【報　告】

高張力鋼におよぼす溶接熱量の影響

奥　村　敏　恵*

1. はしがき

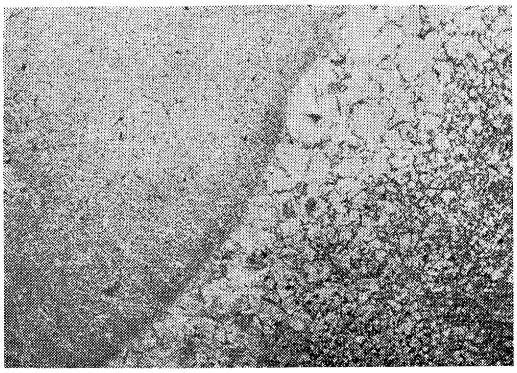
技術または工学の分野では，いわゆる常識とよばれる考え方がときには大変な間違いをおかしている場合がある。このようなものも理論または実験による解析を経て正しい結果がわかつてみると，はじめ常識的でないと思つたことが，普通の常識判断で納得される場合が多い。このような点を明確にすることも研究の一つの主要な目的であつて，技術はこの解明によつて段階的に発達する。新しい技術はしばしばこうしたことにぶつかり，その採用に多くの困難をともなうものである。この場合，この現象を明確に体系づけることが早いほど，それによる経済効果の実をあげる時期が早くなる。ここに述べようとする事象もこの一例と考えられる。

最近橋梁，水圧鉄管，球形タンクなどの構造物に，より強度が高く，いわゆる溶接性の良好な高張力鋼を使おうとする傾向が高まつた。これは貴重な材料をより有効に使おうとする目的にかなうものであつて，単に表面的な経済でなく，わが国のように鉄鋼の原料を外国より輸入する国にとつては大いに心すべきことである。しかもこのような材料を用いる場合，この性能を最高度に発揮させるように設計製作に意をはらうべきであることは，いうまでもない。

このような高張力鋼は溶接性をよくするために炭素含有量を少なくし，これにともなう引張強さの低下を償うため，マンガン，珪素を余計におぎなつている。この結果はマンガンと炭素の含有量比を高くし，脆性破壊の基準となる切欠じん性を高めることになり，好ましい傾向を持つ。

一方引張強さ 41 kg/mm² を保証する普通鋼材でも板厚が厚くなり溶接性を要求することになると，その価格は全く変らなくなり，以下に示すと同じ程度の溶接の問題が入つてくるのを考慮にいれておかねばならない。さてマンガン量が多くふくまれるようになると，冶金的組織より見て，オーステナイト組織となり水素の吸着性が高まる。一方溶接後の熱の与え方が不均衡で，急速な冷却がおこなわれると，溶接近傍の結晶粒の粒度が増大し熱影響部の硬度が高まる。この一例を**写真—1**に示す。一方このような急冷却は鋼の変態点を低下させ，青脆温度近くまで降下すると変態応力の結果，ビード下われの危険性も入つてくる。これらは溶着金属にふくまれる水素の含有量が大になるほど，きびしい様相を示すものである。従つてマンガン珪素等によつて，いわゆる溶接性のうちの使用性能，すなわち衝撃エネルギー吸収能力を高めた材料を溶接するときにはこれに対する注意を必要とする。一方アルミニウム珪素等で不完全な鎮静を行うと，表面に近いミクロラミネーションを原因とし，隅肉溶接後板厚方向に力がかかると，いわゆるはく離現象をおこす可能性が生ずる。このような溶接熱を与えたのちのミクロラミネーションの発生に関して製鋼圧延上，十分な注意を払つてもらう必要があるが，一般に鎮静した材料はラミネーションの存在に対し安全側にあることがいえる。この点いわゆる良好な溶接性をねらつた高張力鋼はラミネーションに関しては安全と考えてよいであろう。しかしこのように良好な溶接性を有しておれば無条件に安心してよいであろうか？　いくぶん不利な板でも溶接施工の条件を調整することにより，改善する余地はないであろうか？　これに答えるため溶接施工条件の影響をしらべる必要があると思われる。

写真—1　50 kg/mm² 高張力鋼の表面にビード溶接したものよりとつた顕微鏡写真 (Illinois. 昭. 32)



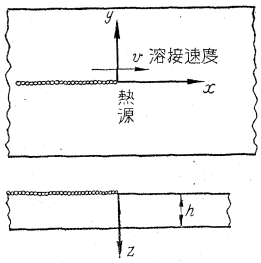
左より溶着金属境界が明確であり熱影響部の結晶粒の粗大化が見られる（倍率 400）

さて溶接現象の重要な特徴はごく狭い巾に，多くの場合一つの直線に沿つて移動しながら多量な熱を与えることである。しかもこの供給熱源は溶接終了と同時に中止される。この熱を受けた周囲の板は熱伝導により温度上昇を生じ，最高温度になつたのち冷却過程に移る。この場合，周囲の温度が低い場合とか熱の与え方およびその中止が急速であると，溶接線の近傍の板の冷却速度も大となる。このように冷却速度が大となると，鋼の変態温度を低下させ，焼入れ効果を与える危険性がある。一方溶

* 正員　工博　東京大学助教授　工学部土木教室

接後の材のひずみを考えると，熱の与え方が大きいほど大きいものと予想される。従つて一般にあまり大きい溶接熱を与えることをきらうのが常識と思われていた。しかし実際の効果を考えると，溶接線の近くの隣接する点の各瞬間における温度の差が問題となる。このようなことを明確にするためには溶接熱によつて生ずる板の温度分布に関する理論的な手がかりを持つ必要がある。このような研究に関しては数多くの論文[1),2),3),4)]が発表されている。これを総合すると次のようになる。すなわち 図—1 に示すように板の面上の一つの直線（x 軸にとる）に沿つて同じ速度でアーク（熱源）が移動する場合，三次元の熱伝導の式より，板の温度常数を温度に関し一定と仮定すると，板に生ずる温度分布 Θ を計算することができる。この値は溶接開始および終了付近を除けば，いわゆる準定常状態となり，下式に示す値となる。

図—1 板の表面にビード溶接を行う場合



$$\Theta=\frac{q}{2\pi\kappa h}e^{-\lambda vx}\left[K_0(\lambda vr)+2\sum_{n=1}^{\infty}\cos\frac{n\pi z}{h}\cdot K_0\left\{\lambda vr\sqrt{1+\left(\frac{n\pi}{\lambda vh}\right)^2}\right\}\right]$$

ただし q は熱源の強さ（cal/sec），v は溶接速度（mm/sec），h は板厚（mm），κ は熱伝導率（cal/mm °C sec），$1/2\lambda$ は熱拡散率（mm²/sec），$r=\sqrt{x^2+y^2}$，K_0 は第二種の Modified Bessel Function である。一般に $K_0(\alpha)\fallingdotseq\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}e^{-\alpha}$ で示される。なお鋼では λ（0°C と 800°Cの平均値）$=6$ sec/cm²，$\kappa=0.1$ cal/cm °C sec であたえられる。

式が示すように第一項は板厚方向 z に無関係に一定な値であり，第二項は z に関係して変わる値である。いま現在の熱源の後方 x（>0）の位置の温度を考えると，第一項は $\frac{q}{2\pi\kappa h}e^{\lambda vx}K_0(\lambda vx)\fallingdotseq\frac{1}{2\sqrt{\pi}\kappa\sqrt{\lambda x}}\cdot\frac{q}{\sqrt{v}}$ となる。

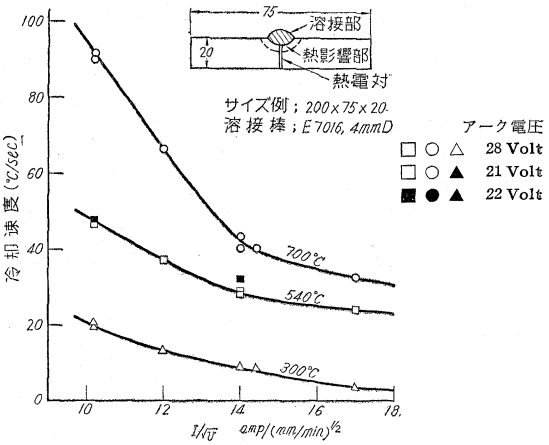
q は溶接電流 I，溶接電圧 V，効率 η の積であらわされる。実測によると[5)] ηV はほぼ一定であるから，q は I に比例するとみなされる。このような関係より溶接熱の効果は $I/\sqrt{v}$ に比例するとみなされる。以下溶接施工の熱効果の特性値として $I/\sqrt{v}$ をとり，この相違が鋼板とくに高張力鋼板におよぼす影響について述べることにしよう。

もし溶接熱を多量に与えることが不利であれば，$I/\sqrt{v}$ と特性値の間の関係が，明確にその事象を示すものと考えられる。

2. 溶接熱影響部の冷却速度と硬度

すでに述べたように軟鋼にくらべて硬化性のいちじるしい高張力鋼では，熱影響部の延性およびビード下われの危険性を防ぐため，溶接部の急冷効果をできるだけ緩和するように，板厚と継手形状に応じた適切な溶接条件を選定しなければならない。これを基本的に解決するためには，冷却速度の溶接熱影響部におよぼす条件を明確にすればよい。前述の式より $\partial\Theta/\partial t$ を計算すれば理論的には明らかにすることができるが，溶接部の巾を考慮すると必らずしも実情に即したものとはいえない。このためには実際の溶接を施し熱電対を使用して，溶接後の冷却速度を測定することによつて解決される。従来この問題についても多くの研究者がとりあげ，測定を行つている。すなわち Hess[6)]，Cottrell[7)]，仲[8)]，鈴木[9)] 等がそれである。筆者はこのうち特に鈴木氏の行つた資料にもとずき，溶接施工条件をあらわす特性値として $I/\sqrt{v}$ を選び，これらの条件のもとで溶接した場合の溶接熱影響部が溶接後冷却過程に移り，700°C，540°C，300°C を通過するときの冷却速度を $I/\sqrt{v}$ と関連させて整理してみた。これが図—2 に示すものである。

図—2 冷却速度におよぼす溶接条件の影響
$I\fallingdotseq170$ amp.



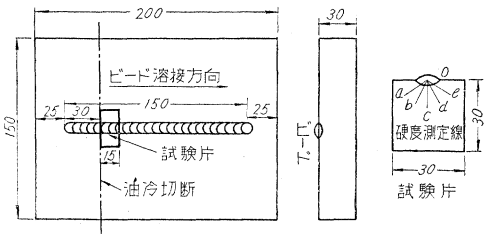
この実験は厚さ 20 mm の板の表面に溶接電流 170 amp，溶接電圧 21～28 volt，溶接速度 100～275 mm/min で低水素系溶接棒を使用しビード溶接し，ビード直下の温度の変化を熱電対および，オッシログラフで測定したものである。このような値は継手の形状，板厚が変わると，いくぶん変わることが予想されるが，実際には溶接熱の影響は溶接部のごく近傍にかぎられることより考えると，かなり一般性を持つものとみられる。特に注目すべきは $I/\sqrt{v}$ が 14 amp/(mm/min)$^{1/2}$ 以下の溶接条件を採用するとき，熱影響部の冷却速度が急激に増大する点である。このうち変態点温度に近い 700°C を通過する際の冷却速度が大となることである。これは焼入れ効果を

強くすることがいえるわけである。特に橋梁のような構造物は隅肉溶接を多用するわけであるが，この場合にはこの種の現象が特にいちじるしく現われると考えねばならない。なおこの現象は板厚が厚くなるほど，また周囲の気温が低いほどきびしいものであると思われる。さてこのような急冷効果が実状の高張力鋼を使用した場合，いかなる影響をおよぼすかを調べる必要がある。このため特に八幡製鉄の厚意で製鋼してもらつた**表—1**に示す機械的性質および化学成分を持つ Wel-Ten 50 について以下に示す実験を行つた。そのうち，まずビッカース硬度測定について述べることにしよう。

表—1　使用材料の性質

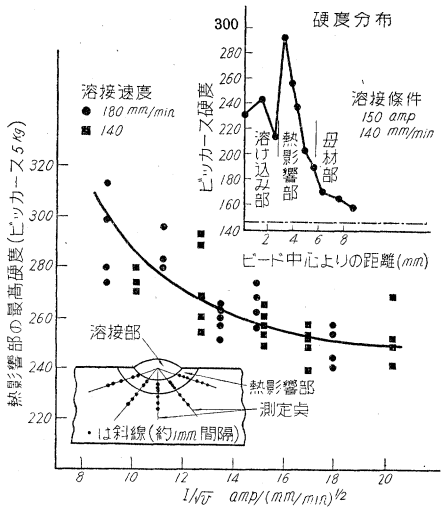
機械的性質		化学成分（%）						
引張強さ (kg/mm²)	降伏点 (kg/mm²)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al
55.5	33.5	0.15	0.44	1.20	0.014	0.019	0.18	0.05

図—3　試験片の製作と硬度測定要領



すなわち板厚 30 mm，200×150 mm の平板を準備し，**図—3**に示すように板の表面にビード溶接を行い，アークの出発点より 30 mm 離れた点——温度分布が準定常状態になると考えられる点——でビードに直角方向に油冷切断をおこない，これより試験片を作製した。研磨は最初サンド ペーパーで十分みがいたのち，研磨盤にかけた。アルミナの粉末を水でとき，約3分間ほど静置し，大きな粒を沈殿させたのちの上澄液を用い，これを一滴ずつ研磨盤の上に落しながら試験片の試験面の回転している盤の上に，力を抜いてあて，鏡のようになるまで磨いた。なお溶接熱影響部で硬度が上昇する部分は，溶接境界層に隣接するきわめて薄い層であることが想像されるので，測定点相互の影響を少なくし，かつ相互の間隔を細かくし精確に実際の値をとらえうるようにするため，荷重を 5 kg におとし，ビードの中心より放射直線上に硬度計にとりつけた顕微鏡をずらせて，できるだけ組織と関連をもちながら測定を行つた。溶接棒はわが国市販の高張力鋼用の代表的な径 4 mm の低水素系溶接棒2種類を使用した。この結果を**表—2**，**図—4**に示す。

図—4　熱影響部で測定された最高硬度（東大，昭．32）



なおビード中心より離れるに従つて，硬度の値がいかに変化するかを考察した一例を**図—4**の右上の付図に示した。

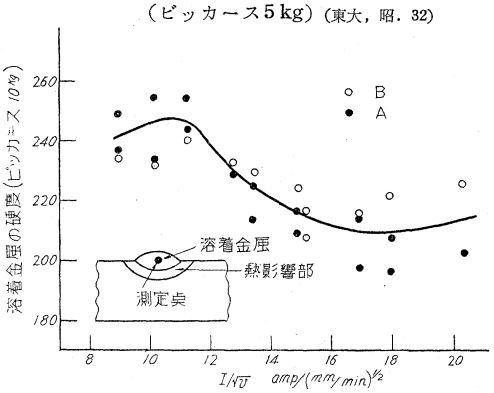
表—2　溶接条件およびビッカース 5 kg 硬度

溶接電流 I (amp)	溶接電圧 (Volt)	溶接速度 v(mm/min)	$I/\sqrt{v}$	使用溶接棒 A ビード 1 cm 当りの使用溶接棒長 (mm)	使用溶接棒 A ビード中心部の硬度	使用溶接棒 B ビード 1 cm 当りの使用溶接棒長 (mm)	使用溶接棒 B ビード中心部の硬度	熱影響部の最高硬度 ビッカース 5 kg
120	23	140	10.1	14.0	254 234	14.5	232	280, 274, 274, 274, 271
120	23	180	8.9	10.5	249 236	11.0	234	313, 299, 280, 274, 299
150	25	140	12.7	15.5	219 219	15.5	232	293, 268, 254, 260, 289
150	25	180	11.2	12.0	254 243	12.5	240	296, 280, 280, 283, 296
180	27	140	15.2	18.5	207 207	19.5	216	260, 265, 254, 257, 249
180	27	180	13.4	14.0	225 213	14.5	229	260, 265, 257, 251, 263
200	30	140	16.9	18.5	215 197	21.5	216	249, 257, 239, 254, 251
200	30	180	14.9	14.5	216 209	16.0	223	262, 274, 256, 268, 268
240	32	140	20.3	22.5	202 189	24.0	225	268, 249, 241, 251, 251
240	32	180	17.9	20.5	207 196	19.5	221	257, 254, 241, 244, 257

註　母材の硬度；136～158　平均値；147　標準偏差；6

これによると熱影響部の硬度は溶接溶け込み部に隣接した 0.2 mm くらいの巾の層に高いピークを示し，測定位置が少し離れると急に低下することがいえる。しかも一般的傾向からいうと，この最高硬度の値は溶接条件に支配され，$I/\sqrt{v}$ が大になるに従つて低下する。$I/\sqrt{v}$ $=14$ amp/(mm/min)$^{1/2}$ より大となると，260 前後の値に落着く。この場合は 30 mm の板厚に対して適用したのであるが，**図—2** に示した冷却速度の特性と全く一致した傾向を示し，溶接熱影響部の硬度の増加は溶接熱の不均衡な与え方による冷却速度の値のみに関係をもつものであるといえる。また同じ $I/\sqrt{v}$ でも溶接速度のおそい方がいくぶん有利である。またその硬度も板厚表面すなわち溶接部のいわゆる趾に近いほど高い値を示す。**図—5** に溶接ビード中心部の硬度が溶接条件でいかに変るかを示す。使用された溶接棒が違うと，その硬度もいくぶんの相違を示すが，$I/\sqrt{v}=14$ amp/(mm/min)$^{1/2}$ を境として，それより低い条件の場合には高い硬度を示す。なおあまり高い値になると，すなわち，心線径 4 mm の溶接棒を使用した場合，溶接電流 240 amp となると逆に硬度が高くなる。結晶組織より見ると，粒度があらくなり溶接境界部がいりみだれる。このような点より見ると，$I/\sqrt{v}$ が大となつてもあまり高い溶接電流は必らずしも有利ではないことは注意を要する。

図—5 溶着金属ビード中心部の硬度
（ビッカース 5 kg）（東大，昭．32）



3. 溶接された鋼の低温脆性 —きれつ発生感度—

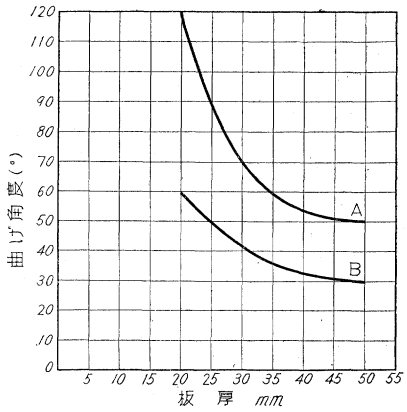
$I/\sqrt{v}$ の低い条件で溶接すると，実験に使用した高張力鋼はその熱影響部に，いちじるしく高い硬度のピークを示すことがわかつたが，このような条件が実際構造物として使用したとき，いかなる問題を発生するかを調べてみる必要がある。従来溶接構造物として大きな問題を投げているのは，溶接にもとずく鋼の脆化といつた点である。このためできるだけじん性にとんだ鋼を選び，溶接による脆化をおぎなおうとしているのが実情である。しかしせつかく優秀な材料を選んでも，溶接条件が不適の場合には，その真価を発揮するわけにゆかない。逆にいくぶん不利な鋼材を選んだとしても，溶接条件を最適にすることによつて，その不備をおぎなうこともできるわけである。さて溶接による脆化とは，いかなるものであるか。これについて考えてみよう。

一般に溶接構造物のように板で形成された構造物が荷重を受けて破壊する場合には次のような経過をたどるようである。すなわち板の中に欠陥——形状の急変化，溶着金属のブローホール，割れ，不溶着部などの欠陥の存在——が存在すると，その周辺にいちじるしい応力集中を生じ，大きな塑性変形を生ずるか，あるいは変形なしにその欠陥が拡大しはじめる。拡大した欠陥はより低い荷重状態でその拡大を促進させることになり，板全域にわたつて割れが伝播することになる。

このため低い平均作用応力で破壊するという結末となる。なおこのような伝播段階に移つた割れは，もろい様相を示す。このような割れの発生機構に関し，いわゆる Griffith Orowan の式[10] が適用されるとすると，単位面積あたりの表面塑性仕事量が関係する。このような値は，溶接により当然影響を受けると考えなければならない。なおこのように発生した割れは伝播の段階に移るわけであるが，**図—4** の付図が示すように溶接熱の影響を受けるのはわずかの範囲で，その他は鋼本来の性質を失わないとみなすことができるから，破壊の伝播を阻止するに十分な延性の条件を示す鋼材を選べば危険を未然に防ぐこともできこの点は解決される。幸い現在生産されている高張力鋼はその性質を備えているとみなすことができる。

しかし溶着金属に欠陥が存在し，それを核として割れが拡大するとき，溶着金属の隣接部分の性質は当然重要な役割を持つと考えなくてはならない。このような割れの発生条件を調べる実験に関し多くの提案[11]がなされている。筆者はこのうち溶接，形状変化等の要素を盛り込んでいるオーストリアの規格のビード曲げ試験[12]をとりあげた。この試験は 1940 年ごろ相続いて事故を起した溶接橋梁[13]の調査に採用した Kommerell 試験を改良したものである。この試験は材料と溶接に関する問題を究明するに役立つたことが報告されている。なおこの改良型（溶接する箇所に溝を掘るように考えた）であるオーストリア ビード曲げ試験は，鋼材の溶接適性を調べる試験に用いているが，その判定基準は **図—6** に示すように破断面の外観によつて 2 つの曲線を用いている。危険側の条件を示す脆性破面に対しては低い基準をその採否の判断に用いている。溶接による脆化をおそれるために課した試験で，このような条件をもち出しているのは溶接条件により，その試験結果がばらつくおそれのあることを示したものであり，数多くの試験の結果このような救いの基準を示したものと思われる。いずれにしても溶接部およびその近傍の割れの発生の可能性に対する抵抗の度

図—6 オーストリヤの基準による判定値



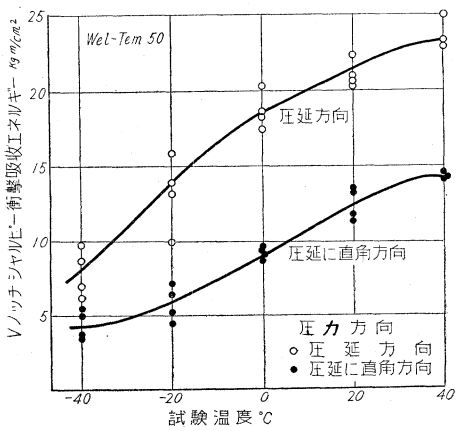
ビード曲げの破断面の性質

破断の形式	破断の進行状況	破断面の外観	最小曲げ角度（きれつの入り始め）
延性	完全に破断するまで除々に進行	にぶい灰色で絹糸状を呈す	線曲Aによる
一部脆性	突然全断面積について破断	一部結晶状（ぎらぎらしている）一部に絹糸状を呈す	曲線Bによる
脆性	同上	結晶状を呈す	同上

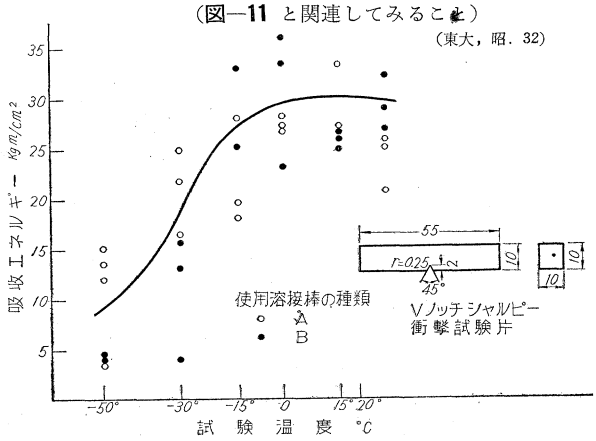
合を示す実験としては一応正しいものと考えてよい。そこで筆者は同一鋼材より試験片を作り溶接条件による影響を調べてみた。

この実験に先立つて使用した鋼材および溶接棒によつて作られた溶着金属のVノッチ シャルピー衝撃値が，試験温度によつていかに変るかを調べてみた。なお鋼材については圧延方向およびそれに直角方向の二とおりのとり方をした。このようなVノッチ シャルピー衝撃値は割れの伝播に対する抵抗を示す一つの特性値と考えられている。この実験結果は **図—7,8** に示すような値であつて，現在の技術水準においては最高の値に近い優良な性質を

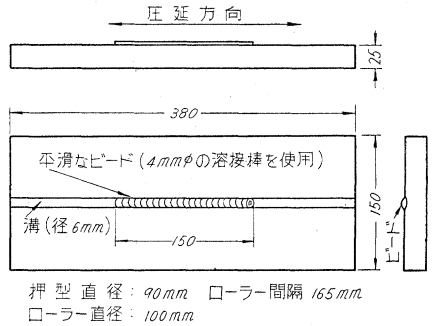
図—7 実験に使用した鋼材（Wel-Ten 50）のVノッチ衝撃試験による吸収エネルギーと試験温度の関係（0°C における値は 6 以上である）（東大，昭. 31)



図—8 溶着金属のVノッチ衝撃試験による吸収エネルギー（**図—11** と関連してみること）（東大，昭. 32)

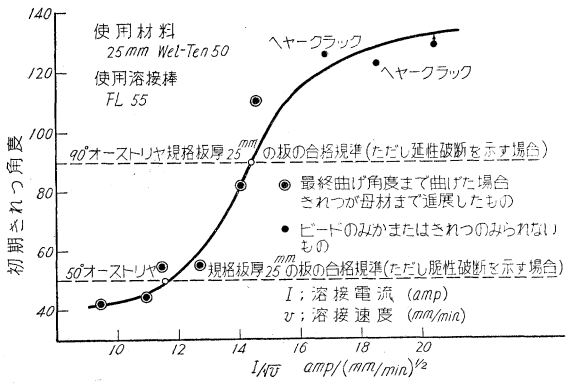


図—9 板厚 25 mm の場合のオーストリヤ ビード 曲げ試験片の形状（20 mm より 5 mm ごとにその形状を変えている）

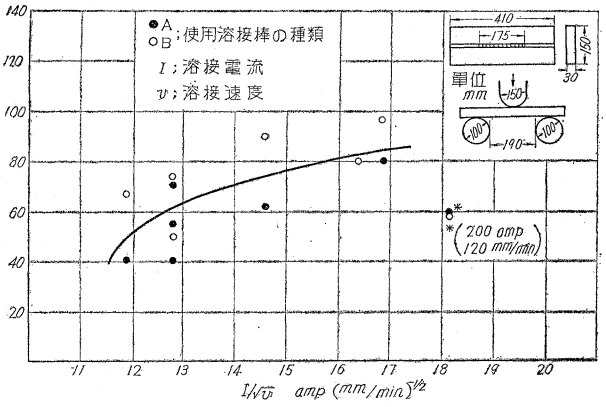


示すものであることが判明した。実験は板厚 25 mm（**図—9** にその試験片の形状を示す）および板厚 30 mm について行つた。板厚 30 mm については 2 種類の溶接棒を採用した。それぞれの実験結果を **図—10,11** に示し，曲げた後の状態を **写真—2** に示す。**図—10** に示す板厚 25 mm の結果では，硬度の測定で示された一つの境界溶接条件である 14 amp/(mm/min)$^{1/2}$ の値で溶接された

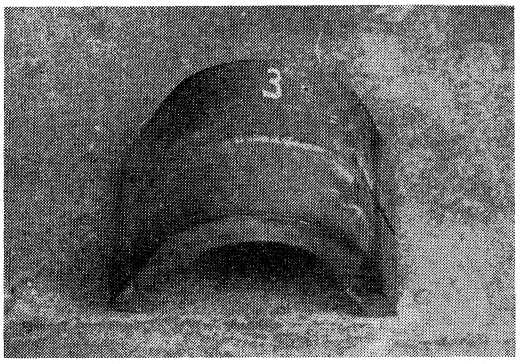
図—10 オーストリヤ ビード試験と溶接熱量との関係（Wel-Ten 50）（東大，昭. 31)



図—11　オーストリヤ ビード曲げ試験と溶接条件（特に溶接棒による影響）（東大，昭．32）



写真—2　オーストリヤ曲げ試験（東大，昭．32）
（I=160 amp, v=120 mm/min）



62° でわれが入り始めたが，120° まで曲げても母材までわれが発展しなかつた。

ものは初期きれつ角度に関して一つの遷移状態を示すものであることが示された。しかもこのような溶接条件の付近でオーストリヤ規格の合格基準のA曲線，およびB曲線の間に入り，最終曲げ角度まで曲げた場合，われが母材まで進展した。なお $I/\sqrt{v}$ が 12 amp/(mm/min)$^{1/2}$ 以下の条件で溶接したものは優秀なVノッチ衝撃値を示す同一鋼材であるのにもかかわらず，オーストリヤ規格に不合格の値となつた。このようなことは，たとえすぐれた鋼材を使用しても溶接条件が不適の場合には，われの発生の感度が鋭くなり，危険を包含することを意味する。この点より見ると高張力鋼に対しては，ある程度高い溶接熱量を与える溶接を行う必要のあることが示されたと見るべきである。**図—11** はさらに厚い板厚 30 mm のものに対して2種類の国産低水素系溶接棒 A,B を使用して行つた実験結果であるが，全体として板厚25mmのものより低い曲げ角度で破壊し，板厚がわれ発生感度に関係の深いことを示した。なお **図—5** の結果が示すように溶接条件に対しビード中心部の硬度の変化がいちじるしい，かつ低い $I/\sqrt{v}$ で高い硬度を与える溶接棒Aを使用したものはより低い曲げ角度でわれが発生した。また溶着金属の境界層近く結晶粒子がいりみだれているもの——溶接電流 200 amp——では低い曲げ角度でわれが入つた。これらの点より見ると，われの核は溶着金属およびその境界にあるといえる。なお心線直径 4 mm の溶接棒については，160～180 amp が適正電流であることが実証されたとみるべきであろう。なお溶接開始時の鋼材の温度が問題となると考えられるので，板厚 22 mm の同一高張力鋼に対して，−30°C，−10°C および常温 26°C の条件で行つた実験結果を **表—3** に示す。

表—3　われの入る曲げ角度

溶接条件 $I/\sqrt{v}$ amp/(mm/min)$^{1/2}$		11	16
溶接開始時の鋼材の温度	26°C	57	132
	−10°C	45	120
	−30°C	41	64

$I/\sqrt{v}$ の値を大きくすれば比較的低い材の温度 −10°C でも高い曲げ角度を示すことがいえる。

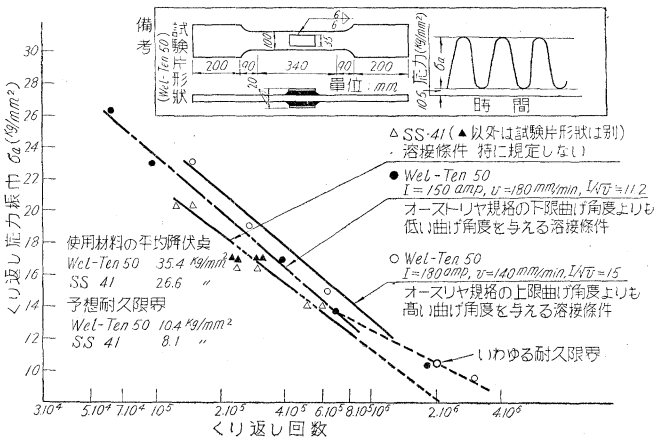
4．溶接された鋼の疲労強度

溶接構造物を設計する場合，脆性破壊とともに問題となるのは疲労強度である。土木構造物，特に橋梁ではその構造上隅肉溶接を多用するのがその特徴である。しかしこのような隅肉溶接が不連続となる箇所，例えばカバー プレートの終端またはスチフナー，ガセットのとりつけ箇所では従来その疲労強度がいちじるしく低下することが指摘されている。特に引張強さの高い鋼材ほどその低下がいちじるしい。この疲労破壊の機構についてはいずれ稿を改めて書くことにするが，筆者の考えによると，疲労破壊の核の生ずる付近の延性（ひずみ硬化の条件）がその核の進展速度に関係を持つと考えられる。一方上記カバー プレートの疲労破断面を観察すると，隅肉溶接の趾に沿つて疲労核が発生することが見られる。このような点より見ると，ごくせまい範囲にしても，溶着金属に隣接する高い硬度の領域は，疲労核の進展に影響をもつものと考えられる。その定量的な結果を知る目的で **図—12** の付図に示すように，その両面に添板を隅肉溶接した試験片を **表—1** に示す素材よりつくり，国鉄技研 多田美朝氏の好意を得て Losen Hausen 疲労試験機を使用し実験を行つた。

溶接は **図—10** で得た実験結果に従いオーストリヤ規格の延性曲げ角度より高い曲げ角度を与える溶接条件とオーストリヤ規格の脆性曲げ角度より低い曲げ角度を与える溶接条件の二とおりの条件のもとで溶接を行つた。なお溶接は前面中央点より左右振りわけに溶接を行い，まわし溶接し各ビードの溶接終了点を側面隅肉の中央点におくようにした。

疲労強度は予想どおり，溶接条件の優良な，すなわち有効溶接熱量の比較的高い方がすぐれた値を示し，少な

図—12 カバー プレートをつけた Wel-Ten 50 の片振疲労強さ
(東大—鉄研，昭. 31)

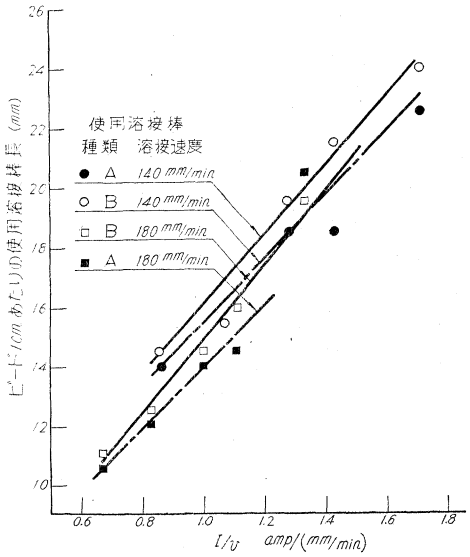


くとも 1 kg/mm² 以上の強度の上昇を示した。参考のため示した降伏点の低い SS 41 を使用し，同一疲労試験片で得た結果と比較すればその価値が判明すると思う。いずれにしてもこのように疲労破壊に敏感な溶接構造物では，溶接条件もまたその強さを支配する一つの要素となることを忘れてはならない。なお破断面を見ると，予想されたとおり最高硬度を示す溶着金属と，熱影響部の境界に疲労核の中心が見られ，その部分の性質が疲労強度を支配したことがうかがわれた。

5. 溶着熱量と溶接われ

従来理論的取扱いより，溶着熱量が高いほど収縮変形の割合が大となり，溶接われの発生の危険性が大となることがいわれてきた[14]。ある点ではこのことは成立する。しかし溶接われは収縮変形のみが条件ではない。さらに収縮われに抵抗する断面の形および大きさも考慮さ

図—13 溶接条件と溶着量との関係 (東大，昭. 32)
(I：溶接電流，v：溶接速度)



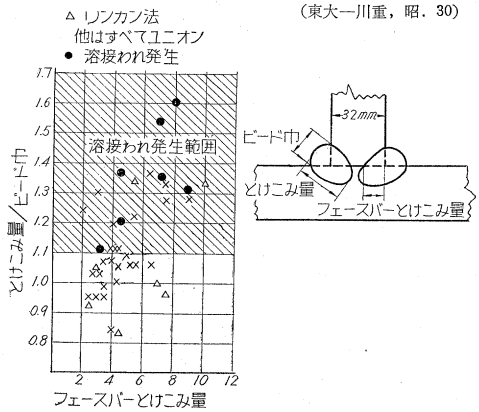
れねばならないし，その組織の発達の状態も考慮する必要がある。つまり溶接によつて与えられる条件を総合して考える必要がある。一般に溶接熱量が大となると，単位溶接長あたりの溶着量が大となり，溶接後の収縮変形に抵抗する断面積が大となる。この性質を示したものが **図—13** である。**図—13** は溶着ビード 1 cm あたりの使用溶接棒長と I/v の関係を示したものである。溶接棒の種類，溶接速度の大きさによつてその比例常数は異なるが，単位長の溶接のために使用する溶接棒の量は大体 I/v に比例する。溶接中のスパッターによる損失はあるが，使用溶接棒長と溶着量は比例すると見ることができる。この点を考慮して収縮変形による溶着金属断面の平均の収縮応力を計算すると，溶接熱量の影響はなく，ただ溶接棒に特殊な熱効率，溶接継手(衝合溶接を対象とする)の溝の巾が問題となり，応力集中の関係より溶着後の形状および内部に生ずるブローホール，スラグ等の欠陥の形状，および一般に周囲からの拘束条件，溶着金属の延性がその収縮われの主要な条件となる。これらは主として使用溶接棒および継手の設計に関係するものである。周囲からの拘束条件を一定とすると使用溶接棒に関する上述の諸性質が問題となるが，一般に低水素系溶接棒は溶接開始付近および終了付近に生ずるブローホールの混入の可能性を除けば，すぐれた性質を持つということができる。なおこのようなブローホールに対しても特殊な工夫[15]によつて解決されており，溶接われにとつて十分安全な方向に向つている。このような結果低水素系溶接棒を使用した場合には周囲よりの拘束がいちじるしい場合でも，溶接われの可能性はほとんどないといつてよく，まして溶着熱量とは全く無関係と考えてよい。

しかし自動溶接法を使用するようになると，手溶接と異なつてその溶接熱量はいちじるしく大となり，この点より収縮変形も大と考えねばならない。ここに溶接われと溶着熱量の関係が問題になると見なければならない。さてユニオンメルト法による自動溶接を行うとき，まず問題となるのは使用電圧である。一般に手溶接では，使用電圧が大となると（一般にアークの長さが大となるとこの傾向をおびる)，母材にとけこむ深さが大となるが，自動溶接では全く逆であつて，使用電圧が低いほど深くとけこんだ形状を示す。なおこのような形状は電流の大きさ，溶接速度にも関係する。なおユニオンメルト法による自動溶接では当然溶着量が大となり，母材に接する周囲の部分と，中央部分ではその冷却の時間にずれがある。このため母材に接する周囲の部分から中央部分に向つて，いわゆる Dentrite 組織と名づけられる柱状の組

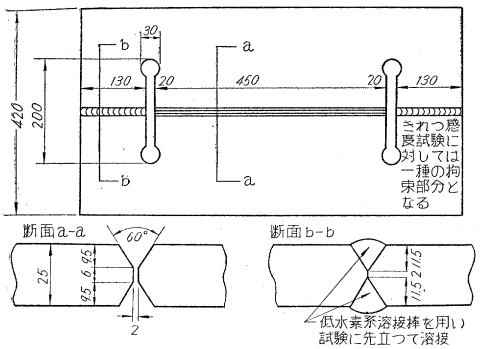
織が発達し，ビード巾に比し深くとけこんだ形のものはこの Dentrite 組織が中央部分に密に集まり，一つの弱点を形成し，拘束状態がきびしいときにはこれが溶接われの原因をつくる。

事実 **図—14** に示すように 32 mm の板を両L形溶接した場合とけこみ量とビード巾の比が高いほど溶接われの生ずる危険性が大であることを示した。これは溶接熱量では説明できない現象である。このような点を考慮し

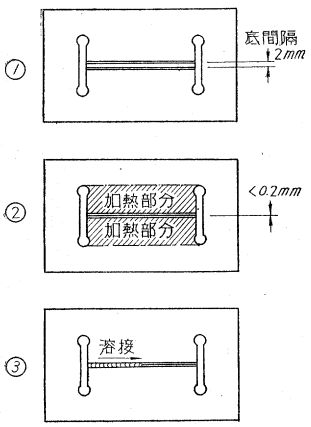
図—14 溶接われと自働溶接法による溶着形状 (東大—川重，昭．30)



図—15 ユニオンメルト法による衝合溶接のわれの発生を知らべた試験片 (東大—横河橋梁，昭．31)



図—16 試験片の順序



高張力鋼をユニオンメルト法により溶接したとき，溶着熱量と溶接われの関係がいかなる性質を示すかを知るため以下に示す実験を行つた。すなわち，**図—15** に示す形の試験片を用意し，溶接する継手の底間隔を最初 2 mm にあけておく。**図—16** に示すように溶接に先立つて試験片をプロパン ガスで加熱し，自動溶接でとけおちしない程度，従つて底間隔が 0.2 mm 以下になるようにしたのち開先溝の片側を中央まで溶接を行つた。なお加熱部分を局部的に限るため両端の溝形の孔の部分に石綿の板を入れた。なお溶接後試験板の全面を圧さく空気によつて冷却し，約 50°C くらいに冷却したのち空気中に放置した。この試験結果を **表—4** に示す。

表—4

試験片番号	溶接電流 (amp)	溶接速度 (mm/min)	溶接電圧 (Volt)	加熱時間	われの状態
1	500	350	34	7分00秒	切断探傷の結果，底部分に底より 2/3 まで下側よりわれの入つていることが判明
2	600	350	34	10分30秒	溶接後 20日～30日 の間に全長われを生じた
3	700	350	34	8分30秒	切断探傷の結果，われのないことが判明
4	750	350	34	10分00秒	同　上

なおこの試験では約 2 mm の変形が拘束として入ることを示したものである。この試験より例えば溶接速度を一定にして溶接をおこなうとき，ある溶接電流より以下の値を採用すると溶接部にわれがはいる。この傾向は母材の強度が高くなるほどきびしくあらわれる。なおこのようなわれは時間の経過とともに入つたり，底より生ずるので外観では見られない等の注意すべき現象を示した。一般にこのような溶接われを防ぐためには溶接速度を低くするとか，溶接電流を上げる以外になく，この意味では逆に溶接熱量を大にすることになる。なお溶接電圧はとけこみの形状より 32 volt 以上が望ましい。

6. むすび

溶着部に隣接する母材の冷却速度，硬度，および高張力鋼の脆化，疲労，溶接われにおよぼす溶接熱量の影響を実験的にしらべたものについて述べてきたが，いずれも有効溶接熱量を適性な量だけ高くした方がよいといつた結果となつた。従来多くの人により溶接熱量を大にすること，従つて溶接電流を大にすることが正しくないことを示されてきた。もちろんある一面においては決してこの点間違つているとはいえないけれども，定量的にどうかといつた点では何らの結論が出されていなかつた。もちろん溶接ひずみの点では溶接熱量を大にすることは不利の点はあるが，この場合正しい溶接順序が選ばれていたが疑問の場合が多い。正しい溶接順序は与えた熱量の均衡をよくすることにあり，また溶接姿勢，溶接工の運棒のくせ等まで細かく配慮すると同時に一度溶接しはじめたものを途中で中止するようなことを行つてはならない。このよう点を考慮すれば溶接熱量の与える影響はごくわずかなものである。逆に硬化性の大きい高張力鋼を溶接する場合には，ある程度高い溶着熱量を与えることによつて満足な結果が与えられることを忘れてはならない。ただこの場合も前掲の実験結果が示すように，あ

る程度高い溶接熱量を与えれば十分であり，それ以上は効果なく，場合によつては逆効果を示すことも忘れてはならない。このような必要かつ十分な溶接条件の値をつかむことによつて，より経済的な工作で，母材の持つよい特性を十分に発揮させることができることは特に注目していただく必要があるであろう。

終りにこの実験に協力してもらつた横河橋梁実験室明石重雄君，東大助手 佐々木利視君，東大卒業生 湯橋十悦君，島崎達夫君に感謝する次第である。

参考文献

1) 仲　威雄：熔接の収縮と亀裂，小峰工業出版
2) Rosenthal, D: Mathematical Theory of Heat Distribution in Welding and Cutting, The American Welding Journal, Vol.20, 1941, p. 220, S-234 S.
3) 仲　威雄・増淵与一：熔接される板の温度分布に関する研究，熔接学会誌第 16 巻 1947.7 号，281～290，同 12 号，347～375
4) 小林信夫：移動熱源による熱伝導，熔接学会誌第 15 巻 1946.2 号 2-7，同 3 号 2-10 同 4 号 2-9.
5) 安藤弘平・三木　勇：熔接アーの熱効率について，熔接学会誌第15巻 1951. 11,12 号 239 同 21 巻 1952. 11 号 313
6) Hess, W.F., L.L. Merrill, E.F. Nippes and A.P. Bunk: The Mesurement of Cooling Rates Associated with Arc Welding and Their Application to the Selection of Optimum Welding Condition: The American Welding Journal, Vol.22, 1943 377 s-422 s.
7) Cottrell, C.L.M.: Contributed Thermal Severity Cracking Test Simulates Practical Welded Joints; The American Welding Journal, Vol.32, 1953, 275 s-277 s
8) 仲　威雄・増淵与一：熔接板の温度分布並に冷却速度；熔接学会誌第 17 巻 1948. 1 号 9～14
8) 木原　博・鈴木春義・金谷文善：鋼の熔接硬化に関する研究　—冷却速度の測定— 熔接学会誌第 26 巻 1957. 2 号 83～90.
10) Orowan, E.: Fundamentals of Brittle Behavior in Metals. Fatigue and Fracture of Metals. Edited by W.M. Murray, M.I.T. Tech. Press and John Wiley & Sons, 1952
11) 奥村敏恵：応力集中と脆性破壊，土木学会夏季講習会（昭和 28 年）
木原　博：脆性破壊と溶接；溶接工学テキスト　熔接研究所編
12) Melhardt, H.: New Austrian Welding Standards, The American Welding Journal, Vol.31, 1952, p.592-595.
13) Otto Graf: Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der Geschweißten Brücken; Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau, Heft 11 1940
14) 仲　威雄：溶接設計溶接工学テキスト，溶接研究所編
15) 杉原栄次郎・木村正臣・菊池　進：ホットスタートに関する研究，熔接学会誌 Vol.26. 1957, Vol.1 p.7～11

土木学会誌"合本用ファイル"頒布

体　裁：B 5 判　学会誌 12 冊綴用，薄グリーン・クロース装，金文字入り

頒　価：1 部　140 円（〒 30）　　申込方法：入金次第発送します

土木技術研究会編　10 月下旬発売!!

土木技術者の手帖 1960

この手帖は，土木技術者，土木行政者，工事人が常時携帯して，必要に応じて直ちに使用できる日誌兼用の小型便覧で，設計・施工・行政に必要な最新のデータを網羅してあります。今まで 2 年間，御愛用を戴いた方々の御意見を徴して，1960年度版は一段と新工夫を致し，鉄筋コンクリートの設計図表を新たに加え，道路篇は新構造令に基づいて全面的に書き換えるなどさらに実用的に改訂しました。

〔横 8.5 cm 縦12cm 448頁 ビニール製 鉛筆付
京浜-京阪神色刷地図付　定価 200 円　〒16円〕

◆特典◆　200 部以上纏めて御注文の場合には御社名金箔押しその他サーヴィスあり。年末贈答用として好評を戴きました。

最新のデータに溢れる堂々 320 頁に及ぶ技術便覧！スマートな製本，最上の紙質，この頁でこの驚異的廉価！

【主要内容】　日誌・年令表・備忘録・土木便覧——数理諸表・構造力学・測量・土質力学・基礎・材料・コンクリート・鉄筋コンクリート・PS コンクリート・木構造・木橋・鋼構造・溶接・鋼鉄道橋・鉄道・鋼道路橋・道路・舗装・水理・発電水力・河川・砂防・港湾・空港・上水・下水・土地改良・施工機械・積算
付録——業者名簿，当用漢字，郵便料金，国鉄料金，力学記号，新かなづかい，商業数表。

同時発売 10 月末　★建築家の手帖 1960〔432 頁　200 円　〒 16 円〕

★建築設備手帖 1960〔362 頁　150 円　〒 16 円〕

◆最新刊◆

河川工学

日本大学教授 工学博士 久宝雅史著

〔286 頁　500 円　〒 40〕

本書は河川工学の全分野に亘り，まず水文学から説き起し，基礎的事項を深く広く説明し，図版，計算例，データは許す限り挿入してある。河川に関連あるすべての技術者，大学土木工学科の学生に最適である。

◆◆測量実務叢書　第 2 回配本　第 6 巻　10 月 15 日

三角測量・天文測量

地理調査所 原口　昇　東北大学 今野彦貞共著

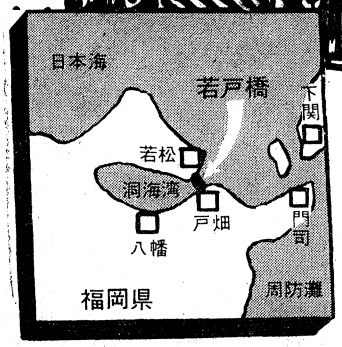
〔A 5 判 200 頁　価 400 円　〒40〕

森北出版株式会社

東京都千代田区神田小川町 3 の 10

振替東京 34757　電(29)2616・4510

夢のかけ橋



近年、国土開発の動脈ともいうべき優良道路の建設がいそがれていますが、海にかこまれ、河川の多いわが国では、この国道の発展とともに、大型・軽量・堅牢な橋梁が最も要求されています。

このたび北九州工業地帯の要衝の地、若松市と戸畑市を結ぶ洞海湾に、東洋一の規模といわれる吊橋「若戸橋」が架けられることになりました。

日立造船は、この建設工事の中核となる橋塔と中間橋脚の製作・架設工事をひきうけます。創業以来、各種の道路橋・鉄道橋を建設してきた専門メーカーとしての豊富な経験と斬新な技術・設備が生かされるわけです。

当社の施工する鋼材重量

戸畑側	橋塔	1，900トン
若松側	〃	1，900〃
戸畑側	中間橋脚	300〃
若松側	〃	300〃
合計		4，400〃

日立造船
創業1881年

本　社　大阪市北区中之島2丁目25
電話　大阪（23）8051～9
東京支社　東京都千代田区丸の内2丁目20の1
電話　東京（28）5231～9