船体の脆性破壊に関する二三の試験

(廣幅効果と箱型模型試験)

正員 工學士 秋 田 好 雄

Abstract

Some Experiments on the Brittle Fracture in Ships

By Yoshio Akita, *Kogakushi, Member*

As a first step of research on brittle fracture in ship structure, first the effect of notch sharpness on brittle fracture in wide width plate, and secondly the radius of opening corners in semi-box type girder were tested.

Boodberg's experiments⁽⁵⁾ on the wide width effect show the decrease of maximum breaking stress at wide width plate having constant notch sharpness. The author's experiment treated the effect of notch sharpness on the bending strength of wide width plates. The shape of test pieces is shown in Fig. 1. In Fig. 3, the transition temperatures are shown. The nominal maximum stress of wide width specimen (21×63 mm) with sharp notch (rad. 0.05 mm) decreases in brittle fracture as shown in Fig. 4. In Fig. 6, the absorbed energy per unit volume at low temperature decreases in the wide width specimen with sharp notch as increase of width.

Fig. 8 shows the effect of notch depth on the nominal maximum stress and absorbed energy.

Next, the semi-box type girders of rimmed and killed steel, perforated at the centre with round, square, notched, and slit shape, shown in Fig. 9, were tested under tension. The nominal maximum stress and absorbed energy are shown in Fig. 11 and 12. The strength of test pieces of several opening shape are nearly equal at room temperature (30°C), but at low temperature (-30°C), the sharp notch or the defect of welding at opening corners has more remarkable effect in their maximum stress and energy absorption rather than the square corner. The test pieces of killed steel show the parallel increase in their strength.

1. 緒 論

第二次世界大戦時において、米国で大量に急速建造された溶接貨物船及び油艀船が就航中に数多くの脆性破壊の事故を起した。

この破壊様式は銲接船で知られていた延性に富む破壊様式と異なっており、また損傷の多発性のために注目されるに至り、主として米国において脆性破壊の原因探究と防止対策の研究が行われて来た。我が国においても昭和 21 年末より造船協会電気溶接研究委員会において鋼材の切欠脆性の文献の調査がなされ⁽¹⁾、昭和 25 年に鋼材研究会が誕生し、その後鋼材の脆性破壊の研究が活潑となつて来ている。

脆性破壊に関する研究を大別すると、次のようになる。

- (1) 化学成分の影響等の材料、冶金的な研究。
- (2) 小型試験片による脆性破壊への力学的因子の影響に関する研究。
- (3) 構造物の脆性破壊に関する研究。

(1) 鋼材の切欠脆性について；電気溶接研究委員会；造船協会雑纂；第 293 号；昭和 26 年 10 月。

(1) については、その緊急を要する課題は一応解決⁽²⁾、板厚が時を超える造船用鋼材ではキルド鋼の使用が推奨されている。(2) に関しては、三軸応力比の影響、材料の前歴歪の影響、寸法効果等について内外で多くの研究が行われ⁽³⁾、一応の見通しが得られている。

然るに (3) に関しては実船の損傷例の報告⁽⁴⁾と、実験的なものとして Boodberg の広幅鋼板の引張試験⁽⁵⁾、De Garmo の rivet zone 及び hatch cormner 等⁽⁶⁾の試験が見られる程度であり、その本質の解明は今後の研究に残されている。

構造物としての要素の一つは荷重に直角方向の板幅が大きいことであり、これは広幅効果と呼ばれ、切欠をつけた鋼板で一般に板幅が増すと、破壊応力及び最小面積当りの吸収エネルギーが減少することが知られている。他の要素の一つとしては不連続構造にもとづく応力集中により脆性破壊が生ずることで、これは構造の形状効果と考えられる。

以下に述べる報告は構造物の脆性破壊の研究の第一歩として行つたもので、二部から成り、第一部は広幅試験片において切欠の鋭さの影響を調べたものであり、第二部は船体状の箱型模型に艀口に模して開口を設け、開口の隅部の形状による脆性破壊への影響を調査したものである。

2. 広幅効果に関する試験の方法

Boodberg は板幅が 3' より 108' までの鋼板に中央部に切欠をつけ静的引張試験⁽⁷⁾を行い、破断応力は板幅が増すにつれて減少することを見出している。これは広幅効果として知られている。しかしながら Boodberg は切欠として、板幅の 1/4 の長さの幅方向の細隙を板中央につけ、その先端に Jewellers saw cut と呼ばれる半径 5/100' (0.12 mm) の切欠をつけ、この一種類の切欠で試験を行っている。実船に生ずる切欠脆性の原因と考えられる切欠が溶接工作の欠陥や構造上の欠陥により生ずるものとすれば、浅い然も鋭い切欠が予想されるので、本試験では比較的浅く、切欠半径が最小 0.05 mm の極めて鋭い切欠から半径 1.6 mm までの 6 種類の切欠をつけ、広幅効果が切欠の鋭さによつてどのような変化をするかを調べた。

試験片は板厚 21 mm 板幅 21 mm, 42 mm, 63 mm の 3 種で、切欠深さは一定で 4 mm であり、切欠半径が 1.6 mm, 0.8 mm, 0.4 mm, 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm の 6 種の組合せの約 100 本である。試験は第 1

第 1 図 広幅効果の試験片

図に示すように試験片側面（母材の板厚の面）に 45° V 型の切欠をつけ、中央集中荷重による静的曲げを与え、温度範囲 -30°~70°C の間で恒温槽内で行われた。曲げの支持点間の距離はすべて 200 mm である。以下、本試験でいう板幅とは第 1 図に示す如き面の幅を示すこととする。試験片の材質は八幡製鉄製 23 mm リムド鋼でその性質は次の通りである。

チャージ番号	C	Mn	Si	P	S	Cu	粒度	降伏点 (kg/mm ²)	破断強度 (kg/mm ²)	伸び (%)
YU 2-T 10534-23 b	0.15	0.39	0.01	.012	.020	0.20	7.5	25.9	39.4	29.3

3. 広幅効果の試験結果

試験片が破断するまでの全吸収エネルギーの温度に対する変化の一例を第 2 図に示す。同図は切欠半径が 0.4 mm の場合だけを示したもので、この試験片のうち、断面が 21×21 のものは試片形状及び切欠形状がシャルピ V 型標準試験片にほぼ相似の大きさになつている。同図によれば 30°C の近傍で遷移現象が見られる。

他の切欠半径の場合も同様の傾向が見られ、遷移温度はこの試験範囲内では切欠半径によつても殆んど変化を

(2) 例えば、鋼材研究会研究成果報告；昭和 27 年 5 月。

(3) 例えば鋼材研究会研究成果報告中の吉識、金沢、木原、増淵、渡辺、秋田各委員の論文；昭和 27 年 5 月。

(4) 例えば J. L. Adam ; Brittleness in Ship Steel ; "Brittle Fracture in Mild Steel Plate" ; The British Iron and Steel Research Association ; Oct, 1945.

(5) A. Boodberg etc. ; Causes of Cleavage Fracture in Ship Plate ; W. J. April 1948.

(6) P. De Garmo etc. ; Some Test of Large Welded Structure ; W. J. May 1947.

(7) 前出脚註 (5)。

せず、切欠が鋭すぎるために遷移温度は飽和状態にあると見られる。

板幅による遷移温度の変化は第3図に示すごとく全エネルギーから定めた遷移温度と、破面伝播エネルギーからの

第2図 切欠半径 0.4 mm のときの吸収エネルギーと温度の関係

第3図 遷移温度と板幅の関係

と、破面の外観から定めた遷移温度の三者ともに、板幅の増加につれて漸増している。

次に最大荷重については興味深い変化が見られる。第4図に示すものは最大荷重モーメントを切欠部の純断面の断面係数で割った最大応力と温度の関係を示す。二つの例として切欠半径が最も鋭い場合 (0.05 mm) と鈍い場合 (1.6 mm) を掲げたが、切欠が鋭い場合には破断応力は板幅に無関係であつて、低温では破断応力が増している。しかし切欠が鋭い場合には板幅が増すと、低温時に破断応力の急減が見られる。

第4図 最大応力と温度との関係

第5図 最大応力と板幅の関係

この関係を各切欠半径と板幅について表したのが第5図である。同図の下方は低温時 (0°C) で上方は高温時 (70°C) のものである。高温の延性破壊ではあまり変化が見られないが、低温時の脆性破壊においては、切欠が鋭いほど最大応力の低下が著しい。Boodberg は切欠半径を一定で 0.12 mm で実験を行つているが、切欠の鋭さは広幅効果が重要な因子であると見られる⁽⁶⁾。切欠のある広幅の板は最大応力が小さいが切欠が鋭いと更に小さくなる。

次に破断までの吸収エネルギーと切欠半径、板幅の関係を第6図に示す。この試験は曲げ試験であるから吸収エネ

- (8) Boodberg の実験では高温時、低温時ともに破断応力が板幅が増すと減少しているが、本試験では高温時の延性破壊においてはあまり変化しない。この原因として考えられるのは本試験が曲げ試験で Boodberg の実験は引張りであることと、又 Boodberg の試験片では slot が板幅につれて変化し、本試験では一定の深さの切欠をつけたことによるものと思われる。

ルギを純断面積と支持点距離との積で割った単位容積当りの吸収エネルギーで表わしている。同図の上方の一群は高温時の延性破壊、下の一群は低温時の脆性破壊の場合である。これによれば延性破壊では吸収エネルギーは板幅が増すにつれて増大するが、脆性破壊では切欠の鋭さにより異なり、切欠が鋭いと板幅が増すにつれて吸収エネルギーが減少している。広幅板の低温のとき、切欠が鋭いと吸収エネルギーが極めて小さいことは注目すべきである。

第6図 高温及び低温における吸収エネルギーと板幅の関係

第7図 吸収エネルギーと切欠半径の関係

第7図は前図を切欠半径によつて表したものである。同図の下方の一群は脆性破壊の場合であるが、同図で判ることは切欠が鋭くなると、吸収エネルギーが減少して後、飽和状態となり；また板幅が広いとこの飽和状態がおくれて吸収エネルギーが非常に小さな値となる。広幅では鋭い切欠が危険なことが判る。

4. 切欠の深さの影響に関する試験

切欠の深さが脆性破壊に影響することは Thomas⁽⁹⁾ が実験しているが、切欠が鋭い場合の check として特に行つた。

試験片及び試験方法は前述の広幅試験と同一で 21×63 mm のもののみに低温で曲げを与えた。第8図は半径 0.05 mm の切欠を種々の深さにつけて、-20°C で脆性破壊させたときの破断応力と吸収エネルギーを示す。同図によれば吸収エネルギーは切欠の深さとともに急激に減るが、破断応力は一旦上昇後に急激に減少して、切欠深さ 4 mm ではほぼ一様の値に落着く。このとき板厚 (23 mm) と切欠深さの比は $4/23 = 0.17$ である。Thomas の実験ではこの比が 2 附近で一定値となつてゐるが、この差は試験片の板幅板厚比の差にもとづくものと思われる。又前述の広幅試験に採用した切欠深さは適当な値をとつてゐることが判る。

(9) H.R.Thomas etc.; A Study of Slotted Tensile Specimens for Evaluating the Toughness of Steel; W.J. April, 1948.

第8図 種々の深さの切欠をつけたときの破断応力と吸収エネルギー, 切欠半径 0.05 mm, 温度 -20°C

5. 箱型模型試験の方法

米国の戦時標準船リパティ船における艙口隅の損傷はその統計資料の中で大きな部分を占めている。艙口隅損傷の原因の一つとしては、艙口隅の形状やその近傍における工作上の欠陥が考えられる。本研究は艙口隅損傷の研究の第一段階として、艙口隅の隅部半径の影響と、隅部における鋭い切欠の影響、及び構成材料としてのキルド鋼とリムド鋼の差異を求め、艙口隅の脆性破壊において、隅部半径が効くのかキルド鋼の採用が損傷をどの程度 cover するものかを調査するのを目的とした。

船体が曲げを受けて中性軸より上方が引張状態になることに模して、試験片は第9図に示す如く断面をコの字型とした。全長は 1.5 mm, 幅 185 mm で、甲板部は板厚 18 mm の黒皮つき鋼材で、側板は板厚 12 mm 幅 40 mm で、側板は甲板に V 型開先をとつて溶接してある。艙口に相当する開口は $90 \times 45 \text{ mm}$ で、第9図に示すように開口隅部は 5 mm 径の丸味をつけたもの、丸味をつけないもの、隅部に深さ 1 mm 幅 0.2 mm の細隙切欠をつけたものの三種である。更に比較のために中央に幅 2 mm 切欠半径 1 mm の細隙をつけたものも加えた。

使用鋼材は甲板部のみ、キルド鋼とリムド鋼に変えた。

その化学成分等は次表に示す通りである。

第9図 箱型模型

材 質	チャージ番号	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	降 伏 点 kg/mm ²	抗 張 力 kg/mm ²	伸 び %
リムド鋼	NU 3-n 4-18 b	.20	.46	tr.	.024	.010	.30	.085	.05	26.4	44.5	26.0
キルド鋼	YU 3 ㊟ S 15825-18	.18	.61	.20	.021	.024	.25	—	—	32.6	50.4	24.5

第10図 箱型模型引張試験

試験方法は第10図に示す如く、300 噸東京衡機構造物試験機により引張試験で行った。同図に示すように試験片を両面から恒温槽でだいて、 -30°C , 0°C , 30°C の三段階の温度で試験を行った。

6. 箱型模型試験結果

4 種の開口形状の最大荷重を最小純断面積で割つた最大応力の比較を第11図に示す。

リムド鋼で 30°C で試験したものは開口隅部の形状によつても殆んど差がない。このときの破面は剪断型を呈している。試験温度が 0°C のときでも最大応力にあまり差がない。破面はこのとき脆性型となつている。

試験温度が -30°C のときには隅部の丸味のあるものとなしいものに最大応力の差がないが、隅部に浅い鋭い切欠をつけたものに強度の低下が見られ、切欠のない場合より約 20% の減少を示している。

キルド鋼は試験温度 -30°C の場合だけについて試験したが、同図に示す如く、全体的に破断強度が上昇し、リムド鋼に比べて約 10% 程度高い値を示している。このときの破面は脆性型である。リムド鋼による強度の上昇は材質としての抗張力の差が主な原因であると考えられる。

第11図 4種の開口形状の最大応力の比較

第12図 4種の開口形状の吸収エネルギーの比較

第12図の4種の開口形状の純断面積当りの吸収エネルギーを示す。前図に比べて傾向は更に強調されており、常温では吸収エネルギーは隅部の鋭さによりあまり減少しないが、低温の脆性破壊では隅部の切欠のために急激に減少し、丸味をつけた場合の1/4程度になっている。

キルド鋼の場合には前述と同様に全体的に吸収エネルギーが上昇している

上図より見て、開口隅の半径の大小は常温の剪断破壊においては強度にあまり差を生じないが、低温の脆性破壊においては開口隅部の半径よりも寧ろ隅部の切欠が物を言うことが判る。従つて構造の不連続箇所には溶接工作上生ずる欠陥は特に注意を要すると言えよう。

第13図 三種の開口形状における剪断破壊 (30°C)

第14図 同じく脆性破壊 (-30°C)

第13, 14図に三種の開口形状のときの剪断破壊と脆性破壊の写真を示す。剪断破壊ではあまり差は見られないが、脆性破壊においては、切欠のある場合に破壊が二断面で同時に発生し、試験片は数個にばらばらに分離される。このことも危険な脆性破壊の一特質と言えよう。

7. 結 論

構造物の脆性破壊に関する研究の第一段階として、広幅板に浅く鋭い切欠を付けた場合の脆性破壊において、切欠の鋭さと深さ及び幅の影響を調べ、次に船体艙口に模した開口箱型模型において、開口隅の半径と切欠の在

存の影響を調べた。

先ず広幅板の脆性破壊においては、鋭い切欠（半径 0.05 mm）が破断応力と吸収エネルギーを減少せしめ、板幅が増すと、この傾向が強くなる。

箱型実験によれば、脆性破壊においては開口部の半径よりも寧ろ隅部の鋭い切欠が最大応力、特に吸収エネルギーを著しく減少せしめることが判つた。

以上の二実験より見て幅の広い構造物においては鋭い切欠が特に強度の低下を招き、危険な脆性破壊をもたらす懸念があると言えよう。

最後に本試験の前半は鋼材研究会、各製鉄所の御援助により、後半は昭和 27 年度文部省科学試験研究費補助金の援助により行つたものであることを記附し茲に感謝の意を表す次第である。