

調質鋼を用いたトラス弦材の疲労を考慮した製作

(大鳴門橋HT70トラス弦材の製作管理と施工実績)

成宮隆雄* 百瀬敏彦***
中塚勲夫**

1. まえがき

道路・鉄道併用橋としての吊橋は、活荷重繰り返し応力による疲れ強さを考慮して設計される。溶接構造物の場合、疲れ強さに影響を与える溶接継手として、リブ十字溶接継手のすみ肉溶接止端形状およびはこ断面閉じ合せ継手（いわゆるかど継手と称する縦継手）が重要である。特にかど継手においては、部分溶け込み溶接継手または、すみ肉溶接継手のルート部の溶接欠陥が疲れ強さを低減させることが大型試験体による疲労試験および破壊力学の面から明らかにされてきている。

大鳴門橋は、道路・鉄道併用吊橋として設計されており、主構トラス弦材には多量のHT70が使用されている。この弦材の製作にあたっては、製作施工方法・使用設備機器および作業方法等について多くの検討がなされ、小型・中型およびパイロットメンバーの製作施工試験により実験的研究および製作要領の妥当性の確認がなされた。

ルート部溶接欠陥の防止要因は数多くあるが、これらを大別すると下記の3点に要約される。

- 1) 溶接施工法の確立
- 2) 継手部の清浄度の確保
- 3) ルートギャップ0.5mm以下の確保

これらのうち1)と2)については、作業標準の遵守と技能教育によって目的を達することが可能であるが、3)については、組合せ精度の問題であり品質のバラツキが累積されるため、各工程でのバランスのとれた管理が重要である。

本文では大鳴門橋トラス弦材（HT70）の製作管理と施工実績を、かど継手の溶接欠陥防止の立場からまとめて報告するものである。

2. 大鳴門橋の概要

大鳴門橋の一般図および設計諸元を41～42ページに示した。当社の製作施工範囲は、中央径間中央により四国側へ1/4の区間であり、主構上・下弦材のフランジ及びウェブは、全てHT70（板厚36～42mm）である。

図-1に主構上・下弦材かど継手の開先条件を示した。部分溶け込み継手は、J開先とし、シングルサブマージアーク溶接。すみ肉継手は、下向きおよび水平姿勢でシングルサブマージアーク溶接で行なった。

写真-1、2に、部分溶け込み継手および下向きすみ肉継手のサブマージアーク溶接施工状況を示した。又表-1にかど継手の溶接施工条件を示した。

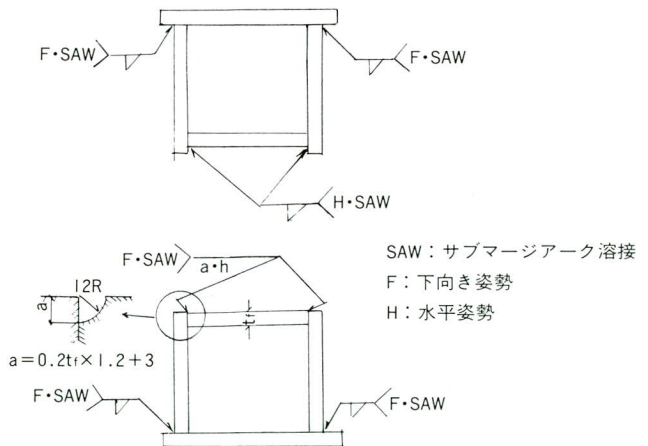


図-1. 主構上・下弦材かど継手開発及び溶接方法

3. かど継手ルート部の溶接欠陥

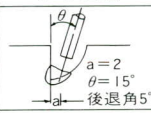
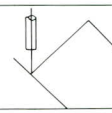
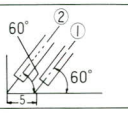
ルート部の溶接欠陥の調査は、主として溶接ビードの縦断面破断後の破面によって行なわれている。ルート部に発生する溶接欠陥は、その種類、形状および寸法が種々雑多であり厳しく定量化して表現することは困難で

* 千葉工場研究室長

*** 千葉工場製造部生産技術課

** 千葉工場製造部製造計画課課長代理

表-1. かど継手溶接施工条件

項目	継手種類	J開先部分溶け込み継手	下向きすみ肉継手	水平すみ肉継手
溶接方法		シングルSAW	同左	同左
溶接材料		Y-DM(4φ)×YF-15K(20 ^x / ₂₀₀)	Y-DM(4φ)×YF-15K(20 ^x / ₂₀₀)	Y-DM(4φ)×YF-15K(12 ^x / ₁₅₀)
溶接条件		(開先深さ12mmの場合) 600A 30V 30cm/min 3パス溶接	(サイズ9mmの場合) 650A 32V 32cm/min	(サイズ9mmの場合) ① 600A-32V-40cm/min ② 500A-29V-70cm/min
ワイヤ角度及び狙い位置				
倣い装置		キロニー倣い装置	キロニー倣い装置	キロニー倣い装置
予熱方法		モールドヒーター全長固定予熱	インフラヒーター熱源移動予熱	モールドヒーター全長固定予熱

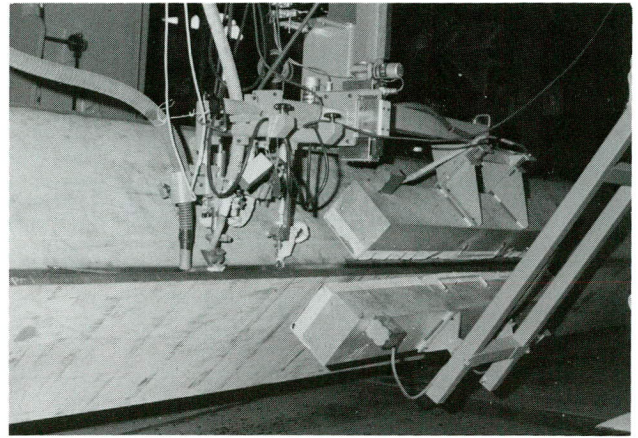


写真-2. 下向きすみ肉継手の溶接施工状況

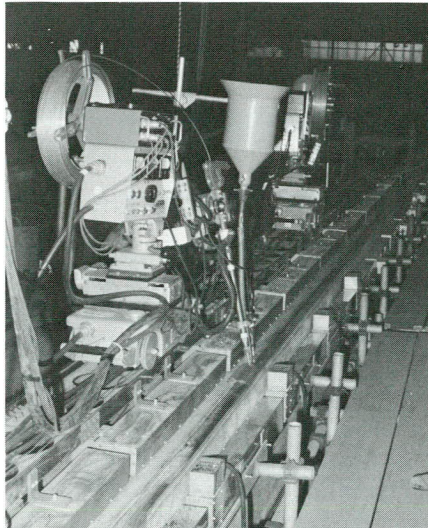


写真-1. 部分溶け込み継手の溶接施工状況

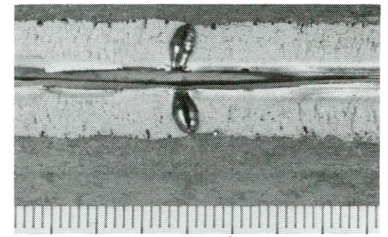


写真-3-1. 球状ブローホール
幅が数mm、長さ数mm程度のもの(不合格欠陥)

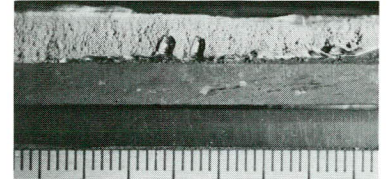


写真-3-2. 球状ブローホール
幅1.5mm長さ2mm程度(許容限界欠陥)

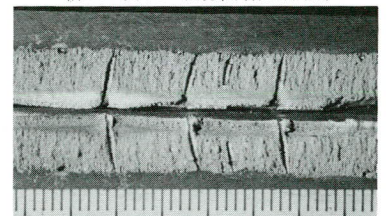


写真-3-3. パイプ状ブローホール
(不合格と見なされているもの)

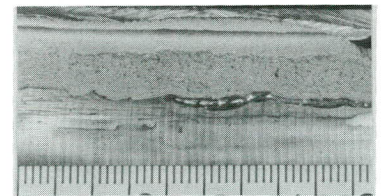


写真-3-4.
ルート部のスラグ巻き込み欠陥

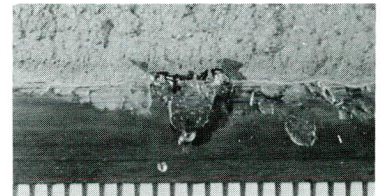


写真-3-5.
垂れ込み欠陥

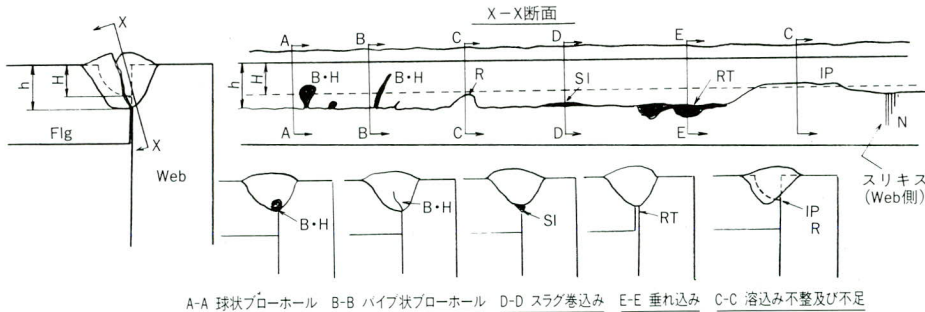


図-2. ルート部溶接欠陥の模式図

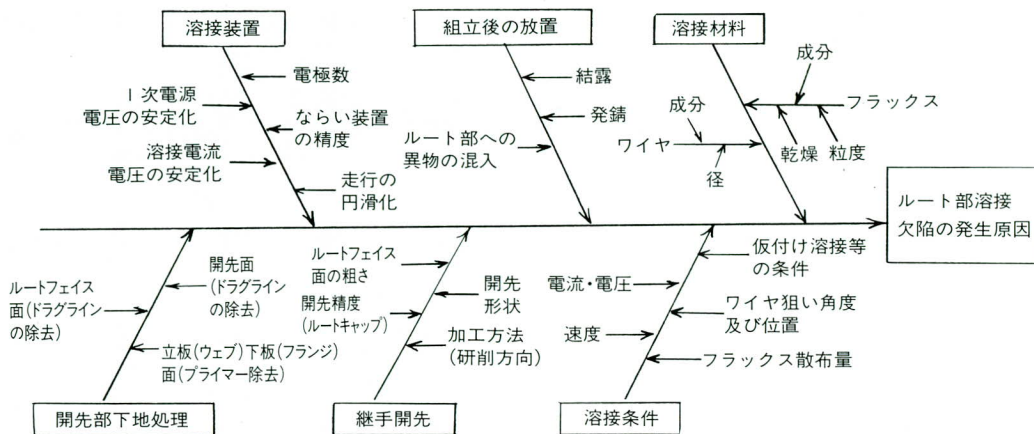


図-3. ルート部溶接欠陥の発生要因図

あるが、発生原因および形状から大別すると下記の通り分類される。

- 1) 球状およびパイプ状ブローホール
- 2) ルート部のスラグ巻込み
- 3) 溶け込み不整
- 4) 溶け込み不足
- 5) ルート垂れ込み
- 6) スリキズ（組立時発生欠陥）

図-2にこれらのルート部溶接欠陥の模式図を、写真-3に各欠陥の代表例を示した。

これらのルート部溶接欠陥の発生要因図を図-3に示した。ルート部溶接欠陥防止のため、各要因について十分な検討を行ない、小型・中型試験体およびパイロットメンバーの製作施工試験により実験的調査および確認を行なった。これらの検討結果については既に詳細に報告されているので本報では省略するが、ルート部溶接欠陥発生において最も大きな要因であるルートギャップについては、たゞ単に組立時に管理するだけではルートギャップ（G）を0.5mm以下にすることは不可能である。

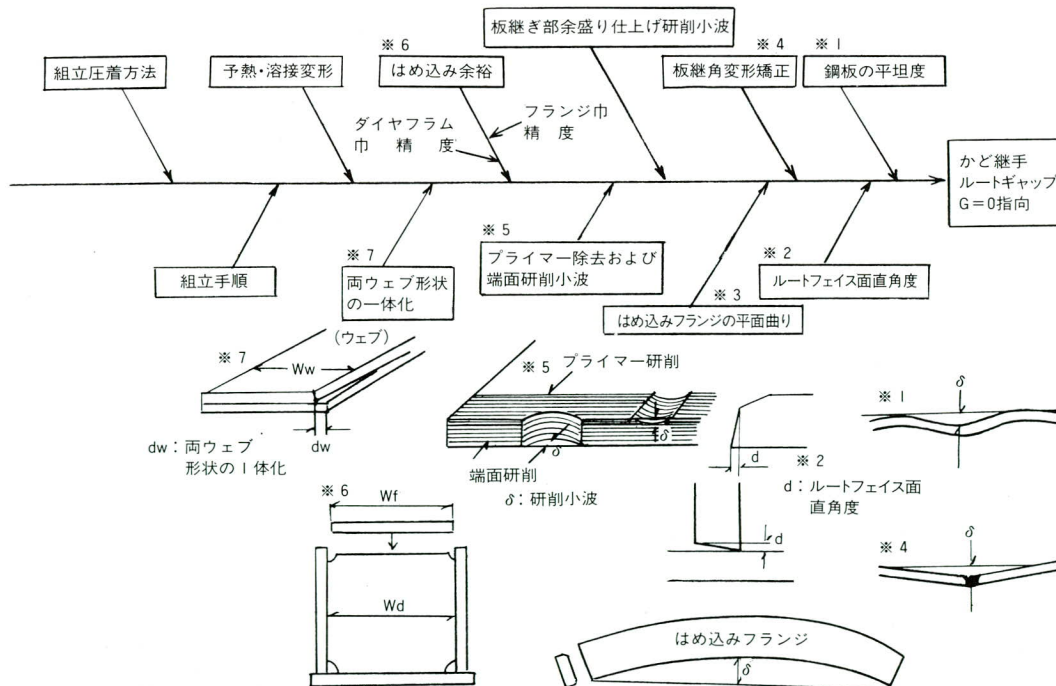


図-4. かど継手ルートギャップの要因図

ルートギャップを0.5mm以下にするためには、製作当初、即ち鋼板入荷時より製作各工程において、きめの細かい管理が必要である。かど継手のルートギャップをできる限り小さく（以降ルートギャップG=0指向と称する。）するための製作上の要因を図-4に示した。

これらの要因については、各々管理値を設定し、作業過程においてセルフチェックおよび諸測定を行ない管理シートに記録し、必要に応じてフィードバックして各工程を常に管理状態に保つように心掛けた。

以下に実橋製作における各工程の管理状態を数値で示し、今後の品質向上の一助としたい。

4. 結果

(1) ルートギャップの実績

主構上・下弦材の組立時には圧着治具等を用いてルートギャップG=0を指向し、仮付け溶接直前にルートギャップをスキ間ゲージを用いて測定し、 $G \leq 0.5$ を確認してから、仮付け溶接を行なった。

ルートギャップは原則として仮付け溶接ピッチ（約300mm毎）に測定し、部材にチョーク等で記録しておき、後程これを管理シートに記載した。これらの結果をまとめ、ヒストグラムとして図-5に示した。図-5(a)は、全継手のルートギャップヒストグラム図、図-5(b)はJ

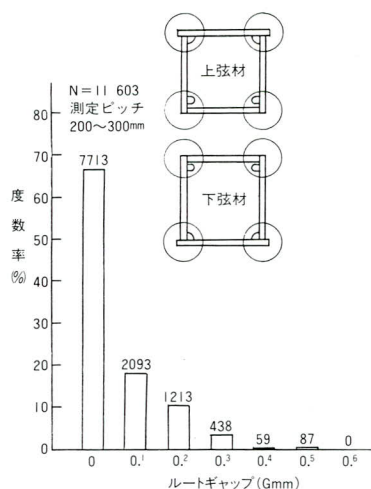


図-5. (a)
かど継手全継手のルートギャップ

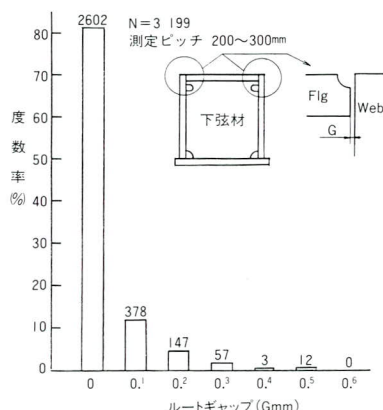


図-5. (b)
部分溶け込み継手のルートギャップ

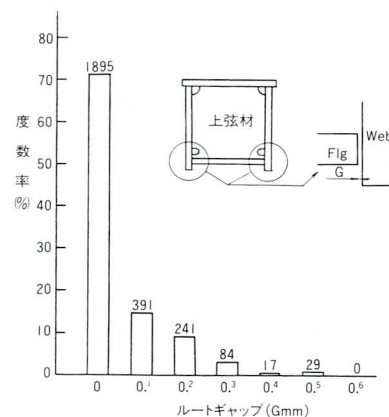


図-5. (c)
水平すみ肉継手のルートギャップ

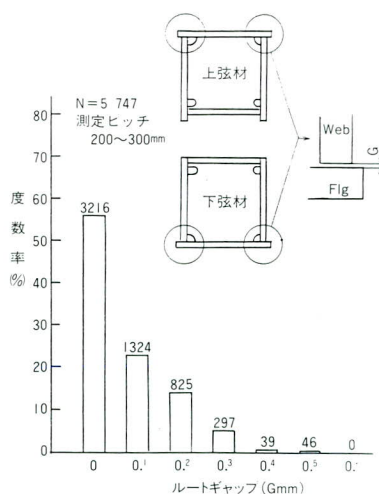


図-5. (d)
下向きすみ肉継手のルートギャップ

開先部分溶け込み継手、図-5(c)に水平すみ肉継手（フランジはめ込み）、また図-5(d)に下向きすみ肉継手のルートギャップのヒストグラムを示した。全継手についてルートギャップ $G \leq 0.5$ を確保することができたが、これは、次に述べる各要因の管理結果と圧着治具等を用いた圧着効果によって実現されたものである。ヒストグラムをみると全継手について $G=0$ の達成率は66.5%であり、継手別にみると部分溶け込み継手で81.3%、水平すみ肉継手で71.3%、下向きすみ肉継手で56.0%であった。結果として、はめ込みフランジ継手の方が $G=0$ の達成率の良かったのは意外であったが、これは圧着のし易さに関係しているものと思われる。

(2) ルートギャップ各要因の管理結果

図-4に示したかど継手ルートギャップ $G=0$ 指向の主な管理要因について、管理結果と若干の考察を以下に示

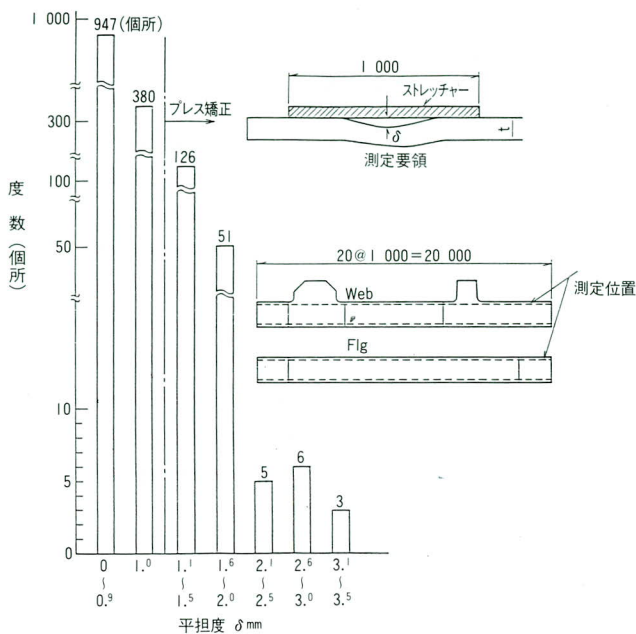


図-6. 大鳴門橋トラス弦材 (ウェブ・フランジ) 鋼板の平坦度 (HT 70)

す。

(a) 鋼板の平坦度

主構トラス弦材のフランジおよびウェブについて、1次切断後、かど継手部 (橋軸方向) の平坦度を1mのストレッチャーを用いて、継手全長にわたって測定した。本橋の主構フランジおよびウェブは全てHT70であり、鋼板の平坦度はHBSで2mm/m以下とされているが、1

次切断後の測定結果では、測定個所数1518個所のうち約1%が平坦度2mm/m以上であり管理目標の1mm/mを超えるものは12.6%であった。管理目標値である平坦度1mm/m以上のものは、全てプレスで1mm/m未満まで矯正した。矯正個所数は、実に191個所であった。鋼板の平坦度測定値 (矯正前) のヒストグラムを図-6に示した。

これらの管理により、鋼板の平坦度はG=0指向の障害とはなっていないと考えられる。

(b) ルートフェイス面の直角度 (落とし込みフランジ)

図-7に落とし込みフランジの直角度のヒストグラムを示した。図中の表示Aは下弦材のフランジであり、ルートフェイス面は機械加工を行い、直角度は-0.1~+0.2で非常に良好であった。一方、図中の表示Bは上弦材のフランジであり、ガス切断後酸化皮膜 (ドラッグライン) 除去の端面自動研削装置 (ベルトグライダー式) で研削した。従ってガス切断時の直角度の影響を受け、研削過程において直角度を測定し、管理目標に入らない場合は修正のための再研削を行った。

(c) 板継ぎ部の角変形矯正残量

板継ぎ継手の溶接角変形は、プレスで1mm/m以下になるまで矯正した。矯正残量のヒストグラムを図-8に示した。矯正残量0.5mm/m以下が96.3%であった。

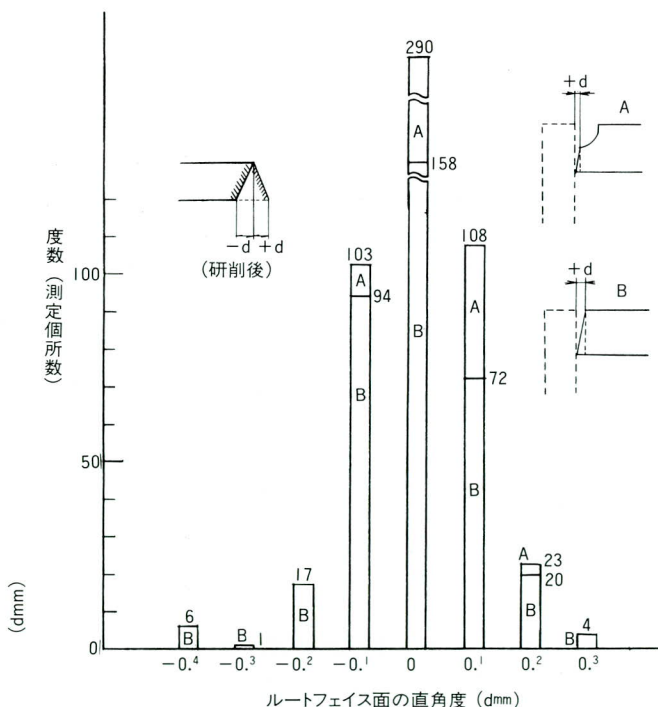


図-7. 落とし込みフランジの直角度

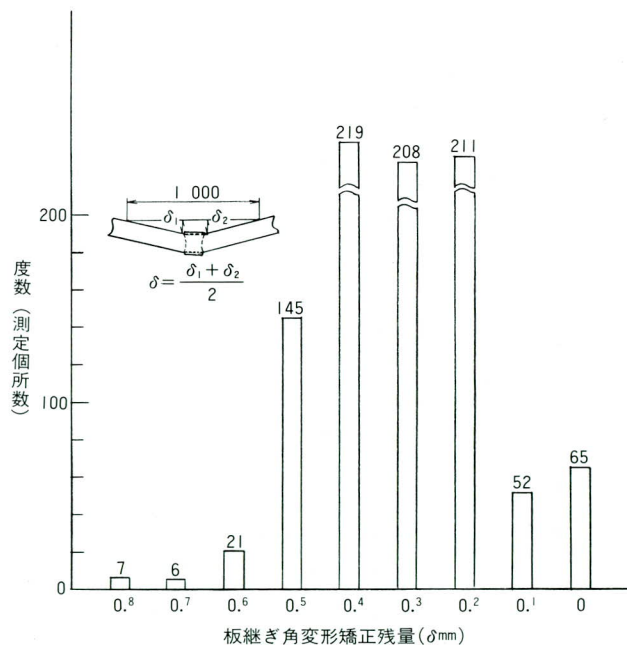


図-8. 板継ぎ角変形矯正残量

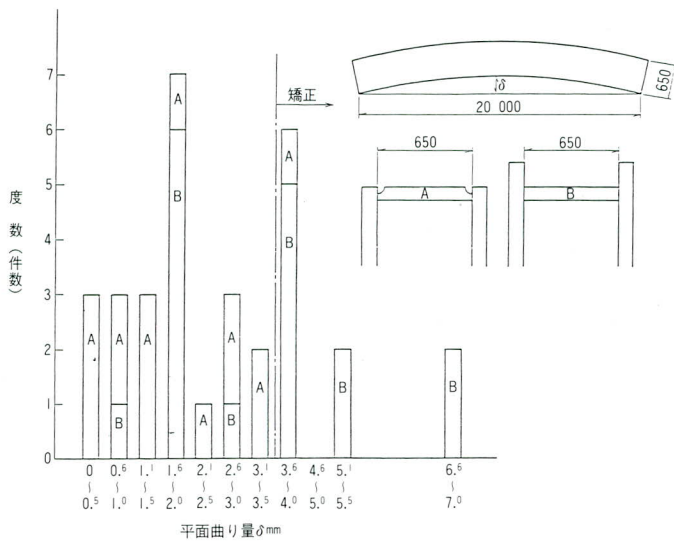


図-9. 大鳴門橋弦材はめ込みフランジの平面曲り量 (HT 70)

板継ぎ継手の角変形矯正にあたって十分注意深く矯正した結果図-8のような平坦度を得ることができ、平坦度と同様ルートギャップG=0、指向の障害とはならないものと考えられる。

(d) はめ込みフランジの平面曲り

大鳴門橋の場合、フランジ巾650mm、長さ約21mであり、平面曲り剛度はそれ程大きいものではない。したがってL形に組立てた後、両ウェブを押し広げることにより、フランジをはめ込むことができれば、治具等を用

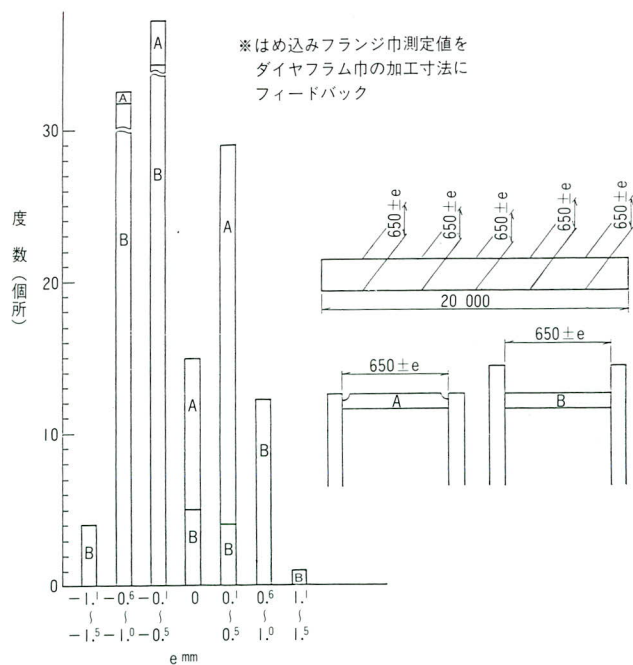


図-10. 大鳴門橋トラス弦材はめ込みフランジ幅精度 (HT 70)

いた圧縮により容易に密着させることができ、ダイヤフラム部を除いてルートギャップG=0指向の障害とはならない。

しかしはめ込みの際平面曲りが大きいとダイヤフラム部等においてスリキズを生じる可能性がある。またダイヤフラム位置において、左右のルートギャップが片寄り片側のルートギャップが大きくなることもある。そのため、はめ込みフランジの平面曲りの管理値を3mm以下とした。図-9に実橋における2次切断後のはめ込みフランジの平面曲り量のヒストグラムを示した。はめ込みフランジ枚数の68.8%が管理目標の3mm/m以下であったが、残りの31.2%は曲り矯正を行なって管理目標の3mm/m以下に納めた。なお曲りは、フランジのコバを加熱矯正することにより容易に矯正できた。

(e) はめ込みフランジの幅寸法精度

図-10に、はめ込みフランジの幅寸法測定値のヒストグラムを示した。下弦材のはめ込みフランジはJ開先加工時幅も同時に機械加工しているため、幅寸法は設計値に対してほとんどが±0.5mm以内に入っているが、上弦材のはめ込みフランジはガス切断後酸化皮膜（ドラグライン）の除去のため自動研削装置で端面仕上げを行っており、端面の直角度およびガス切断の小さなノッチ等の関係で必要以上に研削されるため、±1.5mmの精度となった。ただし、ルートギャップG=0指向を達成するため、はめ込みフランジの幅寸法を基に、ダイヤフラムの幅寸法を決め（中間ダイヤフラム幅はフランジ幅+1.0、端ダイヤフラム幅は、フランジ幅+0.7mm）機械加工を行った。従ってはめ込みフランジの幅寸法精度は、直接ルートギャップG=0指向の障害とならない工夫を

表-2. タブテスト破面試験結果

かど継手の種類	タブテストの数 (※1)	ルートブローホール数(※2)				溶け込み量の平均(mm) (※3)	超音波探傷による推定溶け込み量の平均(mm) (※3)
		0.5 ≤ D ≤ 1.0	1.0 ≤ D ≤ 1.5	1.5 ≤ D ≤ 2.0	D ≥ 2.0		
部分溶け込み継手	12	1	0	1	0	3.0 (N=81×12)	3.7 (N=9×12)
下向きすみ肉継手	7	6	2	0	0	3.8 (N=81×7)	3.8 (N=9×7)
水平すみ肉継手	4	0	0	0	0	4.8 (N=81×4)	3.5 (N=9×4)

※1 タブテスト材1本の検査長は800mmである。
 ※2 Dはルートブローホールの長径を示す。(単位mm)
 ※3 ()内の数字は溶け込み量の測定数。

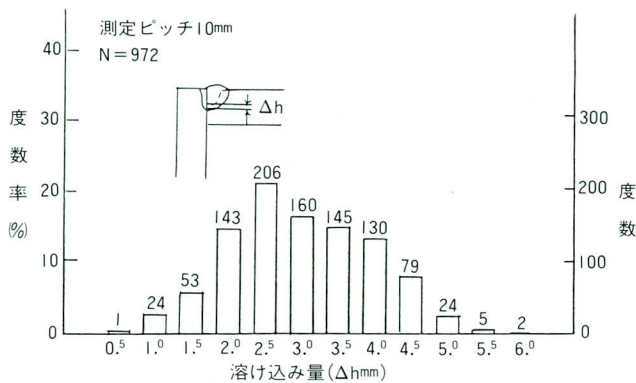


図-11. (a) 部分溶け込み継手の溶け込み量

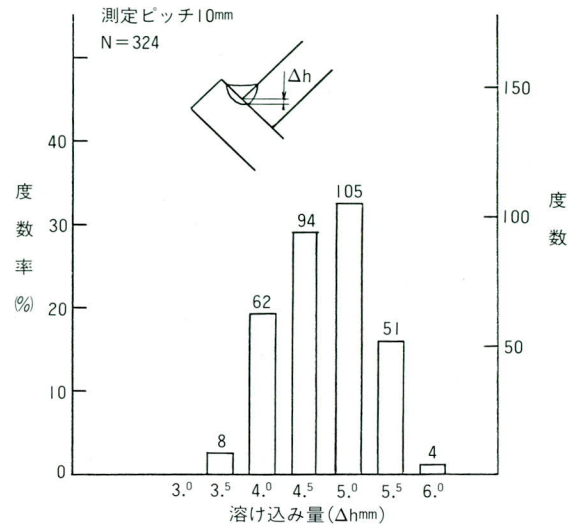


図-11. (c) 下向きすみ肉継手の溶け込み量

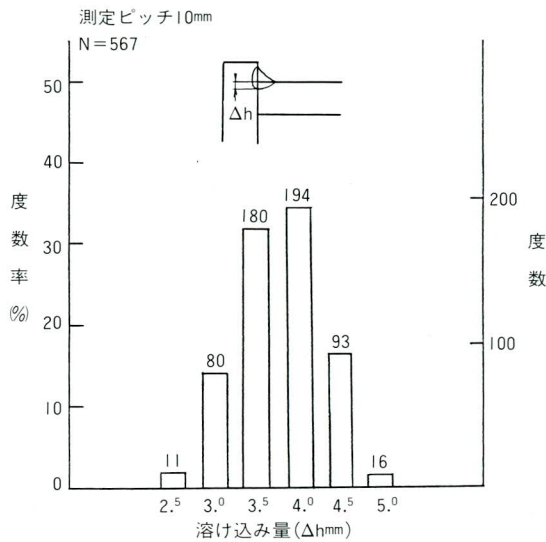


図-11. (b) 水平すみ肉継手の溶け込み量

行っているが、部材の断面寸法精度保持の立場から今後はめ込みフランジの幅精度および端面直角度の精度向上に努める必要がある。

(f) 研削小波

ガス切断面の酸化皮膜除去および継手部のプライマー除去のため、一定圧力で研削できる自動研削装置を開発し、研削小波を生じさせないようにした。又板継ぎ継手の余盛ビード仕上げは、角変形矯正前は粗仕上げ（余盛ビード0.5~1mm程まで仕上げ）までとし、角変形矯正後余盛ビードの最終仕上げを行った。これらの研削小波の管理目標値は0.3mm以下とし、0.3mmスキ間ゲージによるNO-GO管理とした。

(3) タブテスト破面試験結果

継手のルート部欠陥を破壊試験で検証するため、部材

表-3. 実橋におけるAUT法超音波探傷結果

かど継手の種類	対象継手数	検査延長 (m)	超音波探傷による推定溶け込み量の平均 (mm)	一定値以上の超音波エコーがあった個所数					
				ルートブローホール(B+H)※1	一般部ブローホール(D)	スリキズ(N)	溶け込み不整(R)※2	溶け込み不足(IP)	その他※3
部分溶け込み継手	24	493.8	4.5	3 (1)※4	3 (0)	1 (0)	52 (0)	0	0
下向きすみ肉継手	7	141.0	4.2	1 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (0)	0	0
水平すみ肉継手	4	72.5	3.7	1 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (0)	0	0
合計	35	706.3	平均4.3	5 (1)	3 (0)	1 (0)	60 (0)	0	0

※1 エコー(平均)が20%を超えた個所

※2 長さ15mmで溶け込み量が2mm以上変化した個所

※3 母材の介在物および開裂ワレ等

※4 ()内は不合格判定基準を超える個所数

の継手終端に長さ1mのタブ材を取りつけ、部材溶接時に実継手溶接をタブ材まで行い、溶接完了したタブ材を取りはずし、破面試験を行うのをタブテストと称している。大鳴門橋において、部分溶け込み継手では4継手に1本、すみ肉継手では12本継手に1本の割合でタブテストを行なった。試験結果を表-2に示した。また図-11(a)、(b)、(c)にタブテスト破面より測定した継手別溶け込み量のヒストグラムを示した。

タブテスト破面試験の結果は、実継手の品質を反映しているものと考えられるが、ルートブローホール1.5φ以上のものは、1箇所のみであり非常に良好であった。又溶け込み量は各継手とも十分であり、平均で3mm以上を確保されていた。

(4) かど継手の超音波探傷結果

部分溶け込み24継手、下向きすみ肉7継手、水平すみ肉4継手について、超音波自動探傷を行なった。探傷結果のまとめを表-3に示した。超音波探傷検査延長706.3mのうち、基準値以上のルート部欠陥はルートブローホール5個、一般部ブローホール3個、スリキズ1箇所および若干の溶け込み不整60箇所であった。溶け込み不足その他の欠陥は認められなかった。これらの欠陥のうち手直しを要する欠陥は、ルートブローホール1個のみであった。一方溶け込み不整（長さ15mmで溶け込みが2mm以上変化した箇所数）が、かなり多く認められた。特に部分溶け込み継手における溶け込み不整が大部分である。これは、部分溶け込み継手をJ開先とした、めルート部の懐が広く比較的低い電流でも十分な溶け込みが得られる一方、ワイヤの狙い位置によって溶け込みが急激に変化する傾向があり、溶接走向台車の振動によるトーチ部のブレおよびワイヤの矯正ぐせによるワイヤ先端のブレ等によるものと思われる。さらにJ開先継手の場合レールを直接フランジの上に置いているため、全長固定予熱による部材変形の結果、後半は下り勾配となり走向台車がスリップし易くなることも原因の1つと考えられる。今後これらについては検討を加え、溶け込み不整を少なくしていくよう努めるつもりである。

5. あとがき

かど継手のルート部溶接欠陥防止のため、要因図を基に多くの検討結果を反映させた製作要領および管理要領により実橋の製作が完了した。かど継手の溶接品質と

ともに、各工程での管理状況を整理し、今後の参考資料としてまとめて報告した。

本橋での溶接品質の良否については、論議のあるところと思われるが、十分な検討と十分な管理を行なうことにより当初不可能と思われた溶接品質が得られることが周知となったことは大きな財産である。

今後の課題として、

- 1) ガス切断精度の向上
- 2) J開先部分溶け込み継手の溶け込み不整防止を取り上げ検討を行うつもりである。

最後に本橋の製作にあたって、本州四国連絡橋公団製作検討委員会（委員長奥村先生）および本州四国連絡公団鳴門工事々務所の一方ならぬ御指導を受けたことを深謝する次第である。

<参考文献>

- 1) 本州四国連絡橋の補剛トラス製作に関する検討報告。一大鳴門橋補剛桁—主構弦材用SM58およびHT70溶接施工法の検討。昭和57年3月（財）海洋架橋調査委員会・本州四国連絡橋製作検討委員会