溶接構造物の破損事例とその教訓 (2)

—設計への応用—*

矢 島 浩**

Lessons to Learn from Examples of Damages to Welded Structures [2]*

by Hiroshi YAJIMA**

キーワード：溶接構造物，船舶，破損，脆性不安定破壊，疲労亀裂，破壊管理制御設計，設計思想，教訓

1. はじめに

前報¹⁾で述べたように，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^{2,3)}は，工学の世界に幾多の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。

大型船舶で発生した破損例を数例紹介し，その破損原因や破損経緯をヒントに編み出した，船体構造の破壊管理制御設計の考え方について述べる。

また，超大型タンカー (VLCC) で経験した，サイドロンジの疲労破損例の逆解析により編み出した，疲労設計基準の考え方について述べる。

2. 大型船舶の破損例

2.1 大型タンカーの破損例

大型タンカーが，原油を満載して中近東から日本に向かう途中，1968 年 (昭和 43 年) 8 月 9 日に，ペルシャ湾出口付近で，船腹に大破損を起こした (図 1)^{2,3)}。本船は，1965 年 (昭和 40 年) 3 月 6 日に日本の造船所で竣工した 88,461 D.W.T. のタンカーであった。

調査の結果，推測された破損の経緯は以下のようであった。

① ストラット基部の座屈・崩壊→破断。

- ② トランスリングウェブ材に亀裂発生，サイドロンジ材との交差部スカラップと繋がり，トランスリングウェブ材破断。
- ③ サイドロンジ材と船側外板との隅肉溶接止端部に沿って，船側外板に疲労亀裂発生・進展。
- ④ 船側外板の疲労亀裂先端から，脆性不安定亀裂発生・伝播→大破壊に進展。

すなわち，ストラット基部の座屈・崩壊が引き金となったのである。座屈・崩壊・破断→疲労亀裂発生・進展→脆性不安定亀裂発生・伝播→大破壊へと進展したことが明らかになった。

船体構造に対する“破壊管理制御設計の考え方”の基礎を教えてもらった事例である^{4,5)}。

2.2 ウィルスター号の破損例

大型タンカー ウィルスター号が，原油を満載して中近東からヨーロッパに向かう途中，1974 年 (昭和 49 年) 5 月 17 日に，中央アフリカ西岸沖で，航行中に船首部が破断して流出するという珍しい破損を起こした (図 2)。本船は，1967 年 (昭和 42 年) に日本の造船所で竣工した 130,000 D.W.T. のタンカーであった。

図 2 に示したように，コリジョンバルクヘッドのすぐ船首側で見事に切れており，コリジョンバルクヘッドは壊れなかったのである。

上述の，“大型タンカーの破損例”を調査・検討したことにより，船体構造に対する“破壊管理制御設計の考え方”が，ある程度明らかになったと考えていた著者は，本船の破損に遭遇して大きな衝撃を受けた。

ところが，次に紹介する破損例が，その疑問を解いてくれたのである。

2.3 Marcona Trader 号の破損例

Marcona Trader 号が，石炭を満載して南米から千葉

*原稿受付 平成 11 年 10 月 4 日

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

図1 大型タンカー (88,461 D.W.T.) の破損状況 (1968 (昭. 43) 年 8 月 9 日)

図2 ウィルスター号 (130,000 D.W.T.) の破損状況 (1974 (昭. 49) 年 5 月 17 日)

県君津に向かう途中、1981 年 (昭和 56 年) 3 月 1 日に、野島崎東方約 3,300 km の北太平洋で、船首部を破断・流出するという破損を起こした (図 3)。本船は、1966 年 (昭和 41 年) に日本の造船所で竣工した 64,427 D.W.T. の Ore/Bulk/Oil Carrier であった。

船首部を破断・流出後、約 1 ヶ月かけて、自力で 4 月 5 日に千葉県君津に入港した。積み荷を降ろした後、船底を検査して佐世保に回航され、修理された。

調査の結果、推測された破損の経緯は以下のようであった。

- ① ホッピークタンク内の骨部材が、元板厚の半分程度の板厚まで腐食・衰耗。
- ② 苛酷な海象による大きな水圧により、ホッピークタンク内のサイドロンジが、コリジョンバルクヘッド

のすぐ船首側で一斉に座屈・崩壊。引き続き負荷される変動荷重により座屈・崩壊した全てのサイドロンジの座屈・崩壊部が破断。

- ③ 破断したサイドロンジ破断部先端で、船側外板に疲労亀裂が発生・進展。
- ④ それぞれの疲労亀裂先端から脆性不安定亀裂が発生し、一瞬にして全ての疲労亀裂が繋がって、船首部が破断・流出。

すなわち、ホッピークタンク内サイドロンジの座屈・崩壊が引き金になったことが明らかになった。主原因は、構造部材の腐食・衰耗であった。

本船の破損例を調査・検討することにより、上述の“大型タンカーの破損例”の調査・検討結果と合せて、船体構造に対する“破壊管理制御設計の考え方”を教えてもらったといっても過言ではない。

3. 超大型タンカー (VLCC) 原油タンク内サイドロンジの疲労破損例

1990 年 5 月、揚荷中の超大型タンカー (VLCC) において、専用バラストタンク内に原油が漏れているのが発見された。調査の結果、サイドロンジとトランスバルクヘッドとの交差部で、サイドロンジのフェイスプレートに亀裂が発生していることが確認された。また、同様の破損がサイドロンジとトランスリングとの交差部にも発見された (図 4)⁶⁾。

トランスバルクヘッドとの交差部では、カラープレートとの取合部からサイドロンジに亀裂が入ったものがほとんどであるが (図 4, ④), 一部、スチフナとの取合部からサイドロンジ側に入ったものもあった (図 4, ⑧)。

トランスリングとの交差部では、ウェブスチフナのスカルアップ部からサイドロンジ側に亀裂が入っていた (図 4, ③, 図 5)。

これらの亀裂発生は、船体長さ方向中央部付近の原油タンク内に多く、しかも、満載状態での喫水線付近から、水面下 8 m 付近までに分布していた⁶⁾。

図3 Marcona Trader号(64,427 D.W.T.)の破損状況
(1981(昭.56)年3月1日)

図4 超大型タンカー(VLCC)サイドロンジの疲労破損状況

調査結果によれば、亀裂は疲労によるものであることが明らかになった。また、詳細な応力解析を行った結果、満載喫水線の直下に変動応力のピークが存在するこ

図5 ウェブスチフナのスカラップ部からサイドロンジに入った疲労亀裂

とが明らかになり、この変動応力分布と亀裂発生分布とが良く一致した⁶⁾。

4. 船体構造の破壊管理制御設計の考え方

先に2章で述べたように、大型船舶の破損例を調査・検討して、船体構造に対する“破壊管理制御設計の考え方”を教えてもらった。

すなわち、船体構造の如き高次の不静定構造物においては、厳密には亀裂の発生強度を検討基準にすることは不可能に近く、また経済的でない場合も多い⁵⁾。しかも、溶接長が500~700kmにもなるような大型船体では、亀裂の発生強度を検討基準にすることは不可能である。亀裂が存在すること自体が設計上の不備を意味し、破損の発生を許容応力の低減によってのみ回避しようと

する設計思想には、自ずから限界がある。

“船体構造の破壊管理制御設計”は、疲労亀裂の発生・進展、さらに脆性不安定亀裂の発生・伝播あるいは伝播停止といった、亀裂を主体とした損傷過程の把握を基礎とするものである。

また、船体構造部材（含溶接継手部）の許容応力あるいは余寿命計算、欠陥許容値の設定、および材料選定基準などを明確にすることである。また、亀裂の存在は許容しても、使用期間中に致命的な破損を起こさずに機能を全うできる構造方式の開発・設計を実現することである。

当初考えられた、破壊力学（K 概念）による亀裂強度解析の計算内容ないしフローは、図 6 に例示するようなものであった⁵⁾。また、前述の破損例の調査・検討により教えてもらった、当初の船体構造破壊強度検討流れ図を、図 7 に示す⁶⁾。

LNG 船や LPG 船の如き、万一の損傷時に大規模災害が発生する恐れのある船舶に対して、その経済的要因からも、破壊管理制御設計が実用されてきた⁷⁾。

5. 超大型タンカーサイドロンジの疲労設計

先に 3 章で述べた疲労破損は、いずれも、隅肉溶接角回し止端部から発生していたので、評価応力としては、隅肉溶接角回し止端部から 5mm の位置の等価応力範囲 ($\sigma_{R,eq}$) を用い、累積超過確率 $Q=10^{-4}$ の値で代表させた。

隅肉溶接角回し止端部から 5mm の位置の応力を用いたのは、ソリッド要素を用いて有限要素法による応力解析を行なったときに、止端部から 10mm 長さの要素に分割して解析したためである⁸⁾。

隅肉溶接角回し止端部の、基本要素継手疲労試験片お

よび構造要素モデルによる、疲労試験結果から求めた、疲労寿命評価線図を、図 8 に示す⁹⁾。

図 8 の縦軸は、上述の累積超過確率 $Q=10^{-4}$ の $\sigma_{R,eq}$ である。また、横軸は、就航後の年数である。

先に 3 章で述べたサイドロンジの疲労破損は、図 8 の疲労寿命評価線図でほぼ矛盾なく評価することができた⁹⁾ので、以後、図 8 の疲労寿命評価線図を、設計基準と

図 7 船体構造破壊強度検討の流れ図

図 6 破壊力学による亀裂強度解析の流れ図

図8 疲労寿命評価線図

することが提案された。

6. おわりに

大型船舶で発生した破損例を数例紹介し、その破損原因や破損経緯をヒントに編み出した、船体構造の破壊管理制御設計の考え方について述べた。

また、超大型タンカー(VLCC)で経験した、サイドロンジの疲労破損例の逆解析により編み出した、疲労設計基準の考え方について述べた。

これらの設計思想は、いずれも貴重な実物実験結果か

ら教えてもらったものである。

万一、破損例に遭遇したら、謙虚に、納得するまで、観察・思考・観察・思考・・・し、その教訓を前向きに、今後の糧にする必要がある。

参考文献

- 1) 矢島 浩：連載講義 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－，溶接学会誌 第68巻第7号 (1999. 10)，pp.6-10.
- 2) 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.
- 3) 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. 1)，pp.90-96.
- 4) 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.
- 5) 矢島 浩：破壊力学とその設計への応用 (その7)－破壊管理制御の実例(II)－，日本造船学会誌 第658号 (1984. 4)，pp.192-207.
- 6) 渡邊栄一：大型タンカー原油タンク内局部構造の疲労強度評価に関する研究，広島大学大学院工学研究科博士学位論文 (1998. 12).
- 7) M. Watanabe, A. Fushimi, H. Yajima, H. Iizuka, M. Matoba, M. Kinoshita, K. Ando, T. Yamashita : Fracture Mechanics Analysis of Independent Prismatic Tank of Low-Temperature LPG Carrier for Verification of IMCO Type B, Mitsubishi Technical Bulletin No.147 (1981. 12).
- 8) 矢島 浩，川野 始，多田益男，井上克明，阪井大輔，伏見 彬：新制御圧延(TMCP)型50キロ級高張力鋼溶接継手部の疲労強度とその評価 (その4)，西部造船会会報 第83号 (1992. 3)，pp.237-244.

[新 刊]

溶接学会技術資料 (J W S Bulletin) NO. 14

溶接部の材料挙動のモデリングとシュミレーション

(社) 溶接学会溶接冶金研究委員会編

平成11年 8月発行

価 格：15,000円／送料 400円
3,000円／送料 400円 (学生)

体 裁：B5版 (343ページ)

申込方法：購入ご希望の方は、FAXにて下記宛にお申し込み下さい。

〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間 1-11

(社) 溶接学会 溶接冶金研究委員会

FAX：(03) 3253-3059／TEL：(03) 3253-0488