

パイプトラス格点部 K 継手溶接性能に関する実験的研究

Experimental Study on Welding Performance of Pipe Truss K-Joint

保坂鐵矢*, 市川篤司**, 仁瓶寛太***, 磯江暁****, 橋本靖智*****

Tetsuya Hosaka, Atsushi Ichikawa, Kanta Nihei, Akira Isoe, Yasusato Hashimoto

*工博、(株)ウェルディング (前日本鉄道建設公団設計技術室)

(〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

**工博、(財)鉄道総合研究所 (前東京工業大学工学部土木工学科)

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*** 川崎重工業 (株) 明石技術研究所 (〒673-8666 明石市川崎町 1-1)

****工博、川崎重工業 (株) 航空宇宙カンパニー (前川崎重工業 (株) 関東技術研究所)

(〒278-8585 各務原市川崎町 1 番地)

***** 川崎重工業 (株) 橋梁・水門技術部 (〒278-8585 野田市二ツ塚 118)

Pipe truss system was expected to have protecting performance against snow and icicle and was planned to apply to bridges in heavy snowfall areas. On the other hand the problems in constructing pipe truss was clarified in an attempt to replace the existing box truss bridge to a pipe truss bridge. One of the problems is how to weld the joints between brace and chord to realize its demanded mechanical performance. Then the authors did welding test using full scale model. They checked the effectiveness of supersonic test to find cracks, the Vickers hardness, the melting condition of welding metal, the distribution of residual stress and the strength against fatigue. It became clear that high quality welding could be done at the joint.

Key Words: pipe truss, gusset, stress concentration, hot spot stress, fatigue test

キーワード: パイプトラス, ガセット, 応力集中, ホットスポット応力, 疲労試験

1. はじめに

最近では橋梁などの公共構造物においては鋼-コンクリート複合構造などの低価格橋が採用される場合が多く、コストパフォーマンスに優れていることが望まれる。このような事情からパイプ内部を若干の補強部材とコンクリート充填で補強する複合構造の実用化を検討している。

本研究で想定しているパイプトラスの弦材 (以下主管と記す) は 600~800mm 程度と一般に用いられているトラスより太めであり、かつ海洋構造物よりは細めである。また、鉄道橋のように活荷重が載荷するパイプトラス格点構造は、パイプ分岐溶接継手として K タイプや T タイプがあり、完全溶込みが求められる。

筆者らが調査したスイス・ルーリー橋¹⁾で用いている K 継手構造 (主管最大直径 508mm、厚さ 50mm、支点部直径 559mm) は、裏当て金を使用し、外側からの片側溶接

で行っている。また、ドイツのフンボルト・ハーフェン橋は、格点に鋳鋼を用いているという報告もある。ルーリー橋と比較して、研究対象のパイプトラスは比較的薄いこと、裏当て金方法は鋼鉄道橋への適用がなされていないこと、そして、鋳鋼も主部材への適用の研究を要することなどから、K 継手溶接性能について合理的な構造を含め、研究することとした。本研究ではその第 1 段階として、実際のスケールのパイプ格点部を製作し、溶接を実施する上での問題点を把握し、パイプトラスを実現するための基本的な課題につき検討した。

研究の目的は以下のものである。

- ① パイプトラス格点部 K 継手の溶接部における応力集中状況を文献調査および解析により把握する。
- ② 実スケールのパイプを種々の条件で溶接し、溶け込み状況を確認する。

- ③ 完全溶込み溶接については超音波探傷、硬さ試験、疲労試験を行い、溶接部の性能を確認する。
- ④ 完全溶込み溶接を行った場合の残留応力を計測する。

2. 格点部K継手の応力集中

(1) パイプトラス格点部に作用する力

具体的な検討を行うため、信濃川橋（3 径間連続トラス、68x3=204m）を対象に箱断面部材で構成されたトラスをパイプトラスに置き換えた場合の格点部応力について検討した。鋼材には市販されているU0 管を使用するという条件で各弦材および斜材を断面積が等価な鋼管に置き換えることを考えると、主管のパイプ径を 600mm、斜材（以下支管）径を 400mm にすれば、板厚を変えることにより、支持点近傍を除くほぼ橋梁全体の部材を鋼管に代えることができる。このことから、主管の径を 600mm、支管径を 400mm と想定した。

著者らは橋梁全体のフレーム解析を行い、死荷重および列車通過時の活荷重により格点部に生じる力をすでに求めている（文献2 参照）。複数ある格点のうち、支管の軸方向応力が最大となる格点に着目して、作用力を図1 に示すように整理した。格点部に作用する断面力は図のN、S、W 3 種類の荷重モードの重ね合わせとして表現

できる。図は、それぞれの荷重モードの最大値と、列車通過時の変動値（peek to peek）を示している。

これら3 種類の荷重をガーダーとの比較から理解すると（図2 参照）、W 荷重は梁に負荷する荷重がガーダーのせん断力により支持される荷重モードであり、トラスの場合は橋に載る荷重がまず斜材軸力により鉛直方向に支持されることに対応する。S 荷重はせん断力が左右のウェブへと伝達される過程でフランジに軸力が導入される荷重モードであり、トラスの場合はこのメカニズムにより上下の弦材に軸力が導入される。N 荷重は、ガーダーの長さ方向断面力が当該断面に作用するモーメントと釣合う荷重モードであり、トラスの場合は弦材の両端に軸力が作用している状態に相当する。荷重はW<S<N の順に次第に大きくなるが、トラス格点部の強度上問題となるのは斜材と弦材の力の伝達性能であるので、S 荷重に対する強度を主眼に検討した。

(2) 支管－主管溶接部の応力集中

パイプトラスに関するまとまった資料としては、日本建築学会の「鋼管構造設計施工指針・同解説」³⁾、日本溶接協会の「海洋パイプ構造物の構造強度研究における最近の進捗」⁴⁾ JSSC の調査資料^{5),6)} などがある。これらの資料を参照し、本研究で対象としているトラス格点部（コンクリート非充填の場合）の強度を調べた。

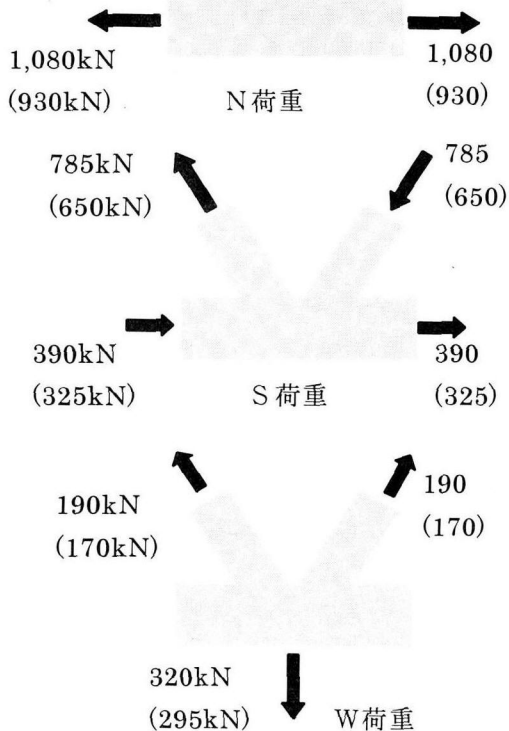
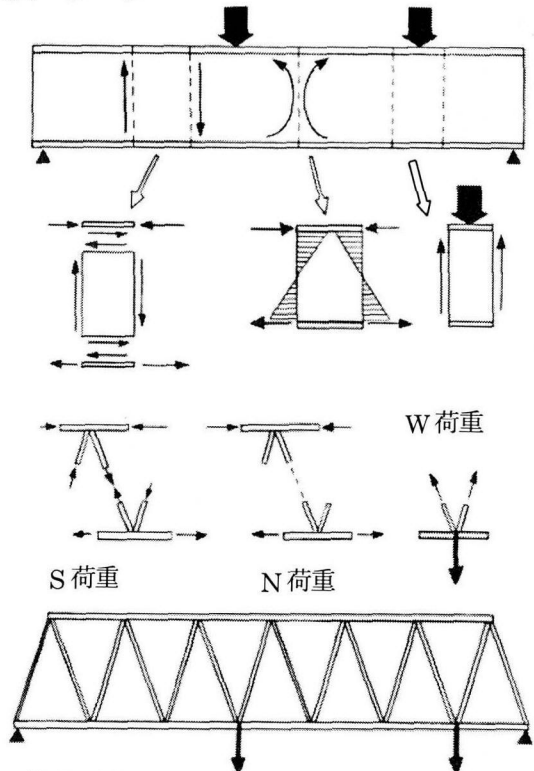


図1 荷重モード
(括弧内は列車通過時の変動荷重)

<ガーダー>



<トラス>

図2 荷重の伝達機構と荷重モード

文献3に従って、着目格点の静的強度を計算すると、表1のような結果になる。基準では表に示す3種類の崩壊モードを扱っているが、主管の崩壊とは主管が著しく変形して圧壊するもので、後の解析結果（図3変形図）と同様の变形をして崩壊へと至るものである。支管の局部座屈は圧縮側支管が主管との溶接部付近で提灯座屈するものである。パンチングシャーは、支管の軸力が主管の溶接線全周におけるせん断耐力の合計を上回り、支管が主管から抜ける崩壊である。これらの崩壊モードに対する最大耐力を比較すると、最も低い荷重、すなわち最も生じ易い崩壊モードは主管の崩壊である。ちなみに、支管が1本のY型格点に対して同様の崩壊モードに対する最大耐力を求めると745 kNであり（支間に圧縮力負荷）、K型格点の場合は2本の支管に同量異符号の軸力が組み合わさって作用することで耐力がかなり上がっていることが分かる。

一般にパイプ継手部に発生する応力集中は継手の形状により異なるが、疲労の判定に用いるS-N線図は継手に

よらず同じものを用いることができる。この場合のSにはホットスポットと呼ばれる点（溶接止端部）の応力を用いる。応力集中係数の計算方法およびS-N線図には幾つかの提案式がある。表2に、いくつかの提案式に対して求めた着目格点部の応力集中係数（SCF）を示す。ただし、計算に用いた格点の形状は表1と同じとした。また、参考としてY継手に対する応力集中係数を合わせて示した。これらの提案式のホットスポット位置は、サドル部となる一つを除いてトウ部の溶接止端部である（図4（a）参照）。

表2の計算結果から判断して、主管側溶接止端部（chord）と支管側の溶接止端部（branch）は差があり、前者の方が大きいと考えられ、その値は7～8程度というのが一つの目安となる。また、最大耐力の場合と同様にY継手と比較してK継手のSCFはかなり小さく、S荷重の一つの特徴が理解できる。

図1に示したS荷重の列車通過に伴う荷重変動（650kN）に対し、SCFを7としてホットスポット応力を求めると380MPaであり、かなり大きな値であることが分かる。提案されているS-N線図に照らして荷重の許容載荷回数を求めると、低めに評価するAPI-X'では3,000回、高めに評価するIIW-Tでも30,000回程度である。これを2,000,000回の使用に耐えるようにするにはホットスポットの応力を1/4程度に緩和する必要がある、実用化するためには補強や構造改良が必要であることが分かる。

（3） 格点部の応力分布

事前検討として、FEMによりパイプトラスK型格点部にS荷重が負荷した場合の応力分布を計算した。

格点部モデルは、横桁からの荷重（W荷重）を無視し、S荷重載荷時の支管－主管接合部の力の伝達に着目したものであり、中央面に対して対象なものとした。荷重の載荷方法は、支管上部の2点をピン支持し、主管の一端

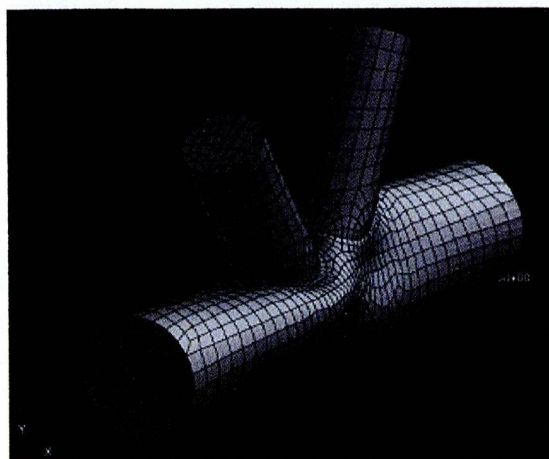
表1 K型格点の耐荷力（文献3 参照）

崩壊モード	最大耐力
主管の崩壊	1,660kN
支管の局部座屈	2,200kN
パンチングシャー	3,900kN
<着目点形状> 主管 : $\phi 609 \times 12.7$ 支管 : $\phi 406 \times 9.6$ 支管－主管交差角 : 60° 支管間隔 : 38mm	

表2 主管溶接止端部の応力集中係数

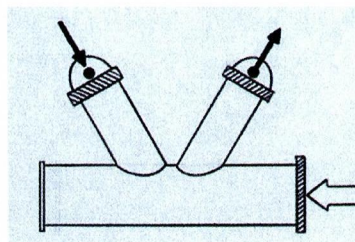
	Y継手		K継手	
	SCF(chord)	SCF(branch)	SCF(chord)	SCF(branch)
EXXSON	10.15	8.96	5.86	4.65
IIW	13.63	9.59	----	----
MARSHALL&KELLOG	9.16	10.26	5.71	7.09
KUANG&MADDOX	10.15	8.96	6.97	5.06
MARSHALL	11.44	7.48	8.78	5.12
WORDSWORTH&SMEDEY	14.12 (サドル部)	----	7.43 (サドル部)	----

SCF：（ホットスポットの応力）／（支管の平均軸方向応力）



757kN

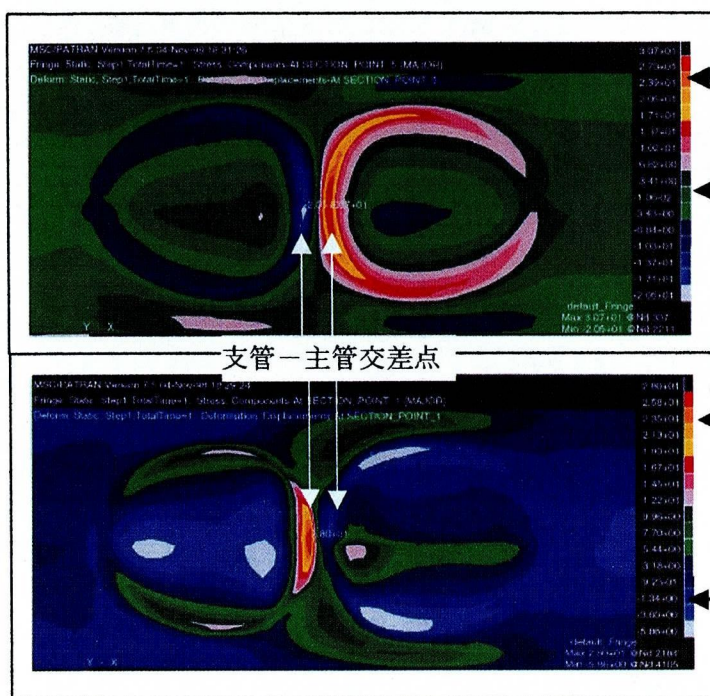
757kN



845kN

(1mm の強制変位負荷)

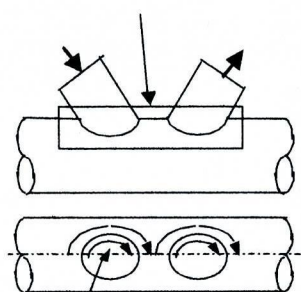
<荷重条件>



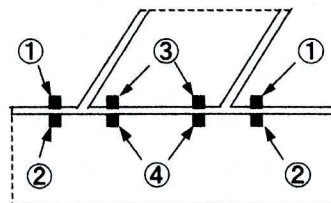
支管-主管交差点

(MPa)

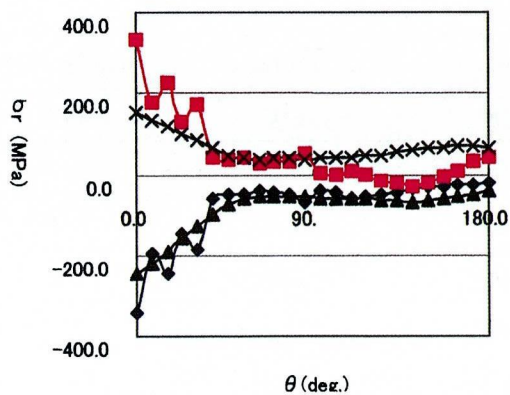
カラーコンター図範囲
(主管上面)



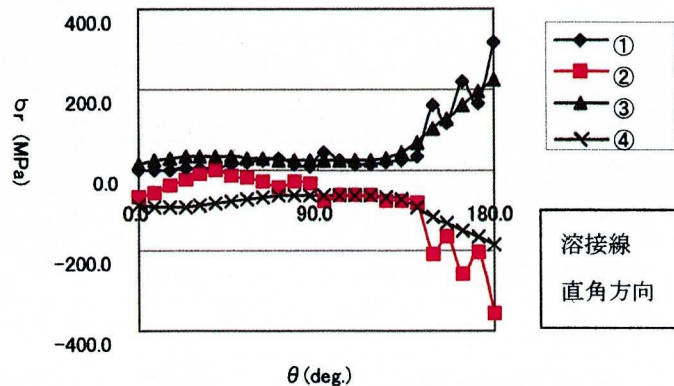
矢印: 応力分布図指示範囲(下图)



<上図: 主管外面最大応力 下図: 主管内面最大応力>



<引張り支管溶接部付近の応力>



<圧縮支管溶接部付近の応力>

図3 格点部にS荷重が载荷した場合の応力分布解析

に1mmの水平方向強制変位を与えることによりS荷重相当の力を負荷している(図3右上参照)。解析はABAQUSを用いて実施しており、8節点シェル要素を使用した。

解析モデルのメッシュ分割状況と変形を図3左上に示す。図では変位を拡大して示しているが、圧縮側支管が主管にめり込み、主管は扁平に変形している。また引張り側支管付近では主管サドル部が内側に凹んでおり、この結果2本の支管に挟まれた主管トウ部付近に局所的に大きな歪が発生する。

図3の中段は主管の外面および内面の最大応力を示しているが、支管との溶接線に沿って、トウ部を中心に応力の高い部分の帯ができていいるのが分かる。

図3下段は、支管-主管結合部近傍要素の溶接線直方向応力を示している。これは境界線に接する要素の中心応力である。同解析では支管の平均応力は62MPaであり、SCFが仮に7であるとする溶接止端部応力は430MPaになる。FEMの結果はそれより低い値になっており、この原因は溶接止端部の応力集中を捉えるにはメッシュが粗い点にあると考えられる。

以上、FEM解析からも最も応力の高い点が主管のトウ部であることが確認された。

3. 鋼管トラス格点部の溶接試験

(1) 溶接条件と試験体

試験体は全部で4体製作した(表3)。これ以前に、適切な開先を検討するための試作物を幾つか製作している。試験体の主管と支管の交差角は60°と45°の2タイプとし、開先形状は試作物溶接の結果を参考に図4(c)のような形状にした。これは、溶接全周に対して支管断面と主管外面のなす角を一定にしたものである。

試験体は、完全溶込み溶接と外側からの部分溶込みの2種類の溶接により製作しているが、外側からの部分溶

表3 試験体一覧表

試験体	主管-支管 交差角	溶接方法
試験体A	60°	完全溶け込み
試験体B	60°	外側からの部分溶け込み
試験体C	45°	完全溶け込み
試験体D	45°	外側からの部分溶け込み

支管-主管の狭角35度一定

(主管-支管交差角45度の場合は30度一定)

込み溶接は試作物を製作した段階ですでに超音波探傷ができないことが明らかになっている。そこで試験体B、Dの外側からの部分溶込み溶接は、以下の手順で実施した。

- ①内側から裏当て代わりの溶接実施
- ②(ガウジングなし)
- ③外側からの溶接実施

ここで実施した溶接方法は、外側からの部分溶込み溶接と比べると最初に内側から溶接を行う分だけ手間がかかるが、溶接内側にノッチが無くなるというメリットがある。各試験体に対する試験項目を表4に示す。試験体A、Cはガウジングを実施している。

(2) 超音波探傷試験

①超音波探傷試験要領

超音波探傷試験は、以下の基準に従って実施した。また、探傷面は主管、支管の外面とした(図5)。

- (a) JIS Z 3060(1994)「鋼溶接部の超音波試験方」⁷⁾
- (b) JIS Z 2344(1993)「金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験通則」⁸⁾

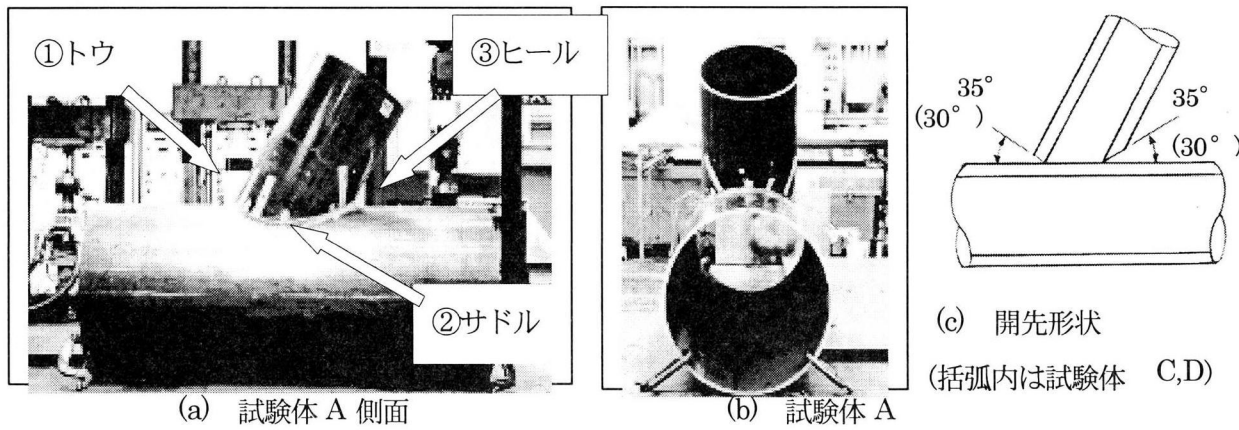


図4 試験体正面

②超音波探傷試験結果

完全溶け込み溶接で製作した試験体AおよびCは精度良く超音波探傷が実施できた(図6)。試験体Aについては

溶け込み不良等のクラックは発見されていない。試験体Cは超音波探傷の結果ヒール部に欠陥が見つかった(図7参照)。

試験体Aは支管と主管の交差角が 60° であるのに対し、試験体Cは 45° でありヒール部の開先が非常に狭く、溶接が困難な状況にある。今後の欠陥予防対策としては、内面側の積層数を増やすことにより裏はつり部先端形状を広くする方法が考えられる。

試作物に対して超音波探傷を試みたが、内側から溶接せず外側からの部分溶け込み溶接だけで製作されているため超音波が内側の角部で乱反射し、映像が得られていない。したがって通常の部分溶け込み溶接は超音波探傷不可能と判断した。

試験体B、Dに適用した部分溶け込み溶接は、内側から溶接した後に(ガウジングせずに)外側から溶接しており、超音波探傷ができる可能性がある。

表 4 試験項目と試験片採取位置

試験項目	試験片採取位置	備考
①マクロ試験	$\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$	
②硬さ試験	$\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$	
③非破壊検査 (超音波探傷)		全溶接線 (JIS 基準に 準拠)

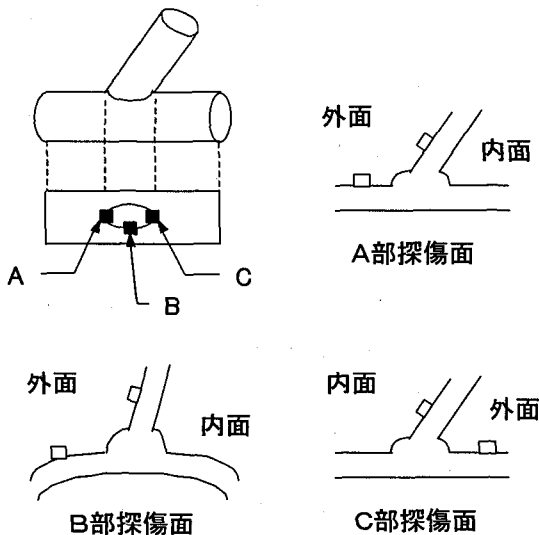


図5 超音波探傷面

B、D 2体の試験体に対し超音波探傷を試みた結果、溶接部中央に溶け込んでいない部分があることが確認された。現時点では、溶け込んでいない部分の大きさを超音波探傷から把握するには至っていないが、今後データを蓄積し検討を重ねれば可能であると思われる。

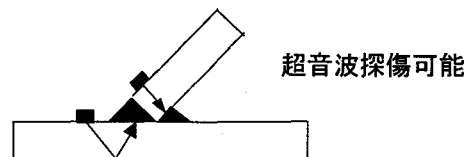
(3) マクロ試験

マクロ試験結果を図7に示す。写真は上から順に、トウ部、サドル部およびヒール部である。マクロ試験の結果、試験体Aは溶接品質の良さが確認された。また試験体Cのヒール部に一部溶け込み不良が見られており、超音波探傷結果を裏付ける結果となった。試験体BおよびDの溶け込んでいない部分の大きさと形状が、写真により確認された。

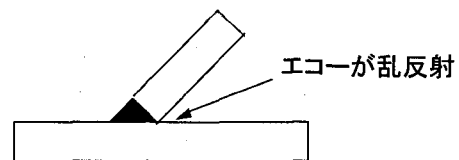
(4) 硬さ試験

硬さ試験については、ピッカース硬さ(Hv、荷重10 kg)を調査し、硬さ370以下を合格とした。硬さ試験結果の一例を、図8に示す。硬さ試験の結果、溶着金属およびその周辺の熱影響部のピッカース硬さは200~220程度であり、支管母材の140~160、主管母材の160~180と比較してもあまり大きな値ではなく、許容値370を十分クリアしている。鋼管の材質はSTK400であり、溶接棒はDW-Z100を使用している。使用した鋼管の炭素当量は $\phi 406$ の場合で0.23%、 $\phi 609$ の場合で0.27%であり、この炭素当量から見て妥当な硬さと判断される。

①試験体A,C(完全溶け込み)



②試作品(部分溶け込み)



③試験体B,D(部分溶け込み)

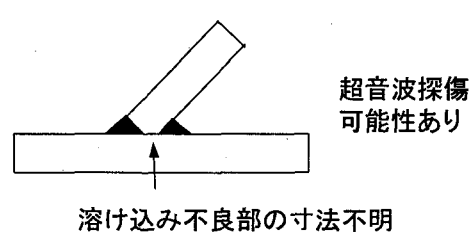
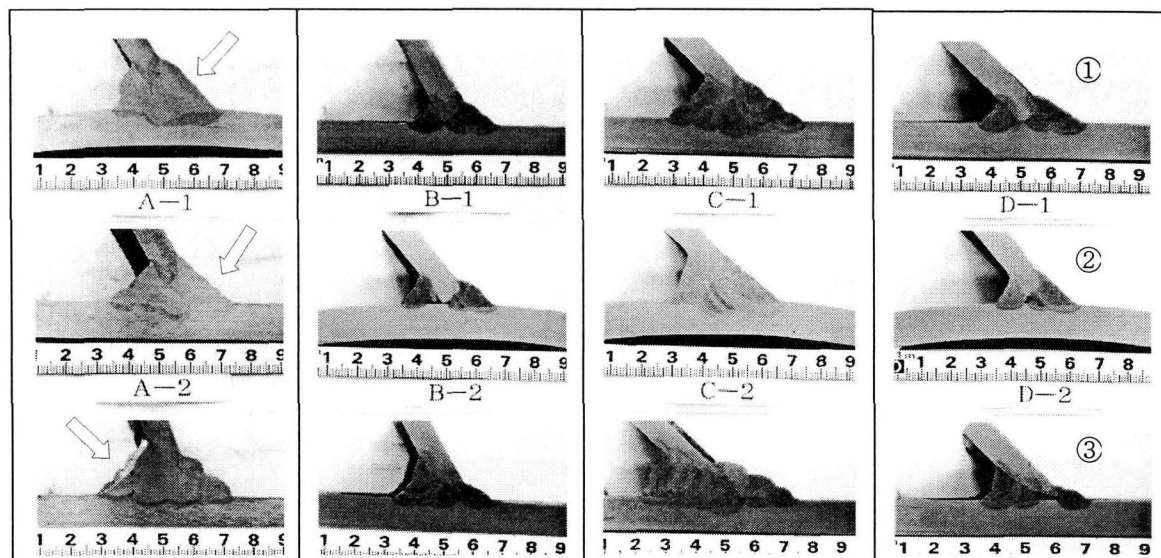


図6 超音波探傷結果



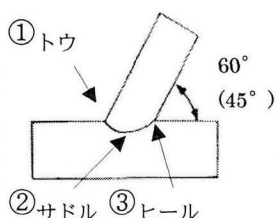
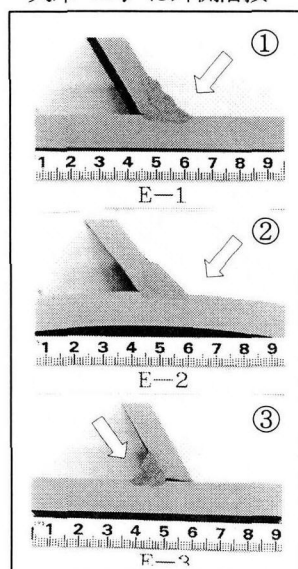
<試験体 A>

<試験体 B>

<試験体 C>

<試験体 D>

矢印 ⇨ は外側溶接



<試作物>

(部分溶込み溶接)

- ・ヒール部は開先が不十分で溶接が不良。
- ・トウ、サドル部内側にノッチが見える。

(5) 残留応力の測定

①測定位置

歪ゲージの貼付位置は、図 10 の計測結果に示すように、主管の支管外側および内側と、支管であり、それぞれ溶接止端部から 5mm の位置を狙って設置している。

②測定方法

残留応力の測定は、溶接の周囲および裏面に歪ゲージを貼付し、切断法により求めた。また、切削油に対する防湿・保護のためにゲージ表面にはコーティング処理を施した。次に、歪ゲージの初期値をデジタル静歪計にて読取った後で、歪ゲージを貼付した部分を含んで、応力が十分に開放されたと考えられる寸法で、切断可能な最小片まで試験体を切断機にて切断し、その都度歪量を読取ってその変化量を調べた。解体状況を図 9 に示す。

なお、切断は、試験体に熱による塑性変形を与えないように冷却しながら行い、加工液も歪ゲージやコーティング剤の性能を劣化させないものを使用した。

図 7 マクロ試験結果

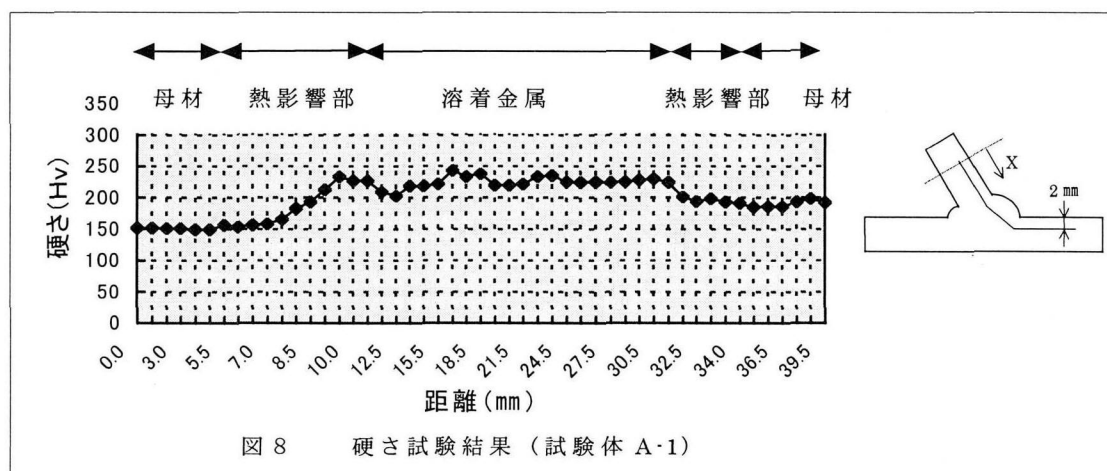


図 8 硬さ試験結果 (試験体 A-1)

③残留応力の算出

平面状の残留応力 σ_x と σ_y の算出は、主軸方向のひずみをそれぞれ ε_x 、 ε_y として(1)および(2)式により求めた。

$$\sigma_x = -\left(\frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y)\right) \cdot \frac{K_m}{K_g} \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\left(\frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x)\right) \cdot \frac{K_m}{K_g} \quad (2)$$

ここで、

σ_x : 溶接ビードに垂直方向の残留応力 (kgf/mm²)

σ_y : 溶接ビードに平行方向の残留応力 (kgf/mm²)

E : ヤング率 (21000kgf/mm²)

ν : ポアソン比(0.3)

ε_x : 溶接ビードに垂直方向の歪の変化量 ($\times 10^{-6}$)

ε_y : 溶接ビードに平行方向の歪の変化量 ($\times 10^{-6}$)

Km : 測定器にセットされているゲージ率 (2.00)

Kg : 使用ゲージのゲージ率

(2.10 または 2.09)

ただし、各々のひずみの変化量 ε_x 、 ε_y ＝(最終ひずみ値－初期ひずみ値)

④測定結果

測定結果を図 10 に示す。なお、表現を簡略化するため、主管の支管外側を外側主管、主管の支管内側を内側主管と略す (図 10 参照)。

図 10(a) に示した外側主管の応力を見てみると、主管外面と内面の両者に対して σ_r (溶接線直角方向応力) と σ_θ (溶接線方向応力) がよく似た分布モードをしている。残留応力は溶着金属の冷却縮みが原因であるので、溶接線に沿って圧縮になるのが一般的であるが、主管外面では溶接線直角方向についても圧縮応力が発生しており、2 軸圧縮状態にあることが分かる。ただし、外側からの溶接は図 10 右下に示すように溶接線全周を 4 つに分割し、

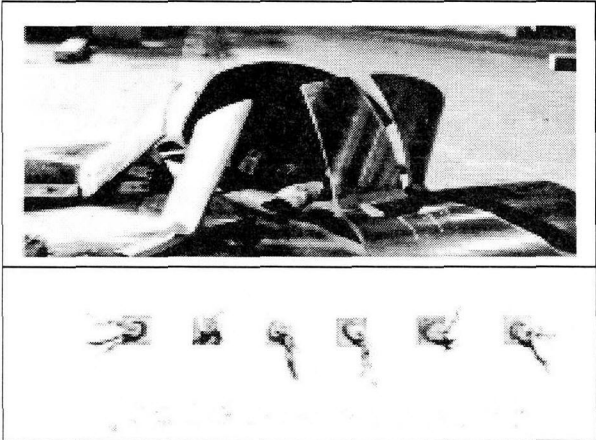


図 9 残留応力計測用試験体解体状況

試験体を反転させながら順に下向き溶接にて製作したため、溶接の継目となる箇所はこれと逆符号の応力 (引張り応力) が計測されている。また主管の外面と内面の応力を比較してみると、主管内面側は応力レベルが低い結果となった。

図 10(b) には内側主管の残留応力を示している。外側主管 (図(a)) と同様に、外面の σ_r は圧縮となる。しかし外面の σ_θ は σ_r と分布モードは同じであるが、値は引張り応力側に寄っている。試験体製作手順は、まず支管内側を溶接した後に外側を溶接しているため、外側が圧縮、内側が引張りとなるようなモーメントが溶接線に沿って発生していると考えられる。図 10(c) には支管の残留応力を示すが、特に外面の応力は外側主管 (図(a)) の応力と似た傾向を示している。

以上、残留応力は溶接の手順を反映して複雑な分布をしている。特徴としては、外側主管、内側主管、および支管を通じて外面の応力の方が内面の応力よりも大きく、特に溶接線直角方向に降伏応力相当の応力が発生している点である。

(6) 疲労試験

①概要・目的

鉄道橋パイプトラス構造の実用化に際し、溶接継手部の疲労強度を知る目的で実溶接継手構造から切り出した試験片を用いて疲労試験を実施し、継手のS-N線図を取得する。なお事前検討の結果、継手部の主管側と支管側では前者に発生する応力の方が高いことが判明したことに対応し、疲労試験は主管側の溶接止端部から破断するように実施する。また当該部の応力状況は面外曲げ成分が支配的であることも考慮して荷重負荷形式は曲げ(4点曲げ)とする。

②実験方法・条件

(a) 試験片

[採取位置] 表5に試験片採取位置を示す。試験片は試験体Aから予備試験用のものを含め全8体作成し、試験時には試験しやすい (治具との取合いが良好な) ものを選別し、試験順に「1体目」から順に番号を付けていった。

表 5 試験片採取位置

疲労試験片	θ (deg.)
①	- 60°
②	- 30°
③	15°
④	30°
⑤	70°
⑥	105°
⑦	120°
⑧	140°

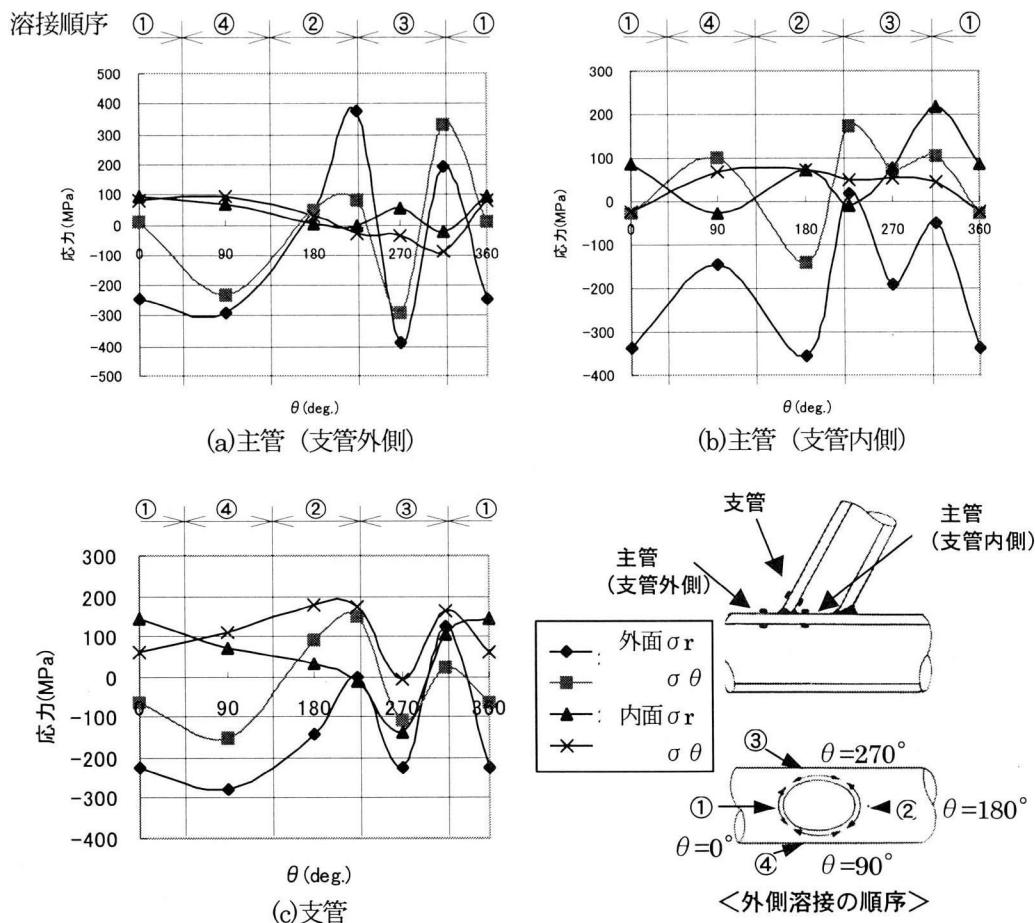


図10 溶接部残留応力の分布（計測位置は溶接止端部から5mm）

〔形状〕 図 11 に試験片と治具の組立状況を示す。試験片形状は試験体からの切出し位置によって全て異なるが（試験片幅は 25mm で統一してある）、代表として試験片 1 体目（疲労試験片⑤）の試験状況写真を示す。

(b) 試験条件

〔応力比 R〕 0.1（最小荷重時にも小さな圧縮荷重を加え、試験片が治具から外れないようにした）。応力は、主管側の溶接ビード止端部から板厚の 30% の位置（ビード止端部での局所的な応力集中の影響を受けず、安定した。

応力値を測定できる位置⁹⁾にひずみゲージを 3 枚ずつ（左右表裏合わせて 12 枚）貼付けて測定した。疲労試験の前に静的に荷重を加え、発生するひずみ値から試験荷重の目安をつけた後、動的繰返し荷重の負荷を開始した。

動的繰返し荷重下で発生するひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ ($= \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$) にヤング率 E を乗じた値を疲労試験の負荷応力範囲 $\Delta \sigma$ とした。

ただし、応力比 $R = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = (P_{\min} / P_{\max})$

〔疲労寿命〕 標点部でのひずみ範囲が定常時でのひずみ範囲に対し 5% 低下した回数として定義した¹⁰⁾。

〔負荷様式〕 2Hz～4Hz の正弦波、アクチュエータの軸力による 4 点曲げとした。

〔試験環境〕 室温、大気中。

③疲労試験結果・考察

(a) 疲労試験結果

表 6 に疲労試験結果を示す。き裂が発生した 2 体目、3 体目についてはき裂の状況が見やすいように、浸透探傷液を使ってき裂を赤く浮き上がらせて状況を調査した。

1 体目、4 体目については繰返し回数が 2×10^6 回を過ぎても標点部のひずみの値の変化が見られずき裂が発生する兆候が見られないため試験を打ち切った。また 5 体目についても②の項目で説明する JSSC の疲労強度データと比較して十分な疲労強度があると判断して 9.19×10^5 回で試験を打ち切った。

2 体目については、き裂が鋭角側の溶接ビード止端部（支管内側）から発生した。これは本試験で使用した疲労試験片形状では鋭角側の方がビード止端部での応力集中が大きく、公称曲げ応力値が鈍角側と同じでも、局所的には鋭角側の発生応力が高くなっていたためである。しかし FEM によるパイプトラズ構造の応力数値解析の結果（2.3 格点部の応力分布）では鋭角側と鈍角側の発生応力は鈍角側の方が大きいため、疲労試験片でも鈍角側からき裂が入る方が適切であると判断し、3 体目以降の試験片では鋭角側の溶接ビード止端部をグラインダ仕上げし、応力集中を緩和した上で試験を実施した。

表6 疲労試験結果一覧

試験片 No.	試験片 切出し 番号	応力比 R	応力範囲 $\Delta \sigma$ (kgf/mm ²)	試験最大 荷重 $P_{\max}$ (kgf)	試験最小 荷重 $P_{\min}$ (kgf)	疲労寿命 N_f (cycles)	備考
1体目	⑤	0.1	12.6	-48	-479	$>2.18 \times 10^6$	未破断
2体目	①	0.1	24.9	-82	-816	1.85×10^5	鋭角側からき裂発生
3体目	⑥	0.1	24.2	-89	-887	3.35×10^5	鈍角側からき裂発生
4体目	③	0.1	16.5	-54	-540	$>2.00 \times 10^6$	未破断
5体目	⑦	0.1	23.6	-80	-795	$>9.19 \times 10^5$	未破断
6体目	④	0.1	31.1	-87	-867	3.27×10^5	鈍角側からき裂発生

(b) JSSC線図との比較

試験に供した試験片の溶接継手の品質（ここでは疲労強度）を一般的に公開されている溶接継手の品質と比較するため、JSSC（日本鋼構造協会）編「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に記載の疲労強度データとの比較を行う。試験に供した継手は止端部非仕上げの荷重非伝達型のすみ肉溶接継手であることから、JSSCの指針では「E等級」に相当する。図12にE等級の溶接継手の全バックデータを示す。図中の実線は上から順に平均線（非破壊確率50%、 2×10^6 回での疲労強度が $\Delta \sigma = 126 \text{ MPa}$ ）、設計線（ 2×10^6 回での疲労強度が $\Delta \sigma = 80 \text{ MPa}$ ）を示す。なお設計線は $-2s$ 線（非破壊確率97.7%、 2×10^6 回の疲労強度が $\Delta \sigma = 82 \text{ MPa}$ 、 s ：標準偏差）に対し安全側に若干の余裕を見て引かれた線図である。

図12上に本疲労試験の結果をプロットした。図から本疲労試験の結果はJSSC-E等級の平均線をほぼ上回っていることが分かる。2体目（切出し番号①）のみ平均線を若干下回っているが、これは応力集中の大きい鋭角側ビード止端部からき裂が入ったこと、次にJSSCの疲労寿命が試験片の分離破断で定義されているのに対し、本試験では標点部のひずみ範囲が定常状態と比較して5%低下した回数、つまりき裂発生時期を疲労寿命として定義してあることの2つが理由として上げられる。一方、鋭角側ビード止端部をグラインダ仕上げした3体目（切出し番号⑥）については2体目とほぼ同じ応力範囲で試験をしているにも関わらず、疲労寿命が2体目より2倍弱長くなっている。

また図12にAWS規格のパイプトラス継手の疲労強度設計線図（AWS-X₂）を合わせて示す（図中の点線）が、本疲労試験結果は全てこの線図を上回っていることが分かる。なおAWS設計線において応力値はHSS（Hot Spot Stress、構造不連続による応力集中は含むが溶接ビードによる応力集中は含まない応力値）で定義してある。本試験で用いた試験体は構造不連続はほとんどないものの、先に定義した負荷応力はHSSと基本的に同等のものである（JSSC

では基本的に荷重を断面積で除した公称応力値を用いている）。

以上のことから本試験に供した溶接継手の品質は少なくとも疲労強度の観点からは一般的な品質を十分有していると判断できる。

4. FEMによる残留応力解析

(1) 解析方法および解析条件

図3に示した解析モデルを用いて、支管－主管交差部に溶接後の溶着金属冷却を模擬した熱荷重を負荷し、その時の挙動を調べた。熱荷重を入力するために支管相当要素と主管相当要素の交差部に沿って、断面積 30 mm^2 の棒要素を追加した。溶接金属の冷却は、追加した棒要素に温度荷重 -80°C を負荷することにより模擬した。しかし、実際の熱影響部の範囲や温度は把握できていないので、ここでは応力分布の傾向のみを見ることにする。

(2) 解析結果

図13(a)、(b)に格点部の変形状態を示す。図(a)は、支管－主管交差部断面が見やすいようにこの部分を切り出しており、図(b)は主管部の変形が分かるように支管を除いている。主管は、支管が溶接線全周に渡って主管面に食い込んでいるような変形をし、支管下端は口が彎む変形をする。これは文献11)の結果と同傾向にある¹¹⁾。

図14の下には最大、最小主応力（ $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\min}$ ）の分布を示す。図(a)と(b)を比較すると良く似た分布をしているが、これは主管外面の溶接線付近は全周に渡って2軸圧縮応力状態となっていることを示している。図(c)と(d)から主管内面の応力を見てみると、最大応力が引張り応力となっている。本文には図示していないが、主管内面では溶接線直角方向の応力がトウ部、ヒール部、サドル部のいずれにおいても引張り応力となっており、このことから主管内面は溶接線方向には圧縮応力、溶接

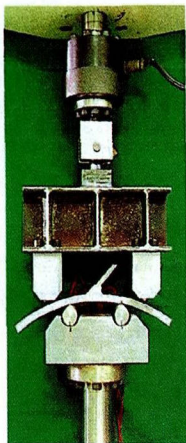
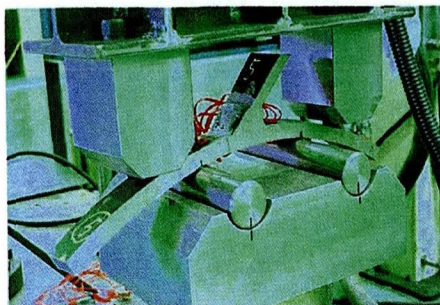


図 11 疲労試験実施状況

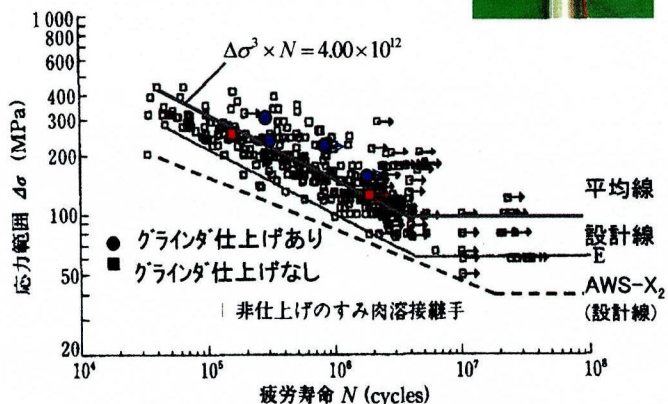
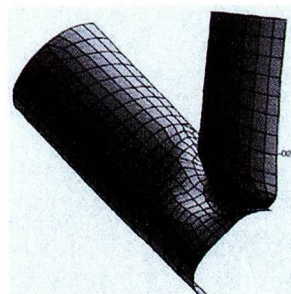
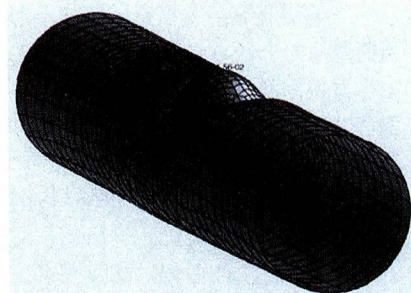


図 12 JSSC 線図との疲労強度の比較



(a) 支管－主管溶接部付近の変形



(b) 主管の変形（支管を除いた図）

図 13 溶接による格点部の変形モード



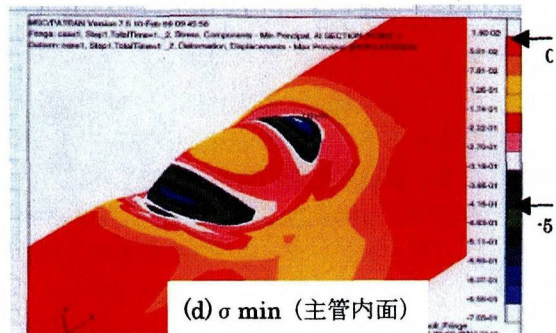
(a) $\sigma_{\max}$ (主管外面)



(b) $\sigma_{\min}$ (主管外面)



(c) $\sigma_{\max}$ (主管内面)



(d) $\sigma_{\min}$ (主管内面)

図 14 溶接による残留応力のモード

直角方向には引張り応力が生じており、溶接線溶接線付近は図(c)が溶接線直角方向応力、図(d)が溶接線方向応力にほぼ対応する。この応力分布は、内面側が凸となる図(b)の変形状態と対応している。実験で計測された主管外面に発生する圧縮応力の発生が、解析でも確認された。

5. 結論

以上の研究から、以下の結論を得た。

- ① 文献調査およびFEM 応力解析によって、格点部の応力集中状況を確認し、パイプトラスの実現性と問題点について検討した。例として信濃川橋をパイプトラスに置き換えた場合を考えると、内部補強しない場合は主管の断面形状を保持する剛性が低いことから、圧縮側支管が主管を圧壊する形で崩壊する。崩壊荷重よりも小さい荷重レベルでも、主管側トウ部で応力集中が発生するため、繰返し荷重が作用する場合は疲労破壊を起こす可能性が高い。
- ② 溶接試験により支管－主管溶接部の性能を確認した。支管と主管の接合部は完全溶込み溶接をすることも可能であり、かつこの場合は超音波探傷が可能である。ただし、工作、特に溶接部を目視で確認しながら行うガウジングが困難であり、外側からの部分溶込み溶接に比べてかなり手間がかかるという問題がある。
- ③ 完全溶込み溶接を行った場合の主管－支管溶接部・残留応力を計測した。今回のように、主管外面を支管下端に沿って一周するような溶接の場合は自己平衡な内部応力が蓄積し易いと考えられるが、計測した残留応力の分布は溶接の手順の複雑さを反映して複雑な分布であり、大きさも降伏応力レベルに達している。溶接の継ぎ目を除くと、溶接線直角方向応力は、主管外面が圧縮、内面が引張りであり、大きな面外曲げモーメントが発生している。
- ④ 残留応力の分布をFEM 解析により求めると、溶接線方向の残留応力は圧縮、溶接直角方向の応力は主管外面が圧縮、内面が引張りとなり、局所的に大きな曲げ応力が発生する結果となった。この傾向は実験結果と一致する。
- ⑤ 鉄道橋パイプトラス構造の実用に際し、溶接継手部の疲労強度を知る目的で実溶接継手構造から切り出した欠陥のない試験片を用いて疲労試験を実施した。一般的な溶接継手の疲労強度として JSSC（日本鋼構造協会）が公開するデータと本試験の結果を比較したところ、本継手は非仕上げのすみ肉溶接継手としては平均以上の疲労強度を有していることが分かり、疲労強度の観点からは本継手の溶接は十分な品質があると言える。

以上の本研究の結果から、十分注意して完全溶け込みを行い、溶接の品質が確保できれば所定の疲労強度を有することが確認できた。しかし、実橋における溶接条件環境を鑑みると一抹の危惧を有すること、そして、非破壊試験の信頼性も現技術では十分でない。また、内径が小さくて鋼管内部に補強を行い難い構造であることから、座屈耐力の確保にも従来手法が適用できないことが判明した。

このような点から、鋼管トラス格点にコンクリートを充填し、溶接を部分溶け込みとした、耐力および溶接品質の信頼性を有する構造の研究を、東京工業大学三木教授の指導のもとに進行中であり、近々報告する予定である。

6. 謝辞

本研究の実施に当たっては、研究の計画や実施において、東京工業大学の三木教授及び関係各位にいろいろな意見・批判をいただいております。また、溶接試験実施に当たり KHI・野田工場関係者の協力をいただきました。明記するとともに感謝いたします。

参考文献

- 1) 増田陳紀、他：欧州における新複合構造橋梁に関する調査団報告書、2001
- 2) 保坂、堀地、磯江：トラス格点部合理化構造の検討、構造工学論文集、vol.46A、2000
- 3) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説、丸善、1980
- 4) 日本溶接協会：海洋パイプ構造物の構造強度研究における最近の進歩、塑性設計資料集（その十一）、1985
- 5) 秋山成興、他：鋼管構造格点の耐力に関する実験報告、JSSC、vol.10、No.102、1974
- 6) JSSC 技術委員会（主査：堀川浩甫）：海洋構造物の格点部の構造・材料・工作に関する工作の立場からみた二・三の考察、JSSC、vol.17、No.186、1981
- 7) JISZ3060：鋼溶接部の超音波試験方法、1994
- 8) JISZ2344：金属材料のバルス反射法による超音波探傷試験通則、1993
- 9) 仁瓶、稲村、公江：溶接構造の統一的な疲労強度評価法に関する研究－板厚と脚長の組合せに対するホットスポット応力算出法について－、日本造船学会論文集、第179号、1996
- 10) 日本造船研究協会第202研究部会：海洋構造物の疲労設計法及び溶接部の品質に関する研究－報告書
- 11) 松岡一祥：構造用鋼管T継手部の残留応力、日本造船学会論文集、No.157、1985

(2001年9月14日受付)