

新しい船体疲労設計ガイダンス (PrimsShip-FD) について

～その概要と解析例～

恵美 洋彦*, 的場 正明*, 越智 宏*

1. 緒言

近年, 新しい構造様式や材料の採用あるいは長寿命化計画の船舶が増加しつつある. このような場合, 船体の疲労強度は, 経験的に判断することができないため, きわめて重要な問題となる. 本会は, 1995 年に新しい船体疲労強度設計ガイダンス (Guidance for Fatigue Design of Structures : PrimeShip-FD)¹⁾ を発行した. 本報では, その概要とそれに基づいた解析例について述べる.

2. ガイダンスの概要

2.1 解析方法

現在, 船体疲労強度の精密解析法として実際的な方法, すなわち Design by Analysis (DA) の思想による疲労強度の解析方法 (Fatigue Design by Analysis : FDA) は, 次のような解析法からなる.

- (1) 構造解析には, 大型 FEM 及び詳細構造の局部 FEM のモデルを用いる.
- (2) 船体運動理論により, 規則波中の荷重/応力の応答関数を求める.
- (3) 気象海象データから統計確率論により, 荷重/応力の長期分布を予測する.
- (4) 各部材ごとに各種荷重成分の影響や位相差を考慮した組み合わせ応力の長期分布を予測する.
- (5) 対象部材に適切な S-N 線図を用いて累積被害度を求める.

この各過程は, (1), (2)及び(3)については, PrimeShip-FD¹⁾ で示した方法が, 現在, FDA として広く採用されている手法であり, 本報での説明は省略する. (4)の組み合わせ応力を求める方法としては, 次の 2.2 に示す方法が提案されている. (5)の疲労累積被害度を求める方法としては, 次の 2.3 に示す方法が提案されている.

2.2 組み合わせ応力の予測

FDA を実施する場合, 現在実施されている最も理論に忠実な方法は, 規則波の周波数と出会い角ごとに, 時間と位相を考慮して応力計算を行って応力応答関数を求め, 想定海象の応答を統計処理する方法である. しかし, この方法, 時刻歴解析法は, 膨大な解析工数時間を費やすので PrimeShip-FD¹⁾ では, 次の(1)に示す方法が提案されている. さらに, PrimeShip-FD¹⁾ では, 簡略化した次の(2)及

び(3)に示す方法が提案されている.

(1) 時刻歴解析法 (Time History Analysis)

これは, 各種の規則波ごとに波浪外力や積荷加速度を時間の関数として求め, 応力の応答もその外力と同様の時間の関数として求め, 短期・長期の応力分布を統計予測する方法である. この方法は, 離散化解析法 (DISAM) として解析例が報告³⁾ されており, 前述の理論の方法である. しかし, 比較的容易とはいえ, 解析に多くの工数時間を必要とするので PrimeShip-FD¹⁾ では, 付録としてその計算をサポートするプログラムソフト (THAN)⁴⁾ を供与することとしている.

(2) 設計波法 (Design Wave Method)

これは, 対象とする部材/位置に支配的な荷重・波条件を設計波とし, 同時刻の他の荷重成分も加算する方法である. この方法は, 前記(1)に比べて容易ではあるが対象部材/位置ごとに波の特性パラメータを変えながら試行錯誤的に設計波を選定する必要がある. 解析には, ある程度の工数時間がかかる.

(3) ピーク時比率法 (Combination Ratio Method)

これは, 対象部材/位置の応力の長期頻度分布を波変動圧, 積荷などの荷重成分ごとに求め, これらの組み合わせ応答量が最大になると想定されるある一定の比率で組み合わせる方法である. この方法も, 前記(1)に比べて容易ではあるが解析にはある程度の工数時間がかかる.

2.3 疲労被害度の算定/評価

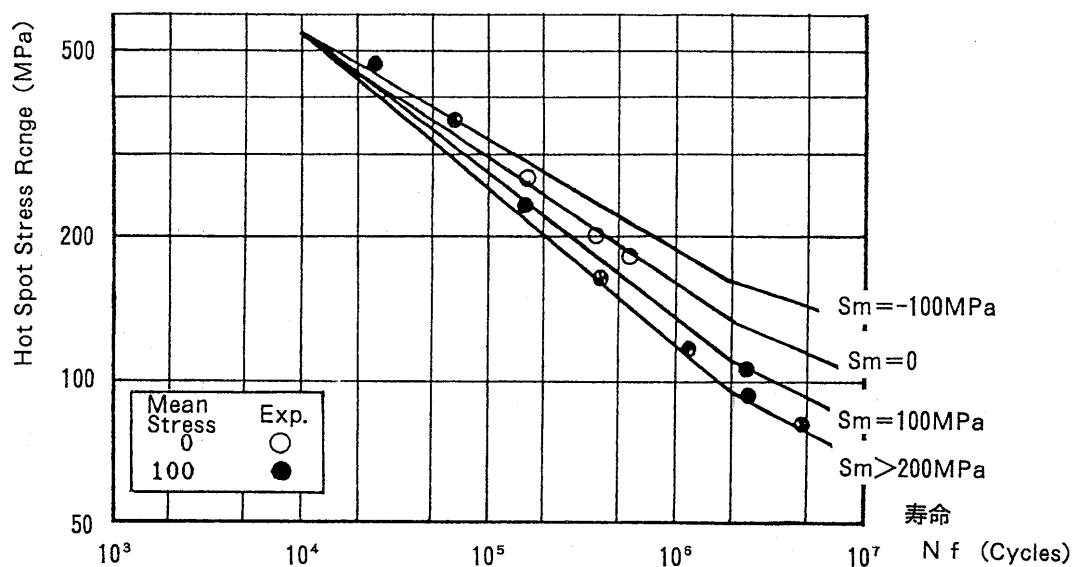
評価に用いる S-N 線図は, 本会を含む日本での共同研究²⁾ での実験研究成果に基づいた荷重非伝達型隅肉溶接継手基礎試験片の 50% 破壊確率のものをベースにし, 突合わせ, 斜交差隅肉継手の線図を提供している (図 1 参照). ここで, 基礎試験片の破壊寿命 N_f は, で実船の部材の破壊寿命より短いので, 設計評価に N_f を用いる場合, 安全側になる. 次に, 若干の補足を示す.

(1) ホットスポット応力変動範囲 ΔS_h は, 静水状態, 波浪最大及び最小荷重状態の 3 ケースの最大差とする.

(2) 溶接残留応力は, 等価平均応力 S_m として考慮する. この値は, 例えば, 縦通骨部材端部で 50 MPa, 複雑なスロット廻り 100 MPa 程度である.

(3)設計では, 累積被害度 1.0 を判定の標準とし, 部材重要度, 検査保守の間隔/方法, 予定寿命などに応じて使分け. これらを考慮して寿命設計する方法は, 別途提案⁵⁾ されている. 例えば, 重要度が高い部材で点検が困難な上甲板縦通梁は, その寿命間累積被害度を 0.1 以下とするか,

*技術研究所



$$Nf \cdot (\eta \cdot \Delta Sh)^2 = B$$

- $\eta = 0.746$ for butt weld
- $= 1.0$ for fillet weld (non-load carrying type)
- $= 1.587$ for fillet weld (load carrying type)
- $= 0.806$ for specially controlled fillet weld (non load carrying type)

Fig.1 S-N diagram proposed by PrimeShip-FD¹⁾

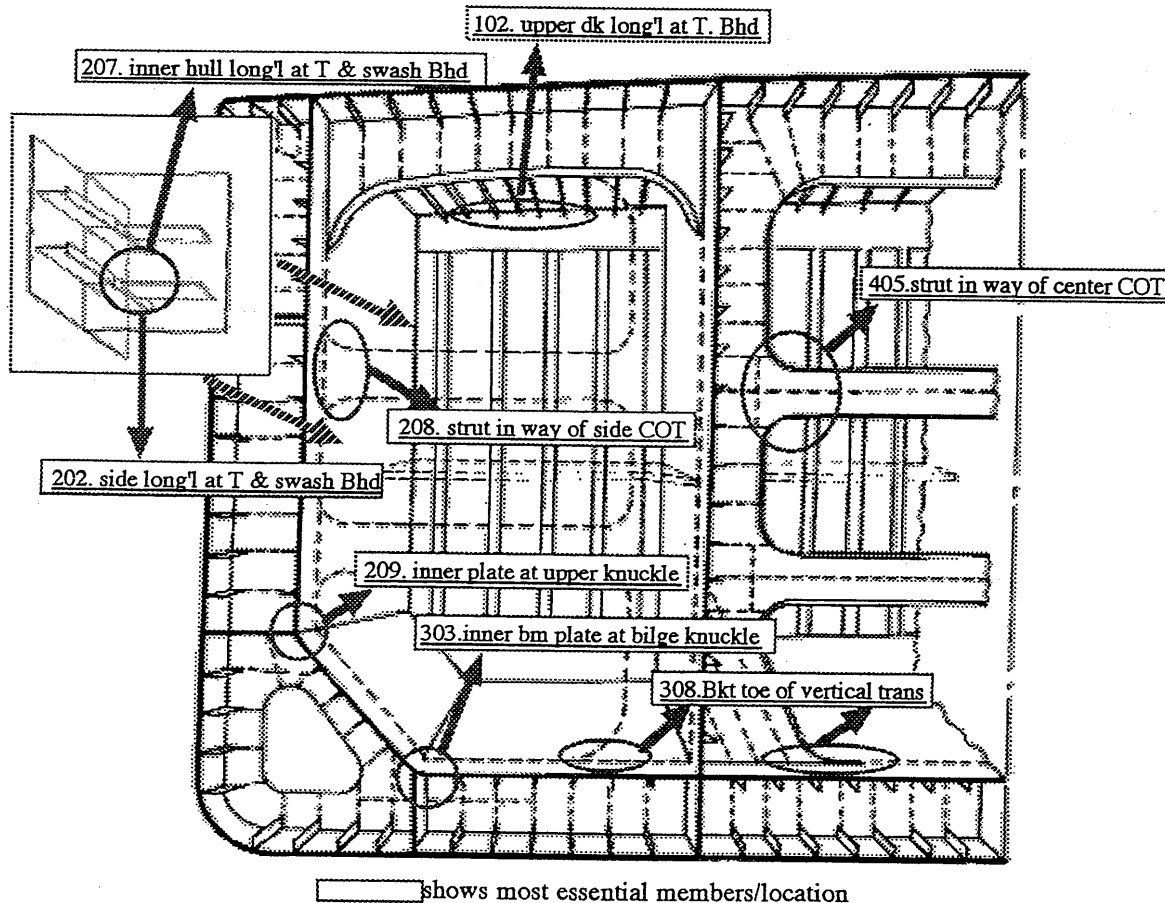


Fig.2 Most essential members/location of DH VLCC

または0.1を超えたら約2年間隔でクローズアップ検査が容易に行える手段を講じておく。

3. 解析対象部材／位置の選定

船体構造には、膨大な種類の構造部材／位置が存在する。これらの全てについて疲労強度解析を実施するのは、実際上不可能であり、また、意味がない。そこで、重要部材を適切に選定して解析することになる。このような部材／位置は、損傷の発生確率が比較的高いもの、または、発生確率は低い、万一発生した場合、重大な事故の主要因となる恐れのあるものを選定する必要がある。PrimeShip-FD¹⁾では、本会提案の基準²⁾で危険評価して選定した重要部材／位置のリストをVLCC(SH,DH),バルクキャリア,コンテナ船について示している。さらに、重要部材／位置のうち、万一発生した場合、重大な事故の主要因となる危険と損傷の発生確率が比較的高いものを最重要部材／位置と指定している。図2に、DHVLCCの最重要部材／位置の例を示す。

4. 解析例

4.1 在来型 VLCC の疲労損傷解析

著者らは、1970年代に建造された31隻のVLCC(船底及び上甲板の一部に高張力鋼使用、他は軟鋼)について疲労損傷(腐食に起因する疲労損傷を除く)の調査を行った。その一覧は、表1に示される。これらは、建造時に疲労設計が実施されていないが、一般的に疲労損傷発生率が低く、十分な疲労強度を有しているといえる。ただし、船側縦通肋骨及びストラットは、重要度の高い割りに発生率が高くなり、実際の累積被害度が大きくなった場合、密な間隔で十分な点検を必要とする。図3及び図4に損傷例を示す。また、同図には、この種の構造の代表例についてPrimeShip-FD¹⁾の設計波法による疲労累積被害度を求めた結果を示す。この結果に基づいて危険評価を実施すると、十分な構造健全性を維持するには、船側縦通肋骨では船齢10年、ストラットでは船齢15年を超えた場合、2年間隔で該部のクローズアップ検査が必要と判断される。なお、表1では、横桁のスロット周辺の損傷発生率が高いが、こ

Table 1 Data Base of Fatigue Failure for VLCC
(Cargo are)

Structural Members (a)-(l): refer Fig.1	Damage Frequency Nos per tank-year x 10 ⁴		Remarks
	COT	BWT	
[Plating: Swash Bhd. excluded; refer 2.3.2]			
Shell plate	1	0	due to poor welding
Deck plate	0	0	
Longitudinal Bulkheads	3(3)	27(14)	
Transverse Bulkheads	23(15)	0	members at boundary of COT/WBT included in BWT
ditto			
[Girders(Side Trans,Bottom Trans,etc): including Horizontal Girder of horizontal main system. refer 2.3.3]			
Face plates(a)	1	0	due to poor welding
Bracket toes of main girder(b)	0	0	
Strut(c)	16(7)	0	
upper strut			
[Girders of Transverse Bulkheads: refer 2.3.3]			
Face plates(d)	10(0)	0	
Bracket toes of main girder(e)	45	49	
[Frames, etc.: refer 2.3.3]			
Bottom Longitudinals(f)	18(6)	0	at structural discontinuity
Deck Longitudinals(g)	0	0	
Side Longitudinals(h)	52(30)	36	
Longitudinal Bhd.stiffeners(i)	0	0	
Vertical Stiffeners on Bhd.(j)	11(11)	0	
[Others : refer 2.3.3]			
Web plate of girder(k)	103(3)	158	
slot(k-1)	72	110	
snip end of web stiff.(k-2)	21	32	
others(k-3)	10	16	
Web stiffeners, brackets,etc.(l)	294(88)	1083(36)	
bottom longl.(l-1)	153()	563()	
side longl.(l-2)	118()	433()	
others(l-3)	23()	87()	
Stiffeners on transverse Bhd.	11(11)	0	

note. 1) Investigated period, No. of total ships, mean age; 1980-90,35 vessels, 11 years old

No. of investigated tanks(slop tank excluded)

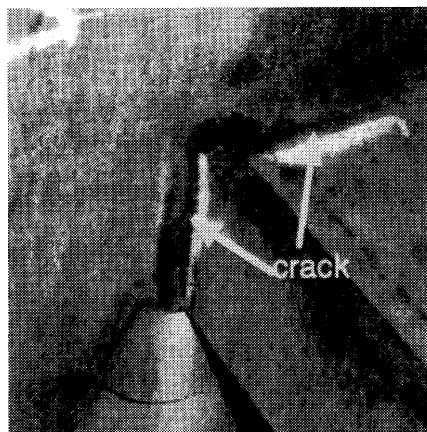
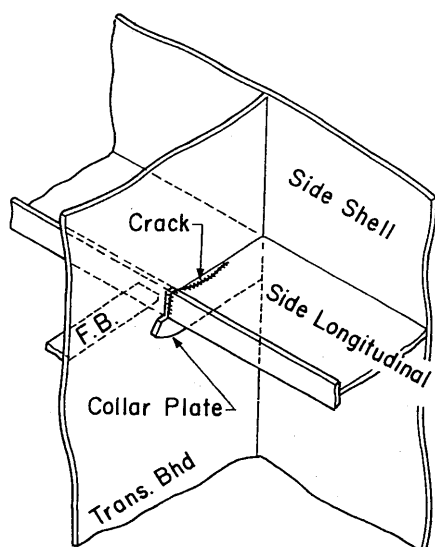
COT: 18.6/ship, 6900 tanks-years

BWT: 2.1/ship, 822 tanks-years

2) Damages mainly due to wastage excluded

3) Nos. in () show frequency of crack damages longer than 200mm
spaces in () indicates no data available

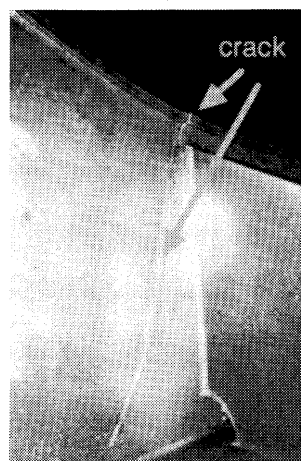
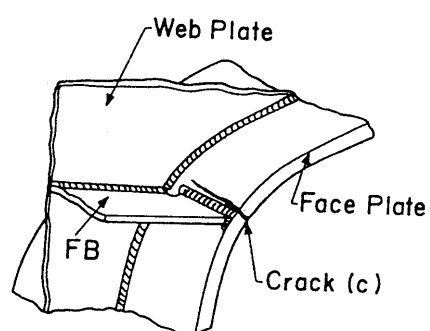
4) No. of damages/ ship 14.2(mean)



Example of fatigue analysis of side longitudinals in way of COT at load water line

Ships particular :254,000DWT, voyage route; Japan-Perusian Gulf
 Damage factor (Df) :0.86 at 12.5 years
 :3.64 at 25 years

Fig.3 Typical example of fatigue failure of side longitudinals and result of fatigue analysis



Example of fatigue analysis of upper strut in way of COT

Ships particular :254,000DWT, voyage route; Japan-Perusian Gulf
 Damage factor (Df) :0.07 at 12.5 years
 :0.27 at 25 years

Fig.4 Typical example of fatigue failure of upper strut and result of fatigue analysis

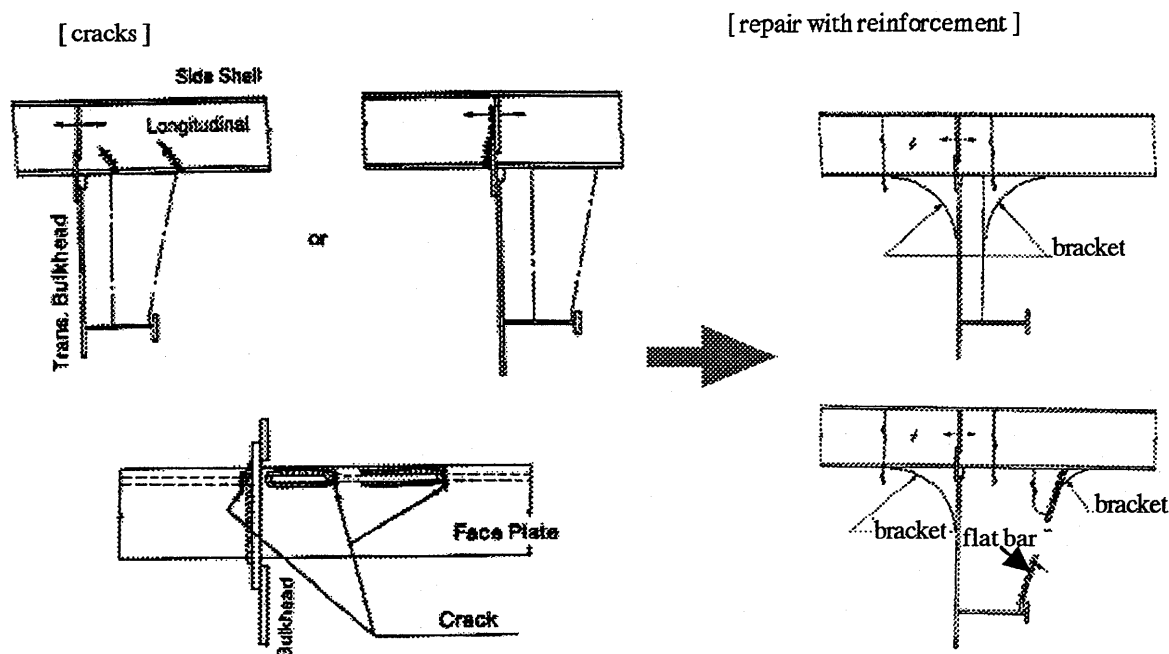


Fig. 5 Examples of fatigue cracks and their counter measures

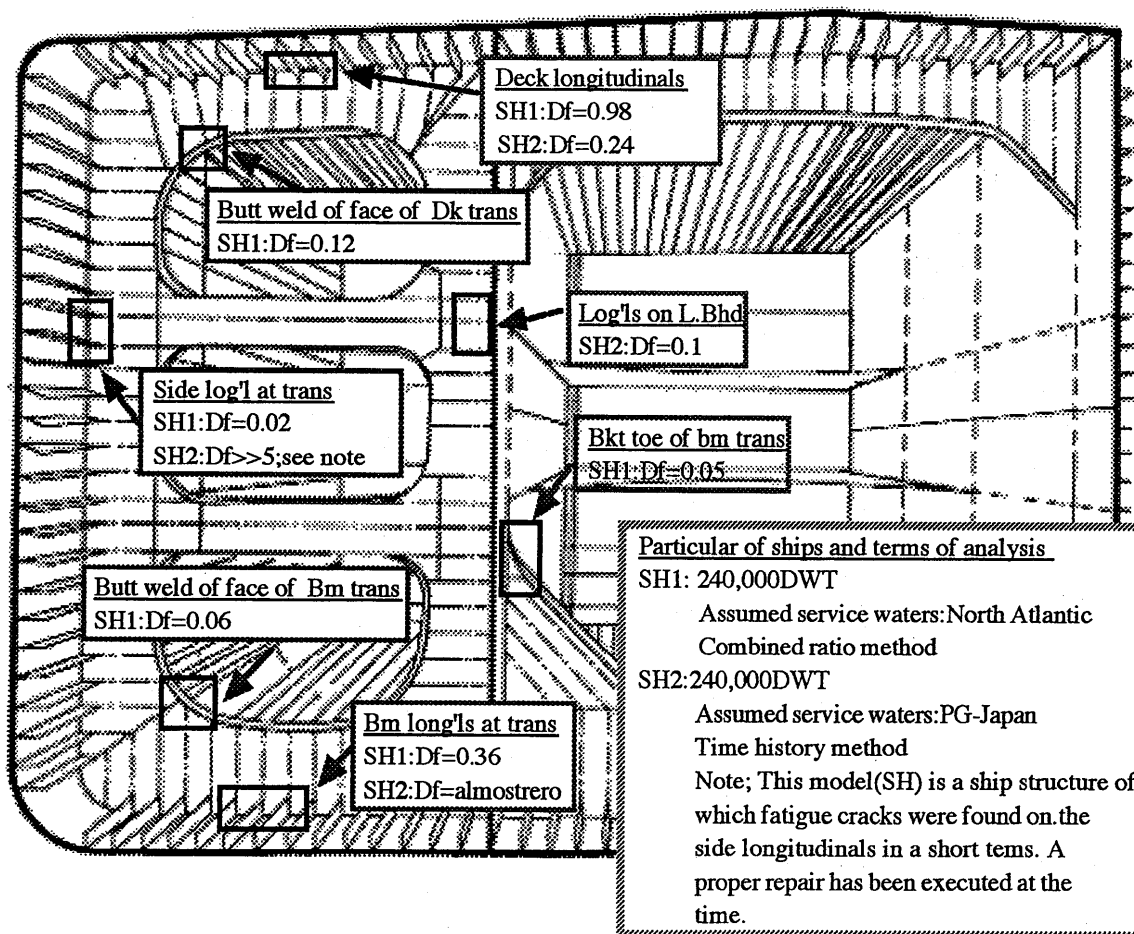


Fig. 6 Result of fatigue analyses for SH VLCC

Cumulative damage factor (Df) shown in the above is of a value for 20 years operation

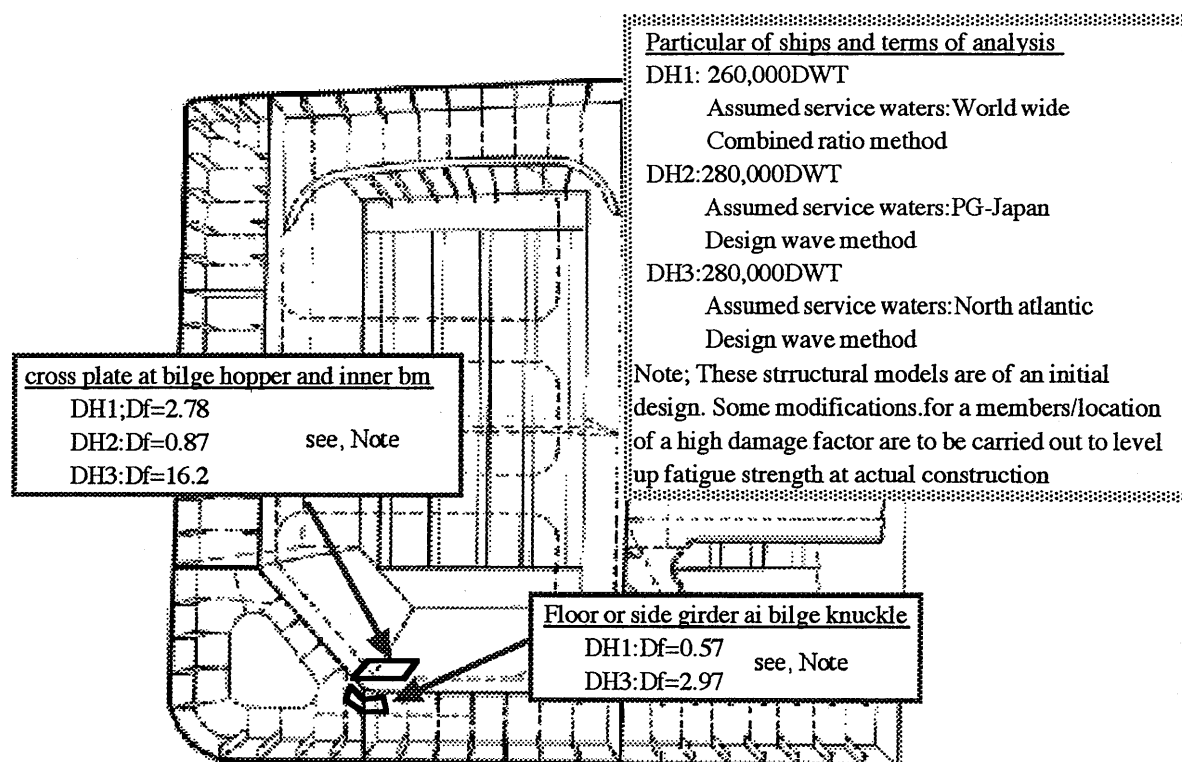


Fig. 7 Result of fatigue analyses for DH VLCC

Cumulative damage factor (Df) shown in the above is of a value for 20 years operation

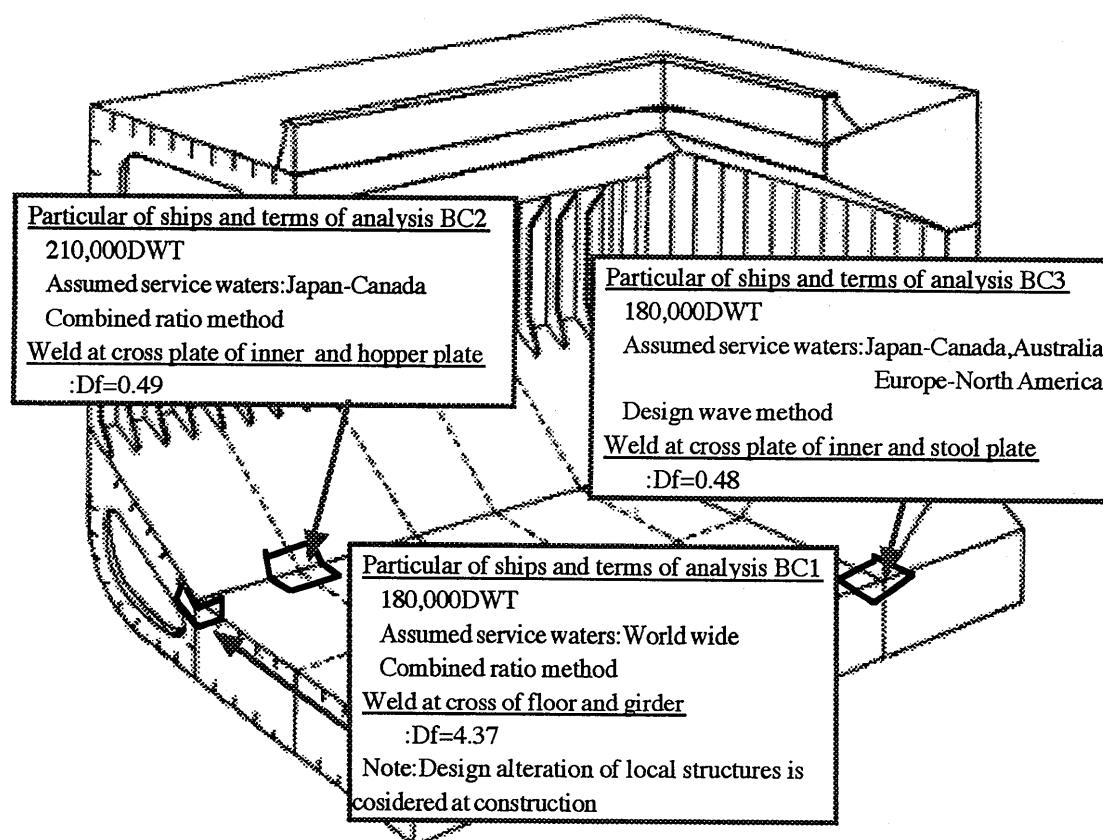


Fig. 8 Result of fatigue analyses for Bulk Carriers

Cumulative damage factor (Df) shown in the above is of a value for 20 years operation

れらは、重大事故にいたるおそれが小さく、危険評価の結果、通常の方法（５年間隔）で保守点検を実施すればよいと判断される。

4.2 高張力鋼使用 VLCC 事故対策

1980 年代に広範囲に高張力鋼を採用した VLCC が建造された。これらの VLCC の船側縦通肋骨には、就航後、短期間（５年未満）で疲労亀裂が発生した。この損傷は、図 3 に示したものと同様、船側縦通肋骨の横隔壁付端部に発生した。さらに、これらの VLCC うち、横桁貫通部の船側縦通肋骨にも類似の亀裂が発見された。この事故に対応するため、本会は広範の疲労強度解析を含む検討を行なった。亀裂発見時までの累積被害度は、短期間に拘わらず 0.2 ～ 4.0 の範囲であり、該部の疲労強度に問題があることが判明した。この検討結果から高張力鋼についての本質的な問題は認められないが、波浪変動応力の大きい応力集中部に対する疲労強度に十分配慮する必要があることが指摘された。そして、設計建造及び就航船に対し、ただちに適切な対策が講じられた。就航船の対策例は図 5 に示すとおりである。このとき実施した疲労解析は、2.2(1)の設計波法を経験的に簡易化した方法が用いられた。

4.3 解析例

ここでは、PrimeShip-FD¹⁾ の研究開発過程で VLCC（シングル SH：2 隻及びダブルハル DH：3 隻、いずれも広範囲に高張力を採用）及びバルクキャリア（3 隻）の代表的部材／位置について前記 2 に示した方法で疲労強度解析を実施した結果について述べる。

解析対象部材／位置及びその結果は、図 6、7 及び 8 に示すとおりである。

5. 結 言

PrimeShip-FD¹⁾ は、現時点では、実際的で精密な疲労設計／解析法として最新のものと考えられる。しかし、特に横強度部材の局部解析は、さらに試行改善すべき点も少なくないと考えられる。また、提案の方法は、厳密な方法に比べて簡易化されているとはいえ、実際の設計に適用する場合、かなり多くの時間工数を必要とする。本会は、今後、より合理的なガイダンスに改良するための検討を進めている。

参 考 文 献

- 1) Nippon Kaiji Kyokai, Guidance for Fatigue Design of Ship Structures : PrimeShip-FD), 1995
- 2) 日本造船研究協会, 大型船縦通肋骨材の強度に関する研究・総合報告書, 1994
- 3) 倉本他, 波浪外力総合評価法による船体構造設計（第 3 報）：日本造船学会論文集第 163 号, 1988
- 4) Nippon Kaiji Kyokai, Time History Analysis of Stress of Hull in Ocean Wave (PrimeShip-THAN : PC Soft), 1995
- 5) Nippon Kaiji Kyokai, Guidance for Total life Assessment of ships and offshore structures (PrimeShip-TLA), 1995