

ステンレス鋼の弾性係数の変化および Ramberg-Osgood 曲線の適用性について

長岡工業高等専門学校 正会員 ○宮 靖大
 大阪大学大学院 正会員 奈良 敬

1. はじめに

ステンレス鋼は、構造用炭素鋼に比べて、優れた耐食性を有する。そのため、ステンレス鋼の土木構造物への活用は、維持管理の観点から魅力的である。このような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ため、ステンレス鋼構造物が低い応力から剛性の低下が発生し、終局状態での変形量が、構造用炭素鋼に比べて大きくなる¹⁾。また、ステンレス鋼構造物の数値計算に使用する応力ひずみ関係は、3区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線などを用いる²⁾が、同式は煩雑であり、より簡便な定式化で精度良く表現することが実用化に向けて重要である。

本研究では、ステンレス鋼の応力ひずみ関係に着目し、比例限界応力(0.01%耐力)および0.1%耐力、0.2%耐力時の初期弾性係数の変化を材料試験結果により、明らかにするとともに、応力ひずみ関係を Ramberg-Osgood 曲線で表現し、その精度を明らかにすることを目的とする。

2. 対象とするステンレス鋼

本研究で対象とするステンレス鋼は、これまでの材料試験データ²⁾を基に、オーステナイト系 SUS304, SUS304N2, SUS316, フェライト系 SUS410L, マルテンサイト系 SUS410, 二相系 SUS329J3L の4系6鋼種である。それぞれのステンレス鋼種について、板厚6mmまたは20mmの板材より切り出した引張り試験片を用いた引張り試験結果により得られた強度を表1にまとめる。同表より、全てのステンレス鋼の0.2%耐力は、JISで規定される0.2%耐力に比べ約1.2倍以上の強度を有していることがわかる。また、SUS304およびSUS316にて、板厚の違いによる強度を比較してみると、6mmの強度が20mmの値に比べて1割程度大きくなることが確認できる。

表1 ステンレス鋼の強度(MPa)

鋼種	板厚(mm)	0.01%耐力	0.1%耐力	0.2%耐力	0.2%耐力(JIS)
SUS304	6	165	260	283	205以上
	20	126	232	259	205以上
SUS304N2	20	241	360	402	345以上
SUS316	6	176	256	280	205以上
	20	162	230	254	205以上
SUS410L	6	274	345	362	195以上
SUS410	6	230	323	344	205以上
SUS329J3L	20	334	477	524	450以上

3. ステンレス鋼の弾性係数

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ため、降伏棚を有する構造用炭素鋼のように、降伏応力近傍までの弾性係数が一定でない。そこで、前節で記述した引張り試験結果を用いて、図1に示す0.01%耐力、0.1%耐力および0.2%耐力時の弾性係数 $E_{0.01}$, $E_{0.1}$ および $E_{0.2}$ を検証する。表2は、各ステンレス鋼の応力ひずみ関係より、3つの応力に対応する割線勾配により決定した弾性係数を示す。また、同表には、比較のため、弾性係数 E を示している。この結果より、 $E_{0.01}$ は E に対して82%以上確保しているが、 $E_{0.2}$ では E の42から58%となり、JIS等で規格化されている0.2%耐力時の材料剛性は初期材料剛性に比較して5割程度低下することが確認できる。従って、構造用炭素鋼のように、降伏応力まではほぼ一定の剛性を有する材料に対して、ステンレス鋼に置換する場合には、この点に十分注意する必要がある。

4. ステンレス鋼の応力ひずみ関係

引張り試験で得られた結果を基に、次式で表す Ramberg-Osgood 曲線³⁾で表現することを試みる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (1)$$

キーワード ステンレス鋼, 応力ひずみ関係, Ramberg-Osgood 曲線, 弾性係数, 耐力
 連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888 TEL 0258-34-9439

表2 ステンレス鋼の弾性係数

鋼種	板厚 (mm)	E (GPa)	$E_{0.01}$ (GPa)	$E_{0.1}$ (GPa)	$E_{0.2}$ (GPa)	$E_{0.01}/E$ (%)	$E_{0.1}/E$ (%)	$E_{0.2}/E$ (%)
SUS304	6	166	147	103	78.9	88	62	48
	20	168	137	96.7	73.5	82	58	44
SUS304N2	20	173	159	117	92.9	92	68	54
SUS316	6	163	143	99.3	76.5	88	61	47
	20	174	152	98.8	72.9	88	57	42
SUS410L	6	204	190	129	94.0	93	63	46
SUS410	6	184	170	119	89.6	92	64	49
SUS329J3L	20	194	184	138	112	95	71	58

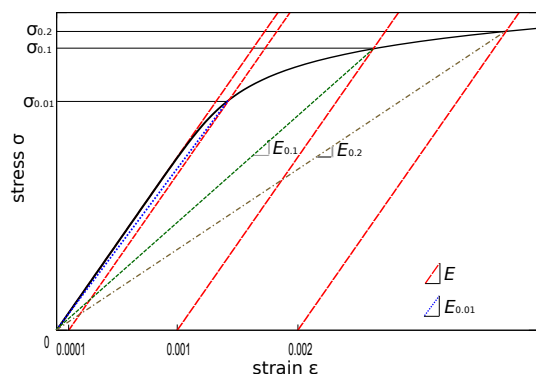


図1 ステンレス鋼の応力ひずみ関係

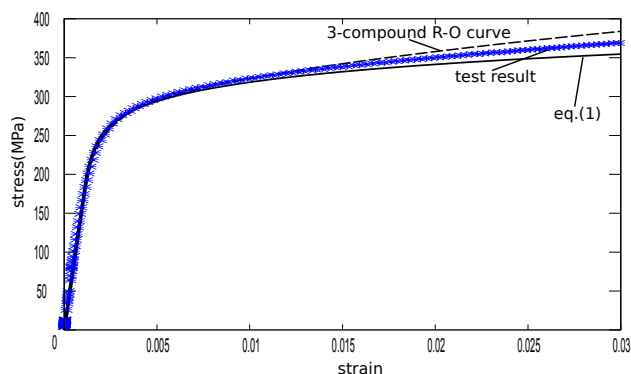


図2 SUS304の応力ひずみ関係

ここで、 ε はひずみ、 σ は応力、 K および n は式(2)の材料定数を表す。

$$K = \left(\frac{1}{m_1 - 1} \right) \left(\frac{\sigma_{0.1}}{E} \right)^{1-n} = \left(\frac{1}{m_2 - 1} \right) \left(\frac{\sigma_{0.2}}{E} \right)^{1-n}, n = 1 + \frac{\ln \left(\frac{m_2}{m_1} \frac{1 - m_1}{1 - m_2} \right)}{\ln \frac{\sigma_{0.1}}{\sigma_{0.2}}}, m_1 = \frac{1}{1 + \frac{0.001}{\sigma_{0.1}/E}}, m_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.002}{\sigma_{0.2}/E}} \quad (2)$$

図2は、板厚6mmのSUS304について、式(1)および3区間に分けた複合Ramberg-Osgood曲線と引張り試験結果を比較している。同図より、3%ひずみ時の式(1)は、実験結果を過大評価することなく、その誤差が約3.9%の精度で再現できることがわかる。また、式(1)は、材料剛性が大きく変化する比例限界応力点(165MPa)から0.2%耐力点(283MPa)の範囲についても、3区間に分けた複合Ramberg-Osgood曲線と同様に表現でき、1%ひずみ時の式(1)との差は2.5%程度以下となる。紙面の都合上割愛するその他のステンレス鋼についても、1%ひずみ時の3区間に分けた複合Ramberg-Osgood曲線と式(1)の差は、9%以下に収まる。今後、Ramberg-Osgood曲線を導入した数値計算を用いて、ステンレス鋼構造物の強度特性を明らかにし、これまでに明らかにした数値計算結果との比較を行うとともに、実現現象を再現する際の両定式化による精度を定量的に検証する必要がある。

5. おわりに

本研究では、ステンレス鋼の引張り試験結果を基に、3つの耐力時の割線勾配の変化とともに、Ramberg-Osgood曲線の適応性を調べた。本研究で得られた内容は次の通りである。(1)ステンレス鋼の0.2%耐力時の弾性係数 $E_{0.2}$ は、初期の弾性係数 E に比べて5割程度減少する。(2)3区間に分けた複合Ramberg-Osgood曲線に比べて簡便に表されるRamberg-Osgood曲線は、1%ひずみ時の差が約9%以下となる。

参考文献

- 1) 宮崎靖大, 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, 2010.3.
- 2) 例えば, 宮崎靖大, 栗林孝典, 三好崇夫, 奈良敬: ステンレス鋼SUS329J3Lの応力ひずみ関係と極限強度特性, 平成20年度土木学会全国大会第63回年次学術講演会, I-342, CD-ROM, 2008.9. 3) Walter Ramberg, William R. Osgood: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, No.902, 1943.7.