

© 1984 ISIJ

耐溶融亜鉛ぜい化特性に優れた送電向け鋼管 鉄塔用 60kgf/mm² 鋼材の開発

技術報告

生駒 勉*・小島 修*²・畠山耕太郎*²金沢 正午*³・広木 光雄*³・家沢 徹*⁴

Development of Steel HT60 with Low Susceptibility to Liquid Zinc Embrittlement for Power Transmission Tower

Tsutomu IKOMA, Osamu KOJIMA, Kotaro HATAKEYAMA,
Shogo KANAZAWA, Teruo HIROKI and Toru IEZAWA

Synopsis :

New steels HT60 whose goal is weight reduction, rationalization of fabrication and construction of power transmission tower are developed. In hot dip galvanizing process, weld heat affected zone cracking occurs occasionally due to liquid zinc embrittlement of steel. The larger the scale of fabricated sub-assembly for hot dip galvanizing, the larger is the thermal stress arised during the process. Improvement of susceptibility to liquid zinc embrittlement becomes, then, more important in development of new steels to be employed for larger scale tower.

This report describes 1) an estimation of weight reduction of tower by employing HT60 steels, 2) establishing test methods for assessment of liquid zinc embrittlement of steel, 3) effect of alloying elements on liquid zinc embrittlement of steel, and 4) properties of steel pipes, plate and flange developed based on the results of studies above mentioned.

New steels HT60 have satisfactory mechanical properties and weldability together with low susceptibility to liquid zinc embrittlement, and are favorable for the large scale power transmission tower application.

1. 緒 言

送電鉄塔の大型化の趨勢をふまえ、その重量軽減すなわち鉄塔の製作と建設に対する総合的合理化を目的とし、現在鉄塔用鋼材として広く用いられている STK 55 鋼管、SM 50 鋼板より、高強度かつ耐溶融亜鉛ぜい化特性に優れた送電鉄塔用 60 kgf/mm² 鋼の開発を行った。

鉄塔用鋼材は、溶接施工後に防食処理として溶融亜鉛めつきを行うが、溶融亜鉛中における鋼の液体金属ぜい化¹⁾により、ときに溶接部にわれを生じる場合がある。

この溶融亜鉛によるぜい化と鋼材の特性との関係については、いまだ研究のつみあげが十分ではなく、特にめつき時に発生する熱応力がより大きくなる大型鉄塔への適用を前提とする 60 kgf/mm² 鋼の開発においては、耐溶融亜鉛ぜい化特性の向上が重要な課題であり、開発においてはこの特性を重視した。

以下に、鋼材開発に先立つて試算した 60 kgf/mm² 鋼適用による鋼管鉄塔の重量減少比、耐溶融亜鉛ぜい化特性についての評価試験法と合否基準の設定、この設定基準を満足するための鋼材合金成分設計の検討およびこれらの結果にもとづいて製造した送電鉄塔用 60 kgf/mm² 鋼材の特性について報告する。

2. 開発目標および 60 kgf/mm² 鋼適用による重量減少比

Table 1 に鋼管および鋼板の開発目標特性を示す。この 60 kgf/mm² 鋼 (以下、新 HT 60 鋼) の強度、靱

Table 1. Aimed properties.

Mechanical properties			Test in molten Zn			
Base metal			Fillet	Restraint	Base metal	
Y.P.	T.S.	$\sqrt{E-s}$	weldment	weldment	El. ₂	R.A. ₂
kgf/mm ²	kgf/mm ²	kgf·m	σ_{Zn}	20 passes	%	%
≥45	≥60	≥4.8	≥40	No cracking	≥20	≥25

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 日本鋼管(株)中央研究所 (現: 日本鋼管(株)技術サービス部) (Technical Research Center, Now Technical Service Dept., Nippon Kokan K. K., 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku 100)

*² 日本鋼管(株)中央研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*³ (株)巴組鉄工所 工博 (Tomoeogumi Iron Works, Ltd.)

*⁴ (株)巴組鉄工所 (Tomoeogumi Iron Works, Ltd.)

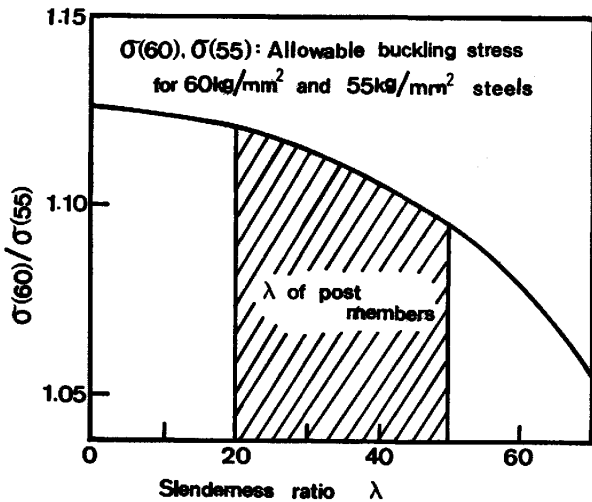


Fig. 1. Increasing of allowable buckling stress in case of STK55 replaced by HT60 steel pipe.

性は WES HW 45 規格に準拠しているが、前述の耐溶融亜鉛ぜい化特性に対し明確な目標を設定したところに特徴がある。Table 1 の耐溶融亜鉛ぜい化目標特性については次章で述べる。引張強さ 60 kgf/mm² に対し降伏強さを 45 kgf/mm² としたのは、降伏比が 90% を超えないように留意したことによる。また、目標強度を 60 kgf/mm² とした理由は、種々検討の結果、耐溶融亜鉛ぜい化特性および鉄塔製作の経済面から 70~80 kgf/mm² 鋼の開発は時期尚早であり、現状では非調質 60 kgf/mm² 鋼がもつとも実現可能性が高いと結論したためである。なお、60 kgf/mm² 鍛造フランジについては後述する。

つぎに、新 HT 60 鋼を使用した鉄塔設計の一例を示す。考え方として、まず、現行 STK 55 使用の鋼管をすべて新 HT 60 鋼に代える。鋼管部材の設計はそのほとんどが座屈強度で決定され、Fig. 1 に示すように細長比 λ† が小さいほど新 HT 60 鋼使用の強度上昇比率が大きく、従つて重量減少効果大きい。図中、ハッチで示したのは支柱材の λ の範囲である。次に、鋼板は、現行 SS 41 使用の中で 16 mm 以上および SM 50 はすべて新 HT 60 鋼に代える。鍛造フランジは、SM 50 相当鋼をすべて HT 60 鋼に代える。

以上の考え方にもとづき、新 HT 60 鋼使用の 500 kV、および今後の 1100 kV 送電鉄塔の試設計を行い重量減少比率を算出したのが Table 2 である。もちろんこれは一設計例であり、普遍的なものではないが、大型鉄塔に対する大略の重量減少比を示している。すなわち

Table 2. Weight reduction ratio of power-transmission tower by employing HT60 steels compared with using conventional steels.

	Tower Type	For 500kV		For 1100kV	
		A	F	A	K
	Height	79.5m	105.5m	142.0m	130.5m
	Weight	143.5 t	224.5 t	326.5 t	507.0 t
Shapes and Pipes	SS41, SS55 ⁽²⁾	1.0	1.0	1.0	1.0
	STK41 ⁽²⁾	1.0	1.0	1.0	1.0
	HT60 ⁽³⁾	0.95	0.91	0.92	0.95
	A total	0.98	0.96	0.96	0.97
Plates	SS41 ⁽²⁾	1.0	1.0	1.0	1.0
	HT60 ⁽⁴⁾	0.69	0.69	0.71	0.73
	A total	0.82	0.87	0.87	0.85
Forged flanges	SS41 Mod. ⁽²⁾	1.0	1.0	1.0	1.0
	HT60 ⁽⁴⁾	0.86	0.89	0.91	0.92
	A total	0.87	0.89	0.92	0.93
Bolts	(2)	1.0	1.0	1.0	1.0
Total		0.92	0.94	0.94	0.93

- (1) A : Suspension type, F and K : Strain type
- (2) Leave as it is.
- (3) STK55 replaced by HT60
- (4) SM50 and SM50 Mod. replaced by HT60

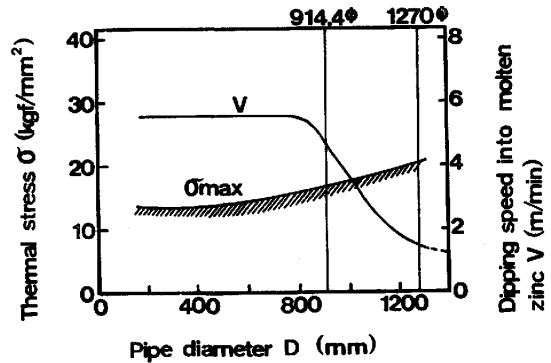


Fig. 2. Relations between pipe diameter and dipping speed into molten zinc and thermal stress.

鋼管で 5~9%、鋼板で約 30%、鍛造フランジで約 10%、鉄塔 1 基当たりの総重量で 6~8% の重量減となり、鉄塔製作と建設全体の合理化は十分可能であると考え。

3. 耐溶融亜鉛ぜい化特性の評価試験方法

溶融亜鉛めつき時に発生する組立てフランジまたは取り付け部材すみ肉溶接熱影響部のわれを抑制する性能（以下、耐溶融 Zn われ性）について、このわれの力学的要因が亜鉛めつき時に生じる熱応力と溶接残留応力であることを考慮し、以下の 3 種類の試験方法と、現用鋼を含めての合格基準を設定した²⁾。

3.1 十字すみ肉継手除荷法試験（熱応力を対象）

板厚 9 mm の十字すみ肉継手試験片を溶融亜鉛中で各水準の応力まで引張つた後、われ発生の有無を検査し、われ発生限界応力 (σ_{zc}) を求める試験である。合否基準の設定に先立ち、各種サイズおよび構造の鋼管鉄塔部材について、有限要素法により溶融亜鉛めつき浸せき時の熱応力解析を行つた。解析の手法および結果の詳

† λ = l/i, l: 長さ, i: 断面二次半径, i = √I/A
 A: 断面積, I: 断面二次モーメント
 I = π(D-D')⁴/64, D: 外径, D': 内径

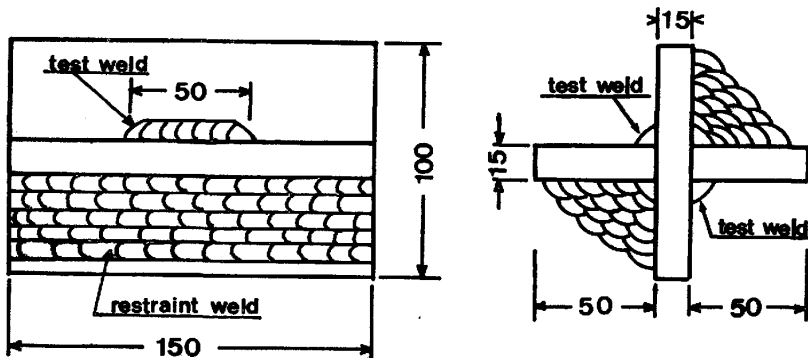


Fig. 3. Restraint weldment test specimen for dipping test in molten zinc.

細は既報文献¹⁾のとおりであるが、Fig. 2 に示すとおり、鉄塔部材の大型化に伴う作業上の制約によって浸せき速度が低下すると共に、発生する最大熱応力が増大する。また、代表部材について熱応力の実測を行い、計算値とよく一致することを確認した。

十字すみ肉継手除荷法試験の合格基準は Fig. 2 の最大応力の 2 倍の値、すなわち STK 55 を使用する従来鋼管サイズ 914.4 mm 以下は $\sigma_{zc} \geq 35 \text{ kgf/mm}^2$ 、さらに大型の鉄塔への適用を前提とする新 HT 60 鋼は $\sigma_{zc} \geq 40 \text{ kgf/mm}^2$ でわれ無しとした。最大応力の 2 倍を合格基準としたのは、浸せき途中で止めるなどのめつき作業上の問題および溶接残留応力の影響を考えたためである。

3.2 拘束継手試験（溶接残留応力を対象）

Fig. 3 に試験片の形状を示す。1パスの試験溶接 (170 A-24 V-15 cm/min, 16 kJ/cm) を多層溶接により拘束し、これを溶融亜鉛中に 10 min 浸せきしてわれの有無を検査する試験法で、極めて厳しい試験である。拘束ビード数が 10 パスの場合、試験溶接部に作用する残留応力は母材降伏強さの約 80%、20 パスの場合は約 100% に達する。合格の基準は、現用鋼管径までは 10 パスでわれ無し、大型サイズを想定した新 HT 60 鋼は 20 パスでわれ無しとした。

3.3 溶融亜鉛中における母材の延性試験

母材へのわれの進行を阻止する性能を評価する試験法で、JIS 12 号試験片を用い溶融亜鉛中で引張試験を行いその延性値を測定する。合格の基準は、現用鋼の実績値から現用鋼管径までは伸び 15% 以上、絞り 20% 以上、新 HT 60 鋼では伸び 20% 以上、絞り 25% 以上とした。

4. 耐溶融亜鉛ぜい化特性と合金成分設計

新 HT 60 鋼の合金成分と製造法を決定するため、鋼材の耐溶融亜鉛ぜい化特性についての検討を行った。

Table 3. Chemical analyses of test materials (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	B
Base	0.05	0.15	1.75	0.008	0.003	0.02	0.05	0.02	0
Level* I	0.02	0.25	1.20	0.015		0	0	0	0.0010
II	0.10	0.45	1.40	0.025		0.06	0.10		0.0030
III	0.15		1.95						

* Shifted levels of respective elements

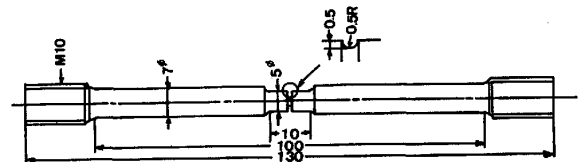


Fig. 4. Notched bar tensile test specimen for simulation of thermal cycle of HAZ.

まず、溶接熱影響部の耐溶融 Zn われ性について、Table 3 に示す Base 成分および Base 成分の 1 または 2 成分を Table 3 に示す各レベルに変動した供試鋼を準備し、溶接熱サイクル再現装置により所定の熱履歴を与えた後、Fig. 4 に示す切り欠き付試験片を作製し、450°C の空気中および溶融亜鉛中でクロスヘッド速度 0.2 mm/min で引張試験を行った。耐溶融亜鉛われ性は、次式で定義する脆化比により評価した。

$$\text{脆化比} = \frac{450^\circ\text{C 溶融亜鉛中の引張強さ} (\sigma_z)}{450^\circ\text{C 空気中の引張強さ} (\sigma_{\text{air}})}$$

検討の結果、次の結論を得た。

- (1) Fig. 5 に示すように、溶接熱影響部の耐溶融 Zn われ性の指標とした脆化比は、かたさと対応する。
- (2) 一方、熱影響部のかたさと化学成分の関係について、以前の研究結果²⁾に B の影響を検討追加し、次の式を得た。

板厚 15 mm、溶接入熱 16 kJ/cm のすみ肉溶接において、

$$\text{熱影響部のかたさ (HV)} = 980 \cdot \text{CEP} + 48$$

$$\text{CEP} = \%C + \frac{\%Mn}{13} + \frac{\%Ni}{29} + \frac{\%Cr}{17} + \frac{\%Nb}{7} + f(B)$$

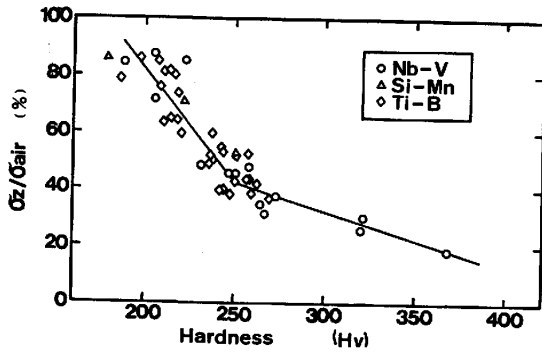


Fig. 5. Relation between hardness and degree of liquid zinc embrittlement. Test results of notched bar tensile test in air and in molten zinc.

$$f(B) = \begin{cases} 0 & (B < 0.0005\%) \\ 0.04 & (B \geq 0.0005\%) \end{cases}$$

ただし、上式の適用は以下の化学成分範囲とする。

- C : 0.02~0.16%, Si : 0.10~0.50%,
- Mn : 0.80~2.00%, Cu : 0~0.40%,
- Ni : 0~0.50%, Cr : 0~0.60%,
- Mo : 0~0.50%, Nb : 0~0.10%,
- V : 0~0.10%, B : 0~0.0010%

上記により、耐熔融 Zn われ性の指標とした脆化比と鋼材化学成分指数 CEP 値の関係が得られたので、次に、設定した基準を満足する脆化比、すなわち鋼材の CEP 値についての定量的検討を行った。検討には、耐熔融 Zn われ性試験の中でより厳しい Fig. 3 に示す拘束モード数 20 パスの拘束継手試験を用いた。

Fig. 6 に試験結果を示す。この結果、定義した脆化比と拘束継手試験結果の間には比較的良好な相関が認められると共に設定基準に合格するためには脆化比 39% 以上、すなわち鋼材の CEP 値を 0.22% 以下にしなければならないと結論した。この場合、溶接熱影響部のかたさは 270 HV 以下となる。

次に、熔融亜鉛中における母材の延性について検討を行った。供試鋼は熱影響部の検討に用いたものから選び、平行部径 4mm の丸棒試験片を作製し、熔融亜鉛中および空气中で引張試験を行い、以下の知見を得た。

(1) 熔融亜鉛中での母材の延性は主としてマイクロ組織に依存し、化学成分はどのようなマイクロ組織をつくるかという意味の間接的要因である。

(2) Fig. 7 に一例を示すように、熔融亜鉛中での延性はベイナイト組織がもつとも大きく、次いでアキシユラーフェライト、フェライト・パーライト組織の順となる。Photo. 1 に熔融亜鉛中での引張破断部の例を示す。

(3) フェライト・パーライト組織の中では、パーラ

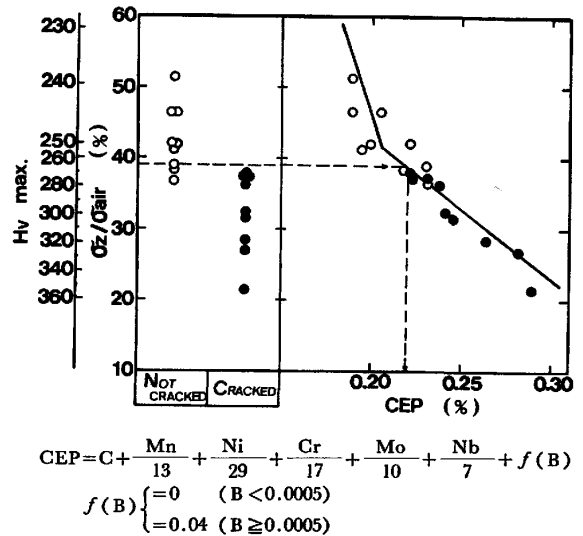


Fig. 6. Summary of restraint weldment test results in molten zinc. Upper limit of CEP for preventing crack : under 0.22%

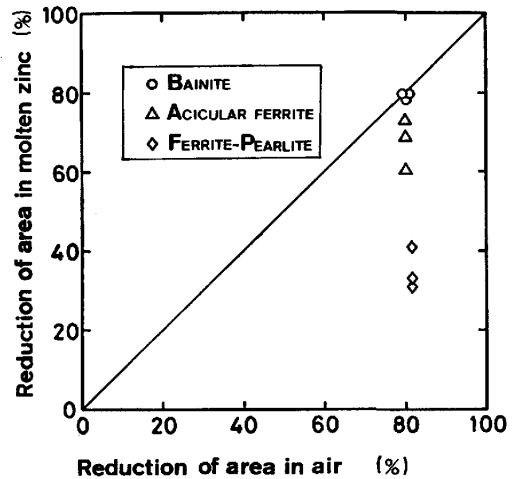


Fig. 7. Comparison of base metal ductility tested in air and in molten zinc.

イト量の少ない低C鋼、フェライト粒が圧延方向に展伸したものは熔融亜鉛中での延性が高い側となる。

上記の結果をふまえ、さらに合否基準との対応について定量的検討を行った。その結果、ベイナイト組織およびアキシユラーフェライト組織の場合は安定して基準値を満足するが、フェライト・パーライト組織の場合は基準値を満足し得ない場合もある。また、引張強さ 60 kgf/mm² を得るには、ベイナイト鋼よりもアキシユラーフェライト鋼の方が CEP 値を小さくすることができる。従つて、新 HT 60 鋼は、CEP 値 0.22% 以下のアキシユラーフェライト組織を有する鋼材とすべきであると結論した。

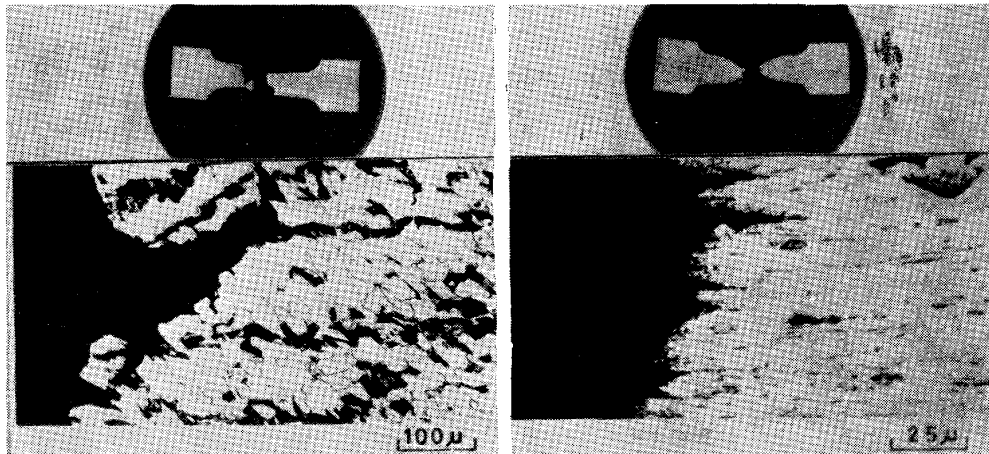


Photo. 1. Fracture appearance of tensile test specimens tested in molten zinc.
Left : Ferrite-pearlite steel, Right : Bainite steel

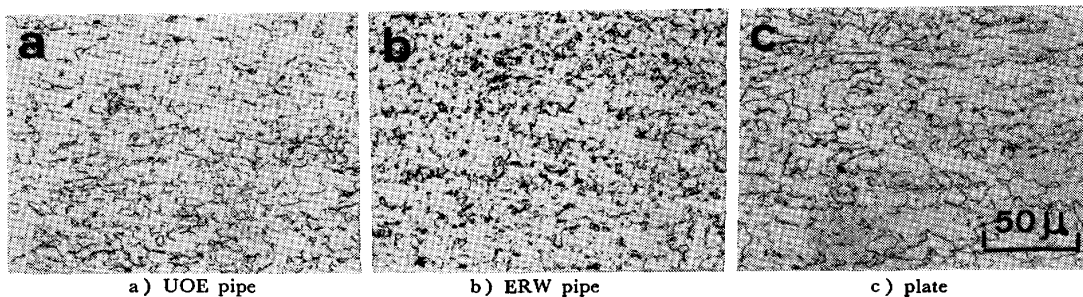


Photo. 2. Microstructure of developed steels.

Table 4. Chemical analyses of developed steels (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	Ceq.	CEP
UOE pipe	0.05	0.24	1.60	0.017	0.001	0.029	0.073	0.014	0.030	0.33	0.18
ERW pipe	0.09	0.21	1.35	0.018	0.003	0.036	0.035	0.014	0.028	0.33	0.20
Plate	0.07	0.24	1.54	0.020	0.001	0.031	0.078	0.011	0.026	0.34	0.19

Table 5. Mechanical properties of developed steels.

	Y.P. kgf/mm ²	T.S. kgf/mm ²	El. (%)	Y.R. (%)	$\sqrt{E-20}$ kgf·m	σ_{T_E} °C
UOE pipe	56.5	66.7	36	85	35.0	-70
ERW pipe	56.4	66.0	29	85	14.6*	-72
Plate	50.9	62.3	38	82	29.1	-80

* 5mm sub-size specimen

5. 新 HT 60 鋼管, 鋼板の特性

前章の検討結果をふまえ, 250t 転炉溶製, 制御圧延により新 HT 60 鋼管, 鋼板を製造し, その確性試験を行った。製造した鋼材は, アーク溶接 (UOE) 鋼管: 外径 609.6mm×管厚 16.0mm, 電縫 (ERW) 鋼管: 外径 267.4mm×管厚 7.0mm, 鋼板: 22.0mm である。

Table 4 に鋼材の化学成分を示す。いずれも低 C-Nb-V-Ti 系で, CEP 値は目標値の 0.22% を下まわっている。Photo. 2 に示すように, ミクロ組織はいずれもアシキュラーフェライト組織である。Table 5 に機

Table 6. Liquid zinc embrittlement susceptibility test results of developed steel.

Fillet weldment σ_{sc} kgf/mm ²	Restraint weldment 20 passes	Base metal	
		El. %	R.A. %
46	Not cracked	26	41

械的特性を示す。強度, 衝撃値は目標値を満足し, 特に, 低 C で細粒鋼の新 HT 60 鋼は, 優れた衝撃特性を有している。

Table 6 に板厚 16mm の UOE 管用鋼板の耐溶融亜鉛ぜい化試験の結果を示す。試験の結果はいずれも設定した基準に合格するものである。

新 HT 60 鋼の溶接性を調べるために, 板厚 16mm の UOE 管用鋼板および板厚 22mm の鋼板の斜め Y 形溶接われ試験を行った。われ防止予熱温度は, 両者共室温以下であり, 新 HT 60 鋼は溶接性にも優れていることを確認した。

Table 7. Chemical analysis of developed forged flange (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq.
0.11	0.26	1.24	0.020	0.001	0.20	0.13	0.17	0.22	0.038	0.42

Table 8. Properties of developed forged flange.

Test	Mechanical properties Base metal			Fillet weldment σ_{wc} kgf/mm ²	Tests in moten Zn Restraint weldment 20 passes	Base metal	
	Y.P. kgf/mm ²	T.S. kgf/mm ²	σ_{Eo} kgf·m			El. ₂ %	R.A. ₂ %
Top of hub	55.8	66.5	26.9	44	Not cracked	15	22
Core of flange	52.4	63.3	28.6				

その他、各鋼材について行つた高サイクル疲労試験、鋼管の座屈試験、亜鉛の付着量などを調べるめつき性試験、突合せおよび前面すみ肉溶接継手試験の結果はすべて良好であった。

以上、新 HT 60 UOE 鋼管、ERW 鋼管、鋼板は、目標とした機械的特性および耐溶融亜鉛ぜい化特性を満足すると共に、溶接性にも優れた特性を有することを確認した。

6. 60kgf/mm² 鍛造フランジ

鋼管との強度協調と重量軽減を目的とし 60 kgf/mm² 鍛造フランジの開発を行い、ひきつづいて試設計にもとづき製造した鍛造フランジを供試体として、実大モデル試験体の疲労試験、静的破壊試験をはじめとする確性試験を行つた。

焼入れ焼もどし処理を行つて製造した鍛造フランジは、外径 609.6 mm、管厚 16.0 mm 鋼管用で、フランジ部厚さ 77.5 mm、1 個の重量が約 200 kg のものである。Table 7 に化学成分、Table 8 に機械的特性および参考として行つた耐溶融亜鉛ぜい化試験の結果を示す。溶融亜鉛めつき時に、フランジと管の突合せ溶接部に生じる熱応力は比較的小さい。従つて、鍛造フランジの耐溶融亜鉛ぜい化特性は、前述の鋼管、鋼板に課したと同等の厳しい基準を満足する必要はないが、試験の結果は Table 8 に示すとおり良好である。

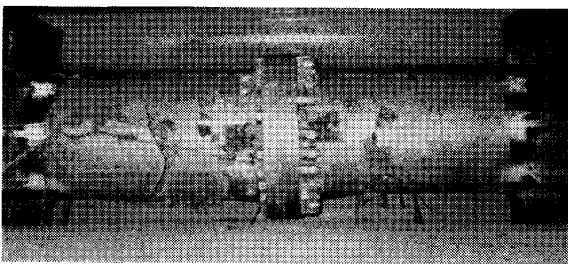


Photo. 3. Rupture appearance of actual scale flange joint model in static tension test.

実大モデル試験体は、上記の鍛造フランジと長さ約 800 mm の外径 609.6 mm の UOE 鋼管を突合せ溶接したものを 2 組をボルトで接合した全長約 2500 mm のものである。試験は 5000 t テストリグを用い、許容設計荷重 P_0 (鋼管の断面応力 28.0 kgf/mm²) に対し、下限荷重 0.5 P_0 、上限荷重 1.5 P_0 、繰返し数 3000 回の片振疲労試験を行つた後、静的破壊実験を行つた。疲労試験後、試験体溶接部の超音波探傷、染色探傷検査を行つたが異常は認められなかつた。Photo. 3 に示すように、静的破壊試験では鋼管部で破断し、破断応力は UOE 鋼管引張強さと同等の 65.1 kgf/mm² であつた。

以上、実大モデルの試験を含む確性試験の結果、新しく開発した 60 kgf/mm² 鍛造フランジは、送電鉄塔用鋼材として良好な特性を有することを確認した。

7. 結 言

送電鉄塔の大型化に対処するべく、耐溶融亜鉛ぜい化特性に優れた新 HT 60 鋼の開発を行い、以下の結論を得た。

- (1) HT 60 鋼の採用は、鉄塔重量を軽減し、製作、建設の合理化に大きく貢献すると考える。
- (2) 鋼材の耐溶融亜鉛ぜい化特性の評価試験法および合否基準を設定した。
- (3) 溶接熱影響部の耐溶融 Zn われ性はかたさとの良い相関がある。一方、熱影響部のかたさは化学成分指数 CEP 値の関数として定まる。すなわち、CEP 値の低減は、溶接熱影響部の耐溶融 Zn われ性向上に有効である。
- (4) 母材の溶融亜鉛中での延性はマイクロ組織に依存し、ベイナイト組織、アンキュラーフェライト組織の鋼材は、フェライト・パーライト組織の鋼材よりも延性が高い。
- (5) CEP 値 0.22% 以下で、かつ、アンキュラーフェライト組織を有する新 HT 60 鋼管、鋼板は、開発に際して設定した機械的特性、耐溶融亜鉛ぜい化特性の合否基準を満足すると共に、溶接性にも優れ、大型送電鉄塔用鋼材として十分満足できる特性を有する。

(6) 同時に開発を行つた 60 kgf/mm² 鍛造フランジも、送電鉄塔用鋼材として良好な特性を有する。

最後に、開発にあたり終始御指導をいただいた東京工業大学藤本盛久教授ならびに東京電力(株)山岸啓利課長に深謝申し上げます。

文 献

- 1) 菊池昌利, 家沢 徹: 日本造船学会論文集, 149 (1981), p. 298
- 2) 金沢正午, 菊池昌利, 家沢 徹, 杉崎六朗: 鉄と鋼, 69 (1982), S 681
- 3) 渡辺 正, 畠山耕太郎: 溶接学会全国大会講演概要, 第 26 集 (1980), p. 40
- 4) 生駒 勉, 畠山耕太郎, 小指軍夫, 新倉正和, 山本定弘: 鉄と鋼, 69 (1983), S 679