

「脆性亀裂アレスト設計指針」の開発

材料機装部、技術研究所

はじめに

市場の国際化が進み、世界的規模で海上輸送量が増大し続ける中、環境負荷や運行コストの低減を目的とした船舶の大型化、高性能化のニーズが高まっている。特に、コンテナ船の大型化は著しく、世界的には10,000TEU超の大型コンテナ船が完工している。^{1),2)}

コンテナ船は、強力甲板に大きな開口を有し、限られた縦通部材で船体縦強度を確保する必要があるため、強力甲板部構造（ハッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板）においては、従来から厚鋼板が使用されていた。そのため、大型コンテナ船では、板厚50mm超えの極厚鋼板が使用されるようになっている。このような極厚鋼板の使用に際し、最も重要な課題は、大規模破壊に至る脆性破壊の防止である。

脆性破壊の防止について、現行の船級規則では、脆性亀裂発生防止に加えて、脆性亀裂の伝播停止も考慮した規則体系となっている。これにより、万一脆性亀裂が発生した場合でも、適切な箇所での伝播を停止させることにより、船体の大規模破壊などの最悪の事態が回避可能となる。³⁾

ところが、最近の研究によると、極厚鋼板にあっては、脆性亀裂の伝播防止に関する従来の知見が直接適用できず、亀裂伝播を停止できない可能性があるとの大型モデル試験結果が報告されている。このことは、大型コンテナ船のような極厚鋼板を使用した船体構造にあっては、現行鋼船規則で要求される鋼材グレードを満足していても、脆性亀裂が万一発生した場合、亀裂が高速伝播し、大規模破壊事故を引き起こす危険性をはらんでいる。すなわち、大型コンテナ船への極厚鋼板の適用においては、脆性破壊防止のための技術基準の確立が緊急の課題となっている。

そこで本会では、2007～2008年度研究開発プロジェクトの一環として、脆性亀裂アレスト設計研究委員会を立上げ、大型コンテナ船に使用される極厚鋼板の脆性亀裂伝播挙動について検討を行った。本報では、同委員会の成果としてまとめられた「脆性亀裂アレスト設計指針」の概要について報告する。

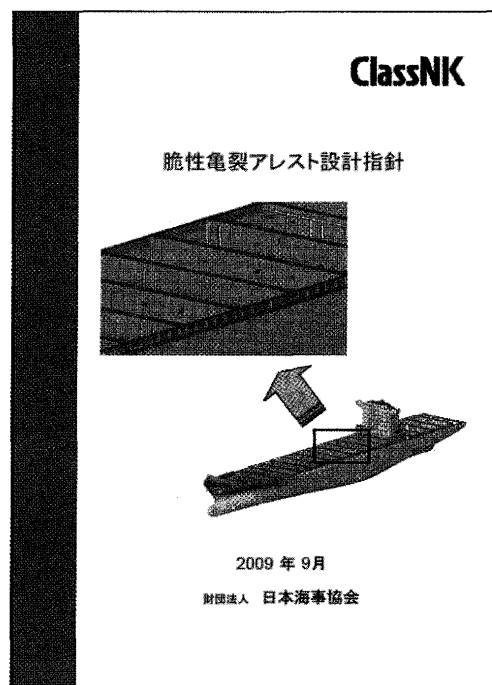


図1 脆性亀裂アレスト設計指針

1. 「脆性亀裂アレスト設計指針」開発の経緯

船体構造の脆性破壊は、大規模破壊事故につながりかねないものであり、確実に防止しなければならない。船舶の脆性破壊を防止するためには、脆性亀裂の発生を防止することがまず一義的に重要であることは当然である。現在、船級協会規則では、構造強度要件とは別に、使用鋼材の材質、鋼材の使用区分（靱性水準の異なるグレード材の構造部材への適切な配置）および溶接継手部の必要靱性水準を定めて、脆性亀裂発生防止を図っている。

同時に、脆性破壊が引き起こす船舶事故の重大さを考えると、万一脆性亀裂が発生した場合に備えて、脆性亀裂の伝播を適切な箇所での伝播を停止させる手段を講じておくことは、船体構造の大規模破壊防止に対するバックアップ機能として、脆性亀裂発生防止と同様に重要である。船級規則では、万一脆性亀裂が発生した場合を想定し、脆性亀裂を伝播停止させるクラックアレスターとして、舷側厚板や梁上側板に高靱性の鋼板を配置するよう規定している。図2にIACS統一規則S6で規定する鋼材の使用区分のうち、クラックアレスター（所定の幅を規定した高靱性鋼板）の配置を示す。これにより、万一脆性亀裂が発生しても、クラックアレスターの高靱性で亀裂を停止させ、船体の大規模破壊などの

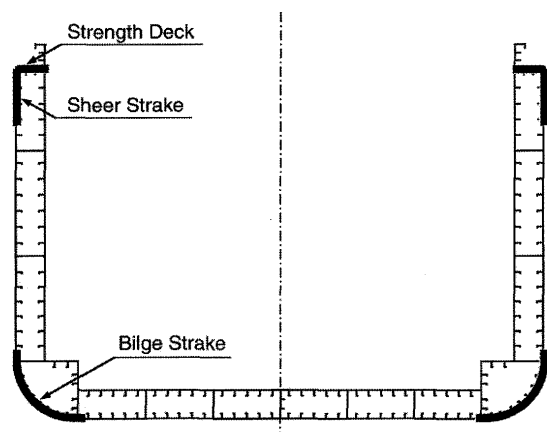


図2 クラックアレスターの配置例 (IACS URS6)

最悪の事態が回避可能となる。

この脆性亀裂伝播停止に関する船級規則の背景には、1970年代から1980年代に日本の大学、造船所、製鉄所、研究機関、船級協会が共同で実施した系統的な研究がある。これらの研究では、当時の大型船の船体構造に使用される板厚35mm程度の船体用高張力鋼板およびその溶接継手部の脆性亀裂の伝播停止性能に関して、概ね下記の知見を得ている。^{4), 5)}

- (1) 溶接継手部の大型アレスト試験により検討した結果、溶接継手部に沿って伝播する脆性亀裂は、溶接残留応力等の影響により、鋼板母材に逸れて停止する可能性が高い。
- (2) 船体構造部材に発生した長大脆性亀裂の伝播を停止させるのに必要な脆性亀裂伝播停止靱性値 K_{ca} は、使用温度において、 $4,000 \sim 6,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上である。

このように、現行の船級規則体系は、脆性亀裂発生の防止のみならず、脆性亀裂の伝播停止についても有効であると考えられてきた。

ところが、最近の研究では、「これまでの使用実績を大きく超える極厚鋼板に関しては、現行規則体系が必ずしも脆性亀裂の伝播停止を確実に保証できるとは言えない」との指摘がなされている。具体的には、大型コンテナ船に適用される極厚鋼板にあっては従来の知見と異なり、「現行の規則要求を満足する高靱性のEH級鋼板であっても、一旦発生した脆性亀裂が停止せず直進する場合がある」との大型モデル試験結果が報告されている。⁶⁾

このことは、極厚鋼板を使用した船体構造にあっては、現行船級規則で要求される鋼材グレードを満足していても、脆性亀裂が万一発生した場合、亀裂が高速伝播し、大規模破壊事故を引き起こす危険性ははらんでいることを示唆している。

そこで、本会では、研究開発プロジェクトの一環として、大学、造船所、鉄鋼メーカー、研究機関で構成される脆性

亀裂アレスト設計研究委員会を立上げ、多数の大型試験と数値解析を実施し、大型コンテナ船に使用される極厚鋼板の脆性亀裂伝播挙動について検討を行った。同委員会では、その成果を、船体構造に極厚鋼板を使用した大型コンテナ船について、目的意識的に脆性亀裂アレスト設計を行うことができるように、必要な技術的要件を「脆性亀裂アレスト設計指針」として取り纏めた。これは、これまで船体構造設計において明確なかたちでは規定されていなかった脆性亀裂伝播停止について、世界で初めて明確な機能要件と具体的要件を規定したものである。

2. 脆性亀裂アレスト設計指針および技術的背景

2.1 脆性亀裂アレスト設計指針の概要

a) 脆性亀裂アレスト設計の目的

脆性亀裂アレスト設計の目的は「脆性亀裂が万一発生した場合に、その脆性亀裂を船体の適切な箇所まで停止（アレスト）させ、船体構造の大規模破壊を防止すること」である。従って、脆性亀裂アレスト設計においては、「脆性亀裂の発生箇所をどこに考えるか、またその脆性亀裂をどこで停止させるか」と言う「シナリオ」の設定が重要になる。

図3に、本指針で設定したシナリオを示す。本指針では標準的な構造様式のコンテナ船を想定し、「ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂を強力甲板で停止させる（シナリオ1）」と「強力甲板で発生した脆性亀裂のハッチサイドコーミングへの進展を防ぐ（シナリオ2）」という二つのシナリオを考えた。

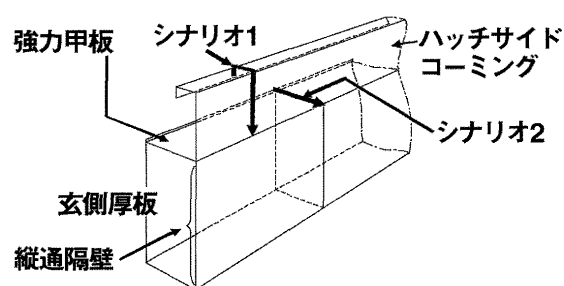


図3 脆性亀裂発生、停止についてのシナリオ

b) 適用対象

本指針の適用部材は「強力甲板まわりの縦通部材（ハッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板）のいずれかが板厚50mmを超える船体横断面のハルガーダー強度部材」とした。

板厚については、下記の理由から板厚50mm超の極厚鋼板を適用対象とした。

- ・ 現行の船級規則では、板厚50mmを境として鋼材

要求値や鋼材の使用区分といった規則上の取扱いが異なってくること

・ 板厚 50 mm 以下の鋼板については、大型船を含む船体構造において相当の安全使用実績があること
ここで、板厚 50 mm 以下の鋼板についても、同指針の規定は安全側の扱いで適用可能であるが、就航後の船体延長工事における溶接工事の不具合といった特殊な事例を除いて就航実績が十分ある板厚 50 mm 以下の鋼板を用いた船舶にあっては脆性破壊事故が発生していないことを勘案すると、具体的な要件として積極的にアレスト設計を適用するのは、当面 板厚 50 mm 超として差し支えないと判断できる。

適用対象船については、板厚 50 mm 超の極厚鋼板を船体構造に使用しているのは主として大型コンテナ船であり、加えてコンテナ船は大きな倉口を有しているため他の船種に比べ万一の脆性亀裂発生に対する冗長性が小さいことから、大型コンテナ船とした。

さらに、脆性亀裂アレスト設計の目的は「脆性亀裂を船体の適切な箇所では停止（アレスト）させ、船体構造の大規模破壊を防止すること」であるので、対象となる強度はハルガーダー強度に限定した。

なお、板厚 50 mm 以下の鋼板における脆性亀裂の伝播停止に対する現行規則の有効性（上限板厚）の確認は、検証されるべき課題の一つである。

c) 想定作用応力および設計温度

脆性亀裂を停止させる箇所の想定作用応力としては、YP40 鋼板の縦曲げ許容応力である 257 N/mm^2 を考えた。

脆性亀裂の停止箇所を強力甲板と考える場合には、ハッチサイドコーミングトップでの縦曲げ強度を YP47 鋼板ベースで設計したコンテナ船にも一般に適用可能である。また、脆性亀裂の伝播する速度が 500 m/sec 程度以上であるのに対し、船体のハルガーダー応力の変動周期は数秒（4～5 秒）程度である。そのため、脆性亀裂発生から停止するまでの間に、亀裂進展による船体横断面係数の変化に伴う縦曲げ応力の変化は生じないと考えられる。

設計温度は、現行船級規則体系での想定環境温度である -10°C とした。

2.2 脆性亀裂アレスト設計の基本要件

a) 脆性亀裂アレスト設計の基本コンセプト

アレスト設計の基本は「脆性亀裂を進展させようとする力（亀裂進展力）」より「脆性亀裂伝播を停止させようとする力（材料抵抗力）」が大きくなるようにすることである。定性的には次のような方法・手段が考えられる。

① 脆性亀裂伝播に対する抵抗力の大きい材料を

配置して、突入してくる脆性亀裂を停止させる。（材料アレスト）

② 亀裂伝播経路の連続性をなくすことにより、脆性亀裂が伝播しないようにする。（構造アレスト）

③ ①と②の併用により、伝播する脆性亀裂の亀裂進展力を減少させることにより、より小さな材料抵抗力で脆性亀裂を停止させる。

②の代表的な例としてはリベット継手やストップホールの設置が考えられるが、現在の大型コンテナ船の船体構造に適用するのは現実的でない。大型コンテナ船の脆性亀裂アレスト設計としては、①または③が現実的な手法と考えられる。例えば、ハッチサイドコーミングと強力甲板の取合いと言ったすみ肉溶接構造部での脆性亀裂伝播・停止については、上記①と②の併用効果が期待できる③である。

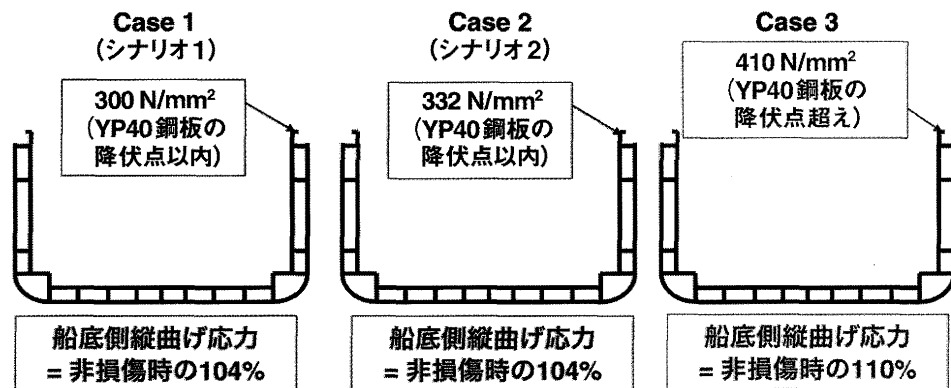
b) 脆性亀裂アレスト設計のためのシナリオ

前述の通り、本指針を策定するにあたり、「ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂を、強力甲板で停止させる（シナリオ 1）」と「強力甲板で発生した脆性亀裂の、ハッチサイドコーミングへの進展を防ぐ（シナリオ 2）」という二つのシナリオを設定した。

図 4 に、8,000TEU コンテナ船の強力甲板まわりの縦通部材の破断状況に応じた縦強度の減少の計算例を示す。両方同時に脆性亀裂が発生する可能性は極めて低いと考え、脆性亀裂は片方のみに発生するとする。ここで示す縦強度の減少は、脆性亀裂伝播中の状態ではなく、ある箇所では脆性亀裂が伝播停止したのちの縦強度減少を表している。

図 4 の Case1（シナリオ 1）及び Case2（シナリオ 2）に示すように、本指針で想定した二つのシナリオを満足するようアレスト設計を行えば、健全な側のハッチサイドコーミングトップの縦曲げ応力は、使用鋼板の規格降伏点未満となり、大規模破壊は防止できると考えられる。ここで、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板のいずれかで発生した脆性亀裂は、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板のバット継手内（一線バット）で停止しない場合でも、舷側厚板および縦通隔壁最上層板より下方において板厚が 35 mm 程度以下になることや、ハルガーダー応力が小さくなることから、従来からの知見により脆性亀裂は停止すると考えた。

これに対し、Case3 に示すように、ハッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板が破断した場合は、健全な側のハッチサイドコーミングトップの縦曲げ応力（最大設計応力）は使用鋼板の規格降伏点を越える。また、船底側の縦曲げ応力



Case 1 : ハッチサイドコーミングのみ破断(片玄)

Case 2 : 強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板が破断(片玄)

Case 3 : ハッチサイドコーミング、強力甲板、舷側厚板、縦通隔壁最上層板は破断(片玄)

図4 脆性亀裂アレスト設計のシナリオ検討 (8,000TEU コンテナ船の検討例)

は非損傷時の110%となり、ホギング状態での船底外板の座屈発生が懸念される。このように、Case3の状態では、甲板側での部材降伏、船底側での部材座屈が生じ、船体構造の大規模破壊につながる危険性が生じている。すなわち、船体構造の大規模破壊を防止するためには、ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂は、少なくとも強力甲板でその伝播を停止させ(シナリオ1)、強力甲板で発生した脆性亀裂は、少なくともハッチサイドコーミングでその伝播を停止させる(シナリオ2)必要がある。

以上より、指針ではアレスト設計のためのシナリオとして、「ハッチサイドコーミングで発生した脆性亀裂を、強力甲板で停止させる(シナリオ1)」と「強力甲板で発生した脆性亀裂の、ハッチサイドコーミングへの進展を防ぐ(シナリオ2)」という二つのシナリオを満足するようなアレスト設計を行うことにする。

c) バットシフト

指針では「材料アレスト(脆性亀裂伝播を停止させようとする材料抵抗力)」もしくは「構造アレストと材料アレストの併用」によるアレスト設計を考えている。ここで、図5に示すように、脆性亀裂を停止させようとする箇所では、伝播してきた脆性亀裂を母材に確実に突入させる必要がある。このため、「亀裂が伝播してきた部材の突合せ溶接継手」と「亀裂が突入しようとする部材の突合せ溶接継手」は一定の距離以上離す必要がある。(バットシフト)

必要なバットシフト量については、脆性亀裂伝播経路の数値解析を様々な条件下で実施し、標準値として300mmを採用した⁷⁾。これは、様々な亀裂伝播形態を包含する安全側の値であるため、指針では「原則」

とし、個々の設計において大型破壊試験等で継手配置の妥当性を検証する場合には、このシフト量によらずとも良いこととした。

2.3 代表的な脆性亀裂アレスト設計

a) 板厚50mm超75mm以下の脆性亀裂アレスト設計

船体構造部材に発生した長大脆性亀裂の伝播を停止させるのに必要な脆性亀裂伝播停止靱性値(K_{ca} 値)は、従来の研究成果として、使用温度において4,000~6,000N/mm^{3/2}以上であることが知られている。これらは、当時の大型船に使用されていたせいぜい板厚35mm程度の鋼板に対する試験結果であり、指針の作成にあたっては、指針の対象とする大型コンテナ船に使用される板厚50mmを超える極厚鋼板に対して必要な K_{ca} 値を明らかにする必要がある。

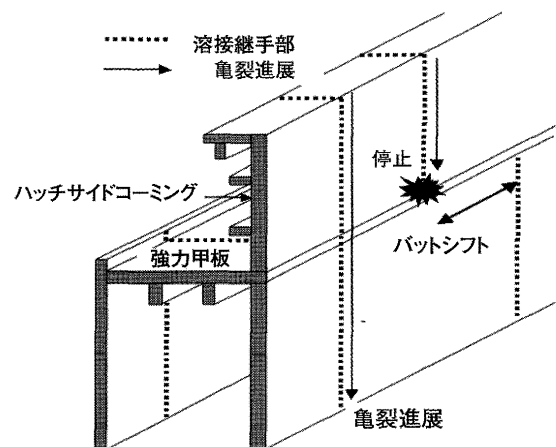
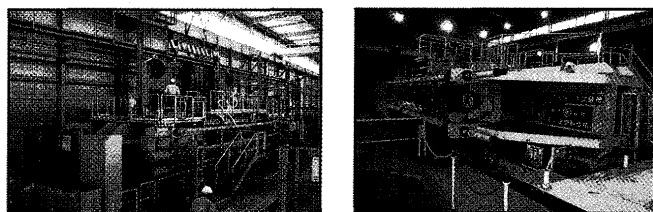


図5 強力甲板部構造のバットシフト例

脆性亀裂は、長くなればなるほど亀裂を進展させようとする亀裂駆動力が大きくなる。そのため、実船のように亀裂伝播距離が大きくなる場合（長大亀裂）の伝播・停止挙動の把握のためには、実船に近いサイズの試験体での大型脆性破壊試験の実施が必要となる。図6に、本研究委員会で使用した大型試験装置を示す。



(a) 新日本製鐵 8,000t試験機 (b) JFE スチール 8,000t試験機

図6 大型モデル試験に使用した試験装置

本調査研究では、現在の極厚鋼板の適用実績と製造能力を考慮し、板厚 60 mm と 75 mm の試験体について、材料特性のみで脆性亀裂を停止させるのに必要な K_{ca} 値を評価する混成 ESSO 試験と、構造の不連続の影響を考慮した中型棚板構造試験を実施した。さらに、実証試験として実際の構造をモデル化した超大型棚板構造モデル試験を実施した。図7に、超大型構造モデル試験体の形状及び溶接組み立て順序を示す。ここでは、実船と同様にハッチサイドコーミングの突合せ溶接部下端部が強力甲板に溶込むように試験体を作成した。

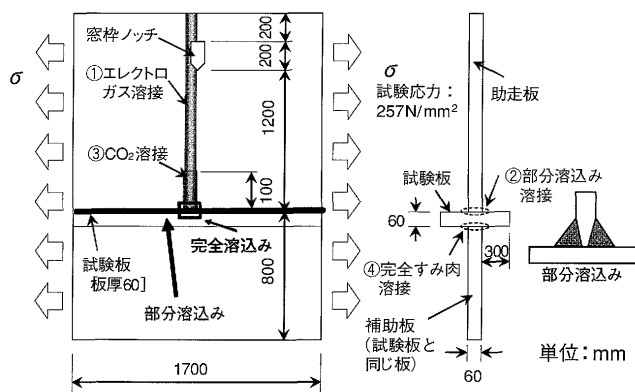


図7 超大型棚板構造モデル試験体
(①～④：溶接組立て順序)

結果、シナリオ1（ハッチサイドコーミングからの脆性亀裂を強力甲板突入で停止させる）、シナリオ2（強力甲板からの脆性亀裂をハッチサイドコーミング突入で停止させる）のいずれの場合も、構造の不連続を考慮した上で、突入してきた長大脆性亀裂を停止させるのに必要な材料抵抗力（脆性亀裂伝播停止靱性 K_{ca} 値）として $6,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ という脆性亀裂伝播靱性値が得られた。

b) 板厚 75 mm 超の脆性亀裂アレスト設計

板厚 75 mm を超える鋼板のコンテナ船船体構造への適用については、必ずしも一般的とは考えられないことから、板厚 75 mm 超の鋼板に対するアレスト設計については個別ケースとして、個々の大型破壊試験等による検証を行うこととした。

2.4 代表的なアレスト設計以外の脆性亀裂アレスト設計の検証

上述のように、代表的な脆性亀裂アレスト設計に関する要件は、指針の実用性も考慮して包括的な安全側の解を与えている。このため、指針では、代表的なアレスト設計以外の脆性亀裂アレスト設計を行う場合について、「適切なサイズの大型脆性破壊試験を含む検証により、アレスト設計の妥当性を検証する」こととしている。これは、実船で発生を想定しているような、長大脆性亀裂の伝播・停止挙動の把握のためには、適切なサイズの大型脆性破壊試験による検証が必要不可欠だからである。

2.5 脆性亀裂伝播停止靱性評価試験法（ K_{ca} 試験法）の標準試験方法

指針では、代表的な脆性亀裂アレスト設計の要件として、脆性亀裂伝播停止靱性値（ K_{ca} 値）を規定している。そこで、要求される K_{ca} 値を有する材料を選定することが必要となるが、現在 K_{ca} 値を評価する試験方法として標準化された試験方法が存在しない。

そこで、種々の試験条件の変化に対する試験結果（ K_{ca} 値）の影響についての調査と、各試験機関で実施されている脆性亀裂伝播停止試験の実情調査を実施した。これらの結果を基に、異なる試験機関であっても共通の試験結果が得られるように試験方法を標準化し、「脆性亀裂伝播停止靱性評価試験法（ K_{ca} 試験法）」として附録に取入れた。

3. まとめ

極厚鋼板を用いた大型コンテナ船に対し、脆性亀裂発生防止措置に加えて、本指針に基づく積極的な脆性亀裂伝播停止の手段（脆性亀裂アレスト設計）を講じることは、二重の安全性を確保することになり、大型コンテナ船の脆性破壊に対する安全性をさらに向上させることができる。

本指針は、脆性亀裂伝播停止機能要件について、世界で初めて明確な機能要件と具体的要件を規定した画期的な技術指針である。

本会では、現在も超大型コンテナ船の極厚化問題を検討する調査研究を継続中で、定量的な構造不連続を評価したより合理的なアレスト設計や、小型の試験片による工業的な脆性亀裂伝播停止靱性値評価の試験法の開発など、本指針の内容をさらに発展させていく計画である。

謝辞

本指針の作成にあたり、様々なご助言と指導を頂いた長崎総合科学矢島教授、東京大学栗飯原教授、海上技術安全局吉成主席研究員に深謝いたします。また、種々の試験、解析を実施し、かつ熱心な審議を頂いた脆性亀裂アレスト設計委員会の皆様方に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 山口欣弥, 北田博重, 矢島浩, 廣田一博, 白木原浩: 超大型コンテナ船の開発 — 新しい高強度極厚鋼板の実用 —, 日本船舶海洋工学会誌, 第3号 (2005) pp. 70-76.
- 2) Yamaguchi Y., Matsumoto T., Yajima H.: Technical Requirements to Ensure Structural Reliability for Mega Container Ships — Application of New Higher Strength Hull Structural Steel Plates of Heavy Thickness —, Proceeding of Design and Operation of Container Ships of Royal Institute of Naval Architects (2006年), pp.43-50.
- 3) 福井努, 北田博重, 多田益男, 廣田一博, 石川忠: 船体構造におけるクラックアレスターの要求性能, 圧力技術, 第41巻, 第6号 (2003), pp.13-25.
- 4) 日本造船研究協会 第147研究部会: 船体用高張力鋼板大入熱溶接継手の脆性破壊強度評価に関する研究, 日本造船研究協会報告書第87号 (1978).
- 5) 日本造船研究協会 第193研究部会: 新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究, 日本造船研究協会報告書第100号 (1985).
- 6) Inoue T, Ishikawa T, Imai S, Koseki T, Hirota K, Tada M, Kitada H, Yamaguchi Y and Yajima H: Long Crack Arrestability of Heavy-Thick Shipbuilding Steels, Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-06 ISBN1-880653-66-4 (2006), pp.132-136.
- 7) 吉成仁志, 栗飯原周二: バットシフト継手における脆性き裂の伝播挙動 — 溶接継手脆性き裂伝播のシミュレーション (第3報) —, 日本船舶海洋工学会論文集, 第9号 (2009), pp.177-182