

リーニ二相系ステンレス鋼の応力-ひずみ特性とその構成式

明石工業高等専門学校 正会員 三好 崇夫

1. はじめに

今後、架け替え、更新される土木構造物において、ミニマムメンテナンス化や超長寿命化、LCC の縮減を達成するための方策の一つとして、耐食性に優れたステンレス鋼の活用が考えられる。しかし、SUS304 等の一般的なステンレス鋼は希少元素であるニッケルを 8%以上含むため、材料コストが極めて高価である。その一方、近年、ニッケル含有量を最少 1.5%まで削減して材料コストの縮減を図りつつも、SUS304 と同等以上の耐食性を有するリーニ二相系ステンレス鋼が開発されており、その土木構造物への活用が注目されている¹⁾。本研究では、同鋼材の応力-ひずみ関係、機械的特性値の板厚依存性やばらつきについて調査するとともに、同鋼材からなる構造物の終局強度解析に向けて既存の構成式の適用性について検討するため、材料試験を実施し、加えて既往の研究^{2),3)}で実施された同鋼材の材料試験結果を収集、分析した。なお、本文では、リーニ二相系ステンレス鋼をリーニ鋼と称することにする。また、リーニ鋼としては EN 10088-4⁴⁾における 1.4162 の熱間圧延鋼板を対象とした。

2. 応力-ひずみ曲線と機械的特性値

本研究では、板厚 6mm の 1.4162 熱間圧延鋼板から圧延方向、圧延直角方向に各 5 体の試験片を採取して引張試験を実施した。試験結果として圧延方向別のリーニ鋼の応力-ひずみ曲線について、構造用炭素鋼 SS400、SM490Y、SM570、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、二相系ステンレス鋼 SUS329J3L の応力-ひずみ曲線とともに図-1 に示す。図-1 より、リーニ鋼は明確な降伏点を持たず、顕著なひずみ硬化挙動を呈するとともに、圧延方向による異方性も認められることがわかる。表-1 には、リーニ鋼の機械的特性値について、本研究の材料試験から得られたその平均値、ミルシート値、材料規格値⁴⁾とともに示した。ただし、ミルシート値は圧延直角方向に対するものである。これより、同試験から得られた 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ 、引張強度 σ_u 、破断伸び ε_f はいずれも規格値を満たしており、試験時のひずみ速度の相違による差異は認められるもののミルシート値とも対応していることがわかる。表-2 は弾性係数、0.2%耐力（降伏応力）と引張強度と降伏比について、リーニ鋼とその他鋼材を比較して示したものである。これより、リーニ鋼の 0.2%耐力、引張強度と降伏比は SUS329J3L と同等であり、SM570 の降伏応力とリーニ鋼の 0.2%耐力も概ね対応していることがわかる。降伏比は SUS304 には及ばないものの SM570 より小さく、SM570 に比べてひずみ硬化特性に優れていることがわかる。同表には、各機械的特性値の圧延方向と圧延直角方向との比も示したが、リーニ鋼

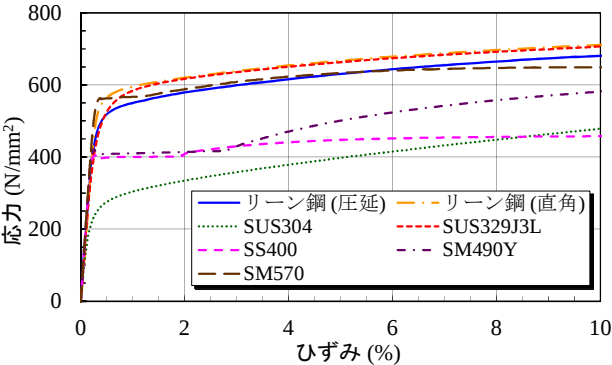


図-1 応力-ひずみ曲線

表-1 リーン鋼の機械的特性値

载荷方向	圧延	直角	全平均	ミルシート	規格値
弾性係数 E (GPa)	197.5	213.6	206.5	—	—
0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (MPa)	379	422	403	—	—
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	512	561	539	596	450
1%耐力 σ_1 (MPa)	558	602	583	641	—
10%ひずみ時応力 σ_{10} (MPa)	679	713	698	—	—
引張強度 σ_u (MPa)	733	753	745	750	660
一様伸び ε_u (%)	31	26	28	30	—
破断伸び ε_f (%)	49	40	44	54	25

表-2 機械的特性値の比較

鋼種	载荷方向	弾性係数 E (GPa)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (降伏応力 σ_y) (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ (σ_y/σ_u)
リーニ鋼	圧延	197.5	512	733	0.70
	直角	213.6	561	753	0.75
	圧延/直角	0.92	0.91	0.97	0.94
SS400	圧延	219.8	392	460	0.85
SM490Y	圧延	214.4	405	535	0.76
SM570	圧延	217.7	561	649	0.86
SUS304	圧延	175.1	263	707	0.37
	直角	180.4	255	687	0.37
	圧延/直角	0.97	1.03	1.03	1.00
SUS329J3L	圧延	183.8	515	735	0.70
	直角	199.3	542	758	0.72
	圧延/直角	0.92	0.95	0.97	0.98

リーニ二相系ステンレス鋼、応力-ひずみ曲線、機械的特性値、構成式

連絡先（〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3, TEL：078-946-6173, FAX：078-946-6184）

は SUS304 に比べてやや大きな異方性を示すことがわかる。

3. 機械的特性値の板厚依存性とばらつき

リーン鋼の機械的特性値の板厚依存性について把握するため、本研究と既往の研究^{2),3)}の材料試験から得られた 0.2%耐力、引張強度と板厚の関係性をそれぞれ図-2, 3 に示す。なお、既往の研究では板厚 4~20mm の鋼板を用いて材料試験が実施されている。また、各図の縦軸は各々を表-1 の規格値で無次元化しており、参考までに相関係数と直線回帰式も示した。図-2, 3 より、限られたデータであるため相関は低いものの、0.2%耐力、引張強度とも直線回帰式は右下がりであり、SUS304 が強度特性値に板厚依存性がないとされている⁵⁾のとは対照的に、リーン鋼は板厚増加とともにそれらが低下する傾向がうかがえる。表-3 には材料試験から得られたリーン鋼の 0.2%耐力（降伏応力）と引張強度の平均値、標準偏差と変動係数についてサンプル数とともに示した。また、同表中にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316 と SM570 に関するそれらの統計値^{5),6)}も示した。表-3 より、リーン鋼の 0.2%耐力の変動係数は SUS304, SUS316 に比べて小さく、SM570 の降伏応力と比較しても多少大きい程度であり、引張強度の変動係数はリーン鋼が最も小さいようである。即ち、リーン鋼の機械的特性値のばらつきは SUS304, SUS316 に比べて小さい傾向にあることがわかる。

4. 構成式の適用性

本研究では、既往の研究⁷⁾で提案されている構成式（MRO 曲線）のリーン鋼への適用性について検討した。それぞれ圧延方向と圧延直角方向について、本研究の材料試験から得られた応力-ひずみ曲線と MRO 曲線とを比較して図-4 に示す。これより、MRO 曲線は材料試験結果と良好に適合しており、リーン鋼からなる構造物の終局強度の把握を目的とした数値解析に MRO 曲線を適用できると考えられる。

5. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) リーン鋼の応力-ひずみ曲線は明確な降伏点を持たず、構造物用炭素鋼に比べて顕著なひずみ硬化挙動を示す。
- (2) リーン鋼の機械的特性値は SUS329J3L と同等であり、その 0.2%耐力は SM570 の降伏応力相当である。
- (3) リーン鋼の機械的特性値は SUS329J3L と同程度の異方性を示す。
- (4) リーン鋼の 0.2%耐力や引張強度は板厚増加につれて低下する板厚依存性を示す傾向にあるが、それらのばらつきは SUS304, SUS316 に比べて小さい傾向にある。
- (5) MRO 曲線はリーン鋼の応力-ひずみ曲線を精度よく表現することができる。

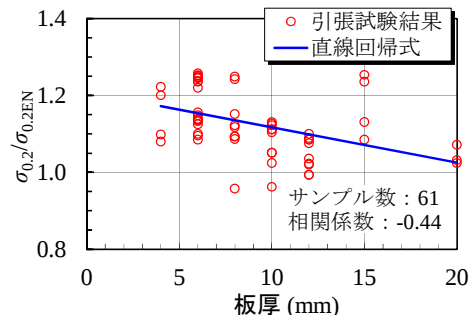


図-2 0.2%耐力と板厚の関係

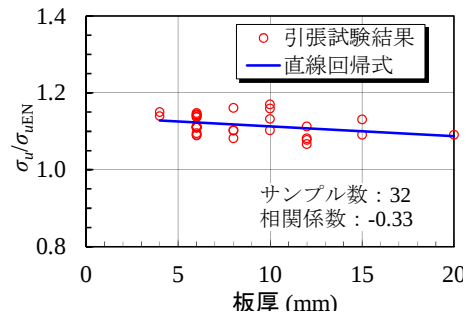


図-3 引張強度と板厚の関係

表-3 機械的特性値の統計値

鋼種	リーン鋼	SUS304 ⁵⁾	SUS316 ⁵⁾	SM570 ⁶⁾
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ または 降伏応力 σ_y (MPa)	サンプル数	59	78	21
	平均値	506	285	288
	標準偏差	36.31	22.94	28.86
	変動係数	0.072	0.081	0.100
引張強度 σ_u (MPa)	サンプル数	30	89	27
	平均値	737	642	586
	標準偏差	17.97	40.71	30.08
	変動係数	0.024	0.063	0.051

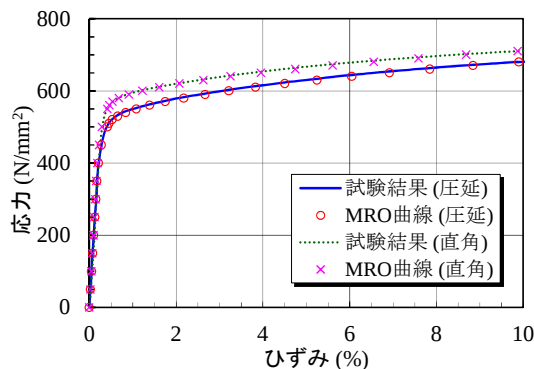


図-4 材料試験結果と構成式の比較

【参考文献】 1) G. Gedge : Structural uses of stainless steel - buildings and civil engineering, J. of Const. Steel Res., Vol.64, pp.1194-1198, 2008., 2) N. Saliba et. al. : Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders, Eng. Struct., Vol.64, pp.375-391, 2013., 3) N. Saliba et. al. : Cross-section stability of lean duplex stainless steel welded I-section, J. of Const. Steel Res., Vol.80, pp.1-14, 2013., 4) European Committee for Standardization, CEN : EN 10088-4. Stainless steels-Part 4: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes, 2009., 5) 建設省:建設事業への新素材・新材料利用技術の開発報告書 : 建設省総合技術開発プロジェクト, 1994., 6) 奈良ら:橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.299-310, 2004. 7) 森ら: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, Vol.15, pp.645-652, 2007.