

塑性ひずみの進展に伴う SUS316 および SUS821L1 の材料特性の変化

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

我が国に現存している土木構造物の多くは、これらの老朽化に伴う早期の課題解決が求められている。経年劣化した土木構造物は、補修または再構築が必要であり、ライフサイクルコストの低減を図った長期的な供用が求められる。その解決策のひとつとして、高耐久性材料であるステンレス鋼の使用が考えられる。しかしながら、ステンレス鋼で構成される橋梁は炭素鋼製に比べて極僅かであり、地震多発地域に位置する我が国での利用にあたっては構造物が繰返し負荷を受ける際の力学的挙動を詳細に明らかにする必要がある。その際には、繰返し負荷を受けるステンレス鋼の応力ひずみ関係のモデル化が必要不可欠である。そこで本研究では、ステンレス鋼について、塑性ひずみの進展に伴う材料特性の変化を、材料試験により明らかにする。

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、リーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1 を対象とする。図 1 は、本研究に用いた試験体形状およびひずみゲージの貼付け状況を示す。また、表 1 は、対象とするステンレス鋼のミルシートに記載の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ および試験体寸法を示す。ここで、同表の繰返し試験体については、ミルシートの入手ができなかったため、 $\sigma_{0.2}$ の値を省略している。材料試験では、負荷条件として複数の繰返しおよび 1 回の引張負荷後除荷の 2 種類を行った。繰返し負荷条件は除荷後のひずみが 2%、5%および 10%となるようにして試験機を制御し、1 回の引張および除荷となる負荷条件は除荷後のひずみが 5%または 10%となるように試験機を制御した。試験片は、繰返し試験条件にて 1 体、1 回の引張および除荷を与える負荷条件にて SUS316 および SUS821L1 について圧延方向 L および圧延直角方向 C にてそれぞれ 1 体を用いた。

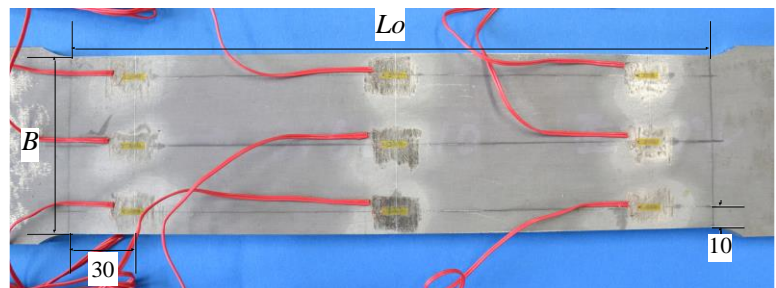


図 1 試験体形状およびひずみゲージの貼付け状況

材料試験時のデータは、計測ひずみ範囲 20~30%の単軸塑性ひずみゲージ

表 1 試験体の実測寸法およびミルシート記載の $\sigma_{0.2}$

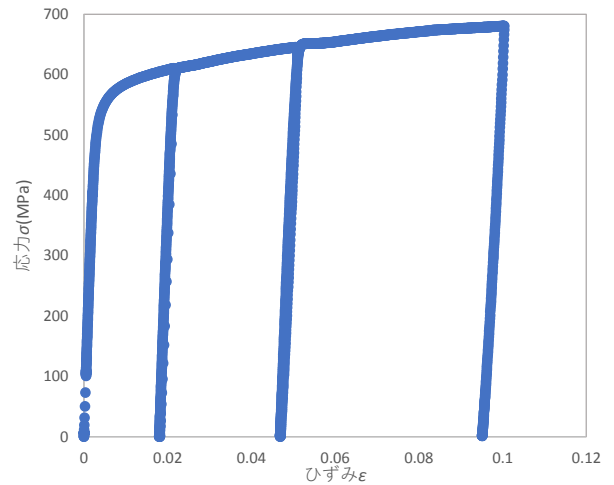
供試体名	公称板厚	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	平行部 L_0 (mm)	板厚 t(mm)	板幅 B(mm)	断面積 A(mm ²)
SUS-Cycle	10	-	291	9.9	85	842
316-5%-L	12	295	291	11.9	80	951
316-5%-C	12	295	292	12.0	80	957
316-10%-L	12	295	291	12.0	80	956
316-10%-C	12	295	291	12.0	80	956
821L1-5%-L	12	559	292	12.2	80	978
821L1-5%-C	12	559	291	12.1	80	971
821L1-10%-L	12	559	291	12.2	80	976
821L1-10%-C	12	559	291	12.1	80	970

(共和電業製：KFEM-5-120-C1L3M2R)を使用し、繰り返し負荷条件では試験片平行部の表裏面にて計 18 枚を、1 回の引張負荷後除荷では平行部の片面 9 枚を貼付け、ひずみを計測した。以降の結果で表すひずみは、このように計測した各試験片のひずみゲージから得られた全ての値を平均して用いることとする。材料試験における負荷方法は、万能試験機のクロスヘッド変位を静的な速度で制御した。

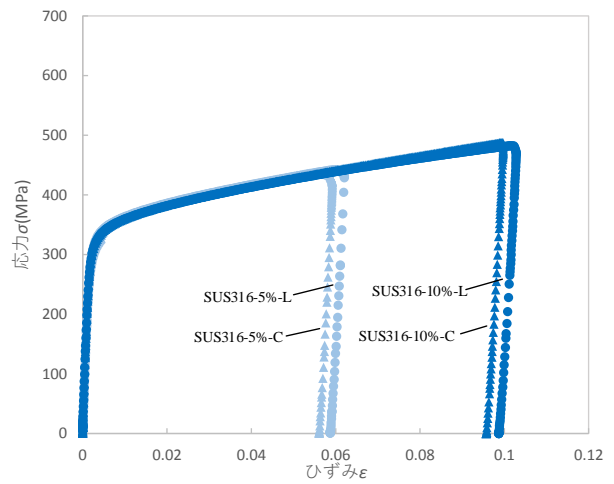
3. 材料試験結果

図 2 は、材料試験により得られた応力ひずみ関係を示す。同図より、対象とした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ことがわかる。また、図 2(b)および(c)を比較してみると、SUS821L1 は、SUS316 に比べて高強度であることが確認できる。

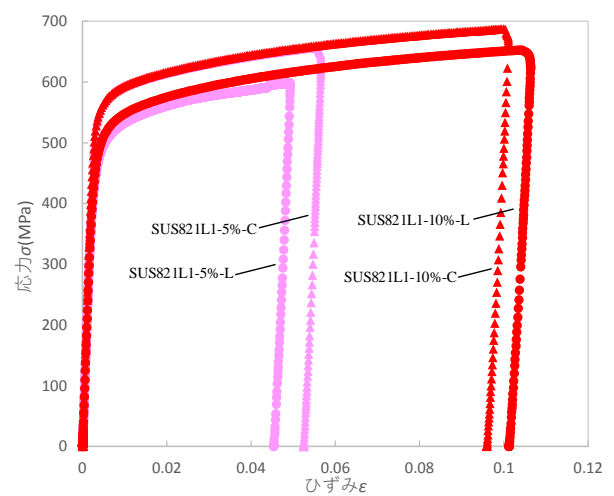
表 2 および表 3 は、繰り返し負荷条件および 1 回の引張と除荷の負荷条件による材料試験により得られたステンレス鋼の材料特性値を示す。これら表中の $E_i (i=0, 1, \dots, 5)$ はヤング係数を、 $\sigma_{0.01_0}$ 、 $\sigma_{0.01_{iv}}$ および $\sigma_{0.01_{ic}} (i=0, 1, \dots, 5)$ は 0.01% 耐力を意味する。また、 E の添え字 i は各負荷時および除荷時のヤング係数を、 $\sigma_{0.01}$ の添え字 v および c は、各負荷時および除荷時の E_i を用いて求めた場合および初期負荷時の E_0 を用いて求めた場合を意味する。図 3 および図 4 は、各状態でのヤング係数 ($i=1, 2, \dots, 5$) および 0.01% 耐力 $\sigma_{0.01_{iv}}$ 、 $\sigma_{0.01_{ic}} (i=1, 2, \dots, 5)$ を E_0 および $\sigma_{0.01_0} (= \sigma_{0.01_{0v}} = \sigma_{0.01_{0c}})$ で正規化した値を示す。両図の横軸は、弾性限界点を 0.01% 耐力とした塑性ひずみ ϵ^p を意味する。なお、 ϵ^p は各状態での E_i を用いて求めた場合、初期負荷時のヤング係数 E_0 を用いて求めた場合、初期負荷時の E_0 および $\sigma_{0.01_0}$ を用いて求めた場合の 3 パターンで表している。図 3 より、塑性ひずみ ϵ^p の算出方法の違いによるヤング係数 E の変化は、ほとんど影響しないことがわかる。つぎに、図 4(a) についてみると、全ての結果において 1 回目の除荷時の $\sigma_{0.01}$ の値は、初期値の約 1.05 倍から約 2.1 倍となることがわかる。同図(b), (c) より、 ϵ^p を初期負荷時のヤング係数 E_0 を用いて求めた場合および初期負荷時の弾性限界点を固定した場合の $\sigma_{0.01}$ の変化は、ほぼ同様の傾向を示すことが確認できる。



(a) SUS-Cycle



(b) SUS316



(c) SUS821L1

図 2 各試験体の応力ひずみ関係

表 2 SUS-Cycle の材料特性値

SUS-Cycle	初期負荷 ($i=0$)	除荷 1 回目 ($i=1$)	負荷 2 回目 ($i=2$)	除荷 2 回目 ($i=3$)	負荷 3 回目 ($i=4$)	除荷 3 回目 ($i=5$)
E_i (GPa)	217	190	206	171	174	147
$\sigma_{0.01_{iv}}$ (MPa)[E_i]	340	572	339	488	459	454
$\sigma_{0.01_{ic}}$ (MPa)[E_0]	340	317	245	167	140	83

表 3 SUS316 および SUS821L1 の材料特性値

供試体名	E_0 (GPa)	負荷		除荷	
		$\sigma_{0.01_0}$ (MPa)	E_1 (GPa)	$\sigma_{0.01_{1v}}$ (MPa)[E_i]	$\sigma_{0.01_{1c}}$ (MPa)[E_0]
316-5%-L	205	210	144	338	60
316-5%-C	190	230	140	385	72
316-10%-L	222	160	130	338	59
316-10%-C	208	202	138	245	44
821L1-5%-L	197	336	174	373	160
821L1-5%-C	212	388	172	469	170
821L1-10%-L	191	379	142	365	87
821L1-10%-C	219	375	147	463	81

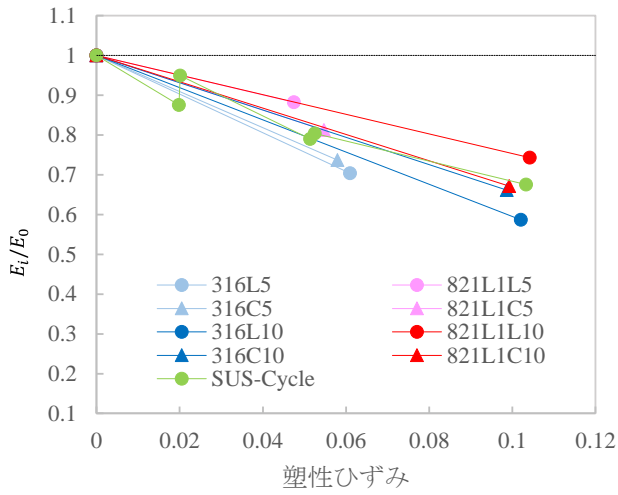
4. おわりに

本研究は、ステンレス鋼の塑性ひずみの進展に伴う材料特性の変化を、材料試験により調べた。本研究で得られた成果は、以下の通りである。

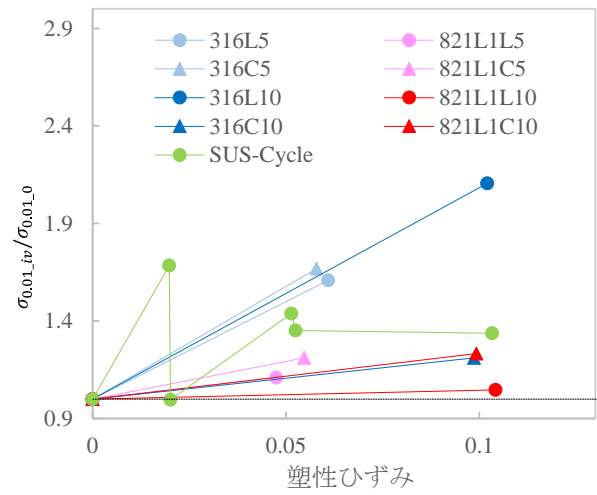
- (1) 各負荷時および除荷時のヤング係数と 0.01%耐力から、初期負荷時のヤング係数 E_0 とそのときの 0.01%耐力から、初期負荷時のヤング係数と 0.01%耐力から、それぞれ算出した塑性ひずみ時のヤング係数の変化は、ほぼ同じ値を示すことを明らかにした。
- (2) 各負荷および除荷状態でのヤング係数 E を用いて決定した 0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ の大きさは、繰返し試験結果の一部を除いて、塑性ひずみの増大に伴い大きくなることを明らかにした。
- (3) 初期負荷時のヤング係数 E_0 とそのときの 0.01%耐力から、および初期負荷時のヤング係数と 0.01%耐力から算出した塑性ひずみ時の 0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ は、ほぼ同じ値となることを明らかにした。

謝辞

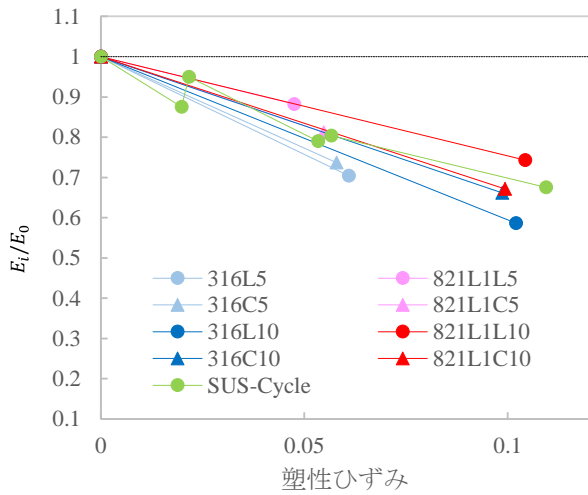
本研究の材料試験実施にあたっては、一般社団法人日本鋼構造協会より、材料および試験片の提供を受けました。ここに記して謝意を表します。



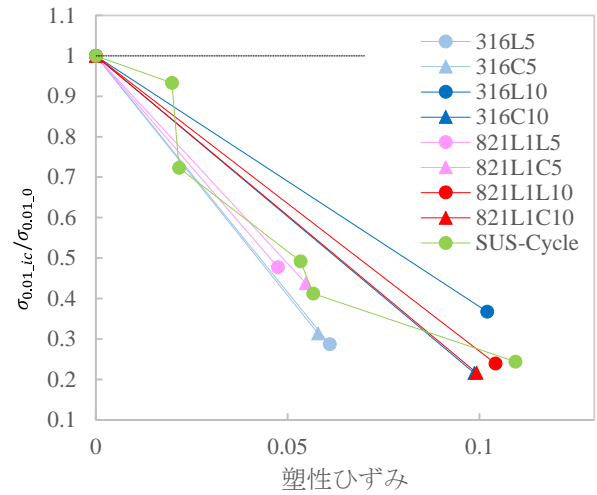
(a) E 変化, $\varepsilon_{0.01}$ 変化



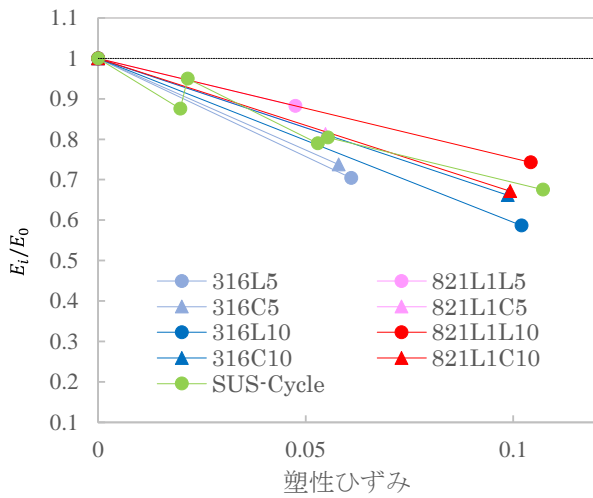
(a) E 変化, $\varepsilon_{0.01}$ 変化



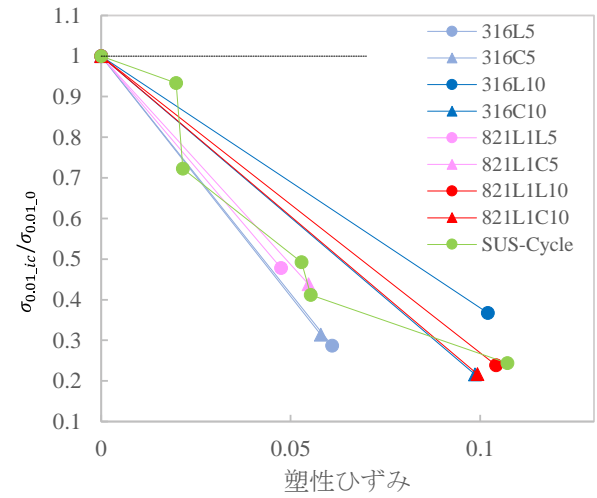
(b) E 固定, $\varepsilon_{0.01}$ 変化



(b) E 固定, $\varepsilon_{0.01}$ 変化



(c) E 固定, $\varepsilon_{0.01}$ 固定



(c) E 固定, $\varepsilon_{0.01}$ 固定

図3 ヤング係数 E の変化

図4 0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ の変化