

SUS316 に対する材料定数を簡易同定した 2 区間 Ramberg-Osgood 曲線の適用性

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○和田 知大
長岡工業高等専門学校 正会員 宮寄 靖大

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。また、ステンレス鋼種は多様であり、高強度ステンレス鋼を構造材料に用いることで構造物の薄肉軽量化が図られる。このようなステンレス鋼を活用するためには、これらの材料で構成される構造物の力学的特性を明らかにする必要がある。著者ら¹⁾は、ステンレス鋼の応力ひずみ関係について、2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線を提案し、ひずみ 10% までを十分な精度で表現できることを示した。本研究は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 を対象に、一般的なヤング係数および引張試験より得られた参照ひずみを用いた 2 区間 Ramberg-Osgood 曲線の適用性を検証する。

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、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 である。対象とする SUS316 は、板厚 9mm および 12mm の板材からそれぞれ圧延方向(L)と圧延直角方向(C)の 2 方向を各条件 3 体ずつ採取した引張試験片を用いて引張試験を実施した結果を用いる。表 1 は、対象とする SUS316 の材料特性値を示す。なお、これらの結果は、各試験片条件 3 体の平均値を表している。ここで、同表中の記号は、 E がヤング係数、 $\sigma_{0.01}$ が 0.01% 耐力、 $\sigma_{0.1}$ が 0.1% 耐力、 $\sigma_{0.2}$ が 0.2% 耐力、 σ_u が引張強度、 δ が破断伸び、 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ が降伏比および ν がポアソン比を意味する。表 1 より、板厚の違いによる強度を比較してみると、9mm の強度が 12mm の値に比べて、圧延方向では 10% 程度、圧延直角方向では 4% 程度大きくなることがわかる。

3. 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線

式(1)は、2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線である¹⁾。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + K_1 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{n_1} & (\sigma < \sigma_c) \\ \frac{\sigma}{E} + K_2 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{n_2} & (\sigma \geq \sigma_c) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 ε はひずみ、 σ は応力を意味する。また、 σ_c は式(2)で表される遷移点であり、 K_1 、 K_2 、 n_1 および n_2 は式(3)および式(4)で表される材料定数である。なお、これらの式に含まれる m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} および m_{22} は式(5)で表される。

表 1 コレクション 1 の引張試験結果

板厚 mm	採取方向	E GPa	$\sigma_{0.01}$ MPa	$\sigma_{0.1}$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_u MPa	δ %	$\sigma_{0.2}/\sigma_u$	ν
9	L	191	218	290	311	606	59.1	0.514	0.285
	C	179	200	275	297	599	63.1	0.496	0.271
12	L	193	205	269	284	609	61.9	0.467	0.293
	C	185	195	265	286	609	63.6	0.47	0.273

$$\sigma_c = E \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1 - n_2}} \quad (2)$$

$$K_1 = \left(\frac{1}{m_{11}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{11}}{E} \right)^{1 - n_1} \\ = \left(\frac{1}{m_{12}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{12}}{E} \right)^{1 - n_1},$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{m_{21}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{21}}{E} \right)^{1 - n_2} \\ = \left(\frac{1}{m_{22}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{22}}{E} \right)^{1 - n_2} \quad (3a, b)$$

$$n_1 = 1 + \frac{\log \left(\frac{m_{12}(1 - m_{11})}{m_{11}(1 - m_{12})} \right)}{\log \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{12}}}, \quad m_{11} = \frac{1}{1 + \frac{a_{11}}{\frac{\sigma_{11}}{E}}}, \quad m_{21} = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{\frac{\sigma_{12}}{E}}}, \\ n_2 = 1 + \frac{\log \left(\frac{m_{22}(1 - m_{21})}{m_{21}(1 - m_{22})} \right)}{\log \frac{\sigma_{21}}{\sigma_{22}}}, \quad m_{12} = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{\frac{\sigma_{12}}{E}}}, \quad m_{22} = \frac{1}{1 + \frac{a_{22}}{\frac{\sigma_{22}}{E}}} \quad (4a, b) \quad (5a, b, c, d)$$

キーワード SUS316, 応力ひずみ関係, Ramberg-Osgood 曲線

連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 TEL : 0258-34-9439 E-mail : y-miyazaki@nagaoka-ct.ac.jp

ここで、 σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{21} および σ_{22} は、割線勾配比 α から選定したオフセット耐力、 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} および a_{22} は選定したオフセット耐力を算出する際の参照ひずみを意味する。

図1は、板厚9mmおよび12mmのSUS316の引張試験による応力ひずみ関係を示す。また、同図中には9-L1試験片の割線勾配比から材料定数を決定した式(1)の2区間としたRamberg-Osgood曲線を表す。これによる引張試験結果の再現性は、1%のひずみ時にて2区間としたRamberg-Osgood曲線の応力が実験値に対して0.5%程度の誤差となる。それ以降の3%、5%および10%の各ひずみ時の2区間Ramberg-Osgood曲線による応力は、実験値の90%以上の値となり、10%ひずみまで良好に再現できるといえる。

表2は、割線勾配比から決定した参照ひずみ a を示す。ここで、 a の値は、材料試験で得られた個々の試験片の応力ひずみ関係に対して2区間Ramberg-Osgood曲線を適用させて算出した値を平均したものである。ここでは、より簡便な2区間Ramberg-Osgood曲線を表すため、表3の a と、SUS316の一般的なヤング係数の値 $E=193\text{GPa}$ を用いて表すこととする。図1中には、このようにして表現した応力ひずみ関係を黒の実線で表している。図1より、簡便に表した2区間Ramberg-Osgood曲線は、個々の試験片に対応させた2区間Ramberg-Osgood曲線とほぼ同様となり、引張試験結果による材料定数を算出することなく、実験による応力ひずみ関係を再現できることが分かる。

図2は、1%、3%、5%および10%の各ひずみ時における平均参照ひずみ a と一般的なヤング係数 E による2区間としたRamberg-Osgood曲線の応力を引張試験の結果の応力で除した値を示す。同図より、1%、3%、5%および10%の各ひずみ時の実験結果に対する2区間Ramberg-Osgood曲線の誤差は6~10%程度となることが分かる。

4. おわりに

本研究で得られた内容は次の通りである。(1)2区間Ramberg-Osgood曲線は、対象としたSUS316の応力ひずみ関係を良好に再現できる。(2)参照ひずみおよび一般的なヤング係数 E を用いた簡便な2区間Ramberg-Osgood曲線は、ひずみ10%までの領域を引張試験結果の6~10%程度の誤差で再現できる。

謝辞

土木研究所、日本鋼構造協会、日本橋梁建設協会、長岡技術科学大学、長岡工業高等専門学校、早稲田大学、本州四国連絡高速道路との共同研究「耐久性向上のための高性能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」にて実施したものです。関係の皆様深く感謝いたします。

参考文献

- 1)井崎茜，宮寄靖大，小野潔，宮下剛：Cr-Ni系ステンレス鋼の材料特性および材料モデルの定式化，鋼構造年次論文報告集，第27巻，pp.1-9，2019。

表2 参照ひずみの平均値

a_{11}	$a_{12}=a_{21}$	a_{22}
0.000978	0.00241	0.00391

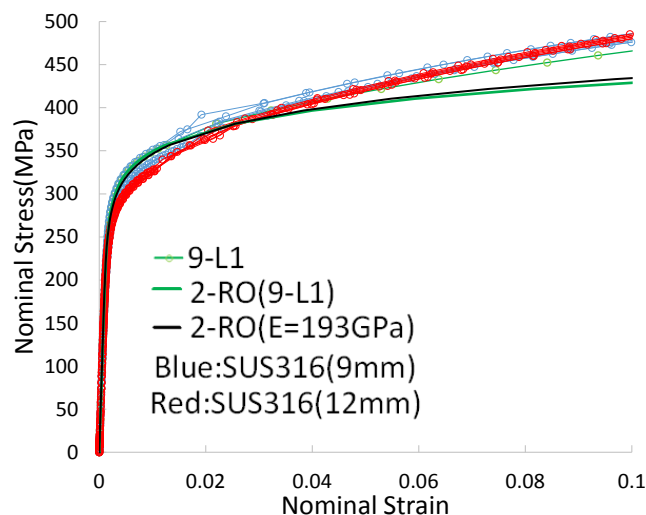


図1 SUS316の応力ひずみ関係と2区間としたRamberg-Osgood曲線

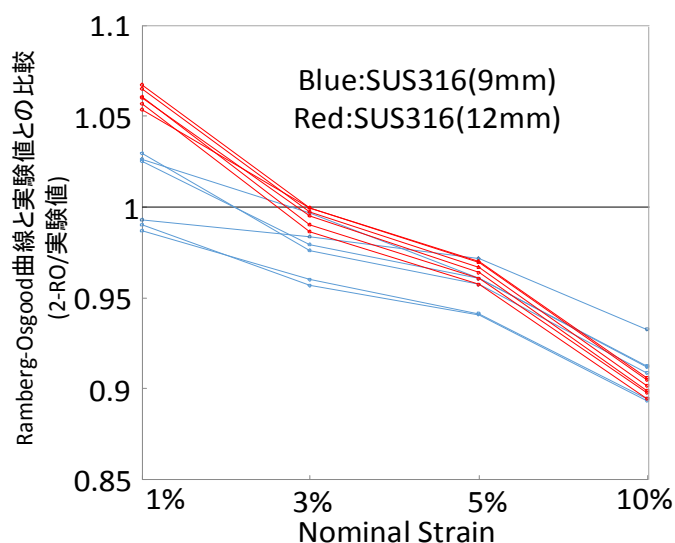


図2 2区間としたRamberg-Osgood曲線と実験値による比較