

予熱低減型HT780を用いたトラス弦材の製作 (明石海峡大橋補剛桁上弦材パイロットメンバー製作施工試験) Manufacturing Truss Chord Members Using Reduced-Preheat HT780 (manufacture and assembly tests of pilot members similar to the upper chords of the stiffening girders of the Akashi Kaikyo Bridge)

森下 統一* 百瀬 敏彦** 村上 貴紀*** 瀬木 純一**
Touichi MORISHITA Toshihiko MOMOSE Takanori MURAKAMI Jun-ichi SEGI

Summary

Welding quenched and tempered high tensile strength steel such as HT780 requires a preheating temperature of over 100°C. But when welding slim members such as chord members of a truss, high-temperature preheating causes problems such as effects on the dimensional accuracy and shapes of the members and adverse impact on the quality of the welds due to a poor working environment.

This report describes the results of basic tests performed to determine the properties (such as suitability for welding) of copper-precipitating HT780, which can be welded using a lower preheating temperature. The results of production and assembly tests of pilot members with characteristics identical to those of the upper chords of the stiffening trusses of the Akashikaikyo-Ohashi Bridge are also reviewed, and the suitability of low-preheat HT780 for bridge applications is examined.

1. まえがき

HT690およびHT780の高強度調質高張力鋼の施工は大鳴門橋および番州橋高架橋において実績があり、これらの施工結果については既に詳細な報告をしている¹⁾。HT780等の高強度調質高張力鋼の予熱温度は100°C以上となりトラス弦材のような細長い部材では、①高温予熱による素材の熱膨張が部材寸法精度および形状におよぼす影響、②高温予熱による作業環境悪化とそれが溶接品質におよぼす影響等について十分な検討が必要となる。

これらの観点から、溶接性が良好で、予熱温度の低減が可能なHT780等の実用化は品質の安定化および向上のみならず製作の合理化にも寄与することが大であると考えられる。当社は、新日本製鉄が開発した予熱低減可能なCu析出型HT780に早くから注目し、平成3年より新日本製鉄および日鉄溶接工業と橋梁への適用に関する研究を進めてきており、既に基礎的な溶接性等の確性試験を完了し、これらの予熱低減型HT780が橋梁用鋼材としてHBS材料規格、鋼橋等製作基準および道路橋示方書等を十分に満足することを確認した²⁾。

予熱低減型HT780等は本州四国連絡橋公団により、条件付ながら明石海峡大橋補剛桁鋼材として使用することが認められたが、当社は実施工に先立ち、予熱低減型H

T780を用いたトラス上弦材のパイロットメンバーの製作施工試験を行い、実部材での予熱低減型HT780の橋梁への適用性の確認を行なった。

本報は、パイロットメンバー製作施工試験結果を予熱低減型HT780の橋梁への適用性の立場から、まとめて報告するものである。

2. パイロットメンバーの特徴と製作方針

明石海峡大橋補剛桁トラス上弦材を想定したパイロットメンバーの製作図を図-1に示した。パイロットメンバーのフランジおよびウェブは板厚34mm予熱低減型HT780を用いた。本パイロットメンバーの特徴と製作方針を下記に示す。

- 1) 予熱低減型HT780、板厚34mmを主鋼板として用いる。
溶接確性試験に基づき予熱温度は50°C以上とする。
予熱は原則として電気ヒーターを用いる。
- 2) 部材の断面は750mm×840mmで、部材長は28,400mmと非常に長い。
- 3) HT780の溶接金属の靱性確保のため板継ぎ溶接はボンドフラックスを用いたサブマージアーク溶接とする。
- 4) かど継手のルートギャップを0.5mm以下とするため、

* 千葉工場製造部生産技術課長

*** 千葉工場製造部生産技術課

** 千葉工場製造部生産技術課係長

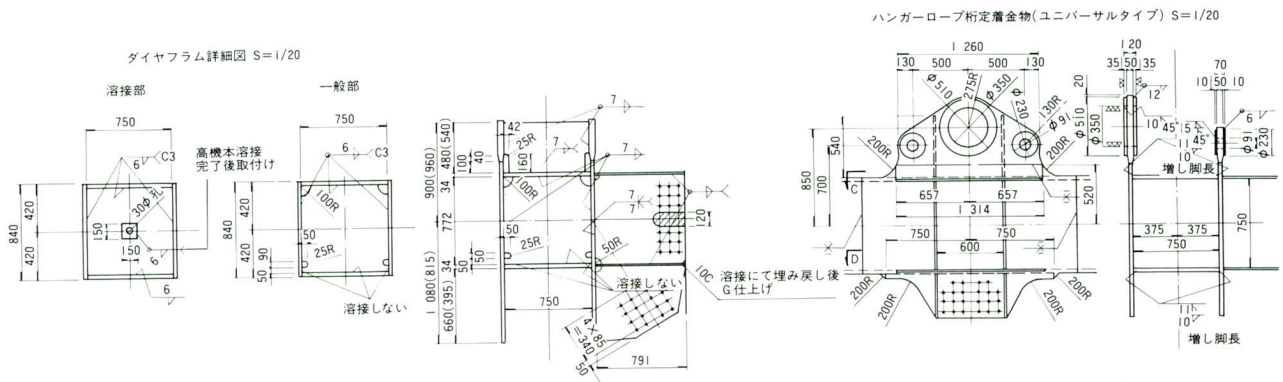
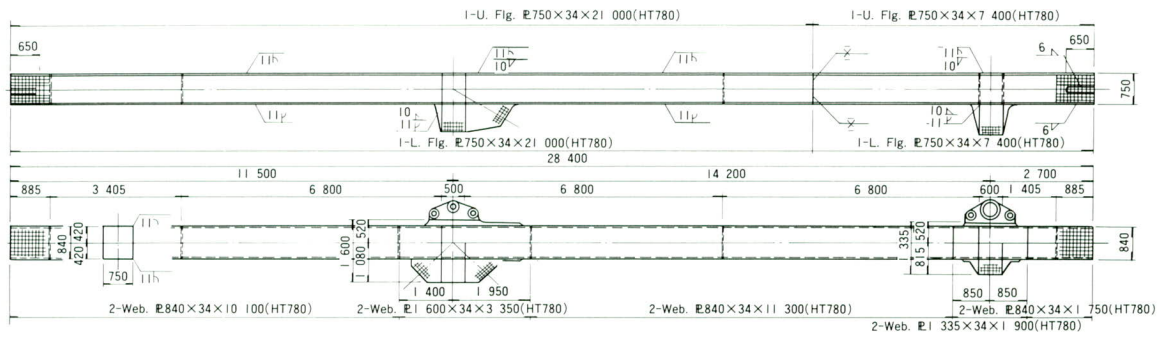


図-1 パイロットメンバー製作図

部品の形状、寸法に関して厳しい管理が必要である。

- 5) 上弦材の場合上・下フランジが落し込みである。
(上下かど継手とも部分溶込み継手) 従って上下フランジの幅寸法相対誤差許容が厳しくなる。
- 6) 上弦材はガセットおよび桁定着金物の関係で横組立方式となる。
- 7) ルート部の微小溶接欠陥を防止するため、溶接部の酸化被膜、プライマー等の完全除去を行う。
- 8) 部分溶込みかど継手の開先形状はJ開先のシングルサブマージアーク溶接とする。
- 9) かど継手は軟質継手とする。
- 10) ダイアフラム等応力直角方向の溶接は溶込みと止端形状に留意する。
- 11) 桁定着金物のピン孔加工精度確保のため、部材製作後機械加工を行う。

に示した。

本鋼材はCu析出型HT780のため、炭素当量式(Ceq)に $Cu/13=0.07$ 程度が付与されるので、 $Ceq \leq 0.53\%$ の本四基準を満足出来ない。 $Ceq \leq 0.53\%$ が満足できない場合は①最高硬さ試験を行い $Hvmax \leq 420$ のこ、②溶接ビート曲げ試験を行い、 28° ($t=34$ の場合) 以上曲がることを同時に満足しなければならないとHBSに規定されている。

表-1 供試鋼板HT780の化学成分の例

| C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | Nb | V | Ceq (本四) | Pcm |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|------|
| 0.06 | 0.25 | 1.35 | .006 | .001 | 0.94 | 1.00 | 0.36 | 0.30 | 0.01 | 0.04 | 0.54 | 0.24 |

$$Ceq(\text{本四}) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + Cu/13$$

表-2 供試鋼板HT780の機械的性質の例

| TP No. | 方向 | 引張試験 (JIS 4号 1/4t) | | | | | | 衝撃試験 (JIS4号 1/4t) | |
|--------|----|-------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|
| | | 鋼板Top側 | | | 鋼板Bottom側 | | | Top | Bottom |
| | | YP N/mm ² | TS N/mm ² | E1 % | YP N/mm ² | TS N/mm ² | E1 % | vE _{-48℃} J | vE _{-48℃} J |
| スペック | — | ≥ 685 | 780/930 | ≥ 16 | ≥ 685 | 780/930 | ≥ 16 | Av. ≥ 47 (L方向) | Av. ≥ 47 (L方向) |
| 01499 | L | 724 | 795 | 28 | 706 | 785 | 28 | 229/257 | 247/250 |
| | C | 745 | 817 | 24 | 747 | 815 | 25 | 135/174 | 168/186 |

3. HT780鋼材

(1) 供試鋼材の化学成分と機械的性質

本パイロットメンバーに使用したHT780(約28T)は新日本製鉄君津製鉄所の予熱低減型HT780を用いた。供試鋼板の化学成分および機械的性質の例を表-1、2

表-3 に本鋼材を用いた最高硬さ試験の結果を示した。Hvmax \leq 420は十分に満足している。②の溶接ビート曲げ試験についても、JISG 3106 (1977) に基づき、溶接ビート曲げ試験を実施した。試験結果は試験片厚34mmに対して曲げ角度28度で曲げ面に割れ発生は認められなかった。(最高硬さ試験および曲げ試験はミルメーカーにて鋼材出荷に先立ち実施した)

(2) 鋼板の板厚公差

供試鋼板 H T 780、板厚34mmのロール鋼板 6 枚について、図-2 に示す位置で板厚測定を行った。

JISG 3193によると板幅1600~2000mm、板厚34mmの板厚許容差は ± 0.90 であるが、今回の鋼板の測定結果の公差幅は0.23mmであり、かつ板厚マイナス側は全くなく、非常に良好であった。

(3) 鋼板の平坦度

調質高張力鋼 (HT780 : $t \geq 32$ mm等) については、HBS G 3103で鋼板の平坦度の最大値は、鋼板の圧延方向および圧延直角方向で2mm/mと規定されている。鋼板の発注にあたっては、これらの平坦度基準をつけて発注した。板継ぎ組立直前に、各板継ぎ材毎に図-3の要領で平坦度を測定し、 $\delta \geq 1.0$ の箇所については、板継ぎ角変形矯正時に矯正を行い、 $\delta < 1.0$ とした。

測定線28m \times 2 \times 4=224mの内、 $\delta \geq 1.0$ の鋼板小波が認められたのは1ヶ所のみ ($\delta = 1.1$ mm) であり、この箇所は $\delta = 0.2$ にプレス矯正した。他は全て $\delta \leq 1.0$ であり、鋼板の平坦度は非常に良好であった。

4. 前段加工

(1) 板継ぎ溶接施工

開先の形状、ベベル角度は開先形状標準により板厚毎に異なるが、板厚34mmでの開先形状を図-4に示した。また、板継ぎ溶接継手の開先形状の測定結果を図-5に示した。測定は1切断線当り3ヶ所、開先角度とルートフェイス高さを測定した。

H T 780の高強度鋼では、溶接金属の靱性の確保するため、入熱制限 (50,000joule/cm以下とすること)、溶接パス間温度を200℃以下にすることおよびポンドタイプのフラックスを使用することが必要であった。

一方、予熱低減型 H T 780鋼板でも、板継ぎ溶接継手の

表-3 溶接部最高硬さ試験結果 (繰り返し数 N = 2 の最高値)

| 試験片厚 mm | 溶接材料 | 入熱 KJ/cm | 最高硬さ Hv (10kgf) | | | |
|------------|--------|-------------|-----------------|-----|-----|------|
| | | | 0℃ | R T | 50℃ | 100℃ |
| 34 | L-80EL | 17.0 | 326 | 320 | 318 | 304 |

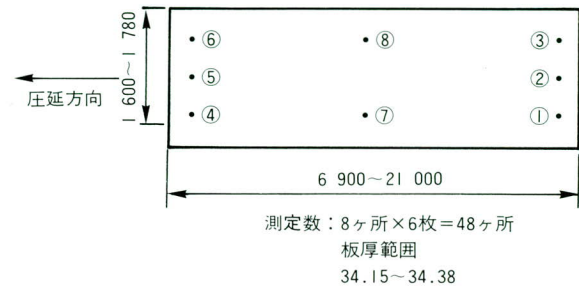


図-2 板厚測定位置

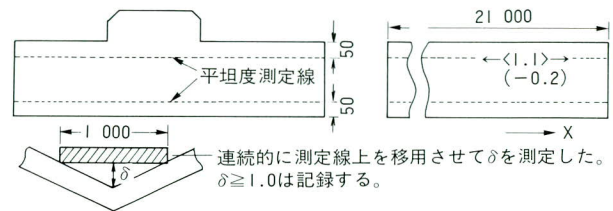


図-3 平坦度測定要領

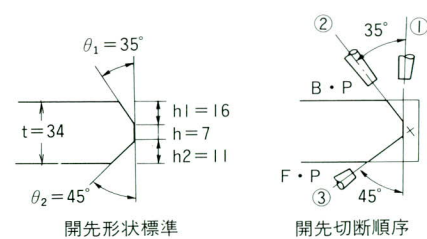


図-4 板継ぎ溶接継手開先図

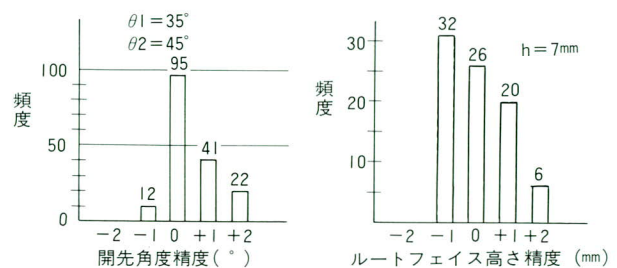


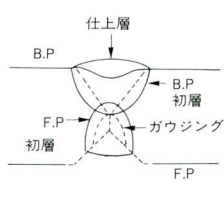
図-5 板継ぎ開先加工精度のヒストグラム

引張強さを必要以上に高くすると溶接金属の拡散性水素量の如何によっては溶接金属に横割れを生じる恐れがある。特に、ボンドフラックスは低温焼結型であり、吸湿し易い性質があるため乾燥および保管に十分留意しないと、溶接金属の横割れ感受性を高めることになる。従って、小型試験結果に基づき、溶接条件を決定すると共に、板継ぎ時の予熱に限り予熱温度を100℃以上とし、パス間温度も上下限を設け、100～200℃とした。表-4に板継ぎ溶接の溶接材料を、表-5に板継ぎ溶接条件を示した。

表-4 板継ぎサブマージアーク溶接材料

| 溶接材料 | 銘柄 | 寸法 | 乾燥条件 |
|-------|---------|--------|------------------|
| ワイヤ | Y-80M | 4.8φ | — |
| フラックス | NB-250H | 12×100 | 300℃×3H乾燥、120℃保管 |

表-5 板継ぎサブマージアーク溶接条件

| 積層 | 層 | 電流 (A) | 電圧 (V) | 速度 (cm/min) | 入熱 (Joule/cm) |
|--|------------------|--------|--------|-------------|---------------|
|  | B.P. 及び F.P. の初層 | 650 | 32 | 30 | 41,600 |
| | 中間層 | 700 | 32～35 | 30以上 | 49,000以下 |
| | 最終仕上げ層 | 650 | 35～700 | 30以上 | 30,000 |
| | | | 38 | 35以上 | 45,600 |

- 組立溶接予熱温度：50℃ (S-16LH、4φ)
- サブマージアーク溶接予熱温度：100℃ パス間温度：100℃～200℃
- 完全裏ガウジング（自動ガウジング使用）ガウジング後グラインダ仕上げをしてカラーチェックにより、裏はつり状態の確認を行う。
- 入熱は50KJ以下とする。

(2) 板継ぎ溶接継手の放射線透過試験の結果

パイロットメンバーフランジおよびウェブの板継ぎ溶接継手の放射線透過試験を行った。透過写真撮影は板継ぎ終了後48H以上経過してから行なった。放射線透過試験はウェブの桁定着金物板継ぎ溶接を含めて全長に渡って行ない、透過写真は全部で62枚であった。透過写真62枚の内、60枚が無欠陥1級、2枚が第1種1級および第2種1級であった。

(3) 板継ぎ溶接継手の性能試験

1) 板継ぎ溶接継手の引張試験結果

表-6に板継ぎ溶接継手HT780×HT780およびHT780×SM490YCとの板継ぎ溶接継手の引張試験結果を示した。HT780×HT780の板継ぎ溶接継手の強度は極端なオーバーマッチングにならず、妥当な引張強さであった。

表-6 板継ぎ溶接継手の引張試験結果 (JIS Z 3121 1号試験片)

| 継手試験片番号 | 板厚 | 材質 | 破断荷重 (N) | 引張強さ (N/mm ²) | 破断位置 | 規格値 (N/mm ²) | 備考 |
|---------|-------|-----------------|----------|---------------------------|------|--------------------------|------------------|
| UF-T1 | 34×34 | HT780 | 695,000 | 814 | 母材 | ≥780 | 溶接材料・溶接条件：表4～5参照 |
| UF-T2 | | | 694,000 | 812 | 母材 | | |
| GAF-T1 | 34×50 | HT780 × SM490YC | 511,000 | 596 | 母材 | 490 | |
| GAF-T2 | | | 511,000 | 596 | 母材 | 610 | |

2) 板継ぎ溶接継手の衝撃試験

表-7に板継ぎ溶接継手HT780×HT780およびHT780×SM490YCの溶接金属より、シャルピー衝撃試験片を採取し、それぞれ-15℃および0℃での衝撃試験結果を示した。いずれも、規格値を満足する靱性が得られた。

表-7 板継ぎ溶接継手溶接金属の衝撃試験結果 (JIS Z 3111 4号試験片)

| 継手試験片記号 | 板厚 | 材質 | 試験温度 | 吸収エネルギー (Joule) | | 規格値 | 備考 |
|---------|-------|-----------------|------|-----------------|-----|-----|--|
| | | | | 試験値 | 平均値 | | |
| UF-C1 | 34×34 | HT780 × HT780 | -15℃ | 145 | 145 | ≥47 | 溶接材料・溶接条件：表4～5参照 シャルピー試験片採取位置 FP |
| UF-C1 | | | | 163 | | | |
| UF-C1 | | | | 127 | | | |
| GAF-C1 | 34×50 | HT780 × SM490YC | 0℃ | 104 | 97 | ≥47 | ノッチ BP |
| GAF-C2 | | | | 104 | | | |
| GAF-C3 | | | | 83 | | | |

3) 板継ぎ溶接継手の断面マクロ試験、硬さ試験および型曲げ試験

板継ぎ溶接継手HT780×HT780およびHT780×SM490YCの断面マクロを採取し、断面マクロ試験および硬さ試験を行った。写真-1にHT780×HT780継手および写真-2にHT780×SM490YC継手の断面マクロ写真を示した。いずれの継手とも、断面マクロは良好な結果であった。

表-8に継手の最高硬さと位置を、図-6にHT780×HT780継手の硬さ分布を示した。熱影響部において軟化域が認められたものの、溶接金属はほぼ母材相当の硬さであり、良好であった。

(4) フランジの端面研削

部材フランジ、ウェブの板継ぎ溶接完了後、罫線、幅切断および孔明け加工を経て、ウェブのプライマー除去

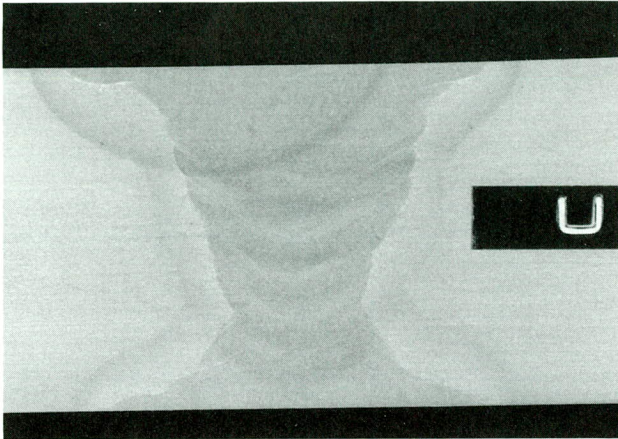


写真-1 HT780×HT780 板継ぎ継手の断面マクロ

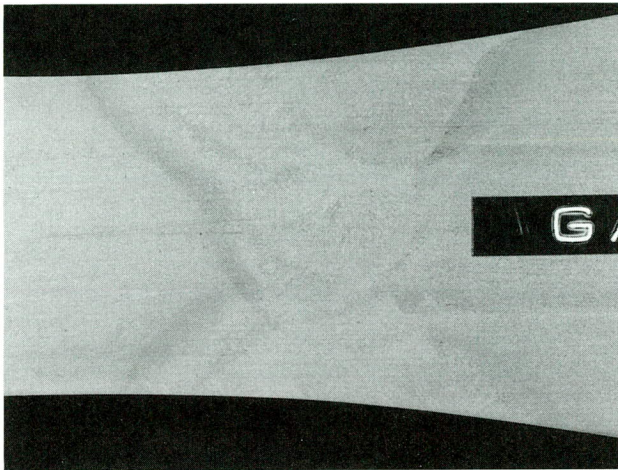


写真-2 HT780×SM490YC板継ぎ継手の断面マクロ

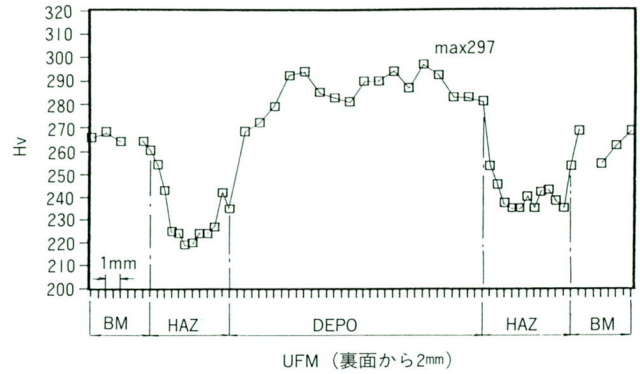


図-6 HT780×HT780板継ぎ継手の硬さ分布

端面切削後幅寸法を0～+0.5mm程度とするのが望ましいが、ガス切断による幅精度を考えると、ガス切断幅寸法をやや大きくし切削によって調整するのが現実的であると考えられる。

表-9に上下フランジの切削面（幅再切断完了後）と端面切削完了後のダイヤフラム取付け位置での幅寸法および端面直角度の測定結果を示した。実測結果によるとガス切断後の幅は上下フランジとも+2.0～+2.5mmとやや大きな寸法であったため端面研削量が多くなり、研削回数も増大した。研削後の幅寸法はほぼ0～+1.0mm、端面直角度は±0.3mm程度であり、良好であった。なお各ダイヤフラムの寸法は下フランジについては実測値+0.7mm（ただし端ダイヤフラムは+0.5mm）として機械加工を行なった。

研削およびフランジ端面の研削を行なった。

パイロットメンバーは上弦材想定部材のため、上下フランジともはめ込み材であり、上下フランジの幅精度はかど継手のルートギャップ0.5mm以下確保および部材断面形状精度確保のためには、非常に重要な要因となる。フランジの幅切断後の幅寸法は設計寸法の+1mm程度とし、

(5) 部分溶け込みかど継手J開先加工

上下フランジは端面研削後、専用開先加工機を用いてJ開先加工を行った。部分溶け込み角継手のJ開先の開先深さの測定値のヒストグラムを図-7に示した。開先加工精度は良好であった。

表-8 板継ぎ溶接継手の硬さ試験結果

| 継手試験片記号 | 板厚 | 材質 | 測定位置 | 最高硬さ(Hv) | 最高硬さ位置 | 規格値 | 備考 |
|------------------------|-------|-----------------------|---------|----------|--------|------|---------------------------------|
| UF-M (断面マクロ試験片と兼用) | 34×34 | HT780 | 表面から2mm | 294 | 母材 | ≤470 | 溶接材料・溶接条件： 表4～表5参照 硬さ測定位置 |
| | | | 中央 | 297 | 溶接金属 | | |
| | | | 裏面から2mm | 304 | 母材 | | |
| GAF-M (断面マクロ試験片と兼用) | 34×50 | HT780 × SM490YC | 表面から2mm | 276 | 母材 | | |
| | | | 中央 | 258 | 熱影響部 | | |
| | | | 裏面から2mm | 272 | 母材 | | |

表-9 上下フランジ(はめ込みフランジ)端面研削前後の直角度と幅精度

| 部品名 | 時期 | 測定の種類 | 測定位置(ダイヤフラム取付位置) | | | | | | | | 板継ぎ溶接部 |
|--------|-------|----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | |
| 上フランジ | 切削前測定 | 幅測定値 α | +2.2 | +2.4 | +2.5 | +2.3 | +2.8 | +2.2 | +2.2 | +2.0 | +2.1 |
| | | 直角度 $\delta 1$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.2 | -0.2 | -0.3 | 0 |
| | | 直角度 $\delta 2$ | 0 | +0.1 | 0 | +0.1 | +1.0 | +0.3 | +0.4 | +0.1 | +0.1 |
| フランジUF | 切削後測定 | 幅測定値 α | +0.1 | +0.1 | +0.5 | +1.0 | +1.0 | +0.6 | +0.6 | +0.5 | +0.3 |
| | | 直角度 $\delta 1$ | +0.1 | +0.2 | +0.2 | +0.2 | +0.2 | +0.4 | 0 | 0 | +0.2 |
| | | 直角度 $\delta 2$ | +0.1 | +0.2 | +0.2 | +0.2 | +0.1 | 0 | +0.1 | +0.1 | +0.1 |
| 下フランジ | 切削前測定 | 幅測定値 α | +2.3 | +2.3 | +2.2 | +2.2 | +2.2 | +2.1 | - | +2.9 | +1.9 |
| | | 直角度 $\delta 1$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| | | 直角度 $\delta 2$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 0 |
| フランジLF | 切削後測定 | 幅測定値 α | +1.0 | +0.9 | +0.9 | +0.9 | +0.7 | +0.8 | +1.2 | +1.2 | +0.1 |
| | | 直角度 $\delta 1$ | 0 | +0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 直角度 $\delta 2$ | -0.1 | 0 | +0.2 | +0.2 | 0 | +0.1 | 0 | 0 | 0 |

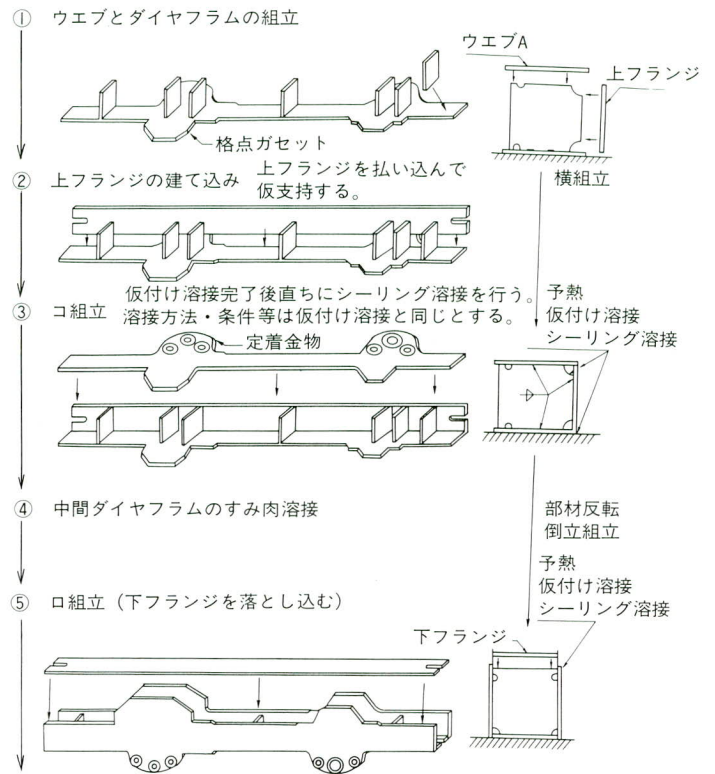
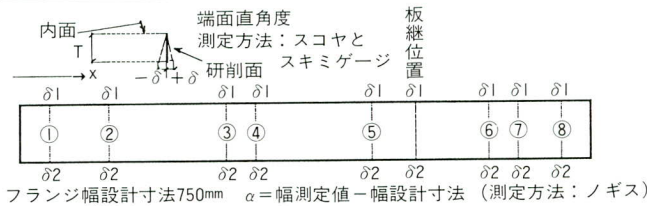


図-8 トラス上弦材パイロットメンバー組立手順図

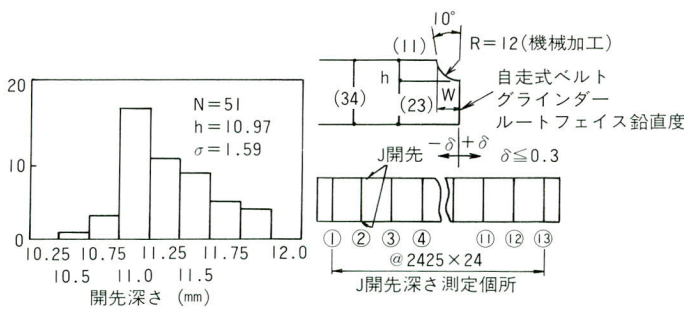


図-7 J開先加工における開先深さのヒストグラム

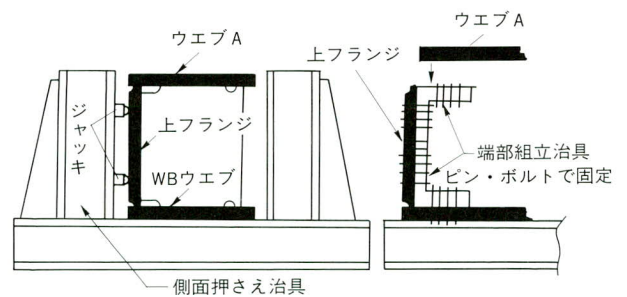


図-9 コ組立治具による組立状況

5. 後段加工

(1) 組立

一般的なトラス上弦材の組立は倒立組立となり、最後に下フランジのはめ込みを行なう。しかしながら、明石海峡大橋を想定した上弦材パイロットメンバーでは上下フランジともはめ込みであり、かど継手は4継手とも部分溶込み継手となる。従来の倒立(または正立)組立法では、下側のフランジ部分溶込み継手の組立溶接が上向きとなり、かつ溶接作業空間が非常に窮屈になる。従って、上下フランジはめ込みタイプの上弦材では、ウェブを下にした横組立でコの字形状とし、90°反転して倒立状

態にして下フランジの落とし込みを行なった。図-8にパイロットメンバーの組立手順を示した。

横組立では組立の押さえとなるのが、ダイヤフラムしかないため、組立時の各材片の相互位置調整および仮付け溶接時の予熱変形による材片のずれ等を避けるため図-9に示す横組立治具を使用した。

表-10に組立溶接条件を示した。写真-3に口組立時はめ込みフランジの密着作業および仮付け溶接予熱状況写真を示した。

J開先部分溶込みかど継手において、横向き状態で仮付け溶接およびシーリング溶接をMAG半自動溶接で行う場合、溶接時にJ開先の肩部を損傷すると、本溶接時のJ開先部をガイドとした開先食い装置の誤作動の原

表-10 組立溶接(仮付け溶接、シーリング溶接)条件表

| 順序 | 継手の種類 継手の位置 | 溶接 姿勢 | 溶接方法 | サイ ズ | 溶接材料 | 予熱 温度 | 溶接 電流 A | 溶接 電圧 V | 条件 |
|----|--------------------------|-----------|---------------------------|------------|----------------|----------|------------|------------|----|
| ① | WebBとDiaの 仮付溶接(すみ肉) | 下向 | MAG Ar+CO ₂ | 脚長 5mm | MG-50T 1.2φ | 50℃ | 180 A | 21 V | |
| ② | TopPとWebの かど継手(J開先) | 横向 * 1 | MAG Ar+CO ₂ | 喉厚 <5mm | MG-50T 1.2φ | 50℃ | 180 A | 21 V | |
| ③ | DiaとTopP及び WebBの仮付溶接 | 立向 上向 | MAG Ar+CO ₂ | 脚長 5mm | MG-50T 1.2φ | 50℃ | 180 A | 21 V | |
| ④ | BottomとWebの かど継手(J開先) | 下向 | MAG Ar+CO ₂ | 喉厚 <5mm | MG-50T 1.2φ | 50℃ | 180 A | 21 V | |

Ar+CO₂: 80%Ar+20%CO₂混合ガス

* 1: 自動溶接

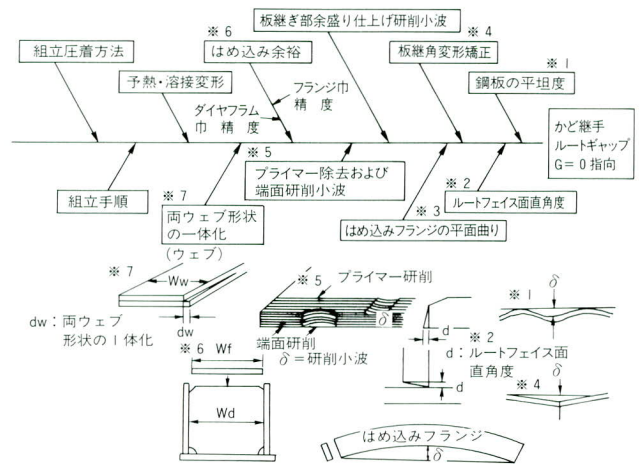


図-10 かど継手のルートギャップG=0mmの管理要因図



写真-3 はめ込みフランジのはめ込みと密着組立状況



写真-4 コ組立時の自動仮付け・シーリング溶接状況の一例

因となる。

簡便な走行装置を用いた自動仮付け溶接装置の試作と試験溶接を行い、自動仮付け溶接及びシーリング溶接の実用化検討を行った。写真-4に自動仮付け溶接の一例を示した。

(2) 組立時のかど継手のルートギャップ

かど継手の組立時のルートギャップは、図-10に示し

たかど継手のルートギャップ管理要因図を基に、前段加工から要因管理を行った。コ組立およびロ組立時にかど継手のルートギャップを300mmピッチ毎に測定した。

かど継手ルートギャップの測定結果のヒストグラムを図-11、12に示した。ウェブBの上に上フランジを乗せ、その上にウェブAを乗せてコ字横組立した場合のルートギャップG=0が96%、一方ウェブの間に下フランジを落とし込んでロ組立した場合のルートギャップG=0は88%であった。いずれの場合もルートギャップ0.5mmを越えることはなかった。また、いずれの場合も、ルートギャップG≠0はガセット部(または定着金物部)が比較的多かった。

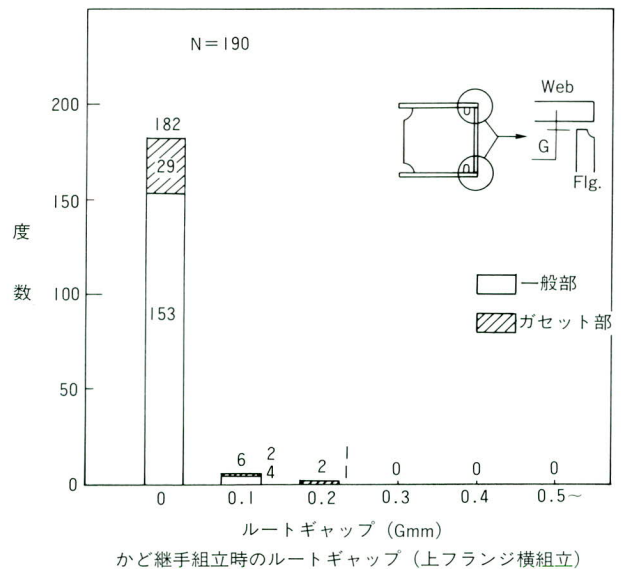


図-11 かど継手コ組立時のルートギャップ測定結果

も、ルートギャップ $G \neq 0$ はガセット部（または定着金物部）が比較的多かった。

(3) ダイヤフラムのC2溶接

コ組立完了後、格点ダイヤフラム（脚長9mm）と中間ダイヤフラム（脚長6mm）のC2溶接を行った。またコ

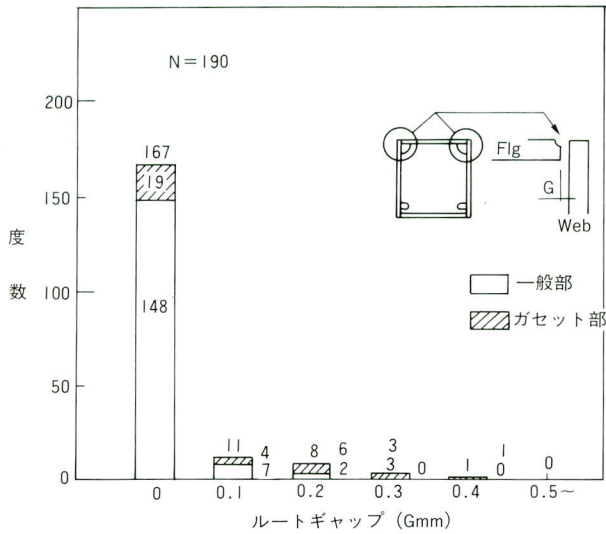


図-12 かど継手口組立時のルートギャップ測定結果

組立およびかど継手の溶接完了後端部ダイヤフラムと端部内面すみ肉溶接を行った。溶接の手順を図-13に、溶接条件等を表-11に示した。

コ組立後のダイヤフラムC2溶接完了後溶接作業者の θ ゲージによる止端形状チェックを行い、止端形状が悪い場合はグラインダーで止端を滑らかにした。

パイロットメンバー製作完了後、ダイヤフラムC2溶接継手の断面マクロ試験片を採取し、投影拡大器で20倍に拡大し、溶接止端角の測定を行なった。写真-5、6にダイヤフラムC2溶接継手の断面マクロと止端角の測定結果の例を示した。

(4) J開先部分溶込みかど継手溶接

本パイロットメンバーは上弦材を想定しており、かど継手は4継手ともJ開先部分溶込み溶接継手であり、かど継手の溶接は正立状態で両側同時溶接、その後倒立状態で両側同時溶接を行なった。予熱装置は溶接マニプレーターに設置し、溶接に先立ち移動熱源で先行予熱を行なった。予熱ヒーターは炭化ケイ素発熱体を用いた輻射式であり、溶接速度で所定の予熱温度を確保出来るよう、予備試験を行い発熱体の熱量と母材間距離との関係を求め、

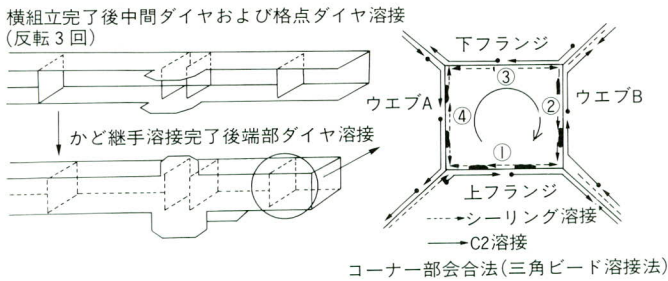


図-13 C2溶接手順

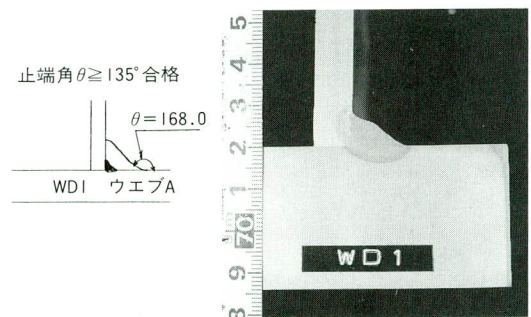


写真-5 端部ダイヤフラムC2溶接断面マクロ試験

表-11 ダイヤフラムC2溶接材料及び溶接条件

| ダイヤフラムC2の種類 | 指定脚長 | 積層層数 | 予熱温度 | 仮付け・シーリング溶接 | | | C2溶接 | |
|-----------------------|------|------|------|---------------------------|----------------|-------|----------------------------|----------------|
| | | | | 溶接方法 | 溶接材料 | 溶接電流 | 溶接材料 | 溶接電流 |
| 中間ダイヤフラム*1 | 6 | 2 | 50℃ | MAG Ar+CO ₂ | MG-50T 1.2φ | 240 A | ② L-60F(6φ) | 340 A |
| 格点ダイヤフラム*2 | 9 | 3 | 50℃ | MAG Ar+CO ₂ | MG-50T 1.2φ | 240 A | ② L-60F(6φ) ③ L-60F(5φ) | 340 A 280 A |
| 端部ダイヤフラム(端部内面溶接を含む)*3 | 6 | 2 | 50℃ | MAG Ar+CO ₂ | MG-50T 1.2φ | 240 A | ② L-60F(6φ) | 340 A |

端部ダイヤフラムC2溶接と端部内面溶接の溶接手順は図5-9参照

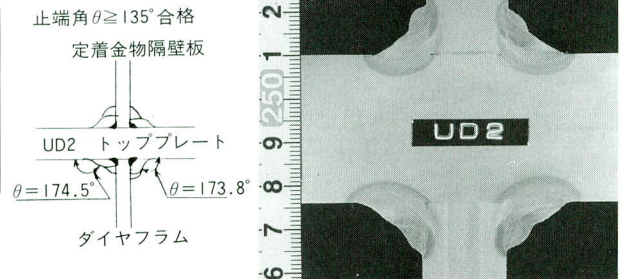
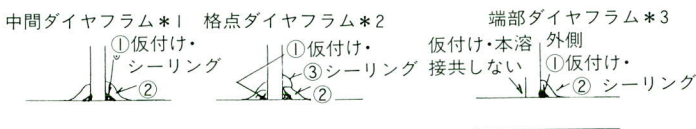


写真-6 格点ダイヤフラム、定着金物隔壁板C2溶接断面マクロ試験

全溶接長において母材間距離を一定に保つことのできる予熱装置を開発した。部分溶込みかど継手溶接時の予熱状況を写真-7に示した。また、表-12にかど継手の溶接材料及び溶接条件を示した。

今回は小型試験結果を実橋部材で確認することを目的としており上フランジ側かど継手（継手記号U AおよびU B）に60キロ級溶接材料を、下フランジ側かど継手（継手記号L AおよびL B）に70キロ級溶接材料を用い、溶接金属機械的強度の確認を行った。

(5) かど継手ガセット部の補強溶接とその角変形

サブマージアーク溶接による、かど溶接の完了後ガセット部等の増し脚長溶接を行った。ガセット部および桁定着金物部はかど溶接および増し脚長等により角変形を生じ、ガセット間隔が狭くなり、垂直材・斜材の取り合い

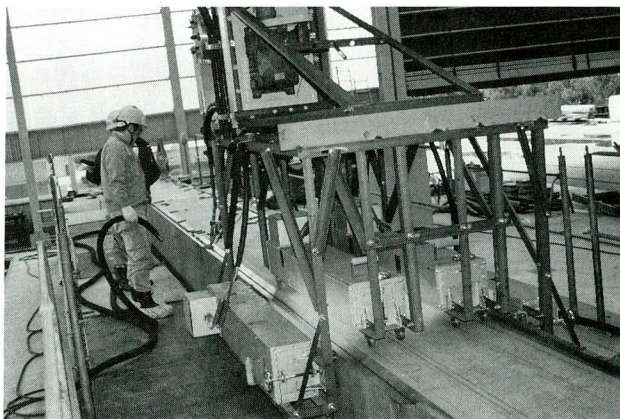
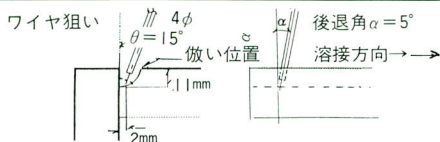


写真-7 J開先部分溶込み溶接時の移動熱源による予熱状況

表-12 J開先部分溶込みかど溶接の溶接材料及び溶接条件

| 項目 | 仕様および条件 |
|--------------------|---|
| 溶接方法 | シングルサブマージアーク溶接 2電極2トーチ型マニュアル溶接装置 做い装置：キロー做い装置 |
| 溶接材料 | トップ側 (UA, UB) 60キロ級 Y-DM(4φ)×YF-15B(20×D) |
| | ボトム側 (LA, LB) 70キロ級 Y-70M(4φ)×YF-15B(20×D) |
| | フラックス乾燥 250~300℃ 1hr以上 |
| 予熱方法および温度 | 炭化ケイ素輻射ヒータを用いた移動熱源予熱装置、予熱温度50℃ |
| 溶接条件 (開先深さ11mm) | 仮付け溶接およびシーリング溶接ビード：のど厚5mm以下に管理 |
| | 初層溶接：600A 32V 30cm/min 38kJ/cm 2層目：700A 35V 30cm/min 49kJ/cm |



が困難になる。またH T 780であるため大きな量の加熱矯正は不可能であり、ガセット部および桁定着金物部は組立前に15/1000相当の予歪みを負荷した。これらの予歪みを基準にかど継手溶接完了後各種のガセット部等の溶接処理方法を行い、変形の推移を調査した。

図-14にガセット部および定着金物部のかど継手溶接後の補強等の処理方法を示した。また、表-13にかど継手溶接完了後各処理ステップ毎のガセット等の角変形の変移を示した。

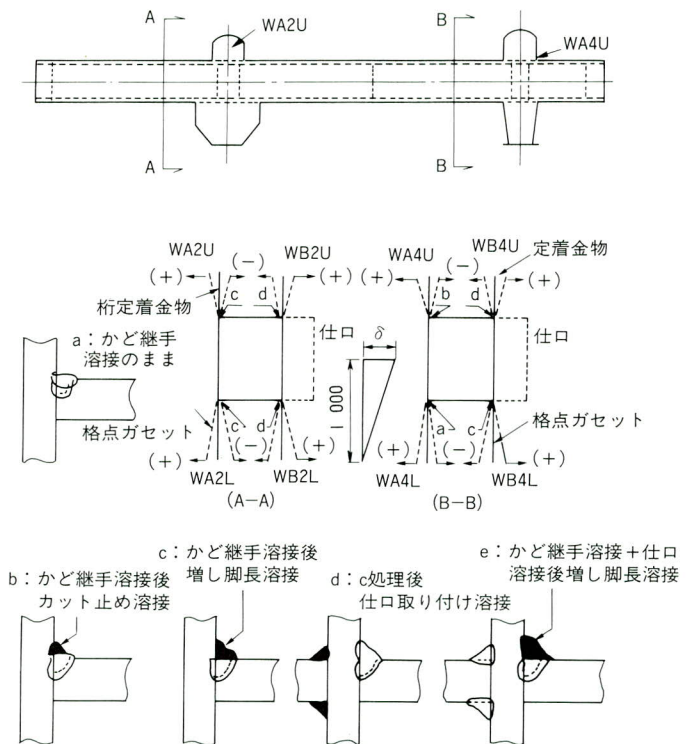


図-14 ガセット部・桁定着金物部の補強処理方法と変形定義

表-13 かど継手溶接および補強溶接による桁定着金物およびガセットの角変形の推移

| 測定ステップ | 定着金物(上フランジ側) | | | | 格点ガセット(下フランジ側) | | | |
|------------|--------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
| | WA2U | WB2U | WA4U | WB4U | WA2L | WB2L | WA4L | WB4L |
| 予歪負荷量(溶接前) | 14.3 | 15.8 | 13.3 | 15.8 | 15.8 | 16.3 | 14.3 | 16.0 |
| かど継手溶接完了後 | ↓ | ↓ | 1.3 | 3.3 | 1.8 | 3.3 | 5.1 | 3.3 |
| カット止め溶接後 | — | — | -7.9 | — | — | — | — | — |
| 増し脚長溶接後 | -7.5 | -5.3 | — | -5.0 | 1.1 | -3.3 | — | ↓↑ |
| 仕口溶接完了後 | — | -4.0 | — | -3.3 | — | 0.3 | — | 5.6 |
| 矯正後(投終形状) | 0.8 | -1.6 | 1.4 | -2.1 | 0.8 | 1.2 | 4.1 | 1.8 |
| 各点等の溶接手順 | c | d | b | d | c | d | a | e |

変形量の測定方法：最終形状測定は成立状態でトランシットによる測定、その他はストレッチによる測定。

最終的には、加熱矯正により最大2 mm以下の角変形量を管理目標とした。

(6) 部材のキャンパーおよび通り変化の経緯

1) コ組立以後のキャンパー変化の経緯

一般に本四橋トラス弦材のように高強度鋼を用い、断面に比べて部材長の長い弦材の組立において最も留意する必要があるのは、材片のギャップ確保と予熱および仮付け溶接等における部材の変形防止である。特にHT690またはHT780を用いる場合は組立溶接においても100℃程度の予熱が必要であり、かつ組立の性質上、予熱および溶接とも完全対称で行うことは不可能でありフランジまたはウェブの予熱等の温度勾配による変形が問題となる。今回は予熱低減型HT780を用いており予熱温度が50℃で良いため、特に製作付加キャンパーはつけなかった。

図-15にコ組立完了からロ組立完了およびかど継手溶接、仕口溶接完了後の最終部材形状でのキャンパーの変化の経緯を示した。コ組立の仮付け溶接およびシーリング溶接のための予熱変形で溶接完了直後で最大+22mm(上フランジ側へ凸)の変形が生じた。時間経過と共に変形は減少したが(降温量による予熱変形復帰および仮付け溶収縮)、最終的には+10mm~+12mm程度(上フランジ側へ凸)の変形残を生じた。

ロ組立時およびかど継手溶接時の予熱および溶収縮ではほとんどキャンパー変化は認められなかった。部材がコ断面形状になった以降は断面剛度が強く、50℃程度の予熱温度では予熱変形および溶収縮の抵抗力が強く変形しない。

2) コ組立以後の通り変化の経緯

コ組立、ロ組立、かど継手溶接完了後および仕口溶接完了後の部材の通り形状の変化を図-16に示した。キャン

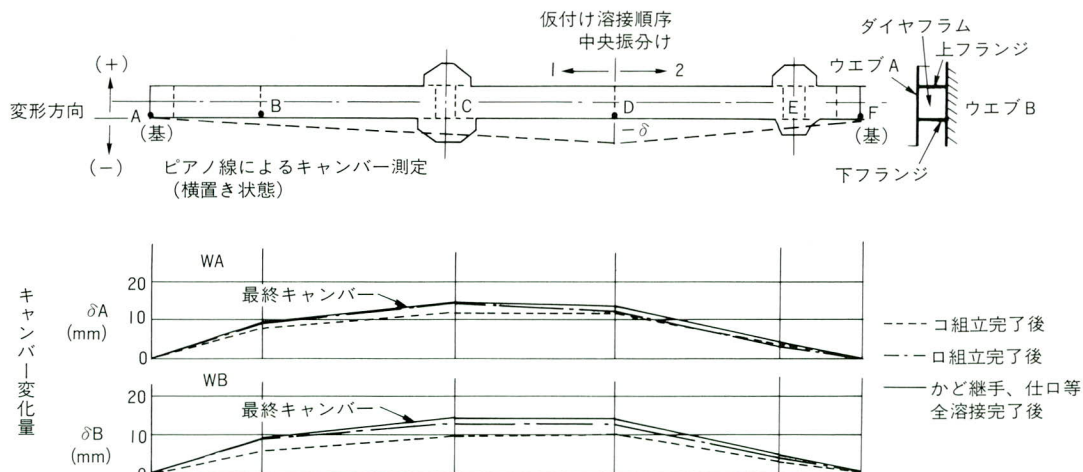


図-15 コ組立から全溶接完了までのキャンパー変化の経緯

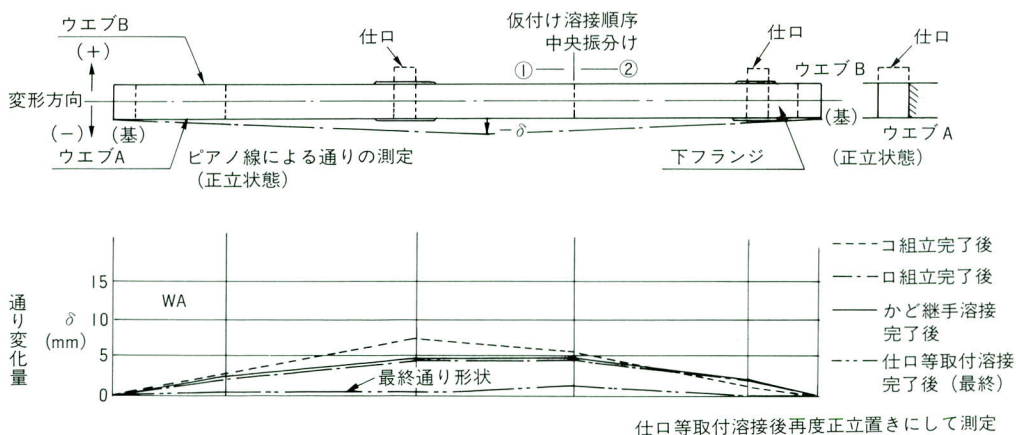


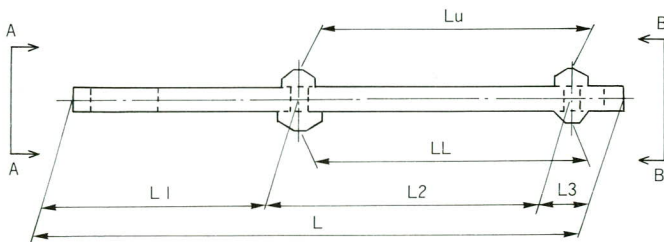
図-16 コ組立、かど継手溶接および全溶接完了後の通りの変化の経緯

ンバーと同様、部材の通りもコ組立時に比較的大きな変形（最大+7.5mm、ウェブB側に凸）し、ロ組立およびかど継手溶接でほとんど変化なく、ウェブB側の仕口取付け、溶接後は溶接収縮により、通りの変形はほぼ0に修正された。

(7) 製作完了後の部材寸法測定

組立完了からかど溶接および製作完了までの部材長変化の推移を表-14に示した。組立時の予熱変形に起因するキャンバー変化により、ガセット間隔は定着金物頂上での寸法より格点ガセット頂上の寸法の方が1~2mm程短くなっている。弦材ウェブの中心での部材長は最終的にかど継手および仕口等の溶接により-1.5mmとなった。表-15に製作完了後の端部断面の寸法を示した。ウェブ高さが-1mm程度となった。

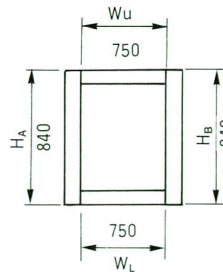
表-14 部材長変化の推移



| 製作ステップ | 部材長 (設計寸法誤差) (mm) | | | | | |
|---------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | L | L ₁ | L ₂ | L ₃ | L _u | L _l |
| 組立完了後 | 0 | 0 | 0 | 0 | +1.0 | -1.5 |
| かど溶接完了後 | -1.0 | 0 | -1.0 | 0 | +0.5 | -2.0 |
| 製作完了後 | -1.5 | 0 | -1.5 | 0 | 0 | -1.5 |

表-15 製作完了後の部材端断面寸法

| 測定断面 | ウェブ高さ (mm) | | ウェブ間隔 (mm) | |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | H _A | H _B | W _U | W _L |
| A-A断面 | -1.2 | -1.1 | +0.7 | +0.7 |
| B-B断面 | -0.2 | -1.1 | -0.1 | +0.1 |



(8) かど継手の超音波自動探傷検査および破面試験結果

かど継手の溶接完了後「かど継手の自動超音波探傷検査要領」を基に、継手全長に渡り、CK-U T-04システムにより、超音波探傷検査を行った。検出された欠陥

表-16 かど継手の超音波自動探傷検査の欠陥検出リスト

| 継手記号 | 欠陥位置 (X) | 推定欠陥種類 | 欠陥寸法 | 継手記号 | 欠陥位置 (X) | 推定欠陥種類 | 欠陥寸法 |
|------|--------------|--------|---------|------|----------|---------|---------|
| U A | 25,307 | BH | 0.8×1.3 | U B | 10,100 | F (* I) | 13mm |
| | 25,327 | BH | 0.8×1.3 | | 10,239 | BH | 1.2×2.1 |
| L A | 記録すべき欠陥エコーなし | | | L B | 26,645 | F (* I) | 30mm |
| | | | | | 8,396 | BH | 0.7×1.2 |

(* I) : 板継ぎ溶接部 BH : プロホール F : 底面傷

リストを取りまとめて表-16に示した。

当初計画位置および超音波探傷検査で欠陥を検出した箇所および溶込み深さの浅い箇所等、200~300mmの破面試験片16体を採取し、破面試験を行った。超音波探傷検査で検出された欠陥の内、破面試験で認められた欠陥は表-16のL B継手X=8,396のBHのみであった。また、超音波探傷検査で底面傷 (F) と判断した箇所も、破面試験結果では傷が認められなかった。超音波探傷検査で底面傷と判定したのは、いずれも板継ぎ溶接箇所であり、過去の例から、感度の高い探傷試験であるため板継ぎ溶接のボンド部等において若干粗粒化した組織からの雑エコーを拾い、疑似欠陥を呈することが知られている。念のため破面試験片を用いて、同じ探触子、感度で手動にて探傷したところ、雑エコーを拾うことが分かった。

全ての破面 (フランジ側) について、10mmピッチで溶込み量の測定を行った。また、破面試験の測定位置に対応する超音波探傷検査による溶込み量を読み取り、破面試験と超音波探傷検査の溶込みの対応を行った。図-17、18に破面試験および超音波探傷検査の溶込み量のヒストグラムを示した。破面試験による結果では、この母集団の溶込み平均値は3.1mm標準偏差0.8mmであったが、同じ母集団の超音波探傷検査結果では平均値2.9mm標準偏差1.6mmであった。平均値の差0.2mmは別として、標準偏差が破面試験による場合の2倍であり、超音波探傷による溶込み量の測定はバラツキが大きかった。

(9) かど継手の性能試験

かど継手から溶着金属の引張試験片、衝撃試験片、マクロ試験片を採取し、継手の性能試験を行った。

1) 溶着金属の引張試験

部分溶込みかど継手より全溶着金属引張試験片 (A 2号) を採取し、引張試験を行い、試験結果を表-17に示した。HT780×HT780のJ開先部分溶込み継手に60キロ級の溶接材料を用いた継手の全溶着金属の引張強度は

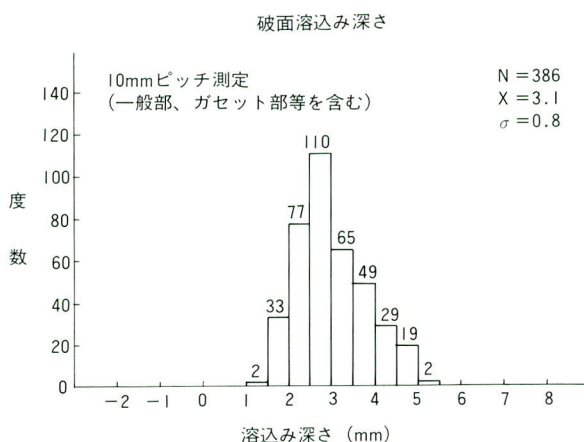


図-17 破面試験による溶け込み深さの測定結果

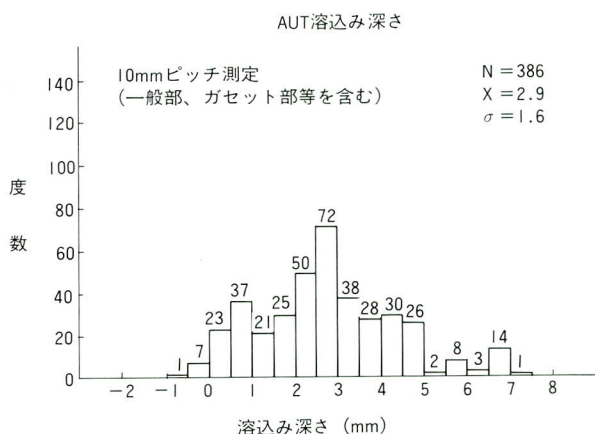


図-18 破面試験片測定位置における超音波自動探傷検査の溶込み深さ測定結果

718N/mm² (690N級相当)、70キロ級溶接材料を用いた場合は780N/mm² (ぎりぎり780N級相当)であった。ある程度のバラツキを考慮すると70キロ級溶接材料を用いて780N級 (HT780/mm²) 相当の強度を得ることには無理があると考えられる。60キロ級溶接材料を用いて、690N級の強度を得ることとし、のど厚は軟質による割り増しを行うのが、妥当と考えられる。

2) かど継手の衝撃試験結果

かど継手の溶接金属、ボンドおよび熱影響部からシャルピー衝撃試験片を採取し、衝撃試験を行った。溶接材料の強度レベルに関係なく、全ての位置で-15℃衝撃値は規格値を満足した。表-18に試験結果を示した。

3) かど継手の断面マクロ試験及び硬さ試験

かど継手の一般部とガセット部の断面マクロの例を写

表-17 部分溶込みかど継手全溶接金属引張試験結果(JIS Z 3111, A2号)

| 継手試験片番号 | 板厚 | 材質 | 溶接材料 | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び | 規格値 (N/mm ²) | 備考 |
|---------|-------|---------------|--------------------|---------------------------|----|--------------------------|----------|
| UAJ-T1 | 34×34 | HT780 × HT780 | 60キロ級溶材 Y-DM 4.0φ | 721 | 27 | ≥690 | 溶接条件：表12 |
| T2 | | | | 716 | 26 | | |
| LAJ-T1 | 34×34 | HT780 × HT780 | 70キロ級溶材 Y-70M 4.0φ | 781 | 24 | ≥780 | |
| T2 | | | | 789 | 24 | | |

表-18 部分溶込みかど継手溶接部の衝撃試験結果(JIS Z 3111, 4号試験片)

| 継手試験片記号 | 板厚 | 材質 | ノッチ位置 | 試験温度 | 吸収エネルギー(Joule) | | 規格値 | 備考 | |
|-----------------------|-------|-------|---------|------|----------------|-----|-----|----------------|-----------------------|
| | | | | | 試験値 | 平均値 | | | |
| UAJ-C 60キロ級材 Y-DM | 34×34 | HT780 | 溶接金属 | -15℃ | 90 | 99 | ≥47 | 溶接材料・溶接条件：表-12 | |
| | | | | | 101 | | | | |
| | | | | | 96 | | | | |
| | | | ボンド | -15℃ | 112 | 108 | ≥47 | | シャルピー試験片ノッチ位置 溶接金属 |
| | | | | | 90 | | | | |
| | | | | | 123 | | | | |
| 熱影響部 | -15℃ | 231 | 242 | ≥47 | 溶接金属 | | | | |
| | | 220 | | | | | | | |
| | | 274 | | | | | | | |
| LAJ-C 70キロ級材 Y-70M | 34×34 | HT780 | ボンド溶接金属 | -15℃ | | 55 | 61 | ≥47 | ボンド 熱影響部 |
| | | | | | | 62 | | | |
| | | | | | | 65 | | | |
| | | | ボンド | -15℃ | 59 | 54 | ≥47 | | |
| | | | | | 57 | | | | |
| | | | | | 47 | | | | |
| | | | 熱影響部 | -15℃ | 249 | 235 | ≥47 | | |
| | | | | | 229 | | | | |
| | | | | | 227 | | | | |

真-8、9に示した。一般部とガセット部を比較すると初層溶接の溶込みは、ガセット部の方が深いことが分かる。写真-9はガセット部で補強盛り溶接を行った例である。

(10) ハンガー定着金属ダブリングプレートの取付け・溶接と切削加工

かど継手溶接完了後、かど継手全長の自動超音波探傷検査を行い、直ちにハンガー定着金物のピン孔のダブリングプレートの取付けおよび溶接を行った。写真-10にダブリングプレート内径切削加工後の開先溶接継手の断面マクロ試験結果を示した。一部にルート部未溶着部も認められたが、概して良好な溶込みを有していた。また、図-19にピン孔ダブリングプレートの加工方法を示した。

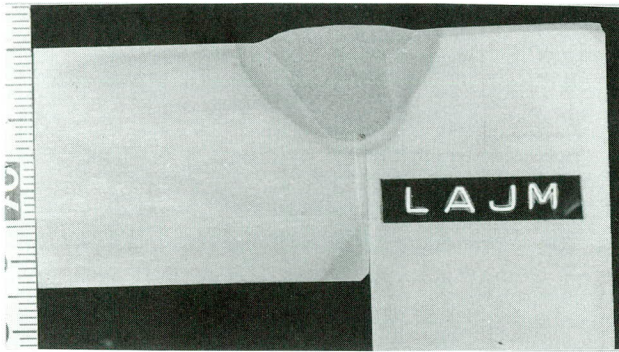


写真-8 かど継手一般部の断面マクロ試験

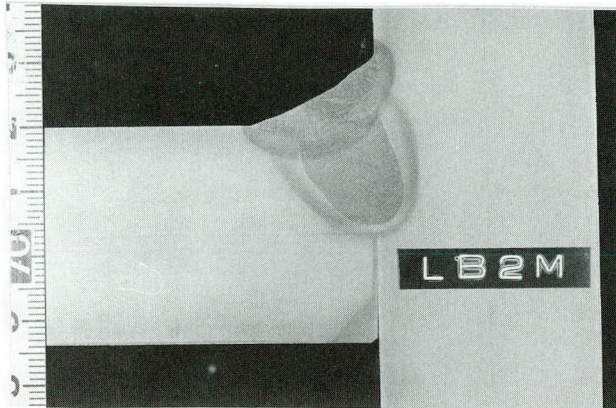


写真-9 かど継手ガセット部に補強盛り溶接を行った場合

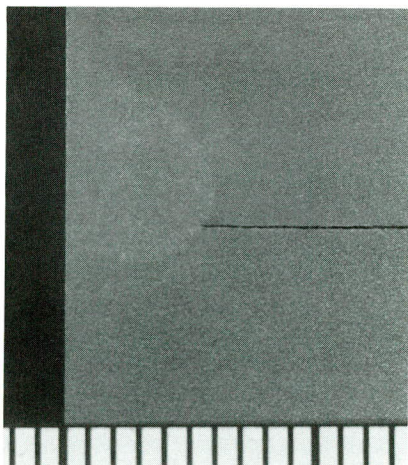


写真-10 ピン孔ダブルリング開先溶接部の断面マクロ (ルート完全溶込み)

ダブルリングプレート取付け方法に関する検討事項は次の通りである。

- ① ハンガー定着金物とダブルリングプレートの密着を確保するには、ダブルリングプレートの定着金物側の切削加工（平坦度確保）が必要かどうかの確認。
- ② 内面のダブルリングプレートは取付け前に切削加工を行っておき、取付け・溶接後は外側のダブルリングプレートのみ切削する方法で所定の寸法精度を確保できるかどうかの確認。
- ③ ピン孔の切削加工代をどの程度にすればよいか。また、切削後も定着金物とダブルリングプレートのピン孔内溶接のど厚の確認。
- ④ 定着金物とダブルリングプレートのピン孔内溶接の品質確認。

ダブルリングプレート取り付け・溶接完了後定着金物ダブルリング部の切削、ピン孔径の切削加工をCNCフライス汎用機により行なった。

写真-13にピン孔ボウリング加工時の孔芯罫線の状況を写真-13に外側ダブルリングプレートの切削状況を示した。

定着金物ピンプレートの各種寸法許容値の例を表-19に示した。切削完了後の板厚測定値は設計値に対して+0.1~0.5mm、ボウリング加工後の孔径精度は0~+0.17mm、角折れ度0~+0.76mm/100mm、ピン孔直角度は±0であり、良好であった。従って、図-19に示したダブルリングプレートの切削加工方法はいずれの方法でも精度上問題は無いことが分かった。

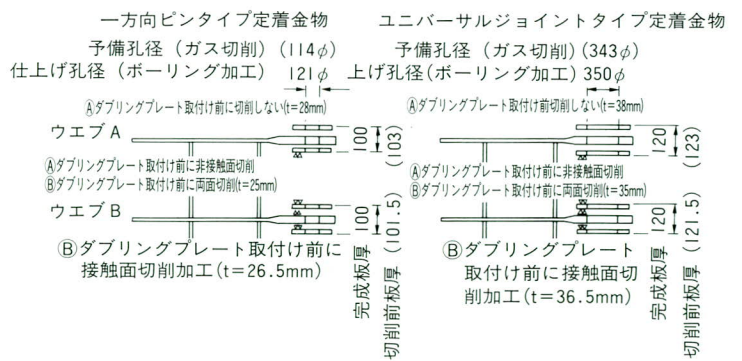
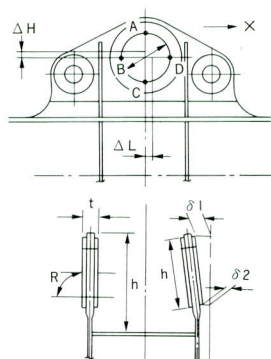


図-19 ハンガー定着金物ピン孔部加工方法

表-19 定着金物ピンプレート寸法許容値の例

| 要求項目 | 条件 | 許容差(mm) | 備考 |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------------|
| ユニバーサルジョイントタイプのピンプレート | 板厚 (t) | 120mm | +1 -0 |
| | 孔径 (φ) | 351φ | +0.2 -0.2 |
| | 角折れ度 (δ1-δ2) | h:ピンプレートの高さ | ±0.3h/100 |
| | ピン孔直角度 (R) | ピンプレートに対する直角度 | ±0.1/100 |
| | 孔位置精度 (ΔH, ΔL) | 鉛直方向 橋軸方向 | 相対差 1.5 // 5 |



6. まとめ

予熱低減型HT780を用いたトラス上弦材のパイロットメンバー製作施工試験を行った。その結果、予熱低減型HT780は十分に橋梁に適用できることが証明された。板継ぎ溶接時を除いて、予熱は全て50℃で行った。上弦材は上下フランジがはめ込みとなり、コ組立は横組とせざるを得なかったため、コ組立においては予熱変形に付随するキャンパー変化を生じた。しかしながらこのキャンパー変化は架設状態での正立・格点受けで、自重タワミで簡単にキャンセルされる量であり、製作付加キャンパー

をつけるべきかどうかは、判断に苦しむが、一応今回得られたキャンパー変化の1/2を製作付加キャンパーとして原寸時考慮することにした。50℃でも、コ組立時に予熱変形を生じていることを考えると100℃以上ではどのような状態になるか、想像が付き難い。また、一般の作業でも、予熱低減は危険防止と作業者の環境改善に寄与していると思われる。今回のパイロットメンバー製作施工試験で得られた知見は非常に貴重であり、実橋製作に当たって、これらの試験結果を十分に反映して施工計画を立てている。

最後に、本施工試験を行うに当たって、数年前から予熱低減型HT780の開発を行い、橋梁への適用研究を当社と共同で行ってきた新日本製鐵(株)にはHT780試験材を、日鉄溶接工業(株)には溶接材料を提供して頂いた。紙上を借りて、深甚なる感謝の意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) 成宮他; 調質鋼を用いたトラス弦材の疲労を考慮した製作、宮地技報No.1
- 2) 成宮他; 最近の高張力鋼強度化方法とHT780について、宮地技報No.9

1994.6.25受付