

第2章 熱と鋼材の関係

2.1 鋼橋に使われる鋼材の変遷

既設橋の損傷の補修では、古い年代の鋼材を対象に熱間加工や線状加熱を行うことも考えられるため、補修計画にあたってはその当時の鋼材の特徴を知っておくべきである。そこで、鋼材の歴史的変遷、規格の変遷及び鋼道路橋の技術基準の変遷を以下に示す。

2.1.1 鋼材の歴史的変遷

世界最古の鉄製橋梁は、1779年に建設されたイギリスのアイアンブリッジと言われている。当時は、構造用材料として鋳鉄や錬鉄が多く使用されており^{2.1)}アイアンブリッジでも鋳鉄が使用されていた。1855年にベッセマー法（転炉による製鋼）が開発され、1877年にはトーマス法（内壁に塩基性の耐火材を用いた転炉による製鋼）の開発により脱リンが可能となったことから、鉄鋼の生産量が飛躍的に伸びた^{2.2)}。このような背景のもと、1874年に最初の鋼橋であるイーズ橋が建設された^{2.2)}。わが国においては、1868年（明治元年）に錬鉄を使用した桁を輸入し、日本で最初の鉄製橋梁である長崎のくろがね橋の他、吉田橋、高麗橋、新町橋などが建設された^{2.1)}。わが国初の国産化の鉄製橋梁は、1878年（明治11年）に建設された八幡橋であり、アーチ材は鋳鉄製、引張材は錬鉄製の鋳錬混合である^{2.1)}。日本最古の鋳鉄を使用した橋梁は、1885年（明治18年）に建設された神子畑鋳鉄橋であり、同橋は、同時期に建設された羽淵鋳鉄橋とともに現在もその姿を留めている^{2.1)}。圧延鋼を使用したわが国初の鋼橋は、1888年（明治21年）に建設された天竜川橋梁（鉄道橋）とされ、道路橋では旧永代橋が1897年（明治30年）に建設された^{2.1)}。

鋳鉄は、鉄と炭素を主成分とし、一般に2.14%以上の炭素とその他の成分を含むものを呼ぶ。鋳鉄の種類として、ねずみ鋳鉄、球状黒鉛鋳鉄、可鍛鋳鉄、合金鋳鉄、白鋳鉄などがある。鋳鉄は、主として圧縮力が作用するアーチ構造で広く用いられてきたが、材質が脆弱であることから引張力の作用する一般的な橋梁用材料としては不適當であった^{2.1)}。

錬鉄とは、パドル法という精錬法（溶融鋳鉄の炉中攪拌による精錬法）により製造された、炭素（C）、硫黄（S）、リン（P）等の含有量が少ない鉄のことである。鋳鉄に比べ、構造用材料として重要なじん性が改善された。初期の錬鉄は不純物が多く純度の低いものであったが、反射炉の構造と規模が改良されて、純度が高い錬鉄が製造されるようになった^{2.1)}。

鋼は、0.2%程度の炭素と合金元素を添加した合金で、錬鉄に比べて粘り強い。鋳鉄から錬鉄へと進歩を遂げた構造用材料がさらに鋼へと技術革新が進む過程には、ベッセマーによる転炉法の発明に代表される製鋼技術の進歩があり、近年、LD転炉（酸素吹上転炉）、溶銑予備処理技術、連続鑄造技術などにより、不純物が少なく、じん性が高い鋼が製造されるようになった。図-2.1.1に鋼材の製鋼法の変遷を示す。

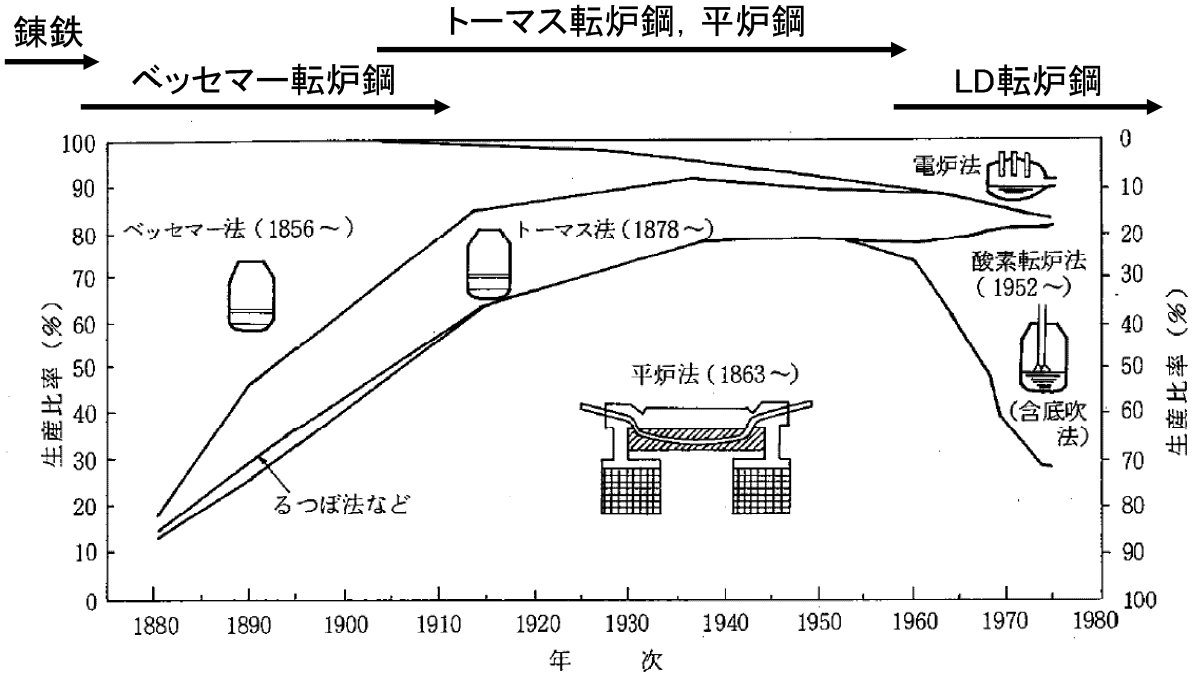


図-2.1.1 世界の鋼の総生産高に対する製鋼法別比率の時代による変化^{2.3)}

2.1.2 鋼材の規格の変遷

わが国における鋼材の規格化は、1925年(大正14年)に制定された日本標準規格 JES (Japanese Engineering Standard) が始まりである^{2.2)}。それ以前は、前述したように鑄鉄や鍊鉄、1800年代後半から鋼材が使用されたが、規格化はされていない。1952年(昭和27年)に JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」(SS材)及び JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(SM材)が制定され、SM材には Mn/C の比を 2.5 以上として溶接性を重視した SM41W が追加された^{2.2)}。その後、SM材は化学成分や衝撃値が規定され、1970年代には連続鑄造技術や溶銑予備処理技術の実用化、1980年代には熱加工制御技術(TMCP)の導入など製鋼技術の躍進により、じん性や板厚方向特性(板厚方向に引張力を受ける場合の耐ラメラテア性能)が向上した。これらのことから、鋼材を次の3つの時代に区分することができる。

- 第1期 1952年以前： JIS 制定前
- 第2期 1952年～1970年代： JIS 制定後
- 第3期 1980年代以降： 製鋼技術の躍進により高純化

なお、文献 2.2) では、鉄鋼の溶接性を基準にした材質面から次の3つの時代に区分できるとしている。

- 第1世代 1952年以前： 高C・低Mn鋼が使用され、溶接性が劣る。
- 第2世代 1952年から1970年代： Mn/C が 2.5 以上となり、溶接性が改善された。
- 第3世代 1980年代以降： 高純化が進み、板厚方向特性(耐ラメラテア性能)が向上した。

(1) JIS 制定前の鋼材 (第 1 期 1952 年以前)

第 1 期 (1952 年以前) の JIS 制定前の鋼材 (ここでは、鋳鉄、錬鉄等も含めて鋼材という) を使用した橋梁は数多く健在しているが、JIS 制定前の鋼材の特性について記述されている資料は少ない。損傷の補修にあたっては、その当時の鋼材における熱間加工や線状加熱のような熱履歴を受けた場合の鋼材の特性への影響について把握して補修計画を行う必要がある。文献 2.2) に、鉄道橋で使用した JIS 制定前の鋼材の性質について整理されおり、以下に引用して示す。

これより、文献 2.2) より引用 図表名、文献名はカッコ内が原文

鋼材の規格制定は、1925 年 (大正 14 年) の JIS であるが、これ以前の鋼材について、橋梁に主として使用したものを年代別に区分すると以下のようなになる。

- ①1770～1850 年：鋳鉄橋 (鉄道橋では製作されていない)
- ②1850～1880 年：錬鉄橋
- ③1880～1896 年：錬鉄・鋼併用橋
- ④1895～1910 年：鋼橋 (主としてベッセマー鋼)
- ⑤1910 年以降：鋼橋

1895 年以降は鋼材が用いられているが、1910 年頃までは主としてベッセマー鋼が使用されており、それ以降は現在とほぼ同材質と考えられる鋼材が使用されている。JIS 制定前の鋼材の材質について記述されている資料は極めて少ない。特に、当時の資料で現存しているものはほぼ皆無の状態である。そこで、当時製作された橋梁から鋼材を採取し、その成分等を調査した結果が報告されている文献を参考に、JIS 制定前の鋼材の性質について記述することとする。ここで紹介する鋼材は、1920 年以前に製作され、60 年以上供用された鋼鉄道橋で撤去する必要が生じた橋梁から採取したものである。(表-2.2) 表-2.1.1 に採取した鋼材の化学成分の分析結果について、橋梁の製作年度や採取位置等を含めて示す。この表より以下の傾向が認められる。

- ・1900 年以前の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が A 及び B) は、ほとんどが C 量が 0.005% 以下、Mn が 0.02～0.06% と異常に低いのに対し、Si が 0.10～0.16%、P が 0.38～0.49% と異常に多い。これらは、成分的にも、製作時期からも錬鉄であると判断できる。
- ・1910 年頃の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が C 及び D) では、現行の溶接構造用鋼材と比較して、Si が非常に少なく、また P、S が非常に多い。そのため、これらの鋼材については溶接は避けるのがよいと考えられる。
- ・1915 年以降の鋼材 ((表-2.2) 表-2.1.1 の試験片 No. の頭文字が E 及び F) については、1910 年以前のものと比較すると P、S が少ない。成分から判断すると溶接も可能であると考えられる。

また、(表-2.2) 表-2.1.1 の右欄には、炭素当量 C_{eq} 及び溶接割れ感受性組成 P_{CM} を示している。ただし、算定に必要な全成分を調査していないものが多いため、参考値として載せている (表中の斜体)。1920 年

頃の鋼材でも C_{eq} 、 P_{CM} ともに高い値を示しており、これらから判断すると溶接には不向きと考えられる。なお、ここで注意が必要なのが、 C_{eq} 、 P_{CM} の算定に P、S が含まれないことである。JES 制定前の鋼材では P、S が多く含まれているものがあり、溶接性の判断指標に C_{eq} 、 P_{CM} のみを用いることは不適切であると考えられる。さらに、これらの鋼材を用いて引張試験や衝撃試験も実施しており、結果を(表-2.3)表-2.1.2、(表-2.4)表-2.1.3 に示す。これらの表より認められる傾向を以下に列挙する。

- 1900 年以前の鋼材は、現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の引張強度 400MPa より低い値となっており、また伸びも異常に小さい。
- 1907 年の鋼材については、現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の規格をわずかに下回るものはあるものの、ほぼ満足している。
- 1910 年以降の鋼材については、ほぼ現行の $400\text{N}/\text{mm}^2$ 材の規格を満足している。
- 衝撃値に関しては全般的にかなり小さく、試験温度 20°C においても現行の規定を満足していないものが多い。

なお、鉄道では、これらの調査結果を基に、(文献 5)) 文献 2.4) に、(表-2.5) 表-2.1.4 に示す古い鋼材に対する加工上の注意点が記述されている。

(表-2.2)表-2.1.1 規格制定前の鋼材の成分分析結果の例(2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Ti	B	Nb	O	N	H	C _{eq} *3	P _{CM} *4
A1	1866年頃 (103年程度)	上落プレート ガーダー	主桁(腹板)	0.005	0.16	0.03	0.493	0.025					0.04								0.017	0.014
B1			主桁(腹板)	0.162	0.01	0.52	0.057	0.104					0.03								0.249	0.190
B2	1897年頃 (92年程度)	上落プレート ガーダー	主桁(補剛材山形鋼)	0.005	0.11	0.06	0.424	0.025					0.05								0.020	0.014
B3			主桁(支材山形鋼)	0.004	0.10	0.02	0.378	0.073					0.05								0.012	0.011
C1			上弦材(薄形鋼)	0.140	0.015	0.42	0.032	0.053				0.008						0.0161			0.211	0.162
C2	1907年 (82年)	下路トラス	上弦材(上フランジ板)	0.310	0.010	0.50	0.024	0.030				0.006						0.0102			0.394	0.335
C3			斜材(アイバー)	0.260	0.021	0.51	0.009	0.026				0.017						0.0106			0.346	0.286
C4			縦桁(下フランジ山形鋼)	0.220	0.005	0.57	0.013	0.032				0.002						0.0104			0.315	0.249
D1			縦桁(腹板)	0.095	0.007	0.46	0.034	0.087				0.001						0.0287			0.172	0.118
D2	1907年 (82年)	上落プレート ガーダー	横桁(腹板)	0.26	0.009	0.53	0.028	0.066				0.004						0.0092			0.349	0.287
D3			主桁(腹板)	0.095	0.007	0.46	0.034	0.087				0.001						0.0287			0.172	0.118
E1			主桁(腹板)	0.22	0.04	0.43	0.006	0.036													0.293	0.243
E2			主桁(補剛材山形鋼)	0.20	0.04	0.54	0.009	0.036													0.292	0.228
E3	1917年 (82年)	上落プレート ガーダー	主桁(フランジカバプレート)	0.19	0.04	0.55	0.038	0.041													0.283	0.219
E4			"	0.25	0.02	0.38	0.008	0.030													0.314	0.270
E5			"	0.16	0.02	0.62	0.035	0.036													0.264	0.192
F1			縦桁(腹板)	0.25	0.02	0.38	0.008	0.030													0.314	0.270
F2			縦桁(フランジ山形鋼)	0.24	0.017	0.50	0.006	0.065	0.006	0.007	<0.01	0.005	0.007	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.0077	0.0038	0.0004	0.326	0.266
F3			" [溶金*1]	0.10	0.55	1.00	0.005	0.010	0.016	0.018	<0.01	0.001	0.010	<0.005	0.019	0.0002	<0.003	0.0103		0.294	0.171	
F4			"	0.28	0.046	0.50	0.004	0.037	0.005	0.012	<0.01	0.007	0.011	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.010	0.0108	0.0006	0.368	0.308
F5	1919年 (70年)	上落トラス	" [溶金*1]	0.12	0.52	0.95	0.006	0.008	0.014	0.018	<0.01	0.001	0.011	<0.005	0.020	0.0002	<0.003		0.0054		0.304	0.188
F6			"	0.27	0.046	0.49	0.003	0.035	0.005	0.013	<0.01	0.008	0.011	<0.005	<0.003	<0.0001	<0.003	0.010	0.0004		0.356	0.297
F7			"	0.16	0.02	0.62	0.035	0.036													0.264	0.192

注) *1 溶金：溶接金属

*2 表中の空欄は測定結果なし。

*3 炭素当量：C_{eq}=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

*4 溶接割れ感受性指数：P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

*5 C_{eq}、P_{CM}の数値の斜体は、算定に用いる成分の分析結果がないため参考値を示す。

(表-2.3)表-2.1.2 規格制定前の鋼材の機械的性質の例 2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	曲げ 試験	備考
A1	1886年頃 (103年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	-	310	0.8	-	
B1	1897年頃 (92年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	317	445	24.8	-	
B2			主桁 (補剛材山形鋼)	276	350	5.3	-	
B3			主桁 (支材山形鋼)	224	356	-	-	
C1	1907年 (82年)	下路トラス	上弦材 (溝形鋼)	254	393	30.7	良	
C2			上弦材 (上フランジ板)	257	450	27.8	良	
C3			斜材 (アイバー)	287	461	26.6	良	
C4			縦桁 (下フランジ山形鋼)	259	403	28.4	良	
C5			縦桁 (腹板)	265	464	22.3	良	
C6			横桁 (腹板)	273	427	30.2	良	
D1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	261	373	29.2	良	
D2			主桁 (補剛材山形鋼)	294	460	27.3	良	
E1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (ソールプレート板)	215	359	32.5	良	
F1	1917年 (72年)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	290	447	27.0	-	
F2				297	467	4.3	-	孔明き材
F3				310	480	3.0	-	新規孔明き材
F4			主桁 (フランジ山形鋼)	263	427	29.3	-	
F5				327	483	4.0	-	孔明き材
F6				330	463	3.0	-	新規孔明き材
G1	1919年 (70年)	上路トラス	縦桁 (腹板)	250	430	40.3	-	
G2			縦桁 (フランジ山形鋼)	297	483	25.7	-	

(表-2.4)表-2.1.3 規格制定前の鋼材の衝撃値の例 2.2)

No.	制作時期 (経年)	構造形式	鋼材の採取位置	ノッチ位置	方向	試験温度 (°C) *1							vTrs*2 (°C)	備考		
						-40	-20	0	20	40	60	80			100	
A1	1886年頃 (103年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	母材			3.9	4.9	5.9						7.5mmサブサイズ*3	
B1	1897年頃 (92年程度)	上路プレート ガーダー	主桁 (腹板)	"			8.8	18.6	48.1						"	
B2			"	"			9.8	26.5	57.9						"	
B3			主桁 (支材山形鋼)	"			6.9	12.8	19.6							"
C1	1907年 (82年)	下路トラス	斜材 (アイバー)	アイバー短縮部		3.9	3.9									
C2			"	母材		2.0	3.9									
D1	1907年 (82年)	上路プレート ガーダー	主桁 (補剛材山形鋼)	"		2.0	3.9	8.8							7.5mmサブサイズ*3	
D2			主桁 (腹板)	"		2.9	9.8	34.3								"
E1	1919年 (70年)	上路トラス	縦桁 (フランジ山形鋼)	"	L		5.9		26.5	54.0	85.3	87.3	96.1	30.4		
E2			"	"	C		3.9		17.7	27.5	32.4	29.4	30.4	27.0		
E3			"	Bond		8.8	16.7	34.3	40.2		52.0				0.0	
E4			"	Bondより1mm		12.8	14.7	22.6	32.4		38.3				-1.8	
E5			"	Bondより3mm		7.8	8.8		24.5		27.5	35.3			4.4	
E6			"	Bondより5mm		3.9	6.9		17.7		31.4	37.3	36.3		22.0	
E7			"	母材	L		4.9		14.7	24.5	67.7	75.5	85.3		44.8	
E8			"	"	C		3.9		11.8	20.6	39.2	44.1	44.1		50.4	
E9			"	Bond		16.7	18.6		48.1		65.7	68.7			7.0	
E10			"	Bondより1mm		13.7	18.6		33.4	59.8	62.8				17.0	
E11			"	Bondより3mm		6.9	15.7		42.2		51.0	54.0			5.0	
E12			"	Bondより5mm		3.9	8.8		16.7		44.1	45.1	47.1	47.2		

注) *1 吸収エネルギーの単位は[J]。文献2), 3) の値を 1 [kgf・m]=9.81[J]として換算している。

*2 vTrs : 50%破面遷移温度

*3 サブサイズで試験した結果については、断面積比により標準サイズの吸収エネルギーに換算している。

(表-2.5) 表-2.1.4 古い鋼材に対する加工上の注意点^{2.4)}

鋼材名		制作時期	代表的な適用橋梁形式	使用上の注意点	判別方法
主として錬鉄		1883年程度以前 (明治26年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・作錬式 ・作30年式桁の補剛桁 ・1886年製のポーナル型、ボーストリング型ピントラスのアイバーと床組の一部に使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質が不均一で層状剥離を起こすこともある。 ・強度は現行の41キロ材より低い(引張強度:70~80%、伸び:数分の1程度、靱性;非常にもろいものが多い) ・P、Sが多いものもあり、溶接はさけるべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・制作年代からの推定
主としてベッセマー鋼		1909年以前の鋼 (明治42年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・クーパー型のピントラス ・日鉄型 ・北陸式 ・山陽基本型 ・山陽補助型 ・達1715、達10のIビーム桁 ・鉄作乙1075 ・帝鉄880 ・作35(鉄作7) 	<ul style="list-style-type: none"> ・強度は現行の鋼材と変わらないものもある。しかし、特にベッセマー鋼はばらつきが大きく、錬鉄と同程度と考えれば安心できる。 ・Siが少ないため、溶接性は劣るので、溶接は避けた方がよい。 ・P、S、Oの含有率が高いため、靱性は劣る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・火花試験 ・成分試験 ・引張試験 ・制作年代からの推定
鋼	S39	1926年~1928年以前 (大正15年~昭和3年以前)	<ul style="list-style-type: none"> ・Iビーム桁 達95、達875 ・上路鉸桁 達680、達540 達425、達94、 研甲355 ・上路鉸桁 達123、達16、 達74 	<ul style="list-style-type: none"> ・材質的には不均一のものが多い(S、Cu、Oが多く、Siが少ない)。 ・強度的には規格値は保証されている。 ・しかし、靱性は低く割れやすい。 ・溶接は可能であるが、その方法は検討の余地もある。 ・老朽化した母材は、溶接部よりも靱性は劣っているし、一旦亀裂ができる大きな割れに結びつきやすい。 	制作年代がある程度判明すれば <ul style="list-style-type: none"> ・成分試験 ・母材のCOD試験もしくは衝撃試験で十分
	SS39	1928年以降 (昭和3年以降)	「鋼鉄道橋設計示方書(メートル)」(昭和3年)によった橋梁 達344、達827 達1084、達407		
	SS41	1940年以降 (昭和15年以降) 1951年以降 (昭和26年以降)	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼鉄道橋設計示方書(メートル)(昭和3年) ・鋼鉄道橋設計示方書(改訂)(昭和31年9月) ・高張力鋼(案)(昭和34年) ・溶接桁(案)(昭和35年) によった橋梁	<ul style="list-style-type: none"> ・ほぼ現行の鋼材と同じ性質である。ただし、腐食が著しく進行しているものは、腐食に対する配慮が必要となる。 	
SM41	1970年以降 (昭和45年以降)	「建造物設計標準(制定)」(昭和45年3月)によった橋梁			

ここまで引用

1925年に制定されたJES第20号「構造（橋梁、建築その他）用圧延鋼材」の概要を表-2.1.5に示す。鋼板、形鋼、平鋼の引張強さは39~47kg/mm²とされ、その他、伸びと曲げ性能、化学成分として不純物であるPとSが規定されている。橋梁には第1種を用いることとされており、第1種のSは0.06%以下とされ、現代の鋼材に比べ不純物が多いことがわかる。なお、同時にJES第21号「造船用圧延鋼材」なども規格化され、これらの規格を決定する際の方針は、工場で作成する鋼材の試験値を調査し、その約90%が合格する水準で決められている^{2.5)}。その趣旨は、製造業者に対し、鋼材品質の改善を促すと同時にその生産能力をあまり低下させないこともねらったものといわれている^{2.5)}。規格の内容は主に英国にならい、特に造船材料はロイド規格に合致するように努められている^{2.5)}。

表-2.1.5 JES第20号「構造（橋梁、建築その他）用圧延鋼材」（1925年）の概要^{2.5)}

種別		抗張力 kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ	化学成分	備考
鋼板・形鋼・平鋼	第1種	39-47	1号	t \geq 9 : \geq 21 t<9 : \geq 17	常温曲げ : 180° 1.5t	第1種 P, S \leq 0.06%	第1種 : 酸性または塩基性平炉で製造
	第2種						
棒鋼	第1種	39-47	2号 3号	\geq 21 \geq 25	焼入れ曲げ : 650°C加熱、 約28°C急冷材 180° 1.5t	第2種 平炉 : P \leq 0.08% S \leq 0.06% 転炉 : P \leq 0.12% S \leq 0.06%	第2種 : 酸性または塩基性平炉もしくは転炉で製造
	第2種						
鉄筋棒鋼	第1種	39-47	2号 3号	\geq 21 \geq 25	180° 密着		
	第2種						
鋸材	第1種	34-41	2号 3号	\geq 27 \geq 34			

JES第20号は1938年(昭和13年)に全面改定され、JES第430号「一般構造用圧延鋼材」が制定され、SS00、SS34、SS41、SS50が規定された。SS00は、当時、無規格品として取り扱われていた雑用の鋼材を規格化したものである^{2.5)}。JES第430号「一般構造用圧延鋼材」の概要を表-2.1.6に示す。JES第20号の鋼板と比べると、転炉での不純物であるPの低減が図られている。

戦時中は、審議や手続きの簡素化、生産の拡充など目的として臨時的な規格として臨JESが制定された。一般構造用圧延鋼材は、1942年(昭和17年)に臨JES第280号が規格化され、1944年(昭和19年)に改定されている^{2.5)}。JES第430号に比べて、PとSは0.010%緩められ、引張強さの範囲が広がり、伸びは1%減り、曲げ半径は0.5倍緩くなっている^{2.5)}。

表-2.1.6 JES第430号「一般構造用圧延鋼材」（1938年）の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験			曲げ試験		化学成分 %				
		引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉		
							P	S	P	S	
鋼板 形鋼 平鋼	普通種	SS00	34-50	1号	t \geq 9 : \geq 18 t<9 : \geq 15	180°	1.5t	—	—	—	—
	第1種	SS34	34-41	1号	t \geq 9 : \geq 20 t<9 : \geq 17	180°	密着	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第2種	SS41	41-50	1号	t \geq 9 : \geq 20 t<9 : \geq 17	180°	1.5t				
棒鋼	普通種	SS00	34-50	2号 3号	\geq 18 \geq 21	180°	1.5径	—	—	—	—
	第1種	SS34	34-41	2号 3号	\geq 25 \geq 30	180°	密着				
	第2種	SS41	41-50	2号 3号	\geq 20 \geq 24	180°	1.5径	\leq 0.060	\leq 0.060	\leq 0.080	\leq 0.060
	第3種	SS50	50-60	2号 3号	\geq 18 \geq 21	180°	2.0径				

戦後 1948 年(昭和 23 年)に改定された JES 金属 3101 「一般構造用圧延鋼材」では、臨 JES 第 280 号が戦時規格のため、国際性を加味した JES 第 430 号と同様の規格に復元され、引張強さの規定範囲が広い SS00 が廃止された^{2.5)}。JES 金属 3101 「一般構造用圧延鋼材」の概要を表-2.1.7 に示す。

表-2.1.7 JES 金属 3101 「一般構造用圧延鋼材」(1948 年)の概要^{2.5)}

種別		記号	引張試験			曲げ試験		化学成分 %			
			引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉	
								P	S	P	S
鋼板 形鋼 平鋼	第 1 種	SS34	34-41	1 号	t \geq 9 : \geq 25 t $<$ 9 : \geq 21	180°	密着	\leq	\leq	\leq	\leq
	第 2 種	SS41	41-50	1 号	t \geq 9 : \geq 20 t $<$ 9 : \geq 17	180°	1.5t	0.060	0.060	0.080	0.060
棒鋼	第 1 種	SS34	34-41	2 号 3 号	\geq 25 \geq 30	180°	密着	\leq	\leq	\leq	\leq
	第 2 種	SS41	41-50	2 号 3 号	\geq 20 \geq 24	180°	1.5 径	0.060	0.060	0.080	0.060
	第 3 種	SS50	50-60	2 号 3 号	\geq 18 \geq 21	180°	1.5 径				

(2) JIS 制定後の鋼材 (第 2 期 1952 年~1970 年代)

工業標準化法の施行により、日本工業規格 JIS に移行する作業が 1949 年(昭和 24 年)から開始され^{2.5)}、1952 年(昭和 27 年)に JIS G 3101 「一般構造用圧延鋼材」(SS 材)が制定された。JIS G 3101 の概要を表-2.1.8 に示す。SS41 以上には、建築基準法の関係で降伏点の下限値が規定されるとともに、SS50 が新たに規定された(棒鋼は SS39 及び SS49 も規定)。

一方、当時、造船関係は海事協会鋼船規則と JIS を一致させたい意向があったこと、土木や建築関係では重量軽減の趣旨からリベット接合やボルト接合などの代わりに溶接接合が大幅に採用される段階にあったこともあり、溶接性の保証された材料の規格化が要望された^{2.5)}。このような背景のもと、SS 材とは別に、同じく 1952 年に JIS G 3106 「溶接構造用圧延鋼材」(SM 材)が制定された。JIS G 3106 の概要を表-2.1.9 に示す。SM 材は SS 材よりも P と S を低く規定しており、溶接性を考慮した SM41W では、ロイド船級規格やアメリカ船級規格と同様に Mn/C が 2.5 以上の成分規定が設けられた。

また、当時は、ベッセマー転炉やトーマス転炉、及び平炉により製造されていたが、1950 年後半から LD 転炉(酸素吹上転炉)が導入され、これにより P と S の低減化も進み、1959 年(昭和 34 年)の JIS 改正で、C、Si、Mn、P、S の成分規定、衝撃値の規定が設けられ、ほぼ現在の規格内容となった(表-2.1.10、表-2.1.11)。その後も高純化が進められ、1962 年の JIS 改正では、SS 材の P と S が 0.05%以下に、SM41 の S が 0.04%に引き下げられた。1970 年代には連続鑄造技術や溶銑予備処理技術が実用化された。

表-2.1.8 JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」(1952年)の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験				曲げ		化学成分 %				
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ 半径	平炉または 電気炉		転炉		
								P	S	P	S	
鋼板 形鋼 平鋼	第1種	SS34	—	34-41	1号	$t \geq 9 : \geq 25$ $t < 9 : \geq 21$	180°	密着	≤ 0.060	≤ 0.060	≤ 0.080	≤ 0.060
	第2種	SS41	≥ 23	41-50	1号	$t \geq 9 : \geq 20$ $t < 9 : \geq 17$		1.5t				
	第3種	SS50	≥ 28	50-60	1号	$t \geq 9 : \geq 18$ $t < 9 : \geq 15$		2.0t				
棒鋼	第1種	SS34	—	34-41	2号 3号	≥ 25 ≥ 30	180°	密着	≤ 0.060	≤ 0.060	≤ 0.080	≤ 0.060
	第2種	SS41	≥ 23	41-50	2号 3号	≥ 20 ≥ 24		1.5径				
	第3種	SS50	≥ 28	50-60	2号 3号	≥ 18 ≥ 21		2.0径				
	第4種	SS39	≥ 24	39-53	2号 3号	≥ 20 ≥ 24		1.5径				
	第5種	SS49	≥ 30	49-63	2号 3号	≥ 16 ≥ 20		2.0径				

表-2.1.9 JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(1952年)の概要^{2.5)}

種別	記号	引張試験				曲げ		化学成分 %		
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ半径	Mn/C	P	S
鋼板 形鋼 平鋼	SM41	≥ 23	41-50	特1号	≥ 21	180°	$t \leq 19 : 0.5t$ $19 < t \leq 32 : 1.0t$ $t > 32 : 1.5t$	—	≤ 0.040	≤ 0.050
鋼板	SM41W							≥ 2.5	≤ 0.040	≤ 0.050

表-2.1.10 JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(1959年)の概要^{2.5)}

鋼板の化学成分と衝撃値

種別	記号	板厚 mm	化学成分 %					衝撃値 kgm/cm ²	
			C	Si	Mn	P	S		
1種	A	SM41A	≤ 100	$t \leq 50 : \leq 0.23$ $50 < t \leq 100 : \leq 0.25$	—	$\geq 2.5 \times C$	≤ 0.040	≤ 0.050	—
	B	SM41B	≤ 50	≤ 0.20	≤ 0.35	$0.60 \sim 1.20$	≤ 0.040	≤ 0.050	$19 < t \leq 25 : \geq 3.5^*$
	C	SM41C	≤ 38	≤ 0.18	≤ 0.35	≤ 1.40	≤ 0.040	≤ 0.040	$12 < t \leq 38 : \geq 6.0^*$
2種	A	SM50A	≤ 50	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.50	≤ 0.040	≤ 0.040	—
	B	SM50B	≤ 38	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.50	≤ 0.040	≤ 0.040	$16 < t \leq 25 : \geq 3.5^*$
	C	SM50C	≤ 20	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.50	≤ 0.040	≤ 0.040	$12 < t \leq 20 : \geq 6.0$

* : 板厚 25mm を超えるものは協定

表-2.1.11 JIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」(1959年)の概要^{2.5)}

鋼板の機械的性質 (引張試験、曲げ試験)

種別	板厚 mm	引張試験				曲げ試験	
		降伏点 kg/mm ²	引張強さ σ_B kg/mm ²	試験片	伸び %	曲げ 角度	曲げ半径
1種	t < 5	≥23 ただし板厚 32mm 以上 ≥ $\sigma_B/2$	41-50	5号	≥23	180°	t ≤ 19 : 0.5t 19 < t ≤ 32 : 1.0t t > 32 : 1.5t
	1号			≥19			
	1号			≥21			
	4号			≥24			
2種	t < 5	≥32	50-60	5号	≥22	180°	t ≤ 19 : 1.0t 19 < t ≤ 32 : 1.5t t > 32 : 2.0t
	1号			≥18			
	1号			≥20			
	4号			≥23			

連続製造技術が導入される以前は、精練を終了した溶鋼を鋳型に鋳込んで鋼塊(インゴット)とし、分塊圧延によりスラブとしてから鋼板を圧延する造塊法である。造塊法では、脱酸の程度により数種類の鋼塊があり、次のような特徴を持つ。

① リムド鋼

溶鋼を鋳型へ注入すると周縁から凝固が進むが、低炭素鋼では凝固前面で C と O が反応して CO ガスが発生し、鋼塊の縁に気泡が残る。鋼塊上部には、ひけ(パイプ)が発生しないので歩留まりがよく、無駄が少ない。気泡は還元性のガスのため内面が酸化せず、圧延で潰れて圧着するので欠陥としては残らないが、鋼塊中心部の非金属介在物が多い。この非金属介在物が圧延後、層状になることがあり、溶接用鋼材としては適していない。

② キルド鋼

溶鋼へ Si、Al、Mn、Ti、Zr などの脱酸剤を添加し、リミングアクション(沸騰攪拌運動)を鎮静化した鋼で、リムド鋼と比較して偏析や非金属介在物は少ないが、鋼塊上部に大きなひけを生じるため歩留まりは悪い。

③ セミキルド鋼

脱酸の程度をリムド鋼とキルド鋼の中間程度とし、適度にリミングアクションを抑えて歩留まりを向上させた鋼である。

造塊法では、S の偏析や MnS などの非金属介在物が起因するラミネーション(鋼板の圧延方向に平行に薄く層状に存在する鋼板の内部欠陥)が生じることがあった。特に、リベット構造から溶接構造となつてから、ラメラテア(板厚方向に生じた拘束応力によって鋼板表面に平行な方向に進展したはく離状の割れ)やサルファ割れ(硫黄偏析が層状に圧延されたサルファバンドから溶接金属内に柱状晶境界に沿って生じる粒界割れ)などの溶接割れが生じることもあり、高純化が迫られていた。このような背景のもと、溶銑予備処理技術が実用化され、低 S 鋼が普及した。また、連続製造技術により非金属介在物は低減・微小化されていった。

1950年代、鋼材の表面に保護性さび(緻密なさび)を形成し、さびの進展を抑制する耐候性鋼材の開発が本格化した。橋梁への適用は、耐候性鋼材に塗装を施すと塗装が長持ちするとの考え方により、塗装橋梁に耐候性鋼材が用いられていた。1967年に耐候性鋼材を塗装しない裸仕様で初めて適用され、

1969年にJIS G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」が制定された。その後、初期建設費の縮減と維持管理コスト軽減への期待から耐候性鋼材の橋梁への適用は増え、現在、鋼橋の中に占める耐候性鋼橋梁の重量割合は約20%となっている^{2.1)}。

(3) 最近の鋼材（第3期 1980年代以降）

1980年頃、LD転炉に完全に移行され、連続鋳造技術も普及したことにより、さらなる高純化が進められ、衝撃値や板厚方向特性が向上した。これにより、1988年（昭和63年）のJIS G 3106「溶接構造用圧延鋼材」（SM材）の改正では、PとSが0.04%以下から0.035%以下に引き下げられ、現在の安定した品質レベルとなった。また、熱加工制御技術（TMCP）の導入や、1992年にはJIS G 3199「鋼板及び平鋼の厚さ方向特性」（耐ラメラテア鋼）が制定され、現在までに多くの高性能鋼が開発・実用化されている。製鋼技術の推移とJISにおけるSS材及びSM材のS量の推移を図-2.1.2に、600N/mm²級鋼材のシャルピー吸収エネルギーの年代変化を図-2.1.3に示す。これらから、LD転炉への移行や連続鋳造の比率が高くなった1980年頃からシャルピー吸収エネルギーが向上しているのがわかる。

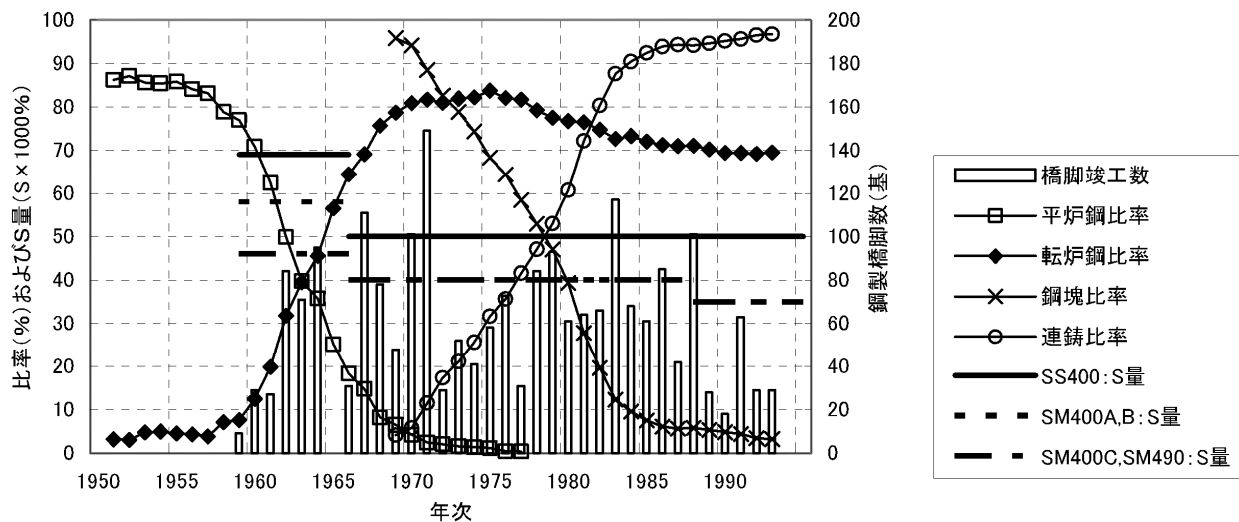
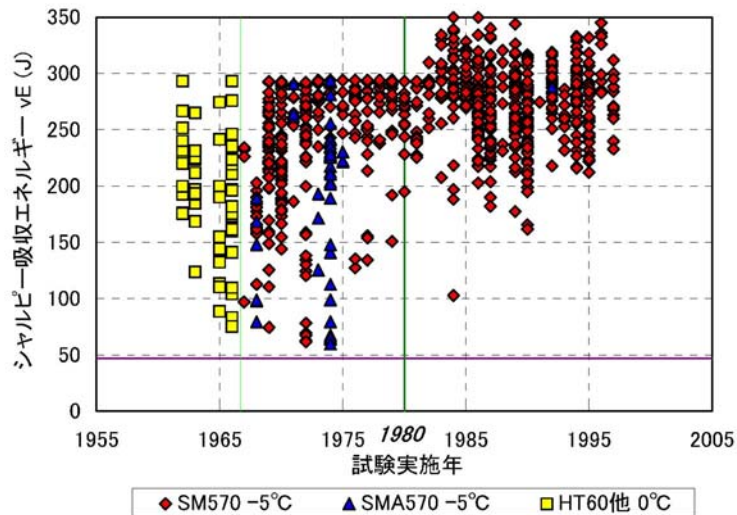


図-2.1.2 炉別生産率・造塊連鋳比率及びJIS規格におけるS量の推移と鋼製橋脚数^{2.6)}



※1980年頃まで300Jを超えるものがないのは、当時の試験機的能力上の問題のため

図-2.1.3 シャルピー吸収エネルギーの年代変化（600N/mm²級鋼材）^{2.7)}

現在の厚鋼板の製造プロセスの例を図-2.1.4に示す。鉄鉱石から酸素を除去する還元材としてコークスが使われ、鉄鉱石をコークスとともに高炉へ入れ、熱風でコークスを燃焼させる。燃焼で生じた一酸化炭素が鉄鉱石中の酸素と結合して鉄鉱石を還元するとともに、鉄に炭素が入り融点を下げることになる。熔融鉄は炉底に沈み、高炉の底部の出銑口より銑鉄として取り出される。銑鉄は、溶けたままSiやP、Sを除去する溶銑予備処理の工程を経て、転炉がある製鋼工場に運ばれる。転炉では合金添加物などを入れ、酸素を湯面に吹き付けて余分な炭素を燃焼させ減量するとともに、発熱、攪拌しながら吹錬する。転炉で溶銑は溶鋼へと転換される。その後、取鍋に移し、脱酸剤としてSi、Al、Tiなどを添加する。また、取鍋を再加熱して合金成分の添加、真空脱ガス処理を二次精練（取鍋精練）として行うこともある。取鍋精練法は、高純化・高纯净度化が進められてきている。精練を終了した溶鋼は、鋼片として固めるための連続鋳造工程へと運ばれ、スラブと呼ばれる半製品になる。スラブは、圧延工程を経て厚鋼板に加工される。

熱加工制御技術とは、制御圧延技術と制御冷却技術を組み合わせた製造技術のことであり、一般にTMCP（Thermo Mechanical Control Process）とも呼ばれている。この製造技術を適用して製造された鋼材をTMCP鋼と呼ぶ。TMCPは、スラブ加熱に始まる鋼の熱間圧延、冷却過程を、単に成形プロセスとしてではなく、熱加工制御プロセス、すなわち鋼の高強度化、高靱化のプロセスとして有効に活用した製造技術である。TMCP鋼は、制御圧延、制御冷却による結晶粒の微細化により、同一強度レベルの従来鋼に比較して、炭素当量 C_{eq} 及び溶接割れ感受性組成 P_{CM} の低減が可能となり、また、従来オフラインの熱処理で行われていた高強度化、高靱化をオンラインにおいて実現することが可能である。熱加工制御プロセスの例を図-2.1.5に示す。

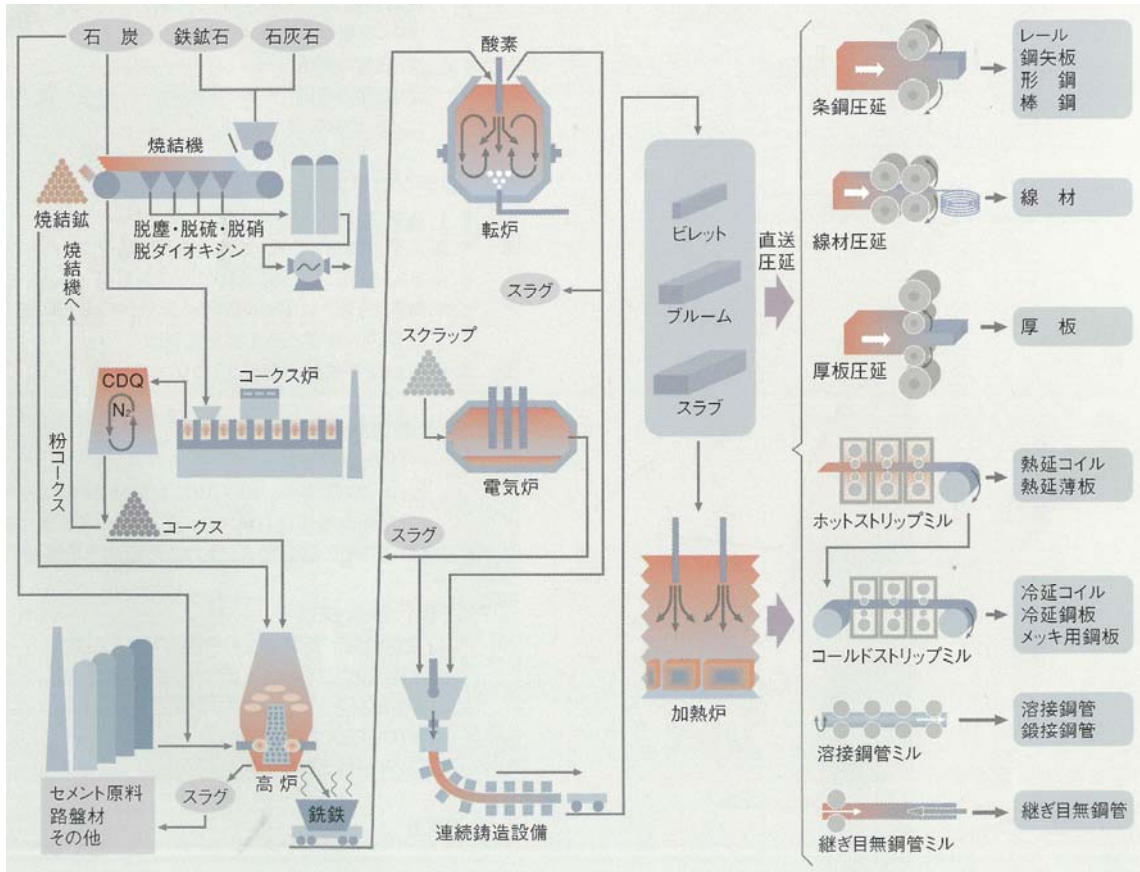


図-2.1.4 現在の厚鋼板の製造プロセスの例 ^{2.8)}

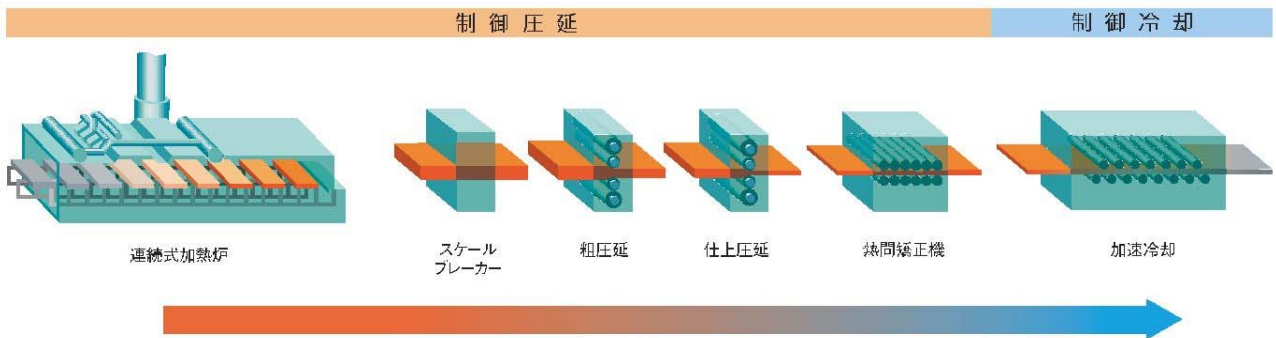


図-2.1.5 熱加工制御プロセスの例 ^{2.9)}

2.1.3 鋼道路橋の技術基準の変遷

(1) 道路橋示方書の変遷

鋼道路橋の技術基準である道路橋示方書、及び使用鋼材の変遷を表-2.1.12 に示す。道路橋示方書の改定と JIS の鋼材の制定及び改正は、ほぼ同時期である。JIS の鋼材の規格及び道路橋示方書の鋼材の規定を整理したものを表-2.1.13 に示す。なお、前述したその当時の鋼材の加工上の注意点も整理した。

1957 年に、溶接鋼道路橋示方書として溶接構造の鋼道路橋について規定された。使用鋼材は、JIS として制定された JIS G 3101-1952 及び JIS G 3106-1952 である。1964 年には SM50 (JIS G 3106-1959)、1967 年には SM50Y、SM53、SM58 (JIS G 3106-1966)、1972 年には耐候性鋼材が加えられ、現在とほぼ同じ鋼種となった。1996 年には、耐候性鋼材を除く鋼材の適用板厚が 100mm に拡大された (耐候性鋼材は 2001 年に適用板厚が 100mm に拡大)。また、JIS では SS400 の化学成分として P と S のみを規定し、溶接性を確保するための化学成分が規定されていないので、JIS 規格材であれば無制限に使用可能との誤解を避けるために、SS400 の鋼道路橋への適用を非溶接部材に限定された。

表-2.1.12 道路橋示方書と使用鋼材の変遷

西暦 (元号)	技術基準	使用鋼材 (主な規定)	規格
1926 年(大正 15 年)	道路構造に関する細則案		—
1939 年(昭和 14 年)	鋼道路橋設計示方書案 鋼道路橋製作示方書案	JES 第 20 号	JES 第 20 号
1940 年(昭和 15 年)	電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案	SS41	JES 第 430 号
1956 年(昭和 31 年)	鋼道路橋設計示方書 鋼道路橋製作示方書	SS41	JIS G 3101-1952
1957 年(昭和 32 年)	溶接鋼道路橋示方書	SS41, SM41, SM41W	JIS G 3101-1952 JIS G 3106-1952
1964 年(昭和 39 年)	鋼道路橋設計示方書 鋼道路橋製作示方書 溶接鋼道路橋示方書	SS41, SS50, SM50A SS41, SM41A・B, SM50A・B	JIS G 3101-1959 JIS G 3106-1959
1967 年(昭和 42 年)	溶接鋼道路橋示方書 (追補)	SM50Y, SM53, SM58 の追加	JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966
1968 年(昭和 43 年)	溶接鋼道路橋示方書 (追補)		JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966
1972 年(昭和 47 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SMA41, SMA50, SMA58 の追加	JIS G 3101-1966 JIS G 3106-1966 JIS G 3114-1968
1980 年(昭和 55 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		同上
1990 年 (平成 2 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		JIS G 3101-1988 JIS G 3106-1988 JIS G 3114-1988
1993 年 (平成 5 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		同上
1996 年 (平成 8 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	適用板厚を 100mm に拡大 (耐候性鋼材は除く) 運用上、SS 材の適用を非溶接部材に限定	同上
2001 年(平成 13 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	耐候性鋼材の適用板厚を 100mm に拡大	JIS G 3101-1988 JIS G 3106-1988 JIS G 3114-1998
2012 年(平成 24 年)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編		JIS G 3101-2010 JIS G 3106-2008 JIS G 3114-2008

表-2. 1. 13 JIS の鋼材の規格と鋼道路橋の技術基準の変遷

西暦 (元号)	鋼材の規格	鋼道路橋の技術基準		鋼材の特徴や加工上の注意点
		技術基準	規定されている使用鋼材	
1920 (T9)	1925 JES第20号制定 SS39	1926 道路構造に関する細則案		1920年頃の鋼材 ・Ceq、P _{tot} ともに高い値を示しており、溶接には不向きと考えられる。
1930 (S5)	1938 JES第430号制定 SS00, SS34, SS41, SS50	1939 鋼道路橋設計示方書案 鋼道路橋製作示方書案	JES第20号	1925年～1952年頃 ・りん(P)と硫黄(S)の化学成分の規定は0.06%以下であり、現在のSS材よりも多い。 ・衝撃値は現在のSS材と比較して低い。 ・靱性が低いため、溶接部付近の加熱矯正を行うと割れが生じる可能性があるため注意が必要である。 ・フラスネーションや介在物の内在にも注意が必要である。
1940 (S15)	1948 JES金属3101制定 SS34, SS41, SS50, SS00廃止	1940 電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案	JES第430号 SS41	1948年：JES第20号に比べると曲げ性能が向上し、不純物であるP、Sの低減が図られている。
1950 (S25)	1952 JIS G 3101制定 SS34, SS41, SS50 1952 JIS G 3106制定 SM41, SM41W 1959 JIS G 3101改定 P.Sの一部変更 1959 JIS G 3106改定 SM41, SM50 C,Si,Mn,P,Sの成分規定及び 衝撃値の規定。 ほぼ現在の規格内容が完成。	1956 鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書 1957 溶接鋼道路橋示方書	SS41 SS41, SM41, SM41W	1952年～1959年頃 ・SS材とSM材のJIS規格が制定され、SM41WはC/Mnの値(2.5以上)を規定しており、溶接性を向上させている。 ・SM材も衝撃値の規定がなく、現在のSM材よりも衝撃値は低いことが多いため、必要に応じ加工前に確認するのがよい。 ・SS41を溶接構造に適用しており、必要に応じ溶接部の靱性を確認するのがよい。
1960 (S35)	1966 JIS G 3101改定 SS39, SS49を削除し、SS50を規定 P.Sの上限を0.060%→0.050% 降伏点、耐力について、板厚別に規定 JIS G 3106改定 SM50Y, SM53, SM58の追加 一部Sの上限を0.05%→0.04% 1968 JIS G 3114制定 SMA41, SMA50, SMA58	1964 鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書 溶接鋼道路橋示方書 1967 溶接鋼道路橋示方書(追補) 1968 溶接鋼道路橋示方書(追補)	SS41, SS50, SM50A SS41, SM41, SM50 SS41, SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58 SS41, SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58	1959年～1980年頃 ・SM材のJIS規格で化学成分及び衝撃値が規定され、現在の規格とほぼ同様となった。 ・現在のSM材よりも衝撃値は低いことが多く、必要に応じ加工前に衝撃値を確認するのがよい。 ・SS41を溶接構造に適用しており、必要に応じ溶接部の靱性を確認するのがよい。 ・フラスネーションや介在物の内在にも注意が必要である。 ・昭和41年以前の鋼材については溶接時のフラマテアに対する注意が必要 ・昭和43年追補でSM58のみCeqの規定。基本的に0.44%以下、硬さ350Hv以下もしくはビード曲げ試験の規定に適合している場合、0.44%を超えて良い。熱処理を伴わない60キロ鋼材やCeqの高い50キロ鋼材に溶接補修を行う場合注意が必要。
1970 (S45)		1972 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SS41, SS50 SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58 SMA41, SMA50, SMA58	1970年頃 ・連続鋳造法の導入 連続鋳造技術 ・溶銲予備処理技術が実用化 ・錬鉄はほぼ純鉄に近い成分であるが、多量のP(0.5%)を含み伸びが著しく低く、溶接には適さない。
1980 (S55)	1983 JIS G 3114改正 SMA-P, SMA-Wの規定 1988 JIS G 3101改正 SI単位への変更 JIS G 3106改正 SI単位への変更 適用厚さの拡大 P.S上限を0.04%→0.035% Mnの上限値を一部引き上げ JIS G 3114改正 SI単位への変更	1980 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	1973年版と同様	1980年頃以降 ・製鋼方法の躍進により衝撃値が向上している。 ・加工熱処理技術(TMCP)の導入 ・高純化が進み、板厚方向特性が向上した。
1990 (H2)	1992 JIS G 3199制定 耐ラメラア制定 1998 JIS G 3114改正 100mmを超える場合の降伏点を規定	1990 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 1993 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 1996 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	SS50削除 SI単位に変更 SS400 SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570 SMA400, SMA490, SMA570 適用板厚を100mmに拡大(耐候性鋼材は除く)	・連続鋳造技術が急速に普及。溶銲予備処理技術が実用化され、低S鋼が普及。 ・1996年の道路橋示方書で運用上、SS材の適用を非溶接部材に限定した。
2000 (H12)	2004 JIS G 3101改正 100mmを超える場合の降伏点を規定 JIS G 3106改正 平鋼の一部の最大板厚を規定 2008 JIS G 3114改正 ISOに準拠 JIS G 3106改正 上限板厚を拡大 JIS G 3140制定 500(W)・700(W) 2009 JIS G 3199改正 ISOに準拠	2001 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	耐候性鋼材の適用板厚を100mmに拡大	
2010 (H22)	2010 JIS G 3101改正 記述修正 2011 JIS G 3140改正 SHBS400(W)追加 2015 JIS G 3101改正 JIS G 3106改正	2012 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	1994年版と同様	

(2) 道路橋示方書における鋼材の加工性に関する規定の変遷

道路橋示方書及びその解説は、その年代毎の鋼材の特性を考慮した鋼種の選定や加工に関する規定及びその留意点を示している。板厚による鋼種選定の規定の変遷を表-2.1.14に示す。

1956年(昭和31年)の鋼道路橋設計示方書及び鋼道路橋製作示方書での適用鋼種はSS41(JIS G 3101-1952)のみであるが、鋼道路橋設計示方書の解説において、「高炭素鋼、低合金鋼などの高張力鋼のような特殊な鋼材は、一般的な規格がないので材質や許容応力度については規定せず、設計者の判断に任せ、用いることができる」とされている。

1957年(昭和32年)の溶接鋼道路橋示方書での適用鋼種は、SS41(JIS G 3101-1952)、SM41またはSM41W(JIS G 3106-1952)であり、板厚22mm以上の場合はSM41またはSM41Wを用いるのがよいとしている。溶接鋼道路橋示方書の解説には、SS41を用いる場合は、規格証明書が添付され、サルファバンドやラミネーション等の欠陥のないものを用いるのがよいとしており、溶接割れへの配慮がされている。SM41及びSM41Wは、SS41と比べてPとSの上限値が低く、曲げ試験の曲げ半径も小さく規定されていることから、自動溶接のように溶け込みの深い溶接を行う場合や、現場溶接のような大きな拘束を受ける溶接を行う場合は、特にSM41またはSM41Wを用いるのがよいとしている。ここでの自動溶接とはサブマージアーク溶接のことである。また、気温が著しく低い地方に架設する橋の場合は、低温脆性への配慮としてSM41Wを用いるものとし、板厚14mm以上の鋼材は溶接部の脆化傾向が著しいため、使用する鋼材のシャルピー吸収エネルギーの要求値を $3.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上としている。

1964年(昭和39年)の鋼道路橋設計示方書及び鋼道路橋製作示方書では、JIS規格の改正により、SS50(JIS G 3101-1959)とSM50A(JIS G 3106-1959)が追加された。鋼道路橋設計示方書の解説には、当時、 $60\text{kg}/\text{mm}^2$ 構造用鋼の研究が進められていたが、強度が高くなるにつれて製鋼が困難になるので表面欠陥や内部欠陥の検査により品質の確認が必要なこと、及び一般的な規格がないことから、材質や許容応力度については特別の配慮をほらう必要があるとしている。

1964年(昭和39年)の溶接鋼道路橋示方書での適用鋼種は、SS41とJIS規格の改正にあわせSM41A、SM41B及びSM50A、SM50Bとしている。溶接鋼道路橋示方書の解説には、鋼材を選定するにあたっての留意点は1957年(昭和32年)版とほぼ同じで、自動溶接のように溶け込みの深い溶接を行う場合や現場溶接のような大きな拘束を受ける溶接を行う場合はSM41A、SM41BまたはSM50A、SM50Bを用いるのがよく、板厚が22mm以上32mm以下の場合はSM41AまたはSM50Bを、板厚が32mmを超える場合はSM41BまたはSM50Bを用いるのがよいとしている。ただし、板厚が23mm以上のSM41B及びSM50Bは、架設される地方の温度や構造物の重要度などによって、使用する鋼材のシャルピー吸収エネルギーの要求値を $3.5\text{kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 以上としている。

1967年(昭和42年)の溶接鋼道路橋示方書(追補)では、JIS規格の改正にあわせて、SM50Y、SM53及びSM58(JIS G 3106-1966)が追加され、さらに鋼種の選定の基準が明確になった。解説には、製鋼方法による鋼材の特徴から選定の際の留意点も示しており、当時、SM50Yにはキルド鋼とセミキルド鋼とがあり、当時のセミキルド鋼は厚板になるに従いラミネーションが生じやすくなること、及びSM50Yの製造経験が浅いことから、25mmを超える厚板ではSM50Yであってもキルド鋼が望ましく、板厚32mmを超える厚板はSM53を用いるとしている。

1968年(昭和43年)の溶接鋼道路橋示方書(追補)では、施工(工作、組立溶接)に関する追加規定が示された。鋼板の切断は原則ガス切断と規定された。解説には、厚板の切断はガス切断が多いこと

だけでなく、ラミネーションが存在する鋼板をガス切断すると切断部に異常が生じ、内部欠陥を検査する役割も果たすことができる理由もあり、原則ガス切断としている。このラミネーションが発見された場合の処置についても規定しており、当時の鋼材の品質が不安定であったことがうかがえる。冷間加工及び熱間加工は、現在の道路橋示方書と同様に冷間曲げ加工の内側半径は板厚の15倍以上(15t以上)、SM570Qの熱間加工は禁止している。線状加熱によるひずみ取りは、鋼材の材質を損なわないようにとしている。なお、当時、耐候性鋼材は、JIS規格に制定されていたが(JIS G 3114-1968)、今後の研究を待つところが多いことから見送られ、1972年(昭和47年)の道路橋示方書で規定された。

1980年(昭和55年)の道路橋示方書では、SM50YBを32mmまで使用できると規定している。解説にて、SM50Yは全てキルド鋼として製鋼されるためとしている。施工に関しては、線状加熱における鋼材表面温度と冷却方法が規定され、解説にて線状加熱による熱影響部が板厚表面数mmのため機械的性質への影響はわずかであるとしている。

1996年(平成8年)の道路橋示方書では、製作や施工の省略化の観点から板厚拡大が望まれ、適用板厚が100mmまで拡大され(耐候性鋼材は除く)規定された。板厚区分はJIS規格と整合させている。解説にて、耐ラメラテア鋼や予熱低減鋼などの高性能鋼の適用について示しており、多くの種類の高性能鋼が適用され始めた。SS400は、JISにおける化学成分としてPとSの量のみを規定し、溶接性を確保するための化学成分が規定されていないことから、鋼道路橋への適用は非溶接部材に限定している。ただし、板厚22mm以下のSS400を仮設資材に用いる場合や、二次部材に用いられる形鋼や薄い鋼板等でSM材の入手が困難な場合には、事前に化学成分を調査したり、溶接施工試験等により、溶接性に問題がないことを確認したうえで使用できるとしている。

表-2.1.14 板厚による鋼種選定の規定の変遷(耐候性鋼材は除く)

鋼種	板厚 (mm)										
	6	8	16	22	25	32	35	38	40	50	100
1957(S32)											
SS41											
SM41											
SM41W											
1964(S39)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM50A											
SM50B											
1967(S42)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM41C											
SM50A											
SM50B											
SM50C											
SM50YA											
SM50YB											
SM53B											
SM53C											
SM58											
1996(H8)											
SS41											
SM41A											
SM41B											
SM41C											
SM50A											
SM50B											
SM50C											
SM50YA											
SM50YB											
SM53C											
SM58											

※キルド鋼塊とする

2.2 鋼材の温度履歴と機械的性質

2.2.1 熱履歴を受けた鋼材の機械的性質

鋼材は、加熱・冷却の熱履歴を受けると鋼材の特性が変化し、その影響の度合いは加熱温度、冷却開始温度及び冷却速度、化学成分、鋼材の製造プロセスによって異なる。鋼橋に使用される鋼材として普通鋼材と耐候性鋼材があり、化学成分は異なるが、熱履歴への影響は道路橋示方書の熱間加工やひずみとり（線状加熱等）の規定において普通鋼材と耐候性鋼材で分けていないことから同程度として考えてよい。ここでは、現在の鋼材の製造プロセスごとに、熱履歴を受けたときの機械的性質について示す。

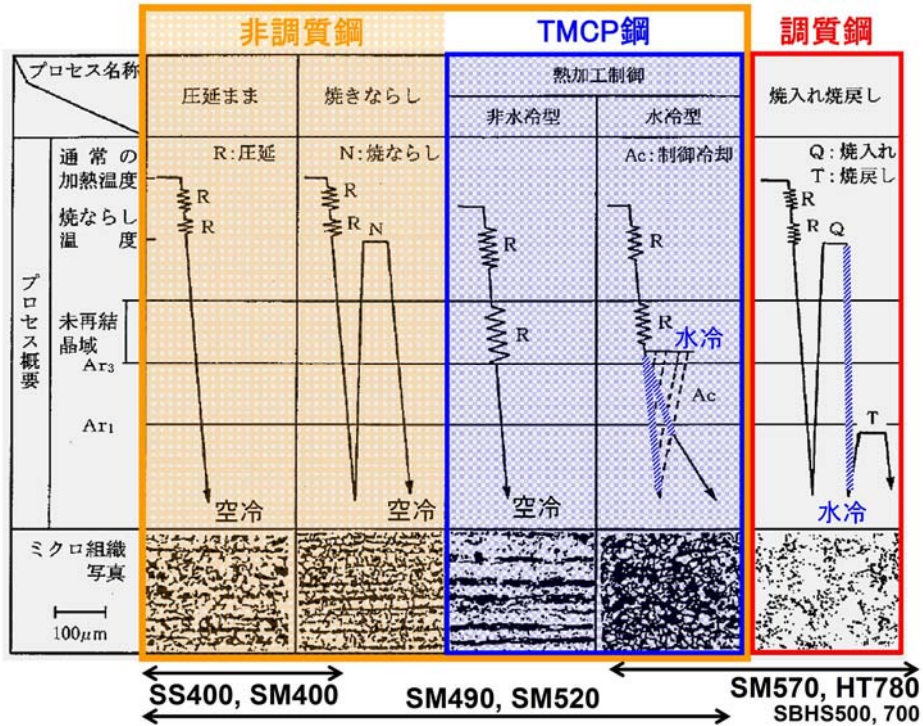
鋼橋に使用される鋼材を熱処理方法により分類すると、圧延まま（熱処理なし）または焼きならしを行う非調質鋼、焼入れ焼戻しを行う調質鋼、制御圧延と制御冷却を行う TMCP 鋼に分かれる。この3つの製造プロセスを図-2.2.1に示す。鋼材の機械的性質は、鋼材のマイクロ組織が最終的に形成された温度を超えて加熱すると、結晶粒微細化強化や変態強化などの強化機構が徐々に失われ、強度が低下する。例えば、図-2.2.1に示した製造プロセスの鋼材を加熱後空冷した場合、一般に以下のことが言える。

- 非調質鋼（圧延まま、焼きならし） → 加熱の影響を大きく受ける製造プロセス（固溶強化、析出強化、加工硬化、結晶粒微細化強化など）がないため加熱の影響は小さい。ただし、変態完了温度（600～700℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 非水冷型の TMCP 鋼 → 変態完了温度（600～700℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 水冷型の TMCP 鋼 → 冷却停止温度（500～650℃）以上の加熱を行うと強度が低下
- 調質鋼 → 焼戻し温度（550～650℃）以上の加熱を行うと強度低下が顕著

上記の他、鋼材は製造プロセスに関係なく加熱温度が Ac1 温度（加熱時の変態開始温度で約 720℃）を超えると鋼材のマイクロ組織が大きく変化し、強度の変化、延性やじん性の低下が顕著になる。さらに、950℃以上に加熱した場合、組織粗大化により徐々に硬化とじん性低下が進み、1100℃を超えるとさらにじん性低下が顕著になる。また、Ac1 温度以上の加熱を行うと、加熱後の冷却中に変態が起きることにより冷却速度の影響度合いが大きくなる。製造プロセスに係わらず、720℃以上の加熱後に急冷すると硬質相が生成し（図-2.2.2）、じん性が低下するため、加熱後の冷却方法は空冷とするのが望ましい。

以上により、鋼材の加熱温度の上限は、鋼材の製造時の熱処理の温度より、次に示すとおりと考え設定した。非調質鋼（圧延まま、焼きならし）の場合、720℃以上の加熱を行うと強度が低下するとされているが、600～700℃でのその程度は一般的に小さく^{2.10)}、加熱温度の上限は、720℃以下としてよいと考えられる。TMCP 鋼は、製造時の冷却方法によって加熱温度の上限が異なるが、少なくとも 650℃を超えないように、調質鋼も同様に少なくとも焼戻し温度以下となる 650℃を超えないようにする必要がある。

上記の加熱温度と冷却方法の場合、1回の熱履歴による機械的性質への影響は小さいが、繰り返し熱履歴を受けると影響度は累積されると考えてよい^{2.11)}。よって、繰り返し加熱すると予想される場合は、その影響度を小さくするために加熱温度を下げるのが望ましい。



Ar₁ : 750°C付近 (冷却時、オーステナイトがフェライトまたはパーライトへの変態を完了する温度)
 Ar₃ : 850°C付近 (冷却時、フェライト変態が始まる温度)
 焼ならし温度 : 900°C付近

図-2.2.1 現在の鋼材の製造プロセス

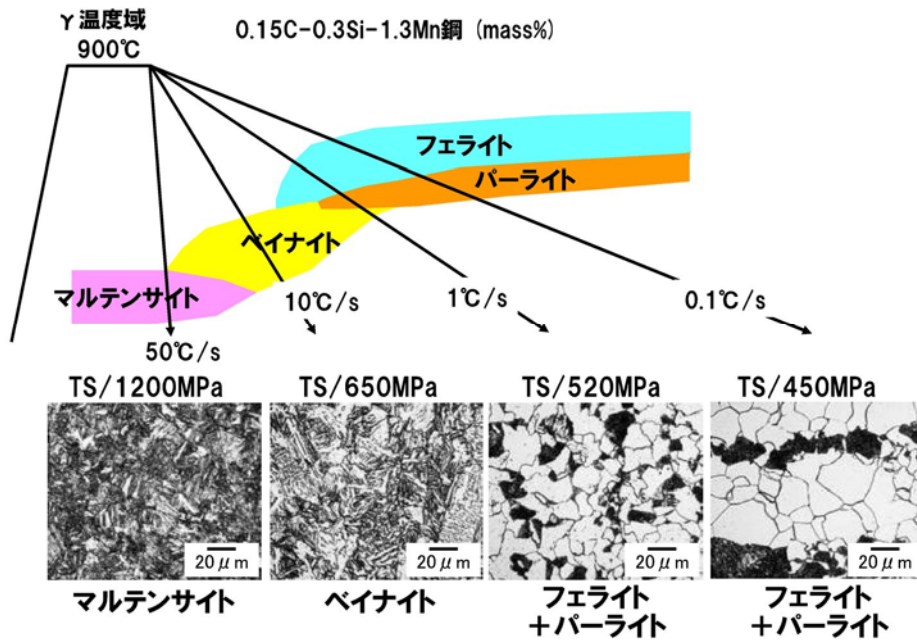


図-2.2.2 900°Cに加熱後の冷却速度の違いによるマクロ組織

高温の状態を長時間保持した場合の鋼材の機械的性質は、文献 2. 10) で示されている。試験の条件は、常温と、500~800℃で1時間保持し、徐冷（20~70℃/h、一部 140~200℃/h あり）している。加熱・冷却後の引張試験結果を図-2. 2. 3~図-2. 2. 7 に示す。SS41 は 800℃でも強度の低下は小さく、SM50B は 700℃で若干の強度低下が認められる。SM50YB 及び SM53B は 650℃から強度が低下している。SM58 のうち焼入れ焼戻しの鋼材は、焼戻し温度の 650℃以上で強度が低下し、SM50YB や SM53B と比べて低下の程度は大きい。

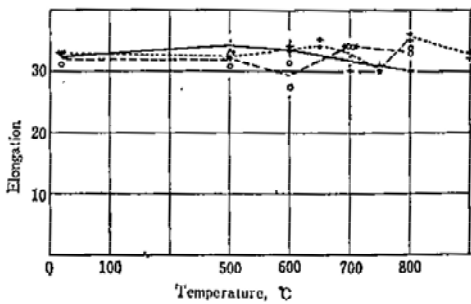
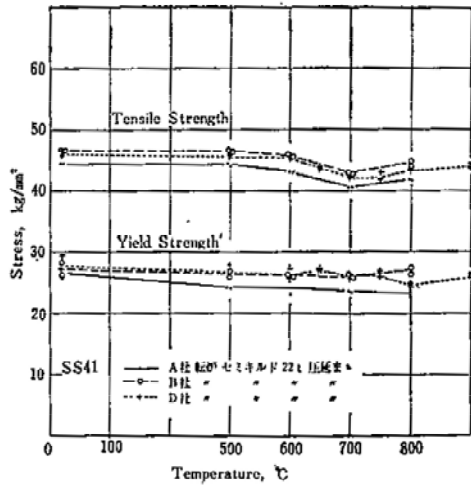


図-2. 2. 3 SS41 の加熱後の強度 ^{2. 10)}

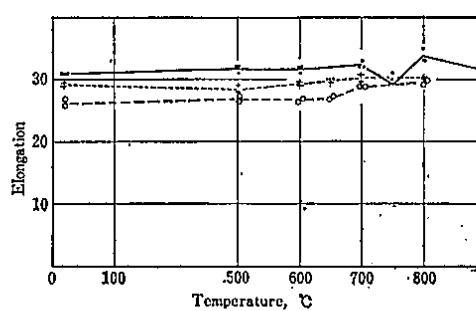
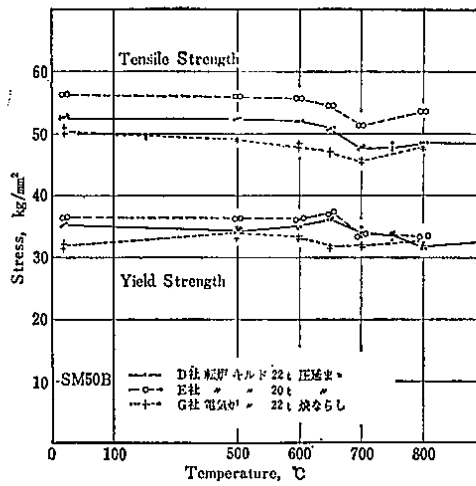


図-2. 2. 4 SM50B の加熱後の強度 ^{2. 10)}

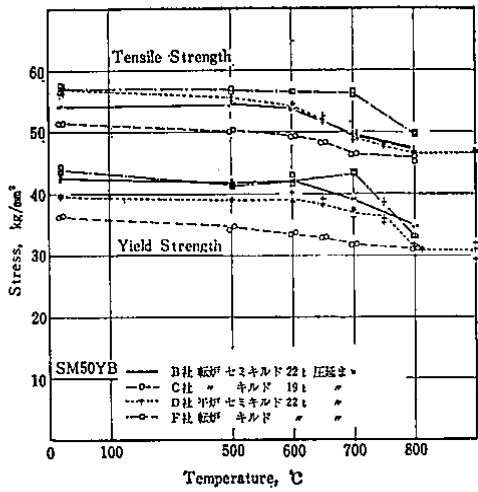


図-2.2.5 SM50YB の加熱後の強度 ^{2.10)}

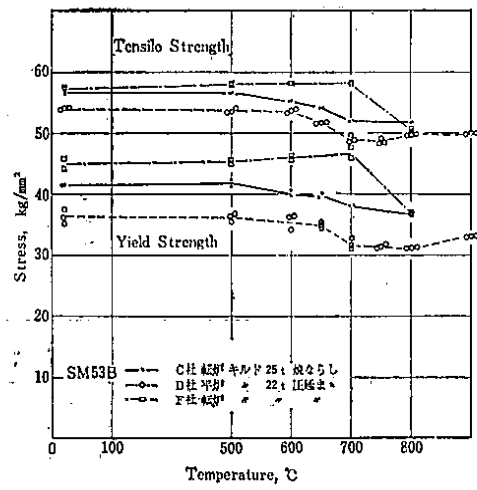


図-2.2.6 SM53B の加熱後の強度 ^{2.10)}

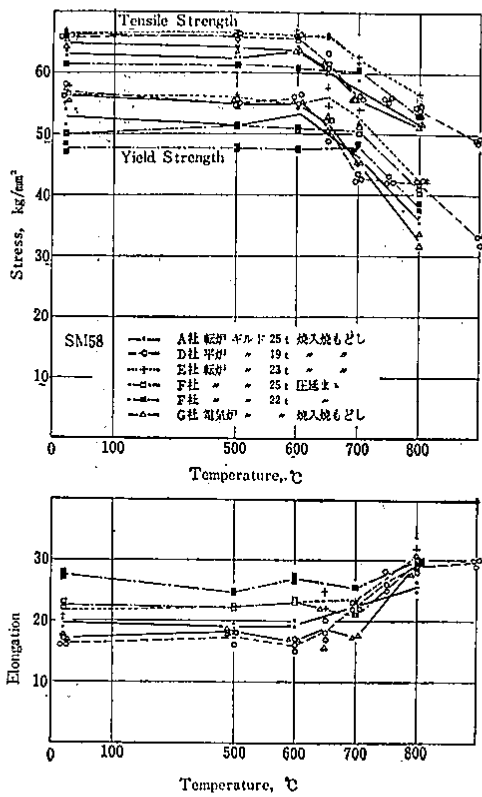


図-2.2.7 SM58 の加熱後の強度 ^{2.10)}

加熱して塑性変形を加える熱間加工においては、特に、赤熱脆性及び青熱脆性に注意する必要がある。赤熱脆性は、鋼材を加熱した際に加熱色が赤くなる 900～1100℃の範囲の加工で現れる脆化のことであり、一般的に鋼材の S 含有量が多いほど生じやすく、融点が高い FeS が結晶粒界に形成され、加工時に鋼材の表面に割れが生じる。近年では、精錬の脱硫技術の向上により、鋼橋で使用される鋼材で赤熱脆性が生じることはほとんどないが、S 含有量が多い JIS 制定前の鋼材を加熱して塑性加工する場合は注意が必要である。

青熱脆性は、図-2.2.8 に示すように、150～400℃の範囲で強度は上昇し、延性は低下して、脆くなる現象である。この温度は鋼材の加熱色が青くなるため、青熱脆性と呼ばれる。青熱脆性が生じる温度範囲での塑性加工は避ける必要がある

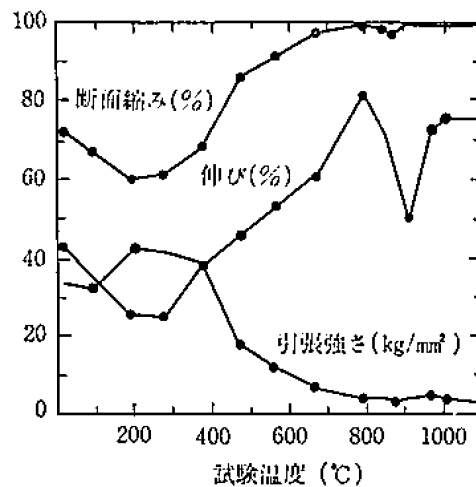


図-2.2.8 高温時の鋼材（軟鋼）の機械的性質^{2.12)}

2.2.2 線状加熱による鋼材の機械的性質への影響

溶接によって生じた変形の矯正や部材の曲げ成形は、プレスなどによる機械法、ガス炎加熱法等によって行われている。ガス炎加熱法は、一般に鋼材の表面の一部を加熱し、塑性ひずみを生じさせて変形させる線状加熱によって行われており、道路橋示方書ではひずみとりの線状加熱時の鋼材の表面温度及び冷却法を表-2.2.1に示すとおり規定している。2.2.1では、鋼材の加熱温度の上限を鋼材の製造時の熱処理の温度から設定し示したが、例えば、調質鋼の加熱温度は焼戻し温度以下の 650℃以下と設定したのに対し、表-2.2.1は焼戻し温度以上となる 750℃までの加熱を許容している。これは線状加熱の加熱・冷却による熱影響は鋼材の表面数mm程度の深さに限られ、鋼材の機械的性質に及ぼす影響はわずかであることからであり、線状加熱に限定した規定であることに注意する必要がある。この線状加熱による鋼材の材質変化については多くの研究がなされており、文献 2.13) では軟鋼、50 キロ級高張力鋼、60 キロ級高張力鋼（調質鋼）などの各種構造用鋼材の線状加熱による鋼材の材質変化について整理されている。また、文献 2.14) では TMCP 鋼について研究を行っており、この研究成果を基に表-2.2.1に示す熱加工制御鋼（TMC）の線状加熱の条件を設定している。

表-2.2.1 ガス炎加熱法による線状加熱時の鋼材の表面温度及び冷却法

鋼種	鋼材表面温度	冷却法
調質鋼 (Q)	750℃以下	空冷または空冷後 600℃以下で水冷
熱加工制御鋼 (TMC)	$C_{eq} > 0.38$	空冷または空冷後 500℃以下で水冷
	$C_{eq} \leq 0.38$	加熱直後水冷または空冷
その他の鋼材	900℃以下	赤熱状態からの水冷を避ける

線状加熱における鋼材の材質変化の要因として、表-2.2.1 に示す加熱温度及び冷却条件のほかに、加熱の重畳回数が考えられる。この加熱の重畳回数については文献 2.13) で整理されており、軟鋼及び 50 キロ級高張力鋼は 5 回繰り返す、60 キロ級高張力鋼 (調質鋼) は 3 回繰り返すの試験を行った結果、強度及びシャルピー吸収エネルギーは 1 回の加熱の場合とほとんど変化せず、加熱の重畳回数による影響はあまり認められないとしている。加熱温度が 900℃以下のため赤熱脆性が生じることはほとんどないが、鋼材の化学成分の S 含有量が不明な場合は、事前に S 含有量を確認するのがよく、特に JIS 制定前の鋼材を線状加熱する場合は脆化に注意が必要である。

2.2.3 熱間加工による鋼材の機械的性質への影響

道路橋示方書^{2.15)}では、「調質鋼 (Q) 及び熱加工制御鋼 (TMC) の熱間加工は、原則として行ってはならない」と規定している。これは、調質鋼のような焼入れ焼戻しの熱処理が施された鋼材は、熱間加工のために焼戻し温度以上に加熱されると、熱処理により得られた特性が失われ、強度が低下するためである。道路橋示方書に示されている調質鋼を種々の温度に加熱したのち空中放冷したときの機械的性質の変化を図 2.2.9 に示す。焼戻し温度の 650℃以上に加熱すると機械的性質が低下することがわかる。TMCP 鋼についても、調質鋼と同様に 650℃以上の加熱で機械的性質が低下する。

非調質鋼の熱間加工については、多くの事例はあるが、2.2.1 で述べたように、鋼材の機械的性質を確保するためには加熱温度は 720℃以下と設定するのが望ましく、加熱温度には注意が必要である。

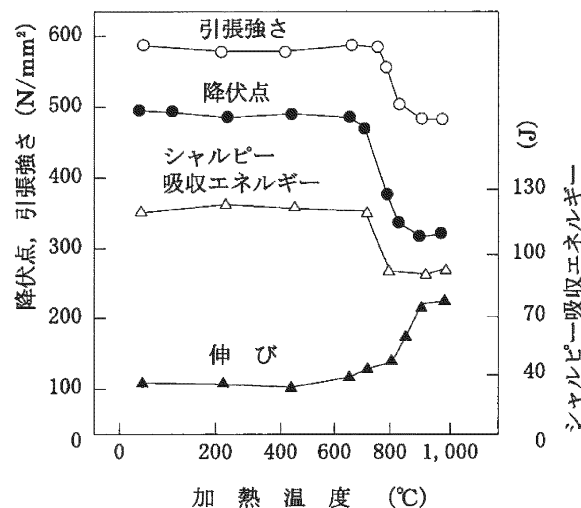


図-2.2.9 調質鋼の加熱による機械的性質の変化

2.2.4 冷間加工による鋼材の機械的性質への影響

鋼材は、冷間塑性加工により塑性ひずみを与えると加工硬化し、さらにはひずみ時効によりじん性の低下をもたらすことが知られている。このことより、道路橋示方書では解説で「主要部材において冷間曲げ加工を行う場合、内側半径は板厚の 15 倍以上とするのが望ましい」とされており、内側半径が板厚の 15 倍で曲げ加工を行ったときの鋼材表面のひずみは約 3%である。図-2.2.10 は、文献 2.16) で示される当時の各種鋼材に予ひずみを与えた後に 250°C で 1 時間の時効処理を行った試験片のシャルピー衝撃試験結果であり、SM58Q を除き予ひずみが 3%でもシャルピー吸収エネルギーの低下が大きいことがわかる。一方、図-2.2.11 は、文献 2.17) で示される文献 2.16) の結果も含めた 1970 年代の鋼材と 1990 年代の鋼材のシャルピー衝撃試験結果であり、素材のシャルピー吸収エネルギーが大きいと予ひずみによる吸収エネルギーの低下は小さいことがわかる。この研究成果より、道路橋示方書では解説で「鋼材規格で衝撃試験が規定されている鋼種で JIS Z 2242 に規定するシャルピー衝撃試験の結果が表-2.2.2 に示す条件を満たし、かつ化学成分中の全窒素量が 0.006%を超えない材料については、内側半径を板厚の 7 倍以上または 5 倍以上としてもよい」としている。

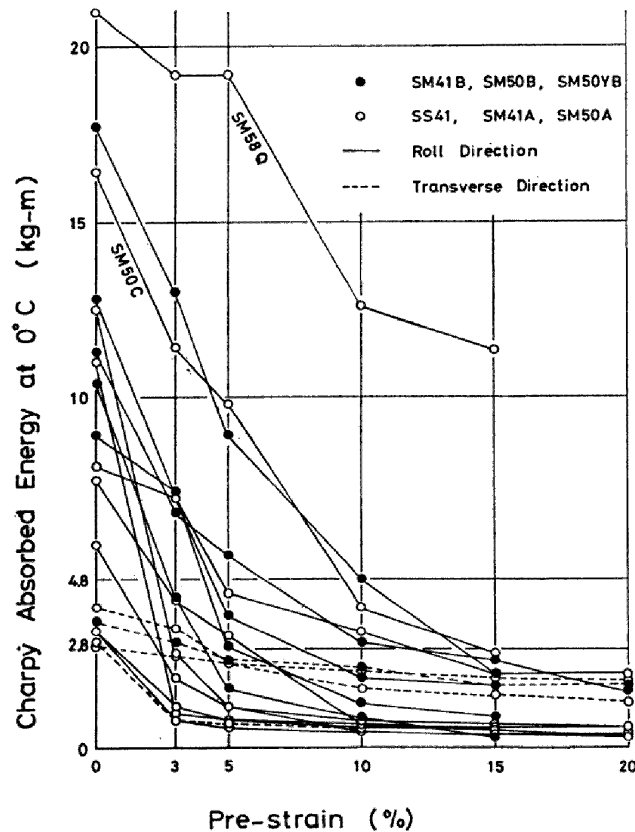
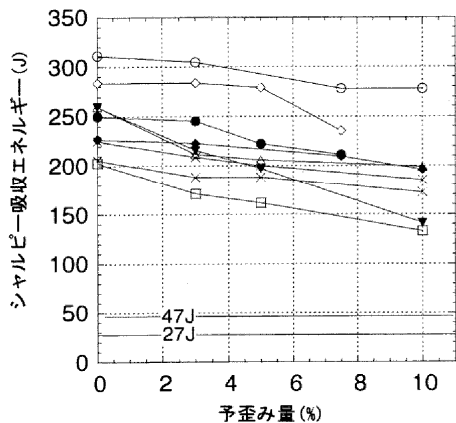


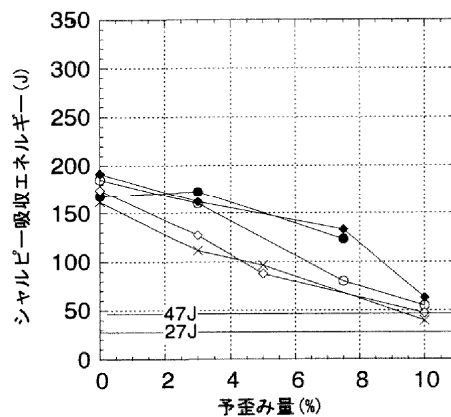
図-2.2.10 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギー^{2.14)}

○ No.1 SM490B-TMC@0°C □ No.11 SMA490BW@0°C
 ● No.2 SM490YB-CR@0°C ▼ No.12 SMA490BW@0°C
 ● No.7 SM400B@0°C ▲ No.13 SMA490BW@0°C
 ◇ No.8 SM520B@0°C × No.14 SM570Q@-5°C
 × No.10 SMA490BW@0°C



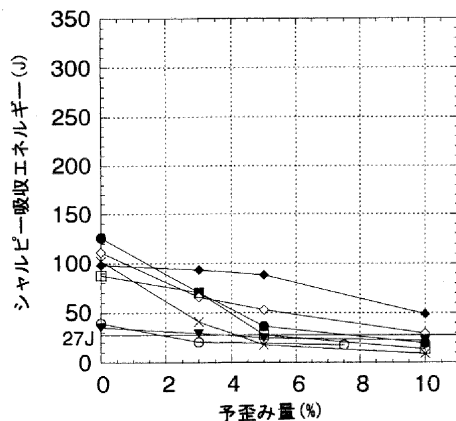
(a) $vE \geq 200J$

○ No.3 SM570Q@-5°C ◇ No.15 SM490B@0°C
 ● No.4 SM490B@0°C × No.16 SM490C@0°C
 ● No.5 SM400B@0°C



(b) $150J \leq vE < 200J$

○ No.6 SM490YB@0°C × No.19 SM400B@0°C
 ● No.9 SMA490BW@0°C □ No.20 SM490B@0°C
 ● No.17 SM490YB@0°C ▼ No.21 SM490YB@0°C
 ◇ No.18 SM490YB@0°C



(c) $vE < 150J$

図-2.2.11 規定温度でのシャルピー吸収エネルギーの予ひずみ量による変化^{2,16)}

表-2.2.2 シャルピー吸収エネルギーに対する冷間曲げ加工半径の許容値

シャルピー吸収エネルギー (J)	冷間曲げ加工の内側半径	付記記号 ^{注)}
150 以上	板厚の 7 倍以上	-7L, -7C
200 以上	板厚の 5 倍以上	-5L, -5C

注) 1 番目の数字 : 最小曲げ半径の板厚の倍率

2 番目の記号 : 曲げ加工方向 (L : 最終圧延方向と同一方向

C : 最終圧延方向と直角方向)

第2章 参考文献

- 2.1) (一社) 日本橋梁建設協会：鋼橋技術の変遷，2010.5
- 2.2) (一社) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），JSSC テクニカルレポート No. 51，2002.1
- 2.3) (一社) 日本鉄鋼協会：鋼中不純物元素の低減とその効果，第90・91回西山記念技術講座，1983.5
- 2.4) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き，1992.7
- 2.5) (一社) 日本鋼構造協会 JSSC，Vol. 2，No. 8，1966
- 2.6) 柳沼安俊，澁谷敦，平林泰明，三木千壽：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について，土木学会第57回年次学術講演会，I-291，2002.9
- 2.7) 一宮充，平林泰明，柳沼安俊，下里哲弘，三木千壽：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について（その2），土木学会第58回年次学術講演会，I-485，2003.9
- 2.8) (公財) JFE21世紀財団：大学教材鉄鋼工学《プロセス編》製鉄・製鋼・塑性加工，2007
- 2.9) 新日鐵住金（株）：厚板／総合カタログ，2018
- 2.10) (一社) 日本鋼構造協会：JSSC，Vol. 4，No. 33，1968
- 2.11) (一社) 日本高圧力技術協会：日本高圧力技術協会規格 [HPIS] 溶接後熱処理基準とその解説，1994.9
- 2.12) (株) 彰国社：鉄鋼の性質と高張力鋼，1967
- 2.13) (一社) 日本溶接協会：溶接などの各種熱加工により生ずる熱ひずみ履歴にともなう材質変化と継手性能，1979.2
- 2.14) (一社) 日本溶接協会：溶接施工管理標準（Ⅱ），1987.12
- 2.15) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.11
- 2.16) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，第300号，1980.8
- 2.17) 本間宏二，三木千壽，征矢勇夫，笹尾英弥，奥村健人，原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究，土木学会論文集，No. 570/ I -40，1997.7