

論文

マルエージ鋼の溶接継手強度におよぼす
試験片寸法の影響

© 1985 ISIJ

藤田 充苗*・河部 義邦*・入江 宏定*²・塚本 進*³Effect of Specimen Size on Tensile Strength of Welded
Joint in Maraging Steels

Mitsutane FUJITA, Yoshikuni KAWABE, Hirosada IRIE and Susumu TSUKAMOTO

Synopsis :

The influence of specimen size on the tensile strength of electron beam welded joint has been studied for four maraging steels. The strength was measured using specimens different in the plate width (W) and thickness (t) and the width (H) of the weld metal. The influences have been discussed on the basis of the plastic constraint of the base metal having higher strength than the weld metal.

The strength of welded joint rises gradually and reaches a constant value as W increases when t and H are both constant. This constant value of strength corresponds to the strength of infinitely wide welded joint. The minimum width (W_{∞}) at which the constant value is achieved is determined. When W and t are constant, the strength of welded joint of the width W_{∞} increased with the decrease in H . When W and H are constant, it increases with the increase in t . The strength of welded joint increases with the decrease in the relative thickness (H/t) as the degree of the constraint from the base metal of the deformation of the weld metal increases. The width W_{∞} is roughly given by $W=5t$ in case $(H/t) \leq 1$ and $W=5H$ in case $(H/t) > 1$. Similar results have been reported for high tension steels.

1. 結 言

マルエージ鋼の電子ビーム溶接継手は、低強度の溶接金属を高強度の熱影響部と母材がはさんだ構成になっている^{1)~2)}。そのため溶接継手強度は、溶接金属の強度と溶接金属の塑性変形を母材が拘束する程度、すなわち塑性変形部に働く応力状態に依存する。溶接継手強度と溶接金属の強度との関係についてはすでに報告した³⁾。溶接継手強度と溶接金属の塑性拘束との関係については高張力鋼の軟質継手で調べられている^{4)~5)}。これによると、母材による拘束の程度は溶接金属幅、溶接金属と母材との強度比、引張試験片寸法などに影響されることが明らかにされている。マルエージ鋼は強度が非常に高く、しかも一般に薄板として用いられる。このような鋼の溶接継手に荷重が加えられるとき、十分塑性拘束が働くような高い応力あるいは歪みに達する以前に破断を生じる低応力破壊が考えられ、高張力と同様な関係を示すとはかぎらない。また、溶接構造物では溶接金属幅に比較して板幅が十分広い継手が多いので、このような継手の強度を正しく評価できる試験片寸法を明確にしておく必要がある。

一方、マルエージ鋼の継手性能を向上させるには、通常の溶接継手のように、溶接金属の強度を母材強度と同等かそれ以上に高める手法は有効ではない。なぜなら、この鋼は強度と靱性が極限まで高められるように組織調整が行われているので、溶接金属の強度を高めると靱性が著しく低下するためである。継手性能向上をはかるもう一つの手法として、溶接金属の強度を下げ、靱性を高め、溶接金属の強度低下を母材による拘束によつて防ぐ方法が考えられる。この方法を利用するには、拘束の程度に影響をおよぼす因子と溶接継手強度との関係を明確にしておく必要がある。

本実験では、強度水準の異なる4種類の鋼に電子ビーム溶接を施し、溶接金属幅、板幅、板厚の異なる試験片を用意して溶接継手強度を調べ、十分幅の広い継手の強度を求める試験片寸法を明らかにした。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

実験には4種類の鋼を使用した。その組成、熱処理条件、母材と溶接金属の強度を Table 1 に示す。これらの鋼は 20 kg 真空高周波炉で溶製し、厚さ 30 mm、幅

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 5 月 14 日受付 (Received May 14, 1984)

* 金属材料技術研究所筑波支所 工博 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Sakuramura Niihari-gun Ibaraki pref. 305)

*² 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals)

*³ 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

Table 1. Nominal compositions and tensile strengths of base metal (σ_B) and weld metal (σ_W) of steels used in this study.

Sample	Nominal composition (wt.%)					Heat treatment (°C)		Tensile strength (kgf/mm ²)		Strength ratio σ_B/σ_W
	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Solution	Aging	σ_B	σ_W	
No.1	18.0	8.0	5.0	0.4	0.1	830	480	201	156	1.29
No.4	18.0	12.0	4.5	1.4	0.1	830	480	270	195	1.38
No.5	13.0	15.0	10.0	0.2	0.1	Thermo-mechanical	500	304	221	1.38
No.6	18.0	15.0	6.5	1.1	0.1	850	500	298	186	1.60

90 mm の板に鍛造圧延後、所定の強度と靱性が得られるように溶体化あるいは加工熱処理を行い、その後 60% の冷間加工、溶接、時効処理を行った。供試材の作製方法は前報³⁾と同様である。

Table 1 に示すように、母材と溶接金属の強度比 (σ_B/σ_W) は、No. 1 鋼が最も小さく、No. 6 鋼が最も大きい。No. 4 と 5 鋼のそれは中間にあり、その値は等しいが、溶接金属と母材の強度は No. 5 鋼のほうが約 30 kgf/mm² 高い。

2.2 溶接方法

冷間圧延した厚さ 1.3 mm、幅 120 mm の薄板の圧延方向に沿って、電子ビーム溶接機を用いてメルトラン溶接 (ビードオンプレート) を行った。平均溶接金属幅 (ビードの表と裏側の幅の平均値) が 0.65~2 mm の溶接継手は、加速電圧 40 kV、ビーム電流 20 mA、ビームの焦点位置を板表面と一定にし、溶接速度を 50~200 cm/min に変化させて作製した。溶接金属幅が 3 mm のものは、ビームの焦点位置を板表面より上部にずらし溶接速度 50 cm/min で作製した。

2.3 引張試験

溶接継手強度の測定には、Fig. 1 に示す寸法の試験片を使用した。板幅効果を調べる試験片は、板厚 1 mm

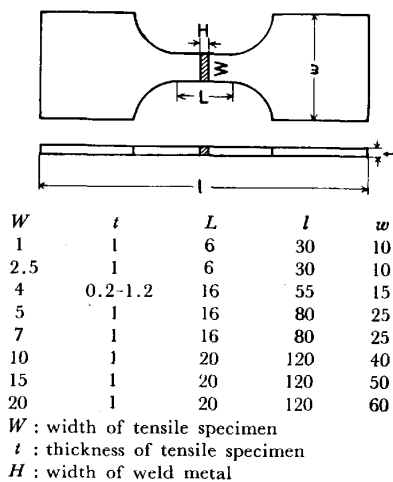


Fig. 1. Tensile specimen size used in the experiment.

と一定にし、板幅を 1~20 mm に変化させた。板厚効果を調べる試験片は、板幅を 4 mm と一定にし、板厚を 0.2~1.2 mm に変化させた。これらの試験片は、溶接後表と裏側の余盛を除去し、所定の形状に加工した後、表面を研削して作製した。その後、Table 1 に示すような条件で時効処理を行い、さらに 200°C で 24 h の脱水素処理を行った。

3. 実験結果

3.1 溶接継手の特徴

Fig. 2 はマルエージ鋼の溶接継手の硬さ分布をこれまでの報告¹⁾³⁾にもとづいて模式的に表したものである。すなわち、溶接金属の硬さは熱影響部や母材の硬さより低い。そして、溶接金属と母材の硬さの差は、母材強度が高い鋼ほど大きくなる傾向にある。熱影響部にも硬さの低い部分が形成されるが、電子ビーム溶接のような低入熱の溶接では、その幅は非常に狭く、熱影響部は母材と同等な機械的性質を持つているとみなせる。なお、溶接入熱を変えて溶接金属幅を変化させても、溶接金属の硬さは変わらない。したがって、マルエージ鋼の溶接継手は、低強度の溶接金属を高強度の母材がはさんだ構成

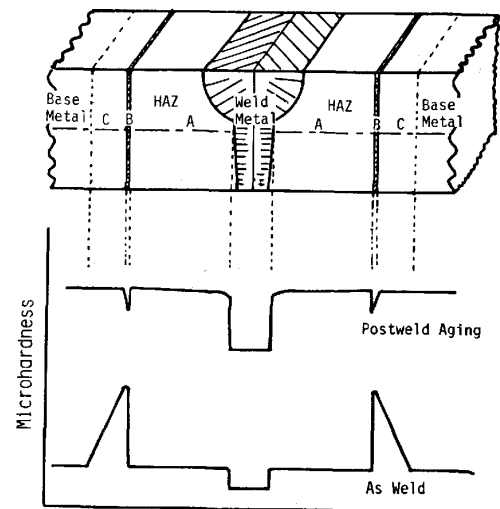


Fig. 2. Schematic illustration of structure and microhardness distribution in the welded joint of maraging steels.

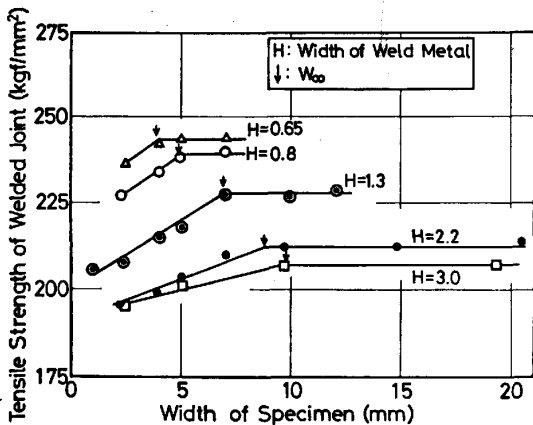


Fig. 3. Relationship between the tensile strength of the welded joint and the width of specimen for various widths (H) of weld metal in No. 4 steel. \downarrow indicates a minimum width (W_{∞}) at which the tensile strength of infinitely wide welded joint as is achieved.

になつており、しかも溶接金属の幅が変わつても溶接金属の強度は変わらないのが特徴である。

3.2 溶接継手強度と引張試験片板幅との関係

3.2.1 溶接金属幅

まず、溶接継手強度に影響をおよぼす因子の中で引張試験片板幅と溶接金属幅の影響を検討する。そのため、強度水準 250 kgf/mm² の No. 4 鋼について、板厚一定で板幅を 1 から 20 mm まで変化させた試験片を用いて、種々の溶接金属幅における溶接継手強度を求めた。Fig. 3 にその結果を示す。いずれの溶接金属幅でも、溶接継手強度は板幅の増加とともに上昇し、一定値に達する。この上限の値が十分幅の広い継手の強度に相当する。この強度が求められる最小の試験片板幅 (W_{∞}) を矢印で示した。この板幅は溶接金属幅が広くなるとともに増加し、上限強度は溶接金属幅が狭くなるとともに上昇する。

板幅の増加によつて溶接継手強度が上昇するのは、溶接金属の変形が母材によつて拘束される程度がだいに強められるためであろう。また、板幅一定で溶接金属幅が狭くなるとともに溶接継手強度が上昇するのも、溶接金属に母材による変形拘束が強く働くようになるためであろう。

溶接金属の変形が母材によつて拘束される程度は溶接金属の伸びの変化から理解できる。Fig. 4 は継手における溶接金属の伸びを溶接金属幅が 0.8, 1.3, 2.2 mm の場合について示したものである。なお、この溶接金属の伸びは溶接金属の幅を標点間距離として求めた。この図から明らかなように、溶接金属の伸びは板幅の増加とともに低下し、その低下の程度は溶接金属幅が狭いほど急

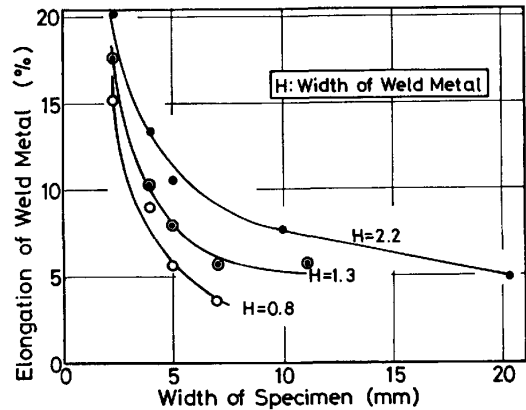


Fig. 4. Relationship between the elongation of welded joint and the specimen width for various widths of welded joint in steel No. 4.

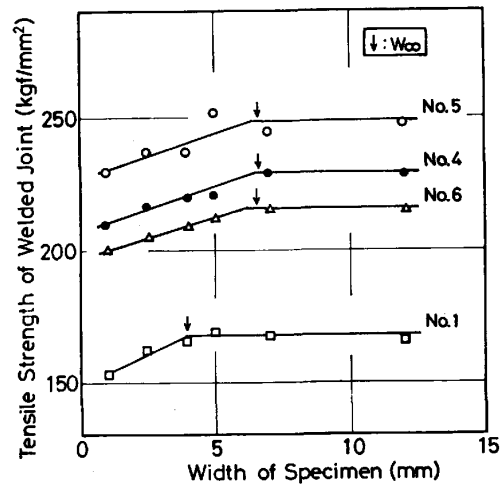


Fig. 5. Relationship between the tensile strength of welded joint and the width of specimen for $H=1.3$ mm the steels studied. \downarrow is explained in Fig. 3.

激である。したがって、板幅が増加したり、溶接金属幅が狭くなると、母材による変形の拘束が強く働くようになり溶接金属の変形量が減少することがわかる。

3.2.2 母材と溶接金属との強度比

次に、溶接継手強度に影響をおよぼす因子の中で、母材と溶接金属との強度比の影響を検討する。すなわち、母材強度が 200 から 300 kgf/mm² の 4 種類の鋼について、板幅を 1 から 12 mm まで変化させた試験片を用いて、板厚と溶接金属幅 (1.3 mm) を一定にして、溶接継手強度を求めた。Fig. 5 にその結果を示す。いずれの鋼種、すなわちいずれの強度比でも、板幅が増加するとともに溶接継手強度は上昇し、一定値に達する。この上限の強度が求められる最小の板幅 (W_{∞}) は強度比の小さい No. 1 鋼では約 4 mm であるが、それより強度比の大きい No. 4, 5, 6 鋼では約 7 mm になる。したがつ

て、十分幅の広い継手の強度を求めるには、強度比が小さい場合より大きい場合のほうが広幅の試験片を必要とすることがわかる。しかし、強度比が 1.38 から 1.60 に上昇しても、必要な板幅は 7 mm 程度であり、強度比に依存しなくなる。

3.3 溶接継手強度と試験片板厚との関係

これまででは、試験片板厚 1 mm と一定で板幅と溶接継手強度との関係を調べてきた。ここでは、試験片板幅一定として、板厚を変えた場合について検討する。なお、Fig. 3 に示したように、溶接金属の幅が 0.65 mm の時、溶接継手強度は板幅 4 mm で上限の値に達しており、板幅が 4 mm の試験片で、溶接金属の母材による拘束が板幅方向に十分働く状態にあると思われる。そのため、母材強度が 200 から 300 kgf/mm² の 4 種類の鋼について、板幅 4 mm で溶接金属幅 0.65 mm と一定にして、板厚を 0.2 から 1.2 mm まで変化させた試験片を用いて溶接継手強度を求めた。Fig. 6 にその結果を示す。なお、ここでは溶接ままの板厚が 1.3 mm であるので、板厚 1.2 mm は最大の板厚である。

板幅方向の拘束が十分働いている状態でも、板厚の増加にしたがっていずれの鋼種とも溶接継手強度は上昇する。また、この溶接継手強度の板厚依存性は、強度比が小さなものより大きなものの方が、すなわち No. 1 鋼より No. 6 鋼の方が大きい傾向にある。したがって、板幅方向の拘束が十分働く場合でも、板厚と強度比によって溶接金属の母材による拘束の程度が影響され、溶接継手強度が変化する。

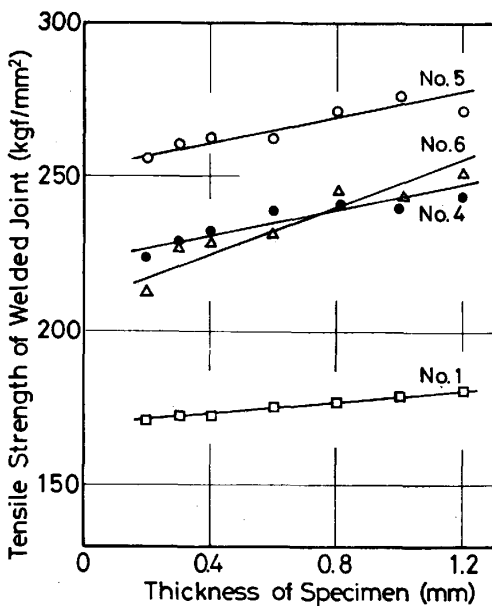


Fig. 6. Relationship between the tensile strength of welded joint and the thickness of specimen for H=0.65 mm in weld metal in various steel studied.

4. 考 察

4.1 溶接継手強度と塑性変形拘束との関係

マルエージ鋼の溶接継手強度は、溶接金属幅、溶接金属と母材との強度比、引張試験片板幅と板厚に依存することを示した。これらは、低強度の溶接金属の塑性変形を高強度の母材が拘束する程度に影響をおよぼす因子であることを示した。これらは、低強度の溶接金属の塑性変形を高強度の母材が拘束する程度に影響をおよぼす因子であることを示した。したがって、これらの因子を統一して拘束の程度を表すことができれば、種々の条件下の溶接継手強度を正しく予測できるであろう。

この拘束の程度は、軟質部（ここでは溶接金属）のくびれによつて生じる多軸応力状態の問題として、いくつかの理論的考察が行われている^{4)~9)}。佐藤らによれば上記因子の変化によつてくびれ部分の多軸応力状態が変わり、その程度に応じて溶接継手強度は溶接金属の強度より上昇することを示している^{4)~6)}。そして、板幅と板厚が等しい場合の溶接継手の強度は、軟質部の強度と相対厚さによつて一義的に表されることを示している。なお、相対厚さとは軟質部の厚さ (H) (ここでは溶接金属幅) と板厚 (t) との比 (H/t) である。また、板幅 (W) が板厚に比べて十分広い場合の溶接継手強度は、板幅方向の歪みが零となる平面歪み状態にあることを加味すると、正方形断面を有する溶接継手材と同様に表されると考察している。この考察にしたがって、溶接継手強度と各因子との関係を整理する。

母材強度 250 kgf/mm² の No. 4 鋼について、種々の溶接金属幅における溶接継手強度と引張試験片板幅との関係を Fig. 3 に示した。この溶接継手強度 (σ_j) を溶接金属の強度 (σ_w) に対する比である相対継手強度 (σ_j/σ_w) で表し、それを縦軸とし、相対厚さを横軸として、Fig. 7 に示す。縦軸は溶接金属の変形が拘束されることによつて溶接金属の強度が見かけ上何倍上昇したかを表し、横軸の相対厚さは幾何学的な拘束状態を表し、その数値が増加すると拘束状態が弱くなることを意味する。Fig. 7 における $W=t$ の曲線は板幅と板厚が等しい場合の溶接継手材、 $W \rightarrow \infty$ の曲線は十分幅の広い溶接継手材について、佐藤らの式⁵⁾⁶⁾にしたがって計算した結果である。また、この図中に、Fig. 3 で板幅が 3 と 5 mm の場合、および十分幅の広い溶接継手材の強度が求められる板幅 (W_∞) の場合の測定結果を示している。板幅が 3 と 5 mm の場合、相対厚さの増加とともに相対継手強度は $W \rightarrow \infty$ の曲線上から $\sigma_j/\sigma_w=1$ 、すなわち溶接金属の強度に近づく。その近づき方は板幅の狭い 3 mm のほうが急激である。 W_∞ の場合、相対継手強度は相対厚さが約 1.5 まで $W \rightarrow \infty$ の曲線にそつて変化

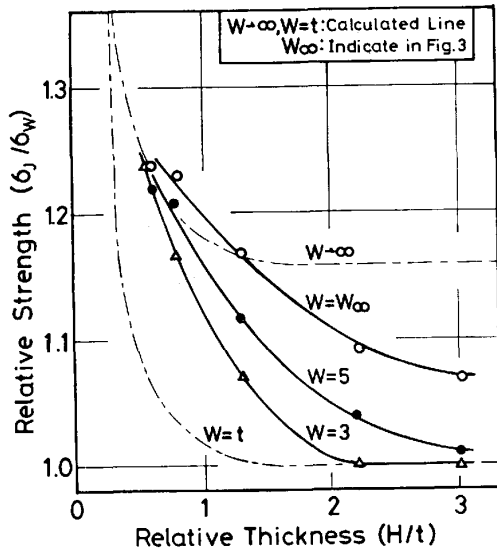


Fig. 7. Relationship between the relative strength (σ_j/σ_w) and the relative thickness (H/t), where σ_j and σ_w are the strength of the welded joint and weld metal, respectively.

し、1.5 以上では $W \rightarrow \infty$ の曲線と溶接金属の強度に相当する値との中間に止まっている。相対厚さが 1.5 までの範囲では相対継手強度が $W \rightarrow \infty$ の曲線と一致していることから、溶接金属における応力状態が平面歪み状態となるような試験片形状であることがわかる。しかし、相対厚さが 1.5 以上では、Fig. 3 において溶接継手強度が上限値に達する板幅の試験片でも、相対継手強度は $W \rightarrow \infty$ の曲線より低下する。したがって、相対厚さが 1.5 以上では板幅が十分に広いにもかかわらず、応力状態が平面歪み状態に保たれていないことを示している。すなわち、相対厚さが 1.5 以上では板幅方向の変形は拘束されているが、板厚方向の変形は十分拘束されておらず、低い応力下で板厚方向の変形が生じるためであろう。

これまでの、板厚一定で溶接金属幅を変えて相対厚さを変えた結果について議論してきた。次に、溶接金属幅一定で板厚を変えた結果について考えてみる。Fig. 6 の結果を、Fig. 7 と同様に相対継手強度と相対厚さとの関係として整理し、Fig. 8 に示す。いずれの鋼でも相対厚さの増加とともに相対継手強度は低下する。No. 4, 5 鋼の相対継手強度と相対厚さの関係は、Fig. 7 に示した $W \infty$ の実測値とはほぼ一致していると考えて良いであろう。このことは、溶接金属幅あるいは板厚が変わることによつて溶接継手強度が変化しても、その変化を相対厚さで統一的に整理できることを示している。したがって、相対厚さが同一であれば、板厚が薄くて溶接金属幅が狭い場合と板厚が厚くて溶接金属幅が広い場合ともに溶接継手強度は等しくなることがわかる。

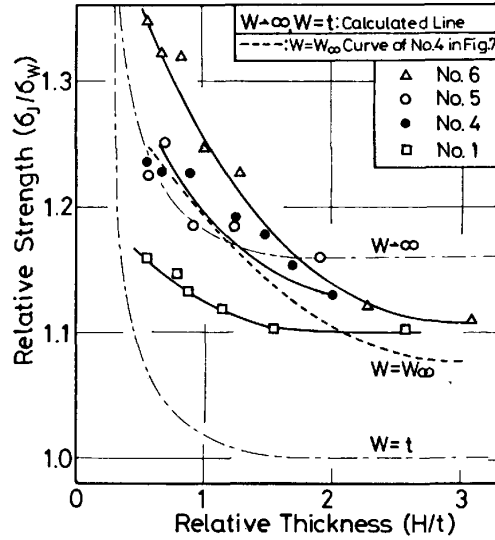


Fig. 8. Relationship between relative strength (σ_j/σ_w) and the relative thickness (H/t).

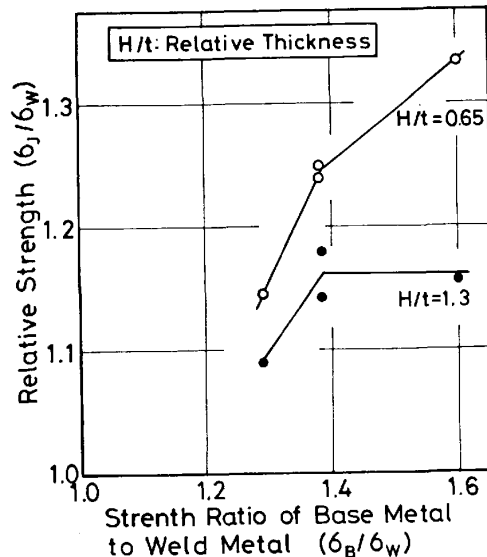


Fig. 9. Relationship between the relative strength (σ_j/σ_w) at $W \infty$ and the strength ratio (σ_B/σ_w).

Fig. 8 において、母材と溶接金属との強度比の大きい No. 6 鋼のほうが強度比の小さい No. 1 鋼より、相対厚さが小さいとき相対継手強度は高くなる。しかし、相対厚さが大きくなると、鋼種による相対継手強度の差は少なくなる。これらのことは、相対厚さが小さなき、すなわち溶接金属に変形拘束が強く働く状態では、母材と溶接金属との強度比が大きな鋼のほうがより強く拘束の影響を受けることを示している。しかし、相対厚さが大きくなり変形拘束状態が弱くなると、強度比の差による拘束への影響は少なくなる。これらのことは、二つの相対厚さに対して、相対継手強度を母材と溶接金属との強度比で整理した Fig. 9 で明らかになる。強度比

が高い鋼では、溶接金属の変形を高強度の母材によつて高い強度に達するまで拘束でき、その結果として、溶接継手強度が高くなる事がわかる。

Fig. 8 において、相対厚さが小さいとき No. 6 鋼の相対継手強度は $W \rightarrow \infty$ の曲線より高くなつてゐる。この理由は明確にできないが、二つのことが考えられる。一つは、No. 6 鋼の溶接金属には約 30% のオーステナイトが残留しており³⁾、相対厚さが小さいときそれが加工誘起変態を生じ、溶接金属そのものの強度が上昇する場合である。もう一つは、溶接金属の幅が板面の表と裏で異なりしかもその形状はワインカップ状であるので、表と裏の幅が同一な溶接金属の変形を前提として求めた $W \rightarrow \infty$ の曲線よりも拘束が強く働くような変形様式となる場合である。

マルエージ鋼の溶接継手強度は、母材および溶接金属の強度が高いにもかかわらず低応力破壊を生じることなく、高張力鋼の軟質継手^{4)~6)}と同様に、低強度の溶接金属の塑性変形を高強度の母材が拘束する程度に影響される。継手効率は 90% 以上であるが³⁾、もしこの拘束が働かず低強度の溶接金属で破断が生じるならば、Table 1 の数値を使つた計算では 78~63% の低い値を示すことになる。

4.2 十分幅の広い継手の強度が求められる引張試験片寸法

Fig. 3 と 5 において、板幅の増加にともなつて溶接継手強度は上昇し、一定値に達する。この上限の強度が十分幅の広い継手の強度に相当し、この強度を求めるには板厚 1 mm の場合矢印で示した板幅 (W_∞) 以上の試験片が必要であることを明らかにした。この板幅 (W_∞) とこれまでに報告されている十分幅の広い継手の強度が求められる試験片寸法をここで比較してみる。Fig. 3 で求めた板幅 (W_∞) を板厚との比の相対板幅 (W_∞/t) で表し、相対板厚 (H/t) の関係として Fig. 10 に示す。

上記の表示方法は佐藤らの方法⁵⁾によつて整理されたものであり、Fig. 10 にはその結果と比較して示した。十分幅の広い継手の強度を求めるには、実線と点線の上側に相当する試験片寸法が必要である。本実験では、これまでの結果より相対厚さの大きな範囲まで調べたが、相対厚さが小さな範囲ではこれまでの結果と良く一致している。相対厚さが大きい範囲ではこれまでの結果の延長線上にあると実験のばらつきを考慮すればいえるであろう。したがつて、高強度のマルエージ鋼で求めた結果と高張力鋼で求めた結果とはほぼ一致しているといえよう。

一方、工学的見地から佐藤らは相対厚さが 1 より大き

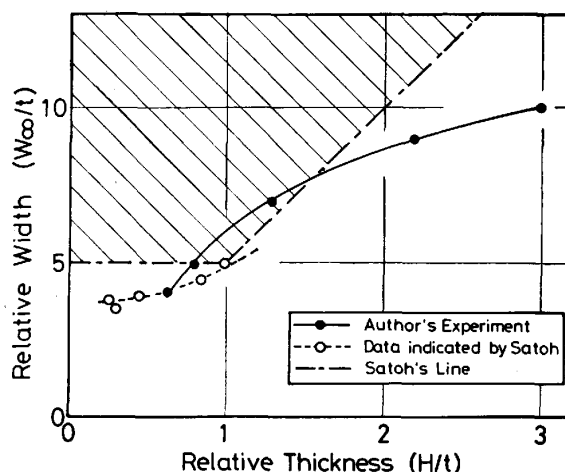


Fig. 10. Relationship between the relative width (W_∞/t) and the relative thickness (H/t). The tensile strength of infinitely wide welded joint can be obtained using the specimen in the shaded area.

い場合と小さい場合にわけ一点鎖線で示すような相対板幅が必要であることを提案している⁵⁾。すなわち、相対厚さが 1 より小さい場合 $W_\infty/t=5$ 、1 より大きい場合は $W_\infty/t=5 H/t$ の直線関係以上の斜線で示す相対板幅が必要だとして、下記の式で板幅を決めている。

$$\begin{aligned} W_\infty &= 5t && \text{相対厚さ} \leq 1.0 \\ W_\infty &= 5H && \text{相対厚さ} > 1.0 \end{aligned}$$

相対厚さの広い範囲にわたる本実験結果とこれまでの実験結果を総合すれば、実線で示されるように、相対厚さが 1 までの範囲では相対板幅は相対厚さに依存せず、1 以上では相対厚さに依存するような曲線が得られる。このことは、上記のような式で板幅を決定できることを示しており、しかもほとんどの実測値が直線より下にあるので、相対厚さが 1 以下では板厚の 5 倍、相対厚さが 1 以上では溶接金属幅の 5 倍の板幅であればほぼ十分であるといえよう。

5. 結 言

母材強度 200~300 kgf/mm² の 4 種類のマルエージ鋼に電子ビーム溶接を施し、溶接金属幅、板幅、板厚の異なる引張試験片を用意して溶接継手強度を調べ、十分幅の広い継手の強度を求める試験片寸法を検討した。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 板厚と溶接金属幅一定で板幅を変えた場合、板幅の増加とともに溶接継手強度は上昇し、その後一定値に達する。この上限の強度が十分幅の広い継手の強度であり、この強度を求めるには上限の強度が求められる板幅より幅の広い試験片が必要である。
- 2) 板幅と板厚一定で溶接金属幅を減少させた場合、

板幅と溶接金属幅一定で板厚を増加させた場合、ともに十分幅の広い継手の強度は上昇する。

3) 溶接継手強度の溶接金属幅依存性と板厚依存性とを相対厚さ(溶接金属幅/板厚)によつて統一して表すことができ、相対厚さの低下すなわち溶接金属の変形を母材が強く拘束する状態になるとともに、溶接継手強度は上昇する。

4) 溶接継手強度の鋼種による差違すなわち母材と溶接金属の強度比依存性は、溶接金属の変形を母材が拘束する状態が弱い場合には、明確に表れない。しかし、強い場合には、母材と溶接金属の強度比が大きい継手のほうが小さい継手より、溶接金属の強度に比較して溶接継手強度が高くなる。

5) 十分幅の広い継手の強度を求めるに必要な引張試験片の板幅は、マルエージ鋼の場合もこれまでの報告と同様に、相対厚さが1までは板厚の5倍以上、1以上では溶接金属幅の5倍以上あればほぼ十分である。

終わりに、本研究遂行に当たりご指導いただいた金属

材料技術研究所、古林英一金属加工研究部長、中村治文溶接部長、多くの助言をいただいた大阪大学工学部豊田政男助教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 藤田充苗, 河部義邦, 入江宏定, 塚本 進: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 996
- 2) F. H. LANG and N. KENYON: Welding of Maraging Steels, Welding Research Council Bullutin, 159 (1971), p. 3
- 3) 藤田充苗, 河部義邦, 入江宏定, 塚本 進: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1750
- 4) 佐藤邦彦, 土井 勉, 豊田政男: 溶接学会誌, 37 (1968), p. 1214
- 5) 佐藤邦彦, 豊田政男: 溶接学会誌, 40 (1971), p. 885
- 6) 佐藤邦彦, 豊田政男: 日本造船学会論文集(1972) 132, p. 381
- 7) P. W. BRIDGMAN: Studies in Large Plastic Flow and Fracture (1950), p. 9 [Mcgraw-Hill]
- 8) N. N. DAVIDENKOV and N. I. SPIDONOVA: Proc. ASTM, 46 (1946), p. 1147
- 9) 瀬尾律二, 正木順一: 溶接学会誌, 49 (1980), p. 875