

繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を評価するためのモデル

Model to assess the decrease in fracture toughness of
structural steels due to cyclic plastic strains

大倉一郎*, 田原潤**, 安田修***, 広野正彦****

Ichiro Okura, Jun Tahara, Osamu Yasuda and Masahiko Hirono

*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)

**工修 日立造船(株)東京設計部 (〒100-8121 千代田区一ツ橋 1-1-1)

***高田機工(株)技術研究所 所長 (〒649-0111 海草郡下津町方 1375-1)

****工修 高田機工(株)技術研究所 (〒649-0111 海草郡下津町方 1375-1)

The purpose of this study is to present a model to assess the decrease in the fracture toughness of structural steels due to cyclic plastic strains. The relation between the number of cycles of plastic strains and the decrease in Charpy absorbed energy is investigated. The equivalent plastic strain is defined to relate the decrease in the fracture toughness due to cyclic plastic strain to that due to monotonic plastic strain. The equation for the relation between the decrease in Charpy absorbed energy due to monotonic plastic strain and the increase in stress is provided. Using the equivalent plastic strain, this equation makes it possible to evaluate the decrease in the fracture toughness of structural steels due to cyclic plastic strains.

Key Words : brittle fracture, fracture toughness, cyclic plastic strain, equivalent plastic strain

1. 序論

1995 年兵庫県南部地震において、阪神高速道路神戸線の鋼製円柱橋脚 P580~P585 の柱高さの中間部に局部座屈とそれに伴う亀裂が観察された。亀裂の中には円柱断面全体にわたって伝播したものもあった^{1) 2)}。神戸港港湾幹線道路(ハーバーハイウェイ)の鋼製門型橋脚 P75 の柱-梁隅角部にも、柱の断面全体にわたるような亀裂が観察された^{3) 4)}。

これらの亀裂は、塑性ひずみの導入によって破壊靱性が低下したことによる脆性破壊によって起こされたことが、これまでの研究^{4)~7)}で明らかにされている。鋼製円柱橋脚の場合、設計当時想定されていた地震力をはるかに上回る力が橋脚に作用したことにより局部座屈が生じ、この局部座屈変形によって塑性ひずみが発生した⁴⁾。鋼製門型橋脚の場合、同様に設計当時想定されていた地震力をはるかに上回る力が橋脚に作用したことで柱-梁隅角部が作り出す構造的なひずみ集中によって塑性ひずみが発生した^{5) 6)}。

このように、先の地震においては、塑性ひずみが鋼材の破壊靱性を低下させ、橋脚に脆性破壊を起こさせた。したがって、鋼製橋脚の耐震設計法を確立する上で、塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を評価でき

ることが必要である。

鋼製橋脚は地震時に繰返し荷重を受ける。したがって塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を考える際には、塑性ひずみが繰返されることの効果を考慮しなければならない。

繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を取扱った研究としては文献 8)~12)が挙げられる。文献 8), 9)は、繰返し塑性ひずみによる破壊靱性低下は塑性スケルトンひずみによって評価することができると主張しているが、文献 11), 12)は塑性スケルトンひずみで評価できない試験データを示している。このように、繰返し塑性ひずみによる破壊靱性低下を評価できるモデルはまだない。

本研究では、著者等の先の研究成果^{10)~12)}にさらに試験データを追加することにより、繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を評価するためのモデルを提案する。

2. 塑性ひずみの繰返し回数の定義とこれまでの著者等の研究成果

塑性ひずみの繰返し回数の定義を図-1 に示す。図-1(a), (b)は単調载荷に対する塑性ひずみの繰返し回数

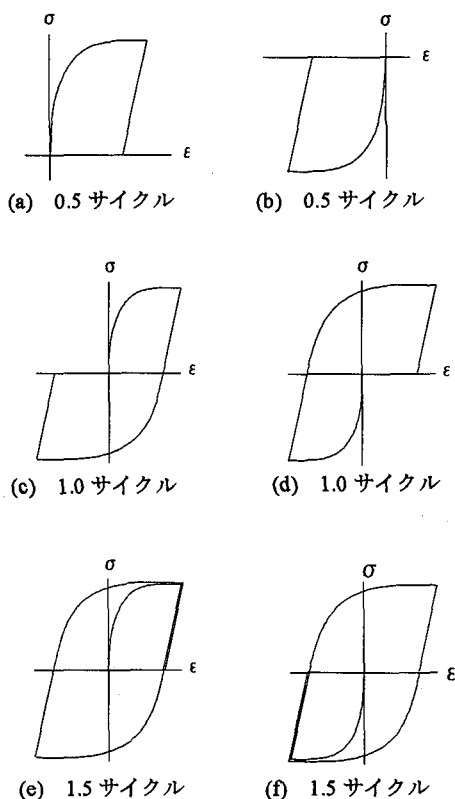


図-1 塑性ひずみの繰返し回数の定義

の定義である。図-1(c)~(f)は繰返し载荷に対する塑性ひずみの繰返し回数の定義である。2 サイクル以上の繰返し载荷に対する塑性ひずみの繰返し回数の定義もこれに従う。単調载荷によって生じた塑性ひずみを単調塑性ひずみ、繰返し载荷によって生じた塑性ひずみを繰返し塑性ひずみと呼ぶ。

これまでの著者等の研究^{10)~12)}で、繰返し塑性ひずみとシャルピーの衝撃吸収エネルギーの低下に関して次のことを明らかにした。

- (1) 全ひずみ(弾性ひずみ+塑性ひずみ)が $\pm 0.5\%$ の繰返し载荷の場合、5.5 サイクルまでで吸収エネルギーの低下が大きく、5.5 サイクルから 10.5 サイクルの間で吸収エネルギーの低下が小さい。全ひずみが $\pm 1.0\%$ の繰返し载荷の場合、3 サイクルまでで吸収エネルギーの低下が大きく、3 サイクルから 10.5 サイクルの間で吸収エネルギーの低下が小さい。このように早期の塑性ひずみの繰返しにおいて吸収エネルギーの低下が起こる。
- (2) 無载荷と単調载荷の場合、時効処理(ひずみ時効を加速させるために鋼材を適当な温度に加熱する処理)の影響は小さいが、繰返し载荷の場合、時効処理の影響が大きく現われる。すなわち繰返し载荷に対して、時効処理された衝撃試験片の吸収エネルギーが時効処理されない衝撃試験片の吸収エネルギーを大きく下回る。

(1)に示したように、早期の塑性ひずみの繰返しにおいて吸収エネルギーの低下が大きいことを明らかにしたが、全ひずみが $\pm 0.5\%$ の場合、1 サイクルから 5 サイクルまで、全ひずみが $\pm 1.0\%$ の場合、1 サイクルから 2.5 サイクルまでに対して衝撃試験を実施しなかったため、早期のどの繰返し回数までが吸収エネルギーの低下に影響するのか明らかになっていない。そこで、本研究では、これを明らかにするために、1, 2 サイクルの少ない塑性ひずみの繰返しを受けた鋼材に対して衝撃試験を行う。

3. 塑性ひずみの導入

3.1 繰返し塑性ひずみの導入

図-2(a)に示す I ビームのフランジに塑性ひずみを導入し、フランジからシャルピーの衝撃試験片を採取した。フランジの鋼種は SM400B で、そのミルシート値と引張試験の結果を表-1 に示す。

図-2(a)に示すように、疲労試験機で、支間中央に集中荷重を変位制御で与えることにより、支間中央付近の上下フランジに塑性ひずみを導入した。

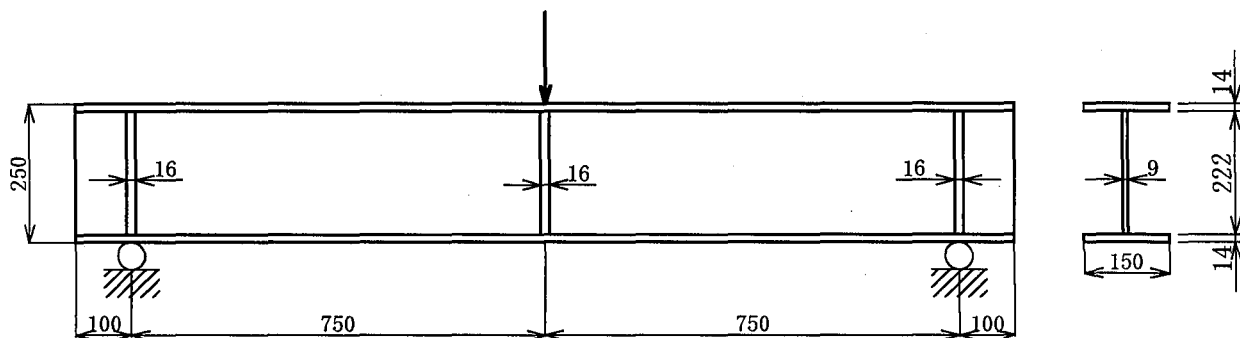
I ビームのフランジに貼付したひずみゲージの位置を図-2(b)に示す。支間中央から左右 90mm の位置の上下フランジの外面にひずみゲージを貼付した。ひずみゲージの位置を番号で識別する。I ビームが最初に置かれた状態で、ひずみゲージ 1~6 は上フランジに貼付されたひずみゲージを表し、ひずみゲージ 7~12 は下フランジに貼付されたひずみゲージを表す。用いたひずみゲージは塑性ひずみが測定できる大ひずみゲージである。

荷重を载荷して除荷した後、I ビームを上下反対に置いて载荷することにより、引張りと圧縮の繰返し荷重を I ビームのフランジに与えた。導入した塑性ひずみの大きさは全ひずみで $\pm 0.5\%$ である。考慮した塑性ひずみの繰返し回数は 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 サイクルである。各繰返し回数に対して I ビームを 1 体用意した。

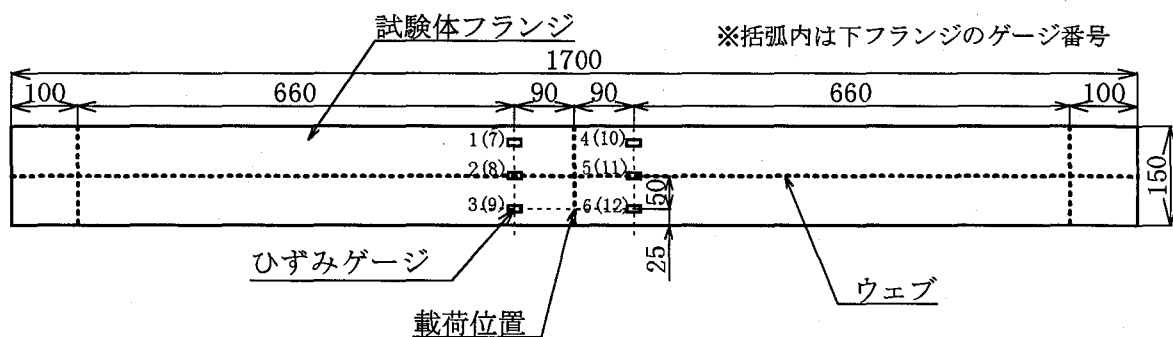
荷重-ひずみ履歴の関係を図-3 に示す。これは 5 サイクルの塑性ひずみの繰返しに対するひずみゲージ 2 と 8 が与える結果である。着目するフランジが下側にあるとき荷重の符号を正で表し、着目するフランジが上側にあるとき荷重の符号を負で表している。载荷中ひずみゲージが示す値にばらつきが生じたので、I ビームの下側にあるフランジのいずれかのひずみゲージが 0.5%に達したら除荷した。

3.2 単調塑性ひずみの導入

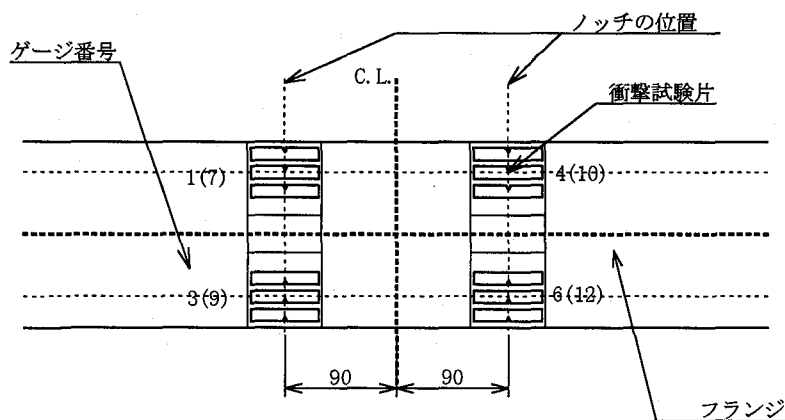
I ビームのフランジと同じ鋼板を単調に引張ることにより、単調塑性ひずみを鋼板に導入し、この鋼板か



(a) 塑性ひずみの導入



(b) ひずみゲージの貼付位置



(c) 衝撃試験片の採取位置

図-2 I ビーム

表-1 ミルシート値と引張試験結果

	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	ヤング率 (MPa)	シャルピーの衝撃吸収 エネルギー J (0°C)
ミルシート値	276	438	28.0	-	159
引張試験値	274	433	30.2	2.110×10^5	-

化学成分 (%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ceq
0.17	0.14	0.73	0.002	0.02	0.02	0.03	0.001	0.002	0.3

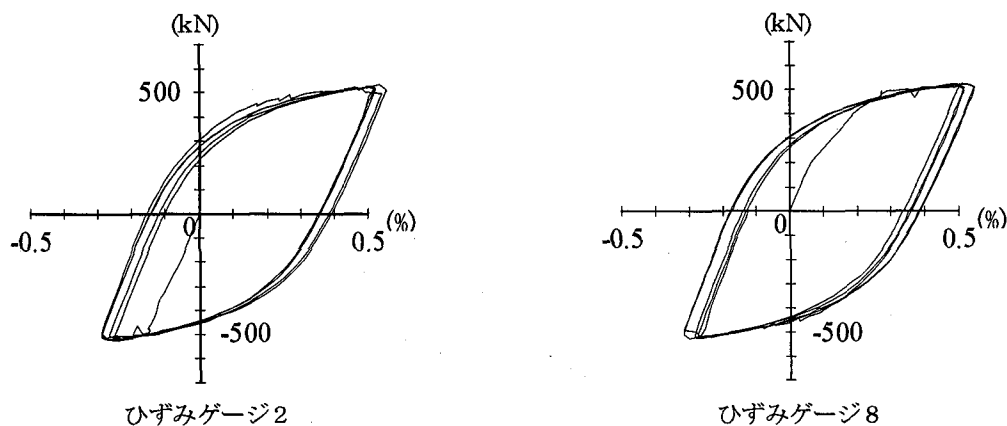


図-3 荷重-ひずみ関係

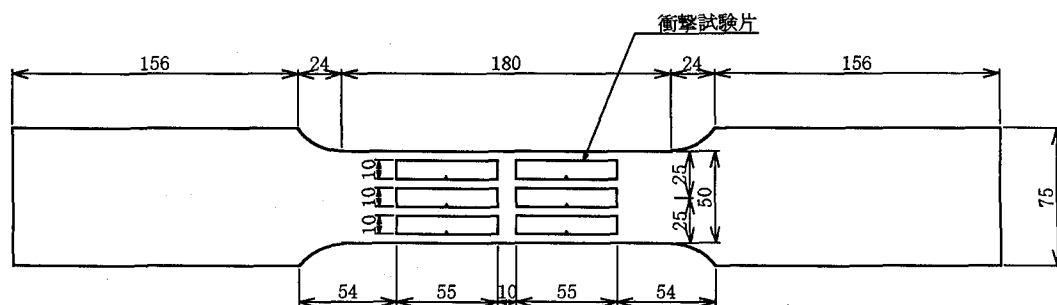


図-4 引張り試験片

らシャルピーの衝撃試験片を採取した。引張り試験片を図-4に示す。考慮した塑性ひずみの大きさは全ひずみで0, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11%である。各塑性ひずみの大きさに対して引張り試験片を1体用意した。引張り試験片への塑性ひずみの導入は万能試験機で行った。ひずみゲージを試験片の表裏に1枚ずつ貼付した。

4. シャルピーの衝撃試験とその結果

4.1 シャルピーの衝撃試験

Iビームのフランジから採取した衝撃試験片の位置を図-2(c)に示す。採取位置は、ひずみゲージ1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12の付近である。衝撃試験片はVノッチシャルピーの衝撃試験片(JIS Z 2202 4号試験片)である。支間中央から左右90mmの位置に衝撃試験片のVノッチが位置するように、フランジの長手方向に衝撃試験片を採取した。Vノッチを板厚方向に入れ、各ひずみゲージの位置で3本の衝撃試験片を作製した。したがって、1つのIビームの上下フランジから合計24個の衝撃試験片が得られる。

引張り試験片から採取した衝撃試験片の位置を図-4

に示す。引張り試験片から6本の衝撃試験片を採取した。

250℃, 1時間の時効処理の有無を考慮した。シャルピーの衝撃試験は0℃で行った。

4.2 吸収エネルギー低下と単調塑性ひずみの関係

吸収エネルギー低下と単調塑性ひずみの関係を図-5に示す。プロットされた点は、各塑性ひずみの大きさに対して、3本の吸収エネルギーの平均値である。時効処理なしの結果で、全ひずみが5%と7%の吸収エネルギーが全ひずみが3%と4%のそれより高くなっている。吸収エネルギーは、一般に衝撃試験片が採取された鋼板の場所によって異なる¹³⁾。したがって塑性ひずみが導入されない段階で、全ひずみが5%と7%の引張り試験片の吸収エネルギーが他の引張り試験片の吸収エネルギーより偶然高かったのも、この様な試験結果になったと想像する。

時効処理が施されない場合、全ひずみが5%と7%の結果を除けば、塑性ひずみが大きくなるに従って吸収エネルギーが小さくなる。時効処理が施された場合、塑性ひずみが2%から3%の間で吸収エネルギーが急激

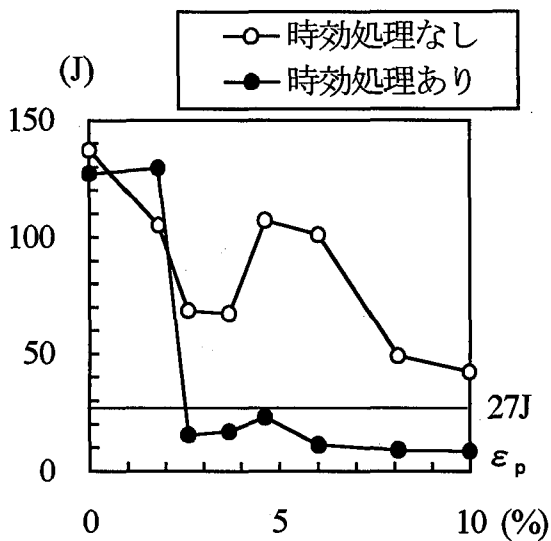


図-5 吸収エネルギー低下と単調塑性ひずみの関係

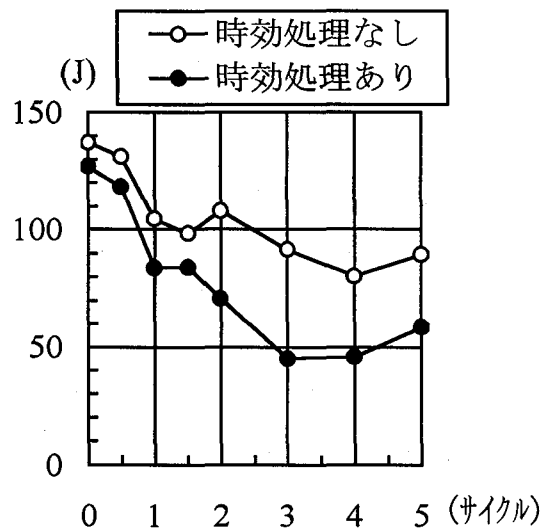


図-6 吸収エネルギー低下と塑性ひずみの繰返し回数の関係

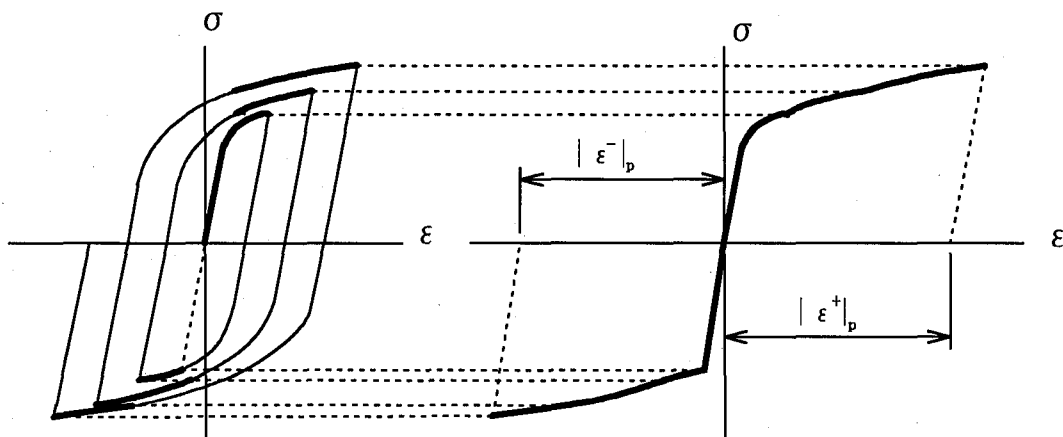
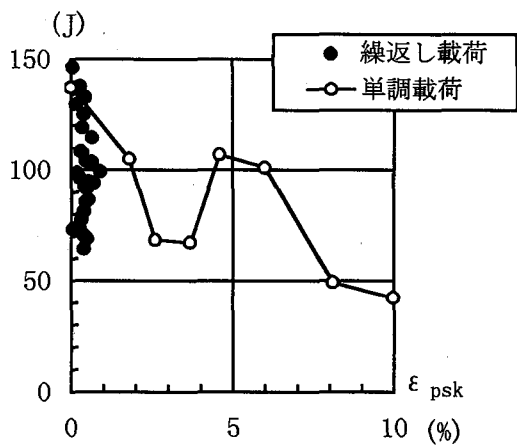
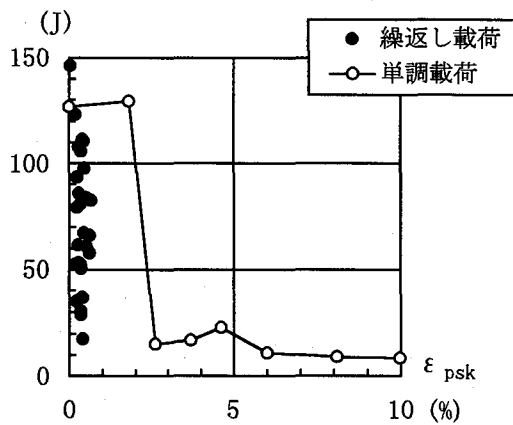


図-7 塑性スケルトンひずみ



(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり

図-8 吸収エネルギー低下と塑性スケルトンひずみの関係

に低下し、これより大きな塑性ひずみに対して、JIS で規定される SM400B の吸収エネルギーに対する規格値 27 J を下回る。

4.3 吸収エネルギー低下と塑性ひずみの繰返し回数の関係

吸収エネルギー低下と塑性ひずみの繰返し回数の関係を図-6 に示す。プロットされた点は、各塑性ひずみの繰返しに対して、12 本の衝撃試験片の吸収エネルギーの平均値である。時効処理の有無に関わらず、3 サイクルまでは繰返し回数とともに吸収エネルギーが低下する。そして 3 サイクル以上の繰返し回数に対して吸収エネルギーの低下は小さい。2 章で述べたように、全ひずみが±0.5%の繰返しの場合、5.5 サイクルから 10.5 サイクルの間で吸収エネルギーの低下が小さかったので、塑性ひずみの繰返しが吸収エネルギー低下に与える影響は 3 サイクルまでで、3 サイクル以上の繰返しが吸収エネルギーの低下に与える影響は小さい。

4.4 吸収エネルギー低下と塑性スケルトンひずみの関係

塑性スケルトンひずみとは、応力の増加分に対応するひずみを加算したものをいう。図-7 に示すように、前サイクルの最大の応力を上回る応力によって生じるひずみを各サイクルごとに加算してスケルトンカーブを引張側と圧縮側に対して作成する。引張側と圧縮側のスケルトンカーブの塑性ひずみの絶対値のうち大きい方を塑性スケルトンひずみと定義する。すなわち塑性スケルトンひずみ ε_{psk} は次式で表される。

$$\varepsilon_{psk} = \text{Maximum} \left(\left| \sum \varepsilon^+ \right|_p, \left| \sum \varepsilon^- \right|_p \right) \quad (1)$$

単調塑性ひずみは塑性スケルトンひずみと一致する。繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性低下は、その鋼材が受けた塑性スケルトンひずみと同量の単調塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性低下と同じであるという主張がなされている^{8), 9)}。

吸収エネルギー低下と塑性スケルトンひずみの関係を、本研究の試験結果に対して図-8 に示す。繰返し载荷に対してプロットされた点は、I ビームのフランジの各ひずみゲージにおける 3 本の衝撃試験片の吸収エネルギーの平均値とそのひずみゲージが与える塑性スケルトンひずみの値である。時効処理の有無に関わらず、塑性スケルトンひずみで評価された吸収エネルギー低下と単調塑性ひずみによる吸収エネルギー低下との間に相関は見られない。したがって塑性スケルトンひずみで吸収エネルギー低下が評価できるという主張には疑問がある。

5. 等価塑性ひずみ

繰返し塑性ひずみによる破壊靱性低下を単調塑性ひずみによる破壊靱性低下に関連付けるために、本研究では繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係に対して、次の仮説を立てた。

- (1) 繰返し载荷を受けた鋼材の破壊靱性低下は、繰返し载荷によるひずみエネルギー損失と同量のひずみエネルギー損失を単調载荷で受けた鋼材の破壊靱性低下と同じである。
- (2) 破壊靱性を低下させる繰返し塑性ひずみは 3 サイクルまでである。

図-6 に示したように、0.5 サイクルごとに吸収エネルギーが低下するので(1)の仮説を設けた。さらに 4.3 節で述べたように、吸収エネルギーの低下は 3 サイクルまでの繰返し回数で生じるので(2)の仮説を設けた。

鋼材の応力とひずみの関係に対して図-9 に示す剛完全塑性体を仮定して、これらの仮説を適用すると、繰返し载荷による破壊靱性低下と等しい破壊靱性低下が起こる単調塑性ひずみ ε_{pe} が次式で与えられる。

$$\varepsilon_{pe} = \sum_{i=1}^6 r_i \quad (2)$$

r_i は繰返し载荷における 0.5 サイクルごとの塑性ひずみ範囲である。 ε_{pe} を等価塑性ひずみと呼ぶ。3 サイクル未満の場合、最後のサイクルと 3 サイクルとの間の r_i を 0 とする。

図-3 に示したように、繰返し回数ごとに、塑性ひずみは全く同じ値をとるわけではない。3.5 サイクル以上の繰返し载荷に対して、等価塑性ひずみを大き目に評価する方法として、図-10 に示すように、全サイクルに対して r_i を求め、大きいものから 6 番目までを式(2)に採用する。

吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係を、本研究の試験結果に対して図-11 に示す。単調载荷の点を結ぶ線の周りに繰返し载荷の点が広く分布している。これは、塑性ひずみを導入しない段階で吸収エネルギーが鋼板の場所によって異なること¹³⁾、および衝撃試験片の V ノッチの製作精度や衝撃試験の際に生じる実験誤差に起因しているためと考える。そこで、図-11 に示す吸収エネルギーのばらつきを小さくするために、試験結果に次の処理を施した。

0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 の各塑性ひずみの繰返し回数で、等価塑性ひずみはひずみゲージ間で大きなばらつきを示さなかった¹⁴⁾。したがって吸収エネルギーと等価塑性ひずみに対して、塑性ひずみの繰返し回数ごとにそれぞれ平均をとる。時効処理が施された場合と施されない場合の各場合で、12 本の衝撃試験片の平均をとる。平均値を用いた吸収エネルギー低下と等価塑

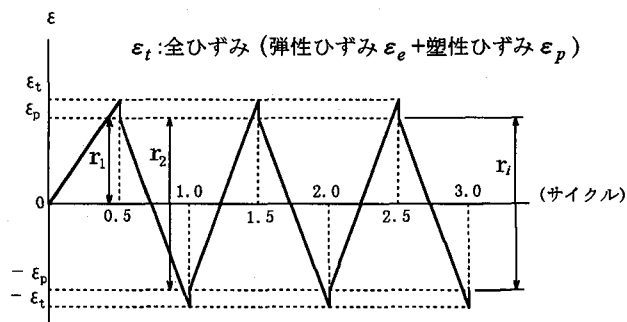
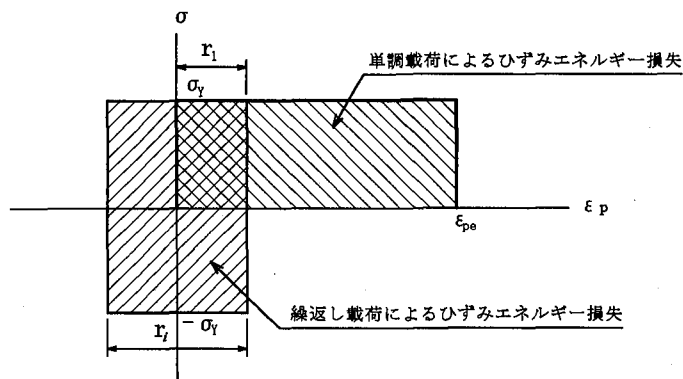


図-9 等価塑性ひずみ

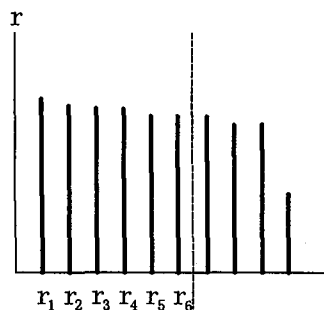
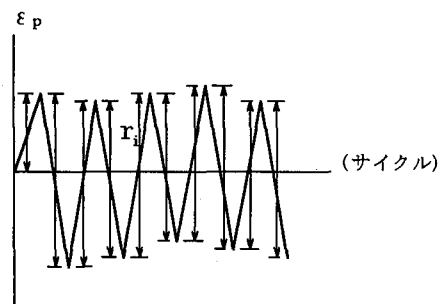
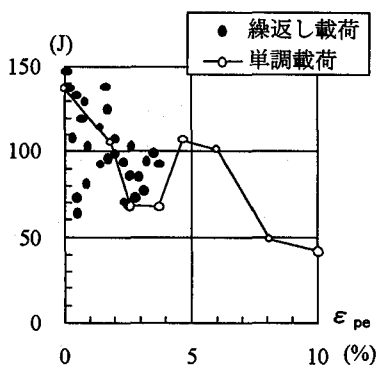
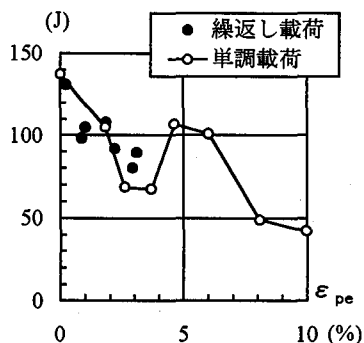


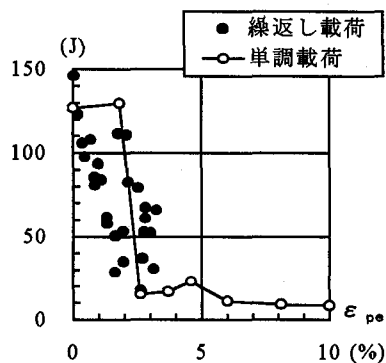
図-10 塑性ひずみの繰返しに対する等価塑性ひずみ



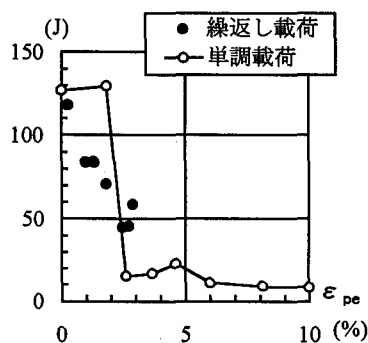
(a) 時効処理なし



(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり



(b) 時効処理あり

図-11 吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係

図-12 吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係
(平均値を用いた場合)

性ひずみの関係を図-12 に示す。単調载荷の点を結ぶ線の周りに繰返し载荷の点が分布している。

6. 破壊靱性低下と応力上昇の関係

引張り試験片が与える破壊靱性低下と応力上昇の関係を図-13 に示す。時効処理を施した引張り試験片の降伏応力を調べていなかったため、時効処理を施した試験結果はこの図に載せていない。図の記号の意味は次の通りである。

CVN：単調塑性ひずみを受けた場合のシャルピーの吸収エネルギー

$(CVN)_0$ ：塑性ひずみを受けない場合のシャルピーの吸収エネルギー

σ は真応力で表された、単調塑性ひずみに対応する応力である。真応力と公称応力の関係は次の通りである。

$$\sigma = \sigma_n(1 + \varepsilon_n) \quad (3)$$

ここに、 σ ：真応力、 σ_n ：公称応力、 ε_n ：公称ひずみ

σ_Y は降伏応力である。 σ_Y は真応力と公称応力で大差がないので公称応力で表す。 σ_{Be} は次式で定義される引張強さである。しかし、 σ_{Be} が材料学的に何を意味する量が現在不明である。

$$\sigma_{Be} = \sigma_B(1 + e) \quad (4)$$

ここに、 σ_B ：引張強さ(公称応力)、 e ：破断伸び

図-13 の縦軸は、塑性ひずみを受けない場合の吸収エネルギーに対する、単調塑性ひずみを受けた場合の吸収エネルギーの比を表している。横軸には、降伏応力からの応力上昇($\sigma - \sigma_Y$)が、引張強さと降伏応力の差($\sigma_{Be} - \sigma_Y$)で無次元化されている。このような量によって試験結果を整理すると、試験結果は右下がりに分布している。この分布を次式で近似する。

$$\frac{CVN}{(CVN)_0} = 1 - \left(\frac{\sigma - \sigma_Y}{\sigma_{Be} - \sigma_Y} \right)^n \quad (5)$$

ここに、 n ：係数

この式は、 $\sigma = \sigma_Y$ のとき $CVN = (CVN)_0$ で、 $\sigma = \sigma_{Be}$ のとき $CVN = 0$ を仮定している。試験結果は $n = 0.4935$ の曲線と $n = 2.175$ の曲線の間にある。

7. 破壊靱性低下の推定方法

繰返し塑性ひずみを受けた鋼材のシャルピーの吸収エネルギーに関する本研究の試験結果および過去の著者等の試験結果¹⁰⁾を次式によって推定する。

$$CVN = (CVN)_0 \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma(\varepsilon_p) - \sigma_Y}{\sigma_{Be} - \sigma_Y} \right)^{0.4935} \right\} \quad (6)$$

この式は、式(5)の n に対して 0.4935 を用い、 $(CVN)_0$

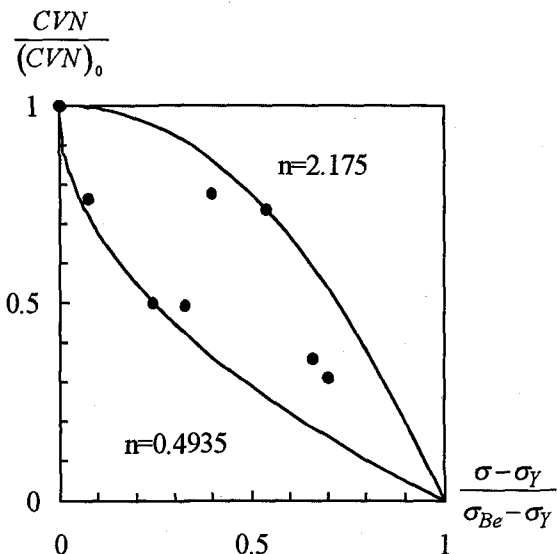


図-13 破壊靱性低下と応力上昇の関係

を右辺へ持ってきたものである。 $\sigma(\varepsilon_p)$ は真応力 σ が真ひずみ ε_p によって表されていることを意味している。ここで真ひずみ ε と公称ひずみ ε_n の関係は次の通りである。

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (7)$$

繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーは、等価塑性ひずみ ε_{pe} を式(2)で求め、これを式(7)で真ひずみに変換し、これを式(6)の ε_p に用いることにより推定することができる。

I ビームのフランジから採取された衝撃試験片のうち、時効処理を施さなかった試験結果に対して、吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係を図-14 に示す。横軸に真ひずみが採られている。図-15 に示す、I ビームのフランジの応力と塑性ひずみの関係を式(6)に代入して得られる曲線が図-14 に示してある。式(6)が与える曲線の周りに試験結果が分布している。

著者等の過去の試験結果¹⁰⁾で、時効処理を施さなかった試験結果に対して、吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係を図-16 に示す。図-17 に示す、過去の試験で使用した鋼板の応力と塑性ひずみの関係を式(6)に代入して得られる曲線が図-16 に示してある。式(6)が与える曲線の周りに試験結果が分布している。

これら2つの例を通して、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性低下が式(2)と(6)によってある程度の信頼性を持って推定することができると思われる。

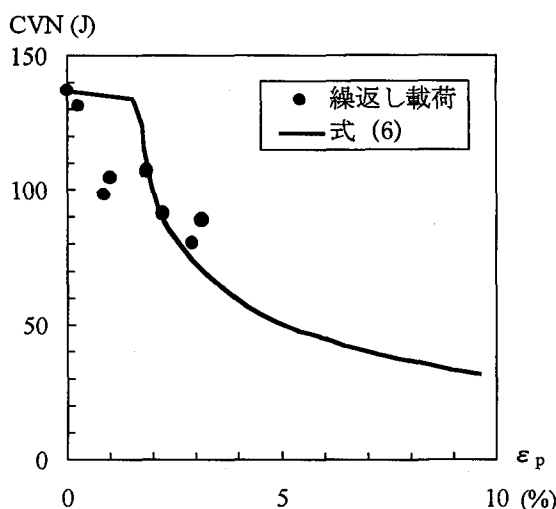


図-14 吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係

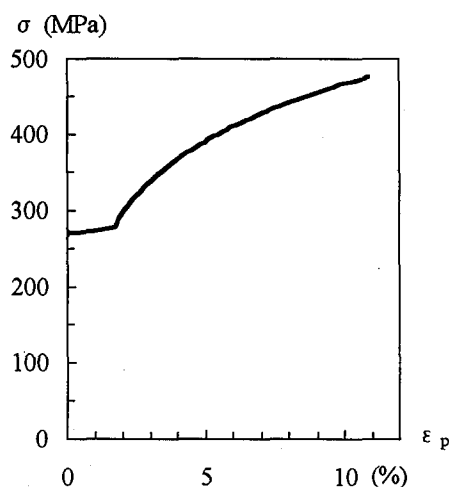


図-15 応力-塑性ひずみ関係

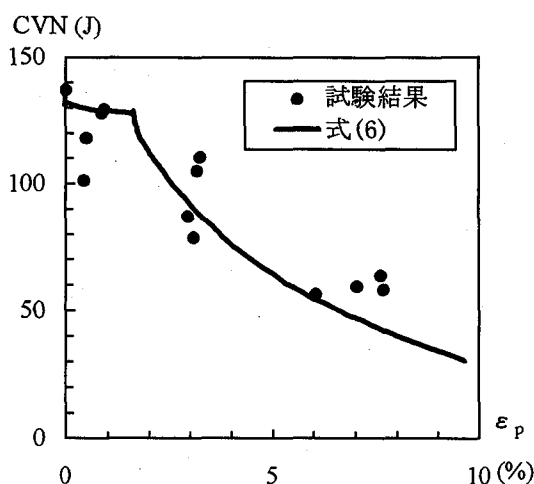


図-16 吸収エネルギー低下と等価塑性ひずみの関係

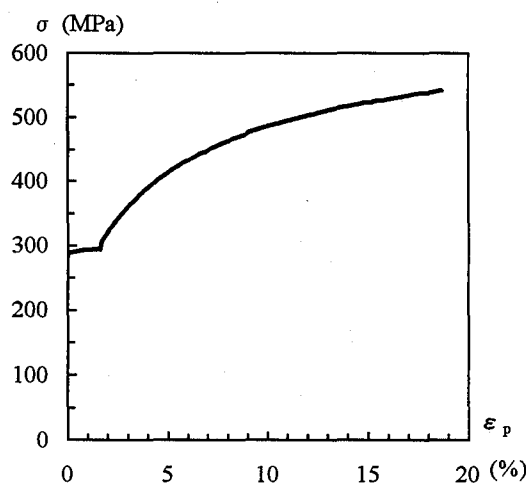


図-17 応力-塑性ひずみ関係

8. 結論

繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を評価するためのモデルを提案した。繰返し塑性ひずみによる破壊靱性低下を単調塑性ひずみによる破壊靱性低下に関連付ける塑性ひずみとして、式(2)で定義される等価塑性ひずみを提案した。単調塑性ひずみを受けた鋼材のシャルピーの吸収エネルギー低下と応力上昇の関係を与える式として式(6)を提案した。繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性低下は、式(2)が与える等価塑性ひずみを式(6)に用いることによって推定することができる。

式(2)と(6)は、著者等の試験結果に基づいて提案された式である。したがって、これらの式の信頼性と適用範囲を明らかにするために、今後、多くの追認試験が必要である。これと併せて、本研究で提案されたモデ

ルの材料学的な意味も明らかにされなければならない。

参考文献

- (1) (社)土木学会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 橋梁，丸善(株)，p.49，1996。
- (2) (社)土木学会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害要因の分析 コンクリート構造物 鋼構造物，丸善(株)，pp.120-134，1997。
- (3) 文献1)の p.169。
- (4) 文献2)の pp.135-150。
- (5) 岡下勝彦，大南亮一，道場康二，山本晃久，富松実，丹治康行，三木千寿：兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.243-261，1998。
- (6) 三木千寿，四十沢利康，穴見健吾：鋼製橋脚ラー

- メン隅角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.273-281, 1998.
- 7) 大倉一郎, 田原潤, 安田修, 広野正彦: 阪神・淡路大地震で被災した鋼製円柱橋脚の破壊靱性, 鋼構造論文集, 第5巻第19号, pp.29-37, 1998.
 - 8) 建設省建築研究所, (社)鋼材倶楽部: 建築鋼構造物の延性・脆性破壊挙動と破壊性能評価のあり方, 破壊性能研究会研究報告書, 1995.
 - 9) (社)日本溶接協会, 鉄鋼部会 APD 委員会: 繰返し大変形を受ける建築鉄骨溶接接合部の強度と破壊靱性(中間報告書Ⅲ), JWES-IS-9603, 1996年7月.
 - 10) 大倉一郎, 田原潤, 西岡敬治, 安田修: 繰返し塑性ひずみが鋼材の破壊靱性に与える影響, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, pp.1-11, 1996.
 - 11) Okura, I., Tahara, J., Nishioka, T. and Yasuda, O.: Effects of cyclic plastic strains on fracture toughness of structural steel, Proceedings of the 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, pp.855-862, 1997.
 - 12) Okura, I., Tahara, J., Nishioka, T. and Yasuda, O.: Effects of cyclic plastic strains on fracture toughness of structural steel, Stability and Ductility of Steel Structures, Edited by T. Usami and Y. Itoh, Elsevier, pp.415-424, 1998.
 - 13) Frank, K.H., George, D.A., Schluter, C.A., Gealy, S. and Horos, D.R.: Notch toughness variability in bridge steel plates, Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP Report 355, USA, 1993.
 - 14) 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.27-53, 1998.

(1998年9月18日受付)