

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

The material properties and formulation of the stress-strain relationship for Cr-Ni type stainless steel

○井崎 茜^{*1}

宮崎 靖大^{*2}

小野 潔^{*3}

宮下 剛^{*4}

Akane IZAKI^{*1}

Yasuhiro MIYAZAKI^{*2}

Kiyoshi ONO^{*3}

Takeshi MIYASHITA^{*4}

ABSTRACT The stainless steel can be expected to reduce the life-cycle cost for long-term service because it has high corrosion resistance and strength equal to or higher than carbon mild steel. In this study, it clarifies the material properties and the stress-strain relationship of stainless steel with different steel grade, thickness and extraction direction from plate and angle members. Firstly, this paper showed the material properties of the lean duplex type and the austenitic type stainless steels. Secondary, this paper examined adaptability of 2-interval Ramberg-Osgood curve comparing with the tensile test resultants. Finally, we confirmed that of the 2-interval Ramberg-Osgood curve can accurately reproduce the stress-strain relationship on the range of 10% strain.

Keywords: ステンレス鋼, 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, 応力ひずみ関係, Ramberg-Osgood 曲線
stainless steel, austenitic stainless steel, lean duplex stainless steel, stress-strain relationship,

1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の構造用炭素鋼と同程度の強度を有するとともに、炭素鋼に比べて高耐食性を示す。そのため、長期的な供用が必然である土木構造物にステンレス鋼を用いることで、従来の炭素鋼製構造物に比べてライフサイクルコストの低減が可能となる。このようなステンレス鋼製土木構造物の実現には、部材強度を明確にした上での設計法の確立が必要不可欠である。また、ステンレス鋼は、炭素鋼に比べてCrやNi等の希少金属を含有するため、価格変動や高価となることが否めない。そのため、主たる構造は従来の炭素鋼とし、腐食環境が激しい部材や維持管理が困難な部材にステンレス鋼を利用

した適材適所の材料選択が現実的であるといえる。

著者ら[1~5]は、ステンレス鋼製土木構造物の強度特性を数値計算および実験により明らかにしてきた。また、前述の炭素鋼とステンレス鋼を適材適所とした構造物の強度特性についても、同様に明らかにしてきた[6,7]。数値計算による構造物の力学的特性を高精度に調べるためには、精確な材料特性の導入が必須である。このような材料特性は、材料試験結果を用いる方法や、これらの材料試験結果を十分な精度で再現できるモデルを用いる方法がある。ステンレス鋼における後者の場合は、その応力ひずみ関係として、Ramberg-Osgood 曲線[8]が一般的に用いられる。この Ramberg-Osgood 曲線によるステンレス鋼の応力ひずみ関係の再現性は、ひずみが 3%程度までの範囲[8,9]である。また、ひずみが 10%程度の領域までを精確に表現できる 3 区間に分けた複合 Ramberg-Osgood 曲線[10]が提案されているものの、この式に含まれる多くの定数の算出が必要であるため、煩雑となる。そこで、著者ら[11]は、数少ない材料定数かつ容易に算出できる Ramberg-Osgood 曲線を 2 区間で表すことを提案した。この 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線は、ステンレス鋼の応力ひずみ関係について、ひずみ 10%までを十分な精度で再現できる。さらに、佐藤[12]は、この曲線に含まれる材料定数を決定する際に、より簡便に行えるヤング係数と対象応力点までの割線勾配との比を用いる手法を提案した。

^{*1} 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻
(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

^{*2} 第 2 種正会員

博士(工学) 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授

(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

^{*3} 第 2 種正会員

博士(工学) 早稲田大学 創造理工学部 教授
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

^{*4} 第 2 種正会員

博士(工学) 長岡技術科学大学 工学部環境社会基盤工学 准教授

(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

本研究では、塗装などによる維持管理が煩雑となる鋼橋の 2 次部材にステンレス鋼を利用することを目的として、その基本となるステンレス鋼の材料特性を実験により明らかにする。また、引張試験により得られた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 曲線の適用性を調べる。まず、橋梁 2 次部材に用いられる板厚 6mm から 20mm 程度のステンレス鋼製板材および山形鋼より切出した引張試験片を用いて引張試験を実施する。つぎに、引張試験により得られた対象ステンレス鋼の材料特性をまとめる。最後に、対象としたステンレス鋼に対する 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線を表現するための材料定数を示し、引張試験により得られた応力ひずみ関係の再現性を検証する。

2. 引張試験方法

2.1 引張試験片

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 鋼種である。板材または山形鋼から採取した引張試験片を用いて、引張試験を実施し、その材料特性を明らかにする。試験片の採取方向は、板材が圧延方向および圧延直角方向、山形

鋼が圧延方向のみとする。図 1 は、これら材料の引張試験片採取位置を示す。また、山形鋼については、図 1 (b) に示す等辺山形断面を対象とし、辺長 B を 75mm または 100mm の山形鋼を用いた。そして、これら材料の板厚は、10mm, 18mm または 20mm の板を、6mm, 9mm または 10mm とした。以上の各種ステンレス鋼、材種、方向および板厚から採取した引張試験片は、図 2 に示す JIS Z2241 5 号試験片[13]の形状に製作加工する。本研究で対象とする引張試験は、各条件 3 体とし、表 1 に全試験片条件をまとめる。なお、同表中の試験片名は、P または L が板または山形鋼を、次の記号が鋼種を、A または B がロールを、次の数字が板厚を、RD または TD が圧延方向または圧延直角方向を、次の数字が試験体番号を表している。例えば、P-304-A-10-RD-1 は、P が板材、304 が SUS304, A がロール A, 10 が板厚 10mm, RD が圧延方向、1 が試験体番号 1 を意味している。また、表 2 は、対象とするステンレス鋼の鋼種、材種およびロール別にしたミルシートに記載の化学成分をまとめる。

2.2 引張試験条件

本研究で行う引張試験は、JIS Z2241[13]に準拠する。引張試験時の負荷条件は、ミルシートに記載の基準耐力 σ_F までを応力増加速度 3MPa/s または 4MPa/s とし、その後、クロスヘッド変位速度を 0.32mm/s とする。なお、試験中のデータは、試験機付属のロードセルより荷重を、試験片に貼り付けたひずみゲージよりひずみを計測する。ここで、ひずみゲージは、全試験片平行部両面に計測範囲 5%の 2

表 1 試験片条件

材種	鋼種	ロール	公称 板厚	採取 方向	試験片名
P	SUS304	A	10	RD	P-304-A-10-RD-1(2,3)
				TD	P-304-A-10-TD-1(2,3)
			20	RD	P-304-A-20-RD-1(2,3)
				TD	P-304-A-20-TD-1(2,3)
		B	10	RD	P-304-B-10-RD-1(2,3)
				TD	P-304-B-10-TD-1(2,3)
			20	RD	P-304-B-20-RD-1(2,3)
				TD	P-304-B-20-TD-1(2,3)
	SUS316	A	10	RD	P-316-A-10-RD-1(2,3)
				TD	P-316-A-10-TD-1(2,3)
			20	RD	P-316-A-20-RD-1(2,3)
				TD	P-316-A-20-TD-1(2,3)
		B	10	RD	P-316-B-10-RD-1(2,3)
				TD	P-316-B-10-TD-1(2,3)
			18	RD	P-316-B-18-RD-1(2,3)
				TD	P-316-B-18-TD-1(2,3)
	SUS323L	-	10	RD	P-323-10-RD-1(2,3)
				TD	P-323-10-TD-1(2,3)
			20	RD	P-323-20-RD-1(2,3)
				TD	P-323-20-TD-1(2,3)
SUS821L1	-	10	RD	P-821-10-RD-1(2,3)	
			TD	P-821-10-TD-1(2,3)	
		20	RD	P-821-20-RD-1(2,3)	
			TD	P-821-20-TD-1(2,3)	
L	SUS304	-	9	RD	L-304-9-RD-1(2,3)
			10	RD	L-304-10-RD-1(2,3)
	SUS316	-	6	RD	L-316-6-RD-1(2,3)
			10	RD	L-316-10-RD-1(2,3)
	SUS304A	-	9	RD	L-304A-9-RD-1(2,3)
			10	RD	L-304A-10-RD-1(2,3)
	SUS316A	-	9	RD	L-316A-9-RD-1(2,3)
			10	RD	L-316A-10-RD-1(2,3)

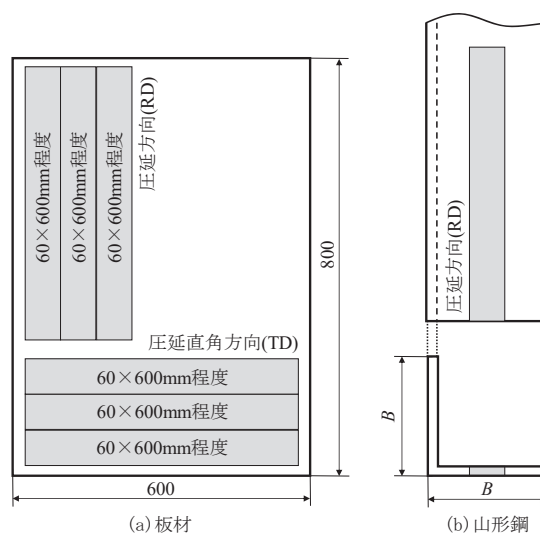


図 1 引張試験片採取位置

表 2 対象ステンレス鋼の化学成分

材種	鋼種	ロール	板厚	化学成分(%)							
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
P	SUS304	A	10	0.060	0.46	1.08	0.033	0.003	8.07	18.14	-
			20	0.060	0.44	0.84	0.033	0.003	8.05	18.10	-
		B	10	0.040	0.48	0.92	0.038	0.002	8.06	18.38	-
			20	0.050	0.54	0.92	0.037	0.003	8.11	18.14	-
	SUS316	A	10	0.050	0.43	0.86	0.025	0.000	10.10	17.07	2.08
			20	0.020	0.51	0.84	0.029	0.000	10.06	16.11	2.08
		B	10	0.040	0.61	1.24	0.037	0.007	10.20	16.82	2.06
			18	0.040	0.62	0.96	0.035	0.002	10.13	16.77	2.05
	SUS323L	-	10	0.013	0.57	1.60	0.028	0.001	3.94	23.53	0.32
			20	0.014	0.56	1.59	0.028	0.001	3.94	23.60	0.36
L	SUS304	-	10	0.024	0.31	3.19	0.022	0.000	2.26	20.86	0.48
			20	0.021	0.30	3.22	0.023	0.000	2.26	20.99	0.48
	SUS316	-	9	0.040	0.34	0.66	0.032	0.001	8.18	18.10	-
			10	0.040	0.31	0.75	0.029	0.000	8.12	18.15	-
	SUS316	-	6	0.020	0.46	1.55	0.027	0.000	10.03	16.76	2.06
			10	0.020	0.46	1.54	0.029	0.000	10.23	16.89	2.07
	SUS304A	-	9	0.050	0.49	0.99	0.037	0.006	8.04	18.14	-
			10	0.050	0.47	0.97	0.037	0.006	8.03	18.06	-
	SUS316A	-	9	0.040	0.49	1.40	0.037	0.003	10.04	16.90	2.04
			10	0.030	0.50	1.40	0.031	0.003	10.06	16.82	2.03

軸弾性ひずみゲージ（東京測器研究所製：FCA-5-11-3L）を、各種試験片の No.1, No.2 の平行部両面および No.3 の平行部片面に計測ひずみ範囲 15 から 20%の単軸塑性ひずみゲージ（東京測器研究所製：YFLA-5-3L）を、No.3 試験片片面に計測ひずみ範囲 30 から 40%の単軸塑性ひずみゲージ（東京測器研究所製：YHFLA-5-3L）を設置した。図 3 は、ひずみゲージ貼付け状況を示す。

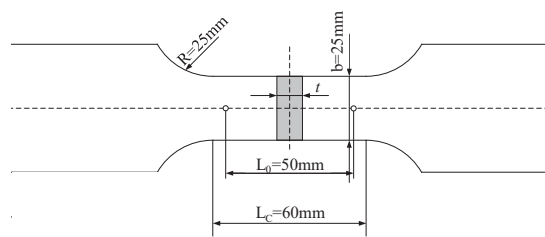


図 2 引張試験片 (JIS Z2241 5 号試験片)

3. 引張試験結果

3.1 材料特性値

表 3 は、対象とした材料の引張試験により得られた材料特性値を示す。なお、同表中の値は、表 1 で示した各試験片条件 3 体の試験結果を平均して表している。ここで、同表中の記号は、 $\sigma_{0.01}$ が 0.01%耐力、 $\sigma_{0.1}$ が 0.1%耐力、 $\sigma_{0.2}$ が 0.2%耐力、 E がヤング係数、 σ_u が引張強度、 δ が破断伸び、 ν がポアソン比および $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ が降伏比を意味する。また、基準耐力は、ミルシートに記載の値であり、SUS304, SUS316, SUS323L および SUS821L1 の場合 0.2%耐力を、SUS304A および SUS316A の場合 0.1%耐力となる。そして、ヤング係数 E は、図 4 に示す引張試験により得られた応力ひずみ関係から、ミルシートに記載の基準耐力の 20%, 30%, 40%および 50%の応力およびそのときのひずみを抽出し、20%から 30%, 20%から 40%, 20%から 50%の 3 領域の勾配を平均した値としている[14]。

表 3 より、対象としたリーニ二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 は、オーステナイト

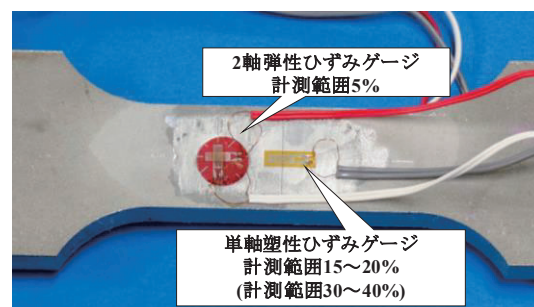


図 3 ひずみゲージ貼付け状況 (P-304-A-10-RD-3)

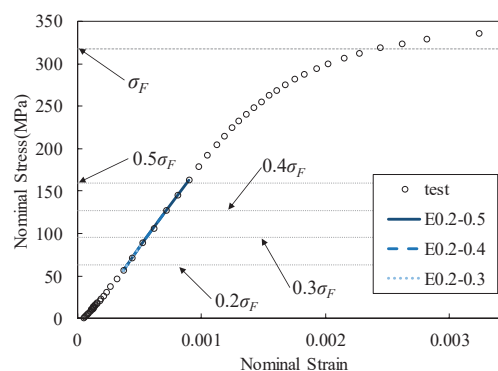


図 4 3 領域の弾性係数

表 3 引張試験により得られた材料特性値 (試験片 3 体の平均)

材種	鋼種	ロール	公称 板厚	採取 方向	$\sigma_{0.01}$	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	E	σ_u	δ	ν	$\sigma_{0.2}/\sigma_u$	σ_F
					MPa			GPa	MPa	%			MPa
P	SUS304	A	10	RD	214	310	328	198	649	63.3	0.314	0.506	318
				TD	238	323	342	200	658	61.2	0.292	0.519	
			20	RD	206	284	307	218	662	69.0	0.298	0.471	300
				TD	200	275	293	192	665	67.6	0.310	0.441	
		B	10	RD	181	252	271	194	622	64.0	0.279	0.436	286
				TD	200	262	279	209	629	62.7	0.297	0.444	
			20	RD	189	257	275	203	638	69.7	0.287	0.431	275
				TD	200	275	301	208	647	67.9	0.292	0.465	
	SUS316	A	10	RD	218	295	315	179	610	63.0	0.365	0.516	326
				TD	209	293	312	199	608	62.4	0.297	0.514	
			20	RD	202	276	300	210	605	67.4	0.270	0.496	294
				TD	175	271	302	198	603	67.5	0.306	0.502	
		B	10	RD	174	243	262	201	567	65.1	0.281	0.463	261
				TD	190	255	274	205	570	65.7	0.298	0.480	
			18	RD	184	257	273	199	590	69.8	0.282	0.463	264
				TD	191	264	284	206	589	68.3	0.295	0.482	
	SUS323L	-	10	RD	365	505	543	207	718	38.7	0.200	0.756	614
				TD	448	589	615	244	756	33.5	0.222	0.814	
			20	RD	398	506	532	181	701	50.6	0.235	0.760	544
				TD	364	526	560	214	725	46.1	0.247	0.772	
	SUS821L1	-	10	RD	333	458	495	203	696	46.0	0.221	0.712	537
				TD	383	516	543	223	723	39.0	0.240	0.752	
			20	RD	354	490	526	202	717	51.5	0.226	0.734	530
				TD	374	529	570	215	733	44.3	0.249	0.777	
L	SUS304	-	9	RD	170	247	265	196	629	68.4	0.264	0.422	268
			10	RD	176	249	268	183	615	68.7	0.280	0.435	250
	SUS316	-	6	RD	189	249	267	196	573	63.0	0.267	0.466	263
			10	RD	201	249	255	194	568	57.5	0.277	0.450	264
	SUS304A	-	9	RD	196	291	312	169	660	62.1	0.279	0.473	278
			10	RD	188	298	332	203	663	62.8	0.277	0.495	272
	SUS316A	-	9	RD	179	267	294	193	601	63.3	0.259	0.489	256
			10	RD	190	272	299	174	603	63.4	0.264	0.496	258

系ステンレス鋼に比べて高強度であり、リーニ二相系とオーステナイト系で大別した場合の降伏比が 1.61 倍となる。また、リーニ二相系ステンレス鋼の伸びについては、オーステナイト系の 67.1% 程度となる。

図 5 は、表 3 の結果について、同鋼種およびロールにおける板厚の違いによる材料強度を比較して表している。ここで、同図の縦軸は同鋼種およびロールにおける板厚の薄い結果を厚い結果で除した値を、横軸は材料強度を表している。同図 (a)、(b) についてみると、板材から採取したステンレス鋼の板厚の違いによる $\sigma_{0.01}$, $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$ および σ_u の最大変化率は、圧延方向で 0.92, 1.09, 1.07 および 1.02, 圧延直角方向で 1.23, 1.17, 1.16 および 1.04 となる。これより、対象とした板材から採取したステンレス鋼の板厚の違いによる強度の変化率は、圧延直角方向の結果が圧延方向の結果に比べて大きくなるのがわかる。同様に、同図 (c) の山形鋼の板厚の違いによる $\sigma_{0.01}$, $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$ および σ_u の最大変化率についてみると、1.04, 0.98, 0.94

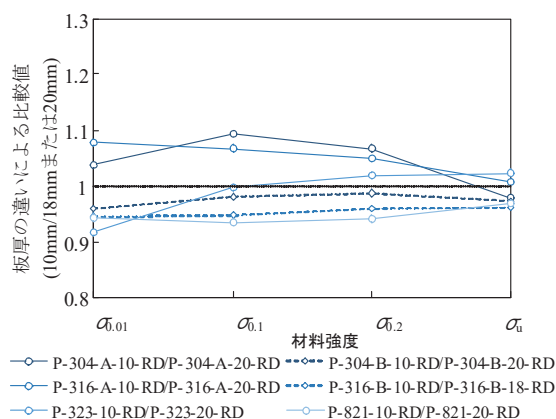
および 1.02 となる。このように山形鋼における板厚の違いによる強度の変化率が板材に比べて小さくなる理由は、山形鋼の場合、対象とした材種の板厚が 9mm と 10mm または 6mm と 10mm であり、板材の板厚差に比べて小さいためである。

図 6 は、表 3 で示した対象とした板材のステンレス鋼の材料強度について、採取方向の違いを比較して表している。ここで、同図の縦軸は、圧延方向の結果を圧延直角方向の結果で除した値を意味する。同図より、オーステナイト系ステンレス鋼の採取方向の違いによる $\sigma_{0.01}$, $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$ および σ_u の最大変化率は、1.15, 0.94, 0.91 および 0.99 となる。また、リーニ二相系ステンレス鋼の採取方向の違いによる $\sigma_{0.01}$, $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$ および σ_u の最大変化率は、0.81, 0.86, 0.88 および 0.95 となる。これらの結果より、対象としたリーニ二相系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて $\sigma_{0.1}$, $\sigma_{0.2}$ および σ_u における採取方向の違いによる変化が大きくなるのが明らかである。これは、二相系ステンレス鋼の場合、塑性異方性の発現に

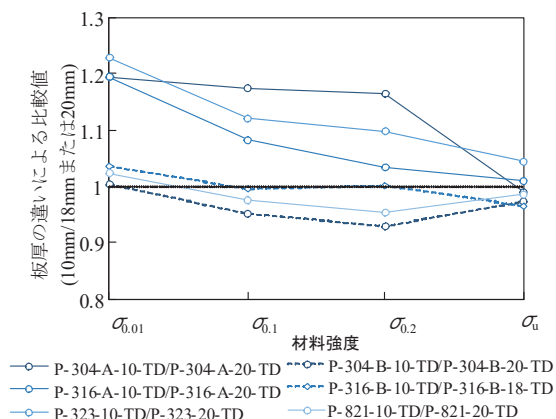
よる結果であると判断する。

3.2 応力ひずみ関係

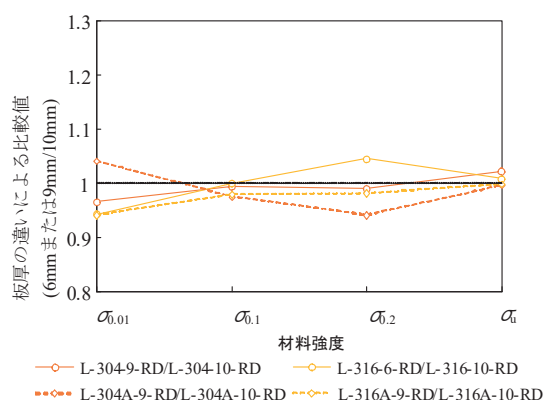
図 7 は、表 1 で示した対象とした全ステンレス鋼の No.3 試験片について、その応力ひずみ関係を示す。ここで、縦軸は荷重を試験片平行部の原断面積で除した公称応力を、横軸は試験片に貼り付けた単軸塑性ひずみゲージの値を表している。



(a) 圧延方向 (板材)



(b) 圧延直角方向 (板材)

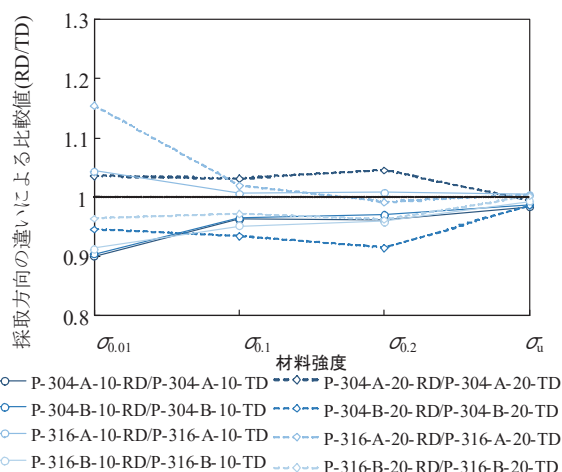


(c) 圧延方向 (山形鋼)

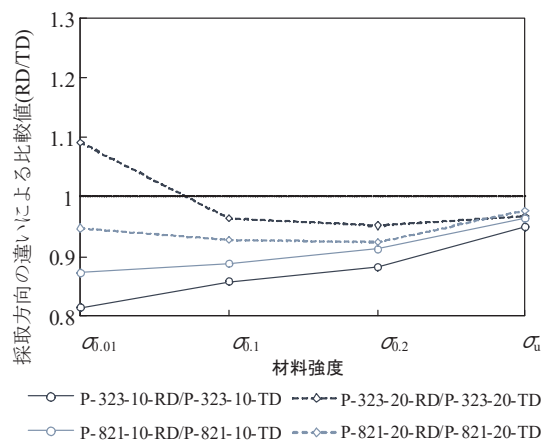
図 5 板厚の違いによる強度の比較

図 7 (a) および (b) についてみると、SUS304 および SUS304A と SUS316 および SUS316A のオーステナイト系ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、鋼種、材種、板厚および方向に依らず、ほぼ同様の傾向を示すことがわかる。つぎに、図 7 (c) および (d) についてみると、SUS323L および SUS821L1 とともに、弾性域を超えた後の同一ひずみ時の応力は、RD の結果に比べて TD の結果が大きくなることを確認できる。この傾向は、両鋼種ともに板厚が 10mm の結果においてより明確に現れている。この結果からも、リーニ二相系ステンレス鋼では、塑性異方性の発現が確認できる。そして、図 7 (a), (b) と (c), (d) を比較してみると、リーニ二相系ステンレス鋼は、前章で述べたように降伏比が高く、降伏点から引張強度に達するまでの応力増加がオーステナイト系ステンレス鋼に比べて小さいことがわかる。

表 4 は、P-304-A-10-RD, P-316-B-10-RD, P-323-10-



(a) オーステナイト系ステンレス鋼



(b) リーニ二相系ステンレス鋼

図 6 採取方向の違いによる強度の比較

表 4 各着目点における試験結果のばらつき

着目ひずみ	P-304-A-10-RD-1,2,3			P-316-B-10-RD-1,2,3			P-323-10-RD-1,2,3			P-821-10-RD-1,2,3		
	平均	標準偏差	変動 係数	平均	標準偏差	変動 係数	平均	標準偏差	変動 係数	平均	標準偏差	変動 係数
	MPa	MPa		MPa	MPa		MPa	MPa		MPa	MPa	
0.1%耐力点	310	3.7	0.012	243	3.6	0.015	505	3.0	0.006	458	10.3	0.023
0.2%耐力点	326	2.6	0.008	262	2.7	0.010	326	2.6	0.008	495	12.7	0.026
1%	368	8.9	0.024	310	3.6	0.012	597	3.9	0.006	541	0.4	0.001
3%	410	7.6	0.019	352	4.7	0.013	652	4.4	0.007	602	2.8	0.005
5%	433	5.6	0.013	382	5.0	0.013	673	4.0	0.006	625	0.7	0.001
10%	483	7.0	0.015	433	4.0	0.009	699	4.2	0.006	663	1.0	0.001

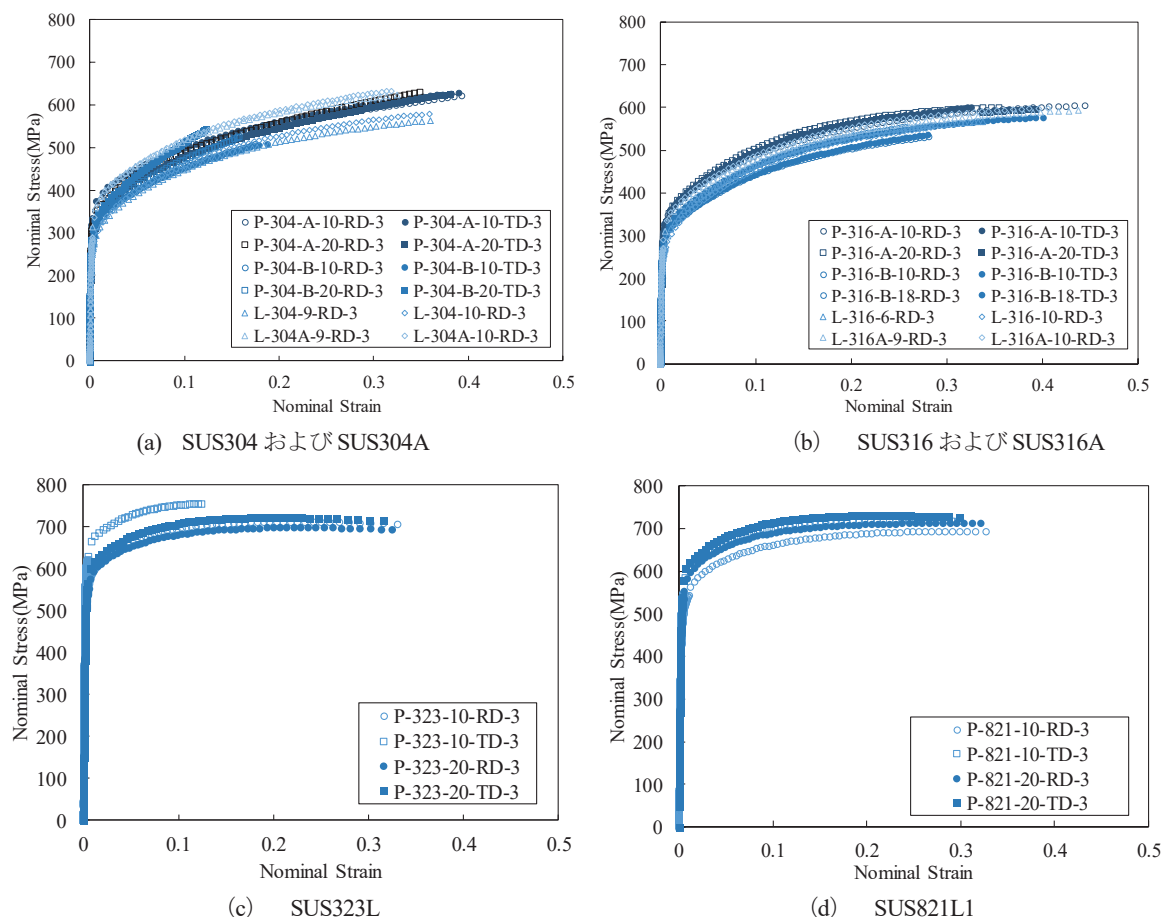


図 7 対象ステンレス鋼の応力ひずみ関係

RD および P-821-10-RD の各 3 体の引張試験より得られた応力ひずみ関係について、ひずみが 0.1%耐力点、0.2%耐力点、1%、3%、5%および 10%におけるばらつきをまとめている。同表の P-304-A-10-RD および P-316-B-10-RD についてみると、0.2%耐力点の変動係数がその他の着目ひずみの結果に比べて最小となることがわかる。また、ひずみ 1 から 10%の各試験片の変動係数についてみると、SUS304 および SUS316 の結果は SUS323L および SUS821L1 の結果に比べて大きくなることがわかる。一方、P-821-10-RD は、0.1%耐力点および 0.2%耐力点での変動係数がその他の領域に比べて大きくなるがわかる。

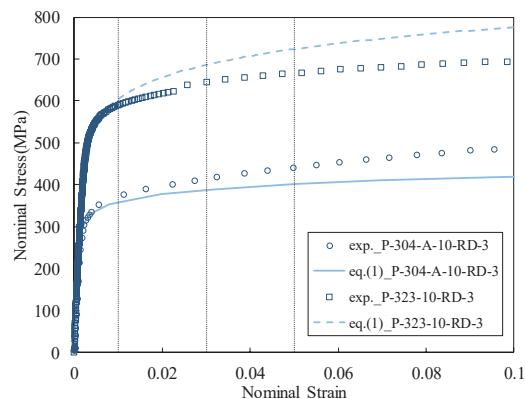


図 8 式 (1) による Ramberg-Osgood 曲線と実験値の比較

以上の結果は、紙面の都合上割愛する対象としたその他のステンレス鋼についても同様の結果が得られている。これらのことから、本研究で実施した引張試験では、オーステナイト系ステンレス鋼の同条件 3 体の 0.2%耐力点を超える領域での応力ひずみ関係のばらつきは、リーニ二相系ステンレス鋼のそれに比べて大きくなる。

4. 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線の適用性の検証

式 (1) は、一般的な Ramberg-Osgood 曲線[8]である。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 ε はひずみ、 σ は応力、 K および n は式 (2) および式 (3) における材料定数を意味する。なお、これらの式に含まれる m_1 および m_2 は、式 (4) で示される材料定数である。

$$K = \left(\frac{1}{m_1} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_1}{E} \right)^{1-n} = \left(\frac{1}{m_2} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_2}{E} \right)^{1-n} \quad (2)$$

$$n = 1 + \frac{\log \frac{m_2(1-m_1)}{m_1(1-m_2)}}{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}} \quad (3)$$

$$m_1 = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{\sigma_1/E}}, \quad m_2 = \frac{1}{1 + \frac{a_2}{\sigma_2/E}} \quad (4)$$

ここで、 σ_1 および σ_2 は選定する 2 つのオフセット耐力、 a_1 および a_2 はこれら 2 つのオフセット耐力を算出する際のひずみを意味する。

図 8 は、P-304-10-RD-3 および P-323-10-RD-3 の応力ひずみ関係について、式 (1) による曲線と 3.2 で示した引張試験結果を表している。ここで、同図中の点線は、Ramberg-Osgood 曲線による実験結果の再現性を確認するため、ひずみが 1%、3% および 5% の位置を表している。また、表 5 は、図 8 に示す結果について、ひずみが 0.1%耐力点、0.2%耐力点、1%、3%、5% および 10% における実験結果に対する式 (1) による応力比をまとめている。同表より、式 (1) による Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 3% 以上の範囲から引張試験結果との値の誤差が 5% 以上となることわかる。

そこで本研究では、著者ら[11]が提案した式 (5) に示す 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線による再現性を調べることにする。

表 5 引張試験結果に対する式 (1) による応力比 (σ_{RO}/σ_{exp})

着目ひずみ	P-304-A-10-RD-3	P-323-10-RD-3
0.1%耐力点	1.000	0.965
0.2%耐力点	1.000	0.973
1%	0.935	1.023
3%	0.950	1.063
5%	0.912	1.084
10%	0.853	1.117

表 6 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線の参照応力を決定する際に用いる割線勾配比[12]

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

表 7 実験結果に対する 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線による応力比 ($\sigma_{2RO}/\sigma_{exp}$)

着目ひずみ	P-304-A-10-RD-3	P-316-B-10-RD-3	P-323-10-RD-3	P-821-10-RD-3
0.1%耐力点	1.000	1.000	1.012	1.006
0.2%耐力点	1.000	0.987	1.000	0.994
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

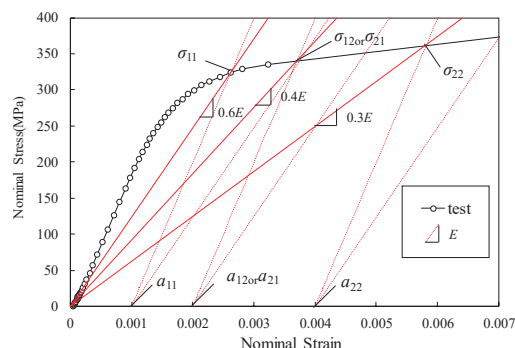


図 9 割線勾配比を用いた材料定数の決定法

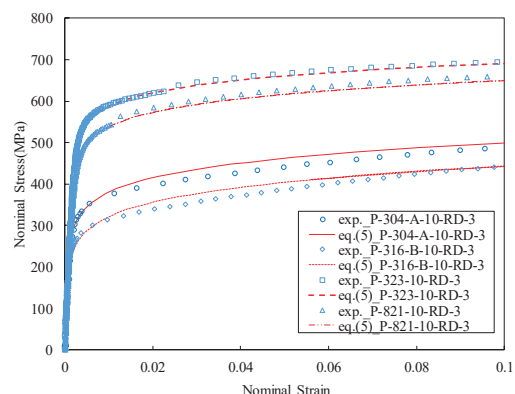


図 10 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + K_1 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{n_1} & (\sigma < \sigma_c) \\ \frac{\sigma}{E} + K_2 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{n_2} & (\sigma \geq \sigma_c) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 σ_c は式 (6) で表される遷移点であり、式 (6) に含まれる K_1 、 K_2 、 n_1 および n_2 は、式 (7) から式 (10) で表される材料定数である。なお、式 (7) から式 (10) に含まれる m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} および m_{22} は式 (11) で表される。

$$\sigma_c = E \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1 - n_2}} \quad (6)$$

$$K_1 = \left(\frac{1}{m_{11}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{11}}{E} \right)^{1 - n_1} \\ = \left(\frac{1}{m_{12}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{12}}{E} \right)^{1 - n_1} \quad (7)$$

$$n_1 = 1 + \frac{\log \left(\frac{m_{12}(1 - m_{11})}{m_{11}(1 - m_{12})} \right)}{\log \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{12}}} \quad (8)$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{m_{21}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{21}}{E} \right)^{1 - n_2} \\ = \left(\frac{1}{m_{22}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{22}}{E} \right)^{1 - n_2} \quad (9)$$

$$n_2 = 1 + \frac{\log \left(\frac{m_{22}(1 - m_{21})}{m_{21}(1 - m_{22})} \right)}{\log \frac{\sigma_{21}}{\sigma_{22}}} \quad (10)$$

$$m_{11} = \frac{1}{1 + \frac{a_{11}}{\sigma_{11}^E}}, \quad m_{21} = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{\sigma_{12}^E}} \\ m_{12} = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{\sigma_{12}^E}}, \quad m_{22} = \frac{1}{1 + \frac{a_{22}}{\sigma_{22}^E}} \quad (11)$$

ここで、 σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{21} および σ_{22} は、表 6 に示す割線勾配比[12]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 9 は、これらの参照オフセット耐力およびそのひずみの選定方法を表している。

図 10 は、P-304-A-10-RD-3、P-316-B-10-RD-3、P-323-10-RD-3 および P-821-10-RD-3 の応力ひずみ関係について、式 (5) で表現した 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線と 3.2 で示した引張試験結果を表している。また、表 7 は、図 10 の結果について、ひずみが 0.1%耐力点、0.2%耐力点、1%、3%、5%および 10%における引張試験結果に対する式 (5) による応力比をまとめている。ここで、 σ_{exp} および σ_{RO} 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。まず、同図の P-323-10-RD-3 および P-821-10-RD-3 の引張試験結果をみると、基準耐力点付近の応力から引

張試験の速度制御の変化による不連続点のような箇所が見られる。この速度制御の変化による点についてみると、その前後のひずみ変化に対する応力変化は、速度を一定と仮定した際の直線の応力変化に対して、最大 2.4%の誤差が生じる。この値は、後述する 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線による誤差に比べて小さいものである。つぎに、同表の P-323-10-RD-3 および P-821-10-RD-3 についてみると、最大変化率が 1.012 であるものの、その他の値はほぼ引張試験結果と一致していると同時に、表 4 に示したこれら試験片の変動係数の値以下となることが確認できる。つぎに、P-304-A-10-RD-3 および P-316-B-10-RD-3 についてみると、実験結果に対する式 (5) による変化率は、表 4 の変動係数に比べて大きくなる。しかしながら、これら結果の変化率は、概ね 5%以下であり、数値計算にこれらの式を用いて表現しても差し支えないものと判断する[15]。割愛するその他の試験結果についても、式 (5) による応力ひずみ関係の再現性は、同様であることを確認した。以上より、割線勾配比から参照応力を確定した 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線は、引張試験結果に対して、ひずみ 10%までの領域を十分な精度で再現できる。

6. おわりに

本研究は、炭素鋼に比べて高耐食性を示すステンレス鋼を橋梁 2 次部材に使用することを目的として、その基礎資料となるステンレス鋼製板材および山形鋼について、鋼種、板厚、採取方向を変化させた引張試験片を用いた引張試験を行い、その材料特性を明らかにした。また、著者らが提案した割線勾配比を用いた 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線によるこれらステンレス鋼の引張試験で得られた応力ひずみ関係の適用性を検証した。本研究で得られた成果は、つぎの通りである。

- (1) 対象としたリーニ二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 の降伏比は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および SUS316 の値の約 1.61 倍となる。
- (2) 対象とした板材および山形鋼から採取した SUS304、SUS304A、SUS316 および SUS316A のオーステナイト系ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、これらの鋼種、材種、採取方向の違いによる明確な差が見られない。
- (3) 対象としたリーニ二相系ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、オーステナイト系ステンレス鋼の結果に比べて $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.2}$ および σ_u における採取方向の違いによる同一ひずみ時の応力変化が

明確に現れる。

- (4) 対象としたオーステナイト系ステンレス鋼の応力ひずみ関係の 1 から 10%ひずみ時の応力のばらつきは、リーニ二相系ステンレス鋼のそれに比べて大きくなる。
- (5) 割線勾配比を用いた 2 区間とした Ramberg-Osgood 曲線は、対象とした全ステンレス鋼の引張試験による応力ひずみ関係について、ひずみが 10%程度の領域まで、十分な精度で再現できる。

謝辞

本研究は、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機能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」の一環として実施したものである。関係の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 佐藤信輔, 宮寄靖大: 静的引張試験による二相系ステンレス鋼の材料特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.297-304, 2016.
- [2] 宮寄靖大, 奈良敬: 応力ひずみ関係に基づくステンレス鋼圧縮板の終局強度評価法, 鋼構造論文集, Vol.20, No.79, pp.67-80, 2013.
- [3] 宮寄靖大, 奈良敬: 無補剛ステンレス鋼圧縮板の座屈照査法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.122-134, 2010.
- [4] 宮寄靖大, 奈良敬: 面内純曲げを受けるステンレス鋼板の強度特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp.261-268, 2012.
- [5] 加藤健太郎, 宮寄靖大, 奈良敬: 単軸面内準静的負荷を受けるステンレス鋼周辺単純支持板の圧縮強度特性と極限圧縮強度評価法, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.49-61, 2015.
- [6] 堀澤英太郎, 宮寄靖大: 部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 1-14, 2019.
- [7] 和田勇輝, 宮寄靖大: ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成される I 形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.92-105, 2017.
- [8] Walter Ramberg, William R.Osgood : Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, No.902, 1943.
- [9] 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼の弾性係数の変

化および Ramberg-Osgood 曲線の適用性について, 平成 23 年度土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会, I-646, CD-ROM, 2011.9.

- [10] Kim J.R.Rasmussen: Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, pp. 47-61, 2003.
- [11] 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, pp.64-67, 2015.
- [12] 佐藤信輔: 速度依存性を考慮したステンレス鋼の材料特性および単軸漸増負荷下における材料モデルの提案, 環境都市工学専攻特別研究論文, 長岡工業高等専門学校, 2017.
- [13] 日本工業規格調査会: JIS Z2241, 金属材料引張試験方法, 日本規格協会, 2011.
- [14] 宮寄靖大: ステンレス鋼板の圧縮強度特性と終局強度評価法, 大阪大学大学院博士論文, 2010.
- [15] 高橋寛成, 宮寄靖大: 材料の応力ひずみ関係の変化に伴う面内曲げ圧縮負荷を受ける周辺単純支持板の強度相関, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 60-72, 2018.