

寒冷地における溶接構造用鋼材

総括執筆者(座長) 渡 辺 昇*
 話題提供者 阿 部 英 彦**
 同 大 島 久***
 同 進 藤 弓 弦****
 同 堀 川 浩 甫*****

1. ま え が き

わが国の鋼道路橋示方書においては、設計に用いる温度変化の範囲として、 -10°C から $+50^{\circ}\text{C}$ まで、とくに気候寒冷地方では -30°C から $+50^{\circ}\text{C}$ までの値を標準として定めている(とくに北海道においては -40°C 以下になる地方もある)。また、最近では日本よりもっと寒冷の国に鋼材を輸出しなければならない事例もふえてきている。したがって、寒冷地における溶接構造用鋼材についての種々の問題点を中心に話題を提供することにした。話題提供者による内容は次のとおりである。

- 寒冷地の鉄道橋の鋼材の選択 (阿部)
- 北海道の道路橋の鋼材の選択 (大島)
- 寒冷地用溶接構造用鋼材の製造要因と溶接部の挙動 (進藤)
- 構造用鋼材の靱性の評価法 (堀川)

2. 寒冷地の鉄道橋の鋼材の選択

鉄道橋は道路橋に比べて設計荷重に近い大きさの列車荷重が頻度高く載荷され、しかも大きい衝撃を伴うので応力的に厳しい条件にあると考えられる。そこで、北海道等、寒冷地における鉄道橋には、比較的最近までリベット構造を採用していたが、これは主として、脆性破壊に対する安全のためであった。鉄道橋の脆性破壊の経験^{1),2)}、最近の鋼材の発達、溶接技術の進歩などにより、

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 日本国有鉄道構造物設計事務所 次長
 *** 正会員 本州四国連絡橋公団第三建設局 建設部長
 (前・北海道開発局土木試験所構造研究室長)
 **** (株)日本製鋼所室蘭製作所 研究所主任研究員
 ***** 正会員 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科

寒冷地においても最近において溶接構造が使用されるようになったが、国鉄においても、使用鋼材については設計示方書に特別仕様を与え、溶接方法についても製作示方書で特に規定を設けるようにしているので、その二、三の例について次に述べる。

(1) 材料選定上の注意

鋼鉄道橋設計標準では、一般に表-1のように鋼材の適用を規定している³⁾。しかし、北海道のように寒冷な地域では表-2のように、特別仕様をつけて全溶接構造を採用している⁵⁾。すなわち、旭川を中心とした極寒地(-40°C)と札幌を中心とした準極寒地(-30°C)とに分けて、設計標準で規定する材質に対応して、圧縮部材では JIS G 3106 (溶接構造用圧延鋼材) の中でランクアップしたり、引張部材では同 JIS 規格のシャルピー衝撃保証値を 0°C でなく、極寒地では -40°C で、また準極寒地では、 -30°C で保証するよう特別仕様している。

なお、北海道のみでなく、本州の北部や高地で北海道に準ずる寒冷地でも、この仕様を適用することになっている。

表-1 溶接構造用鋼材(国鉄)

鋼材規格	厚さ t (mm)	Vノッチシャルピー衝撃試験	
		吸収エネルギー (kg·m)	備 考
SM41, SMA41	A	$t \leq 16$	—
	B	$16 < t \leq 25$	2.8 以上
	C	$25 < t \leq 50$	4.8 以上
SM50	B	$t \leq 25$	2.8 以上
	C	$25 < t \leq 50$	4.8 以上
SM50Y, SMA50	B	$t \leq 25$	2.8 以上
SM53, SMA50	C	$25 < t \leq 50$	4.8 以上

試験温度 0°C ,
 4号試験片
 (圧延方向)

表-2 寒冷地用仕様(国鉄)

①設計標準で規定する材質	②寒冷地用鋼の材質 (①にそれぞれ対応)	衝撃値	
圧縮部材 プレート トガ ー の圧縮 フラン ジ および 腹板	SM41A, SMA41A SM41B, SMA41B SM50B, SMA50B SM50YB SM41C, SMA41C SM50C, SMA50C SM53C	SM41B, SMA41B SM41C, SMA41C SM50C, SMA50C SM53C SM41C, SMA41C SM50C, SMA50C SM53C	JIS G 3106 〔溶接構造用 圧延鋼材〕 による
引張部材 および 引張 フラン ジ	SM41A, SMA41A SM41B, SMA41B S B50B, SMA50B SM50YB	SM41B特, SMA41B特 SM41B特, SMA41B特 SM50B特, SMA50B特 SM50YB特	JIS Z 2242V ノッチシャル ピー衝撃試験 における衝撃 値は極寒地お よび準極寒地 においてそれ ぞれ -40°C および -30 °Cで 2.8 kg ・m 以上ある こと
	SM41C, SMA41C SM50C, SMA50C SM53C	SM41C特, SMA41C特 SM50C特, SMA50C特 SM53C特	JIS Z 2242V ノッチシャル ピー衝撃試験 における衝撃 値は極寒地お よび準極寒地 においてそれ ぞれ -40°C および -30 °Cで 4.8 kg ・m 以上ある こと

(2) 溶接上の注意

国鉄においては、鋼橋は「JRS 05000-1」という国鉄制定の規格に従って製作される⁶⁾。昭和46年12月に改正されたものでは、寒冷地用鋼材の溶接については次のように規定している。

① 主要部材の引張りフランジのグループ溶接継手は原則として手溶接で施工するものとする。

② 主要部材の手溶接およびサブマージアーク溶接を用いたグループ溶接の溶着金属のVノッチシャルピー衝撃値は、母材の規格値以上でなければならない。なお、使用する溶接棒およびワイヤーとフラックスの組合せ、ならびに施工方法の選定にあたっては、Vノッチシャルピー衝撃値を確認するものとする。

なお、①については、溶接材料や技術の進歩の著しい昨今であるので、十分な品質管理を伴って安全な方法があれば、手溶接でなくサブマージアーク溶接を採用することもさしつかえないと考えられる。

(3) 施工試験

現在のところ、新しい仕様に基づく施工の経験が浅いので——データ収集の意味もあって——この二、三年施工試験の際メーカーの協力などにより、溶接部の各部からVノッチシャルピー衝撃試験片を採り、吸収エネルギーと試験温度との関係曲線を得るようにしている。北海道向け橋梁鋼材約40例について0~80°Cの温度範囲試験の試験結果の概要は次のようであった⁷⁾。

① 同条件3個ずつ試験し、3個の間に相当ばらつきのあるものがあるが、平均値は各鋼材とも指定温度に対して所要の衝撃値を満足している。

② 一般に母材の方が高く、溶接金属と熱影響部とはどちらともいえないが、溶着金属は母材や熱影響部に比べて非常に低い場合がある。

③ この程度の低温衝撃値のためにNi等を入れないでも、焼ならしなどの熱処理ですむと考えられる。

(4) 問題点

以上に述べたような考慮を払って寒冷地の鉄道橋に溶接構造を採用しているが、次のような問題点が考えられる。

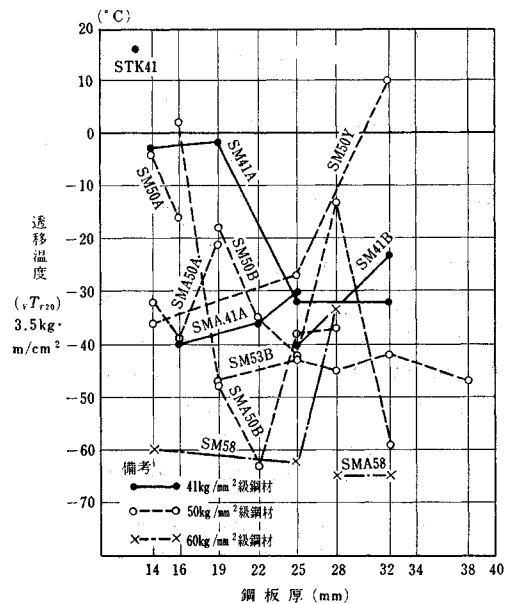
① 寒冷地用鋼材として、このようなVノッチシャルピーの規定値が妥当であるか。

② 極寒値用、準極寒地用として、-40°Cと-30°Cの10°C差で2段階設ける必要があるか。

③ 低温脆性に関連して、鋼材、溶接方法等にさらに規定すべき事項はないか。

3. 北海道の道路橋の鋼材の選択

溶接鋼構造物の脆性破壊については、温度、欠陥、応力状態、溶接部の形、材質、疲労その他多くの要因があり、国内外で多くの研究が行われている。北海道開発局土木試験所構造研究室では、昭和32年ころから各種鋼材についてVノッチシャルピー衝撃試験を行ってきた。



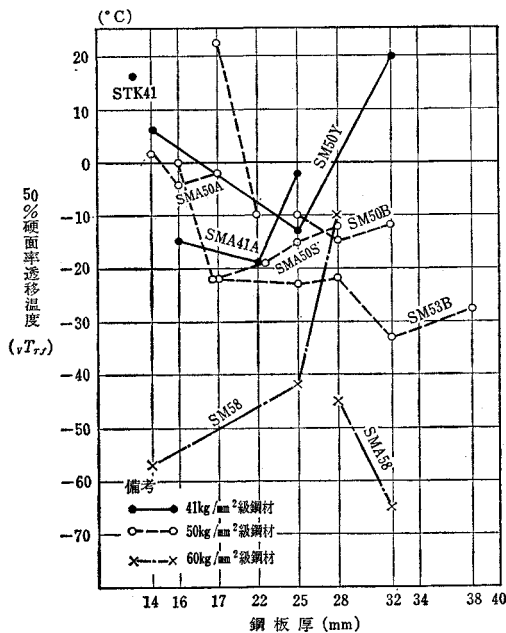
(昭和46年度までの北海道開発局土木試験所実施分)

図-1 シャルピー衝撃試験結果

表-3 北海道開発局土木試験所シャルピー衝撃試験結果

鋼種	14	16	19	22	25	28	32	34	38	40
SM 41A	-3		-2		-35		-35			
SM 41B					-40		-23			
SM 41C										
SM 50A	-4	-16								
SM 50B			-18 +25	-35 -10	-42 -10	-13 -15	-54 -12			
SM 50C										
SM 50YA	JIS規格判定前の鋼材				-27		+10			
SM 50YB	-36 +6				-13		+20			
SM 53B			-47 -22		-43 -23	-42 -22	-42 -33		-47 -28	
SM 53C										
SM 58	-60 -57				-60以下 -42	-33 -10				
SMA41A		-40 -15		-35 -19	-30 -2					
SMA41B										
SMA41C										
SMA50A	-32 +2	-39 -4	-21 -2							
SMA50B		+2 0	-47 -22	-63 -19	-38 -15	-37 -12				
SMA50C										
SMA58						-60以下 -45	-60以下 -60以下			
STK41	板厚 12.7 mm +16 +16									

注：上段数字： vT_{r20} (°C) 数字は母材，溶着部および熱影響部のうちから最も高温のものを記した。
下段数字： vT_{r50} (°C)



(昭和 46 年度までの北海道開発局土木試験所実施分)

図-2 シャルピー衝撃試験結果

また、道路橋示方書の鋼材使用規定の主旨に基づいて、北海道の -40°C 程度の寒冷時までを対象として、「北海道開発局における溶接鋼道路橋の鋼材使用基準」を作成

し実施してきているので、その二、三の問題点について次に述べる。

(1) 各種鋼材のシャルピー衝撃試験結果

同研究室で行った各種鋼材のVノッチシャルピー衝撃試験結果の総括は、表-3、図-1~2 のとおりであった。試験片は JIS Z 2202 の4号試験片 (Vノッチ) で、溶接はユニオンメルト法とし、試験片採取位置は、図-3 のように、母材、溶着部、熱影響部であり、試験温度は +10°C から -60°C までの 10°C ごとに3個ずつの試験片をつくり、3個の平均値を試験値とした。図・表の値は、母材、溶着部、熱影響部のうちから最も遷移温度の高い箇所の試験値である。また、記号は、

vT_{r20} はVノッチシャルピー衝撃試験片による 20 ft-lb (2.8 kg·m≒3.5 kg·m/cm²) の吸収エネルギーの遷移温度 (°C) であり、 vT_{r50} は、Vノッチシャルピー衝撃試験片による 50%せん断破面率の遷移温度 (°C) である。

試験結果では、一般的に母材、溶着部、熱影響部のうち熱影響部の遷移温度が高温であった。上級の鋼材ほど遷移温度が低温であったが、STK 鋼材は母材の遷移温度が 0°C 以上であった。

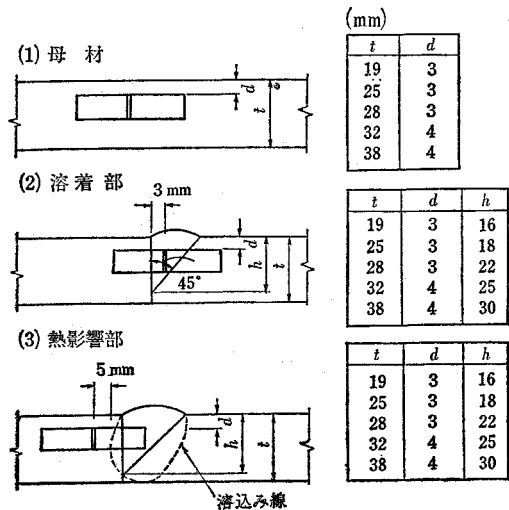


図-3 試験片採取位置の形状と詳細寸法

(2) 北海道開発局の溶接鋼道路橋鋼材の使用基準

北海道開発局の溶接鋼道路橋鋼材の使用基準は、表4のとおりである。本基準を作成するにあたり考慮した事項などは次のようである。

① -40°C までの低温に対し、溶接鋼道路橋の脆性破壊を防ぐ。

② 実施橋梁ごとにシャルピー試験片をとって試験判定することは手数がかかりすぎるので、それを省略するため、同土木試験所が各種鋼材について試験をし、それらの試験結果から使用基準をつくる。

③ 道路橋示方書に採用されている JIS 規格鋼材を、そのまま -5°C 以下の寒冷地にも使えるようにしたい。

④ 使用基準に示した板厚の範囲は、道路橋示方書の規定の数値に準じた。SM 50 材は使用例が少ないため基準から除いた。SM 50 YB 材は、キルド鋼、セミキルド鋼などと材質区分して使用するのが望ましいが、鋼種が多くなって製作時に誤用の恐れがあるので除いた。各種鋼材の C 材は、高価であることや使用例が少ないので除いた。したがって、道路橋示方書の使用基準に比べると鋼種が少なく、厚板の使用が制限されている。

北海道開発局では、これらの使用基準によって数百橋の溶接鋼橋をすでに施工してきたが、現在まで低温脆性破壊は発生していない。

(3) 問題点

シャルピー衝撃試験およびその他の脆性判定方法などについて、次のような問題点が考えられる。

表4 鋼材の使用基準 (北海道開発局)

強度の階級	使用箇所	板 厚 (mm)			
		16 以下	17~25	26~38	39~50
41キロ級	主要部材	SM41 SMA41A	SM41A SMA41A	SM41B SMA41B	
	2次部材	SS41 SMA41A*	SS41 SMA41A	SM41A SMA41A	
50キロ級	主要部材	SM53B SMA50B	SM53B SMA50B	SM53B SMA50B	
	2次部材	SM50YA SMA50A	SM50YA SMA50A	SM50YA SMA50A	
60キロ級	主要部材	SM58 SMA53	SM58 SMA58	SM58 SMA58	SM58 SMA58

注：① 道内で行われたシャルピー試験の結果によって作成した基準であるので、この範囲内で JIS 規格材を使用する場合は、 -40°C までの低温時において鋼材溶接部の低温脆性破壊の危険はないとしてよい。

② 海岸、工場地帯、市街地などで腐食環境にある場合、または、跨線橋、跨道橋および急峻な山岳部で塗替えが困難な橋梁などには耐候性鋼材を使用するのがよい。

③ 鋼材の種類が多くなると、施工が煩雑であり、また鋼種を誤用する原因ともなるので、多種鋼材の混用は避けるのがよい。

④ 主要部材とは、主桁のフランジ、ウェブや主構など、2次部材とは、対傾構、横構、床組などをいう。

⑤ ロールH材は SM50YA を使用してもよい。

① Vノッチシャルピー衝撃試験値のばらつき最大の原因は、試験片の切欠き底部半径の工作誤差によるものと思われる⁹⁾。

② 脆性破壊を判定する試験法として、大型試験が開発されて成果をあげてきているが、施工管理や検査に用いられる実用的方法は、やはり小型試験であるので、小型試験によって直接脆性破壊を評価できる方法の開発が望まれる^{9),10)}。

③ 公的に規格化された低温脆性判定基準の一つとして「日本溶接協会の低温構造用鋼板材質判定基準」(WES 136-1964)があり、その判定方法は、脆性亀裂停止時の破壊靱性 (K_{IC}) と絶対温度との相関、プレスノッチシャルピー衝撃試験 50% 破面率遷移温度 (pT_c) と K_{IC} との相関、 pT_c と V ノッチシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが、最大値の 1/2 となる遷移温度との相関などから、材質の判定を行うものである。土木関係の溶接構造物の低温脆性を判定する基準として、WES 規格を用いることは、現時点として有力な一つの方法であると思われる。

④ 溶接鋼橋では、低温脆性の発生を一部認める鋼材を使用し、伝播を停止する鋼材や機構を設計させる構造設計基準を開発することも考えてよい。

4. 寒冷地用溶接構造用鋼材の製造要因と溶接部の挙動

常温以下 -45°C 程度までの寒冷地で使用される溶接構造物は、使用鋼材の低温靱性が高く、脆性破壊の起点となりやすい鋼材の内部欠陥や、溶接施工上伴う欠陥のないことが最も重要視される。そこで、土木構造物、天然ガスパイプライン、原油貯蔵タンク、砕氷船部材など酷寒地の過酷な条件下でも十分耐え、安全性および経済性をも満たす鋼材の製造要因と、溶接部の挙動を中心に

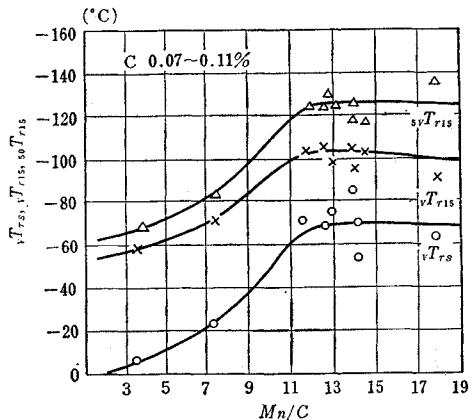


図4 Mn/C 比に対応する遷移温度の比較

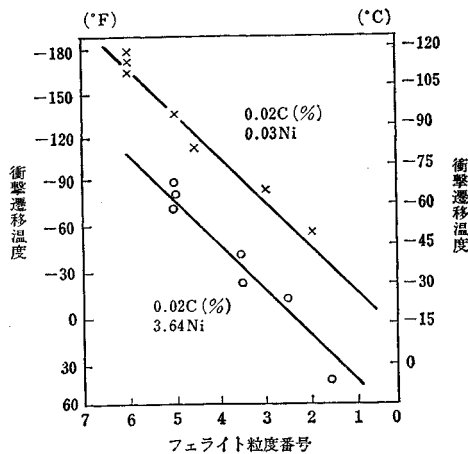


図-5 炭素鋼と Ni 鋼の衝撃遷移温度とフェライト粒度の関係

その二、三の問題点について次に述べる。

(1) 実用鋼材の低温靱性

鋼材の低温靱性を支配する因子は、外的因子として、使用温度、応力状態、負荷速度、雰囲気などがあり、鋼材面からの因子として、含有元素、結晶粒度、熱間加工条件（圧延条件）、熱処理、施工面からの因子として、冷間・熱間加工、溶接条件（溶接熱入力）などがある。

鋼材の面から考えると、 -45°C までの使用温度に耐えうる鋼材は、C-Mn-(Al, Nb, V, Ti) 系の鋼材が一般的であって、高靱性を確保するために低炭素型 ($C \leq 0.15\%$) で、かつ Mn/C 比の高いことが要求される。図-4 は、日本製鋼所で製造している低温用 TEYON-100 A の例である。さらに最近では、鋼中不純元素（例えば P のような低温脆性促進元素）に対する配慮もなされている。Ni は靱性向上に有効な元素であるが高価であり、2.5% Ni~9% Ni 鋼のように、 -100°C 以下の超極低温用に使用する場合が多い。そこで、C-Mn 系を主成分とし低温靱性改善のための冶金学的努力が種々なされてきた。それが、フェライト結晶粒度の微細化処理を目的とした製鋼作業時における脱酸効果や、圧延作業における圧延温度調整でもある。図-5 に、C 鋼と Ni 鋼のフェライト結晶粒度（粒度番号の大きいほど粒子が細かい）と衝撃遷移温度の関係を示す。製鋼時の脱酸剤の添加方法として、 $0.018 \geq \text{Al} \geq 0.058\%$ 、 $\text{Al} \geq 0.018\%$ に $\text{Zr} \leq 0.015\%$ や $\text{Al} \geq 0.018\%$ 、 $0.010 \geq \text{Ti} \geq 0.040\%$ 、加えて最近では、Al+Nb, Al+V, Al+Nb+V などの複合脱酸でもってフェライト結晶粒度の微細化の研究がなされてきた。一方、これらの脱酸元素を添加した鋼材は、圧延加工終了温度をできるだけ下げ、また加工末期に大きな変形を与えることによって、最終製品のフェライト結晶粒度の微細化が著しい。例えば、図-6 に示

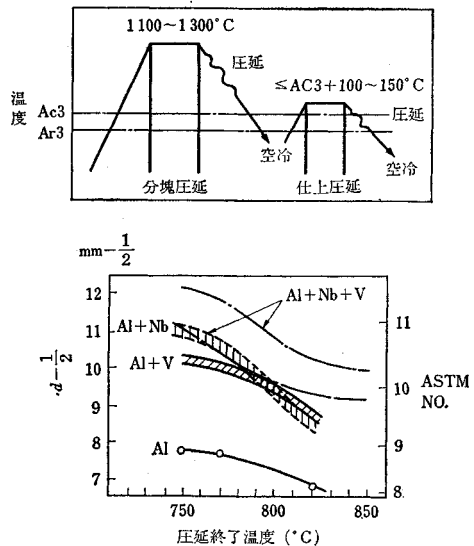


図-6 圧延スケジュールとフェライト粒度の関係

すように、分塊圧延後 900°C に再加熱した板厚 30 mm の鋼材を板厚 15 mm まで熱間圧延した場合、フェライト結晶粒度は圧延終了温度の影響を著しく受け、圧延終了温度を 770°C 以下に調整（コントロールローリング）することにより、2.5~3.5% Ni 鋼と同等の低温靱性をもつ非調質高靱性鋼が開発された。

鋼材の低温靱性は熱処理内容によって著しく向上し、とくに焼入れ焼もどし調質鋼は各種溶接構造用鋼に実用化されている。一方、最近の溶接技術の進歩は著しく、被覆アーク、潜弧自動溶接、半自動溶接、エレクトロガス溶接（エレクトロスラグ溶接）等の溶接法があるが、鋼材の性能と同等またはそれ以上の性能をもつ溶接材料の選択にも十分配慮しなければならない。

(2) 溶接施行

溶接構造物の破壊強度を考える場合、使用鋼材、継手の拘束状態および溶接施行法などの見地から、溶接熱影響部（とくにボンド部）に現われる脆化域に鋭い欠陥が存在する場合、高い溶接残留応力とあいまって脆性破壊発生の可能性を考えなければならない。すなわち、溶接割れとくに低温割れ防止のために適正予熱温度は、鋼材の化学成分、溶接金属中の水素量、継手の拘束度に基づいて決めなければならない。

SM 50~HT 80 の成分範囲内の鋼種について、1 層ビード部のルート割れ防止に対する予熱条件発生のためのノモグラムは図-7 のとおりである。ここで、

$$P_w = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Cr}}{20} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \times 10^3} \quad (\%)$$

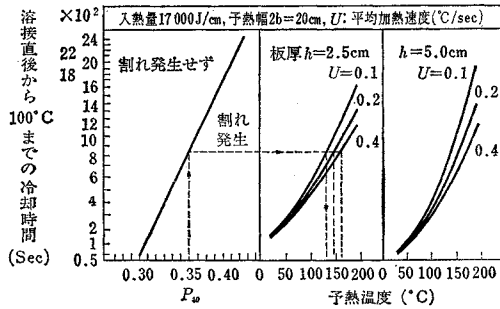


図-7 P_{20} 値、 100°C までの冷却時間と局部予熱温度の関係

H : 溶接金属の拡散性水素量 (cc/100 g) (急冷法),
 K : 継手の拘束度 (kg/mm \cdot mm) である。

H は 2.5~2.5(cc/100 g), Y 開先拘束割れ試験での拘束度 K は、 $K=69 \times$ 板厚 (t), 実際の予熱作業における平均加熱速度 U は、およそ 0.1~0.2°C/sec の範囲内と考えてよい。

もう一つの溶接に伴う鋼材欠陥として、板厚中央部のラミネーション状非金属介在物によるラメラティアを考える必要がある。構造物の拘束度が大きい場合は、超音波探傷試験でなんら異常が認められないのに、すみ肉溶接のビード下割れが発生する場合がある。その主因は MnS , Al_2O_3 などの非金属介在物の点と、それに伴う板厚方向の延性脆弱といわれる。このラメラティア感受性は、溶接時の予熱、延性ある溶接金属の採用、鋼中清浄度の改善 (とくに Si , S , Al) によって弱めることができる。図-8 に S 含有量とラメラティアの関係を示す。

溶接金属は大きく発達したデンドライトと、結晶粒界に偏析した P や S その他の低融点の不純物の影響で高温割れが発生することもある。そこで、 $\text{C} \leq 0.10\%$, $\text{P} \leq 0.02\%$, $\text{P} + \text{S} \leq 0.025\%$ のような溶接金属は高温延性が改善され、高温割れが起りづらくなる。

このような施行上の注意とともに、溶接金属を含む溶接部の欠陥は、破壊検査、非破壊検査でもって完全に除去して、脆性破壊の引き金となる根源を残さぬことも重要である。

なお、表-5 は、日本製鋼所製調質 60 キロ高張力鋼 (2H 鋼) の溶接方法 (溶接入熱量) による溶接部の靱性変化を示す。ボンド部は溶接金属の影響をわずかに受け

表-5 溶接法による 2H 鋼溶接部の衝撃特性 (板厚 44 mm)

溶接法	入熱量 ($\times 10^3 \text{ J/cm}$)	溶接金属	ボンド	熱影響部
被覆アーク	17	10.1(30)	9.2(23)	6.7(33)
横 向 溶 弧	49	7.2(33)	6.9(50)	4.9(73)
エレクトロガス	137	7.9(33)	5.9(46)	3.1(70)

注: ① 数値は vE_0 (kg \cdot m).
 ② () 内は脆性破面率 (%).

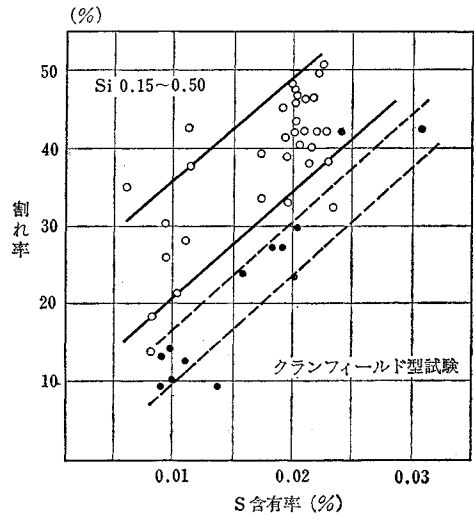


図-8 S 含有量がラメラティアに及ぼす影響

るが、ボンド部近傍の熱影響部は溶接入熱量の増加とともに脆化の度合いが大きい。すなわち、適正溶接材料の選定と同時に適正溶接入熱量を調整して、健全かつ低温靱性の高い溶接構造物を製作するために、種々の因子を検討する必要がある。

5. 構造用鋼材の靱性の評価法

寒冷地の溶接構造物に使用される鋼材は、低温靱性の高いものでなければならない。構造用鋼材に対する要求靱性値の考え方を中心に、その二、三について次に述べる。

(1) シャルピー衝撃試験

脆性破壊に対して鋼材が示す抵抗の度合いをできるだけ

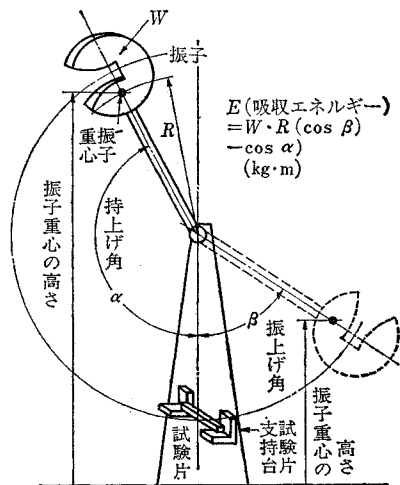


図-9 シャルピー衝撃試験法

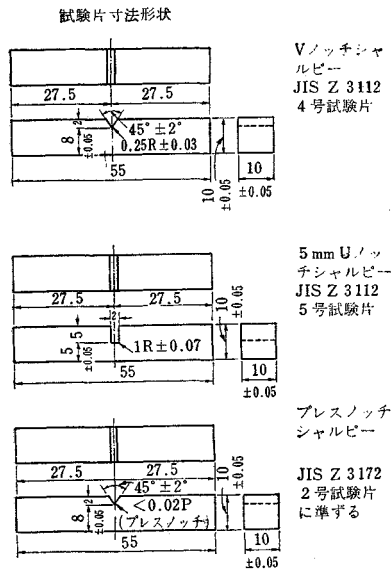


図-10 各種衝撃試験片寸法

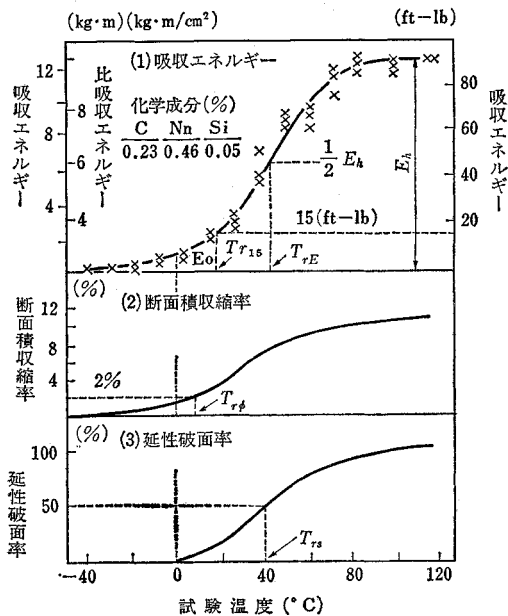


図-11 ノッチシャルピー衝撃試験結果の一例

け簡便に調べる小型試験法として衝撃試験がある。衝撃試験機として最も普及しているのは、図-9のCharpy試験機であり、試験片を支持台に乗せるだけで直ちに衝撃を与えることができる。試験片には、図-10のように、Vノッチ、Uノッチ、プレスノッチの各種がある。試験片の温度とVノッチシャルピー試験による吸収エネルギー ($E = W \cdot R (\cos \beta - \cos \alpha)$) との関係を示す試験結果の一例は、図-11のとおりである。ここで、 T_{r15} : 延性破面率 (脆性破面率) が 50% となる温度、 T_{rE} :

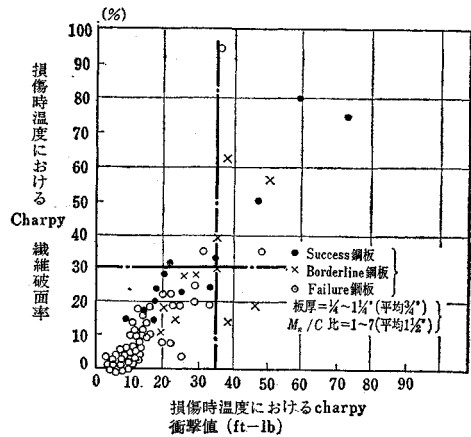


図-12 損傷材に関する LR 調査結果¹²⁾

吸収エネルギーが 100% 延性のときの吸収エネルギー E_b の 50% となる温度、 T_{r15} : 吸収エネルギーが 15 ft·lb となる温度である。Vノッチシャルピー試験は鋼材等級の分類に重要な役割を演じ、1953年アメリカ合衆国 Ship Structure Committee による損傷船についての調査結果では、 $vE=15$ ft·lb、フランスの Bonhamme が 1955年に IIW の第 IX 委員会に報告した損傷船についての調査結果では、 $vE=20$ ft·lb (2.8 kg·m に換算されて JIS の B 種の規格値)、1958年イギリス船級協会 Lloyd Resister (LR) の損傷船についての調査結果 (図-12 参照) では $vE=35$ ft·lb (4.8 kg·m に換算されて JIS の C 種の規格値) となっている。

(2) 破壊力学

脆性破壊の機構は力学的立場からも研究されているが Griffith によるエネルギー論によれば、図-13のように無限板に長さ $2c$ の亀裂が存在し、亀裂に直角方向に一樣引張応力 σ が作用する場合、亀裂の拡大 (dc) に伴って解放される弾性ひずみエネルギーが、新しい破面を形成するに要する仕事より大きいか等しいとき、不安定破壊が生ずると考える。すなわち、弾性エネルギーの解放率 dU/dc (これを crack extension force G とも呼ぶ) と表面エネルギー S との関係は

$$U = \frac{\pi \sigma^2 c^2}{E}, G = \frac{dU}{dc} = \frac{\pi \sigma^2 c}{E} \geq 2S \dots \dots (1)$$

ここで、 E : ヤング率である。

また、Orowan は鋼板のように塑性変形が亀裂先端に生ずる場合、すなわち脆性破面直下に薄い塑性変形層が存在する場合には、前記の表面エネルギーの代わりに塑性仕事をいれればよいと提唱した。すなわち、 S は塑性表面エネルギーとするとよい。

また、Irwin は亀裂先端の応力集中を考慮して、式 (1) の第 2 式に相当するものとして次式を与えた。

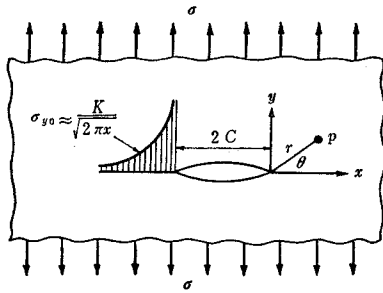


図-13 引張応力 σ を受けた切欠つき平板

$$G = \frac{K^2}{E}, K = \sqrt{GE} = \sigma \sqrt{\pi c} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K を応力拡大係数 (Stress intensity factor) と呼ぶ。上記の G の値がある値 G_c に等しくなると破壊が発生すると考える。種々の応力場の場合の K の値については、数多くの研究者により検討されている。

(3) 大型試験と WES の考え方

現在実施されている大型試験は、表-6 および 図-14 ~18 のとおりである。

最近、わが国で立案・実施されている「日本溶接協会 WES 規格、低温構造用鋼板材質判定基準 (案)」は、近年急速な発展を示している破壊力学の知識を活用し、数多くの鋼種について求められた各種遷移温度間の相関関係および、外国の規格値を参照して作製されたものである。低温用構造物を設計する場合に、使用温度に応じて適当な鋼板を選ばねばならないが、鋼板の脆性破壊に対する特性を示すものとして、この判定基準に基づく WES 認定値が広く用いられている。

本判定基準は、低温 (0°C 以下) にさらされる溶接構造物に用いられる構造用圧延鋼板で、板厚が 5 mm を超え 50 mm 以下のもので最低使用温度が -170°C 以上のものに適用される。鋼板を特性に従って G 種 (general use) と A 種 (arrest use) の 2 つに分類する。G 種は、脆性破壊の発生を考慮しなければならない溶接構造物に一般的に用いられるものであり、A 種は、なんらかの原因により万一事故を生じて脆性亀裂の伝播を阻止する特殊な性能が要求される場合に用いられるものである。一

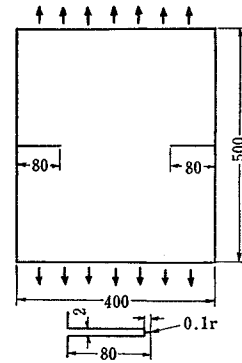


図-14 Deep Notch の試験

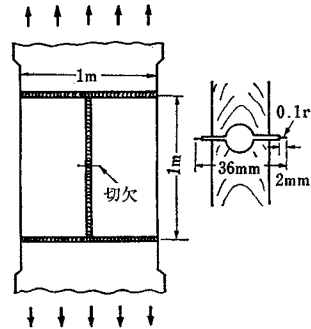


図-15 切欠つき広幅試験

表-6 大型試験の分類

特性	試験法	温度分布
発生および伝播	Deep Notch 試験 (図-14) 切欠つき広幅試験 (図-15) ESSO 試験 (図-16)	一様型
伝播および停止	Robertson 試験 (図-17) 二重引張試験 (図-18) ESSO 試験 (図-16)	勾配型または平型型

般に、脆性破壊の発生特性は種々の要因の影響を受けやすいので、最近改訂された基準では鋼板そのものの材質判定基準であることを考慮し、従来の一様温度型 ESSO 試験の非発生温度に基づく方法を取りやめて、ごく短い脆性亀裂 (亀裂長さ $2c=20\text{ mm}$) ならば、その伝播を阻止することのできる性能をもつ種別を新しく設け、これを G 種と呼ぶことにした。A 種としては、従来の基準

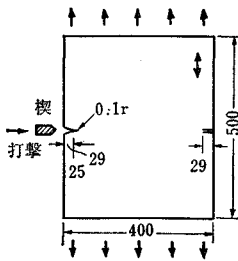


図-16 ESSO 試験

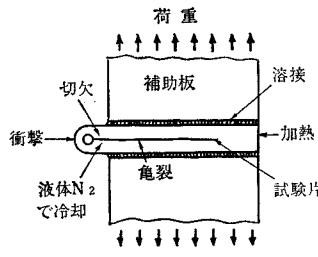


図-17 Robertson 試験

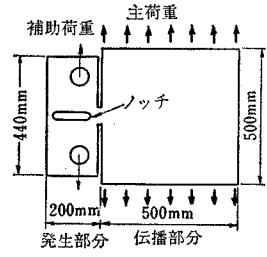


図-18 二重引張試験

と同様に亀裂長さが $2c=200\text{ mm}$ で停止することができ性能をもつものを採用する。

(4) 大型試験と小型試験との関係

工業的試験法として、いちいち大型試験を行うのは困難であるので、小型試験により材質判定を行う方が有利である。この場合、温度勾配型二重引張試験の停止温度 $\sigma_{y/2}T_{aG}$ と、プレスノッチシャルピー衝撃試験の脆性破面率遷移温度 ρT_c の間に良い相関関係があり、さらに vT_{rS} と同試験のエネルギー遷移温度 vT_{rE} の間にも相関関係があるので、順次にこれをつらねると、ばらつきはあるが、 $\sigma_{y/2}T_{aG}$ と vT_{rE} の間に相関関係が求められる。これをもとにして、各種の大きさの応力（設計応力）および最低使用温度に対して G 種および A 種の場合の vT_{rE} が推定される。したがって、指定された温度で V ノッチシャルピー衝撃試験を行い、同様の試験片で 100% のせん断破面（すなわち、延性破壊）を示す温度における衝撃値と比較して、前者が後者の 50% 以上、すなわち指定温度より低い vT_{rE} を示すならば、表示の設計応力、最低使用温度、最大板厚で G 種および A 種として脆性破壊に対する安全性が保証されたことになる。

例えば、25 mm 厚 SM 50 材 ($\sigma_{ta}=19\text{ kg/mm}^2$) を -30°C で使用する場合、G 種では $vT_{rS} \leq -15^\circ\text{C}$ 、A 種では $vT_{rS} \leq -45^\circ\text{C}$ である。また、50 mm 厚 HT 80 材 ($\sigma_{ta}=36\text{ kg/mm}^2$) を -30°C で使用する場合、G 種では $vT_{rS} \leq -40^\circ\text{C}$ 、A 種では $vT_{rS} \leq -80^\circ\text{C}$ である。

(5) 土木学会本四鋼材分科会における検討¹¹⁾

溶接継手部には、図-19 のように種々の欠陥が考えられる。これらの欠陥を考慮して、式(2)の K 値を修正する場合、土木学会本四鋼材分科会が与えた式は次のとおりである。

$$\text{Case ①: } K = f(c/B) \frac{t_1}{t} \sigma \sqrt{\pi c} + 6 Y_B \frac{f(c/B)}{f(t_1/t)} \cdot \frac{t_1}{t} \cdot \frac{eK_e + dK_d}{t} \sigma \sqrt{c}$$

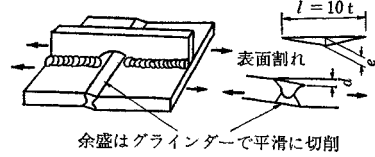
$$\text{Case ②: } K = f(t_1/t) \sigma \sqrt{\pi t_1'} + 6 Y_B \frac{eK_e}{t} \sigma \sqrt{t_1'}$$

$$\text{Case ③: } K = f(c/B) \sigma \sqrt{\pi c}$$

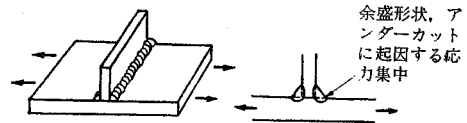
ここで、 $f(c/B)$ 、 $f(t_1/t)$ は、板幅、板厚の補正項、 t は板厚、 t_1 は切欠き深さ、 t_1' は溶接趾端部の相当切欠き深さ、 Y_B は曲げ応力の軸力による応力への換算係数、 K_e 、 K_d は角折れ、目違いについての係数である。

残留応力の効果を残留応力が大きい場合、 $K_{RS}=200\text{ kg/mm}^{1.5}$ 、小さい場合 $K_{RS}=70\text{ kg/mm}^{1.5}$ として加算し、さらに平面ひずみ状態（板厚 40 mm 以上になると実験結果は板厚によらずほぼ一定となり平面ひずみ状態

Case① 角折れ+目違い+非貫通切欠(ボンド部)
+残留応力(大)



Case② 隔内溶接toe部の応力集中(先端母材)
+残留応力(小)



Case③ 板厚貫通切欠(先端母材)
+残留応力(大)

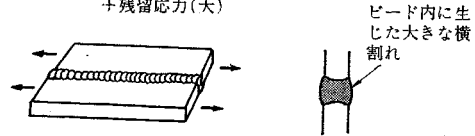


図-19 溶接継手に考えられる種々の切欠状欠陥

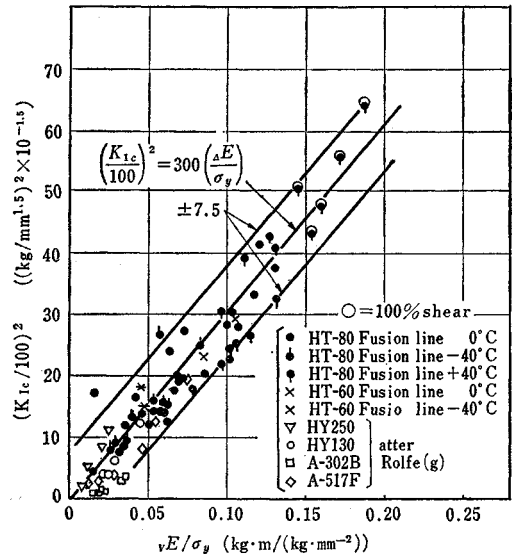


図-20 溶接ボルト部の遷移温度領域における K_{Ic} 値と vE の関係

とみなさせる)へ換算する。計算結果を表-7に示す。

HT 60, HT 80 についての数多くの実験を整理した結果として、溶接ボンド部について遷移温度領域で、図-20 のように

$$(K_{Ic}/100^2) = 300(vE/\sigma_y)$$

の関係があり、また、 vT_{rS} における K_{Ic} 値は約 $500\text{ kg/mm}^{1.5}$ であるとの報告がある¹²⁾。これらの関係を用いて、上述の要求 K_{Ic} 値をシャルピー値に換算し、表-

表-7

鋼種板厚	想定した欠陥	要求 靱 性 値		
		使用温度における K_{Ic} 値 (kg/mm ^{1.5})	使用温度における \sqrt{E} (kg-m)	使用温度を-30°Cとしたときの $\sqrt{T_{rs}}$ (°C)
SM50 (25 mm)	Case ①	295	0.93	+ 42
	Case ②	106	0.12	+204
	Case ③	244	0.63	+ 70
HT80 (50 mm)	Case ①	392	3.6	+ 3
	Case ②	252	1.5	+ 67
	Case ③	603	8.5	- 56

7 にあわせ示した。

これらの考察の結果は、HT 60, HT 80 についての実験結果に立脚しているからであるが、南港連絡橋に関連する諸検討の結果とほぼ一致している。しかし、SM 50 など低強度の材料についての検証例は少ない。これは、負荷応力が低いために、シャルピーの遷移温度領域ではなかなか脆性破壊しないからである。図-21 は、試験片の幅を 2.0m, 切欠きの長さを $2c=1.0m$ とした超広幅引張試験の結果である¹³⁾。

6. 質問内容

話題提供後、活発な質問がなされたのでその内容を簡単に列挙する。

① 表-1,2 をみると、国鉄の鉄道橋と北海道開発局の道路橋とで寒冷地用鋼材に対する規定値が異なっている。すなわち、道路橋はゆるく、鉄道橋はより厳しい。低温脆性破壊には、鉄道橋と道路橋とこれだけの差を設ける根拠が薄いと思われる(名古屋大学 菊池洋一)。

② シャルピー衝撃試験結果について、同一鋼種、同一板厚、同一採取位置でも、そのばらつきは大きい。表-3, 図-1~2 の結果から使用基準を定めるには、試験値のばらつき、分布まで確認する必要があるのではないかと(名古屋大学 菊池洋一)。

③ 図-19 には欠陥サイズが示されていないが、恐らくかなり大きなものを想定していると思う。これに対して計算された要求靱性値を見ると、現行の鋼材使用基準(国鉄、北海道開発局)および溶接品質(JRS, 道路橋示方書の許容レベル)は、脆性破壊に対して十分過ぎる安全率をもっているものと考えられる。そこで、現行基準を緩和することの可否をどのように考えるか。また King's Bridge の破壊事故をこの破壊理論(疲労亀裂の成長を含めて)でどのように説明できるか(横河橋梁製作所 明石重雄)。

④ T_{r15} はアメリカ合衆国の商船事故に対するものであり、橋梁のようなものに対する適用性はどうか(大阪大学 前田幸雄)。

⑤ 大島氏は WES の判定基準の採用を勧告されてお

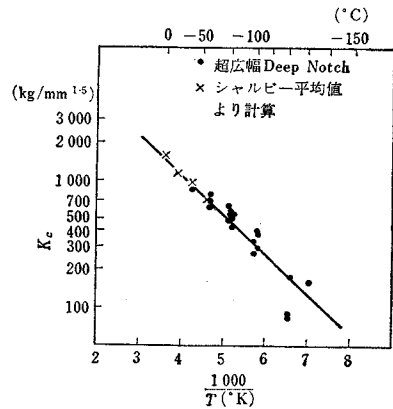


図-21 K_{Ic} 値と絶対温度の逆数の関係

り、堀川氏も WES の基準について述べておられるが、応力・施工の難易や冷間加工などの影響を点数制で具体的に考慮したドイツの Klöppel の鋼材選定の基準が知られている。また、さらにこれを修正したドイツの Bierrett の方法が、ハンガリーなどで鋼橋の鋼材選択に用いられている。Bierrett 法では、細部構造における単一または多軸応力の分布、形状や残留応力の影響などを構造要素と呼ばれる係数によって表わし、また、橋の部材や部分の崩壊が構造物全体の破壊をひき起すかどうかを重要度係数と呼ばれる係数によって表わし、この両係数の値と応力の性質、鋼材厚などによって適切な鋼材が選択できるようになっている。鋼橋設計者の立場から、この Klöppel 法や Bierrett 法を鋼材選定の基準として考えてはどうか(G. Bierrett, Bauingenieur Heft 6, 1959; Heft 8, 1960 参照)(大阪大学 前田幸雄)。

7. ま と め

討論内容の要旨は次のとおりである。

① 鉄道橋と道路橋と寒冷地用鋼材に対する規定値が異なっているのはおかしい。したがって、将来、さらに研究を深めて、合理的な共通規定値がつけられることが望ましい。

② Vノッチシャルピー値は誤差が多い。とくに、試験片製作時の工作誤差の影響が大きい。しかし、大型試験を行うことは実際上困難を伴うので、小型試験としてのシャルピー試験は簡便なので、それなりに評価されるべきである。表-3, 図-1~2 の値は、遷移曲線を板厚ごとに母材、熱影響部、溶着部ごとに作成して、その最も高温の値を記したものである。使用基準を作成する際には、個々の遷移曲線によって十分検討して作成したものである。

③ 図-19 で想定した欠陥は、Case ① の角折れ $e=10mm$ (1m スパンに対し)、目違い $d=2.5mm$ ($t=$

25 mm に対し), $d=5.0$ mm ($t=50$ mm に対し), 切欠深さ $t_1=8$ mm, 切欠長さ $2c=80$ mm; Case ② では切欠長さ $2c=25$ mm ($t=25$ mm に対し), $2c=40$ mm ($t=50$ mm に対し) であり, たしかに破壊力学を用いて脆性破壊の発生特性を論ずる限りでは, 現行の示方書などは十分すぎる安全性をもっているといえるので, 基準を緩和することが考えられる。しかし, それほど大きな支障がなければ, 現在保持している技術水準を低下させる必要もないと思われる。なお, King's Bridge については, R.B. Madison and G.R. Irwin: Fracture Analysis of King's Bridge, Melbourne, Proc. ASCE., Vol. 97, No. ST 9, Sept. '71. に, 破壊力学の適用がなされているので, それを参照されたい。

④ 大型試験片を用いた実験や破壊力学を用いた解析により, 作用応力や想定する欠陥の大きさを考慮した靱性の評価が行われている今日では, 第二次大戦直後の経験に基づく $\sqrt{Tr_{15}}$ は, 商船のみならず鋼橋に対しても, 判断基準の一つの参考値として重要である。実際の構造物の遷移温度は大型試験によって再現されるが, これらと小型試験による特性値との相関性については, 多くの努力がなされており, 図-20 などはその一例である。したがって, 簡単な小型試験が新しい認識の対象として価値づけられてきていることは好ましいことである。

⑤ Klöppel 法や Bierett 法などの手法についても,

わが国としても今後の研究の対象とすることは必要である。

参考文献

- 1) 友永和夫: 鉄道橋の保守並びに補強方法について, 土木学会夏期講習会パンフレット [II], 昭和 26 年。
- 2) 西村俊夫: 溶接鉄道橋の破損事故, 溶接学会誌, 第 37 巻 (1968) 第 10 号, pp. 12~16。
- 3) 土木学会編: 鋼鉄道橋設計標準解説, pp. 77~79, 昭和 45 年 3 月。
- 4) JRS 05000-1 D-13 AR 1 F, 鋼鉄道橋, 昭和 46 年 12 月 21 日改正, 日本国有鉄道。
- 5) 国鉄構造物設計事務所: 鋼橋設計内規 3.2 A, 北海道向け溶接桁, 構造物設計資料 (季刊) 日本鉄道施設協会, No. 28, pp. 10~11, 1971-12。
- 6) 同上: 鋼鉄道橋製作仕様の解説, 寒冷地に使用する構造用鋼材, 同上, No. 29, p. 14, 1972-3。
- 7) 同上: 寒冷地に使用する構造用鋼材の衝撃値, 同上 No. 30, pp. 9~12, 1972-6。
- 8) 越賀房夫: 脆性破壊試験法について, 溶接学会誌, 昭和 38 年 3 月, pp. 4~10。
- 9) 木原博・佐藤邦彦・豊田政男: 日本における溶接構造物の脆性破壊発生に関する研究 (その 1), 溶接学会誌, 第 42 巻 (1973) 第 2 号, pp. 69~90。
- 10) 池田一夫: 低温溶接構造物の設計, 溶接学会誌, 第 34 巻 (1965) 第 3 号, pp. 3~18。
- 11) 土木学会本四鋼材分科会: 昭和 47 年度報告書。
- 12) 伊藤・田中・佐藤: 造船学会論文集 131 号, 昭和 47 年 5 月。
- 13) 堀川・伊藤・田中: 溶接学会 48 年度秋季講演会。



河川、海岸、港湾の護岸消波用、道路擁壁用、
用排水路用、宅地造成用、(東光石等の環境整備用)各種ブロック、
その他、各種コンクリート製品

共和コンクリート工業株式会社

取締役社長 本間 英明

本社 札幌市中央区南 1 条西 1-8 (有楽ビル) 電話(011)251-0181
 東京本社 東京都文京区小日向 4-6-19 (共立会館) 電話(03)943-4371~4
 支店 旭川、札幌、帯広、函館、青森、秋田、岩手、
 仙台、北関東、千葉、神奈川、名古屋、北陸、大阪、九州、福岡
 研究所 技術研究所(札幌市) 中央研究所(埼玉県北本市)
 代理店 岡山、広島(三原市)、山口、徳島、出雲