

橋梁部材のスカーラップ部に生じる面外変形挙動とその疲労強度に関する研究
A STUDY ON FATIGUE STRENGTH OF SCALLOP DETAILS UNDER OUT-OF-PLANE DISPLACEMENT

三木千壽* 舘石和雄** J.F.RICCI*** 梶本勝也****

By Chitoshi MIKI, Kazuo TATEISHI, J.F.RICCI and Katsuya KAJIMOTO

Most fatigue cracks in bridges are observed at the welded joints between longitudinal members and perpendicular members. At their crossing connections, scallops are set up to avoid the crossing-over of some welded lines. In this type of structural detail, the forces transmitted through secondary members induce the out-of-plane bending deformation to the gap in scallop. To investigate the fatigue strength of scallop detail with out-of-plane bending stresses, experimental study was carried out. The stress distribution around scallop changed due to the scallop size, and some different types of fatigue cracks occurred in each type of specimen. Fatigue strength arranged by the 'hot spot stress' was over 60 MPa for 2×10^6 cycles.

1. はじめに

橋梁に生じる疲労き裂は、主桁や縦桁などの縦方向部材と、横桁や対傾構、ラテラルなどの横方向部材の接合部に発生する例が非常に多い^{1) 2)}。このような接合部においては、複数方向からの溶接線が1箇所で交差してしまうため、どちらか一方の板にスカーラップを設けてその位置で回し溶接を行い、溶接線の交差を、防ぐ構造とするのが一般的である。過去に生じた疲労き裂はこのスカーラップ周辺に多くみられる。

この種の疲労き裂の発生原因についてはこれまでに多くの研究が行われている^{3) - 6)}。それらによれば、橋上の活荷重載荷によって橋梁全体が3次元的に変形し、横桁や対傾構などの横方向部材に生じる力によって縦方向部材の溶接線に囲まれた狭い部分に面外方向変位が発生することがこのタイプのき裂の主な発生原因であるとされている。横方向部材による二次力は、例えば主桁のウェブなどに面外の変形を引き起こすことになり、その接合部にスカーラップが設けてあった場合、その開孔された部分の板(ギャップ)には面外変形が集中することになる。しかしこれまでにスカーラップを有する継手部構造に対して、ギャップ部の面外変形に着目して疲労強度を検討した研究はほとんどない。またスカーラップ内のギャップ部は、その周辺を

* 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)

** 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** Swiss Federal Institute of Technology

**** 工博 三菱重工業(株) 広島研究所(〒733 広島県観音新町4-6-22)

複数の板で囲まれていることから、応力状態が周辺の板の拘束の影響を強く受け、多軸応力状態となっていることや、ギャップの長さが板厚のたかだか数倍程度であることから、通常の単純な板曲げの状態とは異なっているものと考えられる。そこで本研究では、スカーラップ構造をモデル化した試験体に対し、ギャップ部に面外変形を導入するようにして疲労試験を行い、スカーラップ内のギャップサイズと疲労強度の関係や疲労破壊モードなどについて検討した。この際、二次応力による疲労現象は橋梁全体の变形から決まる変位制御型の荷重条件になると考えられることから、疲労試験は荷重制御、変位制御の両方の場合について行った。

2. 試験体

試験体の形状、寸法を図1に、載荷の状況を図2に示す。上下の載荷板が直角に交わりその接合部にスカーラップを設けた構造となっている。この試験体に上下から載荷することにより、このスカーラップのギャップ部には面外変形が生じることになる。このディテールは、例えば図3に示すウェブガセット取付

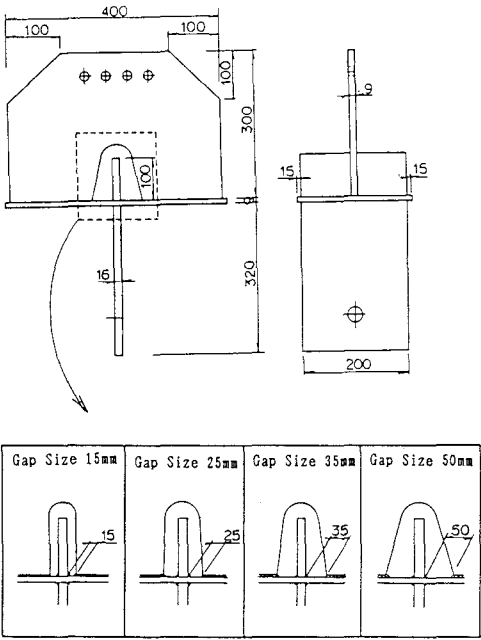


図1. 試験体の形状・寸法

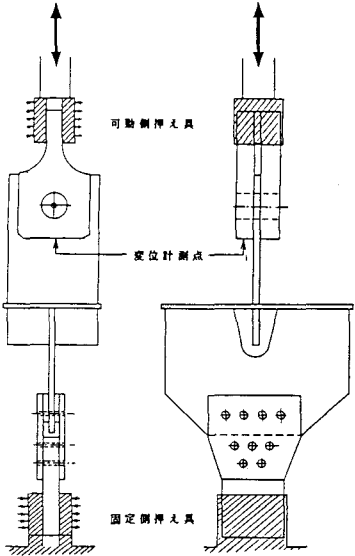


図2. 載荷状況

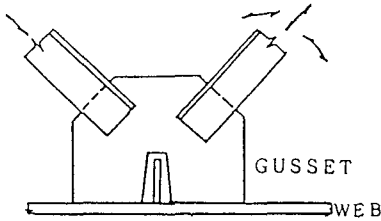


図3. 実構造物におけるモデル化の対象構造例

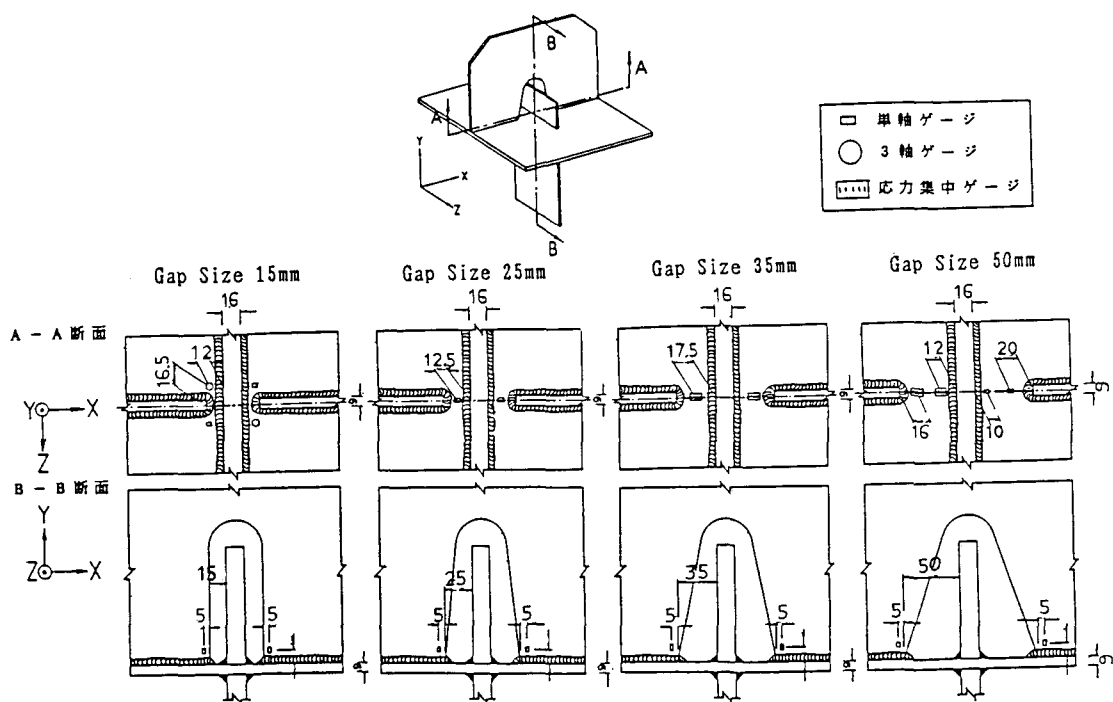


図4. ひずみゲージ貼付位置

部や、主桁垂直補剛材下端のウェブギャップなどをモデル化したものと考えることができる。橋梁で用いられる標準的なスカーラップ寸法は35mmであることを考慮し、ギャップの長さは15, 25, 35, 50mmの4通りとした。ただしギャップ長さは溶接ビードを含めた寸法である。ギャップ長さが15mmの試験体では実際には溶接ビードでギャップ部がつぶされている。

3. 静的载荷試験

3-1. 測定位置

疲労試験に先だって、応力測定を実施した。各タイプでのひずみゲージ貼付位置を図4に示す。ギャップサイズが15mmの試験体は実際にはギャップ部がないことからその周辺で応力を測定したが、その他のものについてはギャップ内に単軸または応力集中ゲージを貼付した。ギャップ長さが25mm, 35mmの試験体ではギャップの中央にゲージの中心がくるように、またギャップ長さが50mmの試験体では最も止端に近いゲージが止端から4mmとなるように貼付した。また図2中示した位置において、変位計により変位を測定している。

なお、本論文では便宜上図5のように各溶接止端に番号をつけて呼ぶこととする。

3-2. 測定結果

図6はギャップサイズが35, 50mmのものについて、ギャップ内に貼付したゲージにより測定したギャップ内の応力分布である。横軸は止端②からの距離を実質のギャップ長さで無次元化して示している。ギャップ部の中央からやや止端②に近い位置を境に応力の符号が反転しており、ギャップ内に面外曲げ変形が引き起こされていることがわかる。応力が0になる位置が止端②側によっているのは、板による拘束の度合いが両端部で異なるためであると考えられる。

図7, 8に各止端近傍から4mm離れた位置で測定した応力を示す。図7は単位荷重(1tonf)あたりの応力を、図8は単位変位(0.1mm)あたりの応力を示している。また止端③の応力は圧縮であるが、図中では絶対値で示している。

単位荷重で整理した場合、ギャップサイズが25mm以上のタイプについては止端④近傍の応力が最も高くなっており、その大きさはギャップサイズが大きくなるにつれ増加している。止端③での応力も、止端④での値よりは小さいが同様の傾向にある。止端④の応力が止端③よりも大きくなっているのは、試験体の製作において止端④位置の溶接サイズが止端③位置のそれよりもやや大きくなっており、止端④に変形が集中するためであると考えられる。ギャップサイズが25, 35mmのモデルでは止端④以外の応力はほぼ等しい結果となっている。単位変位あたりの応力で見た場合でもほぼ同じ傾向であるが、単位変位あたりの荷重はギャップサイズが長くなるほど小さくなることから、ギャップサイズの違いによる応力の差は小さくなっている。

以上より、ギャップサイズが25mm以上のモデルについては溶接止端④での応力が最も大きい結果となった。この溶接は試験体への载荷のためにとりつけた板の継手であり、本試験体がモデル化している実橋梁ディテールでは存在しない。しかし止端③と止端④との応力の発生性状は、大きさの差を除けばほぼ似ていることから、本論文では特に区別せずに止端④での応力を取り扱うこととする。

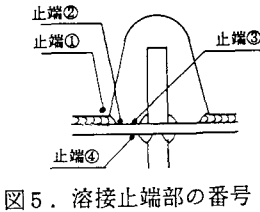


図5. 溶接止端部の番号

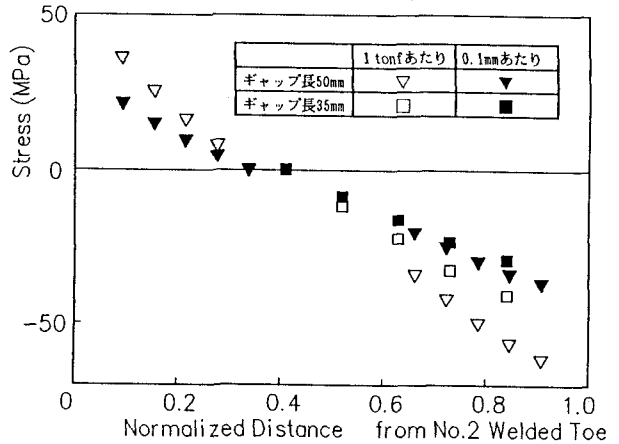


図6. ギャップ内の実測応力分布

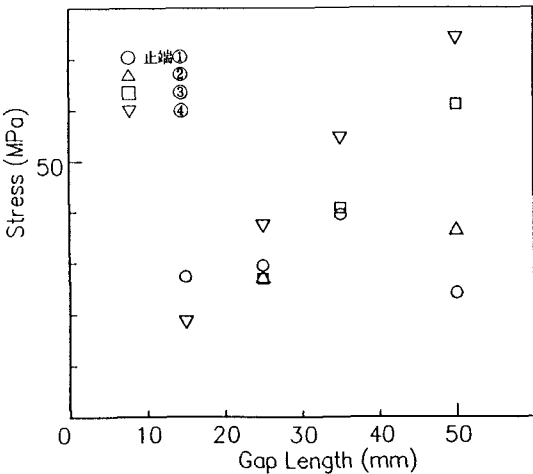


図7. 溶接止端部の応力(単位荷重1tonfあたり)

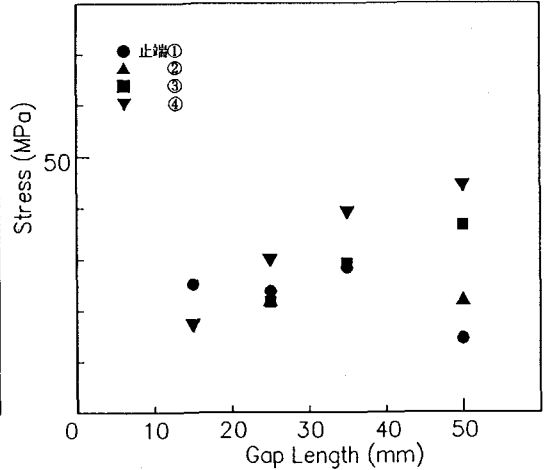


図8. 溶接止端部の応力(単位変位0.1mmあたり)

4. 疲労試験

4-1. 試験方法

疲労試験は動的能力 $\pm 300\text{kN}$ 、 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧式疲労試験機を用いて行った。試験は各タイプ2体ずつ行っており、そのうち1体は荷重制御で（以下、シリーズ1と呼ぶ）、もう1体は荷重点変位を一定に保つようにして行った（以下、シリーズ2と呼ぶ）。シリーズ2での荷重点変位の検出およびその荷重波形へのフィードバックなどは、図9に示すシステムにより行った。試験中、荷重点変位の測定は、繰返し回数1000回毎に行なっている。変位の測定には最大測定範囲 $\pm 50\text{mm}$ の変位計を用いた。また荷重は約1tonfを下限とする引張载荷とした。疲労き裂の観察は目視と磁粉探傷法により行った。シリーズ1の一部とシリーズ2の全試験体については、止端④からの疲労き裂を防止する目的で溶接止端をグラインダーにより仕上げた。

4-2. 疲労試験結果

4-2-1. き裂発生性状

表1に疲労試験結果をまとめて示す。

疲労き裂は止端①、②、④から発生した。それぞれの止端から発生したき裂の例を図10に示す。止端①から発生したき裂（図10中）は、溶接ビード内を斜め下方に向かって進展して母材に達した後、母材内を進展した。止端②から発生したき裂（図10上）は、回し溶接部に沿って進展した後、母材に進展している。止端④に生じたき裂（図10下）は止端にほぼ沿って進展した。

4-2-2. 試験変位、荷重の変化

図11にシリーズ1（荷重制御試験）における荷重点変位と繰返し回数との関係を示す。縦軸は試験開始時の荷重点変位に対する割合で示している。荷重点変位は止端④のき裂が発生してもほとんど増加しておらず、止端①、②のき裂が発生してから徐々に増加傾向を示していることがわかる。止端④のき裂が荷重点変位に対し

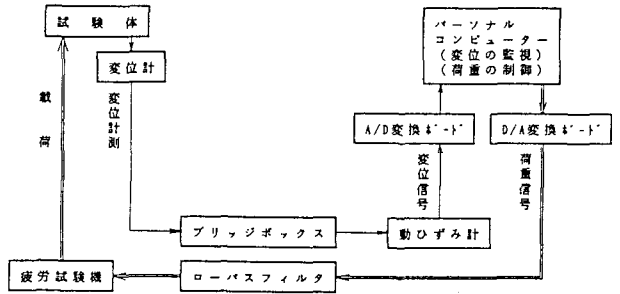


図9. 変位制御疲労試験システム

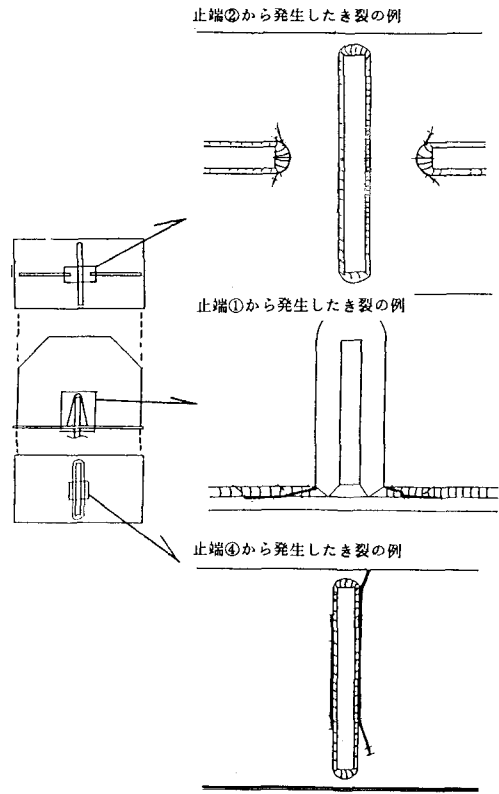


図10. 溶接止端から発生したき裂の例

表1. 疲労試験結果

	GapSize (mm)	初期荷重 (tonf)	初期変位 (mm)	き裂長20mmでの繰返し回数 ($\times 10^4$)と発生止端番号
シリーズ1	1.5	4.6	0.50	72(①)
	2.5	4.0	0.50	31(④), 700(①), 700(①)
	3.5	3.4	0.50	110(④), 340(②), 350(②)
	5.0	3.0	0.50	70(④)*, 90(②), 145(②)
シリーズ2	1.5	3.7	0.22	200(①), 247(④)
	2.5	4.2	0.29	60(①)*, 65*(①)
	3.5	3.7	0.31	105(①), 110(①)
	5.0	3.0	0.32	50(③), 180(④)*

*: き裂発見時に長さが20mm以上であったもの
+: き裂長20mm以前に試験を終了したもの

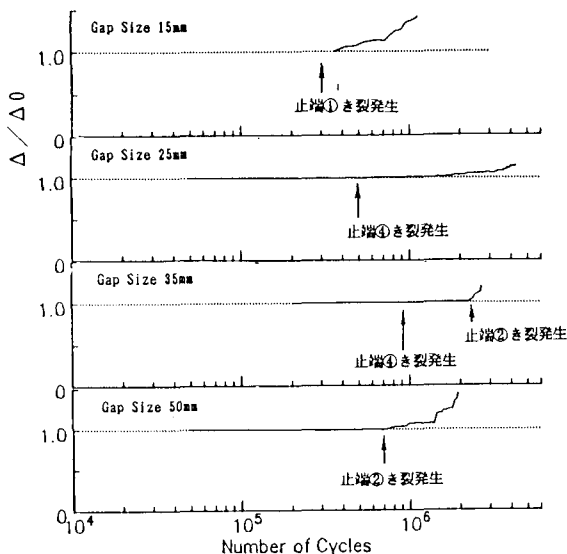


図11. 荷重点変位と繰返し数の関係
(シリーズ1：荷重制御試験)

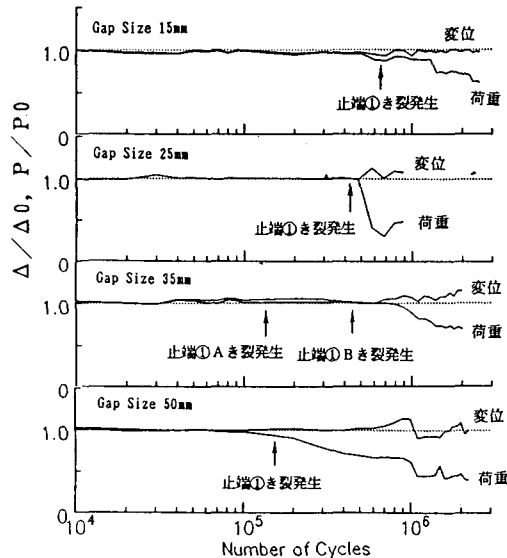


図12. 荷重点変位, 荷重と繰返し数の関係
(シリーズ2：変位制御試験)

て与える影響が少ないことから、変位制御の条件下においてもこのき裂は進展しやすいことが予想される。図12はシリーズ2（荷重点変位制御試験）における荷重点変位および荷重の経時変化である。き裂が生じた後などにやや変動はあるが、荷重点変位はほぼ一定に制御されている。それに対して荷重はき裂が発生した直後から徐々に低下している。

4-2-3. 応力の再分配挙動

図13に、シリーズ1のギャップサイズ25, 50mmのモデルでの各止端近傍の応力値の経時変化を示す。止端④にき裂が発生した後、止端③での応力は急激に低下するが、それに比較して止端①の応力はあまり変化していない。このことから、止端④にき裂が入ったことによる止端①への応力の再分配は小さいものと考えられる。

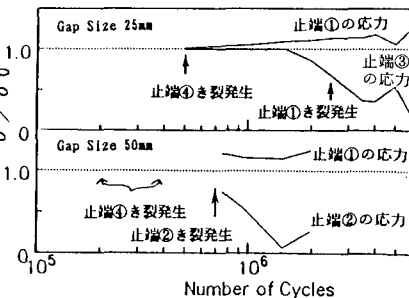


図13. 応力の再分配挙動

4-2-4. き裂進展性状

図14に荷重制御試験での荷重点変位とき裂長さの関係、変位制御試験での荷重とき裂長さの関係を示す。いずれのき裂も長さ5mm程度までは荷重点変位、荷重ともそれほど変化しておらず、試験体のコンプライアンスの変化が小さいことがわかる。ギャップ長さ25mm, 35mmの試験体の止端①に生じたき裂によるコンプライアンスの変化は、き裂長が比較的小さい時点から認められる。それに対しギャップ長さ15mmの試験体の止端①に生じたき裂によるコンプライアンスの変化は小さい。また止端④に生じたき裂によるコンプライアンスの変化は非常に小さい。

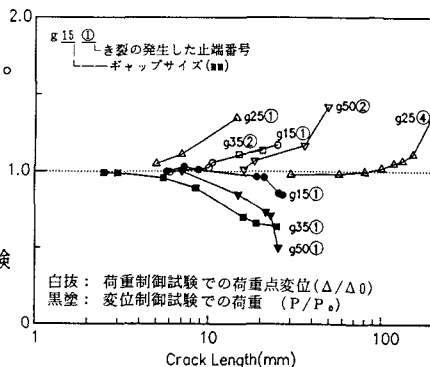


図14. 荷重点変位, 荷重とき裂長さの関係

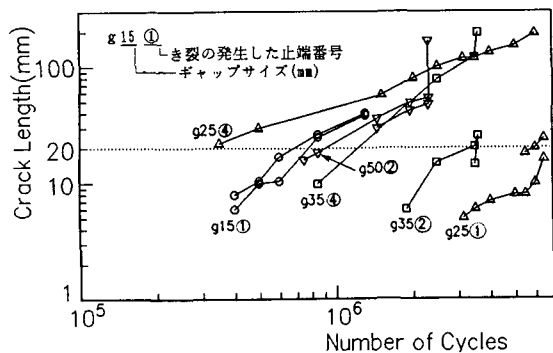


図15. き裂長さと繰返し回数の関係
(シリーズ1：荷重制御試験)

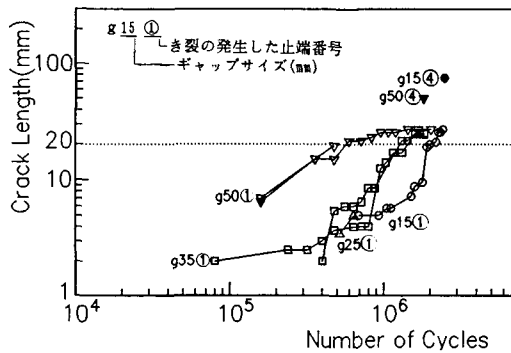


図16. き裂長さと繰返し回数の関係
(シリーズ2：変位制御試験)

図15,16にシリーズ1（荷重制御試験），2（変位制御試験）でのき裂長さと繰返し回数の関係を示す。荷重制御試験の場合疲労き裂は急激に進展していくのに対し、変位制御試験の場合、止端①に生じたき裂は約30mmとなった時点ではば停留する傾向にある。しかし止端④のき裂は変位制御試験においてもかなりの長さまで成長している。

4-3. 疲労強度

4-3-1. 荷重，変位で整理した疲労強度

図17に、疲労寿命をき裂長20mmとなったときの繰返し回数としたときのシリーズ1における荷重と疲労寿命の関係を示す、図18にシリーズ2における荷重点変位と疲労寿命との関係を示す。図17中では疲労き裂の発生した止端を区別して示している。図18に示す疲労き裂はすべて止端①に発生したものである。

図17では、試験体によってき裂の発生した止端が異なることなどから疲労強度がかなりばらついている。止端④の位置での疲労強度はいずれの試験体でも低く、その結果、止端④からのき裂が発生しなかったギャップサイズ15mmのモデルの疲労強度が最も高くなっている。図18の変位制御条件下においてはそれほど大きな疲労強度の違いはみられない。

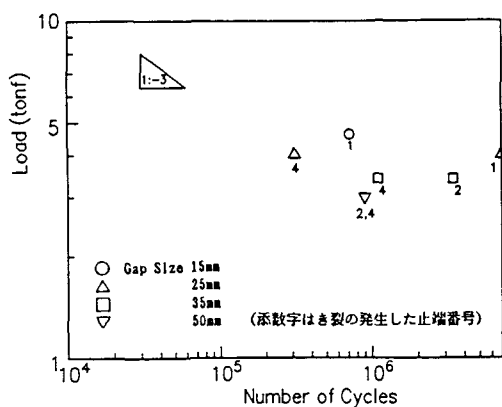


図17. 荷重と疲労寿命（き裂長20mm時）の関係
(シリーズ1：荷重制御試験)

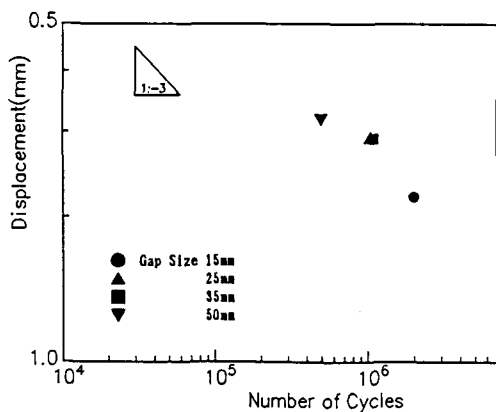


図18. 荷重点変位と疲労寿命（き裂長20mm時）の関係
(シリーズ2：変位制御試験)

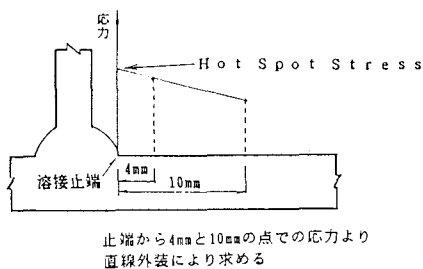


図19. ホットスポット応力の推定方法

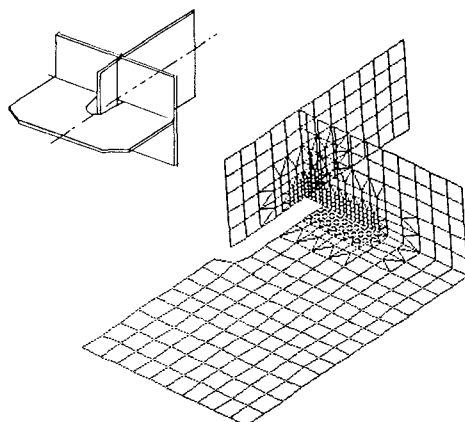


図20. 要素分割図の例

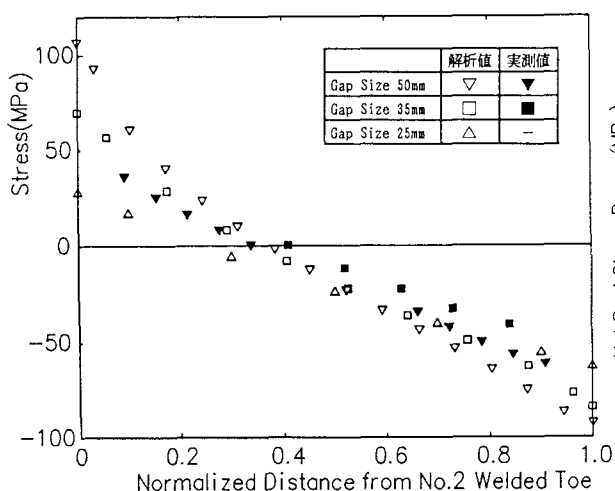


図21. ギャップ内の応力分布の実測値と解析値

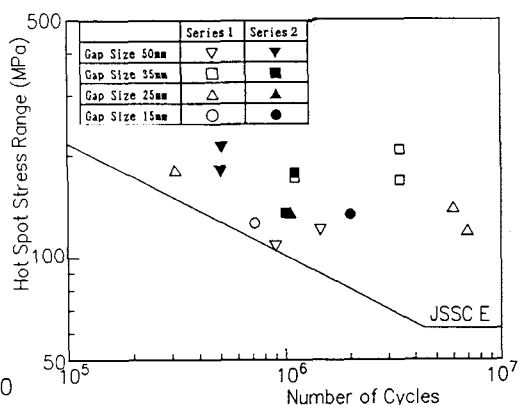


図22. ホットスポット応力と疲労寿命（き裂長20mm時）の関係

4-3-2. ホットスポット応力による疲労強度

JSSC疲労設計指針（案）⁷⁾では、本試験体のような公称応力の定義できない継手に対する疲労照査手法として、ホットスポット応力による照査を規定している。同指針には具体的なホットスポット応力の求め方は規定していないが、過去の研究により^{8)~10)}、ここでは図19に示すように、溶接止端部から4mmと10mmの点から直線外挿によって止端部の応力を推定する方法を用いる。

また、今回の試験体のうちギャップ長さが短いものについては、ギャップ内の応力分布を実測できなかったことから、有限要素法による応力解析を行った。図20に要素分割図の例を示す。シェル要素を用いて試験体の1/4領域を対象に解析を行った。図21にギャップ内の応力分布の実測値と解析値を示す。解析値の方がやや実測値よりも大きい結果となっているが、応力分布の形状は極めてよく一致していることから、実測が不可能であった箇所については解析値を用いてホットスポット応力を求めた。

図22にホットスポット応力範囲で整理した疲労試験結果を示す。横軸はき裂発見回数で示した。図中の直線はJSSCのE等級であり、ホットスポット応力で疲労照査を行なう場合の設計曲線である。今回の実験結果はかなりばらつきがみられるが、試験結果はJSSCのE等級をほぼ下限とする範囲にあることがわかる。

5. まとめ

本研究ではスカーラップ構造のギャップ部に生じる面外変形に着目し、疲労実験を行った。以下に主な結論を述べる。

- ・ 止端①, ②に生じる疲労き裂は、その発生により継手の変形性能が増加する。それに対して止端④に生じる疲労き裂は、継手の変形性能にあまり影響を与えず、変位制御条件下でも進展しやすいといえる。
- ・ き裂長20mmの時点疲労寿命とすれば、荷重制御の条件下ではスカーラップのギャップサイズが15mmの継手の疲労強度が最も高い。それに対して変位制御の条件下ではいずれのギャップサイズの試験体とも疲労強度に大きな差は見られなかった。
- ・ 疲労試験結果をホットスポット応力で整理した結果、試験結果のばらつきはほぼJSSCのE等級を下限とする領域におさまった。

本研究を実施するにあたり、東京工業大学工学部竹淵敏郎技官に手伝っていただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Fisher, J., F.: Deformation Induced Cracking in Steel Girder Bridges and Retrofit Guidelines, Office of Research and Special Studies, 1987.
- 2) 三木千壽, 坂野昌弘, 館石和雄, 福岡良典: 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, No. 392, 1-9, 1988.
- 3) Fisher, J., F., Fisher, T., A. and Kostem, C. N.: Displacement Induced Fatigue Cracks: Eng. Struct., Vol. 1, 1979.
- 4) Masuda, N., Mikia, C., Kashiwagi, H. and Kaido, H.: Analysis of Sway Bracing Members in Composite Girder Bridges, Proc. of JSCE, No. 386/1-8, 1987.
- 5) Okura, I., Takigawa, H. and Fukumoto, Y.: Structural Parameters Governing Fatigue Crackings in Highway Bridges, Proc. of JSCE, No. 410/1-12, 1989.
- 6) Fisher, J., F.: 鋼橋の疲労と破壊, 建設図書, 1987.
- 7) 日本鋼構造協会: 疲労設計指針(案), 1989.
- 8) 砂本大造、山内崇賢、的場正明: 溶接継手の疲れ強さに関する新しい評価法の検討、三菱重工業技報, Vol. 16, No. 3, 1979.
- 9) Yagi, J., Machida, S., Tomita, Y., Matoba, M. and Kawasaki, T.: Definition of Hot Spot Stress in Welded Plate Type Structure for Fatigue Assessment, IIW-XIII-1414-91, 1991.
- 10) 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.

(1992年9月21日受付)