

溶接構造部材のスカラップディテールの疲労強度

三木千壽*・館石和雄**・石原謙治***・
梶本勝也****

溶接構造部材のスカラップ部の応力発生性状と疲労強度について実験およびFEMにより検討した。その結果、このディテールにはスカラップの存在とせん断変形によって高い応力集中が生じ、疲労強度が極端に低く、公称応力による疲労照査は不可能であることを示した。実測および解析により疲労き裂発生位置でのホットスポット応力を求め、疲労照査を行った結果、疲労強度はJSSCのE等級をほぼ下限とする狭い領域におさまり、スカラップ部の疲労強度評価にホットスポット応力を用いた手法が有効であることを示した。

Key Words : fatigue, scallop, stress concentration, shear deformation, hot spot stress

1. はじめに

鋼橋のような溶接構造物中には部材が交差するディテールが必ず存在し、そこでは溶接線の交差を避けるため、スカラップを設けることが一般的である。たとえばプレートガーダ橋での主桁と横桁、横桁と縦桁の接合部、鋼床版での縦リブと横リブあるいはダイアフラムとの交差部などがそれに相当する。また、I型断面梁を現場溶接する場合のフランジの溶接とウェブの溶接の重なりを避けるためのスカラップなど、部材の交差部以外にもスカラップあるいはそれと類似のディテールが構造物中に多数存在する。

このようなスカラップはその形状から応力集中箇所となる。また、スカラップがあげられたことによる局部的な剛性の低下により、スカラップにはさまれた領域に面外変位が誘起される。これらに起因してこのディテールの疲労強度は低く、また実構造物での疲労損傷も多い^{1),2)}。

本研究では面内に曲げられるI型断面梁部材の中に存在するスカラップディテールの疲労性状を検討し、その疲労照査方法を提案しようとするものである。この問題については著者らによる補強フランジの現場溶接部ディテールに関するもの³⁾以外はあまり取り上げられていない。ただし、スカラップディテールの局部的な面外変形挙動やそれに伴う応力集中の疲労に対する影響の重要性は以前より田島、山下らにより指摘されており、トラス格点を対象にしたFEM解析や載荷実験が行われている⁴⁾。

2. 試験体および試験方法

試験材は表-1に示す化学成分・機械的性質のSM490 YA材である。

図-1にスカラップディテールをモデル化した4本の試験体の形状寸法を示す。Type 1は試験体中に半径 $R = 25, 30, 35, 40$ mmの4種類のスカラップを含んでいる。またスカラップ始点部に廻し溶接を施したものと施さないものの2体を製作しており、ここではそれぞれType 1a, Type 1bと呼ぶこととする。Type 2は直交する桁の交差部をモデル化するために、直交する桁のウェブを模した板が挿入されており、その板の両側に $R = 25, 30, 35, 40, 45, 50$ mmの6種類のスカラップを含んでいる。Type 1試験体と同様に廻し溶接のあるものとならないものの2体を製作しており、それぞれType 2a, Type 2bと呼ぶこととする。

疲労試験は3点曲げで行った。図-2に試験状況を示す。下限荷重は1 tonfとし、荷重範囲は40~45 tonf、荷重繰り返し速度は1~2 Hzである。なお、Type 2a試験体ではR25, R30, R35のスカラップのあるフランジを引張側にして試験を行ったが、試験の進行とともに、後述するようにスカラップ径が大きい方が疲労強度が低いことが明らかになったことから、Type 2b試験体ではR40, R45, R50のスカラップのあるフランジを引張側にして試験を行った。

3. 疲労試験結果

疲労き裂の発生状況を図-3に示す。

Type 1試験体では、疲労き裂はいずれもスカラップにはさまれたフランジ板の、載荷点から離れた側(支点に近い側)の溶接止端部で発生した。疲労き裂は上フランジ側、下フランジ側ともに発生している。ここではこのフランジ板のスカラップにはさまれた領域をフランジ

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

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 東京工業大学大学院修士課程

**** 正会員 工博 三菱重工業(株) 広島研究所

表-1 試験材の化学成分・機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	C ×10 ²	Si ×10 ²	Mn ×10 ²	P ×10 ³	S ×10 ³
SM490YA	9	404	551	22	17	35	129	18	4
SM490YA	16	441	559	25	16	40	124	14	3

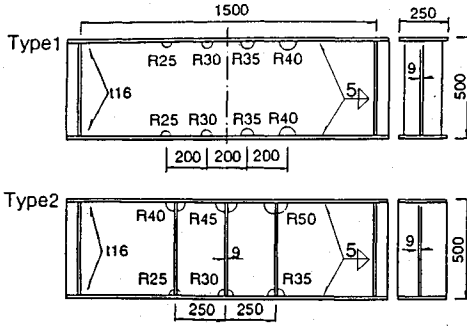


図-1 試験体の形状・寸法

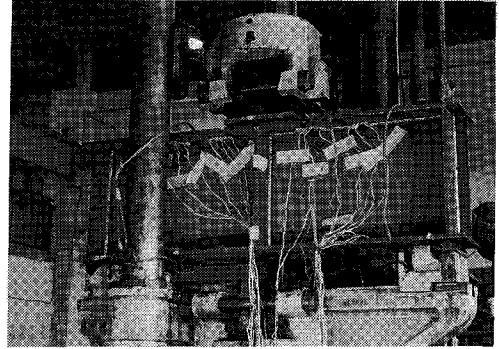


図-2 試験状況

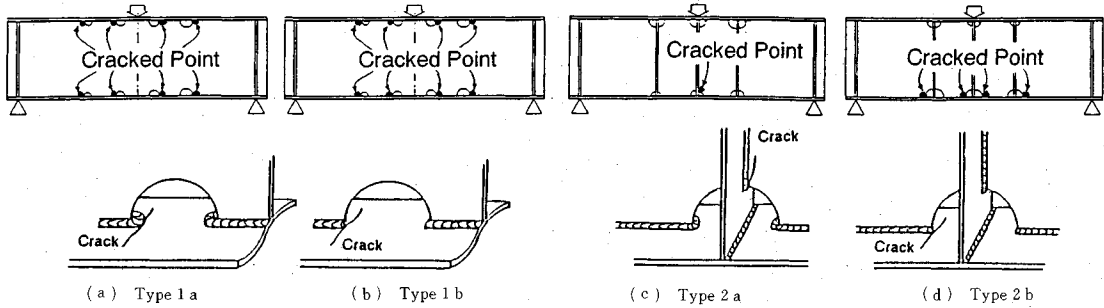
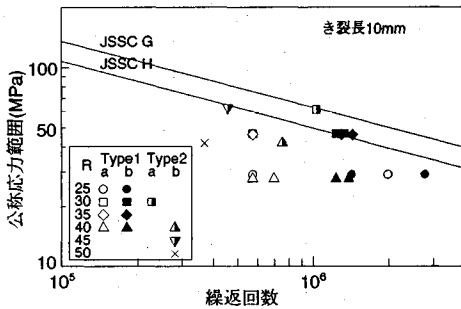
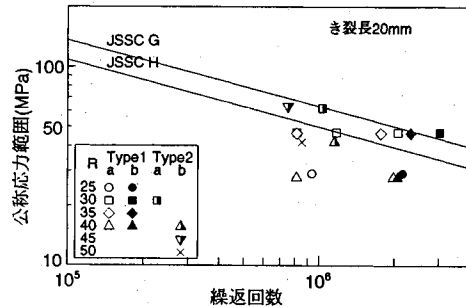


図-3 疲労き裂の発生性状



(a) き裂長 10 mm



(b) き裂長 20 mm

図-4 公称応力範囲で整理した疲労強度

ギャップと呼ぶことにする。Type 2a 試験体では、疲労き裂は載荷点直下の引張側スカラップ ($R=30$ mm) の、交差板との溶接止端から発生し、鉛直に進展した。Type 2b 試験体では引張側フランジのスカラップに、Type 1 試験体と同様にフランジギャップ部の支点側の溶接止端部でき裂が発生した。

図-4 に公称曲げ応力範囲と疲労き裂の表面長さが 10

mm および 20 mm になったときの寿命との関係を示す。日本鋼構造協会 (JSSC) の疲労設計指針⁵⁾では、本ディテールは G 等級 (2×10^6 回で 50 MPa) としている。したがって、図中には G 等級および JSSC 指針で最も低い等級である H 等級 (2×10^6 回で 40 MPa) の設計曲線を示した。試験結果は H 等級の設計曲線よりもはるかに低い領域にプロットされている。このディテール

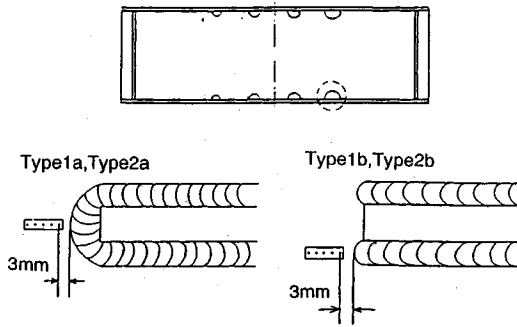


図-5 ひずみ測定位置

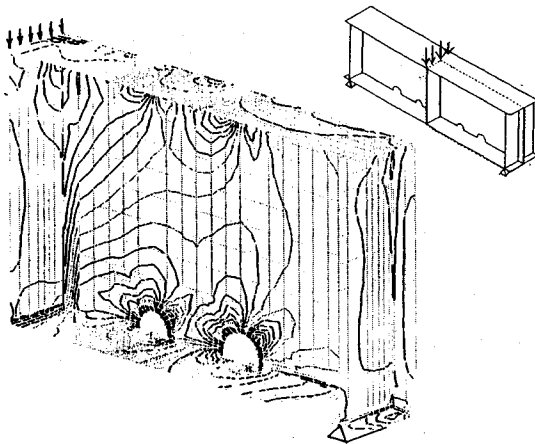
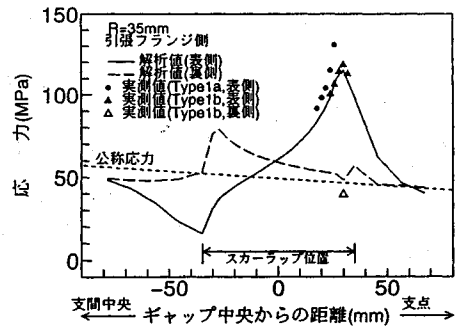


図-6 Type 1 試験体の等主応力線図

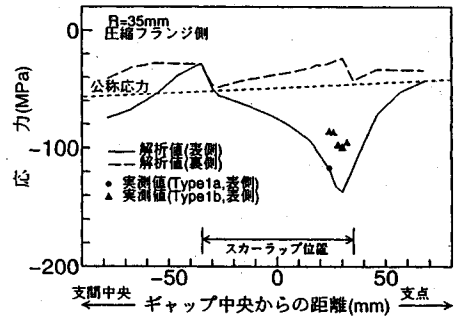
は、ECCS の疲労試験指針では継手分類 71 (2×10^6 回で 71 MPa), BS 5400 および DNV では F 等級 (2×10^6 回で 68 MPa) とされている。JSSC 指針の等級分類 G は、文献 3) の補強フランジディテールの実験結果に基づいて、他の指針類よりもかなり低く決められたものである。しかし、ここでの結果は、このディテールに対する疲労設計は公称曲げ応力に対して JSSC の H 等級を用いてもまだ不十分であることを示している。また、この低い疲労強度は通常の公称応力を用いた疲労照査を行う範囲を外れているといえる。

4. スカラップ周辺の応力分布

スカラップ周辺の応力分布を、ひずみの実測と有限要素解析により検討した。FEM 解析ではシェル要素を用いている。このような局所の応力を検討する際には溶接ビードの存在は無視できない。ここでは既存の研究⁶⁾および予備的な検討に基づいて、溶接ビード部分の板厚を母板の板厚に脚長の 1/2 加えたものとした。ひずみの測定は、ゲージ長 1 mm の 3 軸ゲージおよびゲージ長 1 mm の応力集中ゲージを用いて行った。図-5 にひずみ測定位置を示す。



(a) 引張フランジ側



(b) 圧縮フランジ側

図-7 Type 1 試験体のフランジギャップ部の応力分布

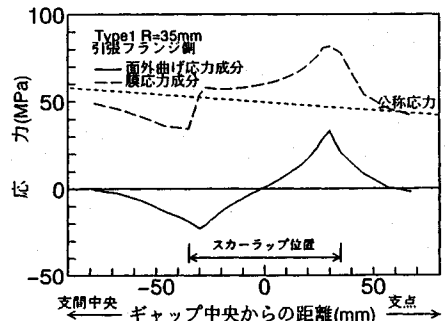


図-8 フランジギャップ部の膜応力成分と面外曲げ応力成分

(1) ウェブスカラップディテール (Type 1)

図-6 にメッシュ分割図および FEM 解析により求められた等主応力線図の例を示す。スカラップの溶接止端部に非常に高い応力集中が生じていることがわかる。

フランジギャップ部の応力について、FEM 解析結果を実測応力および単純梁理論による公称応力と併せて図-7 に示す。実測応力と FEM 解析による応力とを比較すると、このような局所の応力を対象としているのにもかかわらずよい一致をしているといえるが、全体的に FEM 解析結果よりも実測応力値の方がピーク応力が若干高くなる。これは FEM 解析においてスカラップ始点部付近の溶接ビードの影響がまだ十分に取られていなかったためと考えられる。

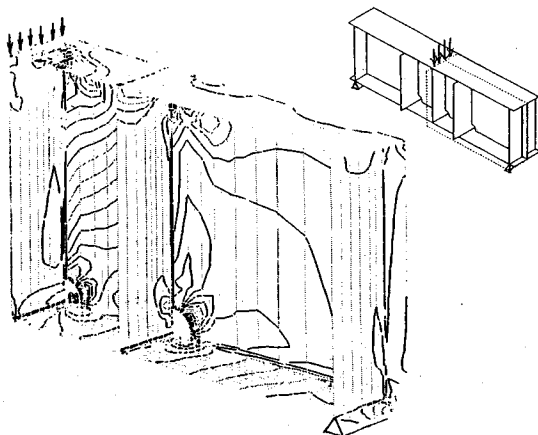


図-9 Type 2 試験体の等主応力線図

応力の急激な変動はフランジ裏側よりもフランジ表側（ウェブ・フランジ溶接側）で著しい。引張フランジ側のスカラップでは支点側の溶接止端付近で応力が急増し、公称応力の3倍近くにまで達する一方、支間中央側の支点部付近では急減する。また圧縮フランジ側スカラップではこれと逆の傾向がみられる。実測応力より、廻し溶接のあるものの方が無いものよりピークの応力値が高いといえる。

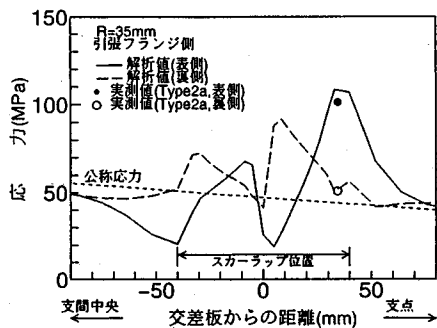
図-8は試験体 Type 1 の FEM 解析で得られた応力分布を膜応力成分と面外曲げ応力成分に分離した結果である。フランジギャップ部に局部的な曲げが作用していることがわかる。また膜応力、面外曲げ応力成分ともにスカラップ始点付近で応力が急変する傾向がみられる。

(2) 桁交差ディテール (Type 2)

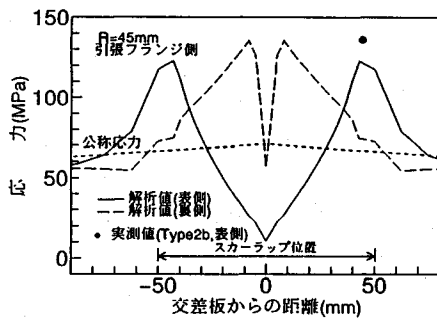
図-9に FEM による等主応力線図を示す。スカラップにかこまれたフランジギャップ部および交差板のスカラップ側溶接止端に非常に高い応力集中が生じている。

フランジギャップ領域について、実測応力、単純梁理論に基づく公称応力および FEM 解析結果を図-10に示す。図-10 (a) は載荷点から 250 mm 離れた位置にあるスカラップ、図-10 (b) は載荷点直下での引張側のスカラップでの応力分布を示している。図-10 (a)、図-7 (a) より、スカラップ始点部付近の応力のピーク値は、交差板のあるものの方が無いものより若干小さいことがわかる。これはスカラップ部に生じる局部的な変形が交差板の存在によって拘束されるためと考えられる。また Type 2 の試験体ではスカラップ始点部付近に加えてスカラップ中央部分（交差板が結合されている位置）でも応力の急変動がみられる。

載荷点直下（図-10 (b)）では、下フランジ上面のスカラップ始点位置での応力が引張側に、交差板位置での応力が圧縮側に急変動する傾向が見られ、他とは異なった応力分布となっている。これは荷重が交差板を通



(a) 載荷点より 250 mm 離れた位置のスカラップ



(b) 載荷点下のスカラップ

図-10 Type 2 試験体のフランジギャップ部の応力分布

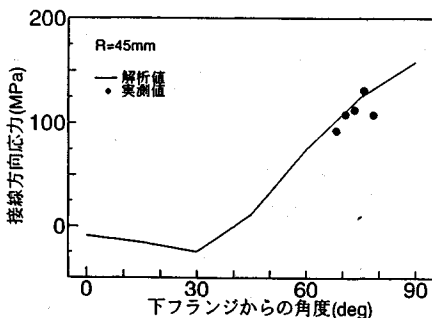


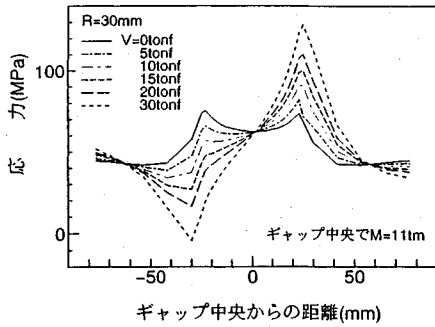
図-11 Type 2 試験体のスカラップ周方向応力分布（載荷点直下）

して直接下フランジに伝えられ、下フランジが交差板に押されるためであると考えられる。

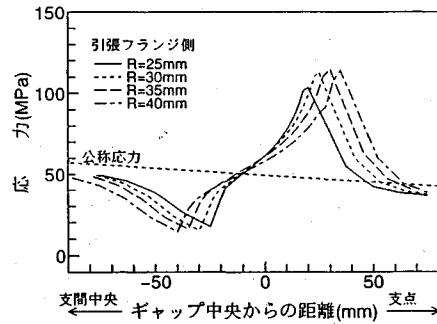
スカラップの周方向に沿った接線方向応力の分布を図-11に示す。解析値と実測値はよく一致している。交差板との溶接部付近で非常に高い応力が生じており、これは図-10 (b) に示したスカラップ始点部付近の応力よりもやや高い値となっている。

(3) せん断力の影響

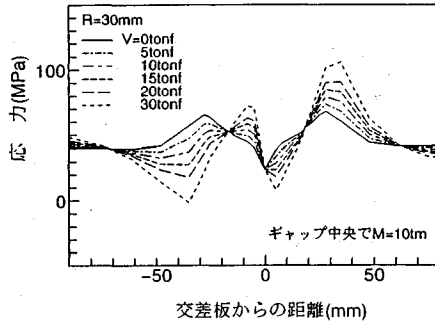
フランジギャップの両側のすみ肉溶接止端での特徴的な応力分布は、せん断力の影響と考えられる。図-12に、ここでのモデルに対して曲げモーメントを一定としてせん断力を変えた FEM 解析結果を示す。解析はスカラップ



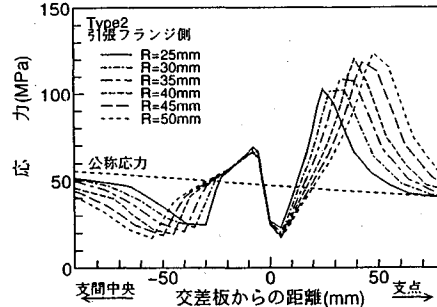
(a) Type 1, フランジギャップ部



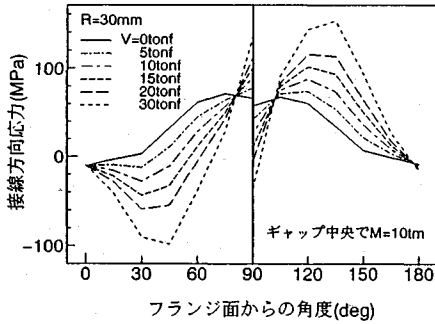
(a) Type 1, フランジギャップ部



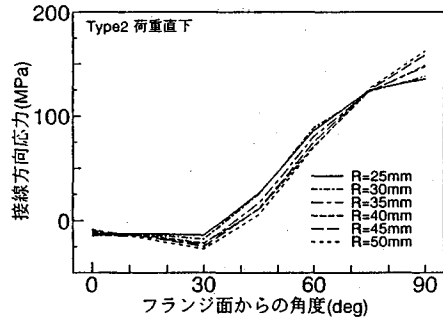
(b) Type 2, フランジギャップ部



(b) Type 2, フランジギャップ部



(c) Type 2, スカラップ周方向, 載荷点下

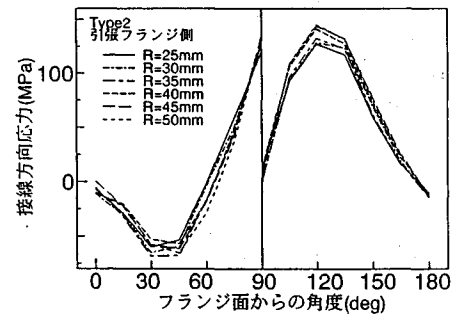


(c) Type 2, スカラップ周方向, 載荷点下

図-12 せん断力がフランジギャップ部応力に及ぼす影響

位置を固定したモデルに対して荷重位置を任意に動かし、かつスカラップ位置での曲げモーメントが等しくなるように荷重の大きさを調整して行った。

Type 1, Type 2 とも、純曲げの状態 (せん断力 $V=0$) ではフランジギャップの両端の溶接止端は対称な形の応力分布となり、応力集中も同程度であるのに対して、せん断力が増すにつれ支間中央側始点付近では応力が急減し、逆に支点側始点部では急増する傾向が見られる。またスカラップの交差板側の溶接部付近の応力もせん断力の増加に伴って増加している。すなわちスカラップ始点部付近の応力分布はそこに作用する曲げモーメントだけでなく、せん断力の影響も受け、せん断力と曲げモーメントとの比率が増すほど応力集中現象は著しくなる。



(d) Type 2, スカラップ周方向, 載荷点から 250 mm 位置

図-13 スカラップ径が応力分布に及ぼす影響

したがって公称曲げ応力のみで面内スカラップを含む構造ディテールの疲労照査を行った場合、スカラップの始点部 (特に支点側の始点)、あるいは交差板との溶接

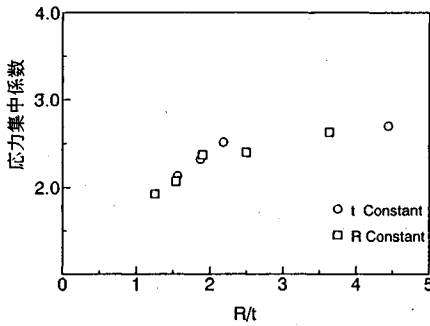


図-14 応力集中係数と R/t の関係

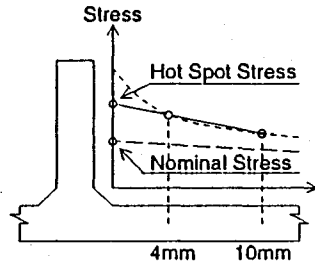
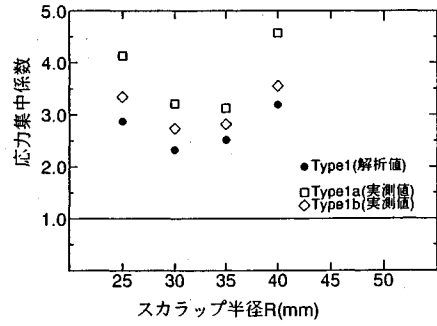


図-15 ホットスポット応力の求め方

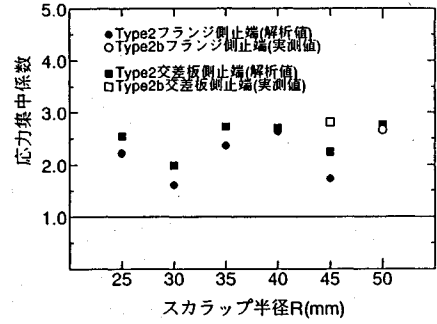
部に公称応力からは予想もつかないような応力集中が生じ、これが疲労損傷を引き起こす恐れがある。よって面内スカラップ構造ディテールを含む部材を設計する際には、せん断力の影響を十分に考慮しなければならないといえよう。

(4) スカラップ径、フランジ厚比の影響

スカラップ径が応力集中に与える影響を検討するために、せん断力の大きさが等しくなるようスカラップ位置を固定し、フランジ板厚 t を一定にしてスカラップ径 R を変化させた場合、およびスカラップ径 R を一定にしてフランジ板厚 t を変化させた場合について解析を行った。板厚 t を一定にしてスカラップ径 R を変化させた場合の解析結果を図-13に示す。フランジギャップ部の応力のピーク値はスカラップ半径が大きくなるにつれてやや増加している。交差板側の溶接部についてみると、荷重直下のスカラップについてはスカラップ径の増加とともに応力が増加しているが、載荷点から離れた位置でのスカラップについてはスカラップ径にそれほど大きな影響を受けていない。図-14に、 R/t と後述する応力集中係数の関係を示す。スカラップ径が大きくなるにしたがって応力集中係数が増加しているが、 R/t が2以上では応力集中の増加の程度は小さくなる。したがってスカラップの寸法はできるだけ小さい方が望ましいといえる。またすべてのデータはほぼ同一の曲線上にあることから、せん断力が一定の場合には R/t をパラメータとすることにより応力集中の程度を整理できる。すなわち、スカラップ部の応力挙動を支配するパラメータはせん断



(a) Type 1



(b) Type 2

図-16 応力集中係数の解析値と実測値

力と R/t であるといえる。

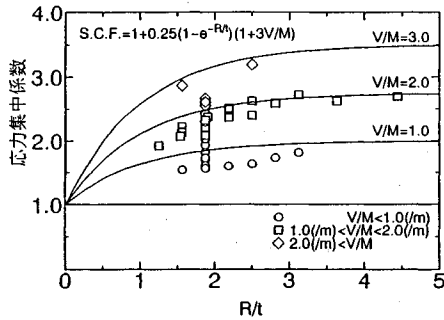
5. ホットスポット応力による疲労照査

(1) ホットスポット応力の推定方法

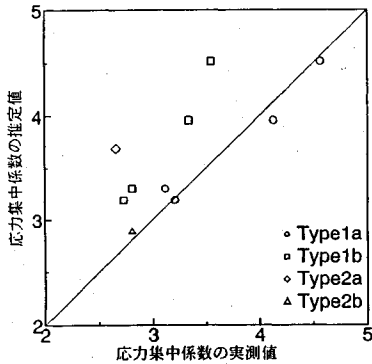
本研究では過去の検討結果^{7)~9)}に基づいて、ホットスポット応力は図-15に示すごとく溶接止端部から4mmと10mmの位置の実測応力を直線で結び、その直線を用いて溶接止端部位置での応力を外挿した値とした。このように定義したホットスポット応力と公称曲げ応力の比を応力集中係数と呼ぶことにする。

図-16に応力集中係数の解析値と実測値を示す。

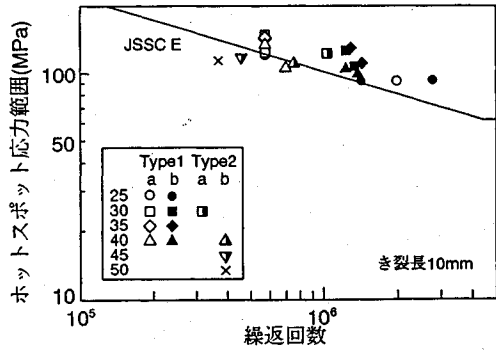
Type 1a, Type 1b 試験体の同一のスカラップディテール間での実測値を比べると、いずれも Type 1a 試験体の方が応力集中が著しい。これは廻し溶接により溶接止端部の剛性が高められることの影響であると考えられる。解析値は Type 1a, Type 1b のどちらの実測値よりも小さな値となっているが、定性的な傾向はよく表現できているといえる。Type 2 試験体の結果は、スカラップ部のフランジ側止端と交差板側止端でのものをともに示した。なお、応力集中係数を算出する際の公称応力はすべて下フランジ上面位置での値としている。載荷点直下にあるスカラップ半径 30, 45 mm の応力集中係数は、載荷点から 250 mm 離れた位置にある他のスカラップと比べて応力集中が低い。また、すべてのスカラップ径について、交差板側での応力集中係数がややフランジ側で



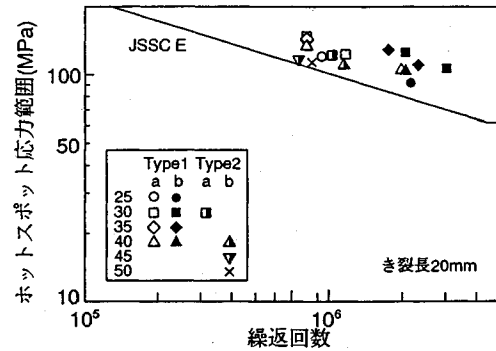
図一17 応力集中係数と R/t, V/M の関係



図一18 応力集中係数の実測値と推定値



(a) き裂長 10 mm



(b) き裂長 20 mm

図一19 ホットスポット応力範囲で整理した疲労強度

の値を上回っているが、その差はせん断力の違いによる差と比較するとそれほど大きなものではない。

図一17に、これまでに述べた全解析ケースで得られた応力集中係数をまとめて示す。図中の記号はせん断力と曲げモーメントの比 V/M によって区別して示している。ただし、交差板があるディテールで載荷点直下のデータは、応力分布が特殊な形状を示すことから、除外している。同じレベルの V/M の場合、 R/t が大きくなるにしたがって応力集中係数はやや増加する傾向にある。また V/M が大きい荷重条件の方が応力集中係数が大きくなっており、その影響は R/t の影響よりも大きいことがわかる。

図一17より、次式によりスカラップ部の応力集中係数がほぼ推定できるものとした。

$$S.C.F. = 1 + \alpha \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{t}\right) \right) \left(1 + 3.0 \frac{V}{M} \right) \dots\dots (1)$$

V : せん断力 (tonf)

M : 曲げモーメント (tonf·m)

R : スカラップ径

t : 板厚さ

α : 係数

$\alpha=0.25$ の場合の曲線を図中に示すが、この場合上式による推定値は解析値の傾向をよく表している。しかし解

析値は実測値に比べて小さい傾向にあることから、実際の部材での応力集中を推定するためには、図一16を参考にして、 α をいくぶん大きくとる必要がある。検討の結果、 $\alpha=0.4$ とすることにより式 (1) でほぼ安全側の推定値を得られることがわかった。図一18に、 $\alpha=0.4$ のときの実測値と推定値の関係を示す。

(2) ホットスポット応力による疲労照査

表面でのき裂長さ 10 mm の場合と、き裂が進展した状態の 20 mm の場合の疲労試験結果をホットスポット応力で整理して図一19に示す。疲労強度を公称応力で整理した場合 (図一4)、各点の散らばりが大きいのに対して、ホットスポット応力で整理した場合にはばらつきは小さくなっている。き裂長が 10 mm の時点の寿命の場合にはやや JSSC の E 等級を下回っているものもあるが、き裂長 20 mm では各点は JSSC の E 等級曲線をほぼ下限とする位置に分布している。したがってここでのようなスカラップディテールに対する照査方法として、公称応力よりホットスポット応力を用いる方が、疲労強度をより正確に把握できるものと考えられる。

6. 結 論

1. スカラップ内のギャップ部には、せん断変形によって局部的に非常に高い応力集中が発生する。応

力集中の程度はせん断力の影響を大きく受け、せん断力が大きくなるにつれて応力集中率が大きくなる。よって面内スカラップ構造ディテールを含む部材を設計する際には、せん断力の影響を十分に考慮しなければならない。

2. スカラップ内の応力集中の程度は、スカラップ半径とフランジ板厚の比 R/t が小さくなるほど小さくなる。よってスカラップ半径はできるだけ小さい方が望ましい。
3. スカラップ始点で廻し溶接を施したディテールでは、廻し溶接を施さないディテールよりも高い局部応力が発生する。
4. 面内スカラップディテールの疲労強度を公称応力範囲により整理した場合、JSSCの最も低い等級であるH等級を適用しても十分ではなく、公称応力による疲労照査は不可能である。
5. ホットスポット応力と公称応力との比を応力集中係数として定義し、応力集中係数をスカラップ半径とフランジ板厚の比 R/t およびせん断力と曲げモーメントの比 V/M から推定する式を提示した。
6. ホットスポット応力範囲で疲労強度を整理した結果、実験結果はJSSCのE等級を下限とする狭い範囲におさまった。このことから、面内スカラップディテールの疲労強度を把握するためには、ホットスポット応力による疲労照査手法が有効であること

が明らかになった。

参考文献

- 1) 三木千壽・坂野昌弘・館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷データベースの構築とその分析、土木学会論文集、第392号、1988.4.
- 2) 岩崎雅紀・名取暢・深沢誠・寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策、横河橋梁技報、No.18、1989.
- 3) 三木千壽・中村賢造・田中雅人：既設鋼桁橋下フランジ補強ディテールの疲労強度、構造工学論文集、Vol.37 A、1991.
- 4) 田島二郎・山下清明：曲げ部材のスカラップ周辺の応力集中について、土木学会第41回年次講演会概要集、1986.
- 5) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説：日本鋼構造協会、1993.
- 6) Matoba, M., Machida, S., Yoshinari, H. and Nishimura, R. : Definition of hot spot stress in welded plate type structure for fatigue assessment PART 2 3rd Report—Derivation of hot spot stress by finite element analysis—, IIW XIII-1448 1992.
- 7) Huther, F. : Recommendation for Hot Spot Stress Definition in Welded Joints, IIW WG XIII/XV, 1990.
- 8) Yagi, J., Machida, S., Tomita, Y., Matoba, M. and Kurosaki, T. : Definition of Hot Spot Stress in Welded Plate Type Structure for Fatigue Assessment, IIW XIII-1414, 1991.
- 9) 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.38 A、1992.

(1993.4.26 受付)

FATIGUE STRENGTH OF SCALLOP DETAILS IN STEEL BRIDGES

Chitoshi MIKI, Kazuo TATEISHI, Kenji ISHIHARA and Katsuya KAJIMOTO

Fatigue strengths of scallop details in welded structural members were investigated by experiment and FEM analysis. Fatigue strength of this detail based on nominal stress was extremely low because high stress concentration occurred in the gap of scallop. Fatigue strength based on hot spot stress are plotted on narrow band above the JSSC's E class design curve (80 MPa for 2×10^6 Cycles), which shows that fatigue assessment method based on the hot spot stress is valid for estimating fatigue strength of scallop details.