

引張強さ950N/mm²級高張力鋼(HT-100)の 水圧鉄管への適用検討

西脇 芳文¹・前島 俊雄²・久保田 克寿³

¹フェローメンバー 東京電力㈱ 神流川水力建設所（〒370-0831 群馬県高崎市新町6-19）

²正会員 工修 東京電力㈱ 神流川水力建設所 上野第二工事事務所
(〒370-1613 群馬県多野郡上野村勝山212-1)

³正会員 工修 東京電力㈱ 神流川水力建設所 上野第二工事事務所
(〒370-1613 群馬県多野郡上野村勝山212-1)

国内水圧鉄管においては、揚水式発電所の大型化・高落差化への要求に対応するため鋼材の高張力化が図られてきたが、HT-80 (JIS G 3128[1987] SHY685NS-F) の適用を果たして以来20年以上が経過し、更なるコストダウンに寄与する新たな高張力鋼の開発・適用が望まれており、電力会社・製鋼メーカー・重工各社で研究が進められてきた。

本論文は、既往の研究・開発成果を踏まえ、最新の技術で製造した引張強さ950N/mm²級高張力鋼(HT-100)およびその溶接継手の、水圧鉄管への適用性評価結果について報告するものである。

Key Words : HT-100 for penstock, Thermo Mechanical Control Process, tensile property, toughness, weldability

1. はじめに

国内水圧鉄管においては、揚水発電所の大型化・高落差化への要求に対応するため、鋼材の高強度化が図られてきたが、1975年完成の大平発電所（九州電力）においてHT-80 (JIS G 3128[1987] SHY685NS-F : 以下HT-80と称す) の適用を果たして以来20年以上が経過し、海外では既に引張強さ950N/mm²級高張力鋼（以下HT-100と称す）の水圧鉄管への適用が開始（スイス : Cleuson Dixence発電所）されており、国内水圧鉄管においても更なる要求、特に近年の建設工事における重要課題であるコストダウンに寄与する新たな高張力鋼の開発・適用が望まれていた。

ここで、水圧鉄管における高張力鋼採用によるコストダウン効果としては、岩盤負担率向上による板厚低減（岩盤負担設計を行う場合）、軽量化に伴う据付単位管長尺化による工期短縮または運搬・据付用設備規模縮小などが挙げられる。これらのコストダウン効果を効率的に引き出すためには、必要な力学的特性を有することはもちろん、良好な溶接性を

有し、かつ高性能化に伴う鋼板製造費の高騰を極力抑えた高張力鋼が必要となる。

なお、HT-100の水圧鉄管以外の適用実績としては、建設用機械や深海潜水調査船などが挙げられるが、建設機械用鋼材は、炭素量が多いこと、ニッケルが添加されていないことなどから、水圧鉄管に必要な溶接性・韌性を確保することが困難であり、深海潜水調査船用鋼材は、ニッケル添加量が多く、水圧鉄管のように大量の鋼材を使用する構造物への適用には経済性からメリットがないと考えられる。

したがって、水圧鉄管の特性を考慮し、かつコストダウン効果を効率的に引き出すため、

- ①HT-80と同等の安全性を確保できる力学特性を有すること
 - ②施工効率を低下させないため、HT-80と同等の溶接管理条件（予熱、入熱等）で溶接が可能であること
 - ③鋼板製造費の増分は、HT-80の許容応力比程度以下におさえること
- を開発目標として、関係各所で水圧鉄管用HT-100の

表-1 水圧鉄管用HT-100鋼板及び溶接継手性能の目標値

要 求 項 目	板厚 t=50mm	板厚 t=75mm	備 考
鋼板の化学成分	C (%) ≤ 0.14	≤ 0.14	
	P (%) ≤ 0.010	≤ 0.010	
	S (%) ≤ 0.005	≤ 0.005	
	Ceq (%) ≤ 0.59	≤ 0.62	
	Pcm (%) ≤ 0.29	≤ 0.33	
鋼板の引張性能	0.2%耐力 (N/mm ²) ≥ 885	≥ 885	
	引張強さ (N/mm ²) 950~1130	950~1130	
	伸び (%) ≥ 12	≥ 12	JIS Z 2201 4号試験片
鋼板の韌性	吸収エネルギー (J) ≥ 47	≥ 47	シャルピー衝撃試験による
	[試験温度 (°C)] $[-55^{\circ}\text{C}]$	$[-60^{\circ}\text{C}]$	
	破面遷移温度 (°C) ≤ -55	≤ -60	ESSO試験による
	亀裂伝播停止韌性 (MPa $\sqrt{\text{m}}$) ≥ 224	0°Cにおいて ≥ 224	
鋼板の溶接性	y形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度 (°C) ≤ 100	≤ 125	溶接法：被覆アーク溶接 溶接雰囲気：気温30°C、相対湿度80%
継手の引張性能	引張強さ (N/mm ²) ≥ 950	≥ 950	
継手の韌性	吸収エネルギー (J) ≥ 47	≥ 47	シャルピー衝撃試験による
	[試験温度 (°C)] $[-9^{\circ}\text{C}]$	$[-12^{\circ}\text{C}]$	
	破面遷移温度 (°C) ≤ -9	≤ -12	

研究開発が進められてきた^{1),2)}。

本論文は、最新の技術で製造・製作した水圧鉄管用HT-100鋼板および溶接継手について、性能確認試験（以下確性試験と称す）を行い、現行のHT-80鋼板と比較しながらその性能評価および実機水圧鉄管への適用性評価を行った結果について報告するものである。

2. 目標性能

HT-100鋼板の水圧鉄管への適用性評価を行うに立ち、水圧鉄管用鋼板および溶接継手として満足すべき目標性能を規定した。

水圧鉄管に適用するHT-100鋼板および溶接継手の目標性能は、「これまでに十分な実績を有するHT-80の延長線上の設計思想で、同等の安全性を有すること」を基本設計思想として、下記の方針に基づき設定した。

(1) 許容応力

HT-100の許容応力は、HT-80の許容応力330N/mm²にHT-100とHT-80の引張強度比1.22(950/780)を乗じた値400N/mm²とした。

なお安全率については、水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編（平成9年5月26日第4回改訂版（第4版））³⁾の考え方従い、鋼板の引張強さに対する安全率2.35、鋼板の0.2%耐力に対する安全率1.8の双方を満足することとした。

(2) 脆性破壊に対する安全性

HT-80開発時の設計思想⁴⁾を踏まえ、「溶接部は最低使用温度0°Cにおいて脆性破壊が発生しないものとし、万一発生した亀裂は母材で伝播を停止すること」とした。

(3) 施工性

施工性を考慮し、「HT-80溶接継手と同程度の溶接施工管理下で継手の性能確保が可能であること」とした。

3. 目標値

目標性能を満足するための化学成分・機械的性質などの目標値を表-1に示す。目標値設定の考え方は以下に示すとおりである。なお、以下化学成分については元素記号により表記している。

(1) 鋼板の化学成分

鋼板の化学成分は、製鋼法・熱処理条件等を考慮し、鋼板の機械的性質・溶接性等の要求性能を満足するよう設計すればよいため、特に溶接性および鋼板の諸性能に悪影響を与える不純物元素に着目し、WES3001[1996]を参考に、C, P, S, 溶接割れ感受性組成(Pcm)およびHT-80で規定されている炭素当量(Ceq)を規定した。

溶接性に大きな影響を与えるCについては、HT-80と同等の溶接性を確保するため、HT-80のJIS規格

値と同じ値の上限値とした。

また、HT-100では高韌性を得るためにNiなどの合金成分をHT-80と比較して多くせざるを得ず、炭素当量(Ceq)、溶接割れ感受性組成(Pcm)はHT-80より大きな値とならざるを得ない。したがって、これまでの研究・開発の過程で製造された供試鋼板の実績に基づき、CeqおよびPcmの上限値を定めた。

不純物元素であるP、Sについては、近年の製鋼技術の進歩により低く抑えることが可能であること、炭素当量(Ceq)、溶接割れ感受性組成(Pcm)をHT-80より大きな規定値としていることを踏まえ、溶接性などへの影響を最小限とするため、これまでの研究・開発の過程で製造された供試鋼板の実績に基づき、HT-80のJIS規格値より更に低い値とした。

(2) 鋼板の機械的性質

a) 引張性能およびシャルピー衝撃試験による韌性の目標値

鋼板の引張性能については、所要の安全率を確保しつつ、許容応力400N/mm²となるようにWES3001[1996]HW885に準拠して定めた。

鋼板のシャルピー衝撃試験による所要韌性については、最低使用温度0°Cで脆性亀裂の伝播を停止できるよう、WES3003[1995]A種鋼板に準拠して定めた。

b) ESSO試験における韌性の目標値

鋼板の韌性確認のために実施するESSO試験における目標値は、WES3003[1995]A種鋼板の所要韌性の考え方から、使用応力下、最低使用温度0°Cで、c=100mm(無限板中で全長200mm)の板厚貫通亀裂の伝播を停止できる韌性を有することとして、以下のとおりとした。

最低使用温度0°Cにおける亀裂伝播停止韌性

$$K_{ca} \text{ (目標値)} \geq \sigma \cdot (\pi \cdot c)^{0.5} \\ = 224 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

ここに σ : 使用応力($=400\text{N/mm}^2$)
 c : 亀裂半長($=100\text{mm}=0.1\text{m}$)

(3) 鋼板の溶接性

HT-80開発時の考え方から、鋼板の溶接性は、y形溶接割れ試験における割れ防止予熱温度の上限値で規定することとし、規定値はHT-80と同等の溶接性を要求することからHT-80と同じ値とした。

(4) 溶接継手の機械的性質

溶接継手の機械的性質の目標値はHT-80の設計思想に則り設定することとし、引張性能については母材の保証引張強さと同等以上、また、シャルピー衝

表-2 確性試験項目

鋼種	HT-100	HT-100	HT-80
板厚	50mm	75mm	75mm
製鋼法	TMCP	TMCP	QT
《鋼板性能試験》			
化学分析試験	○	○	○
マクロ試験	○	○	○
ミクロ試験	○	○	○
硬さ試験	○	○	○
引張試験	○	○	○
曲げ試験	○	○	-
衝撃試験	○	○	○
ESSO試験	○	○	-
ひずみ時効引張試験	○	○	○
ひずみ時効衝撃試験	○	○	○
《溶接性試験》			
テープ硬さ試験	○	○	-
y形溶接割れ試験	○	○	-
U形溶接割れ試験	○	○	-
多層溶接割れ試験	○	○	-
《継手性能試験》			
継手化学分析試験	○	○	○
継手マクロ試験	○	○	○
継手ミクロ試験	○	○	○
継手引張試験	○	○	○
溶接金属引張試験	○	○	○
広幅継手引張試験	○	○	-
継手側曲げ試験	○	○	-
継手硬さ試験	○	○	○
継手衝撃試験	○	○	○
継手CT試験	○	○	○

注) HT-80材はJIS G 3128[1987]SHY685NS-F規格品

擊試験による所要韌性は「最低使用温度0°Cで脆性破壊が発生しないこと」を目標として、WES3003[1973]G種鋼板と同等の要求値とした。

4. 確性試験計画と供試材料

(1) 試験計画概要

HT-100鋼板が、前項で示した目標性能を満足するかを確認するために、確性試験を実施することとした。

試験項目は、HT-80適用時に用いられてきた確性試験項目を参考に設定した。また「HT-80と同等の安全性を有すること」を確認するため、HT-80についても比較試験を行うこととした。

なお、試験を行う板厚については、水圧鉄管管胴部への適用を考慮し、50mmおよび75mmとした。

試験項目は、表-2のとおりである。

ここで、水圧鉄管の疲労については、水圧鉄管などの疲労破壊に関する荷重の発生頻度が小さい、あ

るいは水圧脈動など常時発生する荷重については応力振幅が小さいことから、特に問題とはならないと考えられており⁹、HT-100適用検討に当たっても同様の観点から、疲労関係の試験は特に実施しなかつた。

(2) HT-100供試鋼板

a) 供試鋼板の成分設計の考え方

HT-100供試鋼板の成分設計は、HT-80の成分をベースに下記を考慮して行われている。

- ①熱影響部の硬化を抑制し良好な溶接性を確保するためC, Ceq, Pcmを極力低く抑制する。
- ②母材および溶接部の韌性向上のため、Niを添加する。ただし、高価な元素であるため添加量は最小限とする。
- ③板厚中央部の焼き入れ性確保のため、Cr, Mo, Bを添加する。
- ④焼き戻し時の析出強化による母材強度向上のため、Mo, Vを添加する。
- ⑤結晶粒の微細化による韌性向上のため、Nbを添加する。
- ⑥不純物元素であり、韌性・溶接性等に有害なP, Sを極力低く抑制する。

b) 供試鋼板の製鋼法について

今回の確性試験用HT-100供試鋼板は、合金元素の増加を最小限に抑えることにより良好な溶接性を確保しながら高強度・高韌性を有する鋼材とすることを狙い、TMCP法(Thermo Mechanical Control Process)で製造されている。

その製鋼法の考え方は、板厚中央部では、化学成分の調整による焼入れ性の向上・ベース組織の高韌性化を図ることにより、高強度・高韌性を得、一方板表面部では、圧延・焼入れ過程で韌性が低下する傾向にあるので、TMCP法を用い、低温域での圧延によるオーステナイトの扁平化・組織の微細化を行うことにより韌性の改善を図るというものである。

(3) 溶接材料

a) 繼手溶接方法

供試鋼板の溶接は、実施工で用いる溶接工法を考慮し、表-3に示すとおりとし、溶接方法に応じて必要となる新規に開発されたHT-100用・従来から用いられているHT-80用溶接材料を準備した。表中の溶接方法は略称で記載しておりそれぞれ、

- ・SMAW：被覆アーク溶接(shielded metal arc welding)
- ・MAG：MAG溶接(metal active gas welding)
- ・SAW：サブマージアーク溶接(submerged arc welding)をさしている。

表-3 繼手溶接方法

鋼種	板厚	SMAW	MAG	SAW
HT-100	t=50mm	—	○	○
HT-100	t=75mm	○	—	○
HT-80	t=75mm	○	—	○

b) 溶接材料の設計の考え方

HT-100用溶接材料は以下の考え方を基本として製造されている。

- ①高韌性確保のため基本配合の調整等により溶接金属中の酸素量を0.02%程度以下とする。
- ②高韌性確保のため結晶粒の微細化を狙い適量のTiを添加する。
- ③高韌性確保のためベース組織の高韌性化を狙いNiを2%以上添加する。
- ④強度確保のためCr, Moを適量添加する。
- ⑤耐割れ性確保のため使用材料の難吸湿化等により拡散性水素量の低減を図る。

試験に用いた溶接材料の継手中における化学成分分析結果、引張強度特性については7章(2)節にて後述する。

5. HT-100鋼板の性能

以下に主要な試験結果と水圧鉄管用鋼板としての適性に関する評価をまとめた。

(1) 化学成分

供試鋼板の化学成分を表-4に示す。試験方法はJIS G 0321[1966]による。いずれも化学成分の目標値を満足している。また溶鋼から採取した試料を分析したレーラー値と板厚各位置でのチェック分析結果での差異はほとんど無くほぼ均一な成分状態となっている。

(2) 引張特性

供試鋼板の引張試験結果を図-1に示す。試験方法はJIS Z 2241[1993]、試験片はJIS Z 2201[1998]4号および5号試験片(全厚試験)による。

いずれの試験結果も引張特性の目標値を満足している。

ここで、特徴としてHT-80材では表面部・1/4t部の0.2%耐力・引張強さが板厚中心部(1/2t)と比べわずかに高い傾向にあるものの比較的均一な性状を示しているのに対し、HT-100材では板厚中心部(1/2t)から表面部に向けて0.2%耐力・引張強さが増加しておりその傾向は板厚が厚いほど顕著である。

表-4 鋼板の化学成分分析結果

(成分単位: %)

鋼種	HT-100			HT-100			HT-80		
板厚	t=50mm			t=75mm			t=75mm		
成分	レート ^ル	チェック		レート ^ル	チェック		レート ^ル	チェック	
		表面	1/4t		表面	1/4t		表面	1/4t
C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.10	0.11	0.11
Si	0.23	0.24	0.24	0.25	0.22	0.22	0.21	0.26	0.26
Mn	0.99	0.99	0.99	1.00	0.90	0.90	0.93	0.93	0.94
P	0.006	0.006	0.006	0.006	0.004	0.004	0.005	0.004	0.007
S	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Cu	0.21	0.20	0.20	0.20	0.30	0.29	0.30	0.27	0.17
Ni	1.46	1.47	1.48	1.48	2.64	2.52	2.64	2.50	1.38
Cr	0.50	0.49	0.50	0.50	0.59	0.59	0.60	0.58	0.54
Mo	0.53	0.53	0.53	0.54	0.57	0.57	0.59	0.55	0.48
V	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
B	0.0010	0.0009	0.0009	0.0010	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012
Nb	0.010	0.009	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.010	0.000
Al	0.025	0.024	0.024	0.024	0.062	0.057	0.056	0.057	0.055
Ti	0.012	0.011	0.011	0.011	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005
N	0.0028	0.0032	0.0031	0.0031	0.0046	0.0046	0.0043	0.0049	0.0028
O	—	0.0017	0.0011	0.0010	—	0.0009	0.0011	0.0009	—
Ceq	0.546	0.545	0.547	0.552	0.599	0.606	0.601	0.593	0.541
Pcm	0.261	0.260	0.261	0.263	0.299	0.307	0.293	0.301	0.265

注) チェックの表面とは、板表面より7mm深の位置

炭素当量 Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14 (%)

溶接割れ感受性組成 Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B (%)

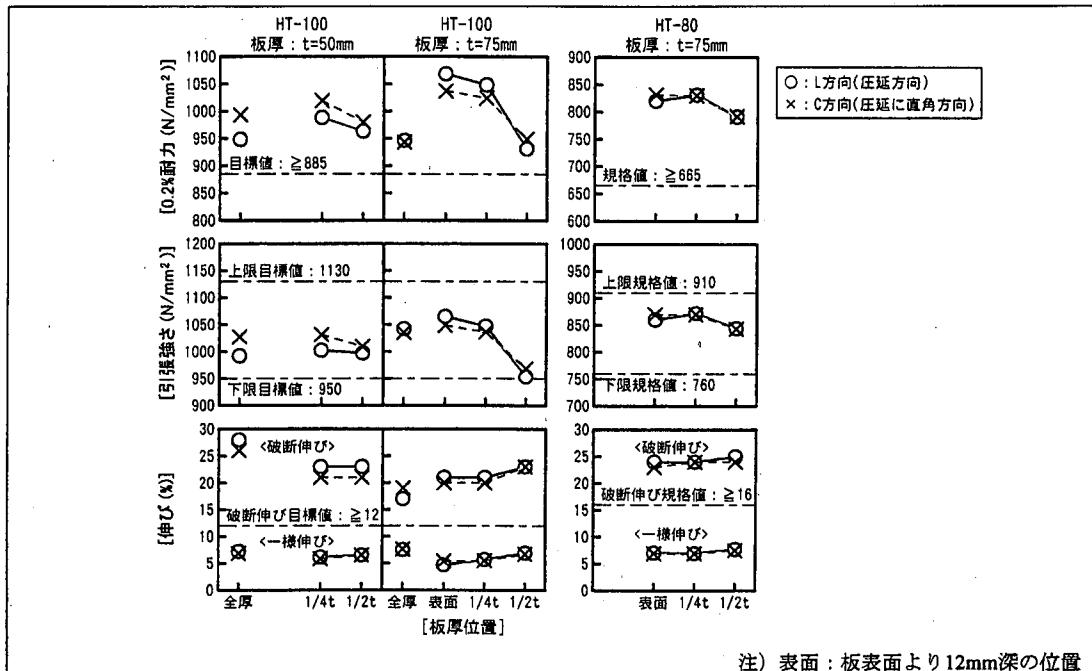


図-1 鋼板の引張試験結果

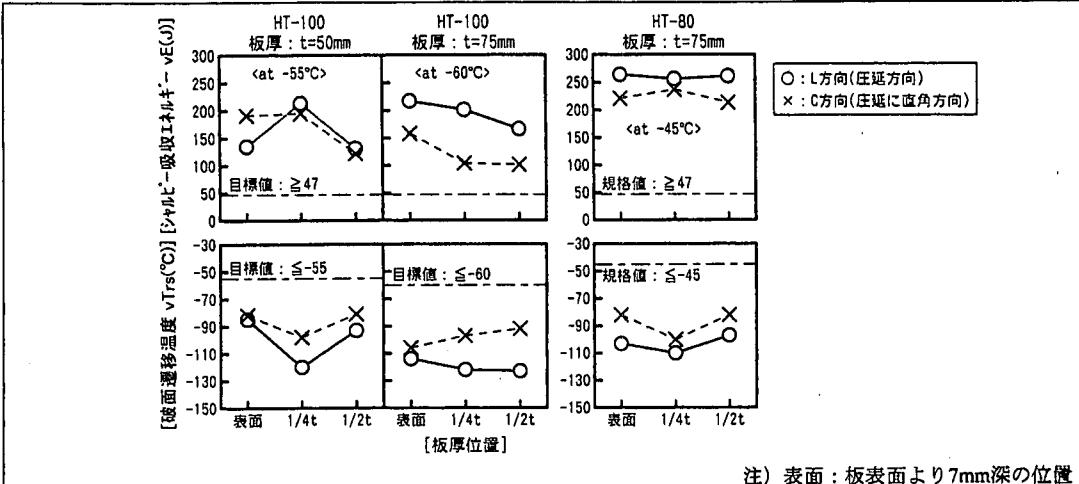


図-2 鋼板の衝撃試験結果

注) 表面: 板表面より7mm深の位置

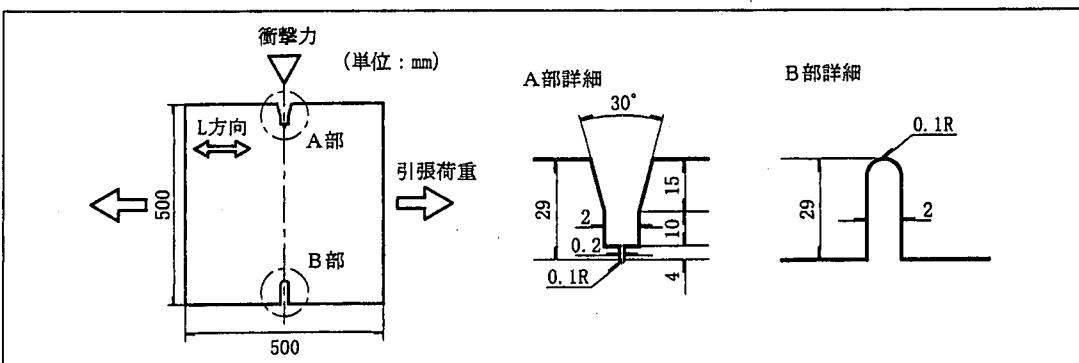


図-3 ESSO試験片形状

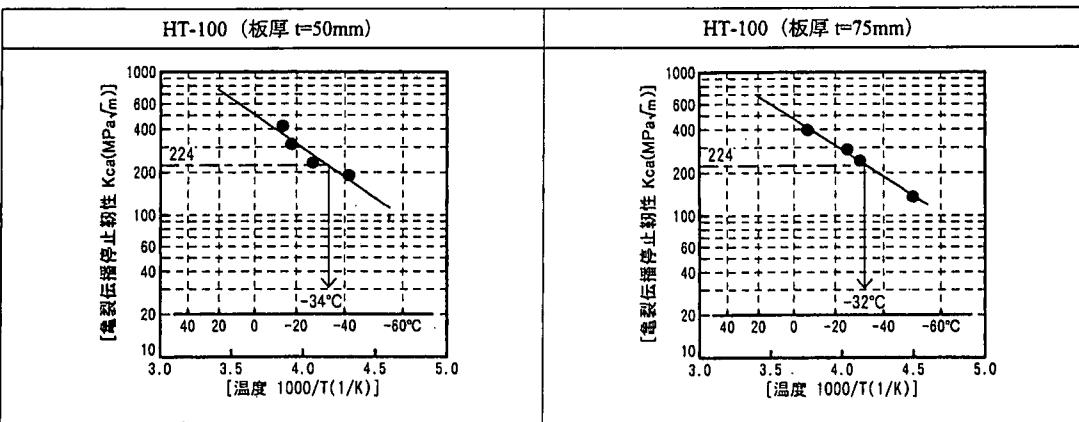


図-4 鋼板のESSO試験結果

なお、全厚での引張試験結果によれば、全厚の引張強さは板厚方向の平均引張強さに近い1/4t位置での引張強さに、全厚の0.2%耐力は板厚方向で最も0.2%耐力の小さい板厚中心部(1/2t)の0.2%耐力に比

較的良く一致することが確認された。この傾向は既往の研究成果⁶⁾とも一致している。

このように板厚方向に引張性能差を有する鋼板の水圧鉄管への適用については、水圧鉄管が薄肉円筒

表-5 ひずみ時効引張・衝撃試験条件

鋼種	HT-100	HT-100	HT-80
板厚	t=50mm	t=75mm	t=75mm
試料採取	L方向・1/4t	L方向・1/4t	L方向・1/4t
予ひずみ0%	時効熱処理無し(原板試験)	時効熱処理無し(原板試験)	時効熱処理無し(原板試験)
予ひずみ2.5%	時効熱処理有り(250°C×1時間)	時効熱処理有り(250°C×1時間)	時効熱処理有り(250°C×1時間)
予ひずみ5.0%	時効熱処理有り(250°C×1時間)	時効熱処理有り(250°C×1時間)	時効熱処理有り(250°C×1時間)

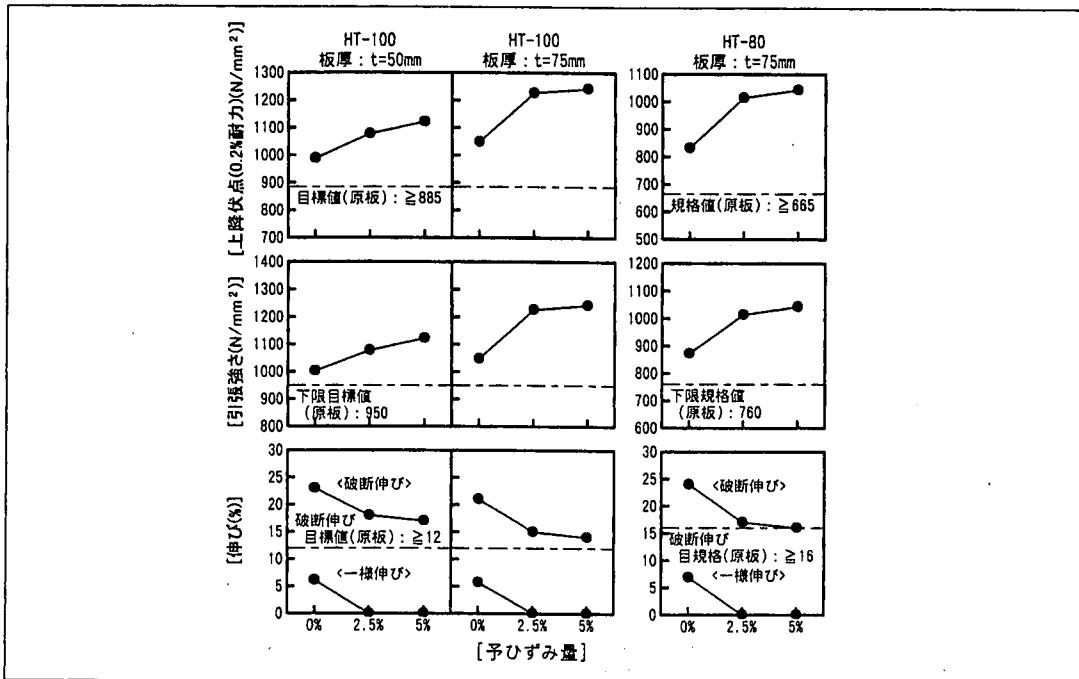


図-5 鋼板のひずみ時効引張試験結果

理論に基づく板厚方向の均一応力分布を仮定して設計されていることを考慮すると、全厚状態における引張性能が保証されれば良く、今回の供試鋼板のように全厚状態で十分目標値を満足する性能を有する材料であれば、問題ないものと考えられる。

(3) 韧性

a) シャルピー衝撃試験による韌性

供試鋼板のシャルピー衝撃試験結果を図-2に示す。試験方法はJIS Z 2242[1993]、試験片はJIS Z 2202[1998]Vノッチ試験片による。

いずれの試験結果もシャルピー衝撃試験による韌性目標値を満足している。

ここでHT-100(板厚50mm)およびHT-100(板厚75mm)のいずれのケースも板厚中央部に対する表面部の韌性低下は認められず、TMCPによる効果が現れているものと考えられる。なおHT-100(板厚50mm)では板厚中央部・表面部に比べ1/4t部の韌性が良好となっている。これは高強度なマルテンサイト

と高韌性である下部ベイナイトの比率およびTMCP法での圧延温度が1/4t部で最も韌性向上に対し有利になっているためと推定される。

HT-80(板厚75mm)については、表面・板厚中心部に比べ1/4t部での韌性が若干高くなる傾向が認められるが、ほぼ均一な性能となっている。

b) ESSO試験による韌性

HT-100供試鋼板のESSO試験片形状を図-3に、ESSO試験結果を図-4に示す。試験方法・試験片はWES鋼種認定試験方法[1995]脆性破壊伝播停止試験による。なお引張荷重載荷方向はL(圧延)方向としている。試験結果によれば、所要の破壊韌性値 $K_{ca}=224 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる温度は、HT-100(板厚50mm)で-34°C、HT-100(板厚75mm)で-32°Cとなっており、いずれも目標値を満足している。

なお、水圧鉄管用鋼板の韌性目標値は板厚貫通亀裂の伝播を停止するよう定めており、全厚状態で所要の韌性を有していることが設計条件となる。したがって、板厚方向に製鋼法の特性による韌性差が

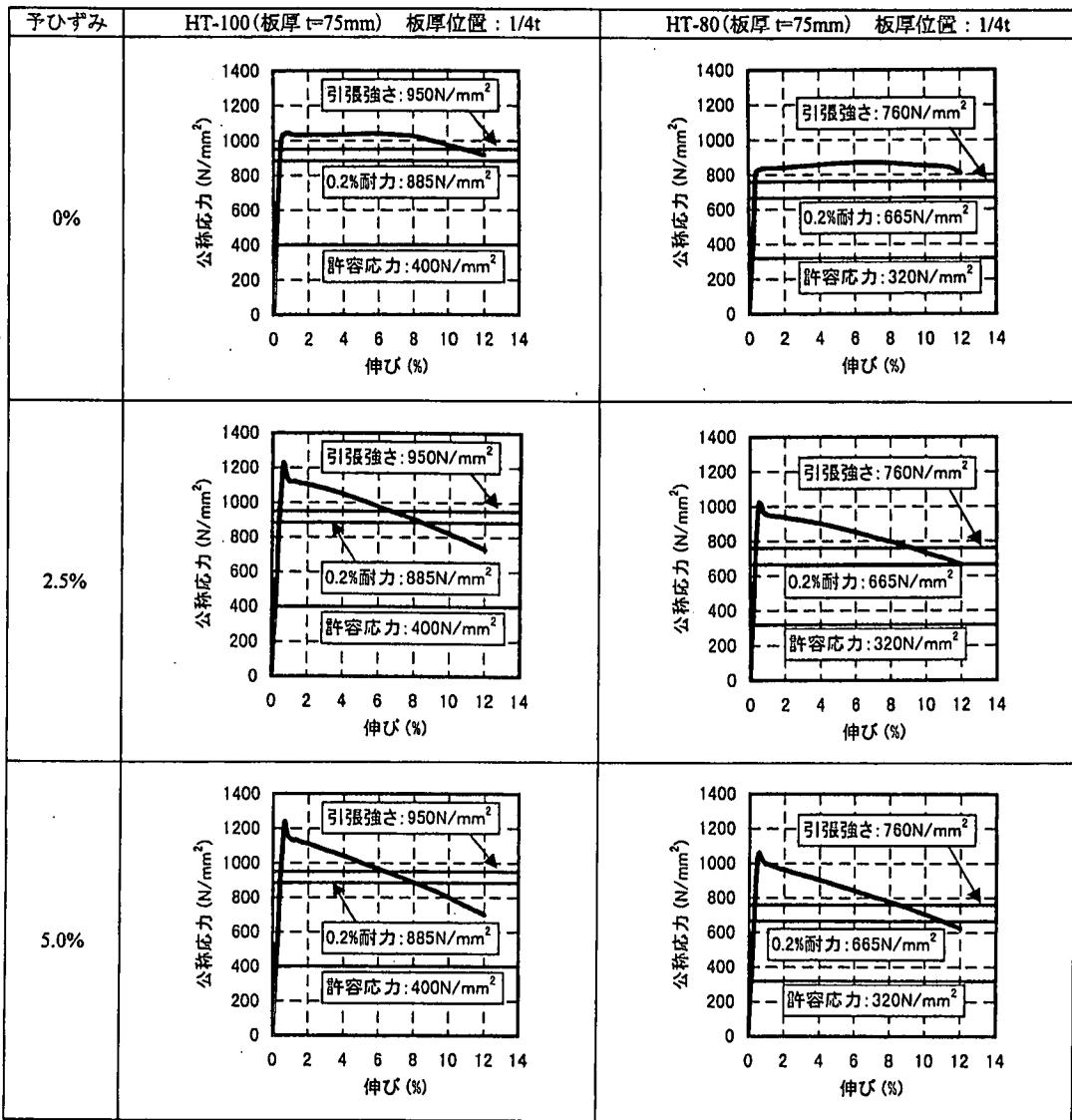


図-6 鋼板のひずみ時効引張試験における応力～ひずみ曲線の例

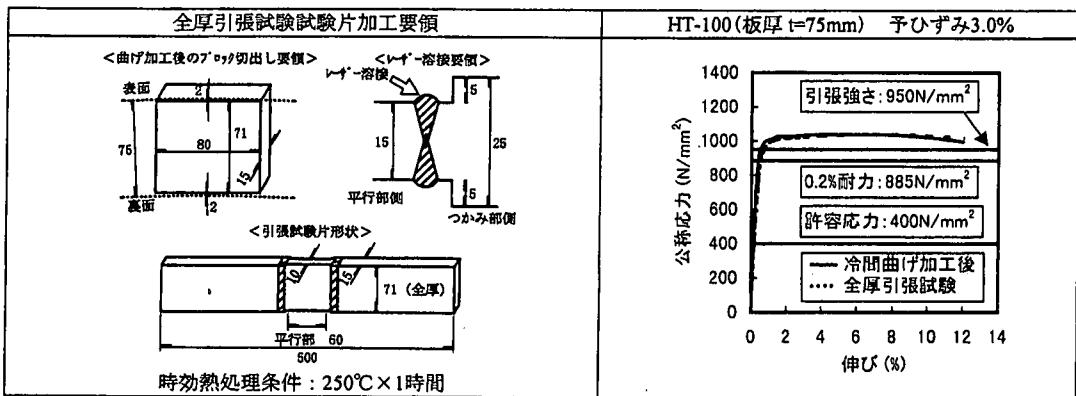


図-7 冷間曲げ加工を行った鋼板の全厚引張試験における応力～ひずみ曲線の例

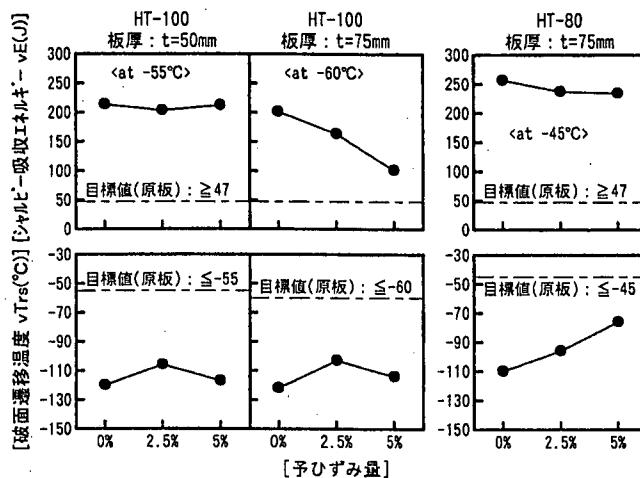


図-8 鋼板のひずみ時効衝撃試験結果

認められるものの、各位置でのシャルピー吸収エネルギー・破面遷移温度は目標値を満足するものであり、またESSO試験による全厚状態の韌性についても目標値を満足することが確認されたことから、韌性の面からも今回の供試鋼板の水圧鉄管への適用については問題ないものと考えられる。

(4) ひずみ時効処理後の鋼板性能

水圧鉄管用鋼板は、通常冷間曲げ加工が行われ、2%程度の永久ひずみが付加される。この影響を評価するため、表-5に示す条件でひずみ時効引張試験およびひずみ時効衝撃試験を行った。

a) 引張性能

供試鋼板のひずみ時効引張試験結果を図-5に、応力～ひずみ曲線の例を図-6に示す。試験方法は、JIS Z 2241[1993]、試験片はJIS Z 2201[1998]4号試験片による。

HT-100およびHT-80とも予ひずみの増加に伴い加工硬化が進み、降伏点強度・引張強さとも増加し、破断伸びは減少する。また一様伸びについては、原鋼板は6%程度であったものが、予ひずみ2.5%以上のケースでは上降伏点が最大強度となり一様伸びは0となっている。

なお、図-7に、5章(2)節で述べた5号試験片による板厚75mmHT-100原鋼板の応力～ひずみ曲線と、製鋼メーカーが別途実施した同一成分系・同一製鋼法の板厚75mmHT-100鋼板の実物冷間曲げ加工後の全厚引張試験による応力～ひずみ曲線を示すが、ほとんど差異の無いものとなっている。

以上より、通常のひずみ時効試験において一様伸びが無い特性となる材料の水圧鉄管への適用性については以下の理由により問題ないと考えられる。

- ①現行の水圧鉄管の設計は水門鉄管技術基準に則り許容応力度設計法で行われており、許容応力は降伏点強度に対し十分な安全率を有している。（降伏点[0.2%耐力]目標値885N/mm²に対し許容応力は400N/mm²であり2.2以上の安全率を有している。また試験結果も0.2%耐力の目標値を満足している）
- ②実施工では冷間曲げ加工により塑性ひずみが与えられるため、曲げ圧縮側では引張荷重に対する余裕があり、全厚状態では原鋼板に近い応力～ひずみ特性となることが確認されている。
- ③HT-100のひずみ時効引張試験における応力～ひずみ特性はHT-80と同様の傾向にあるが、HT-80については多くの施工実績がある。

b) シャルピー衝撃試験による韌性

供試鋼板のひずみ時効シャルピー衝撃試験結果を図-8に示す。試験方法はJIS Z 2242[1993]、JIS Z 2202[1998]Vノッチ試験片による。

一般に鋼材はひずみ時効処理により韌性が低下することが知られており^{7,8)}、今回の試験においてもHT-100、HT-80とも予ひずみの増加に伴い韌性が低下する傾向が認められるが、予ひずみ5%以下の範囲であれば原鋼板の目標値を満足する性能を有していることから、水圧鉄管への適用に問題はないと考えられる。

6. 耐割れ性

(1) 溶接割れ試験結果

溶接割れ試験結果を表-6に示す。表中の温度は、各割れ試験において割れが発生しない最小の予熱温度（割れ防止予熱温度）を記載している。

なおMAG溶接は拡散性水素量および実施工における入熱量がSMAW・SAWに比べ小さいため多層溶接割れ試験は実施していない（拡散性水素量については表-10参照）。

また、HT-80の多層溶接においてその初層では低温割れ発生防止の観点から1ランク低い強度水準の溶接材料を用いる施工を行う場合があることを踏まえ、今回のHT-100における溶接割れ試験においても初層の低温割れ防止効果確認のためHT-80用溶接材料を用いた試験を実施することとした。

a) Y形溶接割れ試験結果

試験方法・試験片はJIS Z 3158[1993]による。

HT-100(板厚50mm)およびHT-100(板厚75mm)のいずれのケースも鋼板の溶接性の目標値（表-1：鋼板の溶接性を参照）を満足している。またHT-100(板厚50mm)のSMAW、HT-100(板厚75mm)のSMAWともHT-80用溶接材料を用いることにより、割れ防止予熱温度を25°C低減できる。

b) U形溶接割れ試験結果

試験方法・試験片はJIS Z 3157[1993]による。

HT-100(板厚50mm)のSMAW・MAG、HT-100(板厚75mm)のSMAWとも、HT-80用溶接材料を用いることにより、割れ防止予熱温度を25°C低減できる。

なお、HT-100(板厚50mm)MAG (HT-80用溶接材料使用) のケースではY形溶接割れ試験とU形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度は同じであるが、それ以外のケースではいずれもU形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度の方がY形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度より高くなっている。Y形溶接割れ試験においては一般に割れがルート部の熱影響部に発生し、熱影響部に沿って又は溶接金属中に転じて伝播することから、主として鋼板の低温割れ感受性を調べる際に利用されている。これに対してU形溶接割れ試験においては、割れがほとんどルート部からビード部に直接入ることから、溶接金属の低温割れ感受性を調べる試験といえる。今回の試験では、溶接金属の耐割れ性よりも母材の熱影響部あるいは接合部の耐割れ性の方が勝っており、溶接金属部に割れを発生しやすいU形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度の方が高くなったものと考えられる。

c) 多層溶接割れ試験結果

試験体はWES鋼種認定試験方法[1985]U形開先多

層溶接割れ試験体とし、予熱温度および後熱有無をパラメータとして浸透探傷検査により表面割れ・断面割れの有無および割れ長さを測定した。表-6に示す割れ防止予熱温度は表面割れ・断面割れいずれも発生しなかつた予熱温度の最小値を示している。

試験結果より、HT-80と同様の150°C×2時間の条件で後熱を行うことにより、予熱温度を25°C以上低減することができる。

(2) 割れ試験結果のまとめ

y形溶接割れ試験・U形溶接割れ試験・多層溶接割れ試験により、以下のことが明らかとなった。

①鋼板の溶接性については目標値を満足することが確認された。

②SMAW・MAG溶接の予熱温度は、多層溶接の初層にHT-80用溶接材料を用いることにより、HT-80溶接継手と同等の予熱温度で割れ発生を防止できる。またSAWにおいては、特に制限なしにHT-80溶接継手と同等の予熱温度で割れを防止できる。

③後熱条件については、必要に応じて多層溶接の初層にHT-80用溶接材料を用いることにより、HT-80と同等の条件により割れ発生を防止できる。

7. HT-100溶接継手の性能

(1) 溶接継手の製作

a) 開先形状

図-9に開先形状を示す。継手部の基本性能を確認するための試験板は、実施工を考慮して、MAG溶接ではV開先、SMAW・SAWではX開先とし、シャルピー衝撃試験およびCT試験に供する継手はK開先とした。これは試験対象箇所であるHAZ(熱影響部: heat affected zone), Bond部(母材熱影響部と溶接金属部の境界)を開先の直線側を使用して試験片を作成することで、ノッチを評価対象箇所に精度良く設置するためである。

b) 溶接条件

予熱・後熱およびパス間温度は、割れ試験結果およびHT-80溶接継手の標準施工条件に基づき表-7に示すとおりとした。入熱条件については、HT-80の標準入熱量の上限値である平均45kJ/cm(各パスでの最大値50kJ/cm)での継手性能を確認することを基本として、溶接法別に入熱量をパラメータとして継手の性能確認を行うこととした。

表-6 溶接割れ試験結果

板厚	溶接法	溶接材料	割れ防止予熱温度 (°C)				【参考】 HT-80標準 予熱温度 (°C)	
			Y形溶接 割れ試験		U形溶接 割れ試験			
			後熟無し	後熟有り				
t=50mm	SMAW	HT-100用	100	125	125	75以下	100以上	
		HT-80用	75以下	100	—	—		
	MAG	HT-100用	75	100	—	—	80以上	
		HT-80用	75	75	—	—		
t=75mm	SMAW	HT-100用	—	—	150以上	75以下	100以上	
		HT-100用	100以下	125	125	100以下	125以上	
	SAW	HT-80用	75以下	100	—	—	125以上	
		HT-100用	—	—	150	100以下		

注) • 多層溶接割れ試験の後熟条件はHT-80と同様150°C×2時間 (SMAW, SAW共通)とした

• 多層溶接割れ試験SMAWでは初層にHT-80用溶接材料を使用

• HT-80標準予熱温度は水門鉄管技術基準による

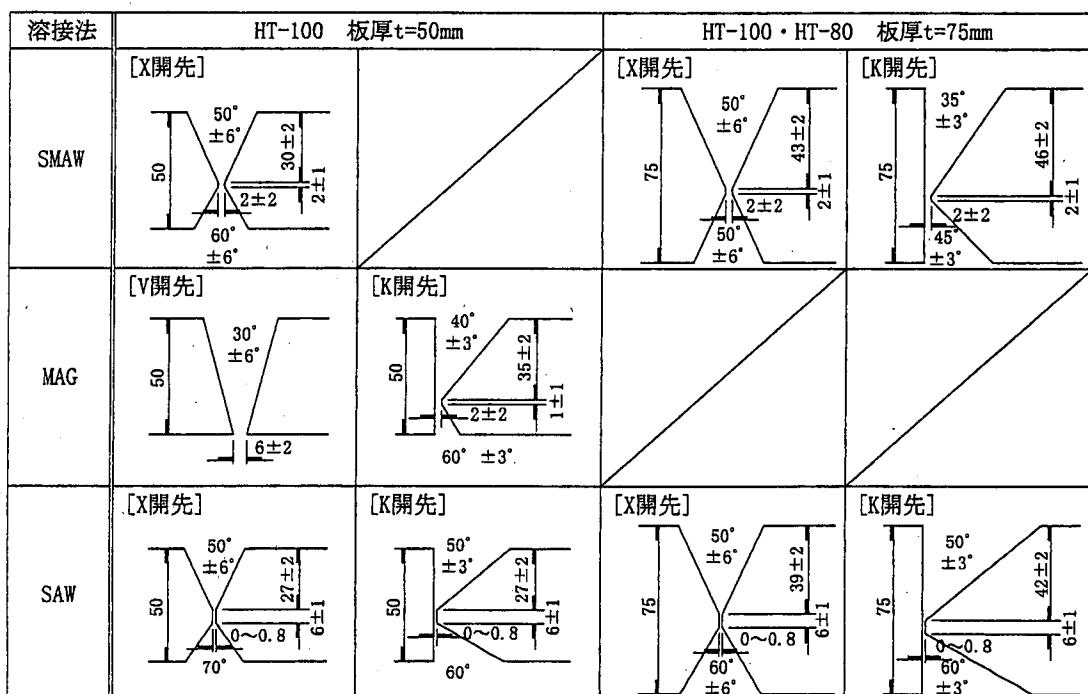


図-9 開先形状図

(単位: mm)

表-7 HT-100確性試験溶接継手の予熱・パス間温度および後熟条件

溶接法	板厚	予熱温度	パス間温度	後熟条件	付帯条件
SMAW	t=50mm	100°C以上	100~230°C	150°C×2時間以上	初層にはHT-80用溶接材料を使用
	t=75mm	125°C以上	125~230°C		
MAG	t=50mm	75°C以上	75~230°C		
SAW	t=50mm	100°C以上	100~230°C		
	t=75mm	125°C以上	125~230°C		

表-8 繼手の化学成分分析結果

(成分単位: %)

鋼種	HT-100		HT-100				HT-80	
板厚	t=50mm		t=75mm				t=75mm	
溶接法	MAG	SAW	SMAW	SAW			SMAW	SAW
入熱量	25 kJ/cm	45 kJ/cm	45 kJ/cm	38 kJ/cm	45 kJ/cm	55 kJ/cm	45 kJ/cm	45 kJ/cm
C	0.07	0.09	0.06	0.10	0.10	0.10	0.08	0.06
Si	0.29	0.36	0.39	0.41	0.38	0.37	0.46	0.43
Mn	1.30	1.64	1.25	1.77	1.74	1.75	1.37	1.82
P	0.006	0.008	0.004	0.008	0.008	0.007	0.009	0.017
S	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002
Cu	0.14	0.12	0.03	0.10	0.11	0.11	0.03	0.11
Ni	2.66	2.38	2.66	2.70	2.70	2.71	1.84	0.31
Cr	0.59	0.20	0.72	0.14	0.15	0.15	0.22	0.41
Mo	0.73	0.70	0.76	0.74	0.74	0.74	0.43	0.74
V	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
B	0.0002	0.0004	0.0001	0.0004	0.0004	0.0004	<0.0001	0.0007
Nb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Al	0.008	0.008	0.004	0.010	0.008	0.008	0.006	0.003
Ti	0.016	0.002	0.016	0.001	0.003	0.002	0.013	0.002
N	0.0069	0.0059	0.0145	0.0063	0.0062	0.0059	0.0111	0.0055
O	0.0219	0.0165	0.0154	0.0173	0.0165	0.0163	0.0199	0.0667

表-9 溶接金属引張試験結果

材料種別	板厚	溶接法	入熱量 (kJ/cm)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	一様伸び (%)	絞り (%)
HT-100用	t=50mm	SMAW	38	897	959	23	8.1	68
			45	905	955	22	8.5	63
			55	881	951	22	7.7	67
		MAG	25	895	965	20	5.9	64
			45	906	965	21	7.3	67
	t=75mm	SAW	38	934	973	21	7.8	69
			45	916	960	21	8.2	66
			55	894	959	22	7.5	66
		SMAW	45	903	955	22	8.1	67
			38	966	998	21	6.8	66
HT-80用	t=75mm	SAW	45	945	985	21	7.8	66
			55	928	976	23	8.2	65
		SMAW	45	821	874	24	8.7	67
			45	741	782	22	9.0	63

注) 入熱量は平均入熱量を示す

表-10 溶着金属中の拡散性水素量 (単位: ml/100g)

種別	SMAW	MAG	SAW
HT-100用	4.4	0.8	1.7
HT-80用	5.0	0.9	3.4

注) 測定はガスクロマトグラフ法による

(2) 繼手の化学成分および溶接金属の引張特性

表-8に継手の化学成分分析結果を、表-9に溶接金属の引張試験結果を示す。

試験方法は、化学成分についてはJIS G 0321[1992]に準じ、溶接金属引張試験においては、試験方法はJIS Z 2241[1993]、試験片はJIS Z 2201[1980]10号試験片によった。

なおHT-100溶接材料引張強さの溶接材料メーカー

保証値は930N/mm²であり、試験結果はこれを満足している。

また溶接金属メーカーが別途実施した溶着金属中の拡散性水素量の測定結果を表-10に示す。これよりHT-80用溶接材料に比べHT-100用溶接材料の拡散性水素量が低減されているのがわかる。

(3) 繼手の引張特性

a) 1号試験片による継手引張強さ

表-11にJIS Z 3121[1993]1号試験片を用いた全厚引張試験結果(板厚75mm材については半厚で試験実施)を示す。試験方法はJIS Z 2241[1993]金属材料引張試験方法による。

表-11 繼手引張試験結果 (JIS Z 3121 1号試験片による) および広幅継手引張試験結果

鋼種	板厚	溶接条件		継手 引張試験	広幅継手引張試験				
		溶接法	入熱量 (kJ/cm)		引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	一様伸び (%)
HT-100	t=50mm	MAG	25	956	937	1009	15	6.3	W
			45	953	—	—	—	—	—
		SAW	45	985	—	—	—	—	—
HT-100	t=75mm	SAW	45	956	957	1006	11	6.7	W~B
			38	1003	—	—	—	—	—
			45	1006	944	1004	21	7.3	B
			55	987	946	1008	13	6.9	W~B
HT-80	t=75mm	SMAW	45	854	—	—	—	—	—
		SAW	45	806	—	—	—	—	—

注) • 入熱量は平均入熱量を示す

• 広幅継手引張試験の破断位置: Wは溶接部(weld zone), Bは母材部(base metal)を示す

• 広幅継手引張試験の0.2%耐力・一様伸びは初期標点距離300mmのゲージの読み値による

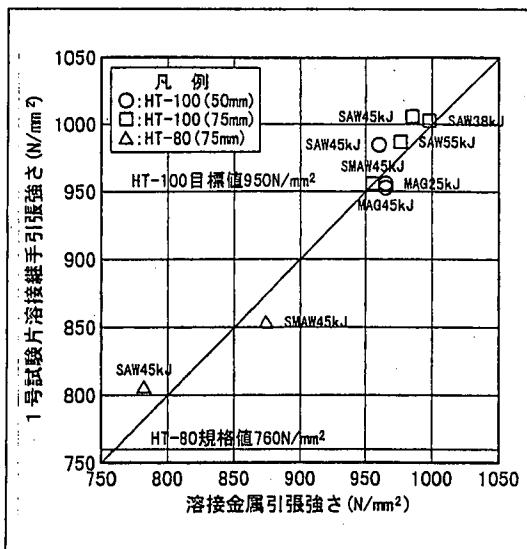


図-10 溶接金属引張強さ(10号試験片)と
継手引張強さ(1号試験片)の関係

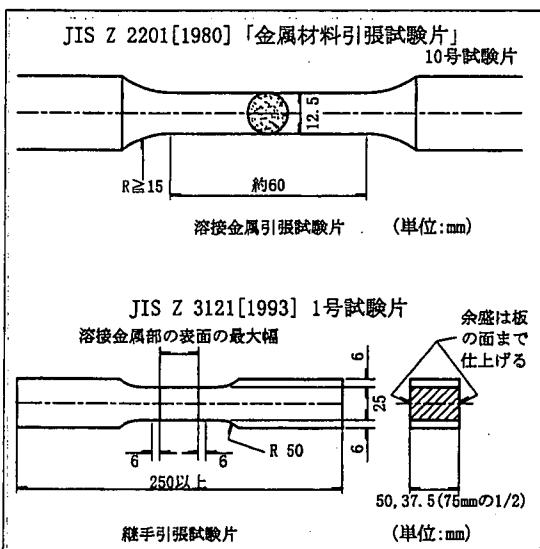


図-11 引張試験片形状の比較

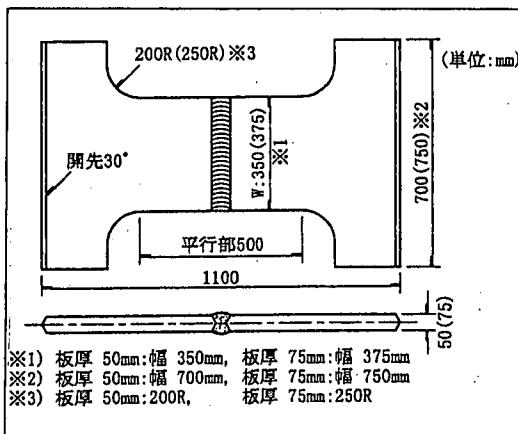


図-12 広幅継手引張試験片形状
(溶接部余盛付き)

図-10に、10号試験片による溶接金属引張強さと1号試験片による継手引張強さの関係を示す。また、図-11に試験片形状の比較を示す。図-10より、溶接金属引張強さと1号試験片による継手引張強さはほぼ等しい関係にあることがわかる。これは、1号試験片では試験片に占める溶接金属の割合が高く継手の引張強さは溶接金属の引張強さに大きく影響されることを示していると考えられる。ここで実構造物の継手では構造全体に占める継手の寸法は小さく、溶接金属よりも母材強度が高い場合には溶接金属の変形が板厚方向・板幅方向で母材に拘束されるため、継手としての強度は溶接金属強度より高くなることが知られている^{9),10)}。

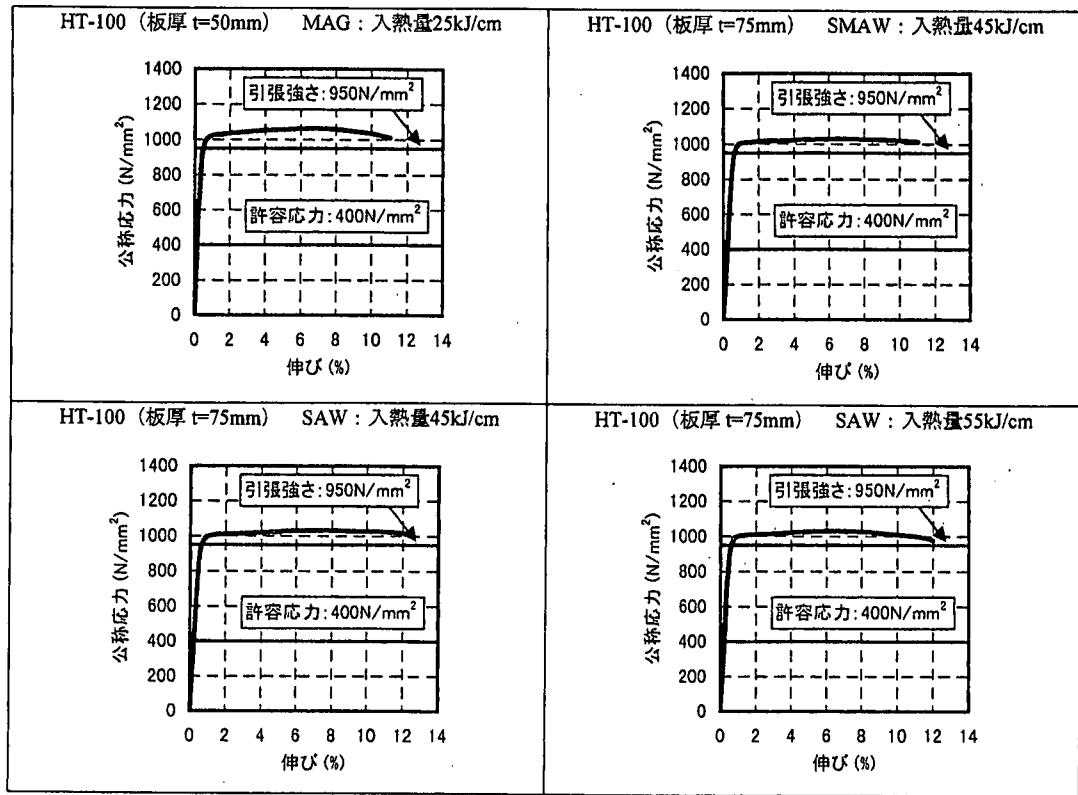


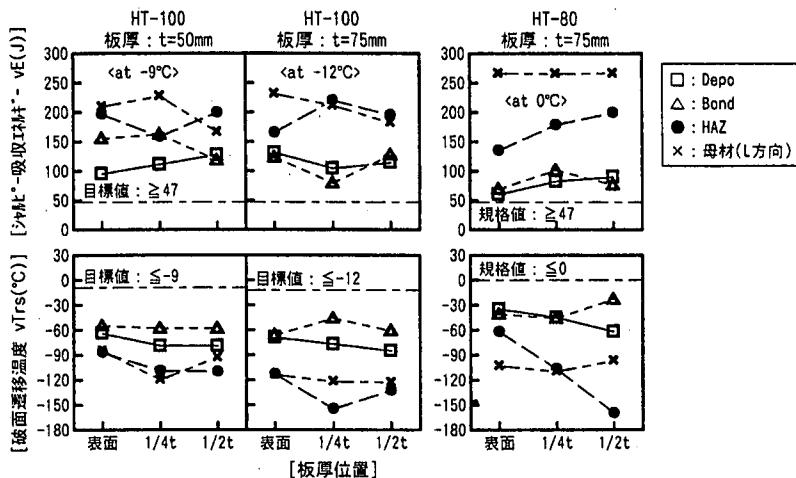
図-13 広幅継手引張試験での応力～ひずみ曲線（初期標点距離300mmのゲージによる）

表-12 継手衝撃試験結果

溶接条件	鋼種		HT-100			HT-100			HT-80	
	板厚		t=50mm			t=75mm			t=75mm	
	溶接法		MAG	SAW	SMAW	SAW		SMAW	SAW	
	入熱量(kJ/cm)	25	45	45	45	38	45	55	45	45
吸収エネルギー	試験温度	-9°C	-9°C	-9°C	-12°C	-12°C	-12°C	-12°C	0°C	0°C
Depo	表面	109	125	95	86	98	131	113	85	60
	1/4t	94	88	111	88	117	104	102	89	82
	1/2t	108	100	127	96	125	114	118	89	90
Bond	表面	122	101	155	104	102	123	128	83	69
	1/4t	153	137	162	89	100	79	117	113	101
	1/2t	192	125	118	88	118	127	144	155	76
HAZ	表面	163	206	196	215	207	165	171	225	135
	1/4t	195	208	158	174	205	220	189	219	178
	1/2t	184	194	199	137	200	195	192	223	199
破面遷移温度	Depo	表面	-88	-80	-64	-52	-73	-69	-61	-43
	1/4t	-81	-53	-79	-52	-68	-77	-74	-38	-45
	1/2t	-68	-57	-79	-64	-87	-85	-94	-39	-62
Bond	表面	-66	-38	-55	-43	-91	-66	-68	-71	-41
	1/4t	-59	-48	-58	-45	-71	-46	-70	-54	-46
	1/2t	-50	-57	-58	-41	-64	-61	-70	-47	-23
HAZ	表面	-70	-91	-87	-118	-134	-113	-120	<-160	-62
	1/4t	-86	-104	-109	-121	-131	-155	-158	<-160	-107
	1/2t	-55	-91	-110	-135	-118	-133	-128	<-160	<-160

注) 表面：板表面より7mm深の位置

溶接法：SAW, 入熱量45kJ/cmのケース



注) 表面：板表面より7mm深の位置

図-14 繼手衝撃試験結果の例

溶接法：SAW, 入熱量45kJ/cmのケース (板厚位置: 1/4t)

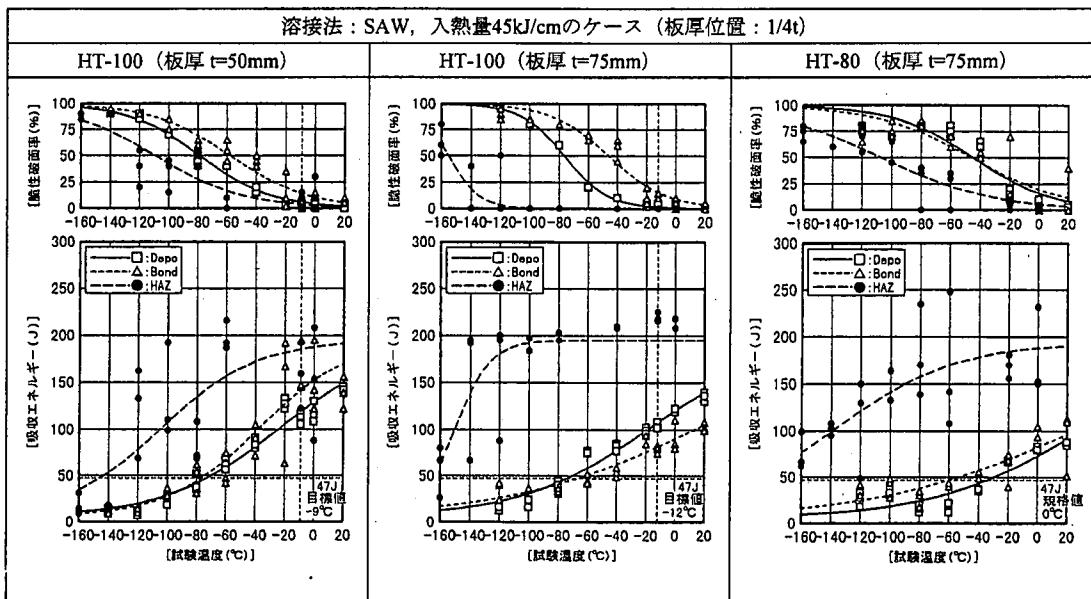


図-15 繼手衝撃試験における遷移曲線の例

そこでHT-100溶接継手ではより実構造物に近い状態における継手強度を確認するため、広幅継手引張試験を実施することとした。

b) 広幅継手引張試験による継手の引張特性

図-12に広幅継手引張試験の供試体形状を、表-11、図-13に試験結果(応力～ひずみ曲線)を示す。

試験方法はJIS Z 2241[1993]金属材料引張試験方法、試験片は旧JIS Z 3127[1977]突合せ継手の広幅引張試験方法によった。

試験結果より、1号試験片による継手引張試験では継手強度が溶接金属引張強度に支配され、引張強さの目標値950N/mm²をわずかに上回る程度であったが、より実構造物に近い広幅継手引張試験による引張強さはいずれも1000N/mm²を超えており一様伸びも母材と同程度となっていることから、実構造物の継手引張特性として問題ないものと考えられる。

(4) シャルピー衝撃試験による継手の韌性

継手のシャルピー衝撃試験用供試体は、K開先で作成した継手より、Depo(溶着金属：deposited metal)・Bond・HAZの各部位から板厚方向に表面(7mm)・1/4t・1/2tの各位置で採取した。なおHAZはBond部から熱影響を受けていない母材部までの幅を有するゾーンであるため代表位置はHAZ中央部として試料採取を行った。試験方法はJIS Z 3128[1996]、試験片はJIS Z 2202[1998]Vノッチ試験片によった。

試験結果は表-12、図-14・15に示すとおりであり、いずれのケースでも目標値を満足している。

また母材のシャルピー衝撃試験結果では製鋼法に起因する板厚方向の韌性差が見られたが、継手シャルピー衝撃試験結果では必ずしも母材と同様な板厚方向の韌性差は認められなかった。これは、Depo部は主として溶接材料の成分設計により韌性が決定されること、Bond部・HAZでは溶接時の複雑な熱サイクルの影響により製鋼時の組織は消滅し、新たに組織が再構成されていることが原因と考えられる。

なお、継手シャルピー衝撃試験では、Bond・Depo部よりもHAZの韌性が高い（ただし個々の試験値のバラツキは大きい）傾向がHT-100継手・HT-80継手ともに認められたが、いずれも目標値（HT-80にあっては規格値）に対し余裕を有した値であり、継手の韌性として問題ないものと考えられる。

(5) CT試験による継手の韌性

継手のCT試験は、継手シャルピー衝撃試験結果より、相対的に韌性の低いBond部・Depo部で行うこととした。供試体は、継手シャルピー衝撃試験と同様K開先継手より採取した。なお、試験方法はWES1108[1995]、試験片はWES1108[1995]標準コンパクト試験片によった。図-16にCT試験片形状を示す。

CT試験については、水圧鉄管における限界CTOD値による継手韌性の評価方法が確立されていないため、既往の評価事例¹¹⁾を参考とした応力拡大係数による評価およびWES2805[1997]に基づく限界CTOD値による評価を、HT-80継手の性能との比較で行った。韌性の評価温度は水圧鉄管の最低使用温度である0℃としている。なお本検討は、絶対値を議論するものではなく、あくまでもCT試験結果により評価した場合、HT-100溶接継手がHT-80溶接継手と同等の安全性を有するか否かの相対的な評価を試みたものであることを追記しておく。

a) 応力拡大係数による評価

ここでは、玉原発電所水圧鉄管におけるHT-80適用検討時の考え方を準じて継手韌性の評価を行った。

まず所要値として、無限長供試体内に長さ80mmの板厚貫通亀裂の存在を仮定し、これに鋼板の0.2%耐力の1/2の引張応力が作用する場合の応力拡大係数所要値Kを次式により算定した。

$$K = \sigma \cdot (\pi \cdot c)^{0.5}$$

ここに K：応力拡大係数所要値(MPa√m)

c : 想定亀裂半長(=0.04m)

σ : 作用応力(N/mm²)

これに対し、継手の破壊韌性値はASTM E1921-97に従いCT試験における荷重～荷重点変位曲線図より求めたJ積分値を用い、次式により算定することとした。

$$K_{Jc} = [E \cdot J_c / (1 - \nu^2)]^{0.5}$$

ここに K_{Jc} : 継手の破壊韌性値(MPa√m)

E : 材料の弾性係数(=206000N/mm²)

ν : 材料のポアソン比(=0.3)

J_c : CT試験における荷重～荷重点変位曲線より求めたJ積分値

上記J積分値は次式により求めた。

$$J_c = Ke^2(1 - \nu^2)/E + \eta \cdot A_p / (B \cdot b_0)$$

ここに Ke : 計算上の破壊韌性値

A_p : 荷重～荷重点変位曲線図下の面積の塑性成分

B : 供試体板厚

b_0 : 初期リガメント

W : 供試体長さ

η : 係数(=2+0.552· b_0/W)

図-17に溶接条件別に上記により求めた継手の0℃における破壊韌性値 K_{Jc} を、表-13に0℃における応力拡大係数所要値Kおよび K_{Jc} の試験最小値を示す。これらより、HT-100、HT-80とも継手の破壊韌性値は応力拡大係数所要値を上回っており、いずれの鋼種・溶接方法でも試験値の最小値がほぼ所要値と同レベルの値となっていることがわかる。

b) 限界CTODによる評価

前述したとおり、水圧鉄管に関しては限界CTOD値による継手韌性評価方法は確立されておらず、また実績として確立されている韌性規定方法としてのシャルピー衝撃試験結果とCT試験による限界CTOD値の関係についても、いくつかの換算式が提案されているが定説が確立されている状況ではないと思われる。このため一つの試みとして、WES2805[1997]に基づき所要の限界CTOD値を算定し、CT試験で得られた限界CTOD値と比較することにより安全性を検証することとした。

WES2805[1997]に基づく限界CTOD所要値の算定方法は以下のとおりである。

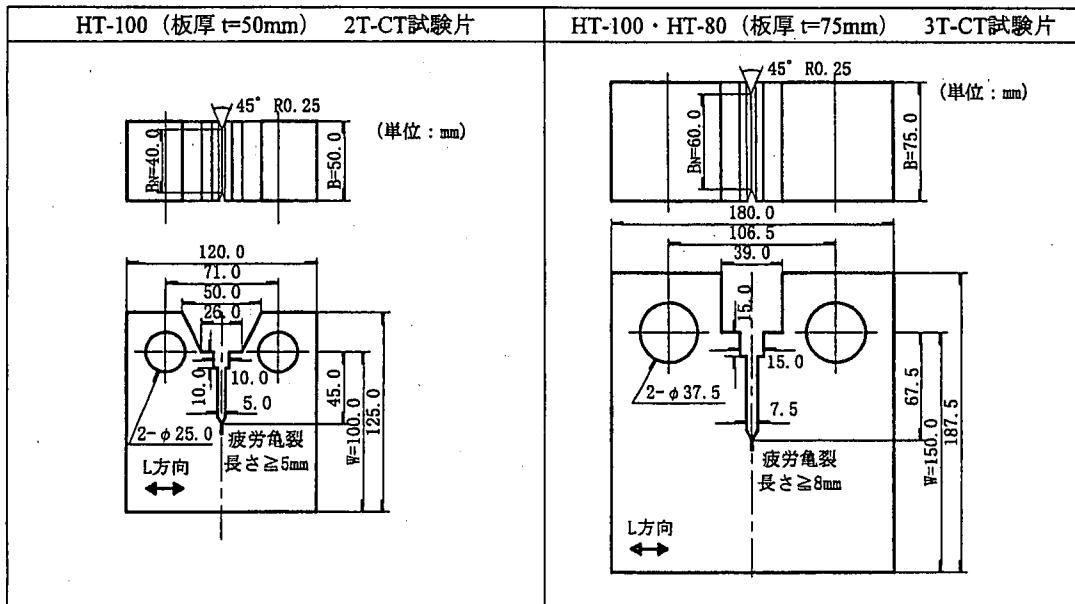


図-16 CT試験片形状

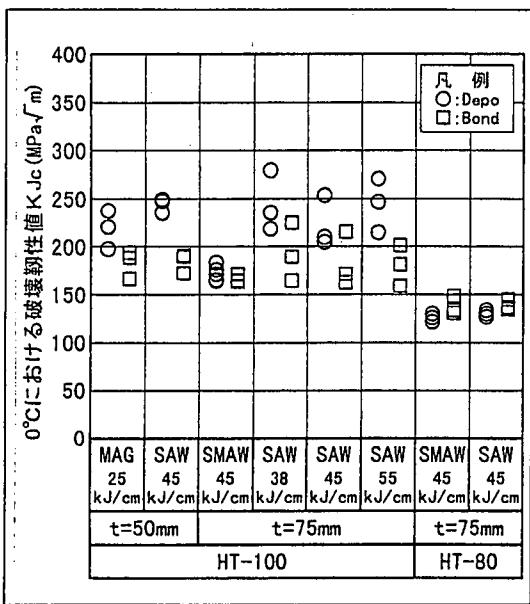


図-17 0°Cにおける破壊靭性値 K_{Jc}

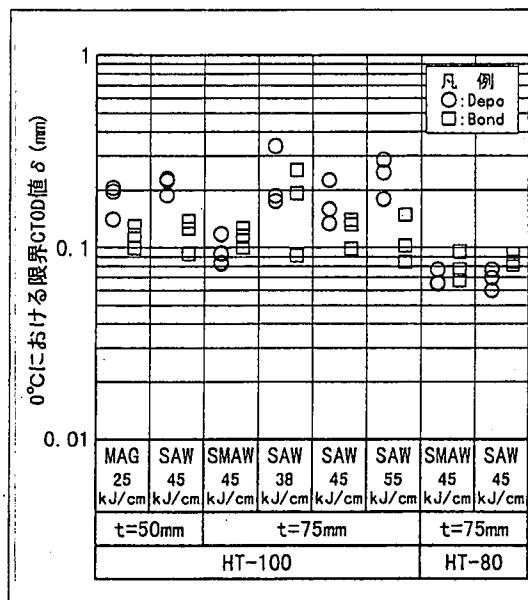


図-18 0°Cにおける限界CTOD値

表-13 0°Cにおける応力拡大係数所要値 K および破壊靭性値 K_{Jc} 試験最小値

鋼種	板厚	0.2%耐力 (N/mm ²)	応力拡大係数 所要値 K (MPa· \sqrt{m})	K_{Jc} 試験最小値 (MPa· \sqrt{m})
HT-100	$t=50\text{mm}$	885	157	167 (MAG, 25kJ/cm, Bond)
HT-100	$t=75\text{mm}$	885	157	159 (SAW, 55kJ/cm, Bond)
HT-80	$t=75\text{mm}$	665	118	122 (SMAW, 45kJ/cm, Depo)

表-14 [ケース1]における0°Cでの限界CTOD所要値と限界CTOD試験最小値

項目	HT-100 (板厚 t=50mm)	HT-100 (板厚 t=75mm)	HT-80 (板厚 t=75mm)
欠陥寸法	亀裂長 2a (mm)	80	80
	亀裂深 b (mm)	50(板厚貫通亀裂)	75(板厚貫通亀裂)
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	885	885	665
使用応力 σ_u (N/mm ²)	442.5	442.5	332.5
限界CTOD所要値 (mm)	0.067	0.067	0.051
限界CTOD試験最小値 (mm)	0.093 (SAW, 45kJ/cm, Bond)	0.083 (SMAW, 45kJ/cm, Depo)	0.060 (SAW, 45kJ/cm, Depo)
試験値と所要値の比	1.388	1.239	1.176

表-15 [ケース2]における0°Cでの限界CTOD所要値と限界CTOD試験最小値

項目	HT-100 (板厚 t=50mm)	HT-100 (板厚 t=75mm)	HT-80 (板厚 t=75mm)
欠陥寸法	亀裂長 2a (mm)	25.0	30.0
	亀裂深 b (mm)	12.5	15.0
使用応力 σ_u (N/mm ²)	400	400	320
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	885	885	665
溶接残留応力	0.6 σ_y	0.6 σ_y	0.6 σ_y
施工誤差	角変形 (mm)	5.5	5.5
	段違い (mm)	2.5	3.0
限界CTOD所要値 (mm)	0.061	0.066	0.053
限界CTOD試験最小値 (mm)	0.093 (SAW, 45kJ/cm, Bond)	0.083 (SMAW, 45kJ/cm, Depo)	0.060 (SAW, 45kJ/cm, Depo)
試験値と所要値の比	1.525	1.258	1.132

$$\delta = \epsilon_y \cdot a_0 \cdot \pi / 2 \cdot (\epsilon / \epsilon_y)^2 \quad : \epsilon / \epsilon_y \leq 1.0$$

$$= \epsilon_y \cdot a_0 \cdot \pi / 8 \cdot [9(\epsilon / \epsilon_y) - 5] \quad : \epsilon / \epsilon_y > 1.0$$

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

ここに各記号の意味は以下のとおりである。

δ : 限界CTOD所要値

a_0 : 亀裂特性寸法。各種亀裂を応力拡大係数の等しい長さ2aの板厚貫通亀裂に置き換えたものであり、亀裂半長a、亀裂深さb、板厚tの関数として算定される。

ϵ_y : 降伏ひずみ

ϵ : 評価ひずみ

ϵ_1 : 使用応力によるひずみ

$$\epsilon_1 = (\sigma_u + H \cdot \sigma_y) / E$$

σ_u : 引張膜応力

σ_y : 曲げ応力

H : 亀裂の性状に応じた係数

E : 鋼材の弾性係数

ϵ_2 : 溶接残留応力によるひずみ

$$\epsilon_2 = \alpha_R \cdot \epsilon_y$$

α_R : 溶接残留応力に関する係数

ϵ_3 : 施工誤差などから生じる応力集中による

ひずみ

$$\epsilon_3 = (K_t - 1) \cdot \epsilon_1$$

K_t : ひずみ集中係数

ここでは2つのケースについて検討を行った。

[ケース1]

まずケース1として、前項a)で述べた玉原発電所水圧鉄管のHT-80適用検討時に対象とした亀裂性状・使用応力を想定して検討を行った。限界CTOD所要値の算定条件は以下のとおりとした。

①想定欠陥寸法

無限長供試体内に長さ80mmの板厚貫通亀裂が存在するものとした。

②使用応力

鋼板の降伏応力(0.2%耐力)の1/2の引張応力が作用するものとした。

③溶接残留応力・施工誤差

理想的な状態を考え、溶接残留応力および施工誤差はないものとした。

[ケース2]

HT-100継手の非破壊検査の合否判定もHT-80継手の非破壊検査合否判定基準と同一のものを用いることを前提に、HT-80継手の超音波探傷試験における合否判定基準である「L検出レベルで2級」に相当する欠陥を許容欠陥寸法として、限界CTOD所要値を算定した。算定条件は以下のとおりとした。

①想定欠陥寸法

前述のとおり、HT-80継手の超音波探傷試験における合否判定基準に相当する欠陥を想定し、板厚50mmの場合には亀裂長25mm、板厚75mm

の場合には亀裂長30mmとした。また亀裂深さについてはWES2805[1997]にしたがって評価した場合、応力的に厳しい条件となる半円形表面欠陥を対象とし、亀裂深さは亀裂長さの1/2とした。

②使用応力

各鋼種の許容応力とした。なおこの試算では直管部を対象として曲げ応力は見込まないこととした。

③溶接残留応力

継手交差部を想定し、WES2805[1997]における溶接線と直角な亀裂の値を採用した。

④施工誤差

施工誤差として水門鉄管技術基準に則り、角変形および段違いを見込んだ。それぞれの値については現状の施工技術から双方が許容上限値の値となる可能性は小さいと考えられることから、水門鉄管技術基準による許容上限値の50%の値とした。

図-18に溶接条件別の0°Cにおける限界CTOD試験値を、表-14・15に[ケース1]および[ケース2]で仮定した限界CTOD所要値と限界CTOD試験最小値を示す。

表-14・15によれば、いずれの試験値も想定した限界CTOD所要値を上回っている。また本検討の所要限界CTOD値はあくまでも試算値であるため、表-14・15には試験最小値と所要値の比についても記載している。これによればHT-100(板厚50mm・75mm)の限界CTOD試験最小値と限界CTOD所要値の比は、いずれもHT-80(板厚75mm)における試験最小値と所要値の比を上回っている。この結果から、HT-100継手は、韌性に関し、限界CTOD値で見てもHT-80継手と同等以上の安全性を有していると推定できる。

8. 結論

①鋼板性能

化学成分については目標値を満足する成分設計が行われていることが確認された。

TMCP法で製造された供試鋼板の機械的性能については、引張特性に関しては製鋼法に起因し板厚中心部から表面に向かい強度が高くなるという板厚方向の性能差が認められ、韌性に関してはTMCPの効果により板表面部での韌性低下は見られないことが確認されたがやはり板厚方向の性能差が認められた。しかしながら、板厚方向いずれの部位の特性値も目

標値を満足していること、水圧鉄管設計の基本となっている全厚状態の特性も目標値を満足していることが確認された。またひずみ時効試験結果より評価した冷間曲げ加工後の引張特性・韌性についても問題ないことが確認された。

②溶接継手性能

SMAW・MAGについては、多層溶接の初層にHT-80用溶接材料を用いることにより、SAWでは特に制約なしに、HT-80と同等の溶接管理条件で、引張特性・韌性とも目標値を満足する継手性能が得られることが確認された。また継手韌性についてはCT試験結果からもHT-100継手はHT-80継手と同等の安全性を有するものと考えられる。

③総合評価

HT-100鋼板およびその溶接継手については「HT-80の延長線上の設計思想で、同等の安全性を有すること」を基本思想として目標性能を設定し、性能確認試験を実施したが、いずれの性能も目標値を満足することが確認された。またHT-100鋼板製造費についても、表-1に示した目標値を「仕様」とした場合について、検討を行った結果、HT-80との許容応力比程度以下に抑えられる見通しが得られている。よって、性能・経済性双方から、今回検討対象としたHT-100鋼板およびその溶接継手の実機水圧鉄管への適用は可能と判断される。ただし鋼板については板厚方向の性能差を有するため、大量生産工程での品質変動の可能性も踏まえ、実工事においては適切な品質管理が必要と考えられる。

9. おわりに

今回の検討は、「HT-80の延長線上で同等の安全性を有すること」を基本設計思想として目標性能を設定し、HT-100の水圧鉄管への適用検討を実施し適用可能との結論を得たが、実工事にあたり適切な品質管理方法を確立させる必要があることが明らかとなったと共に、水圧鉄管においては、許容欠陥寸法と継手韌性規定値の関係の明確化およびこれらを踏まえた要求韌性の低減、終局強度の検討に基づく安全率の低減あるいは限界状態設計法の適用など、更なる合理化に向けた技術課題が残されており、これらについても今後の検討が必要であると考えている。

謝辞：東京電力㈱では、神流川発電所水圧鉄管にHT-100を適用するための諸検討を「HT-100技術検討委員会」を設置し進めてきた。本論文はこの

「HT-100技術検討委員会」での検討成果に基づき作成したものであり、委員会で御指導を頂いた大阪大学接合科学研究所堀川教授、東京工業大学工学部三木教授、東京都立大学工学部岩楯教授、HT-100技術検討委員会メンバー諸氏、試験の実施・結果分析にご協力頂いた三菱重工業㈱・㈱酒井鉄工所・新日本製鐵㈱・住友金属工業㈱の関係諸氏に感謝の意を表するとともに、本論文をまとめるにあたって御指導を頂いた東京大学工学部堀井教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢野清之助, 岡村義弘, 井上尚志, 田辺康児, 前原郷治, 村岡寛英, 豊福昭典, 畠井行彦 : 100kgf/mm²級高張力鋼の開発, 製鉄研究, 第322号, pp.99-115, 1986.
- 2) 松川靖, 有持和茂 : 水圧鉄管用高張力鋼板, 溶接学会誌, Vol.67, No.7, pp.32-35, 1998.10.
- 3) (社)水門鉄管協会 : 水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編 溶接・接合編, 1997.5.
- 4) (社)水門鉄管協会 : 高張力鋼(HT-80)標準仕様および解説, 1980.12.
- 5) (社)水門鉄管協会 : 水門鉄管技術基準 水圧鉄管解説追補, pp.63, 1974.6.
- 6) 堀川浩甫 : 極厚鋼板の引張試験に関する実験研究, JSSC, VOL.8, NO.77, 1972.5.
- 7) 堀川浩甫 : 冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化, 土木学会論文報告集, 第300号, pp.13-20, 1980.8.
- 8) 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 笹尾英弥, 奥村健人, 原修一 : 冷間加工を受けた構造用鋼材の歪み時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.153-162, 1997.7.
- 9) (社)水門鉄管協会 : 水門鉄管技術基準 水圧鉄管解説追補, pp.40-41, 1974.6.
- 10) (社)日本溶接協会 鉄鋼部会 技術委員会 SJ委員会 : 軟質溶接維手の力学的挙動と強度に関する研究(第1報), 1972.3.
- 11) 東京電力㈱ : 玉原発電所 水圧鉄管用80kg/mm²級高張力鋼とその溶接施工に関する検討報告書, 1979.4.

(2000.3.31受付)

STUDY FOR THE APPLICATION OF HIGH TENSILE STEEL(HT-100) TO PENSTOCK

Yoshifumi NISHIWAKI, Toshio MAEJIMA and Katsutoshi KUBOTA

In Japan, the application of High Tensile steel superior to HT-80 to penstock has been hoped because of the reduction of construction cost. Therefore, the researches on higher tensile steel HT-100, which has the tensile strength more than 950N/mm², have been carried out in the electric power companies, the mills and the fabricators.

This paper describes the required properties, performance and suitability of the HT-100 plate and that weld joint for penstock, produced by the latest technique and based on the past researches and development.