

三角リブ付き鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労挙動

SUPER LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF STEEL PIER BASE JOINT WITH TRIANGULAR RIBS

坂野昌弘*, 岸上信彦**, 小野剛史***, 森川友記****, 三上市蔵*****

Masahiro SAKANO, Nobuhiko KISHIGAMI, Tsuyoshi ONO, Tomoki MORIKAWA, Ichizo MIKAMI

*工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-80 大阪府吹田市山手町)

**工修 (株)栗本鐵工所 橋梁設計部 (〒559 大阪府大阪市住之江区柴谷 2-8-45)

***関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻

****駒井鉄工(株) 橋梁工事部 (研究当時: 関西大学工学部土木工学科)

*****工博 関西大学教授 工学部土木工学科

We conducted super low cycle fatigue tests using the steel pier base joint specimen with triangular ribs, in order to investigate the cracking mechanism in the actual steel pier base joint with triangular ribs. Cracks of surface length of 13~21mm were detected in the 1st cycle at the fillet weld toe near the top end of the triangular rib. And after a few cycles, a column flange was failed. Fatigue life of the steel pier base joint specimen with triangular ribs was reduced to be about a half of that without triangular ribs.

Key Words : steel pier, base joint, triangular rib, low cycle fatigue

1. はじめに

1995 年 1 月の兵庫県南部地震の際に、箱形断面の鋼製橋脚柱基部の半周以上が破断するという事例が発見された^{1),2)}。写真-1 に示すように、亀裂は柱とベースプレートとの間に取り付けられた三角形のリブの上端部を連ねるように生じている。亀裂の発生位置は三角リブ上端部のすみ肉溶接の柱側止端部であり、北西角の三角リブ上端部から東側および南側に向かって、それぞれの三角リブ上端部を連ねて進展したものと推定される。このよ

うな亀裂は隅角部の亀裂^{3),4)}とともに、今回の地震で初めて確認されたものであり、どのような力で、どこからどのように生じたか、その発生メカニズムについて明らかにする必要がある。

既報⁵⁾では、地震荷重が繰返し荷重である点に着目し、三角リブのない一般的な鋼製橋脚基部を対象として、10 回程度以下の繰返し回数で破壊が生じるような超低サイクル領域の疲労挙動について検討した。本研究では、三角リブを取り付けた鋼製橋脚基部試験体を用いて文献⁵⁾と同様な繰返し載荷実験と弾塑性 FEM 解析を行い、三角リブ上端部の超低サイクル疲労挙動について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体は、図-1 に示すとおり、リブ無しの鋼製橋脚基部試験体⁵⁾に三角リブを取り付けたものである。三角リブ付き鋼製橋脚基部のモデル化を行う上で、亀裂発生位置と推定される箱断面角部の三角リブ上端付近をできるだけ忠実に再現することを考えた。したがって、試験体の全体的なプロポーシオンの相似性を保つために極端な薄板を用いて溶接ディテールが実物と全く異なったものとなるよりも、溶接部のディテールを再現できる程度の板厚(実物の約 1/3)の鋼材を用い、角継手付近の三



写真-1 鋼製橋脚基部の三角リブ上端部に生じた亀裂
(溶接補修され矩形リブで補強されている)

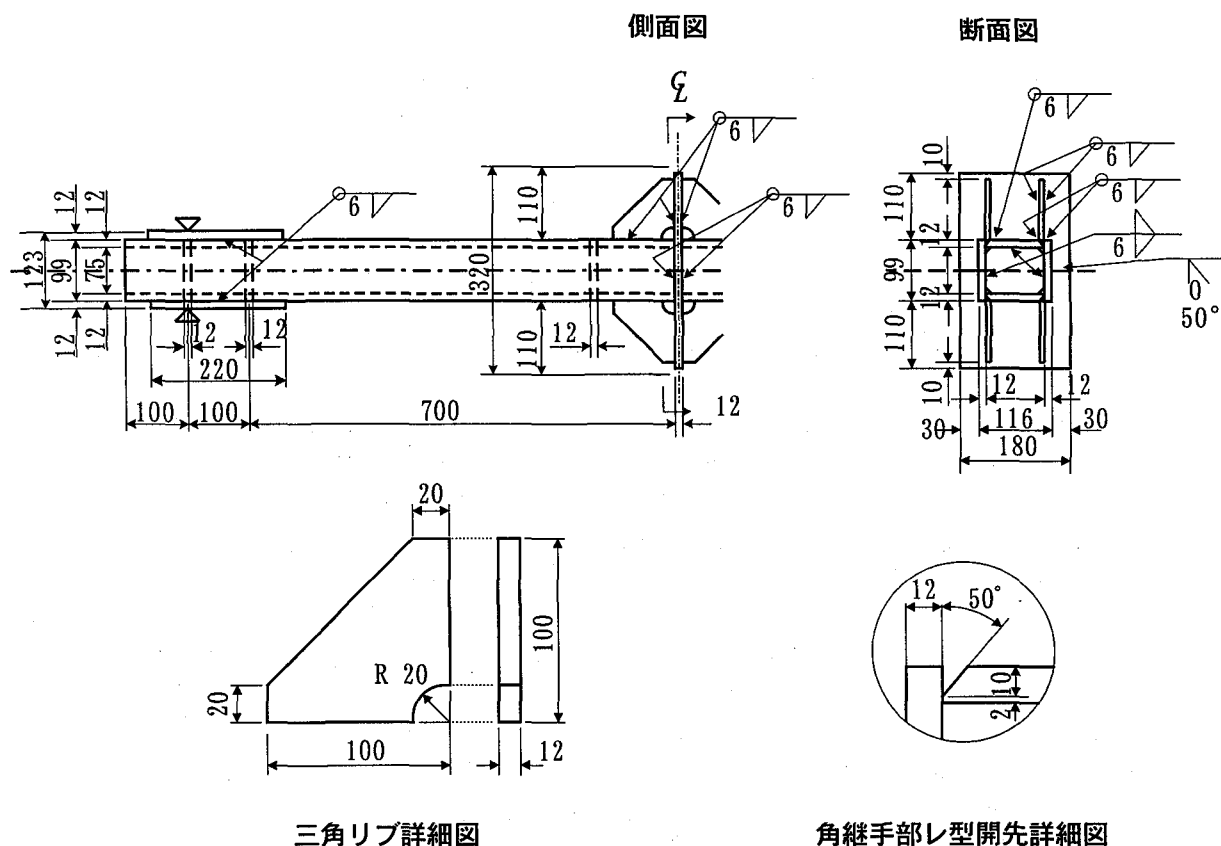


図-1 三角リブ付き鋼製橋脚基部試験体（寸法の単位：mm）

表-1 鋼材と溶接材料の機械的性質と化学成分

材料	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分				
		降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM490A	12	410	538	28	14	41	138	15	3
YFW50	—	501	572	26	3	66	154	17	13

表-2 溶接条件

溶接位置	電流 (A)	電圧 (V)	溶接長 (cm)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (kJ/cm)
柱のフランジとウェブの角溶接	280	38	181.2	30	21
柱とベースプレートのすみ肉溶接	280	40	9.6~12.0	28	24
三角リブ取付けすみ肉溶接	280	40	21.2	28	24

角リブ取り付け部をそのまま取り出したものとなるように試験体を設計した。三角リブは実物と同様に角溶接部に重ねて取り付けた。なお、ベースプレートの固定条件を再現するために、試験体の形状は左右（実物では上下）対称とした。また、座屈防止のためにベースプレートから 150mm の位置にダイヤフラムを取り付けた。実物では柱基部にはコンクリートが充填してある。

表-1 に鋼材 (SM490A) と溶接材料 (YFW50) の機械的性質と化学成分（ミルシート値）を、表-2 に各溶接部の溶接条件を示す。

2.2 載荷方法

載荷実験には載荷容量 ±400kN および ±100mm の電気油圧式疲労試験機を使用した。写真-2 に載荷状況を

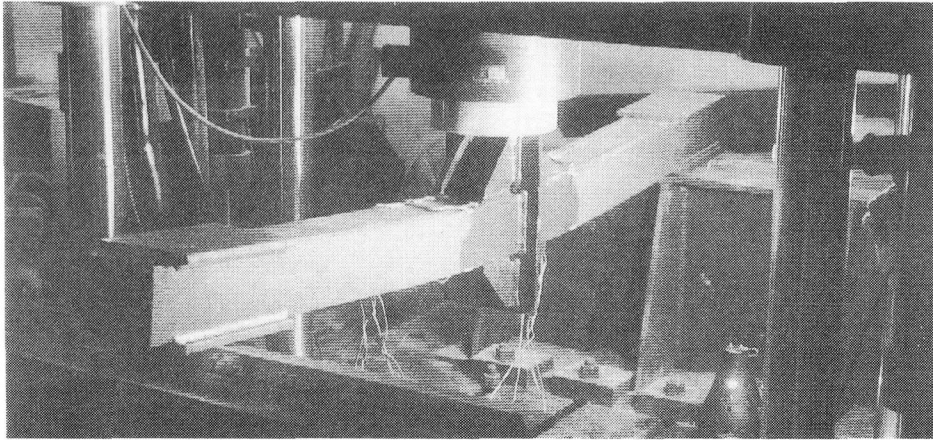


写真-2 載荷状況 (試験体 PBR50, $\delta=50\text{mm}=7.7\delta_y$)

示す。試験体の両端付近を支持し、スパン中央に載荷した。試験体に作用する鉛直方向の荷重は、実際の構造物に作用する水平荷重を想定したものである。なお、実物の橋脚には鉛直方向に死荷重が作用しているが、鋼材の低サイクル疲労挙動に関しては、ひずみの変動範囲とその繰返し回数が支配的であり、予ひずみや平均ひずみなどの影響は無視できることが確認されていることから⁸⁾、死荷重に相当する静的な荷重(平均荷重)は負荷していない。

試験体の支持位置は、リブの付いている場合と無い場合で、試験断面(リブ付き:三角リブ先端部、リブ無し:ベースプレート貫通部)と支点との距離が同じになるように決定した。載荷条件は、リブ無し試験体⁵⁾と同様、載荷点の変位 $\delta = \pm 50\text{mm}$ ($\approx \pm 8\delta_y$) と $\pm 75\text{mm}$ ($\approx \pm 12\delta_y$) の両振り 2 ケースである。これらの変位は、コンクリートを充填したダクティリティの比較的大きい鋼製橋脚の変形性能に対応している^{6), 7)}。 δ_y は鋼材の降伏点(ミルシート値)を用い、三角リブを無視した一定断面の柱として求めた降伏時の変位(6.5mm)である。

なお、図-2 に示すように亀裂発生が予想される三角リブ先端部の回し溶接止端から長手方向に 10mm だけ離れた位置 8 カ所に塑性ひずみゲージ(ゲージ長 2mm)を貼付し、ひずみ変化を測定した。既報⁵⁾では、三角リブが付かない鋼製橋脚基部について、亀裂発生位置付近の極めて局所的なひずみ集中をその程度の大きさのひずみゲージで測定することは不可能と考え、ある程度ひずみ分布がなだらかとなる位置としてすみ肉溶接止端から 10mm という距離を設定している。本研究では、それらと比較するために、同様な位置のひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

表-3 に三角リブ付き鋼製橋脚基部試験体 2 体(PBR50 および PBR75)の試験結果を、リブ無しの試験体 2 体(PB50 および PB75)の結果⁵⁾とともに示す。表中の δ

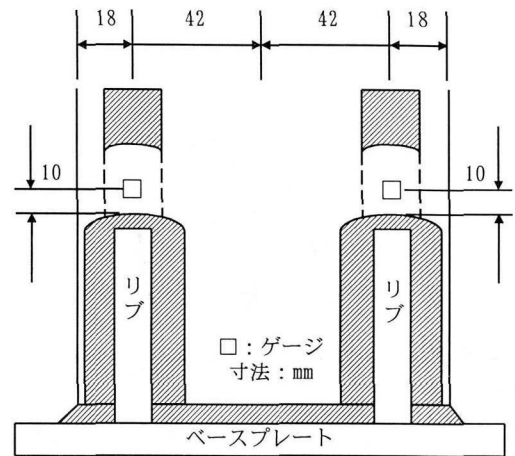


図-2 ひずみゲージ貼付位置

は載荷点の変位、 δ_y はそれぞれの鋼材の降伏点を用い、リブやベースプレートは無視した一様断面柱として求めた降伏時の載荷点の変位である(リブ付きでは 6.5mm, リブ無しでは 6.1mm)。 N_d は亀裂発見時の荷重繰返し数、 $2b_d$ は発見時の亀裂表面長さ、 N_f はフランジ破断時の荷重繰返し数である。

載荷点の変位 $\delta = \pm 50\text{mm}$ および $\pm 75\text{mm}$ のリブ付きとリブ無し⁵⁾の各試験体について、降伏荷重 P_y で無次元化した荷重 (P/P_y) と δ の関係を図-3 に示す。 P_y は δ_y と同様に、一様断面柱と仮定し、それぞれの鋼材の降伏点から求めた降伏荷重である(リブ付き 137kN, リブ無し 143kN)。両試験体とも 1 回目から 2 回目にかけて文献⁵⁾と同様に繰返し硬化現象が明瞭に認められる。 $\delta = \pm 50\text{mm}$ ではリブ付きは 6 回目、リブ無しは 9 回目、 $\delta = \pm 75\text{mm}$ ではリブ付きは 3 回目、リブ無しは 5 回目で荷重が急激に低下しているが、それまではそれぞれの曲線がほとんど一致していることから、基部の全体的な荷重変形挙動に関しては、三角リブ先端部とベースプレート貫通部で違いがないことがわかる。

3.2 破壊挙動

写真-3 および写真-4 に三角リブ付き試験体 PBR50($\delta=\pm 50\text{mm}$)と PBR75($\delta=\pm 75\text{mm}$)の破壊状況を示す。2 体とも 1 回目の载荷中、三角リブ先端の回し溶接部に長さ 13~21mm の亀裂が発生した。载荷回数とともに止端部の亀裂が進展し、 $\delta=\pm 50\text{mm}$ の試験体では 6 回目の载荷中に、 $\delta=\pm 75\text{mm}$ 試験体では 3 回目の载荷中に、亀裂がリブ先端部を連ねるようにして急速に

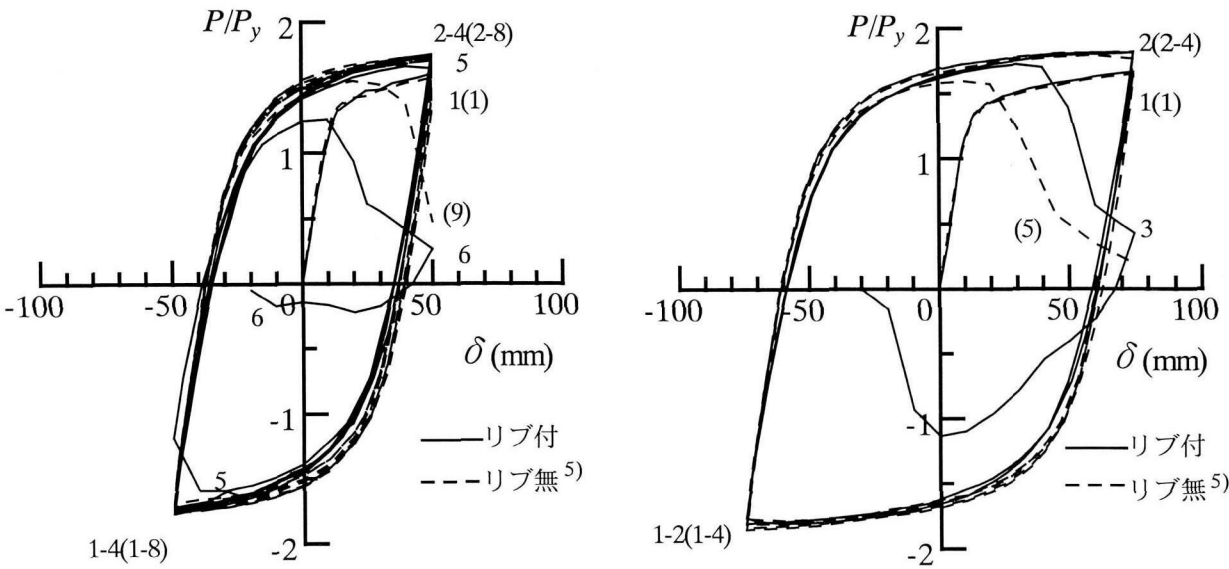
進展し、フランジが破断している。このような破壊状況は写真-1 に示した実物とよく一致している。

写真-5 に両試験体の破断面を示す。それぞれのリブ先端部のすみ肉溶接止端表面から発生した亀裂が板厚方向に進展し、亀裂深さがある程度まで達したときにそれらの亀裂が急速に合体し、フランジを破断させている様子がわかる。

表-3 試験条件および結果

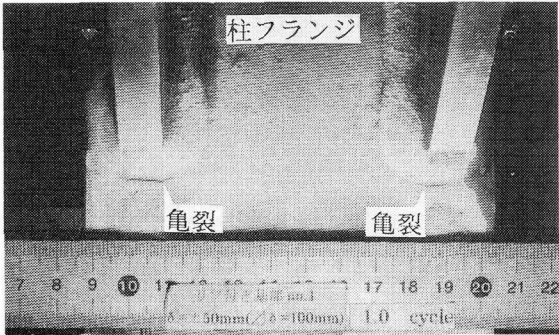
試験体	三角リブ	δ (mm)	δ/δ_y	N_d (cycles)	$2b_d$ (mm)	N_f (cycles)
PBR50	有	± 50	± 7.7	1	13, 15, 17	6
PBR75	有	± 75	± 11.5	1	16, 21	3
PB50	無	± 50	± 8.2	2	6, 7, 16	9
PB75	無	± 75	± 12.3	2	9, 12, 15	5

注) PB50 および PB75 については文献 5)から引用

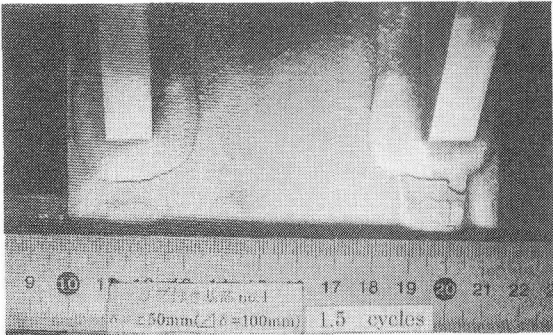


(a) $\delta=\pm 50\text{mm}$ (試験体 PB50 および PBR50) (b) $\delta=\pm 75\text{mm}$ (試験体 PB75 および PBR75)
(ループチップ付近の数字はサイクル数で () 付きはリブ無しのもの)

図-3 荷重 (P) と载荷点の変位 (δ) の関係

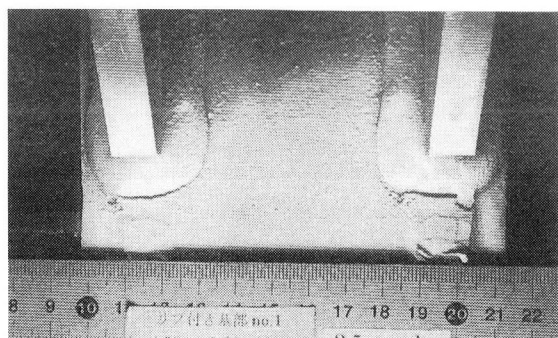


(a) N=1.0cycle

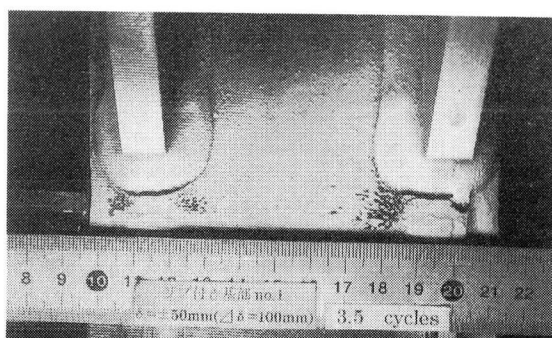


(b) N=1.5cycles

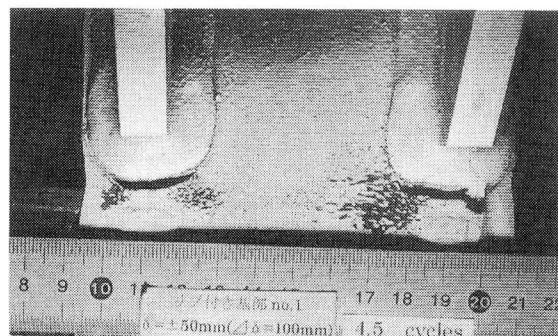
写真-3 破壊状況 ($\delta=\pm 50\text{mm}$)



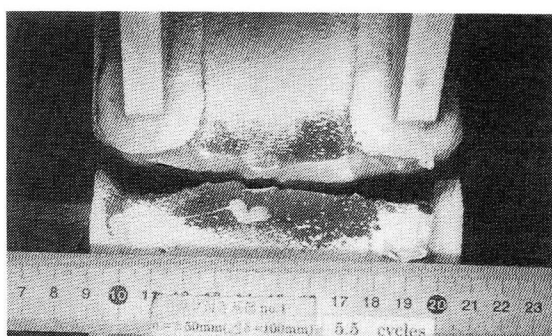
(c) N=2.5cycles



(d) N=3.5cycles

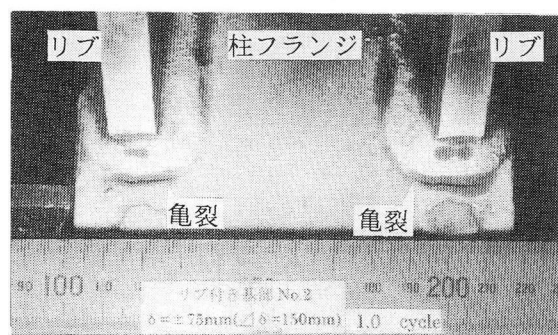


(e) N=4.5cycles

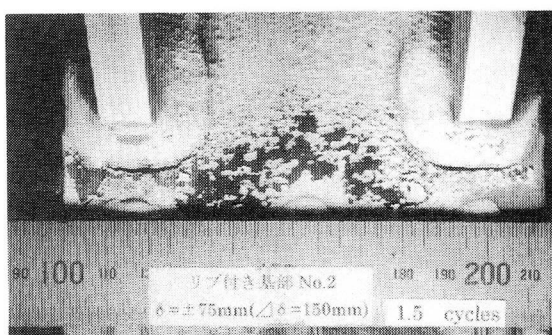


(f) N=5.5cycles

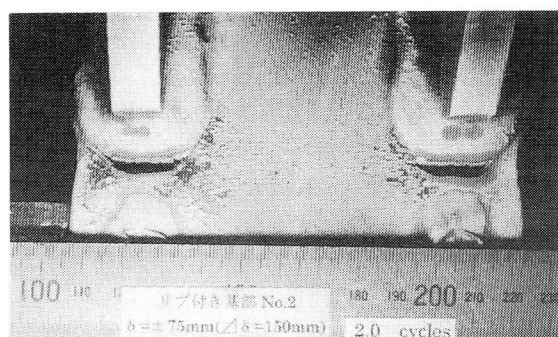
写真-3 破壊状況 ($\delta = \pm 50\text{mm}$)



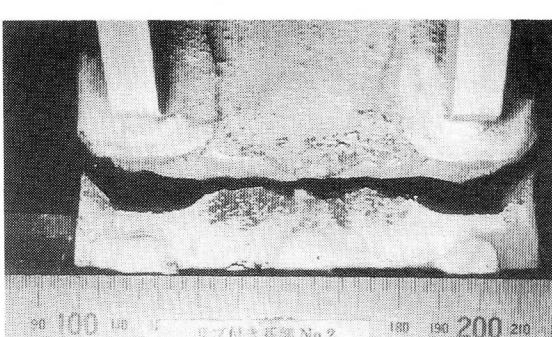
(a) N=1.0cycle



(b) N=1.5cycles

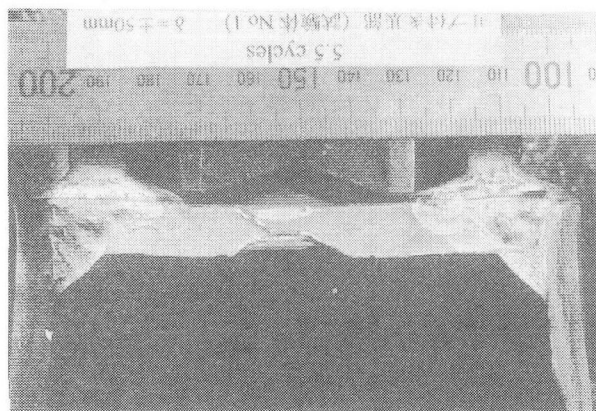


(c) N=2.0cycles

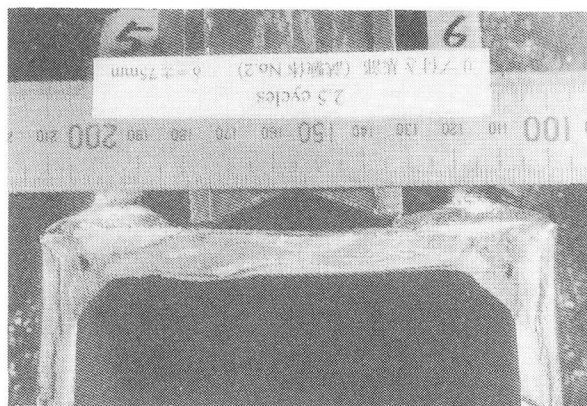


(d) N=2.5cycles

写真-4 破壊状況 ($\delta = \pm 75\text{mm}$)



(a) 試験体 PBR50



(b) 試験体 PBR75

写真-5 破断面

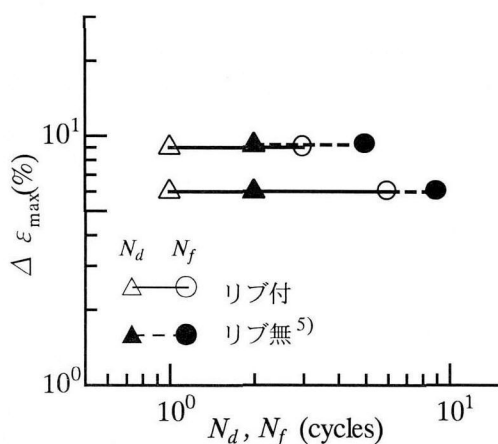


図-4 実測ひずみ範囲と疲労寿命の関係

3.3 疲労寿命

亀裂発生位置である三角リブ先端の回し溶接止端部から長手方向に 10mm 離れた位置に貼付した 8 枚のひずみゲージにより測定したひずみ範囲の最大値 $\Delta \varepsilon_{\max}$ と亀裂発生寿命 N_d および破断寿命 N_f との関係を図-4 に示す。図中の▲と●は、リブ無し試験体の結果⁵⁾である。リブ付き試験体の寿命は、いずれもリブ無しに比べておよそ半減している。

図-4 の縦軸の $\Delta \varepsilon_{\max}$ は亀裂発生位置であるすみ肉溶接止端から 10mm 離れた点の値であり、この位置の $\Delta \varepsilon$ はリブ付き、リブ無しでたまたま同程度であるが、亀裂発生位置であるすみ肉溶接止端でも両者が同じとは限らない。リブによるさらなるひずみ集中も予想される。

4. 亀裂発生位置のひずみ範囲と寿命の関係

4.1 亀裂発生位置のひずみ範囲の推定

ある程度の大きさを持つひずみゲージを用いて表面が平らでないすみ肉溶接止端の局所的なひずみを測定することは不可能と考え、ここでは弾塑性 FEM 解析により亀裂発生位置であるすみ肉溶接止端の局所的なひずみ

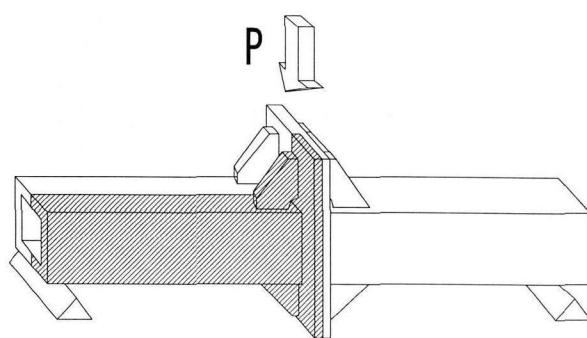


図-5 解析モデル

変化を推定する。解析の方法は文献 5) と同様である。図-5 に解析モデルを、図-6 に解析に用いた繰返し応力範囲-ひずみ範囲曲線を、図-7 に変形状況を示す。

実験は両端支持、中央荷重の単純ばり形式であるが、解析は中央の対称面を支持し、端部荷重の片持ちばり形式である。図-8 と図-9 に解析結果の長手方向ひずみのフランジ幅方向の分布と長手方向の分布を実測値およびリブ無しの解析結果とともに示す。リブ付きの解析値は対称な位置の 8 カ所の実測値 (○印) とよく一致しており、本解析結果が少なくともすみ肉溶接止端から 10mm 程度離れた所までは信頼のおけるものであることが確認できた。一方、リブ無しとリブ付きの解析値同士もひずみゲージ位置ではほぼ一致しており、図-4 に示した実測ひずみが同程度であることと対応している。リブ付きとリブ無しで、すみ肉溶接止端から 10mm 離れた位置のフランジ幅方向のひずみ分布を比較すると、リブ付き (実線) の方がリブ取り付け位置 (○印) 付近でひずみ集中が生じていることがわかる。また、すみ肉溶接止端から 10mm 以内のひずみ分布をリブ付きとリブ無しで比較すると、止端部に近づくにつれてリブ付きの方が急激にひずみが大きくなり、最大値が 2 倍程度に達する著しいひずみ集中が生じていることが推定できる。

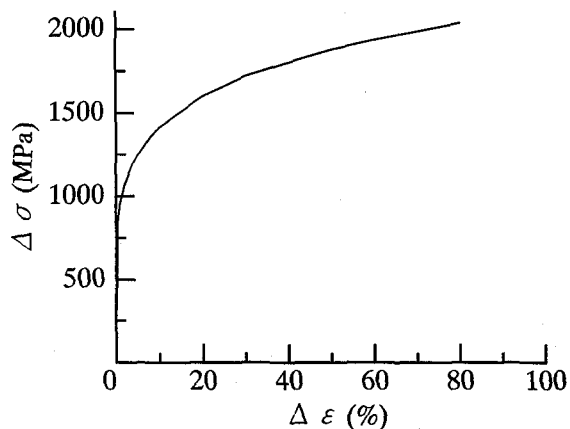


図-6 解析に用いた繰返し応力範囲-ひずみ範囲曲線

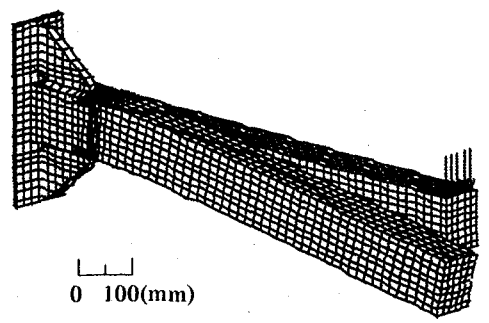
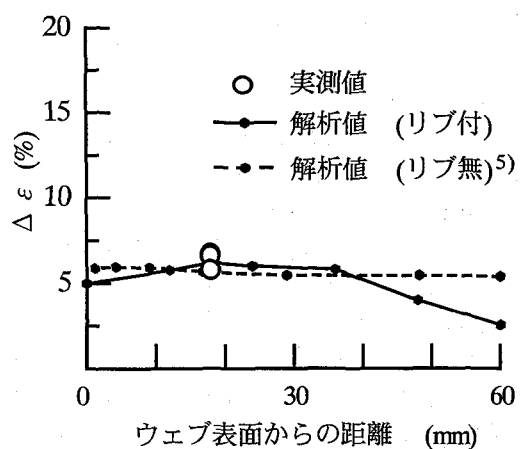
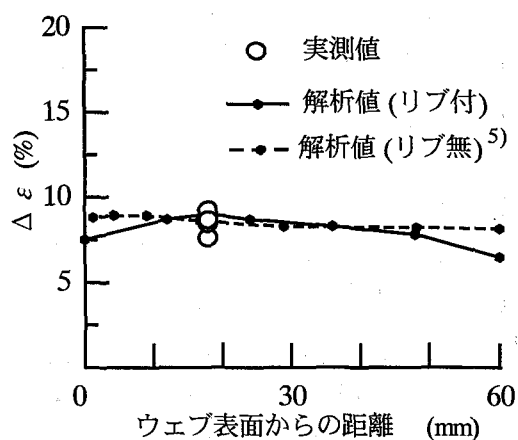


図-7 変形状況 ($\delta=100\text{mm}$)

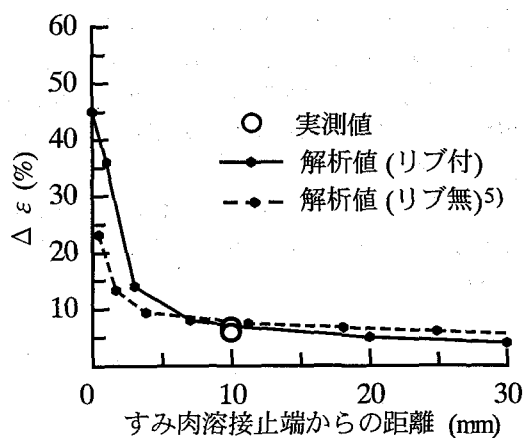


(a) 試験体 PBR50

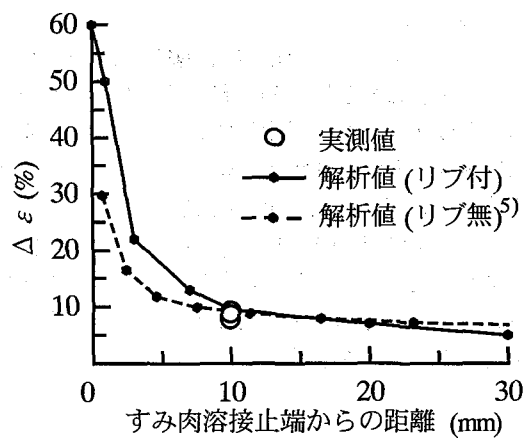


(b) 試験体 PBR75

図-8 長手方向ひずみ範囲のフランジ幅方向分布



(a) 試験体 PBR50



(b) 試験体 PBR75

図-9 長手方向ひずみ範囲のフランジ長手方向分布

4.2 局部ひずみによる寿命評価

図-10 に解析で得られた亀裂発生位置の塑性ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_p$ と亀裂発生寿命 N_d の関係を示す。図中の斜めの直線と◇印は、それぞれ 40~80 キロ級の 5 種類の鋼素材に対して得られた一本の低サイクル疲労寿命曲線、および 50 キロ鋼の引張試験結果⁸⁾ である。今回得られたリブ付き試験体の $\Delta \varepsilon_p$ と N_d の関係は、供試鋼材が文献⁸⁾ のものと当然同一ではなく、しかも亀裂発生位置が溶接部でありながら、リブ無しのものと同様に両者を結ぶ直線上にほぼ分布している。したがって、リブ付き試験体の寿命の低下は亀裂発生位置であるリブ先端の回し溶接止端部の著しいひずみ集中によるものであること、および、亀裂発生位置の局所的なひずみ範囲と亀裂発生寿命の関係が素材の低サイクル疲労試験結果と引張試験結果からおおよそ推定できることが示された。

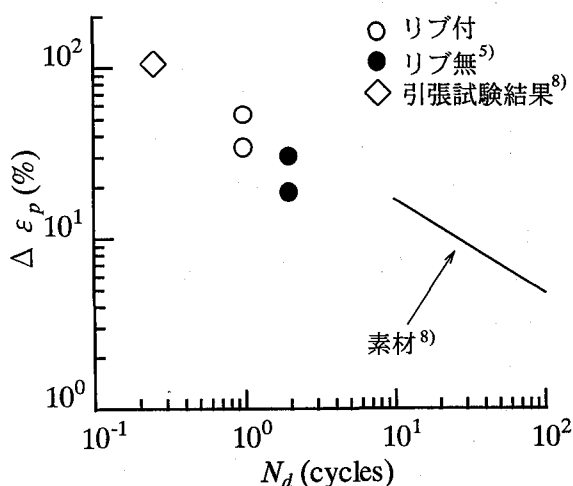


図-10 亀裂発生位置の塑性ひずみ範囲（解析値）と亀裂発生寿命の関係

5. まとめ

三角リブを取り付けた鋼製橋脚基部試験体を用いて繰返し荷重実験と弾塑性 FEM 解析を行い、三角リブ上端部の超低サイクル疲労挙動について検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 荷重振幅が降伏変位の 8~12 倍程度の時、1 回の荷重で三角リブ先端の回し溶接止端部に長さ 1~2cm 程度の亀裂が生じる。それらの亀裂は荷重回数とともに成長し、2~5 回程度の繰返し荷重で、互いの亀裂が合体するような形で急激にフランジを破断させる。

(2) リブ付き基部試験体の超低サイクル疲労寿命は、リブ無し試験体の半分程度に低下する。これは、三角リブによってリブ先端の回し溶接止端部に生じる、リブ無しの場合の 2 倍程度に達する著しいひずみ集中が原因である。

(3) 亀裂発生位置の局所的な塑性ひずみ範囲と亀裂発生寿命の関係は鋼素材の低サイクル疲労試験結果と引張試験結果からおおよそ推定することができる。

謝辞

本研究の一部に対して文部省科学研究費の補助を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 三木千寿：土木構造物の被害，第 3 回鋼構造シンポジウム・パネルディスカッション講演資料，日本鋼構造協会，pp.21-30, 1995.
- 2) Miki, C: Damage to Civil Structures in Great Hanshin Earthquake, Proceedings of the International Conference on Welded Structures in Particular Welded Bridges, GTE Scientific Society of Mechanical Engineering, pp.247-259, Budapest, Hungary, 1996.
- 3) 坂野昌弘，三上市蔵，鷹羽新二：鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動，土木学会論文集，No.563/I-39, pp.49-60, 1997.
- 4) 坂野昌弘，岸上信彦，小野剛史，三上市蔵：鋼製ラーメン橋脚柱梁接合部の超低サイクル疲労破壊挙動，鋼構造論文集，第 4 巻，第 16 号，pp.17-26, 1997.
- 5) 坂野昌弘，三上市蔵，村山弘，三住泰之：鋼製橋脚基部の超低サイクル疲労破壊挙動，鋼構造論文集，第 2 巻，第 8 号，pp.73-82, 1995.
- 6) 才塚邦宏，宇佐見勉：コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証，土木学会論文集，No.570/I-40, pp.287-296, 1997.
- 7) 上仙靖，西川和廣，村越潤，高橋実，岡田淳，中島浩之：角溶接継手が鋼製橋脚の破壊時挙動に及ぼす影響，土木学会第 52 回年次学術講演会概要集，I-B105, 1997.
- 8) 西村俊夫，三木千寿：構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性，土木学会論文報告集，第 279 号，pp.29-44, 1978.

(1997 年 9 月 26 日受付)