

リーン二相系ステンレス鋼板の機械的特性値と構成式

細見 玄武* 三好 崇夫**

Mechanical Properties and the Stress-Strain Model of Lean Duplex Stainless Steel Plates

Genbu HOSOMI, Takao MIYOSHI

ABSTRACT

Stainless steel is still often regarded as only suitable for specialized applications due to its high initial material cost. The cost of stainless steel is sensitive to its nickel content. Austenitic grades which are most commonly adopted in stainless steels have 8%-10% nickel content. Recently developed lean duplex stainless steel (EN 1.4162) has far lower nickel content, around 1.5%, and hence lower cost. Despite the low nickel content, corrosion resistance of lean duplex stainless steel is similar to that of austenitic stainless steel. For this reason, structural applications of lean duplex stainless steel are attracting attention. However, the effect of variation in mechanical properties of the steel on structural performance is not cleared. In this study, mechanical properties and their variations are assessed based on material coupon test results, and the applicability of an existing stress-strain model to the steel is verified. Also, expressions for estimating mechanical properties for given values of 0.2% proof stress and tensile strength are developed. The expressions are compared with existing coupon test results and shown to be reasonably accurate for lean duplex stainless steel. Based on the expressions, it is possible to construct the entire stress-strain curve from 0.2% proof stress and tensile strength.

KEY WORDS: lean duplex stainless steel, mechanical properties, variation, stress-strain model

1. はじめに

一般的なステンレス鋼は材料コストが高いため、特に耐食性が要求される土木構造物の一部に限定的に使用されてきた。ステンレス鋼の材料コストはニッケル含有量に左右され、最も一般的に使用されている SUS304 等のオーステナイト系ステンレス鋼では 8～10%のニッケルを含む。それに対して、近年開発されたリーン二相系ステンレス鋼（以下、リーン鋼と略称する）は、最少 1.5%までニッケル含有量を削減することによって材料コストが低減されている。ニッケル含有量の削減にも関わらずリーン鋼の耐食性は SUS304 と同等であり、構造物のミニマムメンテナンス化、超

長寿命化の促進やLCC縮減の観点からその土木構造物への活用が注目されている¹⁾。

リーン鋼は現状ではステンレス鋼構造物の設計基準²⁾に網羅されていないため、リーン鋼構造物の終局強度や設計法に関する研究が精力的に進められている^{3), 4)}。一般的に、鋼材の機械的特性値はばらつきを有し、板厚依存性を示す場合もある⁵⁾。それらは鋼構造物の終局強度に影響を及ぼす要因であるにも関わらず、リーン鋼の機械的特性値のばらつきや板厚依存性については明確にされていない。本研究では、リーン鋼として EN 10088-4⁶⁾の 1.4162 を対象に、その機械的特性値のばらつきや板厚依存性について明確にすることを目的として、材料試験によって応力-ひずみ関係を把握する

*徳島大学工学部, **都市システム工学科

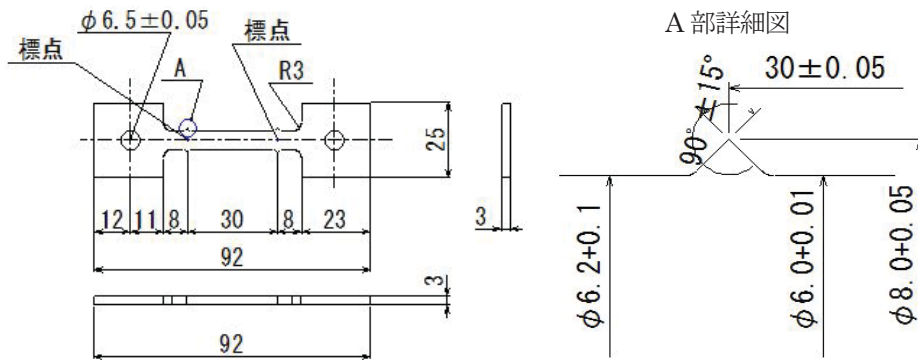


図-1 材料試験片

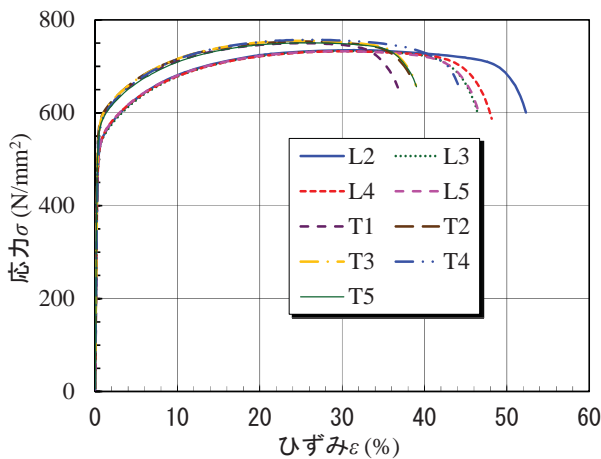


図-2 リーン鋼の応力-ひずみ曲線

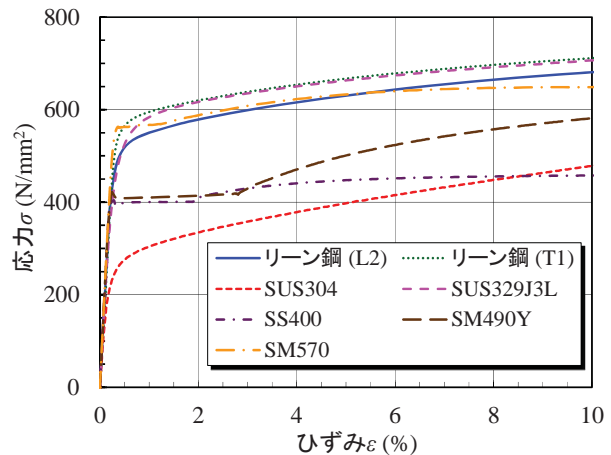


図-3 応力-ひずみ曲線の比較

とともに、既往の材料試験結果^{3), 4)}も調査、分析する。また、リーク鋼構造物の終局強度解析に向けて、既存の構成式⁷⁾の同鋼への適用性についても検証する。一般的な材料規格^{6), 8)}では、ステンレス鋼の機械的特性値として0.2%耐力、引張強度や破断伸びのみが規定されているに過ぎないため、それらに基づいて構成式を確立することは困難である。本研究では材料試験結果を整理し、構成式での材料定数の決定に必要な機械的特性値と、材料規格やミルシートに与えられている0.2%耐力や引張強度間の相関を調べる。それによって、0.2%耐力や引張強度からそれらの機械的特性値を実用的な精度で推定できる式の提示も目的とする。

2. 材料試験

2.1 試験方法

本研究では、試験機の容量を勘案して公称板厚6mmのEN 1.4162 熱間圧延鋼板を3mmに切削した図-1に示す試験片を用いた。同図中のA部は伸び計を設置するための突起であり、同様の試験片を用いたこれまでの材料試験によって、それが試験結果に及ぼす影響のないことが確認されている。また、同鋼板の圧延方向による異方性の影響を把握するため、試験片は圧延方

向に5体、圧延直角方向に5体の合計10体を製作した。以降ではそれぞれ圧延方向、同直角方向試験片の頭文字にL, T, その後に番号を付してL2のように試験片を表記する。試験は一定のひずみ速度 0.0003sec^{-1} による引張载荷とした。なお、L1試験片については载荷方法に不備があったため除外して結果を整理した。

2.2 試験結果

2.2.1 応力-ひずみ関係

全試験片の応力-ひずみ曲線を図-2に示す。これより、リーク鋼の応力-ひずみ曲線は圧延方向による異方性を示すことがわかる。図-3にはリーク鋼L2, T1と構造用炭素鋼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-ひずみ曲線を比較した。同図より、リーク鋼の応力-ひずみ曲線は、SUS304やSUS329J3Lと同様に明確な降伏点や降伏棚を持たないラウンドハウス型の曲線を示すことがわかる。

2.2.2 機械的特性値

本研究では、機械的特性値として弾性係数、0.2%耐力、引張強度に加えて、設計基準²⁾において比例限界として定義されている0.01%耐力、後述の構成式の材

表-1 材料試験から得られた機械的特性値

载荷方向	試験片	弾性係数 E (kN/mm ²)	0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (N/mm ²)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	1%耐力 σ_1 (N/mm ²)	10%ひずみ 時応力 σ_{10} (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	均一伸び ϵ_u (%)	破断伸び ϵ_f (%)
圧延方向	L2	198.4	377	510	557	681	735	32	53
	L3	197.7	382	512	556	678	733	30	47
	L4	198.2	385	517	559	679	733	30	48
	L5	195.7	374	510	561	680	733	31	47
	平均	197.5	379	512	558	679	733	31	49
直角方向	T1	213.9	418	561	602	711	750	25	37
	T2	212.5	425	564	604	716	754	25	39
	T3	213.5	428	566	607	716	755	25	39
	T4	214.2	424	560	602	715	757	26	44
	T5	214.0	415	556	597	709	751	26	39
	平均	213.6	422	561	602	713	753	26	40
平均		206.5	403	539	583	698	745	28	44
規格値		-	-	≥450	-	-	≥660	-	≥25
ミルシート値		-	-	596	641	-	750	30	54

料定数の決定に必要である 1%耐力, 10%ひずみ時応力を取り上げる。

全試験片の機械的特性値, それらの平均値, ミルシート値 (圧延直角方向に対するもの) を規格値⁹⁾とともに表-1 に示す。これより, 0.2%耐力, 引張強度, 破断伸びはいずれも規格値を満たしていることがわかる。試験結果とミルシート値との差異は試験時のひずみ速度の相違によるものと考えられる。

表-2 には弾性係数, 0.2%耐力または降伏応力, 引張強度と降伏比について, リーン鋼 (圧延方向ごとの試験結果の平均値) と炭素鋼 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 を比較した。これより, リーン鋼と SUS329J3L の 0.2%耐力, 引張強度と降伏比は同等であり, リーン鋼の 0.2%耐力と SM570 の降伏応力も対応していることがわかる。また, リーン鋼の降伏比は 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, 機械的特性値の圧延方向と同直角方向の比も示したが, リーン鋼は SUS304 に比べてやや圧延方向による異方性の大きいことがわかる。

3. 機械的特性値の板厚依存性とばらつき

限られたデータではあるものの, 本研究で実施した材料試験に加えて既往の材料試験結果^{3,4)}を収集, 分析することによって, 機械的特性値に及ぼす板厚の影響と機械的特性値のばらつきについて調査した。なお, 既往の研究^{3,4)}では, 板厚 4, 6, 8, 10, 12, 15 および 20mm の EN 1.4162 熱間圧延鋼板から, それぞれ圧延方

表-2 機械的特性値の比較

鋼種	载荷方向*	弾性係数 E (kN/mm ²)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (降伏 応力 σ_y) (N/mm ²)	引張 強度 σ_u (N/mm ²)	降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ (σ_y/σ_u)
リーク鋼	L	197.5	512	733	0.70
	T	213.6	561	753	0.75
	L/T	0.92	0.91	0.97	0.94
SS400	L	219.8	392	460	0.85
SM490Y	L	214.4	405	535	0.76
SM570	L	217.7	561	649	0.86
SUS304	L	175.1	263	707	0.37
	T	180.4	255	687	0.37
	L/T	0.97	1.03	1.03	1.00
SUS329J3L	L	183.8	515	735	0.70
	T	199.3	542	758	0.72
	L/T	0.92	0.95	0.97	0.98

注) *L: 圧延方向, T: 圧延直角方向

向と同直角方向に試験片を切り出して, 引張試験と圧縮試験が実施されている。

3・1 板厚依存性

0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$, 引張強度 σ_u と板厚の関係をそれぞれ図-4, 5 に示す。ただし, 図-4, 5 の縦軸はそれぞれ表-1 に示す 0.2%耐力, 引張強度の規格値 $\sigma_{0.2EN}$, σ_{uEN} で無次元化している。また, 同図中の 0.2%耐力, 引張強度は試験結果ごとにシンボルを変えてプロットし, 参考までに全結果, 圧延方向引張試験 (以降では LT と略称する), 同圧縮試験 (同 LC), 圧延直角方向引張試験 (同 TT), 同圧縮試験 (同 TC) に対する直線回帰式

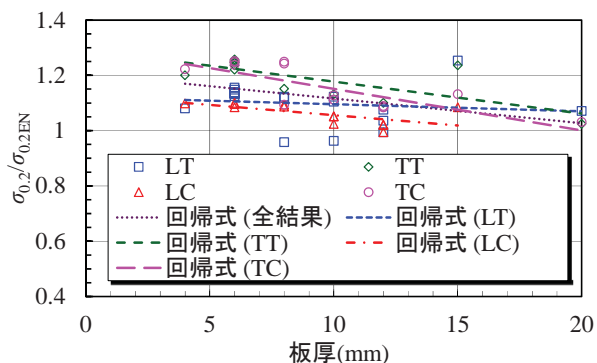


図-4 0.2%耐力と板厚の関係

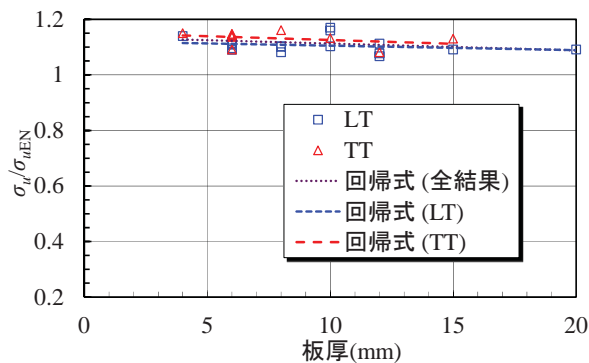


図-5 引張強度と板厚の関係

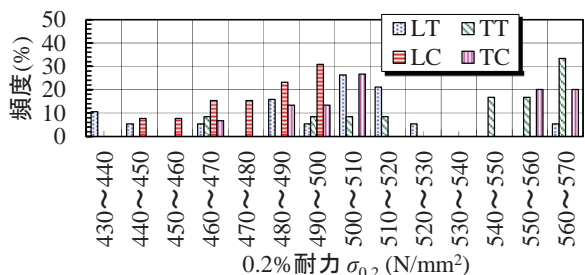


図-6 0.2%耐力の頻度分布

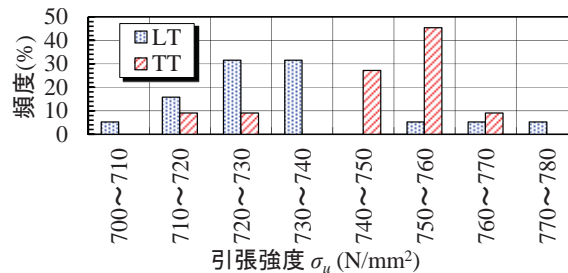


図-7 引張強度の頻度分布

表-3 機械的特性値の統計値

	弾性係数 E	0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$	1%耐力 σ_1	10%ひずみ時応力 σ_{10}	引張強度 σ_u
サンプル数	59	58	59	58	29	30
平均値 (N/mm ²)	205377	361	506	568	678	737
標準偏差 (N/mm ²)	7549	47.99	36.31	28.36	24.71	17.97
変動係数	0.04	0.13	0.07	0.05	0.04	0.02
最大値 (N/mm ²)	219500	442	566	625	726	772
最小値 (N/mm ²)	191000	254	431	506	636	704
95パーセンタイル (N/mm ²)	217794	440	565	614	719	766
5パーセンタイル (N/mm ²)	192959	282	446	521	638	707

もあわせて示した。σ_{0.2}のサンプル数はLTが19、TTが12、LCが13、TCが15の合計59、σ_uのサンプル数はLTが19、TTが11の合計30である。

図-4より、回帰式はいずれも右下がりであることがわかる。全結果に対する回帰式の相関係数は-0.43と相関はあまり強くないものの、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304が0.2%耐力に板厚依存性がないとされている⁹⁾のとは対照的に、リーマン鋼は板厚の増加につれて0.2%耐力が低下傾向にあることがわかる。

図-5より、全ての回帰式が僅かに右下がりであるものの、全結果に対する回帰式の相関係数は-0.33と相関は弱い。よって、引張強度の板厚依存性は0.2%耐力のそれに比べて小さい傾向にあることがわかる。

3.2 ばらつき

それぞれLT、LC、TT、TCに対する0.2%耐力と引張強度の頻度分布を図-6、7に示す。図-6より、0.2%

耐力は、LTが500~510 N/mm²、TTが560~570 N/mm²で最頻値を示すのに対して、LCが490~500 N/mm²、TCが500~510 N/mm²で最頻値を示すことから、異方性の影響は圧縮よりも引張で強く現れることがわかる。一方、図-7より引張強度については、圧延方向に比べて直角方向の方が大きい傾向にあり、異方性が見受けられる。しかし、その分布幅は図-6の0.2%耐力に比べて小さく、引張強度に対する異方性の影響は0.2%耐力に比べて小さいことがわかる。

表-3には全試験結果に対する弾性係数、比例限界、0.2%耐力と1%耐力、10%ひずみ時応力と引張強度について、各サンプル数、平均値、標準偏差、変動係数、最大値と最小値、95、5パーセンタイルを示した。なお、95、5パーセンタイルは正規分布を当てはめて求めている。表-3より、弾性係数は圧延方向による異方性の影響によるばらつきを示す。材料試験によれば二相系ステンレス鋼SUS329J3Lの弾性係数も表-2の

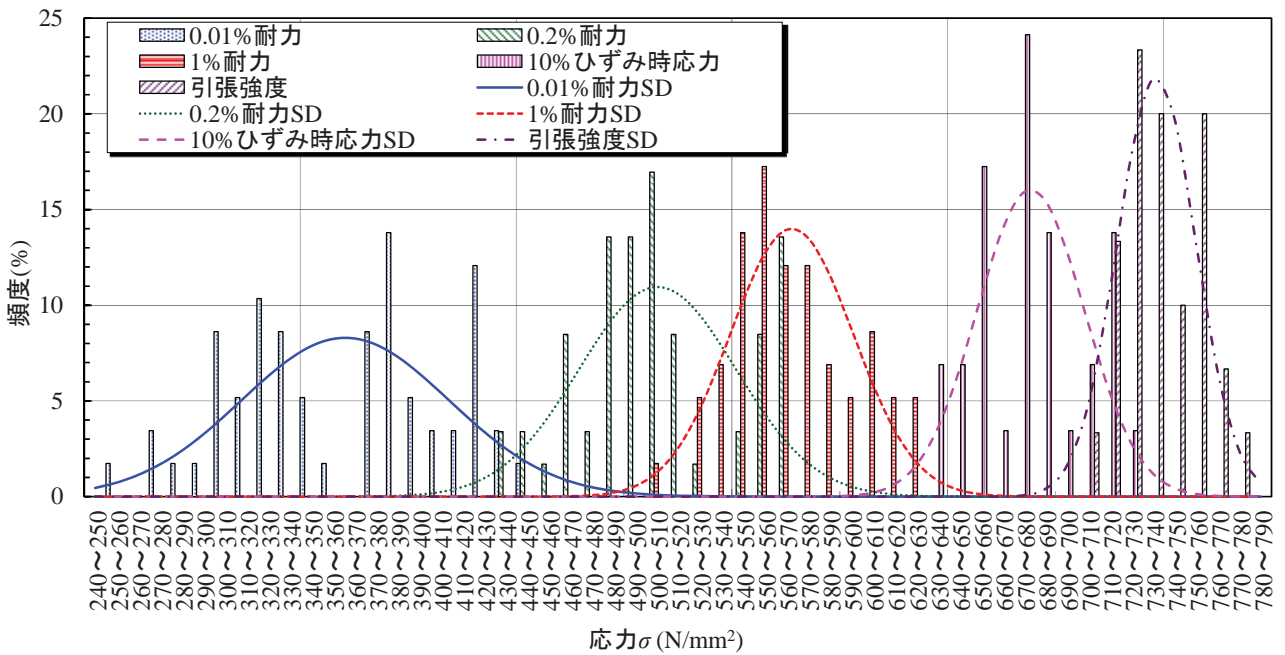


図-8 機械的特性値の頻度分布

ように異方性を示す。しかし、設計基準²⁾では同鋼の弾性係数を 200 kN/mm²と規定していることから、リール鋼の弾性係数も 200 kN/mm²と見なしてよいと思われる。変動係数については、0.01%耐力、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力、引張強度の順に小さくなっていることがわかる。これは、応力の上昇につれて圧延方向による異方性の影響が小さくなることによるものと考えられる。

図-8には全試験結果から得られた0.01%耐力、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力、引張強度の頻度分布ならびに各々に対する正規分布(SD)を示す。これより、0.01%耐力、0.2%耐力、1%耐力、10%ひずみ時応力、引張強度と応力の上昇につれて、各正規分布形状の分布範囲が狭まり、尖った形状が現れていることがわかる。

表-4はリール鋼、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304⁹⁾、SUS316⁹⁾、構造用炭素鋼 SM570⁵⁾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比較したものである。これより、各鋼のサンプル数が異なるため相対的な比較は必ずしも適切ではないが、リール鋼の0.2%耐力は圧延方向による異方性の影響があるにも関わらず、その変動係数はSUS304、SUS316に比べて小さく、SM570の降伏応力の変動係数より若干大きいことがわかる。これは、0.2%耐力の決定に必要な弾性係数のばらつきはリール鋼に比べてSUS304、SUS316の方が大きいこと¹⁰⁾、同表のSUS304、SUS316のデータはミルシートに基づくため、ひずみ速度のばらつきが考えられる。

表-4 統計値の比較

鋼種	リール鋼	SUS304	SUS316	SM570	
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ または 降伏応力 σ_y (N/mm ²)	サンプル数	59	78	21	9449
	平均値	506	285	288	561
	標準偏差	36.31	22.94	28.86	36.80
	変動係数	0.072	0.081	0.100	0.066
引張強度 σ_u (N/mm ²)	サンプル数	30	89	27	9449
	平均値	737	642	586	588
	標準偏差	17.97	40.71	30.08	23.40
	変動係数	0.024	0.063	0.051	0.040

また、引張強度に関しては、SUS304、SUS316やSM570に比べてリール鋼の変動係数が最も小さいことがわかる。この原因として、リール鋼に関しては本研究、既往の研究³⁾⁴⁾とも同一メーカーの鋼板を用いた材料試験結果に基づいているのに対して、SUS304、SUS316やSM570については、複数メーカーのミルシートに基づいていることが考えられるが、詳細は不明である。

4. 構成式の適用性

本研究では、リール鋼の構成式としてSUS304等のステンレス鋼の応力-ひずみ曲線を精度よく表現できることが確認されている以下のMRO曲線⁷⁾を用いた。同曲線は、図-9に示すように、比例限界までは線形弾性域、それ以降は2つのRamberg-Osgood曲線を0.2%耐力点で滑らかに繋いだ構成式である。

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma/E & (0 \leq \sigma < \sigma_p) \\ \sigma/E + a(\sigma^{n_1} - \sigma_p^{n_1}) & (\sigma_p \leq \sigma < \sigma_{0.2}) \\ \sigma/E + b\sigma + c + d(\sigma - \sigma_{0.2})^{n_2} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (1)_{1-3}$$

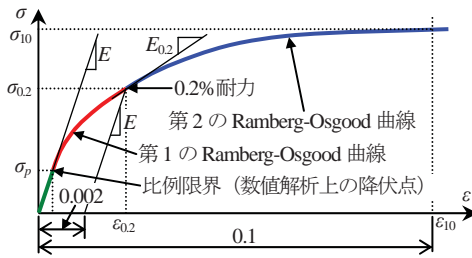


図-9 MRO 曲線の概略図

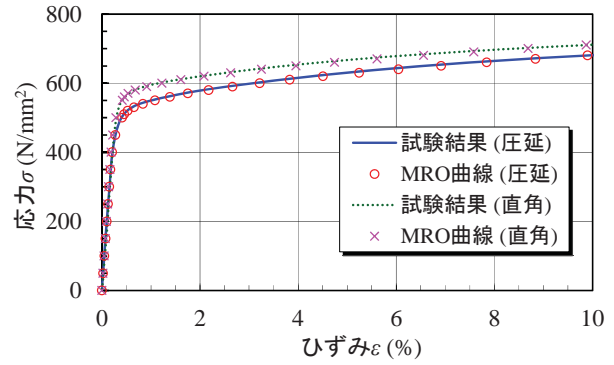


図-10 材料試験結果と MRO 曲線の比較

表-5 MRO 曲線の材料定数

試験片	弾性係数 E (kN/mm^2)	0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (N/mm^2)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm^2)	1%耐力 σ_1 (N/mm^2)	10%ひずみ時応力 σ_{10} (N/mm^2)	硬化パラメータ $n1$	硬化パラメータ $n2$
圧延方向	197.5	379.3	512.2	558.4	679.4	10.0	2.1
直角方向	213.6	421.9	561.3	602.2	713.4	10.5	2.0
全平均値	206.5	402.9	539.5	582.8	698.3	10.3	2.0

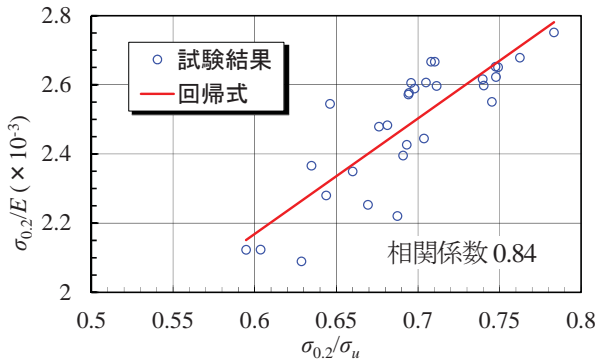


図-11 $\sigma_{0.2}/E$ と $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ の関係

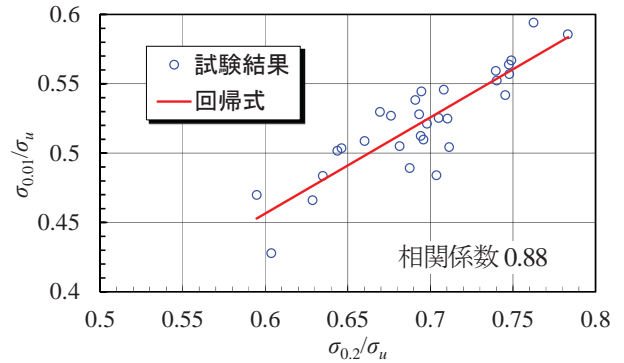


図-12 $\sigma_{0.01}/\sigma_u$ と $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ の関係

$$a = \frac{0.002}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1}}, b = \frac{0.002n1\sigma_{0.2}^{n1-1}}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1}}, c = \epsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E_{0.2}},$$

$$d = \frac{1}{(\sigma_{10} - \sigma_{0.2})^{n2}} \left(\epsilon_{10} - \epsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{10} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \quad (1)_{4-8}$$

$$E_{0.2} = \frac{E(\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1})}{\sigma_{0.2}^{n1} - \sigma_p^{n1} + 0.002n1E\sigma_{0.2}^{n1-1}}$$

ここに、 σ : 応力、 ϵ : ひずみ、 σ_p : 比例限界 (=0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$)、 $\sigma_{0.2}$ と $\epsilon_{0.2}$: それぞれ 0.2%耐力と 0.2%耐力時ひずみ、 E : 弾性係数、 $E_{0.2}$: 0.2%耐力時の接線弾性係数、 $n1$ 、 $n2$: それぞれ第1と第2の曲線の硬化パラメータ、 σ_{10} : 10%ひずみ時の応力、および ϵ_{10} : 10%ひずみ (=0.1) である。

一例として、圧延方向 (L2) と直角方向 (T1) の応力-ひずみ曲線と各試験結果に当てはめた MRO 曲線を比較して図-10 に示す。同図より、MRO 曲線は試験結果と良好に適合しており、MRO 曲線はリーン鋼に対しても適用できると考えられる。

本研究の材料試験から決定された MRO 曲線の材料定数の圧延方向ごとの平均値、全平均値を表-5 に示

す。これより、圧延方向によらず概ね硬化パラメータ $n1$ は 10、 $n2$ は 2 であり、一般的なオーステナイト系ステンレス鋼の $n1$ 値 $3 \sim 10^{11}$ よりも大きい。リーン鋼の 0.2%耐力までの応力-ひずみ曲線の非線形性は同鋼に比べて小さいと考えられる。

5. 機械的特性値と構成式の材料定数間の関係

MRO 曲線の材料定数は、機械的特性値として弾性係数 E 、0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ 、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ 、1%耐力 σ_1 と 10%ひずみ時の応力 σ_{10} を用いて決定される。しかし、一般に材料規格やミルシートには $\sigma_{0.2}$ と引張強度 σ_u のみが与えられているため、それらに基づいて MRO 曲線は定められない。そこで、材料試験から得られた降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ と、機械的特性値 E 、 $\sigma_{0.01}$ 、 σ_1 、 σ_{10} を $\sigma_{0.2}$ や σ_u で無次元化したパラメータを相関分析し、 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ からそれらの機械的特性値を推定することが考えられる¹²⁾。図-11~14 はその結果 $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ と最も良好な相関を示した無次元パラメータの関係、回帰式と相関係数を示している。これより、各回帰式に対する相関係数は 0.84~

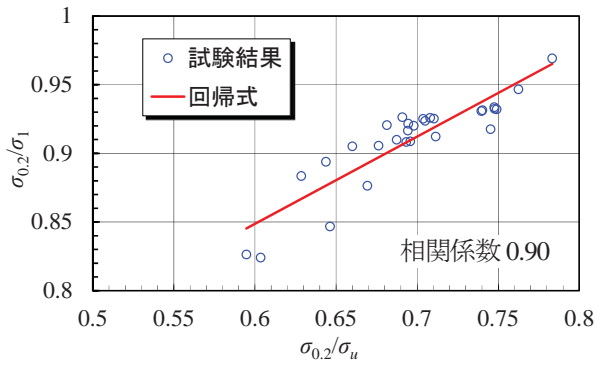


図-13 $\sigma_{0.2}/\sigma_1$ と $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ の関係

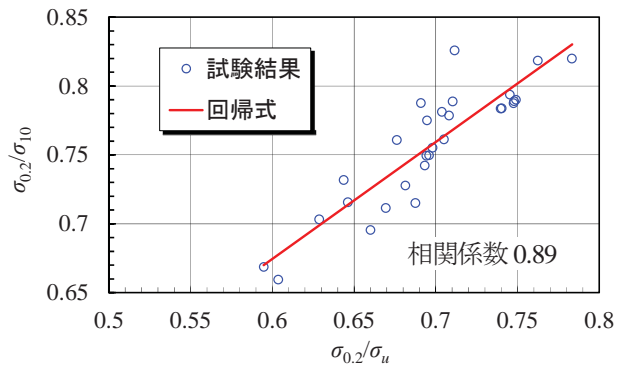


図-14 $\sigma_{0.2}/\sigma_{10}$ と $\sigma_{0.2}/\sigma_u$ の関係

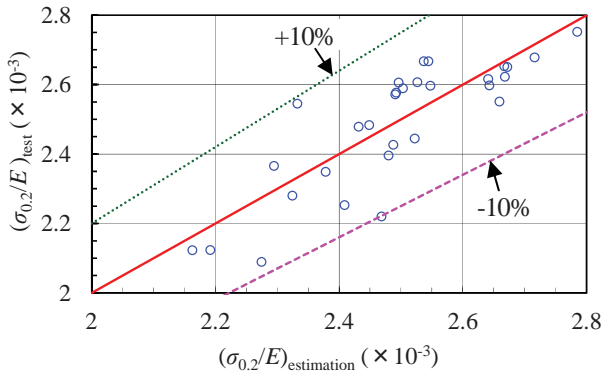


図-15 試験と推定式から得られた $\sigma_{0.2}/E$ の比較

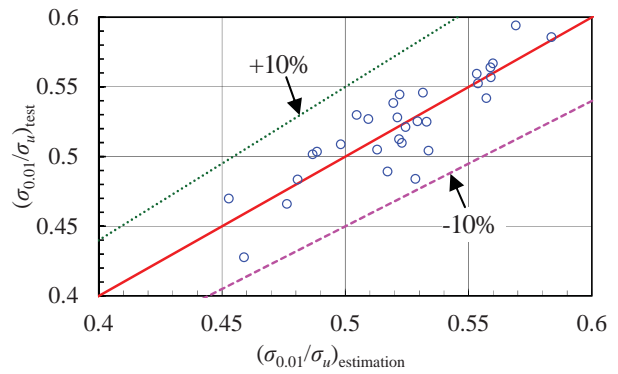


図-16 試験と推定式から得られた $\sigma_{0.01}/\sigma_u$ の比較

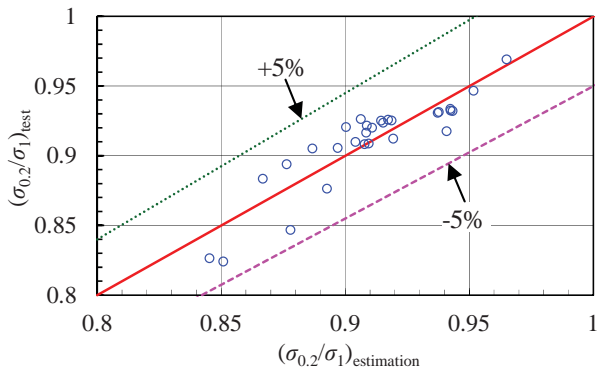


図-17 試験と推定式から得られた $\sigma_{0.2}/\sigma_1$ の比較

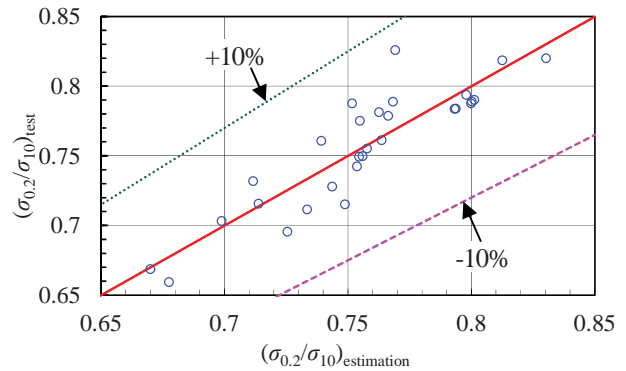


図-18 試験と推定式から得られた $\sigma_{0.2}/\sigma_{10}$ の比較

0.90 と、両パラメータ間に強い相関があることがわかる。弾性係数や 0.01%耐力の相関係数がやや小さいのは、圧延方向による異方性の影響によるものと考えられる。以上より、本研究では、同図中に示す以下の回帰式を E 、 $\sigma_{0.01}$ 、 σ_1 と σ_{10} の推定式として提示する。

$$\frac{\sigma_{0.2}}{E} = 0.0033 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} + 0.0002 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_{0.01}}{\sigma_u} = 0.6939 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} + 0.0401 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_1} = 0.6353 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} + 0.4674 \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{10}} = 0.8498 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} + 0.1646 \quad (5)$$

式(2)~(5)の精度を確認するため、材料試験と同式か

ら与えられた無次元パラメータの関係を図-15~18に示す。これより、同式による試験結果の推定誤差は無次元パラメータ $\sigma_{0.2}/E$ と $\sigma_{0.2}/\sigma_{10}$ 、 $\sigma_{0.01}/\sigma_u$ は±10%以内、 $\sigma_{0.2}/\sigma_1$ にあつては±5%以内であるため、式(2)~(5)は実用的な推定式として適用できると考えられる。

本研究の材料試験に基づく機械的特性値の平均値を用いて決定した MRO 曲線 (曲線 a と称する)、0.2%耐力と引張強度の同平均値を式(2)~(5)に代入して得られる機械的特性値の推定値を用いて決定した MRO 曲線 (曲線 b)、それらの推定値に+側、-側のばらつきを与えて決定した MRO 曲線 (それぞれ曲線 c, d) を図-19に示す。ただし、曲線 c, d のばらつきは、図-15~18 の推定誤差に鑑みて、弾性係数、比例限界と 10% ひずみ時応力については±10%、1%耐力については±

5%とした。これより、曲線 a と b は重なっていること、それらは曲線 c と d の間に挟まれていることから、式 (2)~(5)によって機械的特性値を推定し、それらを用いて MRO 曲線が確立できることがわかる。

6. まとめ

本研究では、リーン鋼 1.4162 の材料試験を実施することによってその応力-ひずみ曲線と機械的特性値を把握するとともに、既往の同鋼に関する試験結果も収集、分析することによって機械的特性値のばらつき、板厚依存性についても調査した。また、既存の構成式 (MRO 曲線) のリーン鋼への適用性を検討し、さらに同曲線の材料定数の決定に必要な機械的特性値を 0.2% 耐力と引張強度のみから決定できる推定式を提示した。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- (1) リーン鋼の応力-ひずみ曲線は明確な降伏点を持たないラウンドハウス型の曲線を示し、圧延方向による異方性が認められる。
- (2) リーン鋼の 0.2% 耐力、引張強度は 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) リーン鋼は板厚増加につれて 0.2% 耐力、引張強度とも低下する傾向にあるものの、引張強度の低下は 0.2% 耐力の低下に比べて小さい。
- (4) リーン鋼の機械的特性値のばらつきは圧延方向による異方性の影響と対応して、応力レベルの上昇につれて小さくなる。
- (5) リーン鋼の 0.2% 耐力や引張強度のばらつきは SUS304, SUS316 に比べて小さい傾向にある。
- (6) MRO 曲線を用いてリーン鋼の応力-ひずみ曲線を精度よく表現できる。
- (7) 提示した推定式を用いて MRO 曲線の材料定数の計算に必要な機械的特性値を実用的な精度で推定できる。

参考文献

- 1) Graham Gedge : Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering, J. of Const. Steel Res., Vol.64, pp.1194-1198, 2008.
- 2) European Committee for Standardization : Eurocode 3: - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels, CEN, European Standard, EN 1993-1-4, 2006.
- 3) N. Saliba and L. Gardner : Cross-section stability of lean duplex stainless steel welded I-section, J. of Const. Steel

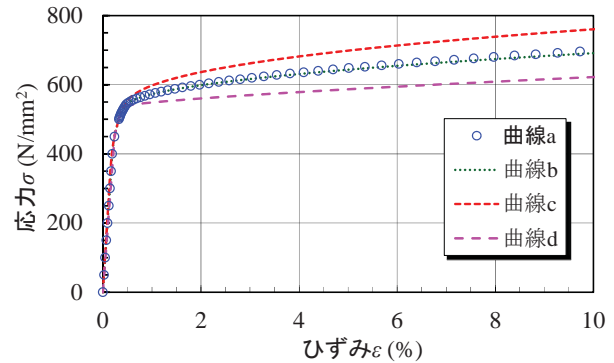


図-19 推定式から材料定数の決定された MRO 曲線

Res., Vol.80, pp.1-14, 2013.

- 4) N. Saliba and L. Gardner : Experimental study of the shear response of lean duplex stainless steel plate girders, Eng. Struct., Vol.64, pp.375-391, 2013.
- 5) 奈良 敬, 中村聖三, 安波博道, 川端文丸, 塩飽豊明 : 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.
- 6) 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.
- 7) 森 省吾, 三好崇夫, 越智内士, 宮寄靖大, 奈良敬 : 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, 日本鋼構造協会, 第 15 巻, 645-652 頁, 2007.
- 8) 一般財団法人 日本規格協会 : JIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯, 2012.
- 9) 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.
- 10) E. Real, I. Arrayago and R. Westeel : Comparative study in analytical expressions for the modelling of stainless steel behaviour, Stainless Steel in Structures, 4th Int. Experts Seminar, Ascot, UK., pp.1-17, 2012.
- 11) K. J. R. Rasmussen, and J. Rondal : Explicit Approach to Design of Stainless Steel Columns, J. of Struct. Eng., Proc. of ASCE, Vol.123, No.7, pp. 857-863, 1997.
- 12) K. J.R. Rasmussen : Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, J. of Const. Steel Res., Vol.59, pp.47-61, 2003.