

# 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

奈良 敬<sup>1</sup>・中村 聖三<sup>2</sup>・安波 博道<sup>3</sup>・川端 文丸<sup>4</sup>・塩飽 豊明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 総合情報メディアセンター (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

<sup>4</sup>博(工) JFE スチール(株) 厚板セクター部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3)

<sup>5</sup>(株)神戸製鋼所 厚板商品技術部 (〒141-8688 東京都品川区北品川 5-9-12)

2001年に国内鉄鋼5社から橋梁向けに出荷された厚鋼板を対象として板厚および強度にかかわるデータを収集し、板厚に関して16万件余、強度に関して8万件弱のデータを得た。それらをもとに、板厚精度、降伏点・引張強さの規格下限値に対する比率および降伏比の平均値、標準偏差および頻度分布を求めた。また、強度の特性値と板厚との相関を調査するとともに、確率分布形に関する検討も行った。その結果、板厚に関して平均値は公称値よりわずかに高く、マイナス側の偏差は大部分が3%以内であること、強度に関して降伏点、引張強さの平均値は規格下限値よりもそれぞれ20~30%、10~15%高いことなどを明らかにした。また、板厚精度と降伏点については、いくつかの確率分布関数に対する適合度も示した。

**Key Words :** steel plate, thickness, yield point, tensile strength, probability distribution

## 1. 序論

政府調達分野では、従来より、1979年4月に作成され1987年2月に改正された「政府調達に関する協定」により、政府機関等による製品の調達に内国民待遇の原則、および無差別待遇の原則が適用されてきた。近年における経済活動のグローバル化にともない、こうした原則の適用範囲を新たにサービス分野の調達や地方政府機関等にも拡大すべく、1994年4月にモロッコのマラケシュで作成されたWTO政府調達協定が1996年1月に発効した。その第6条2には「技術仕様については、適当な場合には、(a) デザイン又は記述的に示された特性よりも性能に着目して、また、(b) 国際規格が存在するときは当該国際規格、国際規格が存在しないときは国内強制規格、認められた国内任意規格又は建築規準に基づいて定める」と記されている。すなわち、技術仕様は性能に着目し、かつ国際規格に基づいて定めるべきことが定められていることになる。

こうした状況を受け、近年、構造物の設計基準を仕様規定型から性能照査型へ移行させるための検討が各所で実施されてきた。建築分野では、平成7年度から3カ年にわたり、建設省(現国土交通省)建

築研究所を中心として、総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」が実施<sup>1)~5)</sup>され、建築基準法が1998年5月に性能規定化を意図した設計基準に改正された。土木分野でも、鋼構造<sup>6)~8)</sup>、コンクリート構造<sup>9)</sup>、基礎構造<sup>10)</sup>の分野でそれぞれ精力的な検討が行われ、モデルコードも提案<sup>11)~14)</sup>されている。平成14年3月には、道路橋示方書・同解説<sup>15)</sup>が性能規定型の設計基準を目指して、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式に書き換えられた。性能照査型設計法においては、信頼性設計法の考え方が導入され、部分安全係数設計法のフォーマットが用いられることが多いため、各種安全係数の値を定めるための統計データの蓄積が望まれる。

構造用鋼材の降伏点、引張強さ、降伏比(降伏点/引張強さ)等の機械的性質に関する実態調査の報告としては、西村<sup>16)~18)</sup>、青木<sup>19)~20)</sup>、福本・伊藤<sup>21)</sup>によるものがあるが、それらはすべて1980年代以前の比較的古いデータである。1990年代以降のデータとしては、文献<sup>22)</sup>や鈴木<sup>23)</sup>の報告がある。前者には、鉄鋼メーカーが実施した引張試験結果や橋梁製作メーカーに対するアンケートで得られた統計値が示されているが、調査対象には橋梁以外の構造

表-1 調査対象の鋼材規格と各板厚区分での調査鋼材データの割合(%)

鋼材規格		板厚区分と調査板厚範囲(単位: mm)						調査対象 (%)
		I	II	III	IV	V	VI	
		$6 \leq t \leq 12$	$12 < t \leq 16$	$16 < t \leq 25$	$25 < t \leq 32$	$32 < t \leq 40$	$40 < t \leq 100$	
SS400		15.2	2.2	2.0	0.2	—	—	99.9
SM400	SM400A	53.0	11.2	11.4	2.2	—	—	
	SM400B	<0.1	<0.1	0.8	0.1	1.2	—	
	SM400C	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.2	—	
SM490	SM490A	46.5	18.3	17.2	—	—	—	99.9
	SM490B	—	2.7	5.5	2.3	2.2	—	
	SM490C	—	—	<0.1	1.6	0.5	3.2	
SM490Y	SM490YA	29.2	20.5	—	—	—	—	99.9
	SM490YB	—	—	31.0	10.5	6.4	—	
SM520	SM520C	—	—	—	—	—	<0.1	99.9
	SM520C-H	—	—	—	—	—	2.3	
SM570	SM570	9.6	15.1	25.8	15.7	14.3	<0.1	99.9
	SM570-H	—	—	—	—	—	19.4	
SMA400W	SMA400AW	71.8	13.3	8.7	—	—	—	100.0
	SMA400BW	—	—	2.3	1.5	0.9	—	
	SMA400CW	—	—	<0.1	0.2	0.2	1.0	
SMA490W	SMA490AW	42.5	20.2	—	—	—	—	100.0
	SMA490BW	—	—	24.5	8.0	4.2	—	
	SMA490CW	—	—	—	—	—	0.7	

注) 板厚区分は道路橋示方書における鋼種選定で定められている適用板厚区分に基づき設定した。

物に適用された鋼材も含まれており、板厚精度等により厳しい制限がある橋梁向け構造用鋼材のみを抽出した調査結果ではない。後者には1970年から1992年に橋梁製作工場で行われた引張試験で得られた降伏点、引張強さ、伸びなどの機械的性質の平均値および上下限値と板厚との関係が示されているが、材料強度の特性値等を定めるのに十分なデータが示されているとは言い難い。

本研究は、近い将来において鋼橋の設計基準が性能照査型設計法へ移行しようとしている状況に鑑み、材料強度の特性値、材料係数、死荷重係数等の設定に用いるための信頼に足る基礎データを提示することを目的とするものである。調査は新日本製鉄、NKK、川崎製鉄、住友金属工業、神戸製鋼所の5社から2001年に橋梁向けに出荷された構造用鋼板を対象とし、板厚および強度にかかわるデータを収集した。板厚については製造時の品質管理記録、強度特性については鋼材検査証明書(ミルシート)に記載される数値をデータとして用いた。本文では、調査の概要、各調査項目に対する基礎統計量と分布形状、板厚と強度特性との相関等について報告する。

## 2. 測定項目

### (1) 調査対象

わが国の鋼橋で実際に使用された鉄鋼5社の厚鋼

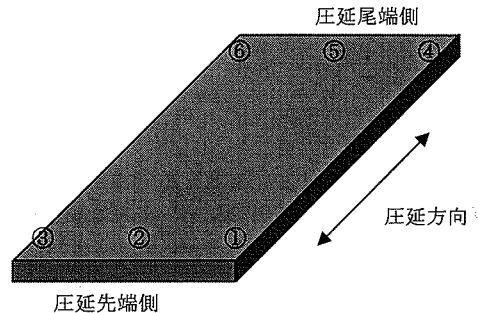


図-1 板厚測定位置

板を対象に、機械的性質および板厚の統計データを調査した。このデータには、道路橋示方書に準拠した道路橋用鋼板の他、鉄道構造物等設計標準に準拠した鉄道橋用鋼板も含まれる。

### (2) 調査対象区分と調査項目

今回収集したデータについて、表-1に示すように鋼材規格と板厚範囲で区分した。収集データのほとんどのものは以降の統計処理を行っているが、各強度レベルにおいて板厚区分のデータ数の割合が0.1%未満のもの(表中では<0.1と表記)は、統計処理の信頼性が十分でないと判断し、統計処理から除外した。また、表中の-印は該当するデータがなかったことを示している。調査した項目は、実測板厚、降伏点(あるいは耐力)、引張強さ、および降

表-2 橋梁向け構造用鋼板の特性調査結果 (\*は規格下限値に対する比で表示)

規格	板厚精度(%)			引張特性						
				降伏点 or 耐力*		引張強さ*		降伏比(%)		データ数
	平均	標準偏差	データ数	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
SS400, SM400	0.18	1.46	58213	1.25	0.10	1.11	0.036	68.0	4.3	31579
SM490	0.52	1.47	3511	1.26	0.11	1.11	0.034	73.5	4.8	2448
SM490Y, SM520	0.17	1.11	56994	1.20	0.08	1.12	0.041	78.3	4.3	30013
SM570	0.66	0.74	6162	1.22	0.08	1.13	0.045	85.7	3.4	9449
SMA400W	0.05	1.23	15640	1.43	0.11	1.16	0.046	74.2	4.5	2094
SMA490W	0.03	0.98	20460	1.25	0.10	1.12	0.047	82.0	4.0	3318
全鋼種	0.17	1.21	160980	1.23	0.10	-	-	-	-	78901

伏比である。今回の調査ではこれらの調査項目の値を用いて、板厚偏差(=実測板厚-公称板厚)と公称板厚の比として評価した板厚精度、ならびに降伏点や引張強さの実測値と規格下限値との比を算出し、それらの平均値、標準偏差、頻度分布を解析した。

### 3. 調査測定方法

#### (1) 板厚精度

板厚測定位置は、図-1に示すように、鋼板の圧延先端側と尾端側の合計6ヶ所(①~⑥)とし、この6ヶ所の測定値の平均値を実測板厚とした。本調査では、板厚精度を式(1)のように定義した。

$$\text{板厚精度(\%)} = \frac{\text{実測板厚} - \text{公称板厚}}{\text{公称板厚}} \times 100 \quad (1)$$

#### (2) 機械的性質

機械的性質としては、降伏点、引張強さ、降伏比を調査した。調査データは実際の出荷鋼板で、JISに従った試験方法によって得られたものであり、試験片はほぼ全数が圧延直角方向に採取されている。構造設計における降伏点としては、上降伏点ではなく下降伏点あるいは静止降伏点を用いるべきであるとの主張もあるが、上述した試験方法で得られたデータであるため、以降に示す降伏点はすべて上降伏点あるいは0.2%耐力である。なお、文献22)によると下降伏点の値は上降伏点の95~97%程度である。

#### (3) 調査期間

調査期間は、2001年の1年間とした。

### 4. 測定結果と考察

#### (1) 基礎統計量

表-2は、鋼種ごとに各調査項目の基礎統計量(平均値および標準偏差)をまとめたものである。

以下に調査項目ごとに考察を加える。

#### a) 板厚精度

道路橋示方書では、板厚の許容差はJIS G 3193の許容差(板厚6~100mmの範囲では、板厚と板幅に応じて±0.5mm±1.5mm以内)を満足し、かつマイナス側の板厚偏差が公称板厚の5%以内となることが定められている。今回の調査結果では、板厚精度の平均値は公称板厚より0~0.7%程度厚めとなっている。また、標準偏差は1.5%以内であり、マイナス側許容差5%より十分小さい。これらの結果から、橋梁向け鋼板の平均板厚はほぼ公称値になっていることがわかる。

鋼種による違いに着目すると、SS400, SM400, SM490, SMA400Wの標準偏差は他の鋼種よりわずかに大きい。これは、表-1に示すように、こうした比較的低強度の鋼種では板厚12mm以下の薄い板の割合が多く、板厚偏差の絶対値が同程度の場合、公称板厚で除した板厚精度が大きい値となるためである。また、同様にSM570も板厚精度が大きい傾向を示すが、これは再加熱される熟処理(QT)材の割合が大きいことがその原因の一つと考えられる。

#### b) 降伏点

降伏点の実績平均値は、規格下限値に対し20~43%高めになっている。降伏点/規格下限値の標準偏差は0.08~0.11であり、比較的狭い範囲に分布している。

SMA400Wの降伏点/規格下限値の平均値は他の鋼種と比べて明らかに高いが、これは通常の軟鋼では添加されないCu, Cr, Niなどの合金成分が、耐候性能付与のために添加されることによる強度上昇が原因と考えられる。SMA400Wを除けば、降伏点/規格下限値の平均値は1.2~1.3程度であり、規格下限値よりも標準偏差の約2.5倍高く管理されている。

#### c) 引張強さ

引張強さは、実績平均値で規格下限値に対し11~16%高めであり、降伏点の場合より規格下限値との差が小さい。引張強さ/規格下限値の標準偏差は

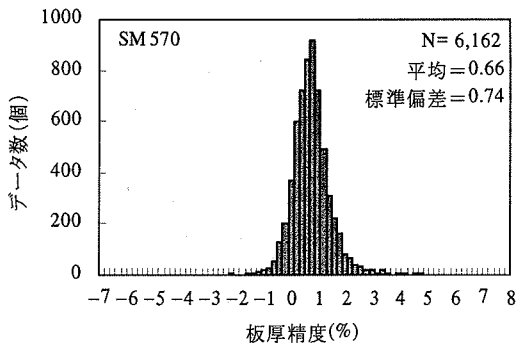
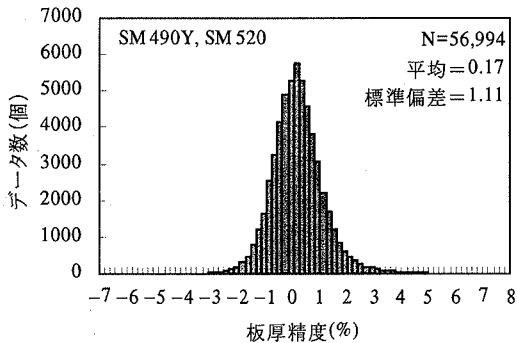
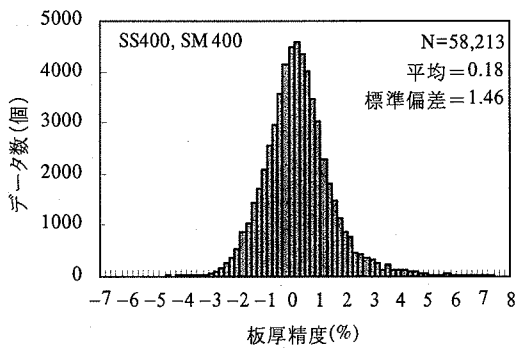


図-2 板厚精度の頻度分布

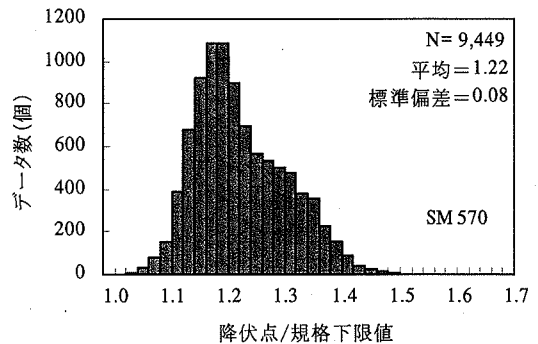
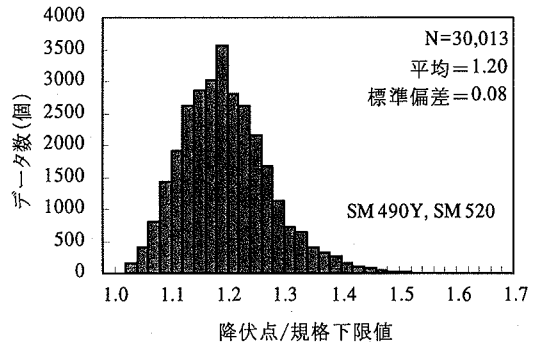
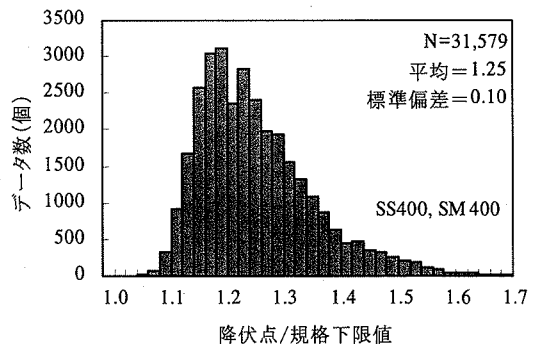


図-3 降伏点/規格下限値の頻度分布

0.034~0.047 であり、ばらつきも降伏点に比べれば半分程度と小さくなっている。これは、上降伏点が弾性変形から塑性変形への大きな変化点で与えられるのに対して、引張強さは塑性変形が十分均一に進んだ後の安定した最大荷重によって与えられるためである。

d) 降伏比

一般に厚鋼板では、高強度化にともない引張強さとともに降伏点が上昇するため、高強度鋼ほど降伏比は高い傾向を示す。今回もそうした傾向が見られ、降伏比の実績平均値は、高強度鋼になるほど高い。また今回の調査では、普通鋼に比べ耐候性鋼は降伏比が高い。一方、降伏比の標準偏差は鋼種による差はあまりなく 4~5%程度で、前述の降伏点のばら

つきが狭い範囲に管理されていることと引張強さのばらつきが小さいことを反映している。

(2) 頻度分布

a) 板厚精度

板厚精度の頻度分布の代表例として、図-2 には①SS400・SM400、②SM490Y・SM520、③SM570の3種類のヒストグラムを示す。同図では滑らかなヒストグラム作成のため、板厚精度の刻みを 0.2%幅とし、各クラスに対する頻度を求めている。

鋼種によっては分布形状が僅かに左に歪んでいるようにも見えるが、正規分布に近い形状を呈している。マイナス側の板厚は、許容値-5%に対し、大部分が-3%以上となっている。また SM570 は、ほと

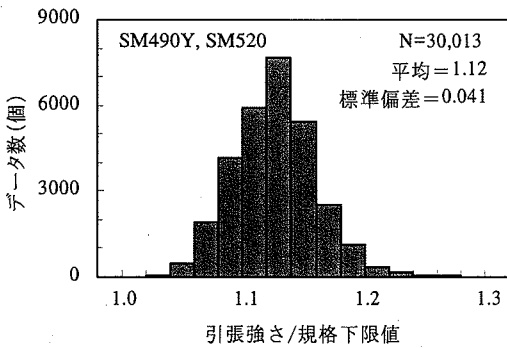


図-4 引張強さ/規格下限値の頻度分布例

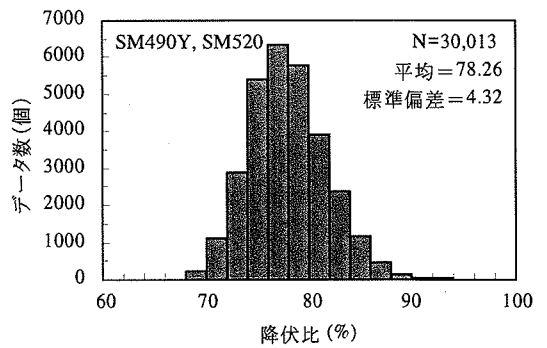


図-5 降伏比の頻度分布例

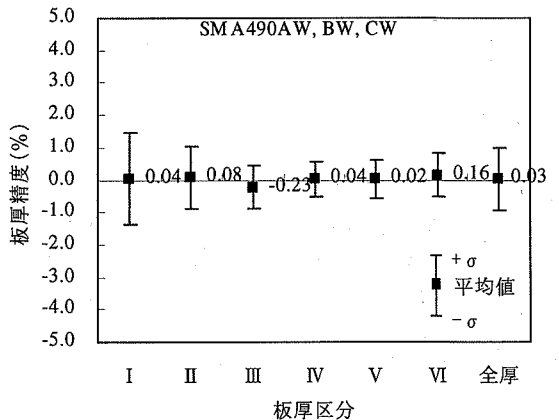
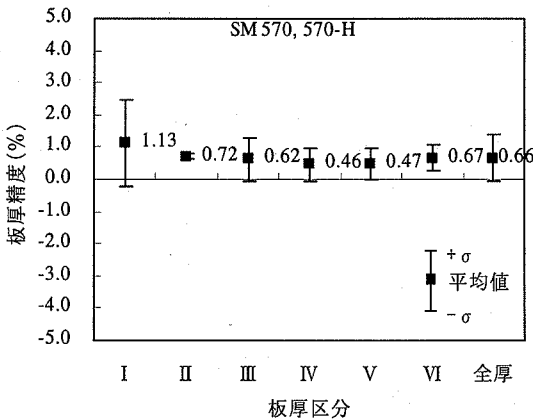
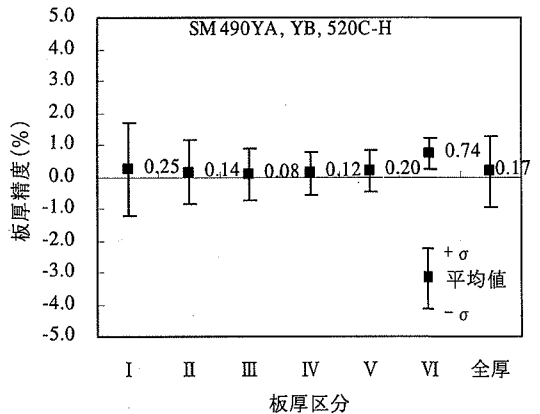
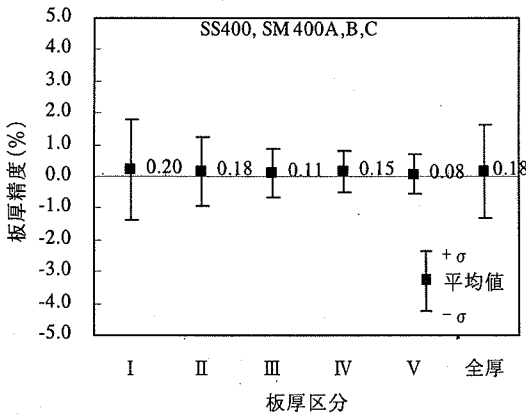


図-6 板厚精度と板厚の相関

んどが-1%以上の板厚である。

b) 降伏点

図-3には図-2と同様、降伏点/規格下限値の頻度分布の代表例として、3種類のヒストグラムを示す。頻度分布の区分は0.02幅としている。

いずれの鋼種も最頻値が値の小さい側(左側)に偏った分布形状をしており、1.2~1.25程度の平均値に対して、最頻値は1.16~1.2程度である。SS400・SM400では特に分布形状の偏りが大きい。

実測値の分布幅は、SS400・SM400では1~1.7程度、SM490・SM520およびSM570では1~1.5程度であり、SS400・SM400は他鋼種と比べやや高強度側に広く分布している。降伏点/規格下限値の分布は平均値を中心とする対称形ではないため、正規分布とみなすことは困難であると考えられる。

c) 引張強さ

引張強さ/規格下限値の頻度分布の代表例としてSM490Y・SM520のヒストグラムを図-4に示す。頻

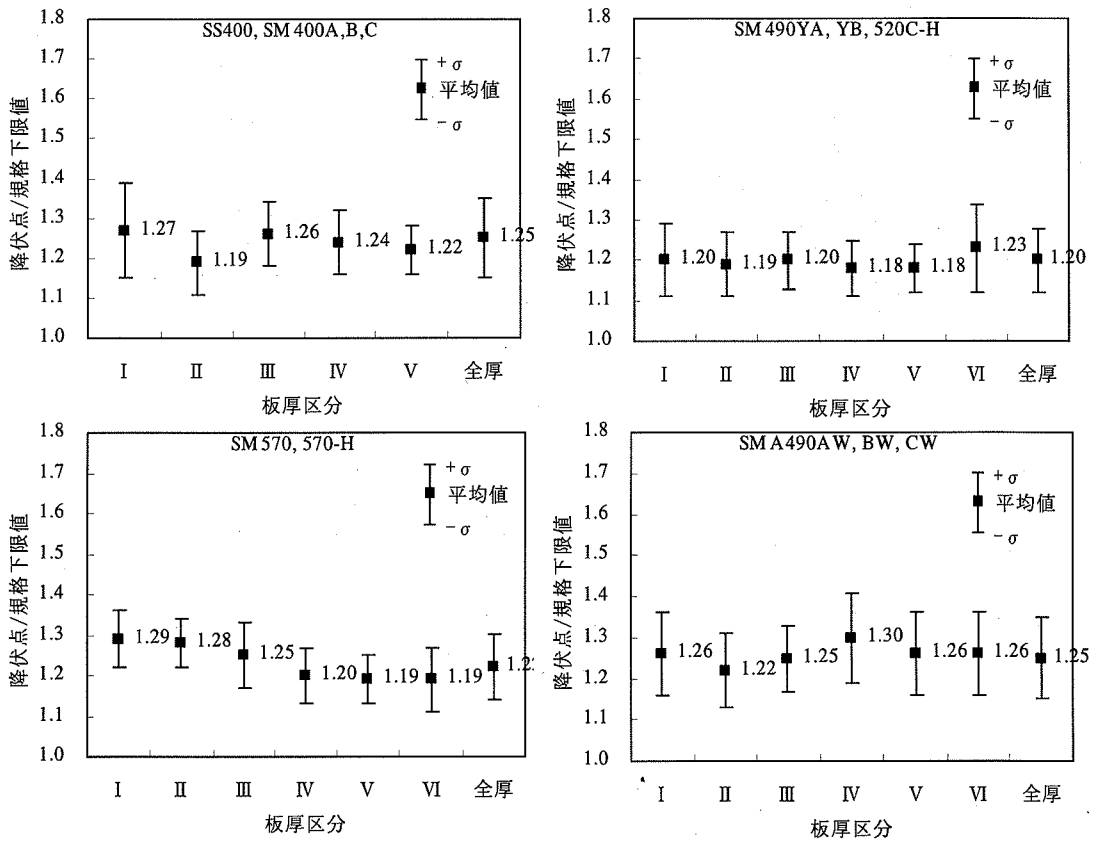


図-7 降伏点/規格下限値と板厚の相関

度区分は 0.02 幅としている。頻度分布はやや低強度側に偏っているが、比較的滑らかな分布形状を呈しており、大部分のデータは 1.00~1.25 に収まっている。

#### d) 降伏比

降伏比の頻度分布の代表例として SM490Y と SM520 を合わせたヒストグラムを図-5 に示す。頻度区分は 2%幅としている。頻度分布は対称形に近く、74~80%の頻度が高い。また、データのほとんどは 68~90%にある。

### (3) 各調査項目と板厚との相関

#### a) 板厚精度と板厚の相関

引張強さ 400N/mm<sup>2</sup>, 490N/mm<sup>2</sup>, 570N/mm<sup>2</sup> 級の普通鋼と 490N/mm<sup>2</sup> 級の耐候性鋼の板厚精度と板厚の相関を図-6 に示す。同図では、各板厚区分での平均値と標準偏差 (±σ) の幅をプロットと棒グラフでそれぞれ示している。板厚区分については表-1 を参照されたい。

いずれの鋼種も板厚が厚くなるほど板厚精度の標準偏差が小さくなっており、区分 I では 1.5%程度であるのに対し、区分 VI では 0.5%程度である。JIS

規格での板厚許容差は、鋼板幅が 4m で板厚 8mm の場合では ±0.9mm であるが、板厚 63~100mm では ±1.5mm であり、板厚偏差の絶対値 (mm) としては板厚が厚いほどばらつきが大きいのが実態である。一方、板厚偏差/公称板厚で定義した板厚精度では板厚が薄いものの方がばらつきが大きく見えるが、これはデータ母数が小さいためである。各板厚区分における板厚精度の平均値は、板厚の増大につれやや小さくなる傾向にはあるが、40mm を超えるような領域でも公称板厚より厚めとなっている。

#### b) 降伏点と板厚の相関

引張強さ 400N/mm<sup>2</sup>, 490N/mm<sup>2</sup>, 570N/mm<sup>2</sup> 級の普通鋼と 490N/mm<sup>2</sup> 級の耐候性鋼の降伏点と公称板厚の相関を図-7 に示す。

降伏点/規格下限値は、板厚の増大とともにやや低下する傾向はあるが、その程度はそれほど大きくない。降伏点の JIS 規格下限値は、板厚増大に伴う降伏点の低下を見込んで、板厚 16mm, 40mm, 75mm を超えるごとに 10~20N/mm<sup>2</sup> 低くなる設定になっている。例えば SM490Y・SM520 の場合、365N/mm<sup>2</sup> (t≤16mm), 355N/mm<sup>2</sup> (t≤40mm), 335N/mm<sup>2</sup> (t≤75mm), 325N/mm<sup>2</sup> (t≤100mm) となる。ただし、SM520-H は、

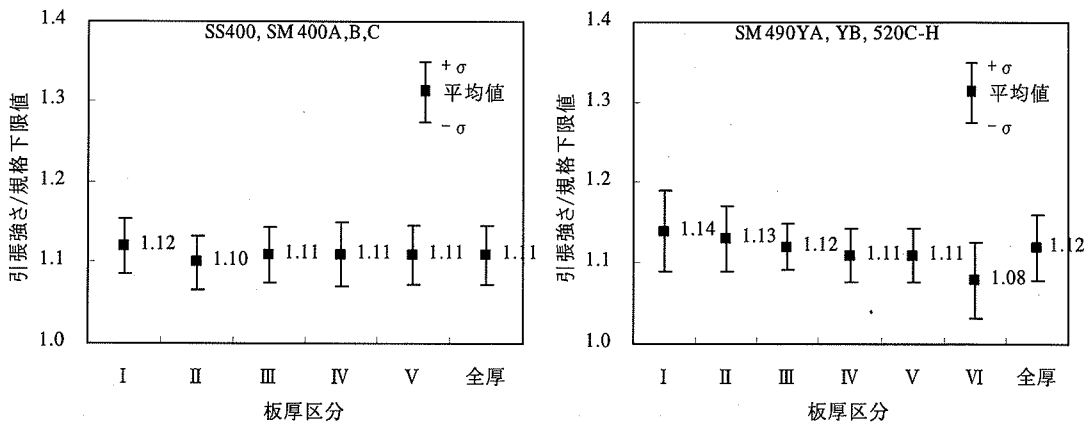


図-8 引張強さ/規格下限値と板厚の相関

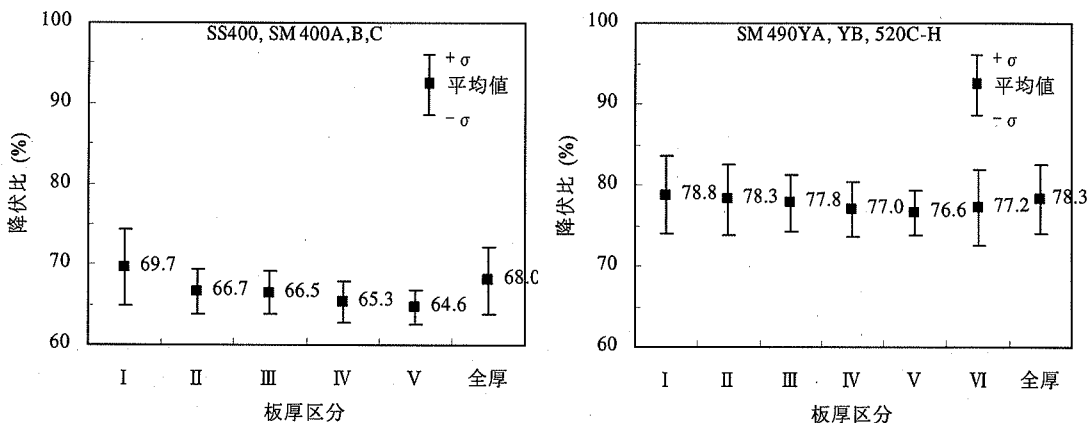


図-9 降伏比と板厚の相関

板厚 40mm から 100mm の領域でも  $355\text{N/mm}^2$  である。したがって、板厚増大とともに降伏点の実測値が低下しても、降伏点/規格下限値では実測値と規格下限値がともに低下することにより、板厚の影響が消滅し、1.2~1.3 程度の範囲内ではほぼ一定の値に落ち着いている。ただし、SM570 では規格値の低下より実測降伏点の低下が大きいため、降伏点/規格下限値が板厚とともに低下する傾向にある。SM490Y・SM520 の板厚 40mm 超えで降伏点が高くなっているのは、道路橋示方書における鋼種の選定標準に従い、適用鋼種が SM490YB (板厚 40mm 以下) から SM520C (板厚 40mm 超え) に変わるためであり、SM520C の引張強さを確保するために降伏点も高めになったものと考えられる。

一方、標準偏差は、板厚の増大とともにやや小さくなるが、影響は小さい。また、当然のことではあるが、全鋼種の出荷鋼材の実測値は全て規格下限値以上である。

#### c) 引張強さと板厚の相関

引張強さと板厚の相関の代表例として、SS400・

SM400 と SM490Y・SM520 の相関図を図-8 に示す。

引張強さ/規格下限値は、板厚増大とともにやや低下するが、その程度は小さい。SM490Y・SM520 の板厚 40mm 超えで引張強さ/規格下限値が低下しているが、これは鋼種が SM490Y から SM520 になり引張強さの規格下限値が 6%上がったためであり、引張強さの値自体は板厚 40mm 超えでむしろ上昇している。

標準偏差は、板厚による影響は小さい。なお、出荷鋼材の引張強さは降伏点と同様、全ての鋼種で規格下限値以上を満足している。

#### d) 降伏比と板厚の相関

降伏比と板厚の相関の代表例として、SS400・SM400 と SM490Y・SM520 の相関図を図-9 に示す。降伏比は、板厚が増大するにつれて低下している。これは板厚増大によって引張強さはあまり変化せず、降伏点が低下するためである。また、標準偏差は板厚増大とともにやや小さくなる傾向にある。

表-3 確率分布のパラメータ

	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布
板厚精度	$\mu = 0.17$ $\sigma = 1.21$	—	$\varepsilon = -5.00$ $\lambda = 0.638$ $\beta = 4.88$
降伏点	$\mu = 1.23$ $\sigma = 0.10$	$\mu_{\ln(x)} = 0.202$ $\sigma_{\ln(x)} = 0.0812$	$\varepsilon = 1.00$ $\lambda = 1.26$ $\beta = 2.46$

表-4 適合度の検定結果  
(a) 板厚精度

データ範囲 (%)	観測度数 $n_i$	正規分布		ワイブル分布	
		推定度数 $m_i$	$(n_i - m_i)^2 / m_i$	推定度数 $m_i$	$(n_i - m_i)^2 / m_i$
~4	288	45.75	1282.54	53.61	1024.88
-4~-3	363	662.34	135.29	1226.58	608.01
-3~-2	2821	5160.49	1060.60	7136.36	2609.50
-2~-1	16593	20980.70	917.60	22166.03	1401.18
-1~0	52810	44647.42	1492.31	43134.78	2170.17
0~1	58877	49822.31	1645.60	50230.53	1488.37
1~2	20416	29162.43	2623.24	29688.18	2895.88
2~3	5366	8941.59	1429.82	6895.49	339.25
3~4	1867	1432.25	131.97	443.65	4566.45
4~	1579	124.71	16958.57	4.86	509590.53
$\chi^2_{7}(0.01)=18.48$		$\chi^2_0=27677.53$		$\chi^2_0=526694.23$	

(b) 降伏点/規格下限値

データ範囲	観測度数 $n_i$	正規分布		対数正規分布		ワイブル分布	
		推定度数 $m_i$	$(n_i - m_i)^2 / m_i$	推定度数 $m_i$	$(n_i - m_i)^2 / m_i$	推定度数 $m_i$	$(n_i - m_i)^2 / m_i$
~1.1	3709	7637.66	2020.82	7437.75	1869.32	8997.00	3108.03
1.1~1.2	31168	22509.52	3330.56	24440.78	1851.64	26400.98	860.74
1.2~1.3	27254	29662.66	195.59	28979.96	102.79	26772.96	8.64
1.3~1.4	11670	15574.91	979.03	14189.39	447.33	13109.92	158.15
1.4~1.5	3642	3242.71	49.17	3371.78	21.66	3205.47	59.45
1.5~1.6	1059	265.04	2378.35	443.39	854.71	382.43	1196.93
1.6~	399	8.51	17922.63	37.96	3434.18	21.93	6483.35
$\chi^2_{4}(0.01)=13.28$		$\chi^2_0=26876.16$		$\chi^2_0=8581.64$		$\chi^2_0=26876.16$	

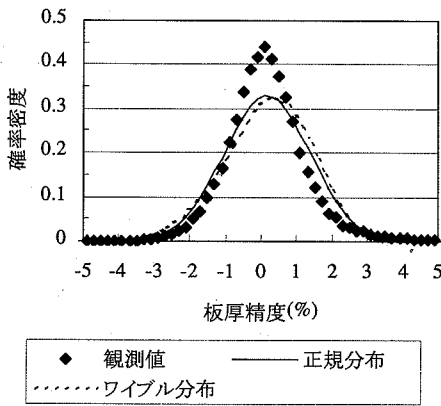
## 5. 板厚と降伏点の確率分布形状

前章には板厚精度、降伏点、引張強さ、降伏比について、鋼種別のヒストグラムを示した。本章では、板厚精度と降伏点について、鋼種による区別をせず、すべてのデータをヒストグラム化した場合に対して、代表的な確率分布に対する適合度を検討する。板厚精度と降伏点のみを取り上げたのは、部分安全係数設計法における死荷重係数や材料係数を決定するための基礎データとなるためであり、全鋼種をまとめたデータを用いるのは、これらの係数を鋼種ごとに設定することは現実的でないと判断したためである。

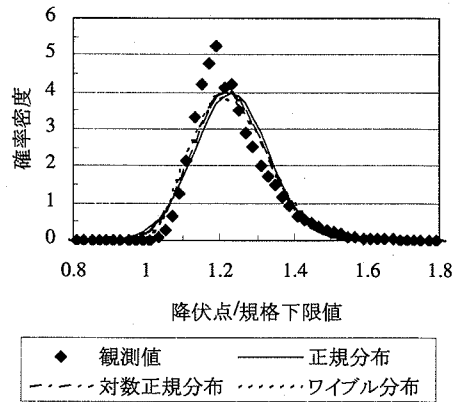
### (1) 検定対象とする確率分布

種々のデータに対し最も一般的に用いられる正規分布、数多くの独立な不確定要因が積み重なって生じる現象の確率分布とされる対数正規分布、多くの自然現象に対してよい近似を与えると言われていたワイブル分布<sup>24)</sup>を取り上げる。ただし、道路橋示方書において板厚精度に対するマイナス側の許容値が5%と規定されていること、メーカーにおける検査の結果、降伏点が規格下限値を下回るものは出荷されないことを考慮し、ワイブル分布は下限値を有するものとする。また、板厚精度は負の値となりうるため、正の領域のみで定義される対数正規分布は、検定対象から除外する。





(a) 板厚精度



(b) 降伏点/規格下限値

図-10 測定値の頻度分布と確率分布の比較

各確率分布の密度関数  $f(x)$ 、期待値  $E[x]$  および変動係数  $V[x]$  は以下のように表わされる。

・正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$E[x] = \mu, \quad V[x] = \sigma/\mu \quad (3), (4)$$

ここに、 $\mu$ 、 $\sigma$  はそれぞれ  $x$  の平均値および標準偏差である。

・対数正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma_{\ln(x)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$E[x] = \exp\left[\mu_{\ln(x)} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln(x)}^2\right] \quad (6)$$

$$V[x] = \sqrt{\exp[\sigma_{\ln(x)}^2] - 1} \quad (7)$$

ここに、 $\mu_{\ln(x)}$ 、 $\sigma_{\ln(x)}$  はそれぞれ  $\ln(x)$  の平均値および標準偏差である。

・ワイブル分布

$$f(x) = \frac{\beta}{\lambda - \varepsilon} \left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda - \varepsilon}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda - \varepsilon}\right)^\beta\right] \quad (8)$$

$$E[x] = \varepsilon + (\lambda - \varepsilon) \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (9)$$

$$V[x] = (\lambda - \varepsilon)^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (10)$$

ここに、 $\varepsilon$  は  $x$  の下限値、 $\beta$  は形状パラメータ、 $\lambda$  はスケールパラメータ、 $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数である。

## (2) 検定方法と結果

測定結果の期待値および変動係数を用いて、式(2)~(10)により各確率分布の密度関数を決定し、測定値の各確率分布に対する適合度の検定を行う。表

3には各確率分布に対して得られたパラメータを示す。検定方法としては $\chi^2$ 検定を用いる。その手順の概略を示すと以下のとおりである。

- ① 測定結果の期待値および変動係数を用いて、正規分布は式(3)、(4)、対数正規分布は式(6)、(7)、ワイブル分布は式(9)、(10)により、密度関数中の未知パラメータを算定する。
- ② 変数(データ)を幅 $\Delta x$ (板厚精度については1.0%、規格下限値で無次元化した降伏点については0.1)で区分した $k$ 個のクラスを作り、 $p_{0i} = f(x_i)\Delta x$  ( $x_i$ はクラス $i$ の中央値)、各クラスに含まれる測定値の個数を $n_i$ とする。
- ③ 母集団の各クラスに対して、母比率 $p_{0i}$ とデータ総数 $n$ から期待度数 $m_i = np_{0i}$ を求め、式(11)により $\chi_0^2$ を算定する。

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - m_i)^2}{m_i} \quad (11)$$

- ④ 各確率分布の未知パラメータ数が2であるため、統計量 $\chi_0^2$ は近似的に自由度 $k-3$ の $\chi^2$ 分布に従うことになる。これより、有意水準 $\alpha$ に対する $\chi^2$ 分布の $\alpha$ 点 $\chi_{k-3}^2(\alpha)$ が求められる。
- ⑤ 「母集団は選んだ確率分布(推定パラメータを含む)に従う」との帰無仮説の下で、以下のよう

$\chi_0^2 > \chi_{k-3}^2(\alpha)$ ならば、帰無仮説を棄却する。

$\chi_0^2 \leq \chi_{k-3}^2(\alpha)$ ならば、帰無仮説を棄却しない。

検定結果を表-4に示すが、板厚精度、降伏点ともに、有意水準1%に対しても帰無仮説は棄却され、今回対象としたいずれの確率分布にも従わないという結論を得た。なお、有意水準としては10%、5%、1%を用いることが多いが、このうち一番小さい値である1%としたのは、帰無仮説が採択される確率

表-5 非超過確率値  
(a) 板厚精度 (%)

非超過確率	観測値	正規分布	ワイブル分布
1.0%	-2.43	-2.65	-2.80
2.5%	-1.93	-2.20	-2.35
5.0%	-1.55	-1.82	-1.94
95.0%	2.09	2.16	2.07
97.5%	2.84	2.55	2.37
99.0%	3.98	2.99	2.72

(b) 降伏点/規格下限値

非超過確率	観測値	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布
1.0%	1.062	0.997	1.012	1.040
2.5%	1.083	1.033	1.043	1.058
5.0%	1.101	1.065	1.070	1.077
95.0%	1.423	1.395	1.399	1.406
97.5%	1.477	1.427	1.436	1.441
99.0%	1.543	1.463	1.479	1.484

を最も大きくする(なるべく仮定した分布形状とみなしてよいとの結論を得る)ためである。参考のため、測定値の頻度分布と各確率分布を比較して、図-10に示す。

### (3) 非超過確率値

$\chi^2$  検定では、今回検討対象とした正規分布、対数正規分布、ワイブル分布は、いずれも板厚精度や規格下限値で無次元化した降伏点の測定結果の確率分布には適合しないとの結論に至った。しかし、部分安全係数設計法においては、必ずしも確率量の分布形状を知る必要はなく、ある非超過確率に対する値が決定できれば十分である。そこで、強度側の特性値や安全係数を決定する際に用いられると考えられる非超過確率 1.0%、2.5%、5.0%、荷重側に対して同様に用いられる非超過確率 95.0%、97.5%、99.0% に対する板厚精度と降伏点の値を算定することとした。その際、観測値ばかりではなく、5.(2)で決定した各確率分布に対してもそれらの値を求め、比較することとした。

得られた結果を表-5に示す。降伏点については、一般に強度側(1.0%、2.5%、5.0%非超過確率値)の値のみが必要で、荷重側(95.0%、97.5%、99.0%非超過確率値)の値は必要ないものと考えられるが、ここでは参考のために示してある。

同表から、強度側の特性値として5%非超過確率値を採用する場合には、観測値より板厚の特性値は公称板厚の98.4%、降伏点の特性値は規格下限値の1.1倍程度となることがわかる。表に示した値は、

強度側では代数的に小さいほうが、荷重側では大きいほうが安全側の設計となるが、そうした観点から観測値と推定値を比較してみると、板厚精度については強度側の推定値は正規分布、ワイブル分布ともに安全側である。両分布を比較すると正規分布の方がより観測値に近い。また、抵抗側の推定値は、正規分布の95.0%非超過確率値を除いて、危険側である。降伏点に関しても、強度側の推定値はいずれの分布でも安全側であり、荷重側の推定値は危険側である。強度側で各分布の推定値を比較すると、ワイブル分布がもっとも観測値に近い。したがって、強度側の特性値を求めるにあたっては、安全側の推定として板厚については正規分布、降伏点についてはワイブル分布を仮定してもよいと思われる。

## 6. 結論

本研究では、2001年の1年間に鉄鋼5社から橋梁向けに出荷された構造用鋼板を対象に、板厚、降伏点、引張強さ、降伏比のデータを収集し、板厚に関して16万件余、強度に関して8万件弱のデータを得た。それらをもとに、板厚精度、降伏点・引張強さの規格下限値に対する比率および降伏比の平均値、標準偏差および頻度分布を求めた。また、強度の特性値と板厚との相関を調査するとともに、確率分布形に関する検討も行った。得られた結論をまとめると、以下ようになる。

### <板厚精度について>

- 1) 板厚精度の頻度分布は平均値をはさんでほぼ対称形状を示し、実績平均板厚は公称板厚より0.0~0.7%厚めである。
- 2) 板厚のマイナス側偏差はほぼ3%以内であり、道路橋示方書の5%以内という基準を十分満足している。

### <降伏点について>

- 1) 実績平均値は、規格下限値より20~30%高い。
- 2) 降伏点/規格下限値の頻度分布は、1.0以上を確保した上でピーク位置が低強度側に偏った形状を示しており、全鋼種でおおよそ1.0~1.6程度のばらつき範囲にある。
- 3) 降伏点/規格下限値に及ぼす板厚の影響は、板厚増大に伴い降伏点も規格下限値も低下するため軽減される。

### <引張強さについて>

- 1) 実績平均値は、規格値より10~15%高めである。
- 2) 標準偏差は降伏点の半分程度であり、引張強さ/規格下限値の頻度分布は1.0~1.3程度の範囲に

ある。

<降伏比について>

- 1) 規格強度の高い鋼種ほど降伏比が高く、また普通鋼より耐候性鋼の方が高い傾向にある。
- 2) 板厚増大に伴い降伏比は低下する傾向にある。

<確率分布関数との適合度について>

- 1) 板厚精度、降伏点の分布とともに、統計的には正規分布、対数正規分布、ワイブル分布のいずれにも有意水準1%で適合しない。
- 2) 強度側の特性値(1.0%, 2.5%, 5.0%非超過確率値)を求めるにあたっては、安全側の推定として板厚については正規分布、降伏点についてはワイブル分布を仮定してもよい。

謝辞：本研究は、(社)日本鋼構造協会に設置された鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会「鋼橋の安全性・使用性部会(主査：依田照彦 早稲田大学教授)」の活動の一環として実施したものであり、部会の委員各位には貴重なご意見をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成7年度報告書，(財)日本建築センター，(財)国土開発技術研究センター，1996.3.
- 2) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」平成8年度報告書，建設省建築研究所，(財)日本建築センター，(財)国土開発技術研究センター，1997.3.
- 3) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」総合報告書，建設省建築研究所，(財)日本建築センター，(財)国土開発技術研究センター，1998.3.
- 4) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」目標水準分科会報告書，建設省建築研究所，(財)国土開発技術研究センター，1998.3.
- 5) 建設省建築研究所：建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」社会機構分科会報告書，

- 建設省建築研究所，(財)日本建築センター，1998.3.
- 6) 土木学会：鋼構造物の性能照査型耐震設計法(報告書)，鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会，2000.5.
  - 7) 鋼橋技術研究会・鋼橋の性能設計分科会：報告書，2000.9.
  - 8) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，JSSCテクニカルレポートNo.49，2001.10.
  - 9) 前川宏一：新しい示方書一仕様規定から性能照査へ一改訂の動向・経緯，土木学会誌，Vol.85，pp.30-31，2000.4.
  - 10) 本城勇介：性能規定型設計・限界状態設計法の動向と杭基礎への適用，基礎工，2000.12.
  - 11) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，土木学会，2000.10.
  - 12) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，丸善，2002.3.
  - 13) 土木学会：複合構造物の性能照査指針(案)，丸善，2002.10.
  - 14) 土木学会：コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]，丸善，2002.12.
  - 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2002.3.
  - 16) 西村昭：ミルシート値とチェックテスト値との関係について，JSSC，Vol.5，No.38，1969.
  - 17) 西村昭：鋼材の機械的性質のばらつきについて，JSSC，Vol.5，No.48，1969.
  - 18) 西村昭：鋼材の機械的性質調査結果(昭和45年度)，JSSC，Vol.8，No.75，1972.3.
  - 19) 青木博文，村田耕司：構造用鋼材の降伏点，引張強さおよび降伏比に関する統計的調査，日本建築学会論文集，第335号，pp.157-166，1984.1.
  - 20) 青木博文，増田正之：素材引張試験結果による構造用鋼材の力学的性質に関する統計的調査，日本建築学会論文集，第358号，pp.94-102，1985.12.
  - 21) 福本昉士，伊藤義人：鋼構造部材の耐荷力評価システムのための数値データバンクの作成と利用，土木学会論文報告集，No.312，pp.59-72，1981.8.
  - 22) 倉西茂編：鋼構造物の終局強度と設計，鋼構造シリーズ6，土木学会，pp.46-47，1994.7.
  - 23) 鈴木博之：溶接構造用圧延鋼材の機械的性質の実績調査，JSSC，No.18，pp.23-28，1995.
  - 24) Kottogoda, N. T. and Rosso, R.: *Statistics, Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineers*, McGraw-Hill, 1997.

(2003.4.14 受付)

## A STATISTICAL SURVEY ON THICKNESS AND MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL PLATES FOR BRIDGES

Satoshi NARA, Shozo NAKAMURA, Hiromichi YASUNAMI,  
Fumimaru KAWABATA and Toyooki SHIWAKU

The data on thickness and mechanical properties of structural steel plates for bridges distributed from domestic five steel making companies in 2001 were collected, and about 160,000 and 80,000 samples were acquired, respectively. The mechanical properties include yield point, tensile strength and yield-tensile ratio. The mean value, standard deviation and histogram of samples were obtained for every steel grades. The correlation between mechanical properties and thickness was examined. The goodness-of-fit tests of thickness and yield point to typical probability functions were carried out. This paper presents the outline of the survey and the discussion on statistical characteristics of the data.