溶接構造物の破損事例とその教訓 (1)

—破損事例からの教訓—*

矢 島 浩**

Lessons to Learn from Examples of Damages to Welded Structures [1]*

by Hiroshi YAJIMA**

キーワード：溶接構造物，橋梁，船舶，海洋構造物，破損，脆性不安定破壊，溶接欠陥，疲労亀裂，教訓

1. はじめに

橋梁・船舶・海洋構造物などの大型溶接構造物で発生した多くの破損例^{1,2)}は，工学の世界に幾多の貴重な教訓を残した。また，平成7年1月17日早朝の阪神・淡路大地震による震災³⁾は，身近な事例として，工学の世界に貴重な教訓を残した。

21世紀に向けて，大型溶接構造物の高信頼性確保と高付加価値化を実現していくためには，多くの破損例が残した教訓を謙虚に受け止めて，前向きに，合理的に，今後の糧にする必要がある。

大型溶接構造物が“壊れる”ことも，“全寿命において機能を全うする”ことも，自然現象であり，それは，設計・建造あるいはメンテナンス担当者の能力次第で決まり，財力や権力の及ぶところではないからである。自然現象は正直であり，絶対に嘘をつかない。また，絶対に我慢もしてくれないのである。

橋梁・船舶・海洋構造物などで発生した破損例を数例紹介し，原因や問題点について述べ，工学の世界に残してくれた教訓について述べる。

2. Hasselt 橋の破損例

ベルギーのルーバン大学，A. Vierendeel 教授が企画・設計し，1933年以降，数年間に50橋以上のVierendeel Truss 橋がベルギー各地に架設された。長さ約74.5m，幅約10.4mのHasselt 橋(図1)は，その一つで

あった。1937年(昭和12年)1月19日に載荷試験に合格して完成したが，1938年(昭和13年)3月14日に路面電車通過直後に崩落してしまった(幸い死者はなかった)ことは，あまりにも有名な事件である^{1,2,4)}。

Hasselt 橋には，最大板厚55mmのトーマス鋼(引張強さ：42～52kgf/mm²，降伏点：28kgf/mm²程度，伸び：20%以上)が使用されていた由であり，現場工作も含め，すべて溶接によって組み立てられていた。

強大な権力をもったボスの教授が企画・設計・推進したので，チェック機構は何も用をなさなかったものと考えられている。

架設されたVierendeel Truss 橋は，数年間で，そのほとんどが破損したようであり，工学の世界に強烈な教訓を残してくれた。

“壊れる”ことは自然現象であり，財力・権力の及ぶと

図1 Hasselt 橋の破損状況
(1938(昭, 13)年3月14日)

*原稿受付 平成11年8月1日

**正 員 広島大学工学部 Member, Hiroshima University

ころではない。また、一人の人間の智力は、自然に対しては微々たるものである。謙虚に対応すべし。

昭和 12・13 年頃、我が国においても、溶接はかなり実用されていた。一步一步基礎から積み上げて実用化されたため、このような大きな破損例は経験していない。

3. 米国における戦時標準船の破損例

第二次世界大戦中、米国で建造された戦時標準船の脆性破壊による破損例は、これまたあまりにも有名である^{1,2,4,5)}。

約 5,000 隻建造されたうち、約 1,000 隻に約 1,500 件もの損傷(その多くは、約 3m 以上の亀裂)が発生した由であり、そのうち約 250 隻は、甲板に亀裂が入る船体強度上重大なものであった。また、約 20 数隻は真二つに折損(図 2)したため廃棄されている。

亀裂が発生した船体から採取した鋼板の V-ノッチシャルピー衝撃試験結果より、損傷発生時の温度で、吸収エネルギーを 15ft・lb (2.1kgf・m) 以上有している鋼

図 2 戦時標準船 Schenectady 号の破損状況 (1943 (昭. 18) 年 1 月)

図 3 破損した船体用鋼板の 15ft・lb 遷移温度

板からは、亀裂は発生しにくいことが明らかになった(図 3)⁴⁾。

すなわち、大型溶接構造物 (As Weld) を建造するとき、その構造物の最低使用温度で 15ft・lb (2.1kgf・m) 以上の V-ノッチシャルピー吸収エネルギーを有している鋼材を使用しておけば、いきなり真二つになるような損傷は起こらないであろうということが明らかになったわけである。

約 1,000 隻(建造した 5 隻に 1 隻の割合)にも及ぶ破損は、戦時中の混乱期とはいえ、あまりにも大きな損害であったといえよう。その代償として“15ft・lb (2.1kgf・m) 遷移温度クライテリオン”が残ったわけである。

4. Avanti 号の破損例

米国で建造された戦時標準船とほぼ同時期に、ヨーロッパ(スウェーデン)で建造されたタンカー Avanti 号の破損例について紹介する。

タンカー Avanti 号 (15,700 D.W.T.) が、原油を満載して、ニューギニアのジュランから岩国に向け北上中、1953 年 (昭和 28 年) 1 月 8 日、奄美大島沖で船体を 2 分割する破損事故を起こした(図 4)^{1,2,5)}。船体前半分は沈没したが、後半分が米海軍により救難され、神戸港に曳航された。

その後、再生工事が現三菱重工業(株)長崎造船所で行なわれ、1955 年 (昭和 30 年) 1 月 31 日、進和丸として再度就航した。

図 4 Avanti 号破損の概要 (1953 (昭. 28) 年 1 月 8 日)

Avanti 号は、1946 年(昭和 21 年)4 月、スウェーデンの造船所で竣工したノルウェーのタンカーであった。

第二次世界大戦末期の混乱時に建造されたため、使用されていた鋼板の破壊靱性値は低く、しかも、重要部材である上甲板で、使用鋼板の圧延方向が船体横方向に配置されていた。また、縦隔壁の上端が、上甲板の間に挟み込まれており、縦隔壁の上端両面が、それぞれ上甲板と溶接されているなど、適用されていた溶接技術も含め、今日では想像を絶するようなものであった。

船体重要部材の V-ノッチシャルピー吸収エネルギーは、0℃で 1.0 kgf・m 程度であり、溶接部は大きな欠陥だらけで、ほとんどが JIS 5~6 級であった。

今日想像すると、これらの溶接欠陥から疲労亀裂が発生・成長し、限界亀裂長さに到達して、脆性不安定破壊を起こし、船体を2分割したものと考えられる。

壊れるべくして壊れた。自然現象は正直である。また、絶対に我慢もしてくれない。

5. Ohio 号の破損例

1966 年（昭和 41 年）4 月頃、貨物船 Ohio 号が、韓国釜山沖で衝突事故を起こした。

第2船倉の左舷に、船底で中心線付近まで相手の船体が突入するという、非常に大きな損傷を受けたが、船体は2分割せずに、生き残った(図5)^{1,2)}

図5 Ohio号の破損状況(1966(昭.41)年4月)

Ohio 号は、1944 年（昭和 19 年）に、米国の造船所で建造された戦時標準船の 1 隻であった。建造時は完全溶接構造であった上甲板部に、その後、リベットシームを追設する改造工事が行なわれており、しかも、衝突後、相手の船体を引き離した直後に、破口にデリックブームを渡して補強するという、機転のきいた処置も効を奏し、2 分割を免れたわけである。

当然のこととは言え、クラックアレスターとしてのリベットシームの威力が認識できた事例である。

6. 金清丸の破損例

1969 年 (昭和 44 年) 1 月 8 日, 門司からナホトカに向け日本海を北上中の木材運搬船金清丸 (7, 292 D. W. T.) の右舷上甲板全幅が脆性不安定破壊を起こした (図 6)^{1,2,5)}

破壊発生時の温度は、 -1°C 程度であったと推定されている。脆性不安定亀裂の起点は、ハッチのトップコーミング内側のカバープレート突合せ溶接部の溶接欠陥であった。この溶接欠陥は、設計上の強度部材ではないので、一寸付いていれば良いとの考えで溶接され、板厚の半分程度未溶着部が残っていたものであった。上甲板を伝播した脆性不安定亀裂は、舷縁に至り上甲板のストリン

図6 金清丸破損の概要(1969(昭.44)年1月8日)

ガーアングル固着用のリベットホールで停止していた、舷縁のリベットシームが、本船を生き残らせたのである。

応力条件など諸条件がかなり明確に把握できたので、本船脆性不安定破壊例から得られた知見は多かった。

溶接で接続すれば、“一枚板”。当然“力”は流れ込む。

脆性不安定亀裂が発生すれば、構造不連続部か高靱性材の挿入が無い限り、絶対に停止しない。

7. 聖水大橋の破損例

1994年(平成6年)10月21日午前7時40分頃、韓国・ソウル市で発生した、聖水大橋の橋桁崩壊・落下事故²⁾について紹介する。

落下した橋桁は、H 型鋼の Face to Face に通したピンによって両側の橋桁に吊り下げられていた (図 7)。この H 型鋼は、Face to Face にピンを通すために、Web Plate を切り取り、Face Plate が増厚されていた。この、増厚されていた Face Plate の突合せ溶接部が、ごく表層部のみしか溶接されていなかったのである。すなわち、H 型鋼の Face Plate の突合せ溶接部は、ごく表層部以外未溶着であったのである (図 8, 図 9)。

開先が加工されていなかったということは、十分な溶接をする意志がなかったものと認めざるを得ない。32名の犠牲者は、あまりにも大きな損害であった。

内部の未溶着部から、溶接金属部に疲労亀裂が発生・進展して Face Plate が破断し、同時に Web Plate も破断したものであった。

自然現象は絶対に嘘はつかない。また、絶対に我慢もしてくれない。

図7 橋桁落下の状況

図8 破断したH型鋼

図9 Face Plate 突合せ溶接部の未溶着部

8. Alexander L. Kielland 号の破損例

船舶に比べて不静定程度の次数が低い海洋構造物は、疲労亀裂が原因となって大損傷を招く危険性は大きいと言わざるを得ない。

1980年(昭和55年)3月27日午前6時30分頃、北海で発生したペンタゴン(5本脚)型半潜水型石油掘削リグ Alexander L. Kielland 号の破損・転覆事故(図10)は、水平支えパイプの水中聴音器サポートフランジ管取り付け溶接部の欠陥から発生した疲労亀裂が原因であった^{1,2,5)}。

事故発生時、本リグはホテルとして使用されていた

め、212名中123名が死亡するという大惨事になった。

本リグは、1976年(昭和51年)にフランスの造船所で建造されたものである。

直径2.6m程度の水平支えパイプに加工された丸穴に、外径325mm・板厚20mm・長さ228mmの水中聴音器サポートフランジ管を差し込み、すみ肉溶接してあったが、このすみ肉溶接のサポートフランジ管側熱影響部に、溶接中あるいは溶接後しばらくして割れが発生し、その割れから疲労亀裂が発生したものと断定された。疲労亀裂の起点になっていたこれらの割れの中に塗料が検出されたことから、建造時に発生した割れであると断定されたのである。

ちょっとした付加物であるから“まあいだろう”と

図10 Alexander L. Kielland 号の破損・転覆事故の概要(1980(昭.55)年3月27日)

ということで、施工も検査もきちんとされなかったのではないかと考えざるを得ない。“盲点をつかれた”例であろう。

自然現象は絶対に我慢してくれない。

9. 阪神・淡路大震災での破損例

1995年(平成7年)1月17日午前5時46分の、阪神・淡路大地震による未曾有の大震災(図11, 図12)^{2,3)}は、身近な事例として、工学の世界に幾多の貴重な教訓を残した。

従来、上下方向の柱・鉄筋などに、大きな引張荷重が負荷されるとは予想されていなかったであろう。倒壊した高速道路の橋脚では、圧接部で切断された上下方向の鉄筋が曲がっていないのである(図11)。

これは、大地震のごく初期に、上下方向に大きな引張荷重を受けて切断されたものであると考えられる。

また、図12のビルの中央層が崩壊した例は、崩壊した部分で、上下方向の柱が大地震のごく初期に切断され、その後、切断部より上層部が落下し、当該層が崩壊したものであると考えられる。

上下方向の柱・鉄骨といえども、大きな引張荷重が負荷されたのである。使用鋼材に対しては、“強さ・弱さ”のみでなく、“粘っこさ・脆さ”についても充分考慮する必要がある、とくに溶接部・圧接部の欠陥(応力集中)・強度・破壊靱性に対しては、十分な配慮が必要であるという無言の証言である。

未曾有の大損害が残してくれた教訓は、謙虚に受け止め、早急に、今後の糧にしなければならない。

図11 切断された上下方向の鉄筋

図12 中央層が崩壊したビル

10. おわりに

橋梁・船舶・海洋構造物などの大型溶接構造物で発生した破損例、また、阪神・淡路大震災での破損例を数例紹介した。これらの破損例は、貴重な実物実験結果であり、納得するまで、観察・思考・観察・思考……し、その教訓を謙虚に受け止めて、前向きに、合理的に、今後の糧にする必要がある。

自然現象は、絶対に嘘をつかないし、絶対に我慢もしてくれない。要は、設計・建造あるいはメンテナンス担当者の能力次第ですべてが決まるのである。

参考文献

- 1) 矢島 浩：大型構造物の損傷例とその教訓，西部造船会会報 第90号(1995.8)，pp. 245-251.
- 2) 矢島 浩：溶接構造物における破壊事例とその教訓，溶接技術 第45巻 第1号(1997)，pp. 90-96.
- 3) 日本建築学会・土木学会編：1995年阪神・淡路大震災スライド集，丸善(株)。
- 4) ASTM: Symposium on Effect of Temperature on the Brittle Behavior of Metals with Particular Reference to Low Temperatures, ASTM STP No. 158 (1953).
- 5) 矢島 浩：連載講義 溶接構造の損傷とその防止，II-6 船舶・海洋構造物の損傷とその対策，溶接学会誌 第53巻 第1号(1984.1)，pp. 14-27.