
本州・四国連絡橋大鳴門橋サドルの設計・製作

Design and Fabrication of Saddles for Onaruto Bridge for Honshu-Shikoku Bridge Authority

山浦 茂義(Shigeyoshi Yamaura) 土平 純一(Jun-ichi Tsuchihira) 大根 世紀(Seiki One) 佐郷 司朗(Shiro Sago) 館野 次郎(Jiro Tateno) 和気 利明(Toshiaki Wake)

要旨：

本四連絡大鳴門橋の主ケーブルを保持する主塔，側塔，スプレイの各サドルの詳細設計と製作を行い納入した。前 2 者は鋳鋼 1 体型，後者は鋳鋼＋鋼板の溶接組立型である。主ケーブルの応力を直接受ける大型重要部材であるので設計に当たって有限要素法による応力解析を行って適切な形状，寸法を決定した。鋳鋼部には冷し金，メタルパッドを併用し指向性凝固を確保し UT などにより良好な内部品質を確認した。溶接に当たっては事前に溶接部の強度試験を行い半自動溶接法（CO₂ シールド）を主体に溶接組立した。厚鋼板の溶接組立歪対策として 2 つのサドルを抱き合わせ同時に溶接を行った。複合円の鞍内面加工は大型の 5 軸 NC 付フランス盤を使用し高精度で加工できた。

Synopsis：

Recently, Kawasaki Steel completed the detail design, manufactured the main tower saddles, side towersaddles and spray saddles which support the main cable of Onaruto Bridge and delivered them to the Honshu-Shikoku Bridge Authority. The main tower saddles and side tower saddles were made of steel castings; the spray saddles were of the hybrid type of steel castings and plates. The saddles were huge and vital parts receiving direct load of the main cable. The shapes and dimensions of the saddles were designed by the finite element method. The steel castings were manufactured by using chills and metal pads and verified as sound by MT & UT. The spray saddles were fabricated by the back to back jointing method with two-blocks and achieved extremely slight strain. High accuracy was obtained in machining the cable groove of saddles by using vertical lathe with five-axis numerical control.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

本州・四国連絡橋大鳴門橋サドルの設計・製作

Design and Fabrication of Saddles for Onaruto Bridge for Honshu-Shikoku Bridge Authority

山 浦 茂 義*
Shigeyoshi Yamaura

土 平 純 一**
Jun-ichi Tsuchihira

大 根 世 紀**
Seiki One

佐 郷 司 朗**
Shiro Sago

館 野 次 郎***
Jiro Tateno

和 気 利 明****
Toshiaki Wake

Synopsis:

Recently, Kawasaki Steel completed the detail design, manufactured the main tower saddles, side tower saddles and spray saddles which support the main cable of Onaruto Bridge and delivered them to the Honshu-Shikoku Bridge Authority.

The main tower saddles and side tower saddles were made of steel castings; the spray saddles were of the hybrid type of steel castings and plates. The saddles were huge and vital parts receiving direct load of the main cable. The shapes and dimensions of the saddles were designed by the finite element method.

The steel castings were manufactured by using chills and metal pads and verified as sound by MT & UT. The spray saddles were fabricated by the back to back jointing method with two-blocks and achieved extremely slight strain. High accuracy was obtained in machining the cable groove of saddles by using vertical lathe with five-axis numerical control.

1. 緒 言

大鳴門橋は本州四国連絡橋公団によって淡路島門崎と鳴門市大毛島間の鳴門海峡に建設中の全長1629mの長支間吊橋である。この吊橋に使用されるサドルはその主ケーブルを保持する構造部材で主塔サドル、スプレーサドル、側塔サドルから成っている。本橋は長支間、かつ、道路、鉄道併用吊橋であるので道路橋に比べケーブル張力が大きくサドルは世界最大級の規模である。従って、製作にあたって大型化、厚肉化により生ずる铸造、

溶接、機械加工に種々の技術的課題を解決する必要があった。それぞれのサドルの設置位置を Fig. 1 に示す。

工事範囲は各サドルの詳細設計から製作、現地輸送までである。

2. 基本構造とその設計

サドルの大型化とともに、合理的構造と高信頼性設計の重要性が増してきた。本項では、基本構造と、基本設計から製作図に展開する段階で実施した詳細設計の一部を紹介する。

* 水島製鉄所鑄鍛部部長

*** 水島製鉄所企画部設計室主査（課長）

〔昭和56年12月24日原稿受付〕

** 水島製鉄所鑄鍛部鑄鍛管理室主査（課長）

**** 水島製鉄所保全全部保全技術室主査（課長）

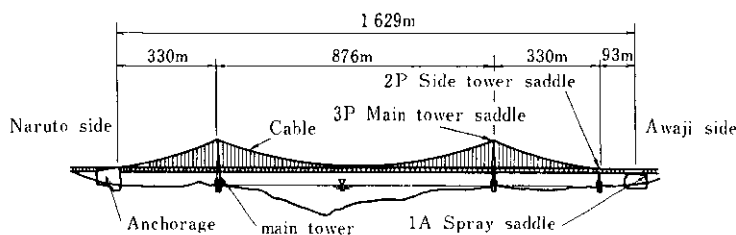


Fig. 1 Location of saddles

2・1 3P主塔サドル

当サドル (Photo. 1 参照) は、主塔頂部にあり主ケーブルを支持する。そのケーブルのおもな仕様は、次のとおりである。

- (1) ケーブル最大張力：28 200tf/ケーブル(3p側)
- (2) 素線径：5.37mm
- (3) ストランドの構成素線数：127本
- (4) ケーブルの構成ストランド数：154本
- (5) ケーブル径：84cm

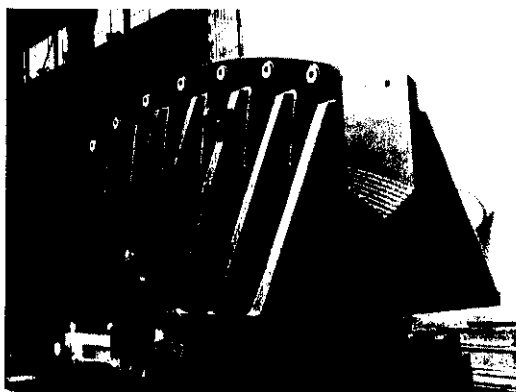


Photo. 1 3P main tower saddle

ケーブル断面および主塔サドル形状を、Fig. 2 に示す。このサドル型式は、鞍直下の中央リブを介して主荷重を伝達する機構であり、最近の長大吊橋に多く採用されている。主塔サドルは鑄鋼1体型であって最大級の鑄鋼品 (SCW 49) である。ケーブルからの荷重は、鞍底部円周面の法線力、接触面の摩擦力およびケーブルの扁平化に伴う側壁面の水平力であり、サドルから主塔の塔頂補強構造を介して、塔壁に伝達される。この型式のサドルに発生する応力は、引張応力部が少なく、安全度は高いが、塔頂構造がやや複雑である。またサドルと塔頂部は相互の剛性の影響を受ける¹⁾。

また、ケーブル溝形状を複合円にして軽量化を計っている。

2・2 2P側塔サドル

本サドル (Photo. 2 参照) は、側塔頂部に固定される。側塔下部は、ピン支持構造でありケーブルの温度変化を含む活荷重载荷により橋軸方向に変位する。1A・2P間のケーブルには、側塔が主塔側に倒れないように2本のエキストラストランドを設け、その端部は、側塔サドルに固定されて

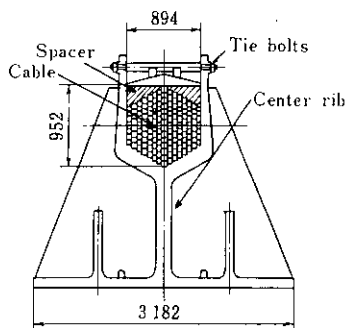
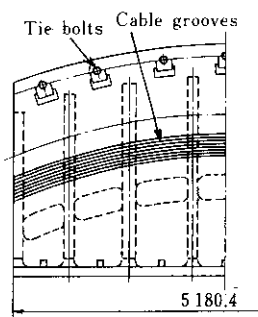


Fig. 2 3P main tower saddle

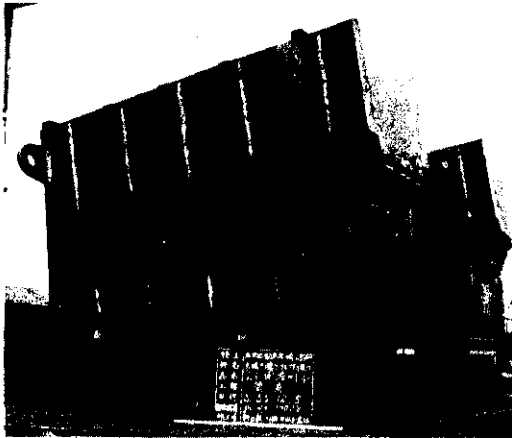


Photo. 2 2P side tower saddle

いる。側塔サドルの基本構造を Fig. 3 に示す。本サドルの特徴としてケーブルがサドル内でスリップするのを防止するため、上蓋を設け締付ボルトでケーブルを強固に締付け、摩擦力の増大を計っている。ケーブルの振れや塔傾斜によるケーブル入射角変動に対してケーブル角折れがないよう溝形状を決定するとともに、上蓋の内面は、両端部を上向き R の形状にすることにより、上蓋締付ボルトに過大な応力が生じない構造とした。締付ボルトは、M45×1 264、16本、材質はクロムモリブデン鋼SCM440とする。ボルトの締付応力は60kgf/mm²、全締付力は、1 300tfである。導入力の70%を有効締付力としており、リラクゼーションに対しても十分安全である。サドル断面に作用する荷重は、ケーブル張力による鉛直力に加えて、上蓋締付力がある。締付力は、側壁面への水平力分布に対しても、大きく影響し、摩擦力増加に有効であるが、

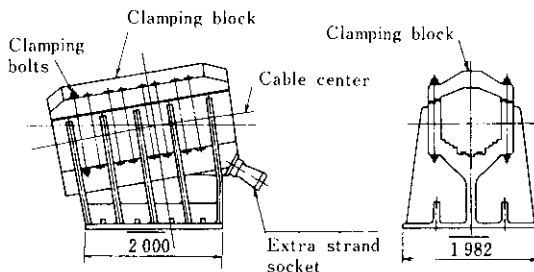


Fig. 3 2P side tower saddle

サドル強度に締付力の影響を考慮する必要がある。側壁面への水平力分布は、次式により検討した。

$$P_{H}(h) = \frac{BL}{2\mu} (1 - e^{-\frac{2\mu}{3L}h}) + \frac{N}{3L} e^{\frac{2\mu}{3L}h}$$

ここで B : ケーブル鉛直力 (tf/cm²)

L : 1 ストランド幅 (cm)

μ : 素線と側壁の摩擦係数 0.15

N : 締付力 (tf)

h : ストランド高さ (cm)

側塔サドルは、鋳鋼 (SC 46) 1 体品で、比較的軽量小型であり、主塔サドルのような塔頂部剛性の影響は小さい。

2・3 1A スプレーサドル

ケーブルの末端では、各ストランドを鉛直ならびに水平方向にスプレーし定着点に固定する。本サドル (Photo. 3 参照) は、そのスプレーの起点になるサドルである。Fig. 4 に 1A スプレーサドルの構造を示す。上部ケーブル支承は、多数本のロッカーローラ上のにり、橋軸方向に移動可能である。溝形状は、各ストランドが、できるだけ形崩れせず、また、アンカー側出口付近で角折れを生じないように決定する。上部支承は、加工時の精度向上を考慮し橋軸直角方向 2 分割構造としボルト接合である。また、鞍部は鋳鋼 (SCW 49) であり、リブおよび下底板は鋼板 (SM 50 B) の溶接ハイブリッド構造である。重量軽減のため比較的高応力設計にする必要から、詳細設計時に有限要素法解析を実施し、ローラ支承反力等手計算では不明な点の詳細検討を行った。スプレーサドルに作用する荷重は、ケーブル溝底面への底面圧、底面鉛直



Photo. 3 1A spray saddle

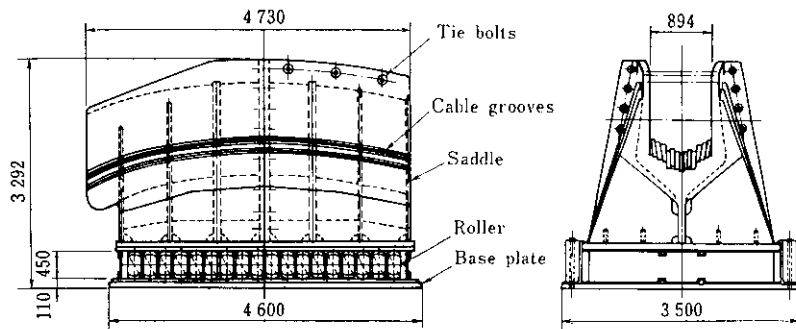


Fig. 4 Spray saddle (1A)

力により派生する側圧およびケーブルの水平スプレーによる側圧がある。解析はまず、サドル全体を平板要素により3次元解析し、全体の応力レベルをみた。Fig. 5に解析結果を示す。主応力ならびに最大剪断応力ともに十分安全な応力度である。ただし、全体解析では、モデル容量上、上部本体のみを取り出し、底面固定条件とした。次いで、基礎の剛性の影響ならびに局部応力を解析するため高応力部を取り出し、基礎と連成して部分平面解

析を実施した。Fig. 6に部分解析モデルを示す。解析結果をFig. 7, 8に示す。局部応力の最大値はケーブル溝側端のコーナーR部①に生じる。コーナーRが3mmの場合、図のごとく4046kgf/cm²である。SCW 49の降伏点(28kgf/mm²)より高いので、集中応力を緩和するためNeberの応力集中理論に基づく推定より①部のコーナーRはR3よりR10に他のコーナーはR5に変更し、これは全サドル共通とした。

Fig. 9にローラ支承部底面反力分布を示す。曲線A, B, Cは基礎と連成した場合で、それぞれ、上支承下部、ローラ下部および底板下部の反力分布を示す。上支承下部の反力分布は、底面固定の場合Dと比較すると、基礎の剛性を考慮の時は、中央部が減少し、端部が増大する。ローラ下部は端部が高い。下底板は、ほぼ均一な分布を示す。これらの解析結果にもとづき、ローラの形状、ローラ表面溶接肉盛の材質、厚さを決定した。また

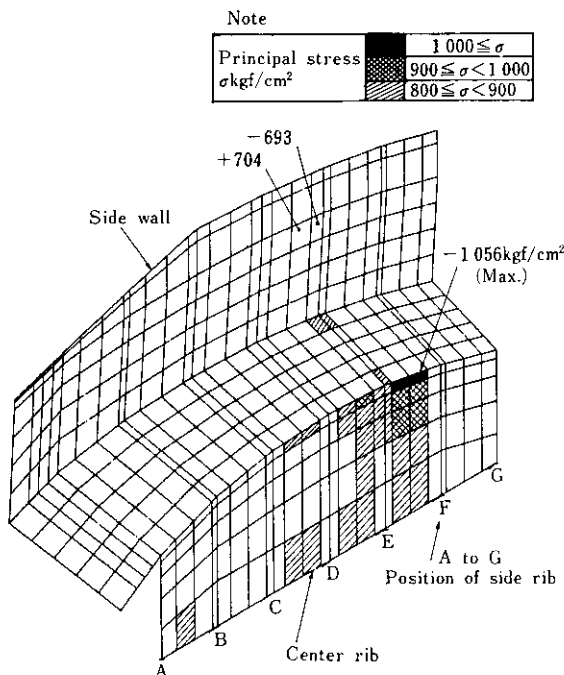


Fig. 5 Principal stress distribution in the spray saddle (1A) by 3 dimensional analysis

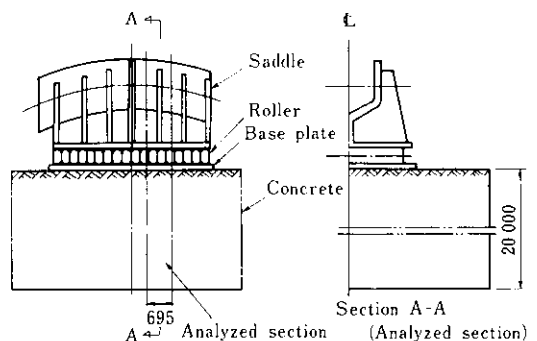


Fig. 6 Finite element analysis model of the spray saddle (1A) for 2 dimensional analysis

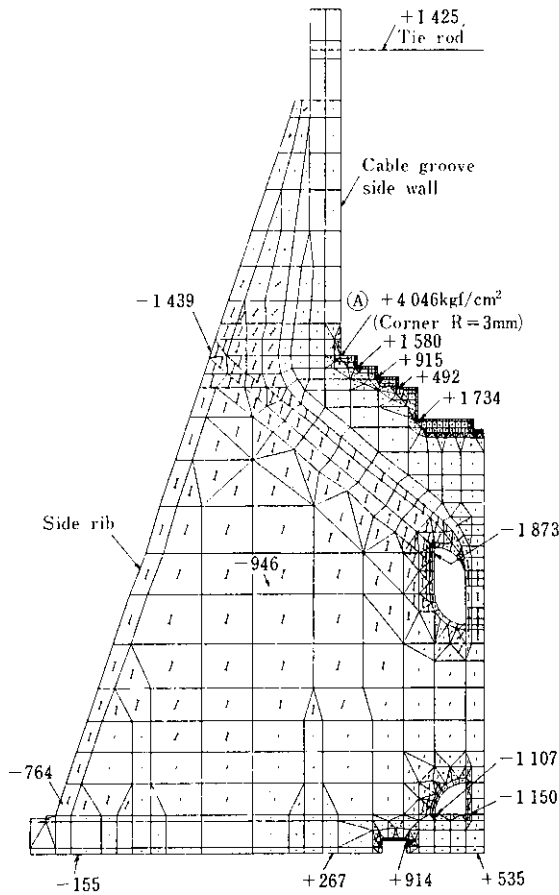


Fig. 7 Principal stress distribution in the spray saddle (1A) by 2-dimensional analysis

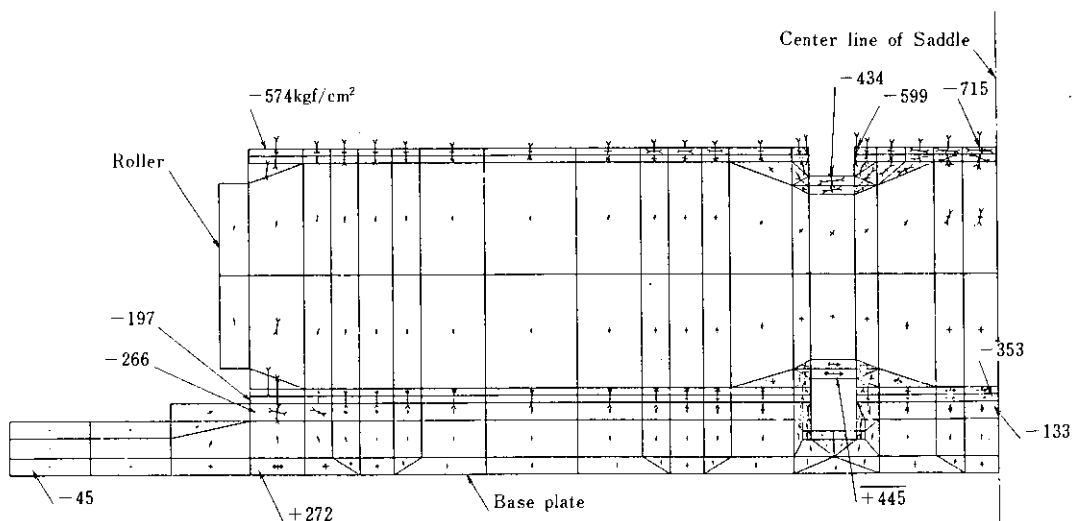


Fig. 8 Principal stress distribution of the roller and base plate in the spray saddle (1A)

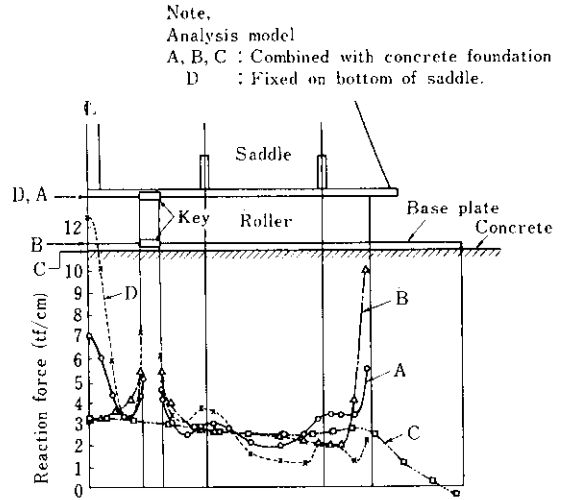


Fig. 9 Distribution of reaction force in the roller and base plate of the spray saddle (1A)

線荷重の局部的に集中する中央部にはキー溝を避け、左右対称に2条設けた。端部は、若干の逃げをとり、局部集中支圧を緩和した。次に上部支承は、大型化により分割構造になったが、その分割面結合ボルトは、ケーブルの摩擦による分離力その他、基礎面のたわみによる曲げモーメントの影響を考慮して仕様を決定した。ボルトは、M64×30本、材質はニッケルクロムモリブデン鋼 SNCM 439とした。

3. 鋳鋼部材の製作

3.1 鋳造方案

高度の品質を要求される鋳鋼品の製造には応力分布を知り、その特性を製造計画へ折り込み要求品質を得ることが肝要である。鋳造方案では、鞍内面に引張りの応力集中があることを特に考慮し、この部分の品質を最重点とし介在物、逆V偏析帯およびその近傍の微小引裂などの鋳造欠陥の防止と作業性を加味し Fig. 10, 11 に示す方案を採用した。下方から押湯に向って指向性凝固がなされるよう立案し、その手段としてメタルパッドと冷し金を用いて凝固を制御した。Y 交叉部へはメタルパッドを付け増肉することにより給湯し、更に下型および側面へは冷し金の大小とその砂付き量を変え凝固の停滞のないように制御した。

冷し金の効果は電算機による凝固計算から求めた。砂目地のある冷し金の冷却面積の拡大率²⁾は

平均面積拡大係数で数値化できる。その一例を Fig. 12 に示す。同図は実操業に適用しやすい様に冷し金の間隙を 20mm とし占有率を 64% として整理している。冷し金効果を加味した凝固係数 M_{chill} を用いて鋳物各部の肉厚に対応した冷し金の適用条件が決定された。

押湯の大きさはモジュラス計算により設計した。スプレーサドルの場合押湯直下に中央縦リブの開先部が位置する。当部位は押湯の高さによって正負の偏析が生ずるが強度、溶接性の点から偏析を避けなければならない。当社の SCW 49 級鋼種の押湯直下の炭素偏析傾向を Fig. 13 に示す。図中の予測式を用いて C 偏析率を 5% 以下になるように押湯高さを決定した。

3.2 材質の検討

鞍部鋳鋼材には強靱性と組立溶接に対する溶接性が良いことが要求される。当鋼種の靱性を調べるために三点曲げ試験片を用いて J 積分値より K_{IC}

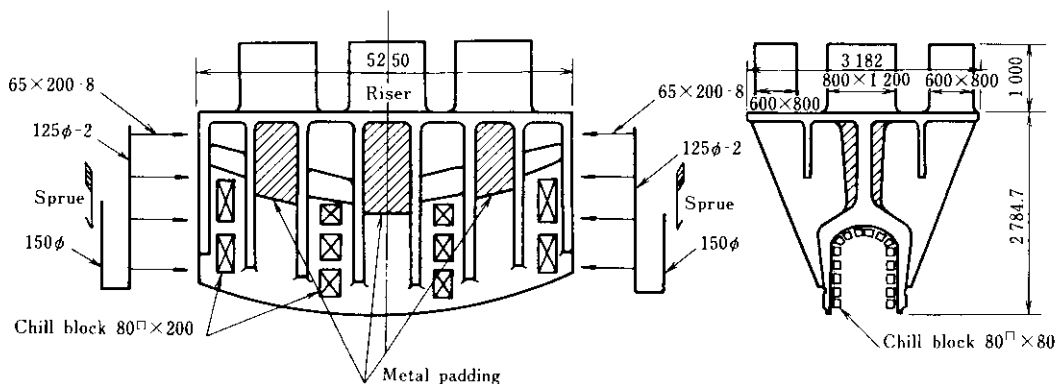


Fig. 10 Casting design of 3P main tower saddle

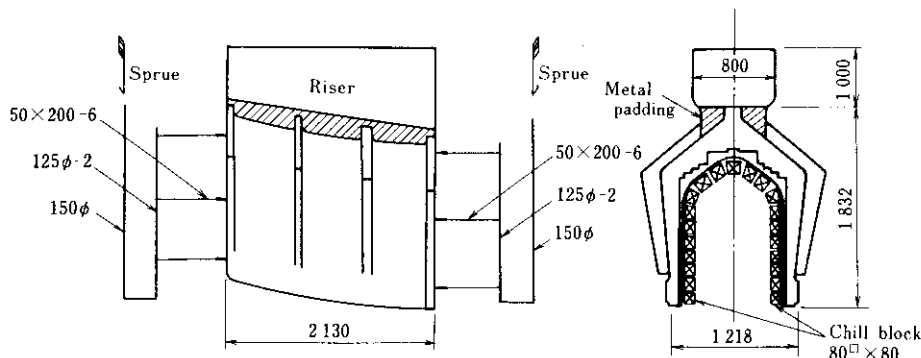


Fig. 11 Casting design of 1A spray saddle

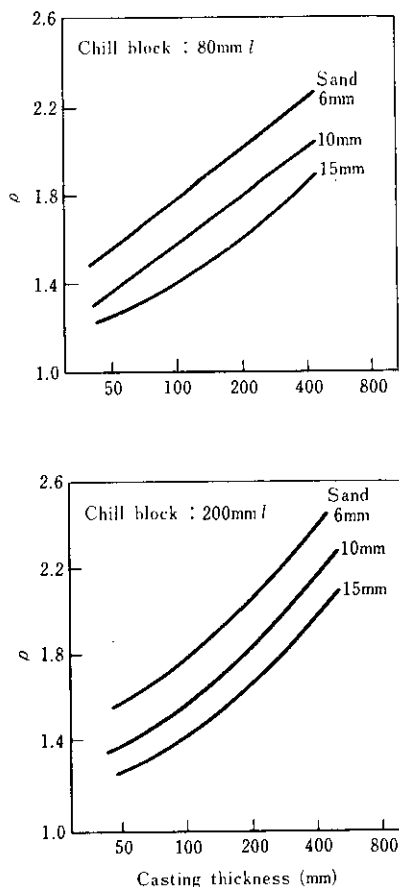


Fig. 12 Relation between casting thickness and coefficient ρ of chilling ability at chill occupancy rate of 64%

を求めた (Fig. 14 参照)。同種鑄鋼と比較して遜色ない数値であった。Table 1 に目標成分、実績

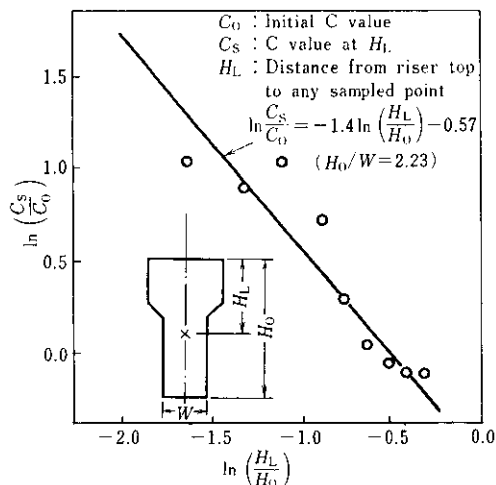


Fig. 13 Relation between vertical segregation ratio $\ln(C_s/C_0)$ of carbon and $\ln(H_L/H_0)$

成分とその材料試験結果の一例を示す。

3.3 製造および検査

造型に当っては寄せ中子方式を採用して全体を構成した。肌砂は全面クロマイトダイカカル砂を使用し焼付のない、美麗な鑄肌を狙った。サドルのリブおよび底板は強度部材でありまた塔頂各リブに正確に一致させるために中子の型合せに当っては慎重に寸法チェックを行って実施した。

溶鋼は180t塩基性上吹転炉で溶製し鑄造した。

製品は磁粉探傷試験、浸透探傷試験および目視にて全面検査を行った。鞍部および底板と縦リブの交叉部は超音波探傷試験にて、鞍部高応力部は

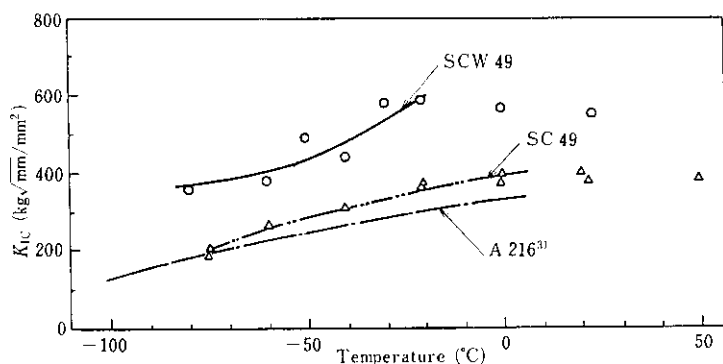


Fig. 14 Experimental result of plane-strain fracture toughness (K_{IC}) of SCW49

の余長を残して溶接し、応力除去焼鈍したのちその余長部を切断する方法をとった。底板⑤の溶接による歪み発生が特に懸念されたため、②～④の各リブと鞍部鋳鋼品との溶接が完了後底板とのメタルタッチが90%以上となるまでグラインダーで成形し底板を取り付けた。また、アンカー側とバックステー側サドルを Fig. 15 に示すように抱き合わせ、歪み防止用ピースを底板端面周囲に強固に取り付けた状態で溶接および応力除去焼鈍を行った。溶接組立状況を Photo. 4, 5 に示す。

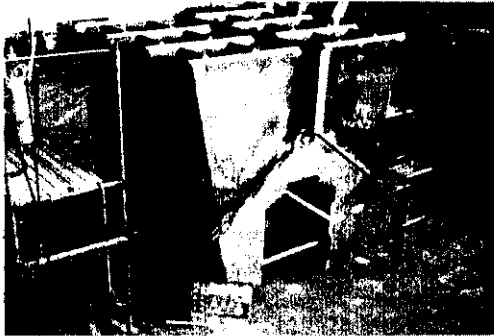


Photo. 4 Assembling before bottom plate setting

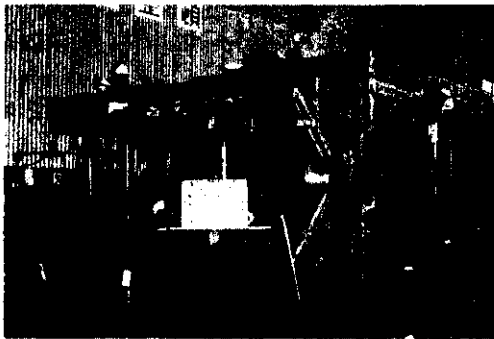


Photo. 5 Docking of two saddles

5. 機械加工

5.1 ケーブル溝部の加工

溝底面は異なった曲率の複合円になっている。さらにスプレーサドルは橋軸直角方向に広がる三次元曲面になっている。そのため曲面を切削加工するには大型でかつ多軸の数値制御機能を備えた工作機械が必要であり、東京芝浦電気(株)鶴見工場

の5軸NC付大型フライス盤で加工を行った。

加工に先だって、1)模型試削による検討、2)曲面度、溝幅深さの加工精度確保のためラム、ヘッドの剛性向上、3)ビビリ、削り残り防止のための特殊カッターの製作等を行った。

スプレーサドルは精度上および作業性の面から2分割で溝加工を行った。Photo. 6に加工状況を示す。Fig. 16に溝部の寸法精度結果の一例を示す。



Photo. 6 Machining of saddle by 5-axis NC milling machine

5.2 支承板、ローラーの製作

前記スプレーサドルの応力解析により支承部材は表面硬度180H_B以上、硬度深さ7mm以上を必要とした。支承板、ローラー共サドルの機構上据付後の防錆保守は不可能である。その点を考慮し材料の検討を行った結果、支承板、ローラー転動面肉盛共SUS 410 (Modified)とし板材については油焼入れ、焼戻しとし、必要硬度、強度を確保した。硬度深さ、加工時の歪みの発生を考慮して、仕上り20mmの鋼板とし両面加工後ビス止めし、外周シール溶接して本体に固定した。

5.3 組立て、作動テスト

スプレーサドルは場内で上部本体、ローラー、下底板の仮組立てを行い作動テストを行った。上部シューを前後に180mm移動した時の上下、左右

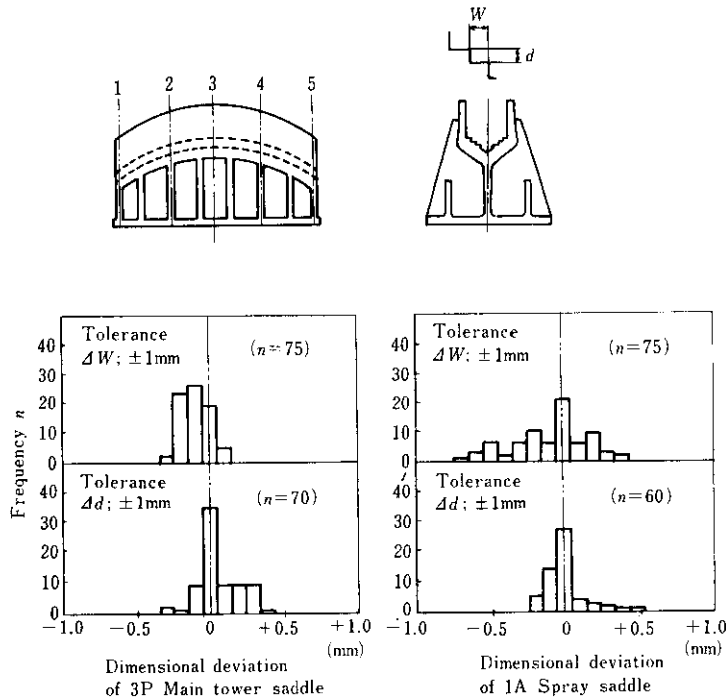


Fig. 16 Dimensional result of cable receiving grooves

方向への振れは0.02mm以下で製作精度が良好なことを確認した。

6. おわりに

詳細設計から製作まで入念な事前検討と確性試験を行って対処した結果、所期の目的を達するサドルを完成し得た。極厚鋼板による溶接構造物の形状寸法や複合曲面を形成する鞍溝内面の加工も良好

な精度で確保できた。鋳鋼品、溶接部の内部性状も問題なくこの結果から今後のサドルの大型化、主塔サドルの2ウェブ化⁴⁾にも十分対応できるものと確信している。

おわりに本工事の設計、施工に際し鳴門工事々務所田中第三工事長（現第一建設局設計課長）、藤井、高塚各氏をはじめ本四公団各位の御指導と東芝鶴見工場はじめ関係各位の御協力に負うことが大きく深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 堀川、石原ら：川鉄技報，9（1977）3・4，96—107
- 2) 例えば、前川、鈴木、宮本：日本製鋼所技報，（1971）29，73—79
- 3) J. D. Landes, and J. A. Begley：Fracture Analysis ASTM STP 560,（1974）170—186
- 4) 山根、村瀬：本四技報，17（1981）7，19—25