

# 鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動

坂野昌弘<sup>1</sup>・三上市藏<sup>2</sup>・鷹羽新二<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>2</sup> フェロー会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 ( 同 上 )

<sup>3</sup> 松尾橋梁株式会社 管理部技術課 (〒590 大阪府堺市大浜西町3)

鋼製橋脚隅角部の梁-柱接合部を対象として繰返し載荷実験および弾塑性解析を行い、低サイクル疲労挙動について検討した。疲労亀裂は柱部材の角継手縦ビード表面上、柱と梁のフランジ同士を接合するすみ肉溶接との交差部およびその近傍から生じており、荷重の繰返しに伴って成長し、フランジを破断させている。±10.8δy の繰返し載荷を受けた最も短寿命の試験体では3サイクル目に表面長さ数mm程度の亀裂が発見され、21サイクルでフランジが破断した。鋼素材の繰返し応力-ひずみ曲線を用いた三次元弾塑性FEM解析によって得られた亀裂発生位置の塑性ひずみ範囲と鋼素材の塑性ひずみ-亀裂発生寿命曲線から、鋼製橋脚隅角部の亀裂発生寿命が精度良く予測できることが示された。

**Key Words :** steel pier, beam-column joint, low cycle fatigue, plastic strain range

## 1. はじめに

地震や台風などにより、構造物に過大な外力が比較的少数回(10<sup>1</sup>回から10<sup>3</sup>回程度)繰返し作用する場合が考えられる。一回の荷重では破壊しなくとも、繰返し載荷によって損傷が進行し、破壊に到る可能性がある。繰返し載荷中、構造物全体としては弾性的な挙動を示していても部材の接合部や断面変化部あるいは切欠き等の応力集中部では局部的に降伏し、塑性変形を繰返し受けることになる。外力の繰返しに伴い、それらの応力集中部から疲労亀裂が発生し成長することによって構造物全体の強度や剛性が急激に低下するおそれがある<sup>1)</sup>。現実には1995年1月の兵庫県南部地震において、鋼製橋脚の隅角部や基部等で低サイクル疲労によると思われる種々の亀裂が発見されており<sup>2)</sup>、過大な繰返し荷重を受ける構造物の強度や変形性能を評価する上で、構造物中に存在する応力集中部の低サイクル疲労は重要な検討項目の一つと考えられる。

現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>では、道路橋の耐震安全性は静的あるいは動的解析によって得られた応力や変位の最大応答値を許容値と比較することにより照査するよう規定されている。しかしながら、地震力に

よる荷重は本質的には繰返し荷重であり、最大値よりも小さい荷重の繰返しによるダメージの蓄積や強度の低下、および単調荷重下とは異なる破壊モードなどについて十分把握しておく必要がある。

近年、鋼製橋脚隅角部を対象とした静的および繰返し載荷実験が幾つか行われている<sup>4)-6)</sup>が、それらは主に隅角部パネルのせん断変形に注目したものであり、繰返し荷重によって生じる亀裂の安定成長(低サイクル疲労)および不安定成長(脆性破壊)に関してはほとんど検討されていない。薄肉構造の場合、過大荷重によって生じる典型的な破壊モードは座屈であるが、鋼材の塑性変形が十分生じないうちに座屈してしまうようでは変形性能はあまり期待できず、鋼材の豊かな塑性変形能力を有効に活かすことにはならない。一方、厚肉化あるいはリブによる補剛の強化などによって座屈に対する抵抗を増し、大きな変形に耐えられるようになってくると、今度はひずみ集中部の低サイクル疲労が問題となる。構造物の軽量化・長寿命化とともに高サイクル疲労が顕在化してきたように、低サイクル疲労は構造物の塑性設計や変形性能向上をめざした結果浮上してくる問題といえよう。

建築分野では、厚肉H形鋼からなる骨組構造の柱

はり溶接接合部を対象として、その低サイクル疲労強度に及ぼすエンドタブや裏当金、スカーラップ（コープホール）等の影響について検討された研究例<sup>7) - 10)</sup>はあるが、部材の断面形状と接合部のディテールの異なる鋼製橋脚に対してそれらの結果をそのまま適用することはできない。弾性範囲を越えるような過大な繰返し荷重が作用する鋼製橋脚を想定した場合には、鋼製橋脚のディテールを対象とした低サイクル疲労挙動の検討が必要である。

一方、小型材料試験片レベルでは、低サイクル疲労寿命は塑性ひずみ範囲の関数として表されることが知られている<sup>11)</sup>。しかしながら、溶接継手部では複雑な表面形状やひずみゲージの大きさ等の関係から亀裂発生位置でのひずみ測定が不可能な場合が一般的であり、また、隅角部などの部材接合部では構造的な不連続部に溶接部の局所的な形状変化も加わって非常に複雑なひずみ分布を示す上に、鋼材の応力-ひずみ関係が繰返し荷重によって変化するため、解析的にも亀裂発生位置の局所的なひずみ範囲を精度良く求めることは容易ではない。

以上のことがらを考慮し、本研究では、図-1に示すような鋼製橋脚隅角部コーナーの角継手をモデル化した試験体を用いて変形量が最大で弾性限界の10倍を越えるような過大な繰返し荷重実験を行い、変形挙動や破壊状況、繰返し荷重の大きさと寿命の関係について検討した。さらに、鋼素材の繰返し荷重時の応力-ひずみ関係<sup>11)</sup>を用いて三次元弾塑性FEM解析を行い、隅角部の低サイクル疲労寿命評価を試みた。

## 2. 実験方法

### (1) 試験体

試験体の形状と寸法および溶接の詳細を図-2に示す。長手方向を柱として貫通させ、隅角部コーナーの角継手部（図-1参照）をモデル化している。なお、試験片は十字形であるが特に十字継手部を想定したものではなく、隅角部コーナーの角継手部が開閉するような変形モードとするために荷重の便宜上上下左右対称形としたものである。鋼材は柱および梁のウェブとフランジに板厚12mmのSM490、ダイヤフラムにはSS400を使用した。柱、梁各箱形断面部材の断面集成にはレ型溶接、柱と梁のフランジ同士の接合にはレ型とすみ肉の組合せ溶接を用いた。溶接方法はソリッドワイヤを用いたCO<sub>2</sub>ガスシールドアーク溶接である。鋼材と溶接材料の機械的性質と化学成分を表-1に、溶接条件を表-2に示す。

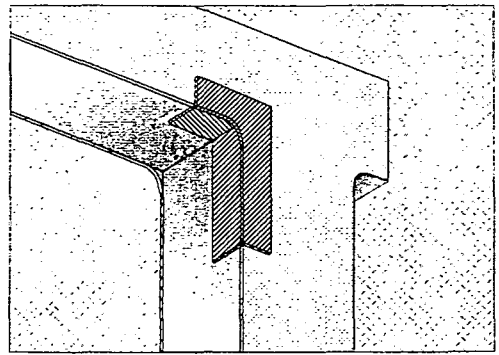


図-1 鋼製橋脚隅角部コーナーの角継手部（斜線部分）

### (2) 繰返し荷重試験

荷重方法は試験体の両端支持、スパン中央荷重による3点曲げとし、動的荷重能力±600kNの電気油圧式疲労試験機を使用した。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地震力等の変動荷重を想定したものである。なお、鋼材の低サイクル疲労強度はひずみの変動範囲とその繰返し回数にのみ依存し、ひずみや応力の絶対値、平均応力や平均ひずみ、応力比などの影響は無視できることが既に確認されているため<sup>11)</sup>、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。

荷重試験は同一条件で製作した5体の試験体を用いて行った。荷重条件は表-3に示すように、試験体No.1とNo.3は荷重 $P = \pm 392\text{kN} (\pm 1.5P_y)$  および $\pm 1.9P_y$ の両振り荷重、試験体No.2とNo.4は荷重位置の鉛直方向変位の変動幅 $\Delta \delta$ がそれぞれ5.0mm ( $1.9 \delta y$ )と5.5mm ( $2.4 \delta y$ )の片振り荷重、試験体No.5は $\delta = \pm 25\text{mm} (\pm 10.8 \delta y)$ の両振り荷重とした。 $P_y$ 、 $\delta y$ は、隅角部を固定端とする断面一定の片持ちばりを仮定し、固定端のフランジが降伏点（表-1のミルシート値）に達するときの荷重および変位として求めた。両振り荷重は隅角部が弾性範囲を越えて大きな塑性変形の繰返しを受けるように、また、片振り荷重は隅角部の全体的な挙動が弾性範囲内であるようにそれぞれの変動範囲を設定した。なお、両振り荷重は試験体を半サイクルごとに反転させて行った。

本研究では、繰返し荷重によって生じるダメージの本質を亀裂の発生とその成長過程であると考え、亀裂発生が予想される位置について繰返し荷重中に一旦試験機を停止し、浸透探傷法および磁粉探傷法を用いて亀裂の検出を試みた。

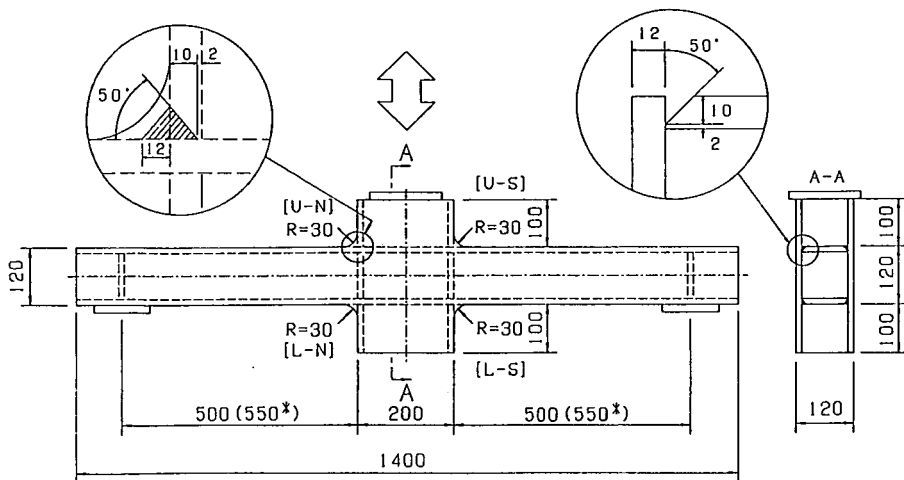


図-2 試験体の形状と寸法（寸法の単位：mm，\* 印付きは試験体No. 3のみ）

表-1 使用鋼材と溶接材料の機械的性質および化学成分（ミルシート値）

材 料	機 械 的 性 質			化 学 成 分 (%)				
	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
SM490A*	382	520	30	15	33	122	18	3
SM490A**	333	510	29	15	33	130	18	2
JIS YGW11	460	560	30	5	73	163	11	16

\* : 試験体No. 1, No. 2

\*\* : 試験体No. 3~No. 5

表-2 溶接条件

位 置	層	溶接長 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/cm)
①	1st	1400	240	29	37~43	9710~11290
	2nd	1400	240	29	23~26	16060~18160
②	1st	100	240	29	42~43	9710~ 9940
	2nd	100	240	29	22~24	17400~18980
③	1st	96	240	29	34~48	8700~12280
	2nd	96	240	29	19~27	15470~21980
	3rd	96	240	29	43~49	8520~ 9710
	4th	96	240	29	52~77	5420~ 8030

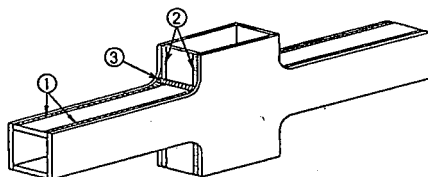


表-3 繰返し載荷試験結果

試験体	P (kN)	P/Py	$\delta$ (mm)	$\delta/\delta y$	Nd (回)	2bd (mm)	Nf (回)
No. 1	±392	±1.51	-	-	50	5.8	96
No. 2	-	-	5.0~10.0 ( $\Delta\delta=5.0$ )	1.9~3.8 ( $\Delta\delta/\delta y=1.9$ )	5000	3.7	18000
No. 3*	±392	±1.90	-	-	10	2.4	51
No. 4	-	-	9.0~14.5 ( $\Delta\delta=5.5$ )	3.9~6.3 ( $\Delta\delta/\delta y=2.4$ )	1000	4.6	10330
No. 5	-	-	±25.0	±10.8	3	2.2.5	21

P : 荷重

$\delta$  : 載荷点の鉛直変位

Nd : 亀裂発見寿命

2bd : 発見時の亀裂表面長さ

Nf : フランジの破断寿命

\* : 載荷長さが 550mm (これ以外は 500mm, 図-2参照)

### 3. 実験結果

#### (1) 破壊挙動

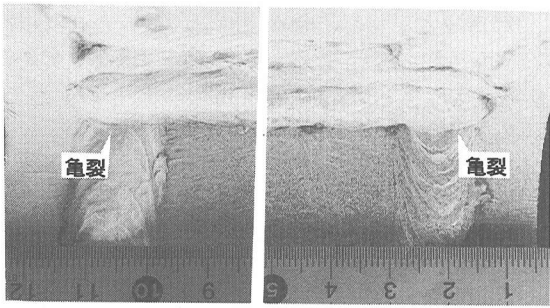
表-3に各試験体について荷重条件と亀裂発見時の繰返し載荷回数(亀裂発見寿命: Nd)およびフランジ破断時の繰返し載荷回数(破断寿命: Nf)を示す。試験体No. 3のみ、支点から隅角部コーナーまでの距離を50mmほど長く設定した。試験体の番号順に実験を行ったが、最初の試験体(No. 1)では発見時の亀裂長さが比較的大きく、Nd=50回以前にもう少し小さな亀裂が生じていた可能性がある。(繰返し回数と亀裂長さの関係については図-3の考察のところで述べる。)最も短寿命の試験体はNo. 5( $\delta = \pm 10.8 \delta y$ )でNd=3回、Nf=21回、最も長寿命の試験体はNo. 2( $\Delta\delta = 1.9 \delta y$ )でNd=5000回、Nf=18000回である。

破壊様式は隅角部の梁と柱のフランジ同士を接合する溶接継手部の疲労破壊である。全ての試験体において、疲労亀裂は4ヶ所のコーナー部全ての柱部材の角継手縦びード表面上、柱と梁のフランジ同士を接合するすみ肉溶接との交差部およびその近傍から生じており、荷重の繰返しに伴って成長し、ウェブに進展した後でフランジが破断している。最終的なフランジの破断は、片振りでは引張側に生じた亀裂、両振りでは引張側と圧縮側によらず成長の早い

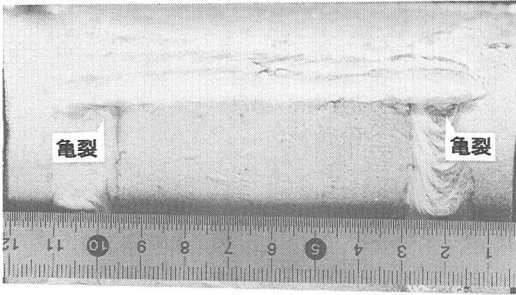
亀裂によりもたらされた。

写真-1と写真-2に、試験体No. 4とNo. 5について亀裂の発生・進展状況を示す。亀裂は初めの載荷時に引張側であるか圧縮側であるかにかかわらず(即ち、平均ひずみや応力比に無関係に)生じている。試験体No. 4では、1000回目で表面長さ5mmの亀裂が確認され、9700回で片側のウェブに亀裂が進展、10330回でもう一方のウェブにも亀裂が進展しフランジが破断している。試験体No. 5では、3回目の繰返し載荷中に磁粉探傷により表面長さ2bが数mm程度の亀裂が複数発見されており、20回で片側の角継手が破断、21回でフランジが破断している。

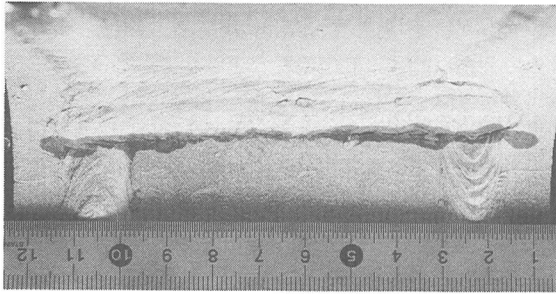
図-3に全ての試験体について、亀裂のフランジ表面長さ2bとフランジの破断寿命に対する荷重繰返し回数の比N/Nfの関係を示す。ほぼ試験開始直後から表面長さが数mm以下の小さい亀裂が発生し、寿命の大半はそのような亀裂の進展過程で占められること、および2bが角溶接部の幅に相当する20mm程度を越えると急激に破壊が進行する様子がわかる。全寿命の80%程度まで疲労破壊が進行しても亀裂の表面長さは数mmから数cm程度であり、写真-1および写真-2に示したようにこの程度の亀裂は肉眼ではほとんど検出不可能である(写真は亀裂が開くように荷重をかけた状態で浸透探傷法あるいは磁粉探傷法を施してある)。



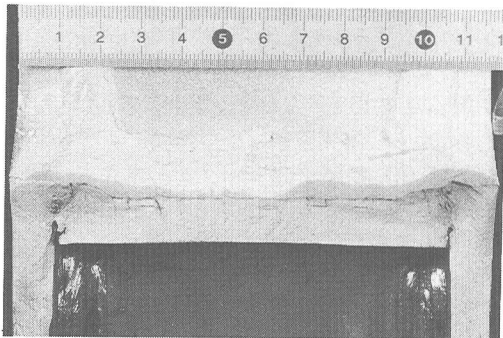
(a) N=1000 回



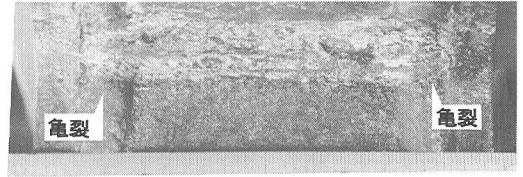
(b) N=5000 回



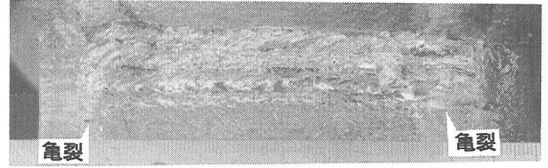
(c) N=9700 回



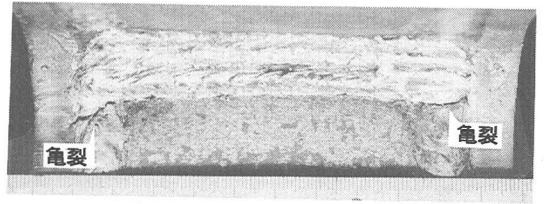
(d) N=10330 回



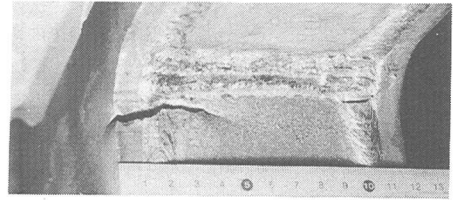
(a) N= 3 回



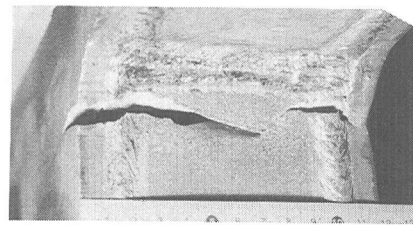
(b) N= 6 回



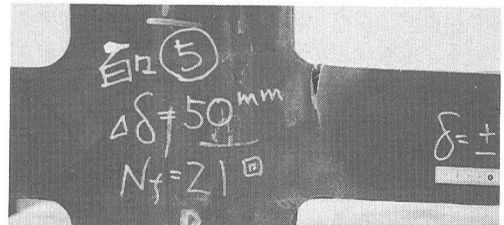
(c) N=12 回



(d) N=20 回



(e) N=21 回



(f) N=21 回

写真-1 亀裂の発生・進展状況 (試験体No. 4)

写真-2 亀裂の発生・進展状況 (試験体No. 5)

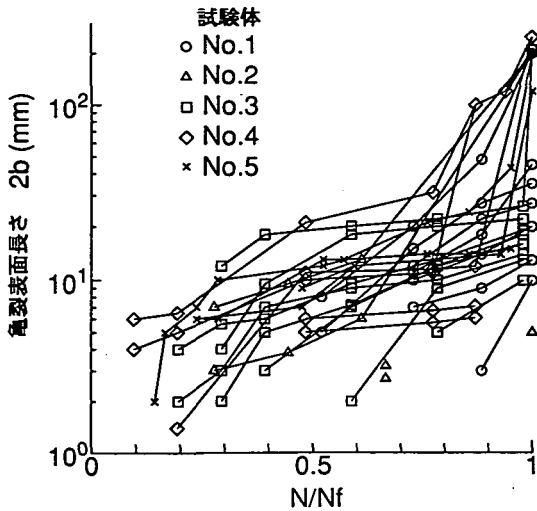


図-3 亀裂表面長さと载荷繰返し回数比の関係

## (2) 荷重-変位関係

図-4に荷重 $P$ と载荷点の荷重方向の変位 $\delta$ との関係を示す。両振り载荷の試験体No. 1およびNo. 3では、繰返しに伴って圧縮側のループが横軸負の方向に移動し、引張側と圧縮側の塑性変形がバランスする方向に変化している。(したがってヒステリシスループは横軸上で始点と終点が閉じていない。) 試験体No. 3では、原点に対してほぼ対称な $P-\delta$ 曲線となったところで移動が停止しており、再び $P-\delta$ 曲線が変化を示すのは亀裂がほぼフランジ全体に成長し、ウェブに進展し始める45回あたり、すなわちフランジが破断する直前である。試験体No. 3では $N=10$ 回のときに既に亀裂が検出されており、 $N=40$ 回ではかなり大きい寸法に成長しているが、 $P-\delta$ 曲線からはそのような損傷進行の情報は読み取ることができない。

片振り载荷を受けた試験体No. 2とNo. 4では、初期の数回を除いて全寿命の大半の期間中、 $P-\delta$ 曲線にほとんど変化はみられず、ほぼ弾性的な挙動を示している。疲労亀裂が発生、進展し、フランジをほぼ貫通した状態でも $P-\delta$ 関係にはほとんど変化は認められない。

変位制御で両振り载荷を行った試験体No. 5では、1回目から2目にかけて荷重抵抗の上昇、すなわち繰返し硬化現象が明瞭に認められる。2回目以降はほぼ定常的なヒステリシスループを描いており、21回目の反転载荷中に柱部材のフランジが破断している。

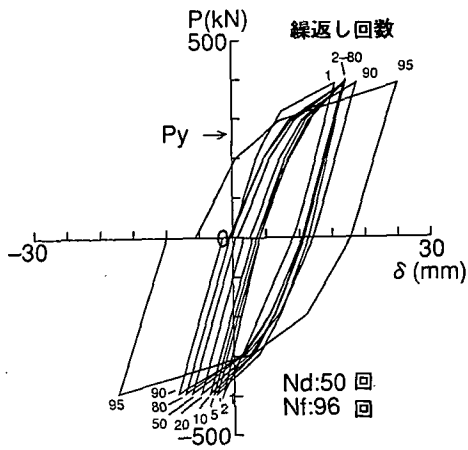
写真-2で示したとおり3回目の繰返し载荷中に表面長さ2~3mmの亀裂が見つかり、破断直前の20回目では片側の角継手部が破断してフランジの中央部と片側のウェブでかろうじて繋がっている状態であるが、 $P-\delta$ 曲線からは、そのような疲労破壊の進行に関する情報はほとんど得られない。

以上のように、疲労亀裂が発生し、かなり大きい寸法に成長していても隅角部全体の $P-\delta$ 曲線に変化は認められないことが確認された。このことは、少々の亀裂が生じて耐荷力上の影響は小さいといえる反面、全体的な荷重・変形挙動からは疲労破壊の進行状況、すなわち最終破断に至る前の亀裂の安定成長期の挙動を検知できないことを示している。

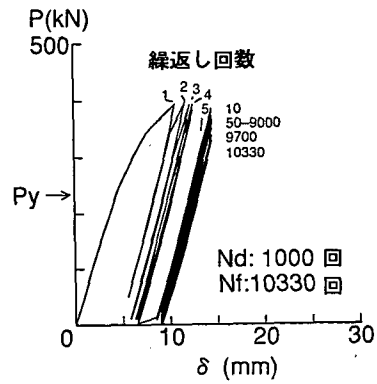
## (3) ひずみ範囲と寿命の関係

図-5に示す位置にひずみゲージを貼付け、繰返し载荷中、亀裂発生位置付近のひずみ挙動を観察した。図-6は、試験体長手方向のひずみを繰返し载荷中の最大荷重時と最小荷重時について比較したものである。荷重範囲の最も小さい試験体No. 2では、初回以降ひずみの最大値、最小値の分布にほとんど変化は見られない。荷重範囲が大きい試験体では、繰返しに伴いひずみの最大値、最小値の分布は全体的に移動している。図-7は、これらのひずみ範囲(最大と最小の差)をとり、繰返し回数を横軸にプロットしたものである。载荷直後の遷移期間と亀裂の影響を受ける寿命後期を除けば、ひずみ範囲に関しては繰返し载荷中おおよそ一定とみなすことができる。

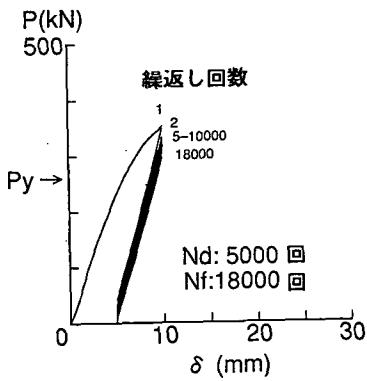
図-8は、図-7のひずみ範囲曲線中の各試験体の亀裂発見時のひずみ範囲の最大値と、亀裂発見寿命( $N_d$ )およびフランジ破断寿命( $N_f$ )の関係を示したものである。図中の直線は、SM41からHT80までの構造用鋼材で製作した小型試験片について求められたひずみ振幅と亀裂発生寿命の関係<sup>1)</sup>である。ひずみゲージでは亀裂発生位置(即ち、すみ肉溶接止端)の局所的なひずみ集中が測定できないことなどから、本実験値は小型試験片よりも短寿命(低強度側)となっている。しかしながら、隅角部試験体の実験結果は小型試験片の実験結果と相似な傾向にあることから、亀裂発生位置(ホットスポット)のひずみ範囲を評価できればこのような隅角部の寿命評価あるいは繰返し数を考慮した強度評価が可能になると考えられる。



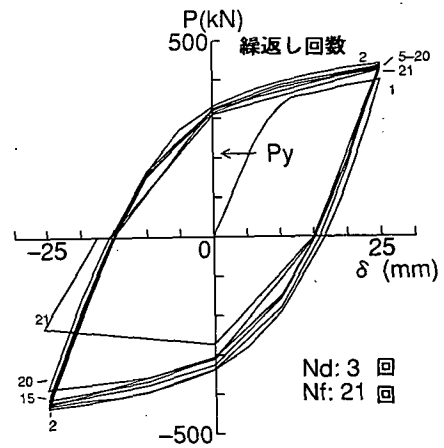
(a) 試験体No. 1 ( $P = \pm 1.5P_y$ )



(d) 試験体No. 4 ( $\Delta \delta = 2.4 \delta_y$ )

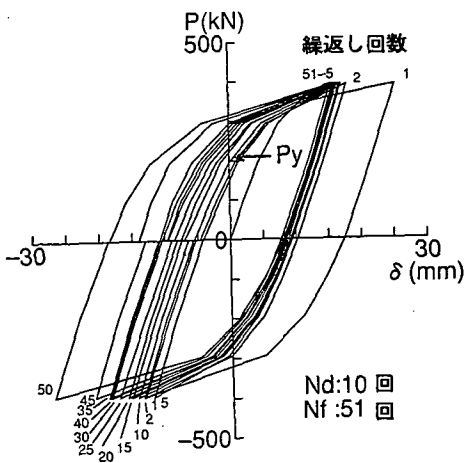


(b) 試験体No. 2 ( $\Delta \delta = 1.9 \delta_y$ )



(e) 試験体No. 5 ( $\delta = \pm 10.8 \delta_y$ )

図-4 荷重と載荷点の変位との関係



(c) 試験体No. 3 ( $P = \pm 1.9P_y$ )

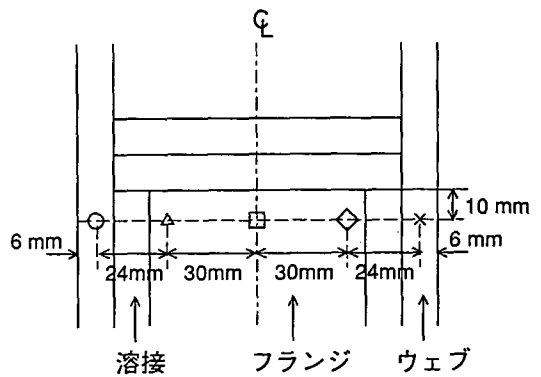
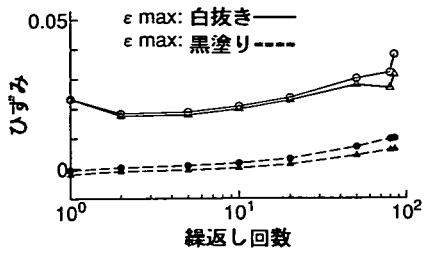
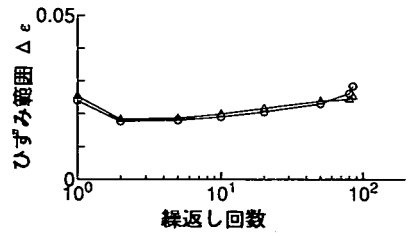


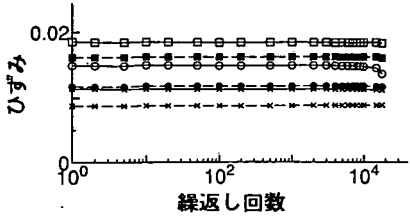
図-5 ひずみゲージ貼付位置



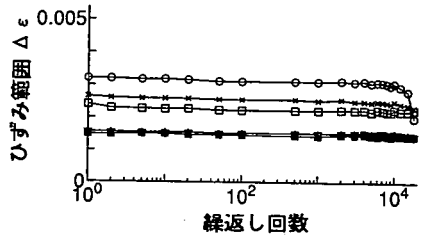
(a) 試験体No. 1



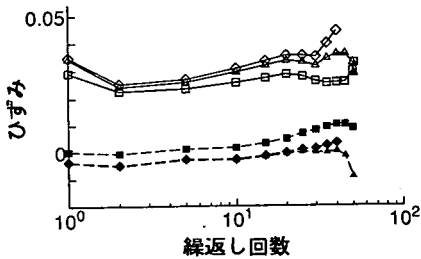
(a) 試験体No. 1



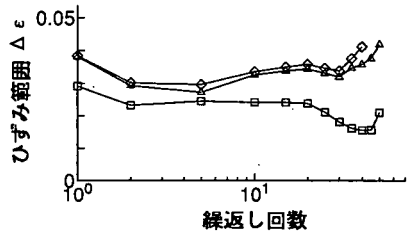
(b) 試験体No. 2



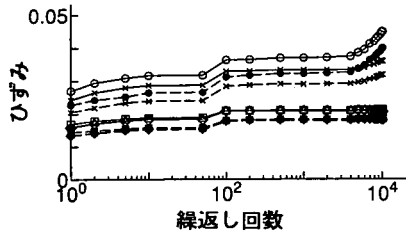
(b) 試験体No. 2



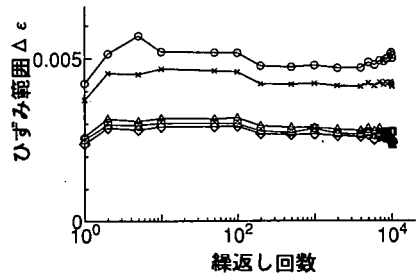
(c) 試験体No. 3



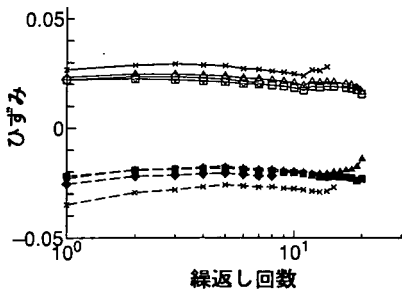
(c) 試験体No. 3



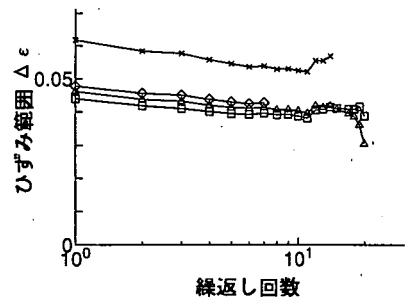
(d) 試験体No. 4



(d) 試験体No. 4



(e) 試験体No. 5



(e) 試験体No. 5

図-6 繰返し载荷によるひずみの変化

図-7 繰返し载荷によるひずみ範囲の変化



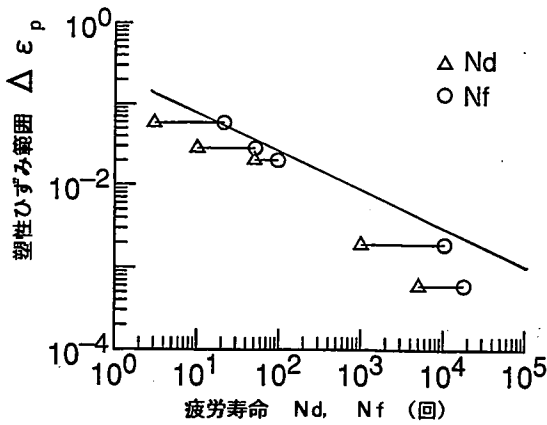


図-8 塑性ひずみ範囲の実測値と疲労寿命の関係

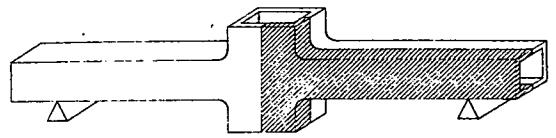


図-9 FEM解析モデル

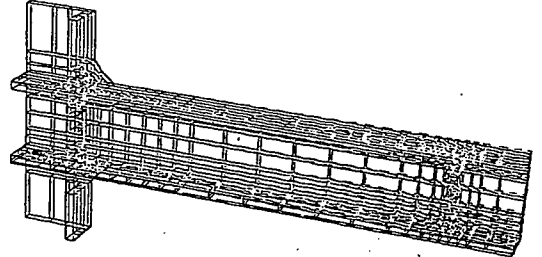


図-10 三次元有限要素分割 (要素数:870; 節点数:1490)

#### 4. 寿命予測

##### (1) 三次元弾塑性解析

使用鋼材(SM490)の繰返し応力ひずみ関係を用いた弾塑性三次元FEM解析により、亀裂発生に対する寿命予測を試みた。図-9に解析モデルを示す。対称性を考慮し、実験に用いた試験体の1/4を対象とした。载荷実験では両端を支点とし中央に载荷したが、解析では中央の対称面を固定端とし端部に载荷する片持ちばりを仮定した。図-10に要素分割図を示す。なお、FEM解析には汎用プログラムMARC<sup>12)</sup>を使用した。

図-11には西村・三木<sup>11)</sup>により求められたSM490材の初载荷時および繰返し载荷時の応力範囲-ひずみ範囲関係を示す。2本の曲線を比較すると、繰返し载荷によって応力が上昇する、即ち繰返し硬化特性がよく現れていることがわかる。このような応力-ひずみ曲線の変化は繰返しの極初期に完了し定常状態となること、および平均ひずみの影響も同様に繰返しの極初期に消失することが確認されている<sup>11)</sup>。ここでは、これらの2種類の応力範囲-ひずみ範囲曲線をそのまま材料特性値として入力し、三次元有限要素解析を実行した。

図-12に、初载荷時および繰返し载荷時の応力-ひずみ関係を用いた弾塑性解析による荷重範囲とたわみ範囲の関係、最も変形の大きな試験体No.5の実験結果とともに示す。初载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析結果は実測されたたわみ値に対してかなり過大な値となっているが、繰返し载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析結果は実測値とよく一致している。

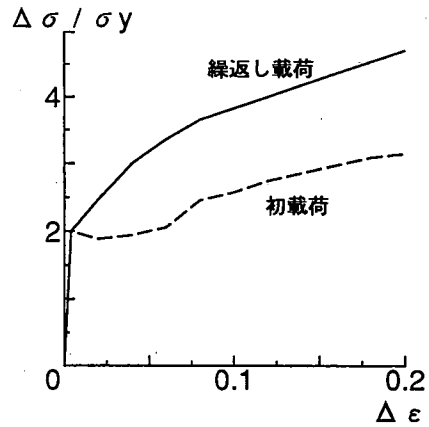


図-11 弾塑性解析で用いた応力範囲-ひずみ範囲関係

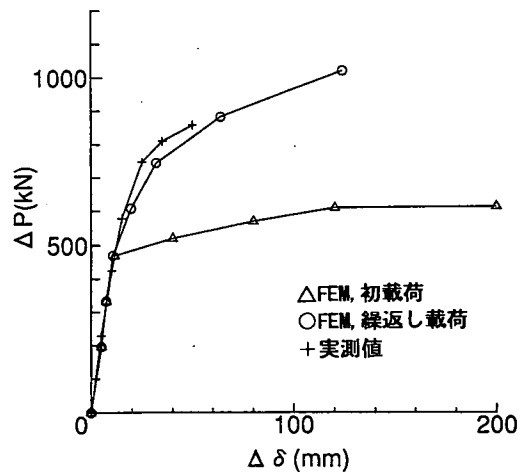


図-12 荷重範囲-たわみ範囲関係の実測値と解析値

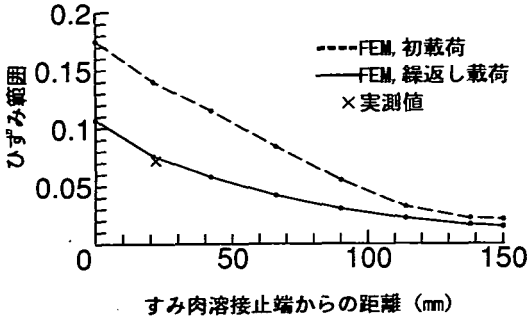


図-13 ひずみ範囲のフランジ長手方向の分布

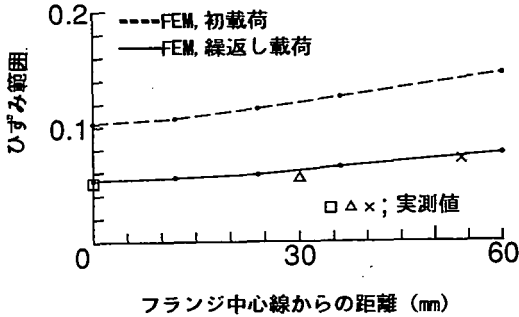


図-14 ひずみ範囲のフランジ幅方向の分布

また、図-13 および図-14 には、図-12 と同様に試験体No.5について、弾塑性解析によるひずみ分布の解を示す。図中には繰返し载荷中にひずみゲージを用いて測定されたひずみ範囲もプロットしてある。ひずみゲージの貼付位置は図-5 に示したとおりである。図-12 と同様に、初载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析結果は実測値に対してかなり過大な値となっているが、繰返し载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析結果は実測値とよく一致している。以上により、図-11 に示した繰返し応力範囲-ひずみ範囲曲線を用いることにより、弾性限界を越えるような過大な荷重の繰返しを受ける鋼製橋脚隅角部の変形挙動を精度良く推定できることが確認された。

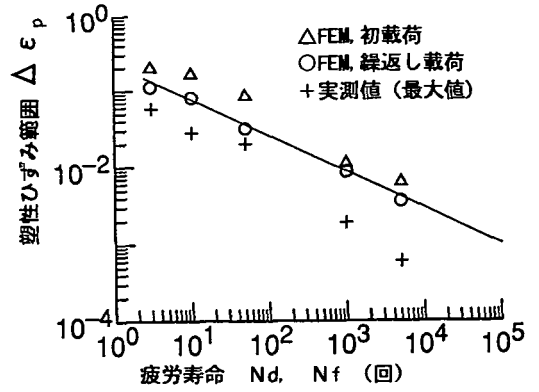


図-15 亀裂発生位置のひずみ範囲と亀裂発見寿命の関係

## (2) 寿命予測

図-15 に初载荷時および繰返し载荷時の応力-ひずみ関係を用いた弾塑性解析により得られた亀裂発生位置(すなわち、梁と柱のフランジどうしを接合する溶接部の柱側止端)の塑性ひずみ範囲と試験体の亀裂発生寿命Ndの関係を示す。図中の+は止端から10mm離れた位置でひずみゲージにより実測された値を表す。また、実線は400~800MPa級の構造用鋼材について砂時計型試験片を用いて求められた寿命曲線<sup>11)</sup>である。実測ひずみは亀裂発生位置である溶接止端から1cmしか離れていないが、溶接部形状による局部的な応力集中の影響が及ぶ範囲から外れているためにその値は小さく、実測ひずみと試験体の亀裂発生寿命の関係を表す点は鋼素材の塑性ひずみ-寿命曲線とはかなり隔たりがある。

初载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析結果は図-13 および図-14 で示したようにひずみ範囲を過大に推定する傾向があるため、試験体の亀裂発生寿命に対してプロットした点は鋼素材の寿命曲線に比べてかなり大きめのひずみ範囲を与えている。したがって、逆に、初载荷時の応力-ひずみ曲線から求めた塑性ひずみ範囲に対して鋼素材の寿命曲線を適用した場合には、亀裂発生寿命を過小評価する、即ち安全側過ぎる評価となる。一方、繰返し载荷時の応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性解析により得られた塑性ひずみと試験体の寿命の関係は鋼素材の寿命曲線とよく一致している。以上により、鋼素材の繰返し応力-ひずみ曲線を用いた三次元弾塑性FEM解析によって得られた亀裂発生位置の塑性ひずみ範囲と、鋼素材の塑性ひずみ-亀裂発生寿命曲線から、鋼製橋脚隅角部の亀裂発生寿命が精度良く予測できることが示された。

## 5. おわりに

鋼製橋脚隅角部の梁-柱接合部を対象として繰返し載荷実験および弾塑性解析を行い、数回程度の繰返し荷重で亀裂を生じるような“超”低サイクル領域までを含めた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) 全ての試験体において、疲労亀裂は4ヶ所のコーナー部全ての柱部材の角継手縦ビード表面上、柱と梁のフランジ同士を接合するすみ肉溶接との交差部およびその近傍から生じており、荷重の繰返しに伴って成長し、ウェブに進展した後でフランジが破断した。 $\pm 10.8\delta y$ の繰返し荷重を受けた最も短寿命の試験体では3回目に表面長さ数mm程度の亀裂が発見され、21回でフランジが破断している。
- (2) 疲労亀裂は繰返し荷重の初期に発生し、疲労寿命の大半が比較的小さい亀裂の進展過程で占められる。全寿命の80%程度まで疲労破壊が進行しても亀裂の表面長さは数mmから数cm程度である。
- (3) 疲労亀裂が発生し、表面長さが数cmに成長しても隅角部全体のP- $\delta$ 曲線に変化は認められなかったが、その程度の亀裂が生じて耐荷力に及ぼす影響は小さいといえるが、その反面、全体的な荷重・変形挙動から、疲労破壊の進行状況、すなわち安定成長から最終破断に到る亀裂の挙動を検知することは困難である。
- (4) 繰返し応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性有限要素解析により、弾性限界を越えるような過大な荷重の繰返しを受ける鋼製橋脚隅角部の変形挙動を精度良く推定できることが確認された。
- (5) 繰返し応力-ひずみ曲線を用いた弾塑性FEM解析によって得られた亀裂発生位置の塑性ひずみ範囲と、鋼素材の塑性ひずみ-亀裂発生寿命曲線から、鋼製橋脚隅角部の亀裂発生寿命が精度良く予測できることが示された。

現在、鋼橋の設計は、耐用年数中に1回生じるかどうかという荷重に対しては終局強度に基づき、活荷重など常時作用する変動荷重に対しては高サイクル疲労強度を基準として行われている。地震や台風など比較的少ない回数作用する荷重に対しては、構造各部に生じる応力が弾性範囲内であれば問題はないが、局部的であっても弾性範囲を越え塑性変形を生じるような過大な外力を繰返し受ける場合には低サイクル疲労の影響を考慮する必要があると生じてくると考えられる。

なお、実際の設計段階では、必ずしも個々の構造物について弾塑性解析を行い亀裂発生が予想される位置の局所的な塑性ひずみを求める必要はなく、標準的な構造物については部材の代表的な変形量と局所的な塑性ひずみの関係を予め求めておき、それを用いて間接的に評価することも可能である。

また、現実の地震荷重は本論文で用いたような一定振幅ではなく、ランダムに振幅が変動する荷重である。そのような超低サイクル領域のランダム荷重に対する線型累積被害則等の寿命評価法に関する検討も今後必要と考えられる。

謝辞：本研究中の実験および解析に対し、関西大学工学部4年生（研究当時）の百々良晃君、西村寧人君、加藤準治君のご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 奥村敏恵、堀川浩甫：土木構造物と低サイクル疲労性状、溶接学会誌、第37巻、第5号、pp.98-105、1968。
- 2) 三木千壽：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。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編）、1990。
- 4) 酒造敏廣、事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.37A、pp.121-134、1991。
- 5) 黄元雙、西村宣男、高津秀俊：鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.40A、pp.201-214、1994。
- 6) 宇佐美勉、戸谷和彦、鈴木森昌、是津文章：繰返し荷重を受ける鋼製門型ラーメンの強度と変形能に関するパイロット実験、構造工学論文集、Vol.41A、pp.289-300、1995。
- 7) 藤本盛久、橋本篤秀、中込忠男、金鍾洛、松村弘道：柱はり溶接接合部の破壊特性の検討、日本建築学会構造系論文報告集、第349号、pp.81-90、1985。
- 8) 藤本盛久、橋本篤秀、中込忠男、金鍾洛、松村弘道：柱はり溶接接合部の力学的性状および破壊に及ぼす影響について、日本建築学会構造系論文報告集、第357号、pp.81-88、1985。
- 9) 金多深、甲津功夫：鋼構造溶接接合部の低サイクル疲労強度に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第317号、pp.15-22、1982。
- 10) 金多深、甲津功夫：鋼構造はり端部のひずみ履歴と疲労強度に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第325号、pp.17-24、1983。

- 11) 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.
- 12) MARCプログラムユーザーマニュアルA, B, C, D編, 日本マーク, 1989.

(1996. 4. 2 受付)

## LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF STEEL PIER BEAM-COLUMN JOINT

Masahiro SAKANO, Ichizo MIKAMI and Shinji TAKABA

Low cycle repetitive loading tests are carried out using steel beam-to-column joint specimens in order to investigate low cycle fatigue behavior of the joint. Fatigue cracks are developed from the fillet weld toe at the stress-concentrated portions in the corners of beam-to-column joints. These cracks are initiated in the very early stage of cyclic loading. The crack initiation life of steel beam-to-column joints can be evaluated by means of elasto-plastic finite element analysis, using three-dimensional models and the cyclic stress-strain curve.