

全断面現場溶接Z継手の合理的な一手法と施工性確認試験

Study on workability of full cross section field welding by Z shape joint

保坂鐵矢*, 柳沼安俊**, 入部孝夫***, 市川篤司****, 三木千壽*****

Tetsuya Hosaka, Yasutoshi Yaginuma, Takao Irube, Atsushi Ichikawa, Chitoshi Miki

*工博 (株)レールウェイエンジニアリング (〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

** (株)東京鐵骨橋梁 技術研究所 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020)

***工修 (株)東京鐵骨橋梁 生産設計部 生産設計課 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020)

****工博 鉄道総合技術研究所 研究開発推進室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

*****工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

In the field welding of main girders for steel bridge, it seems that it is a high safe for brittle fracture to use Z shape joint which shifts top-bottom flange's welding line and web's one. Therefore, Monobegawa railway bridge has twin main girder of four spans continuous-composite bridge and it adopted Z shape joint in the field welding. In this paper, it is summarized details of Z shape joints in a past. Next, it is shown features of non- scallop Z shape joint in Monobegawa railway bridge, the point of its welding which was utilized by the result of welding procedure test, the measurement result of deformation occurred by welding, and consideration about behavior of deformation.

Key Words: Z shape joint, site welding, welding procedure

キーワード: Z継手, 現場溶接, 溶接施工

1. はじめに

鋼構造物の脆性破壊の発生要因として、温度による影響のほか①引張応力場、②切り欠き、③靱性不足があげられる。周知のとおり溶接部には、引張の残留応力、スカーラップあるいは溶接欠陥、熱による材質劣化など①～③に相当する脆性破壊を引き起こす3つの要因が潜在する可能性がある。鋼橋の工場溶接では、断面変化位置におけるフランジとウェブ相互の板継溶接線、あるいは板継溶接線と垂直補剛材の取り付け位置などにおいて、溶接線の重畳を避け継手の品質をより高める配慮がおこなわれている。

鋼橋の主桁現場溶接部の継手ディテールについても、溶接継手の靱性向上という観点からは、断面を輪切りにした直線継手ではなく、上下フランジとウェブの溶接線を段違いにした、いわゆるZ継手が好ましいといえる。しかしながら、①現場では立体的な部材の突合せ溶接となり、構造が複雑なほど組立精度が若干劣る可能性がある、②落とし込み部材が必要となる場合のように架設条件、架設手順からの制約があるなど、現場特有の配慮すべき点があり、主桁現場溶接部にZ継手を採用した例は少ない。

日本鉄道建設公団の阿佐線 物部川橋梁(4径間連続合成2主桁桁2連から構成される道床式鉄道橋、橋長188.0m および189.5m、支間長46.4～47.5m、桁高2.7m)における主桁の現場継手は、全断面現場溶接継手を採用している。本橋の架設は、ベント上の架設ステージで主桁を組み立てた後、現場溶接し、逐次、送り出す工法を採用している。したがって、主桁現場溶接部の継手ディテールに関する架設上の大きな制約はなく、上下フランジとウェブの溶接線をそれぞれ100mmずらしたZ継手を採用することとした。このZ継手は、疲労耐久性を考慮してウェブにはスカーラップを設けない継手構造である。

本稿では、物部川橋梁で採用したスカーラップを設けない全断面現場溶接Z継手の特徴について述べる。次に、実断面I型試験体による溶接施工試験を通じて確立した施工要領、溶接による変形量の計測結果を示し、溶接による変形挙動について考察する。

2. 現場溶接直線継手の問題点

主桁現場溶接部に直線継手を適用する場合、図-1に示すとおり、溶接の作業性あるいは溶接線の交差を避

けその部位の品質を確保する関係上、ウェブにスカーラップを設けることが多い。しかしながら、スカーラップを有する溶接継手は、その断面欠損および応力の流れの不均一化により局部的な応力集中を誘発させ、疲労強度の低い継手構造となる。鉄道構造物等設計標準²⁾によれば、

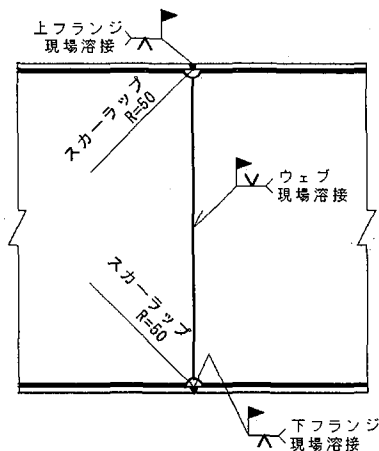


図-1 現場溶接直線継手の一例

「スカーラップを含む縦方向溶接継手をもつ母材」の疲労強度等級を G 等級（200 万回基本疲労応力範囲：50N/mm²）としている。既往の研究²⁾によれば、せん断応力と曲げ応力が同時に作用する部位については G 等級より厳しい設定になることも示されている。

図-2 は突合せ溶接継手 65 種類（板厚 13~100mm）について、母材と溶接金属部のシャルピー吸収エネルギーの相関を整理したものである。一般に溶接継手は、母材の規格値以上の機械的性質が要求されている。本図で示すとおり、いずれの溶接金属についても母材の規格値（SM490YB、SM520B:0℃ 27J 以上、SM520C、SM570Q:-5℃ 47J 以上）を上回るシャルピー吸収エネルギーが得られている。しかしながら、母材の有するシャルピー吸収エネルギーは、規格値よりもはるかに高く、溶接金属のそれは母材の 1/4~3/4 に過ぎない。溶接金属のシャルピー吸収エネルギーが、母材よりも同等あるいは若干上回っているものは、65 継手中 4 継手（6.1%）である。

現場溶接継手に対する設計の要求は、①疲労強度等級が高く、合理的な設計が可能であること、②構造体としての弱点とならず、十分な耐力が期待できることであると考えられる。スカーラップを有する直線継手は、スカーラップによる構造的な不連続に加え、材料靱性の不連続も付加されている。上下フランジとウェブの溶接線をずらした Z 継手は、溶接により発生する可能性がある欠陥の重畳を避け継手の健全性を高めるばかりではなく、鋼材そのものの高靱性を利用したクラックアレスタが形成され、継手としての終局耐力の向上に寄与するものと推測できる。

3. 継手の適用事例

鋼橋の現場における部材の連結法は、リベット継手から始まり、溶接継手および高力ボルト継手へと枝分かれしてきた。Z 継手は直線継手に先立って、国内における鋼橋の製作プロセスに溶接が本格的に導入され

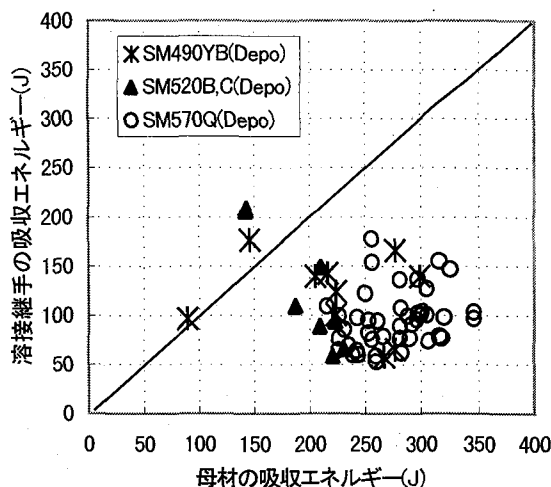


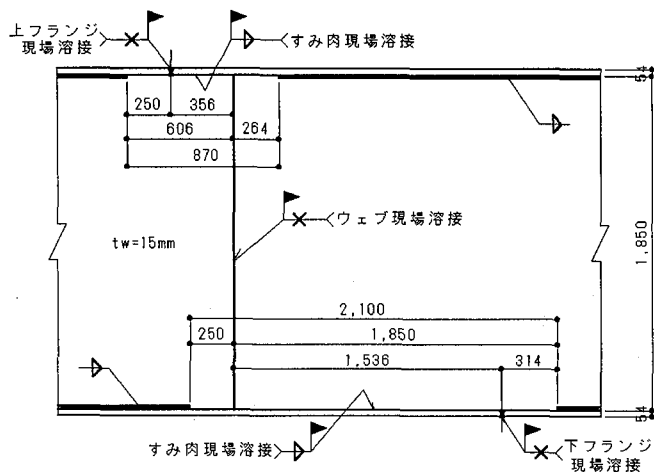
図-2 母材と溶接金属部のシャルピー吸収エネルギー

て間もない 1950 年代に、現場溶接の施工方法として採用されている。

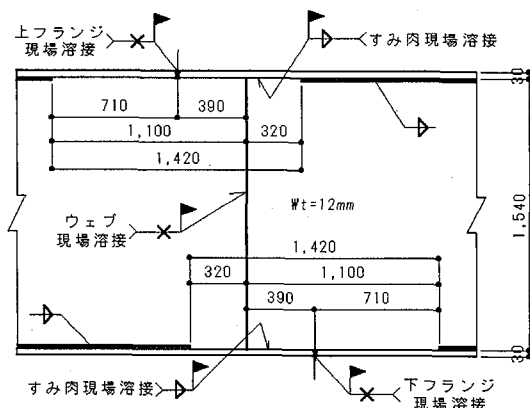
図-3(a), (b)は、当時ドイツで採用された 22 箇所の現場溶接継手の事例として紹介されたものである³⁾。これらの継手で特徴的なことは、フランジとウェブのすみ肉溶接の現場溶接区間（自由すみ肉長）を非常に長く（870~2100mm）採っていることである。文献 3)によれば、工場で施工した拘束の少ない突合せ溶接の継手性能に追従するために、配慮するべき現場溶接施工条件の一つとして、適切な自由すみ肉長を残すことを掲げている。

図-3(c)~(e)は、1954 年頃、実際に国内で施工された Z 継手の事例を示したものである^{4)~6)}。これらは、先に示したドイツで適用されていた現場溶接の継手形状の影響を受けているようである。いずれの事例についてもフランジとウェブの突合せ溶接線を 200~400mm 程度離し、自由すみ肉長を 400~800mm とした Z 継手を採用している。また、フランジ溶接部の裏はつりと溶接施工を考慮して、ウェブにはスカーラップ（R=30mm 程度）が設けられている。図-3(c)高野大橋および(e)和南津橋では、回転治具を用いて下向きを基調とした溶接方法で施工されている。図-3(d)瀬野大橋では、回転治具を用いずオールポジション（フランジ表面：下向き、フランジ裏面：上向き、ウェブ：立向き）で溶接がおこなわれている。なお、文献 6)によれば瀬野大橋の現場溶接施工時において、ウェブの溶収縮により、先に溶接したフランジに反りが生じ、フランジとウェブの首溶接部のルートギャップが最大で 4.5mm となったことを報告し、施工上の注意を喚起している。

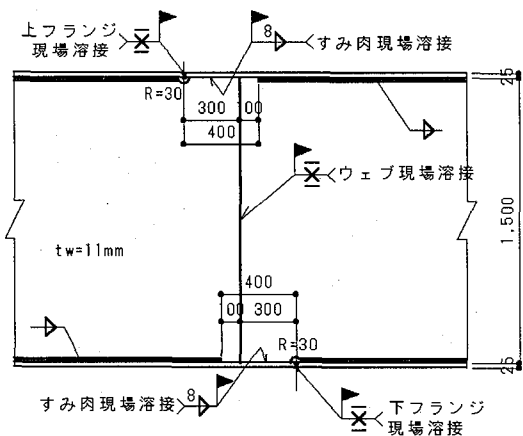
この後、現場溶接の継手ディテールは、Z 継手から前述の直線継手に移行し現在に至るが、近年、千鳥の沢川橋（日本道路公団）で再び現場溶接に Z 継手が採用されている⁷⁾。図-3(f)は、千鳥の沢川橋の現場溶接 Z



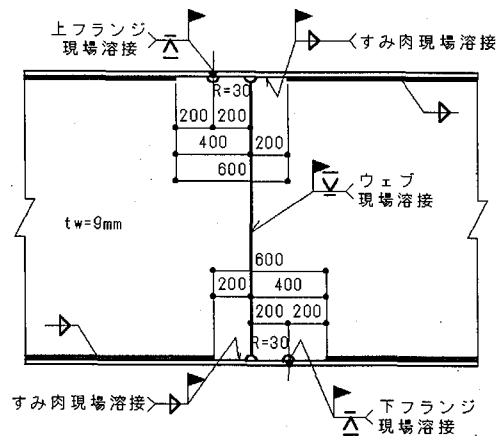
(a) ドイツの橋梁における現場溶接Z継手適用例³⁾



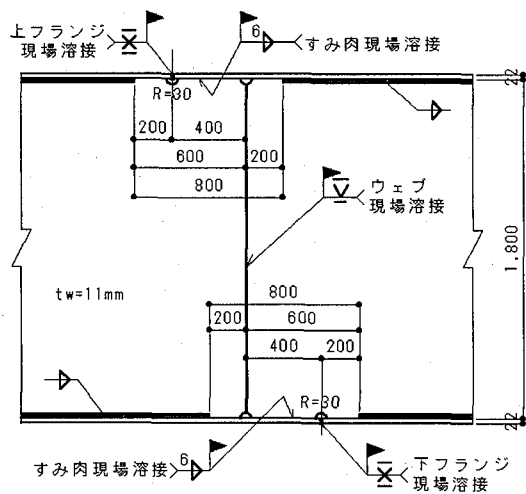
(b) ドイツの橋梁における現場溶接Z継手適用例³⁾



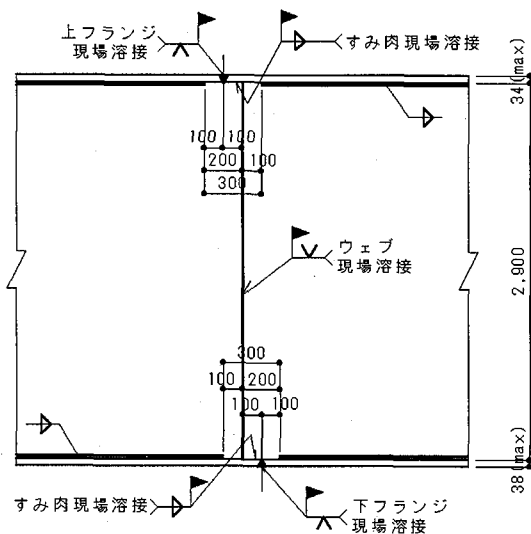
(c) 大阪府 高野大橋 (1954年)⁴⁾



(d) 広島県 瀬野大橋 (1954年)⁵⁾



(e) 新潟県 和南津橋 (1954年)⁶⁾



(f) 北海道 千島の沢川橋 (1998年)⁷⁾

図-3 現場溶接Z継手の適用事例

継手形状を示したものであり、フランジとウェブの突合せ溶接線を100mm 離し、自由すみ肉長を300mm としている。この継手の特徴は、下フランジを上向きMAG 自動溶接とすることでスカーラップをなくしていることである。

4. 提案する Z 継手ディテール

図-4 は、物部川橋梁で採用した主桁の現場溶接 Z 継手の構造詳細である。本継手は、設計の要求を受け入れると同時に、無理な施工とならないように配慮したものである。以下に、Z 継手の構造的な特徴と溶接施工上の留意点をまとめる。

4.1 スカーラップなしの継手ディテール

主桁の現場溶接部では、溶接線の交差を避けるとともに、溶接施工の作業性の向上を図ることを目的として、フランジ溶接線直上（下）のウェブにスカーラップを設けることが多い。しかしながら、前述のとおりスカーラップを有する溶接継手は疲労強度の低い継手構造となる。この場合、疲労強度の改善策として、①スカーラップの廻し溶接止端部をグラインダーで仕上げる方法⁸⁹⁾、②全断面溶接完了後、スカーラップと同形の鋼材を完全溶け込み溶接で埋め戻す方法（パッチ方式）¹⁰⁾などが挙げられる。

物部川橋梁の主桁の現場溶接部では、Z 継手を採用するとともに、下記に示すとおり施工方法を工夫することによりスカーラップなしの継手構造を実現させた。また、下フランジの突合せ溶接には、溶接施工の堅実性および施工能率を考慮して、溶接姿勢として最もスタンダードな下向き溶接を採用した。

- ① 上フランジ溶接継手に用いる裏当材は、ウェブ位置で分割して取り付ける。裏当て材の端部は、ウェブとの密着度を高めるため、ウェブ首溶接部の開先角度（ $\angle$ 型 50° ）に合わせてグラインダーで整形する。
- ② 下フランジの溶接継手ではウェブを挟んで作業員 2 人を配置し、左右振り分けて下向き CO_2 半自動溶接をおこなう方法を採用した。溶接施工上のポイントは、ウェブ直下を溶接始端とし、最初にアークを発生させた作業員の溶接金属が完全に凝固しないうちに、もう 1 人の作業員が溶接を開始し、両者が

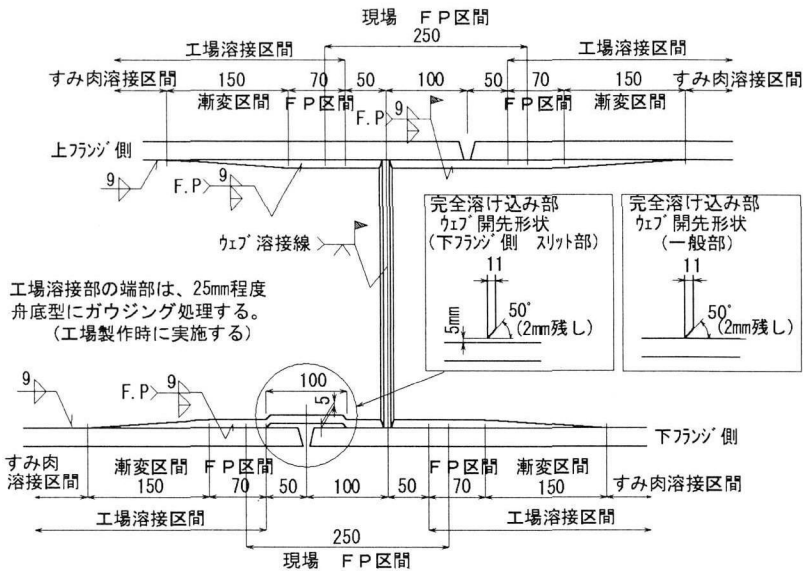


図-4 現場溶接 Z 継手の構造詳細

タイミングを計りながら溶接金属を確実に融合させることである。下フランジ溶接線直上のウェブの開口は、この作業員 2 人による連携溶接をおこなう上で必要最小限のサイズ（高さ 5mm、幅 100mm のスリット）とし、フランジとウェブの首溶接時に埋め戻しが可能なディテールとした。

4.2 現場継手近傍のフランジ・ウェブの首溶接

本橋では、図-4 に示すとおり、現場溶接区間（200mm）および工場施工範囲における部材端部の漸変区間を介した一部分（70mm）のフランジとウェブの首溶接は、 $\angle$ 型 50° の開先加工を施して完全溶け込み溶接とした。現場継手近傍の首溶接を完全溶け込み溶接とする利点は、以下のとおりである。

- ① 上フランジの現場溶接継手に関して、ウェブにスカーラップを設けずに裏当材を分割する手法を適用する場合、ウェブの材端面の一部が裏当の役割を果たすため、上フランジの裏波と局部的に溶着する。写真-1 は、ウェブの材端面と上フランジの裏波の溶着部に着目し、ウェブ板厚中央でスライスして撮影したマクロ写真である。写真 1 (a)は、

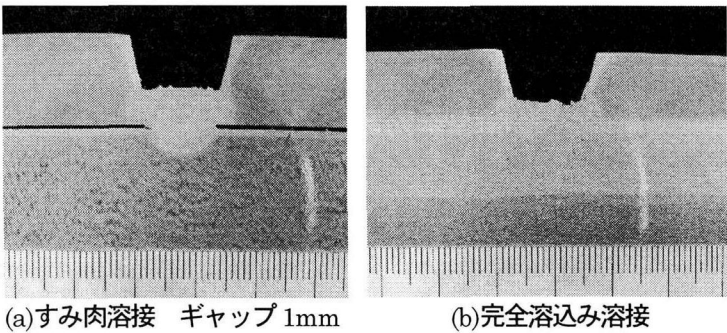


写真-1 上フランジ現場溶接継手部の首溶接マクロ写真

フランジとウェブに1mmのギャップをあけて、フランジ突合せ溶接部の開先内を初層のみ溶接し、首溶接をすみ肉溶接で施工したものである。ここで示すようにフランジとウェブにギャップがある場合、主桁の応力直角方向に位置するフランジ初層の裏波溶着部の止端は、必ずしも滑らかではなく応力集中の要因となり得ることが予測できる。写真1(b)は、フランジ突合せ溶接部の開先内を初層のみ溶接し、首溶接を完全溶け込み溶接としたものである。このような施工をすることにより、応力伝達上の不連続部が回避できる。

- ② 下フランジの現場溶接継手に下向きCO₂半自動溶接を適用する場合、首溶接の完全溶け込み溶接施工のために設けたウェブのレ型開先（開先角度50°）により、トーチアクションが向上する。これにより、より小さなウェブの開口（スリット高さ5mm）でも、作業性を阻害することなく、ウェブ直下の溶接線のつなぎ合わせが可能となる。
- ③ スカーラップなしのZ継手を有する主桁の部材端部の首溶接は、廻し溶接ができないため、すみ肉溶接のままである。仮置き時、あるいは輸送時に首溶接の未溶着部へ水が入り込む可能性がある。工場施工時に部材の首溶接端部をすみ肉溶接から完全溶け込み溶接に漸変させることにより、防水対策が万全となる。
- ④ 主桁部材相互の寸法誤差あるいは架設時の組立誤差の累積により、現場でのフランジとウェブのギャップの精度を満足できないケースが起こり得る可能性がある。現場施工部の首溶接を完全溶け込み溶接とすることにより、ギャップ不整に影響しない健全な溶接施工が可能となる。

5. 実断面Ⅰ型試験体による溶接施工試験

5.1 試験目的

本試験は、断面形状、板厚および施工条件等を実施工とほぼ同一とし、①スカーラップのない全断面現場

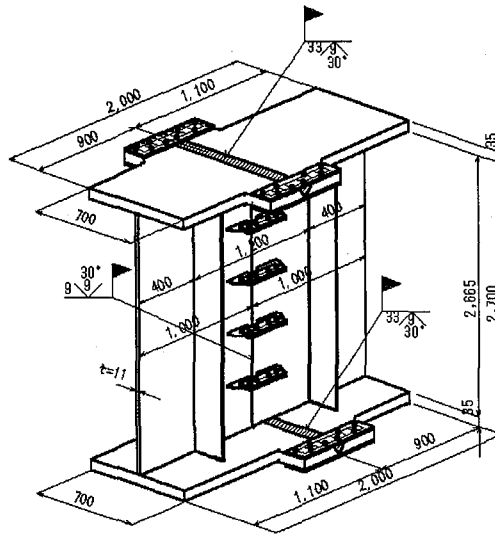
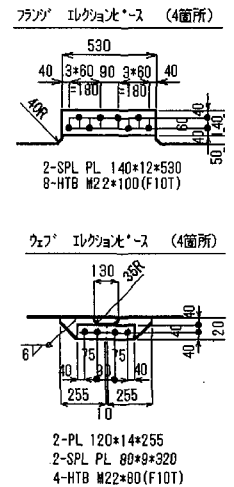


図-5 実断面Ⅰ型試験体 形状寸法



溶接Z継手の溶接施工方法および溶接条件を確立すること、②各溶接継手の重要部位を切り出し、マクロ試験により溶接品質の健全性を確認すること、③溶接収縮量および溶接手順による変形挙動を把握することを目的とした。

5.2 試験体形状寸法

試験体形状寸法を図-5に示す。継手のディテールについては、図-4に示したとおりである。エレクションピースは、上下フランジの両端とウェブパネルの水平補剛材の取り付け寸法に合わせて、ウェブ高さを5分割する位置に設け、トルシア型高力ボルト（M22-S10T）で本締め状態とした。なお、本橋の横桁仕口のフランジ連結板は、主桁フランジと一枚物で構成されている。したがって、フランジのエレクションピースは、板取り上、問題とならない範囲でフランジと一体構造とした。本橋は耐候性鋼材仕様であるが本試験では普通鋼材（SM490A）を用いた。

5.3 溶接施工要領

施工試験における溶接条件を表-1に示す。溶接施工は、下フランジ、上フランジ、ウェブ、首溶接の手順でおこなった。

5.4 試験結果

(1) 溶接品質

溶接完了後、各部位の継手は、非破壊検査およびマクロ試験を実施し健全性を確認した。非破壊試験は、溶接継手の一般部においてJIS Z 3104に準じた放射

表-1 開先精度および溶接条件

部 位	溶接方法	開先角度	ル-ド ギャップ	目違い	溶接材料	裏当材	溶接 条件					予熱 温度	パス 数
							電 流 A	電 圧 V	速 度 cm/min	入熱量 KJ/cm			
U-flg t=35mm	下向き CO2 自動溶接	V型 30° ± 5°	9 ± 2mm	3mm 以下	YGA-50W YM-55W 1.2mm	SB-41	初層	160~180	25~30	10~12	20.0~32.4	50	9
							2層以降	280~300	33~35	20~25	22.2~31.5		
Web T=11mm	立向き CO2 (半)自動溶接	V型 30° ± 5°	9 + 2mm - 4mm	2mm 以下	YFA-50W SF-50W 1.2mm	SB-41	初層	130~150	22~24	4~6	28.6~54.0	-	2
							2層	180~200	20~23	8~10	21.6~34.5		
L-flg T=35mm	下向き CO2 半自動溶接	V型 30° ± 5°	9 ± 2mm	3mm 以下	YGA-50W YM-55W 1.2mm	SB-41	初層	160~180	25~30	10~12	20.0~32.4	50	9
							2層以降	280~300	33~35	20~25	22.2~31.5		

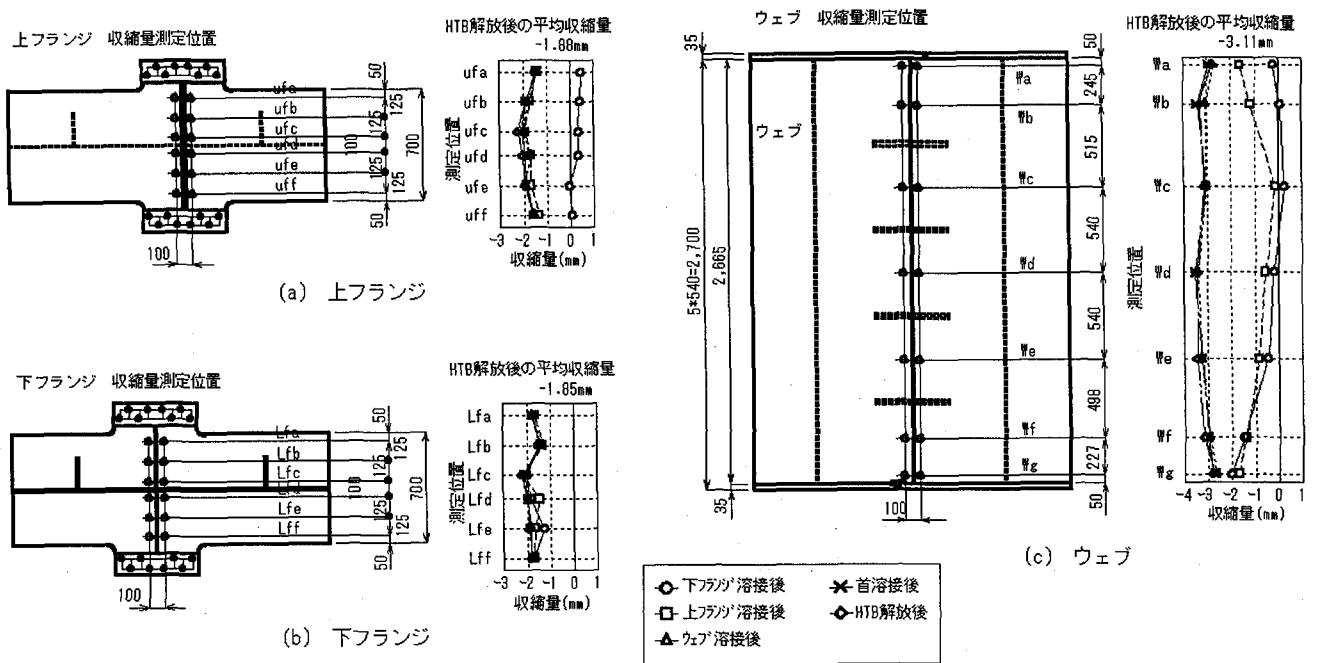


図-6 溶接による収縮量

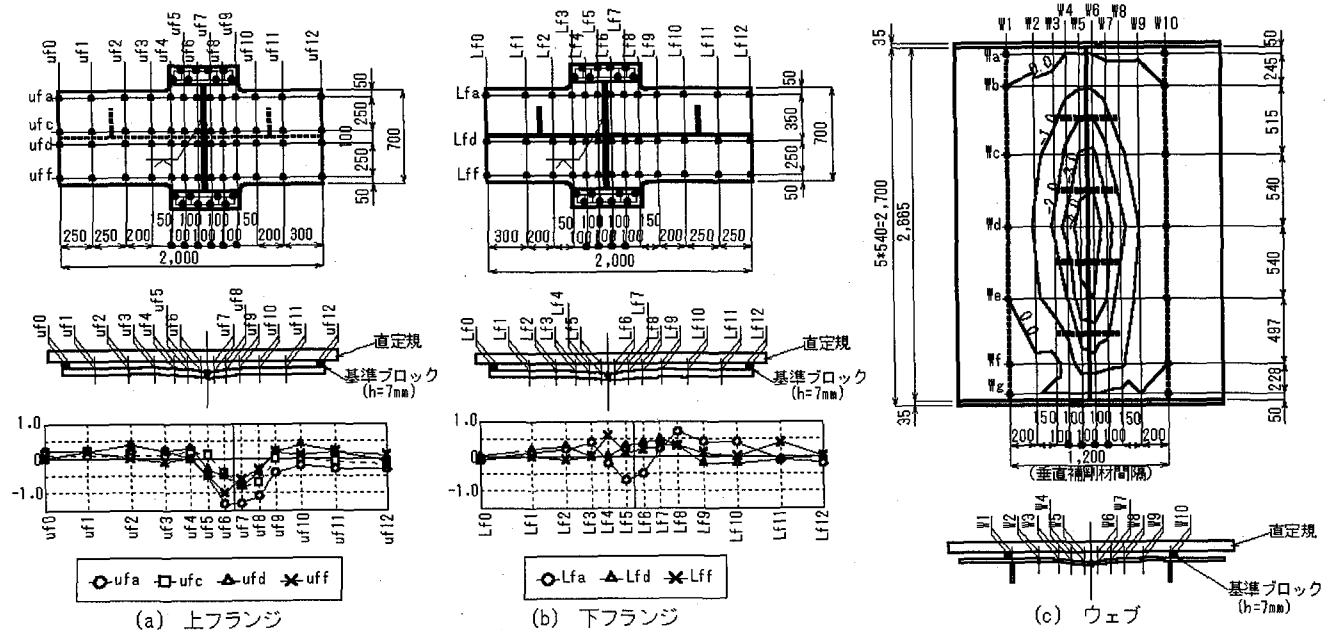


図-7 面外変形量 (HTB 解放後)

線透過試験を実施した。ただし、フランジ溶接線のうちウェブと交差する範囲 (200mm 程度)、ウェブの溶接始末端部 (100mm 程度) およびの完全溶け込み首溶接部 (250mm) は、JIS Z 3060 に準じて超音波探傷試験 (L 検出レベル) を実施した。非破壊検査は、いずれも 1 類合格であった。マクロ試験は、継手の一般部、棒継ぎ部、フランジとウェブの溶接線の交差部および完全溶け込み首溶接部について実施した。全ての試験片について欠陥はなく良好な結果が得られた。

(2) 溶接による変形量

溶接による収縮量および面外変形量の測定は、各部

位の作業ステップごとに実施した。

溶接収縮量計測用の標点間距離は、あいだに溶接線を跨ぐ 100mm とした。計測ポイントに刻んだポンチ跡をノギスで計測し、作業ステップごとの変化量を求め、これを溶接収縮量とした。収縮量の測定結果を図-6 に示す。

各部位における面外変形量の計測ポイントおよび計測結果を図-7 に示す。面外変形量は、直定規、基準ブロック (t=7mm) およびすき間ゲージを用いてその変化量を測定した。上下フランジの計測基準スパン 2.0m、ウェブは 1.2m (垂直補剛材間隔) とした。

本試験の計測結果から読み取れる継手の変形挙動の特徴は、以下のとおりである。

- ① 下フランジの収縮量は、他の部位の溶接による影響をほとんど受けない。
- ② エレクションピースの高力ボルトを解放した後の上下フランジの平均収縮量は、それぞれ1.88mm, 1.85mmであった。この計測結果から1継手当たりの収縮量は、約2mmと予測できる。
- ③ 上下フランジの収縮量は、最終的にほぼ等しくなり、両者の差による継手全体の角変形は発生せず、カンバーに与える影響はほとんどないと判断できる。
- ④ フランジの溶接による最大面外変形量は、上フランジで1.3mm, 下フランジで0.7mmであり、両者ともフランジの自由端側に生じた(図-7(a)(b))。
- ⑤ ウェブ両端のルートギャップは、先行して溶接する上下フランジの収縮量に応じて変化する。一方、ウェブ中央部のルートギャップは、エレクションピースの拘束によりほとんど影響を受けない(図-6(c))。
- ⑥ ウェブの面外変形は、上下フランジと垂直補剛材を節としたパネル全体の変形(裏波側を凸)として観測される。全ての溶接が完了した後にパネルの中央部で最大値6.4mmを示したが、エレクションピースの高力ボルトを解放した後は、4.7mmと減少した(図-7(c))。この面外変形量は、鋼鉄道橋製作要領¹⁰⁾のパネル製作精度の許容値(垂直補剛材間隔/150 = 1200mm/150 = 8mm, ウェブ高さ/250 = 2665mm/250 = 10.7mm)を十分満足している。

5.5 溶接によるウェブの変形量に関する考察

本継手は、上下フランジの溶接施工が完了した後、

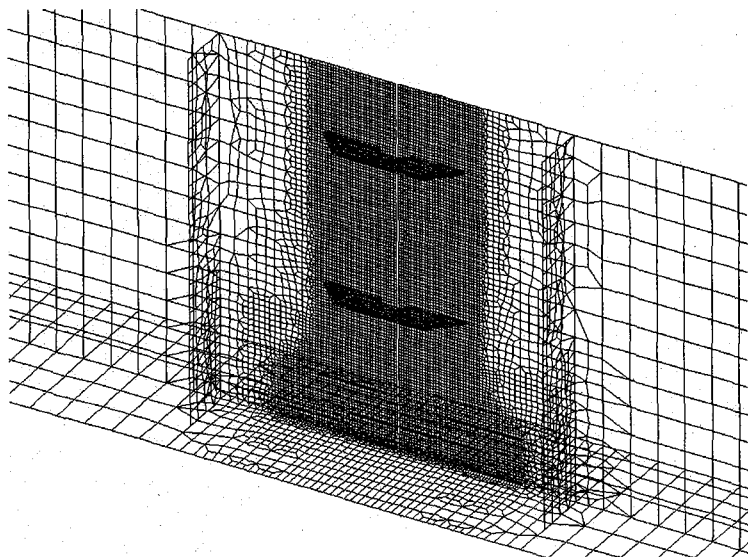


図-8 FEM 解析 ウェブ溶接線近傍のメッシュ分割図

ウェブの溶接をおこなう施工手順である。ウェブの溶接施工時には、剛性の高い上下フランジにより変形拘束を受け、上下フランジ近傍のウェブには引張りの残留応力が発生する。また、ウェブの角変形量は、エレクションピースの拘束の影響により変動する。ここでは、以下を目的としてFEM弾塑性解析をおこなった。

- ① エレクションピースの拘束に伴うウェブ面外変形の挙動を把握し、実測結果と解析結果を対比する。
- ② ウェブ溶接線直角方向の残留変位について、実測結果と解析結果を対比し、フランジ近傍の残留応力分布あるいは降伏域を類推する。

(1) FEM 解析モデル

解析モデルは図-8に示すように、全体形状(橋軸方向に約10mの部材)に対して桁高の半分で折り返した1/2モデルとし、シェル要素で構成した。最小メッシュ寸法は10mmである。モデリング上の特徴と仮定を以下に列記する。

- ① 解析はウェブの溶接による影響についてのみ着目しておこなう。したがって、フランジは溶接完了後とし、連続した一枚の板としてモデリングする。
- ② フランジとウェブの自由すみ肉長(首溶接の現場溶接範囲)は、ウェブ溶接線に対して、左側150mm, 右側50mm, 合計200mmとし、1mm程度のスリットを設けて要素を連結しない(図-4参照)。
- ③ モデルには垂直補剛材とウェブに配したエレクションピースについても考慮した。エレクションピースは、施工試験で使用したのと同じ断面とし、一枚の板($t=14\text{mm}$)で連結する(図-5参照)。ただし、HTBのモデリングはしていない。
- ④ ウェブのルートギャップは9mmとし、開先面に相当するウェブの両端面の各節点に強制変位を与えた。強制変位は、ウェブの突合せ溶接の自由収縮量 δ の1/2に相当するものである。なお、こ

で用いた自由収縮量は、以下に示す図-9のプレート試験体で実験的に求めた数値を参考にして2mmとした。したがって、計算で用いた強制変位は1.0mmである。

- ⑤ 解析には、汎用有限要素解析プログラムNASTRAN(日本MSC株)を用い、解析モデルは、降伏点を 353N/mm^2 (SM490A相当)とする完全弾塑性体として取り扱った。

(2) 収縮量および面外変形量

エレクションピース等の拘束のない状態における収縮量(自由収縮量)および面外変形量を図-9に示すプレート試験体で調査した。使用した板厚は、実断面I型施工試験体のウェブ板厚と同じ11mmである。溶接は立向き半自動溶接でおこない、溶接

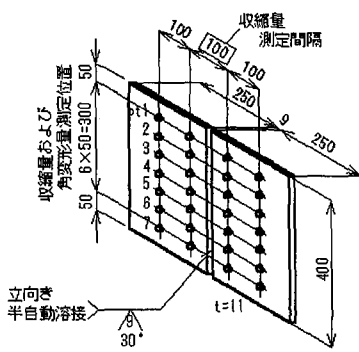


図-9 拘束のないプレート試験体

表-2 拘束のないプレート試験体の溶接による変形量

測定位置	収縮量 (mm)	角変形量 (度)
1	1.40	0.83
2	1.55	0.74
3	1.75	0.74
4	1.85	0.77
5	1.85	0.74
6	1.90	0.74
7	1.70	0.80
平均	1.71	0.77

表-3 実断面 I 型試験体のウェブの角変形量
単位: 度

測定位置	(a). 溶接完了後の角変形量	(b). HTB 解放後の角変形量	(c). 拘束による角変形量 (a)-(b)
Wa	0.40	0.46	-0.06
Wb	0.52	0.23	0.29
Wc	1.15	0.75	0.40
Wd	1.43	1.14	0.29
We	1.09	0.86	0.23
Wf	0.46	-0.06	0.52
Wg	0.46	0.46	0.0
平均	0.79	0.55	0.24

計測位置は図-7(c)参照

条件は表-1 に示す条件を用いた。

実断面 I 型試験体の溶接による収縮量の測定結果 (図-6(c)) によれば、上下フランジの拘束の影響が少ないと考えられるウェブ中心近傍の収縮量は 3.0mm に達する。

一方、拘束のないプレート試験体の自由収縮量の平均値は 1.7mm 程度であり、実断面 I 型試験体におけるウェブ中心部の収縮量実測値の半分程度にすぎない (表-2)。FEM 解析ではこの試験結果を参考に自由収縮量を 2mm と仮定し、強制変位として与えている。

一般に、サブマージアーク溶接のように入熱量が大きく熱の拡散に比べて溶接速度が早い場合、ルートギャップを開く方向に面内の回転変形が生じる。手溶接のように入熱量が比較的小さく溶接速度が遅い場合、逆にルートギャップを閉じる方向に面内の回転変形が生じる。ウェブの立て向き溶接は後者に相当する施工条件であり、とりわけ施工試験体ではウェブの溶接線が比較的長いため (桁高: 2.7m)、この変形による影響が顕著に現れたものと考えられる。

図-10 に示す要領で面外変形量を局部的な角変形量

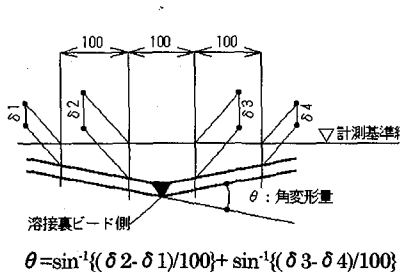


図-10 角変形量算出要領

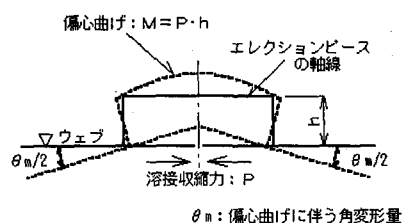


図-11 エレクションピースの偏心曲げに伴う角変形量

として整理すれば、拘束のないプレート

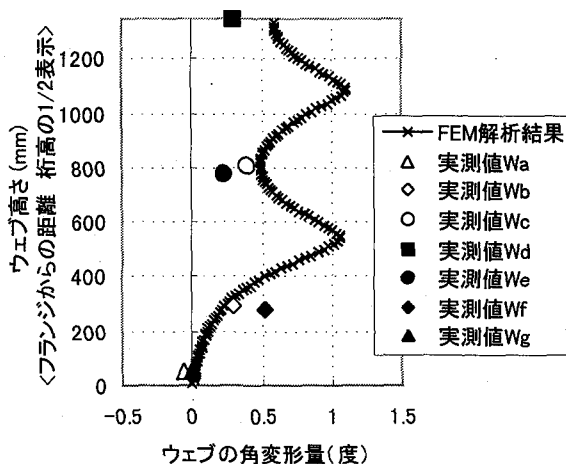


図-12 エレクションピースの拘束に伴うウェブ角変形量

試験体および実断面 I 型試験体におけるウェブの角変形量は、それぞれ表-2 および表-3 に示すとおりとなる。

拘束のないプレート試験体の角変形量は、表-2 に示すとおり各計測ポイントで大きな差はなく、平均で 0.77° の変形量が観測された。これは開先形状 (開先角度: 30°) に起因するもので、溶着金属の多い表ビード側が凹となる。

表-3 には、実断面 I 型試験体の溶接完了後の角変形量(a)、HTB 解放後の角変形量(b)および両者の差から求めたウェブのエレクションピースの拘束による角変形量(c)を示している。

実断面 I 型試験体についてウェブ中心付近の角変形量 (Wc, Wd, We) は、上下フランジによる拘束の影響が少ないと考えられる。この位置における溶接完了後の角変形量 (表-3(a): Wc=1.15°, Wd=1.43°, We=1.09°) は、拘束のないプレート試験体の角変形量に比べて 40~85% 程度高い値を示している。これは模式的に記せば図-11 のように、ウェブの溶接収縮によってエレクションピースに偏心曲げが作用し、ウェブの角変形量を助長したものである (表-3(c))。この偏心曲げはエレクションピースの高力ボルト解放と同時に消失し、ウェブの角変形が戻る現象として現れている。これに伴って、実断面 I 型試験体のウェブ中心

近傍の角変形量 (表-3(b): Wc=0.75°, Wd=1.14°, We=0.86°) は、拘束のないプレート試験体の角変形量に近づいている。

図-12 に FEM 解析結果による角変形量と表-3(c)のウェブのエレクションピースの拘束による角変形量の実測値を示す。FEM 解析結果によ

る角変形量とは、ウェブ溶接線から50mm および150mm 離れた位置におけるウェブの面外変形量をFEM 解析結果から求め、図-10 と同様な方法で算出したものである。なお、図中の上フランジ側の実測値(Wa,Wb,Wc)は、ウェブの中心から折り返した形でプロットしている。

FEM 解析結果において極大値を示している部位は、エレクトロニクス取り付け位置である。この部位の測定データはなく、実測による確認はできていないが、エレクトロニクス間の角変形量については、両者に相関が認められる。

(3) 残留変位および溶接による降伏領域

実断面Ⅰ型試験体は、コンタクトゲージを用いてウェブ面の残留変位の測定をおこなった。測定時期は、溶接施工前と溶接施工完了後である。コンタクトゲージによる変位測定の標点間距離は100mm とし、図-13 に示すとおり、溶接線から50mm および150mm 離れた位置を測定の基準点とした。コンタクトゲージの計測精度は1/1000mm である。

図-14 に FEM 解析結果による変位量とコンタクトゲージによる残留変位の実測値を示す。ここで示した FEM 解析結果による変位量とは、ウェブ溶接線から50mm および150mm 離れた位置における橋軸方向の変形量の差を示し、コンタクトゲージによる測定と同様に標点間距離 100mm に対する変位を FEM 解析結果から算出したものである。図-14 の上フランジ側のコンタクトゲージによる残留変位の実測値 (R1~R6)

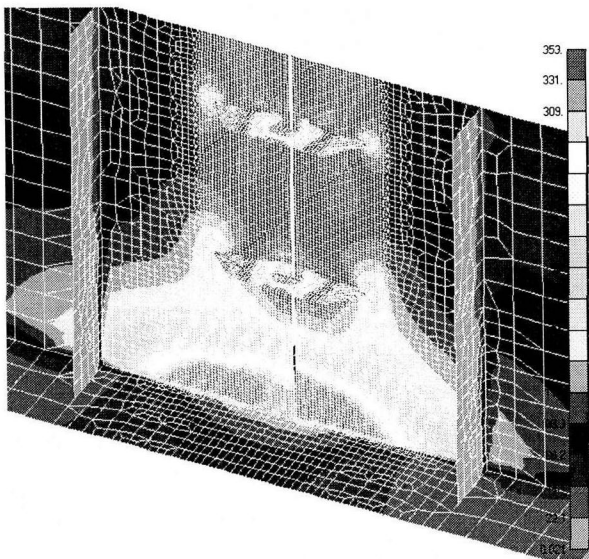


図-15 溶接に伴うウェブの降伏域

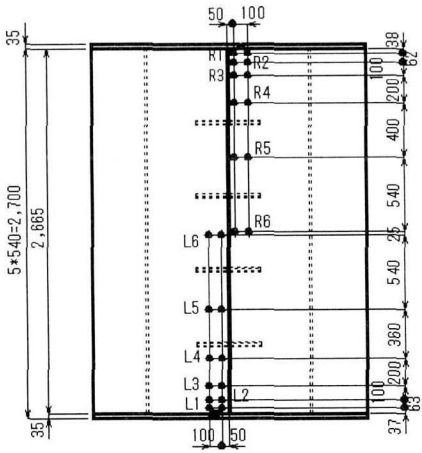


図-13 コンタクトゲージによる
残留変位の測定位置

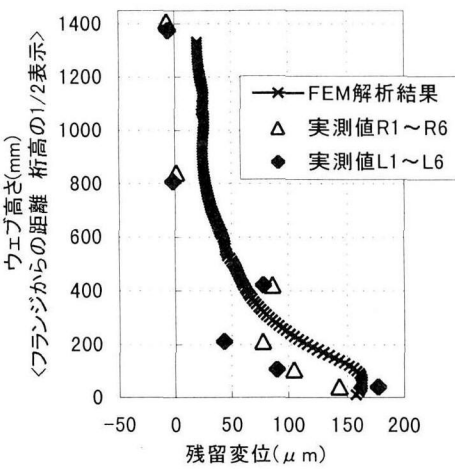


図-14 ウェブの溶接によるウェブの残留変位

は、ウェブの中心から折り返した形でプロットしている。コンタクトゲージによる実測値と FEM 解析結果は、ほぼ同様な傾向を示しており、フランジ近傍で残留ひずみが集中していることがわかる。ただし、コンタクトゲージによる実測値には、フランジとウェブの首溶接に伴う残留変位も加算されているため、実質的には FEM 解析よりも厳しい結果を与えている。

図-15 はミーゼス相当応力で表現した FEM 解析による残留応力分布である。下フランジ側の半楕円形に着色している部位が降伏点レベルに達している領域である。ウェブの溶接線の左右で降伏域の形状が異なるのは、自由すみ肉長の違いによるものである。図-15 における自由すみ肉長は、ウェブ溶接線の左側で150mm、右側で50mm である。

Z継手のようにフランジとウェブの首溶接が部分的に現場溶接である場合、この自由すみ肉長が残留応力生成のひとつのパラメーターとなる。先に示したドイツのZ継手の施工事例(図-3(a), (b))では、自由すみ肉長を長く残すことによってウェブの溶接収縮に伴う拘束を低減している。

図-16 は、片側の自由すみ肉長を 50mm から

1000mm まで変化させた場合の FEM 解析結果であり、片側の自由すみ肉長に対応したウェブ降伏域の面積を示したものである。解析結果によれば、片側の自由すみ肉長を250mm 程度にすれば、ウェブ降伏域を半減させることが可能である。

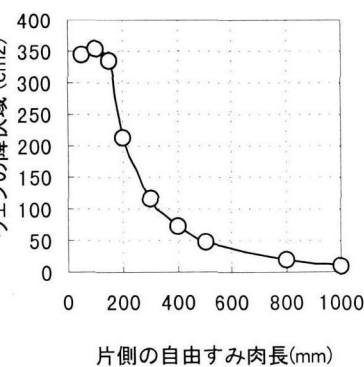


図-16 片側の自由すみ肉長と
溶接収縮に伴うウェブの降伏域

しかしながら、先に述べたとおり図-3(d)に示した瀬野大橋の現場溶接施工時において、ウェブの溶収縮により、先に溶接したフランジに反りが生じ、フランジとウェブの首溶接部のルートギャップが最大で4.5mmとなったことを報告し、施工上の注意を喚起している⁹⁾。瀬野大橋の自由すみ肉長は、200mmと400mmの組合せで、延長600mmである。

このフランジの面外偏心の矯正手段としては、加熱矯正あるいはジャッキ等による加圧矯正が考えられるが、いずれの施工法についても現場での矯正作業は困難である。また、自由すみ肉長を大きく残すことにより、現場での溶接作業が増大する。とくに上フランジ側の首溶接部は、上向き姿勢の溶接であるため作業性も悪い。したがって、本橋では現場での作業負荷を抑えるために、自由すみ肉延長が小さくなるような継手ディテールを採用した。なお、ウェブの溶収縮に伴うフランジの面外偏心量については、その挙動を定量的に把握していない。この実験的検証を今後の課題として考えている。

6. まとめ

- ① 過去に実施した衝撃試験結果(65 継手分)を整理し、溶接金属のシャルピー吸収エネルギーは、鋼材に比べ低いレベル(1/4~3/4)にあることを示した。
- ② 過去に採用された現場溶接Z継手の継手詳細を整理し、その特徴についてまとめた。
- ③ 実際の現場施工に先立って施工試験を実施し、スカラップを設けないZ継手の施工要領を確立した。施工上のポイントは次のとおりである。
 - ・下フランジは下向き CO₂ 半自動溶接とし、作業員2人によりウェブ直下で溶接金属をつなぎ合わせる連携溶接方法を採用した。
 - ・下フランジ継手直上のウェブには、溶接の作業性を考慮して高さ5mm、幅100mmのスリットを設けた。このスリットは溶接で埋め戻す。
 - ・上フランジ継手直下のウェブにはスカラップを設けず、裏当材をウェブ位置で分割して取り付ける。
 - ・継手近傍のフランジとウェブの首溶接は、完全溶け込み溶接とする。
- ④ 実断面I型試験体により、作業ステップごとに収縮量および面外変形量を測定し、継手部の変形挙動を把握した。最終的に上下フランジの溶収縮量は、両者とも約2mmであった。また、ウェブの面外変形は、上下フランジと垂直補剛材を節とした1×1次モードの変形(裏波側を凸)として観測され、最終的に5mm程度であった。
- ⑤ ウェブの溶接に伴う角変形量の測定結果を分析し、溶接による変形挙動を明らかにした。FEM解析

によりエレクトロニクスによる角変形量の影響について検証した。

- ⑥ コンタクトゲージを用いてウェブ面の残留変位の測定をおこない、ウェブ溶接時のフランジによる拘束の影響について確認した。また、FEM解析により、ウェブの溶収縮に伴う降伏領域を推定した。

7. おわりに

現場溶接継手のディテールに対する要求は、設計と施工で相反するものとなる場合が多い。合理的な構造とするためには、最低限必要な要求性能を的確に捉え、両者の歩み寄りが必要となる。本稿で示したスカラップを設けない全断面現場溶接Z継手は、両者の要求が融合したバランスのよい継手のディテールを確立することができたと思われる。

物部川橋梁の架設は1999年2月から始まり、1999年11月に計画どおり竣工した。現場溶接施工は、本稿で報告した施工要領を踏襲することにより、溶接工程はスムーズに進捗し、所定の品質を満足する溶接継手を得ることができた。最後に物部川橋梁の工事にたずさわった関係者の協力に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，丸善，1992.10
- 2) 三木千壽，館石和雄：鋼橋I形断面部材におけるスカラップディテールの疲労設計手法，土木学会論文集 No.563/I-39，41-47，1997.4
- 3) 奥村敏恵：溶接橋についての新しい2,3の問題，第2回道路会議論文集，173-177，1954
- 4) 南 俊次，仲西市朗：全溶接ゲルバーガーダー高野大橋の設計並びに製作についての中間報告，第2回道路会議論文集，187-190，1954
- 5) 成瀬勝武，瀬良 茂：溶接プレートガーダーの現場溶接，第2回道路会議論文集，274-276，1954
- 6) 南保 賀：全溶接和南津橋について，道路，538-542，1955
- 7) 田村陽司ほか：PC床版連続合成2主桁「千鳥の沢川橋」の設計，橋梁と基礎，18-22，1998.9
- 8) 南 邦明，三木千壽，館石和雄：スカラップを有する厚板I型断面桁現場溶接継手部の疲労強度，土木学会論文集 No.577/I-41，121-130，1997.10
- 9) 町田文孝，勝俣 盛ほか：鋼少数主桁橋の現場溶接継手部に用いられるスカラップ構造の疲労特性，川田技報，Vol.16，1997
- 10) 日本鉄道建設公団：鋼鉄道橋現場溶接施工の手引き，1990.6
- 11) 日本鉄道建設公団：鋼鉄道橋製作要領，1996.11
(2001年9月14日受付)