

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

三木 千壽¹・館石 和雄²

¹フェロー 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)

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

鋼橋のI形断面部材に設けられるスカラップディテール周辺の局部応力を有限要素解析により求め、整理することにより、スカラップの大きさやフランジ板厚などの幾何学的なディテール形状や荷重条件から簡易に応力集中係数を推定するための手法を明らかにした。この手法をもとに、スカラップディテールの疲労設計手法について検討し、せん断の影響をとりこんだ疲労設計曲線の適用方法を提案した。

KeyWords: fatigue, cope hole, local stress, shear deformation

1. はじめに

鋼橋の部材交差部、板継ぎ部などに設けられるスカラップ近傍では、剛性の急変により高い応力集中が生じることが明らかとなっている¹⁾。特にスカラップ内のフランジ板にせん断変形が生じる場合には応力集中の程度が著しく、疲労強度が極端に低くなることから、梁理論により求めた曲げ応力、すなわち公称応力を基準とした疲労照査を適用するには注意を要する²⁾。このように公称応力と局部応力とに著しい差が生じるようなディテールの疲労強度を照査するためには、局部応力基準の疲労照査手法を適用するのが合理的である。しかし局部応力基準の疲労照査を行なうためには、ディテール周辺の応力状態をFEMなどの応力解析によって詳細に求める必要がある。スカラップディテールは実橋部材において日常的に設けられるものであることから、部材の設計時にそれらすべての箇所において応力状態を求め、疲労照査を行なうことは現実的には不可能である。そこで本研究では、通常の梁理論から求められる公称応力と、ディテールの形状や荷重条件に関するパラメータから、スカラップディテールに生じる局部応力を簡易に推定する手法を提案する。また提案した手法を基に、スカラップディテールの疲労設計手法について検討する。

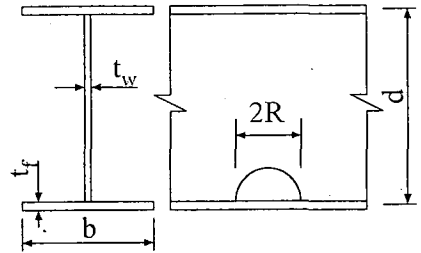


図-1 対象断面

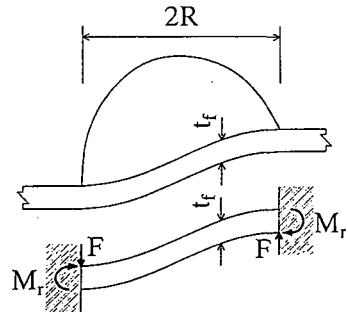


図-2 せん断変形のモデル

2. スカラップ部の局部応力を推定するためのパラメータの選択

ここでは図-1に示すようなI型断面の梁を検討の対象とする。スカラップ内のフランジ板にせん断変形が生じる状態は、図-2に示すように、両側固定梁の支点

に相対変位が生じたときの状態と近いものと仮定する。このとき、単位幅あたりの固定端モーメント M_r によって梁の上、下縁に生じる応力は、梁の半長 R (スカラップ半径に相当)、梁の高さ t_f (フランジ厚に相当)、反力 F と次の関係にある。

$$\sigma_r \propto \frac{RF}{t_f^2} \quad (1)$$

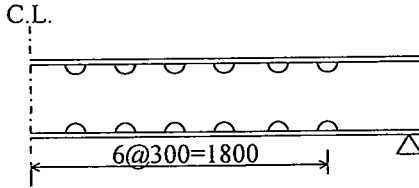


図-3 解析モデル

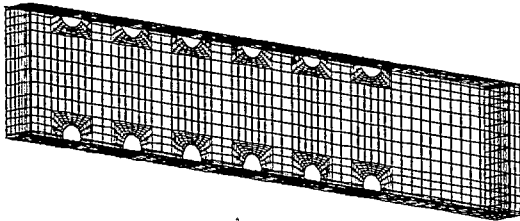


図-4 要素分割図

ここで、支点反力 F は単位幅あたりのフランジ板に生じているせん断力と等しいと仮定する。すなわち、

$$F = \tau t_f \quad (2)$$

ここに τ はフランジ板のせん断応力である。式(2)を(1)に代入することにより、

$$\sigma_r \propto \frac{R\tau}{t_f} \quad (3)$$

となり、これを公称曲げ応力 σ_n で無次元化すると、

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_n} \propto \frac{R}{t_f} \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (4)$$

となる。

ここで、I型断面梁のフランジとウェブの交差部でのせん断応力は、せん断流理論によれば次式のように表わされる。

$$\tau \propto \frac{Vbd}{I} \frac{t_f}{t_w} \quad (5)$$

ここに V は梁に作用するせん断力、 b はフランジ幅、 d は桁高、 I は梁の断面二次モーメント、 t_w はウェブ厚である。これを公称曲げ応力で除して整理することにより、

$$\frac{\tau}{\sigma_n} \propto \frac{Vb}{M} \frac{t_f}{t_w} \quad (6)$$

が得られ、これを式(4)に代入することにより、

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_n} \propto \frac{R}{t_f} \frac{Vb}{M} \frac{t_f}{t_w} \quad (7)$$

が得られる。

以上の考察より、スカラップ部の局部応力を推定するためのパラメータとして、本研究では次の3つに着目する。

1. スカラップ半径とフランジ厚の比(R/t_f)
2. せん断力とフランジ幅の積と曲げモーメントの比(Vb/M)
3. フランジ厚とウェブ厚の比(t_f/t_w)

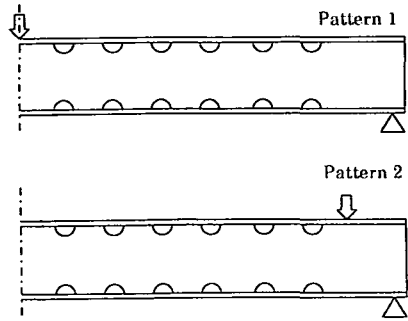


図-5 荷重方法

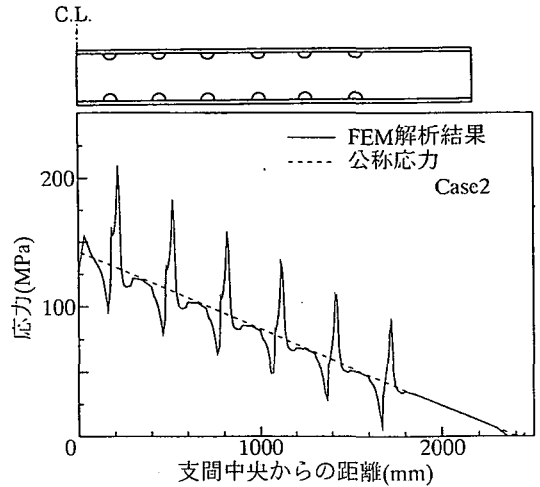


図-6 応力分布の例

3. 応力解析手法

スカラップ周辺の応力分布をシェル要素を用いたFEMにより解析した。解析モデルを図-3に、要素分割図の例を図-4に示す。ウェブの上下に同径の6つのスカラップを設けている。要素サイズの最小値は2mmとした。また溶接ビードの剛性を取り入れるため、溶接線の部分では板厚を増加させて解析を行っている²⁾。表-1に解析ケースの一覧を示す。スカラップ半径、フランジ厚、フランジ幅、ウェブ厚、ウェブ高さ、荷重パターンをパラメトリックに変化させて解析を行なった。表中には、前章で取上げた3つのパラメータの存在範囲もともに示した。荷重パターンを図-5に示す。パターン1の荷重(3点曲げ荷重)では、せん断力が一定であるのに対して曲げモーメントがスカラップの位置に応じて線形的に変化することより、パラメータ Vb/M がスカラップ毎に異なることになる。

表-1 解析条件

ケース	R (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	b (mm)	d (mm)	支間 (mm)	R/t_f	載荷 方法	Vb/M	t_f/t_w
1	25	12	9	250	484	4800	2.08	1	0.11-0.37	1.33
2	25	24	9	250	484	4800	1.04	1	0.11-0.37	2.67
3	25	36	9	250	484	4800	0.69	1	0.11-0.37	4.00
4	35	12	9	250	484	4800	2.92	1	0.12-0.38	1.33
5	35	24	9	250	484	4800	1.46	1	0.12-0.38	2.67
6	35	36	9	250	484	4800	0.97	1	0.12-0.38	4.00
7	45	12	9	250	484	4800	3.75	1	0.12-0.38	1.33
8	45	24	9	250	484	4800	1.88	1	0.12-0.38	2.67
9	45	36	9	250	484	4800	1.25	1	0.12-0.38	4.00
10	55	12	9	250	484	4800	4.58	1	0.12-0.39	1.33
11	55	24	9	250	484	4800	2.29	1	0.12-0.39	2.67
12	55	36	9	250	484	4800	1.53	1	0.12-0.39	4.00
13	25	12	18	250	484	4800	2.08	1	0.11-0.37	0.67
14	35	12	18	250	484	4800	2.92	1	0.12-0.38	0.67
15	45	12	18	250	484	4800	3.75	1	0.12-0.38	0.67
16	55	12	18	250	484	4800	4.58	1	0.12-0.39	0.67
17	25	12	27	250	484	4800	2.08	1	0.11-0.37	0.44
18	35	12	27	250	484	4800	2.92	1	0.12-0.38	0.44
19	45	12	27	250	484	4800	3.75	1	0.12-0.38	0.44
20	55	12	27	250	484	4800	4.58	1	0.12-0.39	0.44
21	25	12	9	250	984	4800	2.08	1	0.11-0.37	1.33
22	35	12	9	250	984	4800	2.92	1	0.12-0.38	1.33
23	45	12	9	250	984	4800	3.75	1	0.12-0.38	1.33
24	55	12	9	250	984	4800	4.58	1	0.12-0.39	1.33
25	25	12	9	250	1984	7200	2.08	1	0.07-0.25	1.33
26	35	12	9	250	1984	7200	2.92	1	0.08-0.25	1.33
27	45	12	9	250	1984	7200	3.75	1	0.08-0.25	1.33
28	55	12	9	250	1984	7200	4.58	1	0.08-0.25	1.33
29	25	12	9	125	484	4800	2.08	1	0.06-0.19	1.33
30	35	12	9	125	484	4800	2.92	1	0.06-0.19	1.33
31	45	12	9	125	484	4800	3.75	1	0.06-0.19	1.33
32	55	12	9	125	484	4800	4.58	1	0.06-0.19	1.33
33	25	12	9	500	484	4800	2.08	1	0.23-0.74	1.33
34	35	12	9	500	484	4800	2.92	1	0.23-0.75	1.33
35	45	12	9	500	484	4800	3.75	1	0.23-0.76	1.33
36	55	12	9	500	484	4800	4.58	1	0.23-0.78	1.33
37	25	12	9	250	484	4800	2.08	2	0	1.33
38	25	36	9	250	484	4800	0.69	2	0	4.00
39	35	12	9	250	484	4800	2.92	2	0	1.33
40	35	36	9	250	484	4800	0.97	2	0	4.00
41	45	12	9	250	484	4800	3.75	2	0	1.33
42	45	36	9	250	484	4800	1.25	2	0	4.00
43	55	12	9	250	484	4800	4.58	2	0	1.33
44	55	36	9	250	484	4800	1.53	2	0	4.00

4. 解析結果

図-6に解析結果の一例を示す。横軸は支間中央からの距離であり、縦軸はウェブとフランジが交差する線に沿った部材軸方向の応力を示している。スカラップの支点に近い側の端部付近に高い応力集中が見られる。

本解析ではシェル要素を用いていることから、応力のピーク値そのものにはさほど意味がない。しかし前報2)で示したように、溶接止端部からわずかに離れた

位置における応力分布の傾向は解析と実測とでよく一致していることから、スカラップ部での応力集中の程度を判断する指標として、溶接止端部近傍の応力から止端部へ直線外挿して求めたホットスポット応力を用いることとする。ホットスポット応力は溶接止端から4mmと10mmの位置での応力から止端部へ直線外挿して求めた値として定義した^{5),6)}。また、ホットスポット応力と曲げによる公称応力の比を応力集中係数 (Stress

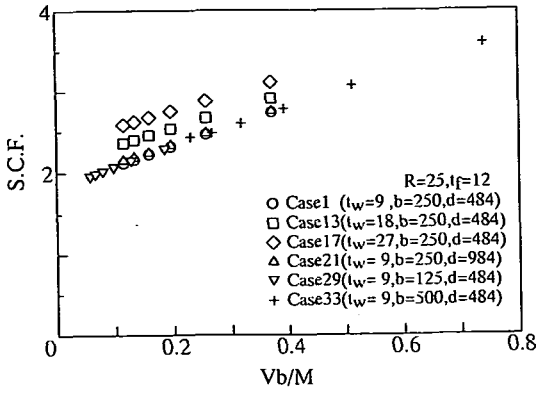


図-7 S.C.F.とVb/Mの関係

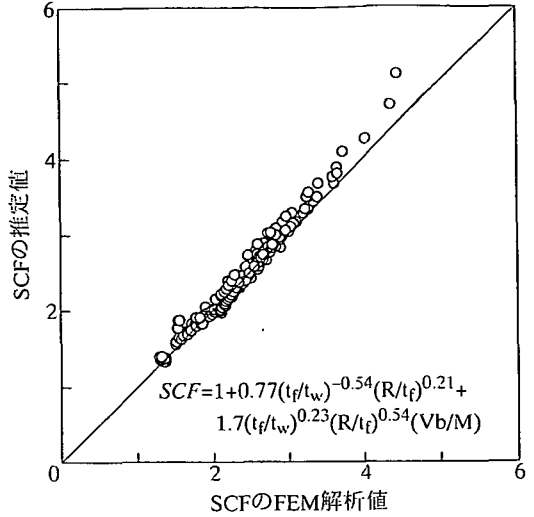


図-9 S.C.F.のFEM解析値と推定値の比較

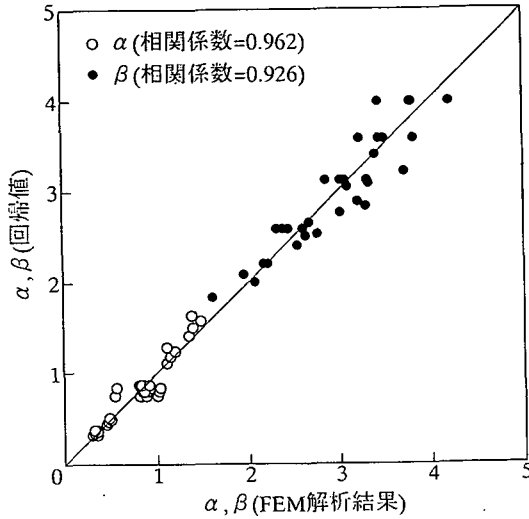


図-8 α, β の回帰結果

Concentration Factor, S.C.F.)として定義した。

図-7にいくつかのケースでの応力集中係数の解析結果を示す。横軸にはパラメータVb/Mをとって示している。それぞれの解析ケースに着目すると、応力集中係数とVb/Mとはほぼ直線関係にあるが、その直線の位置、傾きなどは t_f, t_w, R などによって異なっていることがわかる。これは他の計算ケースについても同様であった。そこで、応力集中係数の推定式として、次に示すようなVb/Mの一次式を仮定した。

$$S.C.F. = \alpha + \beta \frac{Vb}{M} \quad (8)$$

すべての解析ケースについて直線回帰を行い、上式の α と β を求め、さらに α, β を $t_f/t_w, R/t_f$ から推定するために、次式を仮定して回帰分析により未知パラメータを求めた。

$$\alpha = 1 + p_1 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{q_1} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{r_1} \quad (9)$$

$$\beta = p_2 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{q_2} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{r_2} \quad (10)$$

回帰分析の結果、 $p_1 = 0.77, q_1 = -0.54, r_1 = 0.21, p_2 = 1.6, q_2 = 0.23, r_2 = 0.54$ が得られた。図-8に、FEM解析結果から求められた α, β の値と、上式から求められる回帰値との比較を示す。両者は相関係数0.9以上でよく一致しており、 $t_f/t_w, R/t_f$ の2つのパラメータで α, β をほぼ推定することができるといえる。

以上より、応力集中係数の推定式として次式が得られる。

$$S.C.F. = 1 + 0.77 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{-0.54} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{0.21} + 1.7 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0.23} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{0.54} \left(\frac{Vb}{M}\right) \quad (11)$$

図-9に応力集中係数の解析値と式(11)による推定値との比較を示す。様々な断面寸法、荷重条件について解析を行ったにもかかわらず、すべての場合について推定値と解析値とはよく一致しており、式(11)が妥当であることがわかる。ただし、前報2)で示したように、FEM解析値は実測結果と比較して小さめになる傾向がある。そこでこの傾向を考慮に入れるために、前報2)で得られた実測結果を基にしながらかつ行錯誤による検討を行った結果、式(11)の応力増加分を1.5倍した次式によりほぼ安全側の結果が得られることがわかった。

$$S.C.F. = 1 + 1.2 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{-0.54} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{0.21} + 2.6 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0.23} \left(\frac{R}{t_f}\right)^{0.54} \left(\frac{Vb}{M}\right) \quad (12)$$

図-10に、スラップでの応力集中係数の実測値²⁾と、本推定式による推定値との比較を示す。応力集中係数

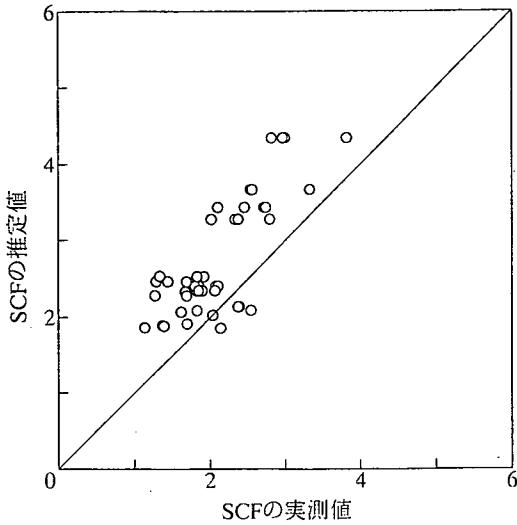


図-10 S.C.F.の測定値と推定値の比較

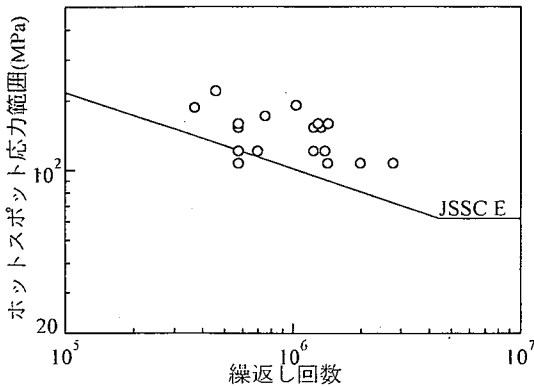


図-11 局部応力で整理した疲労試験結果

の小さい領域で推定値が測定値を下回っている例があるが、全体として推定値と実測値には相関が認められ、また推定値は実測値のばらつきの範囲を概ね安全側にカバーしていることから、式(12)が妥当であるといえる。以上より、式(12)を応力集中係数の推定式として提案する。

次に、過去に実施したスカラップディテールの疲労試験²⁾について、試験体のホットスポット応力を式(12)により推定し、疲労試験結果を再整理した。図-11に、ホットスポット応力範囲と表面でのき裂長が10mmになったときの繰返し回数の関係を示す。1点だけJSSCのE等級を下回っているが、10mmという短いき裂長の時の繰返し回数で示していることを考えると、疲労試験結果はJSSCのE等級をほぼ下限とする領域にばらついているといえる。ここで定義したホットスポット応力を基準としたばあい、疲労強度はほぼJSSCのE等級で照査するのが適当であることが明らかになっており⁶⁾、

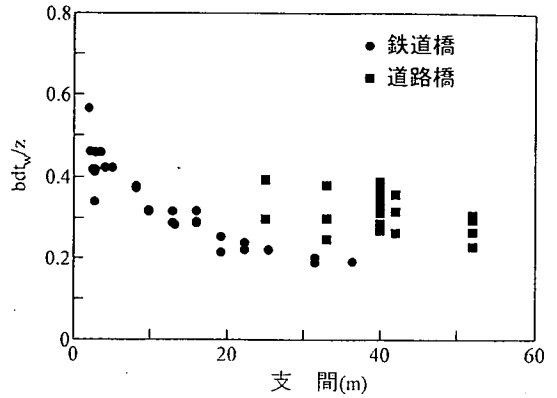


図-12 実橋部材における bdt_w/z

ここでの局部応力の推定結果は妥当であるといえる。

5. スカラップディテールの疲労設計手法

JSSC疲労設計指針⁷⁾では、スカラップディテールの疲労強度を、せん断力などの外力条件とは無関係にG等級(200万回疲労強度:50MPa)と定めている。また、ECCS⁹⁾、BS5400⁸⁾ではそれぞれ71MPa、68MPaの200万回疲労強度を与えているが、それらにおいてもせん断力の影響は考慮されていない。しかし今回の解析および過去の疲労試験²⁾により、スカラップディテールの局部応力はせん断力の大きさに非常に大きく影響を受けることが明らかとなったことから、せん断の影響を取り込んだ疲労設計手法について検討した。

前章ではスカラップ部の局部応力をせん断力、曲げモーメントなどから推定する式を示したが、設計においてはせん断力と曲げモーメントよりもせん断応力と曲げ応力を用いる方が便利な場合が多いことから、ここではせん断応力と曲げ応力の比 τ/σ に着目する。ただし、設計においてはI断面部材のせん断応力として、せん断力をウェブ面積で除した値を用いることが通常であることから、ここでもそれに従うものとした。

パラメータ Vb/M と、 τ/σ との間には次の関係がある。

$$\frac{Vb}{M} = \frac{\tau}{\sigma} \frac{bdt_w}{z} \quad (13)$$

d はウェブ高、 z は断面係数である。ここで新たに無次元パラメータ bdt_w/z が必要となる。このパラメータが実橋梁部材においてどのような範囲に分布しているかについて、鉄道橋、道路橋の標準設計によるI断面プレートガーダー橋の主桁、横桁、縦桁について調査した。鉄道橋については25断面、道路橋については24断面を無作為に抽出した。

図-12に bdt_w/z の存在範囲を示す。横軸には支間をとって示している。道路橋では鉄道橋と比べて若干 bdt_w/z が大きく、また、支間とともに bdt_w/z は減少する傾向

表-2 応力集中係数

(a) τ/σ	(b) S.C.F.	(c) $\tau/\sigma = 0.4$ で のS.C.F.との比	(d) 50MPa/(c)
0	2.50	0.69	72
0.1	2.78	0.77	65
0.2	3.06	0.85	59
0.3	3.34	0.92	54
0.4	3.62	1.00	50
0.5	3.90	1.08	46
0.6	4.18	1.15	43
0.7	4.47	1.23	40
0.8	4.87	1.35	37
0.9	5.28	1.46	34
1.0	5.68	1.57	31

表-3 疲労設計曲線の提案

τ/σ	JSSC 強度等級	200万回 疲労強度
$\tau/\sigma=0$	F	65
$0 < \tau/\sigma \leq 0.4$	G	50
$0.4 < \tau/\sigma \leq 0.7$	H	40

にあるようであるが、両者の相関はそれほど明確でないことから、ここでは安全側をとって bdt_w/z として 0.6 を考えることとする。また、 R/t_f はほとんどの場合 3 以内であると仮定し、安全側の値である $R/t_f = 3$ を考える。このとき、式(12)は次のように書きかえることができる。

$$S.C.F. = 1 + 1.5 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{-0.54} + 2.8 \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0.23} \left(\frac{\tau}{\sigma}\right) \quad (14)$$

さらに t_f/t_w として最小値 1.0、最大値 5.0 を想定し、上式に代入して得られる応力集中係数のうち大きい方をとるものとする。このようにして求めた応力集中係数を表-2に示す。

JSSC においてこの継手を G 等級と分類するにあたっては、文献10)の大型桁試験体の疲労試験結果を基としている。この試験体では、せん断応力と曲げ応力との比 τ/σ が約 0.4 となる。そこで、 τ/σ が 0.4 のときには JSSC の G 等級を適用するのが適当であるものと仮定し、これを基準として τ/σ の影響を考慮するものとした。表-2に、 $\tau/\sigma = 0.4$ のときの応力集中係数を 1 としたときの各 τ/σ での応力集中係数の比、およびその値で G 等級の 200 万回疲労強度である 50MPa を除すことにより求めた 200 万回疲労強度を示す。

τ/σ が 0、すなわちせん断応力が生じない純引張、純曲げの時には 200 万回疲労強度は 72MPa となり、これは ECCS、BS5400 での継手等級分類の 200 万回疲労強

度 71MPa、68MPa とほぼ一致している。諸外国の基準類ではせん断応力の生じない小型試験体による疲労試験結果をもとに設計曲線が定められており、それによる強度等級とほぼ一致していることはここでの設定が合理的であることを示すものであると考えられる。また、スカラップが極端に大きくなった場合を考えるとこのディテールは縦リブ継手試験体にモデル化することができる。JSSC では縦リブ継手試験体の強度等級は G 等級であるが、今回は R/t_f を 3 以下と限定していること、 R が小さいと局部応力が小さくなることを考えると、せん断応力が 0 のときに縦リブ継手試験体よりも高い強度等級を与えることは合理的である。

以上の点および表-2に示される結果を総合的に勘案し、スカラップディテールの疲労照査用の設計曲線として表-3に示す等級を用いることを提案する。

表中には τ/σ が 0.7 以下の場合についてのみ示しているが、これは τ/σ がそれより大きくなると局部応力が非常に高くなり、JSSC に示されている公称応力ベースの疲労照査の適用範囲を越えてしまうためである。このような場合には式(12)または式(14)により求められるホットスポット応力を用い、局部応力基準の疲労照査を行うことが望ましいといえる。

6. まとめ

- スカラップ内部のフランジ板に生じるせん断変形に着目し、これを両端固定梁の支点到相対変位が生じる状態にモデル化することにより、スカラップディテールの局部応力を支配するパラメータとして、フランジ厚とウェブ厚の比、スカラップ半径とフランジ厚の比およびせん断力とフランジ幅の積と曲げモーメントの比を抽出した。
- 様々なスカラップ径、フランジ厚、フランジ幅、ウェブ厚、ウェブ高を有する梁モデルに対して有限要素解析を行い、その結果を1)に示すパラメータに着目して整理することにより、スカラップディテールの局部応力がこれらのパラメータから精度よく推定できることを示し、その推定式を提案した。
- 提案した局部応力推定式を、過去に行われた応力測定結果、疲労試験結果によって検証し、それが妥当であることを示した。
- 実橋部材におけるディテール形状の実態を考慮して2)で提案した式を簡略化し、せん断応力と曲げ応力の比と応力集中係数との関係を明らかにした。この結果に基づいて、せん断を考慮したスカラップディテールの疲労照査手法を提案した。

謝 辞: 実橋に関するデータを提供していただいた(財) 鉄道総合技術研究所の杉本一朗氏, 日本道路公団の岩立次郎氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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ディテールの疲労強度, 土木学会論文集, No.483/I-26, 1994.
- 3) Matoba, M., Machida, S., Yoshinari, H. and Nishimura, R.: Definition of hot spot stress in welded plate type structure for fatigue assessment PART2 3rd Report - Derivation of hot spot stress by finite element analysis -, *IIW XIII-1448*, 1992.
- 4) 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.
- 5) Huther, F.: Recommendation for Hot Spot Stress Definition in Welded Joints, *IIW WG XIII/XV*, 1990.
- 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, 1992.
- 7) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説: 技報堂出版, 1993.
- 8) British Standards Institution, BS 5400, Steel Concrete and Composite Bridges, Part 10. Code of Practice for Fatigue,
- 9) European Convention for Constructional Steelwork Technical Committee 6, Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, No.43,
- 10) 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.37A, 1991.

(1996.3.29 受付)

FATIGUE DESIGN FOR COPE HOLE DETAILS IN I-SECTION MEMBERS OF STEEL BRIDGES

Chitoshi MIKI and Kazuo TATEISHI

Local stresses around the cope hole in I-section members of steel bridges were investigated by finite element analysis in order to propose a simple method to estimate the stress concentration factor for the detail from geometrical parameters and loading conditions. Based on the results, fatigue design method for this detail including the influences of shear deformation of the flange plate inside of cope hole was proposed.