

### 第3章 塑性変形を熱間加工した鋼材の機械的性質及び組織への影響の確認

#### 3.1 試験概要

2.2.3 に熱間加工による鋼材の機械的性質、2.2.4 に冷間加工を受けた鋼材の機械的性質について示したが、地震や衝突による塑性変形の損傷を熱間加工にて補修するような、冷間加工後に熱間加工を行った鋼材の機械的性質に関する研究は調べた範囲ではなかった。塑性変形を熱間加工にて補修する場合、鋼材の機械的性質にどのような影響を及ぼすか明確ではない。

このことより、冷間曲げ加工後に熱間加工にて曲げ戻した場合において、鋼材の機械的性質及び組織への影響について検討する。また、参考として、冷間曲げ加工後に再度、冷間加工にて曲げ戻した場合の機械的性質及び組織への影響についても検討する。

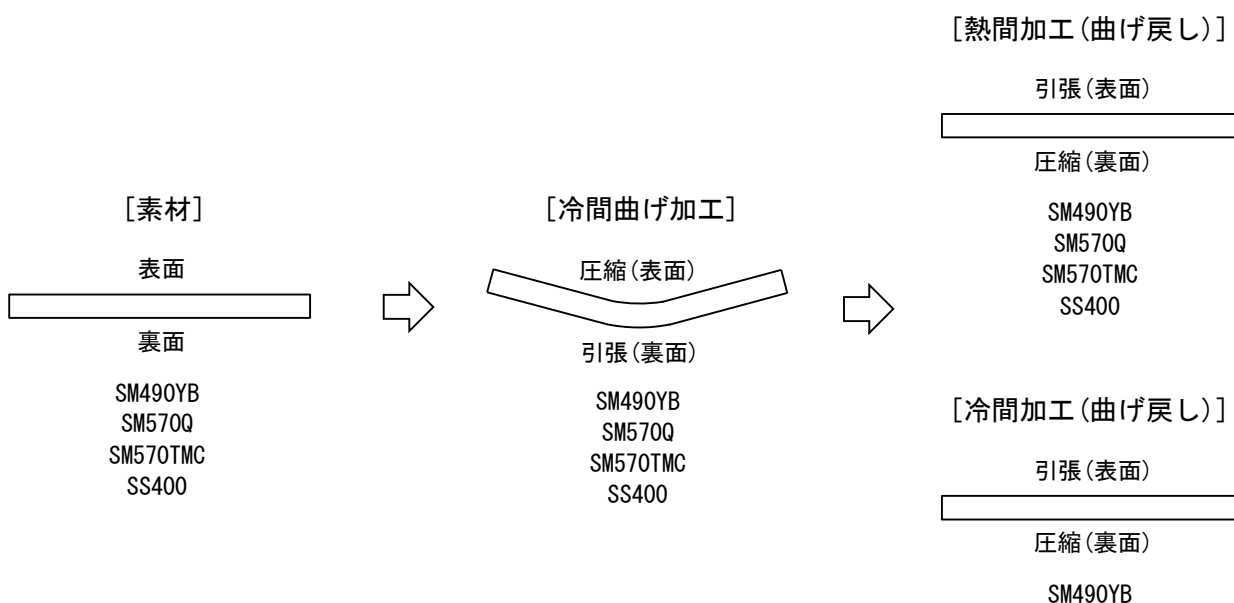


図-3.1.1 試験概要

## 3.2 試験方法

### 3.2.1 試験体

#### (1) 鋼材の種類

試験体に使用する鋼材の種類は、鋼材の製造プロセスでの熱処理方法により機械的性質及び組織への影響が異なるため、非調質鋼の SM490YB、調質鋼の SM570Q、TMCP 鋼の SM570TMC とした。さらに、古い年代の鋼材についても試験を行うものとし、撤去橋梁（1964 年竣工）から試験体を採取した。撤去橋梁の鋼材の材質は、化学成分分析及び金属組織確認により SS400（当時の SS41）と判断した。試験体を使用した鋼材の種類を表-3.2.1、各鋼材の化学成分と機械的性質（SS400 は除く）を表-3.2.2、表-3.2.3 に示す。

表-3.2.1 試験体に使用した鋼材の種類

鋼種		板厚	備考
非調質鋼	SM490YB	32 mm	新規ロール材
調質鋼	SM570Q	32 mm	新規ロール材
TMCP 鋼	SM570TMC	32 mm	新規ロール材
古い年代の鋼材	SS400	25 mm	撤去橋梁から採取（1964 年竣工）

表-3.2.2 SM490YB、SM570Q 及び SM570TMC の化学成分と機械的性質（ミルシート値）

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Ceq	Pcm
SM490YB	32	0.16	0.38	1.44	0.008	0.003	0.01	0.01	0.02	0	0.01	0	0	0.42	0.25
SM570Q	32	0.09	0.22	1.55	0.012	0.003	0.02	0.02	0.13	0	0.02	0.06	0.0001	0.39	0.19
SM570TMC	32	0.10	0.23	1.59	0.014	0.002	0.01	0.02	0.13	0	0.02	0.06	0.0001	0.41	0.20

鋼種	板厚 (mm)	引張試験					衝撃試験			
		採取位置	試験片	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	採取位置	試験片	試験温度 (°C)	平均値 (J)
SM490YB	32	ロール 直角方向	1A 号	394	534	32	ロール 方向	2 mm V ノッチ	0	240
SM570Q	32		5 号	587	678	44			-5	281
SM570TMC	32		5 号	553	668	45			-5	289

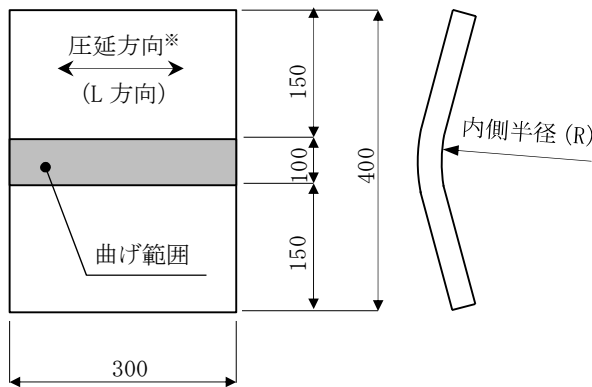
表-3.2.3 SS400 の化学成分（t/4 の位置の成分分析結果）

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B	Ceq	Pcm
SS400	25	0.13	0.46	1.31	0.015	0.008	0.29	0.11	0.11	0.019	—*	<0.000001	0.0003	0.40	0.25

※：Nb の成分分析は未実施

(2) 試験体形状

冷間曲げ加工の際の試験体形状を図-3.2.1に示す。冷間曲げ加工の曲げ方向は、素材の機械試験片の採取方向と合わせるために圧延直角方向（C方向）とした。なお、圧延方向と圧延直角方向にひずみを与えた場合のひずみ時効脆化によるシャルピー吸収エネルギーの低下量は、両者に有意な差は認められないとされている<sup>3.1)</sup>。ただし、SS400については撤去橋梁からの試験体採取の都合上、試験体寸法400mmが撤去橋梁の橋軸方向としており、冷間曲げ加工の曲げ方向は圧延方向（L方向）と想定した。冷間曲げ加工後、熱間加工がしやすいように鋸盤にて幅100mmに切断し（SS400は除く）、1試験体あたり3体の熱間加工の試験体とした。熱間加工時の試験体形状を図-3.2.2に示す。



※：SS400の圧延方向は逆方向  
（試験体寸法400mmの方向）

図-3.2.1 冷間曲げ加工の際の試験体形状

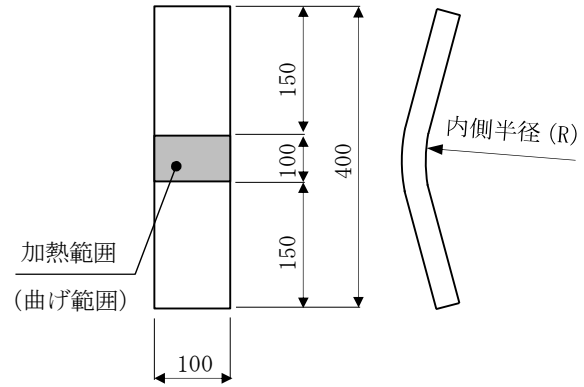


図-3.2.1の試験体を熱間加工前に幅100mmで鋸切断

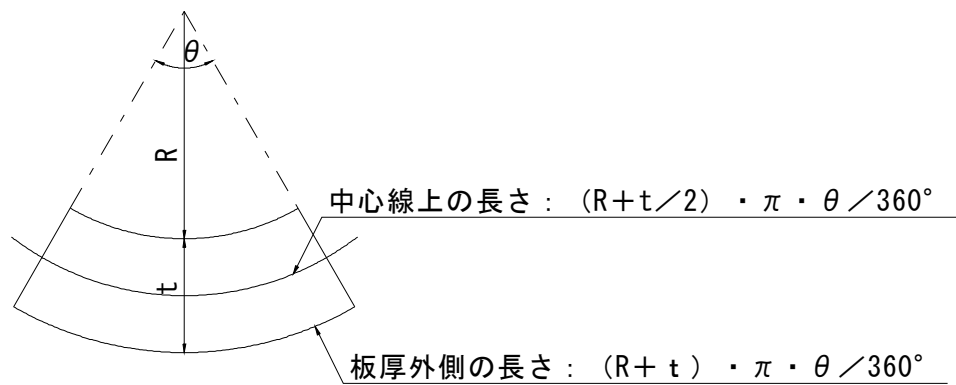
図-3.2.2 熱間加工時の試験体形状

3.2.2 冷間曲げ加工

鋼道路橋の主要部材の製作において冷間曲げ加工を行う場合、内側半径（R）は板厚の15倍以上（15t以上）とするのが望ましいとされている。本試験の冷間曲げ加工の内側半径（R）は、地震や衝突による変形が板厚の15倍（15t）よりも小さくなることもあることから、板厚の7倍（7t、ひずみ6.7%）程度を目標とし、曲げ加工治具の都合により表-3.2.4に示すとおりとした。冷間曲げ加工の内側半径（R）とひずみ（ $\epsilon$ ）の関係は図-3.2.3に示す。冷間曲げ加工の施工状況は写真-3.2.1に示す。

表-3.2.4 冷間曲げ加工の内側半径

鋼種	板厚	内側半径	ひずみ
SM490YB	32 mm	200R (6.25t)	7.4%
SM570Q	32 mm		
SM570TMC	32 mm		
SS400	25 mm	150R (6t)	7.7%



$$\varepsilon = \left\{ (R+t) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ - (R+t/2) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ \right\} / \left\{ (R+t/2) \cdot \pi \cdot \theta / 360^\circ \right\} \times 100$$

$$= (t/2) / (R+t/2) \times 100$$

ここに、

$\varepsilon$  : ひずみ (%)

$R$  : 内側半径 (mm)

$t$  : 板厚 (mm)

図-3. 2. 3 冷間曲げ加工の内側半径とひずみの関係



a) 冷間曲げ加工の施工中



b) 冷間曲げ加工の施工後

写真-3. 2. 1 冷間曲げ加工の施工状況

### 3.2.3 熱間加工

#### (1) 加熱温度

鋼材の特性を考慮した加熱温度の上限は、2.2.1 で非調質鋼は 720℃以下、調質鋼及び TMCP 鋼は 650℃以下と鋼材の製造時の熱処理の温度から設定した。しかし、熱間加工の施工性を考えると加熱温度が高い方がよい。そこで、本試験では 900℃の熱間加工での機械的性質を確認することとした。調質鋼の SM570Q 及び TMCP 鋼の SM570TMC については、650℃を超えた場合の強度の低下は明らかであるため、機械的性質への影響がないと考えられる 650℃の熱間加工も行った。表-3.2.5 に本試験での熱間加工の加熱温度を示す。

表-3.2.5 熱間加工の加熱温度

鋼種		熱間加工の加熱温度
非調質鋼	SM490YB	900℃
調質鋼	SM570Q	900℃
		650℃
TMCP 鋼	SM570TMC	900℃
		650℃
古い年代の鋼材	SS400	900℃

#### (2) 加熱方法

加熱方法は、実際の施工方法と同様に加熱バーナーを用い、試験体の板厚中心が表-3.2.5 に示した熱間加工の加熱温度付近となるように試験体の両面から加熱した。また、試験体両面の加熱範囲全体が目標とする加熱温度に達するように、両面の表面温度を計測しながら加熱した。表面温度は、加熱時の加熱炎の影響が小さく、瞬時に表面温度が計測できる赤外線非接触表面温度計にて計測した。試験体の加熱方法を図-3.2.4、加熱状況を写真-3.2.2 に示す。なお、試験前に試験体の板厚中心が熱間加工の加熱温度付近となる加熱方法を確認している。

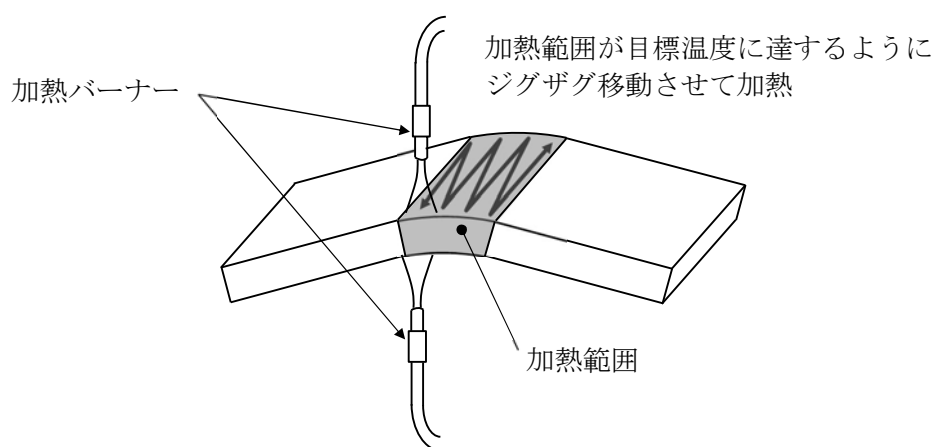


図-3.2.4 試験体の加熱方法



a) SS400、SM490YB 試験体の加熱

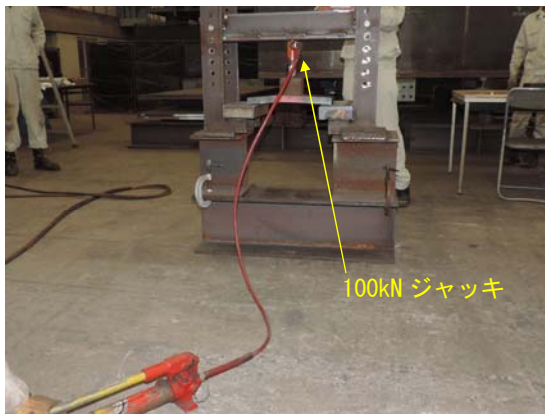


b) SM570Q、SM570TMC 試験体の加熱

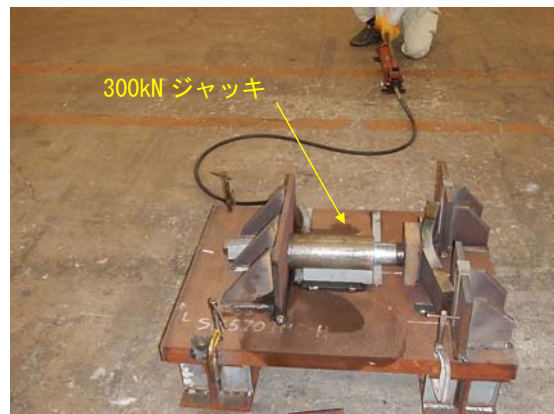
写真-3.2.2 試験体の加熱状況

### (3) 矯正方法

加熱後の矯正は、目標とする加熱温度とした直後に油圧ジャッキにて外力を加え、試験体が平坦になるまでとした。矯正中の温度は、青熱脆性（強度は上昇するがじん性は低下）が生じる 150~400℃に低下することのないようにした。なお、矯正後の試験体は若干の凹凸が生じたが、その凹凸を矯正するための再加熱や再矯正は行わなかった。加熱後の冷却法は、急冷によるじん性低下を避けるため、空冷とした。矯正が完了した時の表面温度は、加熱温度が 900℃の場合は 600~700℃、650℃の場合は 500℃前後であった。矯正状況を写真-3.2.3 に示す。



a) SS400、SM490YB 試験体の矯正



b) SM570Q、SM570TMC 試験体の矯正

写真-3.2.3 試験体の矯正状況

### 3.2.4 冷間加工による曲げ戻し

地震や衝突による変形が大きい場合（内側半径（R）が小さい場合）、または板厚が大きい場合は、冷間加工による曲げ戻しはじん性が低下したり、矯正に必要な外力が大きくなるため、一般的に行われていないが、機械的性質及び組織を確認するために SM490YB については冷間加工による矯正（曲げ戻し）を行った。熱間加工と同様に、矯正後の試験体は若干の凹凸が生じたが、その凹凸を矯正するための再加熱や再矯正は行わなかった。

### 3.2.5 時効促進処理

試験体は、冷間曲げ加工及び熱間加工による曲げ戻しによるひずみ時効脆化を考慮する。しかし、ひずみ時効脆化は、冷間曲げ加工により塑性ひずみが与えられ硬化し、これに伴い長い時間をかけてじん性が低下するので長時間の暴露が必要になる。そこで、時効促進処理により、ひずみ時効脆化を促進させる。時効促進処理は、文献 3.2) と同様に 250℃の環境下で 1 時間保持の条件にて行った。この条件は、文献 3.1) にて自然放置によるひずみ時効との対比がなされ、半年ないしそれ以上の自然放置に対応するものと判断されると、その妥当性が示されている。時効促進処理の時期を図-3.2.5、時効促進処理の施工状況を写真-3.2.4 に示す。

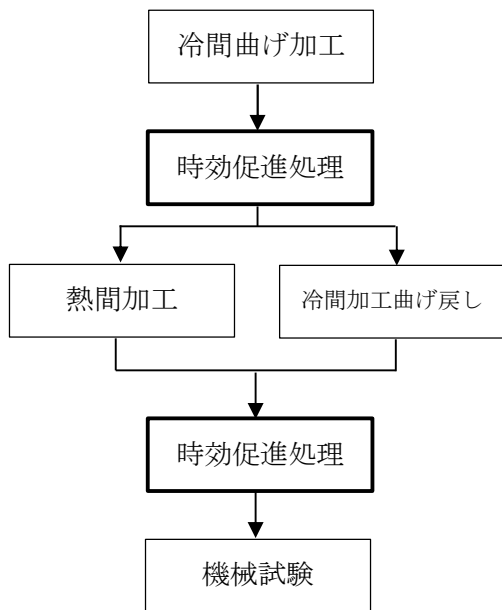


図-3.2.5 時効促進処理の時期



写真-3.2.4 時効促進処理の施工状況

### 3.3 金属材料試験の種類と試験片の採取要領

金属材料試験の種類は、引張試験、衝撃試験、金属組織試験、硬さ試験とした。SM570Q と SM570TMC は、加熱温度 900℃と 650℃の両温度とも上記の 4 種類の試験を行った。

引張試験片は、5 号試験片 (JIS Z 2241) とし、試験体の熱間加工範囲が 5 号試験片の平行部の全体となるようにした。なお、冷間曲げ加工後では、まっすぐな板状試験片 (5 号試験片) の採取ができないため、引張試験は行わない。

衝撃試験片 (JIS Z 2242 : V ノッチ試験片) の板厚方向の採取位置は、鋼材の JIS の規定と同様に板厚 (t) の 1/4 とした。試験温度は、シャルピー吸収エネルギーの遷移温度を確認するために、JIS で規定されている試験温度の他、SM490YB と SS400 は -40℃、-20℃及び 20℃、SM570 は -60℃、-40℃及び -20℃ の試験温度についても行った。また、本試験は曲げによるひずみを導入しており、引張側と圧縮側のひずみが生じるが、文献 3.3) では圧縮予ひずみのほうが引張予ひずみよりも鋼材をより脆化させる傾向にあるとされていることから、その傾向を確認するために SM490YB は引張側と圧縮側の両側で衝撃試験を行い、その他の鋼種は SM490YB の衝撃試験結果でシャルピー吸収エネルギーの低下率が大きい側のみ衝撃試験を行うものとした。

金属組織試験は、熱間加工による加熱や矯正が金属組織にどの程度影響するかを確認するために、表裏面近傍と板厚中心の 3 箇所を 100 倍と 400 倍にて観察した。

硬さ試験は、ビッカース硬さ試験とし、金属組織試験後の試験片を用いて板厚方向に計測した。

金属材料試験の種類を表-3.3.1、試験片の採取要領を表-3.3.2 に示す。

表-3.3.1 金属組織試験の種類

鋼種	試験体の種類	試験の種類
SM490YB、SM570Q、 SM570TMC、SS400	素材	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB、SM570Q、 SM570TMC、SS400	冷間曲げ加工後	衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB、SM570Q※、 SM570TMC※、SS400	冷間曲げ加工後 熱間加工	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験
SM490YB	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	引張試験
		衝撃試験
		金属組織試験
		硬さ試験

※：熱間加工の加熱温度が 900℃の場合と 650℃の場合の 2 種類



表-3.3.2 試験片の採取要領

鋼種	試験体の種類	試験の種類	試験片採取位置	試験片形状	個数	備考
SM490YB	素材	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	表面と裏面の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後	衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）と圧縮側（表面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）と圧縮側（裏面） で t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）と圧縮側（裏面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	SM570Q SM570TMC	素材	引張試験	圧延 直角方向	5号	1
衝撃試験			圧延 方向	Vノッチ	各3	表面の t/4 から採取 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
金属組織試験			圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
冷間曲げ加工後		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）の t/4 から採取* 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
冷間曲げ加工後 900℃熱間加工、 650℃熱間加工		引張試験	圧延 直角方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）の t/4 から採取* 試験温度：-60、-40、-20、-5℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
SS400		素材	引張試験	圧延 方向	5号	1
	衝撃試験		圧延 直角方向	Vノッチ	各3	表面の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
	金属組織試験		圧延直角 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後	衝撃試験	圧延 方向	Vノッチ	各3	引張側（裏面）と圧縮側（表面） の t/4 から採取 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	引張試験	圧延 方向	5号	1	—
		衝撃試験	圧延 直角方向	Vノッチ	各3	引張側（表面）の t/4 から採取* 試験温度：-40、-20、0、20℃
		金属組織試験	圧延直角 方向断面	—	1	表面、板厚中央、裏面の3箇所 の金属組織の観察 金属組織試験後、硬さ試験

※：SM490YBの衝撃試験結果より、加工後に引張側となる方向から採取

## 3.4 試験結果

### 3.4.1 引張試験結果 (JIS Z 2241 : 5号試験片)

各試験体の引張試験結果を表-3.4.1～表-3.4.4、図-3.4.1～図-3.4.4に示す。

SM490YBは、素材の降伏点または0.2%耐力(以降、降伏点)が $396\text{N/mm}^2$ に対し、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工の降伏点は $320\text{N/mm}^2$ と低下し、さらに降伏点の規格値( $\geq 355\text{N/mm}^2$ )も下回った。引張強さは、素材が $534\text{N/mm}^2$ に対し、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工は $519\text{N/mm}^2$ と若干低下したが、引張強さの規格値( $490\sim 610\text{N/mm}^2$ )を満足している。しかし、素材の強度のばらつきを考慮すると、もともと規格値ぎりぎりのものは、加熱により引張強さも規格値を下回ることがあると考えられる。SM490YBは $900^\circ\text{C}$ 加熱の熱間加工では強度に影響すると言える。なお、強度の低下の程度は、2.2.1の図-2.2.5で示した高温の状態を長時間保持した場合と同程度である。伸びについては素材が49.1%、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工では51.5%であり、伸びへの影響は小さい。冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは、降伏点が $451\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $576\text{N/mm}^2$ 、伸びが43.0%であり、素材と比較して降伏点及び引張強さが大きくなり、伸びが低下している。これは、冷間塑性加工による加工硬化の影響である。

SM570Qは、素材の降伏点が $589\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $681\text{N/mm}^2$ に対し、冷間曲げ加工後 $650^\circ\text{C}$ 熱間加工では降伏点が $539\text{N/mm}^2$ 、引張強さは $631\text{N/mm}^2$ と両方とも低下する傾向ではあるが、規格値(降伏点 $\geq 450\text{N/mm}^2$ 、引張強さ $570\sim 720\text{N/mm}^2$ )を満足している。伸びも、素材が41.8%に対し、冷間曲げ加工後 $650^\circ\text{C}$ 熱間加工では42.4%とほとんど変化していない。一方、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工では、焼戻し温度以上での熱間加工のため、降伏点が $383\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $500\text{N/mm}^2$ と両方とも大きく低下し、規格値も大きく下回っている。伸びは、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工で53.8%であり、強度が低下したため大きく増加している。

SM570TMCはSM570Qと同じ傾向であり、素材の降伏点が $551\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $677\text{N/mm}^2$ に対し、冷間曲げ加工後 $650^\circ\text{C}$ 熱間加工では降伏点が $564\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $648\text{N/mm}^2$ であり、規格値(降伏点 $\geq 450\text{N/mm}^2$ 、引張強さ $570\sim 720\text{N/mm}^2$ )を満足している。伸びも、素材が42.4%に対し、冷間曲げ加工後 $650^\circ\text{C}$ 熱間加工では44.4%とほとんど変化していない。冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工では、冷却停止温度以上での熱間加工のため、降伏点が $389\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $504\text{N/mm}^2$ と両方とも大きく低下し、SM570Qと同様に規格値を大きく下回っている。伸びは、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工で53.7%であり、SM570Qと同様に大きく増加している。

古い年代の鋼材のSS400は、素材の降伏点が $402\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $538\text{N/mm}^2$ に対し、冷間曲げ加工後 $900^\circ\text{C}$ 熱間加工では降伏点が $434\text{N/mm}^2$ 、引張強さが $533\text{N/mm}^2$ と強度への影響はほとんど認められない。ただし、素材の引張強さが高く、引張強さは規格値( $400\sim 510\text{N/mm}^2$ )を上回っている。この要因として、SS400以外は圧延直角方向から引張試験片を採取しているが、SS400は撤去橋梁からの試験体採取の都合上、圧延方向と思われる方向での試験であることから、試験片の採取方向の違いにより規格値を上回ったと考えられる。なお、当時の基準である溶接鋼道路橋示方書(昭和32年)はSS41、SM41またはSM41Wのみ適用するとしており、 $41\text{kgf/mm}^2$ 級以外の鋼材は適用していないと推測され、化学成分分析及び金属組織確認による鋼種の判断が間違っていないと考える。

表-3.4.1 SM490YB 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	破断 位置
SM490YB	(規格値)	—	( $\geq 355$ )	(490~610)	( $\geq 19$ ) ※	—
	素材	AT	396	534	49.1	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	HT	320	519	51.5	A
	冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	MT	451	576	43.0	A

※：SM490YB の伸びの規格値は 1A 号試験片での値

表-3.4.2 SM570Q 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	破断 位置
SM570Q	(規格値)	—	( $\geq 450$ )	(570~720)	( $\geq 26$ )	—
	素材	QAT	589	681	41.8	A
	冷間曲げ加工後 650℃熱間加工	QH6T	539	631	42.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	QH9T	383	500	53.8	A

表-3.4.3 SM570TMC 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	破断 位置
SM570TMC	(規格値)	—	( $\geq 450$ )	(570~720)	( $\geq 26$ )	—
	素材	TAT	551	677	42.4	A
	冷間曲げ加工後 650℃熱間加工	TH6T	564	648	44.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	TH9T	389	504	53.7	A

表-3.4.4 SS400 (古い年代の鋼材) 引張試験結果

鋼種	試験体の種類	試験片 No.	降伏点 または耐力 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	伸び %	破断 位置
SS400	(規格値) <当時の規格値>	—	( $\geq 235$ ) < $\geq 23$ >	(400~510) <41~50>	( $\geq 21$ ) ※ < $\geq 20$ >	—
	素材	SAT	402	538	47.4	A
	冷間曲げ加工後 900℃熱間加工	SHT	434	533	49.0	A

※：SS400 の伸びの規格値は 1A 号試験片での値

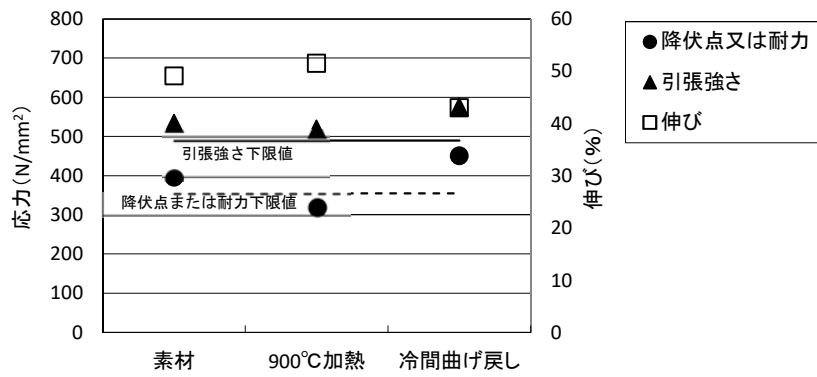


図-3.4.1 SM490YB 引張試験結果

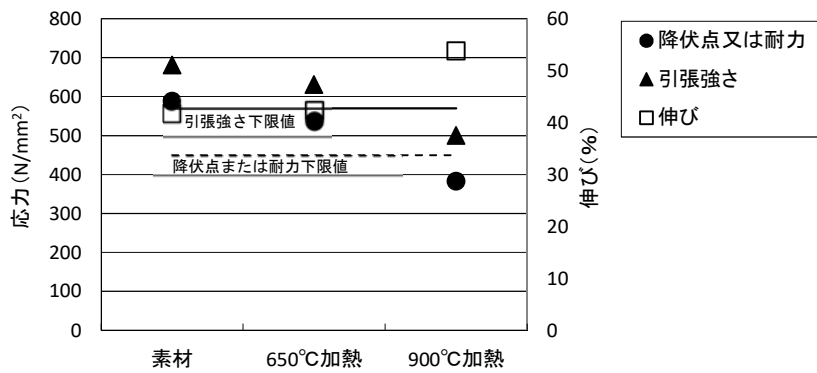


図-3.4.2 SM570Q 引張試験結果

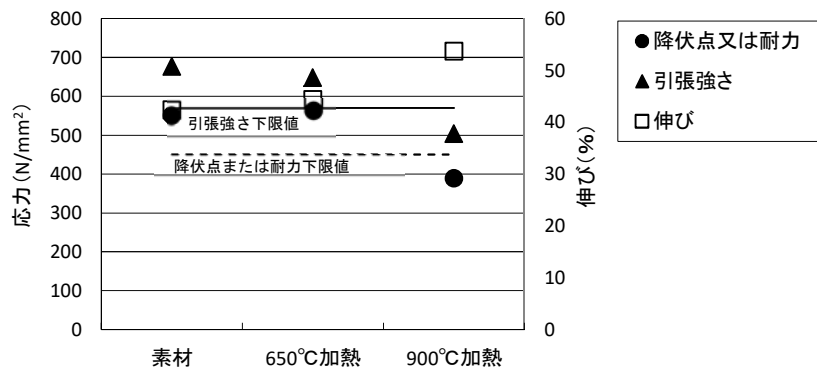


図-3.4.3 SM570TMC 引張試験結果

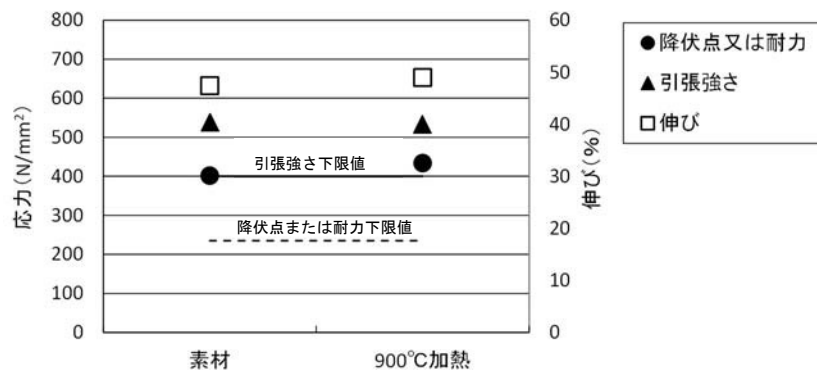


図-3.4.4 SS400 引張試験結果

### 3.4.2 衝撃試験結果 (JIS Z 2242 : V ノッチ試験片)

SM490YB の衝撃試験結果を表-3.4.5、図-3.4.5 に示す。衝撃試験片の採取位置は表-3.3.2 に示すとおり板厚 (t) の 1/4 で、SM490YB では、素材の表面と裏面、及び冷間曲げ加工、熱間加工、冷間加工による曲げ戻しによる引張側と圧縮側から試験片を採取している。

素材は、図-3.4.5 の a) **素材の吸収エネルギー**を見てわかるように、表面と裏面の吸収エネルギーの差異はなく、両面とも試験温度の低下 (-20°C、-40°C) による急激な吸収エネルギーの低下が見られず、遷移温度は-40°Cよりも低い。冷間曲げ加工後は (図-3.4.5 の b) **冷間曲げ加工後の吸収エネルギー**)、試験温度 0°Cの吸収エネルギーでの素材との差異は認められないが、試験温度-40°Cの吸収エネルギーでは素材の表面が 140J で裏面が 138J に対し、冷間曲げ加工後の表面 (圧縮側) が 101J で裏面 (引張側) が 55J であり、冷間塑性変形によるひずみの影響により大きく低下している。一方、冷間曲げ加工後 900°C 熱間加工は (図-3.4.5 の c) **900°C熱間加工の吸収エネルギー**)、冷間曲げ加工後で大きく低下した試験温度-40°Cの吸収エネルギーで比較すると、表面 (引張側) が 140J で裏面 (圧縮側) が 141J であり、素材の吸収エネルギーに近い値となっており、これは 900°Cの加熱により組織が細粒化したためと考えられる。

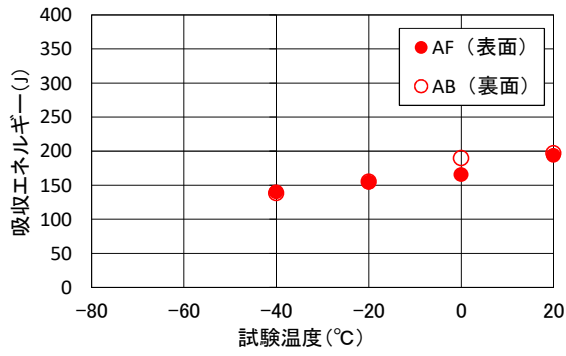
なお、900°Cは組織の変態点付近であるため、冷間曲げ加工によるひずみの影響はなくなる。冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは (図-3.4.5 の d) **冷間加工曲げ戻しの吸収エネルギー**)、素材と比較すると試験温度 0°Cの吸収エネルギーは低下し、-20°Cと-40°Cでは大きく低下しており、ひずみの影響がさらに大きくなっている。冷間曲げ加工後と比較すると、冷間曲げ加工後よりも遷移温度が高温側にシフトしていることがわかる。

素材を除く試験体の種類での引張側と圧縮側の吸収エネルギーは明瞭な差異は認められず、本試験でのひずみ量では引張側と圧縮側の吸収エネルギーに差はない。また、素材の表側と裏側でも吸収エネルギーの差はない。このことより、SM570Q、SM570TMC 及び SS400 については、素材は表面から、加工後は引張側となる面から試験片を採取することにした。この採取位置での SM490YB の加工状態ごとの吸収エネルギーを図-3.4.6 に示す。

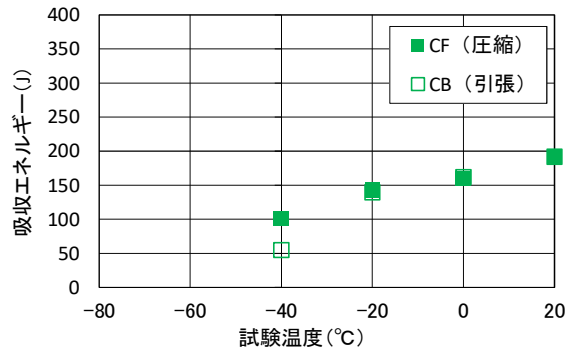
表-3.4.5 SM490YB 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SM490YB	27J 以上 (試験温度 0°C)	素材	表面	AF1	20	194
				AF2	0	166
				AF3	-20	154
				AF4	-40	140
			裏面	AB1	20	197
				AB2	0	190
				AB3	-20	155
				AB4	-40	138
		冷間曲げ加工後	表面 (圧縮側)	CF1	20	191
				CF2	0	160
				CF3	-20	143
				CF4	-40	101
			裏面 (引張側)	CB1	20	192
				CB2	0	162
				CB3	-20	139
				CB4	-40	55
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	HF1	20	202
				HF2	0	216
				HF3	-20	159
				HF4	-40	141
			裏面 (圧縮側)	HB1	20	209
				HB2	0	198
				HB3	-20	171
				HB4	-40	147
		冷間曲げ加工後 冷間加工曲げ戻し	表面 (引張側)	MF1	20	161
				MF2	0	140
				MF3	-20	110
				MF4	-40	19
裏面 (圧縮側)	MB1		20	169		
	MB2		0	141		
	MB3		-20	102		
	MB4		-40	28		

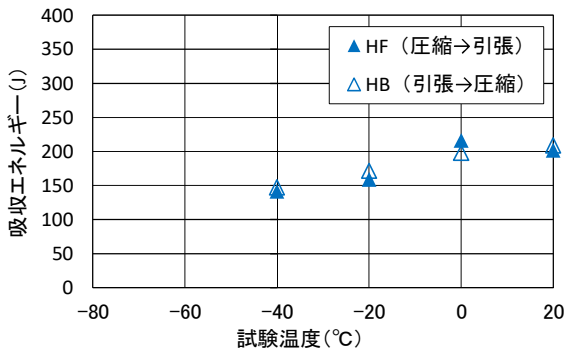
※ : 3 個の試験片の平均値



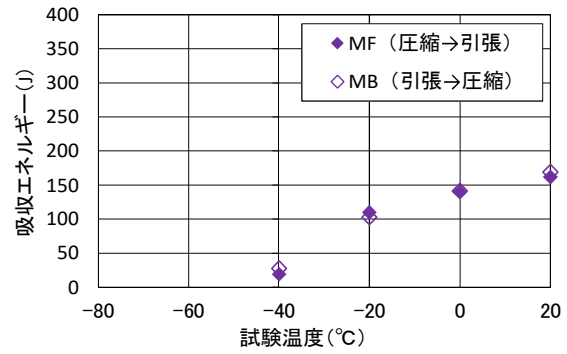
a) 素材の吸収エネルギー



b) 冷間曲げ加工後の吸収エネルギー



c) 900°C熱間加工の吸収エネルギー



d) 冷間加工曲げ戻しの吸収エネルギー

図-3.4.5 SM490YB 衝撃試験結果

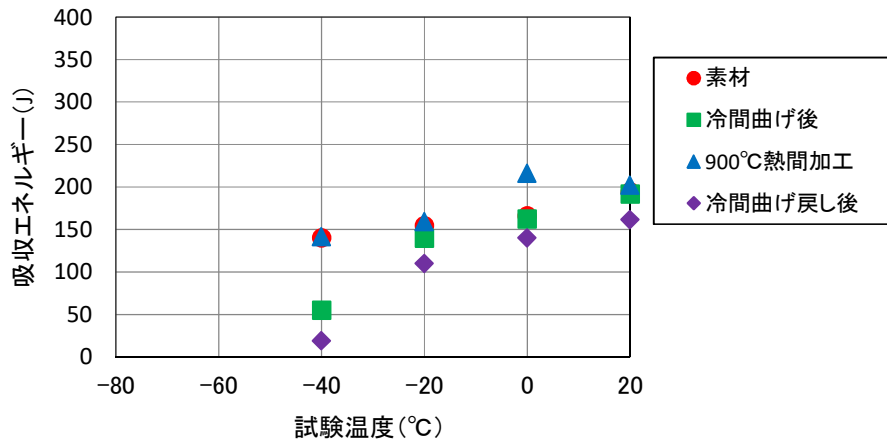


図-3.4.6 SM490YB の加工状態ごとの吸収エネルギー

SM570Q、SM570TMC 及び SS400 の衝撃試験結果を表-3.4.6 及び表-3.4.7、図-3.4.7～図-3.4.9 に示す。

SM570Q と SM570TMC は図-3.4.7 及び図-3.4.9 を見てわかるように、まず素材の遷移温度は $-60^{\circ}\text{C}$ よりも低い、冷間曲げ加工後は試験温度 $-5^{\circ}\text{C}$ での吸収エネルギーはほとんど変化していないものの、冷間塑性変形によるひずみの影響により $-60^{\circ}\text{C}$ では大きく低下し、遷移温度が高温側にシフトしている。つぎに冷間曲げ加工後  $650^{\circ}\text{C}$ 熱間加工では、SM570Q と SM570TMC とも素材と同程度の吸収エネルギーまで回復しており、再結晶温度付近である  $650^{\circ}\text{C}$ の加熱によりひずみの影響が非常に小さくなったと考えられる。冷間曲げ加工後  $900^{\circ}\text{C}$ 熱間加工では、素材の吸収エネルギーと同等以上となっており、鋼材の製造プロセスの熱処理温度を超えた加熱により組織が変化したためと考えられる。

SS400 (図-3.4.9) の素材の吸収エネルギーは SM490YB、SM570Q 及び SM570TMC と比較して低く、遷移温度も高温側である。冷間曲げ加工後では  $0^{\circ}\text{C}$ で大きく低下しており、この理由として SS400 はシャルピー吸収エネルギーを要求していないこと、及び古い年代の鋼材であることが言える。冷間曲げ加工後  $900^{\circ}\text{C}$ 熱間加工では、SM490YB と同様に組織の変態点付近である  $900^{\circ}\text{C}$ の加熱のため冷間曲げ加工によるひずみの影響がなくなり、さらに組織が細粒化したことにより素材の吸収エネルギーと同程度となっている。



表-3.4.6 SM570Q 及び SM570TMC 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SM570Q	47J 以上 (試験温度-5°C)	素材	表面	QA1	-5	286
				QA2	-20	262
				QA3	-40	205
				QA4	-60	193
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	QC1	-5	271
				QC2	-20	275
				QC3	-40	187
				QC4	-60	88
		冷間曲げ加工後 650°C熱間加工	表面 (引張側)	QH61	-5	316
				QH62	-20	296
				QH63	-40	245
				QH64	-60	193
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	QH91	-5	328
				QH92	-20	327
				QH93	-40	283
				QH94	-60	271
SM570TMC	47J 以上 (試験温度-5°C)	素材	表面	TA1	-5	273
				TA2	-20	271
				TA3	-40	265
				TA4	-60	259
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	TC1	-5	255
				TC2	-20	251
				TC3	-40	227
				TC4	-60	169
		冷間曲げ加工後 650°C熱間加工	表面 (引張側)	TH61	-5	265
				TH62	-20	258
				TH63	-40	252
				TH64	-60	230
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	TH91	-5	284
				TH92	-20	315
				TH93	-40	273
				TH94	-60	269

※：3 個の試験片の平均値

表-3.4.7 SS400 (古い年代の鋼材) 衝撃試験結果

鋼種	母材の要求値	試験体の種類	採取位置	試験片 No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー※ (J)
SS400	—	素材	表面	SA1	20	125
				SA2	0	101
				SA3	-20	87
				SA4	-40	42
		冷間曲げ加工後	裏面 (引張側)	SC1	20	81
				SC2	0	43
				SC3	-20	31
				SC4	-40	18
		冷間曲げ加工後 900°C熱間加工	表面 (引張側)	SH1	20	117
				SH2	0	122
				SH3	-20	81
				SH4	-40	43

※：3 個の試験片の平均値

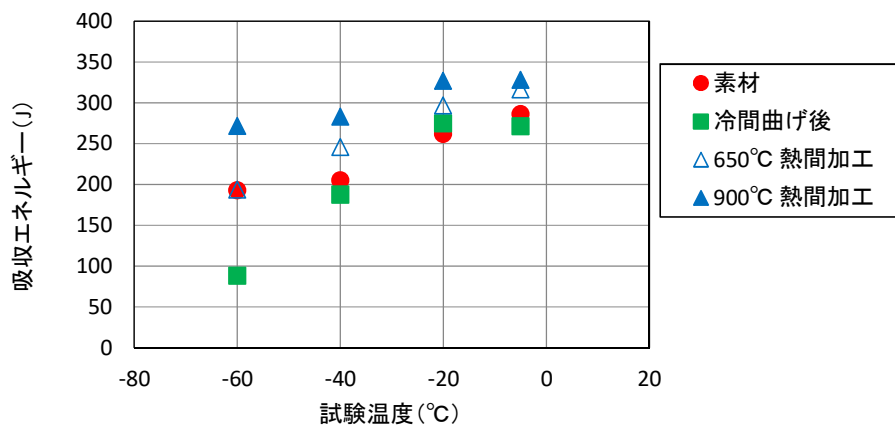


図-3. 4. 7 SM570Q の加工状態ごとの吸収エネルギー

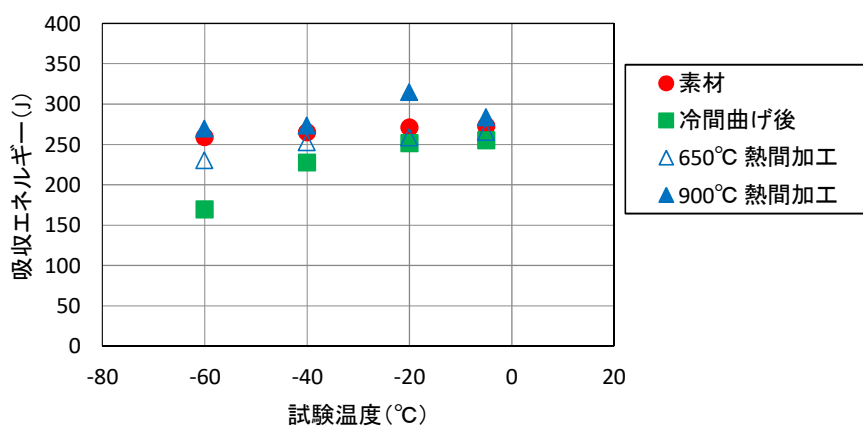


図-3. 4. 8 SM570TMC の加工状態ごとの吸収エネルギー

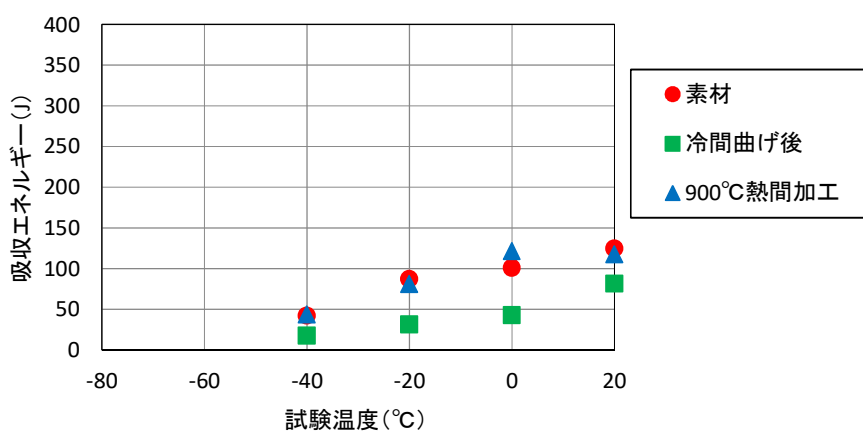


図-3. 4. 9 SS400 の加工状態ごとの吸収エネルギー

### 3.4.3 金属組織試験結果

金属組織試験は、鋼材の金属組織が熱間加工によりどのように変化したのかを確認するために行い、各試験体の素材と熱間加工後の試験体表面の金属組織を写真-3.4.1～写真-3.4.4に示す。各試験体の素材と熱間加工後の金属組織は、以下のとおりであった。

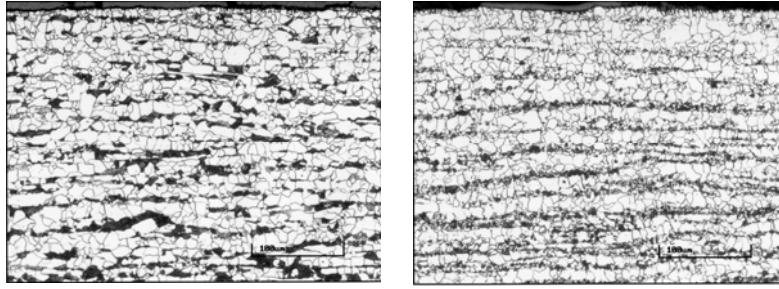
#### 素材の金属組織

- ・ SM490YB、SS400 : フェライト・パーライト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC : 焼戻しベイナイト組織

#### 熱間加工後の金属組織

- ・ SM490YB、SS400 の冷間曲げ加工後 900℃熱間加工後 : 素材よりも結晶粒が若干微細化されたフェライト・パーライト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC の冷間曲げ加工後 650℃熱間加工後 : 素材とほとんど変化がない焼戻しベイナイト組織
- ・ SM570Q、SM570TMC の冷間曲げ加工後 900℃熱間加工後 : フェライト・パーライト組織に変化

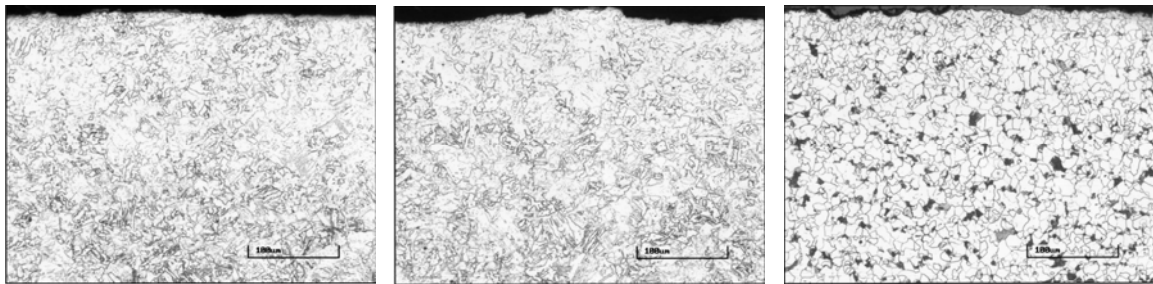
なお、各鋼材の素材と冷間曲げ加工後（SM490YB は冷間加工曲げ戻しも含む）の金属組織を比較すると、結晶粒の変形が見られず、ほとんど変化がなかった。



a) 素材

b) 900°C熱間加工後

写真-3.4.1 SM490YB 金属組織 (試験体表面)

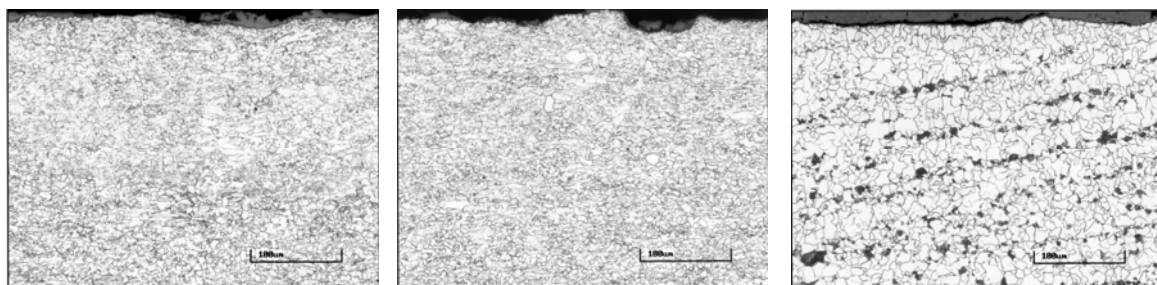


a) 素材

b) 650°C熱間加工後

c) 900°C熱間加工後

写真-3.4.2 SM570Q 金属組織 (試験体表面)

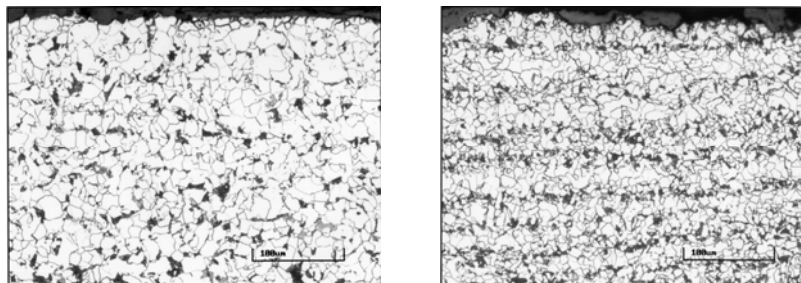


a) 素材

b) 650°C熱間加工後

c) 900°C熱間加工後

写真-3.4.3 SM570TMC 金属組織 (試験体表面)



a) 素材

b) 900°C熱間加工後

写真-3.4.4 SS400 金属組織 (試験体表面)

#### 3.4.4 硬さ試験結果（JIS Z 2244：硬さ記号 HV10）

各試験体の硬さ試験結果を図-3.4.10～図-3.4.13に示す。いずれの鋼材においても、冷間曲げ加工後の硬さが表層から10 mm付近まで上昇しており、冷間塑性加工による加工硬化が生じている。SM490YBの冷間曲げ加工後冷間加工曲げ戻しでは、さらに硬さが大きくなっている。硬さと引張強さは比例関係にあることから、冷間塑性加工により強度が高くなり、冷間曲げ加工戻しのような加工を行うと、さらに強度が高くなることがわかる。SM490YBとSS400の冷間曲げ加工後900℃熱間加工、並びにSM570QとSM570TMCの冷間曲げ後650℃熱間加工の硬さは、素材とほぼ同じになっている。SM570QとSM570TMCの冷間曲げ加工後900℃熱間加工の硬さは、引張試験結果と同様に大きく低下しており、図-3.4.10に示すSM490YBの素材と同等の硬さまで低下している。

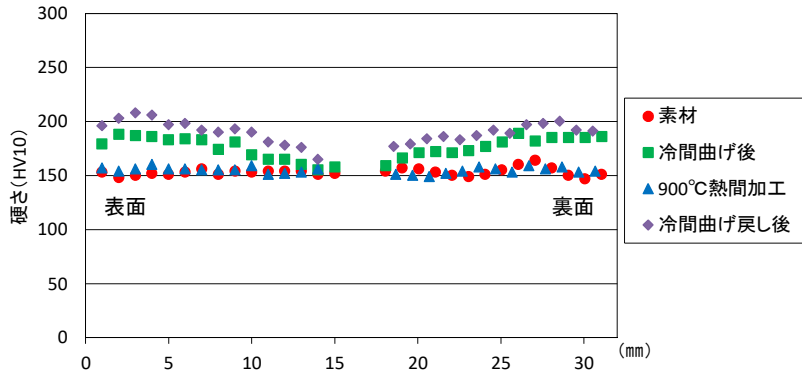


図-3. 4. 10 SM490YB の加工状態ごとの硬さ

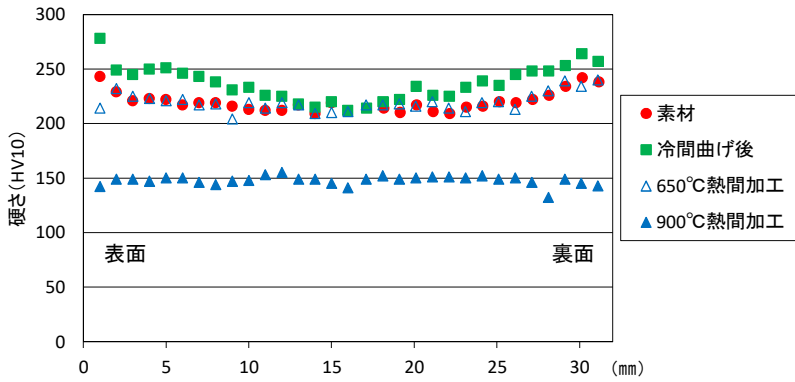


図-3. 4. 11 SM570Q の加工状態ごとの硬さ

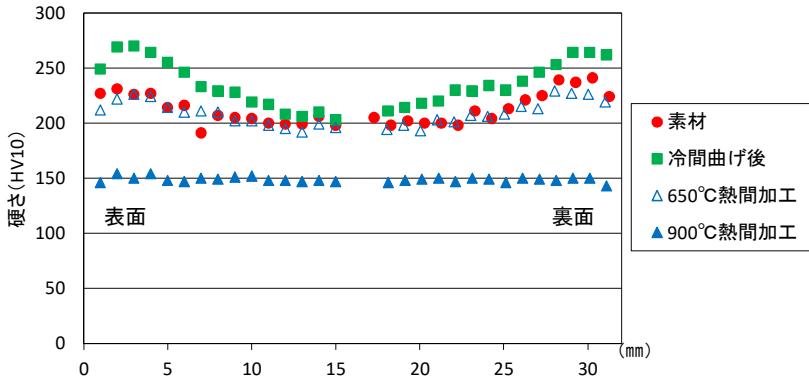


図-3. 4. 12 SM570TMC の加工状態ごとの硬さ

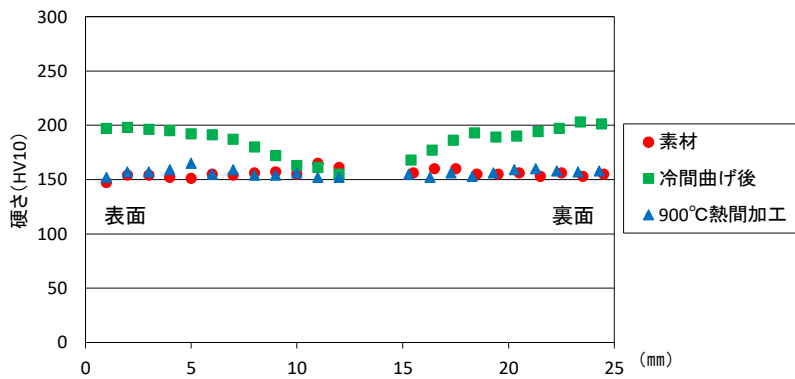


図-3. 4. 13 SS400 の加工状態ごとの硬さ

### 第3章 参考文献

- 3.1) 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
- 3.2) 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
- 3.3) 三木千壽，佐々木栄一，休場裕子，竹之井勇：引張および圧縮の塑性歪み履歴による鋼材の破壊靱性劣化，土木学会論文集，No.640/I-50，2000.1