

$\theta$ がほぼ $45^\circ$ 程度と判断されるようになります。

コインチェックの意義は(イ)実船の溶接長さ10 kmでのビード形状計測として他に認めうる方法がない、(ロ)前述のやり方で従来の目視検査より進んだ定量化が出来、 $\theta$ のチェックには少くとも有効である事、(ハ)溶接の1 mm幅でチェックし、その $K_t$ を求めるという方法でコインチェックを用いると $R$ を求めると言う意味ではバラツキは大きくなります。しかし、疲労強度照査には施工規準に従った試験片を一応用いるがそのビード形状と実船のそれと違うかどうかには最小限前述の方法で充分です。さらに他の例(SR 202 63年度報告)ではアンダーカットを生じるような大きな $(180^\circ - \theta)$ の値をコインチェックでほぼ選別出来ます。(ニ)しかし微少な $K_t$ 値の範囲の選別には適しないのはいくつかの欧州の文献にある通りで充分承知しています。しかも、欧州ではコインチェックに文句をいいつつ目視にたよっているのも現状です。定量化の方向に向うべきと考えます。

**【討論】金子幸雄君** (1) 2.1の終りに厚板は多層盛で余盛高さにコントロールし易いとあるが、厚板は大電流ミグにより多層盛を避けるのが実際ではなかるうか。厚板を多層盛りすると残留応力の影響が疲労強度に出てくる筈であるから、応力集中のみ管理で疲労強度を評価するのは一考を要する。

(2) 突合せ継手の応力集中は $\alpha_t$ の平均値で処理してよいのか問題である。テストピース中の $\alpha_t$ の分布を考慮すべきではないか。

(3) 応力集中係数は趾端半径 $R$ できまるのではないのか。アルミニウムは削り易いので、特に突合せ継手の余

盛部の形状(平削にすることも含めて)の整形により疲労強度を上げることが出来れば、これを基に板厚の軽減等が可能と思うが如何でしょうか。

(4) コンチェックについても平均的な考え方は疑問である。

**【回答】**(1) 大電流ミグの採用はLNG船用の厚板ではすでに採用されていますが、40 mmを超える場合それでも多層となります。厚板での残留応力の過大は今回の講演会の51の松岡さんの論文にもある通りだと思います。厚板各姿勢で盛数もかなり違いますが、それらの疲労に与える影響を同一とみなし、応力集中のみで評価してもFig.14に示すように、三姿勢のデータはすべて水平のデータのバラツキ範囲内になります。Fig.14を応力集中評価の立証としています。

(2) 溶接各断面の応力集中と疲労強度のデータ詳細は、IIW-XIII-1235-87およびINALCO 88'に示してあります。試験片それぞれの応力集中でデータを処理するとFig. 14のバンド幅はさらにせまくなります。しかし実船で数10 kmのオーダーの溶接に対して $\rho, \theta$ を計測し応力集中を計算出来ませんのでコインチェック等の計測精度とフェーズを合せ、応力集中の平均値処理としました。

(3) LNG船のタンクの突合せ溶接では疲労強度照査の結果に応じてビードのある範囲を整形しています。本研究の実用的主旨は疲労強度の推定精度をあげ、コインチェック等も合せて行えば合理的に整形の個所を指示出来ると考えています。

(4) 太田さんの討論(2)に対する回答に準じます。

### 53 線状加熱による板曲げ加工用シミュレータの開発

**【討論】今岡雄君** (1) 角変形量が入熱量と板厚によって整理されていますが、熱源による差、即ち高周波加熱、ガスバーナー、レーザー等により表面の加熱幅、板厚方向の温度分布が異なり同じ入熱量でも角変形量は異なると思います。比例定数 $k$ を考慮すれば良いのでしょうか。

(2) 将来、シミュレーションが実用化される場合、加熱条件、加熱順序の決定、評価の方法についてお聞かせ下さい。

**【回答】**(1) 御指摘の通り、今回のシミュレータで用いた $k$ はあくまでも加熱条件の一例に過ぎません。

溶接の場合、参考文献6)にある寺崎氏の「構造用材料の溶接変形に及ぼす溶接諸条件の影響」を念頭に置いて考えております。ビートンプレートによる溶接入熱量 $Q/h^2$ ( $Q$ :単位溶接長当りの入熱量、 $h$ :板厚)と板の角変形 $\delta$

(ラジアン)には $Q/h^2 \leq 2500$ で $\delta = 6 \times 10^{-6} \cdot Q/h^2$ ,  $Q/h^2 > 2500$ で $\delta = -2.4 \times 10^{-6} \cdot Q/h^2 + 0.021$ (ただし軟鋼の場合)の関係があります。このデータは種々の溶接法と板厚に対して成り立つと寺崎氏は述べております。このとはアーク溶接であれば溶接法によらず上式を採用することが出来ることを述べたものです。

ところでガス炎による線状加熱の場合、上述のようなデータの提供がありませんが今回高周波加熱による計測結果によって、ある程度有用なデータが得られたものと思っております。勿論、各々の熱源に対して加熱幅、板厚方向の温度分布を考慮して実験することが望ましいわけですが、本シミュレータ・システムでは、どの熱源を用いてもFig. 3のような傾向になるものと考えております。

したがってご指摘の熱源の差、水冷の有無を含めて比例定数 $k$ を考慮すれば良いと考えております。

(2) 本システムは教育訓練用シミュレータです。したがって加熱用、機材、板寸法と目的面率が与えられた場合、加熱場所、加熱順序を決定するとどのような曲面が出来るかを知ることが現在の目標です。加熱条件としては  $\delta_{\max}$  となる加熱条件を使用するのが最適と考えております。

また、シミュレーションを完成することによって線状加熱を計算機内で表現することができ、板の変形モデルは勿論のこと作業に関する情報を計算機内にモデルとして表現でき、作業情報の蓄積・管理が容易になり作業情報をベースとした新たなシステムの基礎が確立すると考えています。

**【討論】中村光政君** 造船で行われている板曲げ加工の原理は大きく分けて二つあると思います。一つは本論文で述べておられる線状加熱を板の片面に加え板厚方向に温度勾配を生じさせこの勾配によって発生する塑性変形によって板曲げを行うものであり、他方は変形させたい方向に外部から拘束を加えた上で、その部分を線状加熱し、残留応力の除去、板の面方向の膨出、長さ方向の収縮によって、拘束を緩和させ必要な曲げ形状を得るものと考えます。

前者の適用は本論文の中にあるような比較的単純一方向の曲げや溶接による角変形(ヤセ馬)の除去に適用され、後者は横曲げをプレス等で行った後の縦曲げに適用されています。

本論文によって初めて曲げ加工に対するシミュレータが可能であることを示された意義は大きいと考えられます。今後の方針として、これを基とした後者の課題に対する取り組み方について示して下さい。

**【回答】** 御指摘の通り、線状加熱による板曲げ作業には色々あり、作業の分類、定義、目的等、不明確なものが多いのが現状です。今回の研究である単に曲げのみを取り扱う問題においても実用システムの開発を行うことは言うほどに簡単なことではありません。例えば本システムの曲げモーメントを確定するには現場の実験データが不可欠であります。したがって後者の課題に対しては更に多くの情報整理が必要と思われます。例えば外部からの拘束を加えるのは本当は何のためか、長さ方向の収縮は入熱量との関係でどの程度あるのか等、多項目に亘ります。したがって、これらの作業の裏に隠れた本質的問題が解決されない限りモデル化すら出来ないと考えます。

**【討論】佐々木正人君** 造船現場における線状加熱による曲げ加工は、ガスバーナーによる入熱に同一面側からの水冷も合わせて施工されているのが一般的である。したがって、板曲げ加工における曲げ量は入熱量のみでなく、冷却速度にもよるものと考えられる。

本シミュレータをさらに実際的にもものとしていくため、この冷却速度の部分についてどの様に考えておられるかお教え下さい。

**【回答】** 今岡氏への回答で詳細を述べてある通りです。水

冷の割合を入熱量の変化、或は熱源の変化ととられることが最も工学的であると考えております。したがって、水冷を併用したときの  $k$  を求めてモデル化し、拘束、荷重を掛ければ良いと考えます。

**【討論】渡辺孝和、西垣邦秋君** (1) 正と負の平行な列の互いの離  $2a$  1メッシュサイズずつ離れた線分に掛けてますが、 $2a$  の妥当な値が存在すればご教示ください。

(2) Fig.3は、線状加熱後の変形量を示していると理解するが、同図はある板厚に対し、最大の変形を生じせしめるヒートインプットがあることを示していると理解してよいでしょうか。

(3) (2)の理解が正しければ、 $\delta = k' P / vt^2$  の  $k'$  は定数とは言えないと思われるが、どの様な範囲で定数として扱えるか教示下さい。

(4) 実作業では、板の拘束条件はフリーに近く、更に水冷を併用しているのが普通ですが、実用的弾性数値解析で簡易に取り扱う方法としてどういうモデル化が考えられますか。

(5) 実務的には、与えられた最終形状に至る最適解即ち最短時間で最終形状に至る作業ステップを作業指示書の形で明示出来ることが望まれるが、その為今後必要とする開発検討事項としてどういうことが考えられますか。

**【回答】** (1) 入熱量に対応した角変形を生じさせるのに必要な曲げモーメントを求めているのですから、 $2a$  が大きくなるとモーメントの絶対量は小さくなり、逆に  $2a$  が小さくなるとモーメントは大きくなるようになります。この意味からは  $2a$  の妥当な値というのは存在せず、常に正当な値となります。

(2) 図は一般的な関係を示したのではなく、誘導加熱の場合を示したものであることを考慮すれば、ご指摘の通りです。

(3)  $\delta = k' \cdot (P / vt^2)$  の  $k'$  は入熱量  $Q'_{cr} / t^2$  以下を代表する  $k'$  を示していることとなります。そこで、線状加熱をする場合最も効率の良い入熱量  $Q' / t^2$  は、 $Q'_{cr} / t^2$  を用いることであると著者らは考えました。何故なら  $Q'_{cr} / t^2$  であるなら最大の角変形量を得るとが可能であるからです。したがって  $\delta = k' \cdot (P / vt^2)$  を用いるのは  $k'$  を用いるというより最大の角変形量を求めるためにこの関係を用いていると理解して頂きたいと考えています。

(4) 板の外的拘束はフリーと考えて計算しています。論文中に拘束があるとはモーメントを負荷する際の拘束条件であり、板そのものを拘束していることではないと理解しています。水冷の場合は入熱量に変化があると考えれば、このシミュレーションはすぐに使用可能です。造船所の現場では Fig.3 に示すようなデータを提供して欲しいと思っております。

(5) 現在のところ著者らは、作業手順を指定すると最終形状が得られる教育訓練用・作業シミュレーション用シ

システム開発を目標としています。最適解を得るといえるのは有限要素法のプログラムがあるとき、船体の最適形状、最適板厚等の最適設計を得る方法を議論していることになり、シミュレーション用システムの開発より困難であると

思います。しかし、本シミュレータを活用し、様々な板厚を行こうとによって作業のノウハウが蓄積されればシステムの可能性としては存在すると思えます。

## 55 溶接欠陥の許容限界評価への信頼性工学的アプローチについて

【討論】井上健裕君 負荷応力のモデル化に際し、発生順序を考えないランダム変動応力が、発生順序を考慮するより Conservative としているが、この点についてもう少し詳しく説明をお願いしたい。文中の説明では、実働応力下では、大嵐で亀裂進展し、その後変動応力が小さくなった後に破壊という状況を例として説明されているが、大嵐のうちに疲労亀裂進展して破壊条件を満す場合もありえる。したがって、疲労亀裂進展後の破壊発生を考えた場合の信頼性は、1) 疲労亀裂進展速度が変動応力の順番に依存する、2) 波浪外力と外気温との間に相関がある、等の別の要因が無い限り、同値になると考えられるのではないのか。

【回答】討論者の指摘1)については、本文中に述べている通り、応力の発生順序は考慮に入れておりません。2)については、波浪外力と外気温度は無相関とは申せません(航路、季節などに関連して)が、本論文では常に最低使用温

度にさらされていると考えていると理解していただければよいと思います。これは Conservative な評価となっている理由の一つです。討論者の「同値になる」の表現の意味が著者らによく分かりませんが、要するに Conservative な近似であろうと考えた理由は、上記の他に、頻度的解釈としての Fig.3(b)を、各回の繰り返し波浪応力の発生確率と考えることは、変動応力が嵐の後は平穏というような時系列上の相関があるはずのものを、全く出現順序はランダムと仮定することにより、例えば小さい応力の次にいきなり大きな応力がかかるというような確率は非常に小さいにも拘らず、あるいは大きい応力の次に小さい応力がかかる確率は小さいにも拘らず、このようなことが起きると仮定しているので、遅延効果などを考えると、厳密な数学的証明はむづかしいが、たぶん Conservative な仮定となっているであろうという意味です。

## 56 低温型 LPG 船用 TMCP 型高靱性新低温用鋼板の諸特性とその評価

【討論】高嶋修嗣君 (1) Fig.2は、 $-46^{\circ}\text{C}$ で  $K_{Ic} \geq 400 \text{ kgf} \sqrt{\text{mm}} / \text{mm}^2$  を確保するためには、フェライト粒径を  $6 \mu\text{m}$  以下とする必要があることを示しています。 $A_{r3}$  直上温度での大圧下は、フェライトの細粒化に有効ではありますが、一般に、平均フェライト粒径を  $6 \mu\text{m}$  以下とすることは困難であると思えます。Fig.3の写真では、扁平したフェライトの長手方向で数十  $\mu\text{m}$  のものが存在しており、明らかに  $6 \mu\text{m}$  以下のフェライト粒径になっているとは判断しがたいように思えます。セパレーションの発生などが、アレスト特性の向上に寄与していなかったでしょうか。

(2)  $A_{r3}$  直上温度での大圧下によるフェライト細粒化効果は、板厚が増大するにしたがって軽減されると考えられます。この製造法を適用できる最大板厚はいくらでしょうか。

【回答】(1) Fig.2は、フェライト粒を平均円相当径で整理したものであり、Fig.3に示した組織写真では、本開発鋼の場合  $7.4 \mu\text{m}$  に相当しています。亀裂の伝播抵抗として、破面単位の縁に形成されるテアリッジを想定しますと、円相当径による整理が妥当であると考えられます。また、

Fig.2は、フェライト粒径とアレスト性能との一般的関係を示したものであり、フェライト粒径以外の支配因子が作用しているであろうことは、Fig.1に示したとおりです。しかしながら、本開発鋼の破面には、セパレーションは観察されておりません。

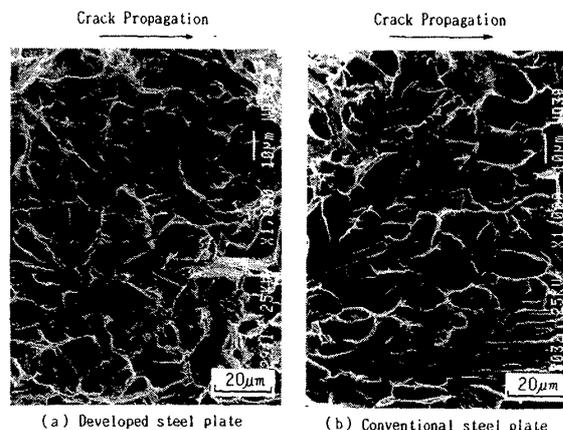


Photo 1 Examples of fracture surfaces