

# 面内曲げを受ける高性能鋼板の ダクティリティー確保のための機械的性質

丹羽量久<sup>1</sup>・三上市藏<sup>2</sup>・宮崎裕司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>工博 日本電子計算(株) 科学技術事業部 大阪建設技術部 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11)

<sup>2</sup>工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

<sup>3</sup>関西大学大学院 博士課程前期課程 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

In order to secure the ductility of thin-walled steel structures, the high performance steels may practically be used for the important plated elements in lieu of the ordinary steels. In this paper, the behavior of the high performance steel plates with aspect ratio of 2/3 under in-plane bending is parametrically examined for various width-thickness ratios by the elasto-plastic finite displacement analyses using MARC. The required values to efficiently possess ductility are cleared about the yield plateau length and the strain-hardening gradient for the high performance steel plates with aspect ratio of 2/3 under in-plane bending.

**Key Words :** High performance steel, yield plateau length, strain-hardening gradient, ductility, in-plane bending

## 1. まえがき

都市構造物の耐震設計の方針は、巨大地震が起きても、人命の安全およびライフライン機能の確保のために、構造物の局部的損傷は許しても崩壊させてはならない。このため、鋼構造物のダクティリティーを確保することが重要な要求性能となる。

鋼構造物では、ダクティリティーを確保する方法として鋼材の機械的性質（降伏比、降伏棚の長さ、一様伸び、ひずみ硬化勾配）を利用する方法が議論されている<sup>1)-8)</sup>。これまで、鋼構造物のダクティリティーに関する研究の多くは箱型<sup>9)10)</sup>、I型<sup>11)</sup>、H型<sup>8)</sup>などの部材を対象としている。一方、構成板要素を取り扱っている研究は圧縮板を対象としたものがほとんどで、圧縮以外ではせん断を対象としたもの<sup>12)</sup>がみられるだけである。

著者らは、機械的性質を制御できる高性能鋼<sup>13)</sup>を取り上げ、一方向圧縮を受ける矩形鋼板がダクティリティーを確保できる降伏棚の長さ、ひずみ硬化勾配の限界値を明らかにした<sup>14)15)</sup>。

構造部材としてのダクティリティーを確保するためには、圧縮フランジと同等に腹板もダクティリティーを有していることが望ましい。

本研究では、面内曲げを受ける高性能鋼板を取り上げて、MARCによる弾塑性有限変位解析を実施する。ただし、解析対象はダクティリティーの代表的な特性をとらえるため、弾性座屈理論により座屈係数が最小となる縦横比2/3<sup>16)</sup>の鋼板とする。まず、

解析モデルの初期たわみ波形がダクティリティーに及ぼす影響を調べる。次に、高性能鋼材の機械的性質（降伏棚の長さ、ひずみ硬化勾配）が鋼板の終局状態から劣化域に至る挙動に与える影響について明らかにする。最後にダクティリティーを確保するために必要な、それら2つの機械的性質の限界値を示す。

## 2. 面内曲げを受ける鋼板

面内曲げモーメント  $M$  を受ける高性能鋼板の終局状態から劣化域に至る挙動は、汎用有限要素解析パッケージMARC<sup>17)</sup>を用いた弾塑性有限変位解析により求める<sup>15)</sup>。高性能鋼材はSS400級の降伏強度  $\sigma_y = 240 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数  $E = 205800 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.3$  とする<sup>15)</sup>。この鋼材の応力-ひずみ関係を図-1に示す<sup>15)</sup>。

### (1) 解析モデル

本論文では、図-2 に示すような周辺単純支持された無補剛高性能鋼板を扱う。ただし、縦横比  $\alpha$  は弾性座屈理論において座屈係数  $k$  が最小 ( $k = 23.9$ ) となる 2/3<sup>16)</sup> とし、板幅  $b = 500 \text{ mm}$  とする。

面内曲げ  $M$  の導入は、載荷辺中央に  $z$  軸回りの強制回転角  $\theta_c$  として変位増分法で与える。すなわち、載荷辺上の節点  $i$  ( $x = \pm a/2$ ) は、次の条件式 (1)、(2) が満足するような強制変位が与えられるこ

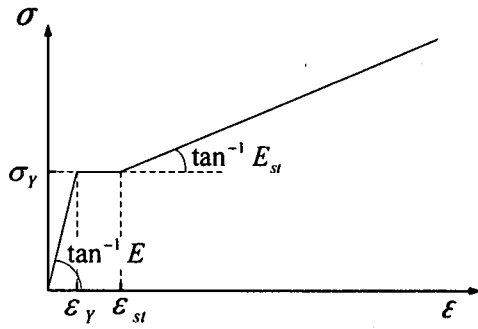


図-1 高性能鋼材の応力-ひずみ関係

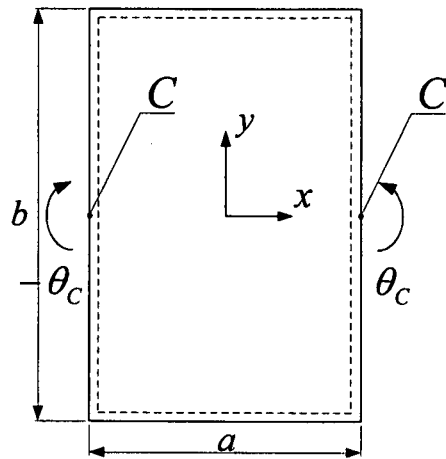


図-2 面内曲げを受ける鋼板

とになる。

$$u_i = u_c + \frac{b_i}{2} \cdot \theta_c \quad \left( \approx u_c + \frac{b_i}{2} \sin \theta_c \right) \quad (1)$$

$$\theta_i = \theta_c \quad (2)$$

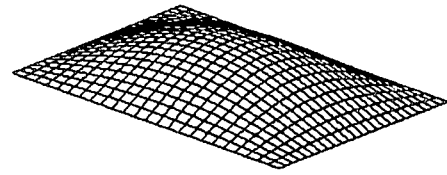
ここに、 $u_i$ 、 $\theta_i$ はそれぞれ荷重辺上の節点*i*におけるx軸方向変位、z軸回り回転角を示し、添字Cは強制回転角 $\theta_c$ が導入される節点( $x = \pm a/2$ ,  $y = 0$ )を表すものとする。 $b_i/2$ は節点*i*から節点Cまでの距離を表している。なお、解析モデルが不安定にならないように面内の境界条件として節点Cを単純支持する。

## (2) 初期たわみ

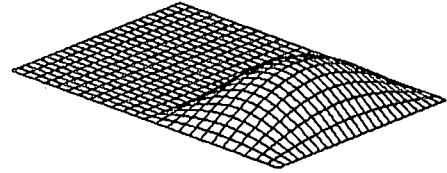
初期たわみは終局強度に不利な影響を及ぼすとされている<sup>18)19)</sup>。ここでは、初期たわみ波形がダクティリティに及ぼす影響について調べるため、図-3に示す4つのパターンについて検討する。ここに、最大初期たわみ $w_{0,max}$ は $b/150$ とする。

### a) パターンA

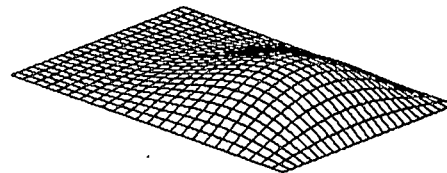
製作上に起こりうる波形に似かよった、圧縮板の座屈モードと同じ波形、



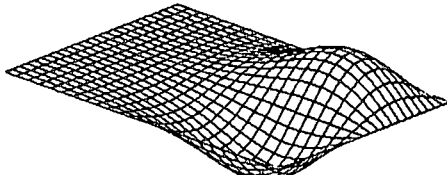
(a) パターンA



(b) パターンB



(c) パターンC



(d) パターンD

図-3 検討する初期たわみ波形

$$w_0(x, y) = w_{0,max} \cos \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi y}{b} \quad (3)$$

### b) パターンB

y方向に2半波形を導入すると、曲げモーメントMが大きくなるにつれて引張側の面外変形が減少しダクティリティに対して有利に働く可能性がある。

引張側の初期たわみを考慮しない波形、

$$w_0(x, y) = w_{0,max} \cos \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b} : y \geq 0 \quad (4a)$$

$$w_0(x, y) = 0 : y < 0 \quad (4b)$$

### c) パターンC

弾性座屈固有値解析より求めた固有1次モード。

### d) パターンD

弾性座屈固有値解析より求めた固有2次モード。

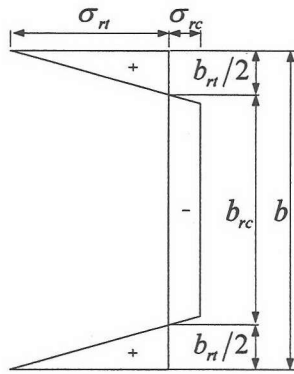


図-4 鋼板の荷重方向残留応力分布形状

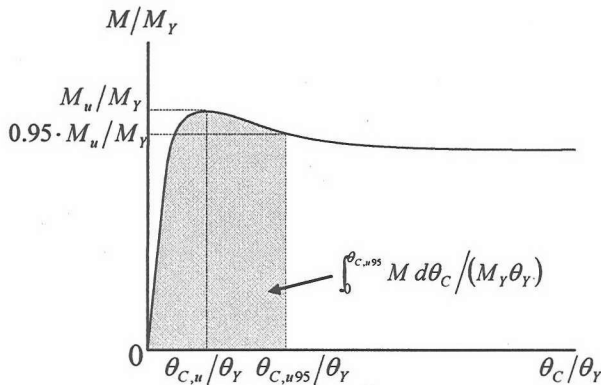


図-5 指標の定義

### (3) 残留応力

荷重方向に導入する残留応力は図-4に示すように分布させる。この分布形状は自己平衡状態が成立するように決定する<sup>15)</sup>。引張残留応力の最大値 $\sigma_n$ は引張残留応力の分布幅と同時に終局強度に影響を及ぼすとされている<sup>18)-20)</sup>。

本研究では、圧縮残留応力 $\sigma_{rc}$ がダクティリティーに与える影響が不明であるため、 $\sigma_{rc} = -0.2\sigma_Y, -0.3\sigma_Y, -0.4\sigma_Y$ の3ケースについて検討する。

### (4) 要素分割

面内曲げモーメントを受ける鋼板の終局および終局以後の劣化域の挙動を十分な精度で求めることができる要素分割数を決定する。検討モデルには初期たわみ、残留応力ともに考慮する。ここでは、強制回転角が $\theta_C = 20\theta_Y$ に達したときの曲げモーメント $M/M_Y$ を使って評価する。ここに、 $M_Y$ と $\theta_Y$ はそれぞれ圧縮縁応力が $\sigma_Y$ に達したときの曲げモーメントと回転角である。x方向の分割数とy方向の分割数を $16 \times 20, 20 \times 24, 24 \times 24$ と変化させ、外挿公式<sup>21)</sup>を用いて無限分割数に対する解を推定した。推定解との誤差が2%未満となる $24 \times 24$ を採用した。

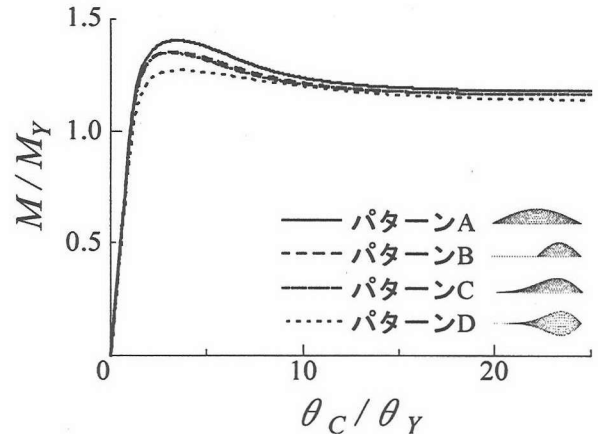


図-6 初期たわみ波形の検討

## 3. 解析モデルの初期不整

終局状態から劣化域に至る挙動は、解析により得られた節点反力モーメントから計算した $M$ と回転角 $\theta_C$ から得られる $M/M_Y - \theta_C/\theta_Y$ 関係により評価する。

降伏棚の長さおよびひずみ硬化勾配を制御しても終局強度はほとんど変化しないが、初期不整により強度に変化が現れる<sup>18)19)</sup>場合がある。強度が高くてもダクティリティーの低い要素とダクティリティーが高くても強度の低い要素が同程度のタフネスを有する場合がある<sup>22)</sup>。したがって、異なる終局強度をもつ鋼板どうしのダクティリティーを比較するためにはタフネスを用いるのが妥当である<sup>22)</sup>。

本章では終局強度に大きな違いがある場合はタフネスをもって評価することにする。終局強度、ダクティリティー、タフネスの評価指標は、図-5に示すように、それぞれ $M_u/M_Y, \theta_{C,u}/\theta_Y,$

$\int_0^{\theta_{C,0.95}} M d\theta_C / (M_Y \theta_Y)$ と定義する。ここに、 $M_u$ は終局曲げモーメントで、 $\theta_{C,u}$ と $\theta_{C,0.95}$ はそれぞれ $M_u, 0.95 \cdot M_u$ のときの回転角を表す。

### (1) 初期たわみ波形の影響

幅厚比パラメータ $R = b/t \cdot \sqrt{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \sigma_Y / 23.9 \pi^2 E$ が0.4、降伏棚の長さ $\epsilon_{si} / \epsilon_Y - 1$ が4、ひずみ硬化勾配 $E_{si} / E$ が0.015の有する高性能鋼板に対して、初期たわみ波形を前述の4つのパターンに変化させ、それぞれ弾塑性有限変位解析を行った結果を図-6に示す。また、これより得られた終局強度、ダクティリティー、タフネスの値を表-1に示す。

まず、終局強度に着目すると、図-6と表-1より、パターンAの初期たわみ波形を導入したモデルの終局強度が最大となり、パターンDの初期たわみ波形を導入したモデルの終局強度が最小となることわかる。これは、導入した最大初期たわみ $w_{0,max}$ は板幅 $b$ で無次元化しているために、荷重方向に2半波形を考慮しているパターンDは荷重方向の曲

表-1 終局強度，ダクティリティ，タフネス

初期たわみ 波形パターン	終局強度 $M_u/M_y$	ダクティリティ $\theta_{C,95}/\theta_y$	タフネス $\int_0^{\theta_{C,95}} M d\theta_C / (M_y \theta_y)$
パターンA	1.41	6.17	7.48
パターンB	1.36	6.38	7.52
パターンC	1.35	6.09	7.12
パターンD	1.27	9.03	10.4

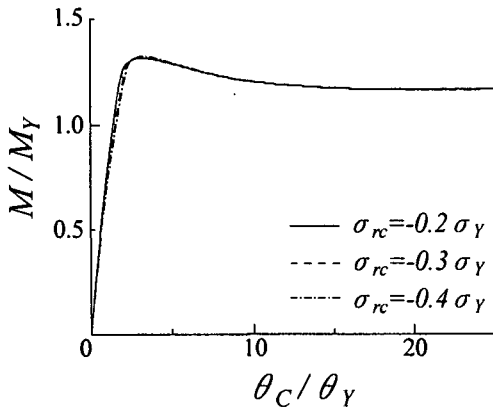


図-7 残留応力の影響

率が他のモデルに比べて大きくなるためと考えられる。

次に、ダクティリティに注目すると、パターンDが最大であり、パターンA,B,Cは低い。これは、パターンDにおいては、終局強度に達したのちの面外たわみの進行が他のモデルよりもかなり遅いため、ダクティリティが高くなっているものと考えられる。

最後に、タフネスに注目すると、パターンCが最も低いタフネスを表していることがわかる。

したがって、本研究では、弾性座屈固有値解析により得られる固有1次モードの初期たわみ波形（パターンC）を導入したモデルを採用する。

将来、曲げ・せん断などの組み合わせ荷重を受けるような場合、ダクティリティに最も不利となるような初期たわみ波形を容易に選定することができる。ただし、縦横比 $\alpha$ が大きくなると最小座屈荷重に対する固有モード形状が変化するため別途検討する必要がある。

## (2) 残留応力の影響

幅厚比パラメータ $R=0.4$ ，降伏棚の長さ $\varepsilon_{si}/\varepsilon_y - 1 = 4$ ，ひずみ硬化勾配 $E_{si}/E = 0.015$ の高性能鋼板を取り上げ，圧縮残留応力 $\sigma_{rc}$ を $\sigma_{rc} = -0.2\sigma_y$ ， $-0.3\sigma_y$ ， $-0.4\sigma_y$ と変化させたモデルの解析結果を図-7に示す。図よりわかるように圧縮残留応力の違いは終局強度，ダクティリティにもほとんど影響を与えない。これより，本研究では文献15)と同様，圧縮残留応力を $\sigma_{rc} = -0.2\sigma_y$ としてパラメトリック解析を行うこととする。

## 4. ダクティリティの評価指標

構造部材として考えるとき，腹板は圧縮フランジと同等のダクティリティを備えているのが望ましい。圧縮板では，ダクティリティ確保の条件として，荷重辺の平均圧縮ひずみ $\bar{\varepsilon}$ が降伏ひずみ $\varepsilon_y$ の20倍に達するまで，平均圧縮応力 $\bar{\sigma}$ が終局圧縮応力 $\bar{\sigma}_u$ の95%より低下しないことである<sup>15)</sup>。

本研究では，純曲げを受ける腹板の圧縮縁ひずみが $20\varepsilon_y$ <sup>23)</sup>のとき，つまり荷重節点の回転角 $\theta_C$ が降伏回転角 $\theta_y$ の20倍に達したとき，面内曲げモーメント $M$ が最大曲げモーメント $M_u$ の95%以上であればダクティリティを確保できるとみなす。

## 5. ダクティリティと機械的性質の関係

ここでは，幅厚比パラメータ $R=0.4$ の鋼板を取り上げ，高性能鋼材の降伏棚の長さ $\varepsilon_{si}/\varepsilon_y - 1$ とひずみ硬化勾配 $E_{si}/E$ が劣化域挙動に与える影響について示す。

### (1) 降伏棚の長さ とダクティリティの関係

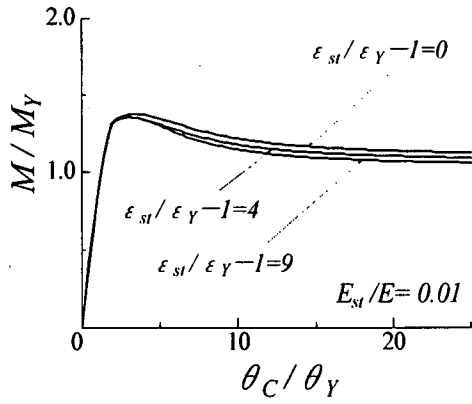
図-8(a)，(b)はそれぞれひずみ硬化勾配 $E_{si}/E$ を0.01，0.03とした解析結果で，降伏棚の長さ $\varepsilon_{si}/\varepsilon_y - 1$ を0，4，9に変化させたときの $M/M_y - \theta_C/\theta_y$ 関係を表している。

図からわかるように，降伏棚が存在しない( $\varepsilon_{si}/\varepsilon_y - 1 = 0$ )ケースでは，降伏後すぐにひずみ硬化域に入るため終局強度が大きい。降伏棚が存在するケースでは，降伏直後のひずみ硬化は起こらないので降伏強度により終局強度が決定される。また，終局に達した後，一旦 $M/M_y$ が低下する。すなわち，降伏棚の長さは終局後の $M/M_y$ の低下率に影響を及ぼすことが分かる。

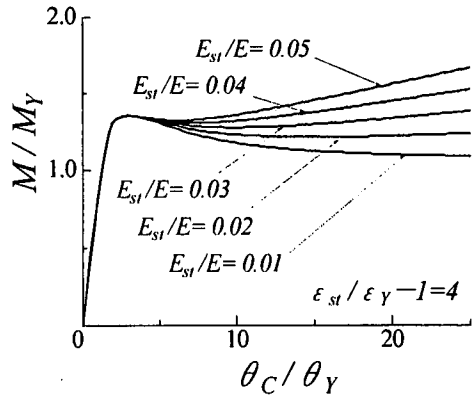
### (2) ひずみ硬化勾配とダクティリティの関係

図-9(a)，(b)はそれぞれ降伏棚の長さ $\varepsilon_{si}/\varepsilon_y - 1$ を4，9とした解析結果で，ひずみ硬化勾配 $E_{si}/E$ を0.01～0.05と変化させたときの $M/M_y - \theta_C/\theta_y$ 関係を表している。

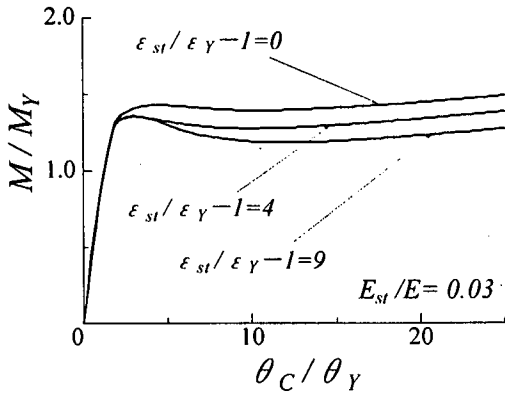
図からわかるように，ひずみ硬化勾配は終局強度に



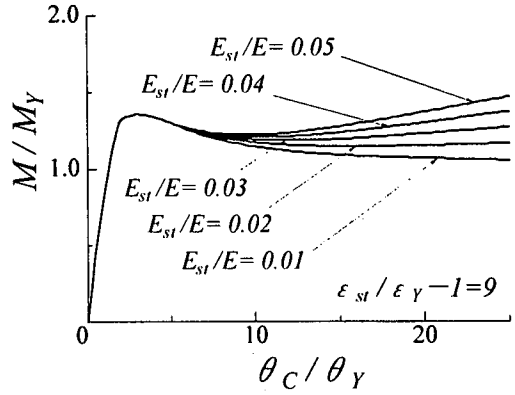
(a)  $E_{st}/E = 0.01$



(a)  $\epsilon_{st}/\epsilon_Y - 1 = 4$



(b)  $E_{st}/E = 0.03$



(b)  $\epsilon_{st}/\epsilon_Y - 1 = 9$

図-8 降伏棚の長さの影響

図-9 ひずみ硬化勾配の影響

影響を与えない。ひずみ硬化勾配が小さいケースでは、終局後  $M/M_Y$  は低下し続ける。一方、ひずみ硬化勾配が大きいケースでは、ひずみ硬化勾配が大きいほど  $M/M_Y$  は増加している。すなわち、ひずみ硬化勾配は一旦劣化した後の  $M/M_Y$  の増加率に影響を与える。

以上のことより、ダクティリティを確保できる機械的性質として、降伏棚の長さを短くするか、ひずみ硬化勾配を大きくすればよいことが分かる。しかし、降伏棚の長さが長い場合は、ひずみ硬化勾配を大きくしてもダクティリティを確保することは困難となる。

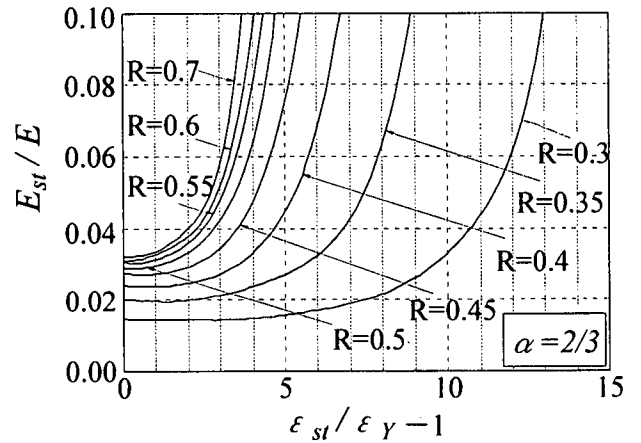


図-10 機械的性質の限界値

## 6. ダクティリティを確保できる高性能鋼材の機械的性質

SS400鋼材の応力-ひずみ関係<sup>24)</sup>を用いて幅厚比パラメータ  $R$  を変化させたパラメトリック解析の結果、面内曲げを受ける場合、 $R \leq 0.28$  の範囲では普通鋼のままでダクティリティを確保できることがわかった。そこで、 $R = 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7$  の鋼板に対してダクティリ

ティを確保するために必要な高性能鋼材の降伏棚の長さとしずみ硬化勾配の限界値を求めることにする。

得られた降伏棚の長さとしずみ硬化勾配の限界値を図-10に示す。図中の曲線は限界曲線であり<sup>11)</sup>、この曲線より上側の領域の機械的性質を有することによりダクティリティを確保することができる。 $R$  が小さいほどダクティリティを確保できる降伏棚の長さとしずみ硬化勾配の選択肢が多い。図か

ら、降伏棚の長さが短いときはひずみ硬化勾配が小さくてもダクティリティーを確保できるが、降伏棚の長さが長くなるにつれひずみ硬化勾配を大きく設定する必要があることがわかる。

## 7. あとがき

面内曲げを受ける縦横比2/3の高性能鋼板を対象とし、汎用有限要素解析パッケージMARCを用いて弾塑性有限変位解析を行った。第一に、解析モデルに導入すべき適切な初期たわみ波形について検討した。弾性座屈固有値解析により得られた固有1次モードを導入すればダクティリティーに最も不利であることがわかった。第二に、高性能鋼材の機械的性質（降伏棚の長さ、ひずみ硬化勾配）がダクティリティーに与える影響を調べ、圧縮板の場合と同様、ダクティリティーを確保するためには降伏棚の長さを短くするかひずみ硬化勾配を大きくすればよいことがわかった。ただし、降伏棚の長さが長い場合は、ひずみ硬化勾配をかなり大きな値に設定する必要がある。第三に、縦横比2/3を有する鋼板においてダクティリティーを確保できる機械的性質の限界値を図に明示した。

本研究では、面内曲げを受ける鋼板の縦横比は、初期不整がダクティリティーに及ぼす特徴を明らかにするため座屈係数が最小となる2/3という値に固定したが、今後、種々の縦横比をもつ高性能鋼板に対してダクティリティーを確保できる機械的性質を明らかにする。

**謝辞：**本研究を遂行するに当たり、(社)日本鉄鋼連盟の平成13年度土木鋼構造教育助成金の補助を受けた。また、高性能鋼に関する情報は新日本製鐵(株)から頂いた。ここに記して、深謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) Earls, C.J.: Influence of material effects on structural ductility of compact I-shaped beams, *Journal of the Structural Engineering*, vol.126, No.11, pp.1268-1278, ASCE, November, 2000.
- 2) 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*、土木学会、Vol.39A, pp.115-124, 1993.3.
- 3) 河上 守、増田陳紀：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、高性能・高機能鋼材の橋梁への利用研究報告、次世代土木鋼構造研究小委員会報告書、日本鋼構造協会、pp.224-233, 2000.3.
- 4) 奈良 敬、村上茂之、大西陽一：局部座屈が鋼製橋脚の弾塑性動的挙動に及ぼす影響、第56回年次学術講演会講演概要集、土木学会、1-A285, pp.570-571, 2001.10.
- 5) 加藤 勉：建築用鋼材の降伏比について、*鉄と鋼*、Vol.74, No.6, pp.11-21, 1986.6.
- 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、土木学会、Vol.36A, pp.125-132, 1993.3.
- 7) 豊田政男、小井 守、萩原行人、瀬戸厚司：骨組溶接構造体の変形能からみた鋼材の降伏比・一樣伸びのあり方、*溶接学会論文集*、Vol.8, No.1, pp.119-125, 1990.2.
- 8) 小野徹郎、吉田文久：H型断面短中の変形性能に及ぼす素材特性の影響に関する研究 その1、*日本建築学会構造系論文集*、第503号, pp.125-129, 1998.1.
- 9) 鈴木森晶、宇佐美勉：軸圧縮力と横力を受ける箱形断面鋼片持柱の強度と変形能に関する解析的研究、*構造工学論文集*、土木学会、Vol.41A, pp.265-276, 1995.3.
- 10) 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*、土木学会、No.507/I-30, pp.99-108, 1995.1.
- 11) 福本秀士、上野谷実、中村雅樹、小林泰男：繰り返しせん断を受けるプレートガーダーの強度と変形能、*構造工学論文集*、土木学会、Vol.46A, pp.143-150, 2000.3.
- 12) 葛西 昭、渡辺智彦、天野麻衣、宇佐美勉：繰り返しせん断力を受ける補剛板の強度と変形能評価、*構造工学論文集*、土木学会、Vol.47A, pp.761-770, 2001.3.
- 13) 鋼材倶楽部 橋梁研究会：高性能鋼の概要（橋梁向け）、1998.
- 14) 三上市藏、丹羽量久、宮西 敦：高性能鋼を用いた圧縮板の劣化域におけるダクティリティーと鋼材の機械的性質について、第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム、土木学会、pp.87-90, 2000.3.
- 15) 丹羽量久、三上市藏、宮崎裕司：一方向圧縮を受ける高性能鋼板のダクティリティーと機械的性質、*鋼構造年次論文報告集*、日本鋼構造協会、Vol.9, pp.105-110, 2001.11.
- 16) Timoshenko, S. and Gere, J.: *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1961.
- 17) MARC Volume A～D : Version K7, MARC Analysis Research Corporation, 1997.8.
- 18) Watanabe, E.: A Study on the Catastrophe and Static Load-carrying Capacity of Structures, Doctorial Dissertaion, Kyoto University, 1985.
- 19) 福本秀士編：座屈設計ガイドライン、土木学会、1987.
- 20) 奈良 敬、小島治雄、津田 真、小松定夫：面内曲げと圧縮を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究、*土木学会論文集*、No.386/I-8, pp.275-283, 1987.10.
- 21) Mikami, I., and Yonezawa, H.: Extrapolation Technique for Finite Difference and Finite Element Solutions, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.25, Univ. of Tokyo Press, pp.567-575, 1977.
- 22) 三上市藏、辻 省悟、中野雅史、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ーと幅厚比、*構造工学論文集*、土木学会、Vol. 39A, pp. 37-50, 1993. 3.
- 23) 土木鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会、日本鋼構造協会次世代土木鋼構造物研究特別委員会・公共の耐震設計小委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化、2000.4.
- 24) 奈良 敬、出口恭司、小松定夫：ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究、*構造工学論文集*、土木学会、Vol.33A, pp.141-150, 1987.3.