

3-3

溶接継手強度の基礎*



大畑 充**

Strength of Welded Joint*

by OHATA Mitsuru**

キーワード 溶接継手, 静的強度, 応力・ひずみ集中, 残留応力, 強度的不均質

1. はじめに

溶接構造物においては、構造として期待する強度や変形レベル以前で打ち切られてしまうような破断や破壊が生じることはあってはならず、必要な強度や剛性などの性能を維持しつつ、所定の期待される機能を満足させなければならない。従って、溶接構造設計の基本は、構造物の使用環境に応じてどのような損傷が起こりうるかを想定し、損傷の条件を設定して継手に生じる応力・変形が設定した値以下になるように、材料を選定し、部材寸法を決定することになる。対象溶接構造や想定される損傷形態によって、各種の設計規格、規準や設計指針が策定されており、その適用を受ける構造物にあってはそれらを遵守しなければならない。例えば、船舶および橋梁では静的強度に加え、脆性破壊の防止や、繰返し荷重による疲労破壊の予防や耐候性を考慮した設計が求められる。また、建築鉄骨では静的強度が主であるが、兵庫県南部地震以後は、激震下における脆性破壊の防止を考慮した設計/施工の必要性が指摘されている。

一方、溶接構造物の「強度」は、一般に溶接部の「強度」で決まることが多いことから、所定の強度、性能・健全性を確保するためには、溶接部の「強度」を支配する要因を十分に把握した継手部の設計・施工、さらには材料選定が重要となる。

本稿では、溶接構造設計を行う上で考慮すべき溶接継手の「強度」である静的強度（動的強度）、疲労強度ならびに破壊強度特性のうち、最も基礎的な静的強度を取り上げ、溶接継手部に特有の様々な力学的特徴が継手強度にどのように影響するか、またなぜそのような影響を受

けるかについて分かりやすく概説する。なお、疲労強度や破壊強度の基礎や、ここで取り上げた溶接部の力学的特徴がそれらの強度特性に及ぼす影響については、別号にて詳細に解説されるのでそちらを参照されたい。

2. 溶接継手部の力学的特徴と継手強度への影響因子

一般に、構造物の製作に溶融溶接を用いるとき、溶接時に「熱」が与えられる。それも局部的に材料の融点以上、あるいはそれに近い加熱が行われるため、溶接部は巨視的に均質と考えられる構造部材としての材料（溶接継手では「母材」とよばれる）とは異なった材質となることが避け難い。従って、継手の「強度」は、このような溶接に伴う特性変化の影響を大きく受ける。

図1は、鋼溶接継手部の主な力学的特徴をまとめたものである。一般に、構造部材を溶接により組み立てる場合には、必然的に溶接部は構造的な不連続部となり、これが応力（ひずみ）集中をもたらし、さらに、溶接部近傍においては、前述の理由から力学的特性の変化は避けられず、その特徴を大別すると、

- ① 材質変化に伴う強度・延性などの強度的不均質の存在（韌性的な不均質も存在）、
- ② 溶接欠陥、継手の形状的な不連続などによる応力（ひずみ）集中源の発生、
- ③ 溶接残留応力の存在、

などに分けられる。

これらの溶接部に特有の力学的特徴が、継手の静的強度（あるいは動的強度）、疲労強度および破壊強度（脆性破壊強度）に影響を及ぼすが、その影響度を整理すると表1のようになる。本稿では、継手の静的強度に焦点を絞り、継手強度を支配する溶接部の力学的特性の影響について、具体的な実験の根拠とともに、理論的、数値解析的検討に基づく機構にも触れながら解説する。

* 原稿受付 平成20年8月12日

** 正 員 大阪大学大学院 工学研究科 Member, Osaka University Graduate School of Engineering

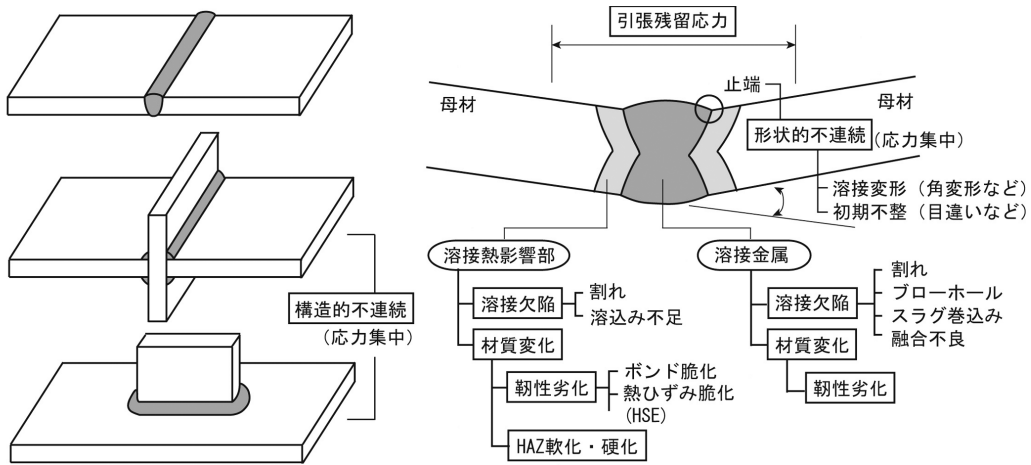


図1 鋼溶接部の力学的特徴

表1 継手強度に影響を及ぼす主な因子とその影響度

		静的強度 (動的強度)	疲労強度	破壊強度 (脆性破壊強度)
応力・ひずみ 集中源	溶接欠陥	△	◎	◎
	形状的不連続	△	◎	◎
溶接残留応力		-	◎	○
材質変化	強度的不均質	△	△	△
	脆性劣化	-	△	◎

—：影響が比較的小さい
 △：条件によっては影響がある
 ◎，○：影響が大きい

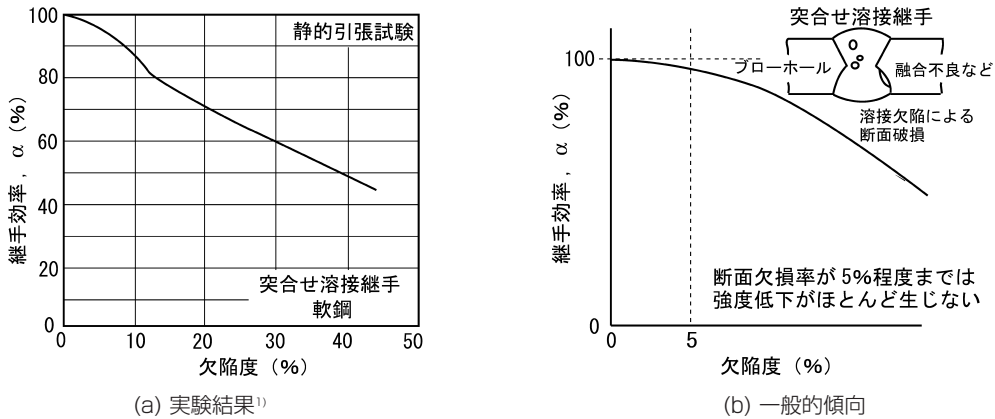


図2 完全溶込み突合せ溶接継手の継手効率に及ぼす欠陥率の影響

3. 溶接継手の静的強度

3.1 継手効率と溶接欠陥の影響

一般に、溶接継手の引張強度の程度は、母材の強度に対する比で表される次式の継手効率 α で評価されることが多い。

$$\alpha = \sigma_T^I / \sigma_T^B \quad (1)$$

ここで、 σ_T^I ：継手の引張強度、 σ_T^B ：母材の引張強度で、この α の値は必ずしも 1 (=100%) にならないのが溶接継手の静的引張強度の特徴である。

一般に、突合せ溶接継手（完全溶込みの場合）の場合、

溶接金属の強度は母材の強度よりも50~100 MPa程度大きい、いわゆるオーバーマッチ継手が普通である。したがって、通常の突合せ溶接継手では、継手強度は母材と同等、すなわち $\alpha = 100\%$ となる。しかし、溶接部に著しい欠陥が存在する場合には、継手効率が100%以下となる場合がある。図2(a)は、軟鋼を対象に、ブローホール、スラグ巻込みや融合不良など、立体的な丸みを帯びた欠陥が存在する場合の欠陥率（破断面積に占める欠陥の面積率）と静的強度の関係を示したものである¹⁾。(b)図にその傾向をまとめるように、継手の静的引張強度は比較的、溶接欠陥度に鈍感であり、欠陥度が5%程度までは強度低下がほとんど生じない。

3.2 形状的不連続の影響

溶接構造物では、巨視的に見ても構造的な不連続は避けがたく、巨視的応力集中が生じるが、さらに、溶接部特有の形状的不連続のために生じる比較的局所的な応力集中源が存在する(図1参照)。図3は、溶接継手の代表的な「突合せ溶接継手」と「すみ肉溶接継手(荷重伝達型)」を取り上げ、一様な引張り外荷を受ける場合の溶接部の応力分布を定性的に示してある。

突合せ溶接継手の余盛止端部では、応力集中係数(平均的な応力に対する集中応力の大きさ)は1.2~3程度(溶接材料や溶接法に依存する)になるが、継手の引張強度を低下させるようなことはない。

一方、すみ肉溶接継手は幾何学的にも複雑な形状をしており、引張り荷を受けるとルート部や余盛止端部に大きな応力集中が生じ、溶接金属内で応力分布が生じる。そのため、継手の強度は突合せ継手の場合に比べて一般に劣る。

すみ肉溶接継手の強度は、通常、式(2)で示すように、応力分布に起因してどの断面で破断(あるいは全面降伏)が生じようとも「どの断面当たりの強度」で表される。

$$\sigma^j = P/al \quad (2)$$

ここで、 P : 継手の降伏荷重または破断荷重、 a : のど厚、 l : 溶接長

この継手強度(降伏強度または引張強度)は、一般に式(3)で与えられる。

$$\sigma^j = \alpha \times \sigma^w \quad (3)$$

ただし、 α : 応力集中特性によって決まる継手形式および荷重の種類によって決まる係数

σ^w : 溶接金属の引張強さ(または降伏応力 σ_Y^w)

簡単な材料力学的手法に基づくくと、引張り荷を受ける等脚すみ肉継手の強度 σ_Y^j (降伏強度)は、図4から、この断面に作用する応力場が降伏条件(Misesの降伏条件)を満たすときと想定すると、次式のように求められる。

$$\sigma_Y^j = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_Y^w \approx 0.7 \sigma_Y^w \begin{cases} \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau_n^2} = \sigma_Y^w & \text{(降伏条件)} \\ \sigma_Y^j = P/2al & \text{(継手の降伏強度)} \end{cases} \quad (4)$$

実際には、すみ肉部の降伏や破断は、引張り外力の方向に対して20~30°傾いた断面で生じることから(溶接金属の強度が母材の強度に比べて極端に大きくない場合)、厳密にはこのような単純計算では評価できないが、図5に示すように、降伏断面を考慮した厳密な理論計算に基づいた結果²⁾(図中、すみ肉角度 $\theta_f = 45^\circ$ のとき)と比較的良好一致を示す。

すみ肉溶接継手の降伏強度は、図6に示すように、脚長の影響をほとんど受けないことが実験的に得られている³⁾。しかし、引張強度には脚長の影響が見られ、脚長が極端に小さい場合には、材料の引張強さにはほぼ一致するが($\alpha_T = 1$)、20mm以上となると引張強度は低下し、材料の引張強さの約0.8倍($\alpha_T \approx 0.8$)で一定となる。これ

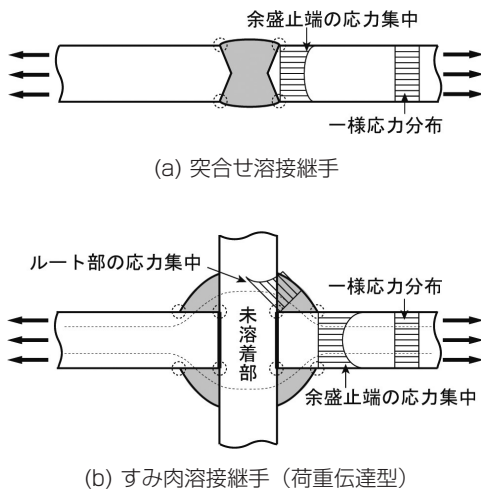


図3 引張り荷を受ける溶接継手の応力集中の例

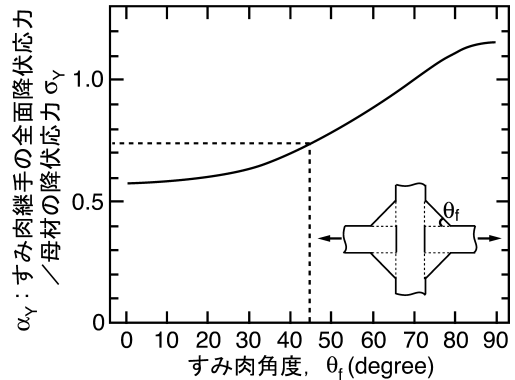


図5 すみ肉継手の全面降伏強度の理論計算結果²⁾

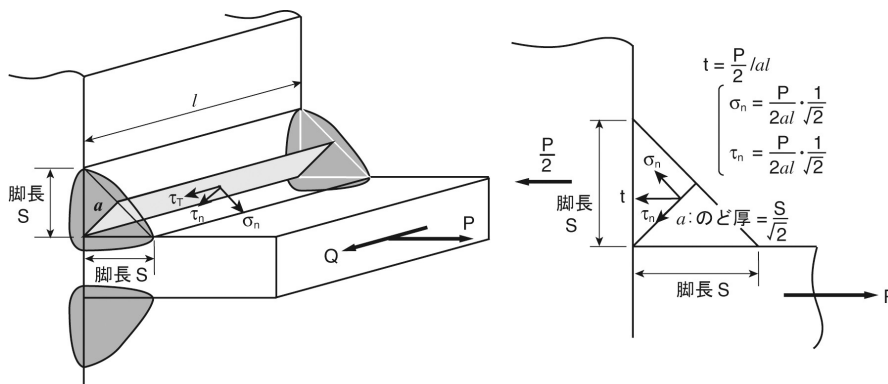


図4 等脚すみ肉溶接継手に生じる応力

は、脚長が大きくなると、すみ肉部において荷重を分担する領域が相対的に小さくなるのが原因する。

表2に、引張り荷重を受けるすみ肉溶接継手の実験および理論的研究により得られている降伏強度比および引張強度比を総合してまとめている⁴⁾。側面すみ肉溶接継手においては、破断はすみ肉溶接部ののど断面でせん断により生じ、その強度は溶接金属のせん断強度と概ね等しくなる。

3.3 残留応力の影響

溶接部近傍には、一般に溶接線方向に降伏点レベルの引張残留応力が生じているが、この残留応力は溶接線方向に引張荷重を受ける場合の静的強度や破断延性にはほとんど影響を与えない⁵⁾。溶接残留応力の生成機構やその特徴については、別号にて詳細に解説されるのでそちらを参照されたい。

図7は、一例として、残留応力分布 $\sigma_r(0)$ をもつ突合せ溶接継手に、一様な荷重を与える（一様なひずみ ϵ が作

用する）場合の継手の応力・ひずみ挙動を示している。一様な引張りひずみを受けると、初めのうちは一様に応力が増加するが、引張残留応力が存在している領域は直ちに材料の降伏応力に達し、応力分布は曲線(1)のようになる（この領域ではみかけの降伏応力が低下している）。さらに荷重を与えると、既に塑性化した溶接部では応力が材料の降伏応力程度に保たれながら、徐々に塑性域が拡大して曲線(2)のようになるが、継手の平均応力（荷重／総断面積）・ひずみ曲線の勾配は残留応力の無い場合よりも小さくなる。しかし、この状態では、継手全体としての大きな変形はなく、継手全体で大きな変形を生じ始めるのは全断面降伏に達したときである(3)。このときの継手の平均応力である全面降伏強さ σ_Y^J は、見かけの降伏応力 $\sigma_{Ya} = \sigma_Y - \sigma_r$ の平均値に等しく、残留応力の自己平衡性から式(5)で与えられる。

$$\sigma_Y^J = \frac{2}{W} \int_0^{W/2} (\sigma_Y - \sigma_r) dx = \frac{2}{W} \int_0^{W/2} \sigma_Y dx \quad (\because \int_0^{W/2} \sigma_r dx = 0) \quad (5)$$

このように、継手の降伏応力は残留応力には無関係で、横断面上の各部の材料の降伏応力 σ_Y の平均値に等しい。また、継手の引張強度や破断延性も残留応力の無い場合とほとんど変わらないことが確かめられている。

3.4 強度的不均質の影響

実溶接構造物では、継手部における溶接金属の強度が母材の強度よりも高いオーバーマッチ継手が採用されるように、一般に、溶接継手部には巨視的に見て強度的な不均質が存在する。さらに、前述のように、溶接熱影響部においても材質変化に伴い強度・延性などが変化し、一般に強度的不均質の存在は避けられない。このような強度的不均質の存在が継手の静的強度にいかに関与するか、またどのような条件下で影響がでるのかを把握しておくことが、継手設計上、重要となる。

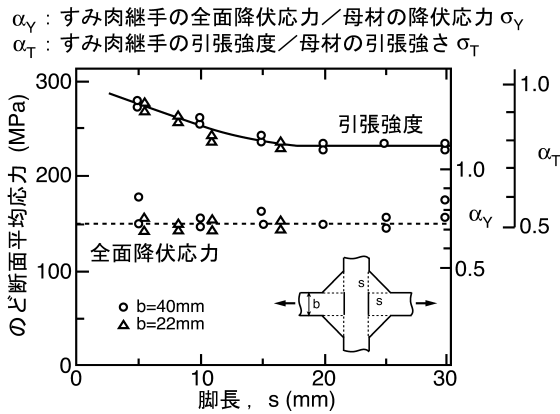


図6 すみ肉継手の降伏強度および引張強度に及ぼす脚長の影響の実験結果³⁾

表2 引張りを受けるすみ肉継手の強度比⁴⁾

		十字すみ肉溶接継手	側面すみ肉溶接継手
降伏強度比	$\alpha_Y = \sigma_Y^J / \sigma_Y^W$	0.7 ~ 0.75 (0.73)*	0.61 ~ 0.64
引張強度比	$\alpha_T = \sigma_T^J / \sigma_T^W$	0.7 ~ 0.85 (0.76 ~ 0.84)*	0.55 ~ 0.6

* 理論計算値

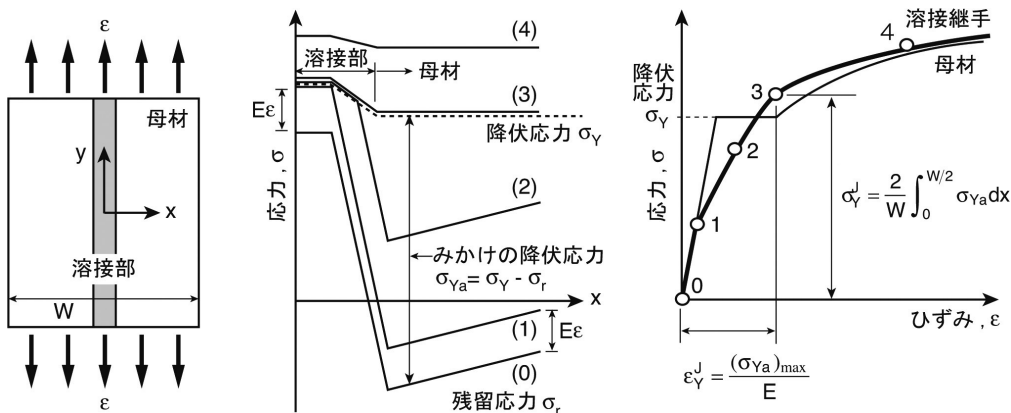


図7 残留応力をもつ突合せ溶接継手の応力・ひずみ挙動

不均質材の静的強度の決まり方を大別すると表3に示す二つの形態に分けられる。

以下にこれらの強度形態の特徴と支配要因について概説する。

(1) 混合則型の強度形態

いくつかの異なる強度をもつ材料からなる継手の強度 σ_T^J が、各材料の強度 σ_T^i とその体積率 V^i のみによって式(6)で表されることを、混合則に従うという。

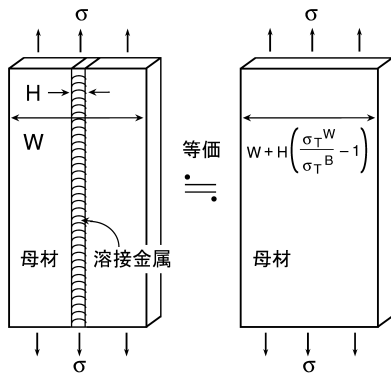
$$\sigma_T = \sum_i^n \sigma_T^i V^i \quad (6)$$

溶接継手において、このような混合則に従うものとして、図8に示すように継手が溶接線方向に引張り負荷(縦引張り)を受ける場合がある。この場合、母材の応力-ひずみ関係を $\sigma^B(\epsilon)$ 、溶接金属のそれを $\sigma^W(\epsilon)$ とすると、継手全体の平均応力-ひずみ関係 $\sigma^J(\epsilon)$ は、

$$\sigma^J(\epsilon) = \frac{H}{W} \sigma^W(\epsilon) + (1 - \frac{H}{W}) \sigma^B(\epsilon) \quad (7)$$

表3 強度的不均質材の静的引張強度を決める強度形態とその特徴

強度形態	特徴	継手形態
① 混合則型	不均質継手を構成する各材料の強度と体積率で強度が決まる	溶接線方向に外負荷が作用する場合
② 変形拘束型(塑性拘束型)	低強度部の変形が拘束され、低強度部が多軸応力状態となることが強度を支配する	溶接線方向に直角に外負荷が作用する場合



σ_T^B : 母材の引張強さ
 σ_T^W : 溶接金属の引張強さ

図8 縦引張りを受ける溶接継手

と書ける。これより、継手の降伏強さ σ_Y^J は、

$$\sigma_Y^J = \frac{H}{W} \sigma_Y^W + (1 - \frac{H}{W}) \sigma_Y^B \quad (8)$$

となる。このように、継手引張強度について混合則が成り立つということは、溶接継手は設計上、板幅 $[W+H(\sigma_T^W/\sigma_T^B)-1]$ の均質母材として取り扱えることを意味している(図8中参照)。

一方、継手の引張強度は、両材の加工硬化指数に依存する。図9(a)に示すように、加工硬化指数(図では真応力 s -真ひずみ e 関係がLudwikの式 $s=ke^n$ に従う場合の n を用いて表示)がほぼ等しい場合には、継手強度も混合則に従う。一般には、強度が高いほど加工硬化指数は小さく、この場合には同図(b)に示すように、応力-ひずみ関係は混合則に従うものの、継手強度については厳密には成り立たない。しかし、図10に示すように、400MPa級および780MPa級の鋼溶接継手について実験で調べられた継手引張強度はほぼ混合則で決まっております⁶⁾、工業的

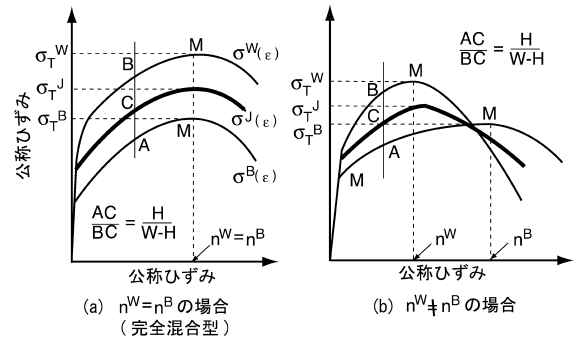


図9 縦引張りを受ける強度的不均質継手の応力-ひずみ関係と混合則

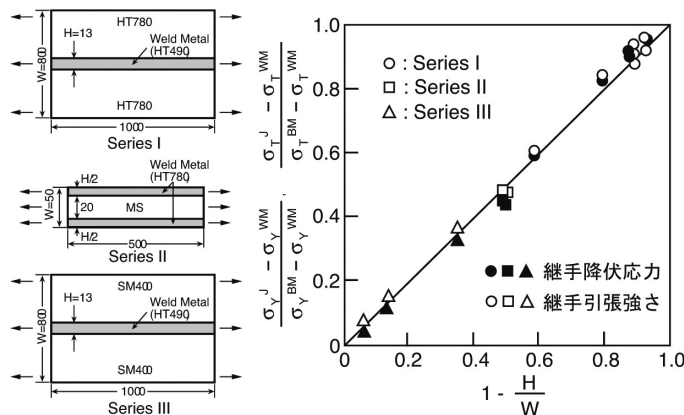


図10 縦引張りを受ける強度的不均質継手の強度⁶⁾

には縦引張りを受ける強度的不均質継手の強度はほぼ混合則に従うと考えてよい。

(2) 変形拘束型 (塑性拘束型) の強度形態

一般に、溶接金属の強度が母材強度よりも高いオーバーマッチ継手が、溶接線に垂直に引張り負荷を受ける場合の継手強度は母材の引張強度と同等になる。しかし、逆にアンダーマッチ継手 (溶接金属強度 < 母材強度)、あるいは溶接金属の強度が母材強度と同程度以上であっても溶接熱影響部 (HAZ) が軟化した継手においては、継

手強度は母材強度より低下する場合がある。このような低強度部を含む継手の強度を支配する因子は、

- ① 低強度部の相対厚さ X_h (= 低強度部厚さ H / 継手板厚 h)
- ② 継手の幅厚比 W/h (W : 板幅, h : 継手板厚)
- ③ 軟質度 S_r (= 低強度部の引張強さ σ_T^S / 母材の引張強さ σ_T^B),

の三つであり、相対厚さ X_h が小さいほど、幅厚比 W/h が大きいほど、また軟質度が S_r が大きいほど継手強度 σ_T^J

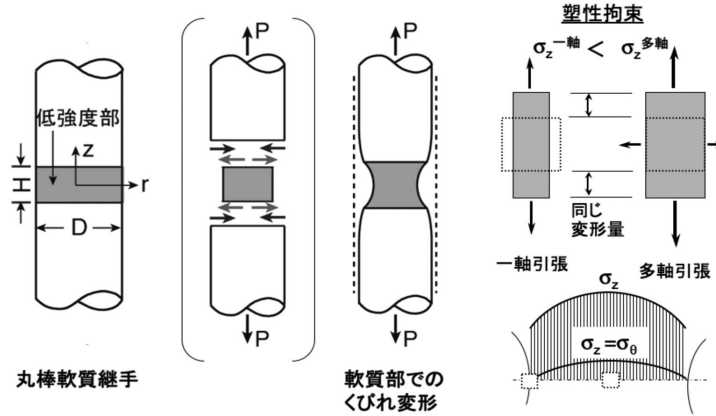


図11 低強度部を含む丸棒継手の引張変形挙動と塑性拘束

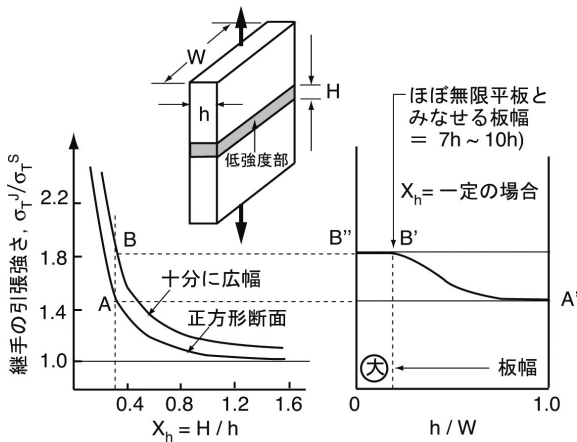


図12 低強度部を含む継手の引張強度に及ぼす板幅の影響⁷⁾

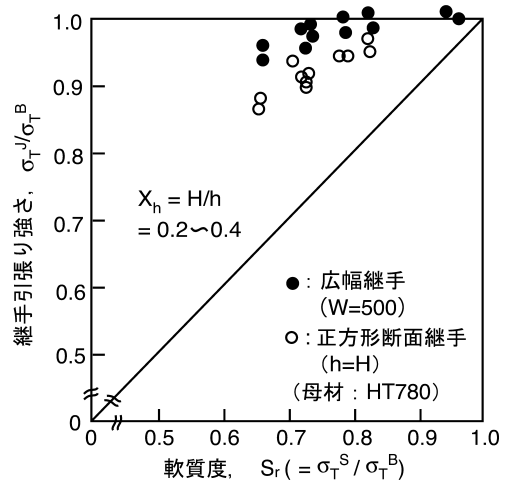


図13 低強度部を含む継手の引張強度に及ぼす軟質度の影響⁸⁾

$$\sigma_T^J = \begin{cases} \sigma_T^S \cdot \left[\frac{1}{13.2} \cdot \frac{1}{\{(X+X_1)/2\}^{1.3} + 0.976} \right] & : X \leq X_1 \\ \sigma_T^S \cdot \left[\frac{1}{13.2} \cdot \frac{1}{X^{1.3} + 0.976} \right] & : X > X_1 \end{cases}$$

$$X_1 = 2 \cdot \left\{ \frac{1}{13.2(1/S_r - 0.976)} \right\}^{1/1.3}$$

(a) 丸棒継手

$$\sigma_T^J = \begin{cases} \sigma_T^S \cdot \left[\frac{1}{3.86} \cdot \frac{1}{\{(X_h+X_2)/2\}^{0.8} + 1.0} \right] & : X_h \leq X_2 \\ \sigma_T^S \cdot \left[\frac{1}{3.86} \cdot \frac{1}{X_h^{0.8} + 1.0} \right] & : X_h > X_2 \end{cases}$$

$$X_2 = 2 \cdot \left\{ \frac{1}{3.86(1/S_r - 1.0)} \right\}^{1/0.8}$$

(b) 十分広幅の継手

図14 低強度部を含む継手の引張強さの評価式^{6), 8)}

は大きくなる。これは、図11に丸棒継手を例に示すように、与える負荷レベルが低強度材の降伏応力を超えると、低強度部の塑性変形が隣接する高強度材によって拘束され（この現象を変形拘束あるいは塑性拘束という）、低強度部では多軸応力状態となることに起因している。つまり、低強度部において同じ変形量（塑性変形）を生じさせるのにより大きな引張り方向応力が必要になり、結果として継手の引張強度が大きくなる。なお、図12に示すように、幅厚比 $W/h > 7 \sim 10$ となると、継手強度 σ_T は板幅が十分に大きな継手（広幅継手）の強度とほぼ等しくなる⁷⁾。また、相対厚さにもよるが、図13に示すように、軟質部 S_T が約85～90%以上になると広幅継手の引張強度は母材強度とほぼ同等となる⁸⁾。

このような実験および強度解析の結果を基にして、図14に示すような低強度部を有する継手の引張強度を評価する簡便式が提案されている^{6, 8)}。

4. おわりに

本稿では、溶接継手部に特有の様々な力学的特徴を述べ、溶接構造設計を行う上で考慮すべき溶接継手の「強

度」である静的強度に及ぼす影響についてその機構に触れながら分かりやすく解説した。溶接継手設計を行うための各種の設計規格・規準や設計指針が策定されているが、その根拠や技術的背景を理解することは重要で、本稿が一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 渡辺, 蒲地: 溶接学会誌, 20 (1960), pp.376.
- 2) 佐藤, 瀬尾: 局所収縮理論にもとづくすみ肉溶接継手の強度解析, 溶接学会誌, 41, 4 (1972), pp.403-414.
- 3) 佐藤: 引張りをうける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度 (第2報) —脚長および溶込み量の影響, 溶接学会誌, 41, 4 (1972), pp.385-393.
- 4) 佐藤: 引張りをうける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度 (第1報) —すみ肉形状の影響, 溶接学会誌, 41, 4 (1972), pp.260-272.
- 5) W. Wilson, C. Hao: Residual Stress in Welded Structure, *Welding Journal*, 26, 5 (1947), pp.295s.
- 6) 豊田政男: 低強度溶接金属をもつ溶接継手の静的引張特性に関する研究, 大阪大学博士論文 (1973).
- 7) 佐藤, 豊田, 藤井: 軟質溶接継手の静的引張強度に関する研究, 日本造船学会論文集, 132 (1972), pp.381-393.
- 8) 日本溶接協会, 鉄鋼部会 SJ 委員会総合報告書: 軟質溶接継手の力学的挙動と強度に関する研究 (1975).