

# ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測

## STRESS ANALYSIS AND CALCULATION OF FATIGUE LIVES ABOUT WEB-GUSSET WELDED JOINTS

竹名興英\*・川上博道\*\*・伊藤文夫\*\*\*・三木千寿\*\*\*\*

By Kouei TAKENA, Hiromichi KAWAKAMI, Fumio ITOH and Chitoshi MIKI

Double side web-gusset welded joints whose main plate thicknesses are changed and a single side web-gusset welded joint are examined using finite element stress analysis. As a result, differences in stress distribution between these joints are revealed, and it becomes clear that shell finite element analysis does not provide sufficient accuracy for such three-dimensional joints. And their fatigue lives are calculated by fracture mechanics. The results indicate that these fatigue lives are almost the same.

*Keywords : fatigue, gusset, steel structure*

### 1. まえがき

鋼構造物の疲労現象において、亀裂がまだ比較的小さい寸法までの繰り返し数が、全体寿命の大きな部分を占めていることが知られている<sup>1)</sup>。したがって、破壊力学解析によって精度よく疲労寿命を予測するためには、亀裂が小さい寸法における応力拡大係数を精度よく計算することが重要である。しかし、ウェブガセット溶接継手のような三次元の形状をした継手では、隅肉溶接の形状まで取り入れた精度の高い応力解析はかなり困難である。

前面隅肉溶接継手等は、板厚が増加するに従って疲労強度が低下する現象、すなわち寸法効果があることが知られている<sup>2)</sup>。これに対して、ウェブガセット溶接継手は、寸法効果がないといわれている<sup>3),4)</sup>。このスミスらの研究では、アイソパラメトリック三次元要素を用いて、この継手の寿命予測を行った。この予測では、板厚が増加するに従って、疲労強度が増大する結果になっている。しかし、要素分割はかなり粗く、また解析のモデルと同じ寸法で製作された試験体の疲労試験結果は、これらの

予測した寿命より非常に長い。これは、隅肉溶接端部の形状は鋭角（すなわち、止端部の曲率半径が考慮されていない）である、初期亀裂寸法が比較的大きい0.15 mmである、亀裂形状は亀裂最深点の深さによって決まる、などと仮定して解析を行ったことが原因であると考えられる。また、実橋においてこの継手の用いられ方としては、ウェブの片側にのみガセットが取り付けられていることが多いが、そのようなモデルの疲労試験および解析は今までにほとんど行われていない。また、三次元形状の継手の簡易な応力解析方法として、まずシェル要素で亀裂進展面付近の変位を計算し、次にこれらを強制変位として二次元解析する方法が用いられる場合<sup>5)</sup>が多い。しかし、この方法が妥当であるという根拠はない。また、山田ら<sup>6)</sup>は、ひずみゲージによる応力測定とFEM 解析を組み合わせてこの継手の応力分布を求めている。

本研究は、ウェブガセット溶接継手の詳細な局部応力の解析とその結果を用いた亀裂進展の解析によって、寸法効果を明確にすること、および両側ウェブガセット溶接継手と片側ウェブガセット溶接継手の応力分布と疲労寿命における違いを明らかにすることを第1の目的としている。さらに、三次元形状継手の応力解析にシェル要素を用いることの妥当性を明らかにすることも目的とし

\* 正会員 工博 新日本技研(〒105 港区芝2-1-23)

\*\* 正会員 鉄道総合技術研究所(〒185 国分寺市光町2-8-38)

\*\*\* 正会員 建設機械化研究所(〒417 静岡県富士市大瀬3154)

\*\*\*\* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木学科

(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

ている。そのためまず、三次元 FEM 解析を行うことによって、両側ウェブガセット溶接継手において板厚が変化した場合、およびガセットが主材に両側と片側に付いた場合の応力分布の違いを明らかにした。次に、三次元要素解析とシェル要素解析した結果を用いて局部応力を二次元 FEM 解析によって求めた。その結果、シェル要素を用いる方法は三次元形状の継手の板厚内の応力分布を求めるには適当な方法でないことを明らかにした。さらに、疲労試験を行い、その結果に基づいて初期亀裂寸法を設定して、寿命予測を行うことによって、その疲労寿命に対する板厚効果およびガセットが主材の両側と片側に付いた場合の影響を明らかにした。

## 2. 応力解析

本研究の対象とした継手は、溶接止端部を仕上げない縦方向荷重非伝達隅肉溶接継手（ウェブガセット溶接継手）である。応力解析を行ったモデルを Fig. 1 に示す。これらのモデルは、幅 150 mm の主板に高さ 100 mm、長さ 400 mm、厚さ 9 mm のガセットプレートが両側に付いたものおよび片側に付いたものとがある。主板の厚さは、前者が 6.75 mm、9 mm および 18 mm で、後者が 9 mm である。ただし、シェル要素の解析では、主板の厚さを 4 mm、6 mm、9 mm、18 mm および 36 mm として行った。隅肉溶接のサイズは 5 mm で、その止端形状を表わすフランク角および曲率半径は、後述する実験結果に基づいてそれぞれ  $135^\circ$  および 0.1 mm とした。なお、板厚 9 mm の両側ウェブガセット継手と同じ寸法の試験体について疲労試験を行っている。

疲労亀裂は、Fig. 2 に示すようにガセットプレートの板厚方向の中央点の主板表面でこのガセットプレートを取り付けるための隅肉溶接止端部より発生し、縦方向に直角な断面上を進展すると仮定した。亀裂は半梢円状に進展する<sup>⑥)</sup>とし、亀裂の深さ方向前縁と表面の幅方向前縁の応力拡大係数を求める<sup>⑩)</sup>ことにより、パリス則によって亀裂の進展を予測した。したがって、亀裂進展面におけるその中央の主板の板厚方向の応力分布と表面の応力集中係数を FEM 解析によって求めた。本研究では、特に主材の板厚内の応力分布に対する溶接部の影響や板厚の影響に着目していることから、1 次解析として全体を三次元要素によって解析し、次にその結果を用いて 2 次解析として溶接止端部付近の応力を二次元要素によって計算した。このようなズーミングによる方法で求めた応力は、多少の誤差を含む。しかし、寿命予測に最も重要なガセットプレート端部の溶接止端部の表面付近のこの方法で求めた応力は、2 次解析で強制変位を与える位置がガセットプレートの板厚に比べて亀裂進展面に十分に近い場合は、厳密な値に近いといえる。また、こ

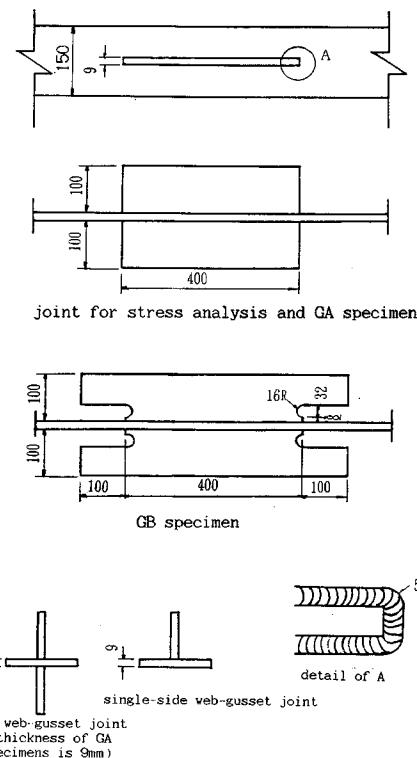


Fig. 1 Configurations and dimensions of models for stress analysis and fatigue test.

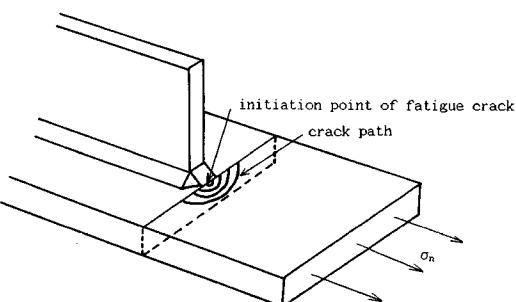


Fig. 2 Assumption of crack initiation and propagation.

のような FEM 解析でのズーミングに伴う誤差は、各モデルに同様に含まれる。したがって、本研究の目的は各モデルの応力分布等の相対的な比較であるので、このような解析方法で十分であると考えられる。FEM プログラムは NASTRAN を、これを支援する要素分割プログラムは MESH を使用した。

### (1) 1 次解析（三次元 FEM 解析）

Fig. 3 に、FEM 解析の対象とした両側ウェブガセット溶接継手の 8 分の 1 のメッシュ分割の例を示す。

Fig. 4 は、ガセットプレート端部付近のメッシュ分割の拡大図である。各継手ともメッシュ分割した要素の寸法

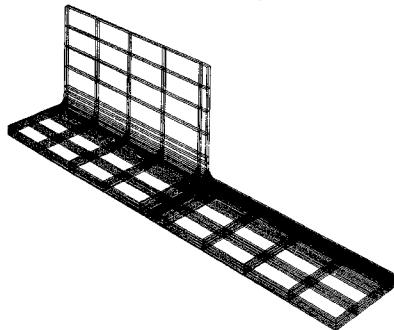


Fig. 3 The mesh used to model the double-side web-gusset joint whose plate thickness is 18 mm.

はほとんど同じである。しかし、片側ウェブガセット溶接継手の場合は、拘束する節点数が少なくなるために自由度が多くなりすぎるので、使用計算機の能力上から主板の板厚方向の要素寸法は他に比べてやや大きくなれた。最小要素寸法は、両側ウェブガセット溶接継手および片側ウェブガセット溶接継手でそれぞれ  $2.5 \text{ mm} \times 2.25 \text{ mm} \times 1.125 \text{ mm}$  および  $2.5 \text{ mm} \times 2.25 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  である。これらの値は、それぞれ縦方向、横方向および板厚方向の値である。また、溶接止端形状は銳角と仮定した。1次解析の主な目的は、亀裂進展面から最も近い節点の変位を求めることがある。この節点の亀裂進展面からの距離は  $2.5 \text{ mm}$  で比較的離れているので、この仮定は変位にほとんど影響がないといえる。

このような継手部の寿命予測を行う際、構造的な応力集中を求めるために1次解析には、シェル要素を用いたFEM解析が行われることが多い。したがって、主板の板厚を変化させた両側ウェブガセット溶接継手についてシェル要素によって解析を行い、三次元解析結果と比較した。そのメッシュ分割を Fig. 5 に示す。

Fig. 6 と Fig. 7 に解析結果を示す。図中の応力は、亀裂進展面の中央でその面に最も近い要素の応力を公称応力で無次元化した値である。Fig. 6(a) と (b) は、主板の板厚を変化させた両側ウェブガセット溶接継手の板厚内の応力分布を示している。Fig. 6(b) の横軸の表面からの距離は板厚で無次元化している。Fig. 6(c) は、同じ板厚の両側と片側のウェブガセット溶接継手の板厚内の応力分布を示している。Fig. 7 は主板の板厚が、4 mm, 6 mm, 9 mm, 18 mm および 36 mm の場合のシェル要素による解析結果であるガセットプレート端部の最も近い主板の応力集中と板厚の関係を示す。

板厚  $6.75 \text{ mm}$ ,  $9 \text{ mm}$  および  $18 \text{ mm}$  の両側ウェブガセット継手について三次元解析によって求めた主板内の応力は、Fig. 6 に示すように、板厚の厚い方が板厚の中心付近の応力や平均の応力が小さいが、表面付近の応力

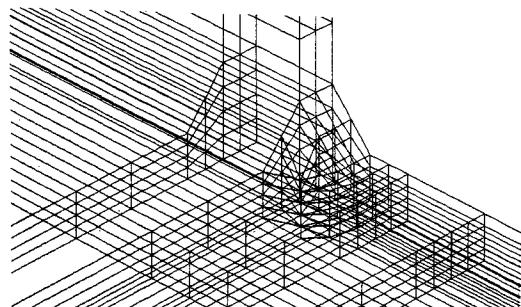


Fig. 4 The mesh used to model the region of the end of the gusset-plate.

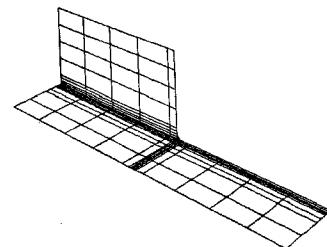


Fig. 5 The mesh used in the analysis of shell elements.

集中は逆に大きい。これに対して、Fig. 7 に示すようにシェル要素の解析結果は、板厚が大きくなるに従って応力が小さくなっている。これは、この解析方法によって求められる応力は平均応力に相当する応力であるためと考えられる。したがって、シェル解析では板厚が厚くなるに従って、表面付近の変位はますます過小に評価されることになる。

Fig. 6 に示すように、同じ板厚  $9 \text{ mm}$  の両側と片側ウェブガセット溶接継手の三次元解析による表面付近の応力分布はほとんど同じである。板厚  $9 \text{ mm}$  の片側ウェブガセット溶接継手の主板の下面を板厚方向に拘束すると、板厚  $18 \text{ mm}$  の両側ウェブガセット溶接継手と全く同じ条件となる。しかし、拘束されない場合は、Fig. 8 の変位図に示すよう反りかえることによって表面の応力集中係数が小さくなると考えられる。

## (2) 局部応力の解析（二次元平面ひずみ）

板厚  $9 \text{ mm}$  と  $18 \text{ mm}$  の両側ウェブガセット溶接継手と板厚  $9 \text{ mm}$  の片側ウェブガセット溶接継手について二次元解析を行った。Fig. 9 に、二次元解析に用いたメッシュ分割の例を示す。この図形の左右の辺に1次解析で求めた変位を強制変位として与えて、二次元平面ひずみ要素によって FEM 解析を行った。最小要素寸法は  $0.02 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$  である。強制変位を与えた節点は、右辺でその間隔は  $0.5625 \text{ mm}$  とし、左辺ではその数を右辺と同じにした。1次解析で求められていない節点の強制変位は、直線補間で求めた。

**Fig. 10** に解析結果を示す。図に示す応力は、表面の応力が最大となる溶接止端部の曲率半径の中央付近の板厚方向すなわち **Fig. 9** の A-A 断面の応力である。表面の応力集中係数は、板厚 9 mm と 18 mm の両側ウェブガセット溶接継手、および 9 mm の片側ウェブガセット溶接継手で、それぞれ、7.6, 8.9 および 7.3 である。しかし、シェル要素を用いた解析結果では、板厚 9 mm および 18 mm の両側ウェブガセット溶接継手でそれぞれ 7.9 および 7.2 で、板厚の厚い方が表面の応力集中係数が小さい。2 次解析においては、ある点の応力は、最も近くの外部境界の節点に与える強制変位の影響を最も受ける。シェル解析においては、板厚が増加するに従って 1 次解析の節点変位が減少する。したがって、2 次解析で節点に与える強制変位が減少するために、この解析方法で求められる表面付近の応力は、ますます小さい値となってくる。寿命を予測する場合は、表面に近い部分の応力分布が重要であるので、このような板厚の変化に伴う板厚方向の応力分布の変化をシェル解析では表現できないために、三次元形状の継手の寿命予測には、シェル解析を用いる方法は不適当であろう。

### 3. 疲労試験

疲労試験体は、応力解析に用いた板厚 9 mm の両側ウェブガセット継手で、合計 11 体を製作した。そのうち、5 体 (GA 試験体) は応力解析のモデルの形状と同じである。鉄道橋でウェブの面外変形によって補剛材の下端に疲労亀裂が発生<sup>7)</sup>しているので、残りの 6 体 (GB 試験体) は補剛材を想定してガセットプレート端部を **Fig. 1** に示すような形状にした。なお、GB 試験体は、実際の溶接状態を再現するために、ガセットプレートの端部にフランジを想定した板を当てて溶接を行った。試験体の使用鋼材および溶接棒は、SS 41 と NW 77 (D 5016) である。

荷重載荷条件は、8 体は最小応力を零に、3 体は最大応力を降伏応力にした。試験結果の破断回数と応力範囲を **Fig. 11** に示す。図には、この継手の国鉄の設計基準<sup>8)</sup>、AASHTO<sup>9)</sup> および BS 5400<sup>10)</sup> の設計寿命直線も示す。GA 試験体と GB 試験体の疲労強度の違いはほとんどなかった。太田ら<sup>11)</sup>は、小型の試験体で実構造物の疲労強度を評価する試験方法として、最大応力を降伏応力とす

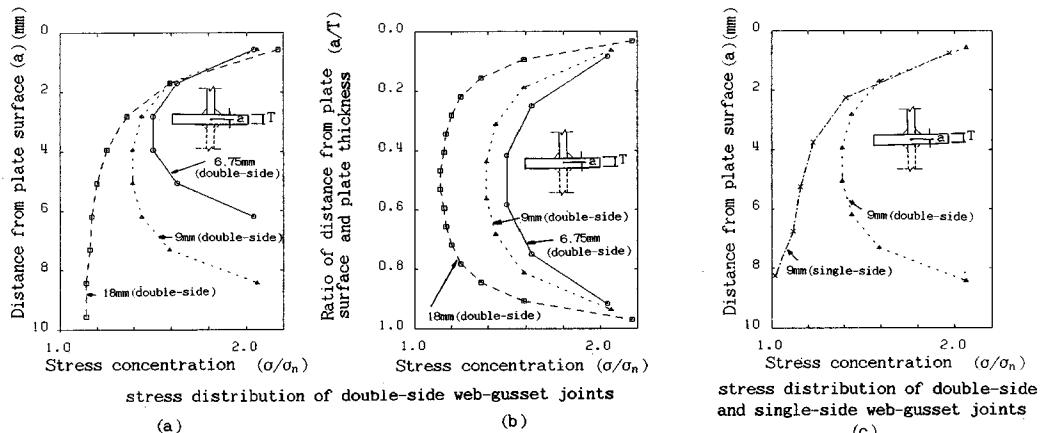


Fig. 6 Results of 3-dimensional FEM analysis.

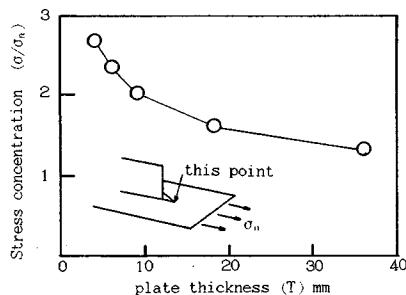


Fig. 7 Relations between stress concentration at the end of gusset-plate and plate thickness by shell element analysis.

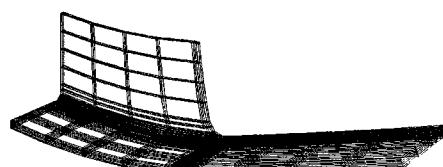


Fig. 8 The deformation-figure of the single-side web-gusset joint.

る方法を提案している。しかし、この試験では、最小応力を零にした試験体と最大応力を降伏応力にした試験体の試験結果にほとんど差がなかった。これは、この試験体は、比較的大型の試験体であることおよびかなり応力集中の高い継手であることなどのためと考えられる。国鉄の設計寿命曲線は、試験結果の下限とよい一致を示すが、余裕がない。また、試験結果は、AASHTO の設計寿命曲線よりかなり高い。

#### 4. 寿命予測

板厚 9 mm および 18 mm の両側ウェブガセット溶接継手と板厚 9 mm の片側ウェブガセット溶接継手について寿命予測を行った。寿命予測に用いた亀裂進展速度  $da/dN$  (mm/cycle) と応力拡大係数  $\Delta K$  (MPa $\sqrt{m}$ ) の関係式は、著者ら<sup>12)</sup>が溶接継手について実験的に求めた下式を用いた。

$$da/dN = 5.47 \times 10^9 \cdot (\Delta K^3 - 2.5^3)$$

亀裂は半梢円状に進展すると仮定できるので、亀裂の深さ方向前縁および表面の幅方向前縁での応力拡大係数範囲を求めれば寿命が予測できる。応力拡大係数の計算に用いた応力分布は、亀裂の深さ方向に対して Fig. 10 に示したものと、表面の幅方向に対しては Fig. 12 に示す表面の応力集中係数を用いた。Fig. 12 に示す応力集中係数は三次元 FEM で求めた結果である。ただし、ガセットプレート端部における溶接止端部の応力集中係数については、溶接の止端形状の影響を考慮に入れるために、亀裂深さ方向と同様に 2 次解析として二次元 FEM 解析を行った。

初期亀裂および限界亀裂寸法をそれぞれ半径 0.02 mm の半円および板厚の 90 % と仮定して、寿命予測し

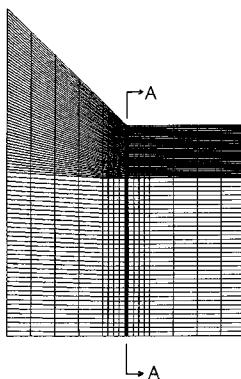


Fig. 9 The mesh used in 2-dimensional analysis.

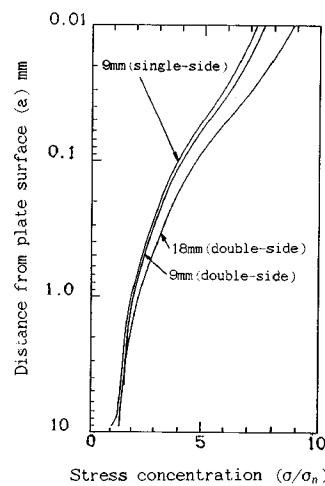


Fig. 10 Results of 2-dimensional FEM analysis.

た結果を Fig. 13 に示す。図には上記の疲労試験結果と板厚 30 mm の試験結果<sup>13)</sup>も示す。初期亀裂寸法は、板厚 9 mm の試験体の試験結果の下限に同じ板厚の両側ウェブガセット溶接継手の寿命予測の結果がほぼ一致するように設定した (Fig. 13)。Fig. 13 に示すように 9 mm と 18 mm の両側ウェブガセット溶接継手の寿命曲線を比較すると、板厚の厚い 18 mm の方が 10 % ほど寿命が長い。このことは、前面隅内溶接継手等では板厚が増加するにつれて疲労強度が減少する現象すなわち板厚効果があるといわれているが、これに対してウェブガセット溶接継手では、板厚効果がないことを裏付けている。また、片側ウェブガセット溶接継手の寿命曲線もそれらの寿命曲線とあまり差がない。なお、応力範囲が低い範囲で板厚の厚い 18 mm の両側ウェブガセット溶接継手の寿命がやや短くなるのは、他の継手に比べて表面付近の応力集中が大きいためである。

#### 5. 結論

ウェブガセット溶接継手について FEM 応力解析および寿命予測を行った結果、下記のことがわかった。

(1) 両側ウェブガセット溶接継手のガセットプレート端の隅内溶接止端部の主板内の応力は、板厚が大きい方が板厚中心付近の応力および平均の応力は小さいが、表面付近の応力は逆に大きい。また、板厚が厚い方がやや疲労寿命が長い。すなわち、この継手ではいわゆる板厚効果がないと考えられる。

(2) 同じ板厚の両側と片側ウェブガセット溶接継手では、上記の位置の表面付近の応力集中はほとんど同じである。また、それらの疲労寿命もあまり差がない。

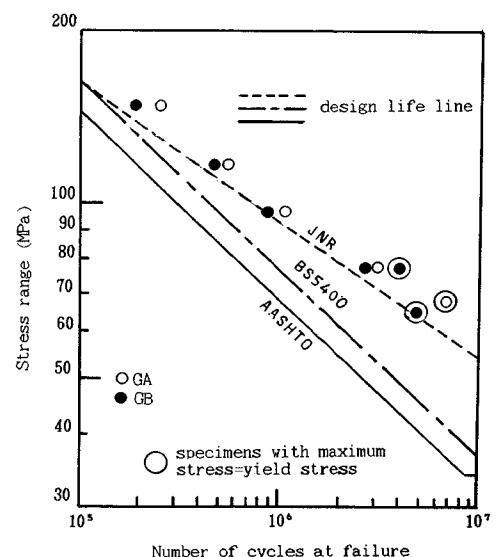


Fig. 11 Test results.

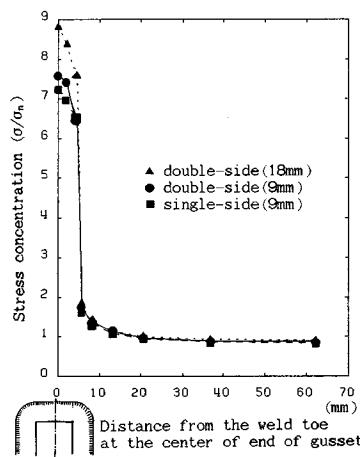


Fig. 12 Distributions of stress-concentration at plate surface.

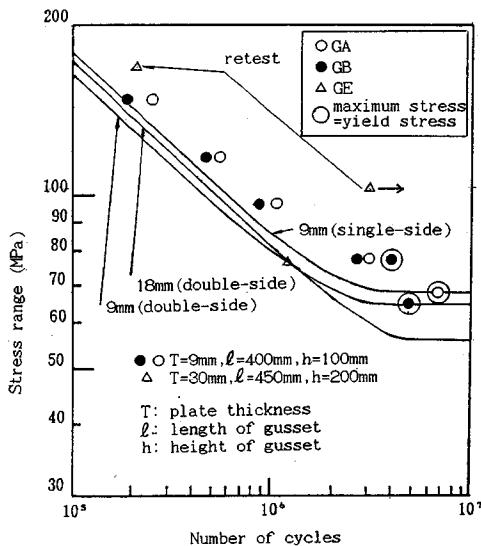


Fig. 13 Calculated fatigue lives and test results.

(3) このような三次元形状の継手の応力を求める場合、簡易な方法としてまずシェル要素で変位を計算し、次にこれらを強制変位として二次元FEM解析する方が用いられる場合が多い。しかし、この方法は寿命予測結果に最も影響を与える表面付近の応力を過小評価するので、このような継手の寿命予測には不適当である。

(4) 国鉄の設計寿命曲線は、試験結果の下限とよい一致を示すが、余裕がない。また、試験結果は、

AASHTOの設計寿命曲線よりかなり高い。

### 参考文献

- Miki, C., Tajima, J., Asahi, K. and Takenouchi, H.: Fatigue of Large-Sized Longitudinal Butt Welds with Partial Penetration, Proceedings of JSCE, No. 322, 1983.
- Gurney, T. R.: Effect of Plate Thickness in Fatigue Strength of Welded Joints, Second International Conference on Behavior of Off-Shore Structure London, 1979.
- Smith, I. J., Smith, I. F. and Hurworth, S. J.: A 3-D Analysis of Longitudinal Non-Load-Carrying Fillet Welded Fatigue Specimen, Research Report, The Welding Institute, 1982.
- Smith, I. F. and Gurney, T. R.: Changes in the Fatigue Life of Plates with Attachments due to Geometrical Effects, Welding Research Supplement, 1986.
- 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方法の検討、三菱重工技報、Vol. 16, No. 3, 1979.
- 山田健太郎・牧野時則・馬場千尋・菊池洋一：疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析、No. 303, 1980.
- 土木学会・鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査、土木学会論文報告集、No. 368/I-6, 1986.
- 国鉄：建造物設計標準および解説、1983。
- AASHTO: Standard Specifications for Highway Bridges, 1977.
- BS 5400 Part 10: Steel, Concrete and Composite Bridges, Code of Practice for Fatigue, 1980.
- Ohta, A., Maeda, Y., Mawari, T., Nishijima, S. and Narumoto, S.: Fatigue Strength Evaluation of Welded Joints Considering High Tensile Residual Stresses, IIW, XII-1198-86, 1986.
- Miki, Ch., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Takeno, K.: Effects of Stress Ratios on the Fatigue Strengths of Cruciform Fillet Welded Joints, Proceedings of ASCE, No. 356/I-3, 1984.
- Simokawa, H., Takeno, K., Itoh, F. and Miki, C.: Fatigue Strength of Large-Size Gusset Joints of 800 MPa Class Steels, Proceedings of ASCE, Vol. 2, No. 1, 1985.
- Albrecht, P. and Yamada, K.: Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proceedings of ASCE, Vol. 103, No. St2, 1977.

(1987.10.12・受付)