

論文の内容の要旨

論文題目 船体ブロックの工作精度に対する残留応力制御型
T M C P 鋼板の有効性に関する研究

氏名 谷 徳 孝

1. はじめに

近年、鋼板製造時の加熱・圧延温度や圧下量、冷却速度を制御した厚鋼板製造法が開発され、強度と共に溶接性に優れた高張力鋼板が実用化され広く適用されている。その中でも、T M C P (Thermo-Mechanical Control Process) 鋼板は、優れた溶接性と大入熱溶接の適用による高能率溶接が可能のため、日本の造船業とともに発展してきた。これまで、船舶の大型化および軽量化に伴って、T M C P 鋼板は広く使用されてきており、大型タンカーにおいては、T M C P 鋼板の使用量は鋼材全体の 70% に達している。

しかし、T M C P 鋼板は、制御圧延および加速冷却により材質制御されるために、製造過程で発生する不均一冷却に起因した残留応力分布により、時として面内/面外の形状不良が発生し、工作精度の低下を引き起こすことがあり、造船所を初めとする需要家からは、“T M C P 鋼板は、従来鋼板に比べて、変形が大きく変形量がばらつく。”と苦情が出るがあった。

今回、T M C P 鋼板の製造工程において、ハード・ソフト面から構成される形状・残留応力制御技術を構築することによって、従来の T M C P 鋼板が有する歪および形状の問題を解消した残留応力制御型 T M C P 鋼板を開発した。本鋼板は、言うまでもなく、従来の T M C P 鋼板に比べ、残留応力は制御され残留応力分布の均一化が実現されている。そのため、船舶建造時の切断変形、溶接変形等の安定化が図られることにより、工作精度向上に寄与するものと考えられる。

本研究においては、船体平行ブロックの建造工程を対象として、従来の T M C P 鋼板のもつ残留応力に起因する問題点を明確にするとともに、従来鋼板の課題を解消した残留応力制御型 T M C P 鋼板を船体ブロックに適用する場合における工作精度や生産性の向上効果に対する有効性を検証した。

2. 従来の T M C P 鋼板の残留応力レベルの明確化と残留応力制御の必要性

従来の T M C P 鋼板の残留応力状態とその発生原因を調査したところ、残留応力は約 100N/mm²程度あり、その分布形態は鋼板によって大きく異なること、鋼板の残留応力は圧延工程における不均一な温度分布により生じることがわかった。この残留応力は、平坦度不良や切断後の横曲がり等の

形状不良を引き起こすことに加えて、切断や溶接といった加工工程での変形ばらつきや誤差の要因となるため、残留応力の少ない鋼板が望まれている。

一方、造船所においては、生産性向上およびコストダウンを狙いとして、効率的な大型ブロックの建造法が採用されている。その際、船体ブロックに対しては、高い工作精度が要求されており、鋼材に対しては、同一の条件で加工すれば同一の形状となる再現性のある鋼板が求められている。

従来のT M C P鋼板の残留応力に起因する不具合を防止し、造船所の生産性向上に貢献するためには、残留応力制御型T M C P鋼板の開発が必要である。

3. 残留応力制御のための要素技術の構築

T M C P鋼板の残留応力は、主に加熱から圧延、加速冷却工程での製造条件の違いに起因した不均一な温度分布によって発生するため、鋼板の残留応力制御においては、まず、残留応力の原因となる不均一な温度分布を極小化する必要がある。鋼板の温度分布を極力小さくしても不可避免的に発生する残留応力については、後の熱処理やローラレバラ矯正により制御する。また、鋼板1枚1枚の残留応力レベルを判定し、許容値以内であることを保証する。鋼板の機械的性質については、従来のT M C P鋼板と同等になるように制御する。これらの考え方をベースに残留応力制御型T M C P鋼板製造のための基盤技術を確立し、量産化のための製造体制および品質保証体制を構築した。

4. 本鋼板実用化に向けた数値解析による有効性検討

残留応力制御型T M C P鋼板を船体ブロックに適用するにあたり、工作精度への有効性を明確にする必要がある。船体ブロック建造における工作精度に及ぼす鋼板の圧延残留応力の影響を系統的に検討した研究例は少ないため、切断や溶接時の面内変形を対象として圧延残留応力の影響を検討した。

検討に際しては、複雑な船体ブロックの組立工程を対象として、一貫して数値解析を用いて、鋼板の残留応力の影響を検討し、切断・溶接加工時の変形ばらつきに鋼板残留応力が影響していることを理論的に説明した。

図1は、NCプラズマ切断機によるトランス材のスリットスロット切断を対象に、熱弾塑性FEM解析を用いて、過渡的なスリット側の長さ変化を解析した結果である。切断入熱や鋼板の残留応力により、切断過程で鋼板が動いている様子がシミュレートできている。鋼板残留応力がスリット側の長さ変化に及ぼす影響として、幅端部に圧縮応力を有する従来鋼板Bは、スロット切断では伸長しているものの切断完了後は1.5mm収縮しているのに対して、幅端部に引張応力を有する従来鋼板Cはスロット切断で収縮しているものの切断完了後は2mm伸長している。鋼板の残留応力状態の影響は大きく、残留応力により変形挙動が異なっていることがわかる。

船体ブロック建造における溶接工程や切断工程を対象として、このような数値解析を行うことにより、工作精度に及ぼす圧延残留応力の影響は大きく、鋼板の残留応力が変形ばらつきの原因になっていること、および、従来のT M C P鋼板の残留応力に関わる不具合を解消した残留応力制御型T M C P鋼板を船体ブロックに適用すれば、切断や溶接等の加工時の変形量が安定し、工作精度や生産性の向上効果が期待できることを理論的に立証した。

また、数値解析を用いた工作精度の検討において、溶接・切断条件や順序、拘束条件、仮付け条件などの製造プロセスが工作精度に大きな影響を与えていることがわかった。これらの影響については、造船所では何となくわかっているものの、多くの場合、熟練作業者の経験と勘により対応されてきたため、本研究で行った数値解析手法や解析結果を活用することにより、これらの影響の

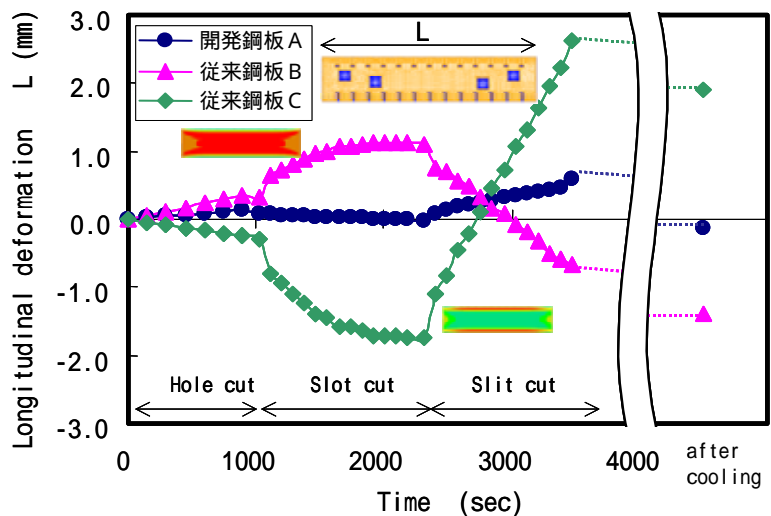


図1 数値解析によるスリットスロット切断時の過渡変形

定量化・標準化が可能であり、技術の共有および技能伝承の手助けになり得ることがわかった。

5. 本鋼板実用化に向けた実船適用による有効性検証

数値解析による検討は、モデル化の際に様々な理想状態を仮定するため、実際の挙動と一致していないことが考えられる。また、残留応力制御型 T M C P 鋼板の工作精度に対する有効性のみならず、生産性向上効果を把握するためには、実際の船舶に適用する必要がある。

そこで、30 万トン級のダブルハル VLCC (Very Large Crude Carrier) の平行ブロックに本鋼板を適用することにより、その有効性を検証した。

図 2 は、本鋼板をトランスパネルおよびスキンパネルに適用し、トランスパネルの引き込み時間を従来鋼板のそれと比較した結果である。トランス引き込みにおいては、 $\pm 1.5\text{mm}/12\text{m}$ の高い工作精度が要求されている。高い工作精度が達成できる本鋼板を適用したトランスパネルは問題なく引き込めたのに対して、従来鋼板を適用したトランスパネルは、鋼板の残留応力により工作精度が低く、引き込み時にトラブルが発生し、工数が増加する結果となった。本鋼板による工作精度向上効果および生産性向上効果が明らかになったといえる。

これら一連の実船適用結果により、従来の T M C P 鋼板は、鋼板の残留応力に起因して変形ばらつきが発生すること、および、本鋼板を船体ブロックに適用すれば、工作精度が向上し、生産性が向上することを実証できた。また、今回検討した熱弾塑性 FEM モデルの解析結果は実際の船体ブロックでの計測値とほぼ一致しており、本研究で行った解析モデルの信頼性は高いことがわかった。数値解析による理論的な検討と実際の船体ブロックへの適用による実証の両面から、本鋼板の有効性が明らかになった。

6. おわりに

複雑な船体ブロックの組立工程を対象として、切断・溶接加工時の変形ばらつきに鋼板残留応力が影響していることを理論的、実験的に説明できた。残留応力制御型 T M C P 鋼板を船体ブロックに適用することにより、ブロック精度の高度化や建造工数と建造コストの削減を達成できることを確認できた。今後、船体曲面ブロックや建築・橋梁分野への適用が期待できる。また、本鋼板の適用を前提とした新工法が開発されることにより、更なる生産性向上効果が達成できるものと考えられる。

さらに、本研究で行った数値解析手法および解析結果を利用することと、実際の施工において理論通りの形状となる残留応力制御型 T M C P 鋼板を活用することにより、熟練作業員の長年の経験やノウハウ、直感、勘やイメージといった経験的知識である暗黙知を、言葉や図表を通して表面化し他人が利用可能な形、すなわち形式知化することが期待できる。これにより、技術伝承や技術者の育成が効率的に行えることが期待される。また、次世代の生産システムにおいては、本解析モデルや解析結果を生産システムに組み込むことにより、設計者や作業員が仮想生産を行ったり、デジタルモックアップを製作したりすることが可能となるものと考えられる。これは、設計者や作業員の技術や経験の習得の手助けとなるだけでなく、効率的な構造物の設計や製作に役立つものと推察され、本研究の波及効果はきわめて大きい。

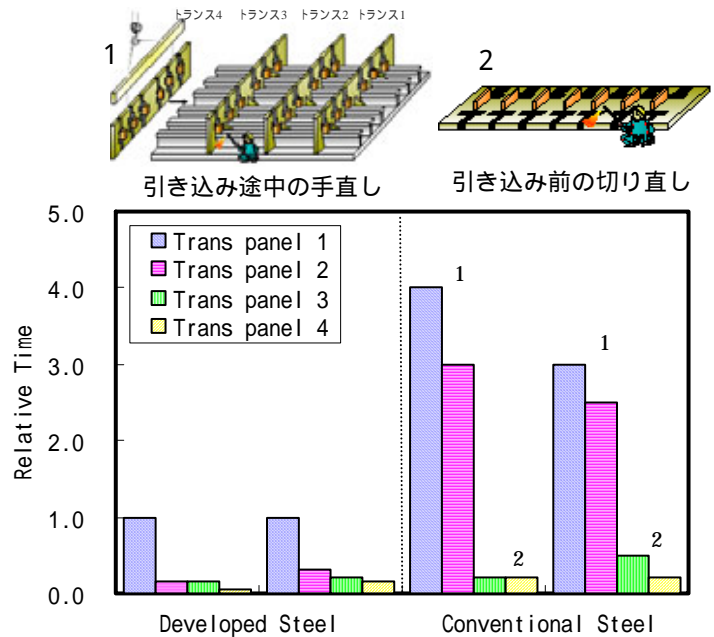


図 2 実船建造におけるトランスパネル引き込み時間