

## 応力ひずみ関係に基づくステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法

### AN EVALUATION METHOD FOR ULTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH OF STAINLESS STEEL PLATES BASED ON STRESS-STRAIN DIAGRAM

宮寄 靖大\*

奈良 敬\*\*

Yasuhiro MIYAZAKI\*

Satoshi NARA\*\*

**ABSTRACT** This paper proposes a method for predicting precisely ultimate strength and displacement of stainless steel plates under uniaxial compression. Based on stress-strain diagrams of stainless steels obtained by coupon tests, the method consists of two classified parts. At the first part, the ultimate strength is estimated by plate slenderness and proposed constants of each stainless steel in the region of elastic buckling. In the region of apparent difference of the stress-strain diagrams between stainless steel and mild steel, the ultimate strength is calculated by predicted ultimate displacement and stress-strain diagrams. The proposed method is independent of proof stress which is 0.1% or 0.2%, because of a proposed conversion factor.

Key words: ステンレス鋼, 終局強度, ひずみ硬化, 変形性能, 幅厚比  
Stainless Steel, Ultimate Strength, Strain Hardening, Ductility, Plate Slenderness

#### 1. 緒論

ステンレス鋼は、欧米諸国にて構造材料として活用するための設計規準[1], [2]が整備され、道路橋や歩道橋の主部材としての使用実績[3], [4]がある。欧州規格[1]では、オーステナイト系、フェライト系、二相系ステンレス鋼を扱っている。我が国では、建築構造用ステンレス鋼[5]が JIS で規格化されており、建築構造物の主部材に使用されている。一方、土木構造物については、グレーチング、高欄、水門ゲートなどへの活用が見られ、主に構造物の腐食に対する被覆材として用いられている。長期間自然環境に曝される土木構造物に対して、耐食性が優れるステンレス鋼を主部材に活用することは、維持管理に伴う費用などを軽減することが期待できる。

---

#### \*準会員

博士（工学） 長岡工業高等専門学校  
環境都市工学科

(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

#### \*\*第2種正会員

工博 大阪大学大学院工学研究科  
地球総合工学専攻

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

ステンレス鋼を圧縮フランジに利用する研究については、有住ら[6]が自由突出板の圧縮強度特性を実験と数値計算によって明らかにしている。また、Gardner ら[7]およびMahmud ら[8]は、欧州で規定されているステンレス鋼板の強度評価法[1]を検証することを目的として、種々の荷重を受けるステンレス鋼板の実験および数値計算を実施し、それらの結果で得られた終局強度と設計により得られる終局強度の比較を行っている。その結果として、ステンレス鋼板に対する終局強度評価法は、構造用炭素鋼板の終局強度評価法に基づいているため、ステンレス鋼が持つ、優れたひずみ硬化特性を有効に活用できないことを指摘している。このため、Mahmud ら[8]は、板の終局強度が材料強度と同程度の圧縮板を対象に、短柱圧縮試験の結果により得られた終局強度時平均圧縮ひずみの予測式を用いてその値を求め、予測したひずみをステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させることで、板の終局強度を算出する設計法を提案している。このようなステンレス鋼の材料特性を有効に活用した終局強度評価法は提案されているものの、既往のステンレス鋼部材の設計法は、構造用炭素鋼と同様の手法が使用されている。

著者らは、これまでに圧縮力を受けるステンレ

表 1 対象とするステンレス鋼の化学成分 (%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00–10.50	18.00–20.00	—	—
SUS304N2	0.08	1.00	2.50	0.045	0.030	7.50–10.50	18.00–20.00	—	0.15–0.30
SUS316	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	10.00–14.00	16.00–18.00	2.00–3.00	—
SUS410L	0.03	1.00	1.00	0.040	0.030	—	11.00–13.50	—	—
SUS329J3L	0.03	1.00	2.00	0.040	0.030	4.50–6.50	21.00–24.00	2.50–3.50	0.08–0.20

表 2 対象とするステンレス鋼の機械的性質

Grade	Young's modulus $E(\text{GPa})$	0.1% proof stress $\sigma_{0.1}(\text{MPa})$	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}(\text{MPa})$	ultimate tensile stress $\sigma_u(\text{MPa})$	elongation (%)	yield ratio $\sigma_{0.2}/\sigma_u$
SUS304	157	236	261	697	70.2	0.374
SUS304N2	173	360	402	723	66.5	0.557
SUS316	174	230	254	561	75.9	0.452
SUS410L	204	346	362	487	38.6	0.744
SUS329J3L	202	485	533	749	47.9	0.712

ス鋼板の終局強度が、ステンレス鋼の規格強度にほぼ対応関係にある構造用炭素鋼板と同等以上となることを明らかにしてきた[9], [10]. また、ステンレス鋼板の初期不整の大きさは、構造用炭素鋼板に導入される最大許容値を考慮することで、十分となることを実験により確認している[11]. そこで本研究では、圧縮力を受けるステンレス鋼板を対象とした終局強度評価法を提案することを目的とする. まず、ステンレス鋼圧縮板の終局強度を評価するため、基本となるステンレス鋼の材料特性について、材料試験により得られた結果を述べる. つぎに、著者ら[9], [10]がこれまでに明らかにしてきた数値計算によるステンレス鋼周辺単純支持板および自由突出板の圧縮強度特性を精査する. 最後に、ステンレス鋼の特徴であるひずみ硬化を有効に活用したステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法を提案する. このような強度評価法は、応力ひずみ関係に依存する. 本研究では、限られた鋼種ならびに試験体から切り出した材料試験片によるステンレス鋼の応力ひずみ関係を用いていることを言及しておく.

## 2. ステンレス鋼の材料特性

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316, SUS304N2, フェライト系ステンレス鋼 SUS410L および二相系ステンレス鋼 SUS329J3L を対象とする. 表 1 に、JIS に記載の対象とするステンレス鋼の化学成分を示す.

表 2 は、引張試験により得られたステンレス鋼の機械的性質を示す. 表 2 より、対象とするオーステナイト系ステンレス鋼は、フェライト系および二相系ステンレス鋼に比べてヤング係数  $E$  が小さいものの、伸びが大きく、降伏比が小さいため、

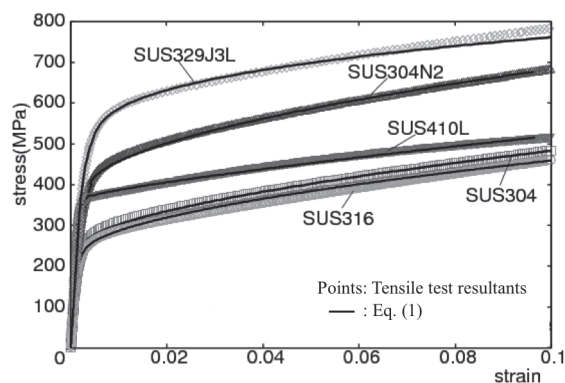


図 1 ステンレス鋼の応力ひずみ関係

粘り強い材料であることがわかる.

図 1 は、対象とするステンレス鋼の引張試験により得られた応力ひずみ関係を点で示す. 図中の実線は、式 (1) の 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線[9]を用いたステンレス鋼の応力ひずみ関係を示している.

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & \text{if } 0 \leq \sigma < \sigma_P \\ \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_A & \text{if } \sigma_P \leq \sigma < \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_B + \varepsilon_C & \text{if } \sigma_{0.2} \leq \sigma \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  はひずみ、 $\sigma$  は応力、 $\sigma_P$  は比例限界応力 ( $=\sigma_{0.01}$ )、 $\sigma_{0.2}$  は 0.2% 耐力を表し、 $\varepsilon_A$  および  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon_C$  は、それぞれ式(2)および式(3),式(4)に示す通りである.

$$\varepsilon_A = 0.002 \frac{\sigma_P^n - \sigma_{0.2}^n}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_P^n} \quad (2)$$

$$\varepsilon_B = \frac{0.002n\sigma_{0.2}^{n-1}}{\sigma_{0.2}^n - \sigma_P^n} \sigma + \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \quad (3)$$

表 3 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線に含まれる材料定数

Grade	0.01% proof		material parameter				
	stress	$n$	$m$	$\varepsilon_{0.2}$	$E_{0.2}$	$\varepsilon_{10}$	$\sigma_{10}$
	$\sigma_{0.01}(\text{MPa})$						
SUS304	143	2.88	1.67	0.00350	29700	0.100	481
SUS304N2	253	3.93	1.79	0.00415	34400	0.100	680
SUS316	162	6.97	1.74	0.00349	16500	0.0823	457
SUS410L	306	15.2	1.25	0.00382	11400	0.101	523
SUS329J3L	346	7.01	2.52	0.00469	30900	0.0597	729

$$\varepsilon_C = \left( \varepsilon_{10} - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}} \right)^m \quad (4)$$

ここで,  $m, n$  は材料定数,  $\varepsilon_{0.2}$  は 0.2%耐力時のひずみ,  $E_{0.2}$  は 0.2%耐力時の接線弾性係数,  $\varepsilon_{10}$  は参照ひずみ(10%ひずみ),  $\sigma_{10}$  は参照応力( $\varepsilon_{10}$  に相当する応力)を意味している. また, 表 3 は, 引張り試験結果から求めた式(1)から式(4)に含まれる材料パラメータを示す. 図 1 における式(1)を表す実線は, 点で示す引張り試験結果を精度良く表現できることが確認できる. これより, ステンレス鋼の応力ひずみ関係について, 本研究の数値計算では, 式(1)から式(4)を用いることとする.

### 3. ステンレス鋼圧縮板

#### 3.1 周辺単純支持板

図 2 は, 本研究で対象とする圧縮力を受ける周辺単純支持板を示す. 周辺単純支持板の形状は, 次式で示す幅厚比パラメータ  $\bar{\lambda}_p$  により決定する.

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5)$$

ここで,  $\sigma_F$  は材料強度(0.1%耐力  $\sigma_{0.1}$  または 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$ ),  $\nu$  はポアソン比( $=0.3$ ),  $k$  は板の座屈係数( $k=4.0$ )である.  $\bar{\lambda}_p$  は, 板幅  $b$  を固定し, 板厚  $t$  を変化させて決定する. また, 板のアスペクト比  $\alpha(=a/b)$  は 1.0 とする. 初期不整は, 周辺単純支持板および自由突出板ともに, ステンレス鋼の計測結果[11]に基づいて与える. これらは, 炭素鋼とステンレス鋼の初期不整に大きな変化が見られず, 構造用炭素鋼板に導入される最大許容値を考慮することで, 過小評価がないことを実験により確認しているため, 炭素鋼と同様にして扱う. 周辺単純支持板で考慮する初期たわみの大きさ  $w_0$  は, 式(6)による.

$$w_0 = w_{0,a} \cos \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi y}{b} \quad (6)$$

ここで,  $a$  は図 2 に示す周辺単純支持板の長さを意味する. 式(6)中の最大初期たわみ  $w_{0,a}$  は, 構造用炭素鋼の製作誤差の最大許容値として,  $b/150$  としている. そして, 残留応力については, 圧縮

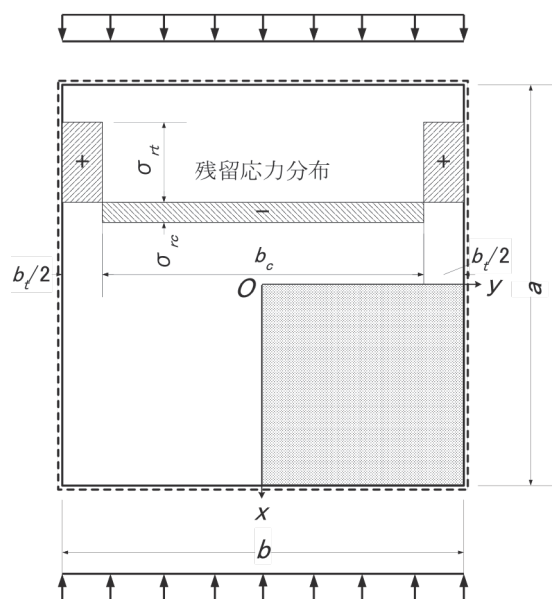


図 2 周辺単純支持板

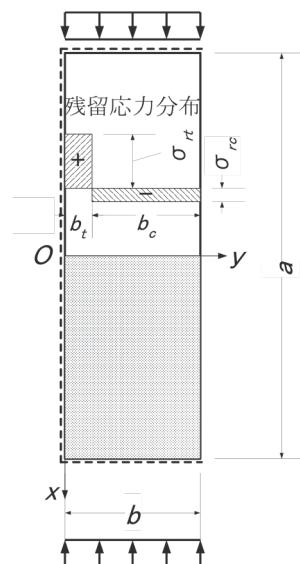


図 3 自由突出板

残留応力の作用幅  $b_c$  と引張残留応力の作用幅  $b_t$  が自己平衡を保つように矩形分布形状で与える. その大きさは, 炭素鋼と同等として, 文献[12]により次式で与える.

$$\sigma_{rt} = \sigma_{0.2} \quad , \quad \sigma_{rc} = -0.3\sigma_{0.2} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_{rt}$ は引張残留応力を、 $\sigma_{rc}$ は圧縮残留応力を意味する。

### 3.2 自由突出板

図3は、本研究で対象とする圧縮力を受ける自由突出板を示す。自由突出板の形状は、周辺単純支持板と同様に式(5)の幅厚比パラメータにより決定する(自由突出板の場合 $k=0.425$ )。また、板のアスペクト比 $\alpha(=a/b)$ は3.0としている。自由突出板で考慮する初期たわみは、式(8)で与える。

$$w_0 = w_{0,a} \frac{y}{b} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (8)$$

式(8)中の最大初期たわみ $w_{0,a}$ は、構造用炭素鋼の製作誤差の最大許容値として、 $b/100$ としている。そして、残留応力については、圧縮残留応力の作用幅と引張残留応力の作用幅が自己平衡を保つように矩形分布形状で与える。その大きさは、既往の実験結果[11]より、炭素鋼と同等として、文献[12]により次式で与える。

$$\sigma_{rt} = \sigma_{0.2} \quad , \quad \sigma_{rc} = -0.4\sigma_{0.2} \quad (9)$$

### 4. ステンレス鋼圧縮板の強度特性

本研究では、ステンレス鋼板の圧縮強度特性を調べるにあたり、非線形有限要素法を用いた数値計算を用いる。これは、幾何学的非線形性を更新Lagrange法に基づいて定式化し、有限回転の影響を考慮する。また、材料非線形性は、等方硬化則、関連流れ則およびvon Misesの降伏関数を用いて定式化する。これらの非線形問題の解法は、増分反復法による。

図4は、上述した数値計算による結果と既往の実験[11]により得られたSUS316の板で構成される正方形断面短柱の圧縮荷重と圧縮変位の関係を示している。同図の縦軸は、柱軸方向の圧縮荷重

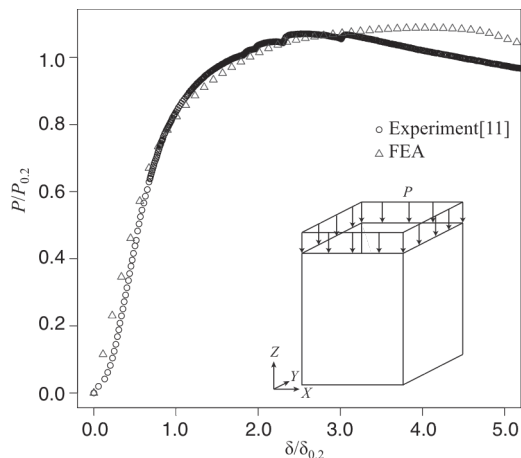
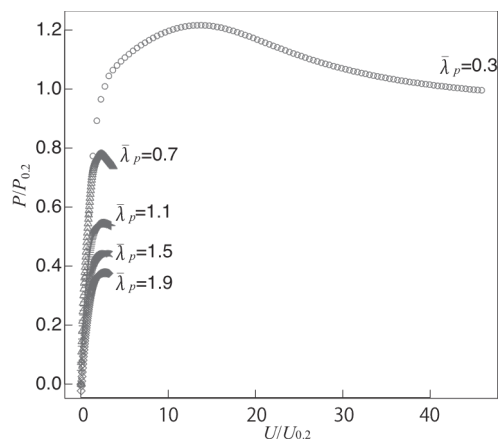


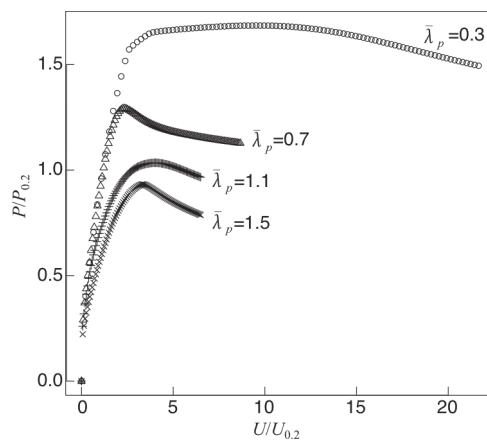
図4 SUS316製短柱の圧縮荷重と圧縮変位の関係

$P$ を短柱の0.2%耐力時の荷重 $P_{0.2}$ で無次元化し、横軸は柱軸方向変位 $\delta$ を0.2%耐力時の変位 $\delta_{0.2}$ で無次元化して表している。同図の数値計算は、短柱構成する4枚の板全体を、8節点アイソパラメトリックシェル要素で離散化している。また、柱の上下端部の境界条件は、柱を構成する板の面外、面内方向変位および面外回転を拘束している。さらに、数値計算では、実験により計測した初期不整[11]を導入している。同図の数値計算による荷重と変位の関係は、最大荷重発生時の圧縮変位が実験結果に比べて1.5倍程度大きくなるものの、最大荷重点までの実験結果を問題無く再現できることが確認できる。これより、本研究で用いる数値計算は、十分な精度を有していると判断する。

図5は、これらの数値計算を用いて得られたSUS304で構成される周辺単純支持板および自由突出板の圧縮荷重と変位の関係の一例を示す。以降で述べる終局強度は、同図に示す各結果の縦軸の最大値を意味している。同図より、幅厚比パラ



(a) 周辺単純支持板



(b) 自由突出板

図5 SUS304圧縮板の荷重と変位の関係



表 4 式(10)に含まれる定数

Boundary condition	Type	Material strength	$\bar{\lambda}_{p,cr}$	$b_p$
Simply supported	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.494	0.719
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.544	0.720
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.457	0.662
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.506	0.712
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.557	0.763
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.584	0.731
	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.482	0.690
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.529	0.705
Outstanding	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.565	0.466
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.606	0.417
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.606	0.396
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.613	0.353
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.572	0.430
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.647	0.403
	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.583	0.436
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.618	0.397

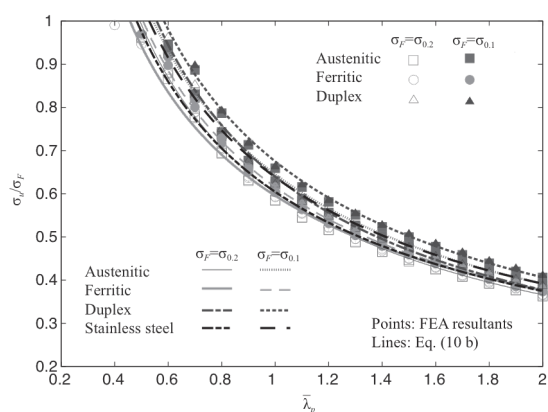


図 6 ステンレス鋼周辺単純支持板の終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

メータが小さい 0.3 の板は、その他の板の最大荷重点での変形量が 5 倍以上大きくなるのがわかる。これは、幅厚比が小さく、終局強度に至るまでの板全体の塑性化が顕著に進行するためである。

#### 4.1 周辺単純支持板の圧縮強度特性

数値計算により得られたステンレス鋼周辺単純支持板の終局強度  $\sigma_u$  を材料強度  $\sigma_F$  で除した値と幅厚比パラメータ  $\bar{\lambda}_p$  の関係を図 6 に示す。圧縮板の終局強度を評価する場合、式(10)の形状が用いられる[13]。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_F} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_b} & (\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_{p,cr}) \\ \left(\frac{\bar{\lambda}_{p,cr}}{\bar{\lambda}_p}\right)^{b_p} \frac{1}{\gamma_b} & (\bar{\lambda}_{p,cr} < \bar{\lambda}_p) \end{cases} \quad (10a, b)$$

ここで、 $\sigma_u$  は板の終局強度を、 $\gamma_b$  は部材係数を、 $\bar{\lambda}_{p,cr}$  (文献[13]では 0.7) および  $b_p$  (文献[13]では 0.86) は定数を意味する。本研究では、ステンレス鋼の終局強度を評価する際にも、式(10)を用い

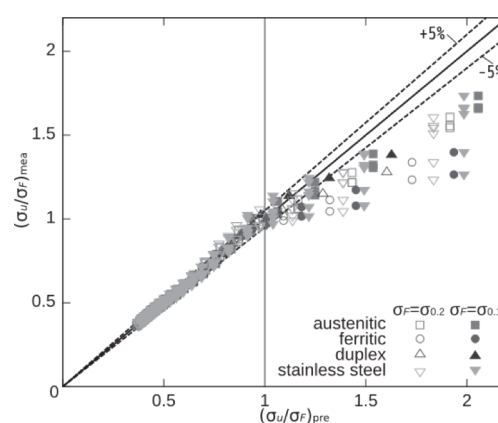


図 7 数値計算結果と式(10)による終局強度予測の関係(周辺単純支持板)

ることとして、数値計算により得られた結果を式(10)との回帰計算を実施することで、式(10)に含まれる  $\bar{\lambda}_{p,cr}$  および  $b_p$  を決定する。ただし、以下では  $\gamma_b$  が 1.0 として記述する。

数値計算結果に基づく式(10b)に含まれる  $\bar{\lambda}_{p,cr}$  および  $b_p$  を表 4 に示す。また、図 6 中には、このようにして求めた式(10b)による耐荷力曲線を実線および破線で表している。それについては、実線が  $\sigma_F$  を 0.2% 耐力とした場合、破線が  $\sigma_F$  を 0.1% 耐力とした場合を意味している。これら式(10b)で表現するステンレス鋼圧縮板の耐荷力曲線は、下限値レベルの強度を評価するものである。

図 7 は、板の終局強度  $\sigma_u$  が材料強度  $\sigma_F$  を超える領域についても式(10)を適用した場合の数値計算結果と強度予測の関係を示している。また、図 7 の横軸は式(10)を用いて強度評価した結果  $(\sigma_u/\sigma_F)_{pre}$  を示し、縦軸は数値計算結果  $(\sigma_u/\sigma_F)_{mea}$  を

示している。図7より、板の終局強度が材料強度以下となる範囲での式(10b)による強度評価は、ほぼ±5%以内の範囲に収まり、正確に終局圧縮強度を予測していることが確認できる。一方、板の終局強度が材料強度を超える場合での式(10a)による終局強度評価は、数値計算結果との誤差が-5%よりも小さくなり、過大となることが明らかである。板の終局強度が材料強度を超える場合の終局強度評価法については、5. で記述する。

#### 4.2 自由突出板の圧縮強度特性

数値計算により得られたステンレス鋼自由突出板の終局強度と幅厚比パラメータの関係を図8に示す。ステンレス鋼自由突出板の終局強度評価についても、周辺単純支持板と同様に式(10)を用いる。数値計算により得られた終局強度と式(10b)を用いた評価法との回帰計算を実施することで、式(10b)に含まれる $\bar{\lambda}_{p,cr}$ および $b_p$ を表4にまとめる。また、図8中には、このようにして求めた式(10b)による耐力力曲線を実線および破線で表している。

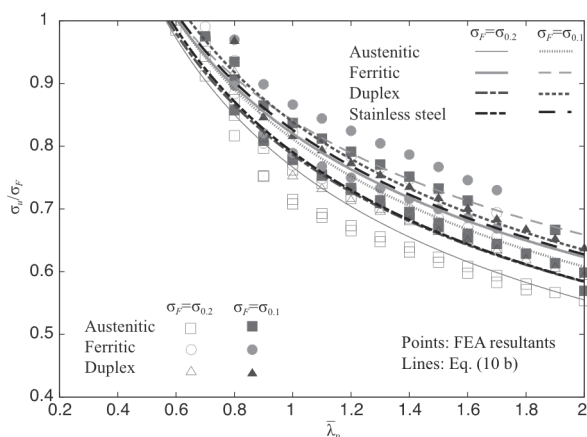


図8 ステンレス鋼自由突出板の終局圧縮強度と幅厚比パラメータの関係

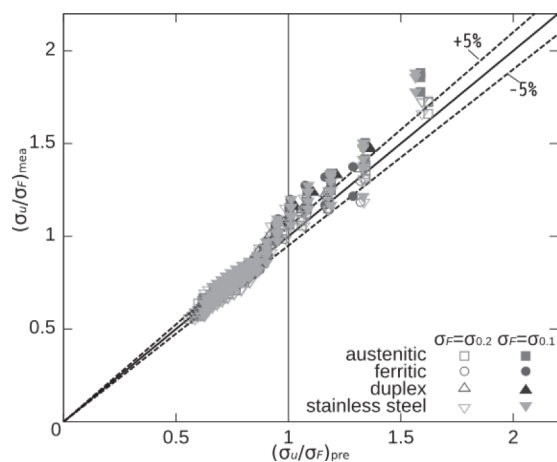


図9 数値計算結果と式(10)による終局強度予測の関係(自由突出板)

それについては、実線が $\sigma_F$ を0.2%耐力とした場合、破線が $\sigma_F$ を0.1%耐力とした場合を意味している。式(10)で表すステンレス鋼圧縮板の耐力力曲線は、下限値レベルの強度を評価するものである。

図9は、板の終局強度 $\sigma_u$ が材料強度 $\sigma_F$ を超える領域についても式(10)を適用した場合の数値計算結果と強度予測の関係を示している。図9の横軸は式(10)を用いて強度評価した結果 $(\sigma_u/\sigma_F)_{pre}$ を示し、縦軸は数値計算結果 $(\sigma_u/\sigma_F)_{mea}$ を示している。図9より、板の終局強度が材料強度以下となる範囲での強度評価は、終局強度が材料強度とほぼ等しくなるあたりでの誤差がやや大きくなるものの、ほぼ±5%以内の誤差に収まり、正確に終局圧縮強度を予測していることが確認できる。一方、板の終局強度が材料強度を超える場合での式(10a)による終局強度評価は、数値計算結果との誤差が±5%の範囲を超え、誤差が大きくなる。板の終局強度が材料強度を超える場合の終局強度評価法については、5. で記述する。

#### 5. 強度評価法

4. で示したステンレス鋼周辺単純支持板および自由突出板の圧縮強度特性を基に、ステンレス鋼が有するひずみ硬化特性を有効に活用した終局強度評価法について述べる。

##### 5.1 ステンレス鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみの予測

2. で明らかにしたようにステンレス鋼の応力ひずみ関係は、ラウンドハウス型を示す。また、ステンレス鋼のひずみ硬化に伴う応力上昇は、構造用炭素鋼に比べて大きいことが特徴である。このことから、ステンレス鋼圧縮板の終局強度の評価にあたり、構造用炭素鋼と同じ手法をステンレス鋼に採用した場合、板の終局強度に材料特性の影響が大きくなる幅厚比パラメータが小さい板に対して、終局強度を過小評価する結果となる。

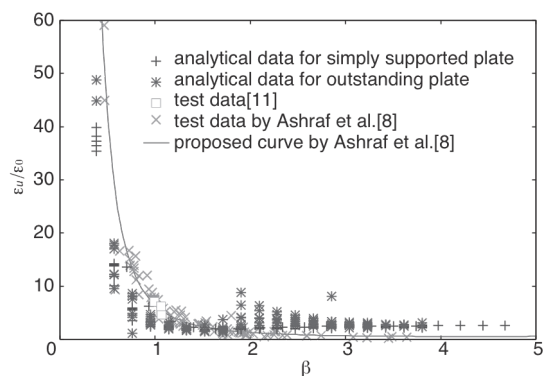


図10 終局強度時の圧縮ひずみと $\beta$ の関係

Gardner ら[14]は、これらの問題点を指摘するとともに、式(11)による終局強度時の圧縮ひずみ  $\varepsilon_u$  の予測に基づく強度評価法を提案している(ただし、 $\beta \leq 1.5$  の範囲を対象とする)。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_0} = \frac{6.44}{\beta^{2.85-0.27\beta}} \quad (11)$$

ここで、 $\varepsilon_0$  は 0.2%耐力時のひずみを表し、 $\beta$  は式(12)により求められる。

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \cdot \sqrt{\frac{4}{k}} \quad (12)$$

図 10 は、式(11)による圧縮ひずみの予測と 4. で示した数値計算結果、既往のデータ[8]および文献[11]で計測したステンレス鋼箱形短柱の圧縮試験結果を示す。図 10 より、式(11)は、文献[11]の実験結果および文献[8]で検証された結果を良好に評価することが確認できる。一方、本研究で扱うステンレス鋼周辺単純支持板および自由突出板の結果は、式(11)による評価が適切でないことがわかる。これは、式(11)が溶接組み立ておよび熱間または冷間圧延成形された矩形断面短柱圧縮試験結果に基づいており、数値計算で扱う圧縮板の幾何学的境界条件を満足していないことが要因として考えられる。

そこで本研究では、4. の結果を基にステンレス鋼圧縮板のみを対象とした圧縮ひずみを式(13)で予測することにした。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_F} = \frac{C_1}{\lambda_p^{C_2}} \quad (13)$$

ここで、 $\varepsilon_F$  は材料強度に対応するひずみ、 $C_1$  および  $C_2$  は定数を表す。式(13)の適用範囲は、ステンレス鋼板の終局強度が材料強度よりも大きくなる圧縮板である。

図 11 は、式(13)を用いて 4. で得られた数値計算結果との回帰計算を実施して、定数  $C_1$  および  $C_2$  を求め、式(13)と数値計算結果を比較して表している。また、表 5 は、これによって決定した式(13)中の定数をまとめた結果を示す。図 11 より、評価式(13)は、ステンレス鋼周辺単純支持板および自由突出板ともに、数値計算結果を正確に評価できることが確かめられる。

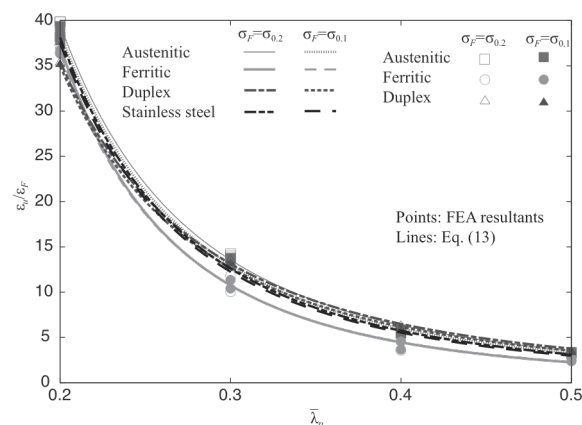
## 5.2 ステンレス鋼の応力ひずみ関係に基づいたステンレス鋼板の終局圧縮強度評価法

4. で示したようにステンレス鋼圧縮板の終局強度が材料強度よりも大きくなる板の終局強度評価法は、式(10)では評価できない。そこで、Gardner

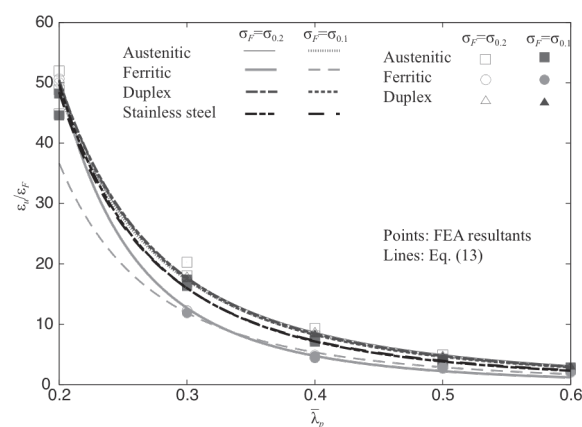
ら[14]の考え方に従い、このような板に対する終局強度評価を次のように行う。まず、式(13)で示した圧縮ひずみを予測する。そして、そのときの応力を 2. の式(1)で示したステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させて算出した値を終局強度  $\sigma_u$

表 5 終局強度時平均圧縮ひずみを評価する式(13)中のパラメータ

Boundary condition	Type	Material strength	$C_1$	$C_2$
Simply supported	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.565	2.64
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.510	2.69
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.270	3.06
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.283	3.02
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.688	2.45
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.626	2.50
Outstanding	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.471	2.73
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.442	2.76
	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.886	2.49
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.803	2.55
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.209	3.41
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.418	2.78
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.793	2.58
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.754	2.61
	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.549	2.80
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.589	2.74



(a) 周辺単純支持板

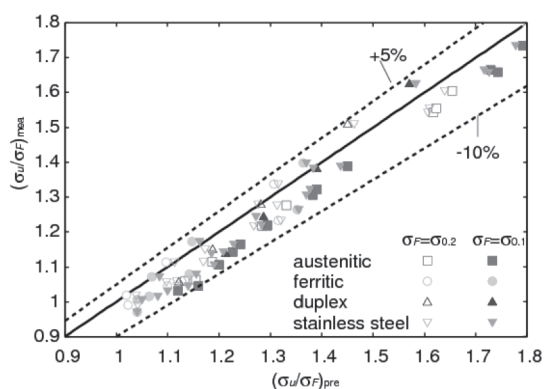


(b) 自由突出板

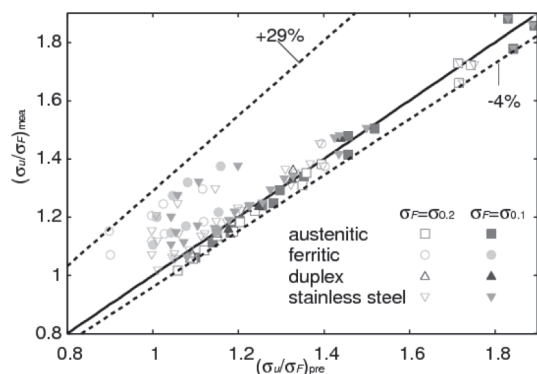
図 11 終局強度時の圧縮ひずみと幅厚比パラメータの関係

とする。図 12 は、このようにして求めた終局強度評価と数値計算結果を比較して示している。図 12 より、板の終局強度が材料強度よりも大きくなるステンレス鋼圧縮板の終局強度の予測値と数値計算結果との誤差の最大値は、周辺単純支持板で約 10%および自由突出板で約 29%となることが確認できる。また、周辺単純支持板の終局強度の予測は、数値計算結果に対して最大で約 10%過大評価することに対して、自由突出板の終局強度の予測誤差の最大値は周辺単純支持板に比べて大きくなるものの、予測する終局強度が数値計算結果に対して過大評価する大きさは約 4%以下になることが確認できる。

つぎに、予測した終局強度を数値計算により得られた終局強度で除した値と幅厚比パラメータの関係を図 13 に示す。同図より、幅厚比パラメータの値が大きくなるとともに誤差が増大することが確認できる。この結果を考慮して、式(13)により得られたひずみをステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させて応力を決定した後、新たに式(14)に示す終局強度補正係数を乗じて補正した値を終局強度とする。



(a) 周辺単純支持板



(b) 自由突出板

図 12 数値計算結果による終局強度と予測した終局強度の関係

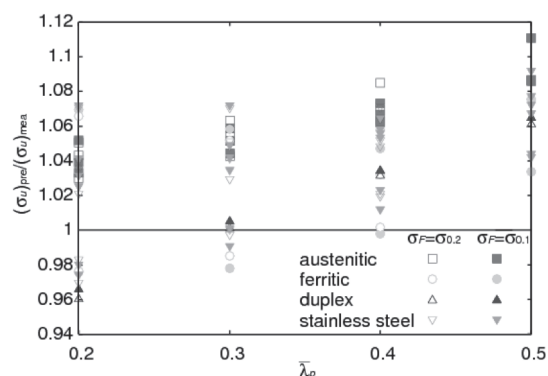
$$C_{\sigma_u} = \exp(\chi \cdot \bar{\lambda}_p) \quad (14)$$

ここで、 $\chi$  は表 6 に示す定数を意味する。

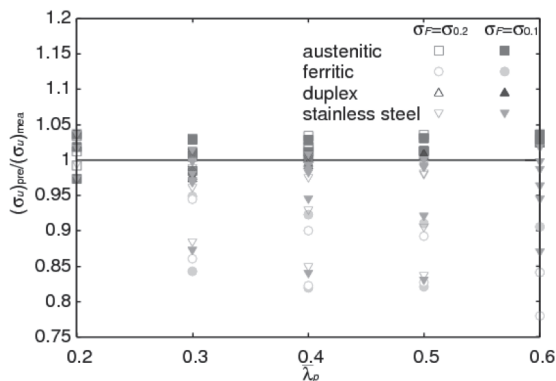
図 14 は、ステンレス鋼の応力ひずみ関係より決定した応力に、式(14)の係数を乗じて終局強度を予測した結果を数値計算結果で除した値と幅厚比パラメータの関係を示す。図 14 より、式(13)から得られたひずみに対応する応力を直接決定した図 13 に比較して、いずれの結果もばらつきを 5%程度小さくできることがわかる。

表 6 式(14)に含まれる定数  $\chi$

Boundary condition	Type	Material strength	$\chi$
Simply supported	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	-0.125
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.176
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	-0.0576
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.0808
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	-0.0484
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.0588
	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	-0.0731
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.113
Outstanding	Austenitic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	-0.0535
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.0409
	Ferritic	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.343
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.289
	Duplex	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.0192
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	-0.00132
	All	$\sigma_F = \sigma_{0.2}$	0.0902
		$\sigma_F = \sigma_{0.1}$	0.0762



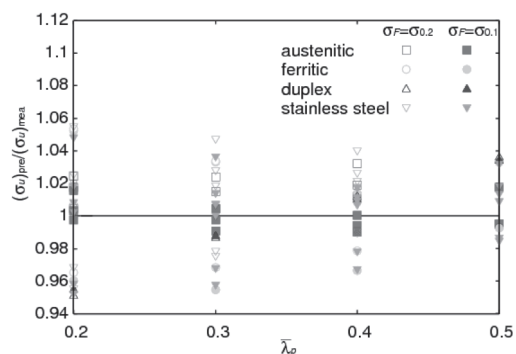
(a) 周辺単純支持板



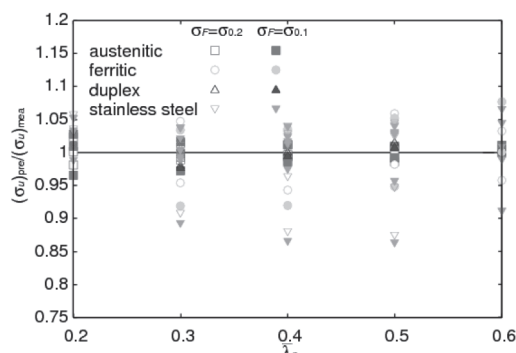
(b) 自由突出板

図 13 予測した無次元化終局強度と幅厚比パラメータの関係



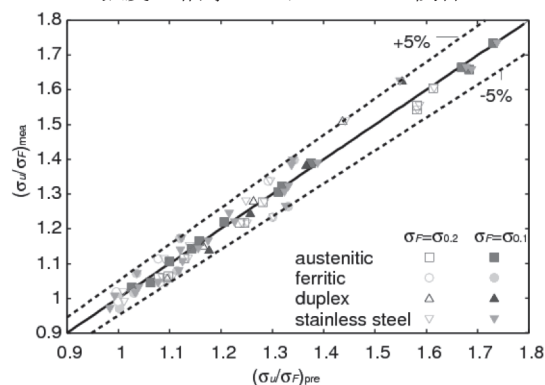


(a) 周辺単純支持板

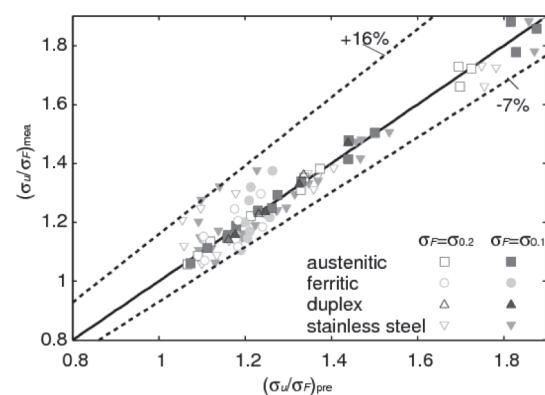


(b) 自由突出板

図 14 式(14)を乗じて予測した無次元化終局強度と幅厚比パラメータの関係



(a) 周辺単純支持板



(b) 自由突出板

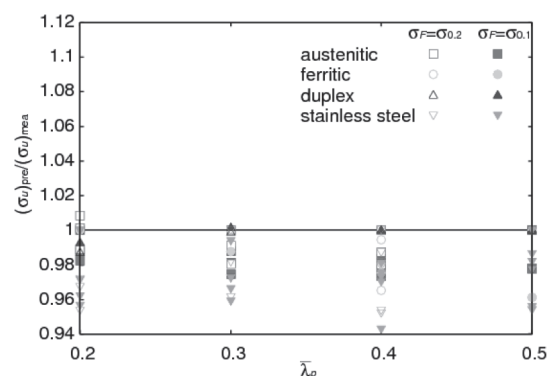
図 15 数値計算結果による終局強度と式(14)を乗じて予測した終局強度の関係

図 15 は、このようにして求めた終局強度の予測の精度を図 12 と同様に示す。図 15 より、周辺単純支持板および自由突出板について、数値計算で得られた終局強度に対する終局強度の予測値の最大誤差は、約 5%および約 16%になり、式(14)を用いることで終局強度予測の精度が向上できることが確認できる。一方、式(14)を用いた終局圧縮強度の予測は、数値計算により得られた強度に対して周辺単純支持板で最大約 5%、自由突出板で最大約 7%過大評価する。そこで、終局強度の過大評価を防ぐため、式(14)に代わる終局強度補正係数を示す式(15)を用いることとする。

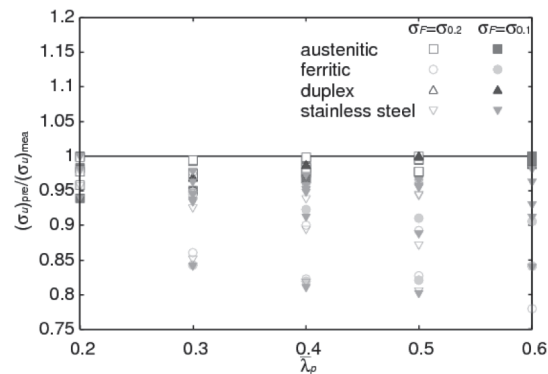
$$D_{\sigma_u} = \begin{cases} 1 / (G_a \bar{\lambda}_p + G_b) \\ 1 / G_c \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $G_a$ 、 $G_b$  および  $G_c$  は係数を意味し、その値を表 7 にまとめる。

図 16 は、上述した同様の方法で、ステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させて算出した強度  $\sigma_u$  に式(15)の係数を乗じて求めた終局強度を数値計算で得られた終局強度で無次元化した値と幅厚比パラメータの関係を示す。これは、図 14 に示したデータを縦軸について平行移動させた結果である。



(a) 周辺単純支持板



(b) 自由突出板

図 16 式(15)を乗じて予測した無次元化終局強度と幅厚比パラメータの関係

図 16 より、式(15)の係数を採用することで、終局圧縮強度の予測値が過大評価とならないことが確認できる。

式(14)および式(15)の活用について整理してみると、式(14)はステンレス鋼圧縮板の終局強度を精度良く評価でき、式(15)は式(14)に比べて終局強度の予測精度が劣るものの強度の過大評価を防ぐ評価式としている。

### 5.3 提案するステンレス鋼圧縮板の強度評価法

#### 5.3.1 強度評価法のまとめ

図 17 は、文献[15]で明らかにしたステンレス鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみとステンレス鋼の材料強度にほぼ対応関係がある構造用炭素鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみを比較して示す。同図の縦軸は構造用炭素鋼板の終局強度時平均圧縮ひずみ  $\varepsilon_{u,SM}$  を降伏ひずみ  $\varepsilon_y$  で無次元化したものを、横軸はステンレス鋼板の終局強度時平均圧縮ひずみ  $\varepsilon_u$  を材料強度に対応するひずみ  $\varepsilon_F$  で無次元化したものを表している。同図より、ステンレス鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみは、材

料強度にほぼ対応関係がある構造用炭素鋼の終局強度時平均圧縮ひずみに比べて大きくなることがわかる。特に、同図中(b)および(d)の板の終局強度が材料強度よりも小さくなる板について、その差は顕著になる。

このようにステンレス鋼は、応力の増大に伴うひずみの進行が同程度の材料強度を有する構造用炭素鋼に比べて小さな応力で生じるため、構造用炭素鋼に代わる材料として活用する際、変形量に注意を払う必要がある。また、構造部材への活用の際にステンレス鋼の材料特性を有効に活用するためには、ここで示した終局強度のみに着目した強度評価法を用いることが考えられる。

そこで、図 18 に示すように、ステンレス鋼圧縮板を構造用炭素鋼圧縮板と同等の圧縮変形量を考慮する場合には保証強度評価法[15]を、ステンレス鋼の材料特性を有効に活用する場合には本研究で提案した終局強度評価法を活用することができる。

ステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法をまとめると、次の領域に分けて記述できる。

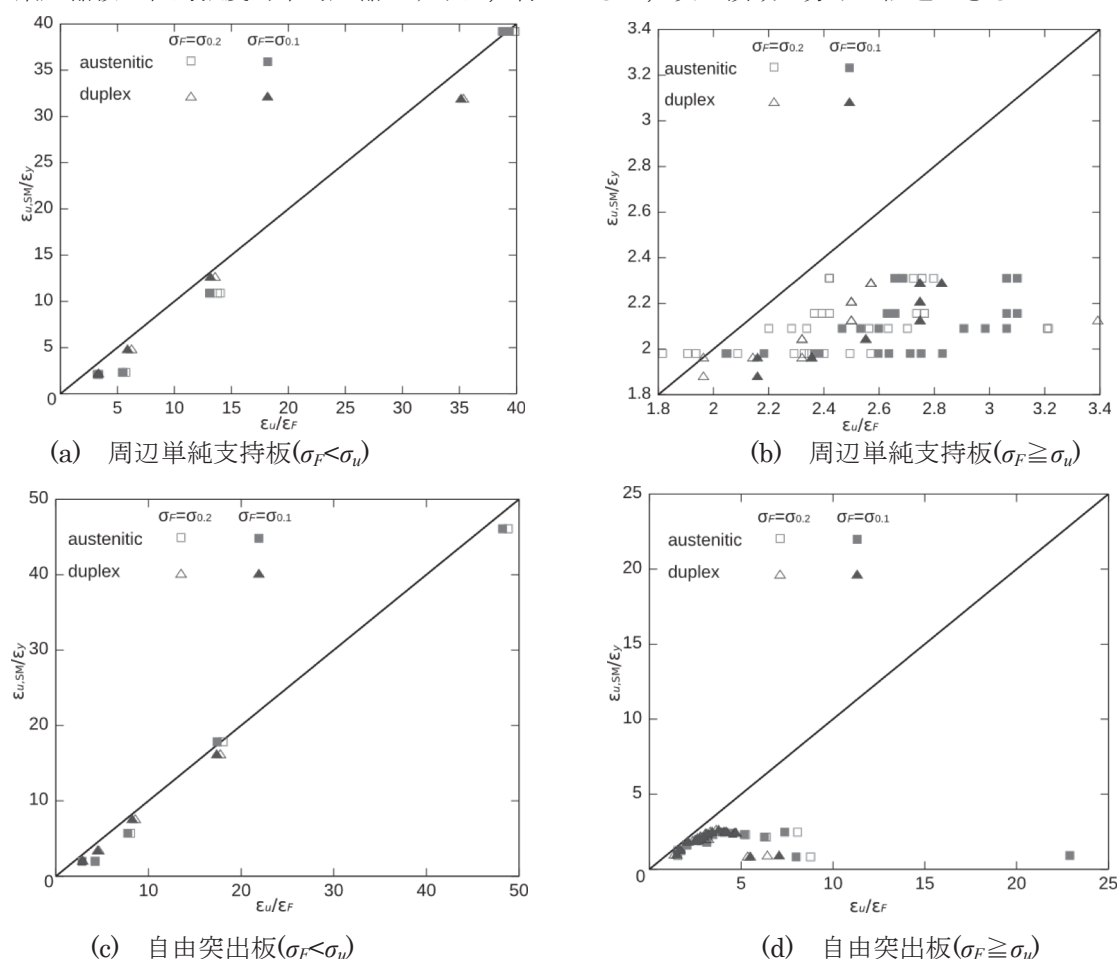


図 17 ステンレス鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみと材料強度がほぼ等しい関係にある構造用炭素鋼圧縮板の終局強度時平均圧縮ひずみの比較

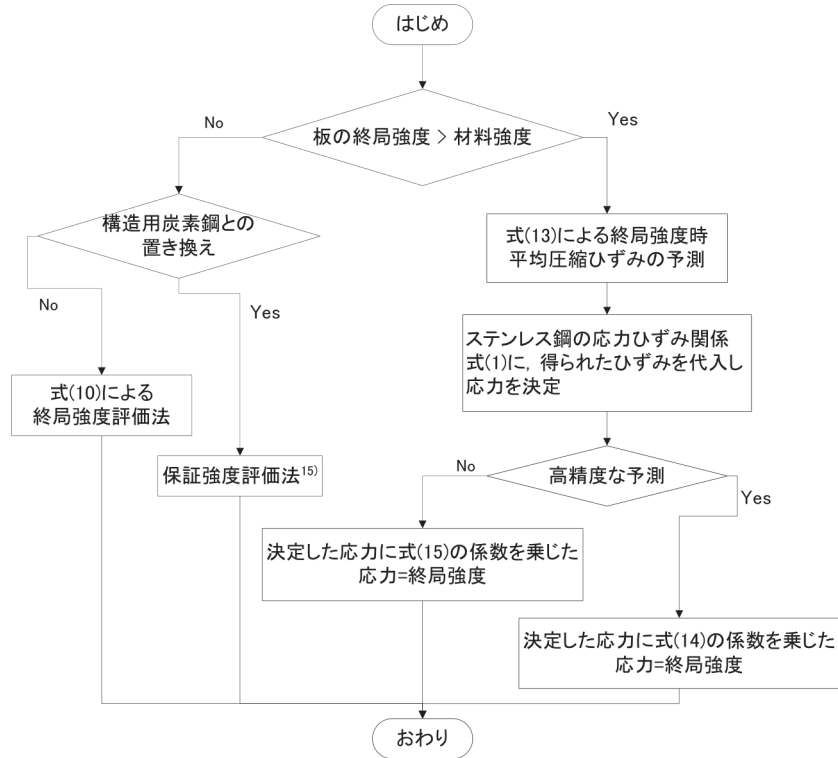


図 18 ステンレス鋼圧縮板の強度評価法の流れ

i)  $\bar{\lambda}_p \leq 0.2$  (領域 I)

式(13)に $\bar{\lambda}_p=0.2$ を代入し、得られた $\varepsilon_u$ を用いて式(1)より対応する応力を決定し、その値に式(14)または式(15)の係数を乗じて $\sigma_u$ を求める。

ii)  $0.2 < \bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_{p,cr}$  (領域 II)

(ここで、 $\bar{\lambda}_{p,cr}$ は $\sigma_u=\sigma_F$ となる幅厚比パラメータ(表 4))

式(13)から得られる $\varepsilon_u$ を用いて式(1)より対応する応力を決定し、その値に式(14)または式(15)の係数を乗じて $\sigma_u$ を求める。

iii)  $\bar{\lambda}_{p,cr} \leq \bar{\lambda}_p$  (領域 III)

式(10)により $\sigma_u$ を求める。

### 5.3.2 材料強度

図 19 は、表 4 および表 5 のステンレス鋼全体のデータを用いて SUS304 で構成される圧縮板の終局強度と幅厚比パラメータの関係を示す。ここで、ステンレス鋼の材料強度 $\sigma_F$ については、建築構造用ステンレス鋼で規定されている 0.1%耐力およびラウンドハウス型の応力ひずみ関係を示す材料に対して一般的に規定されている 0.2%耐力がある。このような材料強度の選定により、表 4 および表 5 で表した定数を用いて板の強度を正確に求める代わりとして式(16)で表す簡易手法を用いる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.1}} = \gamma \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} \quad (16)$$

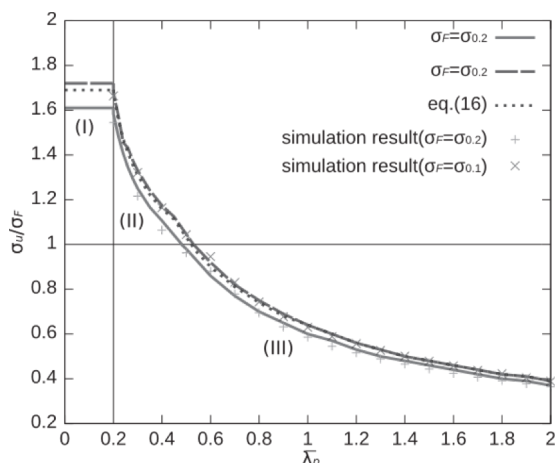
ここで、 $\gamma$ は式(17)で表す係数を意味している。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.1}}} \quad (17)$$

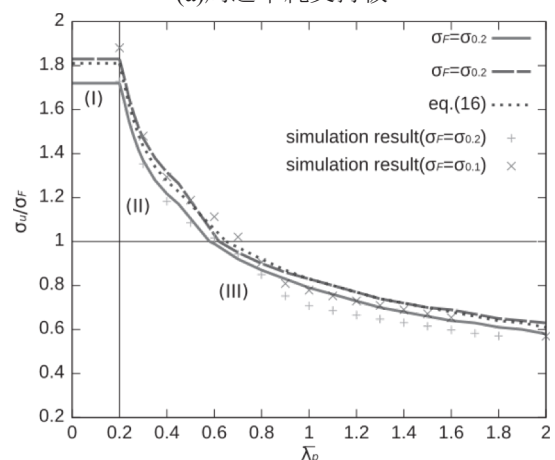
式(16)は、式(17)による係数を 0.1%耐力または 0.2%耐力のいずれかの材料強度を用いて得られた板の終局強度に乗ずることで、もう一方の材料強度を用いた板の終局強度が容易に求められる形としている。式(16)を用いた終局強度評価の結果は図 19 の破線で示している。なお、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.2 以下の終局強度は、ひずみ硬化の影響により、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.2 の板の終局強度以下にならないと判断し、対象とした $\bar{\lambda}_p$ が最小値の終局強度を上限として与えている。式(16)による簡易的な終局強度評価により得られる強度は、表 4 および表 5 の詳細な定数を用いて得られた結果に対して、対象としたいずれのステンレス鋼についても約 10%未満の誤差の範囲内で評価できる。

### 5.3.3 保証強度との比較

図 20 は、材料強度を 0.2%耐力とした SUS304 で構成される板について、ステンレス鋼全体のデータを使用して終局強度評価法により得られた終局強度 $\sigma_u$ を文献[15]で提案した保証強度 $\sigma_{G,SUS}$ で除した値と幅厚比パラメータの関係を示す。ここでの板の終局強度が材料強度よりも大きくなる圧縮板の強度評価は、式(14)の係数を乗じて算出した結果を表している。なお、 $\bar{\lambda}_p$ が 0.2 以下の終局強度は、図 19 と同様に、ひずみ硬化の影響によ



(a)周辺単純支持板



(b)自由突出板

図 19 ステンレス鋼圧縮板の終局強度曲線(ステンレス鋼全体で評価した場合の SUS304)

り、 $\bar{\lambda}_p$  が 0.2 の板の終局強度以下にならないと判断し、対象とした $\bar{\lambda}_p$ が最小値の終局強度を上限として与えている。同図より、周辺単純支持板および自由突出板ともに、幅厚比パラメータが小さい形状の板について、ここで提案した終局強度評価は、保証強度に比べて周辺単純支持板および自由突出板において最大約 1.73 倍および 2.01 倍大きくなることがわかる。したがって、ステンレス鋼板の変形量に制限を設けない場合には、ステンレス鋼の応力ひずみ関係を基にした終局強度評価法が強度について有利となることがわかる。

## 6. 結論

本研究では、ステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法を明らかにすることを目的として、数値計算結果ならびに既往の実験結果を基に、その提案を行った。以下では、本研究で得られた成果をまと

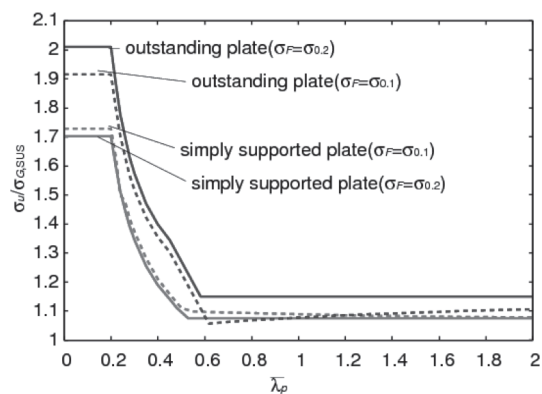


図 20 終局強度と保証強度の比較と幅厚比パラメータの関係(ステンレス鋼全体で評価した場合の SUS304)

める。

- (1) ステンレス鋼圧縮板の終局強度を評価する場合、式(10)を用いることで、板の終局強度が材料強度よりも小さくなる板に対して、適切に終局圧縮強度を評価できる。
- (2) 材料強度よりも終局強度が大きくなるステンレス鋼圧縮板を対象とした終局強度時の圧縮ひずみの予測は、式(13)を用いることにより、適切に評価できる。
- (3) ステンレス鋼圧縮板の終局強度が材料強度よりも大きくなる板の終局強度の評価は、式(13)で得られたひずみをステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させて応力を決定し、その値に式(14)の係数を乗じることで終局強度を数値計算結果に対して、周辺単純支持板で±5%、自由突出板で+16%から-7%の精度で評価できる。
- (4) ステンレス鋼圧縮板の終局強度が材料強度よりも大きくなる板の終局強度の評価は、式(13)で得られたひずみをステンレス鋼の応力ひずみ関係に対応させて応力を決定し、その値に式(15)の係数を乗じることで終局強度を数値計算結果に対して過大評価することなく評価できる。
- (5) 0.1%耐力および 0.2%耐力の材料強度の違いによる終局強度評価は、材料試験によりこれらの耐力を把握しておくことで、いずれかの材料強度を用いて得られた板の終局強度を式(16)により換算できる。
- (6) 終局強度のみに着目した強度評価法は、構造用炭素鋼の圧縮変形量と同様になるとした保証強度評価法に比べて、最大 1.73 倍から 2.01 倍強度を大きく評価できる。

提案した強度評価法は、応力ひずみ関係に依存する。ここでは、限られた鋼種ならびに試験体からステンレス鋼の応力ひずみ関係を用いているた



め、多くのステンレス鋼の応力ひずみ関係のデータを活用した本評価法の検証または高精度化、適用鋼種の拡大などを行うことが今後の課題である。

## 参考文献

- [1]EN1993-1-4. Eurocode 3: Design of steel structures – Part1.4 General rules – Supplementary rules for stainless steel, CEN, 1996.
- [2]ASCE: Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Society of Civil Engineers, New York, ANSI/ASCE 8-02, 2002.
- [3]Euro Inox: Pedestrian Bridge in Stainless Steel, Euro Inox, Vol.7, 1<sup>st</sup> edition, 2004.
- [4]山根薫：香港ストーンカッターズ斜張橋のステンレス部材, JSSC, No.73, pp.14-15, 2009.
- [5]ステンレス建築構造設計基準作成委員会：ステンレス建築構造設計基準・同解説, ステンレス構造建築協会, 1995.
- [6]有住康則, 矢吹哲哉, 下里哲弘, 池宮真人, 松下裕明：ステンレス鋼を用いた圧縮フランジ板の耐荷力評価, 構造工学論文集, 55A, pp.68-79, 2009.
- [7]L. Gardner, D. A. Nethercot: Numerical modeling of stainless steel structural components – a consistent approach, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, pp.1586-1601, 2004.
- [8]Mahmud Ashraf, Leroy Gardner, David A. Nethercot: Structural stainless steel design: Resistance based on deformation capacity, Journal of Structural Engineering, Vol.134, pp.402-411, 2008.
- [9]三好崇夫, 宮寄靖大, 奈良敬：SUS410L の応力-ひずみモデルとそれを用いた板の圧縮強度, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.633-638, 2007.
- [10]三好崇夫, 宮寄靖大, 奈良敬：二相系ステンレス鋼板の極限圧縮強度特性, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.80-91, 2009.
- [11]宮寄靖大, 上谷明夫, 奈良敬：溶接組立てされたステンレス鋼箱形短柱の終局強度, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp.367-374, 2009.
- [12]小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみ, 土木学会論文報告集, No.265, pp.25-35, 1977.
- [13]土木学会：鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 土木学会, 2007.
- [14]L. Gardner, D. A. Nethercot: Structural stainless steel design: a new approach, The Structural

Engineer, Vol.82, No. 21, pp. 21-28, 2004.

- [15]宮寄靖大, 奈良敬：無補剛ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.122-134, 2010.

(2012年12月13日原稿受理)

