

(論文)

船舶用厚板 T 継手部の脆性き裂停止挙動に関する検討

Investigation on Brittle Crack Arrest Behavior of T-weld Joint Structure using Thick Plates for Ships



田村栄一*(工博)
Dr. Eiichi TAMURA



中川知和**(工博)
Dr. Tomokazu NAKAGAWA



古川直宏***
Naohiro FURUKAWA



豊田昌信****
Masanobu TOYODA



木治 昇****
Noboru KIJI



中西保正*****(工博)
Dr. Yasumasa NAKANISHI

Because of the increase in the size of ships, high strength steels of more than 50mm thickness are being used for shipbuilding steel plates. In a recent study, a brittle crack initiated from the electro gas arc weld joint of a hatch side coaming using thick plates was shown to run through the weld line, resulting in the necessity to verify that the brittle crack could be arrested without severe failure occurring with the ship. The brittle crack propagating in a hatch side coaming is expected to be arrested with the effect of the toughness of upper deck and fillet welding between the hatch side coaming and the upper deck. However, the effect of the steel toughness and welding condition on the arrest behavior has not been sufficiently verified, especially for welded joints using steels of more than 50mm thickness. In this study, the effect of steel toughness and welding condition on arrest behavior was investigated with brittle crack propagation tests which were conducted with large size T-weld joint specimens substituted for the construction of hatch coaming and upper deck.

まえがき = 近年の中国をはじめとする東アジア経済の急速な発展に伴い、海上輸送需要が増大しコンテナ船等の輸送船の大型化が顕著となっている¹⁾。コンテナ船は上甲板に大開口を設けた構造になっており、ハッチサイドコーミングなどの船体縦強度部材には高強度の極厚板を使用している。船型の大型化に伴い、使用される鋼材に対してはさらなる高強度化・厚板化が求められている²⁾。一方、厚板大入熱溶接部に万一脆性き裂が発生した場合、き裂が溶接部に沿って直進伝播するとの実験結果も得られており¹⁾、厚板大入熱溶接継手を船体構造に適用することに問題提起がなされている。近年のコンテナ船の大型化への要求を満足し、かつ十分な安全性を保証するためには、厚板大入熱溶接部を伝播する脆性き裂を確実に停止させる技術が必要である。

コンテナ船の上甲板部は、図 1 に示すようにハッチサイドコーミングと強力甲板(アッパーデッキ)の T 溶接継手構造となっている。本構造では、鋼板の脆性き裂停

止性能が一定のレベルで確保されていれば、継手位置をずらすことにより、ハッチサイドコーミングの溶接部に沿って直進伝播する脆性き裂を強力甲板母材部へ突入させ、脆性き裂の伝播を停止させることが可能と考えられる(鋼材性能の影響)。さらに、ハッチサイドコーミングと強力甲板の溶接継手をすみ肉溶接にすることにより、継手内部の未溶着部が構造的な不連続となり、脆性き裂を停止させることが可能と考えられる(溶接施工方法の影響)。

これらの影響因子に対し、継手部での脆性き裂停止性能を検討した例は散見されるが³⁾⁴⁾、板厚 50mm を超える極厚板を用いた検討は少なく、鋼材性能および溶接条件の脆性き裂停止性能に対する効果に関しても十分に把握されていない。そこで本研究では、板厚 60mm のハッチサイドコーミングと強力甲板の T 継手部を模擬した大型構造試験を行い、大入熱溶接部を直進する脆性き裂に対する停止性能に関して検討を行った。

1. 試験方法

1.1 使用鋼板および試験体形状

ハッチサイドコーミングと強力甲板の T 継手を模擬した試験体を製作した。使用した鋼板 A ~ C の材料特性を表 1 に示す。強力甲板(鋼板 C)には 0 における Kca

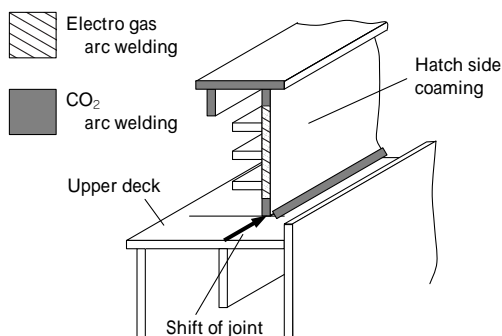


図 1 ハッチサイドコーミング部近傍の構造
Fig. 1 Construction around hatch side coaming

表 1 使用鋼板の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of materials used

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	$\sqrt{E} \cdot t_{40}$ (J)	$\sqrt{t_{15}}$ (°C)
A	520	619	21	293	- 65
B, C	470	604	25	315	- 64

*技術開発本部 材料研究所 **技術開発本部 機械研究所 ***鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ****株式会社 アイ・エイチ・アイ・マリノユニテッド *****株式会社 IHI

がおよそ $6,000\text{N/mm}^{3/2}$, -10 における K_{ca} がおよそ $4,200\text{N/mm}^{3/2}$ である鋼板を用いた。なお, K_{ca} は脆性き裂伝播停止特性を表す。

まず, 溶接部に沿ったき裂の伝播特性と強力甲板の鋼材性能によるき裂停止特性を調べるため, 試験体 1 として図 2 に示す完全溶込 T 継手に対する試験を実施した。鋼板 A はエレクトロガスアーク (EG) 溶接で接合し, 鋼板 A と鋼板 B の接合は完全溶込の CO_2 溶接とした。表 2 に溶接条件を, 図 3 に完全溶込溶接部の断面マクロ写真例を示す。

次に, 溶接条件の影響として, 未溶着による構造不連続のき裂停止に対する効果を確認するため, 試験体 2 として図 4 に示すき裂伝播距離を長くしたすみ肉溶接継手に対する試験を実施した。ハッチサイドコーミング立向溶接部との境界にチルプレート (薄板) を装入し, 立向溶接による鋼板 B への溶込みを防止した。表 3 に溶接条件を, 図 5 および図 6 にチルプレートの装入の概略を示す。

1.2 試験方法

試験機としては最大荷重 30MN の引張試験機を用いた。なお, 試験体に対して均一の応力を加えるため, 試験機と試験体の間には治具 (タブ板) を配した。

試験体温度は試験体数箇所に貼付した熱電対により監

視し, 設定温度である -10 均一状態で 30 分以上保持した後に試験を開始した。

荷重条件については, 鋼板 B の数箇所に貼付したひずみゲージ測定値の平均が 257MPa (強力甲板の設計応力)

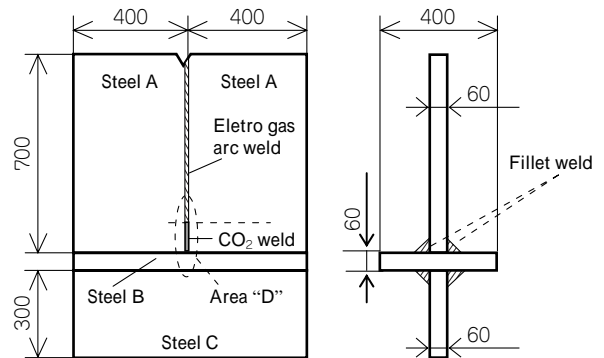


図 4 試験体 2 の形状
Fig. 4 Dimension of Specimen 2

表 3 試験体 2 の溶接条件
Table 3 Welding condition for specimen 2

Electro gas arc welding (DWS-1LG $\phi 1.6$, CO_2)		35kJ/mm
CO ₂ welding (DW-55E $\phi 1.2$, CO_2)	Vertical weld	190 ~ 250A 26 ~ 32V 5 ~ 16cm/min
	Fillet weld	260A 32V 45 ~ 50cm/min

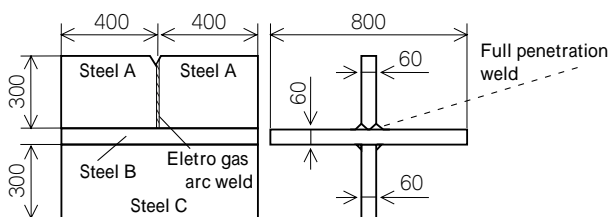


図 2 試験体 1 の形状
Fig. 2 Dimension of specimen 1

表 2 試験体 1 の溶接条件
Table 2 Welding condition for specimen 1

Electro gas arc welding (DWS-1LG $\phi 1.6$, CO_2)	35kJ/mm
CO ₂ welding (DW-55E $\phi 1.2$, CO_2) Full penetration weld	190 ~ 236A 23 ~ 29V 18 ~ 60cm/min

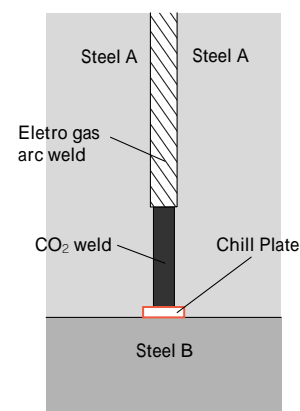


図 5 図 4 中 D 部の詳細
Fig. 5 Detail of area "D" in Fig.4 (Specimen 2)

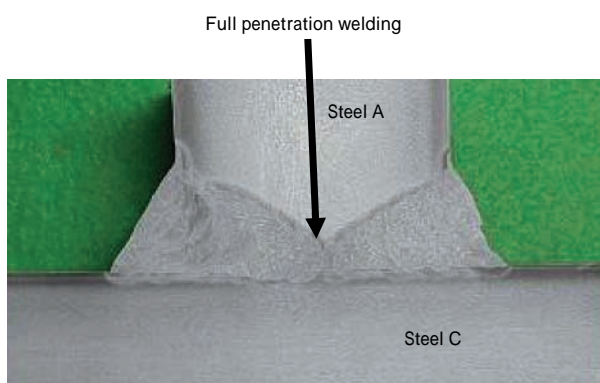


図 3 試験体 1 の T 継手断面
Fig. 3 Cross section of T joint of specimen 1



図 6 試験体 2 の溶接前の D 部
Fig. 6 Area "D" in Fig.4 before welding for specimen 2

となるよう設定した。

上述の温度および荷重条件下で、試験体上部のノッチ部に衝撃負荷を加え、脆性き裂を発生させた。

2. 試験体 1 に対する試験結果および考察

2.1 試験結果

試験体 1 に対する試験結果を図 7 に示す。脆性き裂は、発生直後から EG 溶接部に沿って直進伝播し、T 継手部を介して鋼板 B に約 5mm 進展した後に停止した。

2.2 考察

試験体 1 では脆性き裂は鋼板 B に進展した直後に停止した。このき裂停止位置と図 3 の断面マクロ写真との比較から、脆性き裂は鋼板 B の母材部において停止したと考えられる。

き裂が停止した要因としては、き裂が鋼板 B に達した時点での応力拡大係数が、鋼板 B の脆性き裂停止特性 ($K_{ca} = 4,200\text{N}/\text{mm}^{3/2}$) を下回った可能性が考えられる。そこで、き裂が鋼板 B に達した時点での応力拡大係数 K 値を求めるために、有限要素解析による K 値計算を行った。解析モデルを図 8 に示す。ここでは、図中の E 部を対称境界条件とし、中央き裂に置換えて計算した。また、解析モデル端部に図中矢印方向の一樣荷重を加え、公称応力が 257MPa となるよう荷重設定した。解析ソルバは ABAQUS 6.5⁵⁾ を使用し、静弾性解析を行った。解析の結果を図 9 に示す。本解析結果より、き裂が鋼板 B に達した時点での K 値として $6,450\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ が得られた。

町田ら⁶⁾の混成 ESO 試験による検討では、高速で伝播する脆性き裂の場合、塑性域の発達が抑制されるため、き裂長さの増大に対し K 値が飽和すると考察されており、静解析で求められる K 値 (K_{nom}) よりも実際の有効 K 値 (K_{eff}) は小さくなるとされている。町田らにより求められた $K_{eff} - K_{nom}$ 線図⁴⁾を参考にすると、上述の解析結果 ($K = 6,450\text{N}/\text{mm}^{3/2}$) の場合の K_{eff} はおよそ $4,000 \sim 4,200\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ 程度となり、鋼板 B の K_{ca} と同等、あるいはそれ以下の値と推定される。以上より、き裂が鋼板 B に達した時点での K 値よりも鋼板 B の脆性き裂停止特性が上回ったためき裂停止したと考えられ、

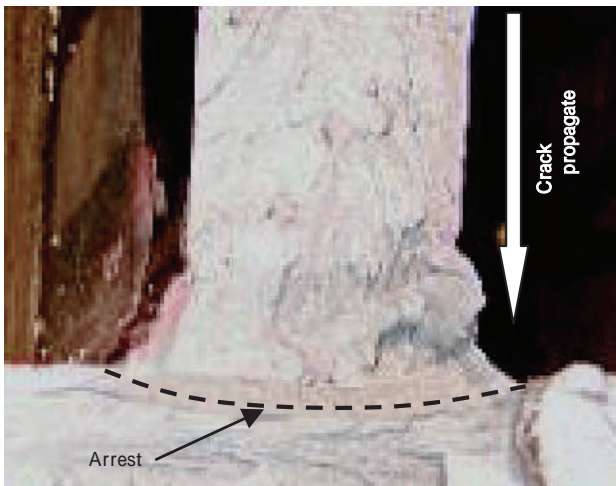


図 7 試験体 1 の試験結果
Fig. 7 Result of test using specimen 1

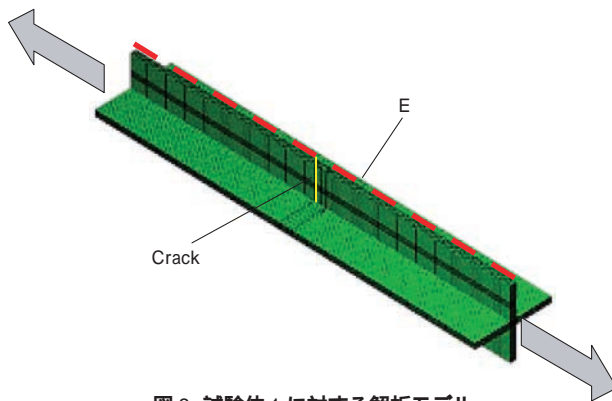


図 8 試験体 1 に対する解析モデル
Fig. 8 Analysis model for specimen 1

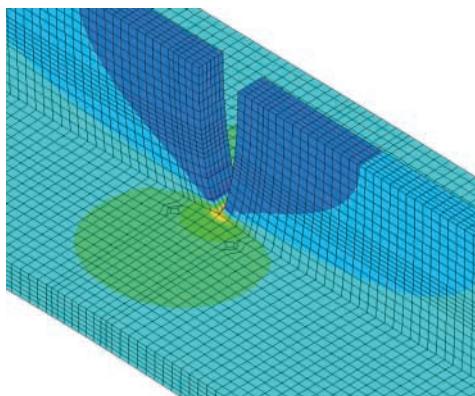


図 9 FEM 解析結果
Fig. 9 Results of FEM analysis

鋼板 B の脆性き裂停止性能が適切なレベルで確保されていれば、脆性き裂の停止が可能であることを本実験結果は示唆している。

3. 試験体 2 に対する試験結果および考察

3.1 試験結果

試験体 2 に対する試験結果を図 10 に示す。脆性き裂は、EG 溶接部および CO_2 溶接部に沿って伝播したが、鋼板 B に突入することなくチルプレートにより形成された未溶着部で停止した。EG 継手部および CO_2 継手部の試験終了後の断面マクロ写真を図 11 に示す。図からわかるように、脆性き裂は EG 継手部ではボンド部を伝播するが、 CO_2 継手部では溶接金属内を伝播する。これより、脆性き裂はチルプレート上部に進展していることが確認できる。また、試験後試験体ではすみ肉ビードに沿った約 100mm 長のき裂も見られた。

3.2 考察

3.2.1 ハッチサイドコーミング下端部でのき裂停止挙動に対する考察

ハッチサイドコーミング溶接部を伝播する脆性き裂は、チルプレートで未溶着部を確保した効果により停止することが確認できた。図 12 にチルプレート近傍のハッチサイドコーミングのき裂破面観察例を示す。図より、ハッチサイドコーミング表層部に約 3mm 幅のシアリップが見られる。また、破面観察の結果、図中破線より板厚中央部 (図中左側) は脆性破面を呈しており、一方ですみ肉溶接部は延性破面を呈し、脆性破壊は生じて

いないことが確認された。なお、すみ肉溶接部近傍の延性破面の形成に対しては、シアリップが影響を及ぼしていると考えられる。

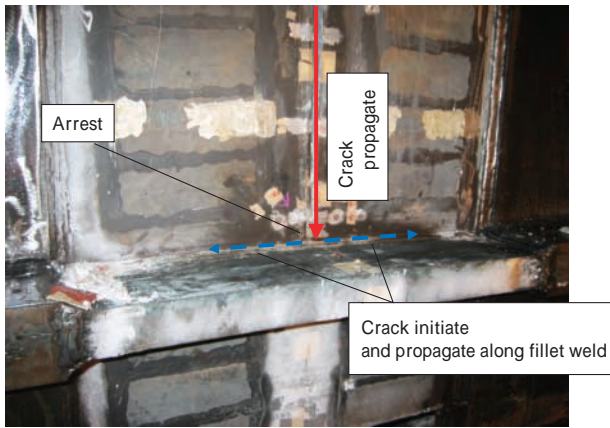


図10 試験体 2 の試験結果
Fig.10 Result of the test using specimen 2

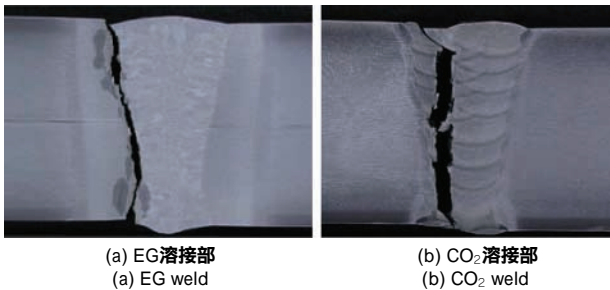


図11 試験体 2 ハッチサイドコーミング部のき裂進展位置
Fig.11 Location of brittle crack in hatch side coaming of specimen 2

3 2 2 すみ肉ビードに沿ったき裂に対する考察

本試験ではすみ肉ビードに沿ってき裂が発生した。すみ肉ビード部のき裂破面に対する観察結果例を図13に示す。破面には伸長ディンプルが見られ、延性破壊であることがわかる。

また、T継手部をすみ肉溶接とした別の試験において、すみ肉ビード部近傍にひずみゲージを貼付し、すみ肉ビード部に延性き裂が発生・進展する際のひずみの変化を調べた。試験の概略および試験結果を図14に示す。なお、本試験においても試験体 2 と同様に、ハッチサイドコーミングにおいては溶接部に沿って脆性き裂が進展し、すみ肉ビード部においては延性き裂が発生することを確認している。図 14 (b) より、横軸が約 8ms の時点においてひずみゲージ測定値が急激に低下しており、同時間においてすみ肉ビードの延性き裂がひずみゲージの真下を通過したと考えられる。本結果より、脆性き裂が発生しハッチサイドコーミングを約 700mm 進展する時間(約 1ms)に比べ、き裂がハッチサイドコーミング下端に達してからすみ肉ビードを 50mm 進展する時間(約 7ms)が極めて長いことがわかり、脆性き裂がハッチサイドコーミング下端に達してから、しばらく時間が経過した後すみ肉ビード部にき裂発生したことが確認できる。

以上より、すみ肉ビード部のき裂は、ハッチサイドコーミング EG 継手部の脆性き裂がチルプレート部で停止した後に発生した二次破壊であると考えられる。なお、二次破壊の要因としては、脆性き裂がチルプレート部で

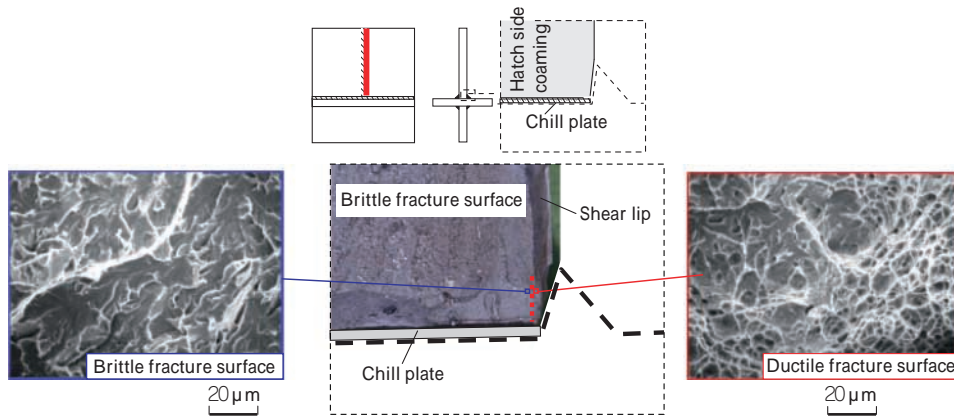


図12 試験体 2 チルプレート近傍のハッチサイドコーミング破面観察例
Fig.12 SEM of fracture surface in hatch side coaming near chill plate in specimen 2

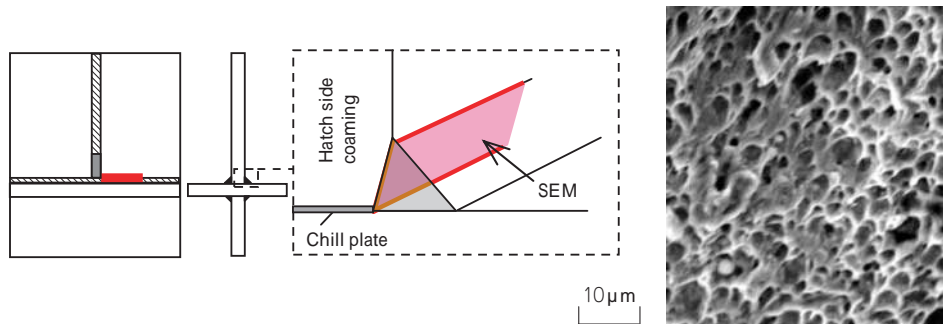


図13 試験体 2 の隅肉溶接部に沿ったき裂の破面観察例
Fig.13 SEM of fracture surface of the crack along fillet weld in specimen 2

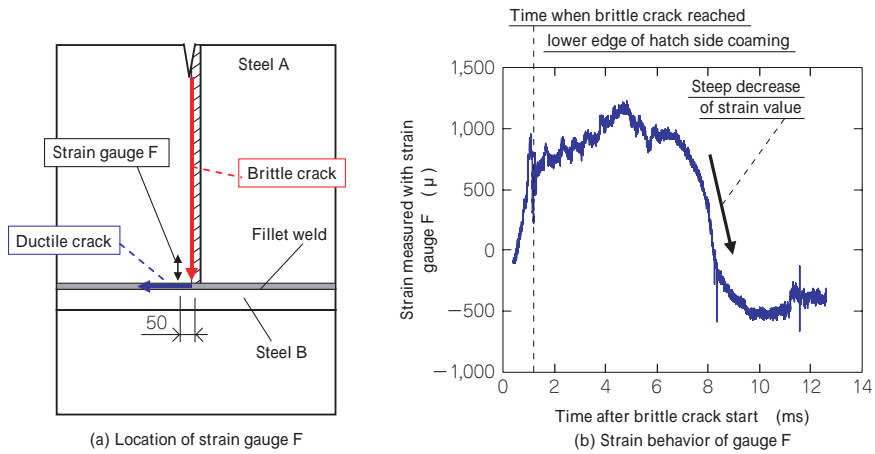


図14 延性き裂経路近傍のひずみ挙動
Fig.14 Strain behavior near ductile crack path

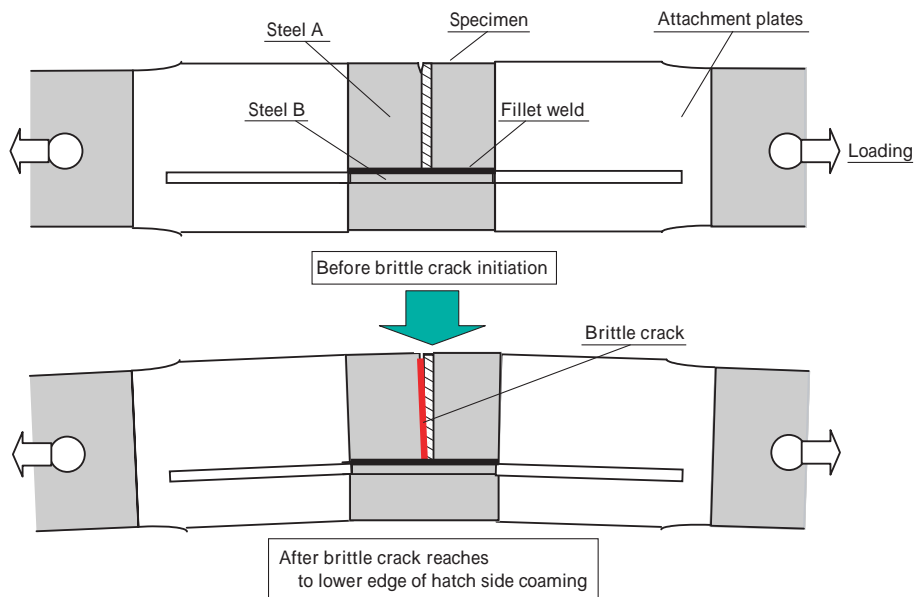


図15 ハッチサイドコーミング下端部まで脆性き裂が達した際の試験体変形の概要
Fig.15 Schematic of deformation after brittle crack reaches to lower edge of hatch side coaming

停止した後の応力再配分により、すみ肉溶接部に過大な応力が負荷された上に、き裂部が開口する曲げ変形（図15に変形の概略を示す）によりすみ肉ビード部近傍に応力集中が発生したためと考えられる。実船舶を想定した場合、ハッチサイドコーミングの大入熱溶接部が破断したとしても、残存する船体断面が大きい本試験体のような過大応力および過大な曲げ変形は発生せず、すみ肉ビードに沿ったき裂進展も発生しないと考えられる。

むすび=本研究では、板厚 60mm の鋼材を用いてハッチサイドコーミングと強力甲板の継手部を模擬した試験体に対する大型構造試験を行い、ハッチサイドコーミングを直進伝播する脆性き裂の停止挙動に対する強力甲板の鋼材特性、および溶接条件の影響について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

・T継手部を完全溶込溶接、強力甲板を Kca (0) が約 $6,000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ の鋼板 B とした場合に、脆性き裂は鋼板 B にわずかに進入した後には停止した。この結果は、鋼

板 B の脆性き裂停止性能が適切なレベルで確保されていれば、脆性き裂の停止が可能であることを示唆している。

- ・T継手部をすみ肉溶接として未溶着を設けることにより、脆性き裂を停止できることがわかった。
- ・ハッチサイドコーミング立向溶接部とすみ肉溶接部の交差部において未溶着部を確保する手法のひとつとして、チルプレートを装入した溶接施工方法が有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 山口欣弥ほか：Kanrin, No.3 (2005) p.70.
- 2) 大北 茂：溶接技術, 2007-3 (2007) p.65.
- 3) 井上健裕ほか：日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第3号, 2006, pp.359.
- 4) 半田恒久ほか：日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第4号, 2007, pp.459.
- 5) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual (1999).
- 6) 町田 進ほか：日本造船学会論文集, 第131号 (1972) p.367.