

討19

海洋構造物用極厚鋼板の破壊特性

川崎製鉄K.K.技術研究所 田中康浩 小林邦彦

Ph.D. 中野善文 工博鎌田晃郎

水島製鉄所 三宮好央 関根稔弘

1. 緒 言

採油基地など海洋構造物のノード材に使用される極厚鋼板はその使用条件から板厚方向の特性が問題となる。板厚方向の特性を律する要因としては鋼中に存在する非金属介在物や熱間加工時に形成される金属組織などがあげられ、とくに非金属介在物は熱間加工によるそれ自体の変形や分散状態の変化に関連し、鋼材の機械的性質に微妙な影響を与える。したがって、板厚方向の特性が問題とされるような鋼材の製造では非金属介在物に関連するSやOの含有量を低減させるとともに適正な熱間加工を加え非金属介在物の過度な変形を防止するよう留意している。本報ではノード材として製造された極厚鋼材の機械的性質および脆性破壊、疲労破壊特性を調査した結果について述べる。

2. 実験方法

供試材としては実規模の採油基地プラットフォームのノード材として最大厚を考えた場合の板厚100mmの50kg/mm²鋼(SM50Cあるいは4360-50D)である。供試材の化学成分と製造履歴の概要を表1に示す。鋼AはBOF-

表1 供試材の化学成分と製造履歴

(wt.%)									Note
	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	O	
Steel A	0.18	0.43	1.48	0.012	0.003	-	0.028	0.0018	40t Big-end up Ingot (t=900mm) Slab (t=380mm)
Steel B	0.14	0.41	1.43	0.017	0.003	0.032	0.047	0.0021	C.C. (t=310mm)

LRFプロセスで溶製された鋼塊を分塊後厚板圧延によって厚さ100mmに仕上げた鋼板であり、鋼BはBOF-RH-連続鋳造による鋼片を直接厚板圧延により仕上げている。それぞれの鋼板の圧延圧下比は鋼Aが9.0、鋼Bが3.1である。いずれもSやO含有量を低くおさえ、非金属介在物の低減につとめている。鋼材は焼ならし処理をされた状態で出荷されるが、ノード材として使用される場合は管状に成型され、溶接された後応力除去焼なまし(SR)がほどこされる。このような工程を考えた場合の基本となる機械的性質を表2に示す。本実験ではノード材として加工を受けた鋼板がSRされた状態において板厚方向を含めいろいろな方向に応力を受けた場合の破壊挙動を定量的に把握することを主目的とした。まず、加工・熱処理

表2 供試材の機械的性質

Steel	Heat-treatment	Location	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	El. %	R.A. %	VTs °C	vEo kgm
A	Norma-lized	1/4tL	34.5	53.8	37	73	-33	18.2
		C	34.5	54.3	37	72	-20	18.7
		Z	36.6	55.9	31	65	0	10.5
		1/2tL	35.8	54.8	37	72	-20	18.0
		C	35.0	55.4	36	73	-15	15.4
		Z	33.3	55.7	32	64	0	11.0
	SR	1/4tL	34.6	51.3	38	73	-10	16.4
		C	35.1	51.5	38	72	-20	18.4
		Z	36.6	51.9	32	67	3	9.0
B	Norma-lized	1/4tL	35.0	55.2	38	74	-61	22.2
		C	36.1	55.4	38	73	-55	18.4
		Z	35.8	55.9	32	65	-20	12.5
		1/2tL	33.6	54.6	34	73	-40	19.9
		C	35.8	55.3	32	73	-19	14.6
		Z	34.7	55.1	31	66	-1	10.8

Tention Test: JIS No.4

Charpy Test: JIS No.4

工程にともなう鋼材の材質変化を引張試験(平行部6mmφ試験片)および衝撃試験(2mmVノッチ試験片)によって調査した。加工は実在のプラットフォーム部材の形状を参考にし、管の半径(R)を1170mmとした。したがって、Rは板厚(t)

の1.2倍となり、一般の土木構造物の規定¹⁾より小さく、管外面で約4.1%のひずみを加えるような加工としている。加工後の鋼板はSR(620°C 4h)をほどこしている。このような鋼材の圧延方向あるいは板厚方向に対し種々な角度をもつ試験片を採取し、引張試験、衝撃試験、静的三点曲げ試験、疲労き裂伝播試験を実施し鋼材の異方性を調査した。静的三点曲げ試験片は厚さ25mmで疲労切欠とした。疲労き裂伝播試験片は厚さ12.5mmのコンパクトテンション型とし、測定は片振引張荷重(下限200Kg)のもとで、繰返し速度20Hzで大気中で行っている。

3. 実験結果と考察

供試材の基礎特性は表2に示すように強度、延性、靱性ともに50Kg/mm²級鋼として十分な性能を示している。すなわち、鋼A、鋼Bとも圧延工程における適正な方向別圧延比の採用により圧延方向(L)とその直角方向(C)、さらに板厚方向(Z)についてほとんど強度に差はみられていない。もちろん板厚1/4部(1/4t)および中央部(1/2t)における差も全くみられない。Z方向についてはL、C方向に対し、絞り(R.A.)がわずかに劣り、vTsで約20°Cほど高温となり、vEoなど吸収エネルギーがやや低目となっている。また、造塊材と連鑄材の差もほとんどないといえよう。鋼材のZ方向特性は圧延圧下率を適当にとることにより、残存する非金属介在物の変形度を制御でき、引張試験におけるR.A.を大きな値に保持しうるということが知られている。圧下比は分塊材では4~12、連鑄材では2~6が良好な延性を保持するのに効果的な値とされている²⁾。SRによる強度の低下は約2Kg/mm²であり、強度以外の特性値の変化はとくにみられない。図1は鋼A(焼ならし材)のL方向(加工方向)の機械的性質Y.P., T.S., vEo, vTsの変化を加工状態、加工後SRの状態、それぞれ板厚の表面から裏面にかけてみたものである。引張特性については引張ひずみを加えられた板表面と圧縮ひずみを加えられた板裏面では、焼ならし状態にくらべ大きくY.P.が上昇しているが、SRによって安定化し回復することがわかる。このような傾向はもちろん衝撃特性にも表われている。SR後の材質は板厚位置での差はほとんどみられないので、加工量が中庸である1/4tについて種々の材質特性を明確にすることにする。図2は板厚方向に対し0°, 30°, 60°あるいは90°(圧延方向)と方向差をもち、切欠位置を1/4tに一致させた試験片での衝撃試験結果である。0°方向では切欠は表面切欠型(LS)と貫通切欠型(LT)について調べているがほとんど差はない。圧延面から試験片採取角度が大きく偏位するにしたがいvEo, vTsなど切欠靱性が劣化するのは、引張試験のR.A.に関連した材質変化となってい

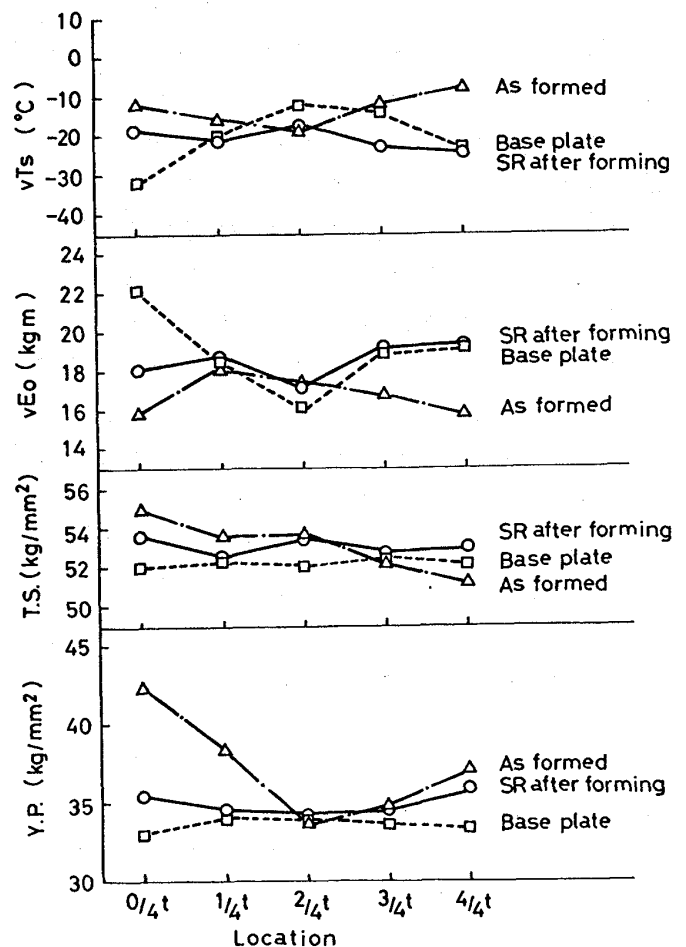


図1 加工・SRによる機械的性質の変化

る。しかし図2に併記した板厚の薄いSM50B(32mm, 圧延のまま)あるいは制御圧延されたAPI-X70(圧延のまま)に見られる程の材質劣化は本供試材のような極厚材の場合みられない。

このような材質特性を破壊に結びつけて論ずるにはもう少し定量的評価をくだす必要がある。ノード材の場合ブレイス管のとりつけは所定の角度をもってなされ、そのホットスポット(応力集中)部の応力状態は単純ではないが、Z方向として把握しておけばもっとも安全側の評価が可能である。海洋構造物における破壊発生の可能性は、溶接などによるラメラ・テア欠陥、供用中の応力変動によりホットスポット部などに生ずる疲労き裂(腐食疲労の場合が多い)に起因すると予測される。図3は鋼Aについて種々の方向に伝播する疲労き裂の速度の測定結果を示しており、図中には板厚32mmの同級鋼のデータを併記してある。極厚鋼ではL, C方向に対するZ方向のき裂伝播速度の増速量はごくわずかであり、疲労き裂の伝播は鋼材の引張強さや加工硬化係数など強度や延性に関連するとしている既報の研究結果⁸⁾をうらづけている。非金属介在物が伸延している板厚の薄い鋼板ではとくに高 ΔK 領域で加速効果⁴⁾がみとめられる。一方、このような疲労き裂が進展し、ある長さに達した場合の脆性破壊の発生の可否は破壊靱性値で判定される。図4は静的三点曲げ試験で求めた限界COD(δ_c)の温度による変化を示している。図中には板厚の薄い同級鋼のデータ⁵⁾を併記してある。極厚材についてもZ方向の δ_c は

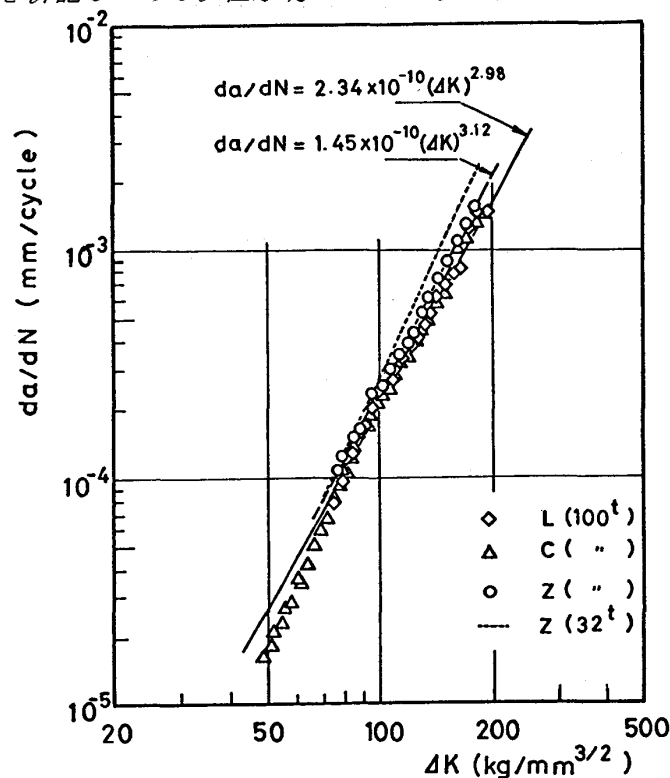


図3 疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係

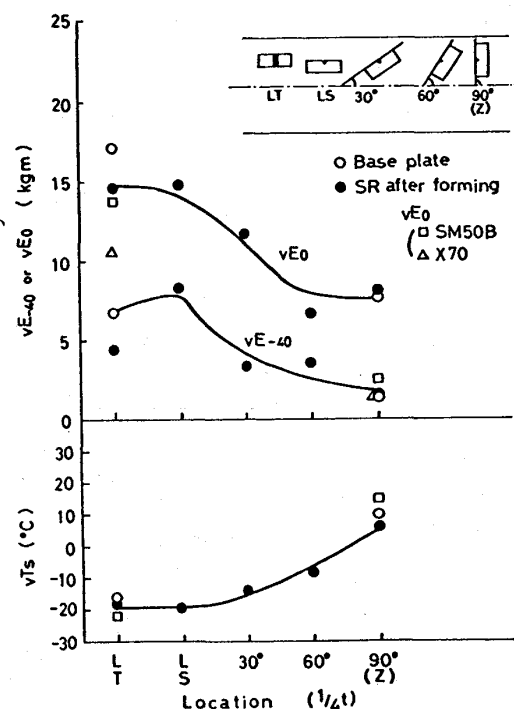


図2 板内での機械的性質の変化

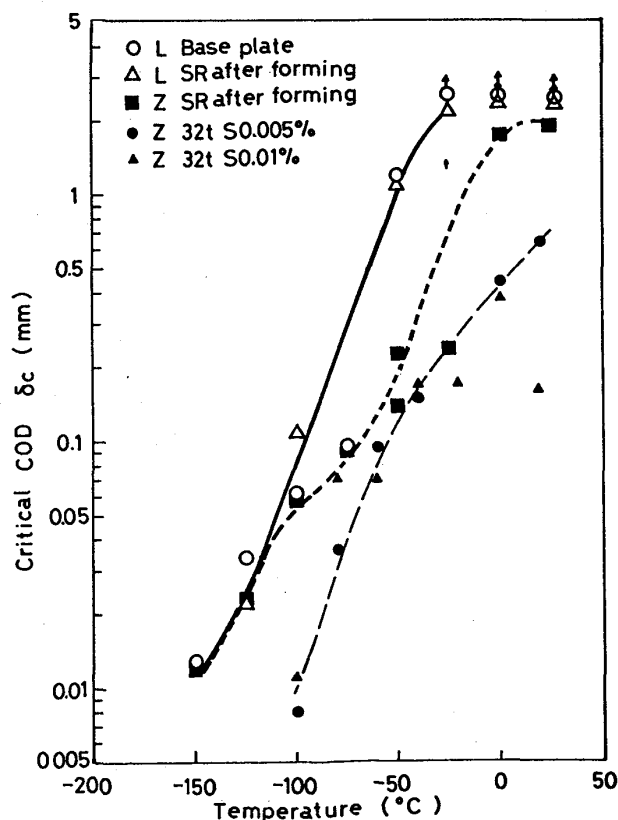


図4 限界CODの温度依存性

L方向での値に比べるとかなり劣化しているが、板厚が薄い場合に比べると大きな値となっている。なお、薄板材のデータは機械切欠での値を疲労切欠の値に換算⁶⁾して示したものである。

このような疲労き裂伝播特性と脆性破壊特性をもつ鋼材について初期き裂がある場合の応力繰返しに伴うき裂の成長と脆性破壊の関連を検討する。また、き裂としては表面き裂あるいは埋没き裂も考慮すべきであるが相当き裂⁷⁾として貫通き裂で代表させることにする。図3に示す $da/dN=C(\Delta K)^m$ の関係から初期き裂の大きさ (a_0) を仮定した場合応力繰返し回数と成長したき裂の大きさ (a_f) が次式で求まる。

$$a_f = \int_{a_0}^{a_f} dN = \left(a_0^{1-\frac{m}{2}} + \frac{2}{2-m} \cdot C \cdot \pi^{\frac{m}{2}} \cdot \sigma_R^m \cdot N \right)^{\frac{2}{2-m}} \quad (\sigma_R: \text{応力範囲})$$

板厚 100 mm のノード材の L 方向および Z 方向について先在する $2a_0=20$ mm のき裂に一定応力が繰返された場合に所定の大きさに成長するまでの回数を図5に示す。図には図4の破壊靱性値と温度の関係を示す。

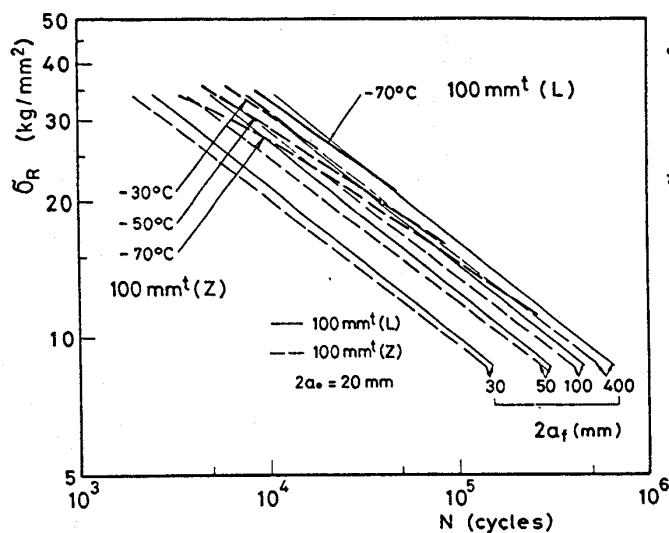


図5 極厚鋼板における疲労き裂の成長

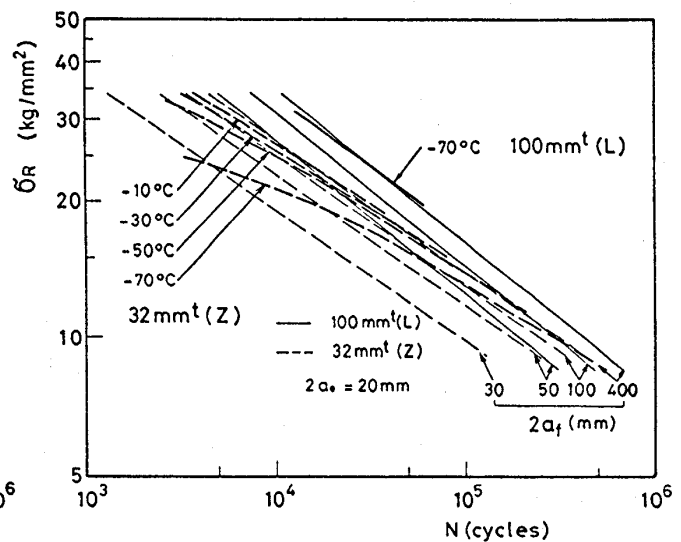


図6 疲労き裂成長の板厚による差

応力とき裂長さに分解し対応する使用限界温度として併記した。なお、疲労き裂の伝播速度は -75°C までは殆ど変化しないとしてあつかっている。たとえばノード材のブレイス管取り付け部に存在する板面に平行な $75\text{ mm}\phi$ の埋没き裂 (相当き裂長さ 30 mm) は 20 Kg/mm^2 の応力の繰返しを受ける場合 -70°C においても脆性破壊しないことがわかる。また、図6は板厚が薄い場合の例を比較のため示したものであり、非金属介在物が延伸された鋼材の方が使用上不利な面もある。これらの現象はさらに海水環境下で再評価されるべきではあるが、極厚ノード材も十分満足すべき性能を有していると結論されよう。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書鋼橋編 (1967)
- 2) 松原，岩崎，武重，滝島，松本：日本鋼管技報 80 (1979) 11
- 3) 成本，田中，船越：川崎製鉄技報 6 (1974) 38
- 4) 小林，成本，田中，船越：鉄と鋼 64 (1978) 1072
- 5) 小林，成本，船越，平井：川崎製鉄技報 8 (1976) 336
- 6) 豊貞：日本造船学会論文集 143 (1978) 427
- 7) 日本溶接協会：「脆性破壊発生に対する溶接欠陥の許容判定基準」WES 2805K (1976)