線状加熱加工を受けた船体用鋼板の 靱性評価に関する一考察

正員 越 賀 房 夫* 安 藤 政 明*

A Proposed Method of Notch Toughness Evaluation for Hull Structural
Steel Plate subjected to Line Heating Process

by Fusao Koshiga, *Member*, Masaaki Ando

Summary

Hull structural steel plates suffer from some embrittlement when they are subjected to bending by the line heating process. The embrittlement, however, is localized in some limited zone of the plate thickness. Therefore, the full thickness behavior should be examined in one way or another, in order to predict the service performance of the plate. The authors propose a simple method of notch toughness evaluation for this purpose by means of the van der Veen test with a sufficiently deep notch.

The transition temperature determined by the proposed testing is deemed as a parameter indicating the full thickness characteristics with respect to propagation arrest of brittle fracture. It is clarified that the increase in the said transition temperature is 10°C or less for the line-heated plate steel as the whole thickness, although the V-Charpy transition temperature increases by a large amount of 55°C if the specimen is taken from 2 mm below the line-heated surface. Tested materials are 50 kg/mm² class hull structural plate steels; conditions of the line heating process are desirable ones in view of the practical efficiencies.

1 緒 言

船舶の巨大化，高張力鋼適用の拡張，といった情勢のもとに，線状加熱法¹⁾などの熱塑性加工法に対する各船級協会の規制は最近かなり厳しいものがある。一方，この方面の研究を十分行なうことにより，若干でもそのような規制の合理化をはかりたいという動きもみられる。日本造船研究協会第 111 研究部会の系統的な試験研究はこの意味でその成果に大きな期待が寄せられている。しかし，その研究部会の実験計画は膨大なものであり，その完成には今後さらに多くの日数を要する見込みである。筆者らがここに提案するのは，同様な課題をごく簡便な方法によつて究明し，暫定的な意味において一応の見解を早目に得ておき，上記の研究部会による本格的な結論が得られるまでの補助的役割を演じようとするものである。

熱塑性加工を施せば，鋼板が局部的に脆化することは避けられない。その脆化の特に著しい局所の切欠靱性が鋼板素材に対する船級協会の要求を満たさない場合も十分ありうる。しかし，板厚方向のある局所にかんりの脆化があつたとしても，板厚全体の示す脆化の程度がさほどでなければ，使用上問題ないはずである。筆者らは，この全板厚挙動の判定を 10 mm notch van der Veen test によつて行ない，板厚の各部から採取した標準 V-Charpy test，熱サイクル再現 V-Charpy test，などと比較した。熱塑性加工法としては，現場の施工能率上好ましいと考えられる加熱冷却条件のもとでの線状加熱法を用いた。

2 供 試 鋼 材

使用鋼材は，Mn-Cu-Ni 系高張力鋼 (K 5 D, K 5 E) であり，化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。

* 日本鋼管(株)技術研究所

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of steels.

Steel	Code	Plate thickness (mm)	Composition (%)*							Ceq.** (%)
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	
Mn-Cu-Ni	K5D	25	0.13	0.27	1.35	0.017	0.010	0.16	0.15	0.37
	K5E	25	0.16	0.26	1.36	0.019	0.020	0.15	0.14	0.41

Steel	Code	Mechanical properties			
		Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	EL. (%)	Impact V. (kg-m)
Mn-Cu-Ni	K5D	34.0	51.6	29.0	9.0 at 0°C
	K5E	37.4	53.9	27.0	15.7 at -10°C

* Check analysis.

** Ceq. = C + Si/24 + Mn/6 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14.

なおこの高張力鋼は、日本海事協会規格材であり、K5Dは圧延材、K5Eは焼準材である。

上記供試鋼材は、板厚 25 mm であるが、薄板の線状加熱実験を行なうために、25 mm 板厚から 11 mm の供試材を削り出した。作製にあたって、25 mm 板厚方向での衝撃値の変化を調べたが、大きな相違がみられなかったため、上下面より 7 mm ずつ切削して、板厚 11 mm の供材とした。

3 実験方法

3.1 線状加熱条件および装置

実際現場において、線状加熱という場合、バーナーを直線的に走らす straight line heating と、バーナーを回転させながら行なう weaving line heating の 2 通りがある。一般に straight は、薄板のように低温で加工する場合に使用されるのに対して、weaving の場合は、厚板の加工に使用されている。

本実験においては、まず寸法 1,000 mm×500 mm×25 mm の供試鋼の中央に、straight line heating を行ない、後に比較のために weaving line heating を行なった。Table 2 に線状加熱条件を示した。加熱冷却条件の温度というのは、加熱表面温度のことであり、また火口高さを、25 mm と 35 mm にしたのは、冷却速度の相違の影響をみるものであり、実際現場で使用している火口高さは、大体 25 mm～30 mm である。

装置としては、ガス切断で使用する台車にガスバーナーを取り付けて、火口高さ、バーナー走行速度をコントロールできるようになっており、weaving の場合は、バーナーノズルが 25 mmφ の円を描くような装置を取付けた。なお水冷する場合は、水冷位置を一定に保ち、水量は 5 l/min. とした。

3.2 温度測定

温度測定の要領を Fig. 1 に示すが、測定にあたっては、表面温度は輻射温度計、温度チョーク、また温度分布測定においては、C. A. 熱電対を使用した。

Table 2 Conditions of Line Heating.

Heating-cooling conditions.	900°C (Max) Air cooling (A.C) 900°C (Max)-A.C.→650°C Water Cooling. 900°C (Max)-A.C.→450°C Water Cooling.
Burner type	TANAKA L.P.G. No. 3, 6650
O ₂ { Press. (kg/mm ²) Volume (l/h)	7.6 8,500
C ₃ H ₈ { Press. (kg/mm ²) Volume (l/h)	0.8 1,680
Height of burner's tip. (mm)	25, 35

3.3 熱サイクル再現 V-Charpy test^{2~4)}

前節の要領で、各加熱点の加熱冷却曲線を求めた。Fig. 2 に straight line heating における火口高さ 25 mm の板厚方向の各点の加熱冷却曲線を示す。なお火口高さ 35 mm となると、図中の破線の加熱冷却曲線となる。また、weaving line heating の場合は、ちょうど 25 mm と 35 mm の中間に位置する。

試験片は、Fig. 3 の破線で示す 12 mm 角、長さ 100 mm とし、その中央部に径 2.0 mm、深さ 0.5 mm の小孔をあけて、0.3 mm ϕ の C.A. 熱電対を溶接後、Fig. 2 に示した熱サイクルを、再現装置を使用して試験片に与えた。次に実線で示す 10 mm 角、長さ 55 mm の標準 V-Charpy 試験片とした。

3.4 切欠靱性試験

切欠靱性試験としては、上記の熱サイクル再現 V-Charpy test、および、全板厚に対する 10 mm notch van der Veen test⁵⁾ を採用した。Fig. 4 にその van der Veen test の概要を示すが、切欠は刃角 45° の鋭利な刃型を深さ 10 mm まで圧入して設けており、試験は刃型圧入後 2 時間以内に実施した。

Fig. 1. Measurement of heating temperature.

Fig. 2. Thermal cycle curves.

Fig. 3. Thermal cycle synthetic specimen (unit in mm).

Fig. 4. van der Veen test (unit in mm).

本研究において、全板厚挙動の判定に 10 mm notch van der Veen test を採用した理由は次のとおりである。船体用鋼板の切欠靱性判定基準として、重要な役割を果たしているところの V-Charpy 35 ft-lb 基準は、周知のとおり、Hodgon と Boyd⁶⁾ の損傷材調査の結果に基礎を置いている。その損傷材調査は、使用中に脆性破壊の伝播を許さなかつた鋼板が、使用温度よりも大体において低い V-Charpy 35 ft-lb 遷移温度を有していたことを示しており、船体用鋼板の靱性判定は伝播特性に着目して行なわれているといえよう。いつぼう切欠深さを標準の 3 mm よりも十分大きくすれば、van der Veen test は、伝播特性判定に適した試験となることが、筆者らの 1 人によつてすでに指摘されている⁷⁾。伝播特性判定の本格的な試験はいうまでもなく二重引張試験であるが、費用と時間に関して安直な点を買つて、本研究では、全板厚の靱性判定方法として、10 mm notch van der Veen test を採用したのである。もつとも、この簡便試験による遷移温度がそのまま船体構造の限界温度を意味するとは考えられないが、各種線状加熱を施された鋼板についてのこの簡便法による遷移温度が、鋼板の受入れままのそれより何 °C 高いかを調べることは、それなりに実際の意味を期待してよからう。

4 実験結果および考察

実際現場で線状加熱が行なわれるについて、もつとも問題となるのは、温度管理という点である。本実験を遂行するについて、加熱表面温度と加熱表面下 2 mm の位置との温度の関係を求めてみた。その結果、加熱表面下 2 mm の温度が 800°C 前後の場合、加熱表面温度が 900°C 前後であることが明らかとなつた。以後に述べる加熱温度とは、この関係を基に換算した加熱表面温度のことである。

Fig. 5. Effect of peak temperatures of thermal cycle on notch toughness in synthetic HAZ specimen.

般には、高炭素マルテンサントの生成によるものと言われている⁸⁻¹⁰⁾。このように A_1 変態点以上に加熱すれば、当然脆化域が生ずるのであるが、900°C 空冷、900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 450°C W.C. の場合、その脆化域は微々たるものである。また 900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 650°C W.C. においては、脆化域は広がるが、それでもその幅は、板厚の 1/5 位である。このような脆化域の存在は焼準材の K5E においてもみられるが、K5D より母材の衝撃値は高いので、900°C 空冷、900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 450°C W.C. においては、脆化しているとしても 10 kg-m までである。しかしながら、900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 650°C W.C. の場合は、K5D と同じように 700°C 以上に加熱された領域が非常に脆化している。

以上、熱サイクルのみによる脆化について述べたが、実際には熱塑性加工という点、歪サイクルをも考慮に入

Fig. 5 に熱サイクル再現 V-Charpy test の結果を示した。供試鋼材は圧延材、K5D であり、加熱冷却条件 900°C 空冷、および 900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 450°C W.C. においては、700°C~800°C の加熱域において、吸収エネルギーに大きな低下がみられる。火口高さの影響、すなわち冷却速度の影響をみると、冷却速度が小さくなる、すなわち火口高さが 35 mm となると、吸収エネルギーの極小がわずかに高温側に移動する傾向にあり、これは冷却速度による A_1 変態点の移動が影響しているものと考えられる。この 700°C~800°C 加熱による脆化域 (A_1 脆化と呼ぶ) は、Fig. 2 の加熱冷却曲線から明らかのように、加熱表面下 2~3 mm の部分に相当する。900°C $\xrightarrow{A.C.}$ 650°C W.C. の加熱冷却の場合、最高加熱温度が 650~700°C 以上の領域、すなわち加熱表面から 5 mm 位までの領域にわたつて、非常に脆化している。このように 900°C 位の加熱を行なえば、空冷の場合、加熱表面直下は焼準組織となり、靱性に富むのであるが A_1 変態点直上か、その温度付近に加熱された領域は、パーライトの部分的分解によつて不安定組織となり、それが冷却または強制冷却されることによつて脆化域となる。この脆化は、一

れなければならない。溶接においても、熱塑性加工においても、この熱サイクルと、歪サイクルが重畳しているので、その重畳効果の鋼材の靱性に及ぼす影響を検討する必要がある。

それゆえに、鋼板に線状加熱を行ない、加熱表面からの距離を種々変えて、標準の V-Charpy test 試験片を板厚方向に切り出し、試験を行なった。なお加熱冷却条件としては、 $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 650^{\circ}\text{C W.C.}$ 、 $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 450^{\circ}\text{C W.C.}$ の二つを選んだが、前者の結果を Fig. 6 に示す。図の中で、ノッチ長さ 10 mm のうち応力多軸度のもつとも大きい中央を折線で結んでみた。加熱表面付近の領域が著しく脆化しており、板厚中央になるに従って回復がみられる。これに対して $900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 450^{\circ}\text{C W.C.}$ の場合は、明らかな脆化域はみられなかった。これは A_1 脆化が微々たるものであるので、V-Charpy test に効いてこなかったものと考えられる。

以上の実験結果より、鋼板を A_1 変態点以上に加熱すれば、当然、脆化域が生ずるし、また靱性域も生ずる。いままでは、線状加熱による鋼板の脆化を調査するにおいて、板厚の特定部分の標準 V-Charpy data にあまり重点を置きすぎたきらいがあるが、それゆえに、本研究において、板厚全体の強度を示す試験として、van der Veen test を採択してみた。まず Fig. 7 に、straight line heating と weaving line heating の相違の影響を示している。遷移温度は T_{II} として示されているが、ほとんど同じであつた。これは、熱影響部の幅は、weaving のほうが、straight より当然広いのであるが、その深さにそれほど相違がなければ、遷移温度に何ら影響を及ぼさないのである。次に、Table 3 に van der Veen test および標準の V-Charpy test の遷移温度をまとめてみた。

まず板厚 25 mm の供試鋼に注目してみると、線状加熱を受けることによって、K5D、K5E ともに遷移温度が母材より 10°C 前後高くなる。すなわち、材質が圧延のままであろうと、焼準されたものでであろうと、線状加熱加工を受けることによって、遷移温度が 10°C 高くなることが明らかとなつた。また加熱冷却条件の相違の影響をみると、 650°C 水冷と、 450°C 水冷とでは、脆化域の大きさは異なるが、遷移温度に変

Fig. 6. Relation between distance and impact value on weaving line heating.

Fig. 7. Example of van der Veen test results, comparison between straight line heating and weaving line heating.

$(900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 650^{\circ}\text{C W.C.})$

Table 3 Summary of transition temperatures.

Steel	Plate thickness. (mm)	van der Veen test			V-Charpy test	
		Base Metal	$900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 650^{\circ}\text{C W.C.}$	$900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 450^{\circ}\text{C W.C.}$	Base Metal	$900^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{A.C.}} 650^{\circ}\text{C W.C.}$
K5D	11 25	-24 12	-16 20	— 18	14	22 —
K5E	11 25	-40 -14	-27 -3	— -4	-4	20 —

Fig. 8. V-Charpy transition curves for 2mm sub-surface subjected to weaving line heating, compared with those of base metal.

板になるに従って、冷却速度が小さくなるので、650°C 水冷を行なってもマルテンサイトなどの組織は生ぜず、加熱表面下 2mm 位まで細粒組織が存在し、板厚の中心部に、 $A_1 \sim A_3$ 加熱による不安定組織が生ずる。板厚 11mm の中央に不安定組織が存在するので、25mm 板厚の場合よりも脆化するものと思えたが、やはり遷移温度は、10°C 前後増加するだけであつた。これは、脆性破壊の伝播が、加熱表面下に存在する靱性に富んだ細粒組織によつて、押えられたためと考える。25mm 板厚の場合、伝播が一気に進むのに対して、11mm の場合、ピチピチという音を出しながら断続的に進行した。すなわち、今回試材の場合、たまたま、細粒 shear lip による抵抗が van der Veen test の伝播にみられた。

以上、鋼種、板厚、加熱冷却条件が、van der Veen test の遷移温度に及ぼす影響について報告したが、まとめてみると Table 3 から次の事項が明らかとなつた。供試鋼 K5D についてまとめてみると、

- ① 900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 650°C W.C. の線状加熱によつて、板厚 11mm, 25mm とともに、 T_H は、8°C 上昇した。しかしながら前述したように破壊の伝播に大きな相違があつた。
- ② 板厚の遷移温度への影響をみると、母材の場合、板厚が 25mm から 11mm になるにつれて、 T_H は、36°C 低下する。この板厚効果は、900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 650°C W.C. の線状加熱を受けた鋼板においても保たれている。
- ③ 板厚 11mm の場合は、van der Veen test と、標準の V-Charpy test を比較すると、前者は破壊の伝播、後者は発生特性を示すという機構上の相違はあるが、板厚効果は実質上問題とならず、900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 650°C W.C. の線状加熱によつて、両者の遷移温度は、ともに等しい上昇 (8°C) を示した。

供試鋼 K5E についても、上記の K5D と同様の傾向が示された。

5 結 論

線状加熱を施された鋼板の靱性に関して普通行なわれている、標準の V-Charpy test のほか、板厚全体としての靱性判定に 10mm notch van der Veen test を用いて、各試験結果の比較を行ない、大要次の結論が得られた。

- (1) A_1 変態点以上に鋼板を加熱すれば、空冷しようと水冷しようと、かならず板厚のいずれかの位置に脆

化がみられないので、強度に影響ないものと考えられる。したがつて、線状加熱において、加熱しながら水冷する場合、水冷温度というものに、それほど神経質になる必要はないものと考えられる。ただしこのことは、板厚 25mm 位の鋼板について言えることである。Fig. 8 は、供試鋼 K5D に加熱冷却条件として 900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 650°C W.C. の線状加熱を行ない、従来、各船級協会が指示する加熱表面下 2mm のところの標準 V-Charpy test 結果である。母材の $Trs. = 15^\circ\text{C}$ に対して線状加熱を行なうと、 $Trs. = 70^\circ\text{C}$ となり、遷移温度は 55°C 上昇する。しかしながら板厚全体の遷移温度の変化をみると、線状加熱を行なうことによつて高々 10°C 増加するだけである。

結局部分的には、非常に脆化しているのであるが、板厚全体を考えると、大きな脆化とはいえないことが明らかとなつた。

以上、板厚 25mm のような厚板について述べてきたが、1/2 in のような薄板が線状加熱を受けた場合、はたしてどうであるかという問題が生ずる。薄板の最高角変形を与えるには、加熱温度 600°C 位であるが、前述の実験結果と関連性を持たせるために、加熱冷却条件として、900°C $\xrightarrow{\text{A.C.}}$ 650°C W.C. を選んだ。薄

化域が生ずる，という事実を確認した。

(2) このような脆化域の存在は，船体の使用状態が，全板厚を建前とするかぎり，実際上さして問題とならない。

(3) これを今回の実験の数字で表現すれば，線状加熱表面下 2 mm の標準の V-Charpy test では，遷移温度が素材のそれより 55°C 高いにもかかわらず，全板厚ままの 10 mm notch van der Veen test では，遷移温度の上昇が高々 10°C であった。

(4) このような観点に立てば，加熱後の水冷開始温度を 650°C としても，それを 450°C とした場合に較べて，実際の靱性には，差が認められない。

(5) 本報告は，3.4 に述べた方針に従って，伝播特性について行なわれたが，今後，発生特性についても実験を行なう必要がある。

終りにのぞみ，本報告の素稿段階において種々有益な助言を賜った日本造船研究協会第 111 研究部会の委員各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石川島重工造船部，“線状加熱板曲加工法”，石川島技報，第 11 卷 35 号，第 13 卷 40 号，41 号
- 2) Ronay, B. “A method for determining the applicable welding procedure for steels”. The Welding Journal, 25 (11), 736 s~747 s, 1946
- 3) Nippes, E. F. and Savage, W. F. “Development of specimens simulating weld heat-affected zones”. The Welding Journal, 28 (11), 534 s~546 s, 1949
- 4) Nippes, E. F. and Lesnewich, A. “Tests of specimens simulating weld heat-affected zones”. The Welding Journal, 28 (12), 599 s~616 s, 1949
- 5) de Graaf, J. E., and van der Veen, J. H., “The Notched Slow-Bend Test as a Brittle-Fracture Test” Journal of the Iron and Steel Institute (1953)
- 6) Hodgson, J., and Boyd, G. M., Brittle Fracture in Welding Ships, Quart, Trans, Roy. Inst. Nav. Arch., Vol. 100 (1958)
- 7) 越賀房夫：“Van der Veen test の検討”，造船協会論文集，第 106 号，p. 215~222
- 8) 鈴木，田村，川名，橋口：“溶接熱サイクル再現装置による鋼の熱影響部の冶金的研究（第 3 報）”，溶接学会誌，第 27 卷，第 5 号，242
- 9) 稲垣，中原，原田，三谷：“各種高張力鋼のボンド近傍における溶接熱影響部再現組織の切欠靱性について”，溶接学会誌，第 33 卷，9 号，p. 104
- 10) 鈴木，田村：“調質鋼の再現熱影響部組織の切欠靱性と機械的性質”，溶接学会誌，第 29 卷，1 号，p. 21