

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、また用地難の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、特に最近はケーブル段数の多いマルチケーブル形式が増加しており、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。

他方、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、熟練技能工の確保と育成の限界により、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、製作ラインの機械化、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、NC化を中心にして自動化、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・設置されつつあり、今後はCAD/CAMを利用した一貫生産システムへ移行し、さらに生産の合理化が図られるものと考えられる。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ようとしている。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、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。

最近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広く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。

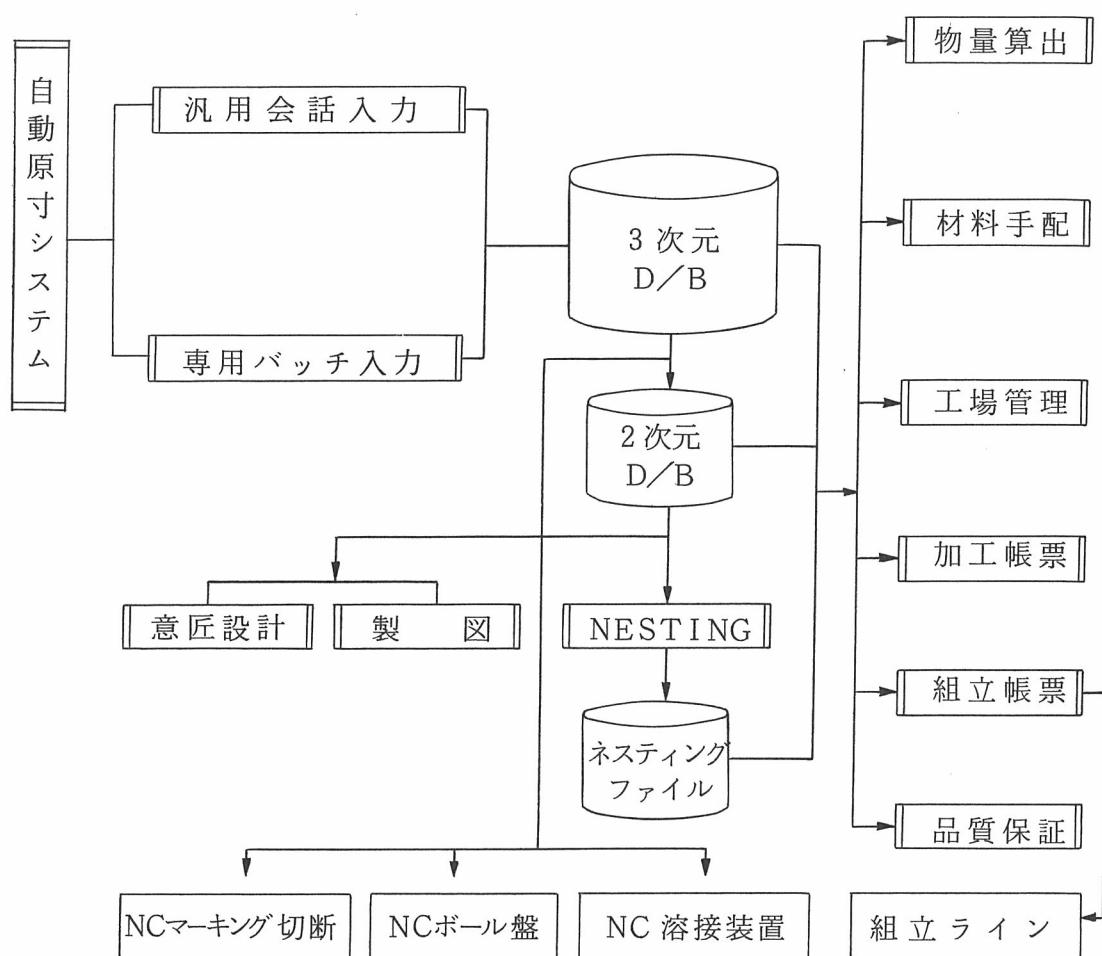


図-3.1 CAD/CAM 一貫生産システム

(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化により図形情報がそのまま数値データとしてNC機器に転送され、自動的に転記されることにより原寸と加工の工程が統合されてきている。

(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、組立部品の消し込みを行う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、板厚、脚長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、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

仮組立工程は依然として自動化、装置化が困難な工程であり、合理化といえば仮組立に必要な帳票類を出力する程度のものである。しかし最近では、仮組立自体を省略しようとする動きがあり、これにかわる品質保証手段として数値仮組立という手法が検討されている。数値仮組立とは部材形状を計測し、コンピュータの中で仮組立計算を行い、様々な条件を設定して数値シミュレーションを行って、仕様と比較照査することにより、架設の際に予想されるトラブルを未然に防ごうとするものである。

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、ケーブルへ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ふことができる。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が、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となる。

斜張橋は主桁と塔より成る立体構造物であるが、工場における立体仮組みが困難なこと、また斜張橋には長大橋が多いが、これ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も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。このため一般には分割仮組立の境界ブロックは、これを狭む両側の仮組立に組み込むことにより、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り全体精度の確保を図っている。図-3.2に大和川橋梁で採用された仮組立の精度基準を示す^{4,31)}。

(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で板厚、溶接量も大きく製作における作業性も悪い。このため溶接による変形を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ので、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はケーブル定着方向の精度が重要であるが、フィラーをテープ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、溶接による変形を避け、施工性を向上させるため、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、これに伴い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

(1) 支間長

「道示」により $\delta \leq 10 + L/10$ を適用する。

$$\ell_1 = 148.000\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_1 \leq \pm 24.8\text{mm}$$

$$\ell_2 = 355.000\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_2 \leq \pm 45.5\text{mm}$$

(2) ブロック長(分割仮組み時の長さ)

$$\ell_4 = 126.500\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_4 \leq \pm 19.8\text{mm}$$

$$\ell_5 = 21.500\text{m} \text{に対し}$$

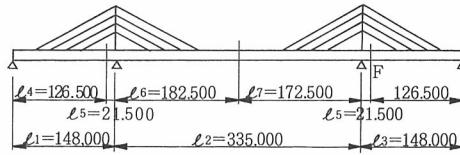
$$\delta_5 \leq \pm 5\text{mm}$$

$$\ell_6 = 172.500\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_6 \leq \pm 22.2\text{mm}$$

$$\ell_7 = 182.500\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_7 \leq \pm 23.2\text{mm}$$



(3) ケーブルアンカ一部間隔

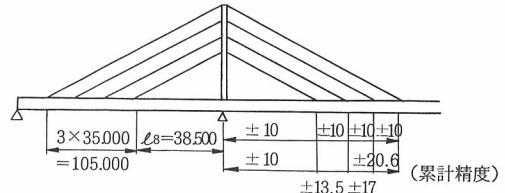
$$\ell_8 = 38.500\text{m} \text{に対し}$$

$$\delta_8 \leq \pm 10\text{mm}$$

$$\text{間隔 (35.000m) に対し}$$

$$\delta \leq \pm 10\text{mm}$$

ただし、塔よりの累計寸法は $L/10$ を適用する

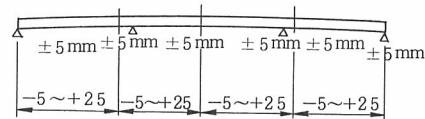


(4) キャンバー

キャンバーについては「道示」を準用する。

各工場とも $-5 \sim +25\text{mm}$

ただし、支点上に対しては $\pm 5\text{mm}$



(5) 主塔製作精度基準

項目	許容誤差 (mm)
全長 H	$10 \pm H/10 = 16\text{mm}$
サドル高 h	$h_1 : \pm 5, h_2 : \pm 7, h_3 : \pm 9$ $h_4 : \pm 11, \text{ サドル間隔 : } \pm 5$
倒れ δ_1	$\delta v = 25$ (面内, 面外とも)
曲がり δ_2	$H/10000, \delta_2 = 6$
水平継手のメタルタッチ	隙間 0.2mm 以下

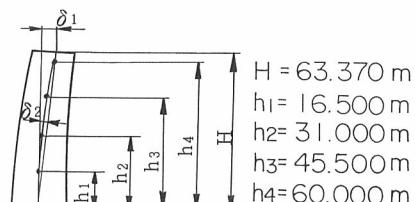


図-3.2 仮組立の精度基準の例

行われている。

また最近の大きな溶接技術の進歩の例として、道路・鉄道併用橋の瀬戸大橋における主構造弦材のかど溶接継手での微少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・実用化があげられる。これを契機として、最近では溶接部の検査に、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、超音波検査が採用される傾向にある（写真-3.1）。

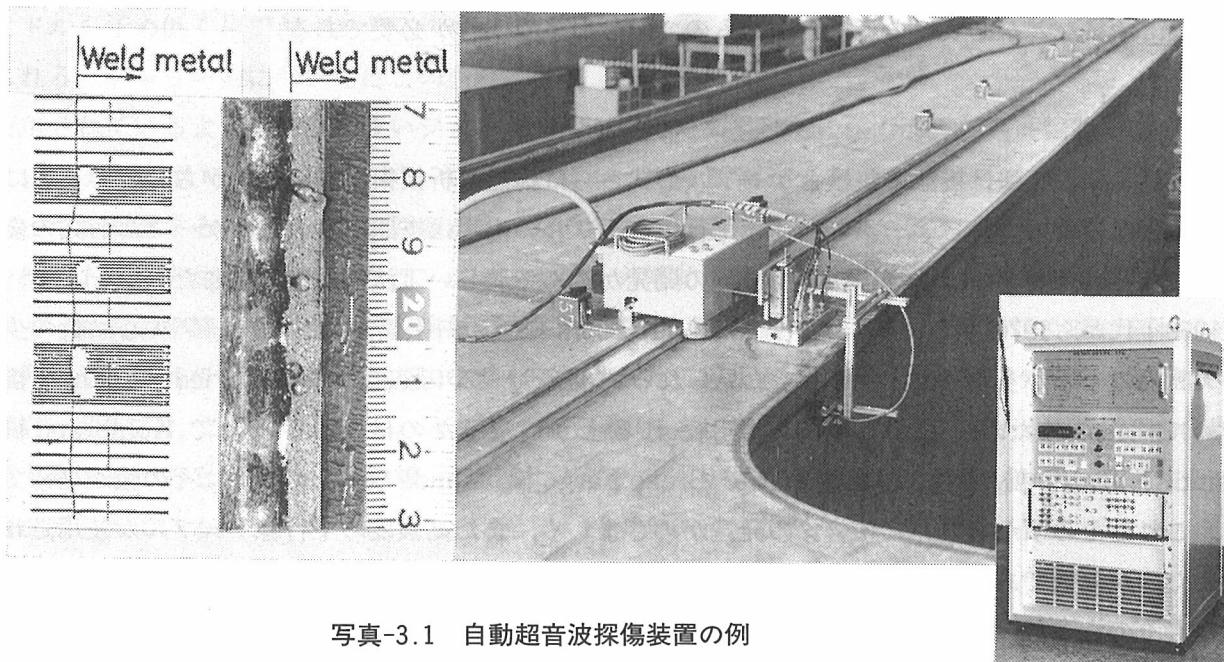


写真-3.1 自動超音波探傷装置の例

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、最近は海上部や河口部に架ける橋梁の増加とあわせ、大型フローティングクレーンによる大ブロック架設が増えてきている（写真-3.2）。これは工場での大ブロック化が、大幅な工期短縮と組立作業の地上化および工場常設設備の活用により、現地工事専用の組立用資機材への投資費用の節減など、全体としての工事費の大幅な低減を図る有効な手段であるとともに次のような種々のメリットがある。すなわち、施工条件に恵まれ、かつ施工管理体制が十分に確立された工場作業がほとんどであることから、構造物全体の品質の向上は非常に大きなものがある。特に仕上げ層まで工場施工を行うことによる塗装品質の向上、継手（ボルトおよび溶接）性能の向上、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。

この状況に対応して、工場製作設備も一般的な

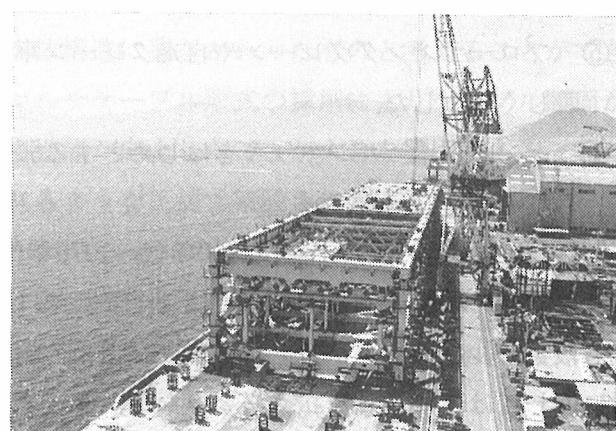


写真-3.2 工場での大ブロック地組立

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が接岸できる臨海組立場の確保が要求されている。すなわち、橋梁業界においては自社保有の臨海組立場の増強、公共埠頭や社外用地の確保などの新たな条件を満足する必要が生じてきている。この傾向が将来さらに大型化へ進むであろうことは容易に推察できるし、製作設備もそれに対応できるものに拡充することが今後の課題とも考えられる。

反面、大ブロックの輸送、架設途中では、完成時と異なる応力状態が生じることにより、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。

3.2 架 設

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、Zárate-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めざましく、また高強度の平行線ケーブルが使用されはじめたのが原因である。このような変遷のあと1980年代になって斜張橋の支間は一気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。これにしたがい架設工法も急激に変化して今日に至っている。

以上のことから斜張橋の架設工法については1980年までと、それ以後の2つの時期に分けて記述する必要がある。それらの要因をまとめると以下のようである。

- ① 1980年代になって、支間がますます長大化し、従来吊橋の領域と考えられていた範囲まで適用される様になってきた。
- 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車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用器具の開発が進み、大きな引き込み力が得られる様になった。

3.2.1 発展期の架設工法（1950年代～1970年代）

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殆どで、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にある。

ケーブルは完成時の張力をもとにその長さを決めており、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。このことからどの様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0.5m~2m程度になる(図-3.3参照)。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。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推しあ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。

3.2.2 現代の架設工法（1980年代）

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。

使用する架設機械に違いはあるが、手法そのものは一般橋梁のケーブルエレクション斜吊り工法と同じ考え方で行われている。すなわち、斜吊り工法の場合には、ケーブルクレーンにより部材を張出しながらケーブルを斜めに張り、滑車およびターンバックルを使用してケーブル長さを調整する。これに対し斜張橋で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長さを調整する。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た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充分に発揮されるような工法で架設されるようになった。

3.2.3 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、こゝでは塔、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（海上の場合占用面積）、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。こゝ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

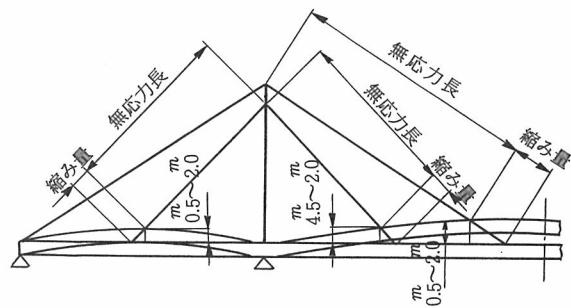


図-3.3 無応力時のケーブル長

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容量のフローティングクレーンを利用して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-3.4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。

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、主桁を先に架設してしまう。その後主桁上に自走クレーン車を準備し、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。実施例としては横浜ベイブリッジ、安治川橋梁、櫛石島橋、岩黒島橋などがある。自走クレーン車の代わりにタワークレーンを利用することもある。なお1本柱形式の場合にはクリーパークレーン（エレクターとも言う）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-3.5はこれらの要領の一例を示したものである。

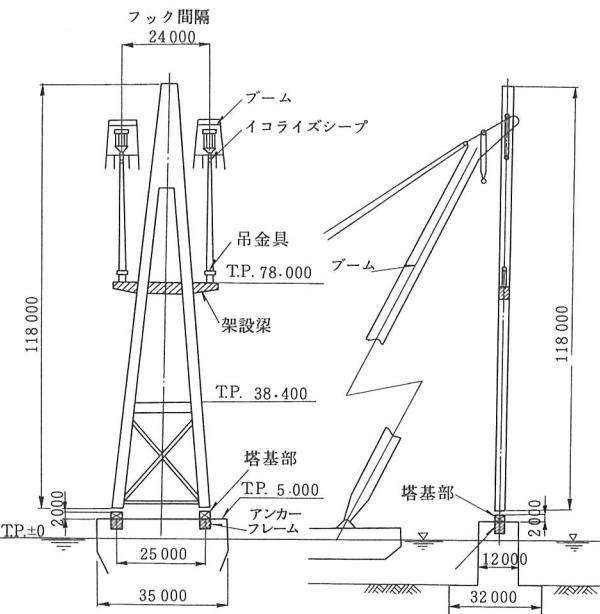


図-3.4 フローティングクレーンによる一括架設

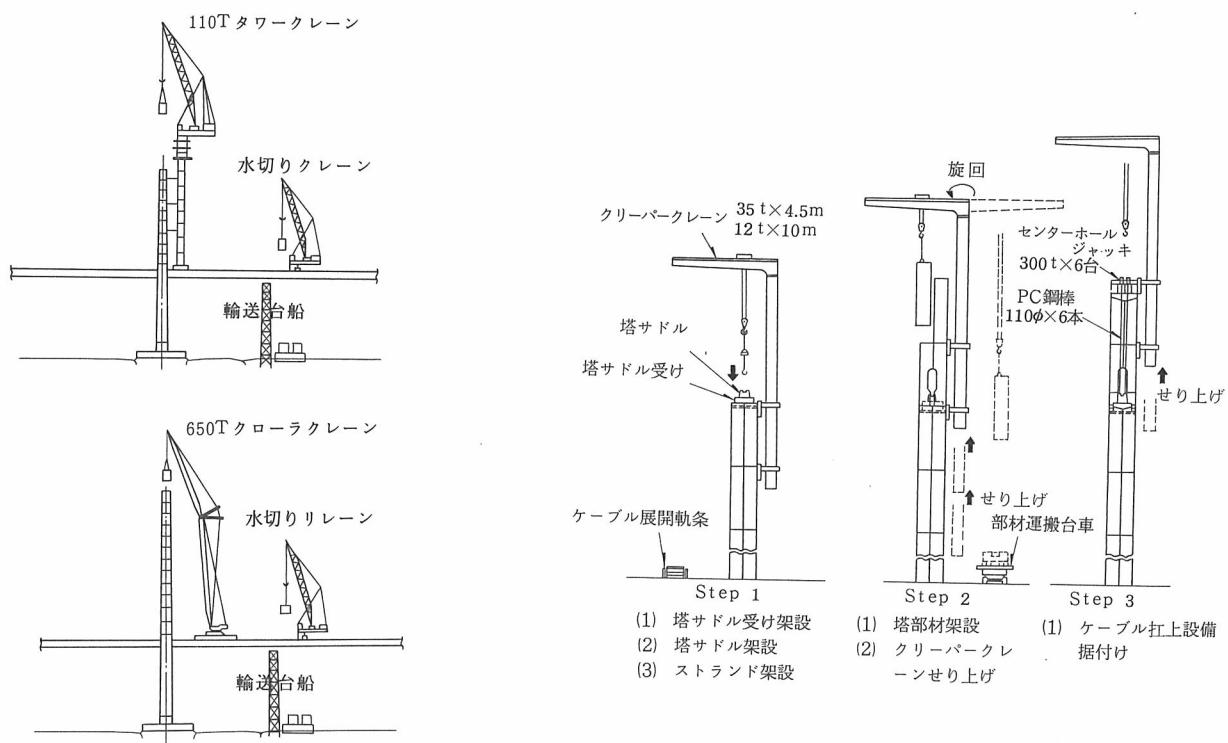


図-3.5 種々のクレーンによる塔架設

(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。これまでに施工してきた方法をまとめると次の3工法に分類される。表-3.1は分類別橋梁を示す。

- 1) 片押し工法
- 2) バランシング工法
- 3) ステージング工法（ジャッキアップダウン工法との併用）

表-3.1 主桁の架設工法の分類

架 設 工 法	橋 梁 名
片 押 し 工 法	Saint Nazaire, Luling, Tjörn, Duisburg-Neuenkamp, 珍島橋, Zárate-Brazo Largo, Knie, Erskine, Bratislava, Severin, Donaubrücke-Deggendorf, 突山橋, Leverkusen, Speyer, Friedrich-Ebert, Ewijk, Oberkassel, Rees Kalkar, Save, Papineau Leblanc, Wye, Linz, Willems, 横浜ベイブリッジ, 檜石島橋, 岩黒島橋, 名港西大橋, 安治川橋梁, 尾道大橋, 水郷大橋, 荒川大橋, 石狩河口橋, 秩父橋, 永歳橋
バ ラ ン シ ン グ 工 法	Rande, Köhlbrand, Ludwigshafen, 大和川橋梁
ス テ ー ジ ン グ 工 法 ジャッキアップダウン 工法との併用	Severin, Bratislava, 豊里大橋, 末広大橋, かもめ大橋, 六甲大橋, 藤戸橋, 日の浦橋

1) 片押し工法

図-3.6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、作業が効率的に行うことができる。長大橋では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、ステージングの設置およびフローティングクレーンの使用可能な場合には、大ブロック架設がよく用いられる。

2) バランシング工法

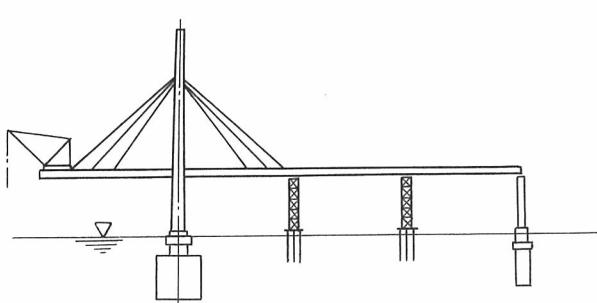


図-3.6 片押し工法の例

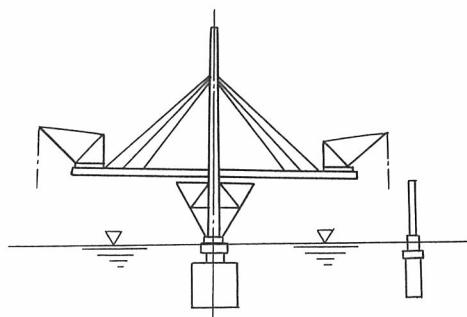


図-3.7 バランシング工法の例

図-3.7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ことから純粋な張出し架設の実施例は表-3.1に示される数橋がある。

3) ステージング工法（ジャッキアップダウン工法との併用）

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、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、そして主桁を下降させる工法である。

(3) ケーブル

ケーブル架設は作業内容により次の3段階に分けられる。

- 1) ケーブルの張り渡し作業
- 2) 張力導入作業
- 3) 防食作業

このうち防食作業は予め防食被覆されたケーブルを使用する場合には不要である。

- 1) ケーブルの張り渡し作業

使用する機材により分類すると次のようになる。

a) 塔頂クレーンによる方法

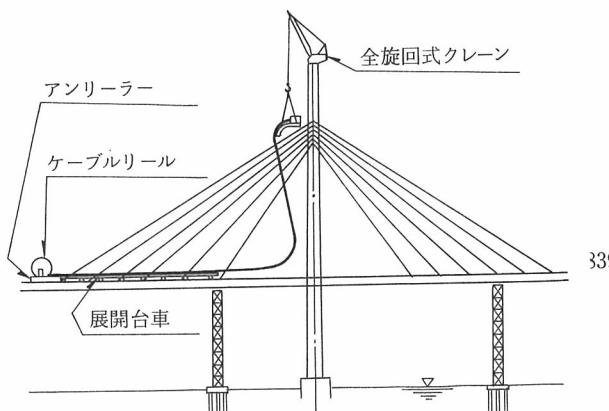
図-3.8に示すように塔頂にクレーンを設置し、これによりケーブルを引き上げた後、塔内に設けた引き込み装置を用いてケーブルを定着させる方法である。実施例が多く一般的な工法と考えられる。

b) 橋上クレーンによる方法

図-3.9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定着させる場合もある。

c) キャットウォークと橋上ワインチによる方法

図-3.10に示すように塔頂から桁端までキャットウォークを設置し、その上にケーブルを展開し、橋上ワインチで塔側に引き込む方法である。大断面のケーブル架設に用いられる工法で、スクリジング



339

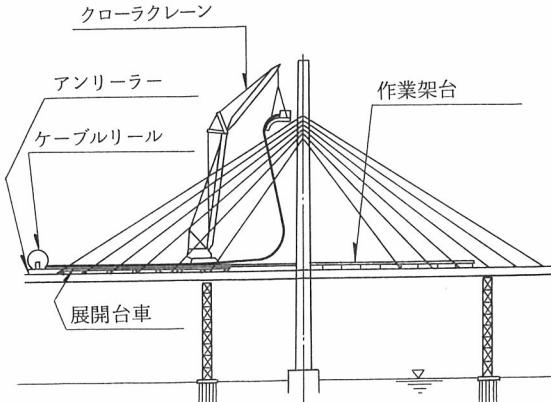


図-3.8 塔頂クレーンによるケーブル架設

図-3.9 橋上クレーンによるケーブル架設

やラッピングを必要とする作業の場合に用いられる工法である。

d) 仮ケーブルと橋上ワインチによる方法

塔頂から桁端まで仮ケーブルを張り渡し、ケーブルバンドを数箇所設けた後、吊上げ用天坪を取り付ける。その後、橋上ワインチでケーブルを吊り上げ塔側に引き込む方法である。自走クレーン車の能力が向上したため、あまり使用されなくなった。

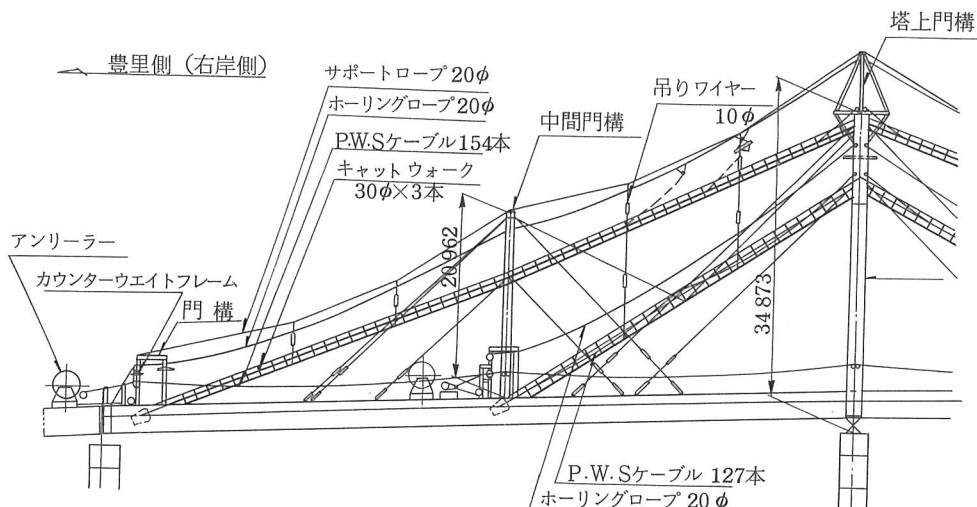


図-3.10 キャットウォークによるケーブル架設

2) 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（張力調整用墳材）が用いられる。以下張力を導入する方法とシムの厚さについて記述する。

a) ジャッキ設備による方法

図-3.11に示すように主桁または塔内部にジャッキ設備を設けた後、ケーブル先端をワインチで定着部近傍まで引き込む（1次引き込みという）。次に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る（2次引き込みという）。

この状態でシムを挿入しジャッキの力を解放して作業は完了する。実施例が多く、現在では一般的な工法である。

b) 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、ステージ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くてすむ。この工法は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く

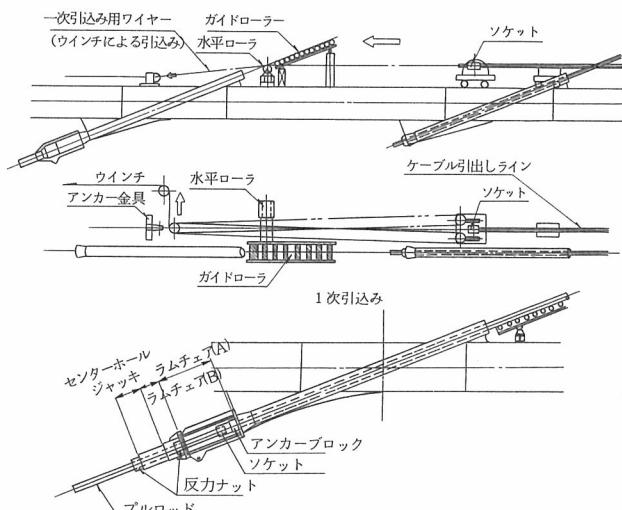


図-3.11 ジャッキによる張力導入

なった。

c) フローティングクレーンによる主桁のジャッキアップダウン方法

上述のステージングの代りにフローティングクレーンを利用した方法である。架橋地点の条件によりステージング工法が困難な場合に採用される。

d) 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。

e) 塔頂サドルのジャッキアップによる方法

今まで述べたのはすべて主桁の定着部を操作して張力導入を行う方法であるが、この方法は塔の定着部を操作して行うものである。

図-3.12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き（これによりケーブル引き込みが容易になる）ケーブルを取りつけた後、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、サドル受台が押し上げ力に対し充分な強度を持っているように設計出来るかどうかが問題となる。

f) シムの厚さ

シムの厚さについて今まで実施された例をあげると表-3.2に示すようになる。

3) 防食作業

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クリービングした後、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、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。セメントミルクの代りに特殊な材料を使うこともある。現在までにわが国で実施されたグラウト注入例を表-3.2に示す。

(4) 架設時の耐風対策および耐震対策

斜張橋は、その規模と架設工法によっては、完成状態に比べて架設時の耐風安定性、耐震性が悪くなる場合がある。そのため架設工法が決定したら、架設時の耐風対策、耐震対策を十分検討し対策案を立案しなければならない。

特に塔については吊橋の主塔と同じように架設時の独立状態で耐風対策が必要となる場合が多く、仮設備としてスライディングブロック、またはTMDを用いて耐風安定性を高めたり、空力的な対策を用いそれをそのまま完成系に用いた例もある。また耐震対策には耐震用ステージングを用い地震時の横力をステージングに取らせた例もある。

(5) その他の

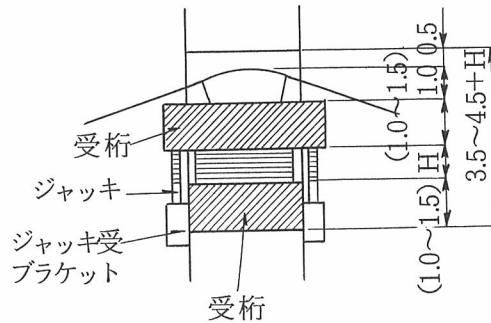


図-3.12 塔頂サドルのジャッキアップ

表-3.2 PE管ケーブルを使用したケーブル例とシム調整量

橋名 ①	竣工年 ②	所在地 ③	面数 ④	形式 ケーブル段数 ⑤	ケーブル構造形式 本筋数 ⑥	材 ⑦	材 ⑧	材 ⑨	繊維 繊線 ⑩	定着構造 ⑪	被覆 ⑫	防食方 法 ⑬	注入剤 ⑭	シム調整量 標準シム量 mm ⑮	シム調整可能量 mm ⑯	ソケット外径 余裕量 mm ⑰
1 藤戸橋・日の浦橋	1980	相生市	2	7アン	3	1	PC鋼線	φ7	133	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	60	±60	40~70	
2 高梨大橋	1984	鳥棲県	2	7アン	6	1	PC鋼線	φ15.2	19	HiAm	PE管, アルミニカバー	ノングラウト	60,80	-60~-80,	-80~-100	
3 名港西大橋	1985	名古屋市	2	7アン	12	1	重鉛メッキ鋼線	φ5	379	HiAm	亜鉛メッキ, ポリエスチル焼付, PE管, グラウト	セメントミルク	100	±50	30~60	
4 秋父橋	1985	埼玉県	1	7アン	6(4)	1	PC鋼線	φ7	409	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	100,400	(±38~108)	10~17.5	
5 かつしかハーブ橋	1987	東京都	1	7アン	17+7	1	PC鋼線	φ7	313	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	100 ~ 140	±60~100	40	
6 鳥飼仁和寺橋	1987	大阪府	1	7アン	8	1	PC鋼線	φ7	421	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	50	±50	10	
7 弥栄大橋	1987	山口-広島	2	7アン	6(2)	1	PC鋼線	φ7	301	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	55	(±60t)	10	
8 横石島橋	1988	本四Dルート	2	7アン	11	2	重鉛メッキ鋼線	φ7	227	HiAm	亜鉛メッキ, PE管, グラウト	ポリアラジエン樹脂	50	+150	10	
9 岩黒島橋	1988	本四Dルート	2	7アン	11	2	重鉛メッキ鋼線	φ7	227	HiAm	亜鉛メッキ, PE管, グラウト	ポリアラジエン樹脂	50	+150	10	
10 蒲津大橋	1988	福岡市	1	7アン	13	1	PC鋼線	φ7	241	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	50	±50	10~15	
11 十勝中央大橋	1989	北海道	2	7アン	7	1	PC鋼線	φ7	301	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	50	±50	25	
12 安治川橋梁	1989	大阪市	2	7アン	9	1	PC鋼線	φ7	349	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	130 ~ 180	±80~130	30	
13 音原城北大橋	1989	大阪市	2	7アン	11	2	重鉛メッキ鋼線	φ7.11	163	HiAm, NSソケット	亜鉛メッキ, PE被覆	ノングラウト	~100	±80~100	20	
14 横浜ベイブリッジ	1989	横浜市	2	7アン	11	2	重鉛メッキ鋼線	φ7	421	NSソケット	亜鉛メッキ, PE被覆	ノングラウト	150	±150	10	
15 花畔大橋	1990	北海道	1	ハーフ	11	1	PC鋼線	φ7	499	HiAm	PE管, グラウト	セメントミルク	60 ~ 100	±40~60	40	
16 幸魂大橋	工事中	埼玉県	1	7アン	7	2	重鉛メッキ鋼線	φ7	397	HiAm	亜鉛メッキ, PE被覆	ノングラウト	100	±100	45.0~67.5	
17 生口橋	工事中	因島市	2	7アン	14	1	重鉛メッキ鋼線	φ7	241	HiAm, NSソケット	亜鉛メッキ, PE被覆	ノングラウト	85 ~ 110	±60~±85	30~40	
18 東神戸大橋	工事中	神戸市	2	ハーフ	12	1	重鉛メッキ鋼線	φ7	301	HiAm	亜鉛メッキ, PE被覆	ノングラウト	150	±100	50	

長大橋斜張橋の塔基部は橋脚に固定支持されるのが多い。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 ペデスタル方式

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。ただし他の方法に比べて工期は長い。

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安治川橋梁、東神戸大橋はこの例である。

③はペデスタルフレームをまず据付けて②の方式でコンクリートを密着させ、ペデスタルフレームの上に塔基部を据付けるものである。

3.3 現場施工管理

3.3.1 概要

斜張橋の現場施工においては、品質管理として、橋体形状・ケーブル張力および橋体応力の管理が特に重要な項目と考えられている。これは主桁や塔の形状・応力・分布を、ケーブル張力を調整することによって改善できるという、斜張橋形式の自由度の高さに起因している。

このような構造特性は、斜張橋に限らず、ケーブルを主構造部材として用いるニールセン系橋梁や、吊橋にも共通に見られるものである。これらの橋梁形式は、近年になって設計技術のうえで長足の進歩を遂げているが、現場施工においてもより合理的な管理手法が求められるようになった。その結果、コンピュータによる解析技術や、各種の測定技術を駆使した管理手法を適用する例も増えている。

3.3.2 形状管理と応力管理

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-3.13に示すものが考えられる。また、架設時の主要な形状および応力管理項目としては、表-3.3に示すようなものが考えられる。現場施工においては、通常各架設段階ごとにこれら形状寸法や作用応力の測定が行われる。

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も含まれているから、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。したがって、斜張橋における形状管理とは、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、許容誤差内の合理的な最終形状を実現させるための指針を与える

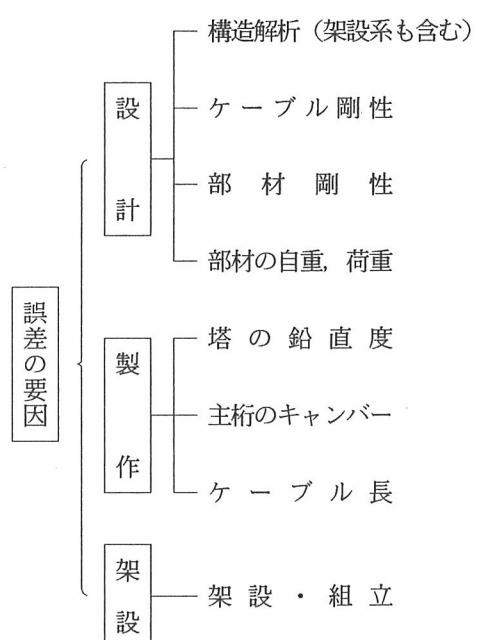


図-3.13 誤差の要因

作業と位置付けることができる。

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、各架設段階を通じて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ジ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。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。

3.3.3 形状および応力管理の手法

(1) 架設系の構造解析による構造挙動の把握

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。コンピュータの普及が十分でなかった初期の Strömsund 橋においても、特に厳密なモデルを用いてこれら管理情報を得たことが報告されており⁶⁾、これ以降の斜張橋の架設においても綿密な架設系解析が行われている。また、近年の支間長の増大に伴い、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幾何学的非線形解析手法が一般的に用いられている。

(2) 変形と応力の測定技術

1) ケーブル張力の測定

ケーブルの引き込みには一般に油圧ジャッキが用いられることが多いが、Norderelbe 橋¹⁰⁾などでは、ジャッキ圧力をケーブル張力として測定していた。この方法は張力の導入と同時に、その測定が可能であり簡便であるが、その反面精度が低く、隨時キャリブレーションが必要となる。そのため、現在では高い精度を要求される場合には用いられず、補助的な測定法となっている。

ロードセルやひずみゲージによる直接測定法は初期の斜張橋から現在のものに至るまで用いられている。これらは高い精度を期待できる測定法であるが、測定に際しては基準値を慎重に設定する必要があり、またひずみゲージの場合には適用できるケーブルが限定される。最近では、かもめ大橋¹¹⁾、新大橋¹²⁾などにおいて、他の測定法と併用し、測定値のキャリブレーション値に用いられている。

ケーブルのサグから張力を求める方法も初期の斜張橋から近年のものに至るまで、主に大断面ケーブルの場合に用いられている。Leverkusen 橋¹³⁾では複数ストランド形式のケーブルを用いているが、最初のストランドについてのみ張力管理を行い、その後のストランドはサグ合わせとする方法を採用している。しかしながら、この方法は一般にサグの測定の際に高所作業を必要とすることや、十分な精度が期待できないなどの欠点のため、最近の斜張橋の架設では用いられていない。

ケーブルの調和振動から張力を推定する方法は、St.Florent 橋¹⁴⁾で用いられた。この方法は振動波形の測定技術の進歩とともに発展し、さらに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り、簡便な手法ながら良好な精度で測定が可能となり¹⁵⁾、現在では最も一般的な測定方法となっ

表-3.3 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
応力管理	ケーブル張力	圧力変換器, ロードセル, ひずみゲージ 加速度計
	ステージング反力	圧力変換器, 变位計, ロードセル
	橋体応力	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

ている。従来の振動数の測定には、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振動波形データを採取するために、取扱いが簡便で廉価な変位計を用いている。

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求め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。かもめ大橋や新大橋の施工に際しては、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、かつしかハーブ橋¹⁶⁾、鳥飼仁和寺大橋¹⁷⁾など、最近の斜張橋の架設では、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。ケーブル張力調整における誤差の許容値は、斜張橋の工事ごとに定められているのが実情であり、現在のところ一般的な基準はない。この誤差の許容値は、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、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、架設工程にも多大の影響を及ぼすことになる。また、製作精度や死荷重の見積り誤差、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%以内。
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	振動法で張力管理を行い、±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	1981	架設時解析結果との誤差は±5%以内で管理できた。
Luling	1982	発注者側の仕様書により、張力誤差を±5%以内と定めた。
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%を誤差許容値に設定した。

2) 主桁と塔の形状測定

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、最近では光波測定も多用されている。しかしながら、橋梁の長大化に伴う測定作業の長期化、測定距離の増大に対して、現場条件に左右されない簡便な方法が開発されている。

たとえば、形状管理の主要項目である主桁のキャンバー測定において、樋石島橋²⁴⁾、岩黒島橋、横浜

ベイブリッジにおいては、連通管の原理を応用している。すなわち、橋軸に沿って設置したパイプの中に液体を封入し、その表面の変動で高さの変化を測定するものである。さらに横浜ベイブリッジでは、連通管の液面変化の探知技術を組合わせることにより、多数のキャンバー値の自動測定を可能にしている。

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。

3) ケーブルおよび橋体の温度測定

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合が多い。

また実際の測定現場では、測定位置が広範囲に分散するので、最近では測定とデータ収集をパーソナルコンピュータの自動制御によって行う例が増えている。

4) 橋体応力と反力の測定

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ではない。また、反力の測定もステージングなど仮設備の安全確認が主要な目的である。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。

(3) 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、キャンバ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前提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。最近では、図-3.14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ている。

ケーブル長の調整を実施する段階としては次の2種類の方法が考えられる。

- 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

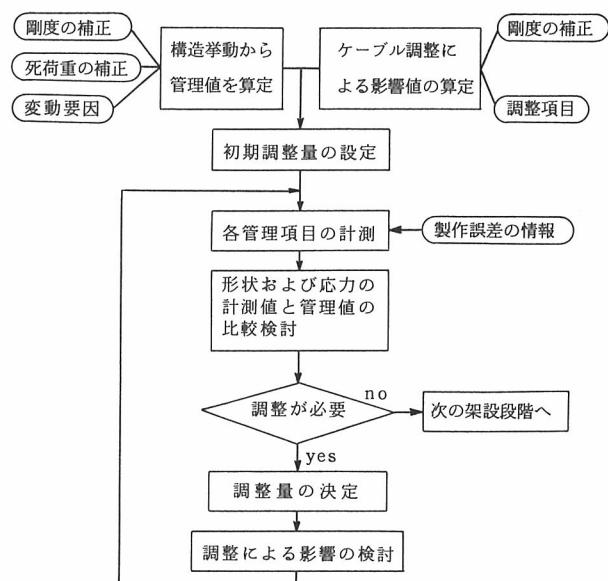


図-3.14 現場施工管理システム

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²⁷⁾や Friedrich Ebert 橋²⁸⁾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、ステージ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。Jülicher Straße 橋²⁹⁾や摩耶大橋³⁰⁾、豊里大橋³¹⁾、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³¹⁾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、測定誤差の介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。すなわち、斜張橋の設計時には、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³²⁾においても同様な管理がなされている。

一方、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の算定法は、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。これについては、最適化手法のいくつかがこれまでに提案され、実際の現場施工に適用されているが、これらはほぼ以下のような考え方に基づいている。川崎橋³³⁾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³⁴⁾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、キャンバ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³⁵⁾。この方法は、その後かつ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、主桁のキャンバ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。

(4) 管理システムの自動化

最近では、コンピュータの小形化・高性能化により図-3.15に示すようなシステムによる管理手法が

適用されつつある。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などを目的としたものである。このような新しい施工管理システムは、世界最大級の名港西大橋、櫃石島橋、岩黒島橋、横浜ベイブリッジ、東神戸大橋などに適用され、施工期間の短縮や精度の向上に寄与している。

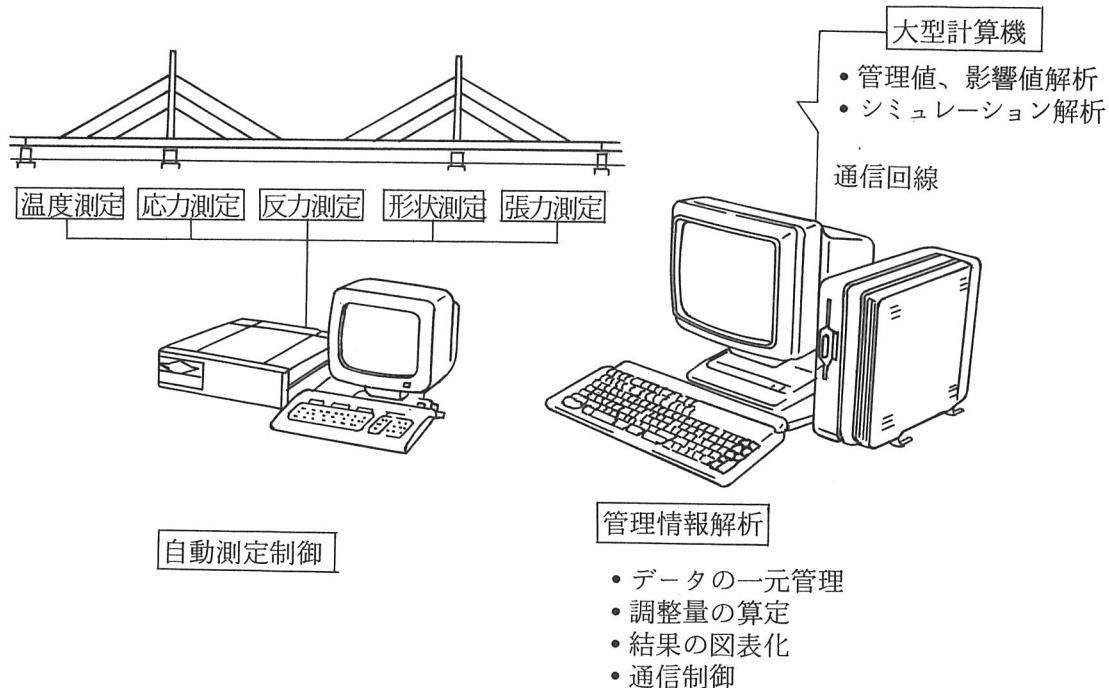


図-3.15 形状・応力管理システム

3.3.4 今後の傾向

これまでに示したように、架設精度の向上を目的とした最近の形状および応力管理手法は、構造解析技術や末端の測定技術に至るまで、めざましい変革を示している。架設現場という限定された設備と時間的な制約を克服するため、今後さらに技術開発が進められるものと考えられる。

技術開発の方向としては、測定および解析計算の作業性向上が期待される。すなわち、一般に夜間作業となる測定および調整を、より迅速にかつ安全に行うために、測定およびデータ収集の自動化、遠隔操作による高所作業の回避などの実現が望まれる。また、コンピュータの演算速度向上により、架設現場においても、現在の大型計算機を用いる場合と同様に、より忠実な構造モデルを使用した解析が行えるようになれば、管理作業は大いに軽減されると考えられる。

現場施工管理のもうひとつの方向として、景観を配慮した中小橋梁や歩道橋などに採用される斜張橋に対して、高度な測定、解析を必要としない一般橋梁と同程度の架設技術で施工可能な、より簡便な管理技術の研究開発が望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：斜張橋資料集成，'76.2
- 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，'82.8
- 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，'70.12
- 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，'84.3
- 5) 中谷、畠中 他：安治川橋梁の架設・橋梁と基礎，'88.5
- 6) H.J. Ernst : Montage eines seilverspannten Balkens im Groß Brückenbau, Der Stahlbau 25, Heft 5, pp.101 ~ 108, '56.5

- 7) 中野, 川人: 名港西大橋の施工(下), 橋梁と基礎, '85.5
- 8) 西岡, 宮本, 片山, 高田, 西, 小泉: 本州四国連絡橋・櫃石島橋の架設精度管理と架設時振動試験, 川田技報, '88.1
- 9) 銭広, 石倉, 竹中, 滝口: 岩黒島橋架設工事報告, 横河橋梁技報, '88.1
- 10) H.K. Havemann, G. Freudenberg: Die Brücke über die Norderelbe im Zuge der Bundesautobahn Südliche Umgehung Hamburg Teil-IV: Bauausführung der Stahlernen Überbauten, Der Stahlbau 32, Heft 10, pp.310 ~ 317, '63.10
- 11) 石岡, 田辺, 西島: かもめ大橋, 三菱重工技報, '77.5
- 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, '78.1
- 13) R. Schumann, A. Fahlbusch: Die Bundesautobahnbrücke über den Rhein Bei Leverkusen Baudurchführung des stählernen Überbau, Der Stahlbau 39, Heft 4, pp.97 ~ 105, '70.4
- 14) Le Pont Suspendu a' Haubans de Saint Florent-Le Vieil, Travaux 50, pp.756 ~ 766, '68
- 15) 新家, 広中, 頭井, 西村: 振動法によるケーブル張力の実用算定式について, 土木学会論文報告集, 第294号, '80.2
- 16) 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, '86.12
- 17) 牧野, 桑田, 柴田, 花岡: 淀川橋梁(太径ケーブル斜張橋)の架設, 橋梁と基礎, '87.5
- 18) 松浦, 横山, 田外: 六甲大橋上部工の設計と架設, 土木学会誌, '76.9
- 19) 大阪市土木局: 川崎橋工事報告書, '79.3
- 20) 丹羽: 共通アンカーを持つ地盤定着式斜張橋, 橋梁と基礎, '82.6
- 21) N. Hajdin, : Straßenbrücke "SLOBODA" über die Donau in Novi Sad, Der Stahlbau 52, '83.4
- 22) 成瀬, 大池, 森安, 中村: ミシシッピーリバー橋のケーブル工事, 橋梁と基礎, '84.9
- 23) 田中, 林, 橋本: 弥栄大橋(5径間連続鋼斜張橋)の設計・施工, 橋梁, '85.10
- 24) 金沢, 佐藤, 武山: 櫃石島橋の形状管理, 本四技報, '87.4
- 25) 鳴田, 大久保, 藤澤, 五十畑, 鞆: 複合斜張橋(秩父橋)上部工の施工, 橋梁と基礎, '85.12
- 26) E. Beyr, : Nordbrücke Düsseldorf I-Teil. Gesamtanlage und Montage der neuen Rheinbrücke, Der Stahlbau 27, Heft 1, pp.1 ~ 6, '58.1
- 27) J. Schöttgen und L. Wintergerst: Die Straßenbrücke über den Rhein bei Maxau, Der Stahlbau 37, Heft 2, pp.50 ~ 57, '68.2
- 28) H. Thul: Die Friedrich-Ebert-Brücke über den Rhein in Bonn, Der Bauingenieur 40, Heft 9, pp.327 ~ 333, '71.9
- 29) E. Beyer, H.J. Ernst: Brücke Jülicher Straße in Düsseldorf, Der Bauingenieur 39, Heft 12, pp.469 ~ 477, '64.12
- 30) 毛利, 岡田, 池田, 中野: 摩耶大橋の設計と施工, 土木学会誌, '67.4
- 31) 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, '82.2
- 32) 金森, 村上, 竹居田: 十勝中央大橋上部工の設計・施工, 橋梁, '88.1
- 33) 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 '79.8
- 34) 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, '86
- 35) 藤澤: 斜張橋架設時のシム量決定方法, 橋梁と基礎, '84.9 および, '84.10