

技術相談

事例集

第27回

WE-COM 技術相談は発足以来、350 件以上の多くの相談が寄せられています。相談案件の中から WE-COM 会員の皆様の活動にお役立ていただけそうな内容を選び、相談者から「公開」のご了解を得たものを、事例集として WEB マガジンにて公開しています。

ご相談は直接の業務に関係する案件だけでなく、日頃、疑問に思っておられる内容についても歓迎します。回答チームでは、相談の背景を伺いながら、基本原理にもとづき、具体性のある丁寧な回答に努めております。

相談者の方々からは、多くの「非常に役に立った」とのご評価いただいておりますが、この相談事例集を参考に、お気軽に WE-COM 技術相談を利用いただけますと幸いです。

第27回では、力学・設計分野から1件、溶接法・機器分野から1件、金属材料・溶接性分野から1件、合わせて3件の事例を紹介いたします。

相談例 78. 回し溶接の残留応力分布

相談例 79. 肉盛溶接の自動化について

相談例 80. LNG 貯槽用材料としての 9%Ni 鋼と SUS304 の使い分け

相談例 78 回し溶接の残留応力分布

大きな溶接構造物では（角）回し溶接部の疲労強度が問題になることがあり、その説明の中で引張残留応力に話が及ぶことがあります。しかしながら、（角）回し溶接部の残留応力分布を示した資料は、教科書ではあまり見かけません。そこで、（角）回し溶接部の一般的な残留応力分布と、発生機構について、ご教示ください。

回 答

1. 溶接残留応力発生の発生機構について

回し溶接であろうが、通常の突合せやすみ肉溶接の溶接残留応力であろうが、発生メカニズムは同じです。溶接金属およびその極近傍が、溶接後冷却した場合に収縮することにより発生します。この収縮を固有収縮といいます。この固有収縮が、まわりの材の影響を受けずに自由に収縮できれば残留応力が発生しないし、なにか抵抗するものがあれば、その抵抗する大きさにより、最大の引張残留応力が決まります。ご質問の回し溶接部の場合も、定性的な考え方は同じですが、定量評価は実験や計算で実施せざるをえません。

2. 回し溶接部のスティフナ長手方向の最大引張残留応力

以下、文献1)、2)と、「考察」とを参照ください。それによると端部の回し溶接する限り、スティフナ長手方向の最大引張残留応力は、材料の降伏応力程度になります。回し溶接部含む端部の溶接をなくした場合、6割程度に低減されます。ただ、この場合残留応力は低減できても応力集中が大きくなり、耐疲労性能が低下して本末転倒です。一方、この端部に低温で変態膨張のする溶接材料でビードを付加すると引張残留応力の低減や圧縮応力化できるとの報告もあります。

(参考)

- ・文献1) 日本造船学会論文集 第180号 753p～761p 「角回し溶接継手の残留応力」船舶技術研究所 松岡一祥, 吉井徳治
- ・文献2) 日本海事協会共同研究支援事業 課題名 スチフナ角回し溶接部疲労強度向上のための溶接施工法の開発 高張力鋼溶接部疲労特性向上のための溶接施工法の開発(その2) (2013年4月～2015年4月) 大阪大学 接合科学研究所 村川英一他, 大学院 工学研究科 大沢直樹他, 長崎総合科学大学 矢島浩他, 今治造船(株), (株)三和ドック, 三菱重工業(株), 日本海事協会

「回し溶接部の残留応力分布についての考察」

1. 平板にスティフナ(リップ)を回し溶接をしないで、すみ肉溶接した場合の残留応力分布

回し溶接をした場合の残留応力分布を考える前に、溶接線方向を x 軸、溶接線に垂直方向を y 軸とした図1のようなすみ肉溶接の場合の残留応力分布について考える。溶接残留応力の発生要

因は溶接金属及び極近傍が、溶接後常温に冷やされたときに収縮することで発生する。この収縮を、固有収縮または固有ひずみという。図 1 の場合の溶接金属及び極近傍の固有収縮は、x 軸方向及び y 軸方向に発生する。

この場合 y 軸方向の固有収縮は x 軸方向にほぼ一様に発生するため、それによって発生する残留応力は小さいものである。

一方、x 軸方向の固有収縮は y 軸方向に一様に分布するわけではなく、すみ肉溶接部近傍に集中する。他の部分はその固有収縮による変形を阻止するように働く。よって、図 1 の太い実践で示したようにすみ肉溶接部および極近傍に最大の引張残留応力が発生する。溶接部およびその近傍は引張の残留応力、少し離れた領域に圧縮の残留応力が発生する。2つのすみ肉溶接の間は、その間隔に依存して、引張か圧縮か決まるが、前述の溶接部とその近傍の最大引張残留応力を超えるものではないので、議論から外す。図 1 のすみ肉溶接部より板幅方向への分布は、平板の突合せ溶接した場合の残留応力分布と類似である。図 1 の板幅 W の影響であるが、板幅 W が小さい場合は、x 方向の固有収縮による変形を阻止しようという抵抗は小さいので、最大引張残留応力 σ_{max} は材料の引張降伏応力より小さいが、ある程度広くなると σ_{max} は材料の引張降伏応力程度となる。

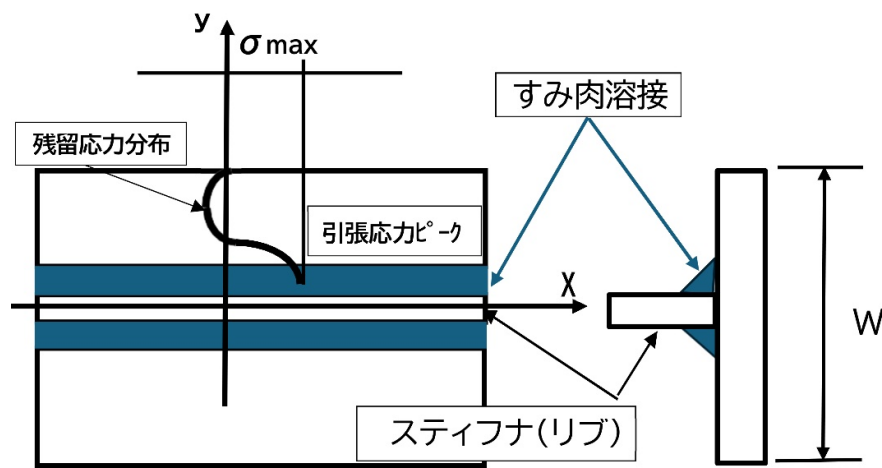


図 1

2. スティフナ (リブ) 端部に回し溶接をした場合の残留応力分布

次に、回し溶接した場合の残留応力分布について、模式図を図 2 に示して考える。板幅 W の影響は上述したものと同一なので省略し、十分板幅がある場合について述べる。また、疲労が問題になるのは図 2 の x 軸方向の繰り返し荷重なので、x 軸方向の残留応力について述べる。

図 2 の中で、青色で示した部分がスティフナ (リブ) に平行なすみ肉溶接であり、赤色で示した部分が回し溶接部である。青色部分の固有収縮による残留応力への影響は先に述べたとおりである。回し溶接の残留応力分布への影響は、回し溶接部の x 軸、y 軸方向の固有収縮を考えることで理解できる。しかし、今回のご質問の回し溶接部が、どれほど残留応力分布へ影響するかは、実験や計算による定量的評価でないとわからない。

スティフナ (リブ) 端部の回し溶接による残留応力分布についての定量的評価は、文献 1) 「角回し溶接継ぎ手の残留応力分布」に示されている。それによると端部の回し溶接がある限り、x 軸方向の残留応力の最大値は降伏応力程度になると報告されている。そのなかで回し溶接部含む端部

溶接をなくせば、残留応力の最大値は6割ぐらいになるとの報告もある。ただ、その溶接をなくせば残留応力低減はできていても応力集中が大きいものとなり、耐疲労性能の点で問題である。一方、回し溶接部の引張残留応力低減のために、端部近傍に図2の端部のx軸方向に、低温で変態膨張する溶接材料で溶接を付加することで、引張残留応力の低減、あるいは圧縮応力化を行い、耐疲労性能を向上させることができるとの詳しい報告もある。それについては、文献2)を参照されたい。

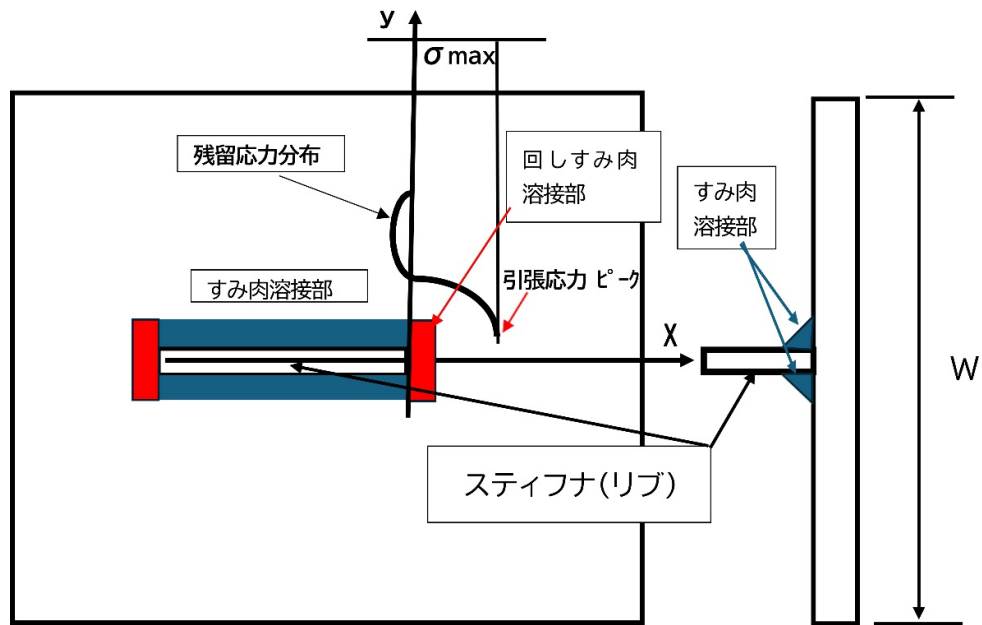


図2

相談例 79 肉盛溶接の自動化について

肉盛溶接作業の自動化を検討しています。プラズマ粉体肉盛溶 (PTA) とレーザクラディングとで、いずれがコスト・パフォーマンスに優れていますか？一般的な、メリット・デメリットなど教えていただければ幸いです。

回答

1. 肉盛溶接では、一般に希釈率、溶着速度が重要です。希釈率としては、ティグ溶接やマグ溶接では 30%程度になるのに対し、プラズマ粉体肉盛溶接 (PTA) とレーザクラディングではともに約 7~8%であり、低希釈率の肉盛が可能です。溶接速度は、レーザの方が高く設定できる一方、溶融池の大きさは PTA 方が大きくできることから、広い面積を肉盛する観点からは PTA の方が効率的であるといえます。逆に、レーザクラディングは高速、精密な肉盛が可能で、冷却速度が速く肉盛溶接金属組織が微細で高硬度になりやすい (割れが発生しやすいとも言える) 特徴があります。これらの特性は、当然溶接条件に依存します。PTA は溶接電流、電圧、速度、粉末供給量など条件選定が、一般的な溶接と同様であり比較的容易であるのに対し、レーザの場合、レーザ出力、スポット径の選定や粉末供給手法など条件設定は複雑となります。
2. 自動化の観点からは、回転テーブルとの連動が必要で、レーザの方が制御性は優れているが、多パスの場合の重ね部への狙い位置などの裕度が狭いので精密な位置制御が必要となるとともに施工条件の工夫も必要となります。また、一般に、ステライトの肉盛では、割れ抑制として、予熱、直後熱処理などの施工管理が行われますが、両プロセスで有意差はなく同様の管理が必要です。
3. 従って、肉盛溶接部の機械的特性は、適正な条件設定を行えば両プロセスに優劣の差はなく、対象とする肉盛溶接部位の特徴 (肉盛溶接幅、厚さ) からみた生産効率や装置の操作性、制御性からプロセス選定を行うことが重要であると言えます。
4. 装置に関して言えば、当然導入コストを考える必要がありますが、近年 PTA を取り扱うメーカーが少なくなっているのに対し、レーザクラディングは LMD (レーザメタルデポジション) として AM (3D 積層造形) などへの適用が増えていることから、将来的なシステムの進化、メンテナンスなども考慮して導入を検討する必要があると言えます。
5. 以上から、どちらのプロセスがコスト・パフォーマンスに優れているかを一義的に評価することは困難で、対象製品や製造環境などに応じて上記の特徴をふまえ、ご判断いただきたい。

相談例 80 LNG 貯槽用材料としての 9%Ni 鋼と SUS304 の使い分け

LNG 貯槽の内槽材料としては、数万 kL クラスの貯槽では 9%Ni 鋼が使用されているのに対し、数百 kL クラスの貯槽では SUS304 が使われていると、文献には記載があります。この使い分けの理由（素材コスト、溶接性、強度など）についてご教示ください。

回 答

1. LNG 貯槽の溶接施工法は、その母材材質によらず、従前から（横向）サブマージアーク溶接、被覆アーク溶接、及びティグ溶接によるものです。なお現在では、被覆アーク溶接に比べて高能率な FCW を用いたマグ溶接法も多用されてきています。
先ず 9%Ni 鋼用の溶接材料では、ほとんどすべての LNG 貯槽で、インコネル系もしくはハステロイ系の高 Ni 合金が用いられて施工されてきました。つまり、Ni 量の少ない 9%Ni 合金溶接材料での溶接は適用されていませんでした。従って、溶接材料費を含めた溶接施工コストは相対的に高価となります。そのため、溶接高温割れ防止等異材溶接材料による健全な溶接を実現するための施工管理が重要となっていました。
2. 一方 SUS304 の溶接には、308 系の溶接材料が用いられます。その溶接金属では適正範囲の量のデルタフェライト相が生成する成分設計となっていることから、溶接高温割れのリスクが低くなっており施工管理は比較的容易です。従って、溶接材料費を含めた溶接施工コストは、9%Ni 鋼に比べ相対的に安価となります。
3. 9%Ni 鋼は SUS に比べて強度が高いので、同じ大きさの貯槽であれば板厚を小さくすることができます。また、SUS よりも大きな板（幅、長さ）を製造することが可能です。板厚が小さくなると溶接工数を減らせます。大きな板も溶接工数が減らせます。
4. なお、母材コストは 9%Ni の方が相対的に安価と言えますが、SUS304 ほど流通しておらず鋼材メーカーでは受注生産となることが多かったため、小型貯槽では調達が困難でした。母材コスト、溶材コスト、溶接コストのバランスを見て材料が決定されます。大型貯槽では 9%Ni 鋼 + Ni 合金、小型貯槽では SUS のほうが経済的となることが多いようです。母材を多く必要とする大型貯槽では、母材コストの占める割合が大きいため、溶接施工コストが多少高くなってもペイするが、小型貯槽では調達が容易なことに加え、母材コストが高くなっても溶接施工が容易な SUS304 を選択する方向になったものと考えられます。