まわ エンジニア!

造船用極厚鋼板の 脆性き裂伝播停止（アレスト）特性*

井上 健裕**, 大谷 潤***

井上 健裕

大谷 潤

Brittle Crack Arrest Properties of Heavy-thick Shipbuilding Steels*

by INOUE Takehiro** and OTANI Jun**

キーワード 大型コンテナ船，造船用極厚高強度鋼板，脆性破壊，脆性き裂伝播停止性能，アレスト性能

1. はじめに

大型鋼構造物の破壊事故は過去度々経験され，その都度大きな被害を生じてきた。特に脆性破壊事故は，脆性き裂の伝播速度が1000 m/s 以上にもなることから，巨大構造物であっても，一瞬にしてその構造物全体の破損に繋がり，多大な損害を生じる。これらの破壊事故は，人的・経済的損害はもちろん，環境被害にも繋がりうるもので，その防止は非常に重要である。

このような破壊事故の防止には，構造物の種類毎に，設計上，操業上の基準が定められている。これらの基準は，破壊の発生破壊事故時の被害リスクの大きい構造物では，より確実に破壊を防止するべく多重の安全性を確保する工夫がなされている。

例えば，LNG や LPG など，大規模漏えいした場合，爆発炎上の危険があるため，少量の漏えいで防止し大規模破壊を起こさないよう，LBB（Leak Before Break：破損前漏えい）での防止の概念を実現して，二重の安全性を確保する図1¹⁾のような考え方が採用されている。これは，脆性破壊の観点からは，脆性き裂発生防止の確保と，万が一の想定外の原因により脆性き裂が発生しても，脆性き裂を停止させうること（伝播の阻止）により，二重の安全性を確保するものである。

脆性き裂伝播を阻止する性能を脆性き裂伝播停止性能または脆性き裂アレスト性能と呼び，水力発電用水圧鉄管（ペンストック）や大型船舶でも過去に検討されてきている。このアレスト性を材料要求に内包しているのは，海外の基準では，ASME の原子力格納容器に対する基準およ

びAPI 及びISO のパイプラインに対する基準がある。ASME では中性子による照射脆化部した容器内面で発生した脆性き裂が，容器外面まで貫通せずに停止することを要求している。また，パイプラインでは，き裂伝播速度をコントロールすれば長距離伝播は防止できることから，DWTT 試験による要求がなされている。

- Effective hydrotest; Effectively high warm prestressing. Subsequent growth of any crack, extreme embrittlement by strain aging etc. are not allowed.
- S.C.A.; Short Crack Arrest. The brittle crack is arrested because the initiation took place at a small embrittled region in heterogeneous material.
- L.C.A.; Long Crack Arrest. A long propagating crack is arrested because it runs into quite tough (another) material.
- No propagation in shear; The arrested long crack is safely contained in the structure even at stress redistribution after arrest.

図1 発生と伝播防止による二重の安全性の概念¹⁾

*原稿受付 平成22年10月26日

**正 員 新日本製鐵株式会社 鋼材研究所 Member, Nippon Steel Corp., Steel Research Laboratories

***正 員 新日本製鐵株式会社 大分製鐵所 Member, Nippon Steel Corp., Oita Works

脚注：アレストという言葉は、英語の Arrest (逮捕する) から来ており、伝播き裂を捕まえ（て停止させ）るというニュアンスが良く出ている表現である。

2. 造船分野でのアレスト

造船分野における脆性き裂伝播に関する研究の歴史は古い。そもそも鋼材の脆性破壊に関する研究が最初に本格的に行われたのは、第二次世界大戦中の戦時標準船の事故の対策であった。この検討は、事故船の鋼板毎の、き裂の発生・伝播・停止を、現在でも鋼材の出荷試験で用いられているシャルピー試験結果で整理することによって行われ、鋼板のシャルピー要求値が定められた。

本格的な造船分野でのアレスト研究は、ロバートソン試験、ESSO 試験、二重引張試験等の大型試験の開発後、精力的に行われた。造船用鋼材としては、TMCP 鋼の実用化を契機として造船研究協会 (SR) にて幅広く行われた。その結果、図 2 に示すように長大き裂でも $K_{ca}=600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 以上の K_{ca} 値があればき裂の伝播停止が可能であること

図2 超広幅試験でのKnom値と有効K値 (Keff) による試験結果の整理²⁾。

図3 大型伝播試験結果とシャルピー衝撃値の関係³⁾

が明らかになった²⁾。さらに、図 3 に示すように溶接部を伝播するき裂は、横軸の伝播部の靱性の谷間が小さく、縦軸の負荷応力が高い場合は真っ直ぐ伝播するが、図 3 実線境界より右側ではき裂が逸れて母材で停止しうることが明らかにされた³⁾。

以上のことから、次のような脆性き裂伝播停止の考え方が提案された。①長大き裂のアレストには脆性き裂伝播停止靱性 K_{ca} として $400 \text{ kgf/mm}^{3/2} \sim 600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ が必要である。②溶接継ぎ手部に沿った伝播き裂は、入熱にかかわらず継手靱性が十分であれば、長距離伝播する間に母材に逸れて伝播停止することが期待できる。

以上の結果は、板厚 40 mm 以下（その多くが板厚 25 mm）の YP 40 以下のグレードの鋼板を用いた実験結果から導き出されたものであるが、この結論から重要部材に造船 EH グレード鋼材等の高靱性鋼材を配置し、ブロック建造による溶接線が一直線上にあっても、万が一の脆性破壊事故に際しき裂の伝播停止が期待でき、沈没に至る最悪の事故は回避されると考えられた。

3. 最近の知見と今後の取り組み

21世紀に入り、コンテナ船は急激に大型化した。中国の経済発展に伴う、海上物流の増加によるものであるが、2000 年頃までは 5000 TEU (TEU: 20 フィートのコンテナの積載個数) 程度であったものが、最近では 10000 TEU を超えるコンテナ船も計画されている。

コンテナ船は、コンテナの積み下ろしのために大きな開口部を有する、特殊な構造の船である。そのため、開口部周辺に配置されるハッチサイドコーミングには極厚の高強度鋼が用いられる。図 4 はコンテナ船のサイズとハッチサイドコーミングの板厚の関係を示した図であるが、両者はほぼ比例関係にあり、10000 TEU になると 100 mm 程度の板厚の鋼板が必要になってくる⁴⁾。

一方、前述の造船材の脆性き裂アレストに関する過去の知見は、板厚 40 mm 以下で確立された手法であった。極厚の場合の脆性き裂アレストについては、65 mm～70 mm の板厚の鋼板を用いた大型アレスト実験が実施され報告された^{5), 6)}。結果を表 1 に示す。

この報告結果から、厚手材では、脆性き裂がボンドから逸れることが無いことが分かった。さらに、その後の 50 mm 以上の板厚の大入熱継ぎ手で脆性き裂が逸れる現

図4 コンテナ船の大きさとハッチサイドコーミングの板厚の関係⁴⁾

表1 極厚造船材 (板厚 65 mm~70 mm) の大型アレスト試験結果^{5), 6)}

試験体	試験体-1	試験体-2	試験体-3	試験体-4	試験体-5	試験体-6
狙い	ボンドアレスト	骨材の効果	骨材の効果 (せん断破壊対策)	SUF骨材 (両表面) 負荷応力の効果	SUF骨材 (片面) SUF棚板の効果	母材アレスト
構造	平板	スチフナ	スチフナ	スチフナ&棚板	スチフナ&棚板	スチフナ
試験温度	温度勾配	-10℃	-10℃	-10℃	-10℃	-10℃
試験応力	36kgf/mm ²	28kgf/mm ²	24kgf/mm ²	19kgf/mm ²	24kgf/mm ²	26kgf/mm ²
試験結果	伝播	伝播	伝播	アレスト (骨材手前でアレスト)	アレスト (SUF棚板に突 入直後に停止)	伝播
き裂の伝 播状況

象が確認できないことが報告された⁶⁾。また、厚手材母材の実験結果から、65mmの厚手材では、シャルピー衝撃値が良好でも、脆性き裂のアレスト特性が不十分で、脆性き裂が止められないことが有ることを実証した。

この報告は、従来の船舶設計で想定している脆性き裂伝播停止のストーリーが極厚では成立しないことを示唆しており、大きな衝撃を持って受け止められた。すなわち、薄手材と同様の鋼材要求・設計を取る限り、万が一脆性き裂が発生した場合には、溶接線に沿ってき裂が伝播し、最悪の場合、船体が破断し沈没する恐れがあることを示唆するものであった。

この研究をきっかけに、日本国内では大型アレスト試験に関する共同研究が始まった。この共同研究は、(財)日本海事協会が、国内鉄鋼会社、国内造船会社を組織して実施したもので、その第1期の研究結果が学会で報告されている⁷⁾。図5にその結果を示す。大型実験でのアレストには $K_{ca} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上が必要であること (前述 SR 委員会での $K_{ca} = 600 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ とほぼ同一)、構造モデルではその要求値が緩和できる可能性が有ることが明らかにされた。日本海事協会ではこの共研成果を反映させ、脆性破壊アレスト設計指針を発行した。

これらの検討は、さらに広く行われるようになってきており、海外でも英国、韓国で検討が開始されている。この動きは、近い将来、国際船級協会連合 (IACS) の中でも国際化を探る動きとなってくると思われる。

さらに1970年代から議論されてきた長大き裂問題は、上述の「 K_{ca} が $6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以上であれば、長い脆性き裂で K 値が $6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ を超える条件でもアレスト可能である」という破壊力学で通常採用される破壊条件と異なる特

図5 日本海事協会共同研究での大型試験結果のまとめ⁶⁾

異な判定条件であり、未解明の問題であるが、この解決に向けての取り組みも続けられている。近い将来長大き裂に関する理論的裏付けも整備され、合理的なアレスト設計が世界的に実現されることが期待されている。

参考文献

- 1) Tanaka, K., et al. ASTM STP905, pp. 22-40 (1986).
- 2) 町田進他, 造船学会論文集, 第131号, p. 367.(1972).
- 3) 造船研究協会報告書No.87, 造船研究協会第147委員会 (1978).
- 4) Yamaguchi, Y, et al. Design & Operation of Container Ships, Royal Institution of Naval Architects, pp.43 (2006).
- 5) 日本造船学会秋季講演大会, ポスターセッション (2005).
- 6) Inoue, T. et al. Proc. of ISOPE2006, pp.132-136 (2006).
- 7) Yamaguchi, Y, et al. Proc. of ISOPE2010, pp.71-79 (2010).