

繰返し負荷を受ける SUS316 および SUS323L の材料特性

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○山田悠作
 長岡工業高等専門学校 正会員 宮崎靖大
 日本鋼構造協会 正会員 志村保美

1. はじめに

表 1 対象とするステンレス鋼の機械的性質と化学成分

鋼種	機械的性質			化学成分(%)									
	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	伸び δ (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS316	294	593	60	0.020	0.51	0.84	0.029	0	10.06	16.61	2.08	-	-
SUS323L	544	721	37	0.014	0.56	1.59	0.028	0.001	3.94	23.6	0.36	0.21	0.15

表 2 材料試験条件

	材料試験条件	振幅	サイクル数	制御方法	試験速度
1	定ひずみ振幅正負交番負荷	3.0%($\pm 1.5\%$)	10	ひずみ制御	0.1%/s
2		0.5%($\pm 0.25\%$)	300		
3	組み合わせひずみ振幅正負交番負荷	0.5% \rightarrow 3.0% \rightarrow 0.5%	200 \rightarrow 10 \rightarrow 100		
4		(step1 \rightarrow step2 \rightarrow step3)			
4	正側定応力振幅負荷	0.2%耐力	500		

現存する土木構造物の多くは、建設後 50 年が経過し、維持管理に関する早急な課題解決が求められている。このように老朽化した構造物は、維持修繕や架け替え等が必要となる。そこで、長期的な供用が必然とされる土木構造物に優れた耐久性を有する材料を用いることで、これらの課題を解決し、構造物のライフサイクルコストの低減を可能とする。

ステンレス鋼は従来の炭素鋼と同程度の強度を有するとともに、高い耐食性を示すため、前述の材料として適している。しかし、厚板のステンレス鋼を土木構造物に用いる際に、設計法を含め、構造用炭素鋼のデータに比べて明確にされている内容が少ないのが現状である。地震多発地域に位置する我が国において、ステンレス鋼製土木構造物を建設する際には、繰返し負荷に伴う材料の塑性変形挙動の把握が重要である。本研究は、ステンレス鋼を対象に繰返し負荷試験を実施し、その材料特性を明らかにする。

2. 材料試験方法

本研究は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および二相系(リ-ン型)ステンレス鋼 SUS323L を対象とする。表 1 および表 2 は、対象とするステンレス鋼の

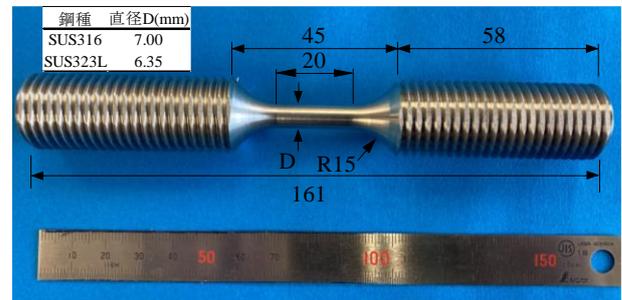


図 1 試験体形状

機械的性質、化学成分および本研究で実施した材料試験条件を示す。また、図 1 は、材料試験に用いる試験体形状を示す。同図の試験体は、ASTM E606/606M¹⁾および ISO12106²⁾に準拠している。これらの材料試験は、精密万能試験機(島津製作所製: AGX-V300kN)を用いて行い、試験機に付属のロードセルより荷重を、伸び計(島津製作所製ダイナストレ-ン: GL10mm)によりひずみを測定した。

3. 材料試験結果

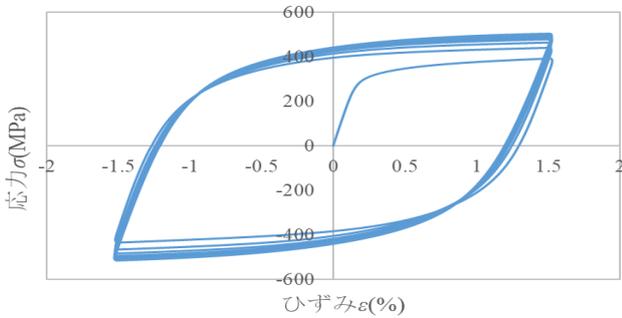
図 2, 図 3 および図 4 は、定ひずみ振幅正負交番負荷試験および組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験により得られた応力ひずみ関係を示す。同図の縦軸は材

料試験で得られた荷重を試験体平行部の原断面で除した公称応力を表している。まず、図2より、ひずみ振幅3.0%とした両ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、サイクル数の増加に伴い履歴ループの拡大が確認できる。つぎに、図3より、ひずみ振幅0.5%とした両ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、サイクル数の増加に伴う変化が図2の結果に比べて小さいことがわかる。そして、図4より、組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた両ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、図2および図3の結果と同様に、ひずみ振幅3.0%でサイクル数の増加に伴う履歴ループの拡大、ひずみ振幅0.5%でその変化がわずかになることが確認できる。

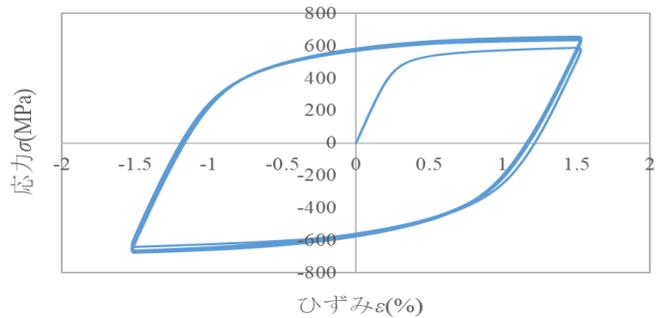
図5は、定ひずみ振幅正負交番負荷試験により得ら

れた応力変動幅 $\Delta\sigma$ とサイクル数の関係を示す。同図の縦軸は応力変動幅 $\Delta\sigma$ を1サイクル目の応力変動幅 $\Delta\sigma_1$ で除した値を、横軸はサイクル数を対数で示している。図5(a)より、SUS316におけるひずみ振幅3.0%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、サイクル数の増加とともに大きくなり、10サイクル目の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は1サイクル目の約123%となった。一方、SUS316のひずみ振幅0.5%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、サイクル数の増加に伴う変化が、1サイクル目の約97%~105%で推移した。

図5(b)より、SUS323Lにおけるひずみ振幅3.0%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、1サイクル目から4サイクル目まで増加し、最大で1サイクル目の約108%となり、それ以降は緩やかに減少し、10サイクル目は1サイクル目の約

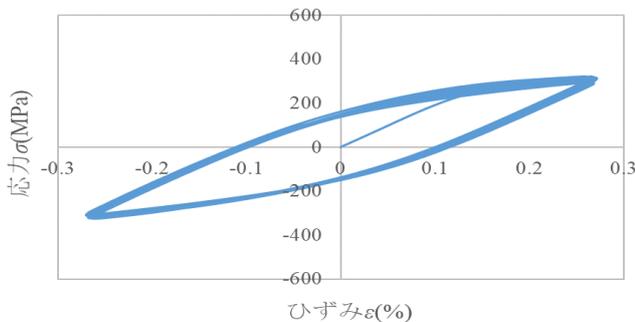


(a) SUS316

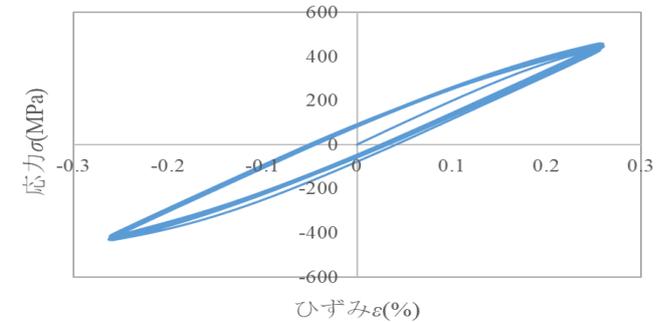


(b) SUS323L

図2 ひずみ振幅3.0%の定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力ひずみ関係

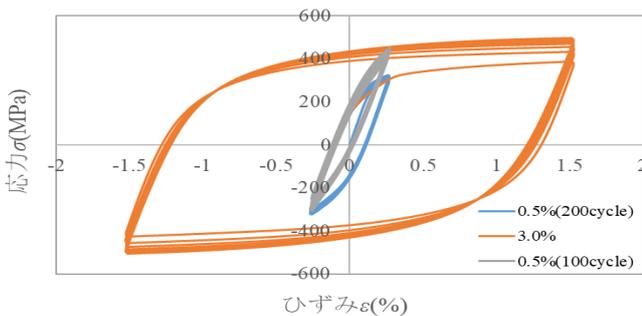


(a) SUS316

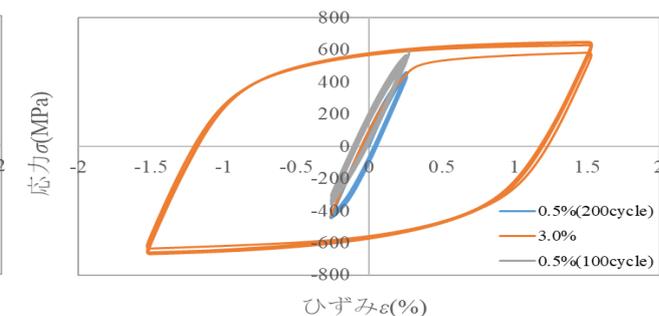


(b) SUS323L

図3 ひずみ振幅0.5%の定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力ひずみ関係



(a) SUS316



(b) SUS323L

図4 組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力ひずみ関係

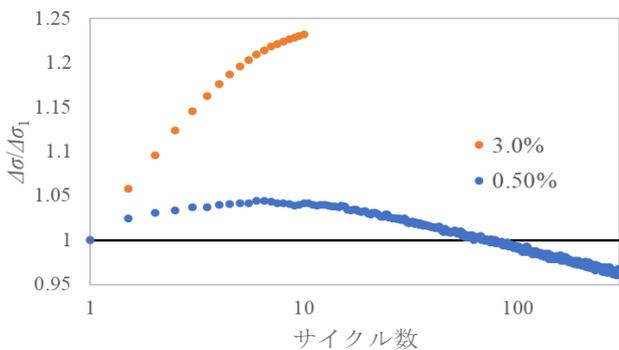
106%となった。また、SUS323Lのひずみ振幅0.5%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、サイクル数の増加に伴う変化が、1サイクル目の約99%~103%となった。既往の研究³⁾より、SUS304では、ひずみ振幅が1%以上になると繰返し硬化が明確に現れ、ひずみ振幅が約0.5%のときには、負荷サイクルを増加させても応力変動幅 $\Delta\sigma$ は明確に変化しないことが報告されている。本研究で対象としたステンレス鋼では、SUS316にて概ねこれらと同様の傾向が得られ、SUS323Lにてひずみ振幅3.0%における応力変動幅 $\Delta\sigma$ の増減が見られた。

図6は、組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験により得られた応力変動幅 $\Delta\sigma$ とサイクル数の関係を示す。同図の縦軸および横軸は、図5と同じである。なお、ひずみ振幅3.0%の場合は、ひずみ振幅3.0%のサイクルに移行した際の1サイクル目の応力変動幅で除している。図6より、組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた両ステンレス鋼のひずみ振幅3.0%および0.5%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られたひずみ振幅3.0%および0.5%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ と同様の傾向が見られる。また、図6(a)についてみ

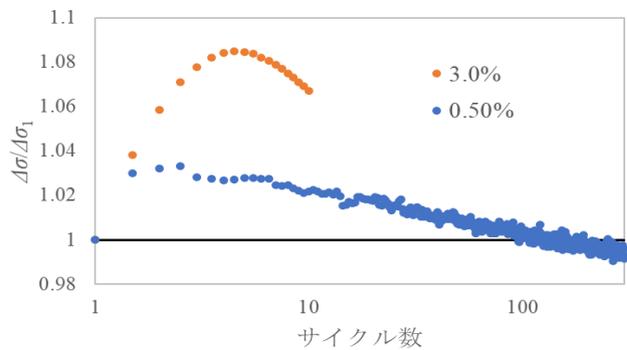
ると、SUS316では、step3の応力変動幅がstep1に比べて約15%増加する。この結果は、SUS304を対象とした既往の実験³⁾においても同様の傾向が確認されている。一方、図6(b)のSUS323Lでは、step1とstep3の応力変動幅の違いがほとんど見られない。

図7は、正側定応力振幅負荷試験により得られた対象としたステンレス鋼の応力ひずみ関係を示す。同図の縦軸は、材料試験で得られた荷重を試験体平行部の原断面で除した公称応力を表している。同図より、SUS316およびSUS323Lの応力ひずみ関係は、サイクル数の増加に伴いひずみ ε が進展していることが確認できる。

図8は、正側定応力振幅負荷試験により得られた増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ とサイクル数の関係を示す。同図の縦軸の増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ は、サイクル数に伴い変化したひずみを意味する。同図より、SUS316およびSUS323Lの500サイクル終了時の増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ は、約0.076%および約0.69%となることがわかる。また、SUS323Lの増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ は、SUS316に比べて、サイクル数の進展に伴う増加量が顕著であることがわかる。この結果より、

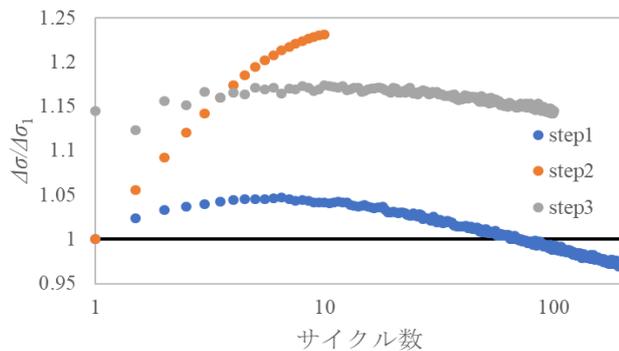


(a) SUS316

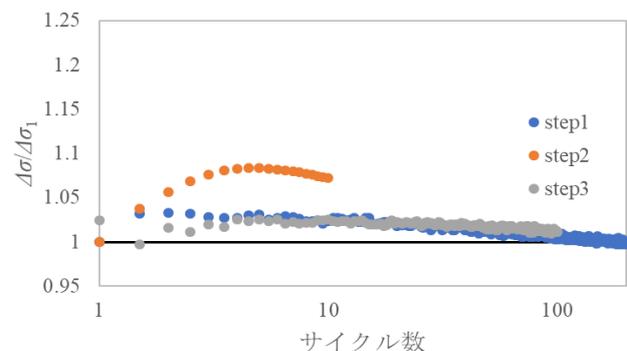


(b) SUS323L

図5 定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力変動幅 $\Delta\sigma$ とサイクル数の関係



(a) SUS316



(b) SUS323L

図6 組み合わせ定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力変動幅 $\Delta\sigma$ とサイクル数の関係

SUS323L のひずみ硬化の影響は、SUS316 に比べて緩やかであるといえる。

4. おわりに

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) SUS316 の定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られたひずみ振幅 3.0%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、サイクル数の増加とともに大きくなり、10 サイクル目の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は 1 サイクル目の約 123%となることを明らかにした。
- (2) SUS323L の定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られたひずみ振幅 3.0%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、1 サイクル目から 4 サイクル目まで増加し、最大で 1 サイクル目の約 108%となり、それ以降は緩やかに減少し、10 サイクル目は 1 サイクル目の約 106%となることを明らかにした。
- (3) 対象としたステンレス鋼の組み合わせひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、個々の定ひずみ振幅正負交番負荷試験で得られた結果と同様の傾向となることを明らかにした。
- (4) 組み合わせ定ひずみ振幅正負交番負荷試験におい

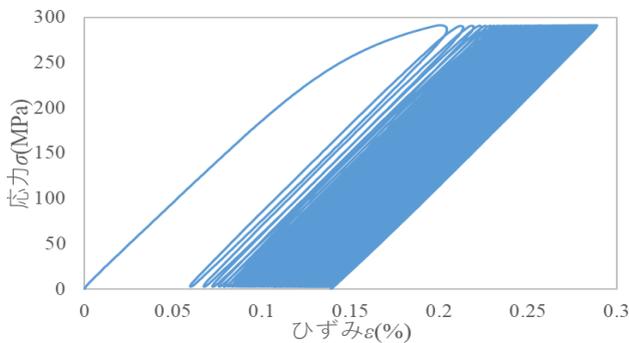
て、ひずみ振幅 3.0%を実施前後のひずみ振幅 0.5%の応力変動幅 $\Delta\sigma$ は、SUS316 では約 15%の増加、SUS323L では変化がないことを明らかにした。

- (5) 正側定応力振幅負荷試験において、SUS316 および SUS323L の 500 サイクル終了時の増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ は、約 0.076%および約 0.69%となることを明らかにした。

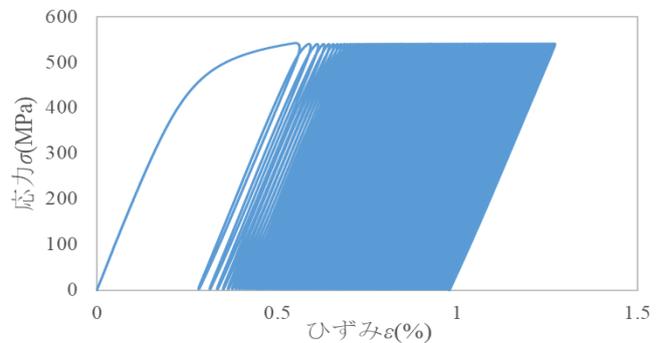
謝辞 本研究で実施した試験にあたっては、一般社団法人日本鋼構造協会より、材料の提供および試験体の製作を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) ASTM E606/E606M, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, 2020.
- 2) ISO12106, Metallic materials —Fatigue testing — Axial-strain-controlled method, 2017.
- 3) Yanyao Jiang, Jixi Zhang. Benchmark experiments and characteristic cyclic plasticity deformation, *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, pp. 1481–1515, 2008.

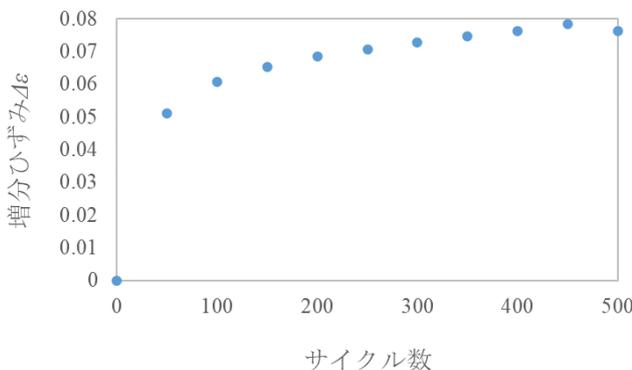


(a) SUS316

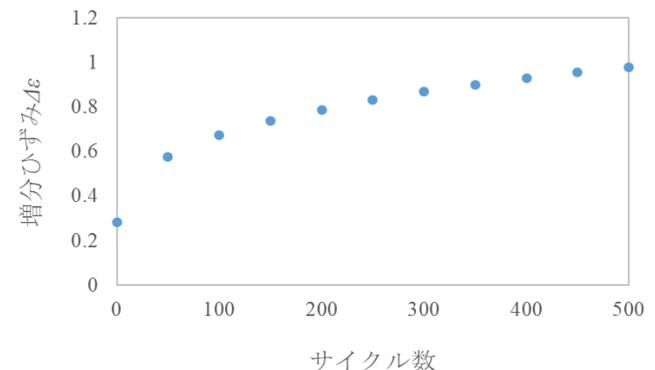


(b) SUS323L

図7 正側定応力振幅負荷で得られた応力ひずみ関係



(a) SUS316



(b) SUS323L

図8 増分ひずみ $\Delta\varepsilon$ とサイクル数の関係