(昭和 51 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

信頼性解析に基づく船体構造設計について

正員 秋 田 好 雄* 正員 山 口 勇 男*
正員 新 田 顕* 正員 荒 井 宏 範*

Design Procedure based on Reliability Analysis of Ship Structure

by Yoshio Akita, *Member* Isao Yamaguchi, *Member*
Akira Nitta, *Member* Hironori Arai, *Member*

Summary

In this paper, a general discussion is made on the design procedure based on reliability analysis, where a “direct method” and “semi-direct method” are proposed for the strength assessment of structural members of ships. The direct method is composed of system analysis, reliability analysis and design criteria; while the semi-direct method is simplified and less time-consuming procedure, but rational due to its strength criteria based on the failure probability concept as obtained by the reliability analysis.

As a numerical example, the reliability analysis is performed on both longitudinal strength members and transverse members of an oil tanker, taking into consideration of such failure modes including yield failure of material, buckling and instability failure of deck or bottom plating, longitudinals and transverse webs, plastic bending collapse of hull girder and of transverse ring frame structure as well as fatigue crack initiation of butt welded joint of the primary strength members of the ship.

1 緒 言

船体構造設計における強度判定基準の根拠として、経験的な実績と、理論的な強度推定の二つがあげられる。前者は、過去の類似な船舶における構造上の一般損傷の有無から判断して、安全とみなされる設計を行なうことにより損傷の再発を防ぐ方法であり、これは確実ではあるが進歩に乏しい。一方、後者は、極めて一般的に適用が可能であり、とくに新しい構造様式の船舶についての設計に対しては有力な役割を演ずると考えられるが、強度推定の基盤となる損傷予測の段階において、強度に対する検討の対象が現在の工学的知識で処理しうる問題のみに限定されるため、未だ資料の不十分なテーマについては前者の考え方を部分的にせよ導入せざるを得ない現状である。

しかしながら、現在までにすでに得られている研究成果を基盤にして、船体構造強度の種々の損傷モードについての分析を試み、損傷形態の因果関係を明らかにして、その結果を設計に反映させることは極めて重要なことと考えられる。

そこで、本論文においては、Design Procedure の一

環として、信頼性解析に基づく船体構造直接設計法を提唱し、一例として、タンカーの縦強度および横強度についての強度分析を行なった。

2 直接設計法

I. S. S. C.-1970 で提唱された“direct design procedure”(直接設計法)の考え方については、その後も引きつづき研究が活発に行なわれており、さらにこれを実用設計にいかに取り入れるべきかについての検討も進められている。

船体構造強度に関する直接設計法の基本概念は、設計の対象とする船体構造について、その建造から就航を含めた一生を通じて発生しうると予想される可能な限りの事象を考慮して、現在までに開発された解析法、蓄積された実測結果ならびに調査資料に基づく総合的な検討を行なうことに基盤を置いている。海洋波中を航行する船舶の船体運動、波浪外力、これにより惹起される構造応答、さらに構造部材の疲労強度、座屈強度ならびに塑性崩壊最終強度などについては、十分実用に供し得る理論解析法が研究開発され、設計への適用が確認されているものが少なくない。

また、建造中の船舶について、その構造部材の工作精

* (財)日本海事協会

度と初期不整量の調査, 使用鋼材の寸法および強度に関する統計資料の収集も行なわれており, これらの成果を設計に反映させることも可能となってきた。一方, 船舶の就航する海域における気象, および海象に関する観測資料に関しても, 特定の海域については着々と整備が進められており, その統計的な利用が十分可能な段階にまで到達していると考えられる。さらに, 就航中の船舶についての積荷状態に関する実績調査ならびに荒天時における操船状況などについての実態把握も試みられており, 将来, この種の資料が整えられることも期待される。

そこで, 一つの試みとして, 上記の諸項目に関する既存の資料を用い近年開発された解析法に基づく船体構造設計法 (design procedure) を提唱する。ここでは下記に述べる “direct method” を中心とし, さらにこれをより簡便で実用的なものとした “semi-direct method” の導入についての検討を行ない, また従来の設計において使用されている “conventional method” との比較についても考察した。

2.1 Direct Method

ここで提唱する直接設計法による船体構造強度の確認の手順と, それら相互の関連を, Fig. 1 のフローチャートに示す。

まず, 船体主要寸法と一般配置が初期計画において与えられ, 船体構造部材の寸法が仮定されると, 船殻重量の概算および IMCO 規定等の諸条件の確認が行なわれる。次に, 船体構造強度の安全性を確認する段階として, 前述の3つの方法が考えられるが, 最初に, Fig. 1 の太い実線の流れで示す “direct method” について述べる。

“direct method” においては, 同図の左上方ブロックで囲まれる system analysis と, その下方のブロック内に示される reliability analysis, さらにそれを基盤とする design criteria から構成される3つの手順から成り立っている。

2.1.1 System Analysis

まず, トータルシステム解析プログラム^{2), 3)}を使用し, 規則波中の船体運動についてストリップ法による解

Fig. 1 General Design Procedure

析を行ない、船体に作用する水圧分布および積荷による船体構造解析を行なって、主要構造部材に発生する応力の応答関数を算出する。つぎに、海洋不規則波に関する波浪スペクトルを用いて上記応力の短期分布を求め、さらに想定海域における波浪の観測資料に基づいた統計解析を行なって、波浪変動応力の頻度分布とその特性極値を算定する。

2.1.2 Reliability Analysis

このようにして求められた船体主要構造部材に生ずる応力の統計値を用いれば、船の就航中に発生する各種の損傷モードについての損傷確率を、信頼性解析により算出することができる。損傷モードの一例として、船体構造部材の溶接継手における疲労亀裂の発生をとりあげれば、波浪変動の頻度分布と溶接継手部材についての疲労実験結果とを使用して疲労損傷確率が求められる。

また、別の損傷モードとして、構造部材の降伏破損や座屈崩壊など、構造部材の延性破損にもとづく損傷のほか、鋼材の低温脆性による急速破断損傷などがあげられる。これらの損傷モードは、いずれも、船体構造部材に生ずる応力の最大値に支配され、これがある限界値を超過すると損傷が発生するものとみなして、上記波浪変動応力の最大値を極値統計論により推定し、各モード別に、損傷確率の計算を行なう。

これらの損傷確率を算定する場合、強度解析法の精度にもとづく subjective uncertainty のほか、使用鋼材特性および寸法較差、建造工作精度（部材の初期不整、溶接欠陥、残留応力などを含む）、疲労実験等の実験データ、就航海域の波浪観測データ、および温度条件、積荷状態などの諸因子のパラッキによる objective uncertainty を考慮に入れた信頼性解析を行なうので⁴⁾、これらの統計量（平均値と標準偏差）についての整備が必要であることはいうまでもない。

2.1.3 Design Criterion

以上の手順により求められた上記各種損傷モードに対する損傷確率の値が、それぞれのモードについて設定される限界値を上まわらないことが確認されれば、その設計寸法は、強度上、許容されるものと考えて、ここで重要な問題として、損傷確率の限界値をどのように設定すべきかについて検討の余地が残されており、この問題について未だ十分な研究が試みられていない現状では、これを単に工学上の立場からのみ決定することは早計であり、文献 5) でも述べているように、経済的さらに社会的見地からも考察することが不可避となろう。しかしながら、本論文では、船体構造強度の信頼性に対する一指標 (reliability index) として算出した上記損傷確率の値は、現在最も合理的な手段の一つにもとづいて求められる有意な尺度であるとして、これを設計に反映さ

せることが必要であろうと考える。

例えば、上記各種損傷モード別に算出された損傷確率の値を、たがいに相対的に評価することも一つの方法である。すなわち、構造部材の局部的な降伏や疲労亀裂の発生などに対する確率に比べて、部材の局部的塑性崩壊や永久的な大変形を伴う座屈損傷の確率はより低い値に制限すべきであり、また、船体ハルガードあるいはトランスリング全体の塑性崩壊、あるいは船殻主要部材の急速大亀裂破壊などの確率は、さらに低い限界値以下に押えた設計が必要であろう。

2.2 Semi-Direct Method

船体構造強度の確認を行なう場合、2.1 で述べた “direct method” により各種損傷モードに対する損傷確率の値を算出してこれらを比較検討することは、その解析プログラムを一度作成しておけば極めて直接的な検討方法であり、しかも強度的に釣合いのとれた適切な設計が行なえる利点がある。しかしながら、その解析に要する工数と計算機の使用費用等の点で、これを各設計船ごとに実行することは、必ずしも適当であるとはいえない。そこで、これを近似的ではあるがより簡便な実用的なものに拡張した “semi-direct method” の導入を考える。この方法として考えられるものは、必ずしも一通りに限定されるわけではなく、その適用すべき構造部材によっても異なり、また設計評価上の重要度、解析費などの諸条件によっても、適宜、選択すべきものと考えられる。いま、一例として、Fig. 1 の太い鎖線の流れて示される “semi-direct method (1)” をとりあげる。この方法においては、上記の system analysis を実行して、設計船の就航期間内に発生すると予想される応力の特性極値を求める。つぎに、“direct method” で行なうような reliability analysis を、直接、本船について実施する代りに、この応力値を各種損傷モード別の損傷確率にもとづいて設定された許容応力値と比較することにより、構造強度の確認を行なう（この具体例については、後述 4 参照）。

もう一つ別の例として、Fig. 1 の “semi-direct method (2)” で示すものは、上の (1) の方法をさらに簡単化したものである。すなわち、本船についての system analysis は行なわず、その代りに、同種の船舶について、あるいは構造の類似なものについて、すでに実施してあるシリーズ解析の結果から得られた構造応答の統計値を、船体主要寸法、構造主要寸法および船型を表わすパラメータなどからなる近似式で表示しておき、本船についての応力特性極値をこの略算式から求める。

例えば、船体縦強度については、大型タンカーの場合に文献 2) でも示されているように、船の長さ別に行なったシリーズ計算により縦応力の特性極値の無次元係数

が求められており、これを用いれば、類似の設計船について船体縦曲げ応力を容易に推定することが可能であり、これを上記(1)の方法で述べた許容応力値と比較して強度の確認を行なうことができる。

一方、船体横強度部材のような不静定構造については、その構造様式を類型化した場合、多種多様にわたると考えられるので、それらをすべてモデル化してシリーズ計算をあらかじめ実施しておくことは、一般的には得策ではないと思われる。しかしながら、一例として、文献6)では、ストラットのない vertical-main 構造のタンカーのトランスリングについてシリーズ計算が行なわれており、桁部材に生ずる部材モーメント、軸力および剪断力の特性極値を与える無次元係数が求められているので、これらを用いて設計船の桁部材応力の特性極値を推定し、さらに上記許容応力値と比較する方法も考えられる。また、船体運動、水圧分布および慣性力などについての system analysis を行なって荷重の特性極値を求め、これを入力データとする比較的簡単な構造解析によって応力の統計値を求める方法⁷⁾なども一案であろう。ただし、ここで注意すべきことは、上記の部材モーメント、軸力、剪断力などは、たがいに位相差を有する相関量であるから、それらの個々の統計値から部材に生ずる応力の特性極値を求める方法を導く必要がある。

2.3 Conventional Method

船体構造強度の確認にあたって、波浪変動荷重の算定に対して従来から採用されている方法として等価波高の適用があげられる。これは、前述の“semi-direct method(2)”においても採り入れられるものであり、system analysis により算出された波浪変動水圧の特性極値の船体に沿っての分布と等価な波高を想定して、水圧荷重を近似的に算定する方法である。一方、応力解析についても、通常は、構造の簡単なモデル化による近似計算を行なって作用応力の特性極値を推定し、これを従来から慣習的に使用されている許容応力値と比較して強度判定を行なう。すなわち、“semi-direct method”と“conventional method”との相違は、前者がより精密なモデルについて比較的精度のよい構造解析を行なうことのほか、本質的な差異として、損傷確率にもとづく許容応力値を強度の判定基準としているか否かの点である。

3 船体構造強度の信頼性解析

前節で述べた船体構造強度に関する直接設計法における system analysis の分野については、文献2)および3)において報告されているように、船体縦強度および横強度に関するトータルシステム解析プログラムがすでに完成し、構造部材に発生する応力の特性極値を求めることが可能となった。ここでは、次の段階として、

Demand および Capability の概念にもとづく船体構造強度の信頼性解析を実施したので、その概要ならびに解析結果を報告する⁸⁾。ただし、本解析においては、構造の損傷モードとして、船殻主要構造部材の降伏、座屈、塑性崩壊および疲労によるものを取りあげた。

3.1 解析法一般

3.1.1 Demand

まず、Demand については、これを構成する確率変数 X_i として、船体に作用する水圧、あるいは構造部材に生ずる応力もしくはその断面力（モーメント、軸力、剪断力）などを考える。そうして、これらの応答 X_i の長期発生確率を、平均値 λ_{X_i} の指数分布と仮定し、その超過確率が 10^{-8} となる特性極値、 $X_{i,ext}(=\log_e 10^{-8} \times \lambda_{X_i})$ の値を前記トータルシステム解析プログラムにより算出する。

一般に、船体構造部材の降伏、座屈、崩壊などの損傷は、特定の船舶を対象とする場合、その就航年限内に発生する応答 X_i の最大値 $X_{i,max}$ に支配されるとして、応答の極値分布⁹⁾を、次式で与えられる平均値 $\bar{X}_{i,max}$ 、標準偏差 $S_{X_{i,max}}$ の正規分布で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_{i,max} &= X_{i,ext} + 0.5772 \lambda_{X_i} \\ S_{X_{i,max}} &= \frac{\pi}{\sqrt{6}} \lambda_{X_i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

つぎに、各種損傷モードのそれぞれについて、損傷の発生に直接関連するとみなして代表的に選択された構造応答（例えば、船底パネルの座屈損傷の場合は、パネルに生ずる応力） R を、上記応答 X_i （同例では、パネルに作用する水圧、軸力など）の関数

$$R = R(X_1, X_2, \dots) \quad (2)$$

であるとし、構造応答の最大値 R_{max} が $X_{i,max}(i=1, 2, \dots)$ で同時に発生すると仮定して、 R_{max} の確率分布を、次式で示す平均値および標準偏差の正規分布で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{max} &= R(\bar{X}_{i,max}) \\ S_{R_{max}} &= \left\{ \sum_i \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2 \cdot S_{X_{i,max}}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

このようにして定められた構造応答の最大値 R_{max} を Demand D として、その確率分布 $p_d(D)$ を決定する。

一方、疲労損傷に対しては、波浪応答の特性極値 X_{ext} を Demand に選び、これが各船ごとに異なるとして、 X_{ext} の確率分布を対数正規分布（平均値 $\bar{X}_{ext}$ 、変動係数 α ）と仮定して $p_d(D)$ を決定する¹⁰⁾。

なお、上述の降伏、座屈、崩壊などの損傷モードに対する Demand を決定する際にも、疲労損傷に対して行なわれたと同様に、波浪応答の特性極値が各船ごとに異なるとみなして信頼性解析を行なう場合には、そのパラメータを考慮に入れて Demand の標準偏差を計算する必

要がある。

3.1.2 Capability

船体構造部材の Capability C は、部材の寸法およびこれに関連する量（初期撓みなど）と、材料強度のパラメータ（降伏応力、疲労強度特性など）を確率変数 Y_i として、各種損傷モードごとに、それぞれ、これらの関数で与えられる。

$$C = C(Y_1, Y_2, \dots) \quad (4)$$

ここで、上記パラメータ Y_i は、それぞれ、正規分布するものと仮定し、その平均値および標準偏差の値は、文献 8), 11) から引用する。

さらに、Capability C の確率分布 $p_c(C)$ は、正規分布するものと仮定して決定される。

3.1.3 損傷確率

上記の方法で決定された Demand および Capability の確率分布を用いれば、船の就航年限に発生する損傷確率 P_f は、各種損傷モードについて、それぞれ、次式により算出される。

$$P_f = \int_{C_l}^{C_u} \int_c^{D_u} p_d(D) \cdot p_c(C) \cdot dD \cdot dC \quad (5)$$

ただし、 C_u, C_l および D_u は、それぞれ、Capability の上限、下限および Demand の上限の値を示す。

3.2 解析例

前項で述べた解析法に従って、下記の各種損傷モードに対する就航 20 年間に對する損傷確率の計算を行なった。解析対象船は、載貨重量 24 万トンのタンカー試験設計船（主要寸法 $304.0\text{M} \times 52.4\text{M} \times 25.7\text{M} \times 19.8\text{M}$ ）で、その中央横断面構造を Fig. 2 に、積荷状態を Fig. 3 に示す。また、海洋不規則波に関しては I. S. S. C.-1970 短

Fig. 2 Midship Section of 240,000 DWT Oil Tanker (Values in parenthesis indicate scantling for HT steel)

波項スペクトルを使用し、就航海域の波浪発生頻度統計資料としては、Walden の北大西洋における年間観測値を用いた。

3.2.1 降伏

(a) 甲板および船底の降伏

Fig. 4 に示すように、縦通隔壁または船側外板と横桁とで囲まれる縦通材つき甲板および船底パネルが、船体縦曲げによる面内圧縮応力 σ および水圧 q を受け、縦通材に局部降伏を生ずる場合について、甲板および船底パネルを周辺単純支持された直交異方性板とみなし、初期撓みを考慮して、有限変形理論による強度解析を行なった。

Table 1 は、満載状態およびバラスト状態について、甲板および船底が軟鋼の場合と高張力鋼を使用した場合とについて、船首から $0.4L$ における甲板および船底の降伏確率の値を示す。計算結果によれば、満載状態の場

Fig. 3 Loading Condition

Fig. 4 Structural Model of Deck and Bottom Plating

Table 1 Probability of Yielding at Deck and Bottom Plating (0.4L from F.P.)

Load Condition	Panel No.	Deck		Bottom		Notes
		①	②	③	④	
Full Load	MS	*	*	2.3×10^{-4}	*	②①
	HT	*	*	1.9×10^{-4}	*	③④
Ballast	MS	1.3×10^{-4}	1.1×10^{-4}	*	*	②①
	HT	1.8×10^{-4}	1.4×10^{-4}	*	*	③④

Notes: * mark means that the failure probability is below 10^{-6}

合の空倉ウイングタンクの船底は水圧の影響により、またバラスト状態における甲板パネルは縦曲げ圧縮により、降伏確率の値はやや大きい、他のパネルでは P_f の値は小さい。なお、静水中の船体縦曲げによる軸圧縮応力の値は、積荷条件により異なるので、これについて検討を行なった結果、静水中応力は、パネルの降伏確率の値にかなりの影響を与えることが判明した。

(b) トランスリングの面材の降伏

横強度部材についての信頼性解析の一つとして、貨物油倉トランスリングの立桁、横桁およびストラットなどの面材の降伏確率を計算した。すなわち、就航中に生ずる面材の応力の最大値を Demand とし、その特性極値を船体横強度トータルシステムプログラムにより算出し、一方、鋼材の降伏応力、面材の幅および板厚をそれぞれ確率変数として Capability を定めた。

計算結果の一例として、Fig. 5 は、満載状態の場合、船首から 0.4L 横断面のトランスリング桁部材の面材の降伏確率の値を示したものである。ただし、ここに示す値は、桁の湾曲部における面材の有効幅の低下により¹²⁾、

Fig. 5 Probability of Yielding at Face Plate of Transverse Members

面材の幅の中央部で応力が上昇することも考慮に入れた場合についての計算結果である。同図から明らかなように、横桁端部およびストラット基部などの湾曲部における面材の降伏確率は、局部的ではあるが、かなり高い値となっている。

3.2.2 座屈による局部崩壊

(a) 船底縦通材の横倒れ崩壊

船体縦強度部材の局部的崩壊損傷モードの一例として、船底縦通材が船体縦曲げによる軸圧縮応力および船底水圧をうけて曲げ振れ変形を生じ、横倒れ崩壊する場合をとりあげた。

この場合、船底縦通材の最終強度は、文献13)の方法により求められ、船の就航期間に生ずる軸圧縮応力および船底水圧の最大値から Demand を決定する。なお、今回の計算では、縦通材はスパン s の両端（船底横桁の位置）で固定されていると仮定し、座屈相当長を $0.2s$ とした。

Table 2 は、船首から 0.4L の位置における船底縦通材のスパンの両端部に生ずる横倒れ崩壊損傷確率の値を、軟鋼および高張力鋼のそれぞれの場合について計算した結果を示したものである。同表によれば、満載状態の場合、ウイングタンクの船底縦通材の損傷確率が、3.2.1(a)の船底パネルの降伏確率に比べてやや高いことが認められる。なお、文献8)において、ロンジの横倒れによる初期降伏確率の値が4隻のタンカー例について計算されているが、ほぼ同程度の値が得られている。

(b) トランスリングの局部崩壊

トランスリングの局部崩壊についての解析を行なう場合には、まずその座屈強度（固有値およびモード）を把握して、崩壊強度の解析を行なうべき構造部材を摘出するのが効率よい方法であろう。Fig.6 はタンカーのトランスリングについて座屈解析を行なった資料14)から引用したもので、図の実線および破線は弾性座屈モードの凹凸を示すものである。同図に示される座屈発生箇所は、トランスリングの中で比較的座屈限界値の低い部分であるが、それらの中から一例として、ウイングタンクの船底三叉部を選び、その部分の局部崩壊について考察を行なうこととする。

すなわち、同図の円内に示される部分について、有限要素法による最終強度解析を行なって、局部崩壊強度を求めた。つぎに、この値を Capability の平均値とし、

Table 2 Probability of Instability Failure of Bottom Longitudinals(0.4L from F.P.)

Load Condition	Bm. Longl. Location	High Tensile Steel 840×200×17.5/30	Mild Steel 840×200×20/39
Full Load	Wing Tank	7.0×10^{-3}	1.3×10^{-3}
Ballast	Center Tank	3.1×10^{-4}	6.4×10^{-4}

Fig. 6 Calculated Buckling Mode and Ultimate Collapse of Transverse Web

降伏応力および板厚を前述の確率変数として、初期たわみに関しては文献 15) で与えられた平均値 $w_0/t=0.059$, 標準偏差 $Sw_0/t=0.047$ を仮定して損傷確率を求めると 1.5×10^{-16} となった。しかし、この場合の初期たわみの平均値および標準偏差は、比較的厚板に対するものであり、桁のウェブのように板厚が薄い場合には、それぞれの値が大きくなることが考えられ、仮に、それぞれの値を3倍とすると、 5×10^{-8} と大きくなる。さらに、桁の最終崩壊確率は、初期たわみの影響を強く受けることがこの計算例から推察されよう。

3.2.3 全体崩壊損傷

(a) ハルガーダーの塑性崩壊

船体縦強度上の最終的な損傷モードとして、船体縦曲

げによるハルガーダーの塑性崩壊 (Jackknifing) をとりあげる。

すなわち、縦曲げモーメント、軸力および剪断力が作用して、船体横断面が全塑性状態で崩壊する損傷確率を計算する。この場合、波浪による曲げモーメントと軸力、剪断力との間には相関があり、またそれぞれの位相差によりピークに同時性がないことも考慮に入れて解析を行なった。また、甲板あるいは船底は、水圧および軸圧縮力による座屈変形が先行すると考え、最終耐荷状態における応力分布を有限要素法解析により求めて、圧縮部材の有効断面積を算定した。計算結果によれば、ハルガーダーの塑性崩壊確率は、船首から $0.4L$ の断面において、満載状態で、軟鋼の場合は 2×10^{-13} 、高張力鋼

の場合は 2×10^{-16} , バラスト状態の場合は, それぞれ, 3×10^{-10} , 4×10^{-11} であった。

(b) トランスリングの塑性崩壊

横強度に対する終局的な損傷モードの一例として, 貨物油倉トランスリングの塑性崩壊について考察を試みる。

すなわち, Table 3 に示すように, トランスリングの船底横桁あるいは船側立桁が塑性崩壊する場合について損傷確率の計算を行なう。この際, 損傷桁部材は, 3.2.2 (b) で述べたようにその端部のコーナー部のウェブが, すでに剪断座屈をおこし, ヒンジを形成しているとみなして, これを両端支持の条件で仮定した。ただし, 桁のスパンの中央部については, ウェブの局部座屈あるいは面材ごとの横倒れ座屈などの影響を考慮せず, 単純塑性解析を行なっているため, 部材の Capability をかなり大きく目に推定している。

同表に示される計算結果によれば, 船側あるいは船底における単一桁部材としての塑性崩壊確率はかなり小さいが, 崩壊モード C のように, ストラットがすでに座屈して有効に働かなくなった場合には⁹⁾, 船側立桁の塑性崩壊確率は極めて大きくなる。

3.2.4 疲労損傷

船舶の就航期間中にうける波浪変動応力により, 縦強度部材および横部材の突き合わせ溶接継手部に生ずる疲労亀裂の発生確率に関する解析法については, 文献 10) に述べられている。

すなわち, 波浪変動応力 (長期発生確率を指数分布と仮定) の特性極値 $\sigma_{a,ext}$ を平均値 $\bar{\sigma}_{a,ext}$, 変動係数 $\alpha = 0.1$ の対数正規分布とみなし, 一方, 溶接継手の疲労強度については, 突き合わせ溶接継手試験片による片振引張繰返し実験の結果¹⁶⁾を用いて, 疲労損傷発生条件を Miner の重畳則により算定する。この場合, 疲労強度に

及ぼす平均応力の影響に対して Goodman 修正を行ない, また, 溶接による目違いの影響および亀裂発生回数と試験片破断回数との相違などに対する修正を行なった。

ただし, σ_a-N 線図の直線近似式における係数 A および B の値に対するデータのバラツキ, Miner 重畳則における累積被害度係数 (usage factor) D_f の値に対する subjective uncertainty ならびに, 満載状態およびバラスト状態において構造部材に生ずる静水中応力 σ_m のバラツキなどを考慮に入れて, これらをすべて確率変数とみなして信頼性解析を行なった。さらに, 上記諸因子の平均値および標準偏差値の選び方が損傷確率にどの程度の影響を与えるかについての sensitivity analysis も行なった結果, 波浪応力が大きく損傷確率の値が高い場合はほとんどその影響がなく, 波浪応力の比較的低い場合でも, 損傷確率の差が一桁程度以内であることが確認された。

そこで, 解析対象船について, その縦強度部材の突き合わせ溶接継手における疲労亀裂発生確率の値を, Table 4 に示す。同表には, 甲板および船底の縦強度部材を, 軟鋼とした場合, および高張力鋼とした場合について, それぞれ疲労損傷確率の値が記載されている。ここで注意すべきことは, 高張力鋼の場合, 船体断面係数の減少により作用応力は上昇するが, 一方, 溶接継手の疲労強度は軟鋼のそれと比べて余り大差ないことが報告されているので¹⁷⁾, ここでは簡単のため軟鋼の場合と同一の疲労強度を仮定して計算を行なった。

一方, トランスリングの桁の面材の突き合わせ溶接継手について, 疲労亀裂の発生確率を求めると, Table 5 のような結果が得られる。ここで, 表中の () 内に示した値は, 3.2.1 (b) で述べたように, 桁の端部湾曲部に

Table 3 Collapse Mode and Failure Probability of Transverse Members (by Limit Analysis)

Collapse Mode		Failure Probability	
		Full Load	Ballast
A		*	*
B		*	3.8×10^{-6}
C		9.5×10^{-1}	1.0

Notes : * mark means that the failure probability is below 10^{-6}

Table 4 Fatigue Failure Probability at Butt Welded Joint of Longitudinal Members

Location	Load Condition	Deck		Bottom		Notes
		①	②	③	④	
Full Load	MS	3×10^{-2}	6×10^{-2}	2×10^{-2}	1×10^{-2}
	HT	1×10^{-3}	2×10^{-3}	8×10^{-4}	8×10^{-4}	
Ballast	MS	3×10^{-2}	3×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}
	HT	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}	7×10^{-4}	

Table 5 Fatigue Failure Probability of Face Plate of Transverse Members

Load Condition	Distance from F.P.	Location of the Face Plate							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Full Load	Deck	4×10^{-3} (8×10^{-3})	3×10^{-4} (3×10^{-4})	*	*	*	1×10^{-4} (1×10^{-4})	5×10^{-5} (1×10^{-5})	3×10^{-5}
	Bottom	8×10^{-3} (2×10^{-2})	1×10^{-2} (1×10^{-2})	*	*	*	3×10^{-4}	4×10^{-5}	2×10^{-5}
Ballast	Deck	2×10^{-2} (5×10^{-3})	4×10^{-3} (8×10^{-3})	2×10^{-2} (4×10^{-2})	5×10^{-3} (2×10^{-2})	1×10^{-4} (3×10^{-3})	1×10^{-4}	*	5×10^{-5}

Notes : * mark means that the failure probability is below 10^{-6}

Values in () indicate the fatigue failure probability when considering the effect of stress concentration at micro-radius of the face plate in round corners.

おける面材の有効幅の低下による応力の上昇部における損傷確率を表わす。

4 Design Criterion への適用

従来の手法により設計された試設計船について、その縦強度部材および横強度部材の各種損傷モードに対する損傷確率を総合的に求めた結果、縦強度部材については、疲労亀裂発生確率が比較的高く、また延性破損としては、船底縦通材の局部崩壊確率がやや大きく、ついで甲板あるいは船底パネル中央の降伏確率の順となり、ハルガーダーとしての全体的な塑性崩壊の確率は極めて小さいことが判明した。一方、横強度部材については、トランスリング桁部材の面材の局部降伏や、面材の突き合わせ溶接継手部の亀裂発生確率が比較的高く、また、たとえば船底横桁三叉部のように、局部的ではあるが、塑性崩壊し永久変形を生ずる確率もやや大きいことが注目される。さらに、トランスリング全体としての塑性崩壊確率はかなり小さいが、ストラット基部のウェブの局部座屈強度が低く、ストラットの曲げ捩れ座屈を生じてその有効性を失なった場合には、船側立桁の崩壊確率は極めて大きくなる点に注意する必要がある。

以上のように、一例による計算結果から得られた結論ではあるが、船体主要部材についての損傷確率を基盤にした強度設計においては、疲労亀裂の発生確率をある限度以下に押えて部材寸法を決定する疲労設計の重要性が再確認された。したがって、従来から慣習的に考えられているような、部材の降伏のみに注目する許容応力設計では不十分と考えられる。

そこで、“direct method”および“semi-direct method”における判定基準として、次のような、損傷確率にもとづく許容応力の定め方を提案する。

まず、軟鋼部材およびその突き合わせ溶接継手について、降伏確率と疲労亀裂の発生確率とがそれぞれ一定の値を示す応力の限界線を、信頼性解析の結果から求めて、Fig. 7 のハッチつき太線のように定めておき、部材に発生する静水中応力 σ_m および波浪変動応力の特性極値 $\sigma_{a,ext}$ がこの限界線の内側にあれば、部材寸法は許容されるものとする。すなわち、許容応力の値を、ただ一義的に決めるのではなく、静水中応力と波浪変動応力との両者の組合わせて決定すべきものと考えられる。すなわち、縦強度部材のように、一般に、静水中応力に比べて波浪変動応力の大きい部材と、横強度部材の場合のように、静水中応力が比較的大きい部材とでは、許容応力の値を区別して考えるのが妥当であろう。

5 結 語

本論文においては、合理的な船体構造設計法として、

Fig. 7 Design Criteria Based on Probability of Failure (Butt Welded Joint of Structural Members)

“direct method”および、さらにこれを簡易化した“semi-direct method”を提唱し、これらについての基礎的な検討を試みた。

“direct method”においては、近年開発されたトータルシステムプログラムを用いた system analysis を行なって構造応答の統計値を求め、さらに信頼性解析に基づいて種々の損傷モードに対する損傷確率を求め、これを強度判定の基準に使用するものとする。

この方法により、構造部材の降伏確率および疲労亀裂発生確率（突合せ溶接継手部）の値が一定となる条件から、静水中応力と波浪変動応力の許容限界を求めた。このようにして定められた許容応力は、上記“semi-direct method”における強度の判定基準としても使用できるものである。

また、今後はさらに、各損傷モードごとに対応する許容応力の設定を考慮する必要があると考えられる。

つぎに、船体構造強度の信頼性解析の一例として、従来の手法で設計された24万トンタンカーについて、その縦強度部材および横強度部材の降伏、座屈（局部崩壊）、全体崩壊ならびに疲労亀裂発生各損傷モードに対する損傷確率の値を求めた。この結果、縦強度部材（とくに高張力鋼の場合）およびトランスリングの桁部材湾曲部の面材における突合せ溶接継手部においては、疲労亀裂発生確率がやや高く、疲労強度設計の重要性が確認され

た。また、船底縦通材の端部横倒れ崩壊や、船底横桁三叉部など、局部的ではあるが、塑性崩壊の確率が比較的大きい点なども認められた。

なお、信頼性解析におけるDemandおよびCapabilityの確率分布形の問題、応答の極値分布を推定するうえでの波浪観測期間の問題、ならびに積荷頻度および荒天時操船などについての今後の調査が必要であり、損傷確率の絶対値については、さらに十二分の検討が必要であらう。

また、損傷強度解析に今回採り入っていない因子、たとえば、波浪衝撃荷重、whipping, springing, 熱応力、低温における急速亀裂破壊、不完全工作などの影響については、今後の研究と調査に待つところが大い。

終わりに、本研究の一部は、日本造船研究協会第134研究部会の研究として実施されたものであり、種々有益な御討論を賜った同研究部会の委員の方々に厚く感謝の意を表す。また、本研究の実施にあたり、種々の計算に協力していただいた日本海事協会の関係各位に、深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Report of Committee 10, Design Procedure, Proceedings of the Forth International Ship Structures Congress (1970). Report of Committee 10, Design Procedure, Committee Reports Fifth International Ship Structures Congress (1973). Report of Committee V-1, Design Procedure, Committee Reports Sixth International Ship Structures Congress (1976), (to be published).
- 2) 秋田好雄, 栢田吉郎, 山口勇男, 田代新吉, 新田顕, 日高正孝, 筒井康治, 湯浅通史, 日笠則明, 津村道夫: 船体縦強度解析に関するトータルシステム, 日本造船学会論文集, 第135号 (昭和49年6月).
- 3) 秋田好雄, 山口勇男, 田代新吉, 新田顕, 日高正孝, 筒井康治, 湯浅通史, 日笠則明: 船体横強度のトータルシステムについて, 日本造船学会論文集, 第139号 (昭和51年6月).
- 4) A. E. Mansour & D. Faulkner: On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Strength, The Royal Institution of Naval Architects, November 21 (1972).
- 5) R. A. Goodman & G. A. Mowatt: Application of Strength Research to Structural Design, Advance Copy to be read International Conference on Steel Plated Structures, July 6-9 (1976).
- 6) F. Merega & M. Simonelli: A Systematic Application of the Procedure for Calculation of Dynamic Stresses on Transverse Frames of Tankers, Technical Bulletin Registro Italiano Navale No. 50.
- 7) 岸康太郎, 吉識恒夫, 金綱正夫, 田中修, 柴原三朗, 茅沼秀高: 波浪中 (規則波) におけるタンカーの横強度について, 日本造船学会論文集, 第137号 (昭和50年6月).
- 8) 船体構造部材の許容応力に関する研究, 日本造船研究協会第134研究部会報告書, 研究資料 No. 237 (昭和51年3月).
- 9) E. J. Gumbel: Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York (1951).
- 10) A. Nitta: Reliability Analysis on the Fatigue Strength of Ship Structures, 日本海事協会誌, 第155号 (昭和51年4月) (IIW DOC. No. XIII-797-76).
- 11) 真能創: 最大荷重に対する縦強度材の信頼性解析, 日本造船研究協会第134研究部会, 信頼性小委資料 R106 (昭和50年4月).
- 12) 新田顕, 湯浅通史: 湾曲部における桁の面材の有効幅, 日本造船学会誌, No. 553 (昭和50年7月).
- 13) A. Nitta: Ultimate Strength of Girder Structures (3rd Report), Selected Papers from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 10 (1972).
- 14) 塑性設計資料集 (その6) 板構造物の座屈と最終強度, 日本溶接協会塑性設計委員会板構造小委員会 (昭和51年11月).
- 15) 船殻部材歪量の船体強度に及ぼす影響に関する研究, 日本造船研究協会第127部会報告書, 研究資料, No. 212 (昭和50年3月).
- 16) 白石隆義: 溶接技術者のための疲労の知識 (その3), 溶接技術 9月号 (1969).
- 17) 山口勇男, 寺田泰治, 新田顕: 船体用鋼板の疲労強度について, 造船協会論文集, 第115号 (昭和39年6月).