

# 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

本間宏二<sup>1</sup>・三木千壽<sup>2</sup>・征矢勇夫<sup>3</sup>  
笹尾英弥<sup>4</sup>・奥村健人<sup>5</sup>・原修一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 東京工業大学社会人博士課程 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)  
(新日本製鉄株式会社 鋼構造研究開発センター (〒293 千葉県富津市新富20-1))

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>3</sup>工博、新日本製鉄株式会社 鋼材第二研究部 (〒293 千葉県富津市新富20-1)

<sup>4</sup>新日本製鉄株式会社 厚板営業部 (〒100 東京都千代田区大手町2-6-3)

<sup>5</sup>川崎製鉄株式会社 厚板セクター (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3)

<sup>6</sup>住友金属工業株式会社 厚板技術部 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3)

本研究は、各種の構造用鋼材に対して歪時効を発生させ、その後、シャルピー試験を行って、歪時効によるシャルピー吸収エネルギーと遷移温度の変化を実験的に検討したものである。橋梁における冷間曲げ加工半径は、塑性歪を受けた鋼材の歪時効脆化を防止する観点から、板厚の15倍以上とすることが規定されてきた(3%の塑性歪以下に対応)。本研究では、最近の構造用鋼材を対象として歪時効脆化の実験を行い、許容される冷間曲げ加工半径の検討を行った。その結果、従来の許容値(3%)より大きな塑性歪(7.5%~10%)を与えても、必要な靱性が確保されることが明らかになった。そこで、鋼材のシャルピー吸収エネルギーレベルに応じた冷間曲げ加工半径の許容値を提言するものである。

**Key Words :** structural steel, bridge design, cold working, strain aging, toughness, charpy test

## 1. はじめに

鋼橋等の鋼構造物において、鋼材の冷間曲げ加工は、鋼構造部材を製作する上で極めて有用な手法の一つである。桁、塔、橋脚、床版をはじめとして、各種の部材で冷間曲げ加工が用いられることがあるが、最近では、景観上からも曲線で構成される断面が好まれる例も見受けられる。箱桁や主塔のような矩形断面部材を製作する上で、角溶接を行うことに代わって曲げ加工で対処する例<sup>1),2),3)</sup>も現われてきており、鋼材の冷間曲げ加工は、景観に優れた構造や、新しい構造形式を考える上で、より重要な手法になりつつあると言えよう。

一方、鋼材の冷間加工は、歪み時効による靱性の低下をもたらすことが知られており、そのため、道路橋示方書<sup>4)</sup>では、「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(t)の15倍以上とするのを原則とする」と規定している。

これまでの道路橋示方書の改訂にあたって、この規定の緩和の可能性が議論されてきた。例えば、従来の鋼材に比べて最近の鋼材の不純物は低減されており歪み時効の程度も小さいであろうとの推測か

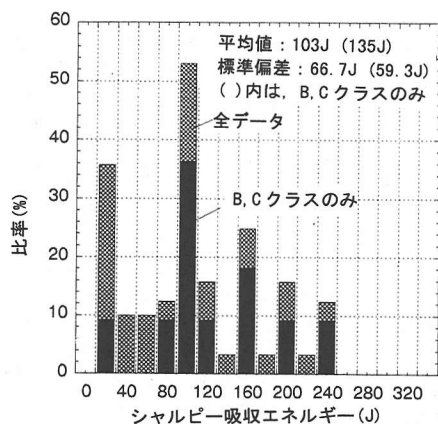
ら、冷間曲げ加工規定の妥当性を検討するために、1970年代には、溶接構造用鋼材のひずみ時効脆化の現状が実験的に調査された<sup>5)</sup>。しかし、その時の結論として道路橋示方書では、「予歪みの増加に伴ってシャルピー吸収エネルギーは低下し、3% (曲げ半径15tに相当)でも相当低下するが、5% (曲げ半径10tに相当)ではほとんどのデータが1.0kgf・m (9.8J)以下となっており、曲げ半径15t以上は妥当である」と記述されている<sup>4)</sup>。また、同時に「SM570等の調質鋼ではシャルピー吸収エネルギーが40℃までほとんど低下しない」(すなわち遷移温度が低い)ことも述べられており、その結果、現行規定の解説の中に、このような材料を使用する場合や、適当な試験を行って脆性破壊が生じないことを確認した場合はこの限りでないことが追加されている。また、現行規定では、「鋼床版に用いられるトラフリブに関しては、板厚の5倍まで加工して良い」という例外を設けている。このように、現行の道路橋示方書では、個別に試験した鋼種や特定の部材によっては、より大きな冷間曲げ加工が許容できる扱いとなっているが、曲げ半径15t以下に関して統一的な判断基準は示されていない。

一方、1970年代以降の鋼材の進歩には目覚ましいものがあり、連続鋳造設備の導入、脱ガス装置導入など製鋼設備の技術革新や、さらには1980年代に制御圧延制御冷却（TMCP）技術が導入される等の進歩をとげてきている。製鋼設備の技術革新は、鋼中の不純物である硫黄、りんなどの元素の含有量の低下をもたらし、またTMCP技術は、炭素量を低減しても、結晶組織を微細化することで所定の強度と高靱性を保持しつつ溶接性を確保した鋼の生産を可能とした。従って、これらの鋼材の進歩を取り入れた形で新しい利用技術を検討することが、鋼橋における鋼材の最適利用の観点で必要といえる。近年の橋梁用鋼材の進歩を鑑みると、この曲げ半径15tの規定には改めて検討の余地があるものと考えられる。

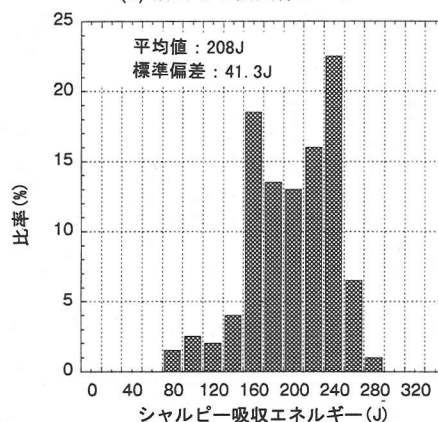
鋼材のシャルピー吸収エネルギーに注目して見た橋梁用鋼材の進歩の一例を図-1に示す。図-1(a)は、1970年代に堀川<sup>5)</sup>によって行われた歪み時効試験に供された鋼材のシャルピー吸収エネルギーの分布を示したものである。一方、図-1(b)及び(c)は、1991年～1993年に行われた橋梁用鋼材（SM490YB及びSM570）のシャルピー吸収エネルギー調査の結果を示したものである。(a)ではシャルピー吸収エネルギーの規定のない鋼種(SS400, SM490A等)を含んでおり、それらを除外した分布も同時に示した。これらを比較すると、シャルピー吸収エネルギーの平均値で(b)及び(c)は(a)の2倍以上にも達している。従って、現在の橋梁用鋼材で、シャルピー吸収エネルギーの規定のある鋼材を対象とするならば、冷間曲げ加工の許容値も緩和できる可能性が高い。

冷間曲げ加工の許容値を何にとるかを判断する基準としては、依然明確なもの存在していないが、冷間加工部の靱性低下による脆性破壊を防止する観点から、シャルピー試験における吸収エネルギーを一定の値(例えば素材に要求される吸収エネルギー)以上とすることや遷移温度を一定の値(例えば0℃)以下とすることで、橋梁の使用条件下における安全性を確保しようとした考え方が提案されている<sup>5)</sup>。

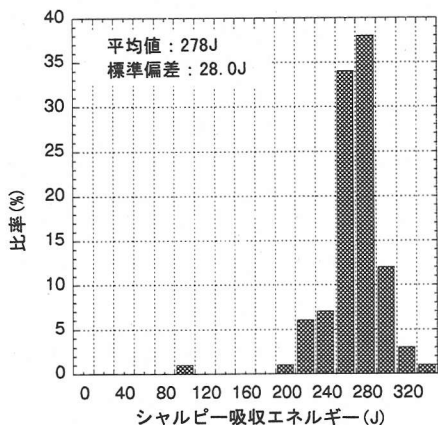
一方、脆性破壊を防止するのに必要なシャルピー吸収エネルギーは、歴史的には、1940年代初頭のLiberty船の事故を契機として発展し、その後のBarsomら<sup>7)</sup>による橋梁用鋼材の所要靱性の検討によれば、シャルピー吸収エネルギーに換算して、地域別の基準温度(例えばZone2で4.4℃)で15～35ft・lbs(20J～47J)を要求値としている。また、JIS等のわが国の規準では、溶接構造用圧延鋼材B種について0℃で27Jを、C種について0℃で47Jを必要シャルピー吸収エネルギーとしている。そこで、冷間加工による歪み時効脆化が発生したとしても、素



(a) 堀川らの供試材データ



(b) 橋梁用鋼材の実績調査データ (SM490YB)



(c) 橋梁用鋼材の実績調査データ (SM570)

図-1 鋼材のシャルピー吸収エネルギーの分布  
(b)および(c)の出典：鋼橋技術研究会

材に要求されるシャルピー吸収エネルギーと同等の値を確保することを前提にして、冷間曲げ加工の許容値を決定することは、現時点で妥当な判断と言えます

表-1 試験鋼材の化学成分

供試鋼材		化 学 成 分 (mass%)													
No.	鋼材規格	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	sol Al	N	Ceq
1	SM490B-TMC	0.10	0.37	1.44	0.018	0.003	0.011	0.02	0.03	0.001	0.016	0.003	0.022	0.0032	0.35
2	SM490YB	0.16	0.34	1.30	0.020	0.002	0.010	0.02	0.02	0.010	0.015		0.029	0.0034	0.40
3	SM570Q	0.14	0.23	1.44	0.012	0.005									0.39
4	SM490B	0.16	0.34	1.33	0.02	0	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01		0.03	0.0033	0.39

表-2 試験鋼種と機械的性質

供 試 鋼 材				機 械 的 性 質		
No.	鋼材規格	製造方法	板厚(mm)	降伏強さ	引張強さ	伸び(%)
1	SM490B-TMC	熱加工制御(TMCP)	20	424	522	28
2	SM490YB	制御圧延(CR)	20	418	538	27
3	SM570Q	調質鋼(QT)	20	560	651	39
4	SM490B	通常圧延	20	349	520	25.3

強度の単位：MPa

よう。

そこで、本研究では、歪み時効後の各種鋼材において、著者らが行ってきた既往の研究<sup>7),8)</sup>も含めて総括、検討することによって、冷間曲げ加工の規定緩和の可能性を提言するものである。

## 2. 実験方法

本研究では、各種の橋梁用鋼材に対して歪時効を発生させ、その後、シャルピー試験を行って、シャルピー吸収エネルギーと遷移温度の面での変化を検討した。供試材の選定にあたっては、前述したように、最近の鉄鋼製造法の進歩を反映した鋼材を評価の対象に加える目的から、熱加工制御鋼 (No.1 SM490-TMC)、制御圧延鋼 (No.2 SM490-CR)、調質鋼 (No.3 SM570Q) を選定した。さらに、通常構造用鋼材 (No.4 SM490B) を加えて、計4種類とした。試験鋼材の鋼種と化学成分を表-1に、製造方法・機械的性質を表-2に示す。

まず、冷間塑性加工に対応する歪を導入するために、図-2に示すように圧延方向に3%、7.5%、10%で塑性歪を与えるよう引張試験を行った。試験体は、鋼板の圧延方向と引張の方向が一致するようJIS14B号引張試験片を切り出した。鋼板の圧延方向と圧延直角方向では一般に機械的性質に若干の差異があることが知られている。そこで、本実験では、予歪を与える方向を圧延方向に統一した。ただし、

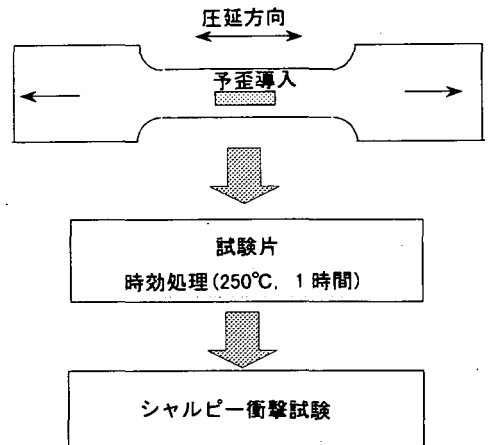


図-2 実験方法

圧延方向と圧延直角方向に歪を与えた場合の歪み時効脆化による吸収エネルギー低下量には、有意な差は認められないことが報告されている<sup>5)</sup>。

予歪導入後、引張試験片の平行部を切断し、歪時効の効果を与えるために、250℃で1時間保持の時効処理を行った。この温度と保持時間は、反応速度論に基づき提案された時効促進処理<sup>9)</sup>であり、その後、自然放置による歪時効との対比がなされて、その妥当性が示されている<sup>5)</sup>ため、同じ時効処理

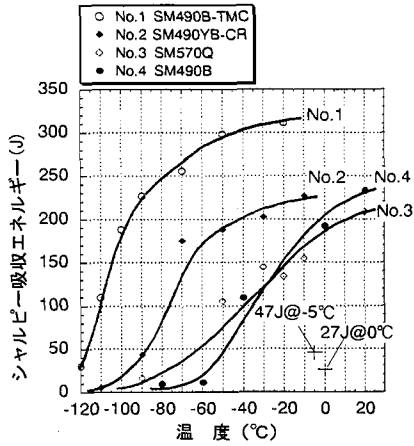


図-3 供試材の初期シャルピー吸収エネルギー遷移曲線変化

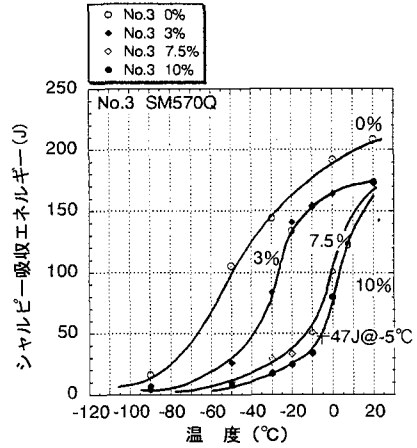


図-6 供試材No.3のシャルピー遷移曲線の歪み時効による変化

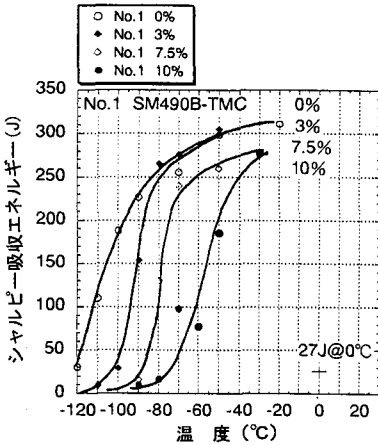


図-4 供試材No.1のシャルピー遷移曲線の歪み時効による変化

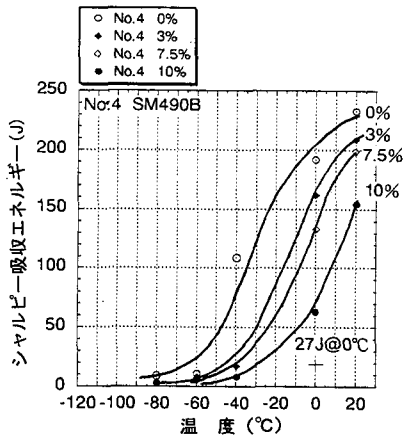


図-7 供試材No.4のシャルピー遷移曲線の歪み時効による変化

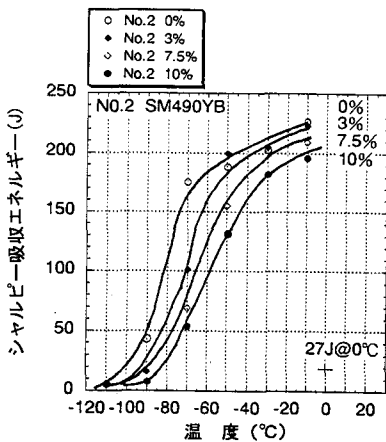


図-5 供試材No.2のシャルピー遷移曲線の歪み時効による変化

条件を採用した。

実験に供したシャルピー試験片採取にあたっては、引張試験片の長手方向を一致させて切り出した。シャルピー試験片は、JIS Z2202金属材料衝撃試験片に記載される4号試験片を用い、試験片中心が板厚の1/4の位置となるよう採取した。試験条件は、原則的に-50~20°Cの間の6温度で各3本試験を行うものとしたが、遷移温度がより低温側にある場合には、より低温側にシフトして試験を行い、シャルピー衝撃値の遷移曲線を求めるようにした。

### 3. 実験結果

まず、実験に供した鋼材に対して予歪を導入する前の初期状態でシャルピー試験を行い、シャルピー

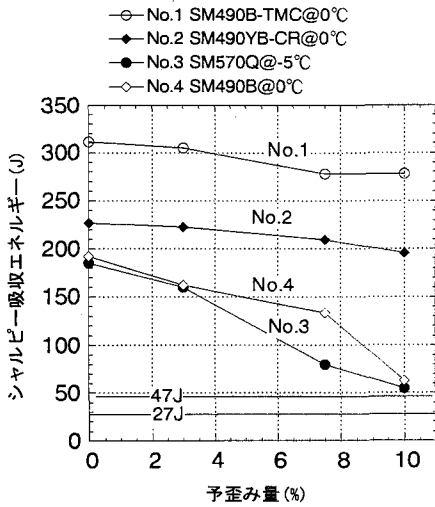


図-8 シャルピー吸収エネルギーの歪み時効による変化

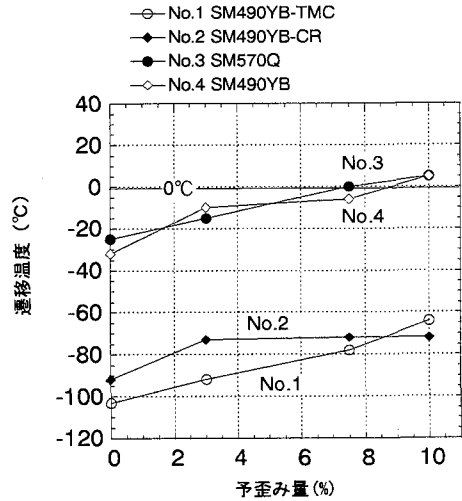


図-9 シャルピー遷移温度の歪み時効による変化

吸収エネルギーの遷移曲線を求めた結果を図-3に示す。シャルピー衝撃値の規格は、JIS G3106「溶接構造用熱間圧延鋼材」および、JIS G3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」に規定される試験温度とシャルピー吸収エネルギーの関係で示されている（以下この試験温度を規定温度と称する）。

本実験に用いた鋼材は、いずれも0°C～-5°C付近は、ほぼシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線におけるアッパーシェルフ領域となっているとともに、アッパーシェルフエネルギーの絶対値も大きい。特に供試材No.1(SM490B-TMC)で300J以上、No.2(SM490YB-CR)、No.3(SM570Q)、No.4(SM490B)で200J前後である。

次に、これらの鋼材を用いて、前に述べた実験方法で3%、7.5%、10%の歪を与えた試験片に対して時効処理を行った後、シャルピー試験を行い、シャルピー吸収エネルギーの遷移曲線を求めた。結果を、それぞれ図-4～図-7に示す。図中のプロットは1温度あたり3本のシャルピー吸収エネルギーの平均値を示している。いずれの場合も、歪時効の影響が明瞭に見られ、予歪量が増加するに従って、遷移曲線が高温側にシフトしている。また、一定の温度のもとでは、予歪量が増加するに従ってシャルピー吸収エネルギーが低下していくことが確認された。また、比較のために、図中にシャルピー吸収エネルギーの規格値である、 $vE_0 \geq 27J$  (SM570については $vE_{.5} \geq 47J$ )を同時に示した。

さらに、一定温度におけるシャルピー吸収エネルギーの変化で見た歪時効の影響を図-8に、遷移温度の変化で見た歪時効の影響を図-9に示す。図-8より、予歪の増加とともにシャルピー吸収エネルギーが低下していくことが明瞭に読み取れる。また、

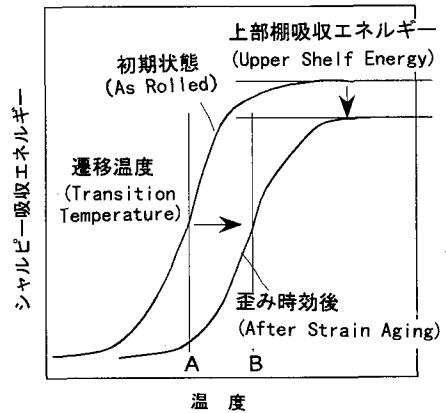


図-10 シャルピー吸収エネルギー遷移曲線の歪み時効による変化の模式図

図-9より、初期遷移温度は、-30°C程度のものから-100°C程度のものまで各種あるが、いずれも遷移温度が予歪の増加とともに上昇していることがわかる。

#### 4. 考察

実験に供した鋼材に対する歪み時効試験の結果をシャルピー試験に基づき考察する。

歪み時効により引き起こされるシャルピー吸収エネルギーの遷移曲線の変化は模式的に図-10のようになる。すなわち歪み時効による影響は、上部棚(Upper Shelf)吸収エネルギーの若干の低下とともに、初期状態の鋼材の遷移曲線の高温側への平行移動に顕著に現われている。その結果として一定温度

表-3 歪時効試験材一覧

No.	鋼材規格	板厚 (mm)	vE (J)	備考
1	SM490-TMC	20	311	本研究
2	SM490YB-CR	20	227	
3	SM570Q	20	185	
4	SM490YB	20	192	
5	SM400B	22	168	文献8)
6	SM490YB	19	39	
7	SM400B	16	250	文献7)
8	SM520B	36	284	
9	SMA490BW	16	98	文献10)
10	SMA490BW	22	225	
11	SMA490BW	22	203	
12	SMA490BW	25	260	
13	SMA490BW	25	260	
14	SM570Q	25	210	文献5)
15	SM490B	25	175	
16	SM490C	25	160	
17	SM490YB	13	130	
18	SM490YB	19	110	
19	SM400B	25	100	
20	SM490B	25	90	
21	SM490YB	19	35	

vE: 規定温度でのシャルピー吸収エネルギー

で見た場合、シャルピー吸収エネルギーの低下が観測される。特に試験温度が歪み時効前後の遷移温度の間(図中A-B間)に位置する場合、シャルピー吸収エネルギーの低下は極めて大きくなる。そこで、歪み時効により大幅なシャルピー吸収エネルギーの低下を防止する観点からは、歪み時効後の遷移温度(図中B)をシャルピー試験の規定温度以下(たとえば0℃以下)とすることが望ましい。ここでは、これを考慮に入れて検討するものとする。ただし、冷間曲げ加工の許容値の判断基準は、冒頭に述べたように、脆性破壊を防止する観点から「歪時効後のシャルピー吸収エネルギーが素材に要求される値以上」という考え方を基本とすることとする。

まず第一に、歪時効後のシャルピー吸収エネルギーが、素材に要求される値以上という考え方に準ずるならば、図-8から読み取れるように、実験に供した全ての供試材について、10%の歪レベルでも、その考え方を満足する。特に、No.1(熱加工制御鋼)、No.2(制御圧延材)は、10%の歪を与えた場合でも、シャルピー吸収エネルギーが、0℃で200J~250Jにあり、10%の歪時効による脆化はほとんど問題にならない。

さらに、第二に遷移温度が0℃以下を目安とするならば、図-9から読み取れるように、供試材No.3、No.4で7.5%まで、遷移温度が0℃以下、供試材No.1、No.2については、10%まで条件を満足していることがわかる。特に、No.1(熱加工制御鋼)、No.2(制御圧延材)は、10%の歪を与えた場合でも、遷移温度が-50℃程度と充分低温側にあることがわかる。

以上の2つの条件を同時に考慮した場合、No.1(熱加工制御鋼)、No.2(制御圧延材)で10%の冷間加工歪みが許容でき、No.3、No.4供試材でも7.5%の冷間加工歪みは許容できる量といえる。曲げ加工半径に換算すると、それぞれ5t、7t程度である。

今回の供試鋼材は、先に述べたようにシャルピー吸収エネルギーの規格である $vE_0 \geq 27J$ または $vE_5 \geq 47J$ に比べてはるかに高い値を示しており、No.1、No.2で200J以上、No.3、No.4で150J以上となっている。このような鋼材を前提にすれば、冷間加工は現状規定の15tより小さな曲げ加工半径を適用できる可能性が極めて高い。

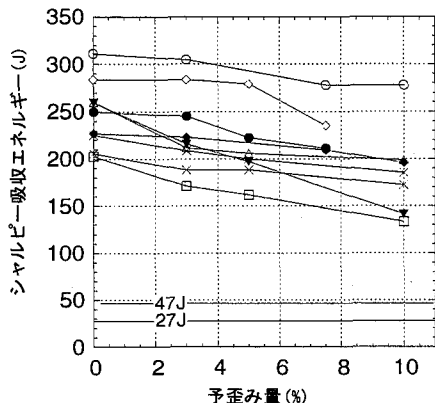
しかしながら、冷間曲げ加工の規定の検討においては、JIS規格でシャルピー吸収エネルギーの最低レベルの鋼材が供給された場合も含めて、歪時効による靱性低下が問題とならないことが保証されなければならない。

そこで、より幅広く各種の鋼材を検討し、シャルピー吸収エネルギーのレベルに応じた判断を行うこ

とが適切であると考えられるので、既往の研究を総括して検討を試みた。歪み時効による鋼材の脆化に関する研究は、1970年代の堀川らの研究<sup>6)</sup>、鋼材倶楽部の研究<sup>10)</sup>と、1990年代に実施した著者らの研究<sup>7),8)</sup>等があるので、ここでは、今回の実験結果に加えて、既往の研究を含めて歪時効後のシャルピー試験結果を総括し、歪時効の影響について考察を行うものとする。その際、既往の研究における試験材の中で、現行のJIS規格(SM,SMA)に適合する鋼種でシャルピー吸収エネルギーの規定があるものを検討の対象とした。表-3に今回の試験材と既往の研究における試験材の一覧表を示す。これらの試験材に対する結果を、規定温度でのシャルピー吸収エネルギー初期値(予歪を導入する前の初期状態での値)の範囲ごとに、150J未満、150J以上~200J未満、200J以上に分類し、歪み時効の影響を整理した。規定温度でのシャルピー吸収エネルギーの変化で整理したものが、図-11、遷移温度の変化で整理したものが、図-12である。

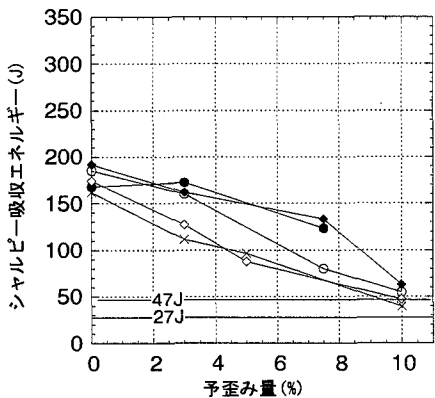
図-11、図-12の結果をもとに、前述の2つの条件を同時に考慮して検討すると、200J以上の供試材については、10%の歪レベルで、歪時効後のシャルピー吸収エネルギーが、素材に要求される値(規定温度で27Jまたは47J)以上、かつ、遷移温度が0℃以

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



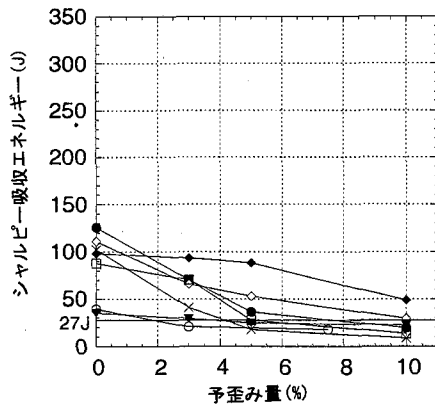
(a)  $vE \geq 200J$

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



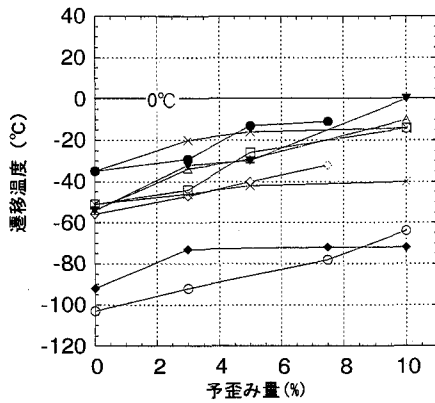
(b)  $150J \leq vE < 200J$

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



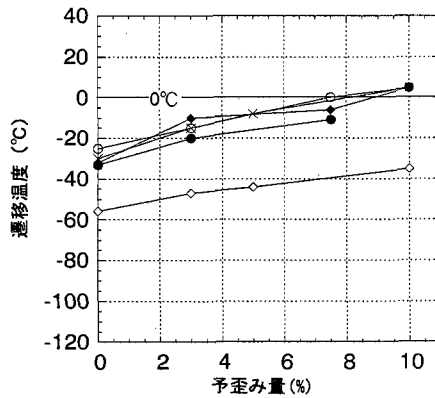
(c)  $vE < 150J$

- No.1 SM490B-TMC
- No.2 SM490YB-CR
- No.7 SM400B
- ◇ No.8 SM520B
- × No.10 SMA490BW
- No.11 SMA490BW
- ▼ No.12 SMA490BW
- △ No.13 SMA490BW
- × No.14 SM570Q



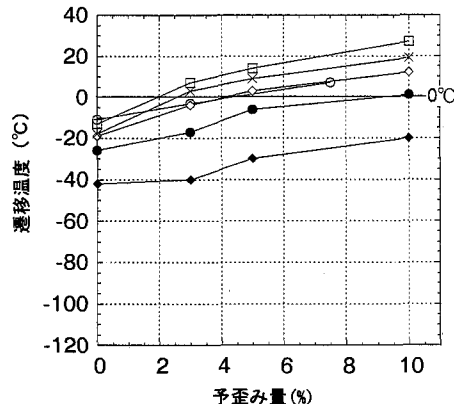
(a)  $vE \geq 200J$

- No.3 SM570Q
- No.4 SM490B
- No.5 SM400B
- ◇ No.15 SM490B
- × No.16 SM490C



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

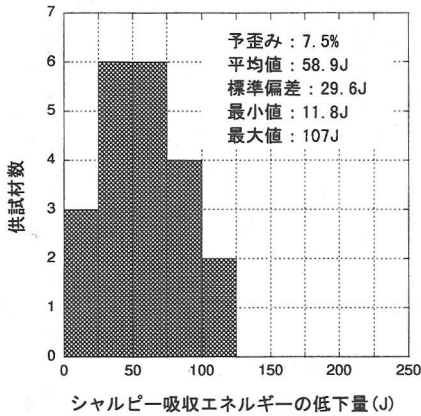
- No.6 SM490YB
- No.9 SMA490BW
- No.17 SM490YB
- ◇ No.18 SM490YB
- × No.19 SM400B
- No.20 SM490B
- ▼ No.21 SM490YB



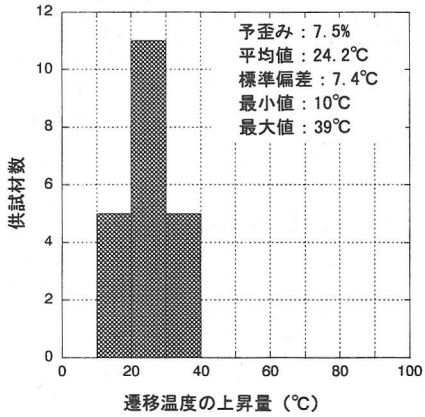
(c)  $vE < 150J$

図-11 規定温度でのシャルピー吸収エネルギー(vE)の歪み時効による変化

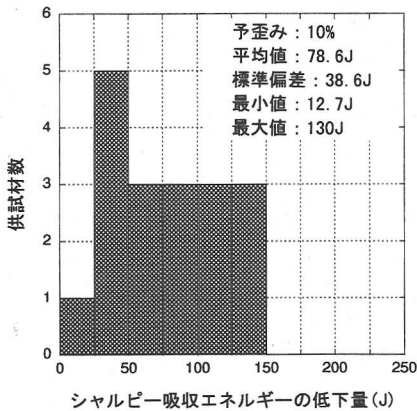
図-12 シャルピー遷移温度の歪み時効による変化



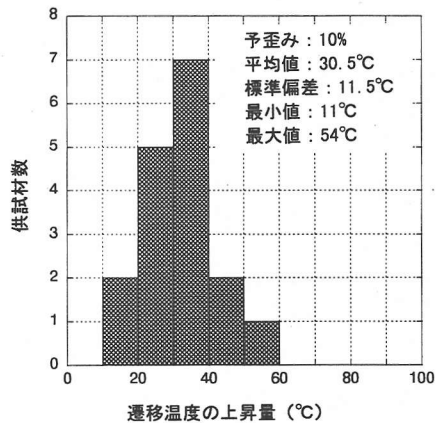
(a)予歪み7.5%の場合のシャルピー吸収エネルギー低下量



(a)予歪み7.5%の場合の遷移温度上昇量



(b)予歪み10%の場合のシャルピー吸収エネルギー低下量



(b)予歪み10%の場合の遷移温度上昇量

図-13 シャルピー吸収エネルギー低下量の分布でみた歪時効試験の結果

図-14 遷移温度上昇量の分布でみた歪時効試験の結果

下を満足していることがわかる。また、150J以上の供試材については、7.5%の歪レベルで、2つの条件を同時に満足している。

さらに、この結果について、吸収エネルギーの低下量の分布で整理すると、図-13を得る。また、遷移温度上昇の分布で整理すると、図-14を得る。図-13(a)は、7.5%の予歪みによるシャルピー吸収エネルギー低下の分布を示しているが、平均で58.9J、最大で107Jの低下が見られる。また、図-13(b)は、10%の予歪みによる場合を示しているが、平均で78.6J、最大で130Jの低下が見られている。

すなわち、シャルピー吸収エネルギーの初期値が150J以上の鋼材、または200J以上の鋼材を前提にするならば、歪み時効によるエネルギー低下を見込んでも、それぞれ7.5%、10%の冷間加工による歪み

が許容されることがわかる。

冒頭に述べたように、最近の橋梁用鋼材のシャルピー吸収エネルギーの分布の平均値が200J以上であることを考慮すると、そのような鋼材の実態に則した規定を設けることが必要と考えられる。そこで、以上の結果をもとに鋼材の規定温度でのシャルピー吸収エネルギーのレベルに応じて、次のような冷間曲げ加工半径の適用が可能であると考えられる。

すなわち、

1) 素材のシャルピー吸収エネルギーが200J以上であれば10%程度 (曲げ半径5*t*程度に対応)

2) 150J以上であれば7.5%程度

(曲げ半径7*t*程度に対応)

の歪による時効が許容できると考えられる。以上の結果をまとめると、表-4のようになる。ただし、前述したように圧延方向と圧延直角方向に機械的特性



表-4 冷間曲げ加工の許容値

	板厚の7倍以上 (7.5%予歪みに対応)	板厚の5倍以上 (10%予歪みに対応)
シャルピー吸収 エネルギー (J)	$vE \geq 150J$	$vE \geq 200J$

vE : JIS G3106、G3114に規定される温度でのシャルピー吸収エネルギー

が若干異なることから、本表の適用にあたって、圧延方向に曲げ加工を行う場合にはシャルピー吸収エネルギーの値として圧延方向の値を、圧延直角方向に曲げ加工を行う場合には圧延直角方向の値を用いることが必要であるといえる。

## 5. 結論

1) 歪時効後のシャルピー試験の結果、歪時効による遷移温度上昇および、それに伴うシャルピー吸収エネルギーの低下が観察された。この傾向は、付与した歪みが大きいほど顕著であり、歪時効後にシャルピー吸収エネルギーが素材に要求される規格値を満足するためには、鋼材のシャルピー吸収エネルギーが歪時効による低下に相当するマージンをもって高いことが必要である。

2) 歪時効後のシャルピー吸収エネルギーが素材に要求される規格値以上、かつ遷移温度が0℃以下を許容できる歪レベルの判断基準とすれば、塑性歪みを受ける方向(曲げ加工により導入される歪みの方向)での素材のシャルピー吸収エネルギーが、規定温度で200J以上であれば10%程度(曲げ半径5t程度に対応)、150J以上であれば7.5%程度(曲げ半径7t程度に対応)の歪による時効が許容できる。

3) 現在のJISの溶接構造用圧延鋼材B種のシャルピー吸収エネルギーの平均は200J以上であり、規格値を大幅に上回っている。冷間曲げ加工の許容値は、供給される材料の実情に即して決定すべきであり、現在の橋梁用鋼材でシャルピー吸収エネルギーの規定のある鋼材を対象とするならば、素材のシャルピー吸収エネルギーに応じて、現在の曲げ加工半径の規定である「板厚の15倍以上」を緩和する規定を別途設けることは妥当であると考えられる。

謝辞：本研究は、東京工業大学創造プロジェクト都市基盤施設研究体「高性能鋼の橋梁への利用研究会」の活動として実施したものであり、貴重な助言をいただきました研究会参加メンバー各位に感謝いたします。また、橋梁用鋼材の実情調査、および一部の歪み時効試験は、鋼橋技術研究会施工部会「曲げ加工WG」にて実施されたものであり、ここに関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Miki, C., et al: Design, Fabrication and Erection of Cable Stayed Bridges in the Tokyo International Airport, *Proceeding, Innovation of Cable-Stayed Bridge*, pp.273-284, 1991.4.
- 2) 渡辺英一, 杉浦邦征, 森忠彦, 鈴木巖: 補剛R付き箱型断面短はり一柱の強度と変形性能, *構造工学論文集 Vol.38A*, pp143-154, 1992.3.
- 3) 中井博, 宮村重範, 山内幸裕, 田中実雄, 松浦健二: 半径500mmの曲面を持つ鋼製橋脚の設計・施工, *橋梁と基礎*, pp.17-22, 1987.2.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 鋼橋編, 1994.2.
- 5) 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, *土木学会論文集*, No.300, pp.13-20, 1980.
- 6) Barsom, J.M. & Rolfe, S.T.: Fatigue and Fracture Control in Structures, *Prentice-Hall Inc., New York*, 1987.
- 7) 森好生, 塩崎正孝, 三木千壽, 栗原正好: 歪時効による鋼材の靱性変化の評価, *構造工学論文集 Vol.36A*, pp389-397, 1990.3.
- 8) 三木千壽, 館石和雄, 船見純一: 冷間加工を受けた構造用鋼材の破壊じん性に関する研究, *土木学会第49回年次学術講演会講義集*, pp.586-587, 1994.
- 9) 奥村敏恵: 80キロ高張力鋼溶接部のひずみ時効の影響調査, *JSSC Vol.9, No.89*, 1973.5.
- 10) (社)鋼材倶楽部: 耐候性鋼材の研究—耐候性鋼材の構造物研究会報告書一, 1980.

(1996. 9.2 受付)

## A STUDY ON STRAIN AGING OF COLD WORKED STRUCTURAL STEEL AND ALLOWABLE COLD WORKING RADIUS

Koji HOMMA, Chitoshi MIKI, Isao SOYA,  
Hideya SASAO, Taketo OKUMURA and Shuuichi HARA

In this paper, the strain aging of cold worked structural steel is studied to determine allowable cold working radius of steel bridges. In Japanese bridge design code, the allowable cold working radius of steel plate used in bridges is specified to be more than 15 times of thickness of steel plate(This corresponds to the plastic strain of 3%). The effects of strain aging on modern steels are discussed based on the experimental data of Charpy absorbed energy. It was found that the plastic strain of 7.5% ~ 10% is acceptable to ensure the required toughness of structural steels. As a result, the change of allowable cold working radius is proposed with regards to the level of Charpy absorbed energy.