(昭和 31 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

静的曲げによる脆性破壊の研究

正員 工学士 安 藤 良 夫*

Studies on Brittle Fracture of Steel
in Slow Notch Bend Test

By Yoshio Ando, *Kogakushi, Member*

Abstract

Slow notch bend tests with semi-killed, killed and HT52-high tensile steels were performed. Fracture appearance transition temperatures T_{II} and energy transition temperatures are nearly the same, and transition temperatures in ductility criterion T_I , those in low energy level Tr_{LE} (10 kg-m/cm²) and those in reduction in thickness Tr_{ϕ} (4%) and also nearly the same for three kinds of steels.

Results of slow bend tests are compared with the results of Charpy and Tipper tests in same steels. As to fracture appearance transition temperature, slow bend test is most sensitive and Tipper test is the next.

1. 緒 言

鋼材の切欠脆性が問題とされるようになってから、僅か十数年を経たばかりであるが、その間鋼材の切欠脆性を判定する試験法は、非常に多くの方法が発表されている。

静的曲げ試験 (Vander Veen test) は 1953年7月、コペンハーゲンにおける I I W の決議事項の結論として、破壊が板面に平行に進行し、実際の状態に近いという理由で、板厚のまま試験する場合に好ましい方法であるとされた¹⁾。わが国では 1954 年、日本造船研究協会第 19 部会において始めて取上げられ、著者がその実験を担当した。本報告は、静的曲げ試験について種々の判定規準を検討し、同一鋼材について行われたシャルピー試験ティッパ試験の結果と比較を行つたものである。

2. 供試材料、試験片形状及び試験方法

2-1 供 試 材 料

実験に使用した鋼材は、板厚 20 mm のセミキルド鋼 (FS)、キルド鋼 (YK)、HT 52 高張力鋼 (K 4 B) の 3 種で、それらの化学成分を Table 1、機械的性質を Table 2 に示す。

Table. 1 Chemical composition of steels tested

cord letter	check analysis (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Al
FS	0.208	0.064	0.78	0.014	0.022	0.189	—	—
YK	0.138	0.220	0.80	0.017	0.023	0.177	—	—
K 4 B	0.130	0.481	1.19	0.012	0.006	0.176	0.114	0.024

原稿受付. 7 月 13 日

* 東京大学生産技術研究所助教授

Table. 2 Mechanical properties of steels tested

cord letter	type	thickness mm	yield point kg/mm ²	tensile strength kg/mm ²	elongation %
FS	semi-killed	20	28.0	46.8	26.5
YK	killed	20	32.9	48.7	30.3
K4B	HT52 high tensile	20	34.7	52.4	29.0

Fig. 1 Test specimen

Fig. 2 Procedure of pressing notch

Fig. 3 An example of Pressed notch

2-2 試験片形状

試験片の形状は Fig. 1 に示す通りで、板はミルスケールを取除かず、圧延のまま試験した。切欠は 1% Cr 鋼を 45° の角度に鋭く研磨したナイフエッジを、Fig. 2 に示す装置を用いて 3 mm の深さに押込んで形成

した。切欠のプレスは 10 t アムスラー試験機によつて行い、荷重は約 9 t であつた。切欠の拡大写真の 1 例を Fig. 3 に示す。若干のものについて切欠半径を計測したが、いずれも切欠半径は 0.004 mm 以下であつた。時効の影響をなくすために、切欠をプレスした後 2 時間以内に破壊試験を行つた。

2-3 試験方法

試験片は試験温度 0°C 以下はドライアイスとエチルアルコール、それより高い温度は水を用いて、予め所定の温度において 10 分以上保つておき、試験を行うときに、治具および試験片が完全に没する水槽状恒温槽に入れ、さらに 5 分以上一定温度に保つた後に試験を開始した。

Fig. 4 Procedure of test

Fig. 5 Depth of fibre

試験片は Fig. 4 に示すように、切欠を下にして、200 mm の距離を保つた半径 20 mm の 2 個の支点で支え、中央を直径 60 mm の荷重ロールで押して曲げた。試験片の横倒れを防ぐために、特に設計した支持台を用いたが、それでも温度の高い場合横倒れするものが若干あつた。

荷重ロールの垂直方向の速度は大体 20mm/min を保つようにし、曲げ試験中は荷重撓み曲線を自動的に記録した。

3. 静的曲げ試験の結果と考察

静的曲げ試験では、比較基準により次の 2 つの遷移温度をとつている。

(a) 破面遷移温度 T_{II}

切欠底部から剪断亀裂の伸びた長さ (depth of fibre または mm fibrous, Fig. 5) が 32 mm, すなわち板幅の中心線に達する温度

(b) 延性遷移温度 T_I

最大荷重に達したとき, 200 mm の支点間隔で支えた試験片が中央で 6 mm 撓む温度

Fig. 6 Relation between depth of fibre and temperature

Fig. 7 Relation between deflection at max load and temperature

試験した3種の鋼材について depth of fibre を描くと, Fig. 6 に示すように, いずれも遷移現象のはつきり見られる。これらの鋼材の T_{II} の値は, 後に述べる他の遷移温度と共に Table 3 に示す。

1例として高張力鋼 K4B について最大荷重時における試験片中央の撓みを描くと Fig. 7 がえられる。温度が高い場合には可なり点がばらつくが, これは剪断による滑り面の方向が種々異なることなどのためと思われる。勿論大きな横倒れを行つたものは除いてある。しかし 6 mm の撓みでおさえるときは, 相当はつきりと T_I を決めることができ, これらの値も Table 3 に示してある。

Table 3 Various transition temperatures

test	criterion	transition temperature	steel cord letter		
			FS	YK	K4B
Slow bend	fracture	T_{II}	23 °C	-24 °C	28 °C
	"	T_{rE}	23	-26	28
	ductility	T_I	-21	-28	3
	"	$T_{rLE}(10\text{kg-m/cm}^2)$	-21	-28	3
	"	$T_{r\varphi}(4\%)$	-20	-28	0
Charpy	fracture	T_{rs}	25 +	2 +	26 *
	ductility	T_{r15}	-15 +	-30 +	-12 *
Tipper ($r=0.05\text{ mm}$)	fracture	T_{rs}	15	-20	20
	ductility	$T_{r\varphi}(4\%)$	-34	-57	-37

+ results of T. Kanazawa

* results of H. Suzuki

通常論ぜられる上記の2種の遷移温度の他に, 他の量の遷移現象を調べてみることにする。まず試験片の吸収エネルギーを断面積で割つたものを1例としてセミキルド鋼 FS について図示すると Fig. 8 のようになる。温度が高いときは, 試験片は荷重が一旦最大値に達した後に減少して破断する。Fig. 8 では最大荷重までの吸収エネルギーと全吸収エネルギーを区別して図示してあるが, 低温では荷重が増大しつつあるうちに破壊が起るので, この両者は同じ値になる。最大荷重に達した後に, さらにエネルギーを吸収するようになる最低温度, 言かえれば最大荷重までの吸収エネルギーと全吸収エネルギーが等しい最高温度を T_{rE} と定義すれば, 3種の鋼材に対する T_{rE} は Table 3 に示すようになり, T_{II} ときわめて良く一致する。

Fig. 8 Relation between absorbed energy and temperature

Fig. 9 Relation between reduction in thickness and temperature

静的曲げ試験の結果とVノッチシャルピー試験、ティッパ試験の結果を比較してみる。静的曲げ試験では前節に述べたように、破面、延性両種の基準に対する遷移温度はそれぞれ良く一致しているので、破面遷移温度として T_{II} 、延性遷移温度として T_I を比較の対象にとる。

シャルピー試験では破面遷移温度としては、剪断破面率 50 %より定めた T_{rs} 、延性遷移温度としては吸収エネルギー 15 ft-lb より定めた T_{r15} をとり、金沢 武²⁾、鈴木春義³⁾ 両氏の試験結果を拝借した。これらの値は Table 3 に示す。

Fig. 10 Correlation of results for slow bend, V-notch Charpy and Tipper tests: fracture appearance criterion

シャルピー試験では延性遷移温度として low energy level, すなわち 15 ft-lb (2.6 kg-m/cm²) が基準としてとられている。静的曲げ試験では 10 kg-m/cm² を基準としてとると、low energy level の遷移温度 T_{rLE} が Table 3 のように求められ、延性遷移温度 T_I と良く一致する。シャルピー試験に比して吸収エネルギーの基準値が高いのは、試験片の体積が大きいことなどの影響と考える。

破面の厚さ減少率(%)を描くと、3種の鋼材について Fig. 9 に示すようになり、これらが4%となつた温度を $T_{r\phi}$ と定義すれば、これまた Table 3 に示すように延性遷移温度 T_I と良く一致する。

以上をまとめると、各種の異つた量に対して適当な規準を設けて遷移温度を定義すると、Table 3 でわかるように、3種の鋼材について、破面遷移温度をあらわす T_{II} と T_{rE} 、あるいは延性遷移温度をあらわす T_I 、 T_{rLE} (10 kg-m/cm²)、 $T_{r\phi}$ (4%) はそれぞれ非常に良く一致しており、他の試験法ではこれほどの一致は見られないところである。3種の鋼材に対する破面遷移温度と延性遷移温度の順序は一致しているが、資料不足のためそれ以上の相関関係は求められなかつた。

4. 静的曲げ試験とシャルピー試験、ティッパ試験の比較

静的曲げ試験の結果とVノッチシャルピー試験、ティッパ試験の結果を比較してみる。静的曲げ試験では前節に述べたように、破面、延性両種の基準に対する遷移温度はそれぞれ良く一致しているので、破面遷移温度として T_{II} 、延性遷移温度として T_I を比較の対象にとる。

シャルピー試験では破面遷移温度としては、剪断破面率 50 %より定めた T_{rs} 、延性遷移温度としては吸収エネルギー 15 ft-lb より定めた T_{r15} をとり、金沢 武²⁾、鈴木春義³⁾ 両氏の試験結果を拝借した。これらの値は Table 3 に示す。

ティッパ試験は著者が行つたもので⁴⁾、深さ 2 mm、切欠半径 0.05 mm の切欠を両側につけた試験片に対する結果を用いた。破面遷移温度としては剪断破面率 50%より定めた T_{rs} 、延性遷移温度としては破面断面の板厚減少率 4%より定めた $T_{r\phi}$ をとつた。これらの値も Table 3 に示してある。

破面遷移温度を比較するため、静的曲げ試験の T_{II} を横軸にとり、シャルピー試験、ティッパ試験の T_{rs} を縦軸に描くと Fig. 10 がえられる。鋼材は僅か3種しかないが、シャルピーの T_{rs} もティッパの T_{rs} も一応それぞれ直線上にのる。その横軸に対する傾斜角はティッパ試験の方がシャルピー試験より大きい、いずれも 45° 以下で静的曲げ試験は遷移温度の差が最も大きくでる点ですぐれている。1例として YK と K4B について破面遷移温度の差をとつてみると、

静的曲げ試験	52 °C
ティッパ試験	40 °C
シャルピー試験	24 °C

となり、静的曲げ試験の感度が良いことがわかる。

延性遷移温度を比較するため、静的曲げ試験の T_I を横軸にとり、シャルピー試験の T_{r15} 、ティッパ試験の $T_{r\phi}$ (4%) を縦軸に描くと、Fig.11 がえられる。いずれも一直線には乗りにくい、板厚 25 mm について比較した IIW の報告⁵⁾⁶⁾の曲線を入れてみると、シャルピー試験は大体その曲線の近くにあることがわかる。ティッパ試験では延性遷移温度をうまく定義することが困難であること⁴⁾、および資料不足のために十分な比較は出来なかつた。

5. 結 言

以上 3 種の鋼材について行つた静的曲げ試験の結果、およびこの試験とシャルピー試験、ティッパ試験との比較について述べたのであるがえられた結果を要約すると次の通りである。

- (1) 静的曲げ試験の破面遷移温度 T_{II} とエネルギー遷移温度 T_{rE} は各鋼材ともきわめて良く一致する。
- (2) 静的曲げ試験の延性遷移温度 T_I 、low energy level 遷移温度 T_{rLE} (10 kg-m/cm²)、断面収縮遷移温度 $T_{r\phi}$ (4%) は各鋼材ともきわめて良く一致する。
- (3) 破面遷移温度については、静的曲げ試験が最も感度が良く、ティッパ試験、シャルピー試験の順に感度が落ちる。
- (4) 延性遷移温度は静的曲げ試験とシャルピー試験ではほぼ同程度の感度である。

あ と が き

本研究を行うに当たり、御指導御助言を得た日本造船研究協会第 19 部会の吉識、木原両教授を始め、各委員に厚く御礼申上げる。また実験に協力した著者の研究室の諸君に厚く感謝する。

参 考 文 献

- (1) IIW. Commission 12, Copenhagen-Meeting Resolutions (1953, 7)
- (2) 日本造船研究協会第 19 研究部会報告 (1956, 3)
- (3) 日本造船研究協会第 6 研究部会報告 (1954, 3)
- (4) 安藤：本報告と同時に造船協会で発表 (1956)
- (5) Report of IIW. Commission 9. British Welding Journal Vol.2 No.3 (1955, 3)
- (6) do. The Welding Journal Vol.34 No.7 (1955, 7)

Fig.11 Correlation of results for slow bend, V-notch Charpy and Tipper tests: ductility criterion