

# 繰り返し载荷を受ける補剛板の 強度と変形能に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON STRENGTH AND DUCTILITY OF  
STEEL STIFFENED PLATES UNDER CYCLIC LOADING

渡辺智彦\*・葛漠彬\*\*・宇佐美勉\*\*\*

Tomohiko WATANABE, Hanbin GE and Tsutomu USAMI

\*学生会員 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻博士課程(前期課程) (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*正会員 博士(工学) 名古屋大学 助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*フェロー会員 博士(工学) 名古屋大学 教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

A large number of steel structures or members are composed of thin-walled plate components. A reliable design of such structures or members requires an evaluation of strength and ductility of their components. This paper deals with an inelastic large deformation analysis of steel stiffened plates under cyclic loading. To trace accurately the inelastic behavior of steel material, a modified two-surface model is employed as the constitutive law in the analysis. Effects of plate width-thickness ratio, aspect ratio and stiffener rigidity on the strength and ductility capacity are investigated. To evaluate the computed results, stiffener's slenderness ratio parameter is introduced. It is found that there is a good correlation between the strength/ductility and the stiffener slenderness ratio parameter. The proposed formulas are expected to be useful to engineers in determining the strength and ductility of steel stiffened plates.

**Key Words :** ductility, strength, cyclic loading, stiffener's slenderness ratio parameter, width-thickness ratio parameter, stiffener rigidity

## 1. 緒言

鋼製橋脚の地震時保有水平耐力および変形性能を算定する方法の1つに、応力-ひずみ関係を用いた骨組の弾塑性有限変位解析(Pushover解析)がある<sup>1)</sup>。この方法では、局部座屈の影響が考慮できないため、解析によって求めた水平荷重-水平変位曲線の終点を定める破壊条件が別途必要とされる。文献1)において、箱形断面橋脚に対しての破壊基準が詳細に述べられている。その中で、箱形断面の場合は圧縮フランジが座屈崩壊すると橋脚全体の崩壊につながるとみなし、橋脚のダイアフラム間のフランジ補剛板を取り挙げ、それが単調圧縮(载荷辺は剛棒を介して载荷されていると考え、一様な変位を板の長さ方向に与える)を受けるときの载荷辺での平均応力 $\bar{\sigma}$ (=圧縮力/補剛板断面積)と平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ (=载荷辺の縮み/補剛板の長さ)の関係を求め、平均応力がピーク値の95%まで降下した点での平均ひずみを限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ とし、それを用いて破壊条件を規定している。

しかし、地震荷重を受ける場合、鋼製橋脚のフランジは、単調圧縮ではなく圧縮と引張の繰り返し荷重を受けることから、単調圧縮解析のみで限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ を定めることは不十分である可能性がある。そこで、本研究では、単調圧縮と比較して実際の現象により近い、繰り返し荷重を受ける条件での補剛板の挙動を、弾塑

性有限変位解析を行うことにより求め、その強度と変形能を文献1)における単調圧縮载荷による解析結果と比較し検討を行う。

なお、文献1)では構造解析用汎用プログラムMARCを用い、パネル部分にはシェル要素、補剛材にはオフセット梁要素を用いて弾塑性有限変位解析を行っているが、本研究では、構造解析用汎用プログラムABAQUS<sup>2)</sup>を用い、パネル部分と補剛材ともにシェル要素を用いて解析を行う。また、構成則には名古屋大学で開発された修正二曲面モデルを用いた。このモデルは、構造用鋼材の繰り返し弾塑性挙動を精度よく表現できることが検証されている<sup>3)</sup>。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析モデル

本解析は、補剛材4本(サブパネル数 $n=5$ )で4辺単純支持の補剛板について行い、図-1のメッシュ部分に示すような解析モデルを考えた。文献4)によれば、このような多リブ板は、1本の補剛材と、それと隣接する板要素からなるT形断面柱の解析をすれば極限強度は十分正確に求められるようであるが、変形能については不明であるので、敢えて図-1のような全体モデルを考え、ダイアフラムにまたがる長さ $a$ の部分

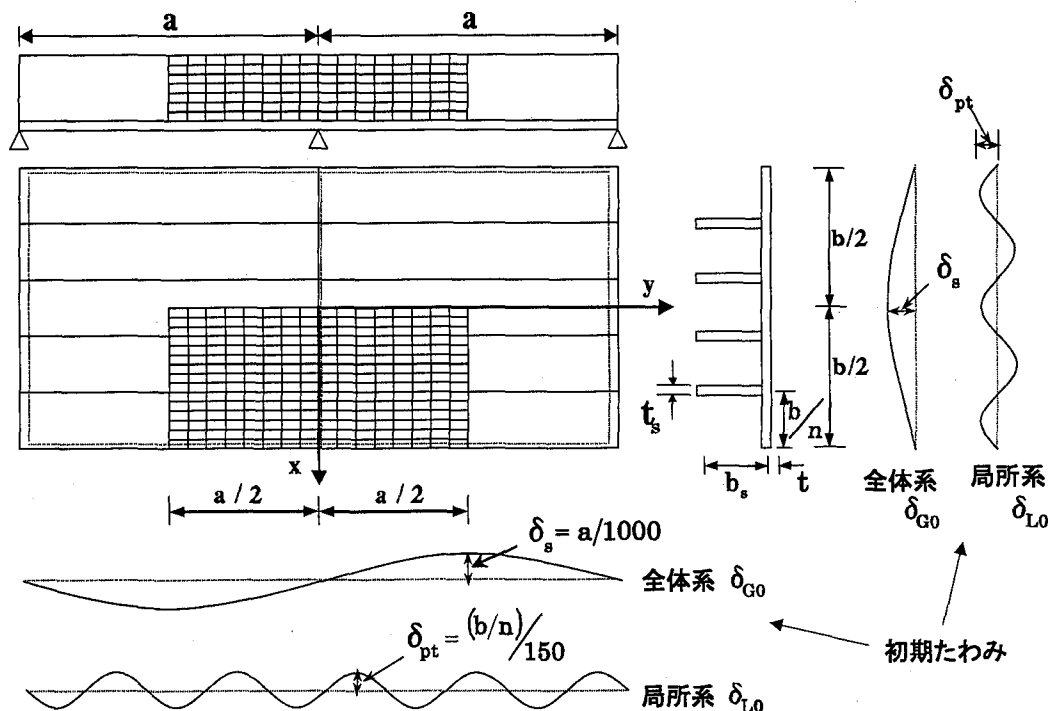


図-1 解析モデルと初期たわみ

を取り出して解析を行った。

メッシュ数は、パネル部分については荷重方向（ $y$  軸方向）に16分割、非荷重方向（ $x$  軸方向）に15分割とし、補剛材は荷重方向にパネル部分と同様に16分割、補剛材板幅方向に7分割とした。また、境界条件は式(1)に示すとおりである。なお、解析に用いた要素はS4Rである<sup>2)</sup>。要素S4Rは、4節点シェル要素であり、積分点は要素中心に1個で、厚さ方向は5個とした。自由度は、節点あたり6自由度がある。この要素は薄肉および厚肉シェルのどちらの解析にも適用可能である。

$$\begin{aligned}
 x=0 & : u=\theta_y=\theta_z=0 \\
 x=b/2 & : w=\theta_x=0 \\
 y=0 & : w=\theta_y=\theta_z=0 \\
 y=a/2 & : v=\theta_x=\theta_z=0 \\
 y=-a/2 & : \theta_x=\theta_z=0
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $a$  はダイアフラム間隔、 $b$  は補剛板の幅、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  方向の変位、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  はそれぞれ  $x, y, z$  軸まわりの回転角である。なお、荷重方向は  $y$  方向であり、 $y=a/2$  で変位  $v$  を拘束し、 $y=-a/2$  で強制変位を与えている。

## 2.2 解析モデルの諸元

解析モデルの諸元を表-1に示す。モデル名の数字は順に、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$ 、アスペクト比  $\alpha (= a/b)$  および幅厚比パラメータ  $R$  に対応している。

また、 $R$  は式 (2)、 $\bar{\lambda}_s$  は式 (3) で与えられる<sup>5)</sup>。

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

$$\bar{\lambda}_s = \frac{a}{r_s} \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{Q}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

ここで、 $n$  = 補剛材で囲まれたサブパネル数 (=5)、 $b$  = 補剛板の幅、 $t$  = パネルの板厚、 $k$  = 座屈係数 (=4.0)、 $\sigma_y$  = 降伏応力、 $E$  = ヤング率、 $\nu$  = ポアソン比、 $r_s$  = 補剛材1本を含むT型断面の断面2次半径、 $Q$  = 補剛材で囲まれた板パネルの局部座屈強度である。文献1)によれば、 $Q$  は次式で与えられる。

$$Q = 1/(2R) \left[ \beta - \sqrt{\beta^2 - 4R} \right] \leq 1.0 \quad (4)$$

ここで、 $\beta = 1.33R + 0.868$  である。

解析に使用した鋼材は、SM490で、材料定数は  $\sigma_y = 314 \text{ MPa}$ 、 $E = 206 \text{ GPa}$  および  $\nu = 0.3$  である。パネル部分の板厚  $t$  は  $20 \text{ mm}$  で全モデル一定とした。幅厚比パラメータ  $R$  は、既存の構造物よりも比較的小さいモデルを採用したが、これは本研究が変形能の高いモデルを対象の中心にしているからである。また、補剛材剛比  $\gamma/\gamma^*$  に関しては、文献6)によると、 $\gamma/\gamma^*$  を1.0から3.0に上げることにより、強度・変形能を大きく上昇させることが出来るが、 $\gamma/\gamma^*$  を3.0以上にしても変形能に大きな変化は無い、という実験結果があるので、本解析では、補剛材剛比  $\gamma/\gamma^*$  が3.0以上になるように制限し、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  を0.205～0.55の範囲で変化させた。また、補剛材の板幅と板厚を決める際、まずアスペクト比  $\alpha$  と幅厚比  $R$  をある値に設定

表－１ 解析モデルの諸元

| モデル名               | $\bar{\lambda}_s$ | $\alpha$ | $R$   | $\gamma/\gamma^*$ | $b(\text{mm})$ | $t(\text{mm})$ | $b_s(\text{mm})$ | $t_s(\text{mm})$ | $R_s$ |
|--------------------|-------------------|----------|-------|-------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------|
| [1] SP-205-10-30   | 0.205             | 1.0      | 0.30  | 3.82              | 1461           | 20             | 225              | 40               | 0.354 |
| [2] SP-205-05-35   | 0.205             | 0.5      | 0.35  | 3.90              | 1705           | 20             | 149              | 40               | 0.275 |
| [3] SP-205-05-40   | 0.205             | 0.5      | 0.40  | 5.22              | 1948           | 20             | 172              | 40               | 0.271 |
| [4] SP-225-10-30   | 0.225             | 1.0      | 0.30  | 3.05              | 1461           | 20             | 232              | 40               | 0.365 |
| [5] SP-225-05-35   | 0.225             | 0.5      | 0.35  | 3.10              | 1705           | 20             | 136              | 40               | 0.214 |
| [6] SP-225-05-40   | 0.225             | 0.5      | 0.40  | 4.15              | 1948           | 20             | 157              | 40               | 0.247 |
| [7] SP-250-10-35   | 0.250             | 1.0      | 0.35  | 3.24              | 1705           | 20             | 244              | 40               | 0.384 |
| [8] SP-250-05-40   | 0.250             | 0.5      | 0.40  | 3.21              | 1948           | 20             | 142              | 40               | 0.224 |
| [9] SP-300-10-42   | 0.300             | 1.0      | 0.425 | 3.20              | 2070           | 20             | 251              | 40               | 0.395 |
| [10] SP-400-10-55  | 0.400             | 1.0      | 0.55  | 3.06              | 2679           | 20             | 259              | 40               | 0.408 |
| *[11] SP-550-10-72 | 0.550             | 1.0      | 0.725 | 3.03              | 3531           | 20             | 273              | 40               | 0.430 |
| *[12] SP-225-75-35 | 0.225             | 0.75     | 0.35  | 3.42              | 1705           | 20             | 208              | 30               | 0.437 |
| *[13] SP-225-10-35 | 0.225             | 1.0      | 0.35  | 4.20              | 1705           | 20             | 272              | 40               | 0.428 |
| *[14] SP-225-15-35 | 0.225             | 1.5      | 0.35  | 6.06              | 1705           | 20             | 427              | 70               | 0.384 |
| *[15] SP-250-05-35 | 0.250             | 0.5      | 0.35  | 2.54              | 1705           | 20             | 120              | 50               | 0.151 |
| *[16] SP-250-75-35 | 0.250             | 0.75     | 0.35  | 3.27              | 1705           | 20             | 180              | 60               | 0.189 |
| *[17] SP-250-15-35 | 0.250             | 1.5      | 0.35  | 3.87              | 1705           | 20             | 371              | 40               | 0.584 |
| *[18] SP-250-10-40 | 0.250             | 1.0      | 0.40  | 3.94              | 1948           | 20             | 285              | 30               | 0.598 |
| *[19] SP-300-05-55 | 0.300             | 0.5      | 0.55  | 4.75              | 2679           | 20             | 177              | 40               | 0.279 |
| *[20] SP-600-10-55 | 0.600             | 1.0      | 0.55  | 1.16              | 2679           | 20             | 177              | 40               | 0.279 |

\* 印：単調圧縮載荷のみ行ったモデル

し、 $\bar{\lambda}_s$ をある目標値になるように、かつ補剛材の剛比  $\gamma/\gamma^*$  が基本的に3.0以上となるように補剛材の幅  $b_s$  と補剛材の厚さ  $t_s$  を試行錯誤的に求めた。特に、局部座屈を起こさせないように、補剛材の幅厚比パラメータ  $R_s$  (式(2)で  $k = 0.425$  とおいた式) の値を0.5以下と制限した。ただし、[17]および[18]の2モデルでは、 $\alpha$  が大きいなどの点から、以上の設計条件が満たされる  $b_s$  と  $t_s$  を見つけたのは非常に困難であった。その結果、 $R_s$  がそれぞれ0.584および0.598となっている。

なお、 $\gamma$  および  $\gamma^*$  は式(5),(6)で与えられる。

$$\gamma = \frac{t_s b_s^3}{3} \bigg/ \frac{b t^3}{11} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \gamma^* &= 4\alpha^2 n (1 + n\delta_l) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n^2} \quad (\alpha \leq \alpha_0) \\ &= \frac{1}{n} [(2n^2 (1 + n\delta_l) - 1)^2 - 1] \quad (\alpha > \alpha_0) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_0$  = 限界アスペクト比 (=  $(1 + n\gamma)^{1/4}$ )、 $\delta_l$  = 補剛材1本の断面積比 (=  $b_s t_s / b t$ ) である。

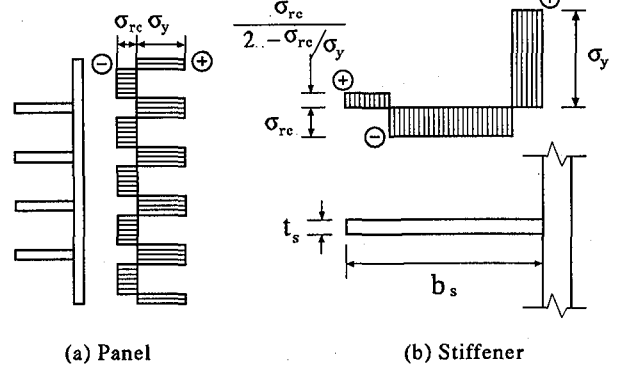
### 2.3 初期たわみ

初期たわみ  $\delta$  については、図－１に示すように全体的なたわみモード  $\delta_{G0}$  と、局所的なたわみモード  $\delta_{L0}$  の和として与えた<sup>7)</sup>。すなわち、

$$\delta = \delta_{G0} + \delta_{L0} \quad (7)$$

⊕ : Tension

⊖ : Compression



図－２ 補剛板の残留応力

$$\delta_{G0} = \delta_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{a} y\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b} x\right) \quad (8)$$

$$\delta_{L0} = \delta_{pt} \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{a} y\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b/n} x\right) \quad (9)$$

ここで、 $\delta_s = a/1000$ 、 $\delta_{pt} = (b/n)/150$  とした。なお、初期たわみの符号はパネル部分に対して補剛材の突出側を正としている。

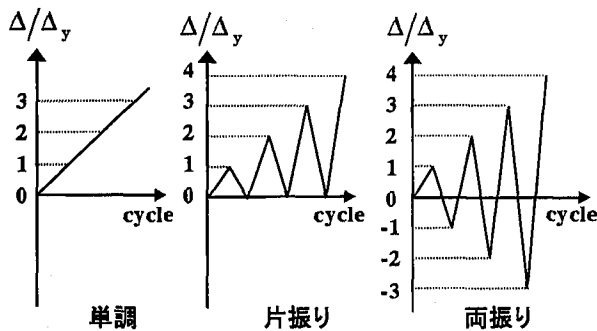


図-3 荷重パターン

## 2.4 残留応力

残留応力は、パネル部分においては図-2(a)に示すように、溶接部に隣接する要素では引張残留応力として降伏応力  $\sigma_y$  を、その他の要素は圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  を与えた。補剛材においては、図-2(b)に示すような矩形分布を採用した。なお、 $\sigma_{rc}$  は、パネル部分と補剛材ともに  $0.3\sigma_y$  を仮定した。

## 2.5 構成則

構成則には、前述したように、名古屋大学で開発された修正二曲面モデルを用いる。このモデルは、繰返し荷重を受ける鋼構造物の実験結果に近い挙動を予測でき、従来の構成則モデルなどによる解析と比較して最も精度の良いものであることが検証されている<sup>3)</sup>。

## 2.6 荷重方法

本解析は、図-1の  $y = a/2$  の辺の  $y$  方向の変位を拘束し、 $y = -a/2$  の辺を剛棒を介して荷重辺とし、その  $y$  軸方向の面内変位  $\Delta$  を変化させる変位制御により行った。本解析に用いた荷重パターンを、図-3に示す。なお、図-3では、圧縮変位を正としており、これ以降も圧縮を正として取り扱っていく。ここで、単調圧縮荷重は、荷重辺を単調に圧縮していく荷重方法、片振り繰返し荷重は、荷重辺を圧縮してから元の位置に戻し、1サイクルごとに圧縮変位幅を降伏変位  $\Delta_y (= \text{降伏ひずみ} \varepsilon_y \times \text{板の長さ} a)$  ずつ増えるように変化させていく荷重方法、両振り繰返し荷重は、荷重辺に圧縮変位を与えた後にその圧縮変位と同じ幅の引張変位を与え、1サイクルごとにその変位幅を  $\Delta_y$  ずつ増やしていく荷重方法である。

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 解析モデルの検証

解析に先立って、本解析のモデルの妥当性を検証するために、文献1)の中で報告されている補剛板の単調圧縮解析の解析結果と比較してみる。

比較の対象としたのは、 $\bar{\lambda}_s = 0.499$ ,  $R = 0.6$ ,  $\gamma/\gamma^* =$

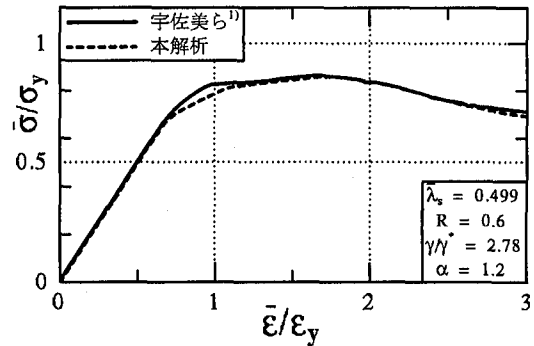


図-4 既往の解析結果<sup>1)</sup>との比較(単調荷重)

2.78,  $\alpha = 1.2$  のモデルである。その比較を図-4に示す。ここで、 $\bar{\varepsilon}$ ,  $\bar{\sigma}$  は式(10), (11)で定義される平均ひずみ、平均応力である。

$$\bar{\varepsilon} = \Delta/a \quad (10)$$

$$\bar{\sigma} = P/A \quad (11)$$

ここで、 $a$  は板の長さ、 $\Delta$  は板の荷重辺の荷重方向の面内変位、 $P$  は荷重辺における全節点の反力を合計した値、 $A$  は断面積 ( $= bt/2 + 2b_s t_s$ ) を表している。

図-4を見ると、両者に大きな違いはなくほぼ一致していることが分かる。これにより、本解析のモデルの妥当性が確認できた。

### 3.2 パラメトリック解析

この節では、パラメトリック解析の結果について述べる。主なパラメータは、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$ 、補剛板のアスペクト比  $\alpha$  および補剛板幅厚比パラメータ  $R$  である。

#### (1) 強度(最大平均応力)

単調圧縮荷重、片振り繰返し荷重および両振り繰返し荷重に対する解析から得られた、平均応力-平均ひずみ曲線をそれぞれ図-5(a), (b), (c)に示す。なお、図中の数字は、表-1のモデル名の数字と対応している。ただし、図-5(b)および(c)は、履歴曲線の圧縮側折り返し点を結んだ包絡線である。例として、[2] SP-205-05-35の履歴曲線を図-5(d), (e)に示す。また、平均応力-平均ひずみ曲線から得られた各モデルの  $\bar{\sigma}_m/\sigma_y$  および  $\varepsilon_{u,s}/\varepsilon_y$  を表-2に示す。ここで、 $\bar{\sigma}_m$  は最大平均応力、 $\varepsilon_{u,s}$  は限界ひずみである。限界ひずみの定義は後述とする。

#### 単調圧縮荷重

図-5(a)を見ると全てのモデルで強度の劣化が生じている。また、全般的な傾向としては、幅厚比パラメータ  $R$  が一定のとき補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が小さい程、そして補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が一定のとき幅厚比パラメータ  $R$  が小さい程、最大平均応力  $\bar{\sigma}_m$  が大きく、強度が大きいと言える。

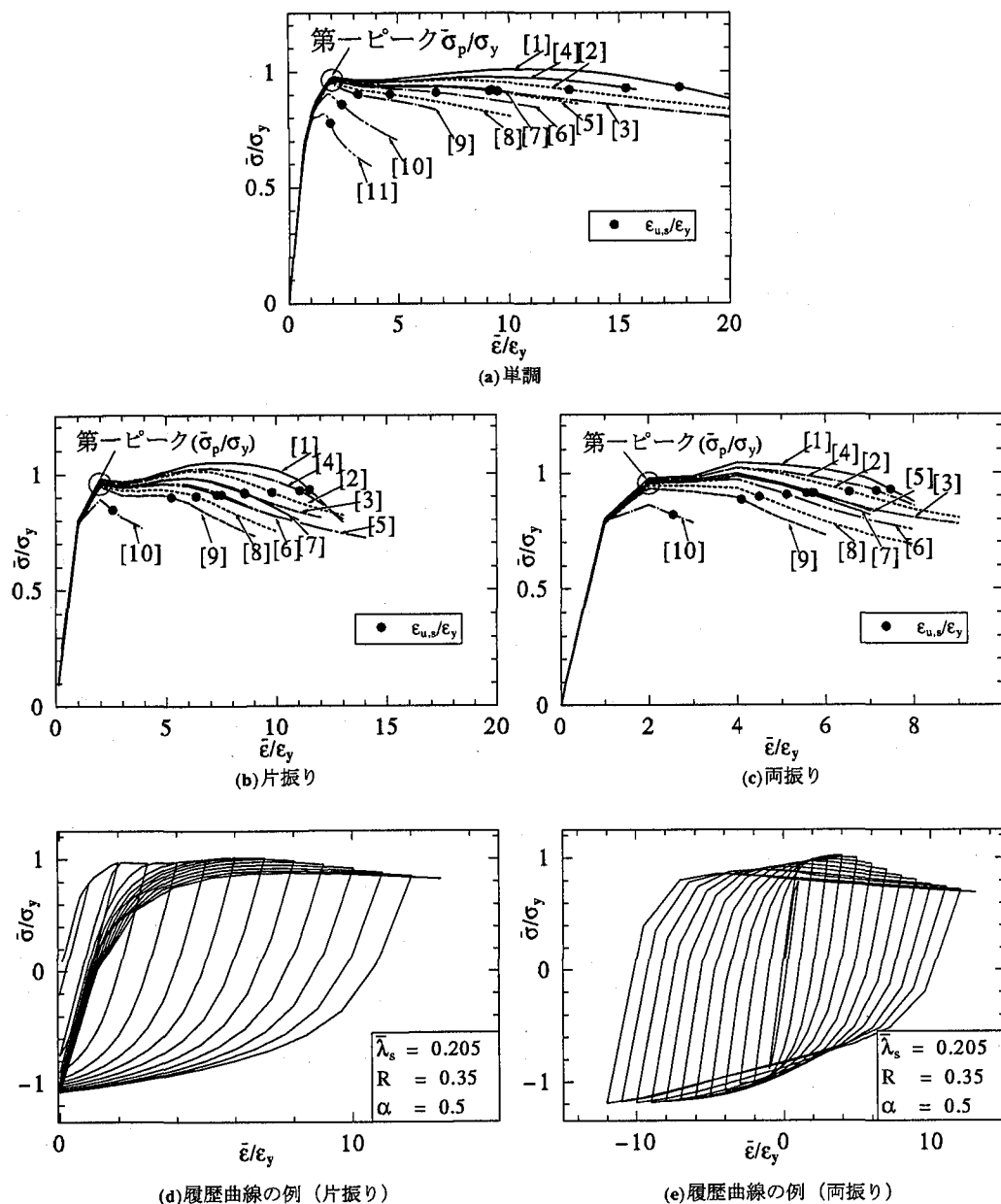


図-5 平均応力-平均ひずみ曲線 ( [ ] 内の数字は表-1 のモデル番号を表す )

具体的に見ると、[6]および[8]～[11]の5個のモデルでは、降伏棚のような領域が見られず、ピークを越えた後そのまま強度は劣化してしまう。特に、[10]、[11]では強度の劣化が激しい。これは、これら5個のモデルが幅厚比パラメータ  $R = 0.4 \sim 0.725$  と比較的大きいために、ひずみ硬化が起こる前に局部座屈を起こしてしまったからである。

それに対し、[1]、[2]、[4]の3モデルでは、すぐには強度が劣化せず、ひずみ硬化の影響による強度増加現象が表れた後に強度の劣化が起こっている。これは、これらのモデルは幅厚比パラメータ  $R$  が 0.30、0.35 と比較的小さいと、局部座屈が起こりにくいことを表している。

一方、[3]、[6]、[8]の3モデルは、幅厚比パラメータとアスペクト比が  $R = 0.40$ 、 $\alpha = 0.5$  と一定で、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が 0.205、0.225、0.25、補剛材剛比  $\gamma/\gamma^*$  が 5.22、4.15、3.21 と異なるモデルである。表-2よりこれらの結果を見ると、幅厚比パラメータ  $R$  とアスペクト比  $\alpha$  が等しいとき、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が小さくなる程、最大平均応力  $\bar{\sigma}_m$  が若干大きくなり、強度が上がっていることが分かる。

また、[2]と[3]の2モデルを比較すると、補剛材細長比パラメータとアスペクト比が  $\bar{\lambda}_s = 0.205$ 、 $\alpha = 0.5$  と一定で、幅厚比パラメータ  $R$  が 0.40、0.35 と小さくなる程、最大平均応力  $\bar{\sigma}_m$  が大きくなり、強度が多少上がっていることが分かる。[5]と[6]の2モデル ( $\bar{\lambda}_s = 0.225$ 、

$\alpha = 0.5$ )でも同様の傾向が現れている。

さらに、アスペクト比 $\alpha$ の影響を調べてみる。 $R$ と $\bar{\lambda}_s$ を一定とし、剛比を3.0程度に保つように $\alpha$ を0.5から1.5に変えた場合の比較を図-6に示す。図-6(a)では $R = 0.35$ と $\bar{\lambda}_s = 0.225$ 、図-6(b)では $R = 0.35$ と $\bar{\lambda}_s = 0.25$ である。これらの図より、最大平均応力(強度)に及ぼすアスペクト比の影響が小さいことが分かる。変形能については、限界ひずみの節で述べる。

これらのことから、以下のことが言える。

1.  $\bar{\lambda}_s$ と $\alpha$ を一定にしても $R$ を小さくすれば強度は大きくなり、逆に $R$ と $\alpha$ を一定にしても $\bar{\lambda}_s$ を小さくすれば強度は大きくなる。
2.  $\alpha$ が強度に及ぼす影響は小さい。

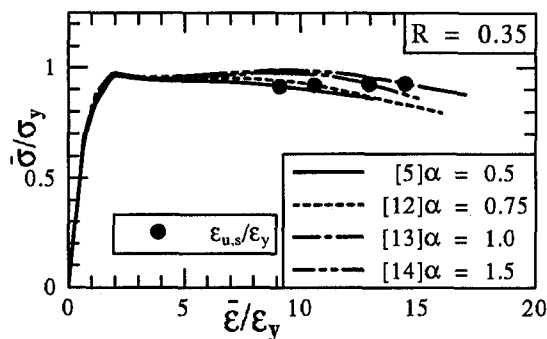
### 繰返し載荷

図-5(b), および(c)にみられるように、片振り・両振り繰返し載荷共に、単調載荷の場合と同様に $\bar{\lambda}_s$ が小さい程、また $R$ が小さい程、最大平均応力 $\bar{\sigma}_m$ が大きく、強度が大きいと言える。

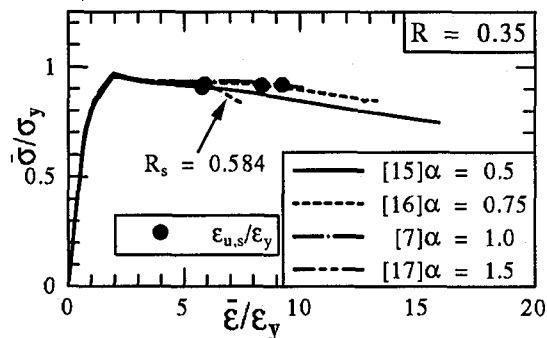
具体的に見ると、単調圧縮載荷で降伏棚のような領域が見られなかった幅厚比パラメータ $R$ が比較的大きいモデルは、片振り・両振り繰返し載荷のどちらにおいてもやはりそのような領域は現れず、ピーク後そのまま強度が劣化していき、その様子は単調圧縮載荷の平均応力-平均ひずみ曲線と相違はほとんど見られない。これは、 $R$ が大きいため局部座屈が一旦発生すると荷重を載荷していくにつれて局部座屈が大きく進展するからである。ここで、例としてモデル[10]に対する平均応力-平均ひずみ曲線の比較を図-7に示す。ただし、表-2を見ると、最大平均応力 $\bar{\sigma}_m$ は、単調載荷に比べて多少低下しているのが分かる。これは、繰返し載荷に伴う強度劣化によるものである。

また、幅厚比パラメータ $R = 0.35$ のモデルは、単調圧縮載荷では強度増加現象がほとんど無かったが、繰返し載荷では、繰返しひずみ硬化の影響による強度増加現象が表れている。図-8には、モデル[2]と[5]の比較が示される。

さらに、幅厚比パラメータ $R = 0.3$ の[1], [4]の両モデルでも、図-9に見られるように、繰返しひずみ硬化の影響による強度増加現象が起こり、単調圧縮載荷では、 $\bar{\epsilon}/\epsilon_y = 4 \sim 5$ の辺りで強度増加が始まっていたのが、片振り繰返し載荷では $\bar{\epsilon}/\epsilon_y = 4$ 、両振り繰返し載荷では $\bar{\epsilon}/\epsilon_y = 3$ 付近で強度増加が始まっており、単調圧縮載荷、片振り繰返し載荷、両振り繰返し載荷となるにつれて早く強度増加が起こることが分かる。また、表-2を見ると、幅厚比パラメータ $R$ が比較的小さいこれらのモデルでは、最大平均応力 $\bar{\sigma}_m$ が単調圧縮載荷に比べて上昇しているのが分かる。このように、幅厚比パラメータ $R$ が比較的小さくなると単調圧縮載荷の場合との違いは大きくなる。



(a)  $\bar{\lambda}_s = 0.225$



(b)  $\bar{\lambda}_s = 0.25$

図-6 アスペクト比 $\alpha$ が強度と変形能に及ぼす影響

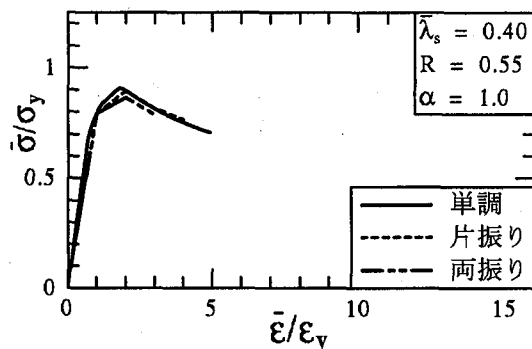
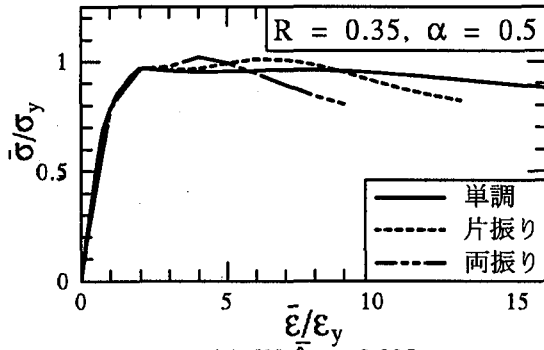


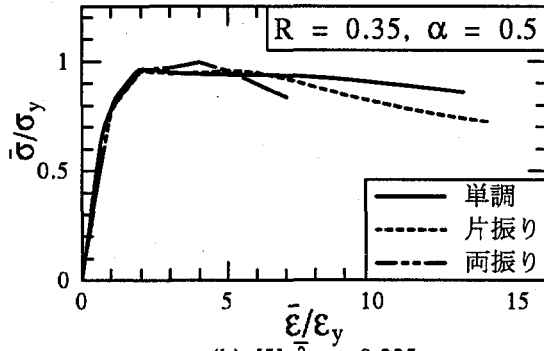
図-7 載荷パターンの影響 (モデル[10])

これらのことから、繰返し載荷を受ける補剛板は、幅厚比パラメータ $R$ が比較的大きいと、局部座屈を起こしやすいため、繰返しひずみ硬化域に至る前に強度の劣化が起こるので、単調圧縮との違いはほとんど現れない。それに対して幅厚比パラメータ $R$ が比較的小さいと、局部座屈を起こしにくくなるため、局部座屈を起こす前に繰返しひずみ硬化域に至って強度の増加が起こり、単調圧縮との違いが大きくなる、ということが言える。一方、図-8と図-9より $\bar{\lambda}_s$ の影響を見ることもできる。 $R = 0.35$ と $\alpha = 0.5$ の場合(図-8参照)、繰返しひずみ硬化による強度増加は、 $\bar{\lambda}_s = 0.205$ の方が $\bar{\lambda}_s = 0.225$ より顕著である。この傾向は、 $R = 0.30$ と $\alpha = 1.0$ の場合(図-9参照)も同様である。

強度に関する推定式<sup>8)</sup>と解析結果の比較を図-10

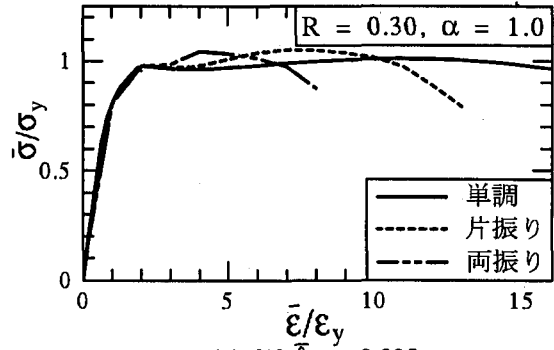


(a) [2]  $\bar{\lambda}_s = 0.205$

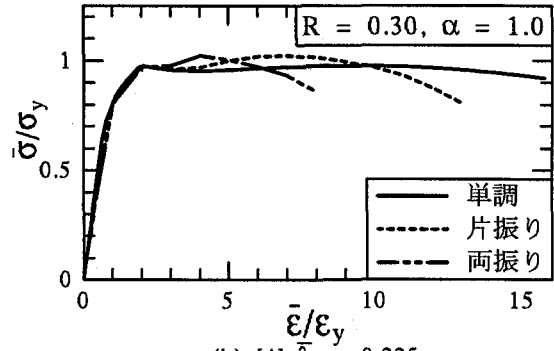


(b) [5]  $\bar{\lambda}_s = 0.225$

図-8 荷重パターンと $\bar{\lambda}_s$ の影響 ( $R = 0.35, \alpha = 0.5$ )



(a) [1]  $\bar{\lambda}_s = 0.205$



(b) [4]  $\bar{\lambda}_s = 0.225$

図-9 荷重パターンと $\bar{\lambda}_s$ の影響 ( $R = 0.30, \alpha = 1.0$ )

に示す。図-10を見ると、若干、解析結果の方が推定式よりも低い値となつてはいるが、よく一致していることが分かる。なお、文献8)で与えられている式は次のようである。

$$\frac{\bar{\sigma}_m}{\sigma_y} = 1.24 - 0.54R \leq 1.0 \quad (12)$$

ただし、上式は実験結果の平均値を表すものである。

## (2) 限界ひずみ

文献1)において、板要素の限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ は、一様圧縮荷重の解析結果を基に、平均応力が最大平均応力から95%まで低下したときの応力に対応する平均ひずみを用いている。しかし、この定義を繰り返し解析の結果にそのまま適用すると、幅厚比パラメータ $R$ が比較的小さいケースでは、限界ひずみ点における強度が全断面降伏強度( $\bar{\sigma}/\sigma_y = 1.0$ )よりも大きくなってしまふ場合がある。このことから、本研究では、限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ を定義するため、まず、 $\sigma_{u,s}$ (限界応力)を式(13)のように定義した。ただし、繰り返しひずみ硬化の影響により第一ピーク(図-5参照)後にさらに強度上昇が起きた場合には、式(14)のように定義した。すなわち、

$$\sigma_{u,s}/\sigma_y = 0.95\bar{\sigma}_m/\sigma_y \quad (13)$$

ただし、 $\bar{\sigma}_m > \bar{\sigma}_p$ の時

$$\sigma_{u,s}/\sigma_y = 0.95\bar{\sigma}_p/\sigma_y \quad (14)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_p$ は第一ピークの平均応力を表す。

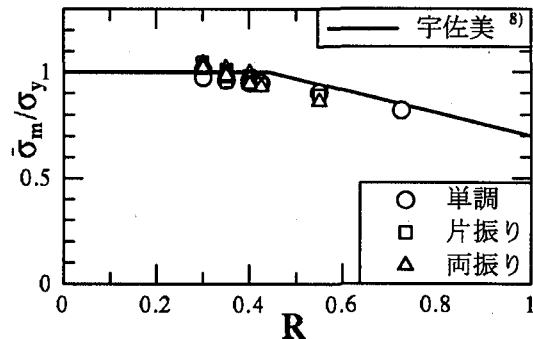


図-10 強度推定式<sup>8)</sup>と解析結果の比較

以上のように定義した $\sigma_{u,s}$ に対応するひずみを限界ひずみ $\epsilon_{u,s}$ と定義し、その解析結果を $\epsilon_y$ で無次元化したものを、表-2にまとめている。そして、その $\epsilon_{u,s}/\epsilon_y$ と、補剛材細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ との関係を図-11(a), (c)および(e)に示す。なお、これらの図には、文献1)による下記の推定式もプロットしてある。

$$\frac{\epsilon_{u,s}}{\epsilon_y} = \frac{0.145}{(\bar{\lambda}_s - 0.2)^{1.11}} + 1.19 \quad (15)$$

図-11(a), (c)および(e)を見てみると、単調、片振り、両振りともに補剛材細長比パラメータ $\bar{\lambda}_s$ が比較的大きい範囲では、推定式(15)と非常に良く一致した結果となったが、 $\bar{\lambda}_s$ が比較的小さい範囲、特に $\bar{\lambda}_s = 0.205 \sim 0.225$ 付近では、推定式(15)が危険側になるものも少なくはない。また、片振り、両振りとなる程、

表-2 最大平均応力と限界ひずみ

| モデル名             | 最大平均応力 ( $\bar{\sigma}_m/\sigma_y$ ) |       |       | 限界ひずみ ( $\varepsilon_{u,s}/\varepsilon_y$ ) |      |      |
|------------------|--------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------------|------|------|
|                  | 単調                                   | 繰返し   |       | 単調                                          | 繰返し  |      |
|                  |                                      | 片振り   | 両振り   |                                             | 片振り  | 両振り  |
| [1]SP-205-10-30  | 0.980                                | 1.05  | 1.04  | 17.7                                        | 11.5 | 6.54 |
| [2]SP-205-05-35  | 0.969                                | 1.01  | 1.02  | 12.7                                        | 9.79 | 5.51 |
| [3]SP-205-05-40  | 0.963                                | 0.983 | 0.998 | 9.49                                        | 8.57 | 5.10 |
| [4]SP-225-10-30  | 0.976                                | 1.02  | 1.02  | 15.3                                        | 11.1 | 6.07 |
| [5]SP-225-05-35  | 0.964                                | 0.957 | 0.996 | 9.13                                        | 7.30 | 5.15 |
| [6]SP-225-05-40  | 0.958                                | 0.959 | 0.972 | 6.69                                        | 7.51 | 4.83 |
| [7]SP-250-10-35  | 0.968                                | 0.982 | 0.986 | 9.23                                        | 8.55 | 5.17 |
| [8]SP-250-05-40  | 0.950                                | 0.950 | 0.944 | 4.59                                        | 6.35 | 4.50 |
| [9]SP-300-10-42  | 0.950                                | 0.947 | 0.932 | 3.16                                        | 5.22 | 4.02 |
| [10]SP-400-10-55 | 0.904                                | 0.893 | 0.863 | 2.41                                        | 2.56 | 2.55 |
| [11]SP-550-10-72 | 0.820                                | —     | —     | 1.88                                        | —    | —    |
| [12]SP-225-75-35 | 0.922                                | —     | —     | 10.6                                        | —    | —    |
| [13]SP-225-10-35 | 0.924                                | —     | —     | 7.55                                        | —    | —    |
| [14]SP-225-15-35 | 0.926                                | —     | —     | 5.18                                        | —    | —    |
| [15]SP-250-05-35 | 0.909                                | —     | —     | 5.76                                        | —    | —    |
| [16]SP-250-75-35 | 0.917                                | —     | —     | 8.36                                        | —    | —    |
| [17]SP-250-15-35 | 0.923                                | —     | —     | 5.87                                        | —    | —    |
| [18]SP-250-10-40 | 0.918                                | —     | —     | 5.16                                        | —    | —    |
| [19]SP-300-05-55 | 0.860                                | —     | —     | 2.60                                        | —    | —    |
| [20]SP-600-10-55 | 0.745                                | —     | —     | 1.92                                        | —    | —    |

限界ひずみ  $\varepsilon_{u,s}$  は低い値となっており、特に両振り繰返し載荷では、 $\bar{\lambda}_s = 0.205 \sim 0.225$  付近で全て推定式(15)よりも低い変形能となっている。これは、 $\bar{\lambda}_s$  が比較的小さい場合は一般に  $R$  も小さいので、前述したように、繰返し荷重を受けると、繰返しひずみ硬化による強度の増加現象後に繰返し載荷により急激に強度劣化を起こすため、変形能が単調載荷より低下してしまうものと考えられる。

単調載荷に注目して図-6を見ると、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s = 0.225$  と  $0.25$  のいずれの図でも、4つのモデルは幅厚比パラメータ  $R = 0.35$  と一定だが、アスペクト比  $\alpha$  がそれぞれ  $0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  と異なったものである。 $R_s$  が  $0.5$  より大きいモデルを除いて  $\alpha$  が  $1.5$  から  $0.5$  へ小さくなると  $\varepsilon_{u,s}$  が減少する傾向が見られる。このことから、限界ひずみ  $\varepsilon_{u,s}$  にはアスペクト比  $\alpha$  が影響しているということが推察できる。

そこで、 $\alpha$  の影響を考慮して試行錯誤的に式(16)のように  $\bar{\lambda}'_s$  を定義した。

$$\bar{\lambda}'_s = \frac{1}{\sqrt[3]{\alpha}} \bar{\lambda}_s \quad (16)$$

この  $\bar{\lambda}'_s$  を  $\bar{\lambda}_s$  の代わりに横軸にとると図-11(b)のようになる。図-11(b)を見ると、例外 ( $R_s > 0.5$  のもの) はあるが、推定式(15)の  $\bar{\lambda}_s$  を  $\bar{\lambda}'_s$  で置き換え

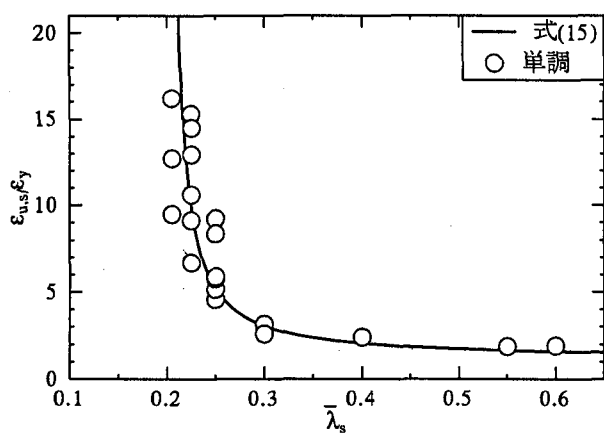
た推定式と解析結果は比較的良く一致し、ほとんどのプロットが安全側になる。

同様に、 $\bar{\lambda}'_s$  を用いて片振り、両振り繰返し載荷の結果をプロット仕直したのが図-11(d), (f) である。これらを見ると、繰返し載荷においても  $\bar{\lambda}'_s$  を用いることで推定式(15)により近くなり、ほとんどが安全側となっている。このことから、 $\alpha$  の影響を考慮した  $\bar{\lambda}'_s$  を適用すれば、載荷パターンの違いに関わらず、推定式(15)を用いることができよう。

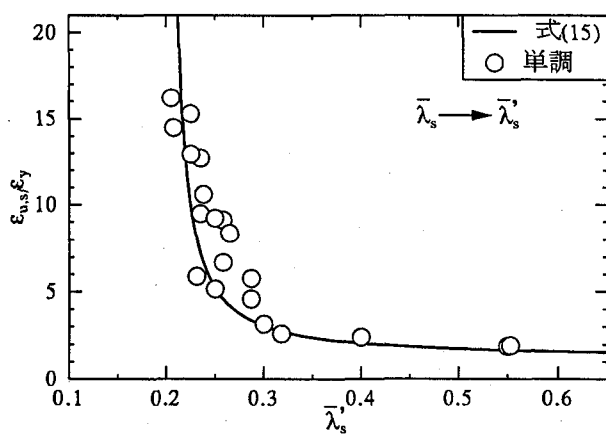
### 3.3 残留応力の影響

$\bar{\lambda}_s$  および  $R$  が比較的小さいモデル[4]とそれらが比較的大きいモデル[10]について、残留応力を与えない場合の解析を行い、残留応力のある場合との比較を行った。その結果を図-12に示す。ただし、初期たわみは考慮されている。図-12を見ると、残留応力のある場合とない場合では、第一ピークの大きさとそれが現れる点 (残留応力があるときに  $\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y \cong 2$ , ないときに  $\bar{\varepsilon}/\varepsilon_y \cong 1$ ) が異なっているが、ひずみが大きくなると両者はほとんど一致する。したがって、変形能のみを問題にする場合に残留応力の影響は載荷パターンによらずに無視しても差し支えないことが分かる。

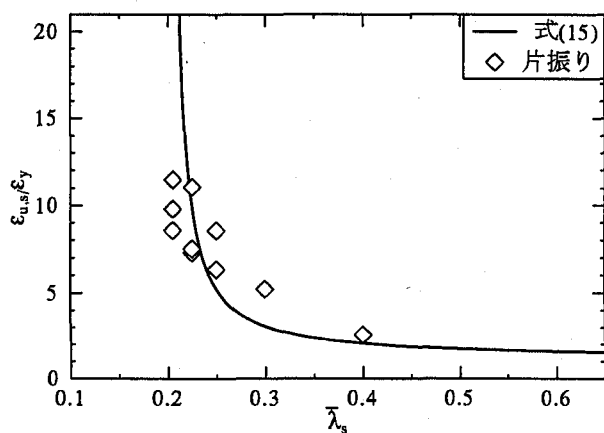




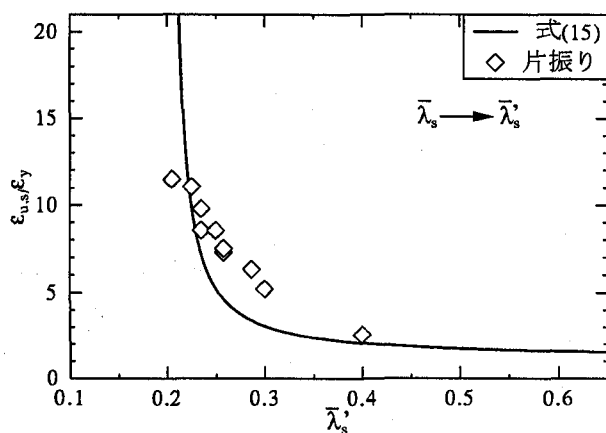
(a)



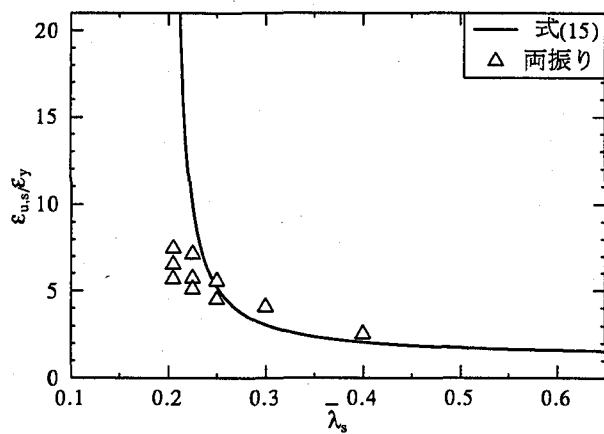
(b)



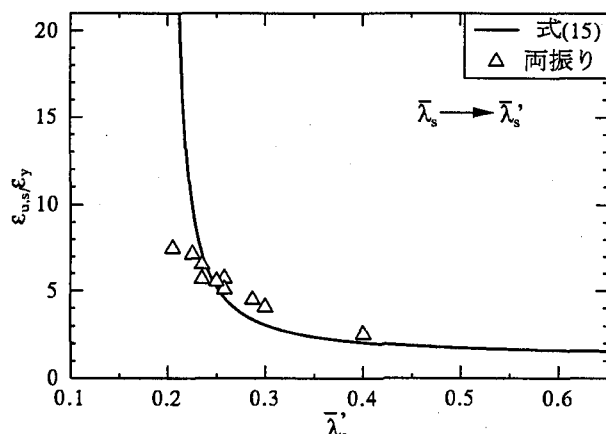
(c)



(d)

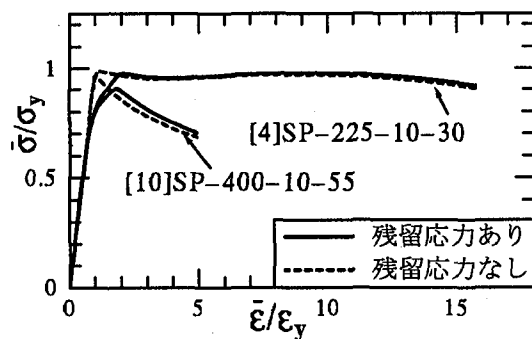


(e)

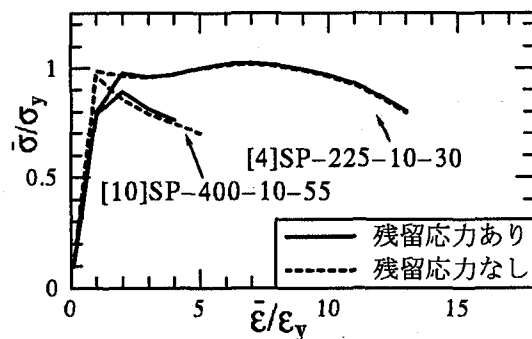


(f)

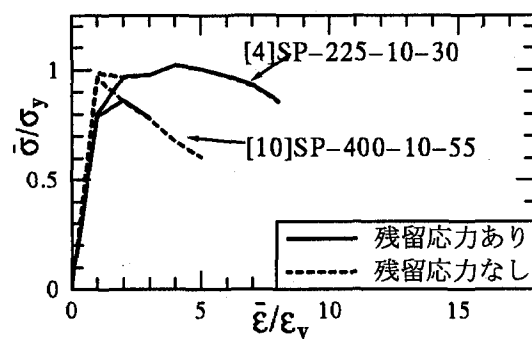
図一 11  $\varepsilon_{u,s}/\varepsilon_y - \bar{\lambda}_s$  関係と  $\varepsilon_{u,s}/\varepsilon_y - \bar{\lambda}'_s$  関係



(a) 単調

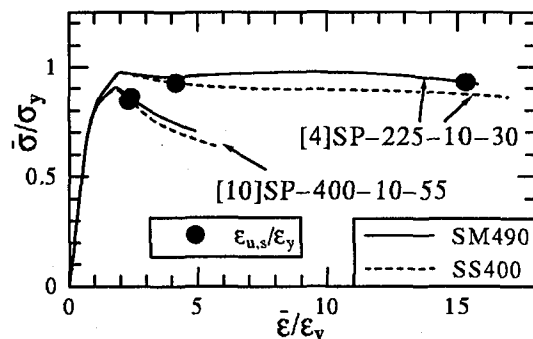


(b) 片振り

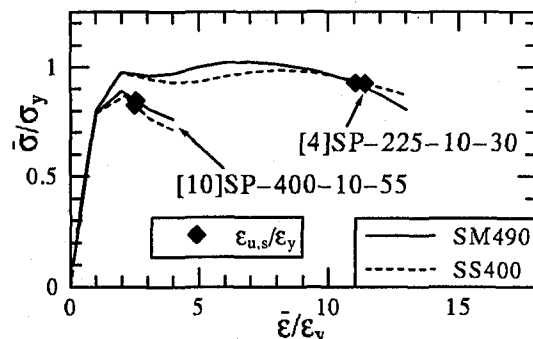


(c) 両振り

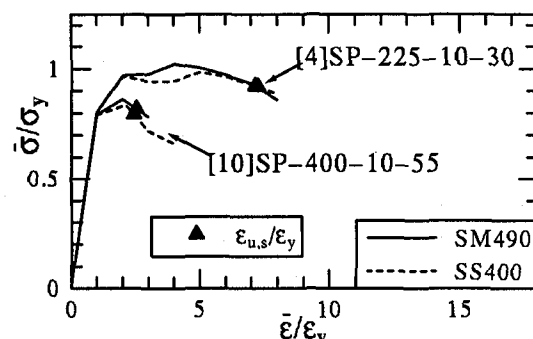
図-12 残留応力の影響



(a) 単調



(b) 片振り



(c) 両振り

図-13 鋼種の相違の影響

### 3.4 鋼種の相違の影響

$\bar{\lambda}_s$  および  $R$  が比較的小さいモデル[4]とそれらが比較的大きいモデル[10]に対して、鋼材に SS400 を用いて解析し SM490 の場合との比較を行った。その解析結果を図-13 に示す。なお、鋼材を SS400 に変える際に、モデル[4]、[10]の両モデルとも  $b, b_s$  および  $t_s$  の寸法を変えて SM490 の場合と各パラメータが等しくなるように設計した。

図-13 を見ると全般的に、第一ピーク後の応力ひずみ曲線は SM490 よりも SS400 の方が低いものとなっていることが分かる。これは、ひずみ硬化係数  $E_{st}$  が SM490 は  $E/30$ 、SS400 は  $E/40$  と SS400 の方が小さいためである。

具体的に見ると、モデル[10]については、前述のように SS400 の方が SM490 よりも強度が多少低くなって

はいるが、全載荷パターンを通してその挙動にはほとんど差がないと言える。また、モデル[4]では、片振り、両振り繰り返し載荷のグラフを見ると SS400 の方が SM490 よりも降伏棚が長いので、繰り返しひずみ硬化がより大きなひずみを受けてから始まっており、SS400 と SM490 の挙動には若干の相違があるものの、強度の劣化は同様に起こり、限界ひずみにはほとんど違いが見られない。しかし、単調載荷については限界ひずみが SS400、SM490 のそれぞれで  $\epsilon_{u,s}/\epsilon_y = 4.16$  および 15.3 と大きく異なっている。だが、SS400 の場合、 $\epsilon_{u,s}/\epsilon_y$  以後の平均応力-平均ひずみ特性を見ると、ほとんど強度の劣化は見られない。したがって、SM490 を用いた解析により得られた  $\epsilon_{u,s}/\epsilon_y$  を SS400 を用いた構造物の設計に適用しても、実挙動と比較して極端に危険側になることはないと考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、構成則に修正二曲面モデル、解析コードに構造解析用汎用プログラム ABAQUS を用いて、繰返し荷重を受ける補剛板の強度と変形能についての解析を行い、単調圧縮を受ける場合との比較を行うと共に、過去に単調圧縮載荷による解析から提案された限界ひずみ  $\varepsilon_{u,s}$  の推定式の妥当性について検討を行った。

本研究によって得られた結論をまとめると以下のようになる。

1. 補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が大きい程、また、幅厚比パラメータ  $R$  が大きい程、局部座屈が起こりやすい。逆にそれぞれが小さくなる程、局部座屈は起きにくくなる。
2. 幅厚比パラメータ  $R$  が比較的大きいと、繰返し荷重を受けても繰返しひずみ硬化が現れず、強度・変形能とも単調載荷の場合との相違はほとんどない。
3. 幅厚比パラメータ  $R$  が比較的小さいと、繰返し荷重を受けると繰返しひずみ硬化が現れ強度の増加現象が起こり、単調載荷の場合と比較して、強度はある程度増大する。ただし、最大荷重後は繰返し載荷による強度劣化のため、単調載荷に比べて強度低下は大きい。
4. 本解析の範囲内において、補剛板の強度にはアスペクト比  $\alpha$  の影響は小さい。
5. 補剛板の限界ひずみは、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  のみならず、アスペクト比  $\alpha$  にも影響される。
6. 文献 1) の補剛板の限界ひずみ  $\varepsilon_{u,s}$  の推定式 (15) は、補剛材細長比パラメータ  $\bar{\lambda}_s$  が比較的小さい範囲では、本解析の結果と多少異なるが、アスペクト比  $\alpha$  の影響を考慮して  $\bar{\lambda}_s$  を  $\bar{\lambda}_s'$  に置き換えた推定式 (15) と本解析結果は比較的良好一致する。

本研究では、補剛板を取り上げて解析を行ったが、実際には断面が 1 枚の補剛板のみで構成されるようなことは極めて稀であり、また、数枚の補剛板で構成される断面でも、全ての構成板が圧縮のみを受けるようなことは少ない。その意味では、断面全体、即ち短柱の解析から変形能を定めるほうがより適切である。そのときには、圧縮と曲げを受ける箱形断面短柱においてウェブの圧縮フランジに対する拘束効果があるので、断面全体の変形能は単独補剛板のそれより大きくなる。以上のことから、補剛板の解析値が変形能の推定式を若干下回っているところ (図-11 参照) があるが、式 (15) をそのまま用いることも考えられる。ただし、これについては今後さらなる検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H.P.Mamaghani, 葛漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, 69-82, 1995 年 10 月。
- 2) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc: ABAQUS User's Manual, Version 5.4, 1995.
- 3) 坂野茂, 宇佐美勉, 水野英二: 修正二曲面モデルによる板要素の繰返し圧縮・引張弾塑性有限変位解析, 土木学会論文集, No.525/I-33, 1-15, 1995 年 10 月。
- 4) 福本 啓士編: 座屈設計ガイドライン, 技報堂, 1987.
- 5) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG (主査: 宇佐美勉): 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.
- 6) 宇佐美勉, 水谷慎吾, 青木徹彦, 伊藤義人, 安波博道: 補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.105-117, 1992.
- 7) 北田俊行, 中井博, 國廣昌史, 原田直樹: 圧縮と曲げを受ける無補剛・補剛薄肉箱形断面の終局強度相関曲線に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.331-342, 1994.
- 8) 宇佐美勉: 鋼平面ラーメン構造物の極限強度評価式の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.79 ~ 88, 1990.

(1998 年 9 月 18 日 受付)