

# 繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係

大倉一郎<sup>1</sup>・大野 勝<sup>2</sup>・山田靖則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>正会員 工修 石川島播磨重工業(株)橋梁事業部建設部 (〒737-8515 呉市光町 5-17)

<sup>3</sup>正会員 工博 高田機工(株)技術研究所 所長代理 (〒649-0111 海草郡下津町方 1375-1)

本研究は、繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係を明らかにすることを目的としている。繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性をシャルピーの衝撃試験で調べる。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ひずみとして、これまで提案された塑性スケルトンひずみと等価塑性ひずみの妥当性を明らかにした。塑性ひずみと時効による、応力上昇と破壊靱性低下の関係を与える。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手法を提案する。

**Key Words** : brittle fracture, fracture toughness, cyclic plastic strain, equivalent plastic strain, plastic skeleton-strain, Charpy V-notch impact test, strain aging, earthquake

## 1. はじめに

先の兵庫県南部地震で観察された、阪神高速道路神戸線の鋼製円柱橋脚の柱高さの中間部の亀裂<sup>1), 2)</sup>、神戸港港湾幹線道路(ハーバーハイウェイ)の鋼製門型橋脚の柱-梁隅角部の亀裂<sup>3)-5)</sup>は、地震動による塑性ひずみの導入が破壊靱性を低下させ、脆性破壊を引き起こしたものであったことが、これまでの研究<sup>4)-9)</sup>で明らかにされている。したがって、鋼製橋脚の耐震設計法を確立するためには、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望まれる。

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、建築分野で行われている一連の研究<sup>10)-12)</sup>と著者等の研究<sup>13)-15)</sup>が挙げられる。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ひずみとして、前者の研究では塑性スケルトンひずみ、後者の研究では等価塑性ひずみが提案されている。

他方、兵庫県南部地震で被災した鋼構造物の復旧作業の際、軽微な損傷を受けた部材は再利用された。再利用された部材の中には地震動によって繰返し塑性ひずみが導入されている可能性がある。繰返し塑性ひずみを受けた鋼材は、時効によってその破壊靱性がさらに低下することが明らかにされている<sup>13)</sup>。したがって再利用された

鋼部材の将来の地震に対する脆性破壊の可能性を予測するためには、繰返し塑性ひずみによる破壊靱性低下を、時効の影響も考慮して評価できることが望まれる。

以上の背景から、本研究は、先に提案された塑性スケルトンひずみと等価塑性ひずみの妥当性を明らかにすること、および、繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊靱性低下を時効の影響も考慮して評価できる手法を確立することを目的としている。最初に、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の破壊靱性低下をシャルピーの衝撃試験で調べ、塑性スケルトンひずみと等価塑性ひずみの妥当性を明らかにする。次に、塑性ひずみと時効による、応力上昇と破壊靱性低下の関係を与える。最後に、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手法を提案する。

## 2. 塑性ひずみの導入

### (1) 試験体

試験体を図-1に示す。図-1(a)は単調引張りの塑性ひずみを導入する板試験片であり、図-1(b)は繰返し塑性ひずみを導入する梁試験体である。板試験片と梁試験体の鋼材は同一のロットのものであり、鋼種はSM400Bである。板試験片の長手方向および梁試験体の長手方向が圧延方向である。鋼材のミルシート値と図-1(a)の板試験片に対する材料試験の結果を表-1に示す。シャルピーの衝撃吸収エネルギーがミルシート値と大きく異なる理由は、ミルシート値の場合、板表面から板厚の1/4

表-1 材料特性

	上降伏点	下降伏点	引張り強さ	一様伸び	破断伸び	衝撃吸収エネルギー	化学成分 (%)				
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(℃) (J)	C	Si	Mn	P	S
ミルシート値	313	---	456	---	29.0	206	0.16	0.19	0.85	0.018	0.004
試験値	286	276	445	20.8	30.4	77					

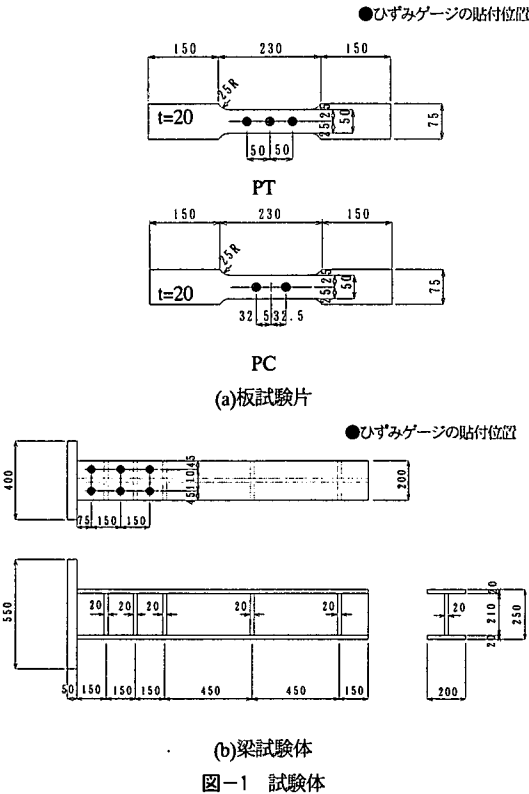


図-1 試験体

の位置に衝撃試験片の中心が置かれているのに対し、4. (1)で述べるように、試験値の場合、板厚中央に衝撃試験片の中心が置かれたからである。一様伸びの求め方は3.で述べる。

(2) 単調塑性ひずみの導入

板試験片を万能試験機で単調に引張ることにより、単調引張りの塑性ひずみ(以後これを単調塑性ひずみと呼ぶ)を板試験片に導入した。板試験片は全部で16枚である。そのうち8枚の板試験片(この試験片をPTと呼ぶ)では、ひずみ時効による降伏点上昇を調べるために、単調塑性ひずみを導入した後、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)を施し、その後引張試験を行った。

残りの8枚の板試験片(この試験片をPCと呼ぶ)では単調塑性ひずみを導入した後、試験片からシャルピーの衝撃試験片を採取した。板試験片へのひずみゲージの貼

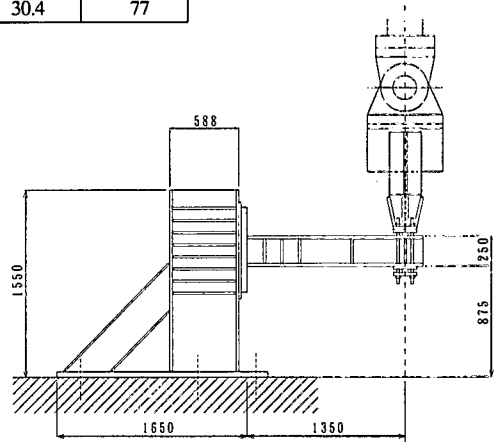


図-2 繰返し塑性ひずみの導入

付位置を図-1(a)に示す。板試験片PTでは試験片の片面にひずみゲージを貼付し、板試験片PCでは試験片の両面にひずみゲージを貼付した。考慮した塑性ひずみの大きさは全ひずみ(=弾性ひずみ+塑性ひずみ)で、板試験片PTとPCのそれぞれで、0, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 15%である。0%の場合、塑性ひずみが導入されていない。

(3) 繰返し塑性ひずみの導入

図-2に示すように、梁試験体の左端を固定し、右端の近くに荷重を与え、梁試験体の左端近傍の上下フランジに繰返し塑性ひずみを導入した。繰返し荷重は疲労試験機で与えた。試験体へのひずみゲージの貼付位置を図-1(b)に示す。ひずみゲージは上下フランジの外側表面に貼付されている。

梁試験体の左端のフランジが降伏するときの荷重  $P_Y$  ( $=205\text{kN}$ )が次式で与えられる。

$$P_Y = \frac{\sigma_Y W}{l} \quad (1)$$

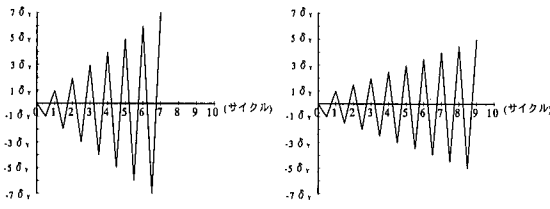
ここに、 $\sigma_Y$ =フランジの降伏応力(上降伏点 286MPa)； $W$ =梁試験体の断面係数( $972,000\text{mm}^3$ )； $l$ =載荷点から梁試験体の左端までの距離(1350mm)。

荷重  $P_Y$ を載荷したとき梁試験体の載荷点直下で測定された鉛直変位を  $\delta_Y$ とすると、この  $\delta_Y$ に基づいて、繰返し荷重を与えた。試験体の右端の鉛直変位と繰返し回数との関係を図-3に示す。梁試験体は全部で4体である。鉛直変位の符号は上向きの変位を-、下向きの変位を+で表している。載荷は全て-から始め、+で終了した。梁試験体AとBは漸増載荷、梁試験体Cは漸減載荷、

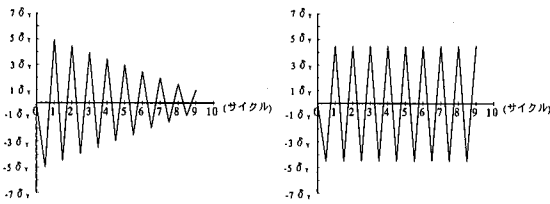
表-2 時効処理を受けた板試験片 PT の引張り試験結果

試験片	塑性ひずみ (真ひずみ) $\epsilon_p$ (%)	降伏応力* $\sigma_Y$ (MPa)	引張りの強さ $\sigma_{Bt}$ (MPa)	一様伸び $\epsilon_{Bt}$ (%)	引張りの強さ (真応力) $\sigma_B$ (MPa)	破断伸び (%)
PT1	0.00	265	449	22.3	549	30.5
PT2	1.65	349	458	21.0	554	29.6
PT3	2.66	387	466	14.3	533	24.5
PT4	4.55	435	481	11.1	534	22.1
PT5	6.18	466	498	8.3	539	19.8
PT6	8.67	501	520	5.2	547	17.5
PT7	10.55	520	532	3.9	553	15.1
PT8	12.91	546	558	2.1	570	14.4

\* : 降伏点

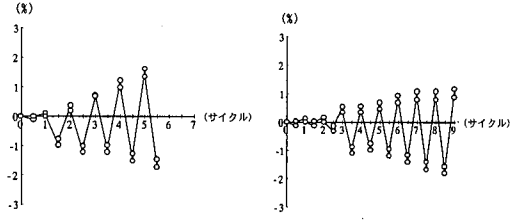


(a) 梁試験体 A (漸増荷) (b) 梁試験体 B (漸増荷)

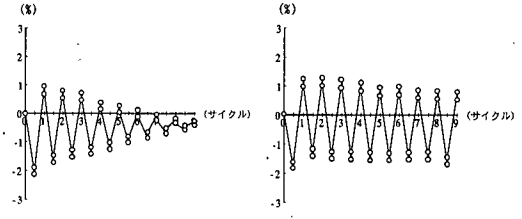


(c) 梁試験体 C (漸減荷) (d) 梁試験体 D (一定荷)

図-3 鉛直変位と繰返し回数の関係



(a) 梁試験体 A (漸増荷) (b) 梁試験体 B (漸増荷)

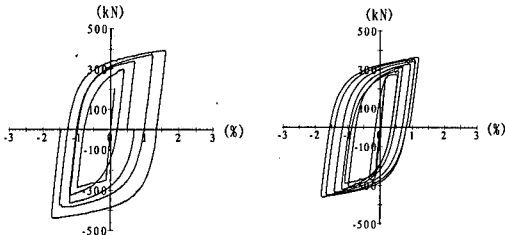


(c) 梁試験体 C (漸減荷) (d) 梁試験体 D (一定荷)

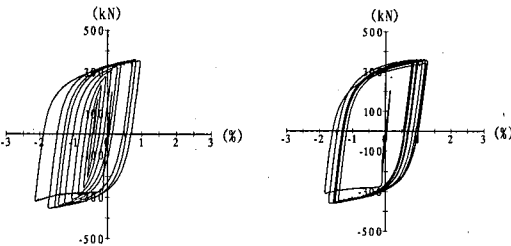
図-5 ひずみと繰返し回数の関係

梁試験体 D は一定荷である。

荷重とひずみの関係を図-4 に示す。この図には、梁試験体の左端に最も近い、上フランジのひずみゲージで測定されたひずみが示してある。さらに、このひずみと繰返し回数の関係を図-5 に示す。図の外側の点は、図-3 に示す所定の鉛直変位が与えられたときのひずみであり、内側の点は、それから荷重が除荷された後に残る塑性ひずみである。



(a) 梁試験体 A (漸増荷) (b) 梁試験体 B (漸増荷)



(c) 梁試験体 C (漸減荷) (d) 梁試験体 D (一定荷)

図-4 荷重とひずみの関係

### 3. 時効処理を受けた板試験片の引張試験

ひずみ時効による降伏点上昇を調べるために、板試験片 PT に単調塑性ひずみを導入した後、時効処理を施し、その後引張り試験を行った。時効処理は 250℃、1 時間である。応力とひずみの関係の一例を図-6 に示す。応力とひずみはそれぞれ真応力と真ひずみで与えられている。真応力と真ひずみは公称応力および公称ひずみと次の関係を持っている。

$$\sigma = \sigma_n (1 + \epsilon_n) \quad (2)$$

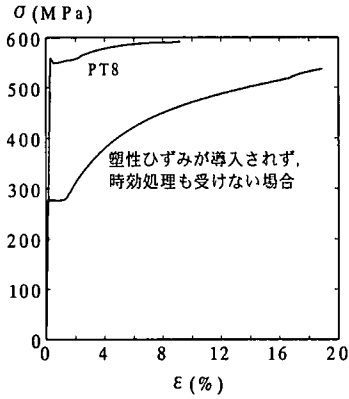


図-6 時効処理後の応力とひずみの関係  
【板試験片 PT8】

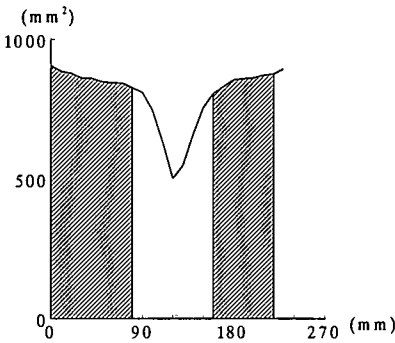


図-7 断面積の変化【板試験片 PT8】

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (3)$$

ここに、 $\sigma$ ＝真応力； $\varepsilon$ ＝真ひずみ； $\sigma_n$ ＝公称応力； $\varepsilon_n$ ＝公称ひずみ。

塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けていない引張り試験片の応力とひずみの関係も図-6 に示してある。塑性ひずみが導入され、時効処理を受けると鋼材の降伏点が上昇することが分かる。

全ての板試験片 PT の引張り試験の結果を表-2 に示す。表の各量は次の通りである。

a) 塑性ひずみ(真ひずみ)  $\varepsilon_p$

これは、単調塑性ひずみを与え、荷重を除荷したとき 3 枚のひずみゲージが示すひずみの平均値を真ひずみで表したものである。

b) 降伏応力  $\sigma_Y$  と引張り強さ  $\sigma_{Bn}$

これらは、単調塑性ひずみが導入された後の板試験片の断面積、すなわち引張り試験を行う前の板試験片の断面積に基づいている。

c) 一様伸び  $\varepsilon_{Bn}$

一様伸び  $\varepsilon_{Bn}$  は引張り強さ  $\sigma_{Bn}$  に対応する塑性ひずみである。3 枚のひずみゲージが示すひずみは、15% を越えるひずみになるとばらつきが大きくなるので、次の方

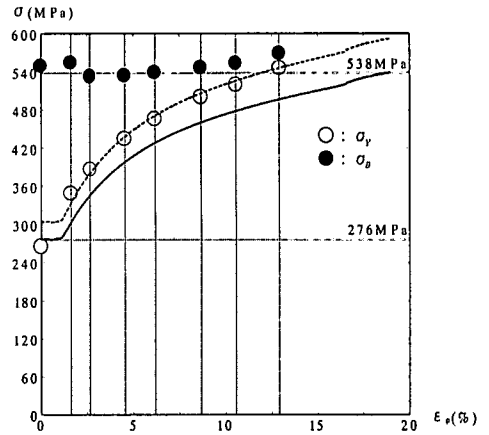


図-8  $\varepsilon_p$  と  $\sigma_Y$  および  $\sigma_B$  の関係

法で  $\varepsilon_{Bn}$  を求めた。引張り試験において、板試験片にくびれが生じると、荷重が除荷される。したがって板試験片が破断したとき、くびれていない部分には引張り強さに対応する塑性ひずみが残されている。塑性変形では体積変化がないので、破断後のくびれていない部分の断面積を測定し、次式により一様伸び  $\varepsilon_{Bn}$  を推定した。

$$\varepsilon_{Bn} = \frac{A_0}{A} - 1 \quad (4)$$

ここに、 $A_0$ ＝引張り試験を行う前の板試験片の断面積； $A$ ＝破断後のくびれていない部分の断面積。

引張り試験を行う前に 200mm の標点を板試験片に設け、破断後、標点間を 1cm ごとに断面積を測定した。測定した断面積の変化を図-7 に示す。ハッチングを施した部分はくびれていない部分であり、断面積の変化が小さい。この部分の断面積の平均値を  $A$  に採用した。

d) 引張り強さ(真応力)  $\sigma_B$

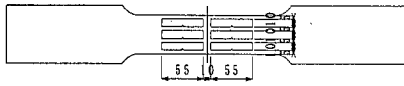
真応力で表された引張り強さ  $\sigma_B$  は次式で計算される。

$$\sigma_B = \sigma_{Bn} (1 + \varepsilon_{Bn}) \quad (5)$$

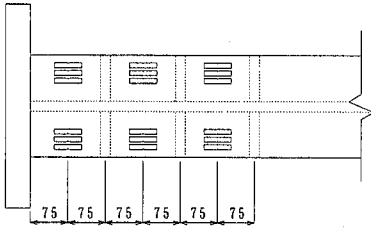
塑性ひずみに比して弾性ひずみが小さいので、この式においては弾性ひずみが考慮されていない。

表-2 の  $\varepsilon_p$  と  $\sigma_Y$  の関係および  $\varepsilon_p$  と  $\sigma_B$  の関係を図-8 に示す。 $\sigma_Y$  が○、 $\sigma_B$  が●で示されている。塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けていない引張り試験片の応力(真応力)と塑性ひずみ(真ひずみ)の関係も示してある。この関係の  $\sigma_Y$  と  $\sigma_B$  はそれぞれ 276MPa と 538MPa である。この応力と塑性ひずみの関係を基本応力-塑性ひずみ関係と呼ぶ。図-8 から次のことが分かる。

- 1) 塑性ひずみが導入されていない板試験片は時効処理による降伏点上昇がない。
- 2) 塑性ひずみが大きくなるに従って、時効処理による降伏点上昇も大きくなる。



(a) 板試験片 PC



(b) 梁試験体

図-9 衝撃試験片の採取位置

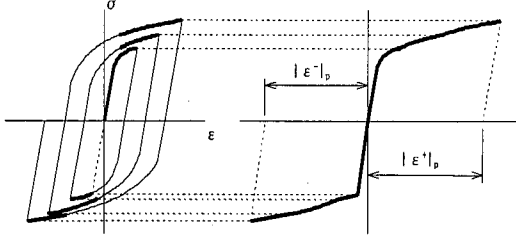


図-10 塑性スケルトンひずみ

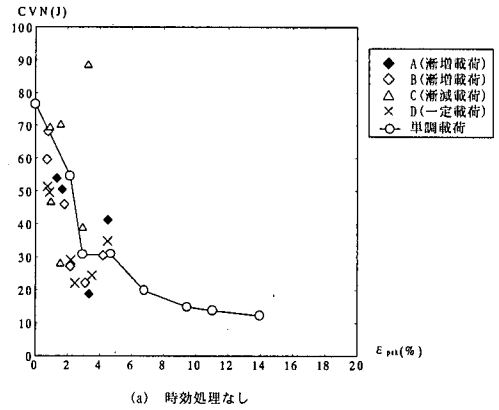
- 3) 引張り強さ(真応力)は、時効処理を受けても、塑性ひずみの大きさにかかわらずほぼ一定である。
- 4) 基本応力-塑性ひずみ関係の応力のみを 1.1 倍した応力と塑性ひずみの関係を点線で示す。時効処理を受けた板試験片の降伏点はこの点線の近傍に分布している。すなわち塑性ひずみが導入され、時効処理を受けた鋼材の降伏点は、導入された塑性ひずみと同じ大きさの塑性ひずみに対応する、基本応力-塑性ひずみ関係の応力の 1.1 倍した応力に等しい。

#### 4. シャルピーの衝撃試験とその結果

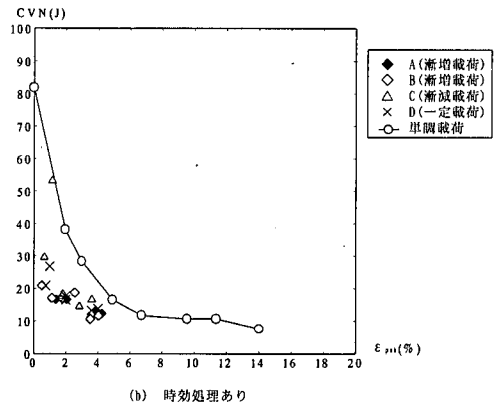
##### (1) シャルピーの衝撃試験

板試験片 PC からの衝撃試験片の採取位置を図-9(a)に示す。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。採取位置はひずみゲージが貼付された位置の 2 箇所であり、1 箇所から 3 個の衝撃試験片を板厚中央から採取し、板厚方向に V ノッチを入れた。図-9(a)において、左側から採取した 3 個の衝撃試験片に対して、250℃、1 時間の時効処理を施した。

梁試験体からの衝撃試験片の採取位置を図-9(b)に示す。採取位置はひずみゲージを貼付した位置で、上下フランジ各々 6 箇所である。1 箇所から 3 個の衝撃試験片を



(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり

図-11 吸収エネルギーと塑性スケルトンひずみの関係

板厚中央から採取した。ひずみゲージの中心に V ノッチが位置するようにノッチを板厚方向に入れた。図-9(b)において、ウェブより下側の上下フランジから採取した衝撃試験片に対して、250℃、1 時間の時効処理を施した。

シャルピーの衝撃試験は 0℃で行った。時効処理を行わなかった場合、塑性ひずみを導入した日からシャルピーの衝撃試験を実施した日までの日数は次のとおりである。板試験片 PC が 49 日、梁試験体 A が 57 日、梁試験体 B, C, D が 22 日である。

##### (2) 吸収エネルギー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<sup>10)~12)</sup>。図-10 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スケルトン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  $\epsilon_{psk}$  は次式で表される。

$$\epsilon_{psk} = \max \left( \sum |\epsilon^+|_p, \sum |\epsilon^-|_p \right) \quad (6)$$

単調塑性ひずみは塑性スケルトンひずみと一致する。

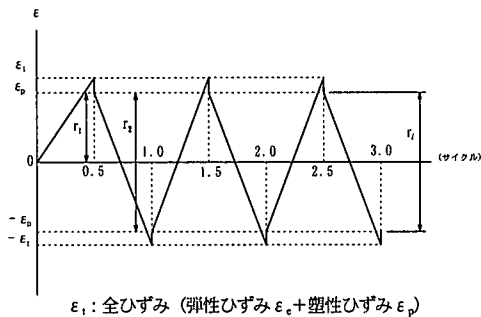
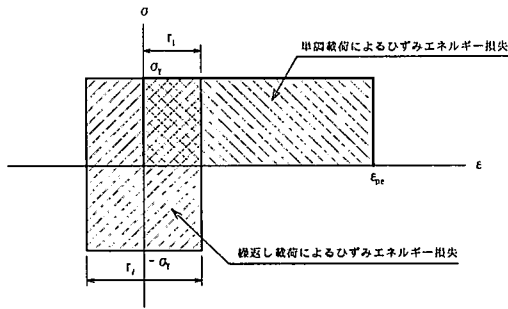


図-12 等価塑性ひずみ

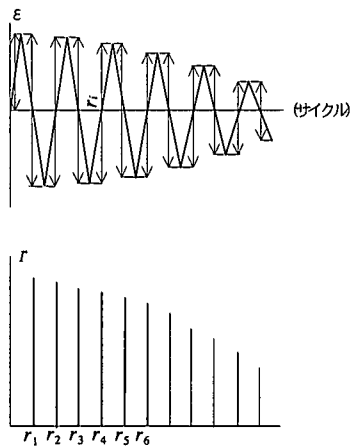
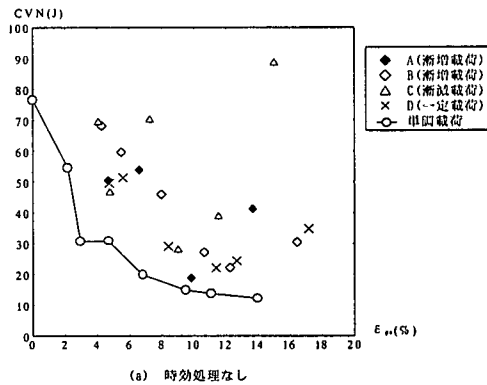


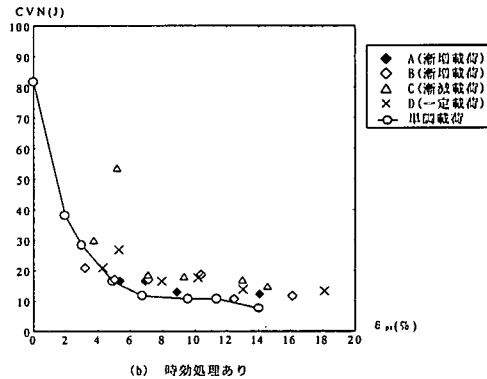
図-13 変動ひずみに対する  $r_i$  の採用方法

吸収エネルギーと塑性スケルトンひずみの関係を図-11に示す。図の各点は、3個の衝撃試験片の吸収エネルギーの平均値である。図-4の荷重とひずみの関係に対して塑性スケルトンひずみを計算し、それを式(3)により真ひずみに変換した値を図-11の横軸にとっている。直線で結ばれた点は、単調塑性ひずみが導入された試験片PCの結果である。図-11から次のことが分かる。

時効処理の有無にかかわらず、漸増荷重、漸減荷重、一定荷重の各荷重パターンに対して吸収エネルギーの分布に偏りが見られない。したがって吸収エネルギーと塑性スケルトンひずみの関係はひずみの履歴パターンに影響されない。



(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり

図-14 吸収エネルギーと等価塑性ひずみの関係

図-11(a)の時効処理なしの場合、繰返し塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーは、単調塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーより全体的に低い所に分布している。図-11(b)の時効処理有りの場合、前者は後者よりかなり低い所に分布している。したがって繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーを、塑性スケルトンひずみを用いて、単調塑性ひずみを受けた鋼材としての吸収エネルギーで推定することは、吸収エネルギーを大きく評価することになり危険である。特に時効処理を受けた場合、塑性スケルトンひずみによる評価は危険である。

### (3) 吸収エネルギーと等価塑性ひずみの関係

著者らは一定のひずみ範囲の繰返しを受けた鋼材のシャルピーの衝撃試験の結果から次の2つの仮説を設け、これらの仮説から等価塑性ひずみを提案した<sup>15)</sup>。

a) 繰返し荷重を受けた鋼材の破壊靱性低下は、繰返し荷重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荷重で受けた鋼材の破壊靱性低下と同じである。

b) 破壊靱性を低下させる塑性ひずみの繰返し回数は3サイクルまでである。

鋼材の応力とひずみの関係に対して、図-12に示すよ

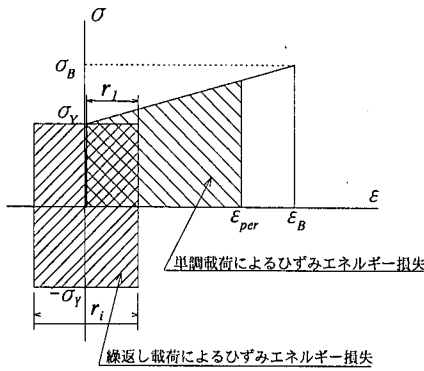


図-15 修正等価塑性ひずみ

うに、弾性ひずみを無視した剛完全塑性体を仮定して、これらの仮説を適用すると、繰返し塑性ひずみ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  $\epsilon_{pe}$  が次式で与えられる。

$$\epsilon_{pe} = \sum_{i=1}^6 r_i \quad (7)$$

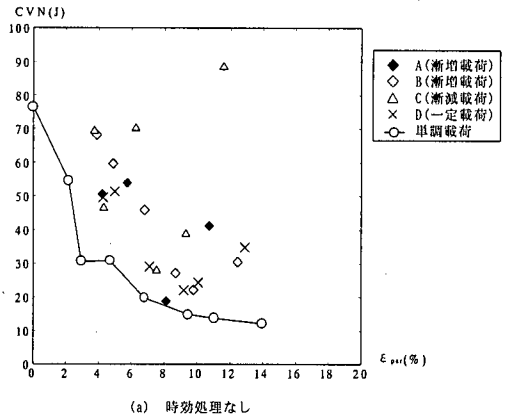
図-12 に示すように、 $r_i$  は繰返し荷荷における 0.5 サイクルごとの塑性ひずみ範囲である。 $\epsilon_{pe}$  を等価塑性ひずみと呼ぶ。3 サイクル未満の場合、最後のサイクルと 3 サイクルとの間の  $r_i$  を 0 とする。単調塑性ひずみは等価塑性ひずみと一致する。

図-5 に示すような変動ひずみが導入された場合、図-13 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(7)に採用する。

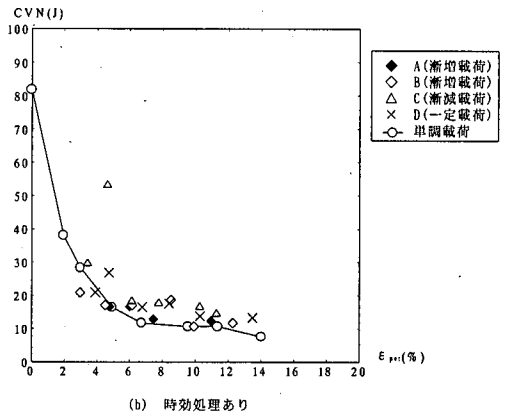
吸収エネルギーと等価塑性ひずみの関係を図-14 に示す。式(7)によって計算した等価塑性ひずみを式(3)により真ひずみに変換した値を図-14 の横軸とっている。図-14 から次のことが分かる。

時効処理の有無にかかわらず、漸増荷荷、漸減荷荷、一定荷荷の各荷荷パターンに対して吸収エネルギーの分布に偏りが見られない。したがって吸収エネルギーと等価塑性ひずみの関係はひずみの履歴パターンに影響されない。

図-14(a)の時効処理なしの場合、繰返し塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーは、単調塑性ひずみが導入された試験片の吸収エネルギーよりかなり高い所に分布している。図-14(b)の時効処理有りの場合、前者の下限値付近に後者が位置している。したがって時効処理を受けなかった場合、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーを、等価塑性ひずみを用いて、単調塑性ひずみを受けた鋼材としての吸収エネルギーで推定することは過度に安全である。時効処理を受けた場合、等価塑性ひずみは、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーの下限値を推定する。



(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり

図-16 吸収エネルギーと修正等価塑性ひずみの関係

#### (4) 修正等価塑性ひずみ

時効処理を受けなかった場合、等価塑性ひずみを用いて吸収エネルギーを評価することは過度に安全であったので、等価塑性ひずみを次のように修正する。

等価塑性ひずみの誘導に際して、鋼材のひずみ硬化を考慮していなかった。そこで図-15 に示すように、単調荷荷に対しては、単調塑性ひずみが大きくなるので、降伏応力  $\sigma_Y$  と引張り強さ  $\sigma_B$  の間を直線で増加するひずみ硬化を考慮する。しかし、繰返し荷荷に対しては、繰返しの塑性ひずみが小さいことと簡単な結果を得るためにひずみ硬化を考慮しない。これらの応力とひずみの関係に対して(3)の a), b)を適用して次式を得る。

$$\sigma_Y \epsilon_{pe} = \sigma_Y \epsilon_{per} + \frac{1}{2} \epsilon_{per} (\sigma_B - \sigma_Y) \frac{\epsilon_{per}}{\epsilon_B} \quad (8)$$

$$\text{ここに、} \epsilon_B = \ln(1 + \epsilon_{Bn}) \quad (9)$$

図-15 から分かるように、 $\epsilon_{per}$  は繰返し塑性ひずみ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である。これを修正等価塑性ひずみと呼ぶ。式(8)を  $\epsilon_{per}$  について解くと、

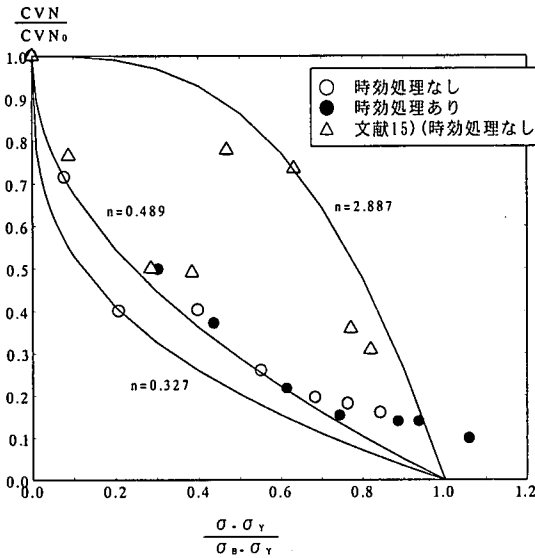


図-17 吸収エネルギーの低下と応力上昇の関係

$$\epsilon_{per} = \epsilon_B \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_B - \sigma_y}} \left( \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_B - \sigma_y} + \frac{2\epsilon_{pe}}{\epsilon_B}} - \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_B - \sigma_y}} \right) \quad (10)$$

吸収エネルギーと修正等価塑性ひずみの関係を図-16に示す。式(10)によって計算した修正等価塑性ひずみを式(3)により真ひずみに変換した値を図-16の横軸にとっている。図-14(a)と16(a)の比較から、時効処理なしの場合、繰返し塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーが、単調塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーに近づいていることが分かる。図-16(b)から、時効処理有りの場合、修正等価塑性ひずみは、依然、繰返し塑性ひずみを受けた試験片の吸収エネルギーの下限値を推定していることが分かる。

## 5. 吸収エネルギーと応力上昇の関係

繰返し塑性ひずみによる吸収エネルギーは、修正等価塑性ひずみによって、単調塑性ひずみによる吸収エネルギーに関連付けることができた。したがって単調塑性ひずみによる鋼材の吸収エネルギーが評価できれば、繰返し塑性ひずみによる鋼材の吸収エネルギーを評価することができる。

板試験片の吸収エネルギーと応力上昇の関係を図-17に示す。図には文献15)で行われた衝撃試験の結果も載せてある。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試験片の吸収エネルギー (CVN)<sub>0</sub>: 塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けなかつた試験片の吸収エネルギー

σ<sub>y</sub>: 塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けなかつた試験片の降伏応力(真応力)

σ<sub>B</sub>: 塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けなかつた

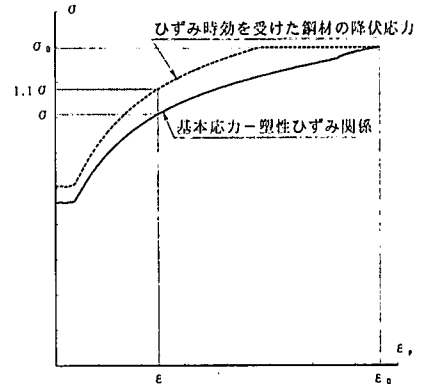


図-18 ひずみ時効を受けた鋼材の降伏応力の推定

試験片の引張り強さ(真応力)

σ: 時効処理を受けなかつた場合、単調塑性ひずみに対応する応力(真応力), 時効処理を受けた場合、単調塑性ひずみに対応する、時効処理後の降伏応力。

ここで、σに対して、時効処理を受けた場合、時効処理後の降伏応力を用いる理由は次のとおりである。図-11, 14, 16に示したように、同一の塑性ひずみに対して、時効処理を受けた場合の衝撃吸収エネルギーが、時効処理を受けなかつた場合の吸収エネルギーより低下する。したがって、時効処理を受けた場合には、時効処理を受けなかつた場合より大きな応力上昇を考える必要があるからである。

シャルピーの衝撃試験片を採取した板試験片 PC に導入した塑性ひずみの大きさが、表-2 あるいは図-8 の結果を与える板試験片 PT に導入した塑性ひずみの大きさと必ずしも一致しなかつた。したがって、時効処理を受けた場合のσは、図-8において降伏応力σ<sub>y</sub>を表す各点を直線で補間あるいは外挿し、板試験片 PC に導入した塑性ひずみの大きさに対応するσ<sub>y</sub>の値をσに用いた。

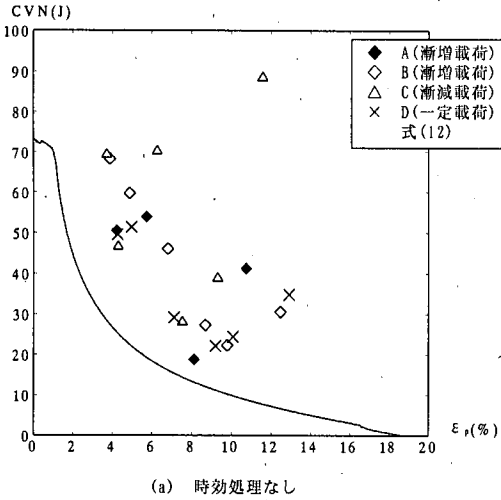
図-17において横軸の値が1を越える所に時効処理ありの結果がある。これは、時効処理を受けたことによって時効処理後の降伏応力が、上記のように定義されたσ<sub>B</sub>の値を越えたからである。

図-17の縦軸は、塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けなかつた試験片の吸収エネルギーに対する、単調塑性ひずみが導入された試験片の吸収エネルギーの比率を表している。横軸は、降伏応力からの応力上昇(σ - σ<sub>y</sub>)が、引張り強さと降伏応力の差(σ<sub>B</sub> - σ<sub>y</sub>)で無次元化されている。図から、時効処理を受けなかつた試験結果と受けた試験結果は同じような分布傾向を示していることが分かる。この分布を次式で近似する。

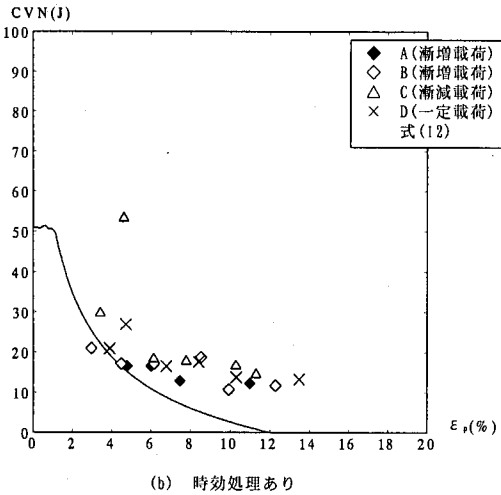
$$\frac{CVN}{(CVN)_0} = 1 - \left( \frac{\sigma - \sigma_y}{\sigma_B - \sigma_y} \right)^n \quad (11)$$

ここに、n=係数。





(a) 時効処理なし



(b) 時効処理あり

図-19 繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーの推定

この式は、 $\sigma = \sigma_Y$ のとき  $CVN = (CVN)_0$  で、 $\sigma = \sigma_B$  のとき  $CVN = 0$  を仮定している。試験結果は  $n = 0.327$  の曲線と  $n = 2.887$  の曲線の間に分布している。試験結果の多くは、 $n = 0.489$  の曲線の近傍に分布している。

## 6. 繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーの推定法

鋼材の基本応力-塑性ひずみ関係（塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けていない鋼材の応力(真応力)と塑性ひずみ(真ひずみ)の関係)が与えられれば、単調塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーが次式で推定される。

$$CVN = (CVN)_0 \left\{ 1 - \left( \frac{\sigma - \sigma_Y}{\sigma_B - \sigma_Y} \right)^{0.489} \right\} \quad (12)$$

この式は、式(11)において  $n$  に 0.489 を用い、 $(CVN)_0$  を

右辺へ持ってきたものである。

ひずみ時効の影響を考慮しない場合、修正等価塑性ひずみに対応する応力を基本応力-塑性ひずみ関係から求め、この応力を式(12)の  $\sigma$  に用いる。ひずみ時効の影響を考慮する場合は、修正等価塑性ひずみに対応する、時効処理後の降伏応力を式(12)の  $\sigma$  に用いる。 $\sigma_Y$  と  $\sigma_B$  は、基本応力-塑性ひずみ関係における、それぞれ降伏応力と引張り強さである。

時効処理を受けた鋼材の降伏応力を、基本応力-塑性ひずみ関係から推定する方法を図-8 をモデル化して図-18 に示す。図に示すように、時効処理を受けた鋼材の降伏応力は、基本応力-塑性ひずみ関係の応力を 1.10 倍した応力で与えられる。ただし降伏応力は引張り強さより大きくならない。また、先に述べたように、引張り強さは時効の有無に関わらず一定である。

本試験で用いた鋼材に対し、修正等価塑性ひずみ  $\epsilon_{per}$  を変数として、上記手法で  $\sigma$ 、 $\sigma_Y$ 、 $\sigma_B$  を求め、式(12)に代入することによって推定された吸収エネルギーと、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の試験結果との比較を図-19 に示す。式(12)によって得られる鋼材の吸収エネルギーは、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の試験結果を安全側に評価していることが分かる。

## 7. 結論

本研究は、繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係を明らかにした。主な結論は次の通りである。

(1) ひずみ時効を受けた鋼材の材料特性は次の通りである。

- a) 塑性ひずみが導入され、時効処理を受けた鋼材の降伏応力は、導入された塑性ひずみと同じ大きさの塑性ひずみに対応する、基本応力-塑性ひずみ関係(塑性ひずみが導入されず、時効処理も受けていない鋼材の応力(真応力)と塑性ひずみ(真ひずみ)の関係)の応力を 1.1 倍した応力に等しい。
- b) 引張り強さ(真応力)は、時効処理を受けても、塑性ひずみの大きさにかかわらずほぼ一定である。

(2) 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ひずみとして、これまで提案された塑性スケルトンひずみと等価塑性ひずみの妥当性を明らかにした。

- a) 塑性スケルトンひずみ(式(6))：吸収エネルギーと塑性スケルトンひずみの関係はひずみの履歴パターンに影響されない。繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーを、塑性スケルトンひずみを用いて、単調塑性ひずみを受けた鋼材としての吸収エネルギーで推定することは危険である。特に時効処理を受けた場合、塑性スケルトンひずみによる評価は危険である。

- b) 等価塑性ひずみ(式(7))：吸収エネルギーと等価塑性ひずみの関係はひずみの履歴パターンに影響されない。時効処理を受けなかった場合、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーを、等価塑性ひずみを用いて、単調塑性ひずみを受けた鋼材としての吸収エネルギーで推定することは過度に安全である。時効処理を受けた場合、等価塑性ひずみは、繰返し塑性ひずみを受けた鋼材の吸収エネルギーの下限値を推定する。
- (3) 前述したように、時効処理を受けなかった場合、等価塑性ひずみによる吸収エネルギーの評価は過度に安全である。これを改善するために修正等価塑性ひずみ(式(10))を提案した。
- (4) 塑性ひずみと時効による応力上昇と吸収エネルギーの関係を表(11)で与えた。
- (5) 基本応力-塑性ひずみ関係を用いて、繰返し塑性ひずみによる吸収エネルギーを評価する手法を6.で提案した。

ここで得られた結論は著者等の限られた試験結果に基づいている。したがってこれらの信頼性と適用範囲を明らかにするために、今後、多くの試験が必要であることを付記する。

#### 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・淡路大震災で被災した鋼製円柱橋脚の破壊特性, 鋼構造論文集, 第5巻第19号, pp.29-37, 1998.
- 8) 三木千壽, 休場裕子, 沖中知雄：阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.45-53, 1999.
- 9) 大倉一郎, 三木千壽, 休場裕子, 沖中知雄：「阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討」への討議・回答, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.237-238, 2000.
- 10) 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.
- 11) (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特性(中間報告書Ⅲ), JWES-IS-9603, 1996年7月.
- 12) (社)日本溶接協会：建築鉄骨での脆性的破壊と鋼材破壊特性セミナー, JWES-IS-9901, pp.55-142, 1999年12月.
- 13) 大倉一郎, 田原 潤, 西岡敏治, 安田 修：繰返し塑性ひずみが鋼材の破壊特性に与える影響, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, pp.1-11, 1996.
- 14) 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.
- 15) 大倉一郎, 田原 潤, 安田 修, 広野正彦：繰返し塑性ひずみによる鋼材の破壊特性低下を評価するためのモデル, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.347-356, 1999.

(2000. 9. 18 受付)

## RELATION BETWEEN CYCLIC PLASTIC STRAINS AND DECREASE IN FRACTURE TOUGHNESS OF STRUCTURAL STEELS

Ichiro OKURA, Masaru OHNO and Yasunori YAMADA

The purpose of this study is to present the relation between cyclic plastic strains and the decrease in the fracture toughness of structural steels. The fracture toughness of structural steels subjected to cyclic plastic strains is investigated by Charpy V-notch impact tests. It is shown which is more suitable, the plastic skeleton-strain or the equivalent plastic strain, for relating the decrease in the fracture toughness due to cyclic plastic strain to that due to monotonic plastic strain. The relationship between the decrease in the fracture toughness and the increase in the stress due to plastic strain and aging is established. A way to assess the decrease in the fracture toughness of structural steels due to cyclic plastic strains is proposed.