

氏 名	かめ 亀	た 田	じゆん 純
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	昭和 5 1 年 3 月 2 5 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 機械工学専攻（博士課程）		
学 位 論 文 題 目	高張力鋼溶接熱影響部の脆化に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 鈴木 正彦		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 鈴木 正彦	東北大学教授 小林 卓郎	
	東北大学教授 萱場 孝雄		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

溶接構造物の不安定破壊の事故例は最近いくつか報告されている。構造物の稼働時の脆性破壊事故を未然に防止するには、溶接設計および施行に際して破壊力学的手法を応用した溶接部の靱性評価法の確立が重要な課題となっている。しかしながら溶接継手の靱性評価には、解決されなければならない問題点がいくつか残されている。以下その問題点を要約してみよう。

- (1) 高張力鋼溶接熱影響部の脆化が問題とされているが、微視組織が狭い領域の中で複雑に変化している熱影響部の靱性評価法は明確にされていない。
- (2) 溶接継手部に存在する残留応力は 3 軸性の引張応力となっており、この残留応力による破壊靱性の低下量が正確に見積られていない。
- (3) 原子炉圧力容器などに採用される極厚肉鋼溶接部は、製作過程で必ず溶接後熱処理が実施さ

れる。この溶接後熱処理条件の妥当性は、残留応力の除去の効果および熱影響部組織の局所的な靱性値の変化に対して総合的な検討を加えて判定されなければならない。

(4) 溶接構造物における許容欠陥評価にあたり、上述(1)、(2)および(3)の問題点を明らかにした上で欠陥の位置および形状を定めなければならない。

本論文においては以上4つの問題点を解明し、溶接設計に有用な高張力鋼溶接熱影響部の小型試験靱性評価法を提案するものである。

第2章 多層盛高張力鋼溶接継手における破壊靱性の微視組織依存性

多層盛高張力鋼溶接継手部(原厚25mm)において、溶接融合境界に隣接する熱影響部組織を、結晶粒径、微視構成要素および組織形成に際し積層ビードにより受ける熱履歴から類別し、それぞれA~Gと名付けた。各組織の存在領域と積層ビードによる熱履歴(A_1 および A_3 変態等温線)との関連性を第1図に示した。溶接止端部近傍にはA~Cと名付けられたマルテンサイト・ベイナイト混合組織が存在しており、板厚内部には積層ビードによる高温の焼戻し処理を受けた中間段階組織および焼戻しマルテンサイト・ベイナイト組織(D, E, FおよびG)が繰返し配列している。

溶接融合境界に隣接する各種熱影響部組織に切欠先端が位置するように十分留意を払って切欠加工された小型曲げ試験片の破壊試験を行ない、破壊靱性値の熱影響部微視組織依存性を明らかにした。その結果溶接止端部近傍に存在する粗大な旧オーステナイト結晶粒径を有するマルテンサイト・ベイナイト組織に著しい靱性の低下が認められる。これに対して板厚内部に繰返しあらわれるD~Gの熱影響部組織は、積層ビードによる高温の焼戻しの効果で優れた靱性値を有している。

第3章 溶接止端熱影響部における平面ひずみ破壊靱性と残留応力

溶接のままの原厚溶接継手の溶接止端部に残存する3軸性引張残留応力の破壊靱性におよぼす影響を破壊力学的手法を用いて明らかにする。

溶接止端部近傍に存在する靱性の低下の著しい熱影響部組織の平面ひずみ破壊靱性値 $K_{I\sigma}(\theta)$ を、残留応力の十分軽減された浅い切欠を有する小型曲げ試験結果から以下の手順で算出した。まず浅い切欠を有する3点曲げ試験片において実験的に求められた塑性応力集中係数R値をもとに止端部組織の限界引張応力を定めた。次に塑性域大きさを介して導入されている限界引張応力と平面ひずみ破壊靱性値 $K_{I\sigma}(\theta)$ との関係式¹⁾を用いて、溶接止端部熱影響部の平面ひずみ破壊靱性値 $K_{I\sigma}(\theta)$ を決定した。この値 $K_{I\sigma}(\theta)$ と残留応力の残存している原厚材の溶接止端部に注目した破壊靱性値 $K_{I\sigma}(\theta)$ ²⁾との比較により残留応力が破壊靱性におよぼす影響を次式で定量化した。

$$K_{IR}(\rho) = K_{IC}(\rho) - K_{IG}(\rho) \quad (1)$$

上式により明らかにされる残留応力の靱性におよぼす影響 $K_{IR}(\rho)$ は熱影響部組織固有の靱性値とは密接な関係を持つ。すなわち高温側では組織固有の靱性値 $K_{IC}(\rho)$ の増加にともなう原厚材の残留応力の緩和を生じ、 $K_{IR}(\rho)$ は低下している。

さらにこの残留応力の靱性におよぼす影響 $K_{IR}(\rho)$ をもとに塑性拘束の考え方を準用し、残留応力の多軸性を表示するパラメータ R_r を

$$R_r = 1 + \ln \left[1 + \frac{0.12}{\rho} \left(\frac{K_{IR}(\rho)}{\sigma_r} \right)^2 \right] \quad (2)$$

によって定義し、溶接上端部熱影響部では R_r が大きいことから止端部組織には 3 軸性の著しい残留応力が存在することを示した。

第 4 章 溶接後熱処理による残留応力除去および溶接熱影響部の脆化

前章まで取扱っている高張力鋼溶接継手において、残留応力の除去を目的とする溶接後熱処理（600℃ 1時間）を施した原厚材の破壊靱性値は、溶接のままの継手の靱性値と比較してそれほど改善されないことが明らかにされた。前章で導入された残留応力評価法を後熱処理された継手の試験結果に適用し、その原因を明らかにした。その結果溶接後熱処理によって 3 軸性の残留応力は軽減されるが、熱影響部固有の靱性値の低下が生じている。溶接後熱処理による熱影響部組織固有の靱性低下は、溶接止端部のみならず板厚内部組織にもみとめられ、粗粒域ほど脆化が著しいことが明らかにされた。

後熱処理による組織固有の脆化を破面観察により検討した。第 2 図(a)に示すごとく溶接のままの継手においてはぎ壁開破面であるが、溶接後熱処理（600℃ 1時間）された継手における粗粒の熱影響部組織には、第 2 図(b)に示される粒界割れが認められる。

第 5 章 極厚肉鋼溶接継手の破壊靱性評価

原子炉圧力容器に用いられる極厚肉鋼（SA533 Grade B-Class1）溶接継手において、前章までに導入された原厚 25 mm の溶接継手の熱影響部組織に注目した靱性評価法を適用し、圧力容器に現用されている溶接後熱処理の是非を検討した。

原厚 165 mm の極厚肉鋼多層盛溶接継手においても、原厚 25 mm の高張力鋼継手と同様に溶接融合境界に隣接して各種熱影響部組織が熱履歴を反映して繰返し規則的に配列していることが判明した。溶接止端部には積層ビードによる焼戻しをうけていない粗大な旧オーステナイト結晶粒径を有するマルテンサイト・ベイナイト組織が存在している。この溶接止端部に注目した原厚材の破壊試験においては、残留応力の影響を含む熱影響部の靱性の評価が可能であり、原厚試験は後熱

処理の是非を総合的に判断する基本となる。600℃ 40時間焼鈍材は中間焼鈍材と比較して原厚試験による靱性値が向上している。この原厚材の靱性試験の結果の具体的な内容を明らかにするため小型曲げ試験を行ない、残留応力の靱性におよぼす影響および組織固有の靱性値の変化が検討された。

残留応力の影響として、原厚材の-196℃における破壊に対しては破壊靱性値の低下量を評価し、-100℃における原厚材の大規模降伏をとまなう不安定破壊に対しては限界切欠開口量を求め、これらの量によって溶接後熱処理による残留応力除去の効果が相対評価された。その結果40時間焼鈍材においては残留応力の影響は存在しないことが明らかにされた。

一方熱影響部組織は粗粒域において、40時間の長時間後熱処理により粒界弱化による靱性の低下を生じている。しかし限界切欠開口量の温度依存性および破面様相の粒界から延性への遷移挙動、それに加えて前述の残留応力の除去の効果を考え合せて、現行の後熱処理条件は妥当であると評価された。

第6章 溶接熱影響部組織靱性評価法とその検討

溶接構造用高張力鋼の溶接部設計に不可欠な試験要項をフローチャートとして第3図にまとめている。この図の中で一点鎖線で囲まれた枠内の各種試験および判定は、本論文で取扱った原厚2.5mmおよび16.5mmの2種の多層盛溶接継手の熱影響部に注目した靱性試験に基づくものであり、これまでの溶接部靱性評価試験では明確に指示されていない試験項目である。これらの項目は大型あるいは実物試験の実施以前に十分検討されなければならないものである。なおこの靱性試験項目は、原厚試験、小型試験および破面観察からなっており、それぞれの結果と解析方法に特徴があるので対処すべき問題に応じて単独あるいは2~3併用して解析をおこなわねばならない。

フローチャートにまとめられた小型試験靱性評価法から明らかにされる溶接熱影響部の靱性および実構造物の破壊をより現実に近い形で再現可能な角変形付き広幅試験結果をもとにして、構造物の限界欠陥の位置および形状に対して考察を加えた。

本論文で取扱った原厚2.5mmの高張力鋼継手の靱性試験で明らかにされたごとく溶接止端部には靱性の低下の著しい熱影響部組織が存在しており、それに加えて3軸性引張残留応力が重畳して働いているため、溶接止端部は脆化の著しい領域となっている。したがって溶接部の欠陥評価にあたり、脆化域の靱性値に十分な配慮が行なわれねばならない。本章では角変形を有する広幅継手の溶接止端部欠陥(深さ1mm)において、従来えられている靱性値および脆化域の靱性値にもとずき推定される破壊応力の温度依存性を、それぞれ破線および実線で第4図に示す。この図から従来の靱性値では低温においてのみ低応力破壊を生じる可能性があるが、脆化域の靱性を考慮に入れると室温付近においても十分長い欠陥があれば止端部欠陥から脆性破壊に至る危険性が

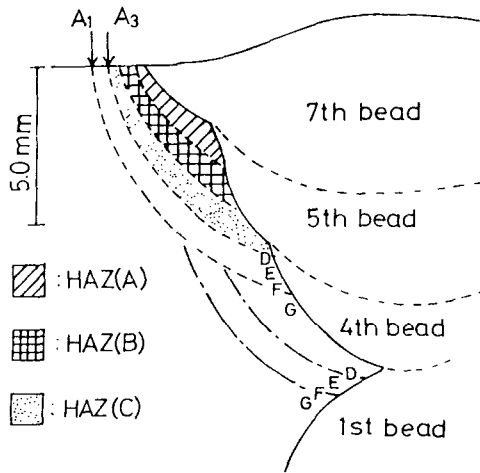
があることが明らかにされた。

第 7 章

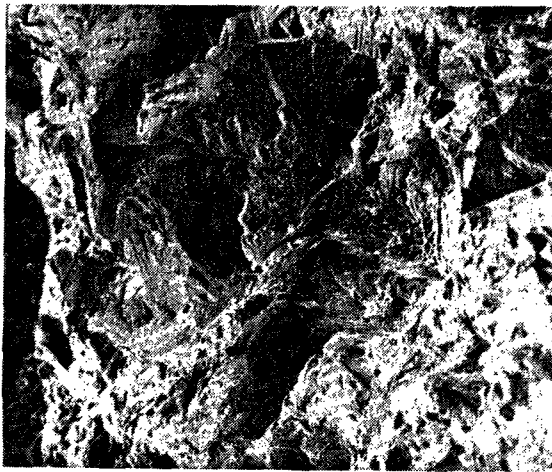
本論文でえられた結果を各章ごとにまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) T. W. Wilshaw, C. R. Ran and A. S. Tetelman; Engr. Pract, Mech., Vol. 1
(1968) 191.
- 2) 長谷川, 高橋, 鈴木 ; 溶接学会誌 Vol. 44, No. 4 (1975) 317.



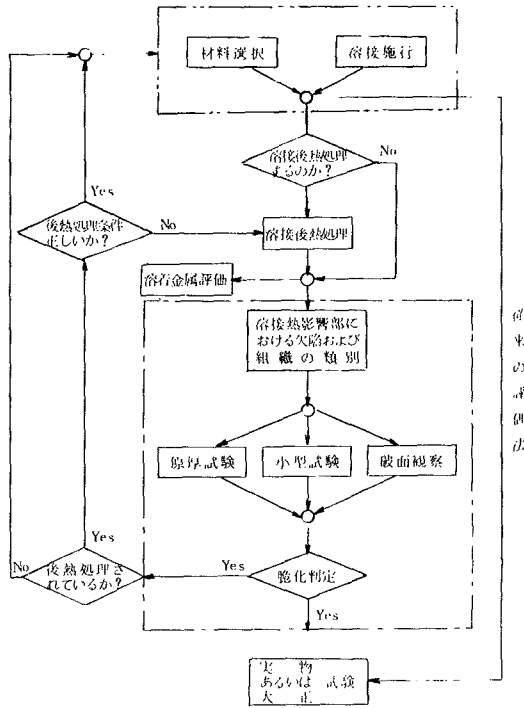
第1図 多層盛高張力鋼溶接継手における熱影響部組織と積層ビードによる熱履歴との関係



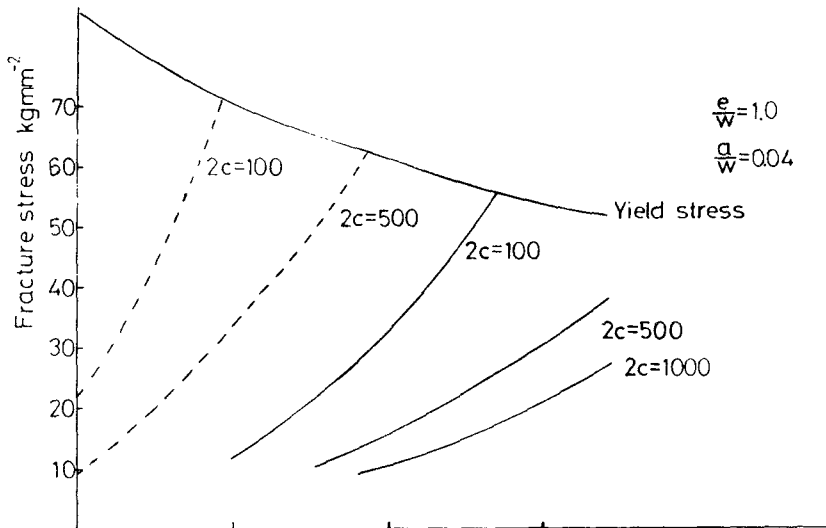
第2図 破面観察
(a) 溶接のままの継手の止端部熱影響部のぎへき開破面



(b) 溶接後熱処理(600℃ 1時間)された継手の止端部熱影響部の粒界破面



第3図 溶接設計に必要とされるフローチャート



第4図 角変形付き表面切欠広幅試験における破壊応力におよぼす切欠長さおよび靱性値の影響

審査結果の要旨

溶接構造物の不安定脆性破壊は、構造物の大型化にともなってその影響するところが多く、破壊事故防止対策は極めて重要な問題である。本論文は溶接構造物の破壊に対して大きな影響をもつ高張力鋼溶接熱影響部に注目し、溶接継手の靱性評価を論じたものであり、6章よりなる。

第1章は序論であり溶接継手の靱性評価について残されている重要な問題点を指摘し、破壊事故防止の上からこれら問題点の解明が重要であることを述べている。

第2章では原厚25mmの高張力鋼多層盛溶接継手熱影響部組織を結晶粒度及び微視構成要素によって類別し、破壊靱性の微視組織依存性を明らかにしている。これは溶接継手の靱性評価に対する重要な知見である。

第3章では溶接のままでの原厚溶接継手における残留応力の影響を、原厚継手の破壊靱性値の低下としてとらえるとともに、残留応力の多軸性をしめす量を導入している。これより熱影響部止端部では3軸性残留応力が強大であり、破壊靱性値に対して大きな影響を与えていることを明らかにしている。

第4章では前章で導入された残留応力評価法を用い熱影響部の各組織に及ぼす溶接後熱処理の効果を検討している。後熱処理によって残留応力は軽減される反面同時に組織の脆化がもたられるが結晶粒度の小なる組織ほど後熱処理による脆化をきたさないものであることが明らかにされている。この結果は溶接継手靱性の向上に資する上で有用である。

第5章は発電用原子炉圧力容器に用いられる厚さ165mmの高張力鋼溶接継手について熱影響部微視組織に注目し、原厚溶接継手材の破壊靱性に及ぼす実用溶接後熱処理の効果を検討したものである。この熱処理は熱影響部組織固有の靱性に低下をもたらすが、残留応力緩和の点では著しく有効であり、本材における実用後熱処理条件は満足すべきものであると結論している。

第6章では前章までに得られた結果を総合して高張力鋼溶接熱影響部組織の靱性評価法に対して検討を加え、溶接構造用高張力鋼の溶接部設計に必要な靱性試験要項をフローチャートにまとめた。さらにこれら試験要項を考慮に入れて従来行われている溶接継手広巾試験の結果について考察し、角変形に加えて熱影響部止端部の靱性が著しく低い溶接継手を用いる場合には、表面欠陥が浅いものであっても低応力破壊の危険性のあることを述べている。これは大型溶接構造物の安全性に対する重要な指摘である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、高張力鋼多層盛溶接継手について熱影響部組織の局所的な靱性を考慮し靱性評価を行ったものであって、機械工学ならびに溶接工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。