水圧鉄管(ペンストック)用高靱性 HT980 厚鋼板の開発

岡口 秀治¹⁾ 有持 和茂²⁾ 渡辺 望^{**}
岡田 齋^{***} 堀川 浩甫^{****}

1. はじめに

近年鋼構造物の大型化に伴い、鋼材の厚肉化が急速に進む反面で、施工費、運搬費、工期低減の面から鋼材の高張力化による板厚の低減が図られてきた。

揚水発電所用の水圧鉄管についても図1⁽¹⁾に示すように、高落差、大容量化による水頭圧の増大に従い、SM570、HT690 から HT780 へと高強度鋼の適用が進められており、薄肉化、重量軽減による据付工期の短縮、発電所建設コストの削減に寄与してきた。しかしながら、現在では HT780 鋼を使用しても管胴部で 80 mm 前後、分岐部では 200 mm クラスの板厚が必要となってきた⁽²⁾。今後、揚水発電所の高落差化はさらに進み、一層の厚肉化が必要になると予想されることから、これまで約20年にわたり水圧鉄管に使用されてきた HT780 鋼に替わる高強度鋼の実用化が期待されている。

こうした背景より、従来から水圧鉄管用 HT980 鋼の開発が進められていたが、水圧鉄管として要求される広範囲の板厚に対し、母材では高強度化と脆性亀裂の伝播停止性能の両立、溶接部では脆性亀裂の発生防止性能と高湿環境下における高い溶接施工性の両立等、その高い要求条件から、実用化には至っていなかった。今回、当社が開発した高靱性 HT980 厚鋼板は高い鋼材特性と溶接施工性を具備し、世界で初めて水圧鉄管に HT980 鋼として使用された。本稿では当該開発鋼の基本設計と諸特性を中心に紹介する。

図1 水圧鉄管との大型化の推移⁽¹⁾。

2. 開発目標

HT980 鋼の開発目標としては、管胴部材料として板厚 100 mm までの鋼板を、分岐部用として最大板厚 200 mm までの厚鋼板とした。

表1に鋼材および溶接継ぎ手の目標性能を示す。鋼材の引張特性は WES3001「溶接構造用高張力鋼板」の HW880 の規定値を目標としたが、極厚材の強度については同規格の適用板厚(≦75 mm)をはるかに超えることから 20 N/mm² 低減した値を目標値とした⁽²⁾。靱性は水圧鉄管の最低使用温度 0℃において脆性亀裂の伝播を停止することを目標とする。溶接部は $vT_s \leq -10^\circ\text{C}$ (管胴材), 0°C (分岐材) で脆性亀裂の発生を抑制しうる靱性を有し、従来鋼である HT780 と同等の溶接施工性を有することを目標とした。

* 住友金属工業株式会社

総合技術研究所：1) 材料研究部主任研究員 2) 研究主幹

** 三菱重工業株式会社神戸造船所鉄構部主務

*** 株式会社栗本鉄工所住吉工場生産技術課長

**** 大阪大学教授；接合科学研究所

Development of HT980 Steel Plates for Penstock; Shuji Okaguchi*, Kazushige Arimochi*, Nozomi Watanabe**, Hitoshi Okada***, Kousuke Horikawa**** (*Sumitomo Metal Industries, Ltd. **Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. ***Kurimoto Ltd. ****Osaka University.)

1998年1月31日受理

表 1 鋼材および溶接継ぎ手の目標性能.

	部 材 板 厚	管胴部材 ~100 mm	分岐部シクル材 150~200 mm
母材の機 械的性質	YS(N/mm ²)	≤882	≥865
	TS(N/mm ²)	950~1127	930~1110
	$vTs(^{\circ}C)$	≤-55	≤-65
	$vET(J)$	≥47(-55 $^{\circ}C$)	≥47(-65 $^{\circ}C$)
溶 接 性	割れ防止予熱 温度($^{\circ}C$)	≤125	≤150
継手の特性	TS(N/mm ²)	≥950	≥930
	vET	47(-10 $^{\circ}C$)	55(0 $^{\circ}C$)

3. 材質設計の基本指針

(1) 母材強靱化技術

強度を高めると同時、水圧鉄管の使用環境下における脆性亀裂伝播停止特性を保証するためにも、高い靱性を付与させる必要がある。開発鋼では広範囲の板厚に対し強靱性を付与させるために、図 2 に示すように、いずれの板厚においても板厚中心部および溶接熱影響部においてマルテンサイトと下部ベイナイトの複合組織になるように、オーステナイトの焼入性を調整した。

また HT980 鋼ではオーステナイトの焼入性が極めて高いため、焼入れ時に厚肉材の表層部が完全マルテンサイト組織化してしまい、靱性劣化が生じてしまうことがある。このため図 3 に示すように、微量 Nb 添加による組織の微細・高靱化を図る⁽³⁾と共に、極厚材ではさらに二段焼入れ処理法を適用し、表層部の細粒化と中心部の焼入れ性の最適化の両立を図ることによって、最大 200 mm までの鋼板に対し、表層から中心部までの均一強靱化を達成した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

(2) 溶接性と溶接部靱性の向上

高強度材では溶接熱影響部において硬化層が生成しやすいため、溶接低温割れの発生と溶接継手靱性の劣化が懸念される。本開発鋼ではいずれの板厚においてもこの問題を解決するために、低 P_{CM} 値化と Nb 等の微量元素の最適化によって溶接低温割れの抑制と溶接継手靱性の向上を図った。また、図 4 は P_{CM} 値から計算した割れ停止予熱温度と実際の割れ停止予熱温度の差と Ni 添加量の関係を示したもののだが、Ni 添加量の増加は予熱温度を低減させる効果が大いことが分かる。この Ni による低温割れ改善効果は変態温度の低下による拘束応力の低下が寄与していると考えられている⁽²⁾。極厚 HT980 鋼の材質設計にはこの Ni の作用を活用することによって、極厚化による溶接部性能の低下を排除した。さらに溶接継手靱性向上に対しては低 Si 化と Ni の活用によって、溶接熱影響部における MA 生成を抑制(炭化物生成を促進)し、高強度化と高継ぎ手靱性の両立を達成させた。

図 2 HT980 鋼の板厚中心部で高靱性を得るための必要 DI.

$$(DI=0.311 \times \sqrt{C} \times (1+0.64Si) \times (1+4.10Mn) \times (1+0.27Cu) \times (1+0.52Ni) \times (1+2.33Cr) \times (1+3.14Mo) \times 25.4(mm))$$

図 3 HT980 鋼板の $vTrs$ に及ぼす γ 粒度の影響。

図 4 ΔT に及ぼす Ni 量の影響。

4. 水圧鉄管用 HT980 鋼の製造と諸特性

(1) 母材特性

以上の検討結果に基づき、鋼板の最適成分、製造プロセスを決定し、実生産ラインにて板厚 20 mm から 200 mm までの HT980 鋼を製造した。以下、管胴材では板厚 50 mm、分岐部材では 200 mm の鋼板の製造結果を紹介する。

表 2 に開発鋼の成分を、表 3 に鋼板の引張、衝撃試験結果を示す。いずれも表 1 の目標値を十分に満足している。

(2) 脆性亀裂伝播停止特性

開発鋼母材の脆性亀裂伝播停止特性を調査するために、温度勾配型の ESSO 試験を実施した結果を図 5 に示す。母材成分、圧延・熱処理条件の最適化によって、脆性亀裂伝播停止温度が 50 mm, 200 mm t 材で各々 -13°C 、 -30°C と極めて良好であり、水圧鉄管の最低使用温度より十分に低温側にあることから、脆性破壊に対して安全と判断される。

(3) 溶接性および溶接継手特性

開発鋼の低温割れ性を評価するため、y 型溶接割れ試験を行った。その結果を表 4 に示す。この結果いずれの板厚にお

表 2 開発鋼の化学成分例(mass%)

板厚 (mm)	C	Si	Mn	Ni	Nb	B	Others	P_{CM}
50	0.12	0.16	0.86	1.38	0.01	0.001	Cu-Cr-Mo-V	0.28
200	0.11	0.10	1.01	4.99	0.01	0.001	Cu-Cr-Mo-V	0.33

表 3 開発鋼の引張、衝撃試験結果

板厚 (mm)	部位	方向	引張試験		衝撃試験	
			YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	$vTrs$ ($^{\circ}\text{C}$)	vE_T (J)
50	1/2t	C	943	996	-105	219(-55 $^{\circ}\text{C}$)
	表面	C	—	—	-108	210(-65 $^{\circ}\text{C}$)
200	1/4t	C	909	976	-109	205(-65 $^{\circ}\text{C}$)
	1/2t	C	907	968	-113	209(-65 $^{\circ}\text{C}$)

図 5 母材の ESSO 試験結果。

表 4 HT980 鋼の y 型溶接割れ試験結果。

鋼 種	HT780 鋼	開発 HT980 鋼	
板 厚	~200 mm	50 mm	200 mm
割れ停止予熱温度	150 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$

図 6 開発鋼の溶接継ぎ手衝撃試験結果。

いても予熱温度 125°C 以下と従来の HT780 鋼と同等以上の溶接性を示している。

次にサブマージーク溶接継手(SAW：入熱 $\sim 4\text{ kJ/mm}$)の衝撃試験結果を図 6 に示す。HT980 鋼の継手特性は十分に目標値を満たす優れた性能を示す。

5. 実用化状況、将来性および特許

板厚中心部および溶接熱影響部組織をマルテンサイト+下部ベイナイト組織とする最適成分設計、さらに Nb や Ni の活用と極厚材への二段階熱処理法の適用によって、水圧鉄管としての高い靱性値と良好な施工性を有する最大 200 mm 厚までの HT980 厚鋼板が開発された。

本開発鋼は図 1 に示される世界最高の落差(1883 m)を誇るスイスのクルゾン・ディクセンズ水力発電所の水圧鉄管に 1996 年世界で初めて採用された。一方、わが国でも、すでに多くの新規大型揚水発電所が電源調整審議会において許可済みまたは審議中であることから、今後国内外で HT980 鋼の適用が大幅に増えることが予想される。

なお、本発明に関する特許は特開平2-133518号報など 8 件出願済みである。

文 献

- (1) 渡辺祐一, 有持和茂, 大西一志: 溶接学会全国大会講演概要, (1996), 58, p. 15.
- (2) 丸山嘉一郎, 別所 清, 有持和茂, 大西一志, 飯山英明, 村山 弘: 住友金属, **47** No. 4, (1995), 54.
- (3) 松岡 孝, 渡辺征一, 別所 清, 飯田 豊, 河井清和, 渡辺望: 住友金属, **38** No. 2, (1986), 13.
- (4) 大西一志, 松川 靖, 有持和茂, 岡口秀治, 岡田 斎, 堀川浩甫: CAMP-ISIJ, **10**(1997), 584.
- (5) Y. Kamada, K. Ohnishi and K. Bessho: Journal of Material Science Letters, **10**(1991), 364.