

建築物の高強度化に貢献する 省資源型 YS785MPa 級せん断補強筋の開発

Development of Low Alloy Type YS785 MPa Class Shearing Reinforcement that Contributes to Making of High Strength Building

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

高い強度と延性の両立を要求される YS785 MPa 級せん断補強筋の合金元素添加量の低減を目的として、合金組成の適正化と、製造プロセスおよび製品形状の最適化を行った。Mo 添加は特性バランス向上への寄与は大きいものの、V を始めとする他元素の効果を複合利用することで、Mo の添加をとまなうことなく目標特性を達成可能である。しかしながら、低合金化にともなう、より精度の高い冷却停止温度をはじめとする冷却制御が必要となる。熱間圧延後の冷却条件が鋼材温度履歴に及ぼす影響を明確にし、衝風冷却停止時の鋼材温度を全長にわたって測定することにより高精度な冷却速度、冷却停止温度制御を可能とし、低合金鋼でも安定的に目標特性を達成する操業技術を確認した。以上の知見に基づき、合金元素添加量および製造プロセスの最適化を行った結果、Mo を添加せずとも溶接後の引張強度、伸びに優れる高強度鋼材を得た。

Abstract:

The alloy composition, the manufacturing process, and the product shape were optimized in order to decrease the amount of the alloy element of the YS785 MPa class shearing reinforcement. Although the contribution of the Mo addition to the improvement of property balance was large, the target property was achieved without the addition of Mo by using the other alloy elements such as V. However, the lower alloy has been proved to need the stricter control of cooling process. A highly accurate cooling speed and the cooling stop temperature control was achieved by controlling the velocity of blast air and the amount of air blast cooling time after hot rolling. High strength has been united to excellent ductility by controlling the chemical composition and process condition.

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。せん断補強筋は主筋の曲げを拘束することで構造物の大変形を防ぐ役割も担っている。近年、都市部を中心とする住環境の変化などを背景に、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、せん断補強筋に高強度鉄筋を採用するケースが増えており、高強度棒鋼に対する需要が高まっている。コンクリート強度が高強度化するほどひび割れが分散せず、部材が脆性的なせん断破壊を起こすことが知られている。脆性的な

破壊を防ぐためには、コンクリートが高強度になるほど、より高強度のせん断補強筋との組み合わせが有効となる¹⁾。降伏強さ 490 MPa を超える高強度溶接閉鎖型せん断補強筋は、このようなニーズの高まりの中で使用量が増加している鋼材である。

一方、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したりする非溶接型と、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大きく 2 種に分けることができる。

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 を超える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するという現象が現れる。このため、その軟化部への変形集中による、延性低下が問題となる。これらの鋼材は、突き合わ

2008 年 11 月 4 日受付

せ溶接後も YS785 MPa, TS930 MPa, 伸び 5% 以上の高い強度 - 延性バランスを達成することを要求される。

JFE スチールおよび JFE テクノワイヤではこれら需要と課題を鑑みて、焼入れ・焼もどしの工程を経て YS 1275 MPa 級の高強度を達成する高強度せん断補強筋²⁾に加え、熱間圧延のまま YS785 MPa を達成する高強度せん断補強筋を開発した。

JFE スチールグループの YS785 MPa 級せん断補強筋用鋼材は熱間線材圧延にて、直径 10~16 mm の異形または丸棒に成形後、衝風冷却を用いて、ベイナイト主体のマイクロ組織を非調質で得る。従来 JFE スチールグループでは鋼材への Mo 添加によりこれらの特性を安定的に達成する鋼材を製造してきた。しかしながら近年、レアメタルと呼ばれる合金原料、中でも Mo は、世界的な経済発展にともなう急激な需要の増加に対して供給量が少ないために急激な価格の高騰が起こっている³⁾。このような状況の下、より安定的な使用が可能な合金組成への変更が求められた。

本報では、上記背景および課題をふまえて開発した当該鋼材について報告する。

2. 技術概要

2.1 適正化学組成の検討

2.1.1 圧延ままの引張特性

従来本用途に適用する鋼材は、0.19C-Mo 添加鋼を制御冷却によりベイナイト組織とすることで YS785 MPa 以上の高強度を達成することを特徴の一つとしていた。

Mo の添加なしを目標として、代替元素添加鋼の制御冷却による特性達成の可能性を明確にする目的で、各特性に及ぼす種々元素の影響を調査した。本供試鋼の主要化学組成を表 1 に示す。0.19mass% C 鋼をベース組成として、Cr, Si, Mn, Mo, V, B の添加量を変化させて、特性に及ぼすこれら元素の影響を調査した。これらの供試鋼は 100 kg の真空鋼塊にて溶製し、2 ヒートの熱間圧延にて厚さ 20 mm の板を得て評価素材とした。この素材を切削加工により直径 13 mm × 300 mm 長さの丸棒とし、これを 900℃ に加熱後、衝風冷却して特性調査用鋼材を得た。

供試鋼の引張特性に及ぼす合金元素の影響を図 1 に示す。図中には、ベース鋼に対してそれぞれ 0.1% の合金元素を添加した場合の降伏強さ (YS) および全伸び (EI) の特性変化を示す。各合金元素の添加により、YS はいずれも増加

の傾向が認められた。Mo の添加は、Cr, Mn, Si に比べて、YS 上昇量に対する EI 低下量が小さく、特性バランス保持に有利である。V 添加量増大にともなう YS の著しい変化は認められなかったものの、EI はわずかに上昇する傾向が認められた。

供試鋼の中で最も安定的にベイナイト組織を達成した 0.7% Mo 添加鋼、およびそれとほぼ同等の強度を示した 0.15mass% V 添加鋼のマイクロ組織を写真 1 に示す。Mo 添加材はほぼ全面がベイナイト組織を呈しており、明確なフェライトの生成は認められなかった。これに対して、同一の冷却条件における 0.15mass% V 添加材ではベイナイト中にフェライトが混在する。このフェライト部分の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察結果を写真 1(c) に示す。フェライト中には V 系の微細炭化物の存在が認められた。

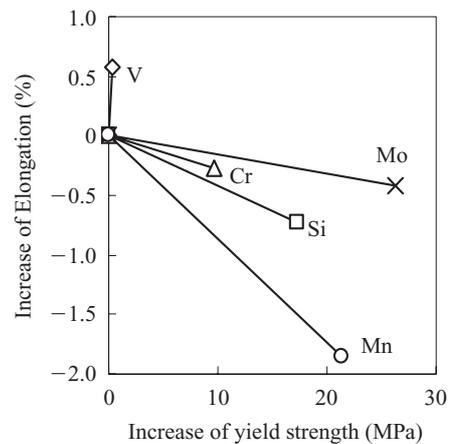


図 1 各種合金元素を 0.1mass% 添加した場合の特性変化
Fig.1 Tensile property change with the addition of 0.1 mass% alloy elements

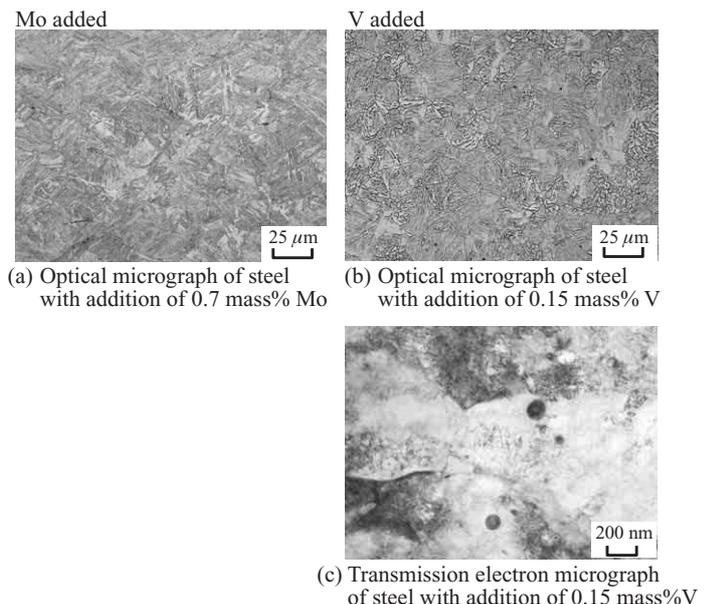


写真 1 衝風冷却後のマイクロ組織

Photo 1 Microstructure of the steel after air blast cooling

表 1 供試鋼の化学組成

Table 1 The chemical composition of steel examined

(mass%)						
C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Others
0.19	0.20–0.50	1.20–1.80	0.60–1.00	0.01–0.30	0.01–0.70	B, Nb

0.15mass%Vの添加により、フェライト生成の促進と、V系炭化物析出による強化が同時に起こり、効果の相殺により強度の変化が小さかったものと考えられる。

2.1.2 溶接後引張特性

溶接後に高強度と高延性を両立させるためには、溶接時の熱影響軟化により、軟化部への変形が集中することの抑制が重要となる。鋼材の溶接時の熱影響部軟化特性を調査する目的で、実際の溶接時の鋼材表面温度を測定した結果から、各部の熱履歴を整理したものを図2に示す。

同溶接において最も軟化が進行したのは、接合面から15 mm程度の部位であった。

これらの熱履歴を実験的に再現することを目的として、前節で得た直径13 mm棒鋼制御冷却実験材より、直径3 mm×長さ8 mmの試験片を切削加工により作成した。この試験片について、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5~20 mm部相当の熱履歴を再現し、各鋼について最も軟化した際の硬さを最軟化硬さとして求め、溶接前後の軟化特性を評価した。溶接相当熱履歴を付与した時の軟化量に及ぼす各合金元素の影響を図3に示す。

Mo, Vなどの元素は、添加量の増大にともなって、溶接前硬さ、溶接後硬さともに上昇し、軟化量は低下する傾向が認められた。中でもVの添加により、溶接熱履歴にともなう軟化は著しく抑制された。一方でB添加については、

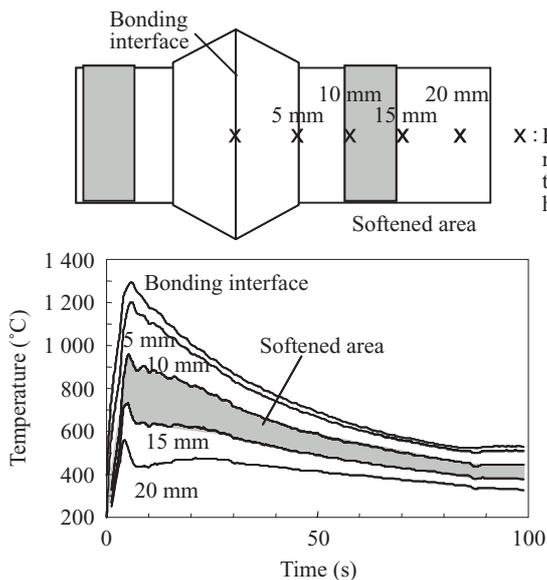
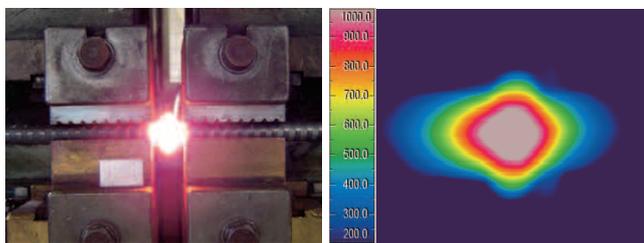


図2 剪断補強筋の溶接中の熱履歴

Fig.2 Heat cycle during welding of shear reinforcement

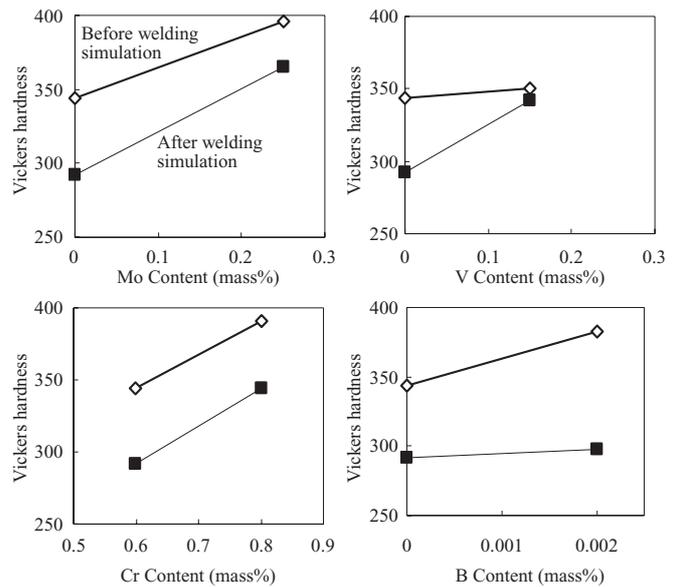


図3 溶接再現熱処理前後の硬さに及ぼす合金元素の影響

Fig.3 Effect of alloying elements on the hardness of the steel before and after the welding heat treatment simulation

溶接前硬さは上昇が認められたものの、溶接後最軟化部硬さには明瞭な上昇が認められず、溶接熱履歴にともなう軟化量は添加によって増大する傾向が認められた。

熱間圧延した状態のまま非調質で高強度を得る手段としてB添加を活用する例は多く存在するが、本用途のような溶接を前提とする用途には、Bを添加しない組成系の活用が特性バランスの面で有利であると判断した。

以上の検討による合金元素の影響に関する知見に基づき、Mo添加の特性バランス向上への寄与は大きいものの、Vを始めとする他元素の効果を複合利用することで、必ずしもMoの添加をとまなうことなく目標特性を達成し得ることが明確になった。

2.2 制御冷却

当該高強度せん断補強筋の製造にあたっては、熱間圧延後、らせん状に巻き取った異形線材をステルモ冷却床⁴⁾上をコンベア搬送しながら、衝風を用いた制御冷却を行う。制御因子の例として、ステルモ上の衝風圧と冷却時間が、

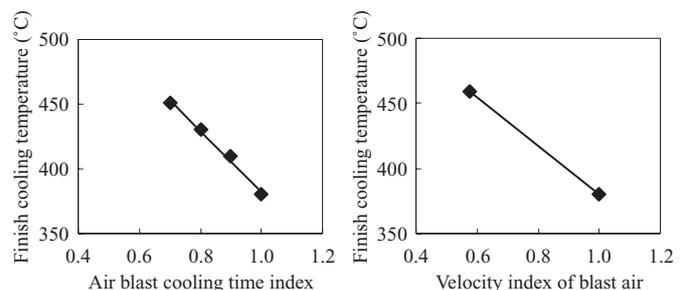


図4 冷却終了温度に及ぼす冷却時間および衝風速度の影響

Fig.4 Effect of cooling time and velocity of blast air on the finish cooling temperature

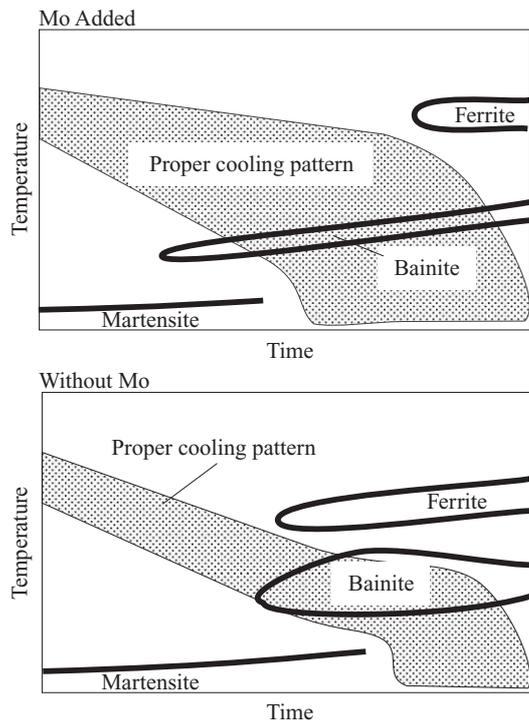


図5 Mo 添加鋼および非添加鋼の連続冷却変態曲線例
Fig.5 Continuous cooling transformation diagrams of steels with or without Mo adding

冷却停止時の鋼材温度に及ぼす影響を図4に示す。図中には、衝風冷却時間および衝風の風速に関して、それぞれ最大値を1.0とする指数を用いて示した。

衝風による加速冷却により高温域でのフェライト-パーライト変態を抑制し、適切な温度で加速冷却を停止することでベイナイト変態の促進を図ることを指針とするマイクロ組織制御を行っている。さらに、衝風冷却停止時の鋼材温度を全長にわたって測定することにより高精度な冷却速度、冷却停止温度制御を可能とした。

図5に、0.7mass%Mo鋼と、Mo無添加鋼の連続冷却変態曲線の例を示す。0.7mass%Mo鋼では、Mo添加の影響で、高温域でのフェライト生成が低冷速側まで抑制され、幅広い冷却速度範囲においてベイナイト変態が安定的に得られる。これに対してMo添加をしない組成系においては、限られた冷却速度範囲においてのみ、ベイナイト変態を得られる。

JFEスチールでは前述の冷却制御技術に基づき、Moの多量添加をしなくても、安定的にベイナイト変態を実現するステルモア操作条件を確立した。

2.3 コンクリート付着強度と曲げ延性バランスに優れる4条リブ

鉄筋コンクリート構造の強度確保のために、鋼材の強度とともに、鋼材とコンクリートとの付着強度が重要となる。付着強度は主に鉄筋用鋼材の異形状により決定する。鉄筋コンクリート用棒鋼には、付着強度上昇を目的とした、

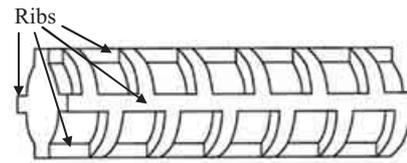


図6 開発した剪断補強筋の形状
Fig.6 Shape of developed shear reinforcement

節を有する形状が多く用いられ、YS235 MPa~YS490 MPaクラスについては、各強度クラスごとの機械的性質とともに、鋼材直径ごとに節の間隔、高さなどの形状がJIS G 3112に規定されている⁵⁾。

一方で、このような異形状の付与によるコンクリート付着強度の上昇と、曲げ加工時の耐折損性とは基本的に相反するものであり、鋼材の強度上昇とともに、両特性の両立はさらに困難となる。

このような問題に対応して、当社では前述の組成、冷却制御による鋼材の強度-延性バランスの向上に加え、4ロール式の仕上げ圧延機を活用して、高強度剪断補強筋の異形状を図6に示すような縦方向に連続した凸部（以下、リブ）を円周方向に4本配置する、4条リブ形状とした。従来一般的に用いられてきた、リブを180°間隔で2条で配置した場合、2本のリブを曲げ方向に対して左右に配した場合と、上下に配した場合とで、耐折損性に大きな差が生じる。リブを90°間隔の4条とすることで、曲げる角度に起因する耐折損性のバラツキを大幅に軽減し、安定的に優れた耐折損性を実現した。

3. 開発鋼の特性

3.1 主要特性

3.1.1 引張特性

Moを添加しない開発鋼の圧延まま、および溶接後の引張特性を、Mo添加鋼の特性と合わせて図7に示す。開発鋼はMoを添加せずとも、従来のMo添加鋼と同等以上の圧延ままおよび溶接後における引張特性を示した。

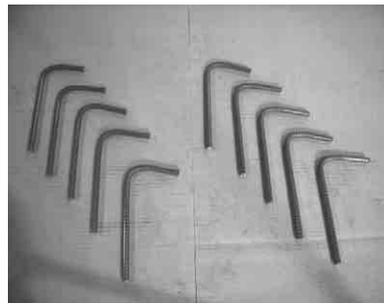
3.1.2 曲げ加工性

開発鋼を、常温(20℃)および-20℃で、それぞれ直径の3倍の曲率半径で180°曲げた後、90°まで曲げ戻す試験を実施した後の外観を写真2に示す。いずれの試験片においても、折損や亀裂は認められず、良好な曲げ加工性を示した。

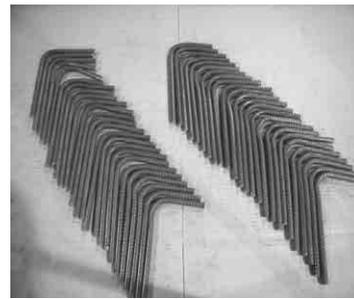
3.2 適用例

上記の検討に基づき開発したYS785 MPa級高強度せん断補強筋「リバーボン785」を用いた建築施工例の外観を写真3に示す。

JFEスチールでは、高強度せん断補強筋「リバーボン



Bent at room temperature



Bent at -20°C

写真 2 開発鋼の 180° 曲げ後 90° 曲げ戻し試験結果

Photo 2 Bending test results of developed steel The steel bar was bent back 90° after it was bent 180°

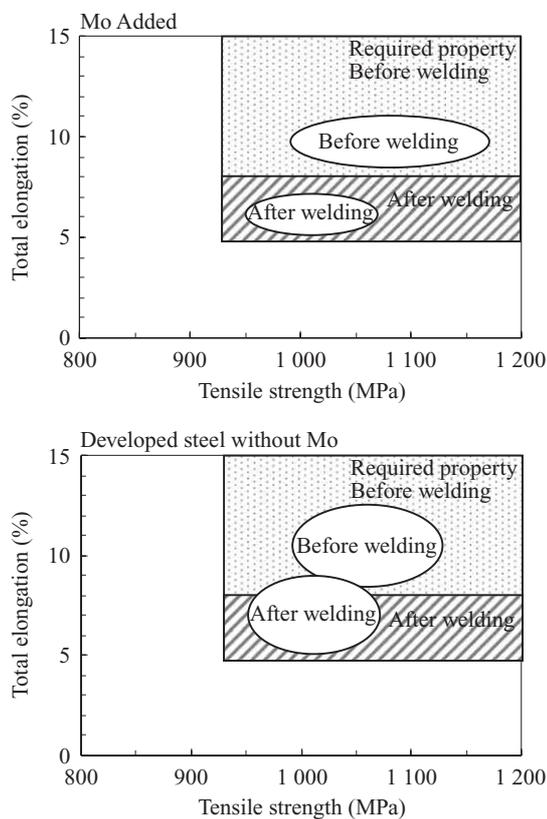


図 7 開発鋼の引張特性

Fig.7 Tensile properties of developed steel

785], 「リバーボン 1275」の 2 種類の降伏耐力をもつ製品を開発し, JFE テクノワイヤではそれぞれの特長を生かすことによって多種多様な設計施工に対応可能としている。高強度コンクリートに適した高強度せん断補強筋「リバーボン 785」および「リバーボン 1275」は, いずれも国土交通大臣の材料認定⁷⁾を取得しており, その降伏耐力はそれぞれ 785 N/mm², 1275 N/mm²である。また, 設計施工方法については(財)日本建築センターの評定⁸⁾を取得しており, コンクリートの適用範囲は 21~60 N/mm²までである。また加工形状も用途に応じてスパイラル形, フック付形, 溶接閉鎖形と, さまざまな形に対応可能となっている。(財)日本建築センターの評定を取得している設計施工

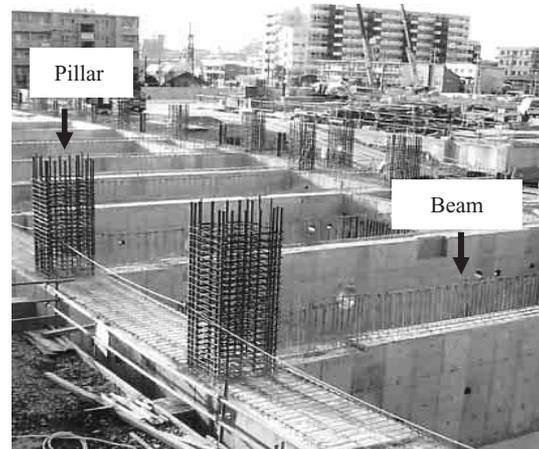


写真 3 開発鋼を用いた高層マンション建築の様子

Photo 3 The multistory apartment house construction situation in which the development steel is used

指針では, 「リバーボン 785」は塑性理論式¹⁾を提案して, 安全性を確認している。高強度コンクリート使用時にその優位性を如何なく発揮することが可能となり, 中高層から超高層の鉄筋コンクリート造建物まで幅広く適用できるようになった。

4. おわりに

YS785 MPa 級せん断補強筋に関して, Mo 添加量を低減することを目的に種々検討を行い, 以下の知見を得た。

- (1) Mo 添加は特性バランス向上への寄与は大きいものの, V を始めとする他元素の効果を複合利用することで, Mo の添加をとまなうことなく目標特性を達成可能である。
- (2) 低合金化にともない, より精度の高い冷却停止温度をはじめとする冷却制御が必要となるが, 熱間圧延後の冷却条件が鋼材温度履歴に及ぼす影響を明確にし, 高精度な冷却速度, 冷却停止温度制御を可能とした。
- (3) 上記知見を活用して従来 Mo 添加を前提としていた当該用途において, 必ずしも Mo を添加せずとも必要特性を達成しうることを明確にした。

コンクリート強度が高強度化するほどひび割れが分散せず、部材が脆性的なせん断破壊を起こすことが知られている。脆性的な破壊を防ぐためには、コンクリートが高強度になるほど、より高強度のせん断補強筋との組み合わせが有効となる⁶⁾。JFE スチールならびに JFE テクノワイヤは今後も、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。

- 6) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説. 6.3 柱および梁のせん断強度. 1990-11, p. 106-121.
- 7) 国土交通大臣材料認定, 認定番号 MSRB-9007.
- 8) (財) 日本建築センター評定. BCJ-C2027 (変1).

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. 112-118.
- 2) 岩本隆, 山内章, 坂下幹雄. JFE 技報. 2009, no. 23, p. 36-40.
- 3) 中村繁夫著. レアメタル資源争奪戦. 日刊工業新聞社. 2007年8月25日初版, 第4刷発行.
- 4) 花田義幸, 上野清博, 野田昭雄, 金堂秀範, 坂本俊夫, 峰公雄. 川崎製鉄技報. 1986, vol. 18, no. 1, p. 62-68.
- 5) JIS ハンドブック. 鉄鋼 II.



岩本 隆



山内 章



坂下 幹雄