

局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察

A STUDY ON THE LOCAL STRESS APPROACH TO THE FATIGUE ASSESSMENT

三木 千寿*, 館石 和雄**, 山本 美博***, 宮内 政信****

By Chitoshi MIKI, Kazuo TATEISHI, Yoshihiro YAMAMOTO and Masanobu MIYAUCHI

For the fatigue assessment based on the local stress, it is important how to define the stress to assess the fatigue strength. In this study, the measurements and the analysis of the stress distributions near the welded toe are carried out on three different types of specimens. Through these results and the fatigue test data which has been obtained on these specimens, the method to define the local stress to assess the fatigue strength is investigated.

1. はじめに

通常の溶接継手の疲労照査は、公称応力と、継手形状ごとに定められた許容応力度によって行われる。この照査方法は公称応力が明確に定義できる溶接継手に対しては容易に適用することができ、また実績のある手法である。しかし、近年疲労損傷が生じているプレートガーダーの対傾構取り付け部や、鋼床版の縦リブ・横リブ交差部などでは¹⁾、作用応力が多軸応力となっているものや、荷重の移動に伴い主応力の向きが変化するなどの複雑な応力状態になっているものも多い。このようなディテールでは公称応力を定義できないことから通常の疲労照査手法は適用できない。多軸応力などの複雑な応力状態下の疲労照査の手法として、溶接部近傍の局部応力を実測あるいは解析により求め、それにより疲労照査を行なう方法がある。JSSC 指針(案)²⁾では疲労損傷の生じる位置の局部応力をホットスポット応力と定義し、公称応力の計算や定義が困難な継手部についてはホットスポット応力により疲労照査を行なうよう規定されている。しかし指針(案)では局部応力の具体的な求め方は示されていない。

局部応力による疲労照査は、海洋構造物での鋼管継手など公称応力を定めにくい構造物ではすでに行われており³⁾、局部応力を求めるための経験式なども示されている。しかし平板構造に対する局部応力の求め方、および局部応力を用いた場合の設計疲労強度曲線などについてはまだ十分に検討されているとはいえない。

そこで本研究では、形状の違う平板継手試験体の溶接部近傍表面での応力分布を解析および実測により求め、それぞれの疲労実験結果に基づいて適切な局部応力評価手法を検討する。

* 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)
 *** 工修 東海旅客鉄道(株) (〒100 東京都千代田区丸の内1-6-5)
 **** 東海旅客鉄道(株) (〒100 東京都千代田区丸の内1-6-5)

2. 局部応力の考え方

疲労亀裂の発生する溶接止端部に作用する応力は、次のように分けて考えることができる（図-1）⁴⁾。

- （a）溶接部から十分離れた位置での応力
- （b）継手の全体形状から発生する応力
- （c）溶接止端部の微視的な形状による応力

（a）は一般にいう公称応力であり、通常の疲労照査はこの応力を基準にして行われる。この応力は小型試験体などでは明確に定義できるが、実橋梁ディテールではどの位置での応力をこの応力と見なすかが難しい場合が多い。

（b）は板と溶接ビードから構成される継手の全体形状から発生する応力である。板の組み方、板厚、板幅、溶接サイズなどがこの応力の大きさに影響を与えるパラメータである。ここではこの応力を二次応力と呼ぶこととする。

（c）は溶接ビードの微視的な形状により発生する応力であり、溶接止端半径、止端角、アンダーカットの有無などにより影響される応力である。ここではこの応力をピーク応力と呼ぶこととする。

本研究では（a）＋（b）の応力を局部応力と定義する。また溶接止端部での局部応力をホットスポット応力として定義する。

J R⁶⁾では実橋でのディテールにおいて図-2に示す位置で測定した一点での応力を（a）＋（b）に相当する応力とみなし、この応力を基準にした疲労強度曲線を定めている。この手法は簡便であり、公称応力が定義できないディテールの疲労照査法として一つの考え方を示すものであるが、図-2に示す測定位置が適切であるかについて十分な検討はされていない。

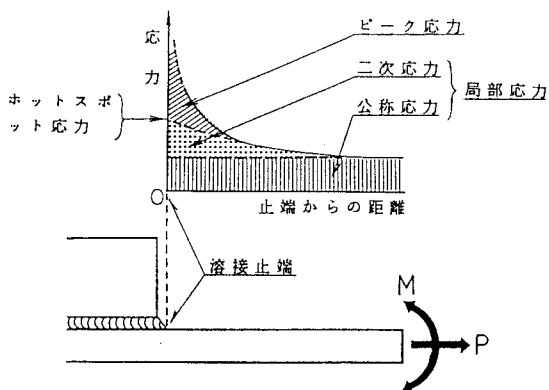


図-1. 溶接止端部の応力

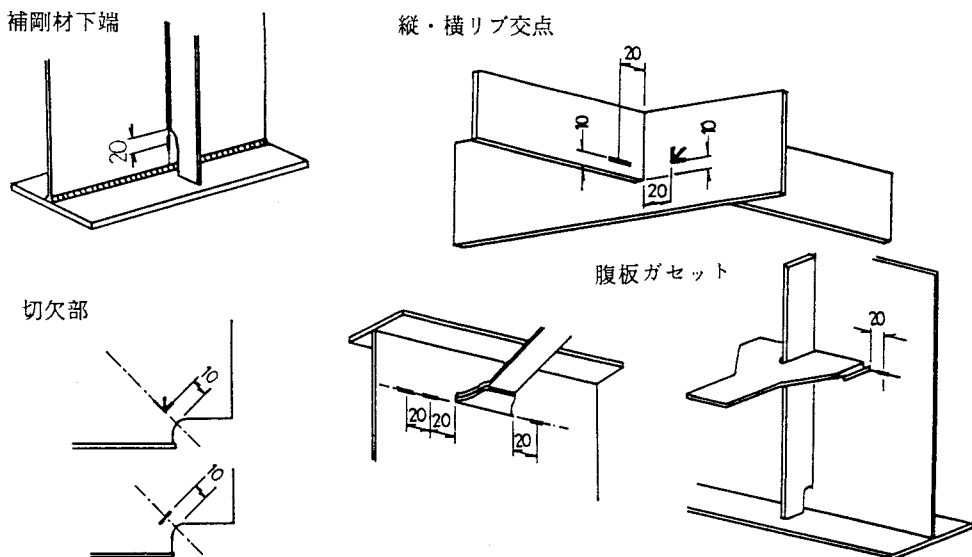


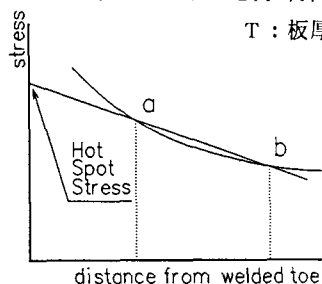
図-2. J Rで定められている応力測定位置の例

JSSC 指針（案）では溶接止端位置での（a）＋（b）の応力をホットスポット応力として定義し、公称応力が定義できない場合の疲労照査に用いることとしている。ホットスポット応力は溶接止端位置での応力として定義されることから、公称応力での照査のような継手形式による疲労強度の違いはなくなり、一本の強度曲線で疲労が照査できることになる。指針（案）ではホットスポット応力は溶接止端近傍の 2 点での応力から止端部位置へ直線外挿して求めることとしているが、この場合どの点の応力で外挿するかが問題となる。指針（案）には具体的な外挿点については規定されていないが、このような試みはすでに多数行われており、これまでに表－1 に示すような応力外挿点の提案がされている⁷⁾⁸⁾。しかしどの手法が適切であるかについては未だ統一的な見解には至っていない。

3. 試験体および疲労試験結果

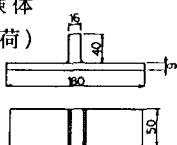
局部応力の評価法の検討に用いた試験体を図－3 に示す⁹⁾¹²⁾。試験体は T 継手試験体（十字継手一体を含む）、縦リブ継手試験体、大型桁試験体の 3 種類である。図－4

表－1. これまでに提案された主な
ホットスポット応力外挿点

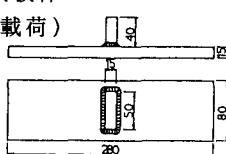


	a 点	b 点
A 法	0.5 T	1.0 T
B 法	0.5 T	1.5 T
C 法	0.4 T	2.0 T
D 法	1.0 T	3.0 T
E 法	4.0 mm	10.0 mm
F 法	$1.57\sqrt{T}^3$	$4.9\sqrt{T}^3$

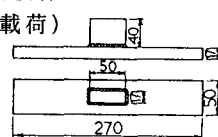
T A 試験体
(曲げ载荷)



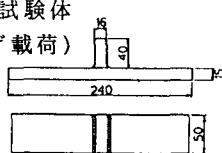
T D 試験体
(曲げ载荷)



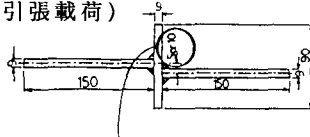
L A 試験体
(曲げ载荷)



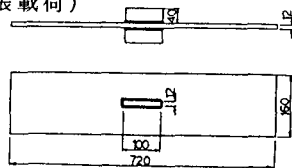
T B 試験体
(曲げ载荷)



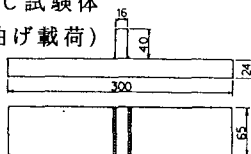
T E 試験体
(引張载荷)



L B 試験体
(引張载荷)



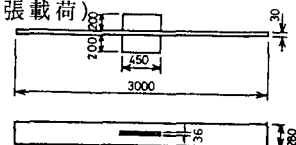
T C 試験体
(曲げ载荷)



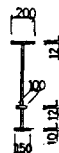
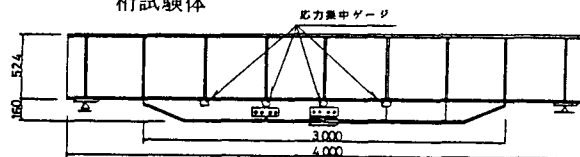
ミスマライメント (M) = 5 mm, 10 mm



L C 試験体
(引張载荷)



桁試験体



図－3. 検討に用いた試験体

に公称応力範囲で整理した疲労試験結果を示す。ただし、JSSC（案）に規定されている曲げ応力を4／5倍する取扱いは行っていない。JSSC指針（案）では、縦リブ継手試験体の強度等級をT継手試験体のものよりも低く設定しているが、ここでの試験結果においても縦リブ試験体LB、LC試験体の公称応力で整理した疲労強度はT継手試験体の疲労強度と比べて低い。TE試験体はミスアライメントを有する十字継手試験体であり、軸引張応力成分の他に、荷重の偏心による曲げ応力成分が生じるものと考えられるが、ここでは公称応力として軸応力成分のみを用いている。桁験体の公称応力は亀裂発生位置での曲げ応力を通常の梁理論により求めたものであるが、小型試験体に比べて明らかに疲労強度が低い結果となっている。

4. 局部応力の解析と実測

4-1. ピーク応力の影響範囲

先に定義したように、ここで検討する局部応力にはピーク応力は含めない。ピーク応力は溶接止端に近い領域にしか生じないものと考えられるが、実際にどの程度の影響範囲を持っているかを、平面要素を用いた2次元F.E.M.解析により検討した。解析は止端半径、止端角をパラメータとして行った。図-5に要素分割図を示す。最小要素サイズは0.2mmである。過去に行われた溶接止端形状の実測結果を参考にして⁽¹³⁾、 ρ はやや大きめの値である1mmおよび2mmの場合について、また止端角 θ は30°、45°、60°の場合について解析した。解析結果を図-6に示す。表面での応力が止端形状に影響を受ける範囲は止端から約2mm程度の範囲であり、よってそれ以上離れた点での応力は、ピーク応力を除いた応力、すなわちここで定義した局部応力であると見なすことができる。

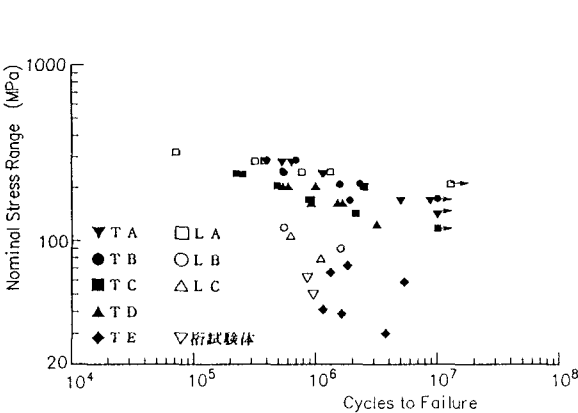


図-4. 公称応力範囲で整理した疲労試験結果

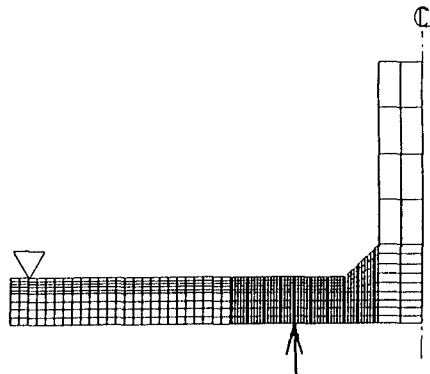


図-5. 2次元モデルの要素分割図

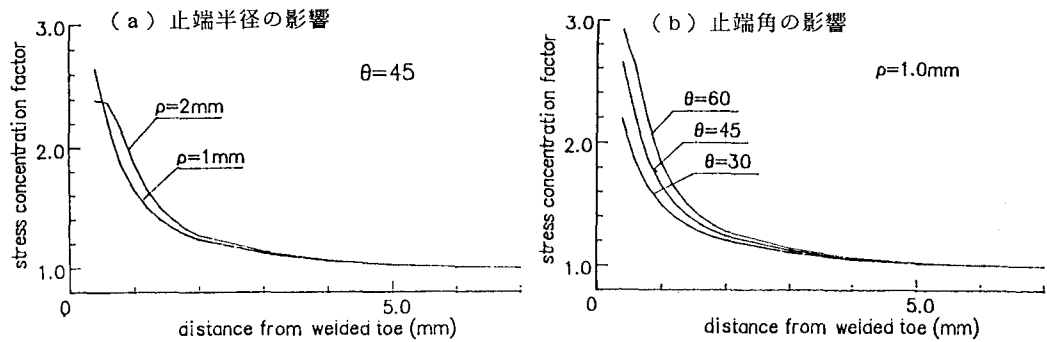


図-6. 溶接止端部の応力分布

4-2. 二次応力分布の実測と解析

今回対象とした疲労試験体について、F.E.M. 解析により溶接止端近傍での二次応力分布を求めた。T継手は前節と同一のモデルにより、縦リブ継手はソリッド要素による3次元モデルにより解析した。図-7に3次元モデルの要素分割図の例を示す。溶接止端近傍での要素の長手方向のサイズは約0.8mmである。また一部の試験体では図-8に示すように溶接止端近傍に応力集中ゲージを貼付し、ひずみを測定した。応力集中ゲージはゲージ長1mmで2mmピッチのものを使用した。図-9に応力分布の解析値と実測値を示す。ただし縦軸は公称応力で無次元化した値（以下二次応力集中係数と呼ぶ）で示している。TA試験体、TE試験体（M=10mm）については実測値が解析値よりやや大きい傾向が見られるが、それ以外では実測値と解析値はよく一致していることから、応力を実測していない試験体についても解析によって二次応力分布を求められるものとした。

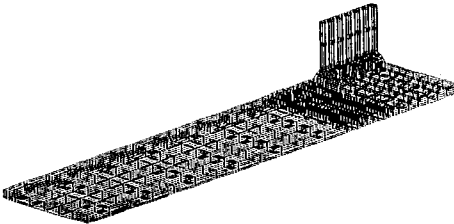
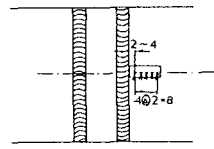
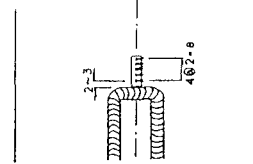


図-7. 3次元モデルの要素分割図

T継手試験体 (TA, TB, TC, TD, TE)



縦リブ試験体 (LA, LB)



桁試験体

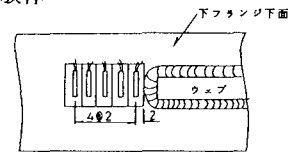


図-8. 溶接止端部の応力実測位置

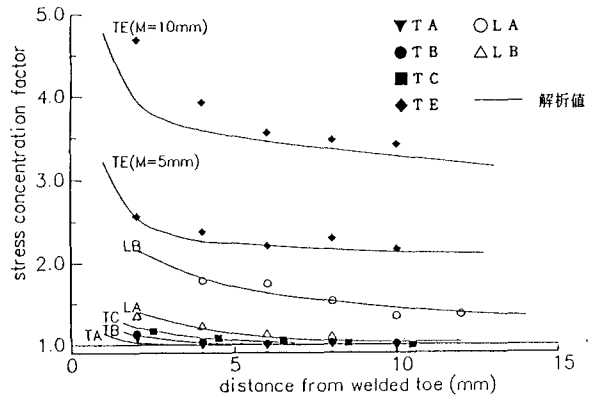


図-9. 溶接止端部の応力分布の実測値と解析値

5. 局部応力評価点の検討

図-10, 11は、各試験体にそれぞれの200万回疲労強度に相当する公称応力が生じているときの、溶接部近傍での応力分布を示したものである。ここで、200万回疲労強度は各試験体の疲労試験結果を公称応力により整理して求め、溶接部近傍の応力分布は各試験体について求められている二次応力集中係数を公称応力に乗じて求めた。図-10は板厚で無次元化した溶接止端からの距離で、図-11は止端からの距離そのもので示した。

JRで行われているような一点での応力による疲労照査の場合、継手形式ごとに応力値が一致する点があれば、その点での応力を用いて疲労照査を行えば良いことになる。しかし図より明かなように、T継手試験体の場合二次応力は比較的止端に近い位置で消えており、すべてのT継手試験体の応力値が一致するような測定点を定めることはできない。T継手ではいずれの試験体も止端から0.4T（T：板厚）程度離れた位置ではば二次応力が消えていることから、実構造ディテールにおいてはこの点での応力を公称応力と定め、

通常の公称応力による照査を行えばよいといえる。縦リブ継手の場合には二次応力影響範囲が試験体の寸法により大きく異なり、すべての縦リブ試験体の応力値が一致するような点は存在しない。

ホットスポット応力は図-10、11において各曲線から外挿した縦軸上（止端部位置）での応力と定義されている。全ての曲線について縦軸上のある一点に収束するような外挿法を定めることができれば、それにより求めたホットスポット応力を用いることで疲労照査が一本の強度曲線で行えることになる。これまでに提案されている主な外挿法は表-1に示したとおりであり、これらはいずれも止端近傍の2点での応力からの直線外挿により求めるものである。各方法により求められたホットスポット応力を表-2に示す。A、B、C、D法では、図-10中に示すように応力外挿点と比較的遠い位置にあることから、ホットスポット応力は公称応力にはほぼ等しくなり、各試験体のホットスポット応力には大きな差が認められる。F法もかなり遠い位置での外挿となることから同様の傾向にある。E法は、図-11中に示すとおり外挿点が比較的止端に近いことなどから他の方法と比較して試験体種類によるホットスポット応力の差が小さい。図-11より判断して、さらに近い

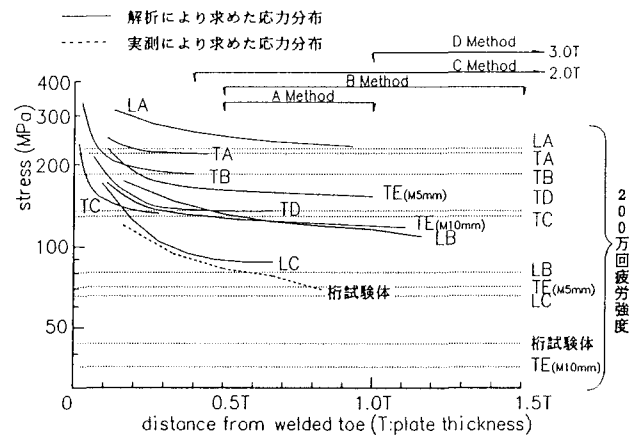


図-10. 公称応力を200万回疲労強度に一致させたときの溶接止端部での応力分布
(板厚で無次元化した距離で整理)

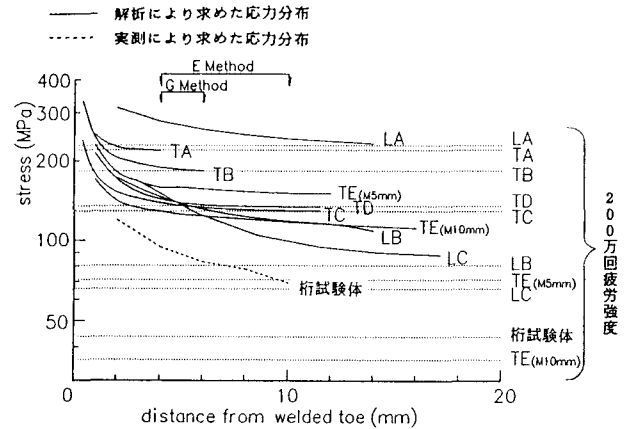


図-11. 公称応力を200万回疲労強度に一致させたときの溶接止端部での応力分布
(止端からの距離で整理)

表-2. 各手法により計算したホットスポット応力 (MPa)

試験体	公称応力	A 法	B 法	C 法	D 法	E 法	F 法
T A	219.1	219.1	219.1	219.1	219.1	219.1	219.1
T B	183.4	183.4	183.4	183.4	183.4	192.6	183.4
T C	128.6	128.6	128.6	128.6	130.5	147.0	128.6
T D	134.4	138.4	137.1	135.7	134.4	141.1	134.4
TE(M5mm)	71.0	166.1	166.1	169.0	166.9	171.1	166.9
TE(M10mm)	35.8	135.0	134.3	136.4	132.5	130.3	132.8
L A	227.7	309.7	292.6	270.4	234.5	305.9	241.1
L B	80.3	146.9	143.3	140.1	124.5	164.9	127.5
L C	65.7	97.9	94.6	97.2	84.4	187.9	89.9
桁試験体	43.7	106.2	102.7	100.9	68.2	110.6	80.0

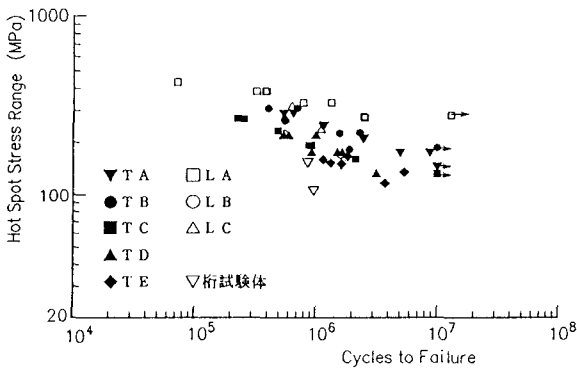
点での応力で外挿すればさらにホットスポット応力の差は小さくなるように思われるが、溶接止端から 2 mm 程度までの点ではピーク応力の影響を受ける恐れがあり、また応力実測も難しくなることから、外挿点の位置は止端から 4 mm 以上に設定するのが適切であろうと思われる。そこでここでは、E 法よりもさらに溶接止端に近い、4 mm と 6 mm の点で外挿する方法（G 法）を新たに検討した。表－3 に、G 法で求めたホットスポット応力を示す。T 継手のホットスポット応力にまだばらつきがあり、また L A 試験体のホットスポット応力が他と比較して著しく大きいなどの点はあるが、他の手法と比較して試験体種類によるホットスポット応力の差は小さくなり、また T 継手試験体と縦リブ継手試験体（L B、L C）のホットスポット応力はほぼ同じレベルになっている。

6. ホットスポット応力で整理した疲労試験結果

図－12 に G 法により求めたホットスポット応力で整理した疲労試験結果を示す。公称応力範囲で整理した場合に見られた T 継手と縦リブ継手の疲労強度の差が、ホットスポット応力で整理することによりほとんどなくなっている。図中▽は桁試験体の疲労試験結果であるが、公称応力で整理した場合よりは小型試験体との疲労強度の差は小さくなっているが、依然として疲労強度は低い傾向にある。これは従来より指摘されているように溶接残留応力の影響などが原因であると考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

表－3. G 法により計算した
ホットスポット応力
(MP a)

試験体	公称応力	G 法
T A	219.1	219.1
T B	183.4	192.6
T C	128.6	163.3
T D	128.6	141.1
TE (M5mm)	71.0	163.3
TE (M10mm)	35.8	138.5
L A	227.7	316.5
L B	80.3	176.7
L C	65.7	208.9
桁試験体	43.7	115.8



図－12. ホットスポット応力（G 法）で整理した
疲労試験結果

7. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ・溶接止端部の微視的な形状による応力（ピーク応力）の影響範囲は、溶接止端から 2 mm 程度までである。
- ・局部応力を溶接部近傍での一点での応力として定義する場合、T 継手に対しては溶接止端から 0.4 T（T：板厚）の位置で測定した応力を公称応力として疲労照査を行えばよい。
- ・ホットスポット応力を溶接止端から 4 mm と 6 mm の点での応力で外挿して求め、疲労試験結果を整理した結果、ここで対象とした T 継手と縦リブ継手の疲労強度はほぼ同じレベルとなりった。

今後、局部応力と疲労強度との対応がついている実験データを蓄積し、ここで得られた結論をさらに検証していくとともに、さまざまな継手形式について同様の検討を行う必要があると考えている。本研究を実施するにあたり、東京工業大学竹淵敏郎技官に手伝っていただいた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 三木千寿, 坂野昌弘, 舘石和雄, 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, pp. 403-410, 1988
- 2) 日本鋼構造協会: 疲労設計指針(案), 平成元年11月
- 3) 土木学会: 鋼管構造の進歩に関する調査研究報告所, 鋼管構造の疲れ強さ, 昭和58年3月
- 4) 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
- 5) 飯田國廣, 浅野皓三, 豊福正継, 石川邦照: 海洋鋼管継手疲労設計法の一試案, 日本造船学会論文集, 大148号, 1981
- 6) 土木学会: 建造物保守管理の標準(案) 同解説: 鋼構造物, 1987
- 7) 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
- 8) Huther, F.: Recommendation for Hot Spot Stress Definition in Welded Joints, IIS WG XIII/XV, 1990
- 9) Shimokawa, H., Takena, K., Itoh, F. and Miki, C.: Fatigue Strength of Large-Size Gusset Joints of 800 MPa Class Steels, Proc of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol2, No.1, 1985
- 10) Miki, C., Mori, T., Tuda, S. and Sakamoto, K.: Retrofitting Fatigue-Cracked Joints by TIG Arc Remelting
- 11) 三木千寿, 森猛, 阪本謙二, 柏木洋之: 前面隅肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響, 構造工学論文集, Vol. 33A, 1987
- 12) 三木千寿, 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
- 13) 田垣徳幸, 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一: 溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響, 土木学会論文報告集, 第324号, 1982

(1991年9月30日受付)