

繰返しの塑性ひずみが鋼材の 高サイクル疲労強度に与える影響

大倉一郎¹・大野勝²

¹正会員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 工修 石川島播磨重工業(株) 橋梁建設部(〒737-8515 呉市光町5-17)

兵庫県南部地震により被災した鋼橋の復旧作業の際、軽微な損傷を受けた鋼部材は再利用された。再利用された鋼部材の中には、地震荷重による繰返しの塑性ひずみが導入されている可能性がある。この繰返しの塑性ひずみは、その後の通常の自動車荷重の繰返しに対する高サイクル疲労強度を低下させる恐れがある。本研究は、繰返しの塑性ひずみを低サイクル疲労と考え、この低サイクル疲労による損傷が高サイクル疲労強度に与える影響を調べる。応力集中を有する丸棒試験片を用いて、最初低サイクル疲労により試験片を損傷させ、その後高サイクル疲労試験を行う。得られた疲労試験結果に基づいて、繰返しの塑性ひずみを受けた鋼材のS-N関係を定式化する。

Key Words: low-cycle fatigue, high-cycle fatigue, cyclic plastic strain, earthquake, steel

1. 序論

先の兵庫県南部地震は鋼橋に多大な被害をもたらした。地震により被災した鋼橋の復旧作業の際、軽微な損傷を受けた部材は再利用された。再利用された鋼部材の中には、地震荷重による繰返しの塑性ひずみが導入されている可能性がある。この繰返しの塑性ひずみは、その後の通常の自動車荷重の繰返しに対する高サイクル疲労強度を低下させる恐れがある。

地震荷重による鋼部材の高サイクル疲労強度の低下を明らかにするためには、次の2つを解明しなければならない。

- (1)地震によって導入された塑性ひずみの大きさとその繰返し回数。
- (2)繰返しの塑性ひずみそのものによる高サイクル疲労強度の低下。

前者に関しては、各部材に生じる塑性ひずみの大きさとその繰返し回数が動的解析によって推定されるであろう。さらに変形した部材を元にもどしたような場合には強制的に導入された塑性ひずみの大きさは変形形状の記録に基づいて推定されよう。

後者に関しては、過荷重によって応力集中部の周

りに局所的に塑性ひずみが生じるような場合の鋼材の高サイクル疲労強度を扱った研究はある¹⁾。しかし、全断面が塑性するような繰返しの塑性ひずみが鋼材の高サイクル疲労強度に与える影響を扱った研究は筆者等が知る限りではない。

そこで本研究は、繰返しの塑性ひずみが鋼材の高サイクル疲労強度に与える影響を明らかにする。繰返しの塑性ひずみを低サイクル疲労と考え、この低サイクル疲労による損傷が高サイクル疲労強度に与える影響を調べる。応力集中を有する丸棒試験片を用いて、最初低サイクル疲労により試験片を損傷させ、その後高サイクル疲労試験を行う。得られた疲労試験結果に基づいて、繰返しの塑性ひずみを受けた鋼材のS-N関係を定式化する。

2. 試験片

試験片を図-1に示す。試験片は丸棒であり、応力集中を持たない平滑試験片(図-1(a))、中央に環状突起を有する突起付き試験片(図-1(b))、中央にU字型の環状溝を有する溝入り試験片(図-1(c))の3種類である。平滑試験片は直径が10mmと14mmの2

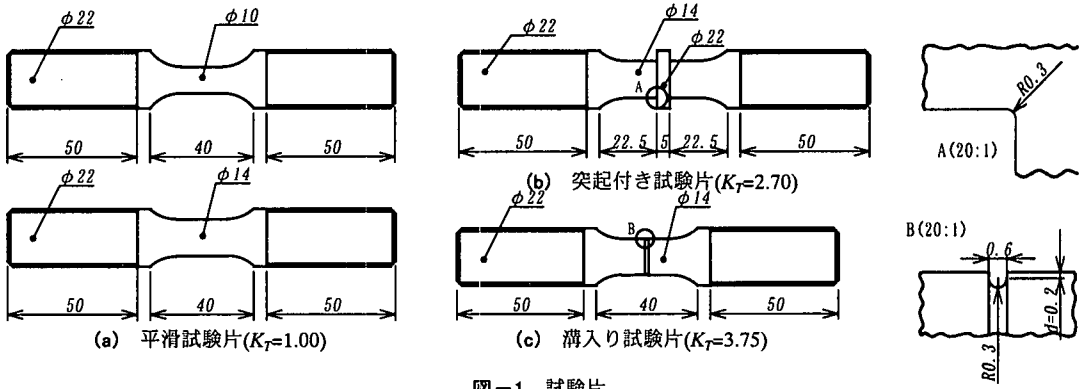


図-1 試験片

表-1 鋼材の材料特性

(a) 平滑試験片と突起付き試験片

	上降伏点 (MPa)	下降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	降伏ひずみ(下降伏点に対応) (%)	化学成分(%)				
						C	Si	Mn	P	S
ミルシート値	289	-	442	30	-	0.13	0.18	1.1	0.008	0.003
引張試験値	270	255	455	29.9	0.12	-	-	-	-	-

(b) 溝入り試験片

	上降伏点 (MPa)	下降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	降伏ひずみ(下降伏点に対応) (%)	化学成分(%)				
						C	Si	Mn	P	S
ミルシート値	309	-	462	31	-	0.14	0.23	1.1	0.018	0.008
引張試験値	303	274	449	31.5	0.13	-	-	-	-	-

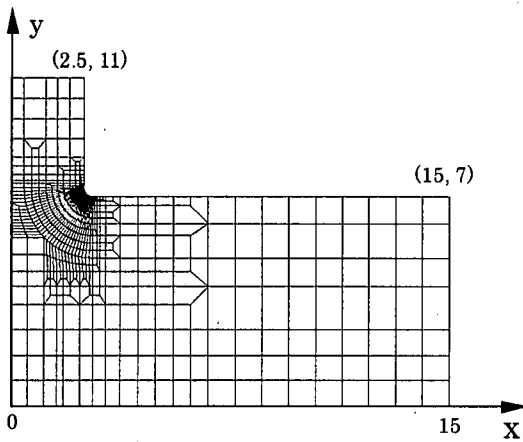
種類を用意した。繰返しの塑性ひずみを導入する試験に対しては座屈を防ぐために直径 14mm のものを用い、繰返しの塑性ひずみを導入しない試験に対しては直径 10mm のものを用いた。突起付き試験片では突起付根の弾性応力集中係数 K_T が 2.7、溝入り試験片では溝底の K_T が 3.75 となるような円弧を付けた。 K_T の詳細な定義は次章で与える。最初全て突起付き試験片を考えていたが、次章で述べるように、突起付根の製作精度が想像したより悪かったので、 $K_T = 3.75$ に対しては溝入り試験片とした。突起付根と溝底の製作精度を確認するために、製作後突起付き試験片の突起付根の円弧半径 R と、溝入り試験片の溝底の円弧半径 R および深さ d を測定した。突起付根や溝底の応力集中部を除いて、#1000 のサンドペーパーで試験片の表面を軸方向に研磨した。使用した鋼材は SM400B である。鋼材のミルシート値と引張試験の結果を表-1 に示す。平滑試験片と突起付き試験片の鋼材は、溝入り試験片の鋼材とは別である。両鋼材の引張試験片は図-1(a)の直径 14mm の平滑試験片と同じである。

3. 弾性応力集中係数

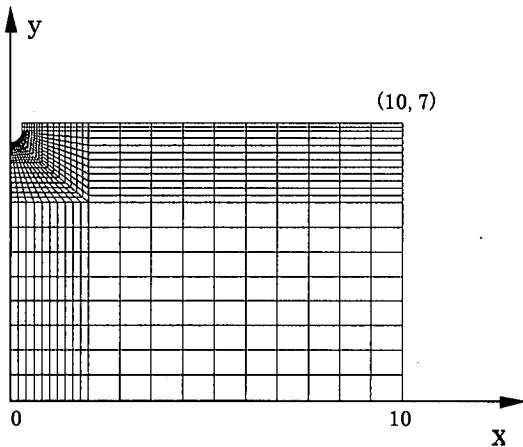
突起付き試験片と溝入り試験片に対して、有限要素解析により弾性応力集中係数 K_T を求めた。有限要素解析には汎用有限要素プログラム MARC²⁾を用いた。要素分割を図-2 に示す。解析モデルは試験片を縦に割った断面の 1/4 の部分を対象とする軸対称モデルである。 x 軸が軸対称軸である。使用した要素は軸対称 8 節点要素(MARCの要素タイプ 55 番)である。 y 軸上で x 軸方向の変位を拘束し、突起付き試験片では $x = 15$ の辺、溝入り試験片では $x = 10$ の辺に軸方向に引張応力を与えた。図-2 の要素分割は、要素の大きさと計算精度を検討した結果である。

突起付き試験片の弾性応力集中係数 K_T は、突起付根の円弧における最大主応力を直径 14mm の試験片断面の公称応力で割った値、溝入り試験片の K_T は、溝底の円弧下端の最大主応力を直径 14mm の試験片断面の公称応力で割った値である。

突起付き試験片の突起付根の円弧半径 R の実測値は 0.26mm から 0.39mm であった。したがって、 $R = 0.26\text{mm}, 0.28\text{mm}, 0.30\text{mm}, 0.33\text{mm}, 0.36\text{mm}, 0.39\text{mm}$ に対して計算を行い、得られた K_T の値と R



(a) 突起付き試験片



(b) 溝入り試験片

図-2 要素分割

の関係を次式で近似した.

$$K_T = 4.77R^2 - 5.71R + 3.98 \quad (1)$$

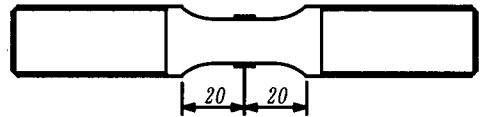
ここに, $0.26\text{mm} \leq R \leq 0.39\text{mm}$

式(1)は計算値を 0.01 以下の絶対誤差で近似する.
 $0.26\text{mm} \leq R \leq 0.39\text{mm}$ に対して $2.48 \leq K_T \leq 2.82$ である.

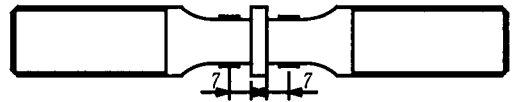
溝入り試験片の溝底の円弧半径 R の実測値は 0.29mm から 0.31mm, 深さ d の実測値は 0.18mm から 0.21mm であった. 溝底の円弧半径 $R=0.29\text{mm}$, 0.30mm, 0.31mm の 3 種類と, 深さ $d=0.18\text{mm}$, 0.19mm, 0.20mm, 0.21mm の 4 種類の合計 12 の組合せに対して計算を行った. 計算結果を表-2 に示す. K_T は 3.67 から 3.79 の範囲にある. 溝入り試験片の K_T のばらつきが突起付き試験片のそれより小さい.

表-2 溝入り試験片の K_T

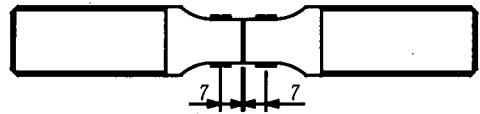
$d(\text{mm})$	$R(\text{mm})$		
	0.29	0.30	0.31
0.18	3.67	3.68	3.69
0.19	3.70	3.71	3.72
0.20	3.74	3.75	3.76
0.21	3.77	3.78	3.79



(a) 平滑試験片 ($K_T=1.00$)



(b) 突起付き試験片 ($K_T=2.70$)



(c) 溝入り試験片 ($K_T=3.75$)

図-3 ひずみゲージの貼付位置

4. 疲労試験

(1) 低サイクル疲労試験

試験片へのひずみゲージの貼付位置を図-3 に示す. 平滑試験片に 2 ヶ所, 突起付き試験片と溝入り試験片に 4 ヶ所ひずみゲージを貼付した. これらのひずみゲージを用いて, ひずみ制御で完全両振りの低サイクル疲労試験を行った. 使用した疲労試験機は動的容量 10tf のサーボパルサー型の疲労試験機である.

考慮したひずみ範囲の目標値は全ひずみ ϵ_t (=弾性ひずみ+塑性ひずみ)で 1% ($\pm 0.5\%$), 2% ($\pm 1.0\%$), 3% ($\pm 1.5\%$) である. 貼付したひずみゲージのうちの 1 枚がひずみの目標値に達すると除荷した. 繰返し回数が多くなるとひずみゲージが剥離することがあるので, 次の方法で載荷した.

繰返し載荷を続けると, 試験機が示す変位と試験

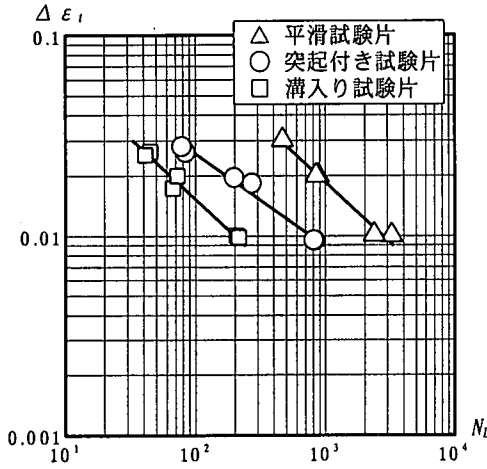


図-4 $\Delta \varepsilon_i$ と N_L の関係

表-3 m_L , c_L , ξ_N の値

試験片	m_L	c_L	ξ_N
平滑試験片	1.65	1.385	0.056
突起付き試験片	2.16	0.037	0.071
溝入り試験片	1.64	0.105	0.056

片のひずみの関係が安定してくる。そこで、7 サイクル目までひずみゲージの値による制御を行い、荷重と変位の関係が安定したことを確認した後、7 サイクル目の変位の値を用いて変位制御により低サイクル疲労試験を行った。変位制御の荷重速度は 0.1 サイクル/秒とした。疲労試験機が出力する荷重と変位の各々の時間変化を記録した。

(2) 高サイクル疲労試験

試験片に単調荷重あるいは繰返しの塑性ひずみを導入した後、高サイクル疲労試験を行った。繰返しの塑性ひずみの導入は、前述の低サイクル疲労試験と同じ方法で行った。高サイクル疲労試験は荷重制御で行った。高サイクル疲労試験の荷重速度は 10 サイクル/秒で応力比を 0.0625 とした。

5. 疲労試験結果

(1) 低サイクル疲労強度

全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_i$ と疲労亀裂の発生寿命 N_L の関係を図-4 に示す(付録(1)参照)。試験片に貼付したひずみゲージが与えるひずみ範囲を $\Delta \varepsilon_i$ に用いた。貼付されたひずみゲージが与えるひずみ範囲の値に多少のばらつきが生じた試験片もあった。このよう

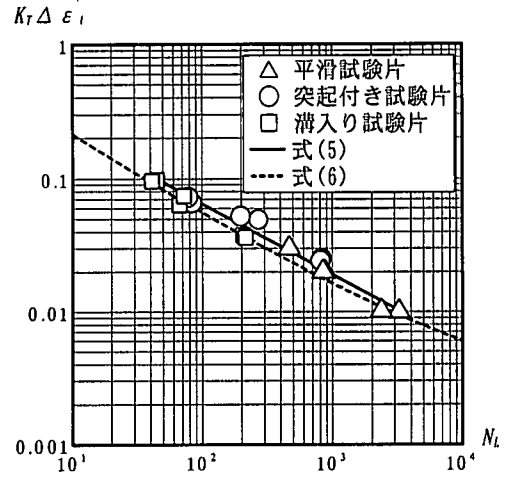


図-5 $K_T \Delta \varepsilon_i$ と N_L の関係

な場合、最も大きなひずみ範囲が疲労亀裂の発生を支配すると考え、計測されたひずみ範囲の中で最大の値を $\Delta \varepsilon_i$ に用いた。

試験片は丸棒であり、丸棒の全円周に亀裂が同時に発生し、それが中心に向かって一様に進展することはないので、亀裂の半径方向の深さと繰返し回数との関係を測定することはできなかった。したがって本研究では疲労亀裂の発生寿命 N_L を次のように定義した。亀裂が発生し、伝播すると試験片の断面が減少する。疲労試験機の変位を一定に制御しているので、亀裂の伝播とともに荷重が減少する。そこで荷重が、亀裂が発生する以前の荷重の 98% まで低下したときの繰返し回数を疲労亀裂の発生寿命と定義した。この疲労亀裂の発生寿命に対して、目視あるいは拡大鏡で疲労亀裂を見つけることはできなかった。

図-4 から分かるように、応力集中が大きくなるに従って、疲労寿命は短くなる。図の各試験片の直線は次式で表される。

$$\log N_L = \log c_L - m_L \log(\Delta \varepsilon_i) \quad (2)$$

ここに、 m_L , c_L = 試験結果に最小 2 乗法を適用して決定される定数。

任意の $\log(\Delta \varepsilon_i)$ に対する $\log N_L$ の標準偏差 ξ_N が次式で計算される。

$$\xi_N = \left[\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k \left\{ \log N_{L,i} - \log c_L + m_L \log(\Delta \varepsilon_{i,i}) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、 k = 試験データの総数； $N_{L,i}$, $\Delta \varepsilon_{i,i}$ = それぞれ、試験片 i の疲労亀裂の発生寿命と全ひずみ範囲。

各試験片の m_L , c_L , ξ_L の値を表-3 に示す。
式(2)の対数を外すと次式を得る。

$$(\Delta \epsilon_t)^{m_L} N_L = c_L \quad (4)$$

突起付き試験片の突起付根および溝入り試験片の溝底には平滑部より大きなひずみが導入されている。このひずみ集中の影響を弾性応力集中係数で考慮した全ひずみ範囲 $K_T \Delta \epsilon_t$ と疲労亀裂の発生寿命 N_L の関係を図-5 に示す。図から分かるように、平滑試験片、突起付き試験片、溝入り試験片の区別なく、試験結果は次式で表される。

$$(K_T \Delta \epsilon_t)^{0.88} N_L = 0.588 \quad (5)$$

この式は、前述と同様にして、平滑試験片、突起付き試験片、溝入り試験片の全ての試験結果に最小 2 乗法を適用して得られた。 ξ_N は 0.114 である。

さらに図-5 には比較として次式で与えられる関係³⁾も示してある。

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = 0.415 N_L^{-0.606} + 0.00412 N_L^{-0.115} \quad (6)$$

$$(10 \leq N_L \leq 10^6)$$

この式は、一般構造用鋼、溶接構造用鋼、高張力鋼の低サイクル疲労試験の結果から与えられたものである。式(5)は式(6)の近くを通っている。したがって今回の試験結果は既往の試験結果と矛盾するものではないと言える。

(2) 単調塑性ひずみが高サイクル疲労強度に与える影響

繰返しの塑性ひずみが高サイクル疲労強度に与える影響を調べる前に、単調荷重による塑性ひずみ(以後これを単調塑性ひずみと呼ぶ)が高サイクル疲労強度に与える影響を調べた。単調塑性ひずみを受けた試験片と受けない試験片の高サイクル疲労試験の結果を図-6 に示す(付録(2)参照)。 $\Delta \sigma$ と N_H は、それぞれ高サイクル疲労試験における応力範囲と試験片の破断寿命である。導入した単調塑性ひずみの大きさは、全ひずみで最大 8% である。単調塑性ひずみの大きさの違いが高サイクル疲労強度に与える影響については本項の後で述べる。図-6 から次のことが分かる。

- (1) 平滑試験片の場合、単調塑性ひずみを受けても、その疲労限は降伏応力より高い。
- (2) 溝入り試験片の場合、単調塑性ひずみを受けた試験片の S-N 関係が塑性ひずみを受けない試験片の S-N 関係の下に位置している。すなわち単調塑性ひずみを受けることにより疲労強度が低下する。

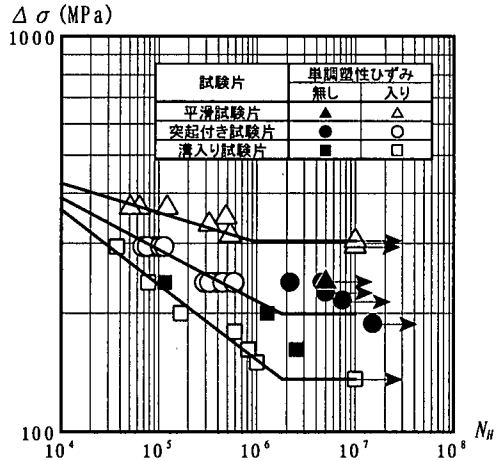


図-6 $\Delta \sigma$ と N_H の関係

- (3) 突起付き試験片においては、 $\Delta \sigma = 239 \text{ MPa}$ で単調塑性ひずみを受けた試験片の N_H は平均で 45.7 万回、塑性ひずみを受けない試験片の N_H は平均で 377.7 万回である。したがって単調塑性ひずみを受けることにより疲労寿命が 12% まで低下する。溝入り試験片においては、 $\Delta \sigma = 239 \text{ MPa}$ で単調塑性ひずみを受けた試験片の N_H は 7.8 万回、塑性ひずみを受けない試験片の N_H は 11.5 万回であり、単調塑性ひずみを受けることにより疲労寿命は 68% まで低下する。これから単調塑性ひずみを受けない場合に対する受けた場合の疲労寿命の比率は、弾性応力集中係数が大きくなるに従って大きくなる。すなわち弾性応力集中係数が大きくなるに従って、単調塑性ひずみが高サイクル疲労強度の低下に与える影響は相対的に小さくなる。

図-6 の単調塑性ひずみを受けた各試験片の直線は次式で表される。

$$\log N_H = \log c_0 - m_0 \log(\Delta \sigma) \quad (7)$$

ここに、 m_0 , c_0 = 試験結果に最小 2 乗法を適用して決定される定数。

任意の $\log(\Delta \sigma)$ に対する $\log N_H$ の標準偏差 ξ_N が次式で計算される。

$$\xi_N = \left[\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k \left\{ \log N_{H_i} - \log c_0 + m_0 \log(\Delta \sigma_i) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ここに、 k = 試験データの総数； N_{H_i} , $\Delta \sigma_i$ = それぞれ、試験片 i の疲労亀裂の破断寿命と応力範囲。各試験片の m_0 , c_0 , ξ_N の値を表-4 に示す。式(7)の対数を外すと次式を得る。

表-4 $m_0, c_0, \xi_N, \Delta\sigma_{0caf}$ の値

試験片	m_0	c_0	ξ_N	$\Delta\sigma_{0caf}$ (MPa)
平滑試験片	13.3	9.74×10^{38}	0.559	304
突起付き試験片	7.71	9.57×10^{23}	0.113	199
溝入り試験片	5.27	3.18×10^{17}	0.123	136

$$(\Delta\sigma)^{m_0} \cdot N_H = c_0 \quad (9)$$

さらに単調塑性ひずみを受けた試験片の疲労限 $\Delta\sigma_{0caf}$ を表-4 に示す。突起付き試験片においては、試験片不足のため疲労試験から疲労限を求めることができなかった。そこで、突起付き試験片においては、溝入り試験片の疲労限が現れる繰返し回数に対する突起付き試験片の疲労強度を疲労限としている。一般に、S-N 曲線が低下するに従って、疲労限が現れるまでの繰返し回数は大きくなるので⁴⁾、前述の突起付き試験片の疲労限は安全側の推定値となっているであろう。

突起付き試験片の破断寿命 N_H と単調塑性ひずみ ϵ_i の関係を図-7 に示す。これは、図-6 の塑性ひずみを受けた突起付き試験片の $\Delta\sigma$ が 294MPa と 239MPa に対する結果を N_H と ϵ_i で表したものである。ここで ϵ_i は全ひずみである。 ϵ_i の最小は 0.2%、最大は 8% である。ここで降伏ひずみは 0.12% である。図から分かるように、 $\Delta\sigma$ の各値において N_H のばらつきは小さい。したがって単調塑性ひずみの大きさの違いが高サイクル疲労強度に与える影響は小さい。

単調塑性ひずみが導入されたリブ十字隅肉溶接継手と溶接で製作された I 形断面の棒の高サイクル疲労試験が実施され、単調塑性ひずみを受けた場合も受けない場合も疲労寿命に差が見られなかったことが報告されている^{5), 6)}。溶接構造物の場合、一般に溶接部には降伏応力に相当する残留応力が発生しているため、そこには塑性ひずみも発生していることが予想される。さらに溶接部は応力集中源となるため、溶接部の高サイクル疲労強度の低下に単調塑性ひずみが与える影響は小さい。したがって溶接構造物においては、単調塑性ひずみが導入された場合の疲労寿命とされない場合の疲労寿命の差は小さいと考える。

(3) 繰返しの塑性ひずみが高サイクル疲労強度に与える影響

変動応力を受ける高サイクル疲労に対して、各国

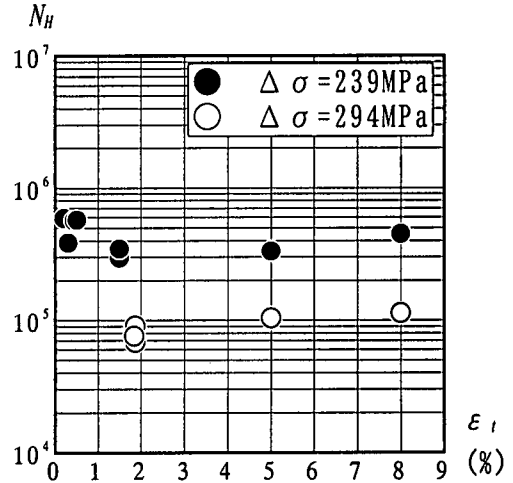


図-7 N_H と ϵ_i の関係

の鋼構造物の疲労設計指針は Miner の線形被害則を採用している。変動ひずみを受ける低サイクル疲労に対しても Miner の線形被害則が成立することが示されている⁷⁾。両被害則はそれぞれ次式で与えられる。

$$\sum \frac{n_H}{N_H} = 1 \quad (10)$$

$$\sum \frac{n_L}{N_L} = 1 \quad (11)$$

ここに、 n_H = 応力範囲 $\Delta\sigma$ の繰返し回数； N_H = 応力範囲 $\Delta\sigma$ に対する高サイクル疲労寿命； n_L = 全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_i$ の繰返し回数； N_L = 全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_i$ に対する低サイクル疲労寿命。

低サイクル疲労による損傷 n_L/N_L を受けた後、高サイクル疲労 n_H/N_H で破断する場合に対して次の非線形被害則を仮定した。

$$\left(\frac{n_H}{N_H}\right)^\alpha + \left(\frac{n_L}{N_L}\right)^\beta = 1 \quad (12)$$

ここに、 α, β = 定数。

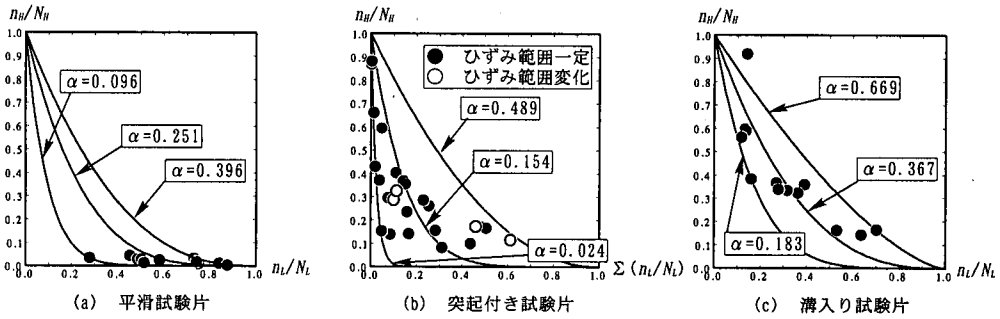


図-8 n_H/N_H と n_L/N_L の関係 [α による近似]

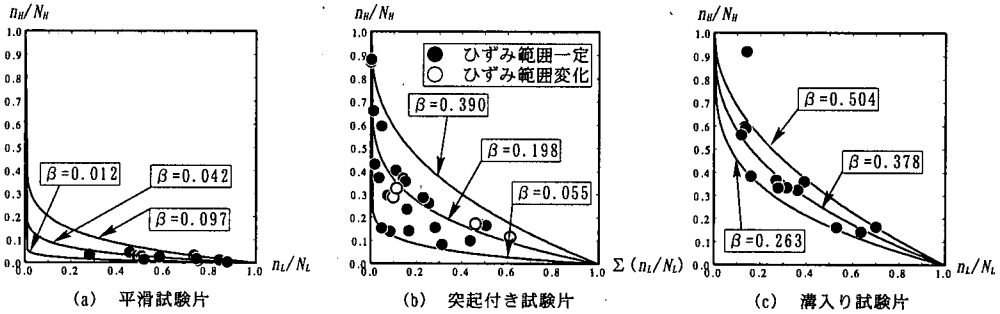


図-9 n_H/N_H と n_L/N_L の関係 [β による近似]

表-5 α , β , K_T の値

試験片	α				β				K_T
	平均値	標準偏差	最大値	最小値	平均値	標準偏差	最大値	最小値	
平滑試験片	0.251	0.095	0.396	0.096	0.042	0.023	0.097	0.012	1.00
突起付き試験片	0.134	0.108	0.391	0.024	0.193	0.094	0.390	0.055	2.63
溝入り試験片	0.367	0.412	0.669	0.183	0.378	0.260	0.504	0.263	3.71

繰返しの塑性ひずみを受けた試験片の高サイクル疲労試験の結果を図-8, 9に示す(付録(3)参照)。両図の試験値は同じであるが、試験値を近似する曲線が両図で異なっている。 N_H は $\Delta\sigma$ に対して式(9)が与える値であり、疲労限を考慮していない。 N_L は $\Delta\epsilon_i$ に対して式(4)が与える値である。図-8(a), 9(a)において、 n_L/N_L が小さい領域で試験結果がない。これは、平滑試験片においては、 n_L/N_L が小さくなると、試験片の中央部に疲労亀裂が発生する前に、試験片のねじ部が先に疲労破断したためである(付録(3)参照)。式(12)は、 $\alpha = \beta = 1$ と置くと線形被害則になるが、図-8, 9から明らかなように、試験結果は直線分布を呈していない。

式(12)で試験結果を近似する際、 α と β の両者を含む近似式を作成するのは数学的に困難であるので、次に示すように、 $\beta = 1$ とした近似式と $\alpha = 1$ とした近似式を考えた。

$$\left(\frac{n_H}{N_H}\right)^\alpha + \frac{n_L}{N_L} = 1 \quad (13)$$

$$\frac{n_H}{N_H} + \left(\frac{n_L}{N_L}\right)^\beta = 1 \quad (14)$$

式(13)と(14)をそれぞれ α , β について解くと

$$\alpha = \frac{\log\left(1 - \frac{n_L}{N_L}\right)}{\log\frac{n_H}{N_H}} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\log\left(1 - \frac{n_H}{N_H}\right)}{\log\frac{n_L}{N_L}} \quad (16)$$

式(15)と(16)から、各試験値に対して α と β の値

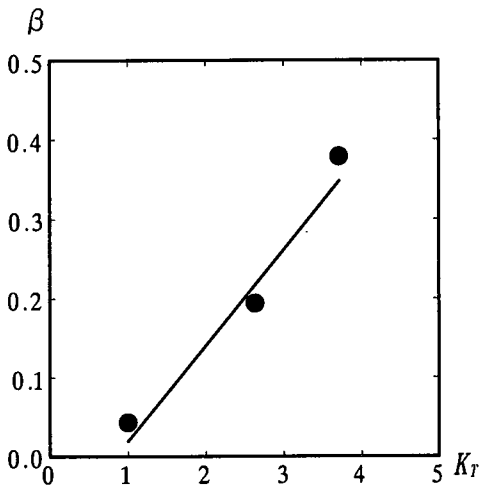


図-10 β と K_T の関係

を算出する。ただし図-8(c), 9(c)において、明かに分布から外れている上側の1点は除く。 α の平均値, 標準偏差, 最大値, 最小値および β のそれらを表-5に示す。各試験片において β の標準偏差および最大値と最小値の差が α のそれより小さい。表-5の平均値, 最大値, 最小値の各値に対する式(13)と(14)の曲線をそれぞれ図-8, 9に示す。図-9の曲線が図-8の曲線より試験値をよく近似しているように見える。したがって低サイクル疲労を受けた試験片の高サイクル疲労に対する疲労被害則として式(14)を採用する。

前述したように, 平滑試験片においては n_L/N_L が小さい領域で試験結果がなかった。他方図-9(b)に示すように, 突起付き試験片においては n_L/N_L が大きい領域で試験結果がない。しかし図-9(a)の平滑試験片においては n_L/N_L が大きい領域で式(14)は試験結果をよく近似し, 図-9(b)の突起付き試験片においては n_L/N_L が小さい領域で式(14)は試験結果をよく近似している。さらに図-9(c)の溝入り試験片においては n_L/N_L の中間領域で式(14)は試験結果をよく近似している。したがって式(14)は n_L/N_L の全領域で適用可能と考える。

β と弾性応力集中係数 K_T の関係を図-10に示す。 β は表-5に示す平均値である。 K_T は各試験片の弾性応力集中係数の平均値であり, 同様に表-5に示してある。図-10の β と K_T の関係は次式で近似される。

$$\beta = 0.12K_T - 0.10 \quad (17)$$

$$(1 \leq K_T \leq 3.71)$$

図-11に示すように, β が大きくなると n_H/N_H

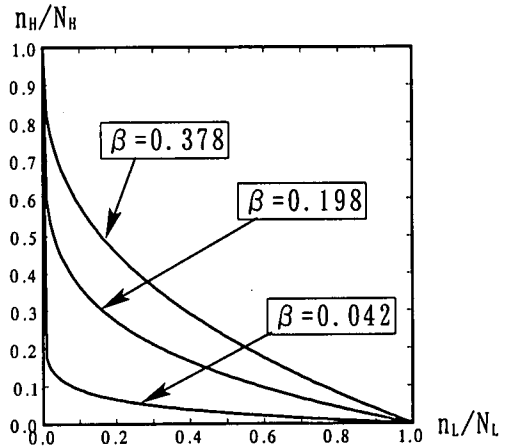


図-11 $n_H/N_H-n_L/N_L$ 関係に β が与える影響

表-6 ひずみ範囲の変動パターン

変動パターン	前半載荷	後半載荷	$\Sigma(n_i/N_i)$
1	$\Delta \epsilon = 2.47\%$	$\Delta \epsilon = 0.78\%$	0.101
	$n_L/N_L = 0.055$	$n_L/N_L = 0.046$	
2	$\Delta \epsilon = 0.83\%$	$\Delta \epsilon = 2.60\%$	0.114
	$n_L/N_L = 0.052$	$n_L/N_L = 0.062$	
3	$\Delta \epsilon = 0.83\%$	$\Delta \epsilon = 2.61\%$	0.459
	$n_L/N_L = 0.214$	$n_L/N_L = 0.245$	
4	$\Delta \epsilon = 2.82\%$	$\Delta \epsilon = 1.00\%*$	0.612
	$n_L/N_L = 0.293$	$n_L/N_L = 0.321$	

* : ひずみゲージ剥離のため, ひずみの目標値で整理

は高くなる。これは, 式(17)を考慮すると, 弾性応力集中係数が大きくなると, 高サイクル疲労に対する低サイクル疲労の影響が相対的に小さくなることを表している。

突起付き試験片に対して, ひずみ範囲を変化させて繰返しの塑性ひずみを導入し, その後高サイクル疲労試験を行った結果を図-9(b)に白丸で示す(付録(4)参照)。ひずみ範囲の変動パターンを表-6に示す。図から分かるように, 変動ひずみを受けた試験値はひずみ範囲一定で行った試験値の分布の中にある。したがって変動ひずみが高サイクル疲労に与える影響は $\Sigma(n_i/N_i)$ で評価され, 式(14)は次のように書き改められる。

$$\frac{n_H}{N_H} + \left(\sum \frac{n_L}{N_L} \right)^\beta = 1 \quad (18)$$

式(9)と式(18)から N_H を消去して, 繰返しの塑性ひずみの影響を考慮したS-N曲線が次式で与えられる。

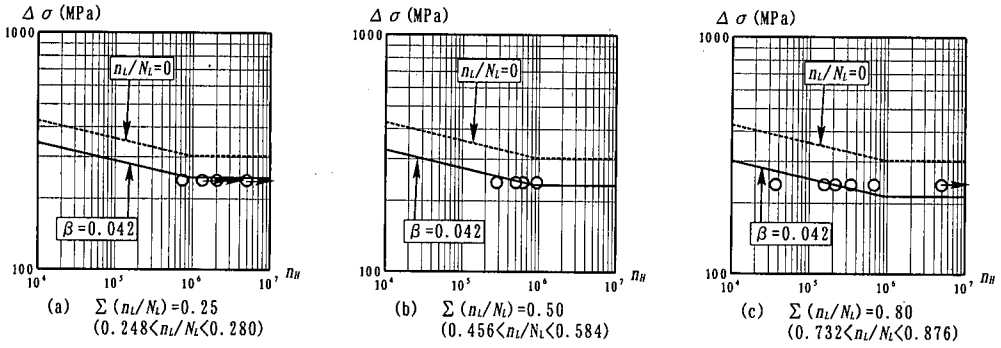


図-12 繰返しの塑性ひずみを受けた平滑試験片のS-N関係 [$\beta=0.042$]

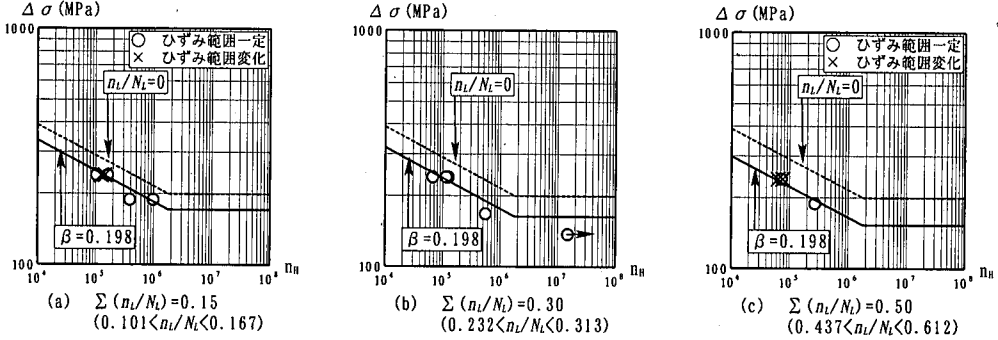


図-13 繰返しの塑性ひずみを受けた突起付き試験片のS-N関係 [$\beta=0.198$]

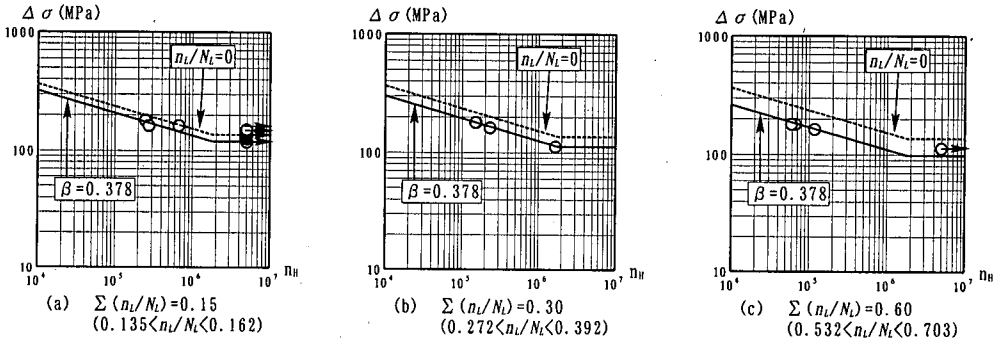


図-14 繰返しの塑性ひずみを受けた溝入り試験片のS-N関係 [$\beta=0.378$]

$$(\Delta\sigma)^{m_0} n_H = \left\{ 1 - \left(\sum \frac{n_L}{N_L} \right)^\beta \right\} c_0 \quad (19)$$

式(19)が与えるS-N曲線と試験結果の比較を、平滑試験片、突起付き試験片、溝入り試験片に対してそれぞれ図-12, 13, 14に示す。繰返しの塑性ひずみが導入されていない場合、すなわち $n_L/N_L = 0$ に対するS-N曲線も示してある。試験値は、各図のタイトルで括弧の中に示す範囲の n_L/N_L に対するものである。試験結果は、式(19)が与えるS-N曲線付近に分布しており、式(19)で繰返しの塑性ひずみを受けた鋼材のS-N曲線が表現されている。

(4) 繰返しの塑性ひずみによる疲労限の低下

単調塑性ひずみを受けた試験片の疲労限を $\Delta\sigma_{0caf}$ 、疲労限が現れる繰返し回数を N_{0caf} とすると、式(9)より

$$(\Delta\sigma_{0caf})^{m_0} N_{0caf} = c_0 \quad (20)$$

同様に、繰返しの塑性ひずみを受けた試験片の疲労限を $\Delta\sigma_{caf}$ 、疲労限が現れる繰返し回数を n_{caf} とすると、式(19)より

$$(\Delta\sigma_{caf})^{m_0} n_{caf} = \left\{ 1 - \left(\sum \frac{n_L}{N_L} \right)^\beta \right\} c_0 \quad (21)$$

式(20), (21)から c_0 を消去すると

$$\Delta\sigma_{caf} = \Delta\sigma_{0caf} \left\{ 1 - \left(\sum \frac{n_L}{N_L} \right)^\beta \right\}^{\frac{1}{m_0}} \left(\frac{N_{0caf}}{n_{caf}} \right)^{\frac{1}{m_0}} \quad (22)$$

$n_{caf} = N_{0caf}$ と仮定すると、繰返しの塑性ひずみを受けた試験片の疲労限が次式で表される。

$$\Delta\sigma_{caf} = \Delta\sigma_{0caf} \left\{ 1 - \left(\sum \frac{n_L}{N_L} \right)^\beta \right\}^{\frac{1}{m_0}} \quad (23)$$

式(23)が与える疲労限も図-12, 13, 14 に示してある。試験結果の疲労限は式(23)で得られた疲労限付近で現れており、式(23)で繰返しの塑性ひずみを受けた鋼材の疲労限を表現できている。

6. 結論

本研究は、繰返しの塑性ひずみが鋼材の高サイクル疲労強度に与える影響を明らかにした。応力集中を有する丸棒試験片を用いて、最初低サイクル疲労

により試験片を損傷させ、その後高サイクル疲労試験を実施した。この試験結果に基づいて、次の結論を得た。

- (1) 応力集中を有する試験片の低サイクル疲労試験の結果は、全ひずみ範囲に弾性応力集中係数を乗ずることにより、式(5)で表すことができる。
- (2) 単調载荷による塑性ひずみ(単調塑性ひずみ)は高サイクル疲労強度を低下させる。しかし単調塑性ひずみの大きさの違いが高サイクル疲労強度に与える影響は小さい。単調塑性ひずみが高サイクル疲労強度に与える影響は、弾性応力集中係数が大きくなるに従って相対的に小さくなる。
- (3) 低サイクル疲労を受けた試験片の高サイクル疲労に対する疲労被害則として式(18)を与えた。この疲労被害則は弾性応力集中係数の影響を受け、弾性応力集中係数が大きくなると、低サイクル疲労が高サイクル疲労に与える影響は相対的に小さくなる。
- (4) 繰返しの塑性ひずみを受けた鋼材のS-N曲線と疲労限をそれぞれ式(19)と式(23)で与えた。

付録

付録(1) 低サイクル疲労試験の結果

試験片	K_T	$\Delta \varepsilon$ (%)	N_L (回)	N_f (回)
H1(14)	1.00	1.00	3252	3391
H2(14)	1.00	1.01	2363	2437
H3(14)	1.00	2.00	880	926
H4(14)	1.00	2.00	844	886
H5(14)	1.00	3.00	467	504
T1	2.64	0.95	829	899
T2	2.54	0.95	808	882
T3	2.67	1.84	271	310
T4	2.67	1.96	198	244
T5	2.52	2.63	84	102
T6	2.59	2.80	78	95
M1	3.72	1.01	205	256
M2	3.69	0.98	213	261
M3	3.68	1.73	67	97
M4	3.71	2.00	72	93
M5	3.69	2.64	45	56
M6	3.79	2.54	41	58

H：平滑試験片，T：突起付き試験片，M：溝入り試験片

(14)：平滑試験片の断面の直径14mm

K_T ：弾性応力集中係数

$\Delta \varepsilon$ ：低サイクル疲労試験の全ひずみ範囲（ひずみゲージによる測定ひずみ）

N_L ：低サイクル疲労試験の疲労亀裂の発生寿命（5章（1）節参照）

N_f ：低サイクル疲労試験の試験片の破断寿命

付録(2) 単調の塑性ひずみが導入された試験片の高サイクル疲労試験の結果

試験片	K_T	ε (%)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N_H
H6(14)	1	0.00	239	5000000*
H7(10)	1	2.41	294	10000000*
H7(10)	1	4.00**	368	121170
H8(10)	1	3.94	368	63370
H9(10)	1	8.08	368	326540
H10(10)	1	8.00**	333	50850
H11(10)	1	8.00**	314	533350
H12(10)	1	8.00**	294	10000000*
H12(10)	1	8.00**	304	10000000*
H12(10)	1	8.00**	348	480190
T7	2.64	0.00	239	2171210
T8	2.57	0.00	239	4529770
T9	2.82	0.00	239	4628830
T10	2.62	0.00	188	15000000*
T11	2.54	0.00	215	7412110*
T12	2.67	0.00	215	5007680*
T13	2.79	0.20	239	589390
T14	2.52	0.30	239	382010
T15	2.52	0.44	239	567790
T16	2.52	0.50	239	572250
T17	2.52	1.50	239	293530
T18	2.62	1.50	239	343590
T19	2.64	5.00	239	329420
T20	2.64	8.00	239	449210
T21	2.54	-0.33	239	585280
T22	2.52	1.86	294	68130
T23	2.52	1.80	294	90860
T24	2.79	1.84	294	75710
T25	2.48	5.00	294	103460
T26	2.48	8.01	294	112980
M7	3.71	0.00	239	115410
M8	3.68	0.00	162	2500320
M9	3.71	0.00	200	1270370
M10	3.68	2.40	294	37170
M11	3.71	2.42	239	78030
M12	3.68	2.43	162	814260
M13	3.74	2.42	200	168080
M14	3.72	2.40	179	593020
M15	3.69	2.41	136	10000000*
M15	3.69	2.41	150	993540

H: 平滑試験片, T: 突起付き試験片, M: 溝入り試験片

(14): 平滑試験片の断面の直径14mm, (10): 平滑試験片の断面の直径10mm

K_T : 弾性応力集中係数

ε : 単調の塑性ひずみ (ひずみゲージによる測定ひずみ)

$\Delta\sigma$: 高サイクル疲労試験の応力範囲

N_H : 高サイクル疲労試験の試験片の破断寿命

*: 疲労亀裂が発生しなかったため, この繰返し回数で疲労試験終了

**: ひずみゲージ剥離のため, ひずみの目標値を記載

付録(3) 繰返しの塑性ひずみを受けた試験片の高サイクル疲労試験の結果

試験片	K_T	$\Delta \varepsilon$ (%)	n_L (回)	$\Delta \sigma$ (MPa)	n_H (回)
H13(14)	1.00	0.96	729	239	5000000*
H14(14)	1.00	0.92	1458	239	951830
H15(14)	1.00	0.95	1458	239	632570
H16(14)	1.00	0.95	2187	239	680900
H17(14)	1.00	0.99	2187	239	5000000*
H18(14)	1.00	1.98	454	239	617190
H19(14)	1.00	2.00	454	239	282340
H20(14)	1.00	1.96	680	239	155640
H21(14)	1.00	1.95	680	239	345710
H22(14)	1.00	2.92	132	239	734550
H23(14)	1.00	3.00	263	239	503040
H24(14)	1.00	2.93	395	239	217780
H25(14)	1.00	3.00	395	239	36920
H26(14)	1.00	2.01	129	239	5758230**
H27(14)	1.00	1.97	227	239	2076780**
H28(14)	1.00	1.77	227	239	1337580**
H29(14)	1.00	3.00	49	239	2455080**
T27	2.54	0.94	3	239	382730
T28	2.57	0.84	5	239	388310
T29	2.59	0.92	36	239	162780
T30	2.73	0.75	111	239	129610
T31	2.70	0.94	223	239	114620
T32	2.73	0.93	446	239	73320
T33	2.50	0.94	446	239	72310
T34	2.54	1.69	5	239	188970
T35	2.52	1.54	34	239	177190
T36	2.54	1.57	68	239	125430
T37	2.73	0.95	137	239	103120
T38	2.62	2.97	1	239	290590
T39	2.52	2.56	5	239	261630
T40	2.50	2.00	25	239	161900
T41	2.62	2.00	49	239	67750
T42	2.52	2.44	49	188	272610
T43	2.62	2.05	25	188	993800
T44	2.82	2.14	25	188	392670
T45	2.79	2.22	12	188	384880
T46	2.67	1.72	12	188	426340
T47	2.82	2.10	49	137	15000000*
T47	2.82	2.10	49	167	557770
M16	3.71	0.92	31	179	249800
M17	3.69	0.91	63	179	153300
M18	3.77	2.56	6	179	247160
M19	3.68	2.99	13	179	150320
M20	3.71	2.80	6	162	276230
M21	3.68	2.86	13	162	233060
M22	3.68	2.32	6	162	406770
M23	3.69	2.64	26	179	59390
M24	3.72	0.91	125	179	66800
M25	3.75	2.59	6	118	5000000*
M25	3.75	2.59	6	125	5000000*
M25	3.75	2.59	6	130	5000000*
M25	3.75	2.59	6	135	5000000*
M25	3.75	2.59	6	140	5000000*
M25	3.75	2.59	6	145	5000000*
M25	3.75	2.59	6	150	5000000*
M25	3.75	2.59	6	162	665450
M26	3.75	2.80	26	112	5000000*
M26	3.75	2.80	26	162	117400
M27	3.68	2.63	13	112	1671110
M28	3.68	2.43	13	112	1697890

H：平滑試験片，T：突起付き試験片，M：溝入り試験片

(14)：平滑試験片の断面の直径14mm

 K_T ：弾性応力集中係数 $\Delta \varepsilon$ ：全ひずみ範囲（ひずみゲージによる測定ひずみ） n_L ：全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ の繰返し回数 $\Delta \sigma$ ：高サイクル疲労試験の応力範囲 n_H ：高サイクル疲労試験の試験片の破断寿命

*：疲労亀裂が発生しなかったため、この繰返し回数で疲労試験終了

**：試験片のねじ部が疲労破断

付録(4) 変動ひずみを受けた試験片の高サイクル疲労試験の結果

試験片	K_T	前半載荷		後半載荷		$\Delta\sigma$ (MPa)	n_H (回)
		$\Delta\varepsilon$ (%)	n_L (回)	$\Delta\varepsilon$ (%)	n_L (回)		
T48	2.67	2.47	6	0.78	61	239	126760
T49	2.73	0.83	61	2.62	6	239	143270
T50	2.73	0.83	248	2.61	24	239	76100
T51	2.50	2.82	24	1.00*	248	239	63710

T: 突起付き試験片

K_T : 弾性応力集中係数

$\Delta\varepsilon$: 全ひずみ範囲 (ひずみゲージによる測定ひずみ)

n_L : 全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ の繰返し回数

$\Delta\sigma$: 高サイクル疲労試験の応力範囲

n_H : 高サイクル疲労試験の試験片の破断寿命

*: ひずみゲージ剥離のため、ひずみの目標値を記載

参考文献

- 1) 三ツ木幸子, 大野貴史, 山田健太郎: 過荷重を受けた応力集中のある部材の疲れ特性, 土木学会論文集, 第368号/I-5, pp.293-300, 1986.
- 2) MARC, 日本マーク(株), K-6バージョン, 1994.
- 3) 金澤武, 飯田國廣: 溶接継手の強度, 産報出版(株), pp.121-145, 1979.
- 4) 大倉一郎: 鋼橋の疲労, 東洋書店, pp.69-71, 1994.
- 5) 大倉一郎: 地震荷重を受けた鋼部材の破壊靱性と疲労強度, 平成8,9年度科学研究費補助金(基盤研究(c)(2))研究成果報告書, No.08650548, pp.54-75, 19908.
- 6) 大野勝, 大倉一郎, 田原潤, 安田修: 繰返し塑性ひずみが鋼材の高サイクル疲労に与える影響, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, I-A191, pp.382-383, 1998.
- 7) 菊川真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘: 変動ひずみ条件下の低繰返し数疲れ, 日本機械学会誌, 第70巻, 第585号, pp.97-111, 1967.

(2000.10.16 受付)

EFFECTS OF CYCLIC PLASTIC STRAINS ON HIGH-CYCLE FATIGUE STRENGTH OF STRUCTURAL STEELS

Ichiro OKURA and Masaru OHNO

Slightly damaged steel members were reused in repairing the bridges suffering from the 1995 Kobe Earthquake. The earthquake loads may have induced cyclic plastic strains into the steel members. The cyclic plastic strains will decrease the high-cycle fatigue strength for the vehicular loads afterward. In this study, regarding the cyclic plastic strains as low-cycle fatigue, we investigate the influence of the damage generated by the low-cycle fatigue on the high-cycle fatigue strength. The columnar specimens with stress concentration are damaged by low-cycle fatigue, and then they are subjected to high-cycle fatigue. Based on the obtained results, we establish the S-N formula for the steels subjected to cyclic plastic strains.