

# 橋梁製作における大入熱溶接の 適用性の考察(その2)

## ビッカース硬さおよび引張強さの 現状調査による入熱制限値の考察

南 邦明\*

### 1. はじめに

橋梁製作において、全作業工程に占める溶接作業の比率は高く、製作コストの削減を図るには、溶接作業の合理化を推進する必要がある。溶接作業の合理化を可能にさせる1つの考え方として、高能率化を図る方法が挙げられる。高能率化の代表的な溶接法として大入熱溶接が考えられるが、これまで適用されるケースは少なかった。これは、平成8年度版以前の道路橋示方書で示されていた最大板厚は50mmまでであり、しかも、橋梁製作ではすみ肉溶接が多く、大入熱溶接の適用に関して十分な検討がなされなかったこと。さらに、道路橋示方書には入熱に関する規定が設けられていることなどが挙げられる。

道路橋示方書では、入熱量の増加に伴う脆化と軟化に配慮し、「SM570およびSMA570Wにおいて1パスの入熱量が、70KJ/cmを超える場合、溶接施工試験を行うことを原則とする」という基準が示されている。この規定は、昭和48年度版から掲載されており、これまで見直しは行われていない。しかし、この約30年間で、鋼材や溶接材料の品質は著しく向上しており、この基準が現在でも適切なのかどうか再検討する必要があると言える。

著者は、これまで、大入熱溶接による脆化の影響を調べるため、橋梁製作会社、製鉄会社および溶接材料メーカー各社で行われたエレクトロガス溶接( ElectroGas Welding : EGW )、サブマージアーク溶接( Submerged Arc Welding : SAW )、エレクトロスラグ溶接( Electroslag Welding : ESW )の溶接施工試験から、シャルピー衝撃値( 1611個 )の調査・分析を行い、入熱制限について考察した。その結果、SM570材を用いた場合、一般鋼では100KJ/cm以下、大入熱対応鋼では150KJ/cm以下での施工は可能であることを報告した<sup>1)</sup>。

これに続き、本報告では、大入熱溶接のもう1つの課題である溶接熱影響部の軟化の問題を調べるため、前報と同

表 - 1 試験片の総数

| 溶接法 | ビッカース硬さ試験 | 継手引張試験 | 溶接金属引張試験 |
|-----|-----------|--------|----------|
| EGW | 69箇所      | 125体   | 52体      |
| SAW | 63箇所      | 75体    | 185体     |
| ESW | 80箇所      | 110体   | 72体      |
| 合計  | 212箇所     | 310体   | 309体     |

様に大入熱溶接試験<sup>2)-67)</sup>から、表 - 1 に示す数量の硬さ試験および引張試験の調査・分析を行い、軟化も考慮した入熱制限について考察したので、その結果を報告する。

### 2. エレクトロガス溶接のデータの分析

#### 2.1 ビッカース硬さ試験の調査結果(EGW)

図 - 1、2 は、それぞれ非調質鋼および調質鋼におけるビッカース硬さ試験( JIS Z2244 )の調査結果を、ビッカース硬さの最小値と入熱量の関係で示した。整理方法は、硬さに影響すると考えられる使用鋼材、冷却速度に関係する板厚などの施工条件、および化学成分として炭素当量を考慮して整理した。使用鋼材は鋼種別に分類し、SM570Qについては一般鋼と大入熱鋼に分けて示したが、大入熱鋼については明確に表示されているデータのみ大入熱鋼として取り扱った。次に、冷却速度は入熱量によって異なり、また同じ入熱量でも板厚によって異なる。そして、この冷却速度は、組織や結晶粒径に影響を及ぼすので、板厚別に整理することとした。なお、硬さ試験が行われた位置は、t/2、t/4、表面から2mmなど文献によって異なっており、様々な位置のデータが含まれている。また、JISハンドブックの鉄鋼 には、ビッカース硬さと引張強度の換算表が示されており、引張強度が490N/mm<sup>2</sup>では150Hv、570N/mm<sup>2</sup>では178Hvとなることが示されており、図中の点線は、鋼材規格の引張強度から換算した値を示したものである。

非調質鋼( 図 - 1 )において、硬さの最小値は入熱量の増加に伴い低下( 軟化 )し、170KJ/cmを越えたデータで、

\* 技術開発室開発課

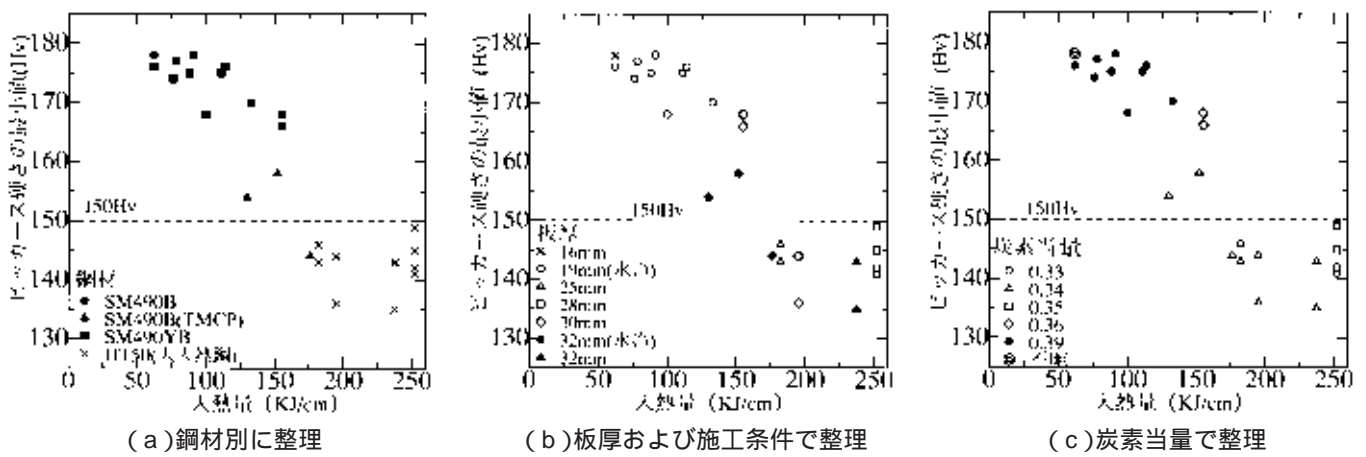


図 - 1 エレクトロガス溶接における入熱量とビッカース硬さの最小値との関係（非調質鋼）

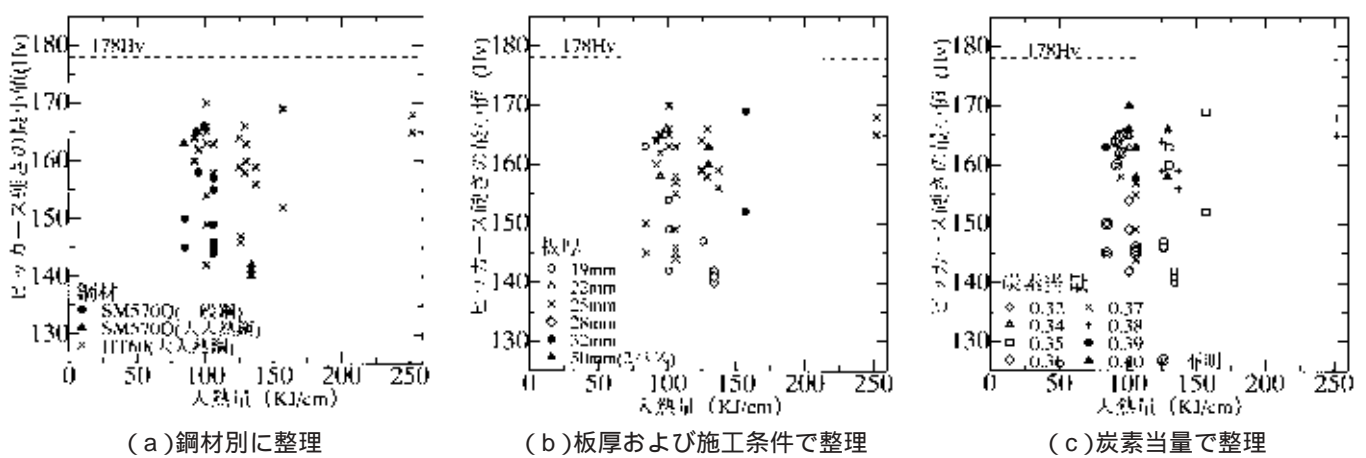


図 - 2 エレクトロガス溶接における入熱量とビッカース硬さの最小値との関係（調質鋼）

150Hvを下回っていた。すなわち、これらの試験片では、局部的に軟化領域が存在していると言える。これは、入熱量が増加することで冷却速度が遅くなることによる影響と考えられる。鋼材別に見た場合(図 - 1(a))、TMCP鋼が、若干硬さが低いように思われるが、明確な違いは生じていない。次に、板厚による違い(図 - 1(b))も明確には現れなかったが、炭素当量で見た場合では(図 - 1(c))、炭素当量が大きくなれば硬さも高くなる傾向が伺える。例えば、252KJ/cmのデータのように同じ施工試験では、その傾向が明確となっていた。また、炭素当量が最も大きい0.39のデータも硬さは高いが、このデータは板厚が19mmで水冷を行っているので、冷却の影響なのか、化学成分の影響なのかは明確でない。なお、水冷は、裏当て材に水冷銅板を用いたものである。

調質鋼(図 - 2)においては、入熱量の分布幅が80～161KJ/cmと小さく、また同じ入熱量でもばらつきが大きいので、入熱量と硬さの関係は明確でなかった。そして、全データで178Hvを下回っており、調質鋼では80KJ/cmを越える場合、軟化領域が存在すると言える。次に、板厚による違いも、ばらつきがあり明確でなかったが、炭素当量

の影響は、非調質鋼と同様、炭素当量が大きくなれば硬さも高くなる傾向が伺えた。

## 2.2 継手引張試験の調査・分析(EGW)

図 - 3、4は、それぞれ非調質鋼および調質鋼における継手引張試験(JIS Z3121)の調査結果を、使用鋼材、板厚および炭素当量を考慮し、入熱量と引張強度の関係で示した。また、図中の実線および点線は、最小自乗法を用いて求めた入熱量に対する引張強度の回帰直線である。

非調質鋼(図 - 3)において、引張強度は入熱量の増加に伴い低下し、その低下する分布幅もほぼ一定である。しかしながら、最大入熱量の252KJ/cmにおいても、規準の引張強度(490N/mm<sup>2</sup>)は十分満足していた。鋼材別に見た場合(図 - 3(a))、明確な違いは生じていないが、TMCP鋼では炭素量を抑えているので、引張強度が若干低いように見受けられる。次に、板厚や施工条件の違いによる引張強度への影響(図 - 3(b))は明確にはならなかった。しかし、炭素当量の違い(図 - 3(c))による影響は見られ、炭素当量が高いものは、引張強度も高くなる傾向が伺えた。

調質鋼(図 - 4)でも、非調質鋼と同様に引張強度は入熱量の増加に伴い低下し、70KJ/cm程度の入熱量では、ば

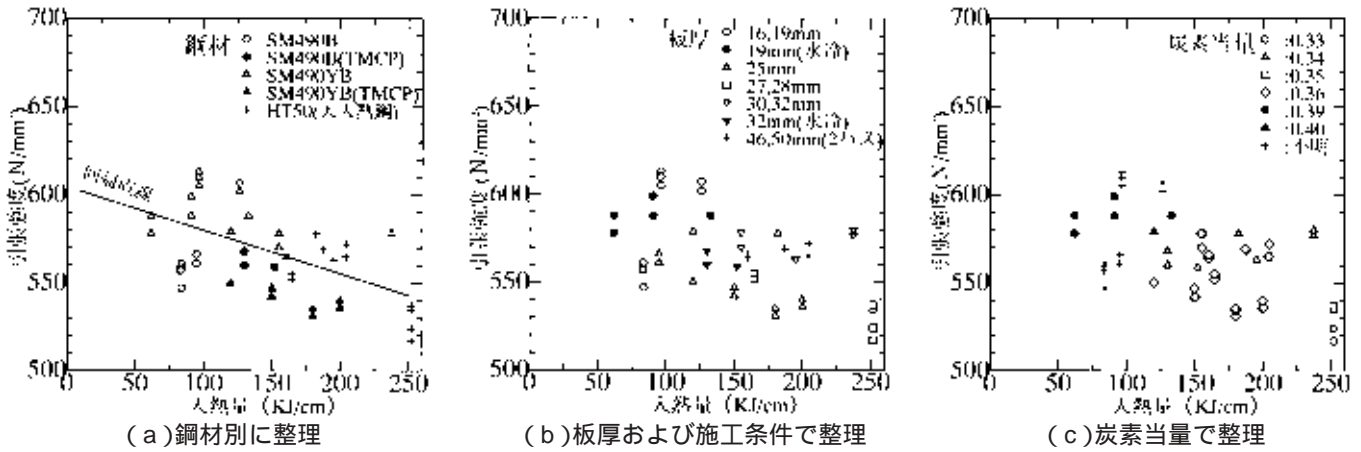


図 - 3 エレクトロガス溶接における入熱量と継手引張強度との関係 (非調質鋼)

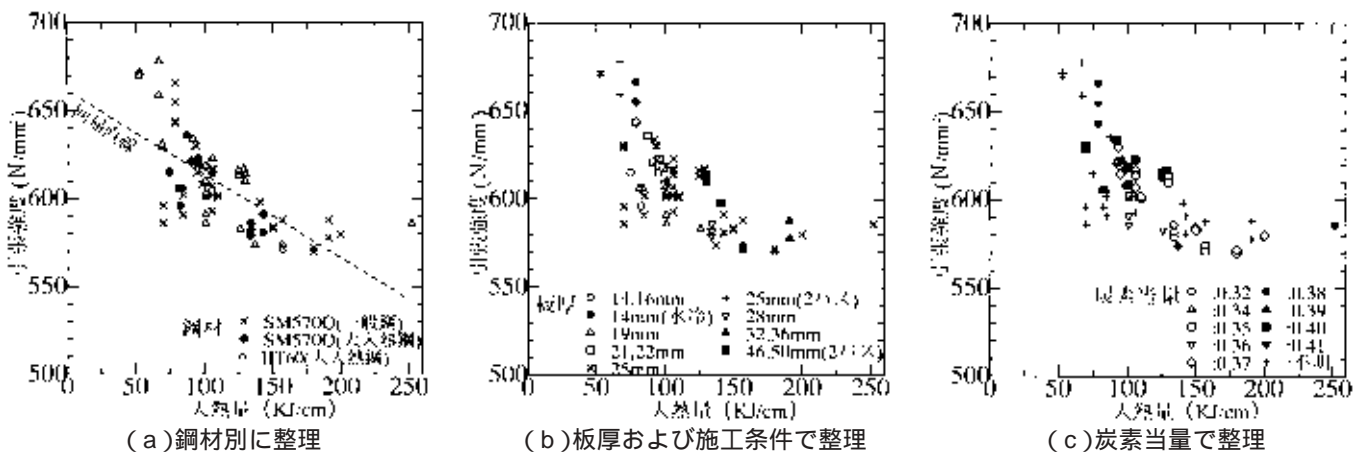


図 - 4 エレクトロガス溶接における入熱量と継手引張強度との関係 (調質鋼)

らつきの幅が大きいが、入熱量が大きくなると、この幅が小さくなる傾向が示された。また、回帰直線の傾きも非調質鋼より大きく、調質鋼の方が入熱量の増加による強度の低下が大きくなるものと判断できる。この理由として、調質鋼では、焼入れ性を高める成分が多く含まれており、入熱量の増加によって冷却速度が遅くなると、焼きが入らないために強度が低下したものと考えられる。次に、板厚や施工条件の違いによる影響(図 - 4 (b))は、ばらつきがあり、また水冷を行ったものはデータ数が少なく、明確にならなかった。しかし、炭素当量の違い(図 - 4 (c))による影響は見られ、非調質鋼と同様、炭素当量が高いものは引張強度も高くなる傾向が伺えた。

継手引張試験において、破断位置は、全試験片の77%が鋼材部(HAZおよびBase Metal)、20%が境界部(Bond)、3%が溶接金属部(Depo)で破断した。また、調査結果ではすべての試験片で規格値を満足したが、150KJ/cmを越えた場合には、規格値(570N/mm²)付近のデータが報告されていた。

### 2.3 溶接金属引張試験の調査・分析(EGW)

図 - 5、6は、それぞれ490N/mm²および570N/mm²級溶接

材料における溶接金属引張試験(JISZ 2241)の調査結果を、使用鋼材を考慮し、入熱量と引張強度、降伏強度および伸びの関係で示した。

490N/mm²級溶接材料(図 - 5)の結果では、データ数が少なく、これらの結果から傾向などを言及することはできないが、すべてのデータで引張強度、降伏強度ともに規格値を満足していた。また、図 - 5 (a)の回帰直線は、継手引張強度の回帰直線(図 - 3 (a))の傾きとほぼ一致しており、降伏強度の回帰直線(図 - 5 (b))と比較しても大きな違いはなかった。

570N/mm²級溶接材料の引張強度(図 - 6 (a))でも、継手引張強度の回帰直線(図 - 4 (a))の傾きとほぼ一致しており、入熱量の増加に対する引張強度の低下傾向は同じであった。また、継手引張強度では、150KJ/cmを越えたもので規格値付近のデータもあったが、溶接材料は鋼材より強度が高くなるよう製造されているので、212KJ/cmにおいても、引張強度は600N/mm²を越え、規格を十分満足していた。次に、降伏強度(図 - 6 (b))の回帰直線は、引張強度の回帰直線より傾きが大きく、入熱量に対して敏感なのは、降伏強度であると判断できる。特に、一般鋼を用いた

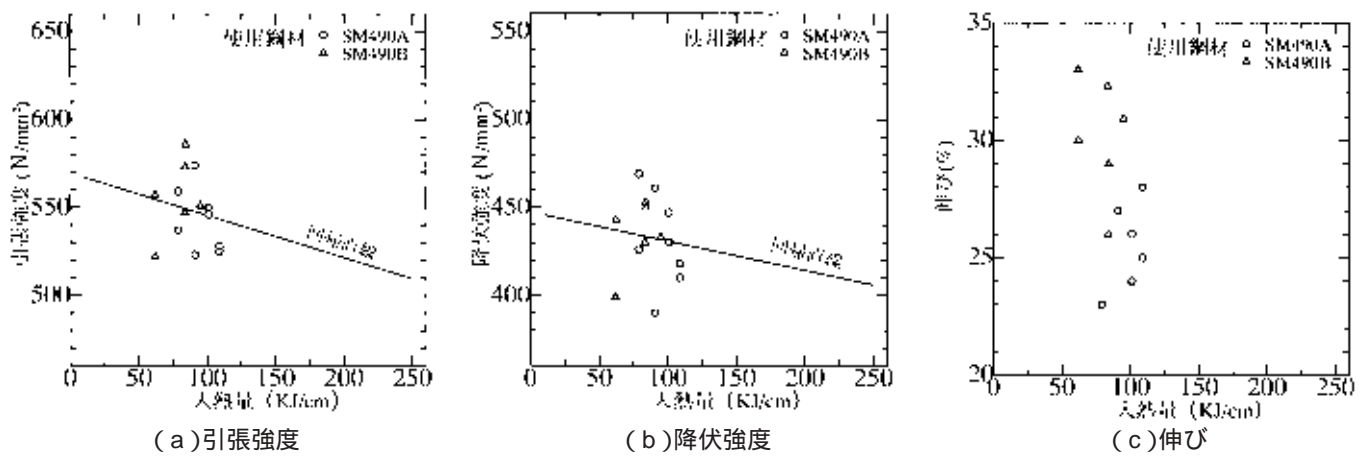


図 - 5 エレクトロガス溶接における入熱量と溶接金属の機械的性質の関係 (490N/mm<sup>2</sup>溶接材料)

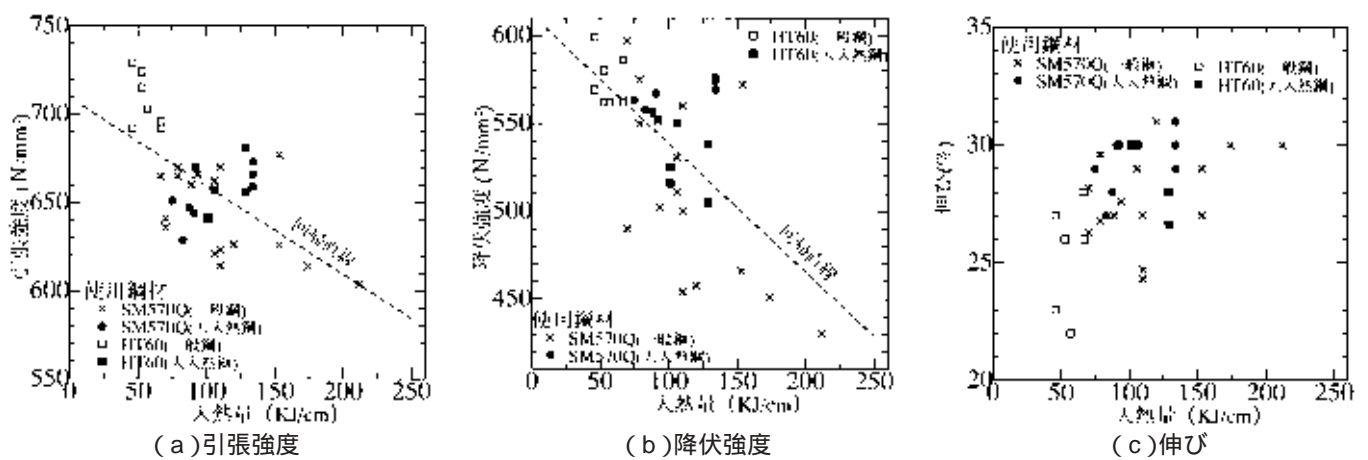


図 - 6 エレクトロガス溶接における入熱量と溶接金属の機械的性質の関係 (570N/mm<sup>2</sup>溶接材料)

100KJ/cmを越えたデータで規格値(460N/mm<sup>2</sup>)を満足しないケースも報告されているが、大入熱鋼を用いたものは、100KJ/cmを越えても、規格を十分満足する降伏強度が得られていた。この理由として、一般鋼でも大入熱鋼でも使用する溶接材料は同じであるが、鋼材との希釈で溶接金属の化学成分に違いが生じたものと考えられる。図 - 6(c)は、入熱量と伸びの関係を示したものであるが、軟化の影響で入熱量の増加に伴い、伸びも増加する傾向が示された。

#### 2.4 引張強度と硬さの関係(EGW)

図 - 7、8は、継手引張試験とピッカース硬さ試験を同時に行っているデータの中から、それぞれ非調質鋼および調質鋼における引張強度と硬さの関係を示したものであり、横軸は、硬さの最大値と最小値を平均した値とした。また、図中の実線および点線は、JISハンドブック鉄鋼に示されているピッカース硬さと引張強度の換算表の値を示したものである。これらの結果が示すように、SM490YBの一部データを除けば、鋼材に関係なく換算値とほぼ一致していた。

硬さ試験結果(図 - 1、2)では、必要な硬さを満足しないデータが多かったが、引張強度はすべての試験片で規

格値を満足した(図 - 3、4)。これは、HAZ部で局所的な軟化領域があっても、隣り合う母材や溶接金属の強度が高いので、引張荷重作用時にHAZ軟化部は両端で拘束を受けるため、継手引張試験では軟化の影響は少なかったものと考えられる<sup>68)</sup>。また、試験体の幅による影響もあり、JIS Z3121による引張試験体の幅は、25 or 40mmであり、幅方向にも平均化される。文献<sup>21)</sup>では、この幅を試験的に7mmおよび14mmとした場合の引張試験を行っているが、通常の試験片では規格を十分満足していたものが、試験体の幅を小さくすると軟化の影響が明確に現れ、570N/mm<sup>2</sup>を満足しない結果が報告されていた。なお、このデータは試験片が規格外なので引用しなかった。

以上のように、局所的な軟化領域が存在しても、軟化の程度によっては引張強度に影響しないと言える。

#### 2.5 引張強度と衝撃値の関係(EGW)

図 - 9、10は、継手引張試験および溶接金属引張試験とシャルピー衝撃試験を同時に行っているデータにおける、引張強度とシャルピー吸収エネルギーの関係を示したものである。横軸は、継手引張試験のデータ(鋼種で表示)に対しては、HAZにおける吸収エネルギーを平均し、また溶

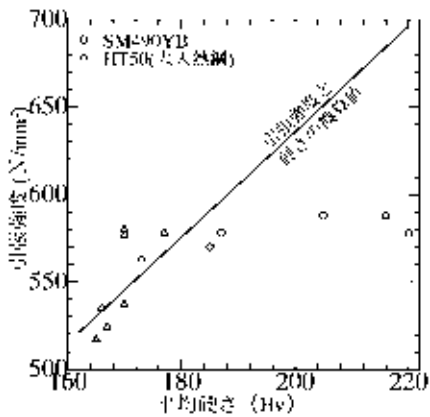


図 - 7 継手引張強度と硬さの関係値 (非調質鋼)

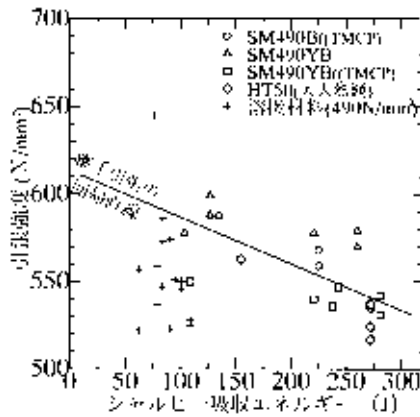


図 - 9 引張強度と衝撃値の関係 (非調質鋼)

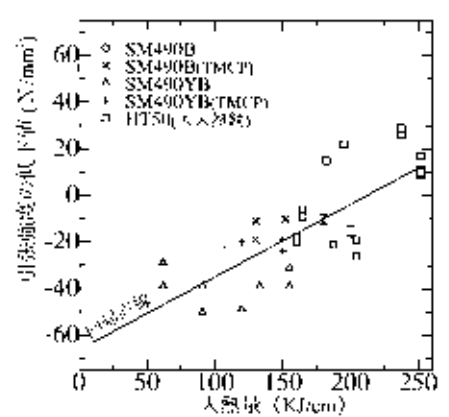


図 - 11 溶接による引張強度の低下値 (非調質鋼)

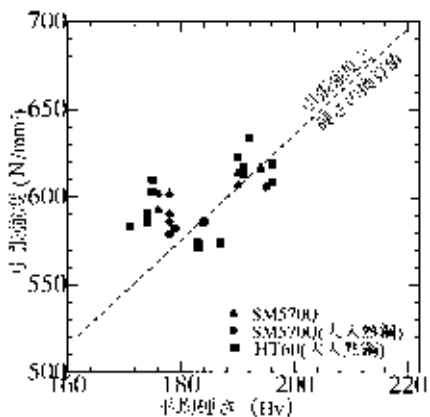


図 - 8 継手引張強度と硬さの関係 (調質鋼)

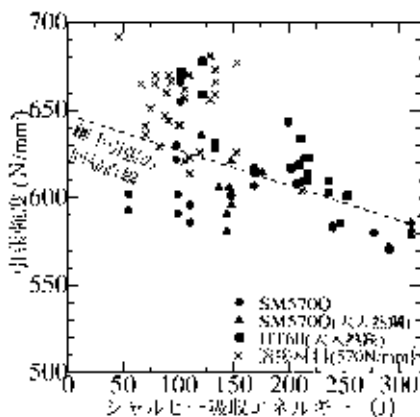


図 - 10 引張強度と衝撃値の関係 (調質鋼)

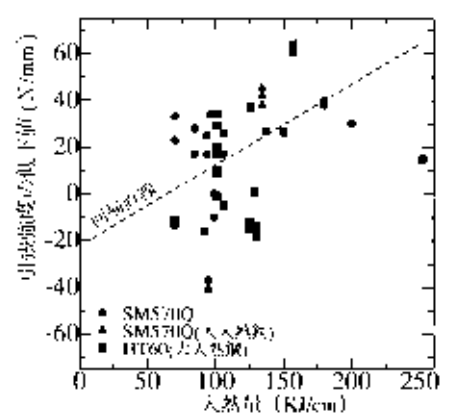


図 - 12 溶接による引張強度の低下値 (調質鋼)

接金属引張試験のデータに対しては、Depo(溶接金属)における吸収エネルギーを平均した値とした。図中の回帰直線は、それぞれ継手引張強度の回帰直線であり、溶接金属は含まれていない。なお、シャルピー衝撃試験の調査は、前報<sup>1)</sup>を参照されたい。

非調質鋼において、継手引張強度はシャルピー吸収エネルギーの増加に伴い低下し、その低下する分布幅もほぼ一定であった。また、溶接材料は、継手引張強度より低い分布状態を示していた。調質鋼においては、100~200Jの吸収エネルギーではばらつきの幅が大きいが、吸収エネルギーが大きくなると、この幅は小さくなる傾向が示され、非調質鋼と同様に継手引張強度は、シャルピー吸収エネルギーの増加に伴い低下した。また、溶接材料は非調質鋼とは逆に、継手引張強度より分布状態が高かった。

以上のように、軟化と脆化は相反するものと考えられ、脆化の問題にのみ配慮した鋼材を使用した場合、入熱量によっては軟化の問題が生じるので、両方の機械的性質が満足するような鋼材を選定する必要があると言える。

## 2.6 溶接入熱による引張強度の低下値(EGW)

図 - 11、12は、母材の引張強度が明確なデータから、

溶接前と溶接後の引張強度の差を取り、溶接による引張強度の低下値と入熱量の関係を示したものである。これらの図から、調質鋼と非調質鋼では分布状態が明らかに異なり、調質鋼の方が入熱量に対して敏感であると判断でき、両者とも入熱量の増加に伴い、低下値も増加することが明確に示された。しかしながら、調質鋼と非調質鋼の入熱量に対する引張強度の低下値の回帰直線の傾きは、ほぼ一致していた。また、母材よりも継手引張強度が高くなっているデータ(低下値がマイナス)もあるが、これは溶接金属の強度が母材よりも高く継手引張試験片(多くがJIS Z 3121、1号)のような平行部の長さが短いものでは、溶接金属の影響でこのような結果になったものと思われる。

以上のように、鋼材毎に、入熱量による引張強度の低下値はある程度推測でき、軟化を考慮し大入熱溶接が可能かどうか検討する方法として、母材の引張強度から適用可能な入熱量を検討する方法が考えられる。

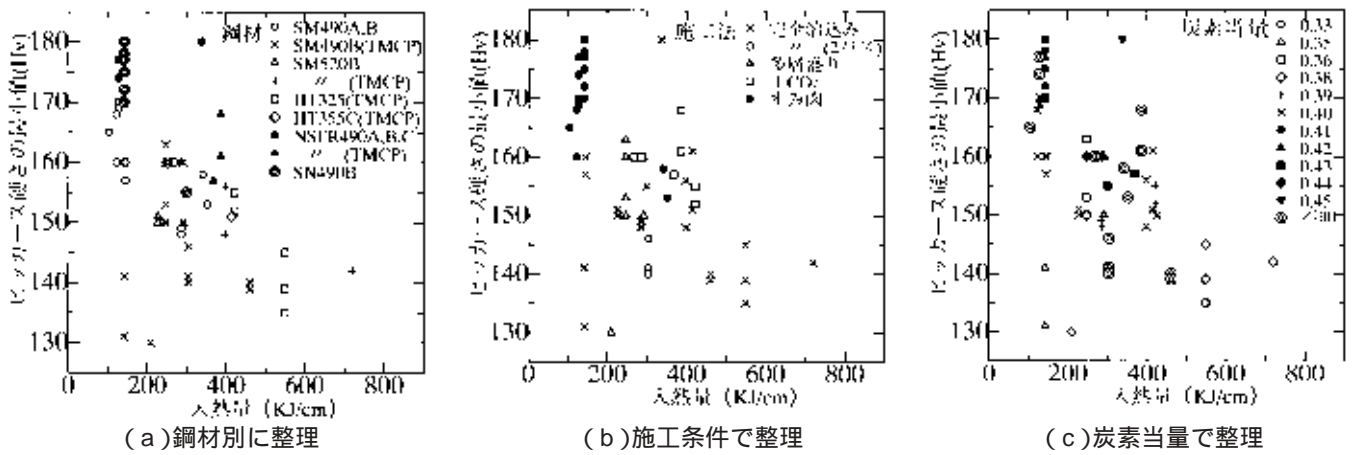


図 - 13 サブマージアーク溶接における入熱量とビッカース硬さ最小値の関係

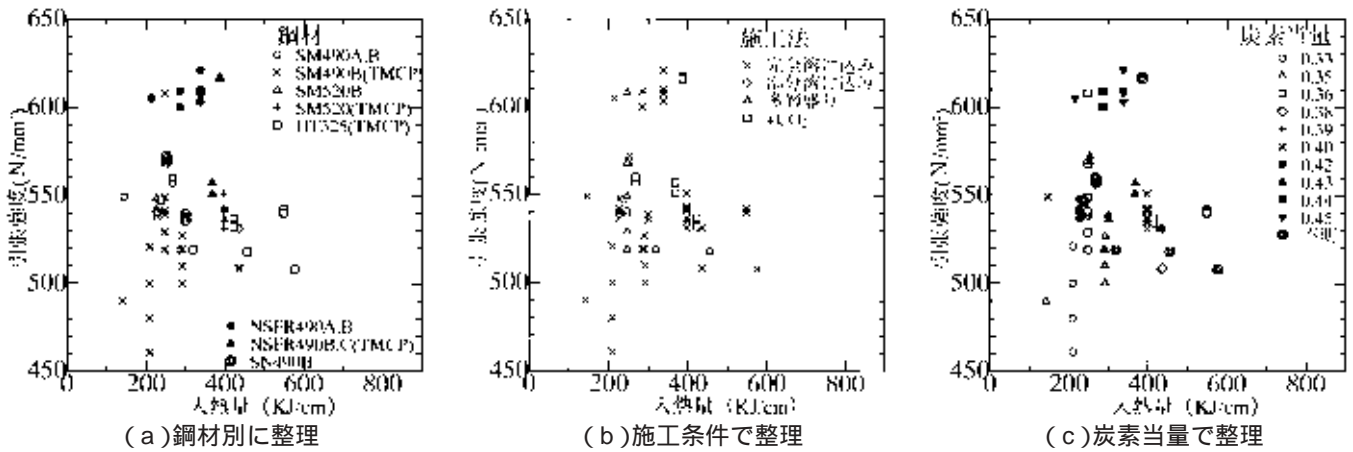


図 - 14 サブマージアーク溶接における入熱量と継手引張強度の関係

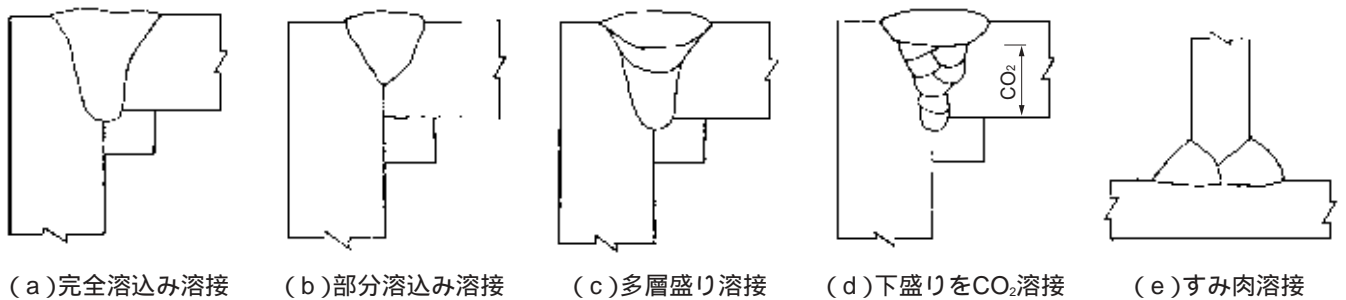


図 - 15 鉄骨製作におけるサブマージアーク溶接施工法の解説

### 3. サブマージアーク溶接のデータ分析

#### 3.1 ビッカース硬さ試験の調査・分析(SAW)

サブマージアーク溶接におけるデータの多くは、鉄骨製作におけるBox柱の角溶接を対象としたものであり、図 - 15(a)~(d)に示す溶接施工法で行われている。

図 - 13は、ビッカース硬さ試験の調査結果として入熱量とビッカース硬さの最小値の関係を、鋼材、施工法および炭素当量を考慮して整理した。なお、硬さ試験の採取位置は、完全溶込み溶接では $t/2$ 、 $t/4$ など様々なデータが含まれており、また下盛りをCO<sub>2</sub>溶接で行ったデータなどでは、サブマージアーク溶接を行った位置での硬さである。

鋼材別で見た場合(図 - 13(a))、耐火鋼(建築鉄骨で用いられる高温での引張強度が改善された鋼材: NSFR)の

硬さは高く、これとは逆に、一部のTMCP鋼では低い分布を示していた。これは、それぞれの鋼材の化学成分による違いであり、図 - 13(c)に示すように耐火鋼では炭素当量が高く、TMCP鋼ではこれが低い。この影響でTMCP鋼は軟化し易く、特に160~210KJ/cmのデータでは130HV程度のデータもあった。次に、施工法では(図 - 13(b))、すみ肉溶接で行ったものは硬さが高く、これは図 - 13(c)に示すように、使用鋼材の炭素当量が高かったことによるものであり、溶接施工法の影響ではないと考えられる。また、その他の施工法では、大きな違いは見られなかった。

以上のように、サブマージアーク溶接を用いた鉄骨製作では、使用鋼材や施工法が様々であり、エレクトロガス溶接に比べばらつきが大きかった。



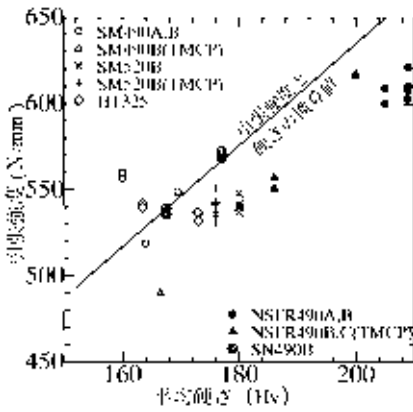


図 - 18 継手引張強度と硬さの関係 (SAW)

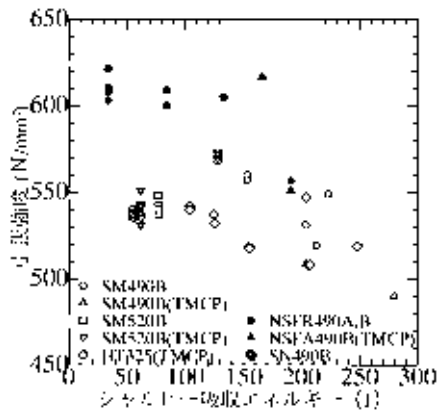


図 - 19 継手引張強度と衝撃値の関係 (SAW)

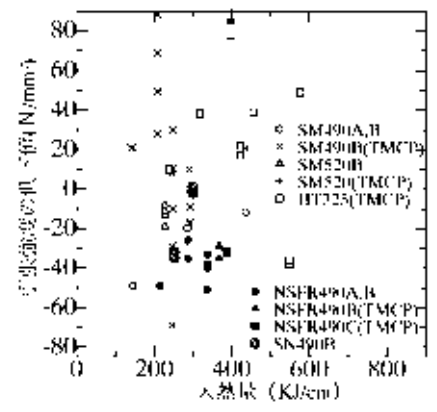


図 - 20 溶接による引張強度の低下値 (SAW)

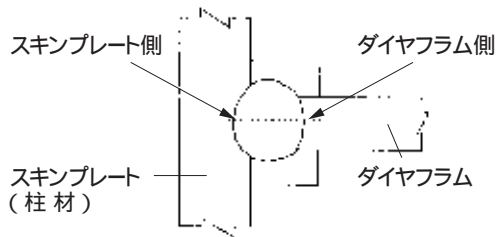
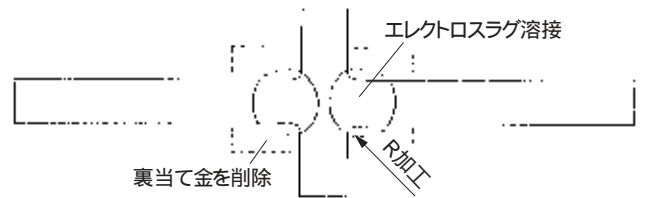


図 - 21 エレクトロスラグ溶接の断面図



(a) 十字継手

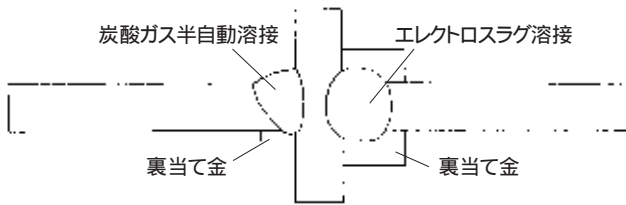
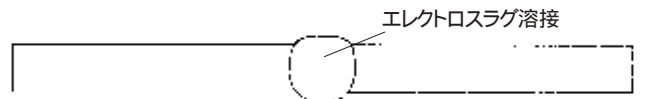


図 - 22 対象外とした継手引張強度の試験体形状



(b) 突合せ継手

図 - 23 対象とした継手引張強度の試験体形状

以上のように、引張強度はすべてのデータで規格値を満足したが、降伏強度は、600KJ/cmを越えたデータで規格を満足しないデータも報告されていた。

### 3.4 引張強度と硬さの関係(SAW)

図 - 18は、引張強度と硬さの関係を示したものである。これらのデータもSM490Bの一部データおよびSM490BのTMCPを除けば、エレクトロガス溶接の結果(図 - 7、8)と同様に、鋼材に関係なく引張強度と硬さは比例し、硬さが高くなれば引張強度も高くなる相関関係が示された。また、換算値と比較すると、硬さの割に引張強度が低くなるデータが多かった。

### 3.5 引張強度と衝撃値の関係(SAW)

図 - 19は、継手引張強度とシャルピー吸収エネルギーの関係を示したものである。

これらの結果においても、引張強度はシャルピー吸収エネルギーの増加に伴い低下する傾向が示された。分布状態は鋼材により多少の違いが生じており、同じ衝撃値であってもTMCP鋼は引張強度が低くなる。これとは逆に、耐火

鋼では引張強度が高く、衝撃値の割には引張強度が高くなる傾向が伺える。以上のように、サブマージアーク溶接でも、軟化と脆化は相反する結果となっていた。

### 3.6 溶接入熱による引張強度の低下値(SAW)

図 - 20は、入熱量と溶接による引張強度の低下値の関係を示したものである。これらの結果が示すように鋼材により低下値は異なり、TMCP鋼では強度は低下し易く、ばらつきも大きい。これとは逆に、耐火鋼では低下値が低く、むしろ溶接後の方が引張強度が高くなっていた。これらのデータを除けば、入熱量の増加に伴い、低下値も高くなっていた。

## 4. エレクトロスラグ溶接のデータ分析

### 4.1 ピッカース硬さ試験の調査・分析(ESW)

エレクトロスラグ溶接におけるデータの多くは、鉄骨製作におけるBox柱のダイヤフラムの溶接を対象とした溶接施工試験である。

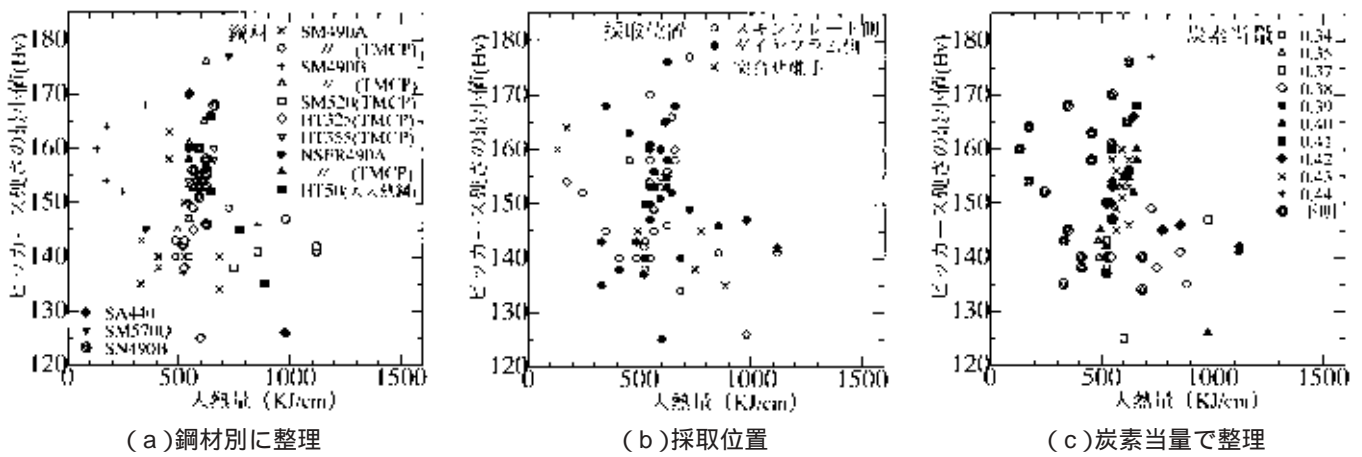


図 - 24 エレクトロスラグ溶接における入熱量とビッカース硬さの最小値の関係

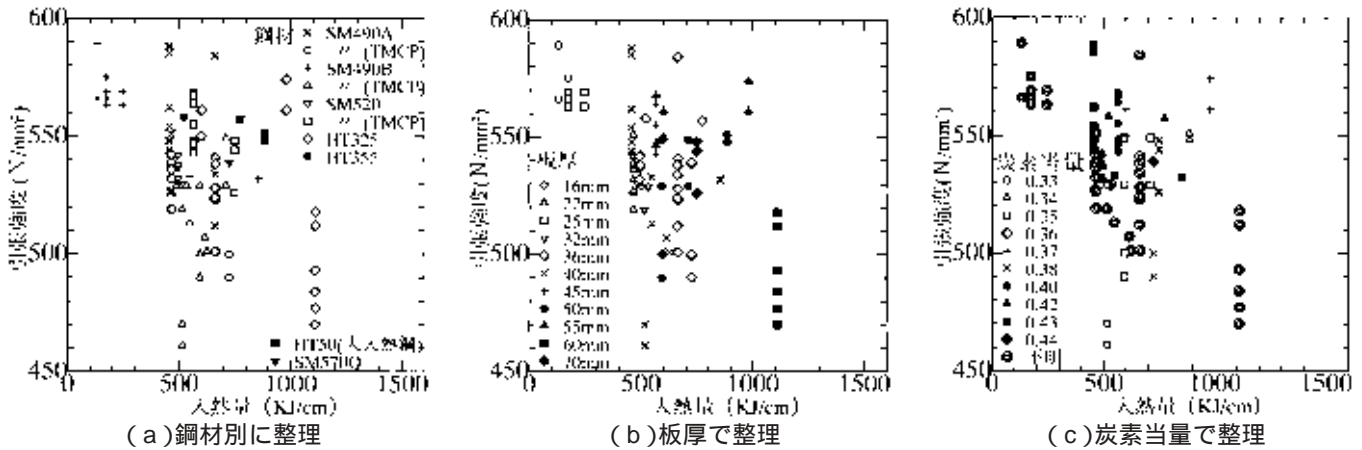


図 - 25 エレクトロスラグ溶接における入熱量と継手引張強度の関係

図 - 24は、ビッカース硬さ試験の調査結果を、入熱量とビッカース硬さの最小値の関係で、鋼材、採取位置および炭素当量を考慮して整理した。なお、採取位置については、図 - 21に示すように、スキンプレート側とダイヤフラム側に分けて示し、また、鋼材については、採取した位置での使用鋼材で表した。すなわち、1つの試験データでも、ダイヤフラム側とスキンプレート側に分けられ、それぞれ使用鋼材も異なったデータとなっている。

鋼材別で見た場合(図 - 24(a))、エレクトロガス溶接の結果では、鋼材による傾向の違いが明瞭であったが、エレクトロスラグ溶接のデータは、ばらつきがあり、サブマージアーク溶接の結果と同様、明確な違いは見られなかった。次に、採取位置で見た場合(図 - 24(b))でも、ばらつきがあり明確な傾向は表れなかったが、同じ施工試験(横軸の入熱量が同じデータ)でスキンプレート側とダイヤフラム側を比較した場合、ダイヤフラム側の方が硬くなっているように見受けられる。また、図 - 23(b)に示すような突合せ継手ではばらつきが少なく、1つの直線分布で入熱量の増加に伴い、硬さも低くなる結果となっていた。炭素当量で見た場合(図 - 24(c))では、これまでと同様に、炭素当量が高くなれば硬さも高くなる結果となっていた。

#### 4.2 継手引張試験の調査・分析(ESW)

図 - 25は、継手引張試験の調査結果を、入熱量と引張強度の関係で、鋼材、ダイヤフラムの板厚および炭素当量を考慮して整理した。対象とした継手引張試験体は、引張試験を行うために、図 - 23に示すように、裏当て金を削除した十字継手や突合せ継手など、軟化の影響を見ることが可能な試験体のみとした。また、図 - 22に示すような鉄骨の仕口部を対象とした試験体では、裏当て金により断面が増え、溶接と関係がない母材で破断するケースや、CO<sub>2</sub>溶接部で破断するケースが生じるなど、エレクトロスラグ溶接の軟化の影響と関係しない場合もあるので、この試験体は対象外とした。

入熱量と引張強度の関係は、硬さ試験結果で示した傾向とほぼ同じであり、炭素当量による違いも同様である。また、サブマージアーク溶接と同様、軟化傾向が著しいSM490のTMCP鋼の一部で、500KJ/cmを越えた場合、規格値を満足しないデータも含まれていた。

以上のように、エレクトロスラグ溶接を用いた鉄骨の製作では、スキンプレートの板厚や鋼種、あるいは裏当て金の材質の影響など不確定要素が多く、全体的にばらつきが大きくなったものと考えられるが、入熱量の増加に伴い、

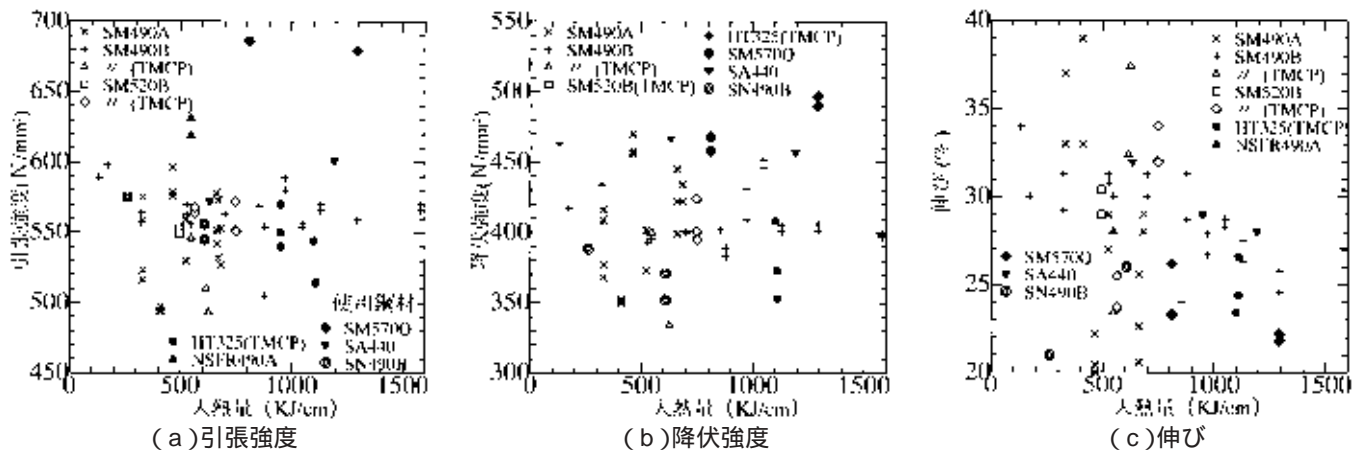


図 - 26 エレクトロスラグ溶接における入熱量と溶接金属の機械的性質の関係

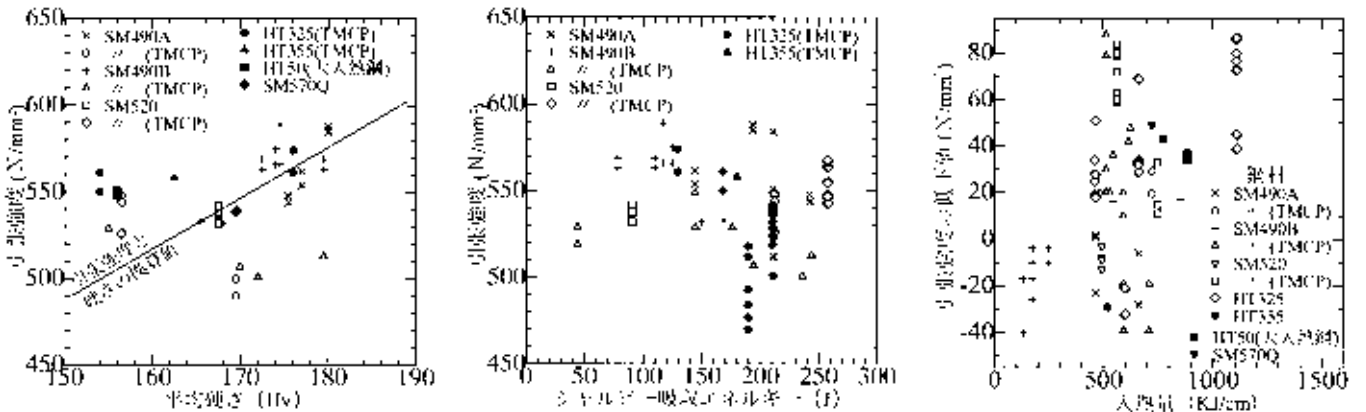


図 - 27 継手引張強度と硬さの関係 (ESW)

図 - 28 継手引張強度と衝撃値の関係 (ESW)

図 - 29 溶接による引張強度の低下値 (ESW)

引張強度は低下する傾向となっていた。

#### 4.3 溶接金属引張試験の調査・分析(ESW)

図 - 26は、溶接金属引張試験の調査結果を、使用鋼材を考慮し、入熱量と引張強度、降伏強度および伸びの関係を示した。

使用された溶接ワイヤーは、490N/mm<sup>2</sup>、590N/mm<sup>2</sup>および耐火鋼の溶接材料であり、それぞれ強度や鋼材に合わせて材料が選定されている。引張強度および降伏強度ともに、590N/mm<sup>2</sup>の溶接材料を使用したSM570Q、SA440(建築用高性能590N/mm<sup>2</sup>鋼)あるいは耐火鋼の溶接材料を用いたNSFR490Aのデータでは引張強度が高く、490N/mm<sup>2</sup>の溶接材料のデータでは、ばらつきは多く傾向も明確でなかった。しかし、SA440のデータで規格を満足しない試験片もあったが、それ以外のデータでは規格を満足していた。また、伸びについては、エレクトロガス溶接のデータ(図 - 6(c))では、入熱量の増加に伴い、伸びも増加する傾向が示されたが、図 - 26(c)では、入熱量の増加に伴い、伸びは減少しているように見受けられる。

#### 4.4 引張強度と硬さの関係(ESW)

図 - 27は、引張強度と硬さの関係を示したものである。これらのデータでは、SM490のTMCP鋼の一部データで、

硬さの割に引張強度が低いデータもあった。しかしながら、同じTMCP鋼でも強度が高いSM520および建築鉄骨のHT325、HT355のTMCPでは、これとは逆に硬さの割に引張強度の高いデータがあり、ばらつきも多かった。しかし、これらのデータを除けば、換算値とほぼ一致する結果となっていた。

#### 4.5 引張強度と衝撃値の関係(ESW)

図 - 28は、引張強度とシャルピー吸収エネルギーの関係を示したものである。

これらの結果においても、分布状態は鋼材により多少の違いが生じていたが、継手引張強度はシャルピー吸収エネルギーの増加に伴い低下する傾向が示された。

#### 4.6 溶接入熱による引張強度の低下値(ESW)

図 - 29は、溶接による引張強度の低下値と入熱量の関係を示したものである。エレクトロスラグ溶接では、500~700KJ/cmのデータが多く、この間ではデータのばらつきが大きい。特に、TMCP鋼では低下値が高いものもあり、逆に低いデータもあったが、これらのデータを除けば、入熱量の増加に伴い、低下値も高くなっていった。

## 5. 脆化と軟化を考慮した入熱制限値の考察

先にも述べたが、著者は前報<sup>1)</sup>で、大入熱溶接による脆化の影響を調べるため、シャルピー衝撃値の調査・分析を行い、入熱制限値を考察した。その結果、SM570材の一般鋼では100KJ/cm以下、大入熱対応鋼では150KJ/cm以下での施工は可能であることを報告した。また、道路橋示方書では、SM490材を使用した場合の入熱制限は、規定されていないが、(前報を報告した時点では、入熱制限はなかったが、平成14年3月の道路橋示方書の改訂<sup>69)</sup>では、100KJ/cmを越える場合は、溶接施工試験が必要とする入熱制限が追加された。)300KJ/cmを越えた場合、規格値付近のデータが多くなり、400KJ/cmを越えた場合では、規格値を下回るデータもある。このため、今後、橋梁でも鉄骨製作レベルの入熱量で行う場合には、入熱制限を設ける必要があることを示した。また、エレクトロスラグ溶接は入熱量が大きく、橋梁製作において適用するには、入熱量を下げる必要があり、狭開先で行うなどの施工法を確立し、これに伴う溶接機の開発が必要であるとした。

本報告では、入熱量の増加に伴う軟化の影響について述べてきたので、ここでは脆化と軟化の影響を考慮した入熱制限値の考察を行った。なお、道路橋示方書では、硬さで合否を判定する基準はなく、ここでは引張強度で検討することとした。

調質鋼では(図 - 4)、全データで規格を満足していたが、150KJ/cmを越えた時、規格値付近のデータもあった。また、一般鋼を使用した場合、100KJ/cmを越えた時、溶接金属引張試験(図 - 6)の降伏強度が規格値を下回る場合があり、軟化を考慮した場合でも、一般鋼では100KJ/cm以上、大入熱対応鋼では150KJ/cm以上での施工は溶接施工試験を行う必要があると考えられる。

非調質鋼において、エレクトロガス溶接のデータでは、最大入熱量が252KJ/cmにおいても、継手引張強度(図 - 3)溶接金属の引張、降伏強度(図 - 5)ともに規格を十分満足していたが、サブマージアーク溶接では、200KJ/cmを越えたデータで規格を満足しないデータが報告されていた。これは先にも述べたが、通常の継手引張試験体を使用していなかった影響であるが、安全側を考えれば、これ以下で施工する必要があると思われる。すなわち、非調質鋼では、200KJ/cmを越える場合は、溶接施工試験を行う必要があると考えられる。

## 6. 結論

本報告では、溶接法毎に硬さおよび引張強度と入熱量の関係について述べてきた。これらのデータから大入熱溶接について以下のことが言える。

1)ピッカース硬さ、引張強度及び降伏強度は、入熱量の

増加に伴い比例して低下する。

- 2)ピッカース硬さ試験では、規格上の硬さを満足しないデータが多かったが、引張強度ではほとんどの試験片で規格値を満足した。すなわち、局所的な軟化領域が存在しても、軟化の程度によっては引張強度に影響しない。
- 3)シャルピー吸収エネルギーが高くなるに従い、引張強度は低下する傾向が示された。すなわち、軟化と脆化は相反するものと考えられ、脆化の問題にのみ配慮した鋼材を使用した場合、入熱量によっては軟化の問題が生じるので、両方が満足する機械的性質となるような鋼材を選定する必要がある。
- 4)溶接による引張強度の低下値は、鋼材の種類によって異なるが、同種の鋼材であれば、比較的ばらつきも少なく、入熱量の増加に伴い低下値も増加する傾向が示された。すなわち、鋼材毎に入熱量による引張強度の低下値はある程度推測でき、軟化を考慮し大入熱溶接が可能かどうか検討する方法として、母材の引張強度から適用可能な入熱量を検討する方法が考えられる。
- 5)脆化と軟化を考慮し、SM570材(調質鋼)の入熱制限値として、一般鋼では100KJ/cm、大入熱対応鋼では150KJ/cmを越える時は、溶接施工試験を行う必要があると考えられる。
- 6)SM490材(非調質鋼)の入熱制限値として、200KJ/cmを越える時は、溶接施工試験を行う必要があると考えられる。

## 7. あとがき

本報告では、前報<sup>1)</sup>に引き続き、これまでに報告されているデータをもとに、道路橋示方書の入熱制限を考察してきた。本報告で引用したデータの使用鋼材、溶接材料、製造年代、あるいは施工会社などは様々であり、施工条件にばらつきのある場合での調査結果である。すなわち、施工条件や、研究目的が異なるデータから判断することにより、大入熱溶接の適用性や入熱制限について考察できるものと考えたからである。

また、本文では鋼材規格別に整理してきた。しかし、同じ規格の鋼材でも、化学成分は大きく異なり、本来なら化学成分を考慮して、適用性や入熱制限について言及することが望まれる。鋼材の製造にあたって、化学成分は非常に重要なことであると言えるが、鋼材がユーザー(橋梁メーカー)に渡ってからは、鋼材規格が施工する上で最も重要な管理基準となる。というのも、橋梁を製作する上での施工条件は、主に使用する鋼材の規格で規定されており、化学成分で条件を選定することはない。すなわち、どのような化学成分で作られていても、同一の鋼材規格であれば溶接条件が変わることない。このため、本報告において、炭素当量を考慮して整理はしたが、5元素や大入熱溶接用の

鋼板とする上で用いられるB、Al、Ti、Niなどの化学成分については、言及しなかった。今後、詳細な検討を行うには、化学成分を考慮してデータの分析を行うことが望まれる。

**謝辞：**本報告をまとめるにあたり、数々有益な御忠告を頂いた、東京工業大学の創造プロジェクト研究“高性能鋼の橋梁への適用委員会(委員長：三木千壽)”のメンバーの方々、また溶接施工試験データを提供して頂いた東京鉄骨橋梁の田中雅人氏、柳沼安俊氏、三井造船の宮崎晴之氏、神戸製鋼所の高瀬元春氏(提供当時)、日鐵溶接工業の三浦利宏氏、横山剛康氏(提供当時)には、ご協力頂きました。ここに心より感謝致します。

### 【参考文献】

- 1)南 邦明：橋梁製作における大入熱溶接の適用性の考察(その1) サクラダ技報, No.11, pp73 - 82, 2000.12
- 2)沢井隆之, 入澤重雄：建築構造用耐火鋼材の施工試験, サクラダ技報, No.8, pp66 - 73, 1995.10
- 3)福田 充, 鈴木 亮, 沢井隆之：60キ口高性能の溶接試験報告, サクラダ技報, No.9, pp46 - 51, 1997.3
- 4)玉井尚治：鉄骨ボックス柱角溶接法の技術進歩の歴史と現在の高性能溶接施工法, 横河ブリッジ技報, No.23, pp165 - 174, 1994.1
- 5)北目 剛, 岩崎雅紀, 深沢 誠：少数主桁橋への適用を考慮した高機能鋼材の溶接性能確性試験, 横河ブリッジ技報, pp56 - 65, No.26, 1997.1
- 6)田中一男, 中野秀二, 大月真一：極厚TMCP鋼の母材特性および溶接性の研究, 宮地技報, No.5, pp33 - 40, 1989
- 7)田中一男, 中野秀二：極厚TMCP鋼の母材特性および溶接性の研究(その2), 宮地技報, No.6, pp 27 - 33, 1990
- 8)田中一男, 中野秀二：極厚SM58Q鋼を用いたボックス柱の溶接施工試験, 宮地技報No.6, pp55 - 61, 1990
- 9)中野秀二, 田中一男, 大月真一：極厚TMCP鋼の母材特性および溶接性の研究(その3), 宮地技報, No.8, pp30 - 38, 1992
- 10)大月真一, 鳴沢明雄, 中野秀二：FR鋼の母材特性及び溶接性の研究, 宮地技報No.9, pp51 - 62, 1993
- 11)中野秀二, 本多忠吉, 清水達也：高性能60キ口鋼の溶接性能試験(その2), 宮地技報No.12, pp39 - 44, 1996.10
- 12)原 章, 高田和守, 片岸 智, 福家耕作, 菅野啓行：鉄骨ボックス柱かど継手の高能率サブマージアーク溶接施工法に関する検討, 川田技報, Vol.7, pp99 - 103, 1988.1
- 13)早川 清：エレクトロガスアーク溶接および上向き自動溶接の施工条件について, 川田技報, Vol.8, pp115 - 120, 1989.1
- 14)高野倉三：調質鋼の溶接適用に関する実験, 東骨技報, Vol.5, pp29 - 33, 1978.3
- 15)森永恒男：大入熱溶接法におけるTMCP鋼の継手諸性能(第1報), 東骨技報, Vol.26, pp44 - 48, 1988
- 16)小林正明：建築構造用耐火鋼材(FR鋼)の溶接継手性能試験および加工性の確認(第2報), 東骨技報, Vol.37, pp49 - 54, 1994
- 17)畠中 朗, 藤平正一郎, 米本栄一, 松田福久：大入熱工法・エレクトロスラグ溶接金属の靱性向上に関する研究(第4報), 片山技報, Vol.11, pp25 - 32, 1994
- 18)上野康雄, 宇井 崇, 藤平正一郎：少数主桁橋梁(I桁)を対象とした実物大・溶接施工実験報告, 片山技報, Vol.17, pp71 - 75, 1997
- 19)横山幸夫, 庄山 修, 佐藤健一：橋梁用予熱低減型/大入熱溶接用SM570Q鋼溶接施工試験, 駒井技報Vol.17, pp81 - 87, 1998.10
- 20)佐藤健一, 小林光博：厚板溶接組立H形断面部材の開先無しサブマージアーク溶接施工法の検討, 駒井技報Vol.18, pp78 - 83, 1999
- 21)小林光博, 横山幸夫：溶接入熱量を実験変数とした溶接継手性能に関する基礎的研究, 駒井技報Vol.18, pp84 - 90, 1999
- 22)横山幸夫, 山下文武, 工藤憲二：建築構造用高性能60キ口鋼を用いた溶接組立箱形断面柱の溶接施工試験, 駒井技報Vol.14, pp57 - 64, 1995
- 23)美濃武志, 江端末春, 藤木 修：I型断面大型橋梁の現場溶接に関する実験, 日本橋梁技報, pp18 - 26, 1997
- 24)阪口修一, 山口忠政, 中野善文：厚物ボックス柱継手の高能率サブマージアーク溶接技術, 川崎製鉄技報, Vol.26, No.4, pp1 - 5, 1994
- 25)山口忠政, 林 三郎, 中島松重：厚鋼板のT型すみ肉高能率サブマージアーク溶接技術, 川崎製鉄技報, Vol.26No.4, pp6 - 11, 1994
- 26)長谷 薫：ボックス柱角継手の高能率サブマ - ジアーク溶接, 神戸製鋼技報, Vol.40, No.2, pp93 - 96, 1990
- 27)建築鉄構事業部：極厚TMCP鋼板を用いたBox 断面柱の溶接性確認試験, 三井造船技報, 第145号, pp32 - 40, 1992.2
- 28)サクラダ八千代工場：建築鉄骨仕口部溶接施工試験 試験結果報告書, 1990.12
- 29)東京鉄骨橋梁製作所：2電極サブマージアーク溶接による突合せ溶接継手試験報告書, 1996.7
- 30)三井造船(株)千葉建築鉄構部：TMCP鋼溶接性確認試験報告書, 1990.11
- 31)三井造船(株)千葉建築鉄構部：ノン開先極厚T型すみ肉溶接溶接施工試験要領書, 1991.3
- 32)三井造船(株)千葉建築鉄構部：4面プレートボックス溶接施工法試験要領書, 1992.10
- 33)三井造船(株)建築鉄構事業部：建築構造用耐火鋼ノン開先T型継手高能率SAW施工試験, 1992.12
- 34)三井造船(株)千葉建築鉄構事業部：T型継手深溶込SAW施工法試験報告書, 1992.12
- 35)新日本製鐵(株)君津製鉄所：大入熱溶接(EGW)用HT60, 1998
- 36)新日本製鐵(株)君津製鉄所：大入熱溶接(EGW)用HT50, 60, 1998
- 37)新日本製鐵(株)君津製鉄所：大入熱溶接(SES)用HT50, 60, 1998
- 38)住友金属工業(株)鹿島製作所：第2東名神プロジェクト用厚鋼板基本性能確認試験結果, 1996.1
- 39)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：SEGARC - SAによる厚板片面2層溶接, 1979.2
- 40)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：SEGARC法による60kg/cm2級高張力鋼の片面2層溶接試験, 1979.7
- 41)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：SEGARC - SATによる貯槽側板縦継手の高能率溶接について, 1981.4
- 42)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：PFI - 52ES x US - 36Lによる 40mm以上の超板厚Box柱角継手高能率施工法の検討結果, 1987.3
- 43)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：PFI - 52ES x US - 36L によるBox柱角継手部の高能率施工法について, 1987.5
- 44)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：PFI - 53ES x US - 36Lによるボックス柱角継手部One - Run施工法の適用板厚拡大と低入熱・高速溶接化の検討, 1992.3
- 45)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：BOX柱厚板(50mm角継手の性能に及ぼす母材成分の影響), 1994.1
- 46)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：橋梁I桁SEGARC 溶接施工法の検討, 1995.6
- 47)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：橋梁I桁SEGARC溶接施工法の検討(許容入熱量の検討), 1995.7
- 48)Y株)神戸製鋼所溶接棒事業部：建築構造用鋼材(SN材)の溶接継手性能について, 1996.6
- 49)日鐵溶接工業(株)：VEGA - VB法 - ワイヤ振動式高能率エレクトロガス溶接法 -
- 50)日鐵溶接工業(株)：鉄骨の立向自動溶接SESNET法, 1982.6
- 51)日鐵溶接工業(株)：VEGA - VB法による薄板(14mm)の試験結果, 1985.9

- 52)日鐵溶接工業(株)：VEGA - VB法による薄板(14 mmt)の確性試験結果, 1985.11
- 53)日鐵溶接工業(株)：SM - 50A(32mmt)のSESNET及びSES溶接試験結果, 1986.9
- 54)日鐵溶接工業(株)：VEGA - VB法によるEG - 60×SM58Q鋼の確性試験結果, 1987.3
- 55)日鐵溶接工業(株)：ニッケツボンドフラックス NSH - 52について, 1987.4
- 56)日鐵溶接工業(株)：SESNET及びSES法による CLC鋼( SM53B : 70mmt )溶接試験結果, 1987.6
- 57)日鐵溶接工業(株)：SESNET溶接金属部のじん性について, 1988.1
- 58)日鐵溶接工業(株)：エレクトロガスアーク溶接用ワイヤEG - 1 (改)の確性試験結果, 1988.9
- 59)日鐵溶接工業(株)：SESNET溶接によるCLC鋼SM - 50B : 50mmt )ボックス柱ダイアフラム部の確性試験結果, 1988.11
- 60)日鐵溶接工業(株)：ボックス柱角継手用多層盛り用フラックス NSH - 52確性結果, 1988.12
- 61)日鐵溶接工業(株)：NSH - 52による2電極一層溶接試験結果, 1989.5
- 62)日鐵溶接工業(株)：NSH - 52× Y - B×Y - BによるSM50B - CLC鋼(板厚50mm)ボックス柱かど継手の確性試験結果, 1989.9
- 63)日鐵溶接工業(株)：YM - 55Sによる1電極SESNET溶接の確性試験, 1994.2
- 64)日鐵溶接工業(株)：YM - 55Sによる2電極SESNET 溶接の確性試験, 1994.2
- 65)日鐵溶接工業(株)：高性能590N/mm<sup>2</sup>鋼SESNET溶接用ワイヤの確性試験結果, 1994.2
- 66)日鐵溶接工業(株)：60キロ級高張力鋼用VEGAワイヤEG - 60の確性試験結果(水冷銅板使用), 1997.1
- 67)日鐵溶接工業(株)：60キロ級高張力鋼用VEGAワイヤEG - 60の確性試験結果(SB - 60V使用), 1997.1
- 68)仁藤 浩, 阪井大輔, 矢島 浩, 井上好章, 十河康雄, 佐藤邦彦, 豊田政男：TMCP型HT50鋼板溶接継手の引張強さに関する評価, 日本造船学会, No.157, pp304 - 311, 1985
- 69)〔社〕日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2002.3