

プラント配管や橋梁などの建築および船舶といった大型の厚板溶接構造物では多層多パスのアーク溶接が多用されている。大型溶接構造物では溶接に伴う変形や残留応力の発生が不可避であり、そのために構造物の形状や強度信頼性が問題となる。なかでも、溶接残留応力に関しては、溶接部に引張応力が存在すると応力腐食割れをもたらす要因になり得る。また、溶接部の引張残留応力は平均応力を上昇させ疲労強度を大きく低下させることから、比較的低応力の繰返し荷重下においても疲労破壊の原因となることが懸念される。

以上のように、溶接構造物の接合部における強度評価では、溶接部の残留応力状態を把握する必要がある。その手段の一つとして有限要素法をもちいた数値解析による推定があり、近年は多層多パス溶接のような複雑な問題も計算対象となってきた。そこで本稿では、多層多パス溶接による残留応力分布を、材料の変態挙動を考慮した数値解析により算定した。結果、残留応力は材料の変態挙動によって変化し、溶接止端から数mm程度の狭領域に高引張応力が存在することが予測された。



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
CAE・実験評価部 解析技術室

中本 久志

F-1 有限要素法を用いた溶接残留応力解析手法

有限要素法による溶接残留応力は、溶接入熱の過程における温度変化を熱伝導解析で導出し、その過渡的温度変化を入力とした熱弾塑性解析によって求められる。まず、解析対象の形状・寸法をもとに要素分割を行うが、多層多パス溶接の場合は3次元ソリッド要素で構成するのが一般的である。

熱伝導解析では、溶接の熱源モデル、材料定数および熱伝達面の境界条件などが入力情報として必要となる。材料定数は室温から融点近傍までの比熱、密度および熱伝導係数を入力し、溶接の入熱領域を溶接方向に進める移動熱源として計算する。また、

構造体表面からの放熱については、室温大気中に設置された状態を想定した熱伝達係数を設定する。これらの情報に基づき、構造物全体の過渡的温度変化が算出される。

次に、熱弾塑性解析では、室温から材料の融点近傍までの応力-ひずみ関係および線膨張係数を材料特性とし、熱伝導解析によって得られた過渡的温度変化を与える。なお、線膨張係数に鋼材特有の変態挙動を定義する場合もある。これらを入力として所定の変位境界条件のもと応力解析を実施し、構造物全体の応力分布（残留応力）を求める。

F-2 厚板多層溶接部の残留応力

大型構造物の接合部には多層溶接が適用される場合があり、接合対象部材の厚みによっては溶接が数十層にも達するケースが見られる。たとえば、鉄骨造建築物のダイヤフラム接合部は、柱端とダイヤフラムに多層多パス溶接が施工されており*1)、極めて重要な強度設計部位の一つであり、溶接による残留応力を把握することが望ましい。本章では、このような接

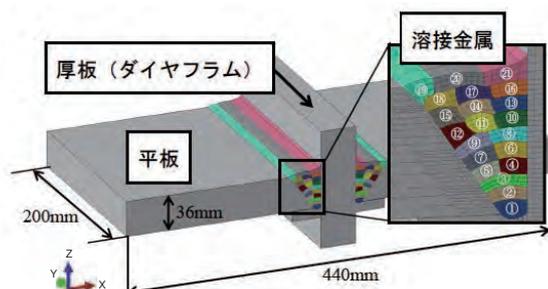
合部を想定し、平板と厚板の十字多層溶接部の残留応力を数値解析で評価する。

第1図は解析対象であり、厚さ36mmの平板と同板厚の厚板との十字多層溶接である。溶接部は厚板の両側2カ所にあり、レ形開先の10層21パスの溶接が施工されている。解析モデルでは溶接部各パスの形状を再現しており、これらは実際に多層溶接さ

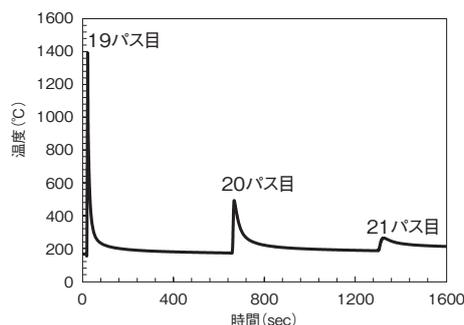
参考文献

- *1)
財団法人日本建築センター：
鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止 ガイドライン・同解説（2007）

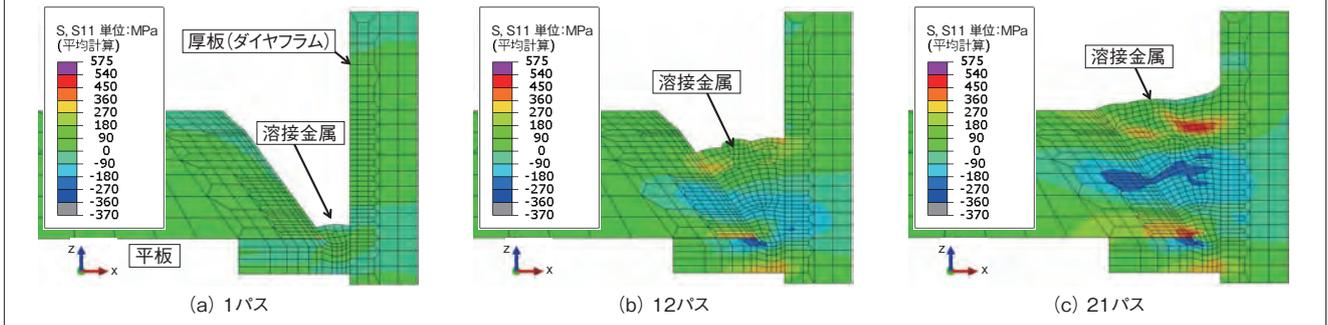
第1図 十字多層溶接継手の形状と溶接順序



第2図 19パス溶接止端部近傍の温度履歴



第3図 バスごとの溶接線直角方向応力コンター



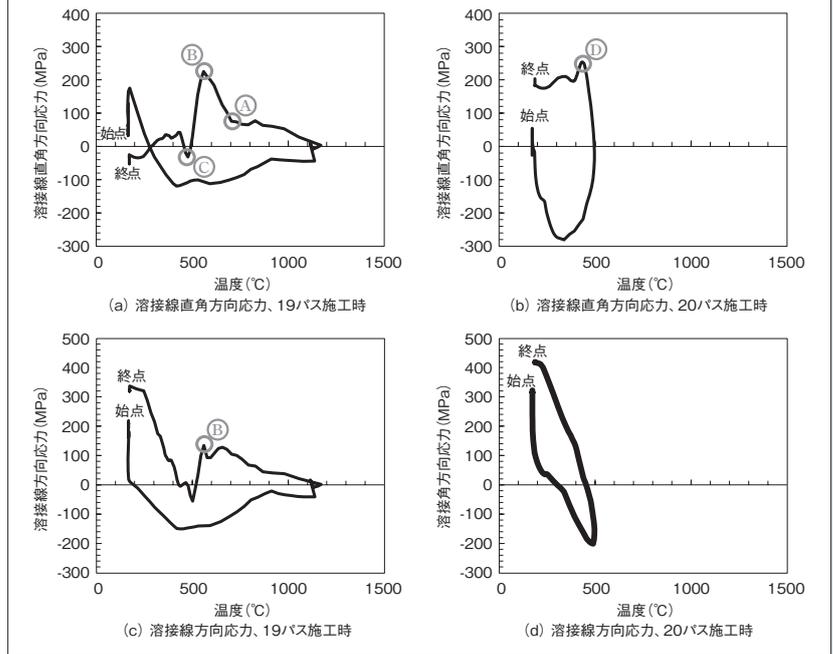
れた溶接部の断面マクロ写真を参考に決定した。なお、平板、厚板および溶接金属は共材としており、引張強度500MPaクラスの鋼材を使用している。解析モデルは3次元のソリッド要素により作成し、要素数は42,168、節点数は43,560である。

溶接時の構造体の温度変化は熱伝導解析により求めるが、本解析の多層多パス溶接は、溶接パスに相当する要素の生成と溶接方向への入熱を、溶接パス順序に従い、その溶接パスを繰り返すことで再現した。第2図に、最表層19パス目の溶接止端近傍の温度変化を、19から21パス溶接施工時について示す。これから、多層多パス溶接では着目点近傍が複数回溶接入熱されることにより、昇温と降温のサイクルを繰り返す。このような温度履歴を溶接構造体全体について求め、残留応力解析の入力条件とする。

第3図は、1、12および21パス溶接終了後の溶接線直角方向の残留応力コンターを片側の溶接部について示したものである。なお、本解析では温度変化にともなう材料の変態膨張収縮挙動を考慮している。これより、パスが進むにつれ、溶接金属が開先を埋めていく様子が確認される。21パス終了後、溶接金属およびその近傍では、板厚内部で圧縮、表面側で引張が作用する応力状態が予測される。

第4図は、各溶接パス通過時における溶接線直角および溶接線方向応力と温度の関係、平板表面溶接止端部(19パス目止端部)から0.5mm離れた位置について示したものである。なお、このような位置は溶接熱影響部に相当し、応力腐食割れが懸念される

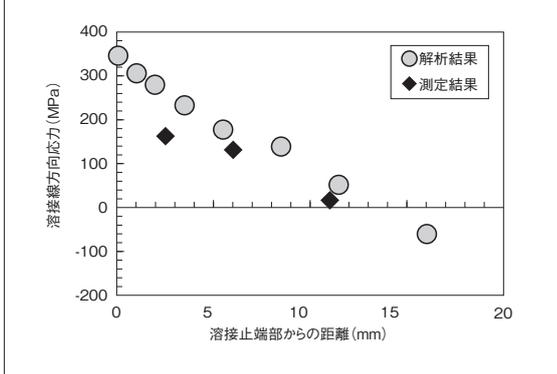
第4図 溶接時の応力変化(19パス目溶接止端部から0.5mm位置)



領域にある。第4図(a)は19パス目施工時の溶接線直角方向応力の推移であり、応力はパス通過後経過時間AおよびCで引張、Bで圧縮側に変化している。このうちBの挙動は着目部位が変態膨張するが周囲の拘束を受けるために圧縮されたものであり、AおよびCは、着目部位の後方および前方が変態膨張したことともない引張が生じたものと考えられる。第4図(b)は20パス目施工時の溶接線直角方向応力の推移である。応力は、パス通過時Dで圧縮側に変化しているが、これは着目部位の溶接線直角方向隣接部で変態膨張が生じたことに起因している。一方、第4図(c)および(d)は、19および20パス目施工時の溶接線方向応力の推移であるが、19パス目のパス通過後経過時間Bのみで顕著に変化している。これより、溶接線方向残留応力については着目部位の変態膨張の影響を大きく受けると予測される。これは、溶接入熱時の溶接部近傍の温度勾配が、溶接線方向では溶接線直角方向よりも緩やかであり、溶接線方向に熱ひずみ差が生じ難いためと考えられる。

第5図に、平板表面の溶接線方向応力と溶接止端部からの距離の関係を示しており、○が解析結果、◆がX線による残留応力測定結果である。残留応力測定は、溶接止端部から2.5、6、11mmの位置で行った。残留応力の実測結果は溶接止端部から離れるに

第5図 継手平板表面の残留応力分布



つれ低下しており、解析でもそのような傾向が再現されている。また、解析結果から、溶接止端極近傍では

300MPaを超える残留応力の存在が推定された。

F-3 鋼材の変態温度が溶接残留応力に及ぼす影響

参考文献

*2) 伊藤ほか: 溶接学会論文集, Vol.2 (1984) No.2, p.150

前章の解析事例では、鋼材の変態挙動を考慮して溶接部近傍の残留応力を評価した。これまで、残留応力と溶接パス通過後の温度低下過程における変態温度に着目された研究がなされており*2)、多層溶接でも変態膨張の発生状況によって残留応力は変化すると思われる。そこで本章では、第2章の十字多層溶接を対象として、冷却時の変態点を仮想的に低温側へシフトさせた場合について残留応力を数値解析した。

第6図に、本計算のために設定した膨張収縮挙動を、比較対象とする第2章での材料挙動(553℃変態)に併記した。低温側とした変態点は300℃に設定

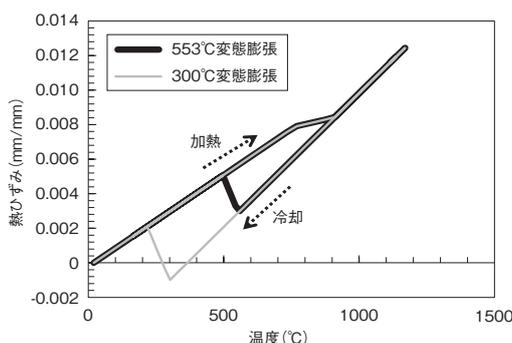
しており、これは13Cr 鋳鋼の変態膨張温度を想定している。

第7図は、変態温度553℃および300℃の材料について、平板表面の溶接線方向および溶接線直角方向応力を溶接止端部からの距離に関して整理したものである。なお、低温側変態の計算でも、溶接時の構造体の温度変化は第2章の熱伝導解析の結果を用いている。第7図(a)より、溶接線方向の残留応力は同様な分布であることが推察されるが、第7図(b)より、溶接線直角方向に関しては溶接止端から10mm程度の領域で応力差が生じていることがわかる。すなわち、変態膨張が低温側で生じる方が残留応力は小さくなっており、溶接止端部で約100MPa低下している。

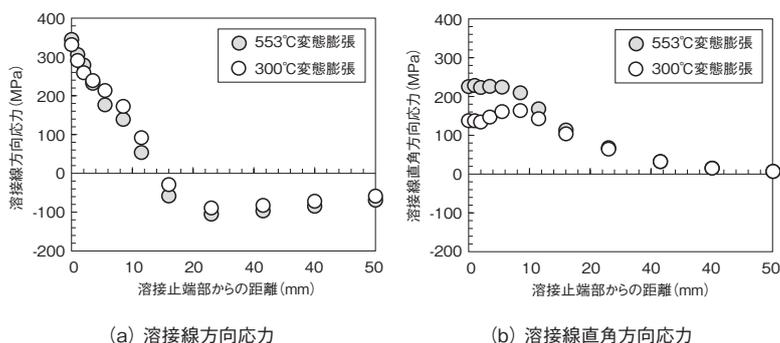
次に、変態開始温度によってなぜ残留応力が変化したかを検討するため、溶接時の応力推移を比較した。

第8図に、19パス目溶接時の溶接線直角方向応力と温度の関係を19パス目止端部から0.5mmの位置で示す。低温側変態の場合、変態膨張開始時には引張200MPaの応力であったが、変態終了後には圧縮150MPaとなっている。この結果、19パス目の溶接終了時には553℃変態温度時との応力値で100MPa程度の差が生じており、これが全溶接パス終了まで影響して、残留応力の差として現れたと考えられる。

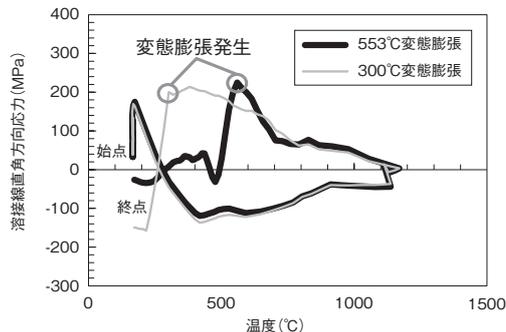
第6図 材料の膨張収縮挙動



第7図 残留応力に及ぼす変態膨張温度の影響



第8図 変態膨張発生時の応力変化 (19パス目溶接止端部から0.5mm位置)



参考文献

*3) 柴原ほか: 溶接学会論文集, Vol.29 (2011) No.1, p.1
*4) 石原ほか: 溶接学会全国大会講演概要, 第94集 (2014-4) p.200

溶接残留応力を精度よく詳細に推定することはプラント配管や船舶など大型溶接構造物の強度評価において有用であり、当社では計測や数値解析といった手法により顧客ニーズに応じてきた。本稿では数値解析による残留応力計算例を紹介し、試験体レベルに限定されるものの、多層多パス溶接のような複雑な

問題についても対応可能なことを示した。今後は、実際の大型実溶接構造物を対象にするなど、計算の大規模化かつ現象の複雑化がますます進むと思われる*3)。当社ではそのようなニーズにも対応すべく、研究機関との連携も含め、計算技術の開発を推進している*4)。