

溶接閉鎖後の延性に優れる YS1275 MPa 級せん断補強筋の開発

Shear Reinforcement Possessing

Both of Over 1 275 MPa Yield Strength and High Ductility After Welding

岩本 隆 IWAMOTO Takashi JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員(課長)
山内 章 YAMAUCHI Akira JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部線材・棒鋼室 主任部員(課長)・工博
坂下 幹雄 SAKASHITA Mikio JFE テクノワイヤ 技術総括部長

要旨

溶接熱影響軟化部への変形集中を防止することを目的として、鋼材の焼もどし軟化抵抗の上昇による溶接時の熱影響部軟化抑制に着目し、溶接熱影響軟化領域の縮小と、最低硬さの向上に優れる高強度剪断補強筋を開発した。溶接時の熱影響による軟化は最高到達温度が 700~750℃のときに最大となり、最軟化部は、溶接時にフェライト単相域最高温度付近に加熱された部分に相当する。Mo, V の添加量増大にともなって、最軟化部の硬さ上昇が認められ、溶接時の軟化抵抗の増大に有効である。最軟化部と母材との硬さの差を 70 以下とすることで溶接後も母材での高延性破断となる。以上の知見に基づき、合金元素添加量の最適化を行った結果、溶接時の熱影響による軟化部の硬度低下を極めて小さく、かつ軟化部幅も狭く制御することが可能となり、溶接後の引張強度、伸びに優れる高強度鋼材を得た。

Abstract:

JFE Steel has developed the high strength shearing reinforcement that reduced the softening induced by heat during welding. The purpose of reducing the softening is to prevent the deformation concentration on the softened area. Softening by the heat effect was the maximum when the steel was heated up to 700-750°C. The most softened area corresponds to the area heated up to the highest temperature where austenite does not exist in the microstructure. Hardness in the heat-affected zone is raised with the increase of the amount of Mo, V. When the difference in Vickers hardness between the most softened area and the base steel is 70 or less, it breaks at the base steel, which has high ductility, even after welding. High strength has been united to excellent ductility by controlling the hardness distribution in the heat-affected zone after welding.

1. はじめに

鉄筋コンクリート中の鉄筋は、構造物の高さ方向の主筋と、これにほぼ直交する、せん断補強筋(フープ筋)とに大別できる。地震などの場合に、柱や梁に発生する曲げ応力によってコンクリートが脆性的にせん断破壊にいたることを防止する役割を、せん断補強筋は担っている。近年、鉄筋コンクリート(RC)構造建築物の高層化にともない、主筋のみでなく、せん断補強筋にも高強度鉄筋を採用する事例が増加しており、高強度棒鋼に対する需要が高まっている¹⁾。

降伏強さ 1 275 MPa 級せん断補強筋は、現在採用されて

いる中で最高強度を有する鋼である。適正な炭素量の鋼の焼入れ・焼もどしにより、焼もどしマルテンサイトを形成することにより高強度を得る。

一方、図 1 に模式図を示すように、せん断補強筋の施工方法は螺旋状に巻き付けたり、先端をフック状にして主筋に配筋する非溶接型と、1 周ずつ溶接閉鎖した輪を順次配置していく溶接閉鎖型の 2 種に大別することができる²⁾。

補強筋の輸送および梁設営の容易さなど、施工性の観点からは、溶接閉鎖型が好んで用いられるが、従来の 490 MPa 級以上の高強度棒鋼に溶接を施すと、溶接熱影響部に軟化部を生じ、溶接継手強度が母材よりも低下し、その軟化部への変形集中による延性低下が問題となる。

本開発は、このような状況に着目し、溶接閉鎖用途へも適用可能な YS1 275 MPa 級せん断補強筋の開発を目的とするものである。

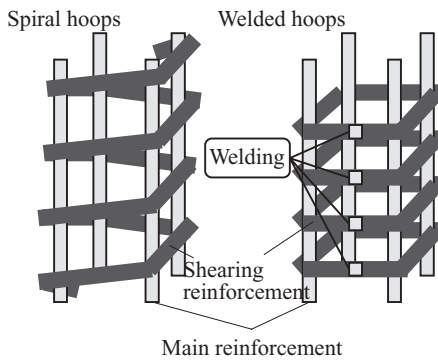


図1 せん断補強筋配置の概念図

Fig.1 Schematic illustration of shear reinforcement arrangement

2. 開発の考え方

溶接閉鎖時の代表的な接合方法として、アップセット溶接があげられる。溶接方法を模式的に図2に、溶接直後およびバリ除去後の外観を写真1にそれぞれ示す。

Mo, Vなどの合金元素を添加しない低合金鋼に焼入れ・焼もどし処理をしてYS1 275 MPa以上を有する異形棒鋼を製造し、これについてアップセット溶接をした際の溶接部近傍の断面マクロ組織を写真2に、圧接面からの距離に応じた硬さ分布を図3に、さらに各部における溶接時の最高到達温度を図4にそれぞれ示す。焼もどしマルテンサイト組織を有する鋼に溶接を行うと、熔融凝固する圧接面とその近傍部分は800℃以上の高温に曝され、加熱中にオーステナイトが生成する。この部分は加熱の終了とともに急速に冷却され、再び硬質相のマルテンサイトが生成して母材部分よりも硬度が高くなる。逆に、圧接面からある程度離れた部分では、溶接時の温度は700℃以下となる。この温度域では焼もどしが母材よりも進行し、逆に母材よりも軟化した領域を形成する。

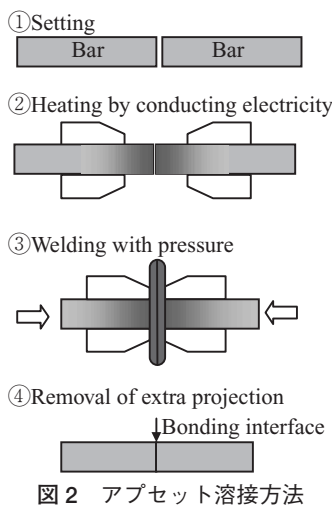


図2 アップセット溶接方法

Fig.2 Schematic image of the process of upset welding

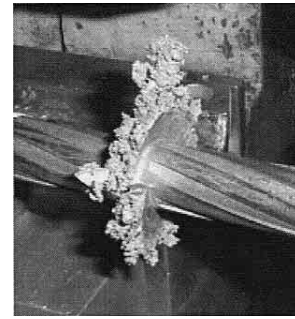


写真1 アップセット溶接後鋼材の外観
Photo 1 Externals of welded bar

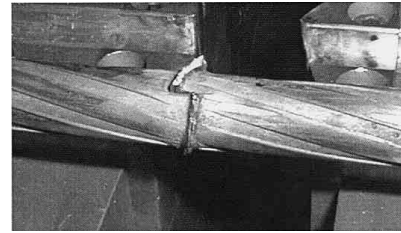


写真2 アップセット溶接後鋼材の断面マクロ組織

Photo 2 Macrostructure of longitudinal section of the steel after upset welding

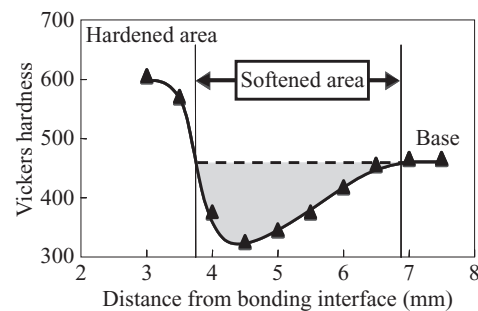


図3 アップセット溶接後の熱影響部硬さプロファイル

Fig.3 Hardness distribution around heat affected zone after upset welding in low-alloyed steel

このような硬度分布を有する低合金鋼に引張応力を掛けた場合には、軟化部に变形が集中し、母材よりも強度、延性が著しく低下して、所定の強度特性が得られなくなる。

この問題への対策として、継手の最大径を母材径の1.4倍以上にして、軟化部の直径を母材よりも太くすることにより、継手強度の低下を断面積の増加で補う処置も施されてきた。しかしながら、この対策では、溶接継手部にコブ状の太径部分を有する形状となる。建築基準法および鉄筋

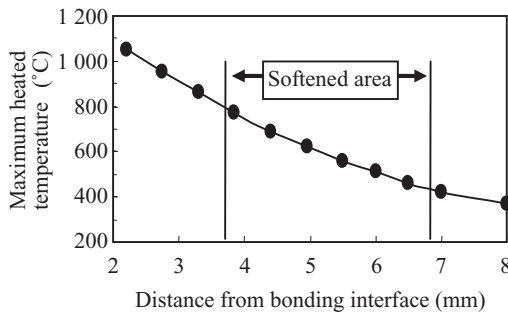


図4 アプセット溶接時の各部の最高到達温度

Fig. 4 The maximum heated temperature of each part during upset welding

コンクリート構造計算基準などには所定のコンクリートかぶり厚さ^{3,4)}が規定されている。前述のコブを有する形状においては、所定のコンクリートかぶり厚さを確保するためにコンクリート全体の厚さが増して、柱、梁の体積が増大するなどの問題を生じる。

本開発においては、コブのない優れた溶接継手部形状を保った上で、溶接熱影響軟化部への変形の集中を防止することを目的とし、鋼材溶接時の熱影響部軟化抑制に着目した。すなわち、鋼材の焼もどし軟化抵抗の上昇による、溶接熱影響軟化領域の縮小と、最低硬さの向上を本開発における最大の注目点とした。

3. 実験方法

3.1 供試鋼

焼もどし軟化抵抗に及ぼす合金元素の影響を調査する目的で用いた供試鋼の主要化学組成を表1に示す。0.28mass% C 鋼に Si, Mn および Nb を添加した鋼をベース組成として、Cr, Mo, V の添加量を変化させ、特性に及ぼすこれら元素の影響を調査した。これら供試鋼は 30 kg の真空鋼塊にて溶製し、2 ヒートの熱間圧延にて厚さ 14 mm の板を得、特性評価素材とした。この素材を切削加工によりφ12 mm の円柱状とし、これに 930°C 加熱の高周波焼入れを施した後、各鋼ごとに焼もどし温度を調整し、引張強さを 1 450 MPa とした。

3.2 軟化抵抗の測定

焼入れ・焼もどし鋼における溶接後の軟化は、熱影響部の高温焼もどしによるものと考えられる。溶接時の熱履歴を再現することを目的として、熱処理シミュレータを用い

表1 供試鋼化学組成検討範囲

Table 1 The chemical composition of steel examined

(mass%)				
C	Cr	Mo	V	Others
0.28	0.70-1.20	0.10-0.45	0.01-0.25	Si, Mn, Nb

た再加熱試験を実施した。前述の高周波焼入れ・焼もどし後の素材からφ3 mm、長さ 8 mm の試験片を切削加工し、熱処理シミュレータ（富士電波(株)製フォーマスタ）を用いて 700~850°C での保持を実施し、その後の硬さを調べた。

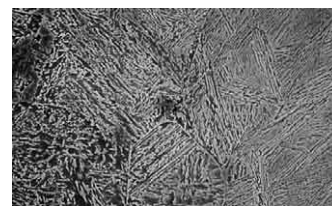
3.3 溶接後軟化状況と、低延性破断の関係の調査

供試鋼の何種かについて同一組成を 100 kg 鋼塊に溶製し、150 mm 角の素材圧延の後、線材圧延にてφ14 mm の線材を得、実機にて伸線から高周波焼入れ・焼もどしを経て評価素材を得た。これを用いて実際にアプセット溶接を行い、その後の引張試験における低延性破断の有無と、溶接部近傍の硬さ分布を整理した。

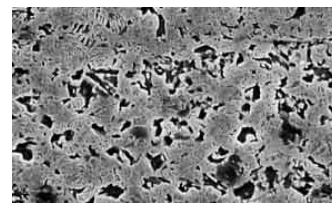
4. 実験結果

4.1 溶接熱サイクル試験における軟化挙動

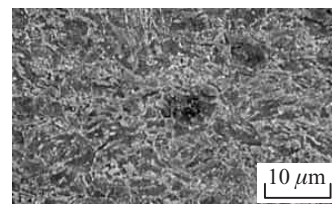
溶接再現試験後のマイクロ組織の一例を写真3に、硬さを図5にそれぞれ示す。低温側では焼もどし温度の上昇とともに硬さの低下が認められたが、組織中に2相域加熱後の急冷により生成したマルテンサイトの存在が微量でも認められると、硬さは上昇した。合金添加量により異なるものの、最も硬さが低下した焼もどし温度は 700~750°C であった。最軟化部は、溶接時にフェライト域最高温度付近に加熱された部分に相当すると考えられる。



Heated up to 800°C Hv 606



Heated up to 750°C Hv 568



Heated up to 700°C Hv 400

写真3 0.28mass% C-0.7mass% Cr-0.1mass% V-0.35mass% Mo 鋼の溶接再現試験後のマイクロ組織

Photo 3 Microstructure after reproduction test of welding using 0.28mass% C-0.7mass% Cr-0.1mass% V-0.35mass% Mo steel

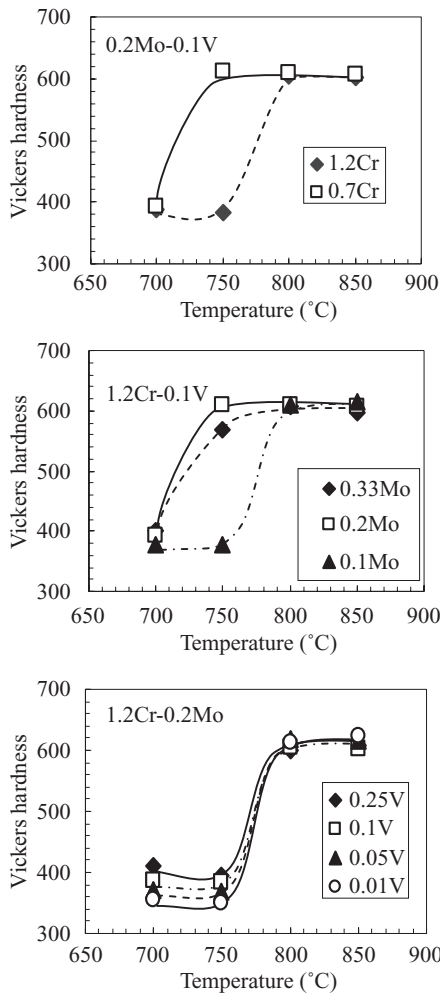


図5 溶接再現試験後の硬さに及ぼす保持温度の影響

Fig.5 Effect of temperature on the hardness of the steel after reproduction test of welding

図5の結果から、溶接再現試験後の最軟化部の硬さに及ぼす合金元素の影響を整理したものを図6に示す。Mo, Vの添加量増大にともなって、最軟化部の硬さ上昇が認められ、これらの元素の添加が溶接軟化抵抗の増大に有効であることが判明した。

4.2 溶接後軟化状況と、低延性破断の関係

図7に、溶接軟化部破断の発生に及ぼす硬さプロファイルの影響を示す。母材よりも硬度の低下した部分を軟化部と定義し、その幅を横軸に、また、最軟化部の硬さと母材硬さとの差を縦軸に、各鋼に関してプロットした。母材高延性破断を示したものを「○」、熱影響部低延性破断を示したものを「×」でそれぞれプロットした。最軟化部と母材との硬さの差を70以下とすることで溶接後も母材での高延性破断となる。

降伏強さ1275 MPa級（引張強さ1420 MPa）に相当する母材のビッカース硬さは約450であり、これらの結果から、高温焼もどし時の最軟化硬さは380以上必要であることが分かる。

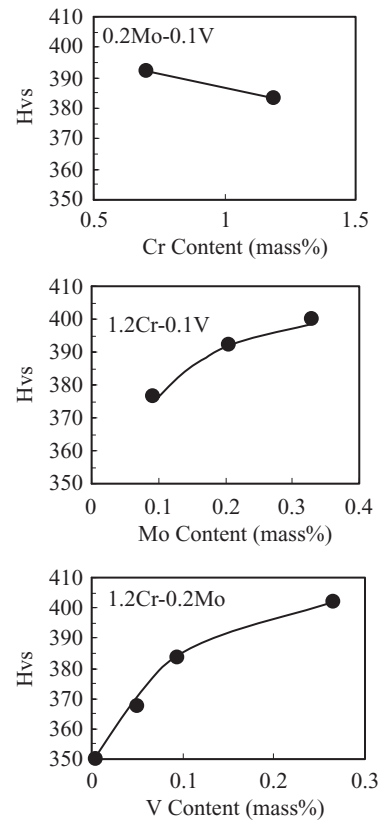


図6 最軟化部硬さ (Hvs) に及ぼす各添加元素の影響

Fig.6 Effect of alloy elements on the Vickers hardness at the most softened area (Hvs)

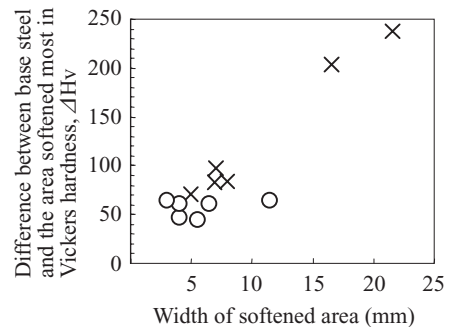


図7 溶接後の引張時溶接軟化部破断の発生と軟化量および軟化部幅との関係

Fig.7 Effect of the amount of softening and the width of softened area on the occurrence of breaking in softened area

5. 開発鋼の特徴

前章までの知見に基づき、高強度棒鋼の課題であった溶接部軟化の抑制に取り組み、軟化抵抗と溶接継手部形状が極めて優れた1275 MPa級の高強度棒鋼、溶接閉鎖型せん断補強筋「リバーボン（商標登録第1400177号）」YS1275 MPa級を開発・商品化した。開発鋼は、Mo, Vなどの適切な合金元素を選択し添加量を最適化することにより、溶接熱影響に起因する軟化を抑制することに成功した。

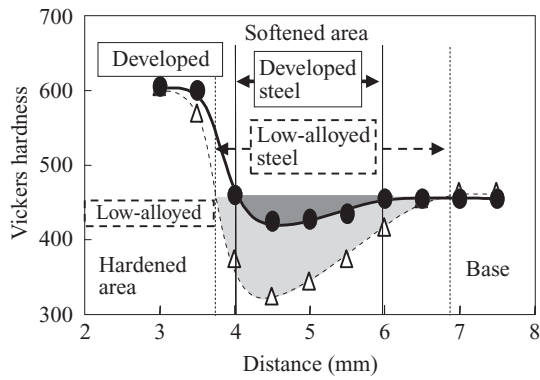


図8 開発鋼アプセット溶接後の熱影響部硬さプロファイル
Fig.8 Hardness distribution around heat affected zone after upset welding of developed steel and low-alloyed one

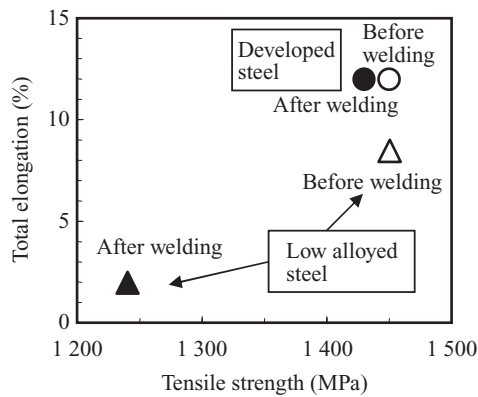


図9 溶接前後の引張試験における強度 - 伸びバランス
Fig.9 Tensile property balance in the steel before and after welding

図8に、開発鋼および前出の低合金鋼における、溶接後の熱影響部硬さ分布を示す。開発鋼は、軟化部における硬度の低下量が極めて小さく、また軟化部の幅も狭いという特徴を有していた。図9に、開発鋼および低合金鋼を用いて製造した高強度剪断補強筋の溶接前後の強度 - 伸びバランスを示す。前述の熱影響部硬度分布の影響を受けて、開発鋼を用いた高強度剪断補強筋は前述のような継手の最大径を大きくするといった対策をせずとも、優れた強度 - 延性バランスを達成している。

開発鋼を用いた施工例を写真4に示す。開発鋼は溶接継手部径を母材とほぼ同径にできるため、特にRC構造においてその効果を発揮する。例えば、コブのない優れた溶接継手部形状により、建築基準法施行令に定める所定のコンクリートかぶり厚さの確保が容易になり、柱、梁断面をコンパクトにできるなどのメリットを得ることが可能となる。

6. おわりに

コンクリート構造建築の高層化に応じてコンクリートが高強度になるほど、脆性的な破壊を防ぐためには、より高

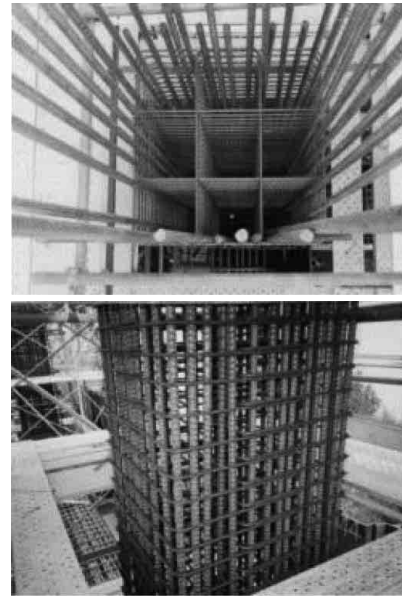


写真4 開発鋼を用いた施工例

Photo 4 Examples of constructions using developed steel

強度のせん断補強筋との組み合わせが有効となる。一方で剪断補強筋の強度が上昇するほど溶接時の熱影響軟化にとりもなう低延性破断が問題となる。この問題を解決することを目的に、熱影響部軟化に及ぼす Mo, V など合金元素およびその添加量の影響を調査した。結果に基づく成分設計により、溶接時の熱影響による軟化部の硬度低下を極めて小さく、かつ軟化部幅も狭く制御することが可能となり、溶接後の引張強度、伸びに優れた高強度鋼材の開発に成功した。当社では今後も、コンクリートの高強度化にマッチした高強度せん断補強筋の検討、開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 柴田正隆, 中澤淳, 白石環, 山本昇, 小阪清, 志賀勝利, 川崎製鉄技報, 1991, vol. 23, no. 2, p. 112.
- 2) 真田暁子, 丸田誠, 鹿島技術研究所年報, 2003, vol. 51, p. 63.
- 3) 建築基準法施行令第79条.
- 4) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 日本建築学会編, 2001.



岩本 隆



山内 章



坂下 幹雄