

# スカラップを有する I 型断面桁 併用継手部の疲労強度

南 邦明<sup>1</sup>・広瀬 剛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社サクラダ 技術開発室 開発課(〒272-0002 千葉県市川市二俣新町21)

<sup>2</sup>正会員 日本道路公団 東京建設局 建設第一部 構造技術課(〒105-0014 東京都港区芝3-39-9)

少数主桁橋の現場継手において、フランジを溶接接合とし、ウェブをボルト接合とする併用継手が採用されるようになった。その際、ウェブにスカラップを有する構造となるが、スカラップ近傍では、曲げ変形に加え、ウェブのせん断変形により局所的な応力集中が発生する。このため、疲労強度が低い継手となる。本研究は、スカラップを有する併用継手の疲労強度を調べるため、併用継手を想定した2体の桁試験体を用いて、疲労試験を実施した。また、スカラップ内の廻し溶接近傍の局部応力を調べるため、ひずみゲージを取り付け応力計測を行った。さらに、局部応力に影響する因子を調べるためFEM解析を実施した。

**Key Words :** fatigue, cope hole, mixed joint, shear deformation, field joint

## 1. はじめに

近年、コスト削減に向けて、少数主桁橋を代表とする合理化橋梁が建設され、主桁に厚板鋼板が使用されるようになった。

これまで、一般の I 型断面桁の現場接合では、作業性や経済性などからボルト接合が用いられてきた。しかし、少数主桁橋のように厚板鋼板をボルト接合とした場合では、スプライスプレートの重量や、ボルト本数が多くなる。このため、経済性を考慮し、溶接接合が採用されるようになった。現場溶接では、その多くが全断面溶接で行われており、その際、ウェブの溶接は、作業効率を向上させるために、エレクトロガス溶接による大入熱溶接を用いるケースもあるが、一般的には、炭酸ガス溶接の自動機を用いるケースが多い。この時、ウェブの溶接は立向き姿勢での溶接作業となり、しかも、少数主桁橋のウェブ高は約 3m にもなるので、多くの作業時間が必要となる。このため、板厚が薄いウェブでは、ボルト接合の方が作業性は良く、架設費を考慮すると経済的となる場合もある。これらのことを考慮し、現場接合部において、フランジを溶接接合とし、ウェブをボルト接合とする併用継手が採用されるケースも生じてきた<sup>1),2)</sup>。

少数主桁橋の現場全断面溶接部では、フランジの溶接作業上、必要最小限のスカラップ開口部を設け、フランジの溶接作業終了後、開口部を埋め戻して施工した報告<sup>3)</sup>もあるが、一般的にはウェブに 50R のス

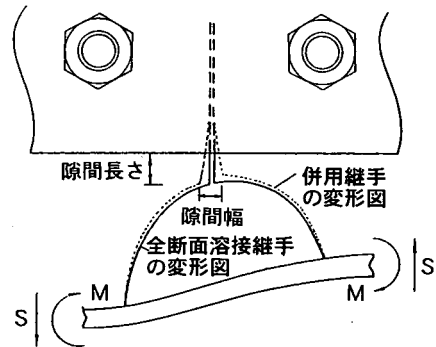
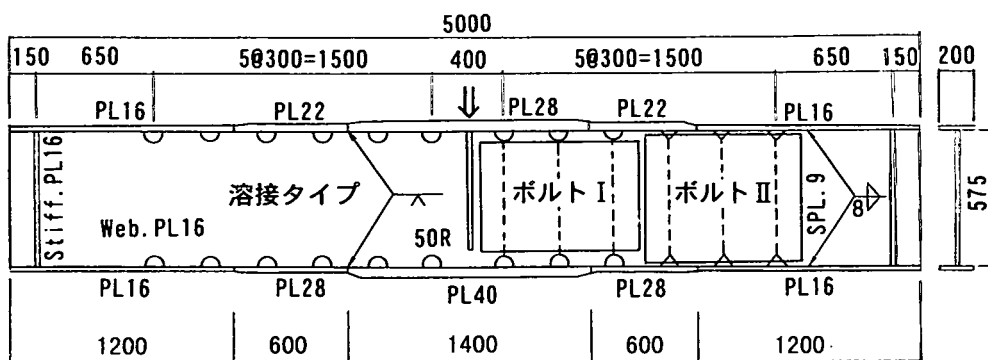


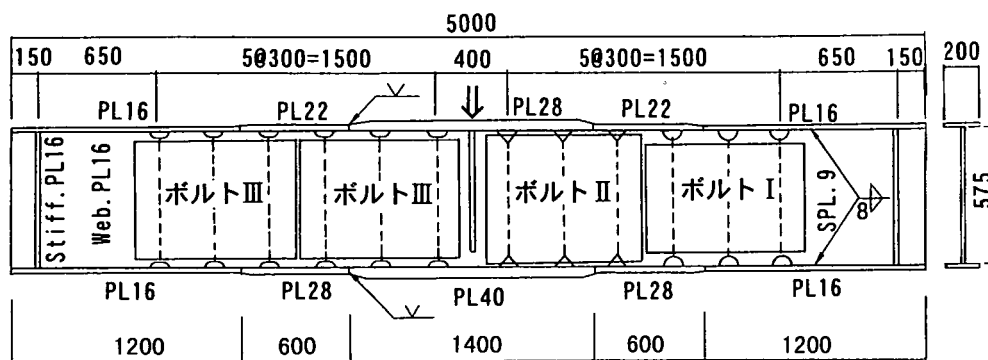
図-1 せん断変形図

カラップを有する構造が多く採用されている。しかし、スカラップディテールでは、この近傍で局所的な応力集中が発生し、疲労強度が低い継手となる。JSSC 疲労設計指針<sup>4)</sup>でも、これを G 等級としている。

著者は、これまでウェブにスカラップを有する桁試験体を用いて疲労試験を行ったが、せん断力が作用した場合には、せん断変形(図-1)の影響で G 等級を下回る場合があることを示し、スカラップ内の廻し溶接部をグラインダーで仕上げれば、F 等級を満足する結果を報告した<sup>5)</sup>。これは、全断面溶接を想定したものであり、これまでウェブをボルト接合とした併用継手におけるスカラップディテールの疲労試験を実施した



(a)試験体A



(b)試験体B

図-2 試験体形状

報告はない。

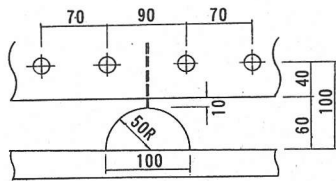
併用継手と全断面溶接継手を比較すると、併用継手では、スプライスプレートによって、ウェブの剛性が増し、せん断変形量に違いが生じてくる。また、図-1に示すようにスカラップとスプライスプレートとの離れ(以下、隙間長さ)が生じることによって水平方向の変位量(以下、隙間幅)が増すなど、スカラップ周辺の変形状態が異なってくる。これらのことから、局部応力に違いが生じることが考えられ、疲労強度に影響を及ぼすことも考えられる。

本報告は、少数主桁橋の現場接合部において、フランジを溶接接合、ウェブをボルト接合とする併用継手におけるスカラップディテールの疲労強度を調べるため、併用継手を想定した試験体を製作し、疲労試験を実施した。また、スカラップ近傍の応力状態を調べるため、ひずみゲージを取り付け、応力測定を行った。さらに、局部応力に影響する因子を調べるため、FEM解析を実施したので、これらの結果を報告する。なお、併用継手の課題としては、フランジ溶接時のウ

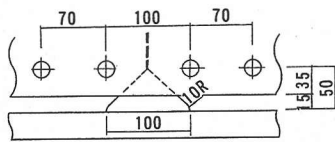
ェブの添接状態によっては、フランジに大きな拘束応力が発生することや、溶接收縮によりフランジ近くの添接板では、滑り耐力が低下することなどの問題もあるが、ここでは、疲労問題にのみ着目した研究を行うこととした。

## 2. 試験体形状

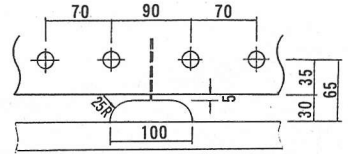
試験体形状を図-2に示す。疲労試験体は2体製作し、いずれも使用鋼材はSM490Aであり、ウェブ板厚を16mm、下フランジを16,28,40mm、上フランジを16,22,28mmと断面変化させた。本試験体では、上下フランジで板厚構成が異なるが、これは圧縮側でも亀裂を発生させるため、上フランジの板厚を下フランジの板厚より薄くし、公称応力を高くするためである。製作手順は通常のI桁と同様、フランジの板厚変化部をサブマージアーク溶接で板継ぎした後、I桁断面に組み、炭酸ガス溶接でウェブとフランジの溶接を行っ



(a)ボルト I

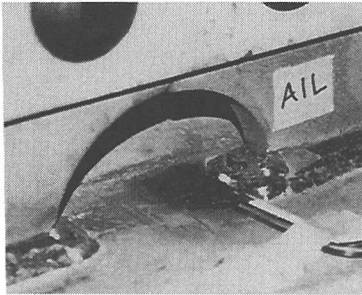


(b)ボルト II

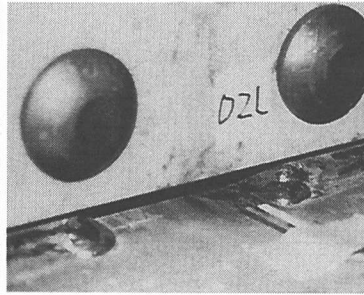


(c)ボルト III

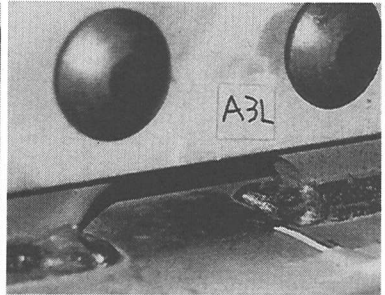
図-3 ボルトタイプの詳細図



(a)ボルト I



(b)ボルト II



(c)ボルト III

写真-1 ボルトタイプの詳細

た。ただし、フランジには現場で行う溶接ビードはなく、ウェブにスカラップを開口しただけである。これは、以前に報告したように、現場溶接ビード部から疲労亀裂は発生せず、亀裂発生に影響したのは廻し溶接部のみであったからである。なお、スカラップの廻し溶接は、すべて非仕上げ(As-weld)とした。

スカラップディテールの違いとして、試験体 A の左側半分は、全断面溶接を想定した 50R のスカラップ(以下、溶接タイプ)とした。次に、ウェブをボルト接合とした併用継手を想定したディテールは、図-3 に示す 3 タイプとし、それぞれ 2 つの試験体に振り分けた。図-3(a) に示すボルトタイプ I (以下、ボルト I) は、50R のスカラップを設けたタイプであり、隙間長さを 10mm、ボルト縁端距離を 40mm とした一般的な高力ボルト接合のディテールである。次に、図-3(b) に示すボルトタイプ II (以下、ボルト II) は、スカラップ近傍の剛性を高めることを目的に、スプライスプレートをスカラップに被せ、また第 1 ボルトをフランジに出来る限り近づけるため、3 角形状のスカラップとした。というのも、第 1 ボルトをフランジから 50mm とするには、半円形のスカラップでは最小ボルト縁端距離が確保できないからである。さらに、図-3(c) に示すボルトタイプ III (以下、ボルト III) は、スカラップの開口による影響を少なくさせるため、楕円形のスカラ

ップ形状とした。また、スカラップ端部と第 1 ボルトの鉛直距離を可能な限り小さくさせるため、隙間長さは 5mm、ボルト縁端距離は 35mm とした。写真-1 に各ボルトタイプの一例を示すが、ボルト II、III では、ボルト I と比べ開口部が小さく、廻し溶接の施工性は多少劣ったが、溶接品質への影響はなかった。また、実構造では、当然のことであるが、工場製作時において、現場継手部は分割された状態で廻し溶接の施工が行われるので、障害となる部材はなく、試験体の製作より施工性は向上する、このため、実構造でも溶接品質の問題は生じないものと考えられる。

ボルト本数は、各タイプともに、1 つのスプライスプレートで、6 段 12 列とした 72 本のボルトを配置した。架設現場における併用継手の施工は、フランジ近傍の数段のボルト以外はフランジの溶接前に本締めし、溶接終了後、残りのボルトを本締めする工法<sup>1)</sup>、あるいは、フランジの溶接時は全ボルト仮止めとし、溶接終了後、全ボルトを本締めする工法<sup>2)</sup>などで行われている。後者の場合、溶接による収縮を見込む必要があるため、試験体のボルト径はすべて 26.5φ の拡大孔とした。また、スプライスプレートは 9mm とし、ボルト接合面はプラスト処理を行った。ボルト施工は、全溶接終了後、トルシヤ型のハイテンションボルトで締め付けた。

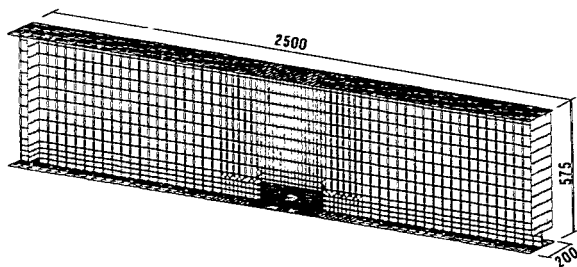


図-4 FEM解析

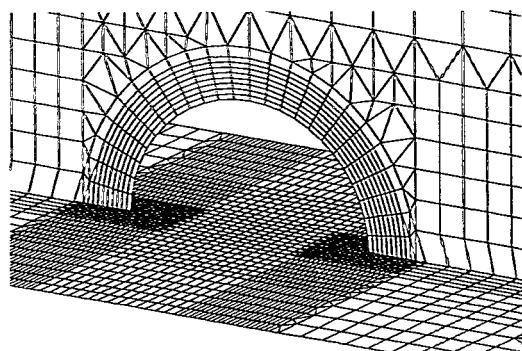
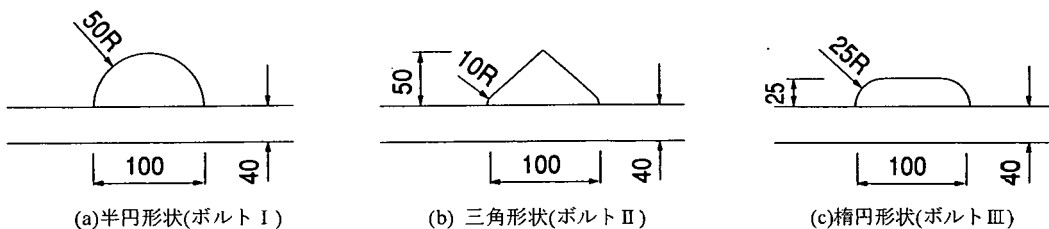


図-5 メッシュ分割



(a)半円形状(ボルトⅠ)

(b)三角形(ボルトⅡ)

(c)楕円形状(ボルトⅢ)

図-6 パラメータⅡの説明図

### 3. FEM 解析による局部応力に影響する因子の検討

#### (1) FEM 解析モデル

疲労試験を行うにあたり、スカラップ内の廻し溶接近傍の局部応力に影響する因子を調べるため、FEM 解析を実施した。

解析モデルは、スパン 5m の I 型断面の 1/2 モデル (支間方向の半分) であり (図-4)、断面寸法は試験体と同様とし、モデルの中央位置にスカラップを設けた。また、スカラップ近傍のメッシュ分割は、図-5 に示す形状とし、その最小寸法を 2mm とした。解析ソフトは、汎用有限要素プログラム MSC/NASTRAN を使用し、シェル要素を用いてモデル化した。また、荷重は、モデルの右端に単位荷重を載荷させた。

解析パラメータは、疲労試験において局部応力に影響するであろう 3 つの因子を解析パラメータとした。パラメータⅠは、板厚の違いによる影響を調べるため、ウェブ板厚を 16mm、スカラップ径を 50R (図-5 参照) として、フランジ板厚を 3 or 4 mm ピッチで、12 ~ 50mm と変化させ、合わせて 11 ケースの解析を行った。次に、パラメータⅡは、スカラップ形状による影響を調べるため、ウェブ板厚を 16mm、フランジの板厚を 40mm とし、スカラップ形状は通常の半円形状 50R (ボルトⅠ、図-6 (a))、三角形 (ボルトⅡ、図-6 (b))、および楕円形状 (ボルトⅢ、図-6 (c)) の 3 タ

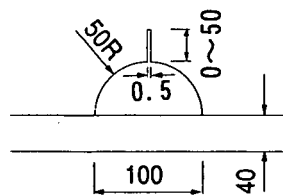


図-7 パラメータⅢの説明図

イプとした。次に、ボルト接合の際、スカラップとスプレイト縁端に隙間部が生じる。一般的にはこの隙間長さは、ボルトⅠに示す 10mm であるが、パラメータⅢ (図-7) は、隙間長さの影響を調べるため、ウェブ板厚を 16mm、フランジ板厚を 40mm、スカラップを 50R、隙間幅を 0.5mm とし、隙間長さを 10mm ピッチで 10 ~ 50mm と変化させた。なお、本解析では添接板および溶接ビードはモデル化しなかった。

#### (2) FEM 解析結果

##### a) パラメータⅠ (板厚の影響)

図-8 は、フランジの板厚が、16mm、28mm、40mm (試験体の下フランジ板厚) の場合の解析結果を示す。縦軸は、ウェブ直下における FEM 解析値を公称応力で割った応力集中係数で示し、横軸は、スカラップ方向 (橋軸方向) の距離で整理した結果である。

図-8 に示すように、最も局部応力が高いのは、各

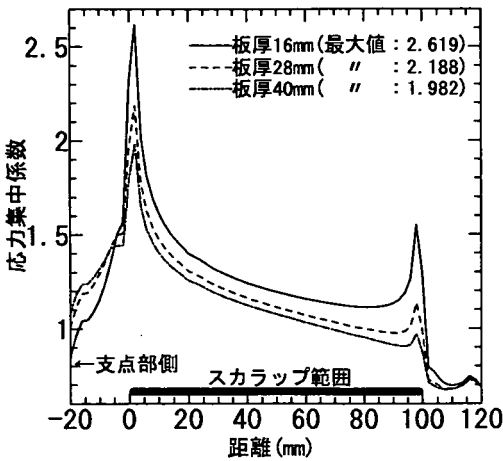


図-8 パラメータ I の解析結果(板厚の影響)

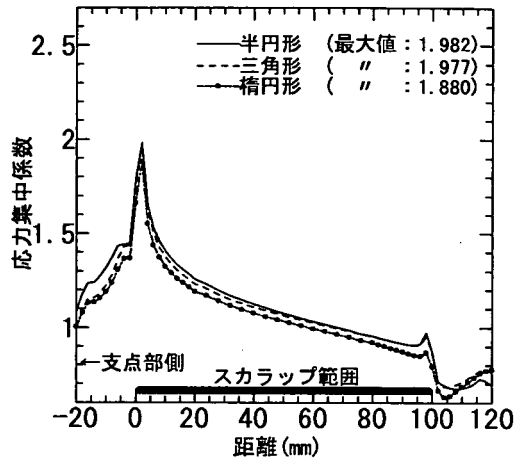
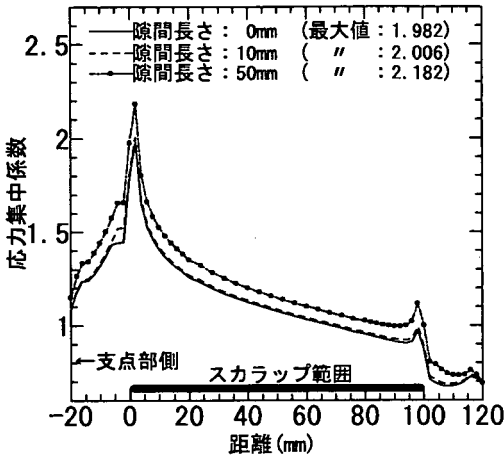
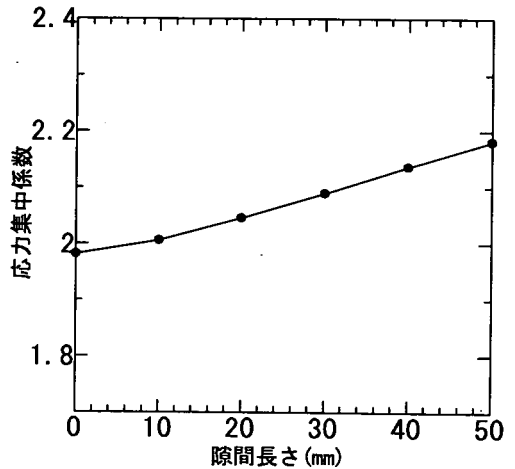


図-9 パラメータ II の解析結果(形状の影響)



(a) 橋軸方向の位置と応力集中係数の関係



(b) 隙間長さ と 応力集中係数の関係

図-10 パラメータ III の解析結果(隙間長さの影響)

板厚ともに、支点部側のスカラップ端部から 2mm 離れた位置であり、荷重点側のスカラップ端部の応力集中は小さく、せん断変形の影響が生じていることが判る。次に、板厚の違いによる影響では、板厚が小さいほど局部応力が高くなる結果となった。また、この図では板厚の差は 12mm ピッチのデータであるが、16mm と 28mm との応力集中係数の差は 0.431、28mm と 40mm では 0.206 となり、変化率は、板厚によって異なる (図-13 参照)。すなわち、板厚が 16mm 程度の薄いものであれば、板厚の違いが局部応力に与える影響は大きいと言える。しかし、板厚が大きくなれば、その影響が小さくなる傾向が示された。なお、その他の板厚における解析結果は、図-13 で示すこととし、次章で計測結果とともに、板厚差の影響を述べる。

#### b) パラメータ II (形状の影響)

解析結果を図-9 に示す。この図に示すように、スカラップ形状の違いによる分布状態の違いはなく、また、通常の半円形状と三角形状を比較しても、ピーク値の差異はない。しかし、楕円形状では、半円形状に比べ、大きな違いはないが、若干応力集中係数が低減する結果となった。

#### c) パラメータ III (隙間長さの影響)

解析結果を図-10 に示す。まず、図-10(a)において、隙間長さ 10mm (ボルト I) と半円形 (隙間長さ 0mm) を比較しても、分布状態にほとんど違いはなく、またピーク値も、ほとんど差異はない。しかし、隙間長さが 50mm となると、分布状態に違いが生じ、ピーク値も約 10% 上昇した。図-10(b)は、隙間長さ と 応力

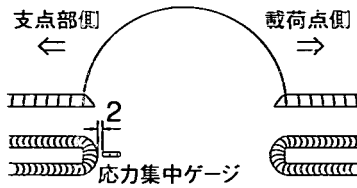


図-11 ひずみゲージ取り付け位置

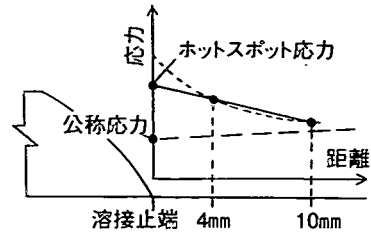


図-12 ホットスポット応力算定法

集中係数の関係を示したものである。この図に示すように、応力集中係数は、隙間長さに対し、比例して増加することが判る。

以上のように、スプライスプレート縁端から変位が拘束されているなら、一般的な隙間長さ 10mm 程度では、この影響はないと考えられるが、隙間長さの大きな構造詳細を適用すれば、局部応力も多少高くなる。

#### 4. 静的荷重試験によるひずみ計測

##### (1) ひずみ計測の方法

スカラップ内の廻し溶接周辺の局部応力を調べるため、疲労試験を行う前に、静的荷重試験を行い、ひずみ計測による応力測定を実施した。

ひずみ計測は、FEM 解析結果から局部応力が最も高くなるスカラップに挟まれた支分部側のフランジの表面に、図-11 および写真-1 に示すように廻し溶接から 2mm 離れた位置に、ゲージ長 1mm の応力集中ゲージを取り付け、荷重を載荷させて行った。荷重は、疲労試験と同じ荷重範囲となるよう、スパン中央に試験体 A では 343kN、試験体 B では 372kN を載荷させた。なお、本計測では、フランジ側の廻し溶接部で疲労強度に影響すると考えられる応力集中について検討することとしたが、これは、以前に行った計測結果では<sup>9)</sup>、ウェブ側ビード止端の局部応力は、公称応力よりも低く、また、疲労試験においても、ウェブ側ビード止端部から亀裂は発生しなかった。仮に、溶接サイズやスカラップ形状が変わったとしても、ウェブ側ビード止端の応力集中の影響はないものと考えられるので、この部位の計測は行わなかった。

##### (2) ひずみ計測結果

各スカラップ位置(図-14)における、公称応力、ひずみ計測より得られたホットスポット応力および応力集中係数を表-1 に示す。公称応力は、最も局部応力の高いスカラップ内の支分部端部で梁理論より求めた値であり、せん断応力については、通常設計で用い

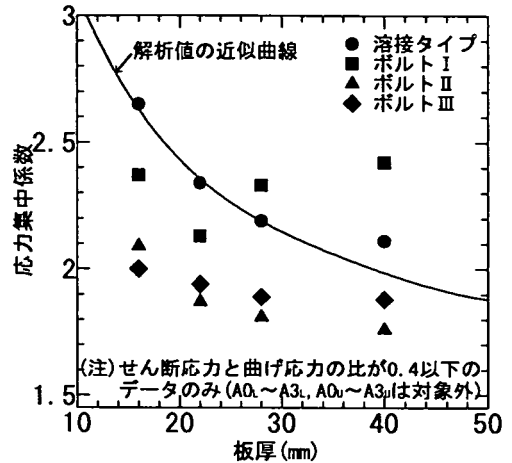


図-13 板厚と応力集中係数の関係

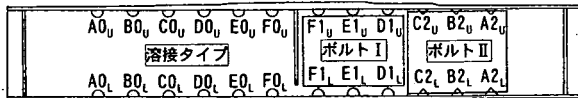
られるようにせん断力をウェブの断面積で割った値とした。また、ホットスポット応力の算出法は、三木らの研究<sup>9)</sup>に基づいて、図-12 に示すように、溶接止端部から 4mm と 10mm 位置の実測応力を直線で結び、その直線を用いて溶接止端部位置での応力を外挿した値とした。なお、ホットスポット応力と公称応力の比を実測による応力集中係数とした。さらに、溶接タイプについては、三木らが求めた算定式<sup>7)</sup>による応力集中係数も示すこととした。

図-13 は、表-1 の結果を各板厚毎に平均した応力集中係数と板厚の関係を示したものである。なお、スカラップディテールではせん断力の影響が大きく、せん断応力と曲げ応力の比( $\tau/\sigma$ )によって疲労等級が異なる( $\tau/\sigma \leq 0.4$ : G 等級,  $\tau/\sigma > 0.4$ : H 等級)<sup>7B)</sup>。このため、図-13 では表-1 で示した  $\tau/\sigma$  が 0.4 以下のデータのみ対象とした(桁端から 800mm の位置にある  $A0_U, A3_U$  などは対象外)。また、図中の曲線は、前章で解析した板厚をパラメータ(パラメータ I)とした解析結果の近似曲線を示したものである。

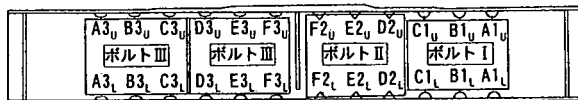
溶接タイプでは、板厚が増加すれば応力集中係数は減少しており、解析値とほぼ一致していた。しかし、板厚 40mm のデータでは、実測値は解析値ほど応力

表-1 スカラップ箇所での応力集中係数

試験体	接合タイプ	箇所	板厚 (mm)	公称応力(MPa)		ねじボルト 応力(MPa)	実測による 応力集中係数	算定式による 応力集中係数	曲げと せん断の比
				曲げ応力 σ <sub>N</sub>	せん断応力 τ				
試験体 A	溶接タイプ	引張側	A0L	16	36.4	103.3	2.84	3.03	0.51
			B0L	16	54.6	142.8	2.62	2.67	0.34
			C0L	28	48.1	126.6	2.63	2.08	0.39
			D0L	28	60.1	122.9	2.04	2.00	0.31
			E0L	40	52.4	122.7	2.34	1.75	0.35
			F0L	40	61.1	115.2	1.87	1.72	0.30
		圧縮側	A0U	16	-36.4	-102.9	2.71	3.03	0.51
			B0U	16	-54.6	-151.7	2.67	2.68	0.34
			C0U	22	-55.1	-131.3	2.38	2.25	0.34
			D0U	22	-68.9	-156.8	2.29	2.15	0.27
			E0U	28	-66.4	-145.8	2.20	1.95	0.28
			F0U	28	-77.4	-146.1	1.89	1.89	0.24
	ボルトⅡ	引張側	A2L	16	36.4	76.7	2.11		0.51
			B2L	16	54.6	107.2	1.97		0.34
			C2L	28	48.1	103.1	2.14		0.39
			D1L	28	60.1	150.6	2.51		0.31
			E1L	40	52.4	135.8	2.59		0.35
			F1L	40	61.1	137.9	2.24		0.30
		圧縮側	A2U	16	-36.4	-79.9	2.10		0.51
			B2U	16	-54.6	-126.4	2.21		0.34
			C2U	22	-55.1	-117.9	2.13		0.34
			D1U	22	-68.9	-142.4	2.07		0.27
			E1U	28	-66.4	-147.6	2.22		0.28
			F1U	28	-77.4	-178.6	2.31		0.24
試験体 B	ボルトⅠ	引張側	A1L	16	39.5	106.7	2.70		0.51
			B1L	16	59.3	145.9	2.46		0.34
			C1L	28	52.2	119.6	2.29		0.39
			D2L	28	65.2	115.6	1.77		0.31
			E2L	40	56.9	98.4	1.73		0.36
			F2L	40	66.4	119.2	1.79		0.30
		圧縮側	A1U	16	-39.5	-99.6	2.52		0.51
			B1U	16	-59.3	-134.7	2.27		0.34
			C1U	22	-60.0	-130.5	2.18		0.34
			D2U	22	-74.8	-119.8	1.60		0.27
			E2U	28	-72.1	-122.9	1.71		0.28
			F2U	28	-84.1	-137.1	1.63		0.24
	ボルトⅢ	引張側	A3L	16	39.5	82.0	2.08		0.51
			B3L	16	59.3	121.1	2.04		0.34
			C3L	28	52.2	103.4	1.98		0.39
			D3L	28	65.2	120.8	1.87		0.31
			E3L	40	56.9	111.0	1.95		0.36
			F3L	40	66.4	120.2	1.81		0.30
		圧縮側	A3U	16	-39.5	-82.5	2.07		0.51
			B3U	16	-59.3	-116.5	1.96		0.34
			C3U	22	-60.0	-124.0	2.07		0.34
			D3U	22	-74.8	-135.5	1.81		0.27
			E3U	28	-72.1	-139.2	1.93		0.28
			F3U	28	-84.1	-151.4	1.80		0.24



(a)試験体 A



(b)試験体 B

\*: 三木 7 による応力集中係数算定式

$$S.C.F. = 1 + 0.77 \left( \frac{t_f}{t_w} \right)^{-0.54} \left( \frac{R}{t_f} \right)^{0.21} + 1.7 \left( \frac{t_f}{t_w} \right)^{0.23} \left( \frac{R}{t_f} \right)^{0.54} \left( \frac{Vb}{M} \right)$$

t<sub>f</sub>: フランジ厚    b: フランジ幅  
t<sub>w</sub>: ウェブ厚    M: モーメント  
R: スカラップ径    V: せん断力

図-14 スカラップ箇所の説明図

(試験体B)

● : 計測位置

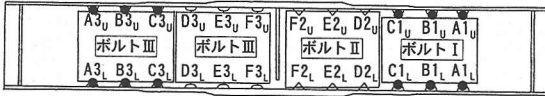


図-15 隙間幅の変位計測位置

表-2 隙間幅の変位計測結果

ボルト I		ボルト III		比率 ボルト I ボルト III
箇所	変位量 (mm)	箇所	変位量 (mm)	
A1L	+0.025	A3L	+0.014	1.786
B1L	+0.053	B3L	+0.042	1.262
C1L	+0.051	C3L	+0.030	1.700
A1U	-0.029	A1U	-0.020	1.450
B1U	-0.046	B1U	-0.035	1.314
C1U	-0.056	C1U	-0.031	1.806

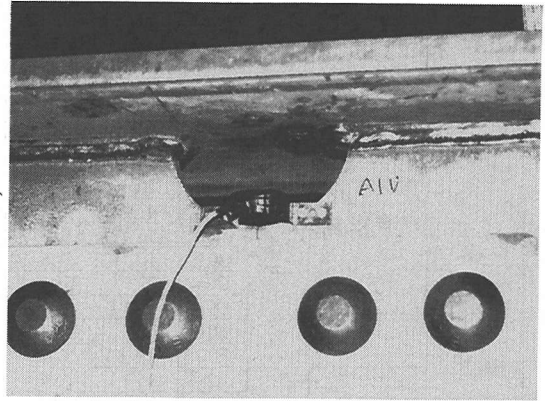


写真-2 π型変位計の取付状況

集中低減効果はなかった。この原因は明確でないが、板厚 40mm の  $F_{0L}$  では、むしろ解析値より実測値の方が応力集中係数は低いが、 $E_{0L}$  では、応力集中が高く、データのばらつきがその要因と思われる。次に、表-1 からも判るように同じ板厚であっても（例えば、 $E_{0L}$  と  $F_{0L}$  を比較）、せん断力の影響が大きい支点部側の実測値は、何れの板厚においても高い結果が示された。これは、すべての箇所でせん断力は一定であるので、公称応力が低い側(支点部側)は、せん断力の影響が大きいからである。さらに、算定式による応力集中係数と実測によるものとは、実測値が多少高い値を示したデータが多かったが、比較的近い値となっていた。

次に、ボルトタイプでは、ボルト I の 28mm と 40mm のデータを除き、溶接タイプと比較して応力集中係数は、低くなった。これは、ボルト接合とすることによって、スプラインプレートによりウェブの剛性が高くなり、せん断変形量が小さくなったことで、局部応力が小さくなったものと考えられる。また、板厚変化による応力集中係数の低減効果は、ボルト I において、板厚 16mm および 22mm のデータでは、溶接タイプとほぼ同じであったが(ボルト II III では全データでほぼ一致)、ボルト I の 28mm と 40mm のデータでは傾向が異なった。これは、製作による誤差の影響や計測による誤差の影響などが考えられる。製作誤差による影響と考えられる要因として、応力集中係数が高かった  $D1_L, E1_L, F1_L, E1_U, F1_U$  は、いずれも試験体 A の桁中央側における 1 枚のスプラインプレートで発生していた。これらの部位で、何らかの製作誤差が生じていたことで、局部応力が高くなったことが考えられる。しかし、6 章で示すが、疲労試験結果では、これらの部位で強度が低くなるわけではなく、計測誤差とも考えられる。以上のように、ボルト I の 28mm

と 40mm のデータは誤差を含んでいるものと考えれば、ボルト I は、溶接タイプより若干局部応力が小さくなると思われる。

ボルト II では、ボルト I (板厚 16,22mm) と比較して応力集中係数が低減した。前章の解析結果では三角形形状(パラメータ II)としても、半円形状と比べ局部応力の低減効果はなかったもので、応力集中係数が低減したのは、形状による影響ではないと考えられる。低減した理由として、スプラインプレートを可能な限りフランジに近づけ、スカラップ部をスプラインプレートで覆うことにより、スカラップ近傍の剛性が増加し、スカラップ開口による局部的な変位量が減少したことで、応力集中係数が低減したものと考えられる。

ボルト III も同様に、ボルト I (板厚 16,22mm) と比較して応力集中係数が低減し、ボルト II に近い値を示した。これは、前章の解析結果で示したが楕円形状では(パラメータ II)、半円形状に比べ局部応力の低減効果があったことが 1 つの理由である。ただし、解析結果では、形状の違いによる応力集中係数の差は、0.1 程度であったが、実測では 0.2(最も差の小さい 22mm のデータ)以上の違いが生じていた。これは、ボルト III では、隙間長さおよびボルト縁端距離をボルト I よりそれぞれ 5mm ずつ短くしたことにより、スカラップ端の隙間幅が小さくなったことによって、局部応力が低減したものと考えられる。

以上のように、ひずみ計測による廻し溶接近傍の局部応力は、全断面溶接に比べ併用継手の方が小さくなるが、通常のボルト施工で行う構造詳細(ボルト I)では、大きな違いはない。しかし、継手のディテールを改良(ボルト II III)することで、応力集中係数が低減する。



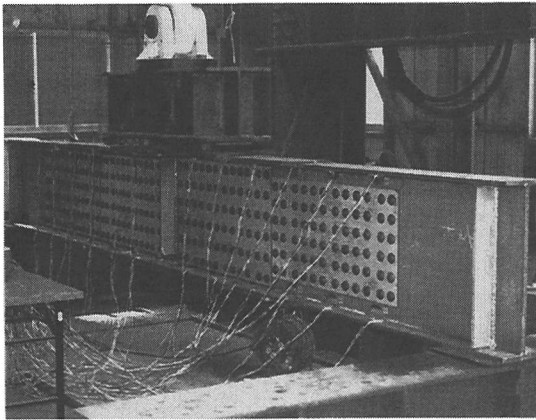


写真-3 載荷状況 (試験体B)

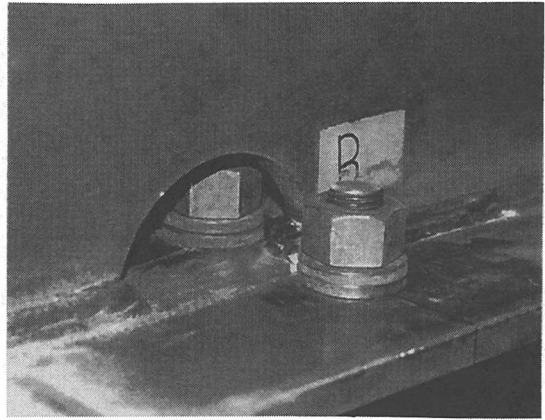


写真-4 ボルトによる補修状況

## 5. 静的載荷試験による隙間幅の変位計測

### (1) 変位計測の方法

併用継手において、隙間部の影響によるスカラップの変形状態を調べるため、疲労試験を行う前に、静的載荷試験を行い、隙間幅(図-1 参照)の変位計測を実施した。

変位計測は、試験体 B において行い、図-15 に示すように、ボルト I およびボルト III の 12 箇所の計測を行った。計測は、写真-2 に示すように、隙間部を挟んだ位置に、 $\pi$  型の変位計を取付け、疲労試験と同じ荷重範囲となるように、372kN を載荷させて、その時の隙間幅の変位量を計測した。

### (2) 変位計測結果

各スカラップ位置における、隙間幅の変位計測結果を表-2 に示す。表-2 の結果から判るように、いずれの箇所においても、ボルト I よりボルト III の変位量は小さくなった。これは、スカラップ縁端と第 1 ボルトまでの鉛直距離がボルト III の方が 10mm 短くなったことによる影響と思われる。すなわち、第 1 ボルトまでの距離を小さくすることで、隙間幅の変位を抑えることができる。この効果によって、前章で示したように、ボルト III では、ボルト I と比較して応力集中係数が小さくなったと考えられる。

## 6. 疲労試験

### (1) 試験方法

疲労試験は、動的載荷能力  $\pm 500\text{kN}$  の電気油圧サーボ型疲労試験機を用い、スパン中央に荷重を載荷させ

る 3 点曲げ載荷で行った。荷重は、両試験体ともに下限値は 20kN、上限値は試験体 A では 363kN、試験体 B では 392kN とした。荷重波形は正弦波で、繰返し速度は 1.2~2.0Hz で行った。載荷状況を写真-3 に示す。

疲労亀裂の確認は、定期的 (5~8 万回の間隔) に磁粉探傷試験 (MT) により亀裂を検出し、ノギスで亀裂長を計測して亀裂の進展状況を観察した (写真-5 参照)。また、亀裂長さが 50mm を越えたものは、亀裂がそれ以上進展しないように、ストップホールをあげ、ボルトによる補修を行った (写真-4)。

### (2) 試験結果

#### a) 亀裂発生箇所および亀裂長 40mm の試験結果

疲労試験は、繰返し回数が試験体 A では 310 万回、試験体 B では 370 万回に達した時に打ち切った。疲労亀裂は、図-16 に示す箇所が発生し、写真-5 に示すように、いずれもスカラップに挟まれた支点部側の廻し溶接止端から発生して、フランジ内に進展した。

表-3 は、下フランジの各スカラップ箇所における公称応力 ( $\sigma_N$ ) およびホットスポット応力 ( $\sigma_H$ ) と亀裂長が 40mm に達した時の繰返し回数 (N) の関係を示したものであり、図-17 は、これらの S-N 曲線である。また、表-4 は、圧縮側において亀裂が発生した箇所の試験結果である。

#### b) 公称応力で整理した試験結果

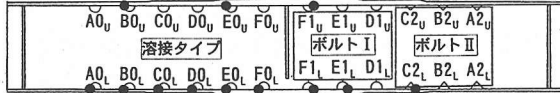
公称応力で整理した試験結果を図-17(a) に示す。

溶接タイプは G 等級を下回るデータもあり、特に板厚 16mm の強度は低く、H 等級レベルであった。これは、ひずみ計測でも示したが、板厚が薄くなれば応力集中係数は高くなり、この傾向と同様に疲労強度は低くなる結果となった。また、板厚 28mm と 40mm

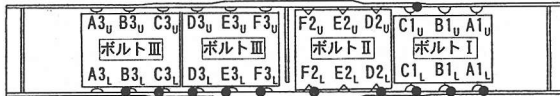


写真-5 亀裂発生状況(磁粉探傷試験)

● : 亀裂発生位置



(a)試験体A



(b)試験体B

図-16 亀裂発生位置

のデータを比べても、疲労強度の差はほとんどなかった。すなわち、板厚 28mm を越える場合のように、ある程度板厚が大きくなれば、板厚差による疲労強度への影響はないものと思われる。これらの結果が示すように、公称応力で整理した場合の疲労強度は、ひずみ計測で得られた応力集中係数の結果と密接に関係し、応力集中係数が高ければ疲労強度は低くなった。また、同じ板厚でも公称応力の低い方が疲労強度は低くなった。これは、ひずみ計測結果(表-1)でも示したように、公称応力の低い側は、せん断力の影響が大きく、応力集中係数も高くなるからである。

ボルトⅠは、溶接タイプと比較して、応力集中係数が高かった  $E_{1L}$  では、疲労強度は低くなったが、それ以外では低くなることはなく、むしろボルトⅠの方が疲労強度は若干高くなった。しかしながら、明確な疲労強度の違いは現れなかった。

ボルトⅡでは、下フランジにおいて 6 箇所中 3 箇所しか亀裂が発生せず、疲労強度が低い板厚 16mm のスカラップからは発生しなかった。また、亀裂が発生した 2 箇所については F 等級レベルであり、発生

表-3 各応力範囲と疲労強度の関係Ⅰ(引張側)

タイプ	箇所	$\sigma_N$ (MPa)	$\sigma_H$ (MPa)	N (万回)	200 万回疲労強度 (MPa)	
					各箇所	平均値
溶接タイプ	A0L	36.4	103.3	256	39.5	50.8
	B0L	54.6	142.8	104	43.9	
	C0L	48.1	126.6	215	49.3	
	D0L	60.1	122.9	136	52.8	
	E0L	52.4	122.7	151	47.7	
	F0L	61.1	115.2	170	57.9	
ボルトⅠ	A1L	39.5	106.7	300	45.2	52.3
	B1L	59.3	145.9	96	46.4	
	C1L	52.2	119.6	190	51.3	
	D1L	60.1	150.6	発生せず	—	
	E1L	52.4	135.8	145	47.1	
F1L	61.1	137.9	205	61.6		
ボルトⅡ	A2L	36.4	76.7	発生せず	—	62.1
	B2L	54.6	107.2	発生せず	—	
	C2L	48.1	103.1	283	54.0	
	D2L	65.2	115.6	221	67.4	
	E2L	56.9	98.4	発生せず	—	
	F2L	66.4	119.2	173	63.3	
ボルトⅢ	A3L	39.5	82.0	発生せず	—	61.6
	B3L	59.3	121.1	263	65.0	
	C3L	52.2	103.4	318	60.9	
	D3L	65.2	120.8	165	64.9	
	E3L	56.9	111.0	180	54.9	
	F3L	66.4	120.2	155	61.0	

(記号の説明)

$\sigma_N$  : 公称応力,  $\sigma_H$  : ホットスポット応力

N : 亀裂長 40mm に達したときの繰返し回数

(疲労設計指針<sup>9)</sup>による 200 万回疲労強度)

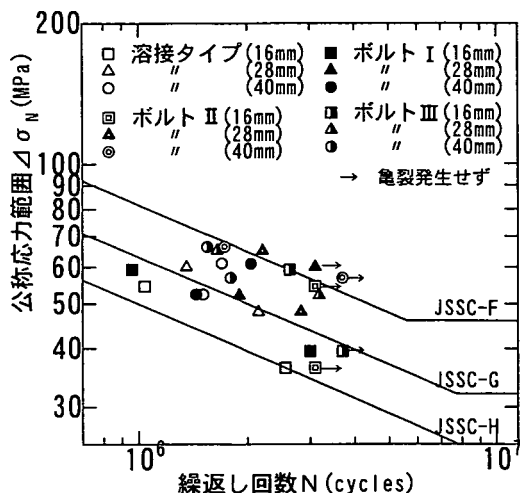
F 等級  $\geq 65$ MPa, G 等級  $\geq 50$ MPa, H 等級  $\geq 40$ MPa

(注) 200 万回疲労強度の平均値は、3 乗平均である。また、

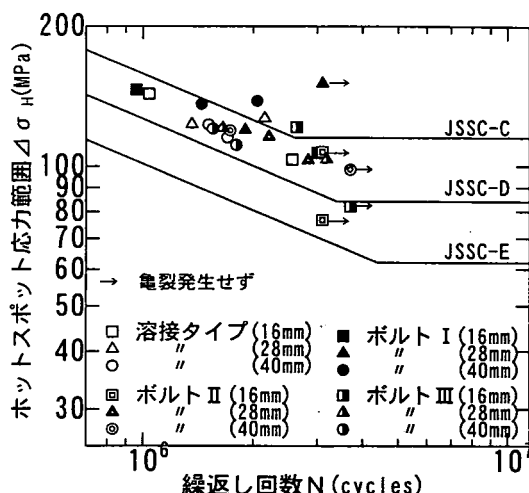
$\tau/\sigma > 0.4$  のスカラップ(A0L, A1L など)は平均値の対象外。

していない  $B_{2L}, E_{2L}$  についても同等以上の強度を有し、溶接タイプおよびボルトⅠと比較して、疲労強度は高くなった。これは先にも述べたが、スプライスプレートを可能な限りフランジに近づけ、スカラップ部をスプライスプレートで覆うことにより、この近傍の剛性が増加し局部応力が低減されたことによって、疲労強度は高くなったものと考えられる。

ボルトⅢは、全箇所でも G 等級を満足した。さらに、F 等級に近い強度レベルを示した箇所が多くあり、溶接タイプおよびボルトⅠより疲労強度は高くなった。これは、ボルトⅢでは、スカラップ縁端と第 1 ボルトとの鉛直距離をボルトⅠより 10mm 短くしたことにより、隙間幅の変位量が小さくなったことにより、局部応力が低減したことによる効果と考えられる。また、疲労強度は、ボルトⅡとほぼ同等であった。次に、ボルトⅢでは、溶接タイプやボルトⅠのような板厚差による強度の違いは現れなかった。これは、図-13 でも示したように、溶接タイプでは、板厚が 16mm と 28mm の応力集中係数の差は、0.46 であったのに対し、ボルトⅢでは 0.11 の違いしかなく、この



(a) 公称応力で整理した場合



(b) ホットスポット応力で整理した場合

図-17 疲労試験結果(亀裂長40mmで整理)

表-4 各応力範囲と疲労強度の関係Ⅱ(圧縮側)

タイプ	箇所	$\sigma_N$ (MPa)	$\Sigma_H$ (MPa)	N (万回)	200万回 疲労強度	
					個々	平均
溶接 タイプ	B0 <sub>u</sub>	-54.6	-151.7	170	51.7	64.5
	E0 <sub>u</sub>	-66.4	-145.8	272	73.6	
ボルト I	C1 <sub>u</sub>	-60.0	-130.5	210	61.4	59.7
	F1 <sub>u</sub>	-77.4	-178.6	84	58.0	

程度の違いでは、疲労強度に影響しないものと思われる。この結果から考えると、第3章のFEM解析結果で示したように、楕円形状のスカラップでは、半円形状より応力集中係数は0.1低減したが、形状の違いだけでは、疲労強度向上効果は現れないものと言える。

c) 200万回疲労強度で評価した各接合タイプの強度

表-3の右側には、疲労試験結果をもとに200万回疲労強度で表した各スカラップ箇所の応力範囲を示した。ここで言う200万回疲労強度とは、疲労設計指針<sup>9)</sup>でも示されているように、 $\sigma^3 \cdot N = \text{Const}$ の関係から、疲労試験結果におけるNと $\sigma_N$ を用いて、各スカラップ箇所における200万回での応力範囲を算出したものである。なお、ここで示す平均値は、3乗平均で算出した値であり、また、先にも述べたように、桁端から800mmの位置にあるスカラップ(A0<sub>L</sub>, A1<sub>L</sub>など)は、 $\tau/\sigma$ が0.4以上(H等級)なので、平均するデータから除外した(G等級で照査するスカラップ箇所を対象)。

溶接タイプおよびボルトIでは、両者ともに平均値は50MPaを越え、G等級を満足したが、両者比較しても大きな違いは生じなかった。しかしながら、ボ

ルトII IIIでは、両者ともに60MPaを越えており、溶接タイプおよびボルトIより約10MPa疲労強度が高くなった。なお、ボルトIIでは、亀裂が発生していない箇所もあるので、200万回疲労強度の応力範囲は、さらに高くなるものと考えられる。

d) ホットスポット応力で整理した試験結果

先にも述べたように、公称応力で整理した場合、接合タイプによって応力集中係数が異なり、疲労強度にもばらつきが生じる結果となった。そこで、図-17(b)は、ホットスポット応力で整理した試験結果を示したものである。

この結果が示すように、応力集中を考慮したホットスポット応力で整理すれば、ばらつきは少なく、いずれの接合タイプにおいても、D等級を満足する比較的狭い範囲におさまっていた。また、ボルトIでC等級を満足する結果(D1<sub>L</sub>, F1<sub>L</sub>)もあるが、これは、図-13で示したように、誤差が含まれていると思われるデータであり、これを計測誤差と考えれば、実際に発生していたと思われる応力よりも高い計測値となったため、このような結果になったものと考えられる。

e) 上フランジ(圧縮側)での試験結果

図-16および表-4に示したように、圧縮側において、ボルトII IIIでは疲労亀裂は発生しなかったが、溶接タイプおよびボルトIでは、それぞれ2箇所合わせて4箇所、亀裂が生じた。疲労強度については、引張側に比べ若干強度が高くなってはいたが、それでもG等級を満足する程度であった。また、200万回疲労強度で比較した場合、引張側より約10MPa高くなった。

### (3) 併用継手の疲労強度および疲労設計について

スカラップを有する併用継手(一般的なディテールはボルト I)の疲労強度は、全断面溶接継手(溶接タイプ)と比較しても強度の違いはなく、併用継手の疲労設計は、全断面溶接と同様に行わなければならない。なお、スプライスプレートを出来る限りフランジに近づけ、せん断変形によるスカラップ近傍の局部応力を低減させるディテールとすれば(ボルト II III), 疲労強度は向上する。ただし、F 等級を満足させるには、200 万回の疲労強度は、65MPa 以上の応力範囲が必要となるので、たとえボルト II III のディテールを適用したとしても、継手等級は G 等級で設計しなければならない。

次に、ホットスポット応力でスカラップディテールを評価すれば、接合タイプが異なってもばらつきの少ない結果が得られ、ホットスポット応力による疲労照査手法は有効であると言える。

## 7. まとめ

本研究をまとめると、以下の通りである。

- 1) FEM 解析および応力測定結果から、スカラップ近傍の局部応力は、板厚が厚くなることによって応力集中のピークが減少し、特に板厚が薄いほどその傾向は顕著に現れる。
- 2) 併用継手の廻し溶接近傍の局部応力は、全断面溶接継手(溶接タイプ)より小さくなる。特に、スプライスプレートを出来る限りフランジに近づけたディテール(ボルト II III) とすれば、その効果が顕著に現れる。
- 3) 併用継手のスカラップディテール(ボルト I)は、全断面溶接継手と比較しても疲労強度の違いはなく、

継手等級は G 等級である。このため、併用継手の疲労設計は、全断面溶接と同様に行わなければならない。

- 4) 併用継手のスカラップディテールの疲労強度向上法として、スプライスプレートを出来る限りフランジに近づけ(ボルト II III), せん断変形によるスカラップ近傍の局部応力を低減させることにより、200 万回強度で約 10MPa 疲労強度が向上する。

## 参考文献

- 1) 中村貴史, 亀井義典, 西村宣男, 雨森慶一, 新井正樹: 高力ボルト・溶接継手併用継手における高力ボルト施工要領, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集I-A, pp.392-393, 1999.9.
- 2) 小日向謙寿, 小森 武, 広瀬 剛, 葛西真一: 在家塚第3高架橋における併用継手の施工要領, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集I-A, pp.106-107, 2000.9.
- 3) 生駒 元, 鈴木松雄, 岩下 宏, 河西龍彦: プレキャスト床版を有する鋼少数主桁橋の合理化・省力化, 宮地技報, No14, pp.55-60, 1998.12.
- 4) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 5) 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, pp.121-130, 1997.10.
- 6) 三木千壽, 館石和雄, 山本美博, 宮内政信: 局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1055-1062, 1992.3.
- 7) 三木千壽, 館石和雄: 鋼橋 I 型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, pp.41-47, 1997.4.
- 8) (社)日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3.

(2002. 1. 11 受付)

## FATIGUE STRENGTH OF FIELD MIXED JOINT IN I-SECTION GIRDERS WITH COPE HOLE DETAILS

Kuniaki MINAMI and Takeshi HIROSE

In the field welding division for I-section girders, the web plate generally possesses semi-circular notches called as cope holes in order to avoid intersection of weld lines. The cope holes induce out-of-plate bending stresses caused by shear force in addition to membrane stresses by bending moment in I-section girders. Therefore, a local stress concentration occurs in the vicinity of a cope hole. This study aims at investigating fatigue strength of cope hole details in the mixed joint that were made both welded flanges and high strength bolted web. For this purpose, fatigue tests were carried out of on the large-scale girder specimens with cope holes in the mixed joints.