

3. 吊橋の製作

3.1 ケーブル

3.1.1 材料の変遷

ケーブル材料としては、古くは藤や蔓など植物性繊維をケーブルに用いた原始的な吊橋に始まっている。吊橋のケーブルに本格的に鉄が用いられたのは、引張りに強い鉄材料が工業的に生産され始めた18世紀以降である。

初の錬鉄チェーンをケーブルに用いた吊橋としてはヨーロッパが初めであり、1734年ドイツのOder河に架けられたGlorywitz橋と1741年イギリスのTees川に架けられたWinch橋を挙げることができる。

アメリカにおいては、近代吊橋の初めとなる吊橋がFinleyによって1801年に架けられたが、ケーブルには鉄のチェーンを、吊材には鉄棒を用いた程度であり、現代の吊橋とは大きな隔りがあった。

一方イギリスにおいては産業革命により、船舶のいかり用チェーンの製造が盛んで、これを利用してケーブルに用いた画期的な業績は、19世紀初頭の1811年のイギリスのBrownによるアイバー・チェーンの開発である。図-3.1.1にBrownのアイバーチェーンを示す。彼はこれを用いていくつかの吊橋を架けているが、1820年のUnion橋が有名である。また、Telfordによって架けられたMenai Straits橋も錬鉄の細長い板を順次にピンで継いだチェーンを用いた点では有名である。

鉄線を用いた吊橋はるか以前にもあったといわれているが、今日の主役をなすワイヤーケーブルが登場してきたのは、19世紀初頭である。アメリカではWhiteが径3/8 inの真ちゅう製ワイヤーを束ねたケーブルを使って長さ124 mの人道橋を架け、チェーンケーブルの流行したイギリスにおいても1816年に最初のワイヤーケーブル吊橋Galashiels橋が架けられている。しかし、ワイヤーケーブルにより熱心であったのは、イギリスおよびアメリカに刺激を受けたヨーロッパ大陸においてであり、スイス人のDufourは1823年ジュネーブに90本の平行なワイヤーを

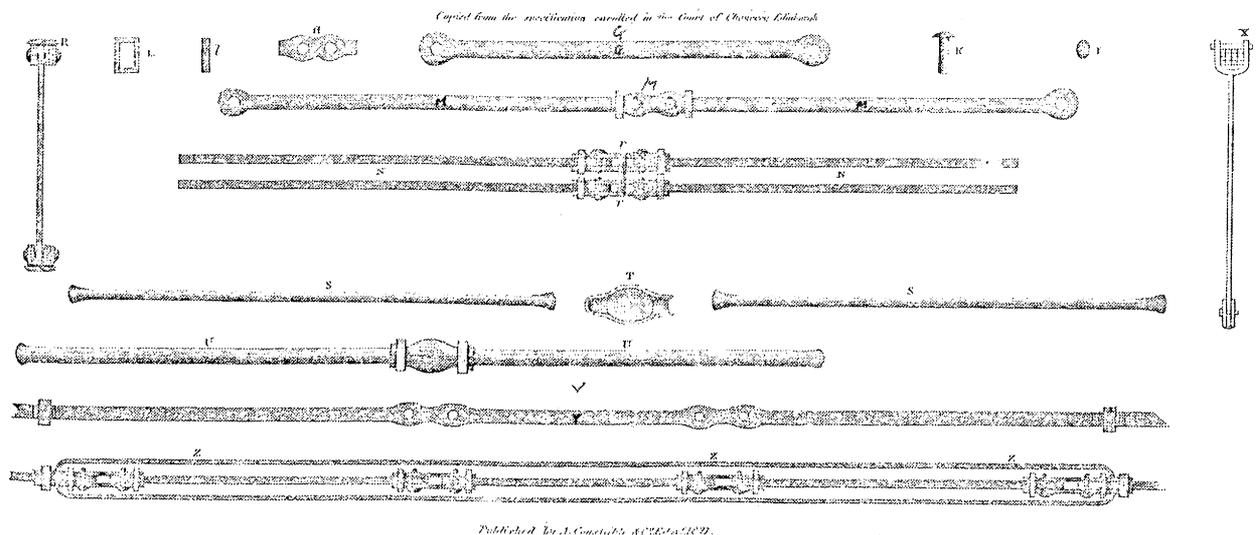


図-3.1.1 Brownのアイバーチェーン(川田忠樹：吊橋の文化史)

所々で束にしたケーブルを用いた吊橋を、翌年フランスの Seguin 兄弟は Rhône 川に St. Antoine 橋を完成させた。St. Antoine 橋のケーブルは今でいう平行線ストランドによるケーブルの簡単なもので、片側当り径 3.4 mm のワイヤー 112 本より成るストランド 6 本で構成され、定着部にはシンプルが用いられたという。また、この吊橋に用いられたケーブルは焼きなまし鉄線を巻き、その上に数回のワニス塗装が施されたものであった。

しかし、近代のワイヤーケーブル吊橋の礎を築いたのは、John Roebling である。ドイツからアメリカに移住し、ワイヤー製造業に携わっていた彼は 1841 年アメリカで平行線ストランドによるケーブルの空中架線法に関する特許をとり、1855 年の Niagara の鉄道吊橋をはじめとし、Brooklyn 橋から始まる長大吊橋への道を開いたといえる。Brooklyn 橋は、ケーブルに冷間引抜鋼線によるワイヤーを使用した最初の吊橋であり、その鋼線は亜鉛メッキが施されていた^{8)~11)}。

それ以降、アメリカの吊橋のケーブルはほとんどが平行線ストランドによるケーブルになったが、ヨーロッパでは 1964 年に建設されたイギリスの Forth Road 橋に初めて平行線ストランドによるケーブルが採用されるまでは、主としてワイヤーロープケーブルが用いられてきた。

また、平行線ストランドによるケーブルのプレハブ化の試みとして、1965 年アメリカの Bethlehem Steel 社で開発されたプレハブストランド工法は、1969 年に建設された Newport 橋に採用され、平行線ストランドに新しい分野を開いたことで特筆できる。

以上のように、ケーブルの材料は錬鉄、鋼へと進歩してきたが、現在のスパイラルロープ・ストランドロープおよび平行線ストランドによるケーブルになるまでには、鉄のチェーンをつなぎ合わせたもの、鉄線あるいは錬鉄線を束ねたもの、錬鉄の平鋼をピンでつなぎ合わせたもの、錬鉄線をより合わせたロープなど幾多の変遷があった。

一方わが国においては、1870 年に皇居内に建設された橋長 73 m の吊橋（山里の吊橋）が最初とされ、ケーブルは錬鉄製のワイヤーを平行に束ねたものを使用している。その後、一部の地方（富山県）で「鎖橋」と呼ばれる鎖を用いた吊橋が架けられたこともあったが、次第にワイヤーロープを用いた中小吊橋が全国に普及していった。その中で特筆すべき吊橋としては、隅田川に架けられた清洲橋があり、Rhine 河に架かる西ドイツ Köln の吊橋を参考とし、ケーブルの代わりにその当時としては高張力鋼である 50 キロ級のデュコール鋼の吊鎖（アイバー）が使用されている。

その後ケーブルにスパイラルロープの採用が見られ、1957 年の大渡橋に初めてスパイラルロープが採用され、わが国初の本格的吊橋である若戸大橋にもスパイラルロープが用いられるに至った。

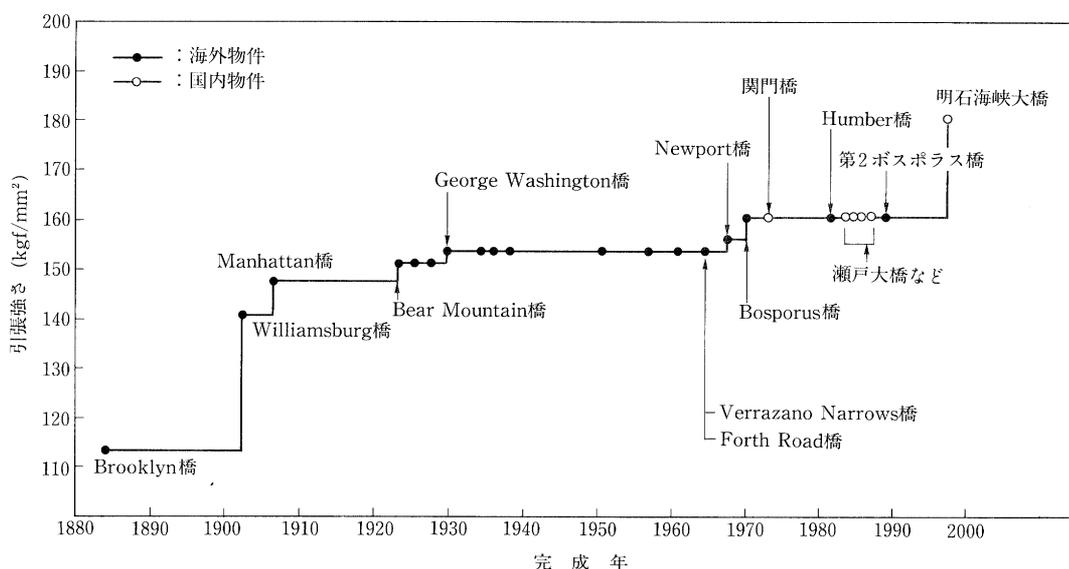


図-3.1.2 平行線ストランド用素線の引張強さ

平行線ストランドによるケーブルについては、長大吊橋の建設計画に対応して昭和30年代後半より平行線ストランドの製造・架線技術の調査および試作研究が行われ、研究成果と技術の確認をするため、初のAS工法を採用した1967年の金谷橋、初のPS工法を採用した1968年の金比羅橋の建設が行われ、技術習得と施工への確信をもてるようになった。これらの実績により本格的に平行線ストランドが使用された関門橋を経て本州四国連絡橋へと急速な進歩を遂げてきた。

今日、吊橋に用いられているケーブルは、中小径間ではスパイラルロープが、長径間では平行線ストランドが一般的であるが、より長径間の吊橋を目指して高強度のケーブル材料の採用が検討されるようになってきている。

図-3.1.2にBrooklyn橋以降の平行線ストランド用素線の引張強さの変遷を示す⁷⁾。

3.1.2 製作方法の変遷¹²⁾

ワイヤーがいつ頃から造られたかを調べてみると、金属を細い線のようにしたワイヤーの起源は非常に古く、エジプトの初期の僧侶の正装の飾りとして、金のワイヤーが用いられたことが、紀元前1700年の記録にある。これらは加工の容易な軟金属（金、銀、ブロンズ）に限られていたようで、金属の棒または板を細かく切ったものを、ハンマーでたたいて丸く伸ばしたもので、Wire Smithなる名前で呼ばれていた。現在のような伸線すなわち線を引く方法は、その後考えられたものである。

鉄を伸線するようになったのは、1~4世紀の間で、当時鎧の下着として大量のワイヤーが必要になったためである。材料としての鉄は焼きなまして軟らかくしたものを、人力によって線引きが行われた。水力を使って機械的に作るようになったのは、14世紀の中頃、ドイツのNürnbergのRudolphが初めてであると言われている。

その後、1675年AltenaのJohannが潤滑剤を使って線とダイス間の摩擦を減らし、初めて鋼線の線引きを行った記録があり、これまで鉄に限られていたものが一歩前進した。

ワイヤーロープに使用する高強度なワイヤーは、線引き前にパテントイング (Patenting) なる熱処理を行うことにより、製作することができるようになっている。この方法は1857年、イギリスのHorsfallが特許を取り、あまりにも画期的なものであったので、今日でも引き続きこの熱処理が行われパテントイングと呼ばれている。

今日、平行線ストランドと対比されるスパイラルロープ・ストランドロープのうち、ストランドロープの製造の試みはかなり古くからなされていたが、1834年にドイツのAlbertにより発明されたといわれている。Albertが製造したロープは、4本線をストランドに撚った後、このストランド3本をロープに撚った12本の焼きなまし鉄線のロープであり、これをドイツの鋳山の立坑に使用した結果、その優秀さが立証され、ワイヤーロープの製造が各地で行われるようになった。さらに、BessemerとMartinの製鋼法およびHorsfallのパテントイング法の発明により、それまで30~40 kgf/mm²の引張強さしかなかった鉄線に代わり、引張強さ120 kgf/mm²程度の鋼線が用いられるようになり、ストランドロープはその後種々の用途に利用されるようになった。

3.1.3 現在の製作方法^{12)~15), 24), 25)}

現代の長大吊橋はほとんど平行線ケーブルが用いられている。平行線ケーブルはその架設工法によりAS工法、PS工法に大別されている。AS工法は現場でストランドを形成していく方法であり、PS工法は工場で作成したストランドを現場架設する工法である。いずれの工法でもストランドを構成する素線としては直径5mm程度の亜鉛メッキ鋼線が用いられている。日本においては関門橋以来160 kgf/mm²級の引張強度を有するものが用いられてきたが、明石海峡大橋用では180 kgf/mm²級の高強度亜鉛メッキ鋼線が開発された。

鋼線の引張強度は線材の化学成分、熱処理、冷間引抜きによる伸線を併用することによって得られている。

(1) 製作工程

長大吊橋の主ケーブルに用いられる平行線ケーブル用亜鉛メッキ鋼線の製作については、本四公団規格 (HBS G

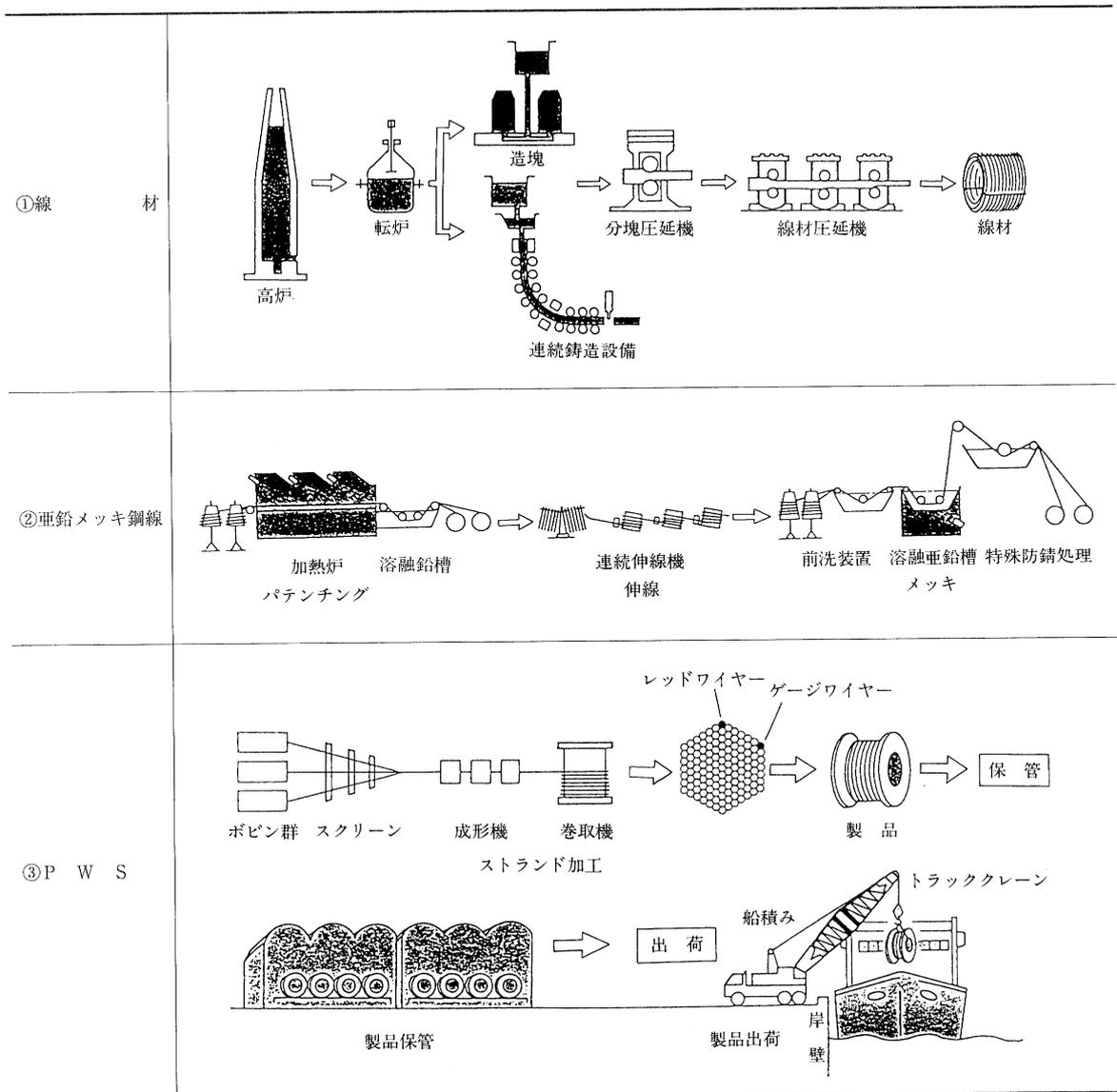


図-3.1.3 PWSの製作工程

3501) に規定されている。図-3.1.3 は平行線ストランドの製作工程を表したものであるが長大吊橋では、数千～数万トンのワイヤーが必要になる。

1) 線材の製作

亜鉛メッキ鋼線に用いられる素材は、JIS G 3502 のピアノ線材または JIS G 3506 の硬鋼線材が用いられている。線材は製鋼・造塊工程を経て一辺 115 mm～155 mm 程度の角形に圧延された鋼片（ビレット）を線材圧延設備で直径 10 mm 程度に圧延されたもので、炭素量 0.8% 前後の高炭素鋼である。

2) 亜鉛メッキ鋼線の製作

製鉄所で製作された線材は二次加工メーカーによって、熱処理（パテンティング）・伸線・亜鉛メッキ等の工程を経て、高品質の亜鉛メッキ鋼線に製作される。

パテンティングは熱間で圧延された線材の組織を微細で均一な組織に変えて強さと靱性を与え、伸線加工に最も適した状態にする重要な工程である。これは一種の焼入・焼戻しで、一般には焼入炉で約 960℃ に加熱し、一定時間保

持した後、約 530℃ の鉛槽に入れる鉛パテンティングが用いられている。熱処理により発生した線材表面の酸化物（スケール）を酸洗いにより除去した後、伸線加工のための潤滑皮膜処理（コーティング）を行い伸線機にかけられる。

伸線は一種の冷間加工であり、線材を数回ダイスに通して冷間で徐々に細く引き抜き、素線としての強靱性を増加させる工程である。伸線することにより、パテンティングによって得られた微少な粒状組織は繊維状に発達し強度と靱性が増加する。平行線ケーブル用の鋼線はダイス通し回数 6~7 回とし、総断面積減少率（総減面率）は 80% 程度としている。一般にはこの作業は連続伸線機により行われ、メッキ加工後の線径および強度を確保するための所定の線径・強度に仕上げられる。

メッキ加工は鋼線の耐食性を維持するために行う鋼線製作の最終工程である。伸線を完了した素線は約 450℃ の熔融亜鉛メッキ槽中を通してメッキが行われる。このメッキの付着量は 300 g/m^2 以上あり、線径は伸線加工後より 0.1 mm 程度増加する。

3) 平行線ストランドの製作

PS 工法で用いられるストランドは亜鉛メッキ鋼線を用いてストランド工場にて製作される。

ストランド工場に運ばれたワイヤーは所定の素線本数を配列板を通して六角形に集束される。このとき六角形の頂点には、ストランドの長さ管理のためのゲージワイヤーおよび着色ワイヤーが配置される。ゲージワイヤーの製作法にはワイヤーを全長引き出して測長する展開測長方式と、ワイヤーに磁気マークをつけながら尺取り方式で検出測長する着磁式測長方式があるが、最近では着磁式測長方式が用いられている。

ストランドの中間部には形状保持のためシージングテープおよびストランドクランプが施される。ストランドの両端部はソケット止め加工される。ソケット止めは円錐状の空洞を持ったソケット内でワイヤーをほうき状に開いた後、ソケットメタルを鑄込むことにより行われている。通常、吊橋用のストランドはソケットメタルとして 98%Zn-2%Cu 合金を用い、鑄込み温度は $460 \pm 10^\circ\text{C}$ である。またソケットメタルの冷却後、ソケット背面よりプレス荷重を数分間作用させプレコンプレッションを行っている（図-3.1.4）。

ストランドはリールに巻き取り架設現場まで輸送される。南備讃瀬戸大橋のストランドでは全長約 1780 m、1 ストランドの重量は 36.5 t であり、胴径 1.8 m ・ 幅 3 m のリールが用いられた（写真-3.1.1）。

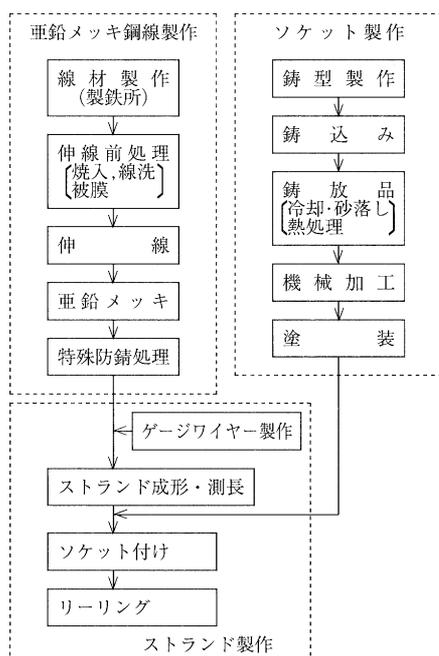


図-3.1.4 ケーブルの製作フロー

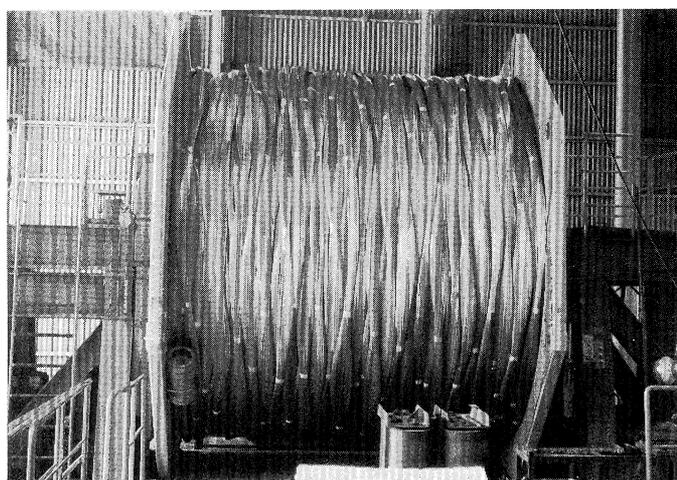


写真-3.1.1 ストランドの巻き取り状況

4) スパイラルロープおよびストランドロープの製作

スパイラルロープは心線の周囲に数本～百数十本の素線を多層に撚ったもので、中規模吊橋のケーブルへの適用例が多い。また特に外周に異形線をかみ合わせて撚り上げたものはロックドコイルロープと呼ばれている。ストランドロープは心線の周囲に所定数の素線を撚り合わせたストランドをさらに撚り合わせたもので、長大吊橋でもハンガーロープに使用されている。

これらのストランドの製作はロープの構成に応じて必要な数の素線をストランダーにかけて心線のまわりに撚り合わせる。撚りの方向・ピッチ・構成などはロープの構成に応じて定め、撚りの状態が一様になるよう製作される。ストランドロープの場合さらに製網機により必要数のストランドを定まった方向に撚り合わせる。

わが国における長大吊橋のハンガーロープの製作は、本四公団規格（HBS G 3504）によっている。ハンガーロープは亜鉛メッキ鋼線を撚り線した後プレストレッシングを行い、測長・マーキングが行われている。一般にはある程度余裕を持たせて製作し、主ケーブル架設後の測量結果をもとに最終製作長を決めソケット付けを行っている。またハンガーロープは工場塗装が施される。表-3.1.1はハンガーロープの製作諸元の一例である。

表-3.1.1 ハンガーロープ製作諸元の例

橋名		項目	本数 (本)	長さ (m)	重量 (t)
下 津 井	瀬戸大橋	φ 68	224	19 030	390
		φ 74	60	620	15
北 備 讃	瀬戸大橋	φ 68	240	25 870	530
		φ 70	92	4 480	97
		φ 74	120	3 010	73
南 備 讃	瀬戸大橋	φ 68	368	37 650	772
		φ 74	116	2 050	50

5) ケーブル付属物の製作

ケーブル付属物としては、塔頂サドル、スプレーサドル、ケーブルバンドおよびソケットなどがある。これらは一体構造の鋳鋼品あるいは鋳鋼に鋼板を組立溶接して製作されている。瀬戸大橋の塔頂サドルでは、鋳鋼（SCW 49）の鞍部に厚肉鋼板（SM 50 B）のリップ、側板、底板を溶接で一体にしたハイブリッド構造が採用された。

サドル等の鋳造品は、凝固後の収縮を見込んだ木型の製作、内表面、肉厚交差部、リップとの溶接開先部に鋳造欠陥を発生させないことが重要である。また、厚肉鋼板と溶接組立されるものは、溶接性向上のため炭素当量を極力低くするとともに、リン、イオウなどの不純元素を少なくすることが必要である。ハイブリッド構造のサドル等で使用されている鋼板は極厚板（瀬戸大橋では $t = 60 \text{ mm} \sim 170 \text{ mm}$ ）であり、溶接変形の修正はほとんど不可能であるため、溶接変形の生じないように、溶接拘束力が小さくなるような組立手順を決定し溶接を行う。

鞍部等の機械加工にはNC大型横中ぐり盤、NCフライス盤が使用されている。

(2) 品質管理

ケーブルは吊橋にとって最も重要な構造部材であり、ワイヤーの製作誤差の及ぼす影響が大きいため、その製作にあたっては非常に厳しい品質管理が行われている。

わが国では関門橋以来、多くの生産実績を重ね線材からストランド集束に至る一貫した製造体制が確立されており、数万トンもの大ロットの製作においても品質・精度ともに安定した製品を供給可能になっている。

表-3.1.2に亜鉛メッキ鋼線の検査項目および品質検査結果の一例を示す。

表-3.1.2 亜鉛メッキ鋼線の品質管理項目と検査結果の例

項 目		橋 名		
		下津井瀬戸大橋 $d = 5.37 \text{ mm}$	北備讃瀬戸大橋 $d = 5.18 \text{ mm}$	南備讃瀬戸大橋 $d = 5.12 \text{ mm}$
線 径	測 定 数	26 674	34 330	38 470
	平 均 値	5.382	5.186	5.130
	標準偏差値	0.010	0.011	0.011
$d \pm 0.06 \text{ mm}$	測 定 数	26 674	34 330	38 470
	平 均 値	168.7	167.8	168.7
	標準偏差値	1.7	2.2	2.0
引張強さ 160~ 180 kg/mm ²	測 定 数	1 514	2 052	2 324
	平 均 値	135.4	135.3	136.5
	標準偏差値	1.6	1.9	1.5
耐 0.7% 力 118 kg/mm ² 以上	測 定 数	1 514	2 052	2 324
	平 均 値	6.64	6.74	6.63
	標準偏差値	0.41	0.37	0.39
伸 び 4.0 % 以上	測 定 数	757	1 026	1 169
	平 均 値	23.1	22.7	22.4
	標準偏差値	1.5	1.5	1.5
ねじり回数 14 回以上	測 定 数	757	1 026	1 169
	平 均 値	351.9	345.1	343.2
	標準偏差値	15.4	19.3	16.5
亜鉛メッキ 付 着 量 300 g/m ² 以上	測 定 数	757	823	1 169
	平 均 値	7.55	44.42	35.4
	標準偏差値	1.07	14.30	18.3
フ リ ー コ イ ル 径 4.0 m 以上	測 定 数	757	823	1 169
	平 均 値	7.55	44.42	35.4
	標準偏差値	1.07	14.30	18.3

3.2 主塔および補剛桁

3.2.1 鋼材の変遷

近代的な構造材料として鉄が使用されるようになったのは、決してそう古いことではない。17世紀の初頭、イギリスでDudleyによりコークスの使用が発見されるまでは、人類は鉄を大量に精錬する技術を知らず、したがって鉄は貴重品であった。しかもコークスが普及するには、イギリスでもさらに一世紀近くを要しており、ようやく18世紀に入って、1713年にDarbyが中西部イングランドのSevern河のほとり、Coalbrookdaleなる村で本格的に操業を開始した。

この村は、その後世界で最初の鉄の町として繁栄し、1779年には初代Darbyの孫、Darby IIIとWilkinsonによって、史上最初の鉄橋として有名なCoalbrookdale橋を完成させた。この橋は半円形のリブをもったアーチ橋で、約378tの鑄鉄（一部錬鉄）が使用されていた。

それまでの製鉄技術は、るつぽに可鍛鉄を入れ外部から加熱溶融し鑄鉄に変えるという、るつぽ法が用いられていたが、手工業的であった。また鑄鉄における靱性の欠如は、構造材料としては致命的欠陥であり、事故の続出したことが報じられている。

その後、1783年にCortがそれまでの木炭の代わりに石炭を使って攪拌式精錬法（バドル法）によって錬鉄を作ることに成功し、ようやく鑄鉄から錬鉄を生産することが可能になった。

錬鉄は引張力にも強く、熱して鍛造または圧延することが可能であったため、錬鉄の細長い板を順次にピンで継いだチェーンをケーブルとして用いた吊橋の建設や、その後の精錬技術の進歩とともに棒形や山形などの断面の材料に

表-3.2.1 鋼材の発展の発展

構造用鋼材の発達		海外の橋梁		日本の橋梁	
1750	<p>鋼鉄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ルツボ鋳鋼 (英) 	<p>・ Glorywitz 橋 (独) ……鋼鉄チェーン吊橋</p> <p>・ Winch 橋 (英) ……支間21mの鋼鉄チェーン吊橋</p>	<p>・ Coalbrookdale 橋 (英) ……支間30.5mの鋼鉄製アーチ橋</p> <p>・ Finley 型吊橋 (米) ……ケープルチェーンに鋼鉄使用</p> <p>・ Menai Straits 橋 (英) ……中央支間175mの鋼鉄使用吊橋</p> <p>・ 最初の本格的な鋼鉄橋 Glasgow (英)</p> <p>・ Britannia 橋 (英) ……鋼鉄使用箱桁橋</p> <p>・ Eads 橋 (米) ……アーチリブに鋼使用のアーチ橋 (中央支間158m)</p> <p>(ニューマチックケーソンによる橋脚建設)</p> <p>・ Ashtabula の橋 (米) の落下 ……鋼鉄橋はこの役用いられなくなる。</p> <p>・ Brooklyn 橋 (米) ……鋼線使用長径間吊橋 (中央支間486m)</p> <p>・ Forth 鉄道橋 (英) ……平桁鋼使用トラス橋 (中央支間521m)</p>	<p>・ くらがね橋 ・ 吉田橋 ……輸入鋼鉄橋</p> <p>・ 心斎橋 ・ 八幡橋 ……上弦材は鋼鉄、その他は鋼鉄のトラス橋</p> <p>・ 天竜川橋梁 ……ベッセマー鋼使用</p> <p>・ 石狩川道路橋 ……ベッセマー鋼使用</p>	
1800	<p>鋼</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ バトル練鋼 (英) 	<p>・ マルチン平鋼製鋼法 (仏)</p> <p>・ トーマス塩基性耐火材 (英)</p> <p>高炭素鋼</p>	<p>・ Zambesi 橋 (南ア) ……巨大鋼アーチ橋の始まり (中央支間150m)</p> <p>・ Manhattan 橋 (米) ……撓度理論により設計された最初の吊橋 (中央支間448m)</p> <p>・ Hell Gate 橋 (米) ……高炭素鋼使用アーチ橋 (中央支間298m)</p> <p>・ Quebec 橋 (カナダ) ……Ni鋼使用トラス橋 (中央支間549m)</p> <p>(架設途中部材の座屈発生)</p> <p>・ Benjamin Franklin 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間633m)</p> <p>・ Köln-Deutz 橋 (独) ……Ni, Cr鋼使用吊橋 (中央支間185m)</p> <p>・ George Washington 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間1067m)</p> <p>・ Bayonne 橋 (米) ……Ducol鋼使用アーチ橋 (中央支間504m)</p> <p>・ Oakland Bay 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間704m)</p> <p>・ Golden Gate 橋 (米) …… (中央支間1280m)</p>	<p>・ 北上山橋梁 ……Mn鋼使用</p> <p>・ 永代橋 ……Ducol鋼使用</p> <p>・ 清洲橋 ……Ducol鋼使用</p> <p>・ 旭橋 ……アーチのタイにCr-Cu鋼使用</p> <p>・ 田端大橋 ……全溶接構造橋梁</p>	
1850	<p>鋼鉄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ベッセマー製鋼法 (英) ・ マルチン平鋼製鋼法 (仏) ・ トーマス塩基性耐火材 (英) 高炭素鋼 	<p>・ 高炭素鋼</p> <p>・ 低合金鋼</p> <p>・ 溶接構造用鋼</p> <p>・ 鋼質高張力鋼</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	
1900	<p>鋼鉄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Ni鋼 (米) ・ Ni-Cr鋼 (独) ・ Mn鋼 (Ducol鋼) (英) ・ Cr-Cu鋼 	<p>・ 低合金鋼</p> <p>・ 溶接構造用鋼</p> <p>・ 鋼質高張力鋼</p>	<p>・ Benjamin Franklin 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間633m)</p> <p>・ Köln-Deutz 橋 (独) ……Ni, Cr鋼使用吊橋 (中央支間185m)</p> <p>・ George Washington 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間1067m)</p> <p>・ Bayonne 橋 (米) ……Ducol鋼使用アーチ橋 (中央支間504m)</p> <p>・ Oakland Bay 橋 (米) ……Ni鋼使用吊橋 (中央支間704m)</p> <p>・ Golden Gate 橋 (米) …… (中央支間1280m)</p>	<p>・ 北上山橋梁 ……Mn鋼使用</p> <p>・ 永代橋 ……Ducol鋼使用</p> <p>・ 清洲橋 ……Ducol鋼使用</p> <p>・ 旭橋 ……アーチのタイにCr-Cu鋼使用</p> <p>・ 田端大橋 ……全溶接構造橋梁</p>	
1920	<p>低合金鋼</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Si-Mn (St52) (独) ・ Cor-ten 鋼 (耐候性) (米) ・ 2-3% Ni鋼 (低温用) (米) 	<p>・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米)</p> <p>・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日)</p> <p>・ Si-Mn系の2H鋼 (日)</p> <p>・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日)</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	
1940	<p>低合金鋼</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米) ・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日) ・ Si-Mn系の2H鋼 (日) ・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日) 	<p>・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米)</p> <p>・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日)</p> <p>・ Si-Mn系の2H鋼 (日)</p> <p>・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日)</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	
1960	<p>低合金鋼</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米) ・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日) ・ Si-Mn系の2H鋼 (日) ・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日) 	<p>・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米)</p> <p>・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日)</p> <p>・ Si-Mn系の2H鋼 (日)</p> <p>・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日)</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	
1980	<p>鋼鉄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米) ・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日) ・ Si-Mn系の2H鋼 (日) ・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日) 	<p>・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米)</p> <p>・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日)</p> <p>・ Si-Mn系の2H鋼 (日)</p> <p>・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日)</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	
2000	<p>鋼鉄</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米) ・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日) ・ Si-Mn系の2H鋼 (日) ・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日) 	<p>・ 鋼質高張力鋼 (T-1) (米)</p> <p>・ 標準 Mn-V-Ti系高張力鋼 (日)</p> <p>・ Si-Mn系の2H鋼 (日)</p> <p>・ 析出硬化による非調質高張力鋼 (米) (日)</p>	<p>・ Tacoma Narrows 橋 (米) の落橋 ……以後空気力学の重要性認識</p> <p>・ Stromsund 橋 (スウェーデン) ……最初の近代鋼張橋</p> <p>・ 橋梁へのT-鋼の適用 (米) ……80キロ鋼使用橋</p> <p>・ コンピューターの進歩により高次不特定の橋梁の設計が可能となる。</p> <p>・ 高速道路橋 (米) ……耐候性鋼材使用</p> <p>・ Verrazano Narrows 橋 (米) ……中央支間1298mの吊橋</p> <p>・ Newport 橋 (米) ……初のプレハブ平行線ストランド工法による吊橋 (中央支間488m)</p> <p>・ Severn 橋 (英) ……流線形断面の吊橋 (中央支間985m)</p> <p>・ St. Nazaire 橋 (仏) ……中央支間404mの斜張橋</p> <p>・ New River Gorge 橋 (米) ……耐候性鋼による支間518mのアーチ橋</p> <p>・ Humber 橋 (英) ……中央支間1410mの吊橋</p> <p>・ Rama IX 橋 (タイ) ……中央支間450mの斜張橋</p> <p>・ Yangpu 橋 (中国) ……中央支間602mの斜張橋</p>	<p>・ 角川橋梁 ……高力ボルトを使用</p> <p>・ 相模大橋 ……52キロ鋼使用</p> <p>・ 木曽川橋梁 ……60キロ鋼使用</p>	

日本橋梁建設協会：鋼橋の施工にかかわる鋼材の知識 1993.12

熱間圧延することが可能になり、その結果として1850年にBritannia橋の建設を可能にした。

やがて、鑄鉄が駆逐され錬鉄の時代となった。

その後、1856年イギリスのBessemerがパドル法に代わって溶融中に空気を吹き込む製鉄法（転炉）により精錬することに成功した。さらに1865年ドイツのSiemensとMartinは平炉製鋼方法を実用化させ良質の鋼が安価に得られるようになった。この平炉製鋼法により1880年には圧延鋼を多量に生産するまでに至り、イギリスのForth鉄道橋は構造用鋼を多量に使用して1890年に開通した¹⁵⁾。

1890年以降には錬鉄は鋼に取って代わられた。

現在では、いろいろな改良が加えられ、さらに良質な鋼が生産されるようになってきている。

このような鑄鉄から鋼に至る材料の変遷の中から、材料に具備すべき性能を見いだすことができる。

- a. 安全性（引張り・圧縮・せん断・曲げ強さ・靱性等）
- b. 溶接性・加工性・均一性
- c. 経済性（価格・入手の難易）

表-3.2.1に鋼材の発展に関する年表を示す。

3.2.2 製作方法の変遷

(1) 接合方法の変遷

1) リベット継手

部品と部品、あるいは部材と部材のように2つ以上のものを接合する方法は、昔から紐、ピン、釘、ねじ釘、ボルト、ナット、リベットなどが用いられている。

この接合方法の技術の歴史は、人間の技術の歴史と表裏一体となって進歩してきたといえる。

鋼構造分野におけるこの接合技術は、鑄鉄→錬鉄→鋼という製鉄技術の進歩と深く関係している。18世紀後半に架けられたイギリスのCoalbrookdale橋は部材継手に普通ボルトを用いていたと推察される。

リベットがいつ頃から使われ出したかは明らかではないが、600年代に隋（中国）で建造された石造アーチの趙州橋において、鉄棒の端をたたいて太くして止めるという工法が用いられている。また造船分野では1700年代中頃にイギリスで建造されたVictoria号に鉄製の敲釘（リベットとほぼ同じとみてよい）が、用いられたという記録が残っている¹⁶⁾。

リベット継手の技術は1830年頃からの錬鉄時代を通じて発達・普及し、それ以前の鑄鉄時代のボルト継手に代わって、鋼構造物の継手の主流となっていった。

わが国に鉄橋が導入されたのは明治早々であり、くろがね橋、吉田橋がその初めで、いずれも錬鉄製であった。これらの橋の部材結合にリベットが用いられたか、ボルトが用いられたかは明らかではないが、1888年に架けられた二重橋にテーバーボルトが用いられていることからボルト継手が用いられていたと推察される。このようなことから、リベット継手の採用は1900年前後（明治時代の後半）のことであろうと思われる。

1940年代頃からの溶接工学の驚異的な進歩と1950年代中頃からの高力ボルトの普及によって、リベットの優位性は次第に衰えていった。1960年代の高度成長期を迎え、労務費高騰によるリベット工不足、生産性・施工性での欠点および騒音公害問題などにより工場継手は溶接に、現場継手は高力ボルトにその主流が移ってゆき、現在ではリベット接合法はほぼ完全にその姿を消している¹⁷⁾。

2) 溶接継手

初期の鉄橋建造時にはまだ溶接工法が開発されておらず近代溶接の技術は19世紀末に至って発明された。

1885年ロシアにおいてベナルドス法と呼ばれる炭素電極を用いたアーク溶接方法が発明された。また、電気抵抗溶接がアメリカで、ガス溶接がフランスでそれぞれ発明され、実用化に向かった開発が進められた。

1892年ロシアで前述の炭素電極に代わって母材と同質の金属電極を用いる方法が発明され、現在のアーク溶接の基を開いた。この方法の溶接棒に被覆剤を塗る考案は、1907年スウェーデンに始まり、以来種々の改良考案がなされて今日の金属被覆アーク溶接に至っている¹⁶⁾。

この工法の応用は1930年代にはすでに鋼橋の製造にも用いられていたことがある。しかし、その後数年も経たぬうちに、これらの溶接橋は相次ぐ墜落事故を起こしている。これらの事故は、ぜい性破壊によるものであったが、その後幾多の実験研究が繰り返された結果、その原因が判明し今日では溶接技術は信頼するに足るものになってきた¹⁷⁾。

3) 高力ボルト継手

高力ボルトが鋼構造の接合法として初めて用いられたのは、1930年代のイギリスにおいてであり、強さ60 kgf/mm²のボルトを永久構造物に使用したと報告されている。

その後の研究は主にアメリカを中心に行われ、特性が明らかになるにつれてリベットの補助的手段もしくは代用としての地位から、継手の主流となっていった⁴⁾。

アメリカにおける実験的研究は1938年から1950年代にかけて盛んに行われ、1947年“Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints”が設けられた。この調査研究委員会により、高力ボルト接合に関する初めての規定である“Specification for Assembly of Structural Joints Using High Strength Bolts”が1951年に発表され、AISC, AREA, AASHTOが相次いでこれを受け入れた。このことから、各種鋼構造物の継手に高力ボルトが盛んに使用されるようになった。

わが国における発展も、アメリカにおける研究および普及に刺激されたものであり、したがって技術的にも影響を受けているところが多い¹⁸⁾。

(2) 製作事例

1) 海外の吊橋¹⁹⁾

代表的な海外の吊橋の製作に関して以下に述べる。

a) 主塔

アメリカで発達した主塔構造はセル構造であり、リベット継手を用いた場合にはプレートとアングル材を用いたマルチセル構造であった。その後、溶接構造を用いるようになってから断面はなるべく厚板を用いて簡素化し、セルの数を少なくするためリブ付き鋼平板を用いている。このことは施工上材料を節約し、また検査がきわめて簡単となり、安全性の確認が容易になったことを意味している。この傾向は1960年以降の長大吊橋では顕著に現れており、より断面構成が単純化されてきた。こうした傾向は高張力鋼の開発と溶接技術の進歩また高力ボルト継手の開発によって可能となったものである。

マルチセル構造の主塔として Verrazano Narrows 橋の例を示すと、使用鋼材は主塔2基の総鋼重56500 t 中約30%が ASTM A-7、その他の一般構造用鋼約70%は ASTM A-440、A-441などの低合金鋼である。A-440、A-441は塔柱に使用され、A-7はストラットに使用されている。構造はリベット接合であり、全高193.47 mを16分割し、第1層が7.2 mであるほかは各層はすべて12.1 m、そのうち最大層重量は87 t (Brooklyn 側)、80 t (Staten Island 側)である。現場継手は摩擦接合高力ボルト ASTM A-325を2040 t使用している。主塔は各ブロックに分割して製作されるが、これを積み上げたときの鉛直度を正確に確保するため、製作上厳しい精度を要求している。Verrazano Narrows 橋については、上下の単体間の機械仕上げ面の間隔が0.005 in (0.13 mm)以下になるよう要求されている。また、少なくとも3層を工場で仮組し、長さ・直線性の検査および諸調整を行うことを要求している。

これに対しリブ付き鋼平板を矩形に組み合わせ、隔板を配した溶接構造の主塔として Forth Road 橋、Severn 橋の例を示す。Forth Road 橋の主塔の断面寸法は、最大12×5×47 ft 6 in (3.6×1.5×14.5 m)であり、今までに例がないほど大きなものであるため、溶接の技術とねじれの調整の面で種々問題が生じたようである。断面は3個の溶接さ

れた箱形部材より構成されており、高張力鋼を使用し、その板厚は 1/2 in~9/8 in (1.03~2.6 cm) である。工場での溶接は自動溶接機を使用し、チャンネルの補強材と側壁板との千鳥溶接部には亀裂を生じるのを避けるため、低水素系溶接棒および鋼材を予熱するなどの配慮を行っている。また、Severn 橋においては、各架設ユニットは箱形で長さ 55 ft 6 in (16.9 m) の 4 枚のリブ付き鋼板から構成されている。主要鋼材は厚さ 1~9/15 in (2.5~1.4 cm) の高張力鋼を使用している。製作は特殊な装置を使用してプレートの組立・溶接が行われ、主要な軸方向の溶接は連続被覆溶接棒を使った自動溶接機によって行われた。端部のプレートは半自動溶接装置により溶接され、スチフナーは低水素系溶接棒を使った手溶接により行われた。製作ブロックの精度確保の目的から、各組立部材の材端は機械仕上げが行われ、良好な接合が得られるよう工場において仮組立が行われた。また、接合用ボルト削孔に際しては正確な組立を確実にするため、最低 3 個以上の部材が同時に並べられ、上方の部材が追加された後下方の部材を除くという重複作業を行ったと報告されている。

b) 補剛桁

補剛桁の製作については、補剛桁の形式がプレートガーダー形式、トラス形式、箱形式などによって異なる。ここでは、トラス形式、箱形式について代表的な吊橋の製作例についてふれることとする。

トラス形式の補剛桁は、断面をコーナーアングルとプレートにて構成し、工場リベットにより組み立てられる製作方法が主流であった。現場接合方法としては、1930 年代に建設された George Washington 橋、Golden Gate 橋等においてはリベット継手が用いられ、それ以降の Mackinac 橋、Verrazano Narrows 橋においては高力ボルト継手が用いられた。また、隣接する断面との精度確保の目的より、Delaware Memorial 橋においては補剛トラスは 2 パネル単位で組み立てられた後リベット継手された。Verrazano Narrows 橋においてはトラス弦材断面の両端が機械仕上げされ、99 ft (30.2 m) という長尺な部材で製作された。

イギリスに目を向けると Forth Road 橋は、トラス断面を溶接にてボックス形状にしており、アメリカの Verrazano Narrows 橋と同時期にもかかわらず溶接構造を採用していることは興味深いところである。この Forth Road 橋の断面は板の縁に沿って溶接結合され、端部はダイヤフラムを溶接してシールした構造となっている。なお、現場接合方法は Verrazano Narrows 橋と同様に高力ボルト継手が採用されている。

塗装については、資料が少なく不明な点が多いが、Mackinac 橋においては 3 層のペンキ塗装がされ、塗料としては工場塗装は分溜した亜麻仁油に 75% の鉛丹と 25% の鉄酸化物を溶かしたもの、最初の現場塗装には分溜した亜麻仁油に 30% の鉛丹と 60% の鉄酸化物を溶かしたものを、最終現場塗装には合成樹脂に 75% の純粋クロム緑と 25% の珪酸マグネシウムを溶かしたものが使用されたと報告されている。また、Verrazano Narrows 橋においては 2, 3 の例外を除いて工場塗装、中間および仕上げ塗装の 3 過程から構成され、補剛トラスと床トラスの弦材の内外には 2 回の中間塗装が施工されている。これは将来、塗装作業を行ううえでの困難部への配慮として報告されている。また、Forth Road 橋においては、Drem 空港の不利用格納庫の中に特別注文のプラスト設備を整え、サンドブラストを施している。鋼構造のすべての外側表面および大気によって腐食される可能性のある内側表面にはサンドブラスト後、亜鉛スプレーを施し、その上で 2 重・3 重あるいは 4 重に塗装したと報告されている。

一方、箱形式としては Severn 橋を挙げることができるが、全断面溶接により製作されている。断面は偏平六角形の箱桁であるが、断面の上面および底面は幅 8 ft (2.44 m)、長さ 60 ft (18.29 m) の補強プレート (厚さ 1/2 in (13 mm) 以下) からなるユニットを組み立てることにより製作されている。各ユニットは現場近くに設けられた工場の頑丈な組立治具の上で溶接により組み立てられたが、高精度が要求され、特に幅に関しては 1/32 in (0.8 mm) 以内に収めなければならなかったと報告されている。現場継手は現場溶接により行われたが、放射線透過試験が要求され連続的に行われた。塗装については Forth Road 橋と同様な下地処理が施され、特に曳航中に浸されるボックスの底面については、雲母状酸化鉄を基としたエポキシ塗料が用いられている。また、この部分では亜鉛スプレーの代わりに亜鉛-アルミニウム合金が採用された。

2) わが国の吊橋^{22), 23)}

わが国の近代吊橋の歴史は山里の吊橋に始まり、昭和初期に完成した清洲橋など、多くはヨーロッパの吊橋技術を基礎に発展してきたが、その後第二次世界大戦の影響から吊橋の建設は低迷した。戦後本格的な吊橋となる若戸大橋は、長大支間吊橋を多く建設したアメリカの技術を手本に建設が行われた。そして、溶接構造の信頼性向上・ヨーロッパの長大吊橋などの影響を受けて関門橋が建設される。その後、関門橋の技術は本州四国連絡橋の吊橋へ生かされ、現在の発展をみることになる。現在の吊橋技術の原点といえる若戸大橋と関門橋について述べる。

a) 主 塔

若戸大橋の断面は、最大3.8×5.0 mで中央にエレベータを配置した11セルからなるマルチセル構造で、鋼材はSS 41が使用されている。当時、工場継手は溶接構造が主流になりつつあったが、製作精度を確保するため、あえて鋼板と山形鋼によるリベット構造が採用されている。鋼板の加工に自動ガス切断が使用されるなど現在と大きな違いはない。組立方法は、ひずみ取りを行った鋼板と山形鋼から治具などを使用して精度良くパネルを組み、立体ブロックに組み上げる方法で、これも現在の溶接工法に共通した方法である。

断面の組立後には水平継手端面の切削が行われ、横置きによる2段仮組、継手部の孔ぐりが行われている。端面の検査は、添接板に設けた検査孔を隙間ゲージで検査する方法で、その規格値は、許容隙間0.2 mm、塔の折れ・ねじれ20"である。これらは、現在も本州四国連絡橋の製作基準へと引き継がれている。

また、鋼材の段階でプラスト後プライマーを塗布する素地調整が初めて採用されているほか、現場継手には一部高力ボルトが使われるなど当時としては新しい工法が採用されている。

若戸大橋のほぼ10年後に完成した関門橋の断面は最大3.2×7.2 mでSM 53鋼材が使用され、リブ付き鋼板による3セル溶接構造になっている。3セルの接合には高力ボルトが使用され、現場水平継手の高力ボルト伝達は全強の50%で設計されている。また、仮組では2段立置きで検査されるなど、若戸大橋の実績を継承しながら新しい工法が採用されている。当時、厚板のSM 53鋼材の施工実績が少なく、各種の溶接施工試験を行って、施工法が決定されている。

b) 補 剛 桁

若戸大橋の補剛桁は、SS 41、St 50鋼材を使用したトラスである。上下弦材は腹板とカバープレートを山形鋼とリベットで形成し、斜材は溝形鋼とタイプレートを溶接する方法で、I断面の垂直材は溶接によるビルトアップで製作された。当時としては、精度の問題、50キロ鋼の溶接信頼性に確信が持てなかったためと思われる。

仮組立は塔付近は立体仮組、その他は平面仮組を行い、精度確認がなされている。

関門橋ではSM 58鋼材が使用され、部材も溶接によるボックス構造が主体となっている。鋼板の切断には自動切断やNC切断機が使用され、溶接も炭酸ガス自動溶接が使用されるなど現在とほぼ同一の方法で製作がなされている。

塗装については、若戸大橋では主塔と異なり、製作後製品プラストがなされ、中塗り以降は現場塗装で施工されている。関門橋では、内面塗装にタールエポキシ樹脂が、外面に亜鉛溶射+塩化ゴム系塗料が使われるなど維持管理を重視した重防食塗装がなされている。

このようにわが国の吊橋技術の発展は、若戸大橋と関門橋が基礎となり、本州四国連絡橋の経験から得た高張力鋼の溶接施工技術・大型模型疲労試験による知見・非破壊検査技術など、数々の経験と技術開発によるものといえる。

3.2.3 現在の製作技術^{15), 26) ~ 31)}

近代吊橋の歴史は比較的早く、材料・製作技術はその歴史のなかで大きな変革がなされてきたものの、製作工程の流れ自体には大きな変化はない。しかし、コンピュータ利用の高度化などの技術環境、労働・材料・機材や輸送などの経済環境、高学歴・高齢化といった社会環境など、製作における環境が大きく変わってきた。さらに、価値観の多様性、景観・環境問題の重視、架設環境がより厳しくなるなど、製作に求められる要件もより高度で多様なものにな

っている。こうした背景から多品種少量受注生産の橋梁製作においても、品質の向上、効率化のため、各種NC装置の導入がなされ、それに伴う原寸工程のCAD/CAM化、そして製作・管理情報の統合を指向したFA化が進められている。

(1) 製作工程

工場製作工程の一例を図-3.2.1に示す。部材・構造形式・工場体制などにより一部前後したり異なる工程もあるが、吊橋の製作手順は基本的に一般橋と同様である。以下に製作の各工程と最近の動向について今日的視点から述べる。

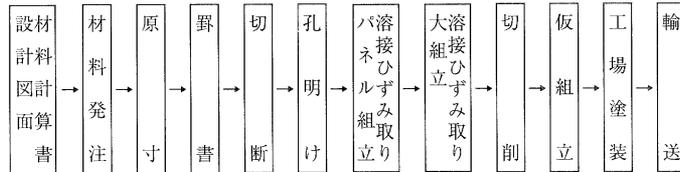


図-3.2.1 工場製作工程

1) 原 寸

原寸は、設計図と製作要領をもとに下流工程の製作情報を作成する作業であり、次の役割を分担している。

- a) 各部材の取合いに不都合はないか、施工上の支障はないかなどの照査。
- b) 設計図に製作キャンバー・溶接収縮などを考慮した全体形状の図形化。
- c) 部品形状の定義情報、加工段階で使用する型板・定規などの作成。
- d) 下流工程で必要とする帳票の作成。
- e) ネスティング（板取り）

従来は、こうした作業を原寸大で床描きし部品形状を型に写しとることで行っていたが、下流工程がNC化された現在は、コンピュータを利用したNC原寸へと移行している。標準的な構造には専用バッチシステムが、特殊構造には汎用CAD/CAMシステムを利用するなど、多種の構造に効率的対応が可能なシステム構成がなされている。

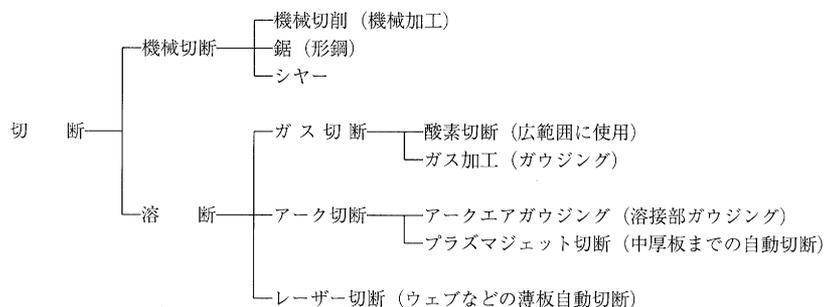
2) 罫 書

罫書は、部品番号、切断線、取付線など加工情報を型・定規などを用いて、鋼板、形鋼などの素材に転記する作業である。現在は、ネットワークまたはフロッピーディスクを介して、図形数値情報としてNCマーキング装置に転送されるようになっている。

3) 切 断

罫書された鋼板、形鋼は切断工程へと回される。金属材料の切断方法は表-3.2.2に示すように、機械切断と溶断

表-3.2.2 切断方法の種類



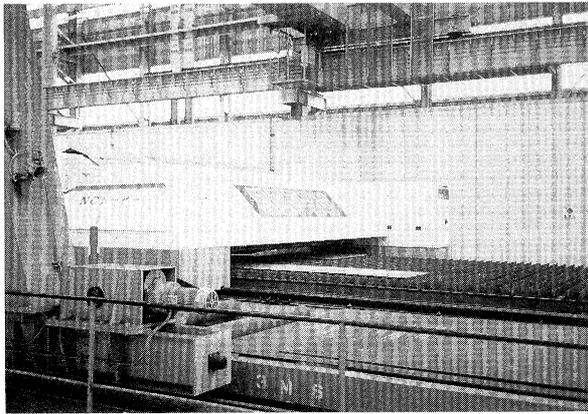


写真-3.2.1 NC マーキングレーザー切断機

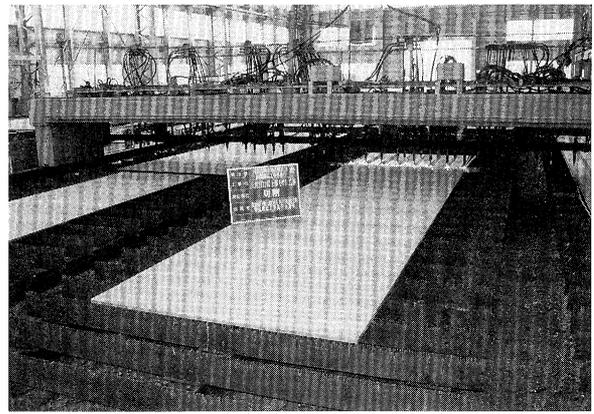


写真-3.2.2 フレームプレーナー（ガス切断）

に大別される。機械切断ではバンドソーなどが、今も形鋼の切断に多用されている。鋼板の切断には一般的に溶断が使われ、なかでも酸素ガスと金属との反応熱を利用するガス切断が、適応板厚が広く切断面精度が良いことから最も一般的に使用されている。しかし最近では NC 装置の普及から、高能率の NC プラズマアーク切断、入熱量が少なく精度の良い NC レーザー切断（写真-3.2.1）が急速に普及浸透し、罫書と同一工程で処理される例が多くなっている。

また、部材形状に適した切断装置を利用することも、効率的に切断工程を処理するうえで行われている。例えば、フランジ、補剛材のように一定幅の部材には、多数のタッチで平行切断するフレームプレーナー（写真-3.2.2）が、同一形状部材には型に倣って切断するアイトレーサーを、ウェブなどには NC 切断機を使用するなど装置の利点を生かした利用法がなされており、ネスティングも切断装置別に行われる。

4) 孔 明 け

切断された部材は必要に応じて孔明けがなされる。示方書の規定から、孔明けは原則的にドリルで行われる。最近では、ウェブなど大きな部材は可搬式ドリルから NC ガーダーボール盤（写真-3.2.3）に、添接板など小部材は NC ラジアルボール盤が採用され、精度向上と自動化が図られている。

5) 組立・溶接・ひずみ取り

切断・孔明け加工された部材はパネル状に仮付けされて溶接される。完成したパネルはひずみ取りの後、ブロック状態に仮付けされ溶接がなされる。NC 化されて部品単位の精度が向上した現在、仮付けは製作精度上からは最も重要な作業であり、精度を確認した後に溶接される。

溶接方法の種類には表-3.2.3 のような各種の方法があるが、主要構造部材の製作には、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、炭酸ガスアーク溶接および MAG 溶接が多く使用される。サブマージアーク溶接はフランジ、ウェブなど先継ぎ部材の突き合せ溶接に一般的に使用される。その他の溶接は主に組立時に使用されるが、最近では高能率、経済性、汎用性などの理由から半自動炭酸ガスアーク溶接の比重が多くなっており、高張力鋼には靱性の高い溶接が可能な MAG 溶接が使われる。

最近では、各種の自動溶接機が開発され、特にパネル段階の溶接には比較的容易に対応が可能のため、多電極形式の自動溶接装置（写真-3.2.4）などが使用されている。



写真-3.2.3 NC ガーダーボール盤

表-3.2.3 アーク溶接方法の種類

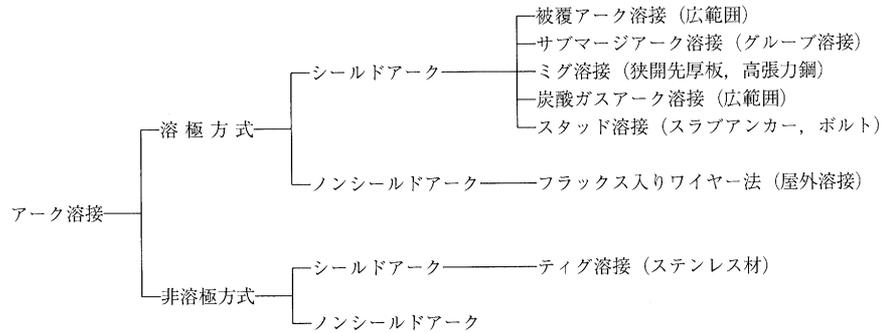


写真-3.2.4 多電極自動溶接機

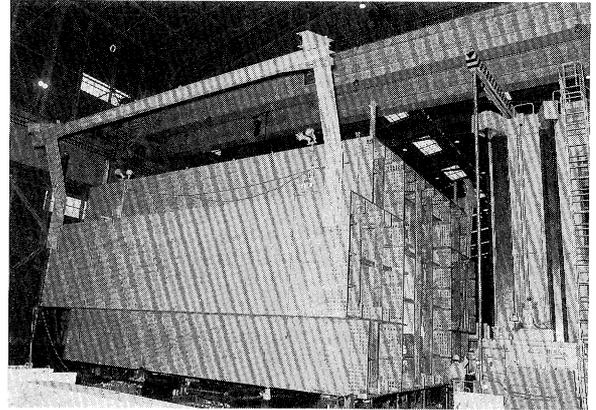


写真-3.2.5 横中ぐり盤による塔断面切削

溶接後には溶接収縮によるひずみ取りが行われる。ひずみ取りの方法には、プレス、ローラーの使用、点状・線状加熱法などがある。調質鋼では、焼き戻し温度以上に加熱しないなど注意が必要となる。

6) 切 削

吊橋の塔は軸圧縮力が卓越し、支圧応力による伝達を設計上の条件とすること、鉛直精度が厳しく管理されることなどの理由から長大橋では、塔柱ブロックの芯出し後、端面の切削を行う。従来、切削時の芯出しは立置きで行っていたが、最近は重量増大によりブロック反転が困難になったため、高精度の計測・制御機器や大型横中ぐり盤(写真-3.2.5)を利用した、横置きによる芯出しや全段面一括切削が採用されている。

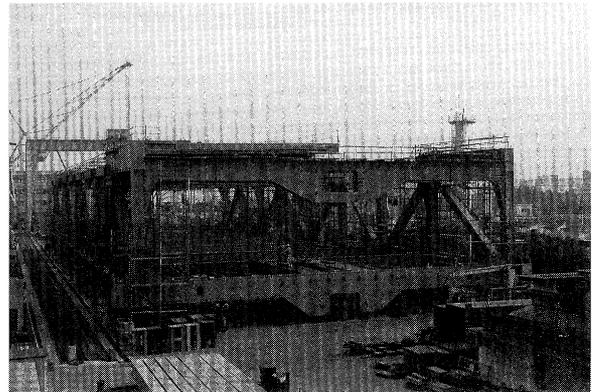


写真-3.2.6 補剛トラスの立体仮組立

7) 仮 組 立

仮組立は、あらかじめ工場で所定形状に組み上げ、架設時に形状を容易に再現できるようにパイロットホールを設ける、各部材の取合いを確認するなどの精度管理を目的とする工程である。一般橋では最近、座標計測による数値仮組立を行い、仮組立を省略しようとする動向がみられる。しかし、吊橋のような長大橋の架設では、構造的に不安定な架設時期を短くするため部材を単材で架設することが少ないこと、工程の遅れは他の工種へ影響することなど、リスクを最少化するため仮組立を行うことを前提にしている。補剛トラスの場合、トラスを水平に組む平面仮組と完成と同様な状態に立体仮組(写真-3.2.6)する方法がある。

塔の仮組は、メタルタッチ、鉛直度などの精度管理が中心になるため、温度の影響が小さい屋内で上下2ブロック

ごとの仮組を横置状態で順次行っている。仮組立検査データは数値仮組による全体形状の累積誤差の推定に利用され、順次上部ブロックの切削に反映して精度を管理する方法が一般に採用されている。

8) 工場塗装

長大吊橋では塗装面積が膨大になることから、可能な限り工場の上塗りまで行い現場では継手部・補修塗装のみ行う方法が一般的である。また架橋環境も海岸部が多いため、維持管理の観点から一般には重防食塗装が採用される。本州四国連絡橋ではポリウレタン塗装が重防食塗装として採用されてきたが、最近では、ふっ素樹脂塗装系を採用する例が増えている。現在、厳しい環境に使用される標準外面塗装仕様を表-3.2.4に示す。

表-3.2.4 厳しい環境に使用される外面用塗装仕様

塗装区分	環境区分	工 程	塗 料 名	使用量 (gf/m ²)	目標膜厚 (μ)		
B	1	工 場	素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			プライマー	長ばく形エッチングプライマー	130 (スプレー)	(15)	
			二次素地調整	動力工具処理 SIS St3 SPSS Pt3	—	—	
			下 塗	鉛系さび止めペイント 1種	170 (スプレー)	35	
			〃	〃	170 (スプレー)	35	
		現 場	中 塗	フェノール樹脂 MIO 塗料	300 (スプレー)	45	
			〃	〃	—	—	
			上 塗	塩化ゴム系塗料 (中塗)	170 (はけ)	35	
			〃	〃 (上塗)	150 (はけ)	30	
			〃	〃	—	—	
C	1	工 場	素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			プライマー	無機ジンクリッチプライマー	200 (スプレー)	(15)	
			二次素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			下 塗	無機ジンクリッチペイント	700 (スプレー)	75	
			ミストコート	ミストコート	160 (スプレー)	—	
		現 場	下 塗	エポキシ樹脂塗料下塗	300 (スプレー)	60	
			〃	エポキシ樹脂 MIO 塗料	360 (スプレー)	60	
			中 塗	ポリウレタン樹脂塗料用 (中塗)	140 (はけ)	30	
			上 塗	ポリウレタン樹脂塗料用 (上塗)	120 (はけ)	25	
			〃	〃	—	—	
	2	厳 しい 腐 食 環 境	工 場	素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—
				プライマー	無機ジンクリッチプライマー	200 (スプレー)	(15)
				二次素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—
				下 塗	無機ジンクリッチペイント	700 (スプレー)	75
				ミストコート	ミストコート	160 (スプレー)	—
			現 場	下 塗	エポキシ樹脂塗料 (下塗)	300 (スプレー)	60
				〃	〃	300 (スプレー)	60
				中 塗	ポリウレタン樹脂塗料用 (中塗)	170 (スプレー)	30
				上 塗	ポリウレタン樹脂塗料用 (上塗)	140 (スプレー)	25
				〃	〃	—	—
3	腐 食 環 境	工 場	素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			プライマー	無機ジンクリッチプライマー	200 (スプレー)	(15)	
			二次素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			下 塗	無機ジンクリッチペイント	700 (スプレー)	75	
			ミストコート	ミストコート	160 (スプレー)	—	
		現 場	下 塗	エポキシ樹脂塗料 (下塗)	300 (スプレー)	60	
			〃	エポキシ樹脂 MIO 塗料	360 (スプレー)	60	
			中 塗	ふっ素樹脂塗料用 (中塗)	140 (はけ)	30	
			上 塗	ふっ素樹脂塗料用 (上塗)	120 (はけ)	25	
			〃	〃	—	—	
4	腐 食 環 境	工 場	素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			プライマー	無機ジンクリッチプライマー	200 (スプレー)	(15)	
			二次素地調整	ブラスト処理 SIS Sa2.5 SPSS Sd2 Sh2	—	—	
			下 塗	無機ジンクリッチペイント	700 (スプレー)	75	
			ミストコート	ミストコート	160 (スプレー)	—	
		現 場	下 塗	エポキシ樹脂塗料 (下塗)	300 (スプレー)	60	
			〃	〃	300 (スプレー)	60	
			中 塗	ふっ素樹脂塗料用 (中塗)	170 (スプレー)	30	
			上 塗	ふっ素樹脂塗料用 (上塗)	140 (スプレー)	25	
			〃	〃	—	—	

(2) 品質管理

長大橋では支間の拡大によって死荷重や風荷重断面力が大幅に増大することから、部材の大断面化・高張力鋼厚板の使用が避けられず、製作・架設誤差、品質を設計上余裕をもって設定することが困難になる。こうしたことから、塔の製作精度や高張力鋼を使用した補剛桁の溶接には、厳しい管理が必要となる。

1) 非破壊検査

高張力鋼の厚板が採用される場合が多いこと、瀬戸大橋のような道路鉄道併用吊橋では疲労損傷防止から溶接部の品質向上が求められる。厳しい施工条件下の高品質要求となるため、溶接施工試験による溶接施工法・管理基準の決定、非破壊検査の徹底が必要となる。欠陥防止には、溶接技術だけでなく、材料管理・開先の管理・作業環境など総合的な管理体制が必要となる。

溶接部の非破壊検査方法には表-3.2.5のような種類があるが、主要部材の板継ぎ部には放射線透過検査が、角溶接部の縦ビード部には超音波探傷検査が一般的に採用されている。

表-3.2.5 非破壊検査方法

非破壊検査	—	放射線透過試験 (RT) : グループ溶接
	—	超音波探傷試験 (UT) : 縦ビード部, ラミネーション
	—	浸透探傷試験 (PT) : 表面欠陥
	—	磁粉探傷試験 (MT) : 表面に近い欠陥

2) 精度管理

精度管理の一例として、本州四国連絡橋の精度管理基準を表-3.2.6に示すが、長大構造物では規模に対する相対的許容誤差は小さく設定せざるを得ないため、部材単位の精度向上が精度管理の基本になる。生産設備がNC化された現在、部品単位で製作精度を確保することは比較的容易であるが、部品から部材へ組み立てられていく過程で、溶接による収縮など避けられない影響がある。こうした量の設定は過去の実績からある程度推定可能であるが、施工要領が一般とは異なる例もあり、部材数が多くなると設定誤差の累積が大きくなる。したがって、場合によっては事前に施工試験を行い検討がなされる。

表-3.2.6 吊橋部材および仮組時寸法許容差（本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準より抜粋）

番号	部材名 要求項目		塔		補剛桁・主桁				鋼床版						
			塔柱, 斜材, 水平材		主構造, 主横トラス, 横構		箱桁		デッキプレート, 縦桁						
			条件	許容差	条件	許容差	条件	許容差	条件	許容差					
1	断面	部材	塔斜材	柱材	$H \leq 1\text{ m}$	± 2	同左	同左	$H \leq 2\text{ m}$ 現場溶接の場合は別途規定による	± 4					
			水平材	材							$H > 1\text{ m}$	± 3			
			フランジ幅	塔斜材	柱材	$W \leq 1\text{ m}$	± 2	同左	同左	$W \leq 1\text{ m}$ $W > 1\text{ m}$	± 2 ± 4				
			水平材	材	$W > 1\text{ m}$							± 3			
3	材長の寸法	の	対角線長	塔斜材	柱材	箱断面	± 3	同左	同左	—	—				
			断面のねじれ	塔柱 (部材長10m 当たり)	材							± 3			
5	部材長の寸法	許容差	メタルタッチ部材	塔	柱	—	—	—	—	—	—				
			一般部材 (斜材・水平材)	$L \leq 10\text{ m}$	± 2	$L > 10\text{ m}$	± 3	$L \leq 10\text{ m}$	± 2	$L > 10\text{ m}$	± 3	同左	同左	—	—
7	許容差	端	圧縮部材の曲り	—	—	主構, 主横トラス	$L/1\,000$	—	—	—	—				
8	許容差	端	端面直角度	塔	柱	20°	—	—	—	—	—				
9	許容差	端	ガセット角度	—	—	主構	$1/1\,000$	同左	同左	—	—				
10	板の平面	の	平面	W : リブ間隔 または腹板間隔	$W/300$ ただし 最少値は3とする。	同左	同左	同左	同左	デッキプレート W : リブまたは腹板間隔	$\frac{W}{150}$				
				縦桁の腹板 h : 腹板高	$\frac{h}{150}$										
11	板の平面	の	平面	フランジの直角度	$1/100$	—	—	—	—	—	$1/100$				
				部分仮組 (ただし数 パネル) N : パネル数	$2 \times N$	—	—	—	—	—	—	$1 \times N$			
12	仮組	時	寸法	許	容	差	全長支間	塔柱 N : ブロック数	$\pm 1 \times N$	主構	$1 \times N$	主桁 L : 全長 (m) : 仮組長 (m)	$\pm (10 + L/10)$	部分仮組 (ただし数 パネル) N : パネル数	$2 \times N$
								斜材仮組の場合の塔柱のずれ	± 2	部分仮組 (ただし数 パネル) N : パネル数	$2 \times N$				
13	仮組	時	寸法	許	容	差	中心間距離	水平材仮組の場合の塔柱のずれ	± 1	主構間隔 (主横トラス面組長) B : 設計主構中心間距離 (m) 隣接パネルとの差	$0.5(B-5)$ 5	主桁間 B : 設計中心間距離 (m)	$\pm (3 + B/2)$	縦桁間隔 B : 設計中心間距離 (m)	$\pm (4 + (B-2) \cdot 0.5)$
								斜材仮組時の場合の塔柱間距離 B_1, B_2 $B_1 - B_2$ B_1, B_2 : 上, 下端の塔中心間距離	± 2 ± 2					隣接パネルとの差	5
14	仮組	時	寸法	許	容	差	高さ	—	—	主構, 主横トラス H : 設計高さ (m) 隣接パネルとの差	$0.5H$ 5	桁高	± 3	—	—
15	仮組	時	寸法	許	容	差	鉛直度	$\frac{1}{10\,000}$	主構造 H : 設計主構高さ	$\frac{H}{1\,000}$	H : 設計桁高	$3 + H/1\,000$	縦桁の鉛直度	4	
16	仮組	時	寸法	許	容	差	対角線長	斜材長 $D_1, D_2, D_1 - D_2, D_1, D_2$: 斜材長	± 4 ± 2	ブロック組した主構の平面および断面 対角線長の差 B : トラス幅 (m)	$\pm 0.5 \cdot (B-5)$ $0.25 \cdot (B-5)$	対角線長差 $D_1 - D_2$	10	鋼床版水平面の対角線長差	10
								現場継手部のすき間	塔柱 (メタルタッチ) 斜材, 水平材	0.2 2	設計寸法に対し	± 5	同左	同左	
17	仮組	時	寸法	許	容	差	目違い	2	—	—	—	—	—	—	
19	仮組	時	寸法	許	容	差	そ	中間水平材 (路床部支持用水平材)	± 2	主構, 主横トラス L : 仮組長 (m) $L \leq 20$ $20 < L \leq 40$ $40 < L \leq 80$ $80 < L \leq 200$ 隣接する格点位置での差	± 5 $-5 \sim 10$ $-5 \sim 15$ $-5 \sim 25$ 5	同左	同左	縦桁の曲り L : 仮組長	$\frac{L}{2\,000}$
								他の水平材	$-5 \sim 10$						
20	仮組	時	寸法	許	容	差	通	(斜材仮組時の塔3ブロック程度の場合) 塔柱 斜材	2 3	主構 L : 仮組長 (m) $L \leq 20$ $20 < L \leq 40$ $40 < L \leq 80$ $80 < L \leq 200$ 隣接する格点位置での差	5 10 15 25 5	同左	同左	同左	
								2	5						

(表示のない単位: mm)

参考文献 (3章)

- 1) 平井：鋼橋 III, 技報堂, 1956
- 2) 小西 編：鋼橋 基礎編 I, 丸善, 1977
- 3) 小西 編：鋼橋 設計編 II, 丸善, 1977
- 4) 日本鋼構造協会：吊構造, コロナ社, 1975
- 5) 伊藤：吊形式橋梁の歴史, 橋梁と基礎, 1981.8
- 6) 伊藤・藤野ほか：吊形式橋梁, 建設図書, 1990
- 7) 日本鋼構造協会：構造物用ケーブル材料規格, 1994
- 8) 川田：吊橋の文化史, 技報堂, 1981
- 9) 関：ヨーロッパの橋を訪ねて, 思考社, 1982
- 10) 成瀬：吊橋史拾遺, カラム, No. 107
- 11) 川田：現代の吊橋, 理工図書, 1987
- 12) 根来：橋梁用ケーブル, 橋梁と基礎, 1975.1
- 13) 富士製鉄(株)：長大橋技術資料, No. 101・102, 1967
- 14) (株)神戸製鋼所：神戸製鋼技報, Vol. 38
- 15) 日本橋梁建設協会：鋼橋の施工にかかわる鋼材の知識, 1993.12
- 16) 田島：継手の変遷, 橋梁と基礎, 1981.8
- 17) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成(3) —溶接接合—, 技報堂, 1983
- 18) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成—リベット接合・高力ボルト接合—, 技報堂, 1977
- 19) 神戸市企画局調査部：海外長大吊橋の上部工事
- 20) 篠原：鋼道路橋, 橋梁と基礎, 1987.1
- 21) 土木学会：本四連絡橋開通記念 特別連続記念講義集, 1988
- 22) 日本道路公団福岡支社：若戸橋工事報告書, 土木学会, 1964.2
- 23) 日本道路公団：関門橋工事報告書, 土木学会, 1977.3
- 24) 本州四国連絡橋公団：伯方・大島大橋工事誌, 1989.9
- 25) 本州四国連絡橋公団：瀬戸大橋工事誌, 1988.10
- 26) 日本鋼構造協会編：鋼材溶接の基礎知識, 1983.12
- 27) 日本規格協会：非破壊検査マニュアル, 1983.4
- 28) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧, 1990.6
- 29) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 1990.2
- 30) 土木学会：鋼構造シリーズ5 鋼斜張橋—技術とその変遷—, 1990.9
- 31) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準, 1989.4