
ラメラテア感受性の低い 50kg/mm² 級鋼板の製造

On the Production of HT50 Steel Plates with Low Susceptibility to Lamellar Tearing

榎並 禎一 (Teiichi Enami) 森 徳明 (Tokuaki Mori) 三宮 好央 (Yoshifumi Sannomiya) 青柳 信男 (Nobuo Aoyagi) 山本 武美 (Takemi Yamamoto) 上田 新 (Arata Ueda)

要旨：

通常工程で製造された 50kg/mm² 級鋼のラメラテアと板厚方向延性について調べ、硫化物系介在物が小さく、少ないほど板厚方向絞りは増加し、ラメラテア感受性が改善されることがわかった。これらの結果をもとにして、LD-RH あるいは ASEA-SKF 工程により、0.004～0.006% S の鋼板を製造した。これらの鋼板は 55%以上の板厚方向絞りを有し、特にその中の 1 枚は、板厚方向を含めて引張特性の異方性がまったく認められなかった。これらの鋼板は、通常の溶接条件ではラメラテアに対して安全であった。

Synopsis：

Lamellar tearing and the short-transverse tensile ductility of 50kg/mm² class tensile strength steel plates produced by ordinary processes have been studied. Decreases in contents and sizes of sulfide inclusions result in a increase of the reduction of area in short-transverse tensile test, with further reduction in lamellar tearing susceptibility. The plates with 0.004-0.006%S were produced using LD-RH or ASEA-SKF processes on the basis of above mentioned results. These plates had more than 55% in the short-transverse reduction of area, especially one of them had no anisotropy of tensile properties including the short-transverse direction. These plates were safe from lamellar tearing on the usual condition of welding.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

ラメラテア感受性の低い 50kg/mm² 級鋼板の製造On the Production of HT50 Steel Plates with Low
Susceptibility to Lamellar Tearing

榎 並 禎 一*

Teiichi Enami

森 徳 明*

Tokuaki Mori

三 宮 好 央**

Yoshifumi Sannomiya

青 柳 信 男***

Nobuo Aoyagi

山 本 武 美****

Takemi Yamamoto

上 田 新*****

Arata Ueda

Synopsis:

Lamellar tearing and the short-transverse tensile ductility of 50kg/mm² class tensile strength steel plates produced by ordinary processes have been studied.

Decreases in contents and sizes of sulfide inclusions result in an increase of the reduction of area in the short-transverse tensile test, with further reduction in lamellar tearing susceptibility.

The plates with 0.004~0.006%S were produced using LD-RH or ASEA-SKF processes on the basis of above mentioned results. These plates had more than 55% in the short-transverse reduction of area, especially one of them had no anisotropy of tensile properties including the short-transverse direction.

These plates were safe from lamellar tearing on the usual condition of welding.

1. 緒 言

船舶、海洋構造物、高層建築などの大型溶接構造物に用いられる角継手、T継手あるいは十字継手では、拘束条件が厳しい場合、溶接熱影響部にラメラテアと呼ばれる溶接割れが発生しやすいことが知られている¹⁻⁴⁾。

最近、これら構造物の大型化に伴い、使用される鋼材の板厚増加、高張力化や複雑な継手構造の採用などが進むにつれてこのような割れが重要視

され、この現象に関する多くの研究が行われるようになった⁵⁻¹⁰⁾。

ラメラテアはテラスと呼ばれる鋼板表面に平行な割れと、ウォールと呼ばれるこれらをつなぐ部分とが全体として階段状につながった割れであり、破面は非金属介在物を含む低延性破面である²⁾。このような割れの方向性から、ラメラテアは鋼板の板厚方向特性、特に板厚方向延性の劣化によるところが大きいとされている^{1,2)}。

圧延鋼板の機械的性質が異方性を持つこと、特に引張試験における伸び、絞りなど、延性破壊の

* 技術研究所水島研究室主任研究員
*** 水島製鉄所管理部検査課(現 管理部薄板管理課)
***** 水島製鉄所製鋼部

** 水島製鉄所管理部厚板管理課
**** 水島製鉄所製鋼部電炉課掛長

限界ひずみに相当する特性が、板厚方向では圧延方向、圧延直角方向に比べて低いことは古くから知られており¹¹⁾、これは熱間圧延によって変形する硫化物系非金属介在物が主因と考えられている¹²⁾。

また、超音波探傷では欠陥が検出されない鋼板でも溶接後ラメラテアが生じることから、ラメラテアの発生に対して溶接が重要な要因であることは明らかであり、この場合の溶接の悪影響として、①溶接熱サイクル、溶接金属の収縮にともなう応力の発生^{2, 3, 5)}、②溶接による水素の導入⁸⁾、③材質の変化¹³⁾、などが考えられている。

ラメラテアの発生機構についても最近いくつかの研究が報告されており、大別すると

- (1) 溶接直後に非金属介在物とマトリックスとの界面がはく離し、時間とともにこれら微小クラックが連結していくと考えられるもの^{10, 14)}
- (2) 溶接後かなり時間が経過したのち割れを発生する遅れ割れ的な発生過程をたどるもの^{8, 14)}
- (3) ルートクラック、トウクラックなどが伝播の過程でラメラテア的な形態を示すもの^{10, 14)}などに分けられる。

(1) は典型的なラメラテアであり、非金属介在物密度の高い鋼板に多く、(2) はむしろ水素による低温割れであることが破面観察から知られている。

ラメラテア防止対策はこのような発生機構の違いを考慮してたてられるべきである。この場合、(1) に対しては主として鋼材の改善が、(2) および (3) に対しては鋼材側での低温割れ対策や、溶接施工時の水素低下、予熱などが効果的と考えられる。

ラメラテアの発生は鋼材の特性と溶接施工条件の両者の影響を受けるから、鋼材のラメラテア発生傾向は溶接という過程を含めた試験法で評価されなければならない。このような試験法として、クランフィールド試験⁷⁾、Z 窓型拘束割れ試験⁶⁾のほか一般の溶接割れ試験に用いられる RRC 試験⁹⁾、定ひずみ試験¹⁵⁾あるいはインプラント試験¹⁶⁾などが利用されている。

これらの試験法はラメラテアの発生限界を正しく定量的に把握するためには適しているが、鋼材の工程試験としては複雑すぎて適当ではなく、後者の目的のための試験として、板厚方向試験片による引張試験、衝撃試験¹⁷⁾およびスライスペンド

試験¹⁸⁾などが行われている。

そして、前記 2 グループの試験成績間の相関関係あるいは事故例の解析などから、鋼材のラメラテア特性を板厚方向試験により判定する基準がいくつか提案されている。そのほとんどは板厚方向絞りによる方法であるが、このほかこれと S 含有量¹⁹⁾あるいは絞り比²⁰⁾とを組合せる方法も提案されている。この場合、採用される板厚方向絞りの下限値は通常 15~25% の範囲である。

しかし、今までに明らかにされているラメラテアについての研究結果から考えると、ラメラテア防止のための鋼材の要求特性は溶接時の水素量および拘束度に応じて定められるべきであり、最近この点を考慮した提案もなされている¹⁹⁾が、今後の研究に待つところが多い。

ここでは当社製 50kg/mm² 級鋼について、ラメラテア試験としてクランフィールド試験および Z 窓型拘束割れ試験を、また板厚方向特性試験として丸棒試験片による板厚方向引張試験、スライスペンド試験をそれぞれ行って、両者の関係を調べるとともに、板厚方向絞りにおよぼす鋼板製造条件の影響を調査した。さらにその結果にもとづいて耐ラメラテア鋼板を製造し、ラメラテア特性を調査した。

2. 50kg/mm² 級鋼のラメラテア特性および板厚方向特性

2.1 ラメラテア特性と板厚方向特性との関係

板厚 30~32mm の 50kg/mm² 級鋼を用いて、圧延のままで、クランフィールド試験、Z 窓型拘束割れ試験、丸棒試験片による板厚方向引張試験およびスライスペンド試験を行った。

クランフィールド試験は Fig. 1 に示す試験片を用い、Table 1 に示す溶接条件を用いて行い、溶接後室温に 24h 放置したのち 5 ヲ所の断面について割れ率を測定し、平均割れ率を求めた。Z 窓型拘束割れ試験は Fig. 2 に示す試験片と Table 1 に示す溶接条件を用いて行い、クランフィールド試験と同様の方法で平均割れ率を求めた。

板厚方向引張試験は、試験鋼板の両側表面に同じ鋼板を炭酸ガス溶接したのち削りだした平行部

Table 1 Welding conditions for cracking tests

Welding method	Electrode	Drying condition of welding rods	Hydrogen content in welding rods	Welding condition			Preheating and interlayer temperature	Remarks
				Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)		
Manual arc welding	KS-76EL* (4.0mm ϕ)	350°C $\times$ 1h	0 cc/100g	23	170	15	See note**	1st pass only
	KS-76* (5.0mm ϕ)	300°C $\times$ 1h	2.7 cc/100g	25	210	25	$\leq 50^\circ\text{C}$	After 2nd pass

* Corresponds to JIS D5016, AWS E 7016

** Preheated at room temperature for Cranfield test and at 150°C for window type through-thickness restraint cracking test

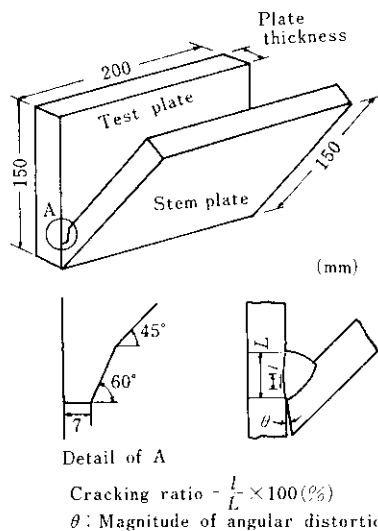


Fig. 1 Specimen of Cranfield test

5 mm ϕ $\times$ 30mm の試験片を用い、室温でオートグラフによって行った。スライスベンド試験は Fig. 3 に示す試験片を用い、外側表面の伸びが 9.3% になるように治具を用いてプレスした。プレス前後に試験片表面の染色浸透探傷試験を行って、プレス前に試験片表面に欠陥が存在しないことを確認するとともに、プレス後の割れの個数および長さを測定した。

クランフィールド試験で認められた割れの例を Photo. 1 に示す。Photo. 1 はルートクラックが進行するにつれてラメラチアに変化した例である。

クランフィールド試験の割れ率と板厚方向絞りおよびスライスベンド試験の割れ長さとの関係を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。また Z 窓型拘束割れ試験の割れ率と板厚方向絞りとの関係を Fig. 6 に示す。

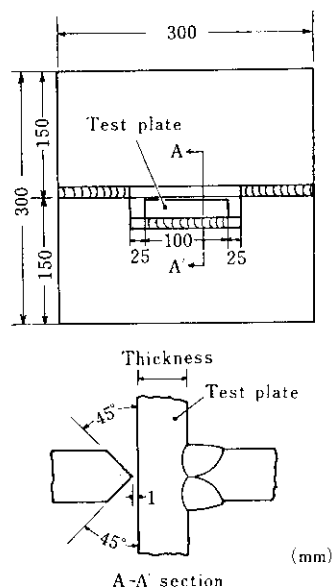


Fig. 2 Specimen of window type through-thickness restraint cracking test

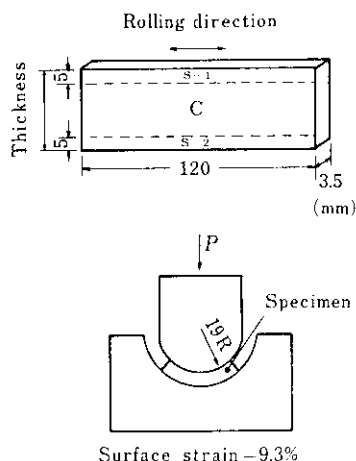


Fig. 3 Specimen and testing method of slice bend test



Photo. 1 Lamellar tearing in Cranfield test

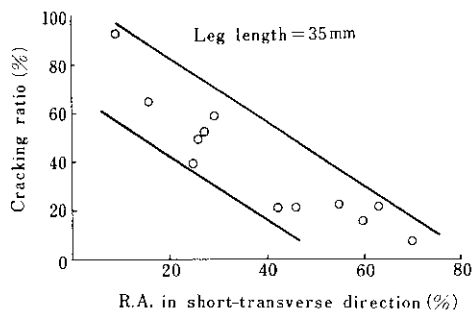


Fig. 4 Relation between cracking ratio in Cranfield test and reduction of area in short-transverse direction

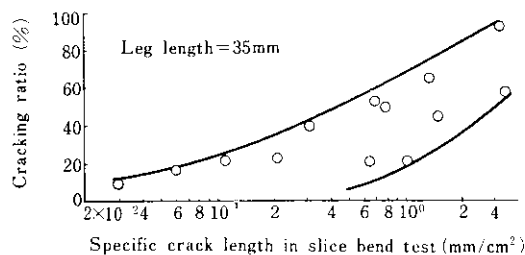


Fig. 5 Relation between cracking ratio in Cranfield test and specific crack length in slice bend test

これらの結果からわかるように、溶接条件が一定の場合、ラメラテア発生率と板厚方向絞り、あるいはスライスベンド割れ長さで表わされる板厚方向延性値との間には強い相関が認められる。しかし、クランフィールド試験やZ窓型拘束割れ試験ではラメラテアが鋼板表面部で生じるのに対して、板厚方向絞りやスライスベンド試験では板厚内部や板厚方向全体にわたる特性を測定しているため、ラメラテアと後者の延性値との関係はかなり広い幅をもったバンド状となる。

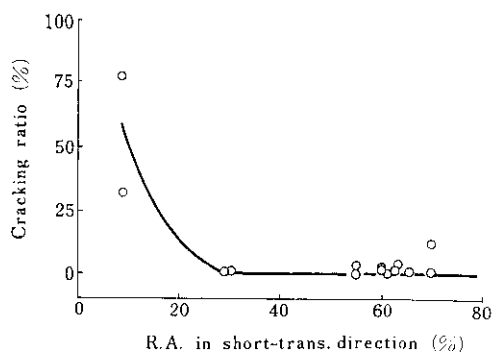


Fig. 6 Relation between cracking ratio in window type through-thickness restraint cracking test and reduction area in short-transverse direction

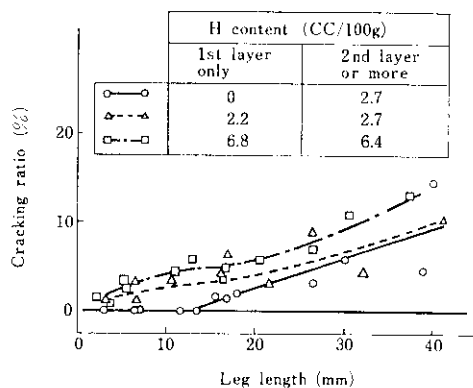
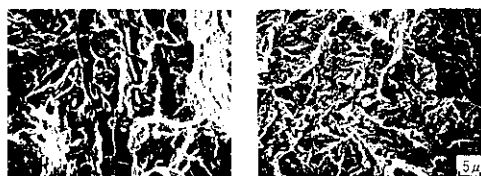


Fig. 7 Effect of hydrogen contents on cracking ratio in Cranfield test

ラメラテア発生率におよぼす溶接条件の影響を示す例として、溶接棒の乾燥条件を変えて、溶接金属中の拡散性水素量を変化させた場合のクランフィールド試験の結果を Fig. 7 に示す。同じ鋼板を用いた場合でも、Fig. 7 のように、溶接金属中の拡散性水素量が増加するほど、また脚長（角変形量）が増加するほど割れ発生率は高くなる。水素量が異なる試験片の破面を Photo. 2 に示す。Photo. 2 (a) は水素量が比較的小さい場合であり、破面は非金属介在物を伴う低延性破面とディンプルの混在であるのに対し、水素量の多い Photo. 2 (b) の場合は水素性クラックに類似の破面が認められ、割れに対して水素量の影響が大きいことがわかる。

以上の結果から、ラメラテアの発生率あるいは発生限界を決める要因としては、鋼材の特性のほ



(a) H content : 2.7cc/100g (b) H content : 6.4cc/100g

Photo. 2 Scanning electron micrograph of fractured surface of Cranfield test specimen

か溶接部の水素量、拘束力などの溶接設計・施工上の要因が考えられること、これらの要因のうち鋼材の特性は板厚方向絞り、スライスバンド割れ率などの板厚方向延性値でよく表わされることなどが結論される。

2.2 板厚方向絞りと製造条件

ラメラテアに影響を与える鋼板の板厚方向特性を板厚方向絞りで代表させ、これに及ぼす鋼板の製造要因の影響を調査した。供試材は連続鋳造あるいは分塊圧延スラブから熱間圧延された板厚30~32mmの50kg/mm²級鋼工程材のなかから選択した。

板厚方向特性を低下させ、特に延性の異方性の原因と考えられるものに非金属介在物がある。Fig. 8は鋼板中の非金属介在物密度を表わす清浄度と板厚方向絞りとの関係であり、製錬、脱ガスプロセスに関係なく板厚方向絞りは非金属介在物量の増加によって低下することがわかる。

さらに、非金属介在物を熱間圧延での変形能の

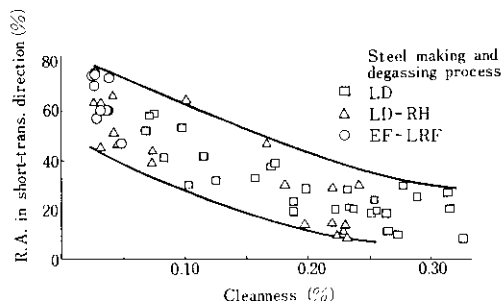


Fig. 8 Effect of cleanliness on reduction of area in short-transverse direction in 50kg/mm² steel plates by various steel-making and degassing processes

大きい硫化物系介在物と変形能の小さい酸化物系介在物とに分け、それぞれの量をSおよびO含有量で代表させて板厚方向絞りとの関係を求めたのがFig. 9およびFig. 10である。これらの結果

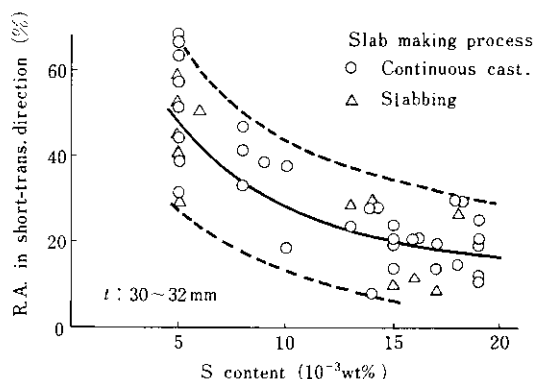


Fig. 9 Effect of sulfur content on reduction of area in short-transverse direction

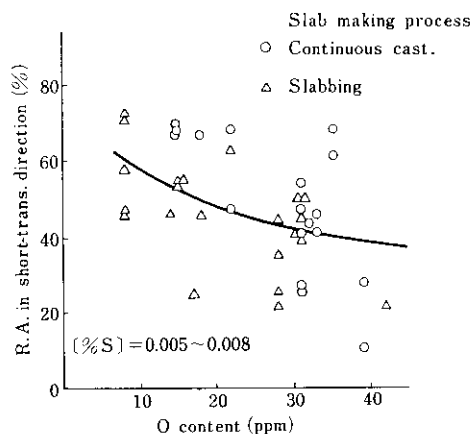


Fig. 10 Effect of oxygen content on reduction of area in short-transverse direction

から、O含有量よりもS含有量のほうが板厚方向絞りとの間により明りょうな関係があること、S含有量が低い場合でもO含有量が多くなると板厚方向絞りは低下する傾向にあることなどがわかる。すなわち、熱間圧延によって伸長する硫化物系介在物のほうが酸化物系介在物よりも板厚方向絞りの低下により大きく寄与しているといえる。さらにFig. 9およびFig. 10から、SあるいはO含有量が同じであれば、スラブの製造プロセスは板

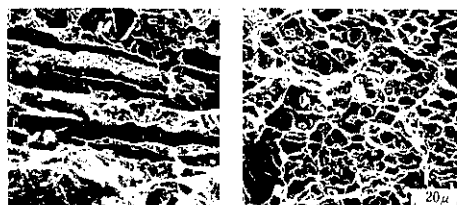
厚方向絞りにはほとんど影響を与えないといえる。

板厚方向引張試験片の破面に存在する硫化物系介在物および酸化物系介在物の例を Photo. 3 に示す。破面内の硫化物系介在物が熱間圧延によって伸長している様子が明らかに認められる。

硫化物系介在物の熱間圧延中の挙動から考えると、板厚方向絞りは圧延比の影響を受けることが予想される。板厚方向絞りに及ぼす全圧延比の影響を Fig. 11 に、鋼板幅方向圧延比に対する長さ方向圧延比の割合で定義したクロス圧延パラメータによる板厚方向絞りの違いを Fig. 12 に示す。

Fig. 11 は厚さの異なる連続鋳造製スラブをほぼ同じ板厚に圧延したときの結果であり、スラブが厚く、全圧延比が大きい場合のほうが同じ S 含有量でも板厚方向絞りが小さい。また Fig. 12 の結果は、クロス圧延比が小さいすなわち鋼板幅方向にも大きい圧延比で圧延された場合には、板厚方向絞りが低下することを示している。

以上の結果から、板厚方向絞りはまず非金属介在物量、特に硫化物系介在物量の増加によって低



(a) Sulfide inclusion (b) Oxide inclusion
Photo. 3 Nonmetallic inclusions in fractured surface of short-transverse tensile specimen

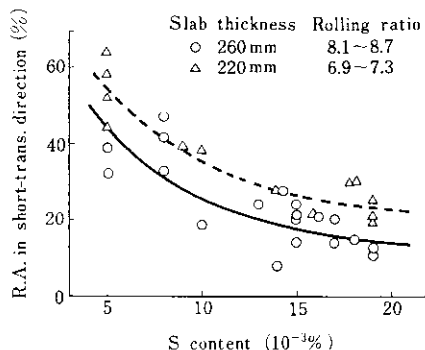


Fig. 11 Effect of slab thickness on reduction of area in short-transverse direction

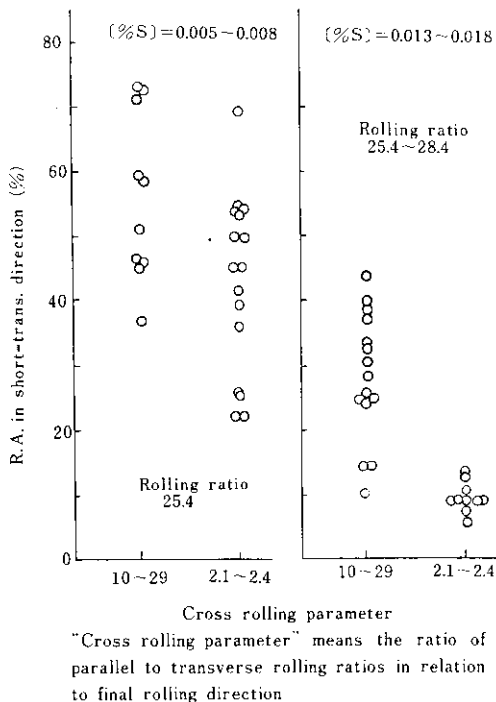


Fig. 12 Effects of sulfur content and cross rolling parameter on the reduction of area

下するほか、硫化物系介在物の圧延後の面積および(幅/長さ)比の増加によって減少するといえる。

3. 耐ラメラテア鋼板の製造

3.1 試作材の製造

3.1.1 製造条件および内部性状

前述の調査結果によると、ラメラテア防止のために最も重要なことは、非金属介在物の少ない清浄な鋼を造ること、特に硫化物系介在物を減少させることである。この考えのもとに、S 含有量を低下させた 50kg/mm² 級鋼板を製造して、その板厚方向特性およびラメラテア特性を調査した。

溶製法としては、転炉-RH 脱ガス(以後 LD-RH)プロセスのほか、低 S 鋼の溶製および非金属介在物の分離、除去に対して好ましいと考えられる電気炉-ASEA-SKF 取鍋精錬(以後 EF-LRF)

Table 2 Chemical compositions of steels

(wt%)

Steel	Process	C	Si	Mn	P	S	Al	REM	C_{eq}	P_{CM}	Remarks
A	LD-RH	0.16	0.46	1.44	0.014	0.006	0.037	—	0.40	0.247	Trial heats for anti-lamellar steels
B	EF-LRF	0.16	0.42	1.33	0.008	0.004	0.026	—	0.38	0.227	
C	EF-LRF	0.14	0.51	1.32	0.010	0.004	0.032	0.035	0.36	0.223	
D	LD-RH	0.16	0.50	1.38	0.028	0.017	0.035	—	0.39	0.246	Reference heat

$$C_{eq} = C + Mn/6$$

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20$$

Table 3 Results of microscopic testing for the non-metallic inclusions

Steel	Cleanliness (%)			
	$d_{A60 \times 400}$	$d_{B60 \times 400}$	$d_{C60 \times 400}$	$d_{60 \times 400}$
A	0.04	0.00	0.02	0.06
B	0.01	0.00	0.02	0.03
C	0.02	0.01	0.03	0.06
D	0.15	0.02	0.05	0.22

プロセスを採用し、それぞれ 30t 鋼塊を製造した。分塊圧延後、主として板厚 32mm の鋼板に圧延したほか、一部のスラブは板厚 25mm あるいは 50mm の鋼板に圧延した。圧延条件としては、非金属介在物の形状の点から 1 方向圧延が好ましいが、ここでは鋼塊長さ方向分布の調査も目的としたため完全クロス圧延とした。調査は主として圧延のままで行ったが、一部焼ならし後の試験も実施した。

供試鋼板の化学成分を Table 2 に、また JIS G 0555 による清浄度測定結果を Table 3 にそれぞれ示す。D 鋼は比較のために用いた通常の 50 kg/mm² 級鋼である。

スラブおよび鋼板の断面について、サルファプリントおよびマクロ組織観察を、また鋼板について超音波探傷試験をそれぞれ行った。この結果有害な欠陥は認められなかった。

3.1.2 板厚方向引張試験

板厚 32mm の鋼板の鋼塊ミドル部相当位置について、圧延方向、圧延直角方向および板厚方向の引張試験を行った結果を Table 4 に示す。圧延方向および圧延直角方向の引張試験は、板厚の 1/4 位置を中心線として採取した JIS 4 号試験片を用いて行い、板厚方向引張試験は平行部が 5mmφ × 37mm (G.L.=25mm) のサブサイズ試験片を用

いてくり返し数 5 で行った。

降伏強さおよび引張強さについては、D 鋼を除き板厚方向も含めてほとんど異方性は認められず、板厚方向でも 50kg/mm² 以上の引張強さを有している。

伸びおよび絞りについては圧延方向と圧延直角方向との差はほとんどなく、D 鋼も含めて 30% 以上の伸びと 67~77% の絞りが得られている。これに対し A 鋼および C 鋼の板厚方向絞りは、圧延方向あるいは圧延直角方向に比べてやや低く、異方性がわずかに認められるが D 鋼に比べると絞りの異方性は非常に改善されている。特に B 鋼の板厚方向絞りは圧延方向および圧延直角方向のそれとほぼ等しく、B 鋼は絞りに関しても異方性のまったくない鋼板であるといえる。

B 鋼の板厚 32mm、圧延のまま材における S 含有量と板厚方向引張特性の鋼塊高さ方向分布を Fig. 13 に示す。この結果から、B 鋼は鋼塊内全長にわたってすぐれた板厚方向特性を有しているといえる。

同一鋼塊から異なる板厚の鋼板を圧延することによって調べた板厚方向絞りの圧延比依存性を Fig. 14 に示す。

圧延比が大きくなるほど板厚方向絞りが低下するという傾向は認められるが、その効果は Fig. 11 ほど大きくない。この理由として Fig. 14 に示した鋼塊材の場合、Fig. 11 に示した連続製造スラブ材に比べ、全圧延比が大きいことおよび非金属介在物量が少ないことなどが考えられる。

焼ならし後の鋼板の板厚方向絞りを圧延のまま材のそれと対比させて Fig. 15 に示す。焼ならし後の板厚方向絞りは、圧延のまま材と同じかまたはやや向上することがわかる。

B 鋼の板厚 32mm、圧延のまま材について試験

Table 4 Tensile test results

Steel	Direc- tion	As rolled				Normalized			
		Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El (%)	R.A. (%)	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El (%)	R.A. (%)
A	Long.	35.3	55.7	37	71	36.9	55.0	38	73
	Long-trans.	34.6	54.7	36	70	37.0	54.8	37	72
	Short-trans.	36.2	55.5	22	55	35.7	55.8	27	60
B	Long.	36.0	55.7	34	71	36.3	55.7	34	68
	Long-trans.	36.3	55.8	34	70	36.3	56.3	33	67
	Short-trans.	35.3	55.1	28	70	34.8	55.1	28	74
C	Long.	34.0	53.7	36	71	38.0	54.0	36	73
	Long-trans.	34.7	54.6	35	69	38.0	54.7	36	70
	Short-trans.	34.6	54.7	28	66	37.4	53.0	32	63
D	Long.	34.0	55.6	33	77	—	—	—	—
	Long-trans.	34.8	54.7	32	70	—	—	—	—
	Short-trans.	35.0	48.7	6	9	—	—	—	—

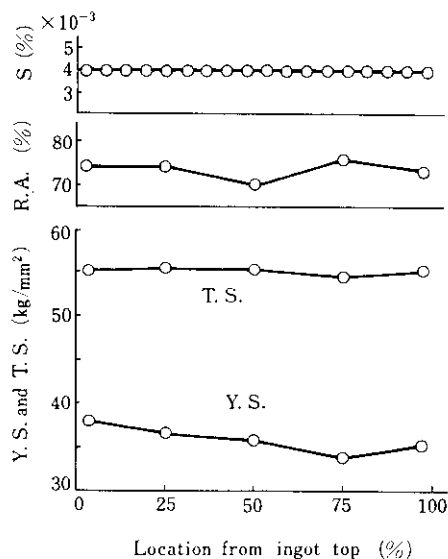


Fig. 13 Distribution of sulfur and short-transverse tensile properties in steel B

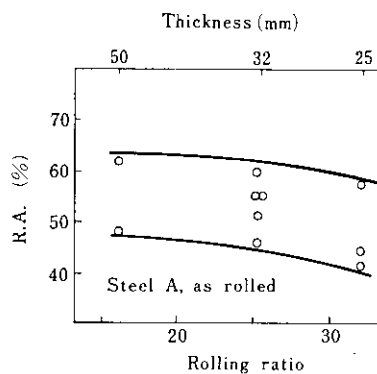


Fig. 14 Relation between R.A. in short-transverse direction and rolling ratio

片直径をかえて行った板厚方向絞りの測定結果を Fig. 16 に示す。

一般に板厚方向絞りは試験片直径が大きくなるほど低下するといわれている²¹⁾が、B鋼では試験片直径が 5 mm から 18 mm に増加することによる板厚方向絞りの低下量は約 4 % である。同程度の寸法効果は、試験片製作時に溶接を要しない圧延

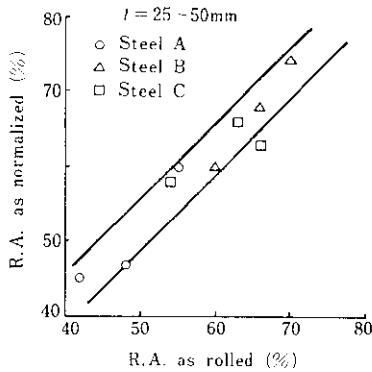


Fig. 15 Relation in the reduction of area in short-transverse direction between as rolled and normalized states

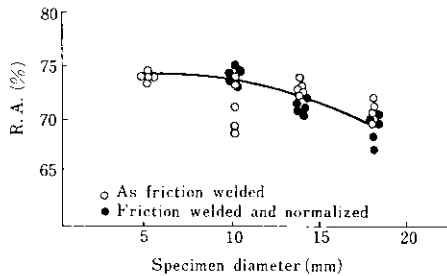


Fig. 16 Effect of specimen size on reduction of area in short-transverse direction

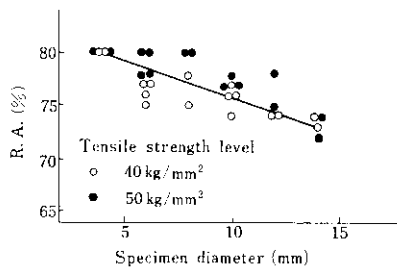


Fig. 17 Effect of specimen size on reduction of area in longitudinal direction

方向試験片についても Fig. 17 のように認められる。また、Fig. 16 では、溶接後試験片を焼ならしすることによって溶接による硬化層を除いた場合にも同程度の寸法効果が得られている。これらの結果から、Fig. 16 のような寸法効果は、試験片製作時の溶接による硬化層の存在以外に原因が求められなければならない。

3.1.3 スライスベンド試験

Fig. 3 と同じ試験方法で行ったスライスベンド試験の結果を Table 5 に示す。

比較材である D 鋼の板厚中心部を除いては、割れの平均長さはいずれも 0.6mm 程度であるが、単位面積あたりの延べ割れ長さには、特に板厚中心部では低 S 鋼である A 鋼および B 鋼と D 鋼との間には明らかに差がある。

スライスベンド試験における割れは、非金属介在物とマトリックスとの境界が開くことによって生じると考えられるから、D 鋼における S 含有量の増加に伴う硫化物系介在物量の増加は、板厚中心部でより顕著に生じていることが Table 5 の結果から推察される。非金属介在物のこのような板厚内不均一分布の存在は、板厚方向特性とラメラ特性との間の相関を悪くする原因のひとつである。

Table 5 Results of slice bend test

Steel	Location	Mean crack length (mm)	Specific crack length (mm/cm ²)
A	S-1	0.56	0.75
	C	0.53	2.22
	S-2	0.75	1.75
B	S-1	0.60	0.50
	C	0.61	0.22
	S-2	0.50	0.08
D	S-1	0.64	0.75
	C	1.18	56.07
	S-2	0.54	3.33

3.1.4 板厚方向衝撃試験

板厚方向に平行に採取した 2 mm V ノッチシャルピー試験片 (10×10mm) を用いて求めたせん移曲線の例を Fig. 18 に示す。

Fig. 18 (a) は圧延のままの板厚 32mm の C 鋼を D 鋼と比較した結果であり、D 鋼では吸収エネルギーが低く明りょうなせん移曲線が認められないのに対し、C 鋼ではシェルフエネルギーが増加

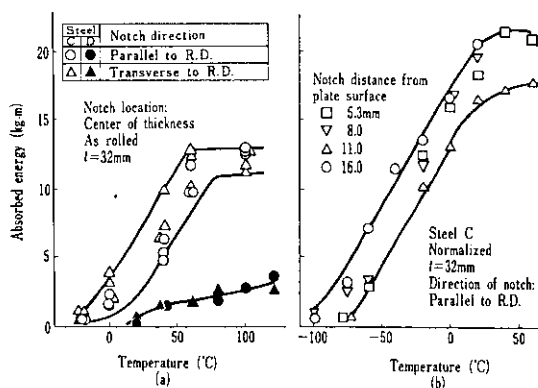


Fig. 18 Transition curves for 2mm V-notched Charpy specimen parallel to short-transverse direction

し、せん移温度も低くなっている。また Fig. 18(a) は、ノッチ方向が圧延方向あるいは圧延直角方向に平行になるように加工した 2 種類の試験片による結果を示しているが、ノッチ方向による差はあまり大きくないようである。

Fig. 18 (b) は、焼ならしされた C 鋼について板厚内でのノッチ位置を変えたときの結果であり、この場合もノッチ位置の影響は大きくないといえる。Fig. 18 (a) と Fig. 18 (b) との比較から焼ならしによってシェルフエネルギーが増加し、せん移温度が低下していることがわかる。この変化は、Fig. 15 に示したように板厚方向絞りが焼ならしによってあまり変化しなかったのに比べると対照的であり、焼ならしによるマトリックスの細粒化作用に起因する変化と考えられる。

3-1-5 ラメラテア試験

試作材および比較材について、Fig. 1 に示した試験片および Table 1 に示した溶接条件を用いて行ったクランフィールド試験の結果を Fig. 19 に示す。

A 鋼、B 鋼とも比較材 D 鋼に比べて、割れが発生し始める角変形量が大きく同じ角変形量での割れ率は低くなっており、クランフィールド試験によるラメラテア発生傾向は非常に改善されている。

Fig. 2 に示した形状の試験片を用いて行った Z 窓型拘束割れ試験の結果を Table 6 に示す。試作鋼はいずれも D 鋼に比べ、同一条件では割れ発生

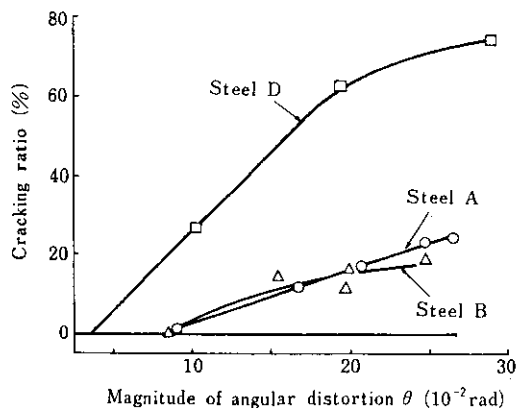


Fig. 19 Results of Cranfield test

Table 6 Results of window type through-thickness restraint cracking test

Restraint intensity (kg/mm ² ·mm)	Sectional cracking ratio (%)			
	Steel A	Steel B	Steel C	Steel D
2 800	2.7	0	0.7	90.2
4 480	13.3	12.5	13.9	—

率が非常に低くなっているが、拘束力が 2 800 kg/mm²·mm の場合でも B 鋼以外はわずかに割れ発生が認められた。しかし、この割れ率からみて、拡散性水素量が 2.7 cc/100g のときの本試作鋼のラメラテア発生の限界拘束力は 2 800 kg/mm²·mm 程度と考えられる。この値は、一般の溶接構造物における拘束力が 40h~70h kg/mm²·mm (h: 板厚, mm) である²²⁾ことを考えると、実際の溶接施工では、水素量の管理を適切に行えばラメラテアに対して十分安全な値であると考えられる。

3-2 製造実績

ラメラテアが重視される構造物のひとつに、石油掘削用プラットフォームがある。当社では、北海に設置されるプラットフォーム用の 50kg/mm² 級鋼板を 1974 年から 1975 年にかけて約 10 000t 製造したが、そのうち約 1 800t が耐ラメラテア鋼板として板厚方向特性を保証するいわゆるノード (node) 材であった。

これらの鋼板の製造にあたっては、今までに述べた調査および試作実験の成果が十分活用され、

良好な成績を収めることができた。

このノード材の適用規格は BS4360-50D, 板厚範囲は 15.88~95.25mm であり, そのうち板厚 25.4mm 以上の鋼板について, 板厚方向絞り 20% 以上が要求値であった。

このため, 試作鋼に対し板厚の増加に相当する合金成分の添加を行い, LD-LRF プロセスで S 含有量上限 0.008% を目標として製造した。このときの板厚方向引張強さおよび絞りは Fig. 20 に示したように良好な結果であった。

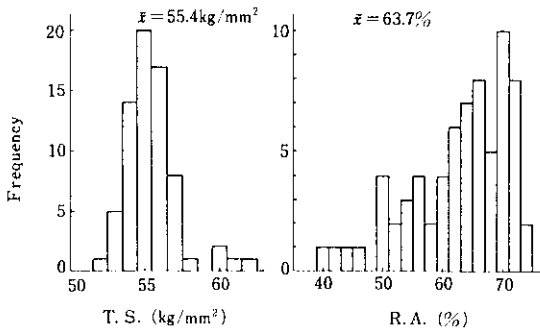


Fig. 20 Distribution of short-transverse tensile properties of commercial product BS4360-50D

4. ま と め

50kg/mm² 級鋼のラメラテア特性および板厚方向特性をクランフィールド試験, Z 窓型拘束割れ試験, 板厚方向絞りおよびスライスペンド試験によって調査し, 以下のことを確認した。

- (1) ラメラテア特性に影響する鋼材特性の一つは, 絞りで表わされる板厚方向延性であり, 一定の溶接条件下では両者間に強い相関がある。
- (2) ラメラテア発生率は, 鋼材の板厚方向絞りのほか, 溶接時に導入される水素量および拘束力の影響を受ける。

さらに, 50kg/mm² 級鋼の板厚方向絞りに及ぼす製造条件の影響を調査し, 以下のことがわか

った。

- (3) 板厚方向絞りは硫化物系介在物の原因となる S 含有量の低下によって増加し, S 含有量を 0.007% 以下にすれば 20% 以上の板厚方向絞り値が確保される。0.005% S 鋼では最高 70% の値が期待できる。
- (4) 板厚方向絞りは O 含有量の増加によっても低下する傾向にある。
- (5) 板厚方向絞りは全圧延比の増加によって低下するほか, クロス圧延を行うことによって低下する。
- (6) S および O 含有量が同じであれば, 板厚方向絞りは製鍊, 脱ガスおよび鑄造法の影響をあまりうけない。

これらの結果にもとずき, LD-RH および EF-LRF プロセスにより低 S の 50kg/mm² 級鋼を試作し, 板厚 25~50mm に圧延して板厚方向特性およびラメラテア特性を調査した。その結果,

- (7) 板厚 32mm 材では, 板厚方向を含めて強度に関する異方性がほとんどなく, 絞りは圧延方向および圧延直角方向で 67~73% であったのに対し, 板厚方向では 50~74% であった。
- (8) EF-LRF プロセスにより製造した 0.004% S 材では, 板厚方向絞りも含めて異方性のほとんどない鋼板が得られた。この鋼板については, 鋼塊内相当位置の違いによる板厚方向特性の変動もあまり認められなかった。
- (9) 焼ならしによって板厚方向絞りは変化しないか, やや改善される程度であるのに対し, 板厚方向靱性は非常に改善された。
- (10) Z 窓型拘束割れ試験の結果, 溶接時の拡散性水素量が 2.7cc/100g の条件でラメラテア発生の限界拘束力は 2800kg/mm・mm 程度と推定された。

これらの結果を利用して製造した耐ラメラテア鋼板の板厚方向特性は良好な成績であった。

参 考 文 献

- 1) H. Wormington: Welding Met. Fab., 35 (1967) 9, 370
- 2) J. C. Farrar, R. E. Dolby and R. G. Baker: Welding J., 48 (1969) 7, 274s
- 3) G. Sweetser: Metal Const. Brit. Welding J., 2 (1970) 3, 103

- 4) F. M. Burdekin: *ibid.*, 3 (1971) 5, 205
- 5) D. M. Nicholls: *Brit. Weld. J.*, 15 (1968) 3, 103
- 6) J. C. Farrar and R. E. Dolby: *Metal Const. Brit. Weld. J.*, 1 (1969) 2, 32
- 7) D. N. Elliott: *Welding J.*, 48 (1969) 9, 409s
- 8) 西尾, 山本, 梶本, 広実: 溶接学会誌, 41 (1972) 5, 576
- 9) 永尾, 原沢: 溶接学会誌, 45 (1976) 2, 119
- 10) 金沢, 山戸, 井上, 橋本: 溶接学会誌, 45 (1976) 2, 128
- 11) 仲: 溶接学会誌, 24 (1955) 7, 11
- 12) 渡辺, 出口, 蒲地, 浜名: 溶接学会誌, 26 (1957) 1, 35
- 13) J. E. M. Jubb, L. Carrick and J. Hammond: *Metal Const. Brit. Weld. J.*, 1 (1969) 2, 58
- 14) 坪井, 平井: 溶接学会講演概要 第16集, (1975), 234
- 15) 坪井, 平井, 中野: 溶接学会講演概要 第16集, (1975), 236
- 16) 長谷部, 別所, 二戸, 浅井, 中村: 住友金属, 25 (1973) 4, 393
- 17) J. Heuschkel: *Welding J.*, 50 (1971) 3, 110s
- 18) M. L. Drury and J. E. M. Jubb: *ibid.*, 52 (1973) 2, 88s
- 19) 金沢, 山戸, 井上: 溶接学会誌, 45 (1976) 3, 238
- 20) P. Amiot, A. Brodeau, H. de Leiris and Y. Le Penven: *IIW IX-828-73*, (1973)
- 21) 川村, 土師, 福田, 縫部: 第52回溶接冶金委員会資料 WM-509-74, (1974)
- 22) 佐藤, 上田, 木原: 溶接学会誌, 42 (1973) 1, 57