

ステンレス鋼長柱部材の終局圧縮強度解析

三好 崇夫*

Ultimate Compressive Strength Analysis of Stainless Steel Columns

Takao MIYOSHI

ABSTRACT

Stainless steels are able to contribute to the ease of maintenance for infrastructures due to superior corrosion resistance. This paper shows the numerical method for structural response and the ultimate compressive strength of stainless steel columns with welded box cross-sections. At first, the constitutive equation of stainless steel is incorporated into non-linear FE analysis program, and the program is validated against the theoretical solution and other numerical results. Secondly, parametric studies are performed to investigate the effect of residual stresses due to welding on the ultimate compressive strength. Finally, the ultimate strength curves of the stainless steel columns are discussed in comparison with the design curves specified in several design standards.

KEY WORDS: non-linear FE analysis, ultimate compressive strength, residual stress due to welding

1. はじめに

今後新設される土木構造物には、維持管理の省力化、長寿命化や総ライフサイクルコストの縮減が求められている。これらの要求に応えるため、土木構造物へのステンレス鋼の活用が注目されている¹⁾。

ステンレス鋼は、土木構造物に多用されている構造用炭素鋼に比べて優れた耐食性を示すものの、構造用炭素鋼と異なり、明確な降伏点を有さず、ラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線を示すため、炭素鋼構造物に対する設計基準類をステンレス鋼構造物に準用することは困難であると考えられる。既に、我が国の建築分野や欧米では、ステンレス鋼構造物の設計基準^{2)~5)}が策定されており、柱部材の設計強度曲線も与えられている。しかし、橋梁等の土木構造物において、一般的に柱部材として使用されている、溶接箱形断面部材の終局圧縮強度については明確にされていない。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304

*都市システム工学科

を対象に、溶接箱形断面部材の終局圧縮強度を解析的に明確にすることを目的として、ステンレス鋼の構成式を非線形有限要素法解析プログラムに導入し、その妥当性を検証する。また、同プログラムを用いたパラメトリック解析によって、溶接箱形断面部材の残留応力分布形状が終局圧縮強度に及ぼす影響について明らかにするとともに、終局圧縮強度を設計基準類に与えられている設計強度曲線と比較する。

2. 数値解析法

一般的に、局部座屈を生じず、圧縮強度が部材座屈に支配される柱部材の終局強度解析には、骨組解析が用いられている。そこで、本研究においても、数値解析プログラムとして、有限要素法による立体骨組構造物の弾塑性有限変位解析プログラムを用いた。

2・1 ステンレス鋼の構成式

著者らは、ステンレス鋼の材料試験結果に基づいて、

ステンレス鋼の応力-ひずみ関係を精度よく表現できる構成式として、Ramberg-Osgood 曲線を修正した、式(1)の構成式 (以下では、MRO 曲線と称する) を提案しており⁶⁾、本研究においても MRO 曲線を用いた。

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma/E & (0 \leq \sigma < \sigma_p) \\ \sigma/E + a(\sigma^{n1} - \sigma_p^{n1}) & (\sigma_p \leq \sigma < \sigma_{0.2}) \\ \sigma/E + b\sigma + c + d(\sigma - \sigma_{0.2})^{n2} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (1)_{1\sim3}$$

$$a = \frac{0.002}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1}}, b = \frac{0.002 \cdot n1 \cdot \sigma_{0.2}^{n1-1}}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1}}, c = \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}}$$

$$d = \frac{1}{(\sigma_{10} - \sigma_{0.2})^{n2}} \left(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \quad (1)_{4\sim8}$$

$$E_{0.2} = \frac{E(\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1})}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1} + 0.002 \cdot n1 \cdot E \sigma_{0.2}^{n1-1}}$$

ここに、 ε : ひずみ、 σ : 応力、 E : 弾性係数、 σ_p : 比例限界、 $n1, n2$: 硬化パラメータ、 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力、 $\varepsilon_{0.2}$: 0.2%耐力点における全ひずみ、 ε_{10} : 10%全ひずみ (=0.1)、および σ_{10} : 10%ひずみ時の応力である。

2・2 構成式の数値解析プログラムへの導入

数値解析プログラムは、部材断面をセグメントと称する微小要素に分割してモデル化できる、2 節点薄肉閉断面 Euler はり要素を有するものである。また、本プログラムは、幾何学的非線形問題には更新 Lagrange 法によって対応し、弾塑性問題については、等方硬化則、連合流れ則と von Mises の降伏関数を用いて定式化されている⁷⁾。本プログラムの概略的なフローチャートを図 1 に示す。構成式は、同図中に二重線囲みで示した応力積分アルゴリズムにおいて、与えられた相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ に対する、相当応力 $\bar{\sigma}$ とひずみ硬化係数 H' の計算式を追加することによって導入した。式(1)の第 2, 3 式より、 $\bar{\varepsilon}^p$ と $\bar{\sigma}$ の関係は、次式で表される。

$$\bar{\varepsilon}^p = \begin{cases} a(\bar{\sigma}^{n1} - \sigma_p^{n1}) & (\sigma_p \leq \bar{\sigma} < \sigma_{0.2}) \\ b\bar{\sigma} + c + d(\bar{\sigma} - \sigma_{0.2})^{n2} & (\sigma_{0.2} < \bar{\sigma}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)の第 2 式において、 $\bar{\sigma}$ は解析的に求められないため、Newton-Raphson 法を用いることにすれば、収束条件式は次式で表される。

$$F(\bar{\sigma}^{(r)}) = b\bar{\sigma}^{(r)} + c + d(\bar{\sigma}^{(r)} - \sigma_{0.2})^{n2} - \bar{\varepsilon}^p \cong 0 \quad (3)$$

式(3)において、 $\bar{\sigma}$ の右肩符号(r)は、反復計算回数を表す。また、新たな $\bar{\sigma}$ は次式から求められる。

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^{(r)} &= \bar{\sigma}^{(r-1)} - F(\bar{\sigma}^{(r-1)}) / \{dF(\bar{\sigma}^{(r-1)})/d\bar{\sigma}\} \\ dF(\bar{\sigma}^{(r-1)})/d\bar{\sigma} &= b + d \cdot n2 \cdot (\bar{\sigma}^{(r-1)} - \sigma_{0.2})^{n2-1} \end{aligned} \quad (4)_{1,2}$$

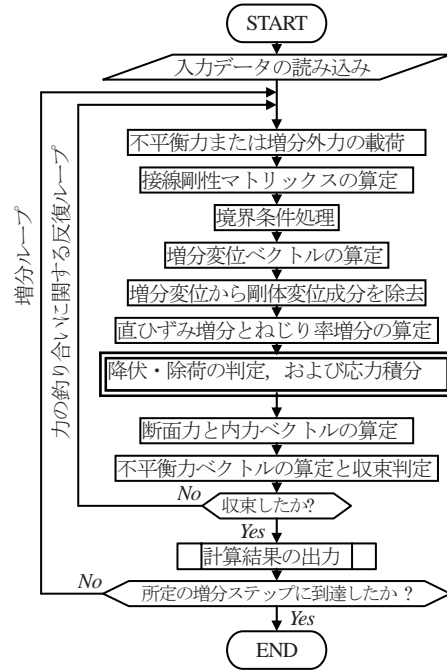


図 1 解析プログラムのフローチャート

式(2)の第 1 式、あるいは式(3)、(4)を用いた繰り返し計算によって $\bar{\sigma}$ が求めれば、ひずみ硬化係数 H' は、次式から求められる。

$$H' = \begin{cases} (a \cdot n1 \cdot \bar{\sigma}^{n1-1})^{-1} & (\bar{\sigma} < \sigma_{0.2}) \\ \{b + n2 \cdot (\bar{\sigma} - \sigma_{0.2})^{n2-1} \cdot d\}^{-1} & (\bar{\sigma} \geq \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (5)_{1,2}$$

3. 解析プログラムの検証

構成式が導入された解析プログラムの妥当性は、正負交番荷重を受ける棒部材の弾塑性理論解、圧縮力を受ける箱形断面部材を対象とする、シェル要素を用いた有限要素法による弾塑性有限変位解析結果との比較によって検証した。なお、シェル要素を有する有限要素法解析プログラムには、MRO 曲線が導入されており、既にその妥当性も確認されている⁸⁾。

3・1 正負交番荷重を受ける棒部材

図 2 に示すように、ステンレス鋼 SUS304 からなる箱形断面を有する棒部材を想定して、その一端を固定し、他端に軸力 P を正負交番荷重した。棒部材は軸方向に 1 分割ではり要素を適用し、部材断面は 32 個のセグメントに分割してモデル化した。解析に用いた MRO 曲線の材料定数を表 1 に示す。

解析結果として、軸力と図 2 に示す A 点の X 軸方向変位の関係を弾塑性理論解とともに図 3 に示す。これより、解析結果は弾塑性理論解と一致しており、解析プログラムの弾塑性解析アルゴリズムに対する妥当性

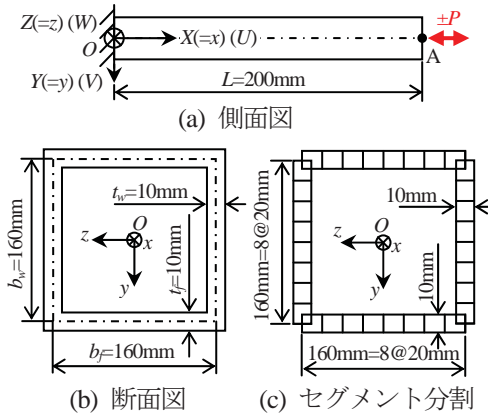


図2 正負交番負荷を受ける棒部材

表1 検証解析に用いた材料定数

Elastic modulus E (N/mm ²)	190420
Poisson's ratio ν	0.3
Proportion limit σ_p (N/mm ²)	163
0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	273
Coefficient of MRO curve n_1	5.9
Coefficient of MRO curve n_2	1.7
Stress at 10% strain σ_{10} (N/mm ²)	501

が確認できる。

3・2 圧縮力を受ける箱形断面部材

箱形断面部材として、図2と同じSUS304からなる正方形断面を有する、両端ヒンジ支持柱を想定した。柱部材の長さ L は、細長比パラメータが1.0となるように決定した。初期不整としては、初期たわみのみを考慮し、初期たわみ形状は、支間中央における初期たわみの最大値 $\delta_{max}=L/1000$ を持つ、正弦半波形で与えた。シェル要素を用いた本柱部材の解析モデルは、図4に示すように、対称性を考慮した1/4モデルとし、構成式を追加した解析プログラムに対する解析モデルは、図5に示すように、部材軸方向の対称性を考慮した1/2モデルとして、はり要素を14等分割にて適用した。解析結果として、圧縮力 P と、図4、5に示す節点Aの Y 軸方向変位 V の関係を図6に示す。

図6より、はり要素、シェル要素を用いた解析による荷重-変位関係は一致しており、構成式を追加した解析プログラムの弾塑性有限変位問題に対する妥当性が確認できる。

4. パラメトリック解析

パラメトリック解析では、細長比パラメータ λ_c を0.2から2.0まで0.1刻みで変動させ、さらに残留応力分布

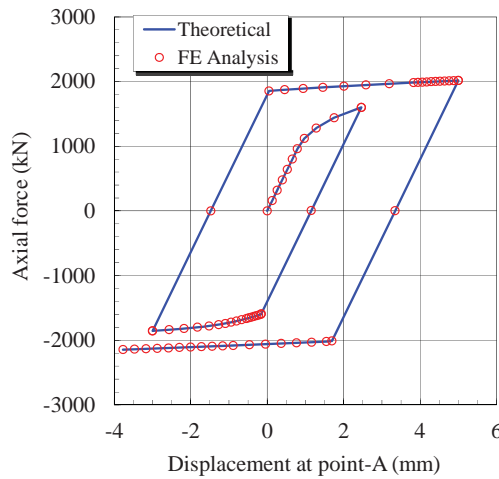


図3 正負交番軸力と変位の関係

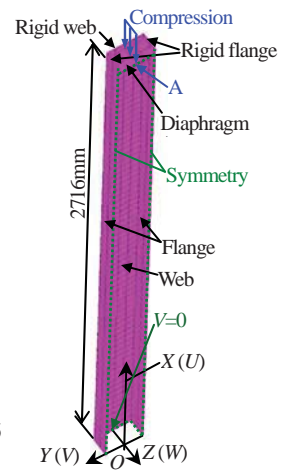


図4 シェル要素モデル

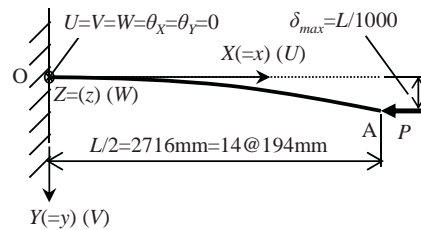


図5 はり要素モデル

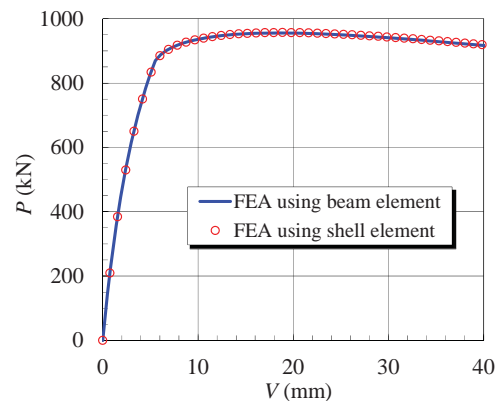


図6 はり、シェル要素を用いた検証解析結果

形状の異なるケースも設定した。

4・1 解析モデル

パラメトリック解析では、板厚20mmのSUS304に対する材料試験結果⁸⁾に基づいて、MRO曲線の材料定数は表2の値を設定した。また、部材断面の腹板、フランジの板幅、板厚は、各々の幅厚比パラメータが0.28になるように決定した。柱部材の長さ L は、 λ_c ごとに次式から決定した。

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E}} \frac{L_e}{r} \quad (6)$$

ここに、 E : 弾性係数、 L_e : 有効座屈長であり、部材

長を L とすると両端単純支持柱では $L_c=L$, および r : 断面回転半径である. また, σ_F は設計基準強度であり, ステンレス鋼では 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ が用いられる³⁾⁻⁵⁾.

初期たわみについては, 3・2 節の検証解析と同様の正弦半波形として, パラメトリック解析モデルは, 図 7 に示すように, 部材軸方向の対称性を考慮した 1/2 モデルとした.

4・2 残留応力分布

本研究では, 既往のステンレス鋼溶接部材の残留応

表 2 パラメトリック解析に用いた材料定数

Elastic modulus E (N/mm ²)	157000
Proportion limit σ_p (N/mm ²)	96
0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	261
Coefficient of MRO curve n_1	3.00
Stress at 10% strain σ_{10} (N/mm ²)	481
Coefficient of MRO curve n_2	1.66

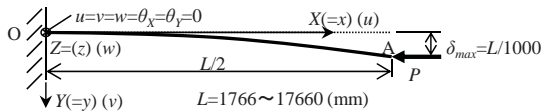


図 7 パラメトリック解析モデルの側面図

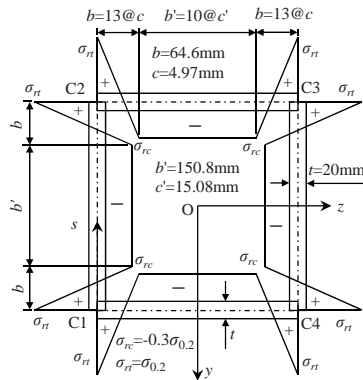


図 8 三角形残留応力分布モデルとセグメント分割

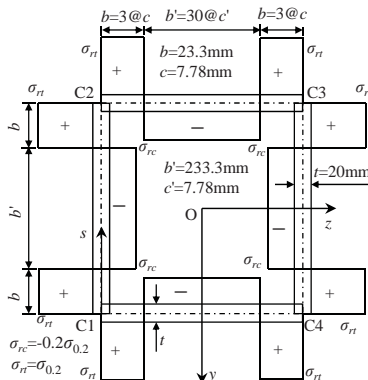


図 9 矩形残留応力分布モデルとセグメント分割

力分布モデル⁸⁾⁻¹⁰⁾に基づいて, それぞれ図 8, 9 に示すように, 溶接部近傍の分布形状が, 三角形および矩形の残留応力分布を設定した. なお, 図中には, セグメント分割も示しており, σ_m , σ_{rc} はそれぞれ引張, 圧縮残留応力の最大値を表している. また, 比較のため, 残留応力を考慮しないケースも設定した.

5. 解析結果と考察

5・1 荷重-変位関係

細長比パラメータ λ_c が 0.6, 1.7 の場合について, 荷重-変位関係を図 10, 11 に示す. 同図において, 縦軸は平均圧縮応力 σ を σ_F で, 横軸は図 7 に示す A 点の Y 軸方向変位 v を部材長 L で無次元化したパラメータである. また, 図中には, 弾性理論解と比例限界 (P.L.) を示した. 図中の凡例の「without R.S.」は残留応力を無視したケース, 「T」, 「R」はそれぞれ溶接部の残留応力分布形状が三角形, 矩形のケースの結果を表しており, 「U.P.」は終局点を意味する (以下同様とする).

図 10 より, $\lambda_c=0.6$ では, いずれの終局圧縮強度も比例限界を超えており, 残留応力を無視した場合, 三角形分布, 矩形分布の順に終局圧縮強度が大きくなっていることがわかる. 逆に, 図 11 より, $\lambda_c=1.7$ では, 終局圧縮強度は比例限界を下回っており, 残留応力を無視した場合, 三角形分布, 矩形分布の順に終局圧縮強

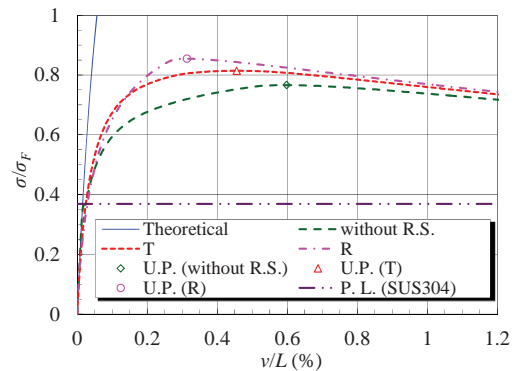


図 10 荷重-変位関係 ($\lambda_c=0.6$)

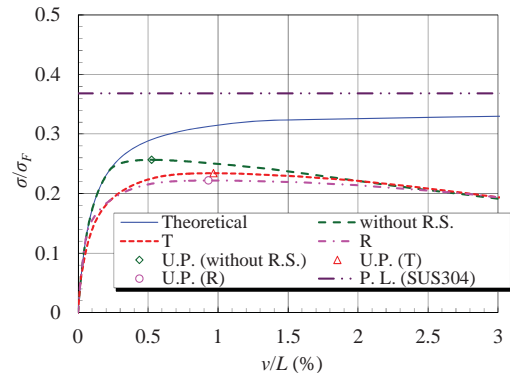
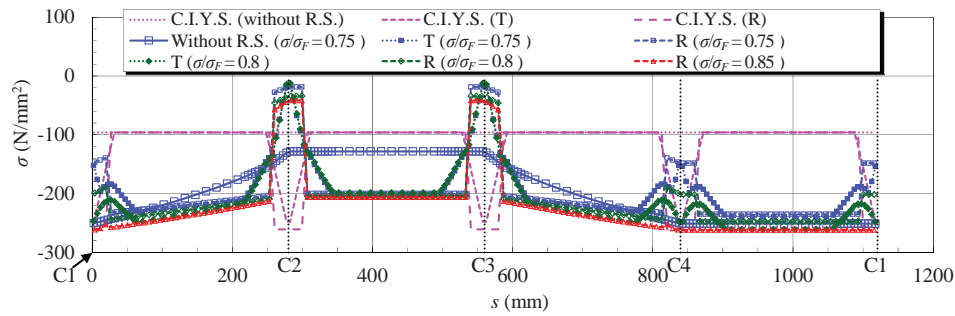
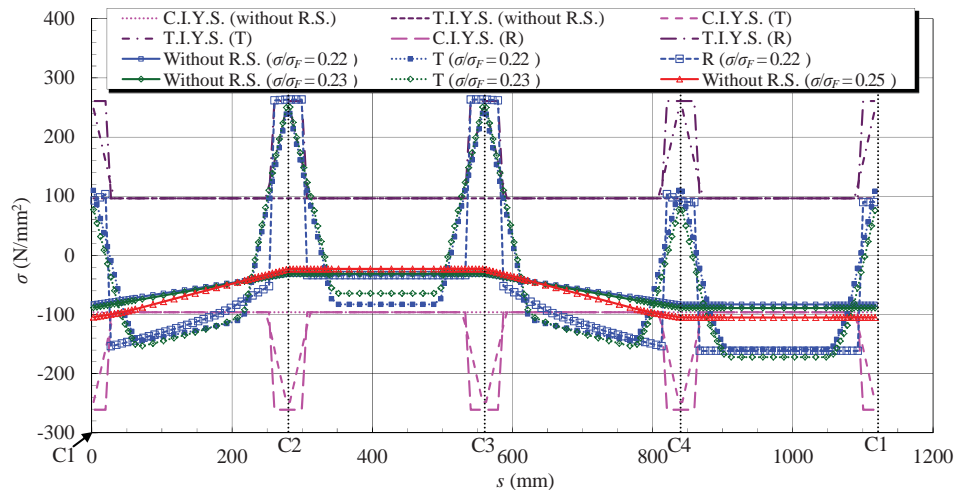


図 11 荷重-変位関係 ($\lambda_c=1.7$)

図 12 支間中央断面における応力の推移 ($\lambda_c=0.6$)図 13 支間中央断面における応力の推移 ($\lambda_c=1.7$)

度が小さくなっていることがわかる。

5・2 支間中央断面における応力の推移

それぞれ $\lambda_c=0.6$, 1.7 の場合について、支間中央（図 7 の固定端）断面における、平均圧縮応力 $\sigma/\sigma_F=0.75\sim 0.85$, $0.22\sim 0.25$ に対する応力の推移を図 12, 13 に示す。同図において、縦軸は応力 σ （引張を正とする）、横軸 s は、図 8, 9 に示す、腹板、フランジの肉厚中心線に沿った座標、C1~C4 は溶接部を意味する。また、凡例の T.I.Y.S., C.I.Y.S. はそれぞれ引張、圧縮側の初期降伏応力を意味する。

図 12 より、 $\sigma/\sigma_F=0.75$ では、残留応力を無視したケースは、全断面が塑性化しているのに対して、残留応力を考慮したケースは、溶接部近傍が弾性状態であることがわかる。また、 $\sigma/\sigma_F=0.8$ では、三角形分布のケースは、C1, C4 が塑性化しているのに対して、矩形分布のケースでは、弾性状態であることがわかる。したがって、 $\lambda_c=0.6$ については、引張残留応力によって初期降伏応力が増加するため、残留応力を無視した場合に比べて終局圧縮強度が上昇すると考えられる。特に、矩形分布では、引張残留応力の大きさが一定であるため、

最も終局圧縮強度が大きくなったものと考えられる。

図 13 より、 $\sigma/\sigma_F=0.22$ では、残留応力を無視したケースは、弾性状態にあるのに対して、矩形分布のケースでは、C2, C3 近傍の引張残留応力分布幅にわたって、塑性化していることがわかる。即ち、矩形分布のケースでは、この分布幅の応力が σ_{02} を超えており、接線弾性係数の低下も大きくなるため、最も終局圧縮強度が小さくなったものと考えられる。また、 $\sigma/\sigma_F=0.23$ では、三角形分布のケースも、C2, C3 近傍において塑性化しており、残留応力を無視したケースよりも、終局圧縮強度が小さくなったものと考えられる。

5・3 終局圧縮強度と設計強度曲線の比較

終局圧縮強度 σ_u と細長比パラメータ λ_c の関係を図 14 に示す。これより、終局圧縮強度が比例限界を超えると、残留応力によって終局圧縮強度が上昇するものの、 $\lambda_c=0.3$ 以下では、終局圧縮強度には残留応力による有意差のないことがわかる。また、一般的に、終局圧縮強度の上昇や低下に及ぼす影響は、三角形残留応力分布モデルを用いたケースに比べて、矩形残留応力分布モデルを用いたケースの方が大きいこともわかる。

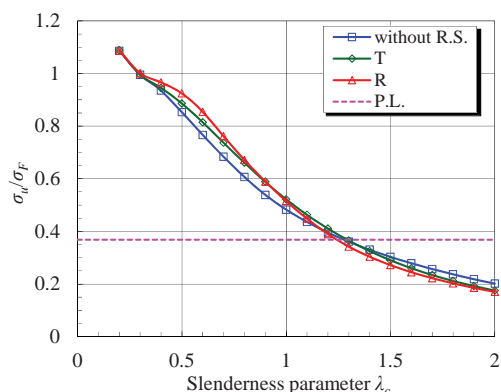


図 14 終局圧縮強度と細長比パラメータの関係

パラメトリック解析から得られた終局圧縮強度の最小値と設計強度曲線を Euler 曲線とともに図 15 に示す。設計強度曲線としては、溶接製作ステンレス鋼部材を対象とする設計基準である、文献 2) (SSBA) と 5) (EC3) に与えられている曲線を取り上げた。これより、文献 2) の設計強度曲線は、終局圧縮強度との適合は良好であるが、 $\lambda_c=0.7\sim 1.2$ では若干危険側、 $\lambda_c=1.4$ 以上では安全側に終局圧縮強度を評価することがわかる。また、文献 5) の設計強度曲線は、終局圧縮強度を危険側に評価することがわかる。

6. まとめ

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 からなる溶接箱形断面部材の終局圧縮強度を解析的に明確にすることを目的として、まず、ステンレス鋼の構成式を非線形有限要素法解析プログラムに導入し、その妥当性を検証した。次に、同プログラムを用いたパラメトリック解析によって、残留応力分布形状が終局圧縮強度に及ぼす影響について明らかにした。さらに、終局圧縮強度を設計基準類に与えられている設計強度曲線とも比較した。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

- (1) SUS304 溶接箱形断面柱部材の平均圧縮応力が比例限界を超えると、引張残留応力によって初期降伏応力が上昇するため、終局圧縮強度も上昇する。
- (2) (1)において、逆に、平均圧縮応力が比例限界よりも小さければ、残留応力によって終局圧縮強度が低下する。
- (3) SUS304 溶接箱形断面柱部材の終局圧縮強度の上昇や低下に及ぼす影響は、三角形残留応力分布モデルに比べて、矩形残留応力分布モデルの方が大きい。
- (4) 文献 2) の設計強度曲線は、SUS304 溶接箱形断面柱部材の終局圧縮強度と良好に適合するが、文献

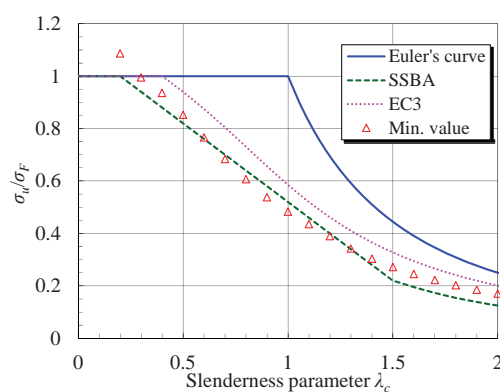


図 15 設計圧縮強度曲線との比較

5) の曲線は、SUS304 溶接箱形断面柱部材の終局圧縮強度を危険側に評価する。

参考文献

- 1) Graham Gedge : Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering, J. of Const. Steel Res., Vol.64, pp.1194-1198, 2008.
- 2) ステンレス構造建築協会：ステンレス建築構造設計基準・同解説 第2版, 技報堂出版, 2001.
- 3) ASCE : Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members, SEI/ASCE8-02, 2002.
- 4) AS/NZS : Cold-formed stainless steel structures, Australian/New Zealand Standard, AS/NZS 4673, 2001.
- 5) European Committee for Standardization, : Eurocode 3: - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels, CEN, European Standard, EN 1993-1-4, 2006.
- 6) 森省吾, 三好崇夫, 越智内士, 宮寄靖大, 奈良敬 : ステンレス鋼の応力ひずみモデルが終局強度に及ぼす影響について, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, 第15巻, 645-652頁, 2007.
- 7) 三好崇夫, 西村宣男, 立石優一, 奈良敬 : 鋼トラス橋のリダンダンシー評価のための非線形解析法について, 応用力学論文集, 土木学会, 第13巻, 965-976頁, 2010.
- 8) 宮寄靖大 : ステンレス鋼板の圧縮強度特性と終局強度評価法, 大阪大学学位論文, 2010.
- 9) 長渡祐樹, 越智内士 : ステンレス鋼からなる圧縮版の耐力実験および解析, 明石高専紀要, 第48巻, 97-102頁, 2005.
- 10) L. Gardner and R. B. Cruise : Modeling of Residual Stresses in Structural Stainless Steel Sections, J. of Struct. Eng., Proc. of ASCE, Vol.135, No.1, pp.42-53, 2009.