

Cr-Ni 系ステンレス鋼への 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線の適応性の検証

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○井崎 茜
 長岡工業高等専門学校 正会員 宮崎 靖大
 早稲田大学 正会員 小野 潔
 長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の構造用炭素鋼に比べて高耐食性であるため、土木構造材料に使用することで、長期的な供用に対するライフサイクルコストの低減が期待できる。このようなステンレス鋼土木構造物を実現するためには、設計法を明らかにする必要がある。そのため、部材または構造全体レベルでの強度特性を詳細に調べる必要がある。本研究では、これらの強度特性を調べるに当たって基本となるステンレス鋼の応力ひずみ関係について、既往の研究¹⁾で提案された割線勾配比を用いた 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線の適応性を調べる。

2. 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線

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 SUS304, SUS316, SUS304A および SUS316A, リーン二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 の 6 鋼種とする。これらの材料の材料試験結果は文献 2) および 3) を参照されたい。

本研究で適応性を調べる 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線は、式(1)の通りである¹⁾。

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

ここで、 σ_c は式(2)で表される遷移点、 K_1, K_2, n_1 および n_2 は、式(3)から式(6)で表される材料定数である。なお、式(3)から式(6)に含まれる m_{11}, m_{12}, m_{21} および m_{22} は式(7)で表される。

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

$$K_1 = \left(\frac{1}{m_{11}} - 1\right) \left(\frac{\sigma_{11}}{E}\right)^{1-n_1} = \left(\frac{1}{m_{12}} - 1\right) \left(\frac{\sigma_{12}}{E}\right)^{1-n_1} \quad (3)^1$$

$$n_1 = 1 + \frac{\log\left(\frac{m_{12}(1-m_{11})}{m_{11}(1-m_{12})}\right)}{\log\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{12}}} \quad (4)^1$$

$$n_2 = 1 + \frac{\log\left(\frac{m_{22}(1-m_{21})}{m_{21}(1-m_{22})}\right)}{\log\frac{\sigma_{21}}{\sigma_{22}}} \quad (6)^1$$

$$\begin{cases} m_{11} = \frac{1}{1 + \frac{a_{11}}{\sigma_{11}/E}} \\ m_{12} = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{\sigma_{12}/E}} \end{cases} \quad \begin{cases} m_{21} = \frac{1}{1 + \frac{a_{21}}{\sigma_{21}/E}} \\ m_{22} = \frac{1}{1 + \frac{a_{22}}{\sigma_{22}/E}} \end{cases} \quad (7)^1$$

ここで、 $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{21}$ および σ_{22} は表 1 に示す割線勾配比から選定したオフセット耐力¹⁾、 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示している。

表 1 割線勾配比

	E_{11}/E	E_{12}/E	E_{21}/E	E_{22}/E
近似値	0.60	0.40		0.30

表 2 実験結果に対する 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線による応力比($\sigma_{2RO}/\sigma_{exp}$)

誤差確認	SUS304	SUS316	SUS323L	SUS821L1
1%	1.037	1.030	1.000	1.000
3%	1.078	1.045	1.000	1.000
5%	1.072	1.035	1.000	1.000
10%	1.047	0.986	1.000	1.000
0.1% 耐力	1.000	1.000	1.012	1.006
0.2% 耐力	1.000	0.987	1.000	0.994

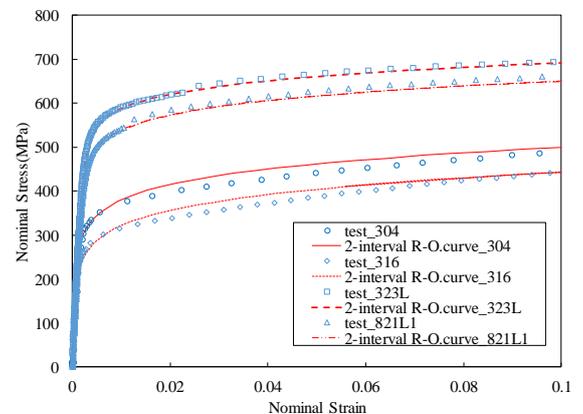


図 1 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線

キーワード オーステナイト系ステンレス鋼 リーン二相系ステンレス鋼 Ramberg-Osgood 曲線

連絡先 〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888 長岡工業高等専門学校 TEL 0254-34-9439

3. 対象ステンレス鋼への2区間としたRamberg-Osgood曲線の適応性

図1は、本研究で対象としたステンレス鋼の応力ひずみ関係および2区間としたRamberg-Osgood曲線の一例を表している。同図の線が2区間としたRamberg-Osgood曲線を、プロットが材料試験結果^{2), 3)}を表している。また、表2は、図1で示した2区間としたRamberg-Osgood曲線と材料試験で得られた各ひずみにおける応力の比をまとめている。なお、 σ_{exp} および σ_{2RO} は、材料試験により得られた応力および2区間としたRamberg-Osgood曲線により得られた応力を意味している。同表より、ひずみ1%, 3%, 5%, 10%, 0.1%耐力および0.2%耐力の各点において2区間としたRamberg-Osgood曲線は、実験値に対して5%以下となることがわかる。これらより、2区間としたRamberg-Osgood曲線は、材料試験結果におけるひずみ10%までの領域を精度よく再現できることがわかる。

表3は、割線勾配比を用いて求めた参照ひずみをオーステナイト系ステンレス鋼またはリーニ二相系ステンレス鋼でそれぞれ平均した値をまとめている。これらの値と割線勾配比を用いて、オフセット耐力を求める線の交点を参照応力とすることでヤング係数 E のみで応力ひずみ関係を再現することを考える。図2および図3は、ヤング係数 E のみにより、2区間としたRamberg-Osgood曲線を表している。ここで、両図のプロットは、丸が各種ステンレス鋼の応力ひずみ関係の上限を、四角が各種ステンレス鋼の応力ひずみ関係の下限の材料試験結果を表している。図2から、オーステナイト系ステンレス鋼のヤング係数($E=193\text{GPa}$)を用いて表現した2区間としたRamberg-Osgood曲線は、材料試験で得られた応力ひずみ関係のばらつき内で再現できることがわかる。また、図3の、リーニ二相系ステンレス鋼のヤング係数 $E=193\text{GPa}$ または 200GPa を用いて表現した2区間としたRamberg-Osgood曲線は、ひずみ1%または4%から材料試験で得られたひずみ時の下限応力値よりも小さく表現することがわかる。

4. おわりに

本研究で得られた内容は、次の通りである。(1)割線勾配比を用いた2区間としたRamberg-Osgood曲線は、ひずみ10%の範囲内で応力ひずみ関係を精度よく再現することができる。(2)オーステナイト系ステンレス鋼のヤング係数 E を用いた2区間としたRamberg-Osgood曲線は、材料試験で得られた応力ひずみ関係のばらつき内に収まることわかる。(3)リーニ二相系ステンレス鋼のヤング係数 E を用いて表現した2区間としたRamberg-Osgood曲線は、ひずみ1%までの範囲において材料試験で得られた応力ひずみ関係のばらつき内に収まる。

謝辞 本研究に用いた材料試験結果は、土木研究所との共同研究「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ある。ここに記して謝意を表す。

参考文献 1) 佐藤信輔, 宮寄靖大: ステンレス鋼の応力ひずみ関係への2区間としたRamberg-Osgood曲線の適用性の検証, 第33回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2015.2) 井崎茜, 宮寄靖大, 佐藤信輔, 小野潔, 宮下剛: 板材および山形鋼から採取したステンレス鋼の材料特性, 平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会, I-571, 2018.8.3) 井崎茜, 宮寄靖大, 宮下剛, 小野潔: 板材および山形鋼より採取したCr-Ni系ステンレス鋼の材料特性, 第36回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp.30-31, 2018.11.

表3 参照ひずみ a の平均

試験片条件	a_{1-1}	a_{1-2}/a_{2-1}	a_{2-2}
304,316	0.0009	0.0022	0.0037
323L,821L1	0.0017	0.0041	0.0067

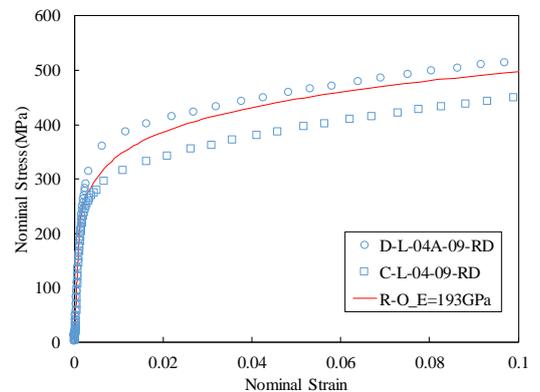


図2 オーステナイト系($E=193\text{GPa}$)の2区間としたRamberg-Osgood曲線

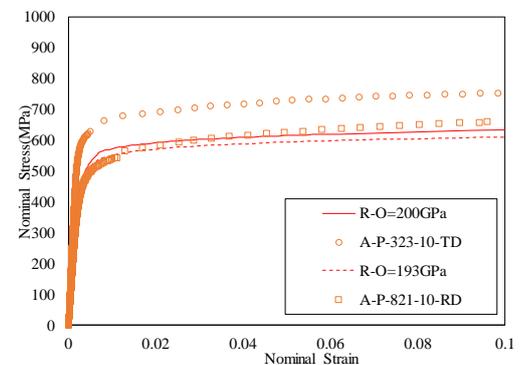


図3 リーン二相系($E=193\text{GPa}$ or 200GPa)の2区間としたRamberg-Osgood曲線