

極厚鋼板の脆性亀裂伝播停止挙動に及ぼす 板厚方向靱性分布の影響

Effect of Toughness Distribution in the Thickness Direction on Brittle Crack Propagation/Arrest Behavior of Heavy Gauge Steel Plate

半田 恒久 HANDA Tsunehisa JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
西村 公宏 NISHIMURA Kimihiro JFE スチール 厚板セクター部 主任部員 (部長)
津山 青史 TSUYAMA Seishi JFE スチール スチール研究所 所長 (専務)・博士 (工学)

要旨

厚肉高アレスト鋼板に必要な、板厚方向特性分布のあり方を明らかにするため、板厚方向の靱性分布が異なる厚肉材の脆性亀裂伝播停止特性を評価するとともに、超広幅混成 ESSO 試験を実施し、靱性分布が長大脆性亀裂伝播停止性能に及ぼす影響について検証した。その結果、脆性亀裂伝播停止靱性値が同じであっても、板厚中央部の靱性が $1/4t$ 部および表層部の靱性より高い鋼板は、板厚中央部の靱性が $1/4t$ 部および表層部の靱性より低い鋼板よりも、実際に鋼材が使用される温度勾配のない条件において脆性亀裂伝播停止特性に優れ、この優位性は脆性亀裂が長大化しても保持されることが明らかとなった。

Abstract:

Brittle crack arrestability of heavy steel plates with different toughness distribution in the plate thickness direction was investigated to clarify the optimum distribution of properties in the thickness direction, which is necessary in the development of heavy steel plates with excellent brittle crack arrest performance. Ultra-wide duplex ESSO tests were performed, and the effect of the toughness distribution in the thickness direction on the arrestability of long brittle cracks was studied. Even in plates having the same brittle crack arrest toughness value, plates in which the toughness at the middle thickness position ($1/2t$) is higher than that at the $1/4t$ and surface layer positions displayed higher brittle crack arrestability under no temperature gradient condition which simulates actually applications, than plates in which the $1/2t$ toughness is lower than that at the $1/4t$ and surface positions. Furthermore, it is shown that this superiority is maintained even in the case of long brittle cracks.

1. はじめに

近年、運送効率向上のため、コンテナ船は 10 000 TEU (TEU: Twenty foot equivalent unit, 20 フィートコンテナの積載可能個数を表わす単位) を超える大型船が建造されるようになってきている^{1,2)}。コンテナ船はその船殻構造から、上部構造部材である強力甲板やハッチサイドコーミングの高強度・厚肉化が進み、最近では、板厚 70 mm を超える降伏点 390 N/mm^2 級鋼や降伏点 460 N/mm^2 級鋼が適用されている³⁻⁵⁾。

溶接構造物である船舶においては、万一溶接部から脆性亀裂が発生しても、その伝播を停止させて船舶全体の破壊を防止する考え方が基本となっている。厚肉の船体構造用鋼板のアレスト性能に関しては、これまで大型実証実験を含む数多くの研究⁶⁻¹¹⁾ がなされ、溶接部に沿って直進伝播した長大脆性亀裂を、板厚 50 mm を超える厚肉鋼板母材で

停止させるには、船体設計温度である -10°C において鋼板の脆性亀裂伝播停止靱性 K_{ca} 値を少なくとも $6\,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上にすべきであることが指針として示されている¹²⁾。また、国際規則¹³⁾ も発行され、鋼材メーカーには厚肉高アレスト鋼の開発が求められている。

厚肉材では板厚方向の特性は必ずしも均一とは限らず、脆性亀裂伝播停止性能を支配すると考えられる靱性も板厚方向に変化する。板厚方向の靱性分布の制御はアレスト特性を向上させるためのひとつの手段と考えられるが、このような特性分布が実際の構造物で必要とされる脆性亀裂伝播停止性能に与える影響について研究した例は少ない。本研究では、厚肉高アレスト鋼板に必要な、板厚方向特性分布のあり方を明らかにするため、板厚方向の靱性分布が異なる厚肉材の脆性亀裂伝播停止特性を評価するとともに、超広幅混成 ESSO 試験を実施し、靱性分布が長大脆性亀裂伝播停止性能に及ぼす影響について検証した。

2. 極厚鋼板のアレスト性能に及ぼす板厚方向韌性分布の影響

2.1 供試鋼

供試鋼には降伏点 355 N/mm² 級の板厚 60 mm の厚鋼板を用いた。機械的特性を表 1 に示す。鋼 A は表層, 1/4t 部, 1/2t 部に従いシャルピー衝撃試験の韌性が低下するように製造した材料であるのに対し, 鋼 B および鋼 C は逆に表層および 1/4t 部に対し 1/2t 部の韌性が向上するように製造した材料である。

2.2 供試鋼の脆性亀裂伝播停止特性

供試鋼の脆性亀裂伝播停止韌性 Kca を把握するため, 温度勾配型 ESSO 試験 (Kca 試験) を実施した。試験方法は Kca 試験方法¹²⁾ に準拠した。

図 1 に温度勾配型標準 ESSO 試験結果を示す。船体設計温度 -10℃ における Kca 値は鋼 A が 4 400 N/mm^{3/2}, 鋼 B が 7 200 N/mm^{3/2} および鋼 C が 6 500 N/mm^{3/2} であった。ここで特徴的なことは, 写真 1 に示すように破面形態が鋼 A では板厚中心部が表層に対し亀裂が進行する一般的なサムネイル状であるのに対し, 鋼 B および鋼 C は板厚中心部に

表 1 供試鋼の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of steel plates tested

Steel	Thickness (mm)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vTrs (°C)		
				1/2 t	1/4 t	Surface
A	60	375	525	-36	-70	-85
B		389	491	-108	-84	-73
C		393	491	-111	-106	-87

YS: Yield strength TS: Ultimate tensile strength
vTrs: Charpy transition temperature

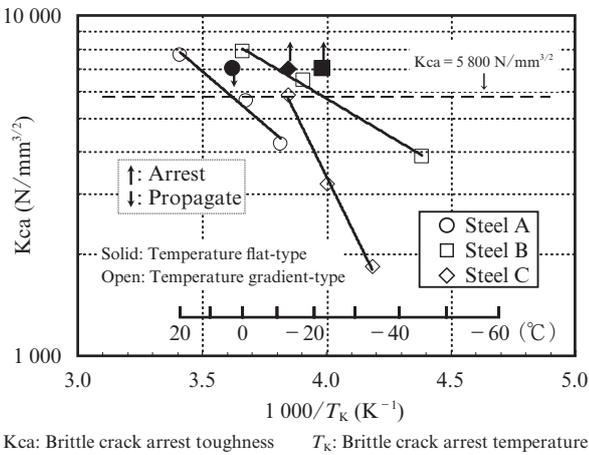


図 1 温度勾配型 ESSO 試験結果と温度平坦型 ESSO 試験結果の比較

Fig. 1 Comparison of flat temperature-type ESSO test results and temperature gradient ESSO test results

対し 1/4t および 3/4t 部で亀裂が先行するスプリットネイル状の様相を呈していることである。

2.3 温度勾配のない条件下における供試鋼のアレスト性能

2.3.1 温度平坦型 ESSO 試験方法

脆性亀裂伝播停止韌性 Kca は, 通常 0.25~0.35℃/mm 程度の温度勾配のある条件下で測定される¹²⁾ が, 実際に鋼板が使用される条件は一定温度条件下であることが多い。そこで, 現実により近い温度勾配の無い条件下での脆性亀裂伝播停止性能を評価するため, 温度平坦型 ESSO 試験¹⁴⁾ を実施した。図 2 に試験片形状および試験方法を示す。脆性亀裂を発生させるため, 亀裂発生部 (ノッチ部) が低温になるように試験片の上半分 (亀裂発生側半分) には温度勾配型 ESSO 試験と同様に 0.3℃/mm の温度勾配を付与した。一方, 試験部である試験片の下半分は温度勾配をなくし温度一定とした。

一般に, 鋼板の Kca が 6 000 N/mm^{3/2} 以上あれば, 実際の条件下では脆性亀裂は停止すると考えられている⁶⁻¹²⁾。本

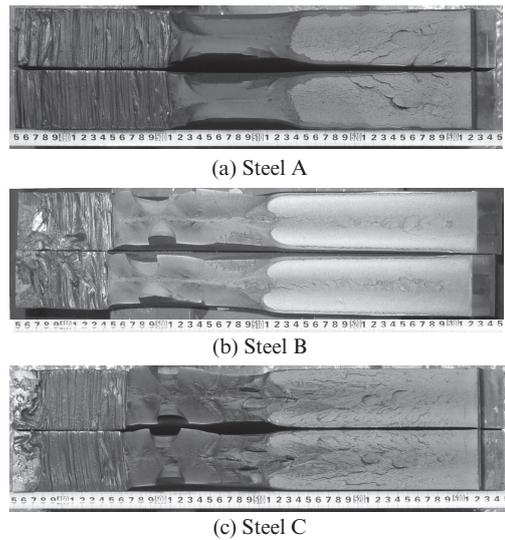


写真 1 温度勾配型 ESSO 試験片破面

Photo 1 Example of fracture appearance of ESSO test specimen

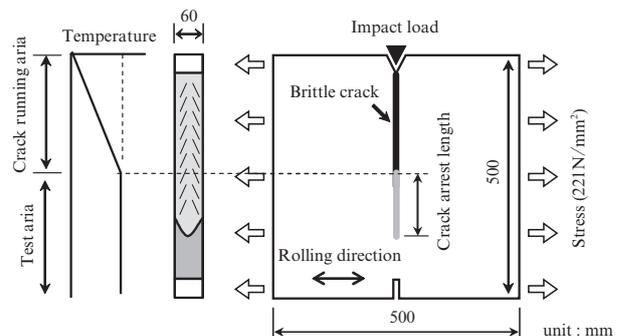


図 2 温度平坦型 ESSO 試験方法

Fig. 2 Flat temperature-type ESSO test method

研究では、脆性亀裂の伝播および停止挙動に及ぼす板厚方向の靱性分布の影響を調査する目的で、脆性亀裂が試験部をある程度伝播するように、試験部への突入 K 値が $6\,000\text{ N/mm}^{3/2}$ よりも高い $7\,000\text{ N/mm}^{3/2}$ となるように応力 221 N/mm^2 を負荷するとともに、試験部の K_{ca} 値が $6\,000\text{ N/mm}^{3/2}$ よりも少し低い $5\,800\text{ N/mm}^{3/2}$ となる温度に試験部の温度を設定して、温度平坦型 ESSO 試験を実施することとした。

2.3.2 温度平坦型 ESSO 試験結果

温度平坦型 ESSO 試験結果を表 2 および図 1 に示す。 K_{ca} が $5\,800\text{ N/mm}^{3/2}$ を示す温度条件下において、鋼 A では脆性亀裂は試験部でアレストせずに貫通した。これに対し、鋼 B および鋼 C では脆性亀裂は試験部をそれぞれ 70 mm および 30 mm 伝播した後、試験部内でアレストした。温度平坦型 ESSO 試験条件の破壊駆動力は、温度勾配型 ESSO 試験よりも高く設定されているため、温度平坦型 ESSO 試験において脆性亀裂は伝播するはずであるが、伝播したのは鋼 A のみで、鋼 B および鋼 C では脆性亀裂はアレストする結果となった。

写真 2 に温度平坦型 ESSO 試験片の破面を温度勾配型の

表 2 温度平坦型 ESSO 試験結果

Table 2 Results of flat temperature-type ESSO test

Steel	Thickness (mm)	Test condition			Test result		
		Stress (N/mm ²)	K^* (N/mm ^{3/2})	Temperature (°C)			
A	60	221	7 000	3	Propagate		
B				-22		5 800	Arrest
C				-13			Arrest

*1 Applied stress intensity factor (Fracture driving force)

*2 Brittle crack arrest toughness K_{ca} of test aria

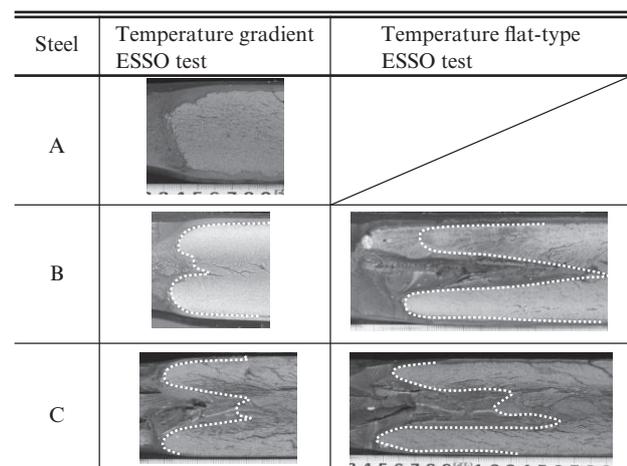


写真 2 温度勾配型 ESSO 試験と温度平坦型 ESSO 試験で得られた脆性亀裂停止部の破面様相の比較

Photo 2 Comparison of crack arresting appearance of temperature gradient ESSO specimens and that of flat temperature-type ESSO specimen

破面と比較して示す。鋼 B および鋼 C の温度平坦型 ESSO 試験片の破面は温度勾配型と同様にスプリットネイル状を呈しているが、板厚中心部に対する $1/4t$ 部および $3/4t$ 部近傍での亀裂先行の程度は温度勾配型に比べてより顕著になっていた。

以上のとおり、板厚方向の靱性分布を変化させることにより、同一 K_{ca} 条件においても全厚でのアレスト特性が変化し、 $1/2t$ 部性能が表層および $1/4t$ 部性能より高い鋼板の方が $1/2t$ 部性能が表層および $1/4t$ 部性能より低い鋼板より、実際に鋼材が使用される温度勾配のない条件において、脆性亀裂アレスト特性が優れることが明らかとなった。

3. 長大脆性亀裂アレスト性能に及ぼす板厚方向靱性分布の影響の検証

実際の構造物においては、万一発生した脆性亀裂が長い距離を伝播し、長大化する可能性も考えられる⁶⁾。本章においては、超大型試験（超広幅混成 ESSO 試験¹²⁾）を実施し、長大脆性亀裂の伝播阻止性能に及ぼす板厚方向靱性分布の影響を検証した。

3.1 超広幅混成 ESSO 試験方法

供試鋼は鋼 A および鋼 C である。脆性亀裂を発生・伝播させる助走板は、亀裂伝播中の分岐を避けるためエレクトロガスアーク溶接継手（板厚 60 mm ）とし、助走板と供試鋼板の突合せ溶接は完全溶込 CO_2 溶接とした。作製した溶接継手から図 3 に示す超広幅混成 ESSO 試験片を加工した。試験片の初期切欠は、溶接残留応力により亀裂が溶接部から逸脱することを避けるため、窓枠型の機械切欠¹²⁾とした。

試験機タブ板は、タブ板と試験片間の応力波の反射と試験中の荷重低下を極力抑えるため、試験片厚と同じものを選択し、荷重荷点間距離は 10 m に設定した。本試験条件は、応力反射のない実際の条件とほぼ等価な荷重条件となっ

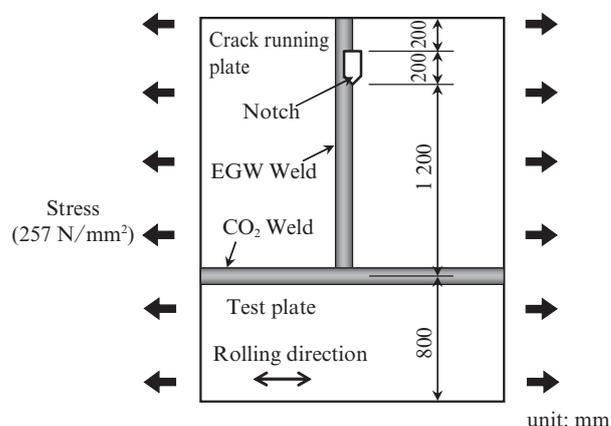
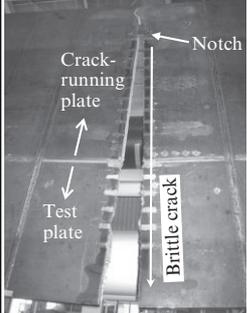
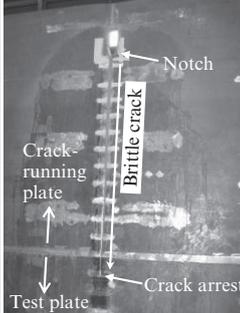
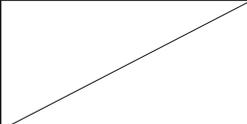
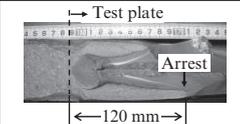


図 3 超広幅混成 ESSO 試験片形状

Fig. 3 Dimension of ultra-wide duplex ESSO test specimen

Steel	A	C
Test temperature (°C)	3	-13
Applied stress (N/mm ²)	257	
Kca at test temperature (N/mm ^{3/2})	5 800	
Crack path of the ultra-wide duplex ESSO test		
	Crack running plate, Notch, Test plate, Brittle crack	Crack running plate, Notch, Test plate, Brittle crack, Crack arrest
Fracture surface around the crack arrest position		
		Test plate, Arrest, ←120 mm→
Result	Propagate	Arrest

Kca: Brittle crack arrest toughness

写真3 超広幅混成 ESSO 試験結果

Photo 3 Results of ultra-wide duplex ESSO test

ていることが動的 FEM (有限要素法) 解析により確認されている¹⁵⁾。試験は、容量 80 MN の試験機を用い、温度平坦型 ESSO 試験と同様に、試験体を試験板の Kca が 5 800 N/mm^{3/2} を示す温度に冷却し 60 分以上保持の後、降伏点 390 N/mm² 級の鋼板の最大許容応力である公称応力 257 N/mm² に相当する荷重を付与し、機械切欠部に打撃を与えて脆性亀裂を発生・伝播させて行なった。

3.2 超広幅混成 ESSO 試験結果

写真3に超広幅混成 ESSO 試験結果を示す。Kca が 5 800 N/mm^{3/2} を示す温度条件下において、長大脆性亀裂は、鋼 A では試験板でアレストせずに貫通した。これに対し、鋼 C では脆性亀裂は試験板を 120 mm 程度伝播した後、試験板内でアレストした。また、鋼 C では温度平坦型 ESSO 試験と同様に顕著なスプリットネイル状の破面を呈していることが確認された。

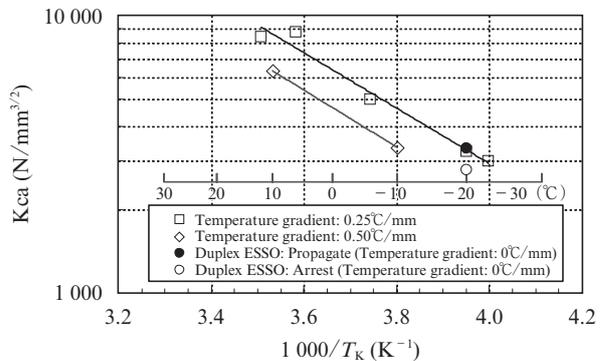
4. 脆性亀裂アレスト性能に及ぼす板厚方向アレスト性能分布の影響に関する考察

2章の実験から、板厚方向の韌性分布を変化させることにより、同一 Kca 条件においても全厚でのアレスト特性が変化し、1/2t 部性能が 1/4t 部性能より高い鋼板の方が 1/2t 部性能が 1/4t 部性能より低い鋼板より、実際に鋼材が使用される温度勾配のない条件において、脆性亀裂アレスト特

性が優れることが明らかとなった。また、このような差は、万一発生した脆性亀裂が実構造物において長大化した場合においても保たれることが3章の超広幅混成 ESSO 試験により確認された。本節においては、このような差が生じた原因について考察する。

まず、温度勾配型 ESSO 試験結果と温度平坦型 ESSO 試験結果を比較した結果について考察する。先に述べたとおり、温度平坦型 ESSO 試験条件の破壊駆動力は、温度勾配型 ESSO 試験よりも高く設定されているため、温度平坦型 ESSO 試験において脆性亀裂は伝播するはずであるが、伝播したのは鋼 A のみで、鋼 B および鋼 C では脆性亀裂はアレストした。この原因として、脆性亀裂伝播停止韌性 (Kca) の測定値には、試験部の温度勾配が影響する⁷⁾ことが考えられる。図4に、脆性亀裂伝播停止韌性 (Kca) の測定値に及ぼす試験部の温度勾配の影響を調査した例⁷⁾を示す。供試鋼は降伏点 355 N/mm² 級の板厚 50 mm の厚板であり、本研究で用いた鋼 A と同様に脆性亀裂停止部が一般的なサムネイル状の破面形態を示す鋼である。このような一般的な鋼の場合、図4に示すとおり、温度勾配が小さくなると、脆性亀裂伝播停止韌性 (Kca) は高くなり、温度勾配 0.25°C/mm 程度で温度勾配のない条件 (実条件) と同等に Kca 値を評価できることになる。

脆性亀裂伝播停止韌性値 (Kca) が温度勾配の影響を受けるのは、図5に示すように、温度勾配により破面形態が変化するためと考えられている。伝播中の脆性亀裂は亀裂前縁がほぼ直線状の板厚貫通亀裂である¹⁶⁾ので、板厚方向に韌性分布がある場合、脆性亀裂は相対的に韌性の高い部位でまず停止し、相対的に韌性の低い部位では遅れて停止すると考えられる。この場合、温度勾配がある条件では、韌性の高い部位で脆性亀裂が停止した後、韌性の低い部位の脆性亀裂は、より温度の高い部位 (より韌性の高い部位) に突入するため、温度勾配が無い場合よりも短い距離で停止する。このため、図5に示すように、亀裂停止位置の差が小さくなり、亀裂先端形状は温度勾配がない条件よりも



Kca: Brittle crack arrest toughness T_k: Brittle crack arrest temperature

図4 Kca 値に及ぼす温度勾配の影響¹²⁾

Fig. 4 Effect of temperature gradient on Kca¹²⁾

Fracture appearance around the crack arrest position	Temperature gradient ESSO test (Kcatest)	Flat temperature-type ESSO test/ Ultra-wide duplex ESSO test
Thumb nail		
Split nails		

図5 ESSO 試験片破面形態に及ぼす温度勾配の影響模式図
Fig. 5 Schematic illustration about effect of temperature gradient on fracture surface of ESSO test specimen

直線的になる。

Kca 試験方法¹²⁾においては、破面形態が変化することによる Kca 値の過小評価を避けるため、温度勾配を 0.25~0.35°C/mm の範囲とすることを定めている。本研究で用いた鋼 A については、一般的なサムネイル状の破面形態を示すため、Kca 試験（温度勾配 0.3°C/mm の ESSO 試験）により、温度勾配のない条件（実条件）と同等に Kca 値が評価され、図 1 に示したとおり、破壊駆動力を高く設定した温度平坦型 ESSO 試験において脆性亀裂が伝播したものと解釈できる。

これに対し、スプリットネイル状の破面形態を示す鋼 B および鋼 C においては、温度勾配型 ESSO 試験での Kca 値が、温度勾配のない条件（実条件）よりも小さく見積もられていることになるが、安全側評価となるので、温度勾配型 ESSO 試験でこれらの鋼材の Kca 値を評価することは実用上は問題ないといえる。写真 2 に示したように、スプリットネイル状の破面形態を示す鋼では、Kca 試験（温度勾配 0.3°C/mm の ESSO 試験）と温度平坦型 ESSO 試験における亀裂停止部の破面形態が大きく異なっている。この違いを、図 5 に一般的なサムネイル状の破面の場合と比較して模式的に示す。脆性亀裂停止位置は、通常、最長伝播部で定義する¹²⁾が、亀裂最長伝播部における応力拡大係数の値（破壊駆動力）は破面形態により大きく異なる可能性がある。そこで、FEM 解析により、亀裂最長伝播部の応力拡大係数の値を評価した。図 6 に FEM 解析モデルを示す。解析対象は超広幅混成 ESSO 試験とし、板厚中心部が表層に対し亀裂が進行する一般的なサムネイル状の破面形態を模擬したモデル (Model 1) と、板厚中央部に対し 1/4t 部および 3/4t 部近傍で亀裂が先行するスプリットネイル状の破面形態を模擬したモデル (Model 2) を解析した。助走板を伝播してきた長大脆性亀裂先端の応力拡大係数が試験板に突入後どのように変化するかを調べるため、亀裂先端位置を助走板と試験板の境界の位置から試験板側に、0, 50, 100, 250 mm と変化させた。モデルは完全弾性体（ヤング率=206 000 N/mm², ポアソン比=0.3）とし、257 N/mm²の引

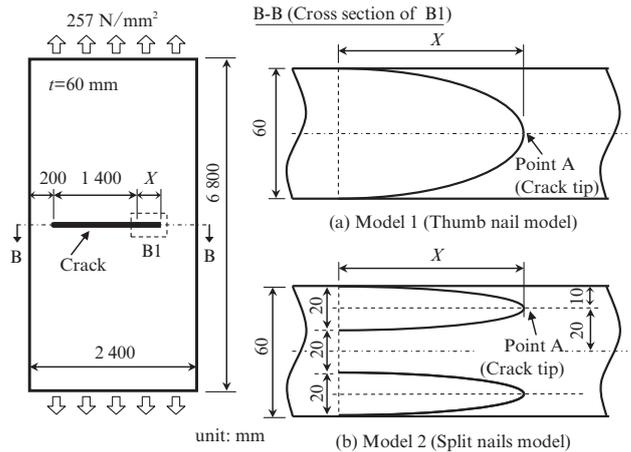


図6 応力拡大係数の計算に用いた FEM モデル

Fig. 6 Finite element method (FEM) models for calculation of stress intensity factor

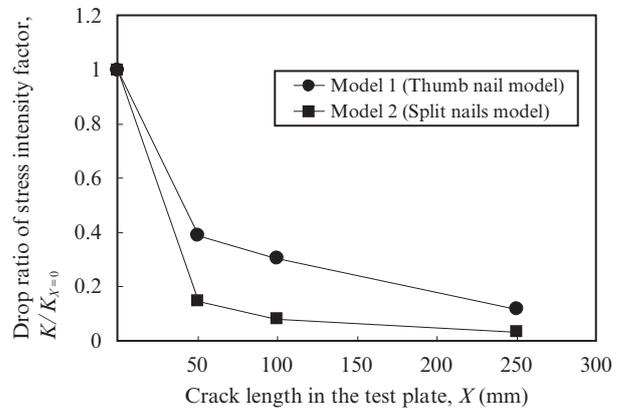


図7 破面形態の変化による応力拡大係数低下の解析結果

Fig. 7 Relationship between crack length in the test plate X and drop ratio of stress intensity factor obtained by finite element method (FEM) analysis

張応力を付与した。応力拡大係数は、FEM 解析から求まる J 積分値を変換して求めた。

図 7 に破面形態の変化による応力拡大係数低下の解析結果を示す。Model 2 のスプリットネイル状亀裂のように、試験板突入後、表層および板厚中心で亀裂が進行せず 1/4t 部付近を中心に亀裂が進展すると仮定すれば、亀裂最先端である 1/4t 部付近の応力拡大係数はその亀裂の進行にともない低下することになる。たとえば亀裂長さの差が 100 mm の場合、一般的なサムネイル状亀裂 (Model 1) の応力拡大係数に対し半分以下となるため、よりアレストしやすくなるものと考えられる。一方、通常、表層で亀裂が進行せず、板厚中心が亀裂の最先端になる場合は、亀裂進展に伴う応力拡大係数の低下がスプリットネイル状の破面形態を示す材料に比較して小さく、比較的亀裂が進展しやすいということになる。

以上のことから、鋼 B および鋼 C のように、表層および 1/4t

部に対し板厚中央部の韌性が高い鋼板においては、脆性亀裂伝播停止部がスプリットネイル状破面となり、鋼 A のような一般的なサムネイル状破面を呈する鋼板よりも脆性亀裂最先端の応力拡大係数がより低下し、特に実際に鋼材が使用される温度勾配のほとんどない条件において、脆性亀裂の伝播阻止に有利になると考えられる。

5. おわりに

厚肉高アレスト鋼板に必要な、板厚方向特性分布のあり方を明らかにするため、板厚方向の韌性分布が異なる厚肉材の脆性亀裂伝播停止特性を評価するとともに、超広幅混成 ESSO 試験を実施し、韌性分布が長大脆性亀裂伝播停止性能に及ぼす影響について検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 1/4t 部に対し板厚中央部の韌性が高い鋼板においては、脆性亀裂伝播停止部がスプリットネイル状の破面形態となる。
- (2) 板厚中央部の韌性が 1/4t 部の性能より高いスプリットネイル状破面形態を呈する鋼板は、同一 Kca 条件と比較した場合、板厚中央部の韌性が 1/4t 部の性能より低い鋼板よりも、実際に鋼材が使用される温度勾配のない条件においてより優れた脆性亀裂伝播阻止性能を示す。
- (3) このようなスプリットネイル状破面を呈する鋼板の優位性は、脆性亀裂が実構造物において長大化した場合においても保たれることが、超広幅混成 ESSO 試験により検証された。
- (4) 脆性亀裂伝播停止部がスプリットネイル状破面となる鋼板が、一般的なサムネイル状破面を呈する鋼板よりも、温度勾配のない条件において優れた脆性亀裂伝播阻止性能を示すのは、亀裂最先端部の亀裂進展による応力拡大係数の低下がより顕著になるためと考えられる。

参考文献

- 1) 長塚誠治. KANRIN. 2007-03, no. 11, p. 10.
- 2) たとえば, <http://www.ship-technology.com/projects/triple-e-class/>
- 3) 森茂博, 田中幸子, 田中義雄, 廣田一博. KANRIN. 2009-05, no. 24, p. 18.
- 4) 西村公宏, 半田恒久, 橋本正幸. JFE 技報. 2007-11, no. 18, p. 18.
- 5) 一宮克行, 角博幸, 平井龍至. JFE 技報. 2007-11, no. 18, p. 13.
- 6) Yamaguchi, Y.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Tanaka, S.; Okabe, T.; Kageyama, K.; Funatsu, Y.; Handa, T.; Kawabata, T.; Tani, T. ISOPE-2010. p. 71.
- 7) Kawabata, T.; Matsumoto, K.; Ando, T.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Inoue, T.; Handa, T.; Tani, T. ISOPE-2010. p. 80.
- 8) Handa, T.; Matsumoto, T.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Inoue, T.; Kawabata, T.; Tani, T. ISOPE-2010. p. 88.
- 9) Inoue, T.; Yamaguchi, Y.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Handa, T.; Kawabata, T.; Tani, T. ISOPE-2010. p. 95.
- 10) Kubo, A.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Inoue, T.; Handa, T.; Kawabata, T.; Tani, T.; Yamaguchi, Y. ISOPE-2012. p. 36.
- 11) Sugimoto, K.; Yajima, H.; Aihara, S.; Yoshinari, H.; Hirota, K.; Toyoda, M.; Kiyosue, T.; Inoue, T.; Handa, T.; Kawabata, T.; Tani, T.; Usami, A. ISOPE-2012. p. 44.
- 12) 脆性亀裂アレスト設計指針. 日本海事協会. 2009.
- 13) "Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates." IACS. UR S33, 2013-01.
- 14) 津山青史, 竹内佳子, 西村公宏, 半田恒久. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 2, p. 188.
- 15) 半田恒久, 伊木聡, 遠藤茂, 津山青史, 潮海弘資. 溶接学会論文集. 2012, vol. 30, no. 3, p. 213.
- 16) 三村宏. 圧力技術. 1993, vol. 31, p. 58.



半田 恒久



西村 公宏



津山 青史