

クラックアレスターについて

池田一夫* 矢島 浩**

A Review on Crack Arrestor

by

Kazuo Ikeda and Hiroshi Yajima

Abstract

The crack arrestor is used for prevention of welded structures including ship from the catastrophic failures such as brittle fracture. Construction of 275,000 ton mammoth tankers are planned presently in the Japanese shipyards, and the importance of crack arrestor has been actively recognized.

A review on welded and riveted crack arrestors is introduced and, in addition, our new types of crack arrestor are proposed in this paper.

1. クラックアレスターの必要性

溶接構造物の脆性破壊による重大な事故を防止するためには、脆性亀裂が発生しないように良好な材料、設計および工作を必要とするが、万一脆性亀裂が発生してもその伝播を停止させることができれば重大な損傷を防止できることになり、溶接構造物の建設のためにはきわめてのぞましい。

一様応力、一様温度、同一材質内では脆性亀裂は一旦発生すると高速で伝播するのが特徴であるが、その伝播速度は温度が低いほど、引張応力が大きいほど大きく、亀裂長さの増加とともに大きくなっていくが、ある値以上にはならないことがこれまでの研究で知られている。¹⁾²⁾一様応力、一様温度、同一材質内では、一旦脆性亀裂が発生すると停止することなく伝播をつづけるので、脆性亀裂の伝播を停止させるには、まず温度勾配をつけて高温部で停止させることが実験室での大型伝播停止試験でもちいられているが、実際の構造物では一般に不可能なことである。また応力場を変化させて、たとえば圧縮残留応力場で脆性亀裂の伝播を停止させることも実験室ではおこなわれるが、実際の構造物での実現はこれまた困難である。

したがって、実用的には良質の鋼板を溶接するか、あるいは鋸継手をもちいて高速で伝播してきた亀裂を

停止させる、すなわちクラックアレスターを採用する方法が実際の溶接構造物においてもちいられている。しかし、最近のように船舶が大型化し、船体用鋼板の厚さが大きくなると鋸継手をもちいることが困難になり、良質な鋼板により亀裂の伝播を停止させる方法の検討が最も緊急を要する問題になる。すなわち、どの程度に良質でどれ位の中鋼板を溶接すれば、数メートルも伝播してきた脆性亀裂を停止させるのに十分であるかという点、さらにはより有効なクラックアレスターの形状や寸法、挿入方法等についてあらかじめすることは、巨大船をはじめとする溶接構造物の設計にきわめて必要である。

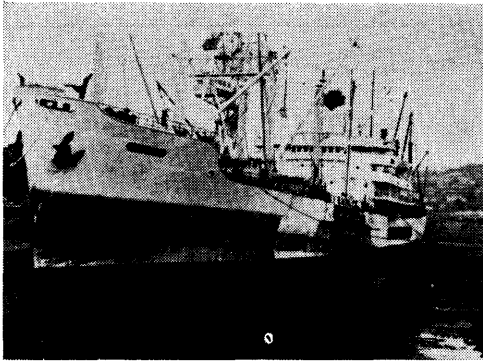
現在、わが国では鋼板の脆性亀裂の伝播停止特性をしらべるには温度勾配型または平坦温度型の二重引張試験または ESSO 試験がおこなわれているが、これらの試験でもちいられているように、脆性亀裂が停止するまでの距離（停止亀裂長さ）が 350 mm 位までの場合で評価した鋼板の脆性破壊伝播停止特性が、はたしてかなり長い距離伝播してきた亀裂の停止性能の推定に正しい答えをあたえるかどうかについては、今後さらに検討を要すると考えられている。

2. クラックアレスターとしての鋸継手

高速で伝播してきた脆性亀裂を停止させる効果的な

* 船体構造部

** 三菱重工業株式会社 技術本部長崎研究所



| | | |
|----------|----------------------|---|
| 造船所 | MISS. PASCAGOULA 造船所 | |
| 建造年 | 1944年 | |
| 寸法 | L | 465 ft 3 in (142m) |
| | P | 65 ft 6 in (20m) |
| | D | 33 ft 11 ³ / ₈ in (10.4m) |
| | d | 29 ft 5 in (9m) |
| GRO. TON | 7,924 TON | |
| N. TON | 4,627 TON | |

写真 1 衝突された貨物船³⁾



写真 2 衝突による甲板の破損³⁾

方法の一つは、鉸継手を亀裂伝播径路上に垂直に設けることである。現在、船体構造の一部にこの形式がもちいられている。

ある米国の戦時標準船の最近の衝突事故の1例では(写真1および写真2), 他船に衝突されて舷側から上

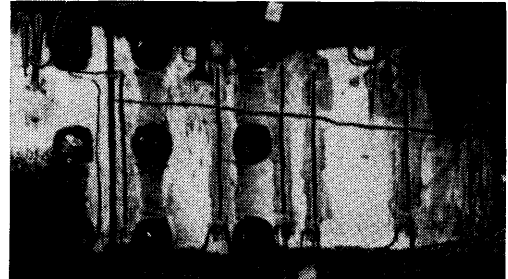


写真 3 スロットにより脆性亀裂が停止した例⁴⁾

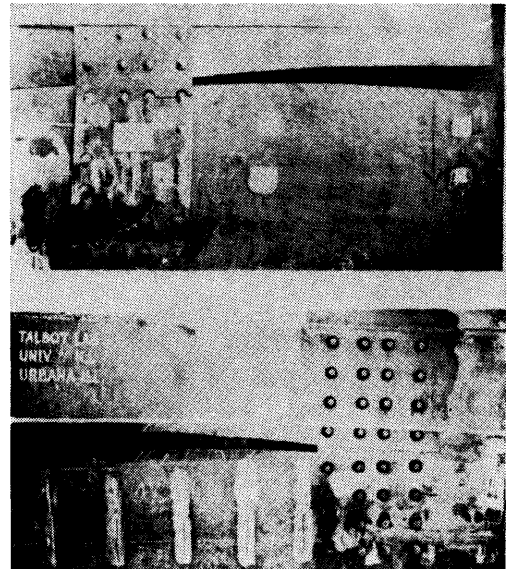


写真 4 スロットがなく、脆性亀裂が鉸孔間にもつかった場合の脆性破壊⁴⁾

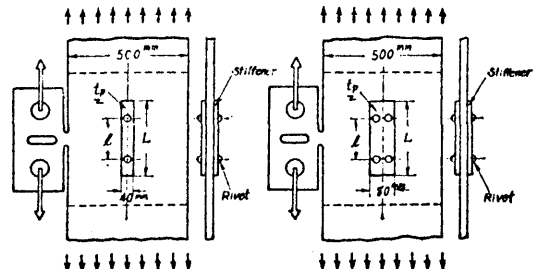


図 1 リベットスチフナー型クラックアレスター試験片⁵⁾

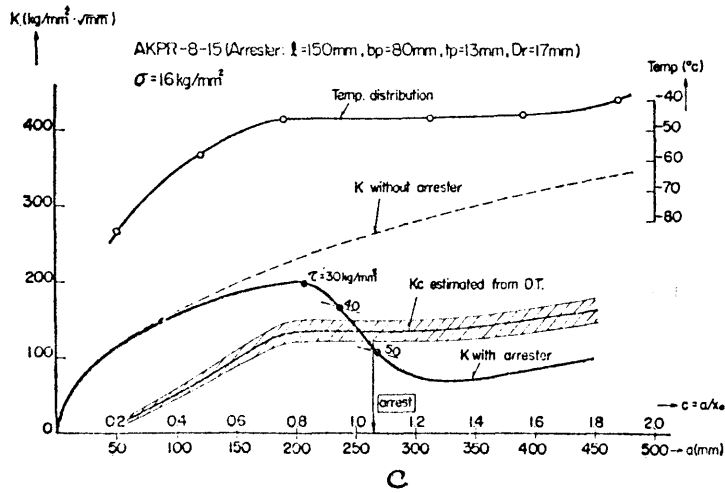


図2 リベットスチフナー型クラックアレスターの機能図³⁾

甲板中心線にむかって伝播してきた脆性亀裂が鋸継手で完全に停止しており、クラックアレスターとしての役割を十分果たしていることがわかった。³⁾

鋸継手によるクラックアレスターの研究については、米国イリノイ大学の Mosborg⁴⁾ が、3,000,000 lb 試験機により巾 72 in, 板厚 3/4 in の広巾試験片をもちいて大規模な実験をおこなっており、⁴⁾ その結果によると、亀裂伝播径路上に直角方向のスロットが存在する場合には脆性亀裂は確実に停止し(写真3), スロットがない場合に亀裂線が鋸孔にぶつくと停止し、鋸孔間にくるときは亀裂は停止することなく伝播をつづけ試験片は破断した(写真4)。

一方、吉誠、金沢、町田⁵⁾ はスロットがなくても亀裂の進展にともなって亀裂伝播径路をはさむ隣接の2つの鋸の間に引き合う力が作用して、亀裂の進展にともなう歪エネルギーの解放率が減少するため亀裂が停止することがあると破壊力学をもちいて推論し、リベットスチフナー型の二重引張試験により実験的に検討した(図1および図2)。

3. クラックアレスターとしての良質鋼板の溶接

3.1 船体構造におけるクラックアレスター(良質の鋼板)の必要性

前述のように鋸継手を設ける構造は、安全第一に考える場合非常に有効であると考えられる。しかるに、造船所において船体の超大型化と工期短縮にともないリベットシームを廃止することができれば下記の理由

から効果大きい。

(1) 鋸孔の穿孔工事は溶接工事と並行作業が出来ず、シリーズ作業となるために短期建造に対して工程

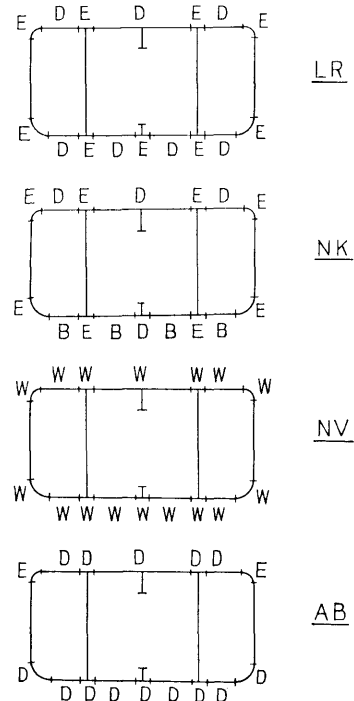


図3 各船級協会規則によるクラックアレスターをふくむ全溶接船の鋼材配置(中央横断面)
(D…D級鋼, E…E級鋼)
(W…W鋼板特殊セミキルド鋼)

上無理が起き易い。

(2) 鉚工の不足, 老令化などにより鉚釘能力が低下している。

(3) タンクテスト時の手直し, 塗装時の塗り残し等不利な点が多い。

(4) ブロック建造法においてブロック分割上に制限が出てくる。

いま, 1例としてある大型船について完全溶接構造とする場合, 図3に示すように各船級協会間でルール上の船殻構造は著しくことなり, 建造にあたる者にとって定量的検討が是非とも必要であろう。

3.2 Mosborg の実験

Mosborg⁴⁾ は前述の鉚継手のほかに, 溶接によるクラックアレスターについての一連の大規模な実験もおこなった。試験片は板厚が3/4inでその巾は予備実験では6inであったが, 本実験としては72in (1,800mm)の広巾試験片をもちい, 十分な助走距離をつけて脆性亀裂を高速でクラックアレスターに突入させることに成功した。

脆性破壊発生板の巾は12inないし56inで, アレスターの巾は主として4in, 一部のものは12, 24, 36inとした。試験温度は主として-5°Fないし-54°Fで, 応力は主として28ksi (20kg/mm²), 一部のものは33ksiとした。脆性破壊発生板としてはリムド鋼をもちい, アレスターとしては調質鋼(T-1鋼)をもちいた。供試材の化学成分および機械的性質等を表1に示す。試験結果の1例を図4に, 総括した結果を表2に示す。

これらよりつぎの現象があることがわかる。

脆性破壊発生板の巾を a とすると

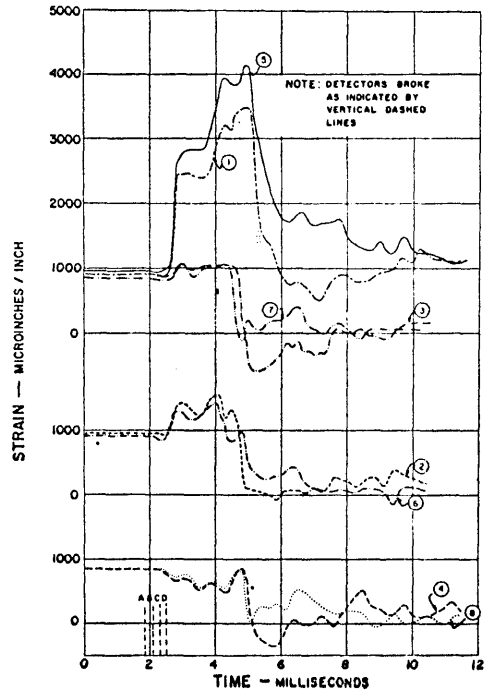
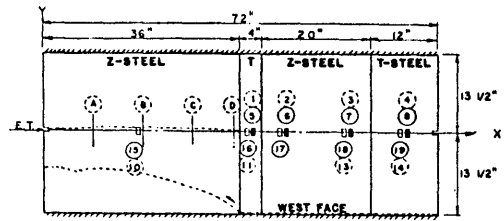


図4 クラックアレスターが挿入されている場合の脆性亀裂伝播経路と歪-時間曲線の記録の例⁴⁾

表1 供試鋼の化学成分および機械的性質⁴⁾

| 鋼 | 鋼種 | C | Mn | Si | P | S | Cu | Cr | Ni | Al | V | Mo |
|---|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| Z | リムド | 0.18 | 0.42 | 0.02 | 0.013 | 0.031 | 0.07 | — | 0.14 | 0.003 | — | — |
| E | リムド | 0.21 | 0.34 | 0.01 | 0.019 | 0.030 | 0.18 | 0.12 | 0.19 | 0.003 | — | — |
| X | セミキルド | 0.20 | 0.76 | 0.03 | 0.019 | 0.040 | 0.04 | 0.02 | 0.16 | 0.002 | — | — |
| T | 調質 | 0.11 | 0.84 | 0.28 | 0.036 | 0.015 | 0.32 | 0.50 | 0.99 | 0.09 | 0.095 | 0.53 |

| 鋼 | 降伏点 ksi | 抗張力 ksi | 伸び (G.L. 2") % | 絞り % | vT_{715} °F | vT_{70} °F |
|---|------------|------------|----------------------|---------|------------------|-----------------|
| Z | 34.7 | 68.1 | 36 | 58 | 50 | 62 |
| E | 32.1 | 64.9 | 36 | 57 | 55 | 62 |
| X | 34.9 | 66.7 | 39 | 65 | -15 | 70 |
| T | 111.9 | 126.6 | 22 | 46 | -180 | -120 |

表 2 クラックアレスターの試験結果一覧表⁴⁾

| 試験番号 | スターター板 | アレスターまでの距離 | アレスター巾 | 温度 | 応力 | アレスター内の亀裂長さ |
|------|--------|-------------------|--------|------|--------|-------------|
| 5 | Z | 12 in | 12 in | 10°F | 25 ksi | 0 in |
| 6 | E | 12 | 12 | -13 | 33 | 0 |
| 8 | Z | 12 | 4 | -5 | 33 | 0 |
| 9 | Z | 12 | 4 | -54 | 29 | 0 |
| 10 | X+Z | 56 | 4 | -39 | 27 | 貫通 |
| 11 | Z | 24 | 4 | -25 | 28 | 0 |
| 12 | Z | 36 ^{1/2} | 4 | -18 | 28 | 貫通 |
| 13 | Z | 36 | 4 | 8 | 28 | 1.5 |
| 14 | Z | 36 ^{1/2} | 36 | -21 | 28 | 0 |
| 15 | Z | 36 | 12 | -24 | 28 | 1 |
| 16 | Z | 48 | 24 | -22 | 28 | 6 |
| 17 | Z | 36 | 4 | -20 | 28 | 0 |
| 18 | Z | 36 | 4 | -13 | 28 | 貫通 |

(注) 試験片の巾は 72 in

$a=12$ in (300 mm) のとき, $-5\sim 10^\circ\text{F}$, 25~33 ksi

で亀裂はアレスターの入口で停止 (4 例)

$a=24$ in (600 mm) のとき, -25°F , 28 ksi で亀裂はアレスターの入口で停止。

$a=36$ in (900 mm) のとき, 8, -20 , -21 , -24°F ; 28 ksi で亀裂はアレスターの入口で停止。

一方, -13 , -18°F , 28 ksi で亀裂は巾 4 in のアレスターを通過。

$a=48$ in (1,200 mm) のとき, -22°F , 28 ksi で亀裂は巾 24 in のアレスターの入口から 6 in だけ入って停止。

$a=56$ in (1,400 mm) のとき, -39°F , 27 ksi で亀裂は巾 4 in のアレスターを通過。

脆性亀裂がアレスターである調質鋼を通過して試験片が完全に破断した場合でも, アレスターでは破面は圧延面にたいし 45° の角度を有する延性破壊であった。

前述の試験結果より, アレスターまでの助走距離が 300 mm とか 600 mm 位では亀裂が停止しても, 1,000 mm 以上になると巾 100 mm のアレスターでは停止しないことがわかる。

したがって, 通常おこなわれるような巾 500 mm 位の試験片でアレスターの実験をしてもどうかとおもわれる。また, アレスターの巾としては少なくとも 200 mm 位は必要ではないかと考えられる。

木原ら⁵⁾の実験によると, 図 5 のように近接した溶

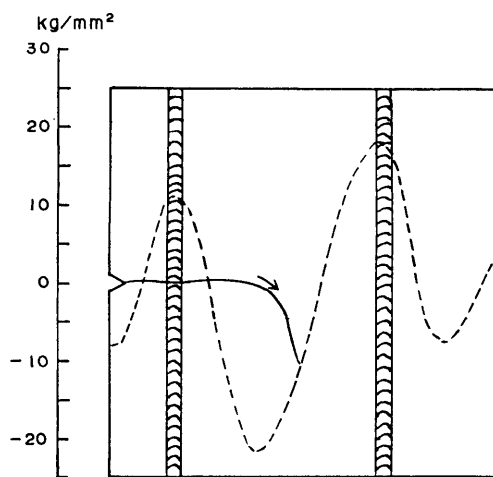


図 5 近接ビード試験片における溶接残留応力分布と脆性亀裂伝播経路⁵⁾

接ビード間にはかなり大きな圧縮応力が存在して脆性亀裂が停止することがあることが知られているので, この試験片を参考にしても巾 200 mm のアレスターが良いのではないかとおもわれる。

以上のべたように Mosborg の広巾試験片によるアレスターの実験は, 実際の構造物におけるアレスターの機能の評価の推定に貴重な資料をあたえたものといえよう。

3.3 越賀らの実験

表 3 混成二重引張試験結果の一覧表

| Starter Plate | Arrester Plate | Test Condition | | | | Test Result | Specimen Mark | |
|--|--|----------------|--------|--------------------------------|--------|-------------|---------------|-----|
| | | B (mm) | C (mm) | σ (kg/mm ²) | T (°C) | | | |
| S (non-spec.) 20 mm thick as rolled 0.20% C 0.23% Si 0.71% Mn 0.015% P 0.027% S Y.P. 29.7 kg/mm ² T.S. 42.0 kg/mm ² pTc +44°C | M (SM 41 C) 20 mm thick normalized 0.20% C 0.25% Si 0.87% Mn 0.013% P 0.023% S Y.P. 36.3 kg/mm ² T.S. 49.5 kg/mm ² pTc +16°C | 350 | 200 | 20 | -15 | Go | M 1 | |
| | | 500 | 100 | 20 | 20 | 0 | No-Go | M 2 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -10 | Go | M 3 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -20 | No-Go | M 4 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -20 | Go | M 5 |
| | | | 400 | 20 | 30 | -10 | No-Go | M 6 |
| | | 400 | 20 | 30 | -10 | Go | M 7 | |
| | 1,000 | 200 | 20 | 25 | -10 | No-Go | M 8 | |
| | | 200 | 25 | 25 | -15 | Go | M 9 | |
| | | 500 | 25 | 25 | -10 | No-Go | M10 | |
| | | | 25 | 25 | -20 | Go | M11 | |
| | | 750 | 25 | 25 | -10 | No-Go | M12 | |
| | | | 25 | 25 | -20 | Go | M13 | |
| N (2 1/2 % Ni) 20 mm thick normalized 0.12% C 0.25% Si 0.57% Mn 0.018% P 0.015% S 2.44% Ni Y.P. 40.7 kg/mm ² T.S. 49.7 kg/mm ² pTc -22°C | N (2 1/2 % Ni) 20 mm thick normalized 0.12% C 0.25% Si 0.57% Mn 0.018% P 0.015% S 2.44% Ni Y.P. 40.7 kg/mm ² T.S. 49.7 kg/mm ² pTc -22°C | 350 | 200 | 20 | -45 | Go | N 1 | |
| | | 500 | 100 | 20 | 20 | -40 | No-Go | N 2 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -50 | Go | N 3 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -40 | No-Go | N 4 |
| | | | 200 | 20 | 20 | -50 | Go | N 5 |
| | | | 400 | 20 | 20 | -40 | Go | N 6 |
| | | 400 | 20 | 20 | -50 | Go | N 7 | |
| | 1,000 | 200 | 25 | 25 | -40 | No-Go | N 8 | |
| | | 200 | 25 | 25 | -50 | No-Go | N 9 | |
| | | 500 | 25 | 25 | -40 | No-Go | N10 | |
| | | | 25 | 25 | -50 | Go | N11 | |
| | | 750 | 25 | 25 | -40 | Go | N12 | |
| 750 | 25 | 25 | -30 | No-Go | N13 | | | |

Note: Crack in the specimen M 8 was arrested at 150 mm before the weld joint.

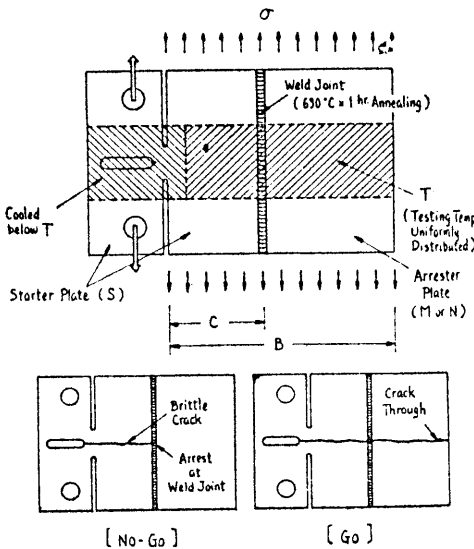


図 6 混成二重引張試験片と試験結果の例⁷⁾

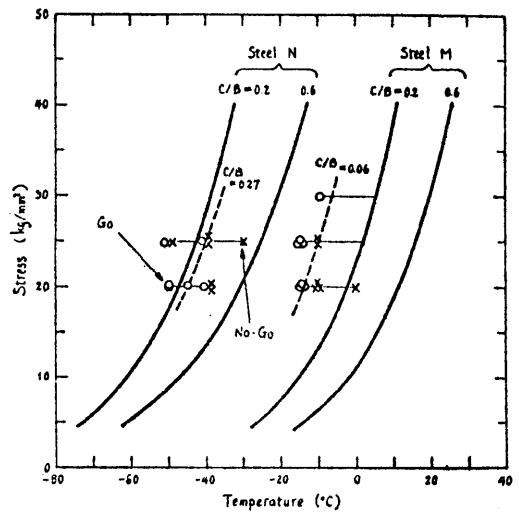


図 7 混成二重引張試験と温度勾配型および平坦型二重引張試験の応力-停止温度曲線の比較⁷⁾

越賀ら⁷⁾は 630°C×1 hr の残留応力除去焼鈍処理した図 6 の混成二重引張試験片をもちいてクラックアレスタの性能をしらべた。試験結果の総括を表 3 に示す。アレスター材が M (SM 41 C) の場合、試験片巾が 1,000 mm で応力が 25 kg/mm² のとき、助走距離が 500, 750 mm で亀裂がアレスターで停止するか貫通するかの限界停止温度はいずれも -10~-20°C であった。また、アレスター材が N (2.5% Ni 鋼) の場合、試験片巾が 1,000 mm、応力が 25 kg/mm² のとき、助走距離が 200, 500, 750 mm で亀裂の限界停止温度はそれぞれ、-50°C 以下、-40~-50°C および -30~-40°C であり、助走距離が大きいほど限界停止温度は高温側へ少し移るようである。

温度勾配型二重引張試験との関連をつけるには温度勾配型や平坦型の試験の解析でもちいる (1) 式の c の値を若干、短くとれば良いようであり、図 7 に示すように $c/B=0.2$ にたいする応力-停止温度曲線をもとめればよいと越賀は述べている。

4. クラックアレスターとしての溶接パッチ

現在は実験室での研究段階であるが、吉識ら⁸⁾は、図 8 に示すように溶接パッチを亀裂伝播径路上に設けることにより、前述のリベットスチフナの場合と同様

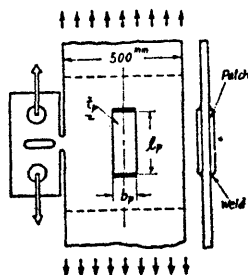


図 8 溶接パッチ型クラックアレスター試験片

に、パッチの両端の溶接部が亀裂による口の開きにたいして反対方向の力を作用させることに注目し、亀裂の進展にともなう歪エネルギーの解放率が減少して亀裂が停止することがあると推測し、さらに、溶接パッチつき二重引張試験により実験的にしらべ、図 2 に類似の曲線をもとにして停止位置の推定ができることをあきらかにした。しかし、実際の溶接構造物にはたしてどのように実現するかという点については種々の問題があるようにおもわれる。

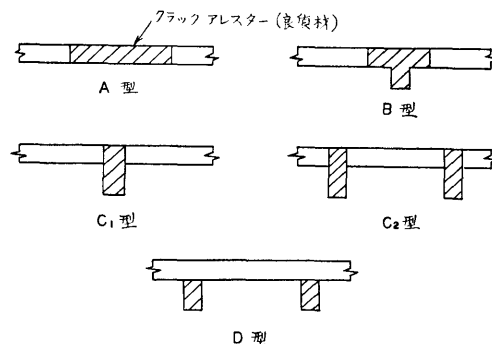


図 9 各種クラックアレスターの模型

5. 有効なクラックアレスターについての提案

前述のように船体構造上からは、良質の鋼板を溶接により挿入して脆性亀裂を停止させることがのぞましく、これに関連した有効な方法についての検討をする必要がある。すなわち、どの程度良質な鋼板をどれ位の中だけもちいれば十分であろうかという問題のほか、さらに一歩すすんで、より有効な形状、配置のアレスターにはどんなものがあるかという問題がある。

これらの点については、最近、船舶技術研究所と三菱重工業長崎研究所が共同で、最大巾 1,300 mm の試験片をもちいて実験により有効性をしらべることになっており、図 9 に示すような形状のアレスターが検討されることになっている。

参考文献

- 1) 池田一夫, 脆性破壊伝播に関する研究(第 4 報)—脆性破壊伝播速度および動的応力の計測, 造船協会論文集, 第 106 号, 昭和 35 年 1 月
- 2) 吉識雅夫, 金沢 武, 板垣 浩, 脆性破壊伝播に関する研究(第 1 報)—動的応力分布と解放弾性エネルギー, 造船協会論文集, 第 108 号, 昭和 35 年 12 月
- 3) 矢島 浩, 船舶の脆性破壊事故例について, 造船協会, 脆性破壊と疲労に関するシンポジウム (於大阪) での討論, 昭和 41 年 9 月
- 4) R. J. Mosborg, Behavior of Riveted and Welded Crack Arrestors, Ship Structure Committee Report, SSC-122, August 1960.
- 5) 吉識雅夫, 金沢 武, 町田 進, クラックアレスターに関する基礎的研究(第 3 報)—実験的検討, 造船協会論文集, 第 118 号, 昭和 40 年 12 月
- 6) 木原 博, 楠田忠雄, 飯田国広, 前田豊生, 松岡

忠博，脆性破壊の伝播におよぼす溶接残留応力の影響，造船協会論文集，第 108 号，昭和 35 年 12 月

7) 越賀房夫，今沢 理，竹花莊治，鋼板における脆性亀裂の停止遷移現象，造船協会論文集，第 114 号，昭和 38 年 12 月