高張力鋼熔接変質部の冷却状況と顕微鏡組織 および硬度 (第 3 報)*

— V 型および T 型接手について —

関口春次郎** 稲垣道夫** 佐藤 誠**

Cooling Curve, Microstructure and Hardness in Welding Heat Affected Zone of High Tensile Steel (Report 3)*

In Case of Single-V-Butt and T-Joint

By H. Sekiguchi**, M. Inagaki** and M. Sato**

Abstract

Authors made a series of investigation on structure and hardness of heat-affected zone, welding with single-V-butt and T-joint which are used generally in welding industries.

In this report the softening effect caused by subsequent welding in the neighbourhood of the first pass was examined. On the other hand, an investigation for completely welded specimens was made in case of above mentioned joints.

In single-V-butt joint, the maximum hardness of heat-affected zone was observed in the neighbourhood of last pass, while in the neighbourhood of root pass softening was caused with the heat effect of subsequently welded passes.

In T type fillet joint, softening was little and the hardness of heat-affected zone was lowered slightly, when the microstructure consisted of martensite mostly. The relation between cooling curves and microstructure in the heat-affected zone of T-joint agreed with that of the second report on high tensile Mn-Si steel (Fig. 9). With reference to hardness, however, lower values were confirmed in this report, and this fact is considered to be attributable to the use of coated electrode of low hydrogen type.

Among all the welded joints investigated, the heat-affected zone of single fillet T-joint showed the highest hardness on account of rapid cooling, and the heat-affected zone of single bead, manually arc welded, shown next higher value. The hardness of that of single bead submerged arc welded, or single-V-butt joint manually arc welded was lower.

1. 緒 言

第 1 報においては、高張力鋼熔接変質部の冷却状況、顕微鏡組織および硬度に及ぼす鋼板寸法の影響を調査し、さらに第 2 報では、熔接諸条件の影響について実験した。そして 55kg/mm^2 程度の引張強さを有する Mn-Si 系高張力鋼について、冷却曲線と熔接変質部の顕微鏡組織および硬度との関係図を作った。しかしこれらは鋼板上にシングルビードを置いた場合の実験で、構造物を熔接する場合の実際の熔接々手についてではなかった。そこで本報では文献¹⁾を参照し、種々の熔接々手の中最も代表的と考えられる V 型および T 型接手について実験した。そして V 型接手では、ルートパス (第 1 層) 附近変質部がその後の熔接によっていかに軟化されるかを調べ、完全に熔着するに要するパス数と、変質部の顕微鏡組織および硬度との関係を明

らかにした。また T 型接手では、片側 1 層隅肉熔接を行った場合の変質程度を、前報のシングルビードの場合と比較した。なお両側 1 層隅肉熔接の場合、前に置いた隅肉ビードによる変質部が、後に置いた隅肉ビードにより、いかに軟化されるかについても検討した。

2. 試験片の作製および実験方法

実験に用いた高張力鋼板はすべて板厚 16mm で、機械的性質、化学成分、顕微鏡組織などについては、第 2 報の Table 1 および Photo. 1 を参照されたい。鋼板は本報でも入手のままの状態で実験に供した。

試験片の寸法については V 型接手試験片では、板の長さ 120mm、板幅 85mm の 2 枚の鋼板を用い、開先角度を 60° にとって実験した。熔接に際しては裏当を使用せず、定盤上に鋼板試片をルート間隔 0 で固定し、両端を仮付け後、本熔接を行った。ルートパス附近変質部がその後の熔接で受ける軟化作用をみるには、実際に鋼構造物を熔接する場合に、採用されられると思われるパス数で熔接を行い、各

* 原稿受付 昭和 32 年 3 月 28 日

** 正員 名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University

層毎に熔接を打ち切り、ルートパス附近変質部の顕微鏡組織および硬度を調査した。なお V 型接手では、前に置いた層附近の温度がほぼ 100°C に低下した後、次の熔接ビードを置いた。

T 型試験片は板の長さはやはり、120mm、板幅は 160mm および 85mm である。板幅 85mm の鋼板を板幅 160mm 鋼板中央部に小口面を仮付け後、下向熔接の位置に試験片を固定し、片側および両側隅肉熔接を行った。この場合もやはり面間隔は 0 とした。

なお本報の実験で採用した熔接諸条件を Table 1 に示

Table 1 Welding conditions adopted

Electrode	Low hydrogen type, 4mm dia.
Welding current	A. C. 180 A
Arc voltage	28 V
Melting rate of electrode	21 cm/min
Interpass temperature	100°C

した。融合および変質部附近の温度測定孔 (径 3mm) は、V 型接手の場合には、孔底を開先面に近接した鋼板厚さの中心面上に位置させた。また T 型接手の場合には、ルート附近に位置させた温度測定用熱電対、記録装置、硬度測定法、顕微鏡試験などはすべて第 2 報と同様である。

3. 実験結果

(1) V 型接手

a) 冷却曲線

ルートパスによる変質部がその後の熔接で受ける熱履歴を、冷却曲線によって図示すると、Fig. 1 の如くなる。この図では、図中に示した位置の熱接点が A_3 変態点以上に加熱された場合には、 A_3 変態点からの冷却曲線を取り、熱接点の最高温度が A_3 変態点に達しない場合は、その最高温度からの冷却曲線を示した。これによると、 A_3 変態点以上に加熱されたサイクルの A_3 変態点以下の冷却状況は、ある狭い冷却曲線の範囲内にあって、殆んど同様である。本実験の場合には、4 層目以後のビードについては、熱接点の最高温度は A_3 変態点に達しなかった。しかし低温範囲における冷却曲線は、 A_3 変態点以上に加熱された場合と一致する傾向にある。

Fig. 2~6 は板厚 16mm の V 型接手試験片をそれぞれ 3, 4, 6, 7 および 9 層で、全溝を熔接し終えた場合、鋼板厚さの中央面における融合変質部附近が受ける熱履歴を、熱接点の最高温度からの冷却曲線によって示した。この場合熱接点が A_3 変態点以上に加熱されても、冷却曲線の 0 秒規準点が最高温度にとってあるので、冷却曲線は重なり合っていない。しかし A_3 変態点からの冷却時間をとれば、 A_3 変態点以上に加熱された第 2 層以後の冷却曲線

は Fig. 7 に示した第 1 層の冷却曲線に近似し、 A_3 変態点以下の冷却曲線は、やはり狭い冷却曲線範囲内に集まる。

b) 熔接変質部の最高硬度および顕微鏡組織

ルートパス附近変質部の最高硬度は、ルートパスのみを

Remarks:—

(a) Proceeding rate of bead (P.R.B.)=16.7 cm/min

(b) Vickers hardness and microstructure of heat-affected zone in the neighbourhood of the first pass:—

Deposited 1st pass only, 287, F(2%)+Zw (40%)+M

After 2nd pass, 203, F+P+Zw

" 3rd " , 194, "

" 4th " , 198, F+P

" 5th " , 218, "

" 6th " , 199, "

" last " , 190, "

Fig. 1 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—P.R.B.=6.7 cm/min

Fig. 2 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—P.R.B.=8.5 cm/min

Fig. 3 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—P.R.B.=12.5 cm/min

Fig. 4 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—P.R.B.=16.7 cm/min

Fig. 5 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—P.R.B.=21.1 cm/min

Fig. 6 Cooling curves of heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) in single-V-groove butt joint

Remarks:—Max. temp. measured by thermocouple, in case of 3 passes, 1355°C

4 " , 1350
6 " , 1110
7 " , 1025
9 " , 1150

Fig. 7 Effect of number of passes on the cooling curve (from A3 point) of the heat-affected zone (neighbourhood of fusion line) by 1st pass

置いた状態で

は、Fig. 8 の如

くウィッカース

硬度287を示し、

顕微鏡組織はマ

ルテンサイトを

50%以上含んで

いる。しかし第

2層を熔着する

ことによって再

加熱を受け、顕

微鏡組織は(F

+P+Zw)となり、

硬度は急減

Fig. 8 Effect of subsequent passes on the maximum hardness of heat-affected zone in the neighbourhood of the first pass in single-V-groove butt joint

(1) 1st pass only, Hv=287, F(2%)+Zw (40%)+M
(2) After 2nd pass, Hv=203, F+P+Zw

(3) After 3rd pass, Hv=194, F+P+Zw
(4) After last pass, Hv=190, F+P

Photo. 1 Softening effects of subsequent passes on the microstructure of heat-affected zone in the neighbourhood of the first pass in single-V-groove butt joint

Remarks:—

- (a) Microstructure in the heat-affected zone of which hardness was the maximum after the first pass
- (b) $\times 400$, etched with 5% Nital

する。さらに第4層以後の熔接によって(F+P)の顕微鏡組織となり、硬度は僅か低下する。Photo. 1はこの場合の顕微鏡組織の推移を示している。Fig. 9はV型接手熔接を行った場合、最終パス附近変質部の最高硬度と、鋼板単位厚さ(1cm)当りのパス数との関係を示す。単位厚さ当りのパス数が増加すると、すなわち高いビード進行速度で熔接を行うと、V型接手試片でも変質部硬度はかなり上昇する。この場合の変質部最高硬度は、Fig. 2~6の断面図中に示した如く、殆んど最終パスの変質部にあらわれ、ルートパス附近変質部の硬度は、母材より幾分高い値を示すに過ぎない。なお Fig. 2~6の冷却曲線の傍に、変質部最高硬度と、その部分の顕微鏡組織成分およびその量的割合を記した。Photo. 2は最終パス附近変質部硬度に相当する部分の、顕微鏡組織を示している。

(2) T型接手

a) 冷却曲線

Fig. 10にはT型接手試験片を片側隅肉熔接した場合の、融合および変質部附近の冷却曲線を示した。横座標

としては、 A_3 変態点からの冷却時間がとっている。同図中に点線で示した冷却曲線は、被覆熔接棒を用い板厚16mm鋼板の中央部に、シングルビードを置いた場合の冷却曲線である。これによるとT型接手の融合および変質部附近冷却曲線は、これと等しいビード進行速度で熔着したシングルビードの場合の冷却曲線より、幾分短時間側に位置してい

Fig. 9 Effect of number of passes per unit thickness on the maximum hardness of heat-affected zone in the neighbourhood of the last pass in single-V-groove butt joint

(1) Number of passes=6, Hv=240, F(2%)+P(3%)+Zw
(2) Number of passes=9, Hv=280, Zw(35%)+M

Photo. 2 Effects of number of passes on the microstructure of heat-affected zone in the neighbourhood of the last pass in single-V-groove butt joint, $\times 400$, etched with 5% Nital

る。すなわちT型隅肉熔接では、シングルビードの場合より冷却が速かに起る傾向である。

Fig. 11はT型接手試験片に片側隅肉熔接を行い冷却曲線を描かせ、次に反対側を隅肉熔接した場合、最初の隅肉熔接融合および変質部附近が受ける再加熱履歴を描かせたものである。図によると、比較的低いビード進行速度で熔接された場合ほぼ 280°C 、高速度の場合ほぼ 200°C に再加熱された。

Remarks:—

- (a) Fillet welded on one side of T joint
 (b) Max. temp. measured by thermocouple, in case of

P.R.B.=6.5cm/min,	960°C
9.3	, 1480
13.5	, 1100
17.0	, 1000
20.3	, 1350

Fig. 10 Effect of proceeding rate of bead on the cooling curve of heat-affected zone in closed T joint

b) 熔接変質部の最高硬度および顕微鏡組織

T型隅肉熔接した場合の変質部の最高硬度、顕微鏡組織成分およびその量的割合を、Fig. 11 の冷却曲線の傍に附記した。また Photo. 3 には代表的な顕微鏡組織を示した。Fig. 11 の両曲線の右端に附記した顕微鏡組織の量的割合および最高硬度は、第2隅肉をにおいて再加熱を受けた後の、第1隅肉熔接側の変質部最高硬度および組織である。Fig. 10 の片側隅肉熔接した場合の最高硬度および顕微鏡組織の関係を、Fig. 11 のほぼ等しいビード進行速度で熔接した試片の場合と比較すると、低速度隅肉熔接の場

Fig. 11 Effect of the second pass deposition on the first pass cooling curve of heat-affected zone in closed T joint

Photo. 3 Effect of proceeding rate of bead on the microstructure of heat-affected zone in closed T joint, $\times 400$, etched with 5% Nital

合には、顕微鏡組織および最高硬度は殆んど変わっていない。(硬度はむしろ実験誤差の範囲で増加している。) 熔接ビード進行速度が大で変質部の硬度が大きい場合には、顕微鏡組織の変化は認め難いが、最高硬度は幾分か低下しており、焼戻が行われたことを示している。

4. 実験結果の考察

V型接手の場合、Fig. 1 の如く最高温度が A_3 変態点を越えた場合には、 A_3 変態点からの冷却曲線は最高温度に関係なく、ほぼ同じ経過をとる。これは融合および変質部附近における熱放散の状況が、接手形状によって一定するからであろう。

V型接手開先の全部を熔接した場合には、変質部の最高硬度は殆んど最終ビード近傍の変質部にあり、ルートパス附近変質部の硬度は母材より僅か高いに過ぎない。

これは引続いて置かれるパスで熱影響を受け、軟化されるためである。しかしT型の両側1隅肉接手の場合には、先に置いたビード変質部につ

いては再加熱が1回であり、短時間でしかも再加熱温度が低かった。従って変質部硬度が高い場合には、反対側の隅肉熔接によって、少しく焼戻されるが、V型接手における如く著しい硬度低下は認められなかった。

Fig. 10 の如く、T型片側隅肉熔接の融合および変質部附近の冷却曲線は、ビード進行速度の等しいシングルビード熔着の場合の冷却曲線より急勾配である。これはT型接手では、熱放散が鋼板の3方向に容易に起るためである。T型接手の融合および変質部附近の冷却曲線と、顕微鏡組織の量的割合ならびに最高硬度との関係を、第2報で報告した熔接変質部の冷却曲線と顕微鏡組織との関係図(第2報 Fig. 9)に記録してみると、変質部組織の割合および最高硬度とも、ほぼ一致することがわかった。しかし最高硬度は前述の組織図に示した値より僅かに低いようである。これは本報のT型隅肉熔接々手では、低水素型の被覆棒を使用したため、水素の影響を受けることが少なかったためと思われる。

V型およびT型隅肉接手の場合の変質部最高硬度の関係を、既報のシングルビード熔接の場合と比較すると、Fig. 12 の如くである。等しい熔接ビード進行速度に対し、低水素型熔接棒 AC. 180A で熔接したT型接手変質部の最高硬度は最も高い。イル

Fig. 12 Effect of the type of welded joint on the maximum hardness in the heat-affected zone

Remarks:—

T joint: welded by coated electrode of low hydrogen type (A.C. 180A)

Single bead (I): welded by coated electrode of ilmenite type (A.C. 140A)

Single bead (II): submerged arc welded by 6/32 inch dia. wire (A.C. 660A)

Single-V-groove butt joint: welded by coated electrode of low hydrogen type (A.C. 180A)

メナイト型熔接棒 AC. 140A²でシングルビード熔着した変質部の最高硬度がこれに次ぎ、V型接手および潜弧熔接による熔着変質部最高硬度は遙かに低い。ただし潜弧熔接に使用した鋼種は他のものと異っている。なおイルメナイト型熔接棒の代わりに低水素型熔接棒を使用すれば、変質部硬度は多少低下するものと想像されるから、被覆棒アーク熔接によるT型接手の場合と、シングルビード熔着の場合との硬度差は Fig. 12 におけるより幾分大きくなるであろう。

5. 総 括

代表的熔接々手と考えられるV型突合接手およびT型隅肉接手をえらび、融合および変質部の冷却曲線、変質部の顕微鏡組織および硬度を調べ、次の結果を得た。

(1) V型接手では、熔接変質部最高硬度の部分は殆んど最終パス附近の変質部内にある。そして最終パスの前に置いた各パス附近の変質部は、その後の熔接によって熱影響を受け軟化される。しかしT型両側1層隅肉熔接では、第1隅肉熔接による変質部最高硬度が高い場合にのみ、第2隅肉熔接による軟化作用が明らかとなり、僅か低下する程度に過ぎない。

(2) T型片側1層隅肉熔接々手の場合、融合変質部附近の冷却曲線と顕微鏡組織との関係は、第2報に報告した熔接変質部の冷却曲線と顕微鏡組織との関係図とよく一致した。しかし硬度は第2報の場合より僅かに低い値を示した。これは第2報ではイルメナイト型熔接棒を使用し、本報では低水素型熔接棒を使用したためと思われる。

(3) 熔接変質部最高硬度が最も高いのはT型接手の場合であり、平らな鋼板上に被覆棒でシングルビードを置いた場合がこれに次ぎ、V型接手および潜弧熔着の場合の変質部最高硬度は、これらに較べて遙かに低い。これらは高張力鋼熔接に際し留意すべき事項である。

本研究は昭和30年度文部省科学研究費交付金による名古屋大学機関研究、「高抗張力鋼の熔接感受性の軽減ならびに熔接亀裂の防止に関する基礎的研究」(文部省課題番号9067)の一部として実施したものである。

なお本実験に当っては、八幡製鉄株式会社より提供された高張力鋼板を試験に供した。同社およびその関係各位に対し深厚なる謝意を表する。

文 献

- 1) 木原, 熔接データブック, (1954), p. 252.