

## 冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化

STRAIN AGING EMBRITTLEMENT OF STRUCTURAL  
STEEL DUE TO COLD FORMING

堀 川 浩 甫\*

By Kohsuke HORIKAWA

## 1. はじめに

鋼材に冷間塑性加工を施し塑性ひずみを与えると鋼材は硬化し（加工硬化）、これに伴って靱性も劣化すること、加工後の時間の経過とともに硬化が進行すること（ひずみ時効）は、よく知られているところであり、自動車などに用いられるプレス成形用の鋼材については多くの系統的な研究がなされている<sup>1),2)</sup>。

一方、橋梁においてもすでに1938年およびその前後に連続して起こった Hasselt 橋、Rüdersdorf 橋、Zoo 橋の脆性破壊による落橋事故に関連した研究報告書<sup>3)</sup>においてそのかかわりが示唆されている。

1978年東京で開催された溶接学会第3回国際シンポジウムにおいて、W. Schönherr は溶接構造物の破壊例 (Cracking or Fracture) の分析結果を報告しているが、それによると全破壊事例294件中26件がひずみ時効の影響を受けており、脆性破壊と判断されたものに限るならば82件中19件が、ひずみ時効の影響を受けていると思われるとしている<sup>4)</sup>。

このように破壊事例にひずみ時効が関連しているとして主としてドイツにおいて研究が進められ、Klöppel が提案し<sup>5)</sup> 1958年頃 DAST-Richtlinie となった<sup>6)</sup>溶接鋼構造物に対する鋼の等級 (DIN 17100 における等級) 選定のための点数制において、冷間塑性加工には大きなウェイトが与えられた。DAST-Richtlinie は Bierett の研究<sup>7)</sup>に基づき1973年に改訂された<sup>8)</sup>が、ここでも冷間塑性加工に対してはそれ以外の要因とは区別して特に厳しい制限を与えている。

本件に関する各国の橋梁に関する技術規準における取扱については、土木学会鋼構造委員会鋼構造進歩調査小委員会により土木学会誌60巻10号(1975年9月)に報告されているところであるが、東ドイツおよびハン

ターの道路橋の技術規準類には1973年改訂の DAST-Richtlinie とほぼ同一の規定がみられ、アメリカ、イギリス、ソビエトの橋梁に関する技術規準類にはひずみ時効脆化を考慮したと思われる規定は見当たらない<sup>9)</sup>。

個々の橋梁の例としては、冷間加工、時効処理後のシャルピー吸収エネルギー ( $U E_{25}$ ) が素材購入時のその50%以上なければならないの特記仕様を設けたルクセンブルグの Charlotte 橋の例が知られている<sup>10)</sup>。

このような背景のもとで、溶接鋼道路橋示方書1968年追補において、

“鋼板の曲げ加工を行う場合は、内側半径が少なくとも15t以上とするのがよい” (第10条第2項) と定められた<sup>11)</sup>。これが1972年の示方書統合に際して、“鋼板の曲げ冷間加工を行う場合は、内側半径が板厚の15倍以上でなければならない” (第15.3.2条第6項)

と改められ現在に至っている<sup>12)</sup>。

ところで、鋼床版橋の閉リブの加工においては、プレスによる内側曲げ半径が板厚の2~3倍程度の冷間加工が行われてきた。その内側曲げ半径を板厚の15倍以上とするためには、閉リブの形状を現在多く用いられている梯形から半円をもつU形に変更する必要が生じ、その加工においても板厚6mmとしても内側曲げ半径は90mmとなるので、専用のプレス型を準備するか、多数回に分けてプレス作業を行う必要が生ずるので製作工程上の障害となるといわれている。

また、1938年頃の鋼材はP, Sなどの不純物も多かったが、最近の鋼材はこれらの不純物が低減されているので、ひずみ時効脆化の程度は小さいのではないかとの意見もある。

そこで、溶接構造用鋼材のひずみ時効脆化傾向の現状を実験により調査することとした。実験はその簡便性からシャルピー衝撃試験によることとした。

\* 正会員 工博 大阪大学助教授 溶接工学研究所

実験にあたっては、

- ① ひずみ時効脆化傾向の少ない鋼材を選別する可能性はないか
  - ② 冷間曲げ加工についての道路橋示方書の規制値をどこまで緩和できるか
- についても考察できるよう心がけた。

## 2. 実 験

### (1) 供 試 材

供試材は表-1に示す12鋼種28材である。これらは前述のように、ひずみ時効脆化傾向の小さい鋼材を選別する可能性を探る目的をもって、通常、橋梁に使用さ

れる鋼材のわくを超えて選定されている。

### (2) 実験条件

予ひずみ量およびシャルピー衝撃試験温度には、一部変更もしくは省略したものもあるが、次の条件を原則とした。

予ひずみ量：3, 5, 10, 15, 20%

時効処理：250°C, 1時間

シャルピー衝撃試験温度：-60, -30, 0, 30°C

### (3) 実験手順

- ① 図-1に示す短冊状の試験片を準備する。
- ② 引張試験機により所定の予ひずみを導入する。
- ③ 250°Cの油槽に1時間浸漬し時効処理を行う。

表-1 供 試 材

No.	鋼 種	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)							$\sigma_Y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	備 考	
			C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	sol Al ×1000	insol Al ×1000				total N ×1000
1	SS41	6	21	4	90	15	28				37	49	
2		15	10	20	69	13	9				29	41	
3		15	21	3	81	16	8				28	45	
4		16	21	22	59	24	12	2	<1	54			ロールHのフランジ
5		19	14	16	60	14	12				29	45	
6		20	21	1	80	17	15				29	46	
7	SM41A	13	20	2	94	20	29	<5		25			
8		20	18	4	87	11	18				26	44	
9		25	14	25	105	20	6	38	<1	56			C.C. 材
10	SM41B	25	14	2	116	18	15	3	5	32			
11	SM50A	9	15	36	142	26	21				41	56	
12		13	17	35	152	24	17	<5		37			
13		19	20	42	140	18	19				35	58	
14	SM50B	25	15	35	195	20	9	36	<1	62			
15		25	16	36	126	24	13	29	<1	81			V=0.027%
16		25	15	32	141	20	13	36	<1	41			
17	SM50C	25	15	32	141	20	13	36	<1	41			No. 16 をノルマ
18	SM50YB	13	18	22	138	29	26	19		64			
19		15.4	18	18	117	23	10	<1	<1	32			Nb=0.026% ロールHのフランジ
20		19	18	40	136	16	11				42	57	V=0.04%
21		19	12	32	137	18	20				44	56	Nb=0.02%
22	SM58Q	13	14	44	130	15	17	54		75			
23		25	12	36	137	18	5	54	<1	54			V=0.042%
24	HT80	13	13	31	97	10	10	67		110			Ni, Cr, Mo 添加
25		20	10	29	91	7	6				82	86	Cu=0.25%, Ni=0.13% V=0.46%, Mu=0.44% V=0.03%
26	KDK	12	14	22	83	24	14	26	<1	51			SM41B 相応
27	A285C	12.7	24	tr	46	18	26	<1	<1	28			リム下材
28	SY50	13	35	16	74	31	16	3	<1	47			Cu=0.28% 鋼矢板

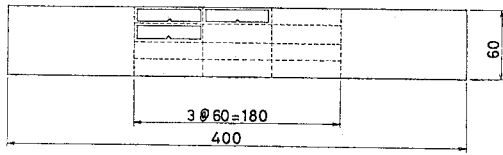


図-1 試験片

- ④ 図-1 に示す位置より JIS Z 2202 に規定された 4 号試験片を作成する。
- ⑤ JIS Z 2212 にのっとり所定の温度で、それぞれ 3 個のシャルピー衝撃試験を行い、3 個の測定値の平均値をもって試験値とする。

(4) 実験条件についての予備的考察

a) 予ひずみの方向

今回の実験では特に圧延直角方向 (C 方向) と記したものを除き、圧延方向に長手の短冊状の試験片を作成し予ひずみを与え、シャルピー衝撃試験片もその方向に採取した。しかし、予ひずみの方向とシャルピー衝撃試験片の方向が異なれば、ひずみ時効脆化の程度も異なるのではないかとの懸念がある。

そこで図-2 に示すようにシャルピー衝撃試験片の方向は圧延方向としたまま、予ひずみの方向を圧延方向と圧延直角方向との 2 通りとした実験が行われた。供試材は表-1 の No. 1 および 8、予ひずみ量は 5% である。

図-3 に試験結果のうち、供試材 No. 1 の例を示す。素材試験におけるばらつき (2 回繰り返した試験値 (それぞれ 3 個の平均値) の差) を考えるならば、予ひずみの方向の違いによる試験値の差は有意とはいえず、予ひずみの方向がひずみ時効脆化に及ぼす影響は大きくないと判断された。

b) 時効処理の条件

今回の実験では 250°C 1 時間の時効促進処理を施したが、これは実構造物におけるこの程度の時間経過に対応するだろうか。

250°C 1 時間が常温における 1 年間の時間経過に対応するとの、反応速度論に基づく計算結果もあるが<sup>13)</sup>、ここでは 5% の予ひずみを与えた供試材を約半年間、自然放置、時効せしめた後、実験し、時効促進処理を施したものと比較した。

実験は表-1 の供試材 No. 7, 12, 18 および 24 について行われたが、その 1 例として供試材 No. 12 についての結果を図-4 に示す。どの供試材においても半年の自然時効材と、時効促進処理材は高温域および低温域ではほぼ一致し、遷移領域にあってはデータが入り混じるものの時効促進処理材の方がややシャルピー吸収エネルギーが小さめであった。したがって 250°C 1 時

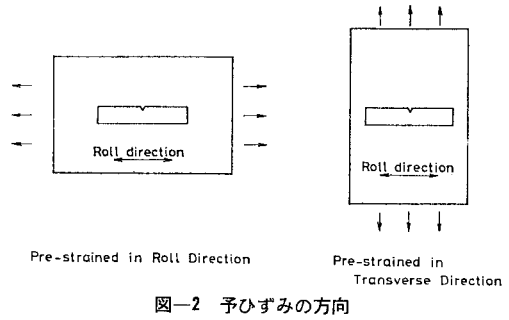


図-2 予ひずみの方向

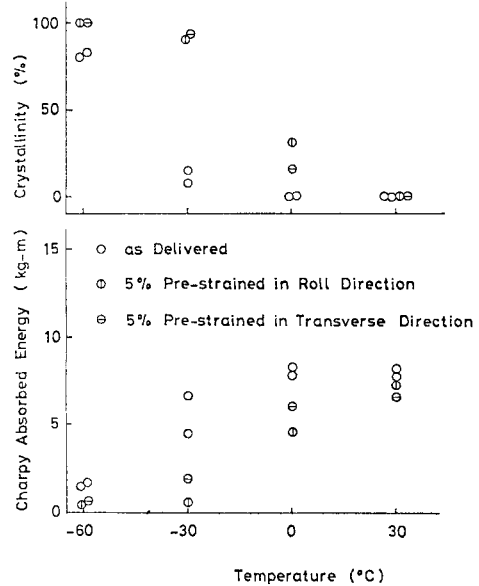


図-3 予ひずみの方向による時効の比較 (供試材 No. 1, SS 41)

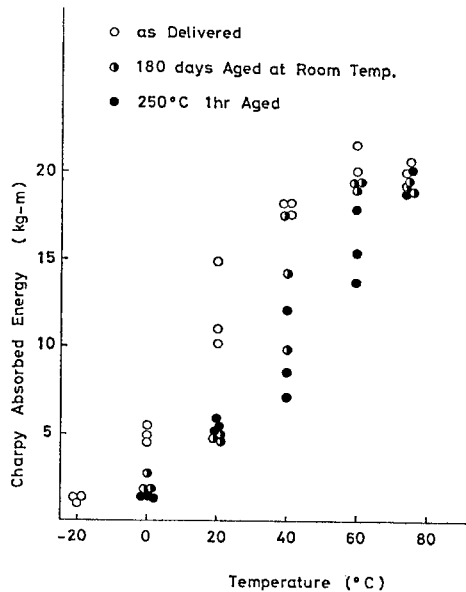


図-4 自然時効と人工時効の比較 (供試材 No. 12, SM 50 A, ε=5%)

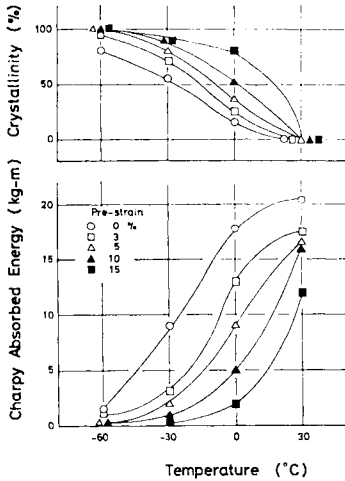


図-5 実験結果の例 (1)  
(供試材 No. 14, SM 50 B)

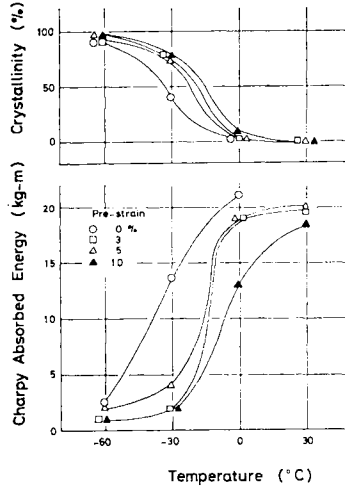


図-6 実験結果の例 (2)  
(供試材 No. 23, SM 58 Q)

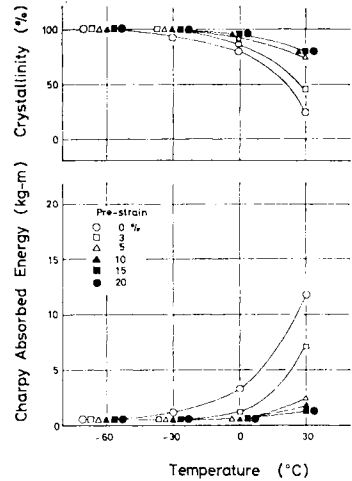


図-7 実験結果の例 (3)  
(供試材 No. 8, SM 41 A)

間の時効条件は、半年の自然時効よりは厳しめの条件と考えられ、上述の計算結果をもあわせ考えるならば、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よう。

(5) 実験結果および考察

a) ひずみ時効脆化傾向の概要

図-5, 6 および 7 に試験結果の典型例を示す。

図-5 はシャルピー遷移温度が 0°C 近傍の、図-6 は 0°C より相当量低温側の、そして 図-7 は高温側の例である。いずれも、ひずみ時効を加えることによって材料が脆化していることが知られる。

いま、1つの指標として 0°C におけるシャルピー吸収エネルギー  $vE_0$  をとり、予ひずみ量 5% でのひずみ時効前後の値を比較してみると 図-8 のようになる。これによると調質鋼である SM 58, HT 80 では、ひずみ時効前後の  $vE_0$  の比は 75% 以上あるが、調質鋼以外では 1, 2 の例外を除き、ひずみ時効前後の  $vE_0$  の比は 50%、あるいはそれ以下、はなはだしいものでは 10% と脆化が著しいものもあることを示している。調質鋼の例である 供試材 No. 23 (SM 58 Q) の試験結果の詳細を 図-6 にみると、試験温度の 0°C はシャルピー吸収エネルギーのアップシエルフ領域になっていて、たとえば、-30°C でのシャルピー吸収エネルギー  $vE_{-30}$  には脆化が認められている。一方、図-5~7 の -60°C はローシエルフ領域になっているが、このような領域でも見かけ上の脆化は少ない。

そこで、もう 1つの指標としてシャルピー破面遷移温

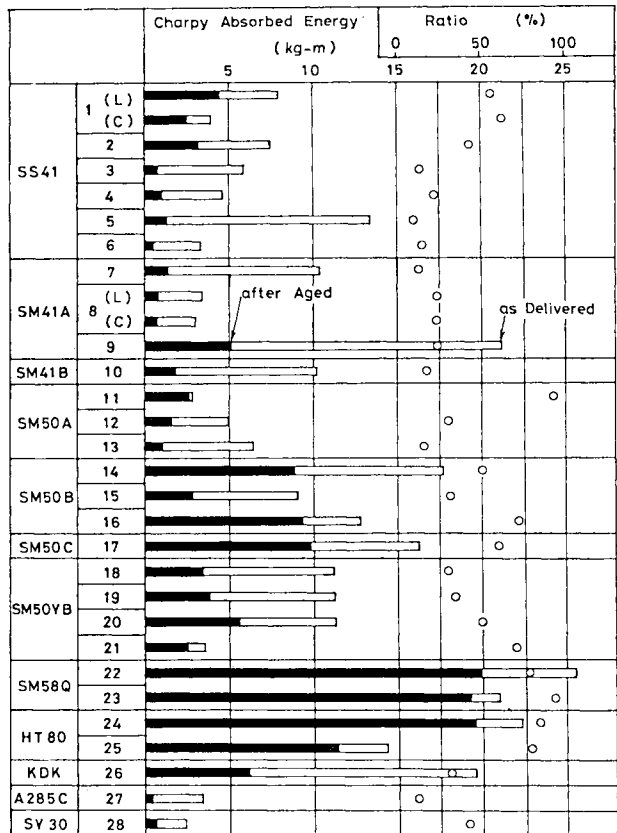


図-8 ひずみ時効前後の  $vE_0$  の比較 ( $\epsilon=5\%$ )

度  $vT_{rs}$  をとり、同じく予ひずみ 5% でのひずみ時効による  $vT_{rs}$  の上昇量  $\Delta vT_{rs}$  を各供試材について比較すると 図-9 のようになる。ここにおいても調質鋼である SM 58, HT 80 の脆化が比較的小さいことのほかに、系統だった特徴は見当たらない。

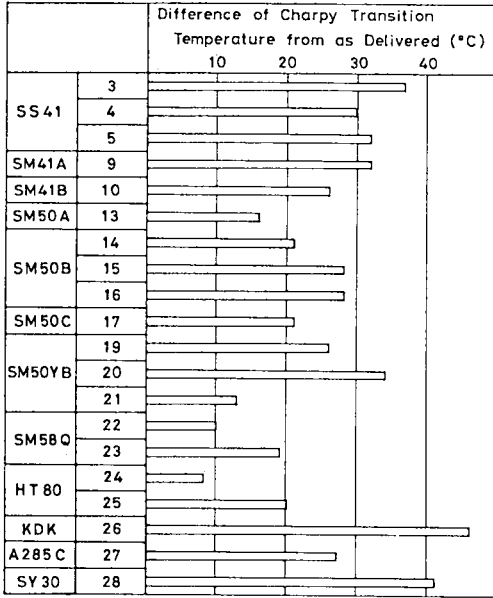


図-9 ひずみ時効によるシャルピー破面遷移温度の上昇 (ε=5%)

b) 化学成分の影響

上述の  $\Delta vT_{rs}$  をひずみ時効に関与するのではないかとされている<sup>11,12)</sup>いくつかの元素に対してプロットした結果を図-10~13に示す。これらの図において調質鋼である SM 58, HT 80 のデータは白丸で示してある。白丸で示した調質鋼は P, S が少なく, sol. Al, total N は多い。したがって白丸で示した調質鋼の  $\Delta vT_{rs}$  が小さいというデータが, P, S が少なく, sol. Al, total N が多いということに基因しているか, 調質鋼であるということに基因しているか, いずれが原因でいずれが結果であるかは, はっきりしない。

しかし, 白丸で示した調質鋼を除いた黒丸のデータだけでも, P が少なければ  $\Delta vT_{rs}$  は小さく, また sol. Al が多くなれば  $\Delta vT_{rs}$  は小さくなるといえよう。

一方, S と total N については見解を示すことは難しい。

いずれにしても今回の実験の範囲では, DIN 17135 のような形注<sup>13)</sup>で, ひずみ時効脆化傾向の少ない材料を規定することはできない。

c) 予ひずみ量による脆化の程度

次に予ひずみ量を変化させたときのひずみ時効脆化の

注) DIN 17135-1964 Alterungsbeständige Stähle, Gütevorschriften の化学成分を定める表-1 の脚注 1) に “Alterungs betändigkeit を達成するに十分なアルミニウムの含有量がなければならない”とあり, 試験に関する項目の中の 6.2.2.2 に “協定により, 素材の切欠衝撃試験, もしくはアルミニウムの含有量が 0.025% を下まわらないことの証明を, 要求することができる”とある。

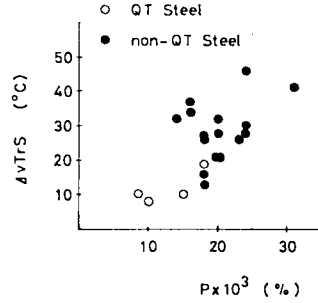


図-10 P と  $\Delta vT_{rs}$

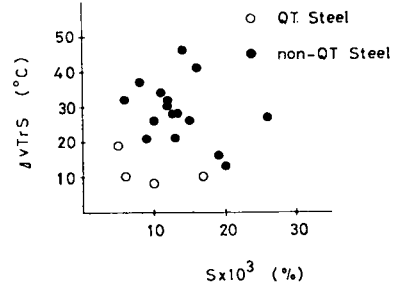


図-11 S と  $\Delta vT_{rs}$

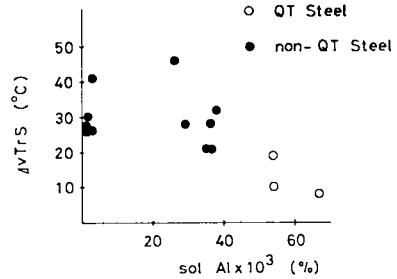


図-12 sol. Al と  $\Delta vT_{rs}$

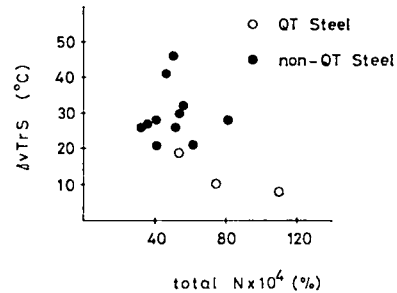


図-13 total N と  $\Delta vT_{rs}$

傾向を考察する。

図-14には, ひずみ時効後の  $vE_0$  の絶対値を, 図-15にはひずみ時効前の  $vE_0$  に対する比を, 予ひずみ量を横軸にとって示す。これらの図において黒丸は  $vE_0 \geq 2.8 \text{ kgm}$  が保証されるべき SM 41 B, SM 50 B, SM 50 YB についての試験結果である。SM 50 C, SM 58 Q はそのむね記入してあり, それ以外の白丸は SS 41, SM

41 A, SM 50 A の試験結果である。また、実線は圧延方向の、点線は圧延直角方向のデータである。これらの図より、予ひずみ量の増加とともにシャルピー吸収エネルギーの減少するのが知られる。

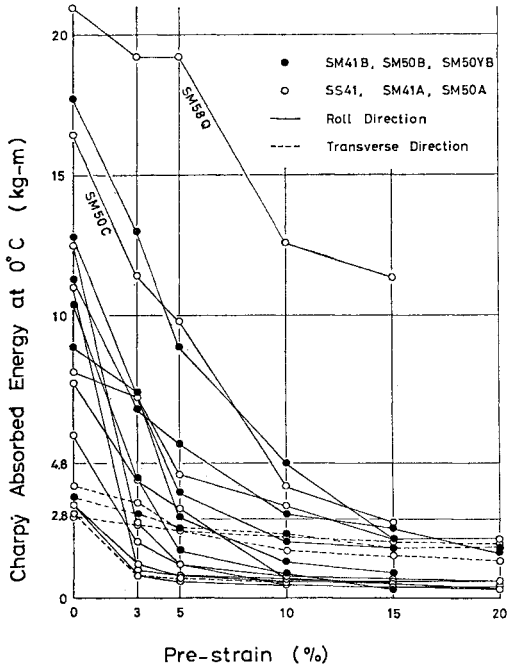


図-14 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギー

図-16 にはシャルピー破面遷移温度の絶対値を、図-17 には素材のそれからの上昇量を、予ひずみ量を横軸にとって示す。図中の記号は図-14, 15 と同様である。遷移温度の上昇量は、予ひずみ 3% で 10~30° で

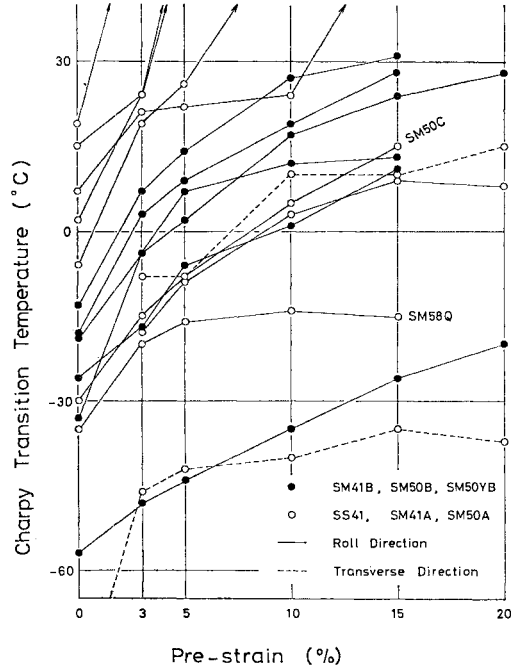


図-16 予ひずみ量とシャルピー破面遷移温度

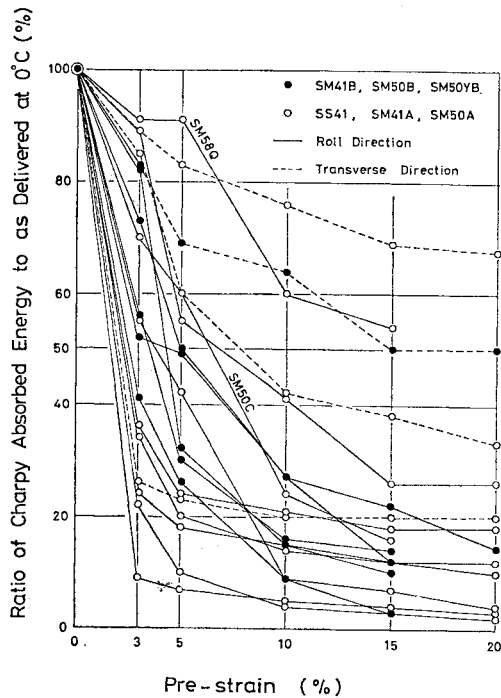


図-15 予ひずみ量とシャルピー吸収エネルギーの低下率

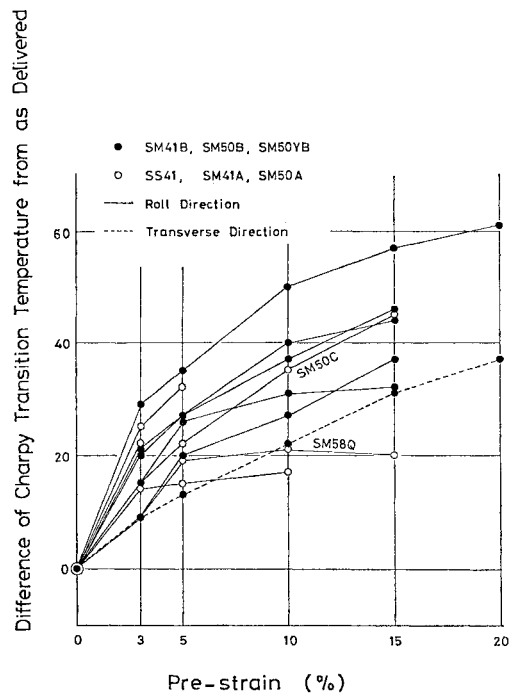


図-17 予ひずみ量とシャルピー破面遷移温度の上昇量

あるが、予ひずみ 10% では 20~50°, 予ひずみ 20% では 30~60° となっている。

#### d) 塑性加工の許容量の目安

何をもってひずみ時効脆化の許容限とするかは大きな問題ではあるが、SM 41 B, SM 50 B, SM 50 YB のように  $vE_0 \geq 2.8 \text{ kgm}$  の保証を要求されるものにはこの値を、SM 50 C, SM 58 では  $vE_0 \geq 4.8 \text{ kgm}$  を、またルクセンブルグの Charlotte 橋の特記仕様にならって“ひずみ時効のシャルピー吸収エネルギーが素材のそのの半分以下にならないこと”を 1 つの目安としよう。

図—14, 15 によれば、SM 58 Q は予ひずみ量 15% までこの目安を満足するが、SM 50 C は予ひずみ量 5% では満足するが 10% になると満足しなくなる。SM 41 B, SM 50 B, SM 50 YB では、予ひずみ量 3% でもこの目安を割るものが 1 例ではあるが存在し、5% になると約半数がこの目安を満足しない。

遷移温度あるいはその上昇量についての判断の基準は見当たらないが、SM 41 B, SM 50 B, SM 50 YB で  $vT_{rs} \leq 0^\circ\text{C}$  を 1 つの目安として 図—16 をみるならば、予ひずみ量 3~5% が許容限界と考えられる。

したがって、道路橋示方書鋼橋編の冷間曲げ加工に対する規制条項は、この実験結果と一致しているといえよう。

### 3. ま と め

鋼床版橋のトラフリブを念頭において、冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化について実験的に検討した。

供試材は、ひずみ時効脆化傾向の小さい鋼種を選別する可能性を探る目的で、トラフリブ材に限ることなく広範囲に選択した。

試験は、その簡便性から、シャルピー衝撃試験によった。

その結果、次のような知見が得られた。

(1) 供試板の規格、成分系、熱処理を問わず、ひずみ時効脆化の傾向は小さくない。

(2) ひずみ時効脆化の程度をシャルピー衝撃試験の破面遷移温度の上昇量  $4_0T_{rs}$  で表すと、予ひずみ量 3% のとき 10~30°, 10% のとき 20~50°, 20% のとき 30~60° であった。

(3) SM 41 B, SM 50 B, および SM 50 YB 材に対しては、予ひずみ量 3% が冷間塑性加工量の許容値について 1 つの目安となる値であると判断された。この値は曲げ加工の場合の表面ひずみにあてはめるならば、許容される曲げ半径は板厚の 15 倍となり、道路橋示方書の規制値と一致する値である。

しかし、次の 2 点については今後の検討が必要である。

(1) 一般に脆性破壊は板厚が厚いと発生しやすく、板厚が薄いと発生しにくいことが知られている。今回用いたシャルピー衝撃試験は材質そのものを評価しており、板厚の効果は入っていない。トラフリブの加工に限定した議論を行うためには、トラフリブの板厚が 6~10 mm であることを反映できる手法を用いて吟味する必要がある。

(2) 溶接継手に塑性加工を施す場合には、熱影響軟化部にはたとえば曲げ半径から計算される平均ひずみの数倍ものひずみが集中して生ずるので、時効脆化の傾向も著しいことが知られている<sup>13)~15)</sup>。したがって、溶接後加工する場合については別途の規制が必要である。

本研究は東京都立大学在職中に開始し、実験の一部は東京都立大学において実施した。

本研究の一部には、文部省科学研究費補助金・試験研究 (1) “橋梁構造に適用される高張力鋼の力学的特性” (代表者 埼玉大学 奥村敏恵教授) の交付を受けた。

また、本研究の一部は日本溶接協会 HSE 委員会 (委員長 大阪大学 佐藤邦彦教授) の共同実験の一部として川崎製鉄 (株) 技術研究所をはじめとするいくつかの事業所で分担、実施された。

ここに記して関係各位への謝辞としたい。

#### 参 考 文 献

- 1) Steohenson, E.T.: Factors affecting the strain aging susceptibility of cox-annealed lowcarbon sheet steel, Trans. A.S.M., 62, pp. 490~501, 1969.
- 2) Butler, J.F.: The effect of heat treatment and microstructure on carbon strain aging in low carbon steels, Trans. A.I.M.E. 224, pp. 89~96, Feb. 1962.
- 3) Graf, O.: Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweissten Brucken, Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau Heft 11, Springer, Berlin, 1940.
- 4) Shönherr, W.: Review of Service Failures, Proc. of 3rd Int. Symp. of JWS, Tokyo, p. 35, 1978.
- 5) Klöppel, K.: Sicherheit und Guteanforderungen bei geschweissten Konstruktionen, Stahlbau—Ein Handbuch für Studium und Praxis, Bd. 2, 1. Auf 1, S. 127, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1957.
- 6) DAST: Empfehlungen zur Wahl der Stahlgutegruppen für geschweisste Stahlbauten (昭和 33 年 12 月付, 三菱重工・神戸造船所鉄構設計課の翻訳による)。
- 7) Bierett, G.: Guteauswahl der Stahle für geschweisste Konstruktionen mit Hilfe eines eifachen Klassifizierungsschemas, Bauingenieur 34, H. 6, S. 213 und 35, H. 8, S. 309, 1960.
- 8) DAST-Richtlinie 009: Empfehlungen zur Wahl der Stahlgutegruppen für geschweisste Stahlbauten, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1973.
- 9) 土木学会鋼構造委員会鋼構造進歩調査小委員会: 各国の

- 橋梁示方書における鋼材の使い分け，土木学会誌 p. 44, 1975 年 9 月号.
- 10) Hagon, R. and A. Broucke : The Grand Duchess Charlotte Bridge at Luxemburg, *Acier* 30, No. 6, 1965.
  - 11) 日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書解説 1968 年追補，昭和 43 年 12 月.
  - 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和 48 年 2 月.
  - 13) 奥村敏恵ほか：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.
  - 14) 池田一夫ほか：溶接施工誤差が脆性破壊発生特性におよぼす影響，溶接学会昭和 48 年度春季全国大会，東京，1973.4.
  - 15) 田中甚吉ほか：高張力鋼溶接ボンド部の靱性について一塑性歪の影響一，溶接学会昭和 48 年度秋季全国大会，松山，1973.10.

(1979.5.24・受付)