

# 鋼材の応力～ひずみ関係が圧縮力を受ける平板の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響に関する基礎的検討

河上 守\*・増田 陳紀\*\*・白旗 弘実\*\*\*

\*正会員 修(工) 長大 構造事業部 (〒550-0013 大阪市西区新町 2-20-6)(研究当時 武蔵工業大学大学院学生)

\*\*フェロー 工博 武蔵工業大学 土木工学科 教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

\*\*\*正会員 修(工) 武蔵工業大学 土木工学科 助手 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

鋼構造物の耐震性能に影響を及ぼす要因は多数存在するが、その一つに鋼材の応力～ひずみ関係がある。鋼材の応力～ひずみ関係の違いが耐荷力・変形能などの耐震性能に及ぼす影響について定性的な検討が行われているが、定量的な検討が行われるほど十分なデータはない。本研究は、定量的評価のための第一段階として、平板を解析対象とし、鋼材の応力～ひずみ関係をバイリニアモデルにモデル化して、一定のヤング率、降伏応力の下でひずみ硬化係数の違いが、耐震性能の指標の一つである履歴吸収エネルギーに及ぼす影響を検討した。

**Key Words :** bi-linear model, strain-hardening factor, energy absorption, plate

## 1. はじめに

近年、鋼構造物を対象とした耐震性能・耐震設計に関する研究<sup>1),2)</sup>が数多く行われている。さらに、阪神大震災において、鋼構造物としては特に橋脚に座屈、亀裂、破断などの現象が発生し多大な被害を受けたため、鋼製橋脚の耐震性能、破壊のメカニズムに関する研究<sup>3)</sup>が実験・数値解析の両面から以前にも増して数多く行われている。耐震性能の評価は耐荷力、変形能、吸収エネルギーなどの観点から検討が行われており、道路橋示方書・V耐震設計編<sup>4)</sup>では、コンクリートを充填した鋼製橋脚に対しては地震時保有水平耐力、許容塑性率が規定されている。一方でコンクリートを充填しない鋼製橋脚に対して、地震時の応答や破壊のメカニズムなどが十分には解明されていないため、地震時保有水平耐力、許容塑性率は規定されておらず、脆性的な破壊を防ぐ構造細目のみが規定されている。鋼製橋脚の耐震性能に及ぼす因子としては①構造形式、②柱の細長比、③構成板要素の幅厚比もしくは径厚比、④荷重条件、⑤応力～ひずみ関係に代表される鋼種などがあげられる。

限界状態設計法へ移行しつつある現在、塑性域における変形能が耐震性能評価の上で重要な指標となる。また、近年においては、製鋼・圧延技術の進歩により、鋼材の応力～ひずみ関係をある程度制御できるようになってきている。そのため、降伏後における鋼材の応力～ひずみ特性と耐震性能との関係を検討することにより、耐震上有利である鋼材をある程度規定することができると考えられる。しかし、鋼材の応力～ひずみ関係の違いが耐震性能にどのような影響を及ぼすかの検討は少ないのが現状であり、以下にあげるような研究が行われている程度である。森脇<sup>5)</sup>、奈良<sup>6)</sup>は、無補剛圧縮板および補剛圧縮板を対象とし、塑性域の応力～ひずみ関係を指数関数でモデル化し、降伏比、ひずみ硬化開始ひずみ、一様伸び、ひずみ硬化係数、ひずみ

硬化指数をパラメータとして、極限強度と塑性変形能との関係を検討した。その結果、降伏比が低く、加工硬化係数が高いほうが圧縮補剛板の極限強度と変形能の向上の観点から望ましいという結論を得ている。富永<sup>7)</sup>は、降伏比の異なる各種鋼材を用い、同一形状の片持ち柱の鋼製橋脚シリーズを設定し、鋼種の違いによる影響を検討している。山尾・崎元<sup>8),9)</sup>は、高張力鋼の降伏比などの塑性域の形状をパラメータとし、圧縮板、溶接H形鋼短柱を解析対象として、耐荷力と変形能の評価を行っている。

これらの研究は、塑性域の応力～ひずみ関係の違いが、極限強度、変形能、吸収エネルギーなどの耐震性能の指標にどの程度影響を及ぼすかを検討しているが、定量的な評価を行うには、更にデータの蓄積が必要である。鋼材の応力～ひずみ関係には、降伏応力、降伏棚、ひずみ硬化などのパラメータがあり、種々の組み合わせが考えられる。そのため、これらの影響を個々に判断するためにパラメータ一つ一つに着目した検討が必要である。

鋼製橋脚の耐震性能を評価するためには、その部材の構成要素である板要素や円筒パネル要素の耐震性能が、鋼材の応力～ひずみ関係の違いによってどのように変化するかを把握しておく必要がある。本研究では、鋼製橋脚の耐震性能に及ぼす鋼材の影響を評価する基礎的な検討として、矩形断面橋脚のパネルの一部分を取り出した平板に解析対象を限定して、数値解析的に検討する。ここでは鋼材の応力～ひずみ関係を単純なバイリニアにモデル化する。本研究の目的は、鋼材の応力～ひずみ関係を単純なバイリニアにモデル化し、一定のヤング率、降伏応力の下で、ひずみ硬化係数が平板の吸収エネルギーへ及ぼす影響を検討することである。また、平板の形状に関するパラメータとしては幅厚比を考慮する。吸収エネルギーは、地震によるエネルギーを構造物がどれだけ吸収できるかを表しており、構造物の挙動が反映されるため、耐震性能の指標

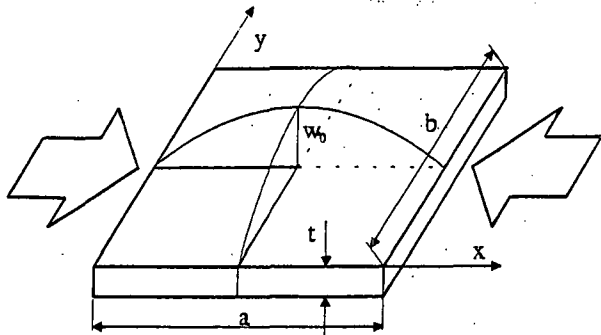


図-1 解析対象

表-1 ひずみ硬化係数

		ひずみ硬化係数 $E_t/E$ (%)			
ひずみ硬化係数		0	0.25	1	2
		3	15	70	100

の一つとされている。まず、吸収エネルギーを求めるため、荷重条件を単調圧縮載荷と繰り返し載荷の二通りに限定して検討する。ここでは初期たわみを限定し、残留応力は考慮していない。数値解析には汎用コード ABAQUS<sup>10)</sup>を用いている。

## 2. 単調圧縮載荷を受ける平板としての検討

ここでは、単調圧縮載荷を受ける平板に対して、ひずみ硬化係数の違いが吸収エネルギーに及ぼす影響についての検討を行う。

### 2.1 解析条件

#### (1) 解析対象およびそのモデル化

解析対象を図-1に示す正方形板とし、対称性を考慮して、1/4モデルを使用する。境界条件は周辺単純支持とし、板の初期たわみを、 $x$  軸  $y$  軸方向ともに載荷辺の長さ  $b$  の  $1/500$  が最大になるよう1半波として式(1)で与える。一辺の長さ  $a=b=67.5$  cmとし、載荷辺の長さ  $b$  を一定にし板厚を変化させて、幅厚比パラメータ  $R$  を  $R=0.4\sim 1.5$  の間で変化させる。幅厚比パラメータ  $R$  は式(2)で与えられ、座屈係数を  $k=4$  とする。使用する要素<sup>10)</sup>は1節点6自由度、1要素4節点の曲面シェル要素、板厚方向の積分点を11、平板の1/4部分の要素分割を  $20\times 20$  分割としている。

初期たわみ分布

$$W_0 = \frac{b}{500} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \quad (1)$$

幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (2)$$

#### (2) 鋼材の応力～ひずみ関係のモデル化

鋼材の応力～ひずみ関係を図-2に示すヤング率、降伏応力が一定のバイリニアモデルとし、ひずみ硬化係

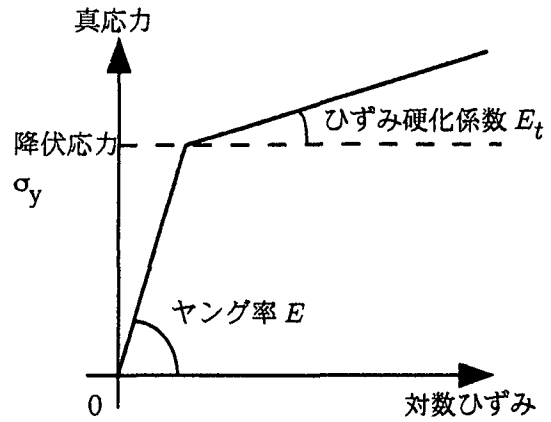


図-2 応力～ひずみ関係のモデル化

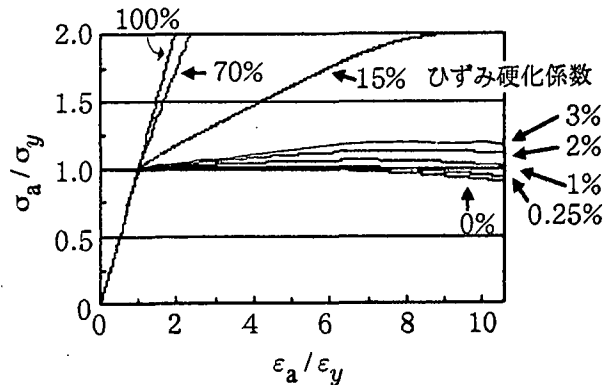


図-3 平均応力～平均ひずみ関係(幅厚比パラメータ  $R=0.4$ )

数  $E_t$  をヤング率の0%から100%の間で変化させる。検討したひずみ硬化係数の一覧を表-1に示す。バイリニアモデルのひずみ硬化係数は、図-2に示す真応力～対数ひずみ関係においてモデル化する。ヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  および降伏応力  $\sigma_y$  はそれぞれ  $E=206$  GPa ( $2.1\times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\nu = 0.3$ 、 $\sigma_y=235$  MPa ( $2400$  kgf/cm<sup>2</sup>) とする。

#### (3) 荷重条件—単調圧縮載荷

図-1における平板の載荷辺の  $x$  軸方向面内変位を一樣に増加させる。制御方法は Riks 法である。

### 2.2 単調圧縮載荷時の吸収エネルギー

単調圧縮載荷時の平板の平均応力～平均ひずみ関係を求める。ただし、平均応力  $\sigma_a$  と平均ひずみ  $\epsilon_a$  はそれぞれ式(3)、式(4)で定義する。

$$\sigma_a = \frac{P}{bt} \quad (3)$$

$$\epsilon_a = \frac{\Delta l}{b} \quad (4)$$

ここで、 $P$  は載荷辺の反力、 $b$  は板の幅、 $t$  は板厚、 $\Delta l$  は板の載荷辺の  $x$  軸方向の面内変位量である。 $P$  および  $\Delta l$  は、1/4 対称部分を対象としているので、計算結果から得られる値を2倍している。幅厚比パラメータ  $R=0.4$  に対する平板の平均応力～平均ひずみ関係を図-3に示す。ここで平均応力、平均ひずみは圧縮を正とし、それぞれ降伏応力、降伏ひずみで無次元化して

表-2 吸収エネルギーが2を超える幅厚比パラメータ

ひずみ硬化係数 (%)	0	0.25	1	2	3	15
最大平均応力まで	0.5	0.57	0.6	0.65	0.67	0.76
最大平均応力の95%まで	0.75	0.75	0.77	0.78	0.78	-

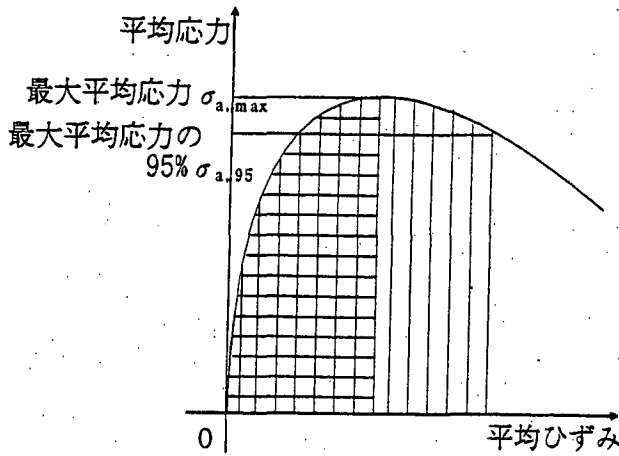


図-4 吸収エネルギーを求める範囲

ある。各幅厚比パラメータにおける平均応力～平均ひずみ関係から、吸収エネルギーを求める。吸収エネルギー  $E$  は式(5)で求められ、弾性エネルギーとして蓄えられているエネルギーも含めて、図-4に示す平均応力～平均ひずみ関係の面積から求める。

$$E = \int \sigma_a d\varepsilon_a \quad (5)$$

橋脚が地震時などに繰り返し荷重を受ける場合は、力の加わる向きが変わるため最大平均応力を超えた後でも、必ずしも不安定な状態となるわけではない。最大平均応力を超えた後の状態も考慮し、吸収エネルギーを求める平均応力～平均ひずみ関係の面積の範囲を以下の二通りについて考える 7),11),12)。

①平均応力が最大になるまでの面積

②平均応力が最大を超えてから最大平均応力の95%になるまでの面積

平均応力～平均ひずみ関係から求められる吸収エネルギーを式(6)で無次元化する。ここで  $\sigma_y$  は降伏応力、 $\varepsilon_y$  は降伏ひずみである。

$$E_e = \frac{\sigma_y \varepsilon_y}{2} \quad (6)$$

吸収エネルギー  $E/E_e$  と各幅厚比パラメータ  $R$  の関係を図-5、図-6に示す。図-5は吸収エネルギーの定義として最大平均応力までの面積、図-6は最大平均応力の95%までの面積である。

### 2.3 考察

本研究で考慮しているパラメータは、幅厚比とひずみ硬化係数である。ここでは、この2つのパラメータが吸収エネルギーに及ぼす影響について考察する。

#### (1) 幅厚比パラメータが吸収エネルギーに及ぼす影響

図-5、図-6から、それぞれのひずみ硬化係数に対して、吸収エネルギーが急激に変化する幅厚比パラメータ

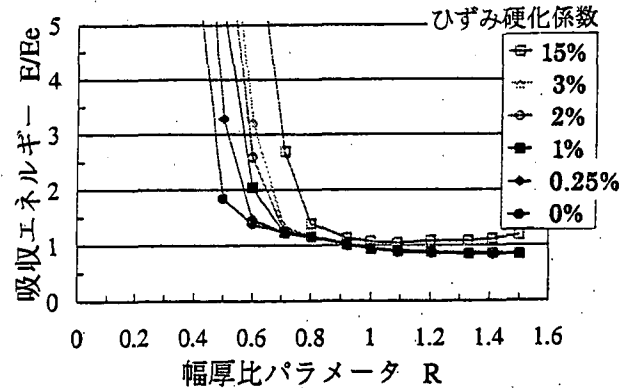


図-5 吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係(最大)

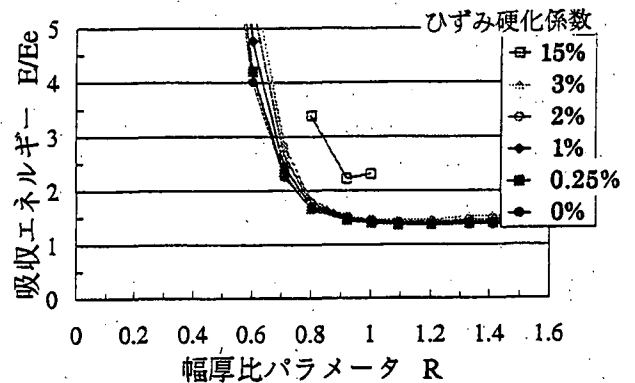


図-6 吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係(95%)

が違ってくる。図-5においては、ひずみ硬化係数0%～15%の範囲では、同一の幅厚比パラメータで吸収エネルギーが0.3ほど異なる。一方、図-5、図-6の両方で幅厚比パラメータ  $R$  が0.7～0.8の間において、ひずみ硬化係数0%～3%の範囲すべてにおいて吸収エネルギーが急激に変化している。吸収エネルギーが2を超えると吸収エネルギーの変化が大きくなる。この時の幅厚比パラメータを吸収エネルギーに関する板の限界幅厚比パラメータと考える。それぞれのひずみ硬化係数に対する限界幅厚比パラメータを表-2に示す。吸収エネルギーを評価する際に最大平均応力まで考慮する定義においては、ひずみ硬化係数0%と1%では、限界幅厚比パラメータが0.1違うことが分かる。吸収エネルギーを評価する際に最大平均応力低下後、最大平均応力の95%までを考慮するという定義においては、ひずみ硬化係数3%以下の範囲では、限界幅厚比パラメータにして0.03しか差がないことが分かる。よって、吸収エネルギーについての「最大平均応力の95%まで」の定義は、「最大平均応力まで」の定義よりはひずみ硬化係数の変化の影響を受けないと言える。また、ひずみ硬化係数の影響は急激に変化する幅厚比パラメータが違う以外はグラフの形状が似ているため、それぞれを平行移動したと考えることができる。任意のひずみ硬化係数の値に対しても、吸収エネルギーが2を超え

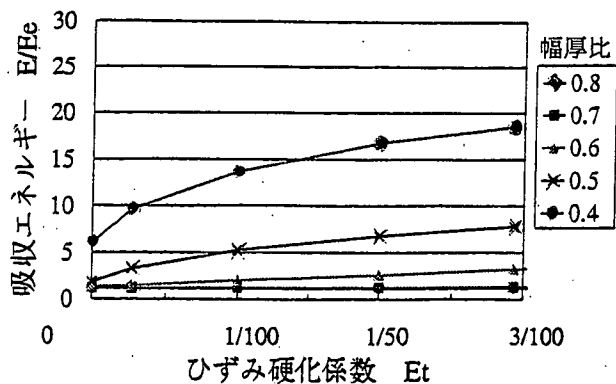


図-7 吸収エネルギー～ひずみ硬化係数関係(最大)

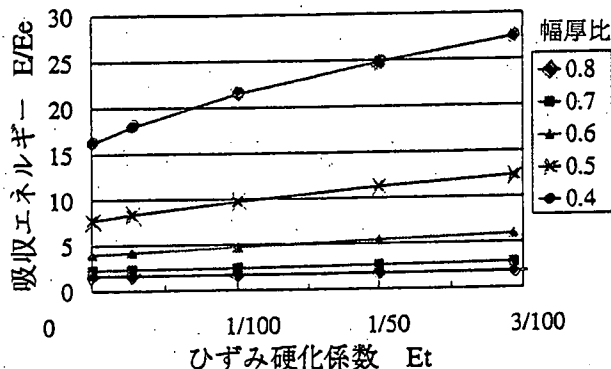


図-8 吸収エネルギー～ひずみ硬化係数関係(95%)

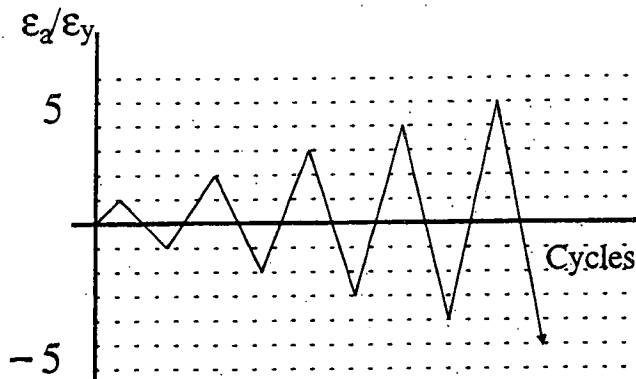


図-9 荷重パターン

る値を図-5、図-6 から補間することによって、吸収エネルギーが変化する限界幅厚比パラメータを与えることが可能であると考えられる。

(2) ひずみ硬化係数が吸収エネルギーに及ぼす影響

図-5、図-6 から平板の吸収エネルギーに及ぼすひずみ硬化係数の影響と平板の幅厚比パラメータの影響とでは、後者のほうが大きいことがわかる。幅厚比パラメータ  $R=0.8$  より大きい範囲では、ひずみ硬化係数の影響は小さく、 $R=0.8$  より小さい範囲で影響を及ぼす。そのため、幅厚比パラメータ  $R$  が  $0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$  のときの吸収エネルギー  $E/E_c$  とひずみ硬化係数  $E_t$  の関係を図-7、図-8 に示す。図-7 は吸収エネルギーの定義として最大平均応力までの面積、図-8 は最大平均応力の 95% までの面積を採用した場合の結果である。図-7 において、ひずみ硬化係数  $0 \sim 1/34$  の範囲においては、幅厚比パラメータ  $R=0.4, 0.5, 0.6$  では、吸収エネルギーはほぼ直線的に増加している。ここでは、降伏比の影響を考慮していないが、吸収エネルギーが大

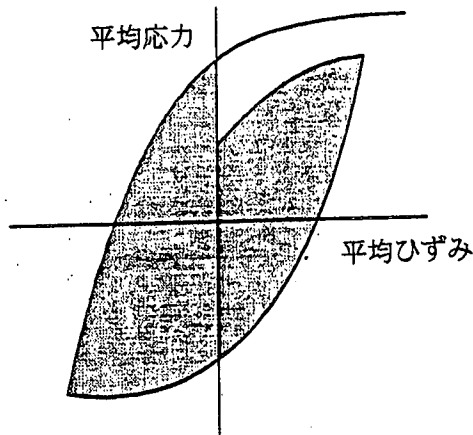


図-11 1ループの履歴吸収エネルギー

きいと耐震性能が高いとすると、耐震性能が高いバイリニアモデルは、ひずみ硬化係数が大きければ大きい程よい結果となる。また、幅厚比が小さいほどひずみ硬化係数の影響を受けるといえる。これは奈良ら<sup>6)</sup>の結果と一致する。

3. 繰り返し荷重を受ける平板としての検討

次に荷重条件として漸増の繰り返し荷重を受ける平板に対して、ひずみ硬化係数の違いが吸収エネルギーに及ぼす影響について検討を行う。

3.1 解析条件

(1) 平板の諸条件

解析対象は図-1 に示す正方形板であり、平板の諸条件および鋼材の応力～ひずみ関係のモデル化は、第 2 章の単調圧縮荷重時の条件と同様である。鋼材の応力～ひずみ関係の硬化則として、移動硬化則と等方硬化則の二種類について検討を行う。

(2) 繰り返し荷重

平板の荷重辺の  $x$  軸方向内変位を一様に増加させる荷重条件を考える。制御方法は変位制御、増分は自動増分機能を使用する。荷重の荷重パターンを図-9 に示す漸増の繰り返し荷重とし、平均ひずみ 0 から始まって→圧縮→平均ひずみ 0 →引張→平均ひずみ 0 と戻るまでを 1 サイクルとする。また降伏変位を  $\delta_y$  とすると  $\alpha$  サイクル目は、 $\alpha\delta_y$  (平均ひずみ  $\epsilon_a/\epsilon_y = \alpha$ ) の変位振幅で荷重しているサイクルであるため、以下、平均ひずみ  $\epsilon_a/\epsilon_y = \alpha$  を振幅  $\alpha\delta_y$  とする。例えば、5 サイクル目は最大平均ひずみ  $\epsilon_a/\epsilon_y = 5$  の状態であり、 $5\delta_y$  の変位振幅で荷重されている状態である。

3.2 繰り返し荷重時の履歴吸収エネルギー

繰り返し荷重時の平均応力～平均ひずみ関係を求める。幅厚比パラメータ  $R=0.4$ 、1% のひずみ硬化係数に対する平板の平均応力～平均ひずみ関係を図-10 に示す。ここで平均応力、平均ひずみは圧縮を正とし、それぞれ降伏応力、降伏ひずみで無次元化してある。各幅厚比パラメータに対する平均応力～平均ひずみ関係から、履歴吸収エネルギーを求める。繰り返し荷重を受ける構造物の履歴吸収エネルギーは、平均応力～平均ひずみの囲む面積として求められる。本研究では、図-9 の

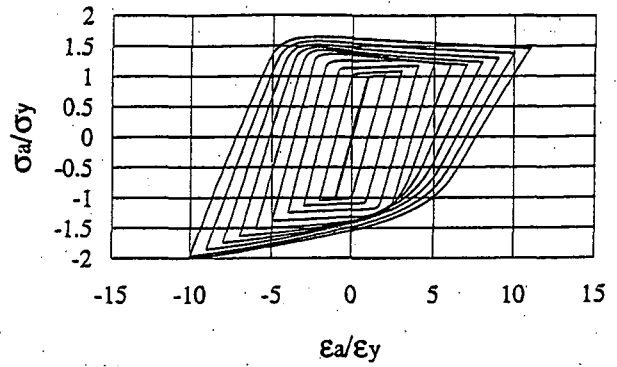
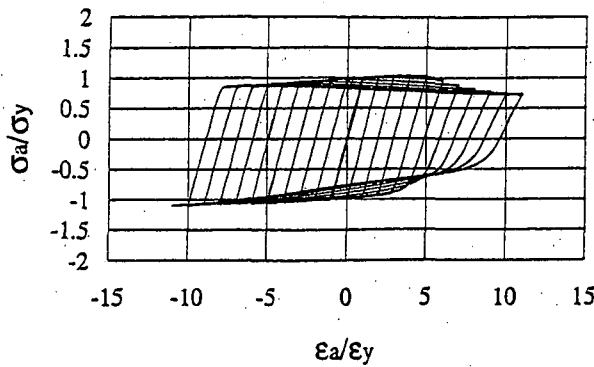


図-10 平均応力～平均ひずみ関係(幅厚比パラメータ  $R=0.4$ , 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

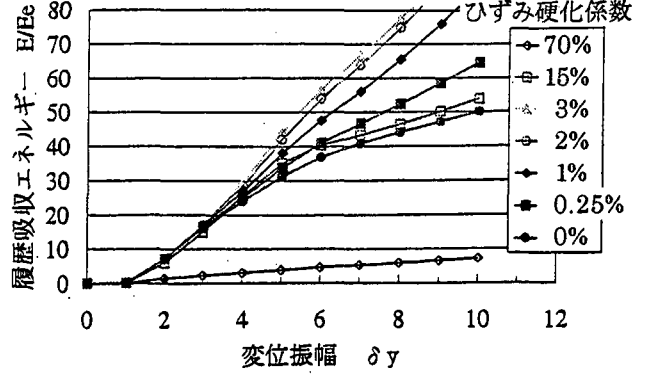
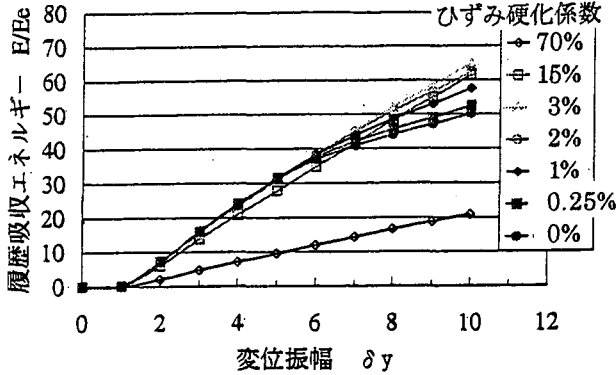


図-12 繰り返し載荷が履歴吸収エネルギーに及ぼす影響(幅厚比パラメータ  $R=0.4$ , 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

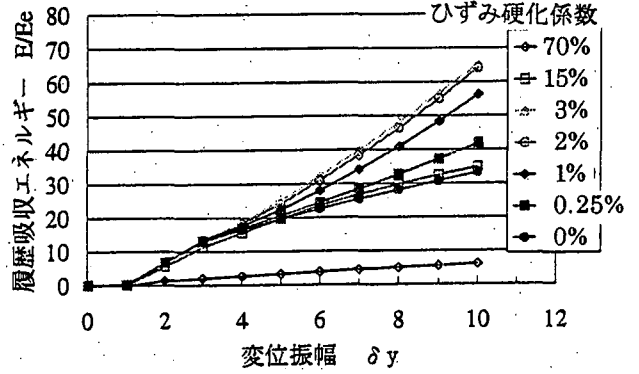
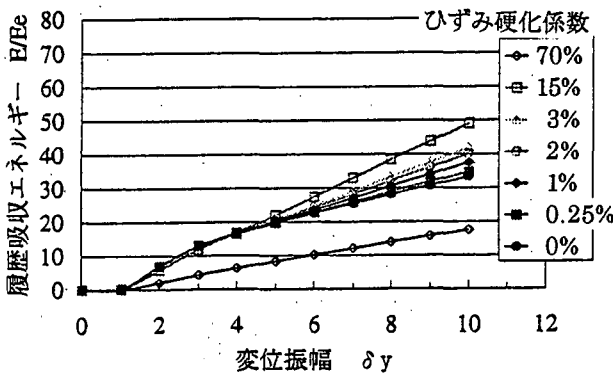


図-13 繰り返し載荷が履歴吸収エネルギーに及ぼす影響(幅厚比パラメータ  $R=0.4$ , 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

漸増の繰り返し載荷を変位制御で行っているため、載荷を始めた点の平均応力と1サイクル後の点の平均応力が一致しない。そこで本研究では、図-11に示す面積を1サイクルの履歴吸収エネルギーとして各サイクルごとに求める。幅厚比パラメータ  $R=0.4$ ,  $0.71$  に対する各サイクルごとの履歴吸収エネルギーを図-12, 図-13に示す。図-12, 図-13の縦軸は無次元化した履歴吸収エネルギー、横軸は各サイクルでの変位振幅である。なお、図-12, 図-13の左側は移動硬化則、右側は等方硬化則である。

### 3.3 考察

#### (1) 変位振幅が履歴吸収エネルギーに及ぼす影響

図-12, 図-13における移動硬化則を採用した場合の結果について考察する。ひずみ硬化係数が70%, 15%の場合は、塑性化による履歴吸収エネルギーは線形的に増加する。一方、ひずみ硬化係数が3%以下の範囲では、幅厚比パラメータ  $R=0.4$  における履歴吸収エネルギー

は、変位振幅  $7\delta_y$  から履歴吸収エネルギーの増加の割合が低下し始めているのが図-12から分かる。そして、幅厚比パラメータ  $R$  が  $0.7$  になると、履歴吸収エネルギーの増加の割合が低下し始める変位振幅が  $7\delta_y$ ,  $6\delta_y$ ,  $5\delta_y$  と小さくなる。逆に、変位振幅が  $4\delta_y$  まででは、ひずみ硬化係数が3%以下の範囲に対しては、ひずみ硬化係数が履歴吸収エネルギー量に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

等方硬化則においては、図-12, 図-13から、ひずみ硬化係数が70%の場合は、移動硬化則と同様に塑性化による履歴吸収エネルギーはほぼ線形的に増加する。一方、ひずみ硬化係数が0%~15%の範囲では、変位振幅が  $4\delta_y$  から、ひずみ硬化係数が履歴吸収エネルギーにおよぼす影響が大きく現れている。逆に、等方硬化則においては変位振幅  $3\delta_y$  まででは、ひずみ硬化係数が0%~15%の範囲内の変化に対しては、履歴吸収エネルギーに及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

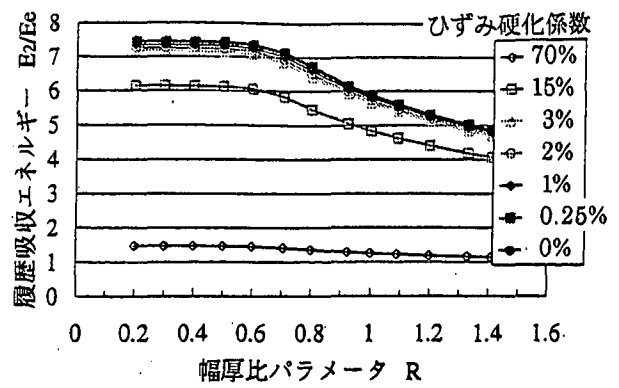
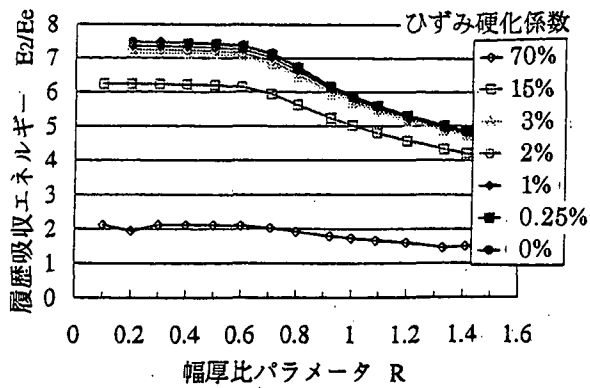


図-14 履歴吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係 (変位振幅  $2\delta_y$  までの合計, 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

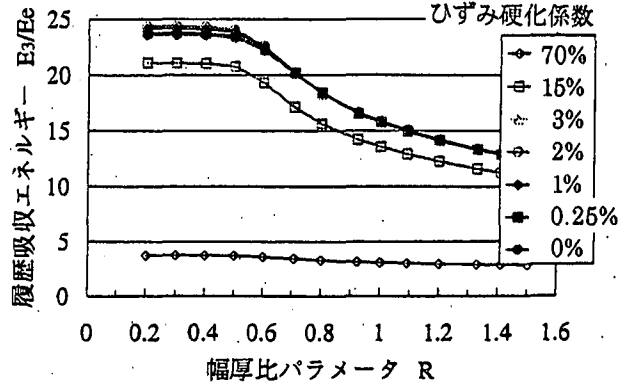
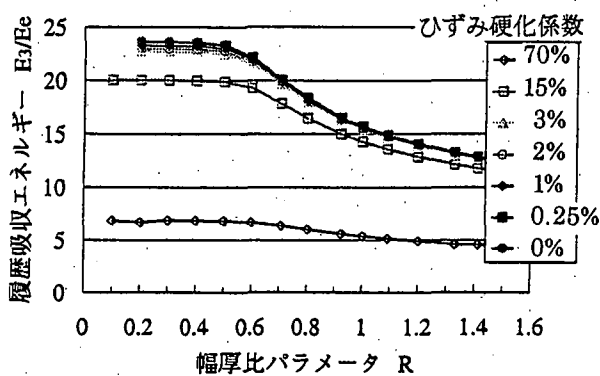


図-15 履歴吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係 (変位振幅  $3\delta_y$  までの合計, 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

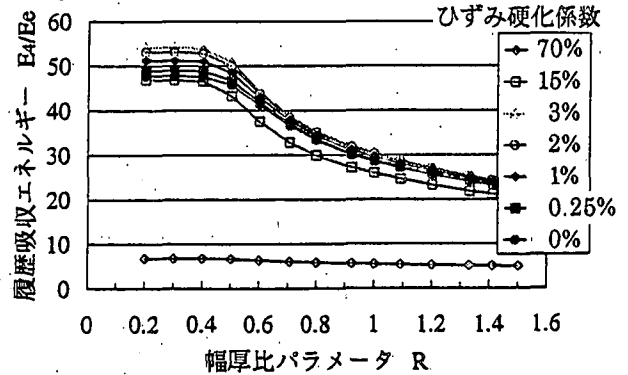
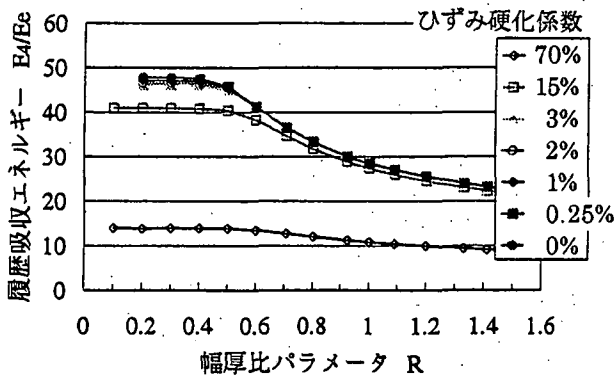


図-16 履歴吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係 (変位振幅  $4\delta_y$  までの合計, 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

(2) 幅厚比パラメータが履歴吸収エネルギーに及ぼす影響

各サイクルごとにそれまで吸収したエネルギーの合計と幅厚比パラメータの関係を図-14, 図-15, 図-16, 図-17, 図-18 に示す。図-14 は, 変位振幅  $2\delta_y$  まで荷重された 2 サイクルまでの合計, 同様に図-15, 図-16, 図-17 図-18 はそれぞれ変位振幅  $3\delta_y$ ,  $4\delta_y$ ,  $5\delta_y$ ,  $6\delta_y$  まで荷重された時の履歴吸収エネルギーの合計を表している。

まず移動硬化則の場合について考察する。それぞれ図-14, 図-15, 図-16 の変位振幅  $2\delta_y$ ,  $3\delta_y$ ,  $4\delta_y$  までの履歴吸収エネルギーの合計は, 幅厚比パラメータ  $R=0.6$  より大きい範囲では, ひずみ硬化係数が 3% 以下の方が, ひずみ硬化係数 15% より大きく, 図-17 の変位振幅  $5\delta_y$  までの履歴吸収エネルギーの合計は, ほぼ等しくなる。そして, 図-18 の変位振幅  $6\delta_y$  までの履歴吸収エネルギーの合計は, ひずみ硬化係数が 3% 以下の範囲の方が, ひずみ硬化係数 15% より小さくなる。これは, 15% のひずみ硬化係数では弾性体に似た挙動を示し, 塑性化による吸収エネルギーが一定であるためで

ある。変位制御の漸増の繰り返し荷重では, ひずみ硬化係数が大きい方が, 履歴吸収エネルギーが大きくなることは必ずしも限らない。

図-16 から, 変位振幅  $4\delta_y$  が与えられる 4 サイクルまでの履歴吸収エネルギーの合計は, ひずみ硬化係数 3% 以下においてはほぼ等しい。そして, 図-17 の変位振幅  $5\delta_y$  が与えられるサイクルからは, ひずみ硬化係数が小さいと履歴吸収エネルギーの増加の割合が減少するために, 履歴吸収エネルギーの合計は, ひずみ硬化係数の影響が現れる。

等方硬化則の場合については図-15 から, 変位振幅  $3\delta_y$  を荷重されるサイクルまでの履歴吸収エネルギーの合計は, ひずみ硬化係数 3% 以下においてはほぼ等しい。そして, 図-16 の変位振幅  $4\delta_y$  を荷重されるサイクルからは, 履歴吸収エネルギーの合計には, ひずみ硬化係数の影響が現れる。

移動硬化則, 等方硬化則ともにひずみ硬化係数 0~1/34 の範囲に限れば, それぞれ変位振幅  $4\delta_y$ ,  $3\delta_y$  を荷重されたサイクルまでは, 履歴吸収エネルギーに及ぼ

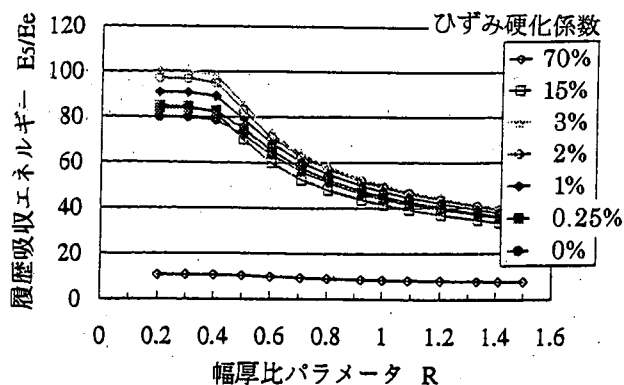
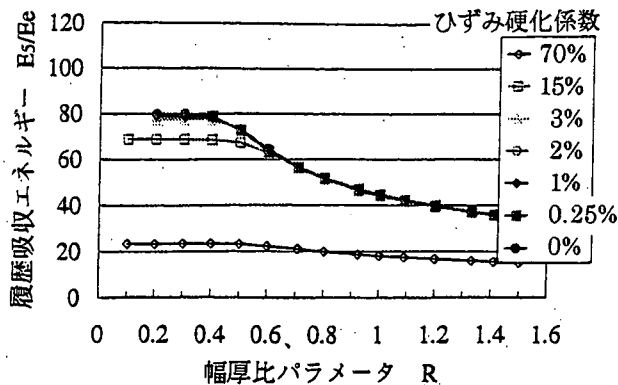


図-17 履歴吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係 (変位振幅  $5\delta_y$  までの合計, 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

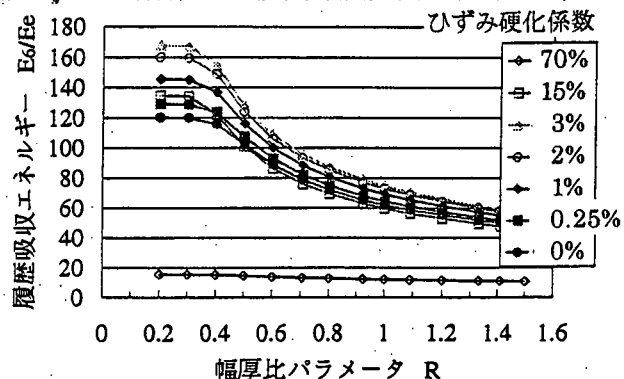
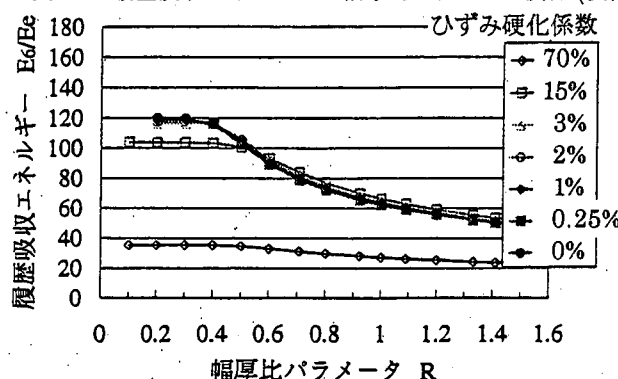


図-18 履歴吸収エネルギー～幅厚比パラメータ関係 (変位振幅  $6\delta_y$  までの合計, 左側:移動硬化則, 右側:等方硬化則)

す影響は少ないと言える。これは、移動硬化則で変位振幅  $0\sim 4\delta_y$ 、等方硬化則で変位振幅  $0\sim 3\delta_y$  の範囲では、平板全体が塑性域になっておらず、降伏していない弾性域が塑性域を拘束しているために、ひずみ硬化係数の変化が現れにくかったためと考えられる。そして、移動硬化則で変位振幅  $5\delta_y$ 、等方硬化則で変位振幅  $4\delta_y$  になると、平板全体が塑性化し、ひずみ硬化係数の違いが顕著に現れてくるため、履歴吸収エネルギーに変化が現れたためと考えられる。等方硬化則の方が移動硬化則より、ひずみ硬化係数の違いによって履歴吸収エネルギーに及ぼす影響が、小さい変位振幅で現れる。また、図-15、図-16、図-17、図-18から、等方硬化則の方が移動硬化則より、ひずみ硬化係数の違いによって履歴吸収エネルギーに及ぼす影響が大きいことが分かる。これは、漸増の繰り返し载荷において、等方硬化則はひずみ硬化係数の違いによって降伏曲面の大きさが変化し、変位の振幅が大きくなればなる程、降伏曲面の変化の割合は大きくなる。その結果、変位の载荷幅は一定であるが、平均応力は大きくなり、履歴吸収エネルギーに及ぼす影響が大きくなるためである。また、ひずみ硬化係数の違いによって平板の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響を、さらに変位振幅の大きさによる影響と繰り返し载荷の载荷パターンによる影響とに分けて検討する必要がある。

#### 4. 結論

本研究では、鋼材の応力～ひずみ関係をバイリニアモデルにモデル化し、一定のヤング率、降伏応力の下で、ひずみ硬化係数の違いが平板の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響を検討した。以下に本研究で得られた結

果をまとめる。

#### 単調圧縮载荷時

1. ひずみ硬化係数の違いによって、吸収エネルギーに影響を及ぼし始める幅厚比パラメータは変化し、吸収エネルギーの大きさも幅厚比パラメータの影響を強く受ける。特に、ひずみ硬化係数0%、1%は、最大平均応力までの吸収エネルギーに対してそれぞれ幅厚比パラメータ  $R=0.5, 0.6$  より小さい範囲で影響が現れ始める。
2. ひずみ硬化係数と吸収エネルギーの関係は、単調増加なグラフで表せられる。そのため、代表的なひずみ硬化係数を用いて吸収エネルギーを求めておけば、その間を直線で近似することにより、吸収エネルギーを推測することが可能である。
3. 吸収エネルギーの定義において「最大平均応力の95%まで」の定義は、「最大平均応力まで」の定義より、ひずみ硬化係数の違いの影響を受けない。

#### 繰り返し载荷時

4. 幅厚比パラメータが増加するにつれて、履歴吸収エネルギー量は低下する。繰り返し载荷回数が少ないときは幅厚比0.6以下では吸収エネルギー量に差はないが、繰り返し载荷回数が増加すると、幅厚比0.4以上で履歴吸収エネルギーは低下しはじめる。
5. 移動硬化則、等方硬化則ともにひずみ硬化係数3%以下の範囲に限れば、それぞれ変位振幅  $4\delta_y, 3\delta_y$  を载荷されたサイクルまでは、履歴吸収エネルギーに影響を及ぼさず、変位振幅  $5\delta_y, 4\delta_y$  を超えるとひずみ硬化係数3%以下の範囲でも違いが現れる。

## 参考文献

- 1) 宇佐美勉, 今井康幸, 青木徹彦, 伊藤義人: 繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.93-106, 1991.3.
- 2) 三上市蔵, 辻省悟, 中野唯史, 竹原和夫: 円周方向面内圧縮力を受ける鋼円筒パネルのダクティリティと幅厚比, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.37-50, 1993.3.
- 3) 土木学会・構造工学委員会, 構造工学震災調査特別小委員会: 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, 1997.5.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善, pp.162-175, 1996.12.
- 5) 森脇良一: 鋼材特性を考慮した圧縮板の極限強度と塑性変形能力について, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.115-124, 1993.3.
- 6) 奈良敬, 梅村哲男, 服部松利, 森脇良一: 鋼材特性を考慮した圧縮補剛板の極限強度と変形性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.125-132, 1993.3.
- 7) 冨永知徳, 安波博道: 厚肉小補剛断面を有する鋼製橋脚の変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.189-200, 1994.3.
- 8) 山尾敏孝, 荒毛徹, 崎元達郎: 鋼材特性を考慮した薄肉鋼 H 形短柱の耐荷力と終局挙動について, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.355-364, 1994.3.
- 9) 山尾敏孝, 岩坪要, 崎元達郎: 降伏比が異なる高張力鋼を用いた短柱の耐荷力と変形能力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.147-145, 1997.3.
- 10) Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc.: ABAQUS / Standard User's Manual, Vol. I, II, Ver.5.6, 1997
- 11) 鈴木 森晶, 宇佐美 勉, 竹本 潔史: 鋼製橋脚モデルの静的および準静的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.507/I-30, pp.99-108, 1995.1.
- 12) 宇佐美 勉, 坂野 茂, 是津 文章, 青木 徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集 Vol.39A pp.235-247, 1993.3.

(1998年8月17日 受付)

## THE INFLUENCE OF STRAIN HARDENING FACTOR OF BI-LINEAR MODEL ON THE ENERGY ABSORPTION OF THIN STEEL PLATES UNDER AXIAL COMPRESSION

Mamoru KAWAKAMI, Nobutoshi MASUDA and Hiromi SHIRAHATA

While there are many factors which affect seismic resistance properties of steel structures, the stress-strain relationship is one of the most important factors. In this study, seismic resistance performance was examined, from the energy absorption view point by changing stress-strain relationship. The stress-strain relationship was modeled by bi-linear. Setting Young's modulus and yield stress constant, the influence of strain-hardening factor on the energy absorption was quantitatively investigated.