

バルクキャリアロアスツール部における目違いの解析

正員 谷川 雅之 正員 摩嶋 禎規
正員 堀 徹

Stress Analysis of a Bulk Carrier Lower Stool Considering Misalignment

by Masayuki Tanigawa, *Member* Yoshinori Majima, *Member*
Tohru Hori, *Member*

Summary

Misalignment of structural members causes additional bending moment. The effect of misalignment on behavior and strength has been clarified for the simple structures such as cruciform joint with fillet weld. For the complicated structures of ships, however, very few studies are conducted.

In this paper stress analyses are performed for the joint between bulkhead lower stool and inner bottom of a bulk carrier and the effect of misalignment on behavior is investigated.

1. 緒 言

船体構造の部材取合部に工作上の不整による目違いが存在した場合、曲げ応力が発生するため降伏強度や疲労強度の低下が問題となる。十字継手の目違いについては藤田ら¹⁾、Bergeら²⁾の研究が、突合せ継手の目違いについては、Maddox³⁾らの研究がある。これらの研究では、目違いによる応力上昇と強度低下が対応することが明らかにされ、応力上昇を評価する方法が提案されているが、2次元の単純な継手構造を対象としており、船体の部材取合部のように複雑な3次元構造について検討された例は少ない。

「鋼船工作法精度標準 (JSQS)」⁴⁾では藤田らの研究をもとに許容目違い量を定めているが単純化のため一律の値を設定している。しかし目違いによる応力の上昇度は周辺の構造配置、部材剛性、荷重条件等により変化するものであり、構造解析技術が進歩した今日では各種因子の影響度を評価し工作標準に反映させることも可能となってきた。また信頼性を評価する場合には目違いが確率変数として取り扱われるため目違いが強度に及ぼす影響の定量化が必要となる。

ここでは目違いの起こりうる部材取合部の代表例として

バルクキャリアの隔壁下部スツール (ロアスツール) と2重底板との取合い部をとりあげ、目違いが応力上昇に及ぼす影響について検討を行った。

2. ロアスツール下部における目違いと応力上昇

ロアスツールと2重底板との取合部について目違いを考慮した3次元シェルモデルによる応力解析を実施し応力分布に対する目違いの影響を明らかにした。また3次元ソリッドモデルによる解析結果との比較を行い解析モデルの妥当性を検討した。

2.1 バラストホールド隔壁下部の応力解析

解析の対象として150,000トン級バルクキャリアのバラストホールド隔壁下部をとりあげた。はじめに粗い要素分割で比較的広い範囲を考えたモデル (ホールドモデル) で解析した後、取合部周辺をズームしたモデル (ロアスツールモデル) で目違いを考慮した解析を行った。

ホールドモデルのモデル化範囲は隔壁を挟んで前後方向に各1/2ホールド、幅方向に1/2ガーダ間隔として境界条件は対称条件とした。Fig.1にホールドモデルの形状と要素分割図を示す。パネル部には3節点および4節点薄板シェル要素を用い、ロンジは梁要素でモデル化した。解析にはMSC/NASTRANを使用した。荷重は疲労が問題となるバラスト水の変動圧を考慮0.32Gの下向き加速度を与えた。

Fig.2に取合部における斜板とフロアの板厚中心位置に

日立造船(株)技術研究所 材料・強度研究室

原稿受理 平成5年1月11日

春季講演会において講演 平成5年5月19, 20日

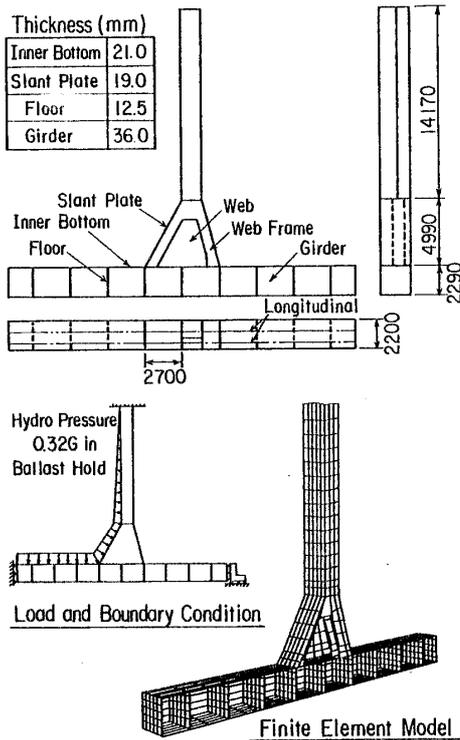


Fig. 1 Hold model of a Bulk Carrier

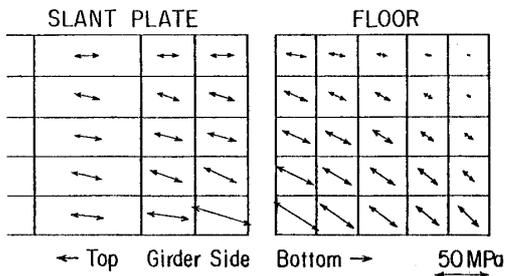


Fig. 2 Maximum Principal Stress in Slant Plate and Floor

おける最大主応力ベクトル図を示す。斜板からフロアに引張応力の流れがみられることから斜板とフロアに目違いがある場合、曲げ応力の発生が予想される。

2.2 目違いを考慮した応力解析

ロアスツールモデルにはホールドモデルの解析で得られた変位とバラスト水圧を与えて解析を行った。目違いはロアスツールモデルでフロアを前後方向に移動することにより考慮した。Fig. 3 に目違いの定義を示す。斜板とフロアの板厚中心線が一致する場合を目違い $\delta=0$ とし、フロアが前方（バラストホールドと反対方向）にずれる場合を正の目違いとした。ここではフロア板厚を t として $\delta=0$, $\pm t/2$, $\pm t$ の5ケース解析した。なお、本モデルでは斜板が傾斜しているため、 $\delta=0$ では斜板と内底板上面の交線（モールドライン）がフロア後面にほぼ一致する。

Fig. 4 に目違い 0 の場合の変形図を示す。水圧による斜板および内底板の局所変形と2重底の全体変形が重畳して

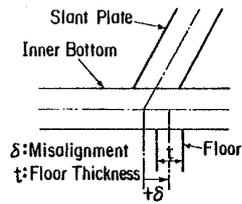


Fig. 3 Definition of Misalignment

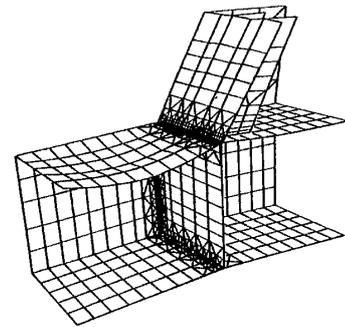
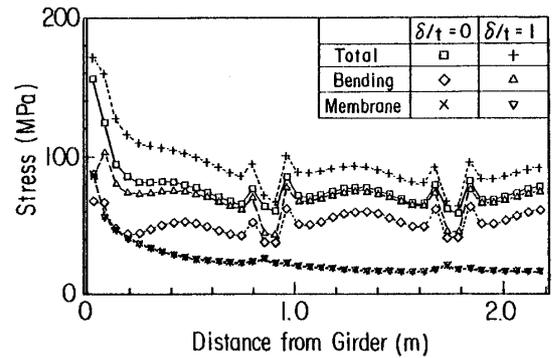
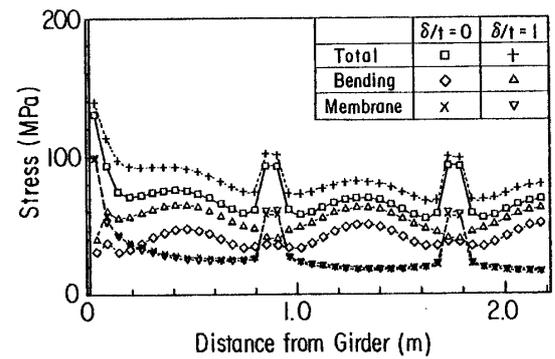


Fig. 4 Deformed Shape of Lower Stool Model



(a) Inner Bottom



(b) Slant Plate

Fig. 5 Effect of Misalignment on Stress Distribution

いる様子がわかる。

次に目違いが応力分布に及ぼす影響をみる。Fig. 5 に内底板および斜板上面における目違いの有無による応力分布の比較を示した。比較した位置は溶接止端部に相当する位置で、内底板では斜板との板厚中心線における交線からバラストホールド側に 9.375 mm, 斜板では交線から鉛直上

方に 15.625 mm の位置である。応力の方向は溶接線に直角方向とし表面値、曲げ成分、膜成分について示した。板上面の曲げ応力増分が正となるよう内底板の目違いは $\delta/t=1$ 、斜板の目違いは $\delta/t=-1$ とした。目違いにより曲げ応力が增大するが膜応力の変化は小さいこと、曲げ応力の増大はガーダ、ロンジの付近で小さくなる傾向を示すことがわかる。

また目違いにより応力が変化の様子をみる。Fig. 6 に内底板および斜板上面の表面位置における応力と目違いの関係を示す。着目した位置はガーダ部（ガーダから 27.5 mm）、ロンジ部（ロンジから 27.5 mm）およびガーダ・ロンジ中央の 3箇所で、溶接止端部に相当する位置である。応力の変化は目違いに比例的でありガーダ・ロンジ中央で変化が大きい。ガーダ部がロンジ部より変化が大きいのは斜板に作用する膜応力が大きいためである。また目違いが負の場合ガーダ・ロンジ中央部で応力の変化する傾向が変わるのは、着目部が目違いを生じた斜板とフロアに挟まれる位置に入ったためである。

2.3 ソリッドモデルとの比較

薄板シェル要素は板厚を剛性として考慮し幾何形状はモデル化していないが、目違いが問題となる箇所は部材取合部であり幾何形状の影響を受けると考えられる。ここでは応力が最大となり多くの部材が交叉するガーダ付近をさらにズームした 3次元ソリッドモデルによる応力解析を行い、薄板シェル要素を用いたロアスツールモデルの結果と比較した。モデル化範囲はガーダ板厚中心から幅方向に 220 mm の範囲を考え、ロアスツールモデルの解析で得ら

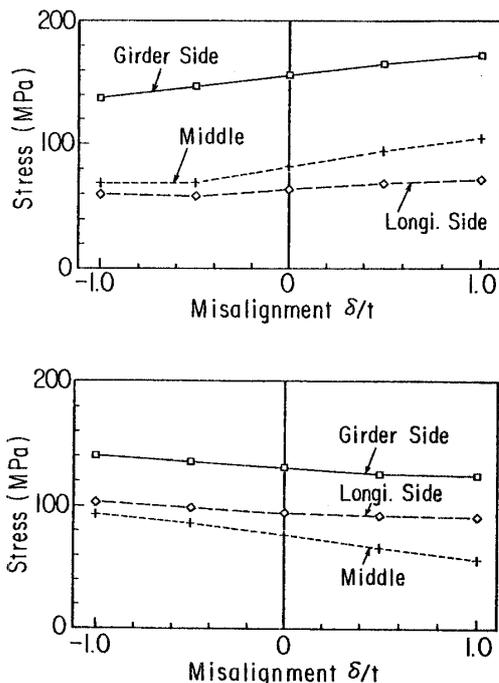


Fig. 6 Stress Change with Misalignment

れた変位とバラスト水圧を与えた。またソリッドモデルの板厚方向要素分割は 4 層とし、ロアスツールモデルの角変位は板厚内の節点位置における並進変位に変換して与えた。なお、溶接ビード形状はモデル化していない。目違いは $\delta/t=0, 1$ の 2 ケースを考えた。Fig. 7 に $\delta/t=1$ の場合の変形図を要素分割図とともに示す。

ロアスツールモデルとの比較を目違い $\delta/t=0, 1$ の場合について Fig. 8(a), (b) に示す。図では内底板の上面で取合部に沿った斜板溶接止端部に相当する位置における応力分布を示しており、膜、曲げ、膜+曲げ成分を比較している。また、Fig. 8(c) には目違いによる曲げ応力上昇の分布の比較を示す。ソリッドモデルの膜応力成分、曲げ応力成分は断面の軸力、曲げモーメントが等しくなるような板厚方向に線形な応力分布より算出した。ガーダの近傍を除くと応力分布および目違いによる応力変化は両者ともよく一致していることがわかる。ガーダ近傍におけるソリッドモデルの曲げ応力の上昇をみるとガーダ上ではほぼ 0 になり、目違いによる回転変形はほぼ拘束されていることがわかる。ロアスツールモデルの場合、目違いによる回転変形が拘束されるのはガーダ板厚中心付近になると予想され、幾何形状モデル化の有無の影響が現われていると考えられる。

3. 目違いによる応力上昇の評価方法

ロアスツールと 2 重底板との取合部を 2 次元十字継手モデルに置き換え、応力上昇に対する溶接ビードなどの影響を明らかにした。また船体構造の目違いに対して応力上昇を簡易に評価できるモデルを検討した。

3.1 十字継手のモデル化

十字梁とロアスツールモデルで部材の長さ方向の応力分布を比較し、検討に用いる十字継手モデルの長さを決めた。なお、板厚はロアスツールモデルと同じとし端部は固定とした。

十字梁の応力分布を Fig. 9 に示す。目違いは交点の曲げモーメントで表わす。梁は伸びないと仮定すれば各梁の曲

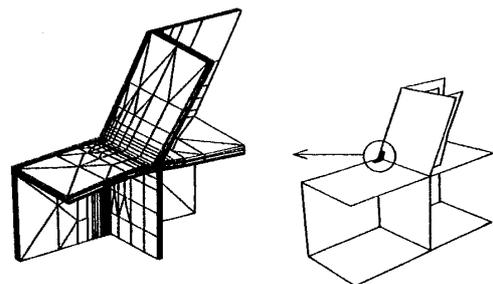
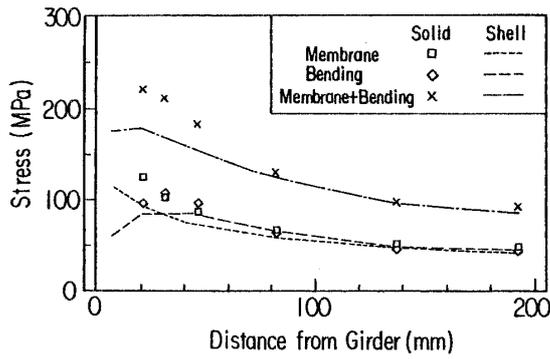
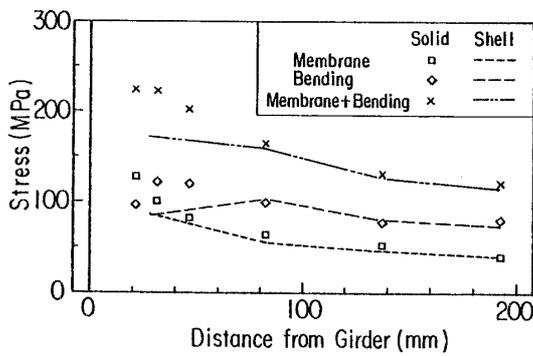


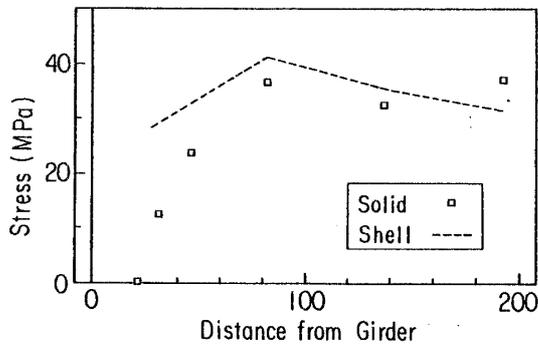
Fig. 7 Deformed Shape of Solid Model ($\delta/t=1.0$)



(a) Misalignment $\delta/t = 0$



(b) Misalignment $\delta/t = 1.0$



(c) Bending Stress Increment

Fig. 8 Comparison of Stress Distribution on the Inner Bottom Plate between Solid Model and Shell Model

げ応力分布は長さ方向に線形となり交点から長さの2/3の位置で0となる。

一方ロアスツールモデルにおける内底板、斜板、フロアの目違い $\delta/t=1$ による曲げ応力増分の分布を Fig. 10 に示す。図の横軸は取合部からの距離で、場所は目違いの影響が大きいガーダとロンジの中間部である。取合部付近の応力勾配を延長して応力が0になる点を求め各梁の長さを選んだ。

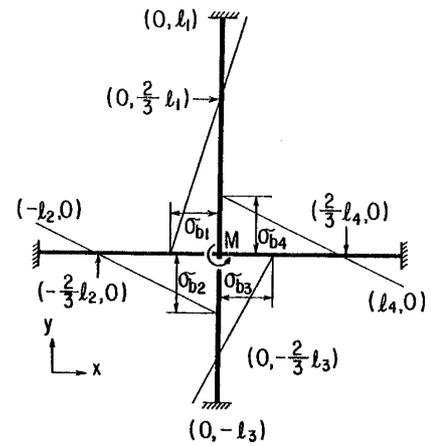


Fig. 9 Stress Distribution of Cruciform Beam

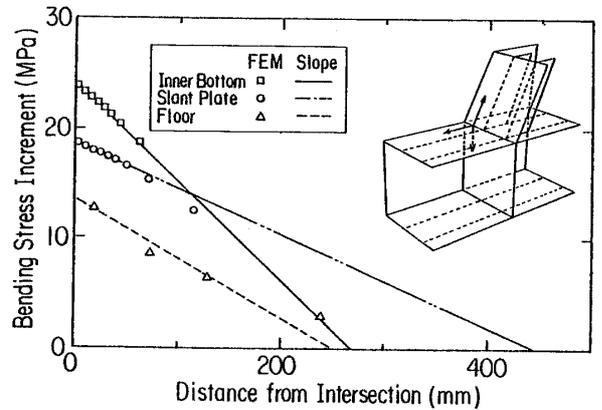


Fig. 10 Distribution of Bending Stress Increment with Misalignment in Lower Stool Model

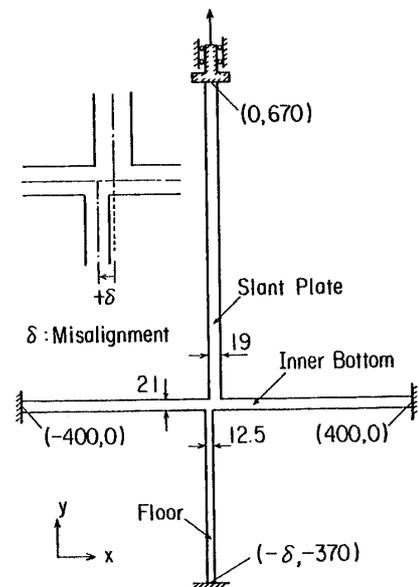


Fig. 11 Cruciform Joint Model

上記の方法で定めた十字継手モデルの形状および寸法を Fig. 11 に示す。十字継手モデルの各部材をロアスツールモ

デルに対応させて内底板, 斜板, フロアと呼ぶ。斜板上端にはフロアの応力が 100 MPa となるような引張荷重を与えた。モデルの内底板, 斜板, フロアの長さはそれぞれ 400 mm, 670 mm, 370 mm で, ロアスツールモデルにおけるそれぞれの長さ 2700 mm, 5670 mm, 2290 mm の 1/6~1/8 となった。斜板で比率が小さくなったのはウェブフレームの拘束がロンジに比べて強かったためと考えられる。

また確認のため取合部における各部材への応力配分を比較した。Fig. 12 にロアスツールモデルの内底板と斜板における目違いによる曲げ応力上昇度の分布を示す。ここで曲げ応力上昇度は曲げ応力上昇量と膜応力の比として定義し, 膜応力にはフロアの値を用いた。ガーダ・ロンジ間で内底板, 斜板の曲げ応力上昇度はそれぞれ 0.65, 0.5 であることがわかる。一方, 十字梁では 0.8, 0.4 となり多少差はあるがモデルとしては概ね妥当と考えられる。

3.2 溶接ビードの影響

溶接止端部の応力に対する目違いの影響を詳細に調べるため Fig. 13 に示す溶接ビード形状について目違いを考慮した応力解析を行った。

モデル PA は「鋼船規則集」⁵⁾ の F1 に相当する溶接ビード形状で斜板側の脚長は約 9 mm, フロア側の脚長は 7.5 mm とした。モデル PB は斜板, フロア側についてそれぞれの板厚分だけ末溶着部を考慮したモデルである。モデル PC は目違いを埋める方向に脚長を約 10% 増加させたモデルである。JSQS では重要部材に対し $t/2$ の目違いにおける 10% の脚長増加は $t/3$ の目違いに相当すると規定している。またモデル PN は溶接ビードを全く考慮しない場合のモデルである。

はじめに目違いによる曲げ応力に対する溶接ビードの影響をみる。Fig. 14 に斜板溶接止端位置の断面における曲げ応力と目違いの関係を示す。モデル PA, PB, PN の結果は梁理論による解とほぼ一致することから対称な溶接ビードは溶込量に拘らず目違いによる曲げ応力に対する影響の小さいことがわかる。また, モデル PC の結果をみると非対称な脚長増加によって目違いによる曲げ応力は減少するが

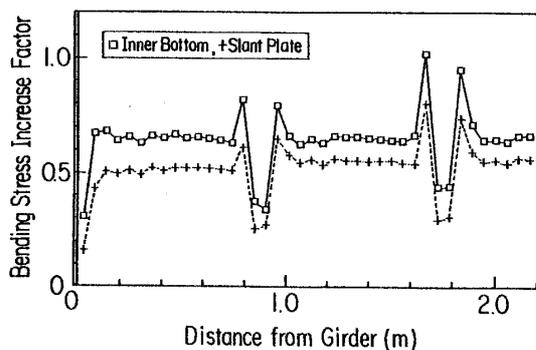


Fig. 12 Distribution of Bending Stress Increase Factor in Lower Stool Model

減少量は 15% 程度であり応力の面では JSQS に規定されているほどの効果 (33% 減少) はないことがわかる。

次に溶接止端部の局部応力に対する溶接ビードの影響をみる。着目した位置は斜板側の溶接止端部で表面に近い 3 要素の中心の応力を用いて 2 次曲線で表面外挿した。Fig. 15 に局部応力と目違いの関係を示す。また, Fig. 16 に斜板溶接止端位置の断面におけるモデル PA, PB の応力分布に対する目違いの影響を示す。溶込量が小さい場合止端部への応力集中は大きくなるが, モデル PA, PB とも局部応力はほぼ同じ勾配で増加していることから目違いによる局部応力の上昇に対する溶込量の影響は小さいことがわかる。またルート部の応力も目違いの影響を受けにくいことがわかる。脚長増加の効果は曲げ応力に対する場合と同様である。

最後に目違いの正負が局部応力に及ぼす影響を調べる。目違い $\delta/t=1$ のときの内底板上面の応力分布を Fig. 17 に示す。曲げ応力の増大量に対する目違いの正負の影響は小さいが, 溶接止端部の局部応力の増大は目違い時にフロアが裏面にくる側では鈍化することがわかる。

3.3 応力上昇評価法

目違いによる曲げ応力上昇度については回転変形が自由に起こる 2 次元十字継手に対し Berge ら²⁾ により評価式が与えられている。ここでは Berger らの式をもとに 3 次

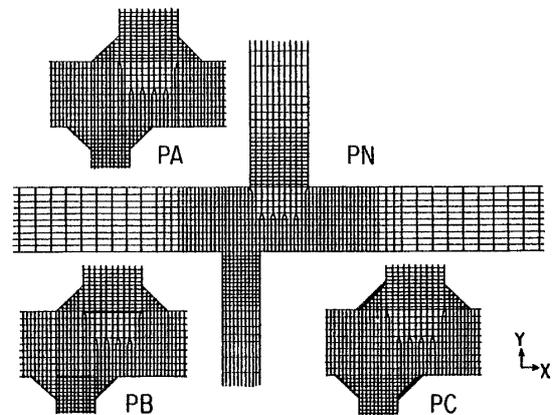


Fig. 13 Mesh Division of Cruciform Joint Model

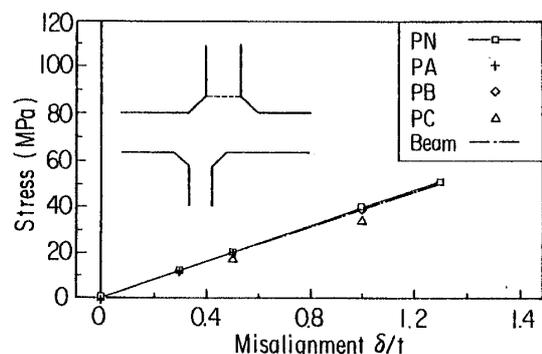


Fig. 14 Effect of Weld Bead on Bending Stress with Misalignment

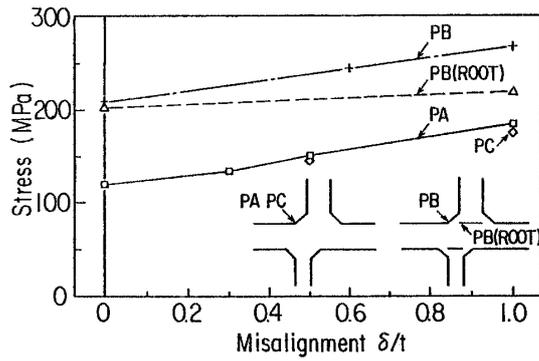


Fig. 15 Effect of Weld Bead on Local Stress with Misalignment

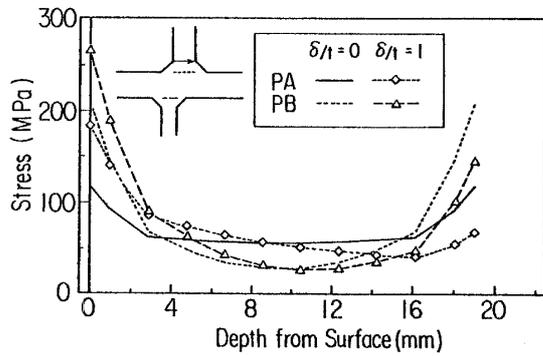


Fig. 16 Effect of Misalignment on Stress Distribution through Thickness

元の船体構造に対して一般化する場合の考え方を示す。

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 + \Delta\sigma_0 \\ &= \sigma_0 + \alpha\sigma_m \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 σ_0 ：目違い 0 における応力

σ_m ：目違いが生じる部材に作用する膜応力

α ：目違いによる応力上昇度

応力上昇度 α は、目違いの大きさ、十字継手を構成する各部材の板厚および長さで決まる係数 a_0 、溶接脚長の増加で決まる係数 a_w 、拘束部材の配置で決まる係数 a_c の積として与えられる。

$$\alpha = a_0 \cdot a_w \cdot a_c \quad (2)$$

ここで、 a_0 ：十字継手の応力上昇度

a_w ：脚長増加効果係数 (≤ 1.0)

a_c ：拘束部材効果係数 (≤ 1.0)

係数 a_0 は Fig. 18 に示す十字梁について次式で表わされる。

$$a_0 = 2\lambda\delta t_m (t_i/l_i) / \sum_{j=1,4} (t_j^3/l_j) \quad (3)$$

ここで、 δ ：目違い

λ ：端部境界条件に関する係数
(全て固定端の場合 3.0)

l_i ：評価する部材の長さ

t_i ：評価する部材の板厚

t_m ： σ_m が生じている部材の板厚

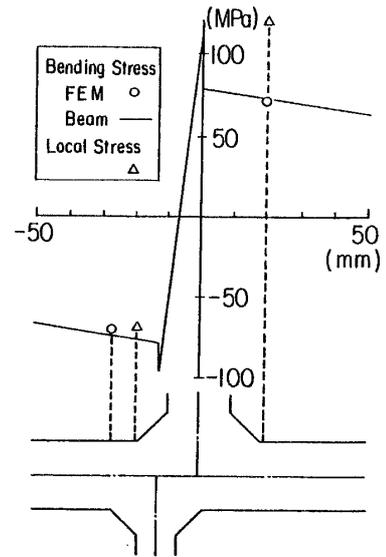


Fig. 17 Stress Distribution on the Surface of Inner Bottom Plate with Misalignment ($\delta/t=1.0$)

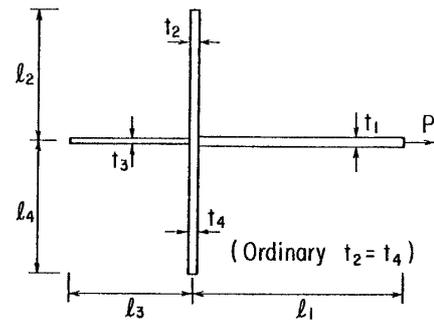


Fig. 18 Cruciform Joint for Stress Estimation with Misalignment

j ：十字継手を構成する 4 部材を表わす。

部材の長さ l の定め方については今後検討する必要があるが、本解析モデルの場合には部材の長さの $1/6 \sim 1/8$ の値となった。

溶接脚長の増加で決まる係数 a_w は目違いを埋め合わせる側に付加された増脚長によって取合部付近において目違いが生じている部材の中性軸を移動させ実質的な目違いを減少させる効果を表わす。本解析モデルでは 10% の脚長増加に対し a_w は約 0.85 となった。

拘束部材効果を表わす係数 a_c は、目違いが生じている箇所の近傍において目違いにより生じる回転変形が、十字継手を構成する部材に対し垂直な平面内に配置されたパネル等によって拘束される効果を表す。ロアツールモデルの場合、ガーダ、ウェブフレーム、ロンジが回転変形を拘束するパネルに相当する。 a_c はガーダ・ロンジ間で 1.0 となるがガーダ付近で急減しガーダ上では 0.0 に近づく。なお疲労強度を考えた場合ガーダ上でのき裂発生寿命は目違いの影響を受けないとしてもき裂進展は加速される可能性が

ある。

4. 結 言

船体構造の部材取合部において目違いが強度に及ぼす影響度を定量化するための基礎研究として目違いによる応力上昇をとりあげ、バルクキャリア隔壁下部スツールと2重底板との取合部について3次元の薄板シェルモデルおよびソリッドモデルによる試解析を行った。また溶接ビードの影響を調べるため2次元の十字継手モデルによる応力解析を行った。目違いが応力に及ぼす影響について得られた結論は以下のとおりである。

- (1) パラスト水圧荷重を受ける場合2重底の内底板を挟んでアロアスツール斜板から2重底フロアへの応力の流れが生じ、両者に目違いがあると局部的なモーメントが生じ曲げ応力が付加される。膜応力の変化は小さい。
- (2) 板厚を剛性として考慮したシェルモデルで算出された目違いによる曲げ応力はガーダなど回転変形を拘束する部材の近傍を除くと板厚を幾何形状として考慮したソリッドモデルの結果とほぼ等しい。
- (3) 内底板、斜板、フロアの目違いによる応力上昇は回転変形が拘束されないガーダ・ロンジ間で大きい。強度が問題となるガーダ上では回転変形が拘束されるため応力上昇は小さい。
- (4) 目違いにより生じる曲げモーメントは溶接ビードの脚長や隅肉溶接の溶込量により変化しないため曲げ応力の上昇に対するそれらの影響は小さい。また、目違いを埋めるための脚長増加は10%程度では効果は小さい。
- (5) 部材の剛性や周辺の構造配置等により変化する応力上昇を評価する方法として部材取合部を等価な十字梁に置

き換え、拘束部材効果等を表わす係数を用いて評価する方法を提案した。

今後の課題としては応力上昇の評価に用いる十字梁の寸法の設定、拘束部材効果等を表わす係数の定量化方法があり、応力集中部となるガーダ等との交叉部を中心に検討する必要がある。また疲労強度に及ぼす影響度についても検討する必要がある。

謝 辞

本研究は日本造船研究協会第207研究部会で行われた研究⁹⁾をもとにまとめたものである。研究を進めるにあたり東京大学の野本敏治教授をはじめ第2ワーキンググループの皆様には有益なご意見を賜りました。また日立造船(株)船舶基本設計部ならびに有明工場の皆様にもご助言をいただきました。ここに謹んでお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 藤田 謙, 萩原孝一, 藤野 宏, 橋本博之: 目違いのある隅肉溶接構造物の強度(その1), 日本造船学会論文集, 第130号(1971), pp. 297
- 2) Berge, S. and Myhre, H.: Fatigue strength of misaligned cruciform and butt joints, Norwegian Maritime Research, Vol. 5, No. 1 (1977), pp. 29
- 3) Maddox, S. J.: Fitness-for-purpose assessment of misalignment in transverse butt welds subject to fatigue loading, IIW-Doc., X III-1180 (1985)
- 4) 鋼船工作法研究委員会第一分科会: 日本鋼船工作法精度標準 JSQS, (1985)
- 5) 日本海事協会: 鋼船規則集
- 6) 日本造船研究協会第207研究部会: 船殻構造の強度評価と管理目標の定量化の調査研究, (1993)