

箱断面桁のダイアフラムと下フランジ縦リブの 交差部の疲労強度

三木千壽¹・塩崎匡克²・舘石和雄³・大橋治一⁴

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学生会員 東京工業大学大学院 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
³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)
⁴正会員 本州四国連絡橋公団 設計二課(〒105 東京都港区虎ノ門5-1-15 虎ノ門第45 森ビル)

吊橋箱断面補剛桁のダイアフラム・下フランジ縦リブ交差部の局部応力の発生性状と疲労強度について、疲労試験およびFEM解析により検討した。試験体は箱桁の橋軸直角方向断面をモデル化した大型試験体であり、交差部に様々な大きさのスカラップを有している。結果として、スカラップを小さくすることにより局部応力が低下し、疲労強度が高くなること、および、スカラップを省略するとUリブ内側に高い応力集中が生じ、疲労強度が低下することが明らかとなった。

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

1. はじめに

鋼橋の直交する部材が交差する部分では、溶接線の重なりを避けるためにスカラップを設けることが多い。スカラップをあけた箇所には、剛性の急変のために局部的な応力集中が生じ、とくにせん断変形によってその程度が著しくなることが明らかとなっている¹⁾。この応力集中に起因してスカラップディテールの疲労強度は極端に低くなる場合があり、同種のディテールはせん断力の大きさなどによっては疲労上特に注意しなければならない箇所となる場合がある^{2),3)}。本研究はそのうちのひとつとして、吊橋の箱断面補剛桁のハンガー定着部断面のダイアフラムと下フランジのUリブの交差部について、その局部応力発生挙動および疲労強度に対するスカラップの影響を検討したものである。このディテールに類似のものとして、鋼床版の縦リブ・横リブ交差部があり、その局部応力や疲労強度についてこれまでに多数の研究が行われてきた^{4),5)}。しかし本研究で対象とする箱断面補剛桁のハンガー定着部断面の場合、定着部を支点とする橋軸直角方向の曲げが卓越すること、交差ディテールが引張り側に存在すること、鋼床版のような車輪の直上載荷を考えなくてよいことなどの相違点があることから、新たな検討が必要となる。

本州四国連絡橋の大島大橋の設計に関して行われた研究⁶⁾において、箱断面の橋軸直角方向の断面をモデル化した実寸試験体に対する疲労試験により、箱断面下フランジの補剛のために取り付けられたUリブとダイア

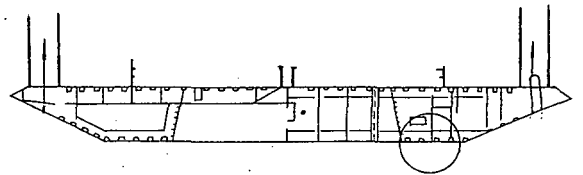


図-1 吊橋箱断面補剛桁

フラムとの交差部に設けられたスカラップ部に高い応力集中が発生し、強度上の弱点になることが指摘された。これを受けて大島大橋では、ハンガーロープ定着部に近い交差部については、Uリブを切断しダイアフラムを通すディテールに変更されている。しかし、このディテールについて、Uリブとダイアフラムとの溶接に裏当金が必要となるなどの疲労上未解決の問題を残している。またスカラップの寸法が応力集中にどのように影響を与えるかなど、構造ディテール形状と局部応力との関係については十分に検討されていない。

2. 試験方法

試験体は図-1に示す箱断面補剛桁の下フランジにおけるUリブとダイアフラムとの交差部をモデル化したものであり、ハンガーロープ取付部を支点とした橋軸直角方向の曲げ変形挙動に着目して製作したものである。試験体の寸法、形状と記号を図-2に示す。試験体は箱断面補剛桁のダイアフラムとUリブの交差部を橋

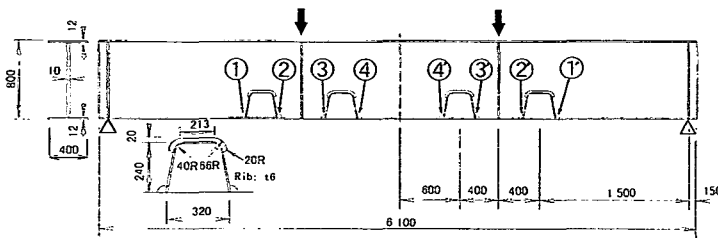


図-2 試験体形状・寸法

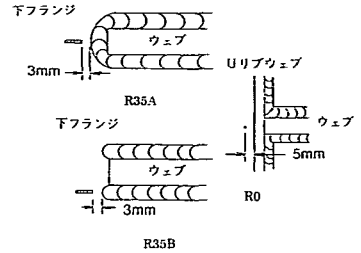


図-3 ひずみ測定位置

表-1 試験体の諸元

| 試験体記号 | スカラップ半径(mm) | 廻し溶接 |
|-------|-------------|------|
| R35A | 35 | 有 |
| R35B | 35 | 無 |
| R15 | 15 | 無 |
| R0 | - | - |

軸直角断面で切り出してモデル化した構造である。鋼材は上下フランジとウェブがSM490YA, UリブがSS400である。スカラップ部の局部応力を問題とするため、Uリブは実寸とし、スカラップディテールの異なる4種類の試験体を製作した。ここでは表-1に示すように、R(スカラップ径) = 35mmで廻し溶接が施してあるものをR35A, R=35mmで廻し溶接が施していないものをR35B, R=15mmで廻し溶接が施されていないものをR15, スカラップがないものをR0と呼ぶことにする。歪みゲージ貼付位置を図-3に示す。R35AおよびR35Bについてはスカラップの下フランジ側溶接止端部から3mm離れた位置に応力集中ゲージを貼付した。R15ではスカラップ内にゲージを貼ることができなかったため歪み測定は行っていない。R0ではUリブ内側のフランジ上に、交差部から5mmの位置に単軸ゲージを貼付した。

荷重は4点曲げにて行い、荷重振幅は30tf~45tfとした。疲労き裂の測定は目視および磁粉探傷試験により行った。

3. 試験結果

R15以外の3体において疲労き裂が発生した。き裂の発生箇所および発見時の繰返し回数の一覧図-4に示す。また、疲労試験後、試験体を疲労破面を露呈し、観察を行なった。疲労破面を図-5に示す。

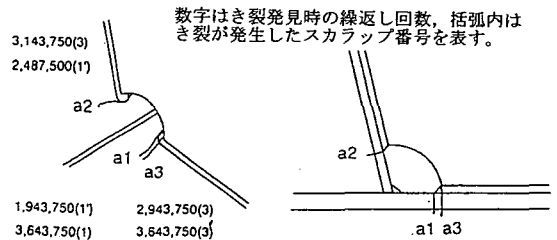


図-4-a R35A試験体

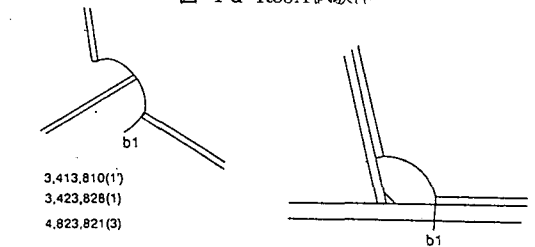


図-4-b R35B試験体

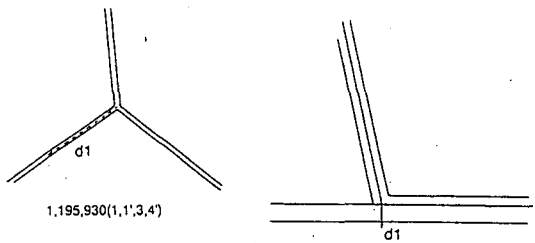


図-4-c R0試験体

図-4 疲労き裂発生性状とき裂発見回数および発見時き裂長さ

R35Aについては、スカラップの下フランジ側廻し溶接部、Uリブ側の廻し溶接部の両方にき裂が発生した。支点に最も近く公称曲げ応力が低いスカラップNo.1,1'(図-2参照)においては、ウェブと下フランジの溶接部の廻し溶接部において、フランジ側の止端に疲労き裂が生じた。等曲げ区間のスカラップNo.3,3'では同じ廻し溶接部のウェブ側の溶接止端部からき裂が生じた。またウェブとUリブの溶接線の廻し溶接部止端にも疲労き裂が発生した。

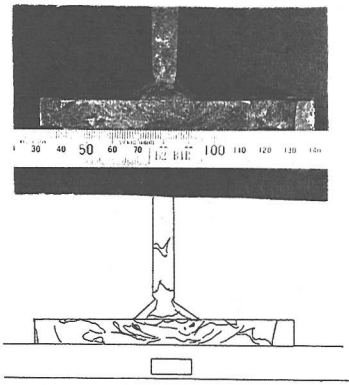


図-5-a a1タイプのき裂

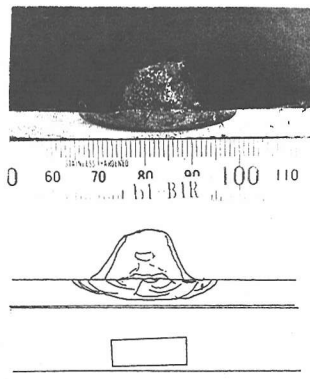


図-5-b a2タイプのき裂

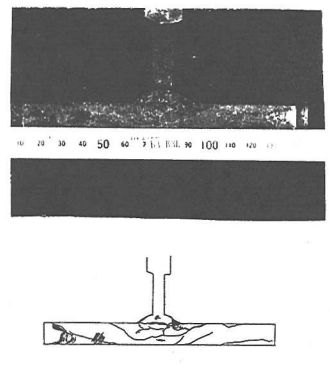


図-5-c a3タイプのき裂

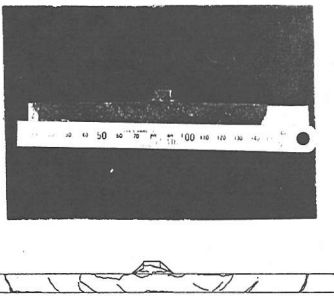


図-5-d b1タイプのき裂

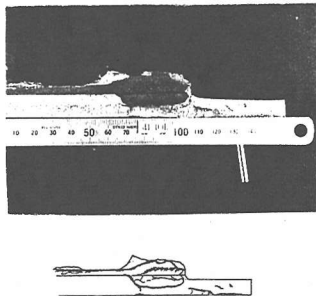


図-5-e d1タイプのき裂

図-5 疲労破面

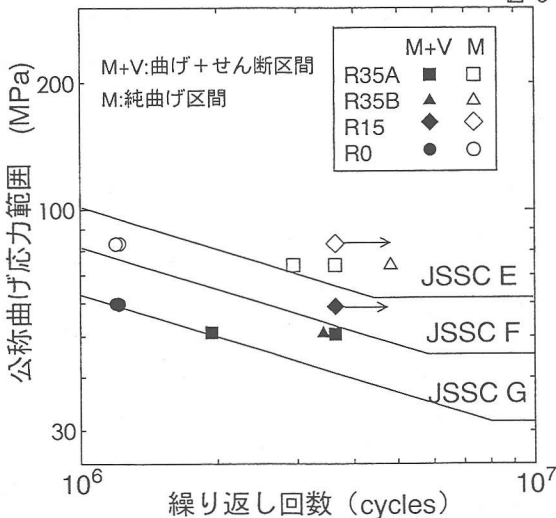


図-6 公称応力で整理した疲労試験結果

R35Bでは公称曲げ応力が最も低いスカラップNo.1,1', および等曲げ区間のスカラップNo.3の3箇所、ウェブ-下フランジ溶接線の端部付近から疲労き裂が発生した。なお、等曲げ区間のスカラップに生じ

たき裂については試験終了後に発見されたものであり、他とは発見時の長さが大きく異なっている。

R0ではウェブ、Uリブ、下フランジの交差部の、Uリブと下フランジの溶接部から疲労き裂が発生し、フランジの破断にいたった(図-4(c)参照)。この疲労き裂は下フランジ上面からは全く確認できないものであり、試験体の破断とともに発見されたものである。破面の観察図より、このき裂はUリブと下フランジの隅肉溶接のルート部から発生し、下フランジを貫通する方向へ進展したことが確認できる。

き裂長3cmのときの繰り返し回数と、Uリブの存在を無視して梁理論により計算した公称曲げ応力範囲を用いて整理した疲労試験結果を図-6に示す。ただしR15では疲労き裂が発生しなかったため図中では矢印をつけて示しており、R0についてはき裂長3cmのときの繰り返し回数をとらえられなかったため破断寿命で示している。また、図中のマークは等曲げ区間のスカラップに生じた疲労き裂とせん断力が存在する領域にあるスカラップから発生したものとに分けて示した。

R35AとR35Bの疲労強度には差は認められず、廻

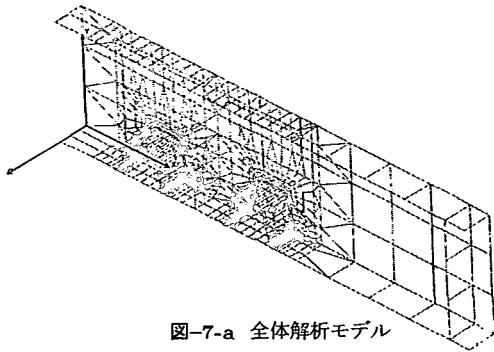


図-7-a 全体解析モデル

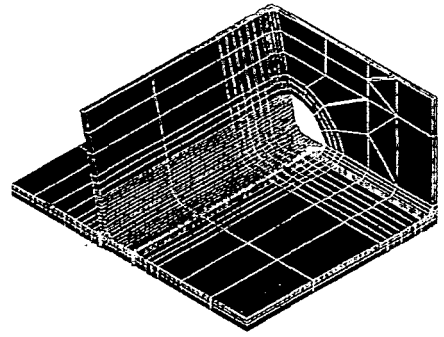


図-7-b 詳細解析モデル

図-7 解析モデル

表-2 応力集中係数

| 試験体 記号 | スカラップ位置 | | | |
|-----------|---------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| R35A | 3.46 | 1.65 | 2.58 | 2.78 |
| R35B | 3.40 | 1.63 | 2.26 | 2.39 |

し溶接の有無が疲労強度に与える影響は小さいといえる。いずれの試験体においても等曲げ区間よりもせん断力が存在する区間でのスカラップの疲労強度が明らかに低く、JSSCの設計曲線の1等級以上の差となっている。よってこのディテールにおいてもせん断力の影響は非常に大きく、疲労強度を考える上でせん断力が重要な支配要因となっていることがわかる。またR0のみ破断寿命で示していることを考えると、R0の疲労強度が最も低いとみることができる。

R35AとR35Bに貼付した応力集中ゲージの測定値から求めた応力集中係数を表-2に示す。ここで応力集中係数は、溶接止端から4mmと10mmの応力値から溶接止端部への直線外挿により求めたホットスポット応力と公称応力との比として定義した⁷⁾。表より、純曲げの領域に比べせん断力と曲げモーメントの両方が作用する領域の方が高い応力集中係数となっており、これが公称応力で整理した疲労試験結果において等曲げ区間のスカラップの疲労強度が曲げせん断区間に比較して高かった原因であると考えられる。また、廻し溶接の有無による応力集中係数の差は小さく、継手形状によって生じる応力集中の程度には廻し溶接の有無は無関係であるといえ、これが両者の疲労強度に差が生じなかった原因であると考えられる。

4. 応力解析

ダイアフラムとUリブの交差部領域の応力分布を詳細に検討するために有限要素法による応力解析を行っ

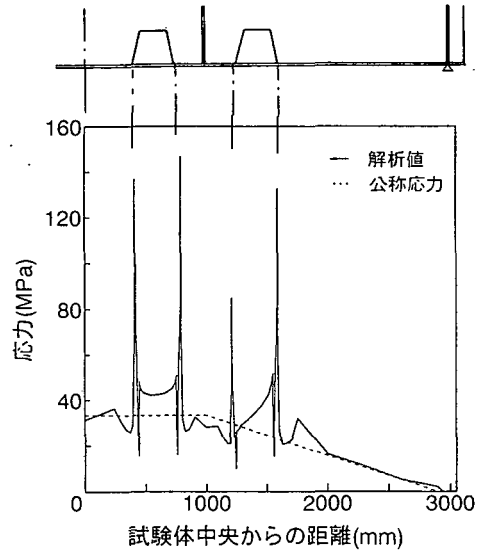


図-8 全体解析結果

た。解析は対称性を考慮し、まず1/4モデルにおいてシェル要素を用いた全体解析を行い、次にスカラップ近傍をズームングしてソリッド要素による詳細解析を行った。詳細解析モデルでは溶接ビードをモデル化しており、廻し溶接の有無の影響などを解析に取込めるようにした。ただし溶接止端半径などの微視的な形状のモデル化を行なえるほどの細分割は行っていない。ソリッド要素における解析の境界条件は、シェル解析によって求められた変位を、対応するソリッド要素節点に与えることにより決定した。要素分割図を図-7に示す。溶接止端部での最小要素サイズはすべてのモデルにおいて0.4mmとしている。

R35のモデルにおける全体解析結果を図-8に示す。横軸は試験体の支間中央からの距離であり、縦軸はウェブと下フランジの交差線上での部材軸方向の応力である。図より、等曲げ区間にあるスカラップNo.3とNo.4の応力のピーク値にあまり大きな差はないが、せん断力を受ける区間にあるスカラップNo.1での応力のピーク値はNo.2のものよりも著しく大きく、等曲げ区間で

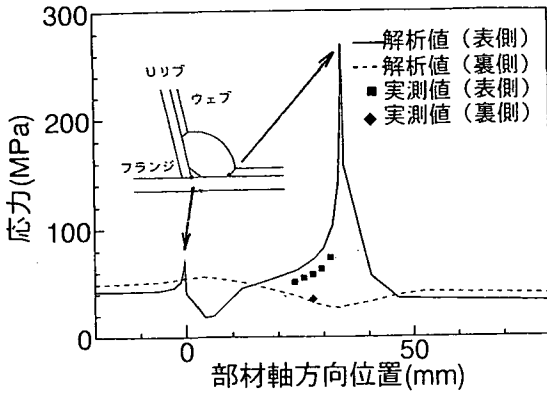


図-9-a 等曲げ区間

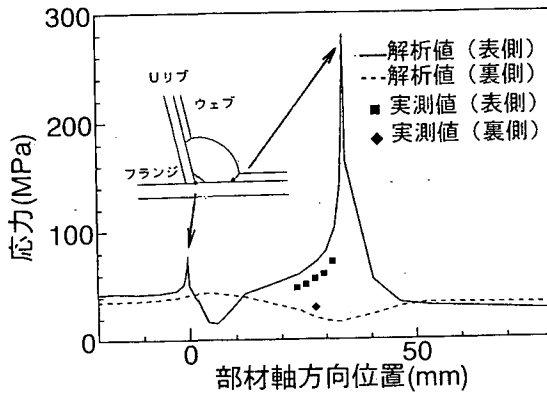


図-9-b 曲げ+せん断区間

図-9 詳細解析結果と実測値の比較

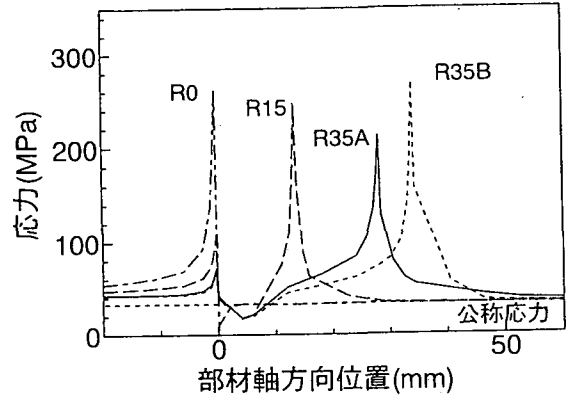
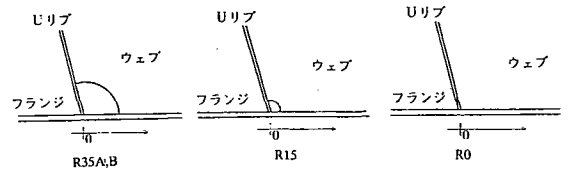


図-10-a 等曲げ区間

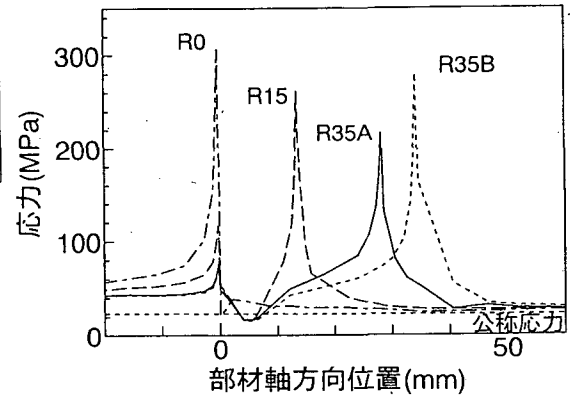


図-10-b 曲げ+せん断区間

図-10 詳細解析結果

の応力のピーク値にほぼ近いレベルであることがわかる。このことより、応力のピーク値が大きい純曲げ区間のスカラップNo.4と、せん断力と曲げモーメントが作用する区間のスカラップNo.1を対象にして詳細解析を行った。

R35Aにおけるフランジ表面での部材軸方向の応力分布を実測値と併せて図-9に示す。解析値と実測値の間には若干の差があるが傾向はよく一致しており、このモデルによりおおよその傾向を捉えることができるといえる。

すべての試験体についての詳細解析結果を図-10に示す。横軸は着目位置を、縦軸は部材軸方向の応力を表わしている。R35,R15についてはスカラップ端部で高い応力が発生しており、R0ではUリブと下フランジの交差部からややUリブの内側に入った箇所が高い応力が発生している。本解析では溶接止端半径などをモデ

ル化できていないことから、応力のピーク値そのものにはさほど意味がないが、溶接から少し離れた位置での応力分布は実測値とほぼ一致していることから、応力集中の程度を把握するためのパラメータとして先に定義したホットスポット応力を用いることとする。表-3にホットスポット応力の解析値を示す。ただしR0については、Uリブ内側の下フランジ表面の応力分布からUリブと下フランジの交差溶接部に外挿して求めたホットスポット応力を示している。

R35AとR35Bのホットスポット応力にはそれほど差がなく、廻し溶接の有無による影響は少ないといえる。R35A,BとR15とを比較するとスカラップ半径の小

表-3 ホットスポット応力の解析結果

| 試験体 記号 | 等曲げ区間 | | 曲げ+せん断区間 | |
|-----------|-------|------|----------|------|
| | HSS | SCF | HSS | SCF |
| R35A | 106 | 3.18 | 106 | 4.51 |
| R35B | 104 | 3.12 | 103 | 4.38 |
| R15 | 92 | 2.76 | 94 | 4.00 |
| R0 | 94 | 2.82 | 104 | 4.43 |

HSS: ホットスポット応力, SCF: 応力集中係数

さいR15の方がホットスポット応力が若干低くなっている。R0のUリブと下フランジの溶接交差部では高い応力が発生しており、その値はR15での値を上回っている。いずれのタイプにおいても、曲げとせん断が作用する区間では純曲げの区間と比較して公称応力が低くなるにもかかわらず、局部応力についてみるとそれと同等あるいはそれ以上の値となっており、せん断力の存在によって非常に高い応力集中が発生していることがわかる。特にスカラップを省略したR0のUリブと下フランジの溶接部では、せん断が作用することによる応力集中の増加が著しい。

応力解析によって得られたこれらの局部応力発生性状、すなわち、等曲げ区間よりも曲げとせん断が作用する区間でのスカラップに高い局部応力が生じること、R35よりもR15の方が局部応力が小さい傾向にあること、R0ではUリブと下フランジの溶接部に応力集中が生じ、その値は他のものと同等あるいはそれよりも大きい傾向にあることなどは、疲労試験結果の傾向と一致している。過去の研究より、補剛材を挟んで両端にスカラップを有する構造ディテールではスカラップが小さい方が疲労強度の点からは有利であり、スカラップを埋め戻すと最も疲労強度が高くなることが明らかとなっている³⁾。本研究において対象としたディテールにおいては、スカラップを小さくすると疲労強度が高くなる傾向は一致したが、スカラップを埋め戻した場合には疲労強度が極端に弱くなる結果となった。これは

スカラップを埋め戻した場合、Uリブの外側ではフランジがウェブに完全に溶接されるのに対し、Uリブの内側では空洞が残されるためにフランジ板が相対的に変形しやすくなり、Uリブと下フランジとの溶接部に変形が集中して高い応力集中が生じるためであると考えられる。

5. 結 論

箱断面補剛桁のダイアフラムとUリブの交差部を対象に、スカラップディテールの異なる4体の試験体を用いた疲労試験および有限要素法により疲労強度の比較検討を行い次の結論を得た。

- (1) スカラップ端部での局部応力はスカラップ径を小さくするほど小さくなり、疲労強度も高くなる。
- (2) 完全にスカラップを埋め戻してしまおうと変形がUリブとフランジの溶接部に集中し、高い局部応力が発生する。これによりスカラップがないディテールの疲労強度は著しく低くなる。
- (3) スカラップ端部に廻し溶接を施したものと施さないものとの間に疲労強度の差はない。

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, 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.
- 3) 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, 1994.
- 4) 長谷川和正, 近藤雅雅, 山田健太郎, 石崎浩: 箱桁橋鋼床版の疲労照査, 構造工学論文集, Vol.35A, 1989.
- 5) 三木千壽, 館石和雄, 奥川淳志, 藤井祐司: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度, 土木学会論文集, No.519, 1995.
- 6) 福井崇博, 谷中幸和, 阪本謙二, 深沢誠, 三木千壽: 吊橋補剛箱桁ハンガーブラケットの疲労試験, 構造工学論文集, Vol.33A, 1987.
- 7) 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, 1992.3.

(1996.2.8 受付)

FATIGUE STRENGTH OF THE JOINT BETWEEN DIAPHRAGMS AND LONGITUDINAL RIBS IN BOX SECTION GIRDERS

Chitoshi MIKI, Masakatu SHIOZAKI, Kazuo TATEISHI and Harukazu OHASHI

Fatigue strength of the joint between diaphragms and longitudinal ribs on lower flange in box girder of suspension bridge was investigated by means of fatigue tests and stress analyses. Fatigue tests were carried out on large scale specimens which were models of transverse section of box girder and had various size of cope holes at the crossing joints. It was found that smaller cope hole was appropriate for reducing the local stress and increasing fatigue strength. However, when no cope hole existed, high stress concentration occurred at the flange plate inside of through rib and fatigue strength became low.