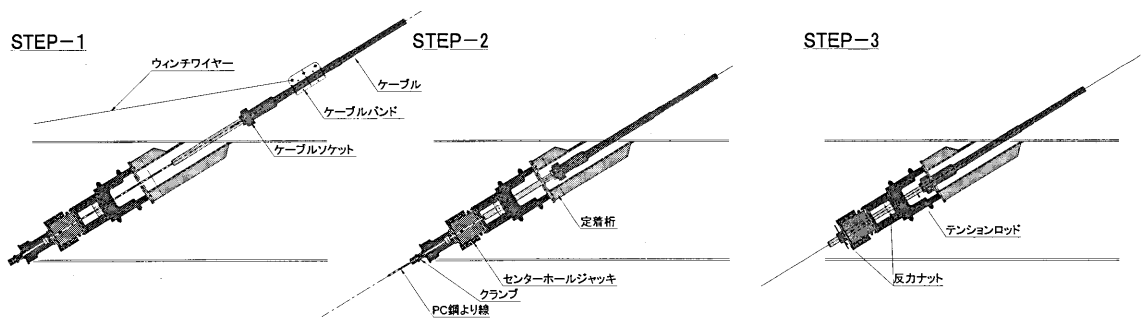


図-3.18 ケーブル引込み Step 図

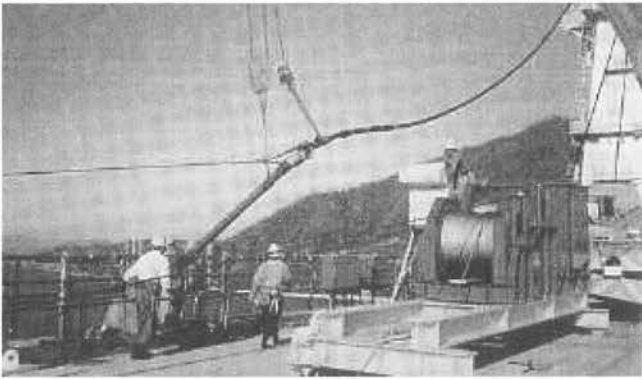


図-3.19 2次引き込み準備の例



図-3.20 桁側引き込み装置の例

### ② 主桁のジャッキアップダウンによる方法

主桁を架設した後、ステーキング上のジャッキで主桁を押し上げる。この状態でケーブルを取り付け、センターホールジャッキで所定の張力が得られる長さまでケーブルを引張り、シムを挿入する。

その後主桁を下降させて作業が完了する。この方法によれば、ケーブルの引き込みは容易でジャッキの引き込み能力が少なくすむ。この工法は引き込み用ジャッキの性能が向上した最近では採用されることが少なくなった。

### ③ 仮ケーブルによる主桁先端の引上げ方法

塔頂と主桁先端の間に仮ケーブルを張り渡し、これに張力を導入して主桁を引き起しケーブルを取付ける工法である。初期に用いられた工法である。

### ④ 塔頂サドルのジャッキアップによる方法

この方法は塔の定着部を操作して行うものである。

図-3.22 に示すように、塔頂または塔内に設けたケーブルサドルの位置を、予め低くしておく(これによりケーブル引き込みが容易になる)ケーブルを取り付けた後、ジャッキでサドルを所定の高さまで押し上げるものである。この場合、ジャッキおよび受台を設けるだけのスペースが必要なこと、サドル受桁が押し上げ力に対し十分な強度を持っているように設計出来るかどうか問題となる。

### c) 防食作業

国内の鋼斜張橋ケーブルの多くは、被覆平行線ケーブルが採用されており、防食作業を行うケースは海外に多い。段数の少ないケーブル形式ではケーブルが大断面となる場合があるがこれは吊橋と同じ様に1本の太いケーブルにスキージングした後、ラッピングを行う。これらの作業はすべてキャットウォーク上で行われる。

マルチケーブル形式では各ケーブルは通常1ストランドで構成されるが、1990年代まで使用されたグラウトタイプの平行線ケーブルを使用した場合、防食工は最終的な死荷重による張力がケーブルに作用した段階でセメントミルクを圧入充填する。

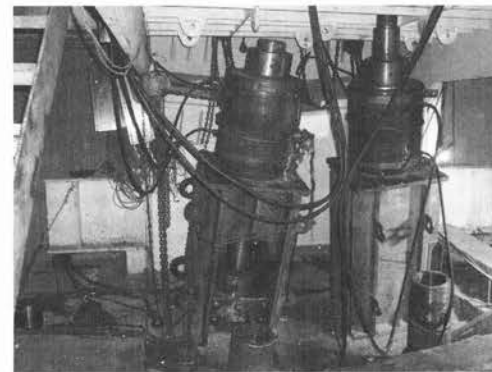


図-3.21 塔側引き込み装置の例

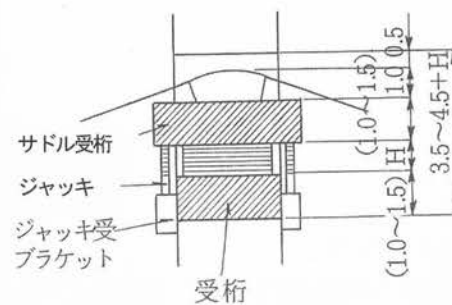


図-3.22 塔頂サドルのジャッキアップ

2) 現場施工型ストランドケーブルの架設

現場においてPCストランドを1本ずつ施工していく，現場施工型ストランドケーブルが，新尾道大橋や鷹島肥前大橋などに適用され，工場で製作された平行線ケーブルの架設に比べ使用機材のコンパクト化が可能となった。

現場施工型ストランドケーブルの架設では，保護管をストランド架設後に取り付ける「ストランド先行方式」（新尾道大橋など）と，保護管をストランド架設より先に行う「保護管先行方式」（鷹島肥前大橋など）がある。近年は，施工が合理的な「保護管先行架設方式」が採用される例が多い，図-3.23に架設 Step 図を示す。

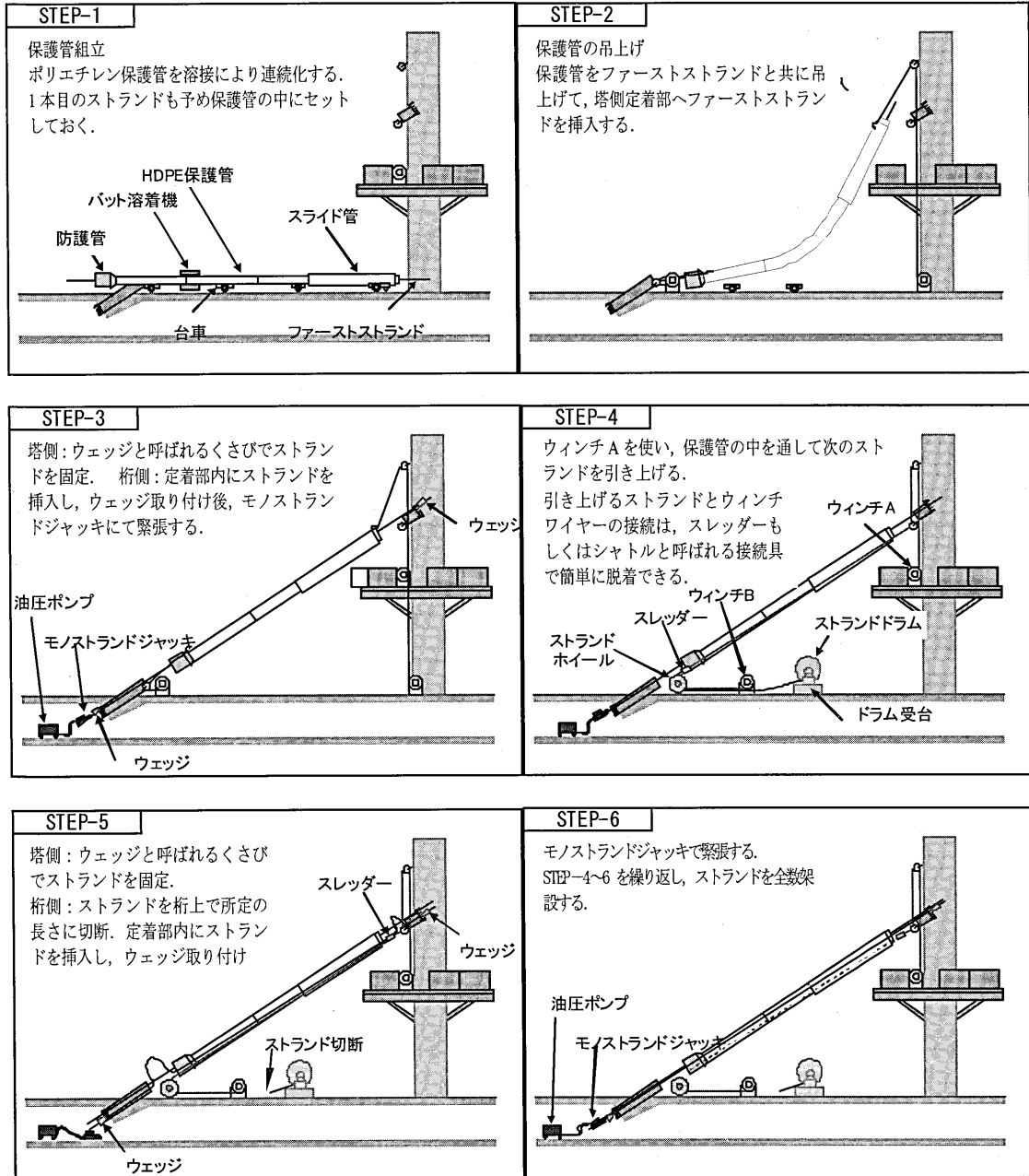


図-3.23 保護管先行方式架設 Step 図

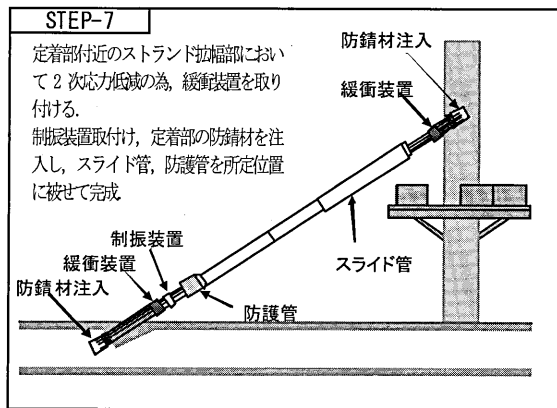


図-3.23 保護管先行方式架設 Step 図 (つづき)

## (4) その他

## 1) 塔基部施工法

長大橋斜張橋の塔基部は橋脚に固定支持されるものが多い。塔基部の大きな反力を下部工に伝達するために次の3方法が用いられる。

- ① コンクリート研磨方式
- ② グラウト方式
- ③ ペDESTAL方式

①は研磨機でコンクリート面を仕上げ、塔ベースプレートとの密着度を高める方法で実績も多い。多々羅大橋では下部工コンクリートの打ち上げ面を設計高さに対し 200mm 程度高く施工し、この部分を研磨した。研磨の精度については、仕上げ高さ $\pm 1\text{mm}$ 、不陸度 0.5mm/m、上面の傾斜度 1/10000 とした。この方法は他に横浜ベイブリッジ、名港中央・東大橋で実績がある。

②は塔基部を据付けた後、コンクリートと底板の間に無収縮モルタルを注入するもので岩黒橋、榎石橋、天保山大橋、東神戸大橋はこの例である。

③はペDESTALフレームをまず据付けて②の方式でコンクリートと密着させ、ペDESTALフレームの上に塔基部を据付けるものである。

## 2) 閉合方法

3径間の斜張橋の場合、主桁の閉合は中央径間中央で行われる。閉合方法は、既設桁の形状、ケーブル張力、資機材の荷重条件、気象条件(気温、風速)等を考慮して行われている。

## a) 主桁セットバックによる閉合

塔部または主桁端部に設置された、セットバック装置(ジャッキ)により既設桁を押し広げるように端部に移動させる。移動量は閉合部材を架設するワーキングスペースを十分に確保するために、片側 400mm 程度まで(温度差による鋼桁の伸び縮み量により決定する。)としている。この後、閉合部材を落とし込み片側の継ぎ手を接合する。この状態でセッティングビーム、引き込み装置(センターホールジャッキ)、支圧板などの閉合設備を設置し、橋面の機材を移動してサーチャージ(荷重調整)を行う。閉合作業は、セットバックを解放、閉合設備の強制力により閉合仕口部の高さ、平面位置、角度、間隔を調整して接合する。

## b) 主桁の温度伸縮を利用した自然閉合

閉合部材架設前に閉合部の間隔(昼夜間の間隔の変化)、仕口角度、高さを数日間計測する。その結果を基に、荷重調整量、ケーブル張力調整力を決定し、閉合部材長さを決定し切断する。セットバックは行わずに昼間吊

り上げた閉合部材を、夜間の既設桁が収縮し閉合部間隔が広がった時に挿入する。そして、翌朝までに主断面の接合を完了させる。

3) 複合斜張橋の施工

鋼とコンクリートの複合斜張橋の施工は、どの部分にコンクリートを使用するかにより施工法も様々である。このため、複合斜張橋の全ての種類について施工法をここで述べることはできない。代表的なものとして、主桁に鋼桁とPC桁を併用した複合斜張橋について説明する。この場合、PC桁端部に鋼桁を架設して接合される。鋼桁の設置方向は、PC桁の製作形状、斜張橋としての完成時死荷重断面力による変形量と、接合後のPC桁のクリープ・乾燥収縮を考慮して決定する。接合部中詰コンクリートには高流動コンクリートを使用することが多い。

3.3 現場施工管理

3.3.1 概要

斜張橋の現場施工では、ケーブル張力（ケーブル長さ）を許容される張力の範囲で調整することで、塔、主桁を所要の形状に納めること（形状管理）が一般的に行われている。

これは架設中であっても長さの変更が比較的容易なケーブルが主要構造部材を構成していることと、内的な不静定次数が高いという構造特性によっている。このことは斜張橋に限らず、ケーブルを主要部材としている他の吊り形式橋梁、吊橋やニールセン系橋梁にも共通するものである。これらの橋梁形式は本四架橋や他の大型プロジェクトに大々的に採用され、それらの建設を通してコンピューターによる解析技術に代表される設計技術、計測技術、それらを統合した形状管理のトータルシステムが発達し、現場施工における合理的な管理が可能になっている。

3.3.2 形状管理と応力管理

架設時の主要な形状および応力管理項目、それぞれの代表的計測方法を表-3.2に示す。また、斜張橋の設計から架設に至るまでの間に、形状や応力に誤差を生じさせる要因として図-3.24に示すものが考えられる。

(1) 形状管理

現場施工では各架設段階で塔の倒れや主桁のたわみを測定し、測定値が所定の許容範囲内に入っていることを確認しながら架設を進める。測定の結果、現場架設時に形状誤差として認識されるのは、計画時に設定された諸数値との差である。これらの値には架設時に生じた形状誤差だけでなく、設計時の仮定や製作誤差など数多くの要因によって生じたものが含まれているから、過度の形状調整は、橋体の応力に悪影響を及ぼすことにもなりかねない。従って、斜張橋における形状管理の目的とは、多様な要因から構成される形状変動を総合的な観点から捉え、各管理項目を許容誤差範囲内に収めた上で、合理的な最終形状を実現することである。

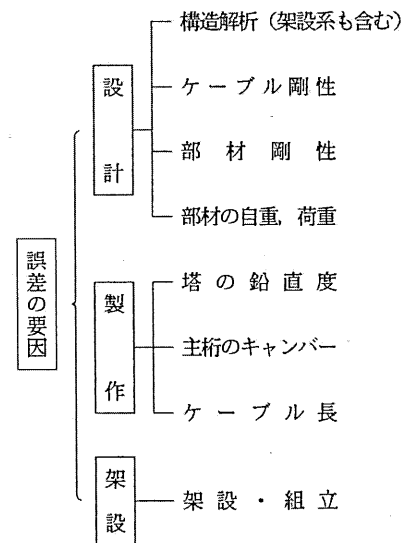


図-3.24 誤差の要因

## (2) 応力管理

一方、応力管理は現場施工における橋体の安全性の確認と、施工品質の保証が主要な目的となる。橋体形状や応力分布に大きな影響を及ぼすケーブル張力は、各架設段階を通じ計画張力に対して許容誤差内にあることが確認されなければならない。また、橋体に作用する応力やステーキングに作用する反力は、主桁架設・形状調整・ケーブル張力の導入などの作業によっても許

容値を超えないように管理する必要がある。これらの架設時応力については、架設計画段階において種々の誤差要因を考慮した解析を行い、その影響を把握しておくのが普通である。実際の工事では橋体の応力を測定しそれに基づいて安全性を判断するよりも、各架設段階のケーブル張力、橋体の形状の測定値を用いて構造解析を行い、その結果得られた応力が許容値以内であることを確認しながら架設を進めているのが一般的である。このようにして橋体応力を管理することによって、計画と実際の現場施工との差異を検証し、安全性の確認を行うことができる。また両側から張り出し架設する場合、閉合誤差による橋体の応力は閉合後も残留してしまう可能性が高いので、設計段階で誤差を想定しそれを考慮した構造解析が行われている。現場施工では、閉合前に実際の閉合誤差が想定値以内であることを検証し橋体の安全性を確認している。

表-3.2 主要管理項目

管理項目	管理内容	一般的な使用測定機器
形状管理	主桁の鉛直変位 主桁のねじり変位 主桁の通り 塔の鉛直度	レベル, トランシット, 水パイプ トランシット トランシット トランシット, 鉛直器, レーザー
応力管理	ケーブル張力 ステーキング反力 橋体応力	圧力変換器, ロードセル, ひずみゲージ 圧力変換器, ロードセル, 変位計 ひずみゲージ
温度測定	気温 橋体温度 ケーブル温度	温度計 熱電対 熱電対

### 3.3.3 形状及び応力管理の手法

#### (1) 架設系の構造解析による管理値の算出

各架設段階における架設系の変形や作用応力などは、斜張橋の現場施工に不可欠な管理情報である。コンピューターの普及が十分でなかった初期の Ström Sund 橋においても、特に厳密なモデルを用いてこれらの管理情報を得たことが報告されている<sup>9)</sup>。現在ではコンピューターを用いて解体計算を行いこれらの管理情報を算出している。また、剛性の低い架設系に対する解析では、構造物の変形を考慮した有限変位解析手法が一般的に用いられている。複合斜張橋においてはコンクリートのクリープ、材齢を考慮しながら乾燥収縮の影響を解析している。

#### (2) 誤差応答解析

架設精度管理の基本方針を策定するために図-3.24 に示した各誤差項目の変動に対して構造物がどのように応答するのかを事前に把握し重要管理項目、管理値を算定することが行われている。表-3.3 に多々羅大橋の誤差応答解析結果を紹介する<sup>10)</sup>。

これより、多々羅大橋では主桁が非常に柔軟な構造であるため、主桁の形状に着目した管理を実施してもケーブル張力に与える影響は微小であるのに対して、ケーブル張力を目標張力に合わせる管理をすると微小な調整量でも主桁には過大な形状誤差が生じ管理目標値を達成するのが困難になる。よって長大な斜張橋は形状を優先した管理、すなわち主桁・塔・ケーブルの「長さ」を管理することで、応力上も満足できる完成系を得ることができる。多々羅大橋では最重点管理項目として「長さ」を選定し、工場における製作データを管理の主体とした。長さの製作精度はきわめて良好なもので、桁の累積長さ誤差、塔の累積高さ誤差ともども全体として±10mm 以内に収まっていた。



表-3.3 多々羅大橋における誤差応答解析結果

誤差項目	応答解析結果
長さ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 桁長誤差の桁のたわみへの影響は非常に大きく、10mにつきプラス2mmの桁長誤差を与えると中央部で320mm桁が高くなる。一方、ケーブル張力への影響は微少である。</li> <li>2. ケーブル長誤差も桁のたわみへの影響は大きいですが、張力への影響は軽微である。</li> </ol>
曲がり	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 桁に同方向の角折れを与えその累積によって大きな曲がりを生じさせても、鋼桁は柔軟であるため曲がりは急速に解消され、誤差形状としては残留しない。</li> <li>2. 局所的な角折れは、最終完成系でも誤差形状として残り修正は不可能だがその影響は角折れの近傍にとどまっている。</li> </ol>
死荷重	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鋼桁で5%の死荷重誤差を与えたところ、支間中央で約170mmのたわみ誤差が生じる。この時のケーブル張力誤差は最大で18tである。</li> <li>2. PC桁部の死荷重誤差はPC桁部で負担するため全体への影響はない。</li> </ol>
張力	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 上記18tは張力誤差としては2~3%程度のものであるが、この誤差を解消して目標張力に合わせようとすると、桁のたわみ誤差が非常に大きくなる(数mに達する)。</li> </ol>
閉合	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全体的に柔構造であるため閉合力は小さい。ただし、誤差は閉合部近傍に残留する。</li> </ol>
剛性	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 桁、塔に曲げ・伸び剛性ともそれぞれ5%の誤差を与えたが、断面力、変形とも影響は軽微である。</li> <li>2. ケーブルの伸び剛性に1%の誤差を与えたが同じく軽微だった。</li> </ol>
PC桁形状	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 側径間PC桁は支間が短く(50m)曲げ剛性が大きいいためケーブル張力では形状を改善できない。</li> </ol>

### (3) 変形と応力の測定と管理

#### 1) ケーブル張力

現在の最も一般的なケーブル張力測定方法は、ケーブルの調和振動から張力を推定する振動法である。この方法ではケーブルの曲げ剛性や支持条件などを適切に評価することによって簡便な方法ながら良好な精度でケーブル張力の測定が可能である。振動数の測定には加速度計の出力波形を周波数分析する方法が一般的に用いられていたが、横浜ベイブリッジでは取り扱いが簡便で廉価な変位計が用いられている。振動法による張力測定ではサグが大きなケーブルでは誤差が大きくなる傾向がある。そこで鶴見つばさ橋や浜田マリン橋ではジャッキ反力の読みと振動法による張力を比較し補正係数を求め管理用の張力を算出している。

中小規模の橋梁では、ケーブルの引き込みに用いる油圧ジャッキの油圧の読みからジャッキ反力を計算しそれをケーブル張力としている例も見られる。この方法では張力の導入と同時に、測定が可能であり簡便であるが、その反面精度が低く、随時キャリブレーションが必要となる。

その他の方法として、岩黒島橋ではケーブルの初期張力をあらかじめ他の方法で正確に測定し、同時にケーブルの両端定着部に設けた標点間距離を厳密に測定しておき、その後の距離の変化からケーブル張力の増減を用いる方法を適用している。

いずれの方法を用いる場合でも、正確なケーブル張力を知ることは橋体形状および応力を管理するうえで重要である。かもめ大橋<sup>11)</sup>や新大橋<sup>12)</sup>の施工に際しては、各種の測定法を用いた場合の得失に関する比較検討が行われている。名港西大橋、かつしかハープ橋<sup>13)</sup>、鳥飼仁和寺大橋<sup>14)</sup>などの架設では、振動法を測定の主体としてこれに複数の測定法を併用する方法が用いられている。

ケーブル張力における誤差の許容値は、ケーブルの余裕張力を上限とし下限を張力測定法の誤差限界付近とする範囲内で設定することができるが、一般的な基準はなく斜張橋の工事ごとに定められている。実際の現場

施工において、過度に厳密な張力管理を要求することは、制約や障害の多い現場条件のもとで作業をいたずらに煩雑にするだけでなく、架設工程にも多大な影響を及ぼすことになる。また、製作精度や死荷重の見積誤差、張力測定方法の測定精度など、架設精度以外に張力誤差を生じさせる要因も多いことを認識し、これらとバランスした許容値を設定することが必要である。既往の斜張橋の架設に際して用いられた、許容誤差の例を表-3.4に示す。

表-3.4 ケーブル張力の管理例

橋梁名	竣工年	管理内容
かもめ大橋	1975	竣工時の張力を振動法とひずみ測定で管理。誤差±5%程度。
六甲大橋	1976	振動法による実測結果は、-8%～+10%であった。
川崎橋	1978	振動法による張力管理を行い、±5%以内の張力誤差となった。
藤戸橋、日の浦橋	1980	鋼桁架設完了時の許容誤差は±10%とした。
Sloboda 橋	1981	架設時解析結果との誤差は±5%以内で管理できた。
弥栄大橋	1987	設計プレストレスを含む設計死荷重張力の 20%以内、または設計最大張力に対する許容張力の余裕量のうち、小さいほうを許容値として設定した。
かつしかハーブ橋	1987	完成時設計張力の±10%を誤差として許容した。
岩黒島橋	1988	完成系張力の±5%を許容誤差値に設定した。
東神戸大橋 <sup>15)</sup>	1992	管理目標値を許容誤差の1/2に設定。架設段階ごとに計測、張力調整実施。閉合後の調整不要を目指した。
さぬき府中湖橋 <sup>16)</sup>	1992	ケーブル余裕張力以内となるように管理。各架設段階ごとに計測、張力調整実施。
鶴見つばさ橋 <sup>17)</sup>	1994	許容誤差は設計張力± 許容張力-設計張力 に設定。管理目標値は許容誤差の1/2に設定。架設段階ごとに計測、張力調整実施。ケーブル張力は上4段について計測。
多々羅大橋 <sup>6,7)</sup>	1998	架設段階ごとに計測。シム調整は最上段ケーブルのみに実施。
浜田マリン大橋 <sup>18)</sup>	1999	管理目標値は設計張力±10%に設定。架設段階ごとに計測実施。張力調整は架設完了後のみ実施。
大島大橋(長崎県) <sup>19)</sup>	1999	設計許容張力を超過しないよう管理。管理目標値は設計張力(D+Ps+L)±10%。各架設段階で計測、張力調整実施。ケーブル張力は上3段について計測。
常吉大橋 <sup>20)</sup>	2000	管理目標値は(D+Ps)×15%。架設段階ごとに計測。張力調整は上1段について実施。架設完了後、張力再調整。
日本・エジプト友好橋 <sup>21)</sup>	2001	設計許容張力を超過しないよう管理。実測ではすべて10t以内。架設段階ごとに張出し先端のキャンバーと張力を計測。張力調整は実施せず。
美原大橋 <sup>22)</sup>	2004	設計許容張力を超過しないよう管理。ケーブル2段ごとに計測実施。張力調整は上1段について実施。
女神大橋 <sup>23)</sup>	2005	設計許容張力を超過しないよう管理。各架設段階で計測、張力調整実施。ケーブル張力は上3段について計測。
Binh 橋 <sup>24)</sup>	2006	ケーブル破断張力の45%を超過しないよう管理。各架設段階で計測、張力調整実施。
Ring Road No.1 橋 Ring Road No.2 橋	2006	ケーブル破断張力の45%を超過しないよう管理。各架設段階で計測、張力調整実施。合成桁の剛度確認のためのケーブル張力導入、キャンバー計測。

## 2) 主桁と塔の形状

橋体の形状測定には、従来からレベルやトランシットなど一般的な測量機器が用いられているが、光波も多用されている。横浜ベイブリッジや本四架橋のような大規模斜張橋では連通管の原理を応用しプロープの水位から主桁のたわみを自動測定している。

塔の形状測定においても、一般的な測量機器が用いられている。この場合、特に高所作業を必要としないように配慮され、櫃石島橋や岩黒島橋などでは塔頂に設置した反射板を利用して測定作業の安全と省力化を図っている。また、横浜ベイブリッジでは、レーザー光と CCD カメラを用いて自動測定を行っている。女神大橋では、塔頂と塔基部にプリズムを据え付け、各々の座標を既知点に設置したトータルステーションにて計測し倒れに換算する自動追尾型トータルステーションを用いている。

主桁、塔の形状に関する管理基準値も日本道路公団（現 NEXCO）や本州四国連絡橋公団などには規定があるが、それ以外の場合には工事ごとに定めている。表-3.5 に既往の例を示す。主桁キャンバーの管理基準値は支間内で一定としている場合が多いが、固定点からの距離に応じて基準値を変化させている例も見られる。また、管理基準値を定めた上でその基準値の半分を架設段階での目標値とするなど、実際にはさらに厳しい値で管理を行っている例も多く見ることができる。主桁の形状は円滑な走行面の提供につながるため、各測定点が基準値以内に入っていることの確認に加えて、主桁全体の形状が凹凸や角折れがなく滑らかになっていることを確認することも重要である。

表-3.5 主桁キャンバーと塔倒れの管理基準値

橋梁名	竣工年	管理基準値 (mm)	
		主桁	塔
櫃石島橋	1988	$\pm\{25+0.25(L-50)\}$	$\pm H/5,000$
横浜ベイブリッジ	1989	$\pm 0.5 \times \{25+(L-40)\}$	$\pm H/5,000$
東神戸大橋	1992	$\pm 25\text{mm} (0 < X < 40\text{m})$ $\pm 0.625X (X > 40\text{m})$	$\pm 100\text{mm}$
さぬき府中湖橋	1992	$\pm\{25+(L-40)\}$ 注1)	$\pm 50\text{mm}$
鶴見つばさ橋	1994	$\pm 0.5 \times \{25+(L-40)\}$	$\pm H/2,000$
多々羅大橋	1999	$\pm\{25+0.25(L-50)\}$	$\pm H/2,000$
浜田マリン橋	1999	$\pm\{25+(L-40)\}$	$\pm H/1,000$
大島大橋	1999	$\pm L/2,000$	$\pm 100\text{mm}$
常吉大橋	2000	$\pm\{25+0.25(L-50)\}$	$\pm H/2,000$
日本・エジプト友好橋	2001	$\pm L/2,000$	$\pm H/1,000$
美原大橋	2004	$\pm 195\text{mm}$ (中央), $\pm 102\text{mm}$ (側)	$\pm 80\text{mm}$
女神大橋	2005	$\pm L/2,000$	$\pm H/2,000$
Binh 橋	2006	$+150\text{mm} \sim -100\text{mm}$ (中央) $+100\text{mm} \sim -60\text{mm}$ (側)	
Stonecutters 橋	2009	$\pm\{2 \times 300/L \times X + 50\}$ (中央) $\pm\{24/36 \times L + 12\}$ (側)	

注1) 塔、支点位置で $\pm 25\text{mm}$ 、支間中央で $\pm\{25+(L-40)\}$ としその途中を直線補間

X: 塔から着目点までの距離 (m), H: 塔高さ (m), L: 支間長 (m)

### 3) ケーブルおよび橋体の温度

橋体の温度測定には熱電対が多く用いられる。ケーブルにおいては内部の温度分布を直接測定することは困難であるため、実際のケーブル部材と同じ断面に製作した供試ケーブルに、熱電対を埋め込んで測定する場が多い。

### 4) 橋体応力と反力

応力の測定には、従来からひずみゲージが用いられている。一般に橋体応力の測定は、架設時に過大な応力が発生していないことの確認のために行われるものであり、この結果が橋体形状の管理に用いられることはない。

反力の測定には、ジャッキ・変位計・ロードセルなどが用いられるが、ひずみゲージの指示値から変換する方法が用いられたこともある。反力は、特に多点支持状態で架設を行う場合には、目的形状を達成するための管理項目の一つとして、またステーキングなど仮設備の安全確認のために測定される。

#### (4) ケーブル張力調整量の決定方法

斜張橋の形状およびケーブル張力の調整は、主にケーブル長を変化させることにより行われる。1つのケーブル長さの調整によって、隣接するケーブルの張力や主桁の形状は比較的敏感に変化する。

初期の斜張橋ではこれらの関係に留意した調整は必ずしも十分でなかったようで、たとえば著名な Theodor-Heuss 橋では、キャンパー形状の修正だけに注目してケーブル長の調整が行われている。また、設計時に計画したケーブル張力を達成することのみを目的とした試行錯誤的な調整作業も行われていたようである。その後は、図-3.25 に示すように、橋体形状とケーブル張力双方の最適化を考慮した調整法が用いられるようになった。

ケーブル長の調整を実施する段階としては次の2種類がある。

- ① 過大な作用応力を生じない限り途中の調整を避け、架設の最終段階に一括して調整する。
- ② 架設途上の調整を各ケーブルの架設段階ごとおよび主桁ブロックの各架設段階ごとに行う。

初期の斜張橋では、ほとんどが①の方法で施工されており、Maxau 橋<sup>25)</sup>や Friedrich Ebert 橋<sup>26)</sup>では、架設後の調整も不要であったと報告されている。また、ステーキング上に主桁を架設した後にケーブルを施工する場合には、ケーブル定着点間の距離を実測して、製作および架設誤差を加味したケーブル長を算定することができる。Julicher Straße 橋<sup>27)</sup>や摩耶大橋<sup>28)</sup>、豊里大橋、Luling 橋などで、この管理方法が用いられた。さらに大和川橋梁<sup>29)</sup>や岩黒島橋、荒津大橋では、部分仮組時における誤差を厳密に把握することにより、測定誤差の存在しやすい架設途上の調整を避ける方法を採用している。

このことは設計時には、ケーブル張力や橋体形状などについて許容される誤差の残留を見込んでおり、架設現場において仮組立て形状の許容誤差内での忠実な再現が可能であれば、架設途上の調整は必ずしも必要ではないということに着目したものである。この場合、ケーブル長の初期調整量は仮組立て寸法から決定され、現場においてはケーブル架設と同時に初期のシム調整が行われる。さらに、架設完了後に全体のケーブル張力が確認されている。十勝中央大橋<sup>30)</sup>においても同様な管理がなされている。

②の方法は近年わが国で施工された橋梁に多く適用されており、調整作業を最小としながら最終的には形状とケーブル張力の双方が許容値内となるように、架設途上の適当な段階ごとに調整作業を繰り返し、最終的に調整不可能な架設誤差が累積しないように配慮するものである。

ケーブル張力の調整量は、ケーブルの単位長さ変化によって生じるケーブル張力や主桁形状の変化の影響値を予め算出しておき、これをもとに最適化手法を用いて決定される。最適化手法はこれまでにいくつか提案され、実際の現場施工に適用されている。川崎橋<sup>31)</sup>では、シム調整量を目的関数に選び、その二乗和が最小となるようなシム調整厚さの組合せを、調整終了後に許容できる残留張力誤差を設定した繰り返し計算によって求

めている。同様な手法は、合掌大橋<sup>32)</sup>や藤戸橋、日の浦橋など多くの橋梁架設に採用された。

また、秩父橋や名港西大橋では、シム量や塔の倒れ、キャンパー誤差などの主要なパラメータに対して、適当な無次元化操作を施し、各パラメータ間に重み係数を考慮できる目的関数を用いて、シム調整量だけでなく形状についても同時に管理することが可能な方法を用いた<sup>33)</sup>。この方法は、その後かつしかハープ橋や櫃石島橋にも適用された。

さらに、現場において調整作業量の削減に着目し、ケーブル張力の調整箇所数も目的関数に設定した方法が横浜ベイブリッジに用いられている。すなわち、シム調整量や塔の鉛直度、主桁のキャンパー誤差などの主要なパラメータを最小とするように、多目的計画法を用いた定式化を行い、この反復計算の中から最終目的としての、シム調整箇所数が最小となるようなシム厚の組合せを見出そうとするものである。

これらの調整法は、高次不静定構造に対する解析技術の進歩、材料の高強度化、製作精度の向上などに呼応して、現場施工においても高い架設精度が要求された結果、これを合理的な手順で実現するための管理手法として採用されるようになったものである。

一旦、ケーブル張力調整量と調整箇所が決定されれば、ロックドコイルや平行線タイプケーブルの場合は、センターホールジャッキを用いてケーブル全体を引張りシムを挿入して所定のケーブル長さを達成する。一方、現場施工型ストランドケーブルは、ケーブルを構成するストランドを1本ずつ架設しモノストランド用ジャッキを用いて緊張定着を行うのが一般的である。新たなストランドを緊張するとそれまでに緊張したストランドの張力が変化するので、各ストランドの張力または無応力長が等しくなるように適切な処置が施される。

新尾道大橋など初期の頃の斜張橋では、全ストランドに事前に無応力長位置をマーキングし、緊張時にはそのマーキング位置を合わせることでストランド間の長さを管理していた。ケーブル張力は代表するストランドの張力に所定のストランド本数を乗じて算出される。この方法ではマーキング作業に多大な労力を費やすことになり、現在ではより合理的な張力管理手法が用いられている。

銚子大橋<sup>34)</sup>では、各ケーブルの最初に緊張するストランドにロードセルを設置し、その測定値に合わせて2本目以降のストランドに張力を導入する方法（ロードセル法）が採用された。ケーブル張力はロードセルの測定値にストランド本数を乗じて求めている。

鷹島肥前大橋<sup>35)</sup>では、ケーブルの定着点間距離と緊張中のストランド張力、ストランド温度を連続的に計測し、当該ストランドの無応力長が設計無応力長と一致するように緊張する方法が採用された。ケーブルの定着点間距離は光波距離計、ストランド温度はダミーケーブルに取付けた熱電対で計測し、変位計を内蔵したモノストランドジャッキとパソコンで連動した自動緊張システムが用いられた。

また、架設段階毎の解体計算から求められるケーブル架設前後の定着点間距離の変化量を基に、予めストランド1本毎の緊張力を計算で求め、それを基に緊張管理する方法もある。

いずれの方法を採用するにせよ、架設時の各ストランド間の温度のばらつき等により、ケーブルを構成するストランド張力にはばらつきが生じる。張力のばらつきを無くして各ストランドの張力を均等化するため、温度の安定する夜間から早朝にかけて、変位計を内蔵したモノストランドジャッキでストランドを1本ずつ緊張することにより導入張力の確認と調整作業が行なわれる。ストランドの張力が均等化した後は、プレハブ型ケーブルと同様に扱うことが可能である。

##### (5) 自動管理システム

名港西大橋、櫃石島橋、岩黒島橋、横浜ベイブリッジ、東神戸大橋、多々羅大橋など比較的規模が大きな斜張橋では、**図-3.25**、**3.26**に示すような形状・応力管理システムによる管理手法が用いられた。これは斜張橋の長大化に伴う作業量の増大に対処するため、測定の自動化や省力化、管理データ解析の高速化を図ったものである。このような形状管理システムは、これらの斜張橋の施工期間の短縮や精度の向上に大きく寄与してい

る。

一方、中小規模の斜張橋の場合は、自動計測システムと連動した形状管理システムを用いるよりも、事前に解体計算で得られた架設段階ごとの影響値をコンピューターに保存し現場に持ち込み、オフラインで計測された実測値を用いて最適値を算出する方法の方が多く用いられている。

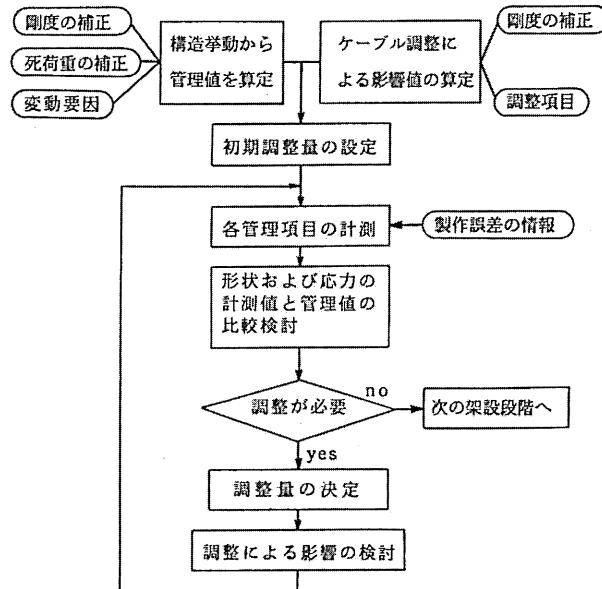


図-3.25 現場施工管理システム

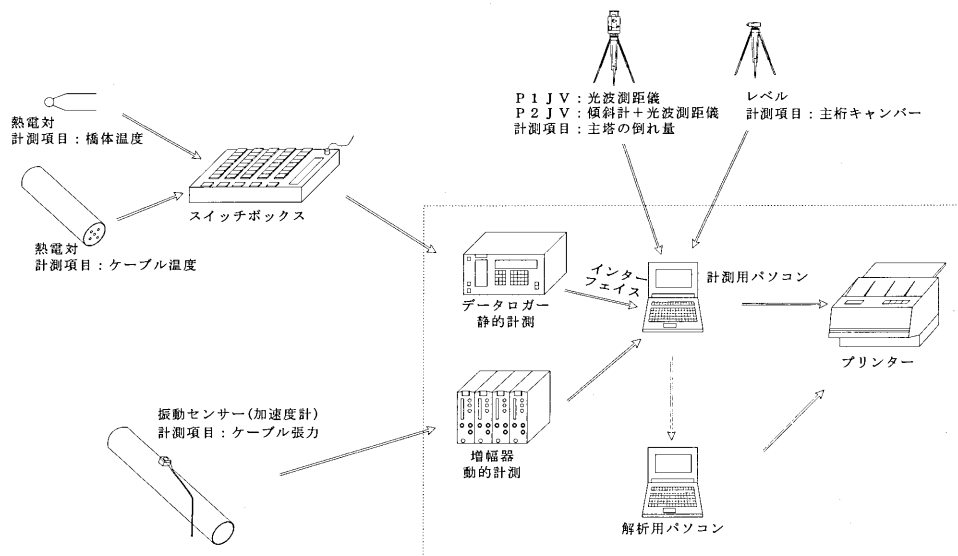


図-3.26 形状・応力管理システム

### 3.3.4 今後の傾向

鋼床版箱桁、鋼製塔、被覆平行線ケーブルによって構成される鋼斜張橋の現場施工管理は、多数の実施例を通して技術的には確立されたものと考えられ、今後の改善、発展は主に測定機器の精度向上によるものが主に

なるものと考えられる。

一方、今後は従来型の鋼斜張橋に加えて複合斜張橋や現場施工型ストランドケーブルを採用した斜張橋が建設されていくことが考えられる。複合斜張橋ではコンクリートの材齢に伴い変化するクリープや乾燥収縮を現場施工管理にも考慮する必要がある。また現場施工型ストランドケーブルの架設方法や張力調整方法は、被覆平行線ケーブルとは異なる。これらの形式は海外では主流になっているもののわが国ではまだ実施例も少なく、今後の建設を通して現場施工管理技術の研究開発が進むものと考えられる。

### 3.2 参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会:斜張橋資料集成, 1976.2
- 2) 建設コンサルタンツ協会近畿支部:斜張橋の実績調査報告書, 1982.8
- 3) 近藤, 井上, 佐伯, 松川:豊里大橋(斜張橋)の設計と架設, 橋梁と基礎, 1970.12
- 4) 阪神高速道路公団, (財)阪神高速道路管理技術センター:阪神高速道路湾岸線, 大和川橋梁工事誌, 1984.3
- 5) 中谷, 畑中他:安治川橋梁の架設・橋梁と基礎, 1988.5
- 6) 政田和久, 津田敏, 明橋克良, 平原伸行:多々羅大橋上部工工事報告, 横河ブリッジグループ技報, 1999.1
- 7) 佐藤佳行, 朝野隆彦:「多々羅大橋」の架設, 石川島播磨技報2001 橋梁特集号
- 8) 松野憲司, 中山真明, 藤田賢治, 山本裕一, 大山篤生:「ビン橋」(ベトナム)の建設工事概要, 石川島播磨技報, 2006.3

### 3.3 参考文献

- 9) H.J.Ernst : Montage eines seilverspannten Balkens im GroB Bruckenbau, Der Stahlbau25, Heft5, pp.101~108, 1956.5
- 10) Y.Manabe, T.Murata, M.Yabuno : Accuracy control on the construction of the Tatara Bridge
- 11) 石岡, 田辺, 西島:かもめ大橋,三菱重工技報, 1977.5
- 12) 松沢, 金谷:東京都『新大橋』のケーブル張力測定, 石川島播磨技報, 1978.
- 13) 森本, 富永, 佐藤:S字形曲線斜張橋上部工の施工管理, 橋梁と基礎, 1986.12
- 14) 牧野, 桑田, 柴臥, 花岡:淀川橋梁(太径ケーブル斜張橋)の架設, 橋梁と基礎, 1987.5
- 15) 千代他:東神戸大橋上部工の施工と架設精度管理(下), 橋梁と基礎, 1992.7
- 16) 明石他:さぬき府中湖橋の設計と架設(下), 橋梁と基礎, 1992.10
- 17) 伏見他:鶴見航路橋横断橋梁上部構造の施工, 橋梁と基礎, 1994.10
- 18) 川崎他:浜田マリン大橋の設計と施工, 橋梁と基礎, 1999.10
- 19) 宮崎他:大島大橋の上部工施工, 橋梁と基礎, 1999.12
- 20) 中西他:常吉大橋の設計と施工, 橋梁と基礎, 2000.3
- 21) 石建他:スエズ運河橋(仮称)の施工, 橋梁と基礎, 2001.11
- 22) 清見他:美原大橋上部工の設計と施工(下), 橋梁と基礎, 2004.9
- 23) 女神大橋上部工の施工, 橋梁と基礎, 2005.12
- 24) 松野他:ビン橋(ベトナム)の建設工事の概要, 橋梁と基礎, 2006.9
- 25) J.Schottgen und L.Wintergerst : Die StraBenbrücke unber den Rhein bei Maxau,Der Stahlbau37, Heft2, pp.50-57, 1968.2
- 26) H.Thul : Die Friedrich-Ebert-Brücke unber den Rhein in Bonn, Der Bauingenieur40, Heft9, pp.327-333, 1971.9
- 27) E.Beyer,H.J.Ernst : Brücke Julicher Straße in Dusseldorf, Der Bauingenieur39, Heft12, pp.469-477, 1964.12
- 28) 毛利, 岡田, 池田, 中野:摩耶大橋の設計と施工, 土木学会誌, 1967.4
- 29) 田井戸, 成瀬, 大志万:大和川橋梁の製作と架設(下), 橋梁と基礎, 1982.2

- 30) 金森, 村上, 竹居田: 十勝中央大橋上部工の設計・施工, 橋梁, 1988.1
- 31) 松村, 新家, 頭井, 寺西: 斜張橋のケーブル張力計測と張力調整, 橋梁と基礎, 1979.8
- 32) 前田, 作田, 西土, 町田, 富沢, 内海: ケーブル構造物の施工管理システム, 川田技報, 1986
- 33) 藤澤: 斜張橋架設時のシム量決定方法, 橋梁と基礎, 1984.9 および 1984.10
- 34) 富澤, 木内, 鈴木, 三浦, 阿部: 銚子大橋 (斜張橋部) の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol.43, 2009.9
- 35) 中村, 坂本, 日比野, 坂本, 牟田, 松原: 鷹島肥前大橋の上部工施工, 橋梁と基礎, Vol.43, 2009.4