

# 明石海峡大橋ケーブル用工場製作物の品質管理

河口浩二<sup>1</sup>・福永 効<sup>2</sup>・武野 優<sup>3</sup>・中村俊一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>本四公団 垂水工事事務所 第二工事長 (〒655 神戸市垂水区平磯1-1-66)

<sup>2</sup>本四公団 垂水工事事務所 第二工事長代理

<sup>3</sup>正会員 明石海峡大橋ケーブル工事 新日鐵・神鋼特定建設共同企業体 所長

<sup>4</sup>正会員 Ph.D 明石海峡大橋ケーブル工事 新日鐵・神鋼特定建設共同企業体 次長

明石海峡大橋の主ケーブルには、工場で製作されたプレファブ平行線ストランドを現場で束ねて主ケーブルとするPWS工法が採用された。ストランドを構成する亜鉛メッキ鋼線の引張強さは180 kgf/mm<sup>2</sup>であり、従来のものより20 kgf/mm<sup>2</sup>高強度となっている。ケーブルバンドには従来の鞍掛けバンドに加えて、ピン定着式バンドが採用された。また、ハンガーロープには、工場でポリエチレン樹脂およびフッ素樹脂により二重の防食被覆がされたPWSハンガーが新たに採用された。これらの製作物は、新構造・新材料であるとともに、種類・量とも過去の実績を大幅に上回った。本報告は、これら製作物の構造的特徴、製作方法、品質管理などについて説明したものである。

**Key Words:** suspension bridges, PWS, pin type bands, PWS hanger ropes, universal joints

## 1. はじめに

明石海峡大橋は、橋長3,910 m、中央支間長1,990 m、ケーブル径1.122 mという世界最大の吊橋であり、平成10年の完成をめざして建設中である。図-1に本橋の一般図を示す。主ケーブル、ケーブルバンドおよびハンガーとも1995年夏までにすべて架設完了している。本橋に用いられる主ケーブル・バンド・ハンガーなどはまず工場で製作され、現地で架設される。これらの製作物は種類・量とも瀬戸大橋など過去の実績を大幅に上回ったが、すべて完了した。本報告はこれら製作物の構造的特徴、製作方法、品質管理などについて説明するものである。

## 2. 主な工場製作物の特徴

主ケーブルには、予め工場で製作されたプレファブ平行線ストランド (Prefabricated Parallel Wire Strand: PWS) を、キャットウォーク上に引き出し、両端のアンカレジのアンカーフレームに定着し、これを現場で290本束ねて主ケーブルとする、いわゆるPWS工法が採用された。1本の平行線ストランドは127本の亜鉛メッキ鋼線で構成される。この亜鉛メッキ鋼線の引張強さは180 kgf/mm<sup>2</sup>であり、従来のものより20 kgf/mm<sup>2</sup>高強度となっている。亜鉛メッキ鋼線の製作、集束、ソケット付け、リールへの巻き取りの作業はすべて工場で行われた。平行線ストランドの品質は、亜鉛メッキ鋼線の引張強さ、伸び、曲げ強さ、ねじれ強さ、メッキ付着量、

ソケット付け精度など種々の角度から検査された。本報告では、3. でこの平行線ストランドの機械的性質、製作工程、検査結果等について述べる。

ケーブルバンドは主ケーブルを円形形状に拘束すると同時に、ハンガーロープを取り付ける機能を有する。わが国においては従来、鞍掛けバンドが用いられてきたが、本橋では後述する被覆されたハンガーロープが採用されたため、鞍掛けバンドは構造的に困難であるため、ピン定着式バンドが採用された<sup>1),2)</sup>。この種のバンドはわが国では過去の事例が少なく、とくに応力が集中するピンプレート部の製作方法・精度、品質管理、検査基準など、解決すべき課題も多くあった。4. では、これらについて詳細に紹介する。

ハンガーロープには新たにPWSハンガーが採用された<sup>1),2)</sup>。本橋に用いられるハンガーは総数1,044本、最大長204 mにもおよぶため、従来のストランドロープを用いた場合、完成後の表面塗装の維持管理に膨大な費用・手間がかかると予想された。一方、このPWSハンガーには予め工場でポリエチレン樹脂で防食被覆され、さらにその上にフッ素樹脂により着色被覆されているため、現地架設工期を短縮でき、しかも長期の防食性能に優れている。5. では、このハンガーの製作方法・品質管理・検査結果などについても述べる。

バンドとハンガーの結合部にも新しい構造が取り入れられた<sup>1)</sup>。従来の鞍掛けバンド方式では、補剛桁と主ケーブルに橋軸直角方向の相対変位が生じたとき、ハンガーの曲げでこれを吸収してきたが、ピン定着形式ではバン

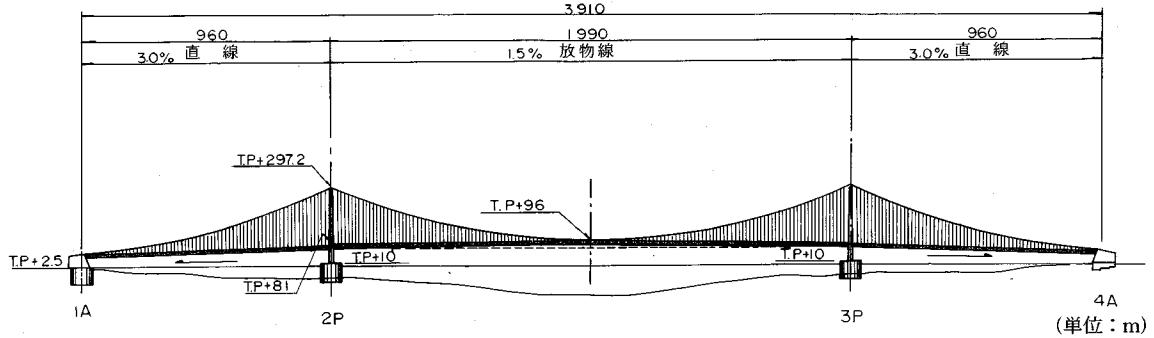


図-1 明石海峡大橋一般図

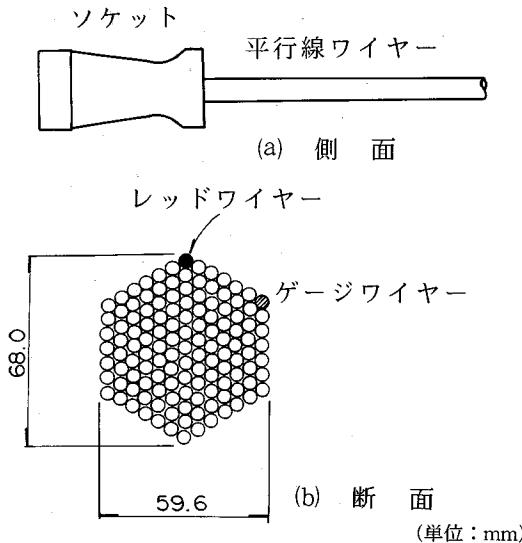


図-2 ストランド構造

ドやソケットのピンプレートに曲げが作用する。この曲げが過大になる部分には、バンドとハンガーの結合部にユニバーサルジョイントが挿入され、曲げを緩和するよう設計されている。6. では、このユニバーサルジョイントおよびピン、ソケット、ケーブルバンドボルトについての構造・製作面について説明する。

### 3. 平行線ストランド (PWS) の製作

#### (1) PWS の概要

1本のPWSは、直径5.23 mmの亜鉛めっき鋼線を127本束ね、両端末にソケット止めしたもので、製作長は平均4,073 mである。本橋では合計580ストランド、重量50,459 tonが製作された。

亜鉛めっき鋼線の引張強度は180 kgf/mm<sup>2</sup>であり、従来のものより20 kgf/mm<sup>2</sup>高強度になっている<sup>3)</sup>。これ

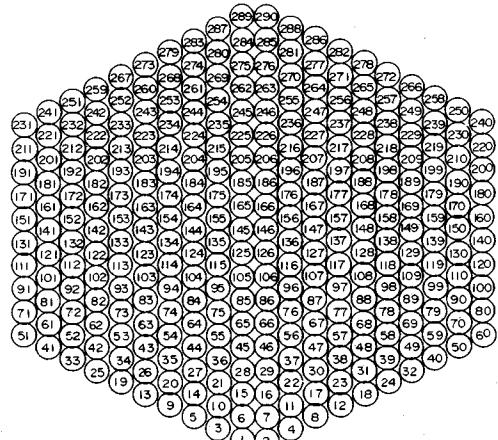


図-3 主ケーブル断面

は、おもにシリコンの含有量を0.25%から1%に増加させることにより可能となった。この鋼線は引張強さが高いだけでなく、延性、遅れ破壊特性、耐食性は従来の鋼線と同程度で、疲労、クリープ、低温じん性、側圧・曲げへの抵抗力、ソケット定着性については同等以上の特性を有しており、吊橋ケーブル鋼線として十分な特性を有している。

図-2はPWSの断面を示す。127本の亜鉛めっき鋼線の中にはレッドワイヤーとゲージワイヤーが含まれている。レッドワイヤーは赤い染料で亜鉛めっき鋼線に着色したものである。PWSが現地でキャットウォーク上を引き出されるとき、わずかではあるが回転しながら移動していく傾向があるため、このレッドワイヤーの位置を確認しながらうねりを修正するためである。ゲージワイヤーは亜鉛めっき鋼線に長さをマーキングしたものです、後述するようにストランドの長さを決定する重要な役割がある。

これらのPWSが290本束ねられ、主ケーブルを構成

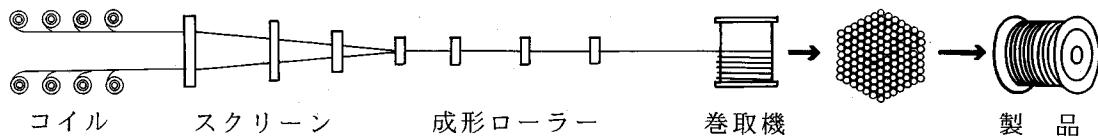


図-4 ストランド集束工程

表-1 亜鉛メッキ鋼線の検査成績結果

検査項目	単位	標本数	平均値	標準偏差	最大値	最小値	許容値
線径	mm	49,424	5.234	0.0103	5.28	5.20	5.23±0.06
引張強度	kgf/mm <sup>2</sup>	49,424	187.7	1.85	199	182	180~200
伸び	%	3,016	6.51	0.486	5.2	8.4	4%以上
メッキ付着量	g/m <sup>2</sup>	1,508	365.3	16.74	311	420	300以上
特殊防錆量	g/m <sup>2</sup>	1,508	9.5	1.70	17.0	6.0	5.0以上
偏径差	mm	49,424	0.036	0.0121	0.06	0.00	0.06以下
耐力	kgf/mm <sup>2</sup>	3,016	152.5	1.66	159	146	140以上
ねじり回数	回	1,508	26.0	1.28	32	22	14以上
線径増加	mm	1,508	0.106	.0123	0.12	0.08	0.12以下

する。本橋には2本の主ケーブルがあり、図-3は片側の主ケーブルの構成を示している。この配列はストランド架設時のものであり、ケーブル全体断面を押しつけコンパクトにするスクイージング作業により丸く整形される。

PWSの製作工程は、線材の製造、亜鉛メッキ鋼線の製造、ストランドの製作に大別される。線材は、HBS-G-3507に規定されるピアノ線材 HWRC 82 Bであり、製鉄所で製鋼、圧延され11.5 mm 径となり、1つのコイルの標準重量は約 2 ton である。

亜鉛メッキ鋼線は、線材を各種の伸線前処理(パテンディング、酸線、磷酸塗被覆)を行った後、伸線される。伸線された鋼線は総減面率は80%で、線径は5.14 mm になる。つづいて、直線加工され、メッキ前処理(脱脂、酸洗、水洗、フラックス処理)された後、溶融亜鉛メッキされ、最終外径は5.23 mm となる。

亜鉛メッキされたワイヤーは、さらに特殊防錆処理が施される。これは、ストランド製作開始から現地ケーブル最終防食まで数年を要するため、この期間中の亜鉛メッキ鋼線を防錆するための処理であり、エポキシ樹脂を主成分とする防錆剤を浸漬塗布した後、強制乾燥させる方法である。塗布量は5 g/m<sup>2</sup>以上とした。

図-4はPWSの集束・成形工程を模式的に示している。ゲージワイヤおよびレッドワイヤを含む127本のワイヤーを配列板に通し、それぞれのワイヤー長が均等になるようにした後、成形ローラーで正6角形に緊密に集束・整形し、約1.5 m 間隔にシージングテープを巻き付けた。また、ストランドの断面保持のため、サドル部

近傍および中央径間中央部に径2.3 mm の鋼線を幅10 cm にわたり巻き付けた。ストランドは集束と同時に同一ライン上でリールに巻き取る。このとき、ストランドがリールに当たる面は麻製の布により防護するとともに、ソケットはリールに固定した。

ソケットティングに先立ち、ほうき状にばらされた鋳込みワイヤー部分は、洗線により特殊防錆処理、油、汚れ、錆などを除去する。鋳込みは、ソケットを約100°C に予熱した後、亜鉛・銅合金(Cu : 98%, Zn : 2%)を、温度460±10°C であることを確認した後、一気に鋳込み、十分固まるまでそのままの状態に放置する。鋳込み合金が常温に達した後、亜鉛・銅合金とソケットの密着性を高めるためにソケット背面よりプレスを行う。これは、保証切断荷重の45%荷重を5分以上かけて行った。

完成されたPWSは、外面を麻製の布で防護したうえ、専用の屋内倉庫で出荷まで保管された。倉庫内では定期的に温度・湿度・ワイヤー外観が監視された。

## (2) 品質検査

ピアノ線材の主な品質検査項目は、成分分析(HBS規格に適合すること)、外観、線径(11.5±0.4 mm 以内)、きず深さ(0.07 mm 以下)、脱炭層深さ(0.07 mm 以下)、非金属介在物(清浄度0.07%以下)である。亜鉛めっき鋼線はPWSの品質を決定する最も重要なものであり、検査項目は多岐にわたる。主な試験検査項目と成績結果および合格判定基準を表-1に示す。線径と引張強度は各コイルごと、その他については20コイルごとに検査した。引張試験は350 mm 長の供試体を用いた。伸びは標

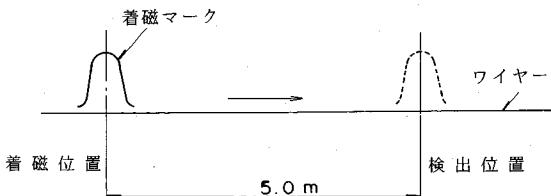


図-5 ゲージワイヤー測長原理

点距離 250 mm とし、切断後に標点マークを再計測して算出した。ねじり試験は、試験片の両端を 523 mm の間隔で固くつかみ、毎分 60 回以下のねじり速度で回転し、試験片が切断したときのねじり回数で評価した。同表の成績結果より、全ての項目が許容値以内であることが理解される。とくに、引張強さは平均  $187.7 \text{ kgf/mm}^2$ 、標準偏差  $1.85 \text{ kgf/mm}^2$  であり、目標とした値に近く、品質のばらつきが非常に少ないことを示している。また、伸びは平均 6.51% と非常に高く、望ましい韌性である。また、特筆すべきはねじり耐力であり、平均 26 回ときわめて耐ねじり特性に優れていることが理解される。

完成した PWS の検査項目は、ソケットとストランドの直角度、ソケット内鋳込み合金の量、リールに巻き取られた状況・外観などであり、これらについても高品質が確保できた。

### (3) ゲージワイヤ

ストランド長の管理は、予め正確に測長されたゲージワイヤーをストランド中に設置することにより行う。ゲージワイヤーは、以下に示す着磁式測長法により製作する。この測長原理を図-5 に示す。

ワイヤーは送出機より送り出され、定張力、定速度で反対側の巻き取り機に巻き取られる。固定された所定の位置でワイヤーに磁気マークを付ける。ワイヤーの走行に伴いこの磁気マークも移動するが、着磁位置から 5 m の位置に設置された検出ヘッドにより、この磁気マークを検出する。同時に、着磁位置では次の磁気マークが付けられる。この着磁・検出の操作を尺取り式に繰り返し、その繰り返し回数をカウントするのである。この一連の操作は、空調された部屋で行われ、コンピューターによる自動制御がなされている。

ゲージワイヤーの精度は、一度マーキングされたワイヤーを、マーキング時とは反対向きに走行させ、再度計測し、1 回目の測定値との差異で確認する。許容精度は、全長で  $1/30,000$  に設定している。なお、中間点は比例配分し、最小許容値は 8 mm とした。

検査結果をまとめた結果、平均  $-5.5 \text{ mm}$ 、標準偏差  $47.34 \text{ mm}$ 、最大値  $+126 \text{ mm}$ 、最小値  $-133 \text{ mm}$  となって

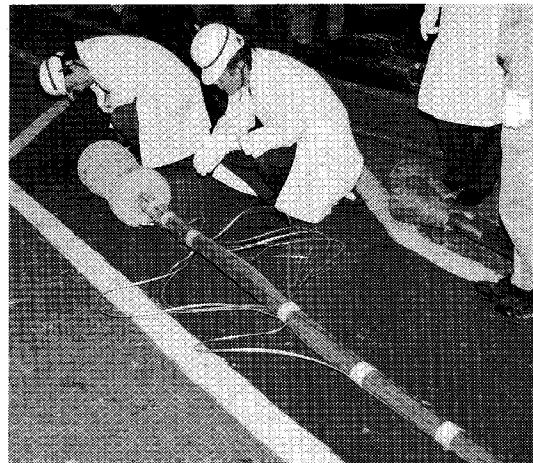


写真-1 ストランド破断状況

おり、満足のゆく品質を確保している。

### (4) 引張試験

ワイヤー集合体としての PWS の強度を確認するため、実物大の供試体を作成し、引張試験を実施した。供試体のワイヤー外面には標点を付け、これを読みとることで伸びを測定した。また、ソケット外面にひずみゲージを貼付し応力の変化を観察するとともに、ソケット内部の合金コーンの抜け出しもダイヤルゲージで測定した。

試験結果によれば、切断荷重は 510 ton、応力レベルでは  $186.9 \text{ kgf/mm}^2$  に相当し、規格値以上であった。このときの伸びは 4.66% であった。弾性係数は  $20,232 \text{ kgf/mm}^2$  であり、ワイヤーの弾性係数とほぼ同程度であった。破断はソケット近傍のワイヤー本体でおこり、4 本破断した時点で試験を中止した。写真-1 は破断時の様子を示している。合金コーンは、 $110 \text{ kgf/mm}^2$  程度の荷重域でソケット内で変形・移動し始め、最終的には 2 mm 程度抜け出した。試験後、ソケットを切断し内部を観察したが、ソケット本体および合金とともに異常な変形は見受けられなかった。

## 4. ケーブルバンド

### (1) ケーブルバンドの概要

前述したように本橋ではピン定着式バンドが採用された。図-6 にこのピン定着式バンド・ハンガー・補剛桁の取り合い構造を模式的に示す。ピン定着バンドは、橋軸方向にのみ回転できる一方のピンバンドと、橋軸直角方向にも回転できるユニバーサルバンドに大別される。さらに、本橋ではピン定着バンドに加えて、鞍掛けバン

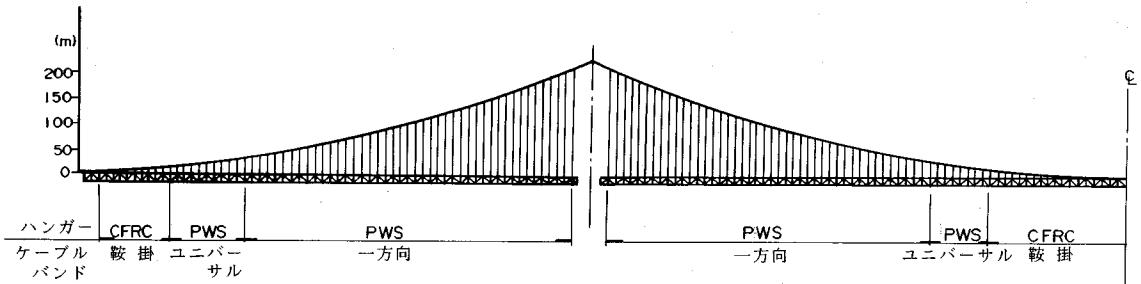


図-7 バンド・ハンガーの種類

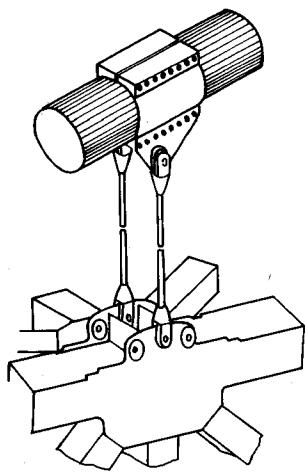
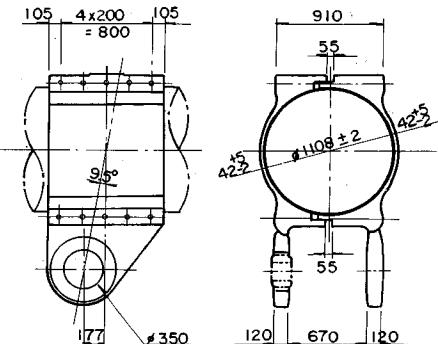


図-6 バンド・ハンガー結合部

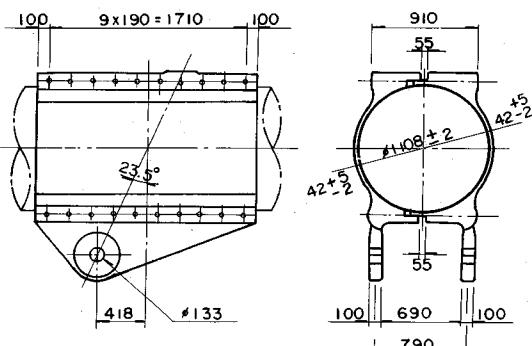
ドも中央径間中央と側径間アンカレッジ近傍に用いられている。この部分はハンガー長が短く、ピン定着式では構造的に無理があったからである。これらの3種類のバンド・ハンガーの配置を図-7に、代表的な設計図面を図-8に示す。本章では、過去に例の少ないピン定着バンドについて、構造の概要、製作方法、品質管理、検査基準などについて述べる。

バンドに用いた鋳鋼品の材料は、溶接構造用鋳鋼品SCW 480とした。機械的性質は、引張強さ $49 \text{ kgf/mm}^2$ 以上、降伏点 $28 \text{ kgf/mm}^2$ 以上、伸び20%以上、シャルピー値27J以上である。

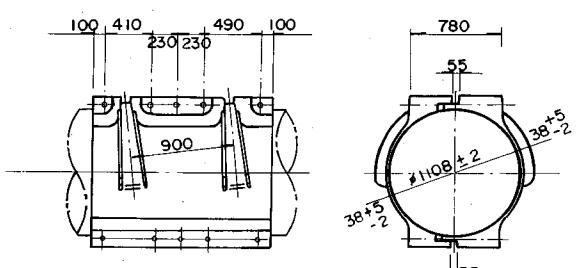
鋳鋼品は溶鋼を砂で作成された鋳型内で凝固させるため、製品内に鋳物砂の混入、ガスホール、凝固速度の不均一、体積収縮などの影響により鋳造欠陥が発生する。この鋳造欠陥を皆無にすることは困難である。このため、土木構造物としては圧縮部材として使用され、引張部材にはあまり適用されていない。しかし、押湯の位置・大きさ、湯道・堰の形状、冷し金の位置・量などを適切に設定すれば、欠陥を最小限に抑えられる。とくに、重大



(a) ユニバーサルピン形式



(b) 一方向ピン方向



(c) 鞍掛け形式

(単位: mm)

図-8 バンド構造

表-2 ピンプレート部の設計応力

部位 荷重	ユニバーサルバンド		一方向バンド	
	C	D	C	D
死荷重	802(47%)	157( 9%)	842(50%)	245(14%)
活荷重	107( 6%)	21( 1%)	118( 7%)	34( 2%)
架設時荷重	1,582(93%)	310(18%)	1,619(95%)	472(28%)
暴風時荷重	1,040(61%)	619(36%)	925(55%)	1,103(65%)

注：C, Dは部位を示す。応力の単位は、kgf/cm<sup>2</sup>である。

( )内は許容応力度に対する比率を示す。

欠陥となりがちな引け巣・割れはほぼ回避でき、またブローホールや砂かみも許容範囲内に收めることができある。したがって、製造段階での品質管理を徹底すれば、引張・曲げ部材に使用することも十分可能である。

表-2にピン定着バンドの設計応力を示す。これにより、ピン孔周辺（図-9のC部）およびピンプレート付け根（同図D部）に大きな引張および曲げ応力が作用していることが理解される。しかし、死荷重応力が卓越しており、活荷重による変動応力は小さく、疲労の問題が生ずる可能性は小さいと推定される。また、暴風時および架設時荷重がより支配的である。これらのが、鋳鋼部材を曲げ・引張が働く部材にも適用した一つの理由でもある。

このように過酷な応力状況のもとにあるピン定着バンドの製作には、製作過程での品質管理が極めて重要である。製作過程は、鋳造方法の立案、木型の製作、主型・中子造型、鋳込み、解枠、砂落とし、鋳仕上げ、中間検査、機械加工、完成検査、塗装となる。この製作手順は通常の鋳鋼品と差異はないが、経験の無い構造であるため、どのような品質のものが製作可能か、非破壊検査で精度良く欠陥が推定できるのか、疑問であった。このような課題を解決するために、実際の大量生産に先だって次に述べる実験を行った。

## (2) 実験

実験は、2種類実施した。

第一は、故意に損傷を与えた供試体を作成し、引張試験により、その欠陥が強度にどの程度の影響を与えるかを調べる実験である。これにより、許容し得る欠陥のサイズを決定し、非破壊検査の管理基準を確立することを目的とした。

図-10は、供試体の種類を示したものである。供試体Aは無欠陥のもので、他の欠陥を有する供試体との比較の基準となる。B1はJIS-G-0581放射線透過試験に規定される1級欠陥を有する供試体である。この規定では、70 mm径の視野内に存在する欠陥のサイズ・個数を点数表示し、この合計点数により等級を定めている。ブローホールでは、欠陥サイズが1 mmから20 mmに対して、

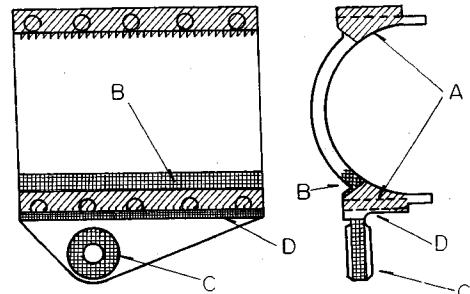


図-9 非破壊検査部位

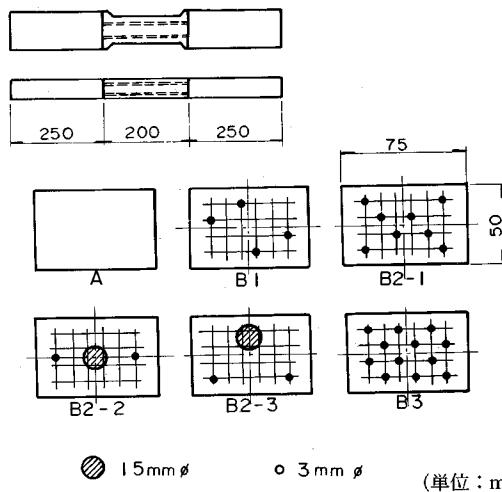


図-10 引張試験の供試体

欠陥1個あたり1点から16点となる。そして、バンド板厚が80-120 mmの場合、10点以下は1級、19点以下は2級、28点以下は3級となる。B2は2級欠陥を有するグループであるが、欠陥のサイズと個数を変えた3種類とした。B2-1は径3 mmのブローホールを8個、B2-2は径15 mmを1個と径3 mmを2個、B2-3はB2-2と同様径15 mmを1個と径3 mmを2個であるが、端部にある。すなわち、小さな欠陥で数が多いもの、許容限度の大きな欠陥、さらにその大欠陥が端にあるものである。B3はJIS 3級相当の欠陥で、径3 mmのブローホールを12個有している。供試体の断面は75 mm×50 mmであり、欠陥は供試体の中央部20 cmの部分を貫通させた。実際の欠陥はこれほど長いものが連続することはありえないが、製作上の理由でこのようにした。また、これは実際より過酷な条件になっている。なお、B3を除いて供試体種類ごとに2個づつ実験した。

表-3は試験結果である。供試体により溶鋼ロットが違うため機械的性質がやや異なるが、B2-2、B2-3の引

表一3 人工欠陥を有する試験片を用いた引張試験結果

供試体 の種類	引張強度 kgf/mm <sup>2</sup>	降伏強度 kgf/mm <sup>2</sup>	伸び %	溶鋼 ロット
A	54.08(1.000)	33.16(1.000)	32.0	a
	53.98(0.998)	32.86(0.991)	33.0	b
B1	53.67(0.992)	32.65(0.985)	32.9	b
	53.78(0.994)	32.76(0.988)	32.3	b
B2-1	53.78(0.995)	32.76(0.988)	33.9	c
	52.86(0.977)	31.12(0.938)	34.3	c
B2-2	49.18(0.909)	29.29(0.883)	34.8	d
	51.73(0.957)	31.63(0.954)	32.9	c
B2-3	49.59(0.917)	30.00(0.905)	35.0	d
	50.71(0.938)	29.90(0.902)	32.9	a
B3	51.22(0.947)	30.51(0.920)	34.9	d

注: ()内はAを1.0にしたときの比率を示す。

表一4 実物大供試体を用いた欠陥探傷結果 (単位: mm)

(a) 一方向バンド					
番号	部位	欠陥種類	RT探傷	UT探傷	切断確認
1	B	砂かみ	φ7	φ15	φ5
2	B	砂かみ	φ6		φ3
3	B	砂かみ	φ8	φ18	φ5
4	B	引け巣	L12		φ8
5	B	未検出	-	φ10	未検出
6	B	砂かみ	φ5	φ12	φ1
(b) ユニバーサルバンド					
番号	部位	欠陥種類	RT探傷	UT探傷	切断確認
1	A	プロホール	φ4	φ4	φ4
2	A	引け巣	L7	φ3	φ3
3	A	引け巣	L6	φ5	φ3
4	A	引け巣	L2	φ3	φ1
5	A	引け巣	L2	φ3	φ1
6	C	未検出	-	φ5	未検出

張強度が最も低い。また、降伏点についても他より低い。したがって、同じ2級相当の欠陥を有していても、小欠陥を多く含む場合より、1個の大欠陥があるものの方が低強度であり、3級相当欠陥を有するものより劣る場合もあり得る。これらの実験結果をふまえ、本橋では2級を基本とはするが、最大許容寸法を10 mmに抑えた。

第二の実験では、実物大の試験体を作成し、非破壊検査で探傷した後、検出された欠陥位置で切断し、欠陥の確認を行った。これにより、実際の製品の品質および铸造方法の妥当性を検証し、さらに非破壊検査の適用限界を探ることも目的としている。試験体は、一方向ピンバンド一体とユニバーサルバンド一体の合計二体とした。

表一4に試験結果を示す。試作品はUT探傷(超音波探傷)およびRT探傷(放射線透過探傷)により欠陥の

表一5 UTで検出された内部欠陥のサイズ・箇所数

部位	欠陥寸法(mm)					合計
	≤2.0	2.1-	4.1-	6.1-	8.0-	
A	0	1	0	0	0	1
B	0	0	0	1	0	1
C	0	4	59	25	1	89
D	0	0	0	0	0	0

種類、サイズ、位置を検出した後、欠陥位置で切断し、確認した。同表より欠陥の種類・サイズが一方向バンドとユニバーサルバンドで偏りが見られるが、これは铸造方法・製作方法の違いによるものであり、この実験結果をふまえて、実際の製作時にはこれらを修正した。

一方向バンドの結果、欠陥発生部位はBに集中しており、種類は砂かみが多い。表中の欠陥番号2, 3, 4は、UTによれば一つの欠陥とみなされるが、実際は3つの小さな欠陥が集まつたものであった。ユニバーサルバンドの結果では、欠陥発生部位はAに集中し、種類は引け巣が多い。2種類の試験バンドに対してRT・UT探傷とともに、実際より大きめに欠陥サイズを検出しがちであることがわかる。

この実物大試験により、RT・UTの2種類の非破壊検査により、内部欠陥の存在は確認できる。ただ、欠陥サイズはやや大きめに検出しがちになり安全側の評価を与えることがわかった。

### (3) 品質管理検査

各製作段階では、主に非破壊検査により品質を管理した。ケーブルとハンガーの角度が位置によって異なるため、バンドの種類は16種類にもなる。各タイプの初回品は、大量生産品の基となるため、RTおよびUTで詳細に検査したが、量産品はUT探傷を主とした。ただし、紛らわしい検査結果が生じた場合には、RT探傷を併用した。

以下に主な品質検査要領を示す。

铸造後、铸肌面のわれなど表面欠陥の有無を、被検査体に磁粉を付着させた上で磁気化し、磁粉の様子により欠陥を検出する、磁粉探傷検査により調べた。判定基準は、割れは不可、密集してない3 mm以下の砂かみ、プロホール等の小欠陥は許容した。

機械加工後に、図一9に示すピンプレートのA, B, C, D部のUT探傷を実施した。探傷法は垂直方向のエコーを検出する垂直探傷法とし、15 mm径の平底孔を有する対比試験片を作成し、エコー高さによって3種類の校正曲線を設定して、欠陥のサイズ・位置を推定した。欠陥サイズが10 mm以上と推定された場合にはRT探傷に

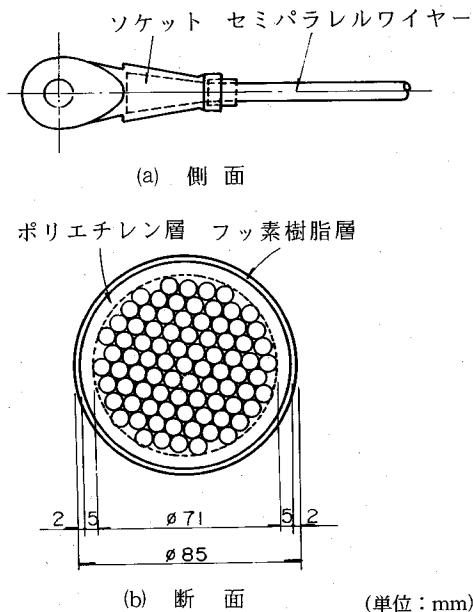


図-11 PWS ハンガー構造図

より再度検査するものとした。同時に、被検査体に浸透液を塗り、欠陥内に浸透した液を現像し浮き上がらせる、浸透探傷法により機械加工表面を検査した。判定基準は、3 mm 径以上の欠陥は不可、2 mm 径以下の欠陥は 100 mm 四方に 5 個以内は許容した。

全てのピンプレート部の UT 検査結果を整理した結果、無欠陥品製品率は 86% であった。検出された内部欠陥のサイズと箇所数を表-5 に示した。実物大試験の結果をふまえて、鋳造方法を修正した結果、引け巣・割れは皆無で、すべてプローホールであった。ほとんどの欠陥サイズは 8.0 mm 以下であり、部位は C に集中していた。全ての欠陥は上述の JIS 1 級の判定基準を満足していた。

## 5. ハンガーロープ

本橋では PWS と CFRC の二種類のハンガーロープが用いられており、これらについて以下に説明する。

### (1) PWS ハンガーロープ

このロープは、近年、斜張橋のケーブルに多く用いられている。工場にて被覆されているため、現地での防食作業は不要である。本橋では、合計 840 本、一本の最大長は 205 m に達するため、現地防食作業の軽減に極めて有利である。

図-11 にこの PWS ハンガーの構造を示す。素線は 7 mm 径の亜鉛メッキ鋼線で、所定の本数がゆるやかによ

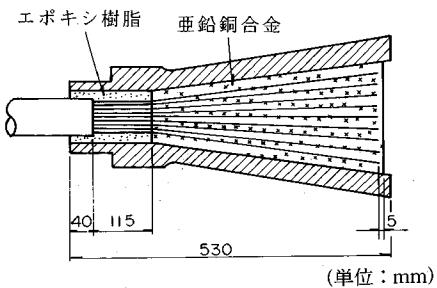


図-12 ソケット口元詳細

られながら集束される。より角度は 3.5° 以内であり、機械特性は平行線ケーブルと同一であり、プリテンショニングも不要である。

二重被覆は 5 mm 厚のポリエチレン被覆と 2 mm 厚のフッ素被覆で構成されている。下層被覆のポリエチレンには耐候性を向上するためカーボンが含まれており黒色である。上層のフッ素被覆は紫外線に強い。また、種々の着色も容易であるため、景観上も優れている。本橋ではケーブルおよび補剛桁ともグリーングレーで統一されている。

このロープの構造的特徴の一つは、図-12 に示すようにソケット口元にエポキシ樹脂が充填されていることである。暴風時にハンガーが橋軸直角方向に変位し、ロープの口元に二次曲げ応力が発生する。その際、エポキシ樹脂が鋼線を弾性支持し、曲げ変形を緩和するため、二次曲げ応力の低減が可能となる。事前の確認実験では、エポキシ樹脂充填のないものに比較して、半分以下の応力になることが確認された<sup>1),2)</sup>。

亜鉛メッキ鋼線までの製作工程は、ケーブルストランドと同一である。鋼線の集束は所定の本数がゆるやかによられ、同時に素線がばらけるのを防ぐためポリエチレン製のテープが巻き付けられる。次に、ポリエチレンおよびフッ素樹脂が押し出し被覆され、所定の長さに切断され、亜鉛・銅合金によりソケット付けされ、エポキシ樹脂がソケット口元に注入され、最後にソケットが塗装される。

線材および亜鉛メッキ鋼線の品質検査項目は、ストランドのものとほぼ同じである。製作された亜鉛メッキ鋼線の品質検査結果を整理・解析した。線径は許容値  $7.00 \pm 0.08$  mm に対して、平均値 7.00 mm、標準偏差 0.012 mm、引張強さは許容値 160–180 kgf/mm<sup>2</sup> に対して、平均値 167.5 kgf/mm<sup>2</sup>、標準偏差 2.8 kgf/mm<sup>2</sup>、伸びは許容値 4% 以上に対して、平均値 6.73%、標準偏差 0.376%，ねじりは許容値 12 回以上に対して平均値 24.3 回、標準偏差 1.17 回であった。

ハンガーの長さはゲージワイヤーで管理される。ゲージワイヤーはストランドの中心にあり、よりの影響を受

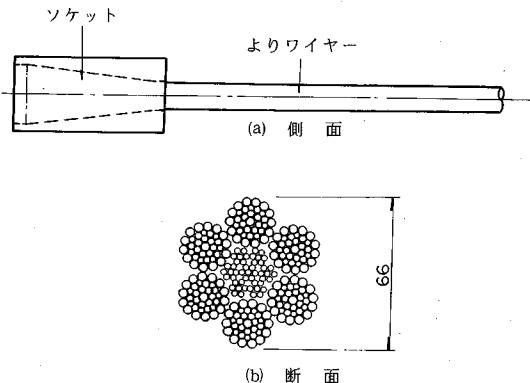


図-13 CFRC ハンガー構造図

けない。ゲージワイヤーへのマーキングは、温度変化の少ない時間帯に、鋼線にテープを沿わせて行った。その際、鋼線とテープの温度差は  $0.2^{\circ}\text{C}$  以内と定めた。製作精度は、製作長  $50\text{ m}$  以上は  $\pm 1/20,000$  以内、 $50\text{ m}$  以下のものについては  $\pm 2\text{ mm}$  以内とした。

ソケット付けは 2 段階でおこなった。後付けのソケット付けは、主ケーブルがほぼ円形に整形され、ケーブル形状が確定した後、実施された。

## (2) CFRC ハンガーロープ

CFRC ハンガーロープは、過去の本四橋梁にも使われており、規格、材料、製作方法もとくに変更はない。ロープ径  $66, 70, 80, 94\text{ mm}$  の 4 種類が使用された。図-13 は標準断面を示す。

ロープ素線は線径  $2.40\text{ mm}$  から  $4.73\text{ mm}$  の 31 種類の亜鉛メッキ鋼線が用いられた。亜鉛メッキ鋼線の引張強さは  $160\text{--}185\text{ kg/mm}^2$ 、伸び  $4\%$  以上である。ねじり回数と亜鉛付着量は線径によって異なり、各々  $10\text{--}14$  回以上、 $210\text{--}270\text{ g/m}^2$  以上である。

これらの素線がよられてロープを構成する。ロープ品質の確認は 1 条につき 1 本、切断荷重、弾性係数、ロープ径を測定する。弾性係数は  $14,000\text{ kgf/mm}^2$  以上、公称径は  $\pm 6\%$  以内でなければならない。ロープ径ごとに 1 本づつ切断試験されたが、使用本数が多い  $66\phi$  の試験結果は、ロープ径  $67.6\text{ mm}$  (許容値  $66.0\text{ mm} \pm 4.0$   $-0$ )、切断荷重  $341\text{ t}$  (許容値  $301\text{ t}$ )、弾性係数  $14,100\text{ kgf/mm}^2$  であった。

ロープはより加工された後、プレストレッシングされた。プリテンション作業は、切断荷重の 55% の荷重を 60 分間、2 回載荷された。ロープの測長・マーキングは、プレストレッシング後、温度変化の少ない夜間に、ロープに常時作用する設計荷重で引っ張った状態で、基準テープにより行った。ソケット付けは、PWS ハンガーと

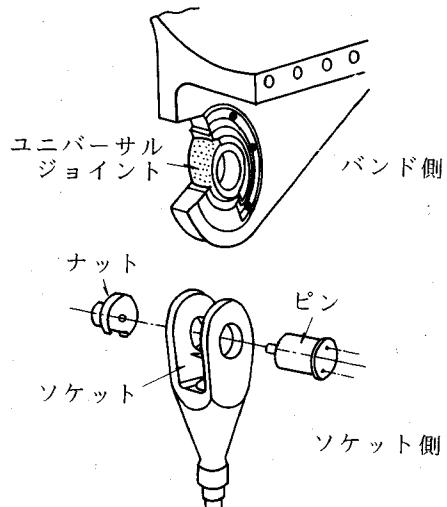


図-14 バンド・ハンガー結合の詳細

同様、主ケーブルがプレスクイーズされ、ケーブル形状が確定した後に行われた。

## 6. ケーブル付属品

主ケーブル、ケーブルバンド、ハンガーロープの結合部には種々の付属品が必要となる。図-14 は、ユニバーサルタイプのケーブルバンドとハンガー用ソケットの取付状態を模式的に示したものである。バンドには全方向に回転可能なユニバーサルジョイントが挿入され、ソケットとはピンで結合している。本章では、ピン、ソケット、ユニバーサルジョイント、バンドボルトについて説明する。

### (1) ユニバーサルジョイント

ユニバーサルジョイントは、外側のスリーブと、内側のブッシュで構成されている。ブッシュは球面であり、スリーブをガイドにして、全方向に回転できるようになっている。

ブッシュの本体は高力黄銅鑄物であり、表面に四フッ化エチレン樹脂を含有した固体潤滑剤が埋め込まれている。高力黄銅鑄物の機械的性質は引張強さ  $80\text{ kgf/mm}^2$ 、伸び  $10\%$ 、硬さ  $235\text{--}275\text{ HB}$  である。

スリーブの材質は HBS-B-4301 で規定されるマルテンサイト系ステンレス鋼棒 SUS-431 である。引張強度は  $70\text{ kgf/mm}^2$  以上、降伏点  $50\text{ kgf/mm}^2$  以上、伸び  $15\%$  以上、絞り  $40\%$  以上、硬さ  $245\text{--}285\text{ HB}$ 、衝撃値  $29\text{ J/cm}^2$  以上である。ただし、硬さはリンク支承を参考にしてやや硬めになっている。

ピン外径とブッシュ内径には設計上 1 mm しかすき間がないため、ブッシュ内径許容差は 0-0.1 mm, ユニバーサルピンの外径許容差  $\pm 0.5$  mm 以内になるように製作した。

ユニバーサルジョイントは、ドライアイスと灯油を用いて低温収縮した状態でバンド孔に挿入し、常温になればしっかりと定着される、いわゆる冷やしばめ法により装着された。冷やしばめに先だって、バンド孔の外径寸法が 0-0.089 mm, ユニバーサル外径寸法が 0.108-0.197 mm, したがって締め代が 0.019-0.197 mm 内にあることを確認した。

## (2) ピン

バンドとハンガーを結合するのはピンである。バンドの種類に応じて二種類の材質のピンが採用された。すなわち、発生応力が高い一方向バンド用には応力腐食割れに比較的優るクロムモリブデン鋼が、相対的に発生応力度の低いユニバーサルバンドには防錆に優れるステンレス鋼が用いられた。

一方向ピンは、直径 130 mm, 長さ 293 mm で、材料は JIS-G-4105 に規定されるクロムモリブデン鋼 SCM 45 である。引張強さ 95 kgf/mm<sup>2</sup>以上、降伏点 80 kgf/mm<sup>2</sup>以上、伸び 15%以上、絞り 50%以上、衝撃値 78 J/cm<sup>2</sup>以上、硬さ 269-331 HB である。一方向ピン表面には、JIS-H-8615 に規定される硬質クロームメッキを 2 層にわたり合計 100  $\mu\text{m}$  を施した。メッキの密着性は、と石試験を行って剝離・膨れがないことを確認した。また、耐食性は塩水噴霧試験を 24 時間実施し、同上の JIS に規定されている腐食の度合いを示すレイティングナンバーが 9 以上であることを確認した。

ユニバーサルピンは、直径 160 mm, 長さ 383 mm で、材料は HBS-B-4301 で規定されるマルテンサイト系ステンレス鋼棒 SUS-431 である。引張強度は 70 kgf/mm<sup>2</sup>以上、降伏点 50 kgf/mm<sup>2</sup>以上、伸び 15%以上、絞り 40%以上、硬さ 210-250 HB、衝撃値 29 J/cm<sup>2</sup>以上である。材料はミルメーカーにて UT 検査し、内部の健全性が保証されているものを使用した。また、機械加工後の表面は染色浸透探傷により検査した。

## (3) PWS ハンガー用ソケット

従来用いられてきた鞍掛けハンガーは、定着は全て支圧式であり、基本的にはソケットには圧縮力のみが作用するため、鍛鋼が用いられてきた。ところが、ピンタイプバンドと同様、PWS ハンガーソケットのピンプレート部には引張・曲げ応力が発生する。しかも、バンドのピンプレートより一層コンパクトな断面になっているため、わずかな内部欠陥も避けたい。そこで、ソケットとしては初めて型鍛造により製作した。

型鍛造とは、加熱された鋼片を、上下組になった金型の間にはさみ、エアースタンプハンマーで打って成形する方法である。その後、焼きならししたうえで、ピン孔・ピン座面などを機械加工した。鍛造素材は、機械構造用炭素鋼鋼材 S 45 C で、引張強度 58 kgf/mm<sup>2</sup>、降伏点 35 kgf/mm<sup>2</sup>、伸び 20%，硬さ 167-229 HB である。

量産前に、試作品を製作し、寸法・外観を確認した。さらに、ソケット本体を切断し、マクロ試験片およびミクロ試験片を切り出し、内部組織が健全であることを確認した。

量産品については、鍛造面は磁粉探傷を、機械加工面は浸透探傷により、表面の健全性を検査した。製作寸法精度に関しては、ピン内径と 2 枚のピンプレート間隔がとくに重要であり、ともに許容値は設計値の  $\pm 0.5$  mm とした。また、ピンプレートどうしの平行度、ピンとピンプレートの直角度、ソケット内面のテーパー角度については、専用のゲージにより精度を確認した。

## (4) バンドボルト

ケーブルバンドを締め付けるボルトは、長さ 1,120 mm と 990 mm の 2 種類があり、予備品を含めて総数 6,907 本製作した。このバンドボルトの材料は、JIS-G-4105 に規定されるクロムモリブデン鋼 SCM 45 である。引張強さ 95-120 kgf/mm<sup>2</sup>、降伏点 80 kgf/mm<sup>2</sup>以上、伸び 15%以上、絞り 50%以上、衝撃値 78 J/cm<sup>2</sup>以上、硬さ 269-331 HB である。ナットは、機械構造用炭素鋼鋼材 S 45 C-H である。

バンドボルトに導入される軸力は、ハンガー張力作用時において降伏点の 75%以下に設定した。また、遅れ破壊を防ぐため引張強度の上限は 80 kgf/mm<sup>2</sup>を抑えた。これらの機械的性質および熱処理条件を確認するため、大量生産に先立ち実物大の引張試験を実施した。この結果、焼入れ 840°C、焼き戻し 550°C で熱処理すれば規定値を満足することを確認した。

ボルト・ナットの全面には、下面に磷酸塩皮膜処理(15  $\mu\text{m}$  厚)した上に長暴型エッティングプライマー(15  $\mu\text{m}$  厚)塗布した防錆処理を施した。さらに、ネジ部以外にはエポキシ樹脂およびフッ素樹脂を塗装した。

## 7. 結論

明石海峡大橋の主ケーブルに関する工場製作物の製作・品質管理について説明した。主な内容をまとめると以下になる。

- (1) 4,000 m を越える PWS を製作したが、亜鉛メッキ鋼線の機械的強度、ストランドとしての強度・機能、長さの精度とも、所定の水準を満足した。
- (2) わが国での実績に乏しいピン定着バンドを製作し

表一6 主な本体構造物の数量・製作期間

製作物	数量(t)	製作期間(月)
PWS	50,459	38 (1991.8-1994.9)
PWSソケット	140	13 (1991.8-1992.8)
ケーブルバンド	2,197	20 (1993.7-1995.2)
PWSハンガー	1,962	23 (1993.8-1995.6)
C F R Cハンガー	84	12 (1994.5-1995.4)
ハンガーソケット	374	14 (1993.9-1994.10)
塔頂サドル	616	18 (1991.9-1993.2)
スプレーサドル	1,388	24 (1991.9-1993.8)
ハンガーピン	32	10 (1993.9-1994.6)
ユニバーサルJ	12	10 (1993.9-1994.6)
バンドボルト	100	8 (1994.6-1995.1)

たが、鋳鋼品に不可避とされる内部欠陥は少なく、設計上の引張・曲げ応力に対しても十分な強度・品質が確保できた。

(3) エポキシおよびフッ素樹脂による防食被覆を施した、最大長さ 200 m を越える PWS ハンガーロープを作成した。亜鉛メッキ鋼線の機械的強度、長さの精度、被覆層の品質とも、所定の水準を満足した。

(4) 主ケーブル、バンド、ハンガーの結合部に用いられる、ユニバーサルジョイント、ピン、ソケット、バン

ドボルトについて材料、製作方法、品質検査について説明した。これらの付属構造物も所定の品質を満足できた。

以上、わが国のみならず諸外国でも類のない、質・量を有する主ケーブルおよび付属構造物の製作に関し、材料、製作技術、品質検査などについて詳細な説明を行った。表一6 に主な製作物の数量、製作期間を示した。この表から理解されるように、すべての製作にはほぼ 5 年の歳月を要した。将来、本橋を越える規模の次世代の超長大吊橋の建設される際には、本橋で蓄積した製作技術ノウハウが役立つと思われる。

最後に、これらの工場製作品の設計・製作・検査には多くの企業・技術者・作業員が従事した。ここに、関係各位に謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 河口、福永：明石海峡大橋のバンド・ハンガー構造（その1），本四技報，Vol. 18, No. 70, pp.22-28, 1994.4.
- 2) 河口、福永：明石海峡大橋のバンド・ハンガー構造（その2），本四技報，Vol. 18, No. 71, pp.29-34, 1994.7.
- 3) 高橋他：橋梁ケーブル用高強度強度亜鉛メッキ鋼線の開発，製鉄研究，第 332 号，pp.53-58, 1989.

(1995.4.13 受付)

## QUALITY CONTROL OF FACTORY FABRICATED PRODUCTS FOR THE AKASHI KAIKYO BRIDGE CABLE WORK

Koji KAWAGUCHI, Susumu FUKUNAGA, Masaru TAKENO  
and Shunichi NAKAMURA

Prefabricated parallel wire strands have been adopted as the main cables of the Akashi Kaikyo Bridge, a suspension bridge with main-span of 1,990 m. These strands are fabricated at factories and bundled into a main cable at site. The tensile strength of steel wires consisting the strands is 180 kgf/mm<sup>2</sup>, which is 20 kgf/mm<sup>2</sup> higher than that of conventional wires. Pin-plate type cable bands made of cast steel have been adopted on the bridge, in addition to the conventional groove cable bands. A new type of ropes, long-lay steel wire strands doubly coated with polyethylene and fluoric resin were introduced as the hanger ropes. These factory fabricated products are new materials with new structural forms, and surpass the past records in kinds and volume. Structural forms, materials, fabrication processes, quality control methods and inspection items of these products, parallel wire strands, cable bands, hanger ropes and other cable accessories, are presented in this paper.