実 用 講 座

すみ肉溶接部の強度はどのようにして決まるか*

The Scope of Fillet Weld Strength*

橋 本 健 一**, 田 沼 吉 伸***

by Kenichi Hashimoto** and Yoshinobu Tanuma***

キーワード：すみ肉溶接，前面すみ肉，側面すみ肉，斜方すみ肉，両面当金継
手，十字継手，溶接施工管理，信頼性，破断現象，強度評価式

1. は じ め に

すみ肉溶接は，その名のとおりに接合材にグループ等の一切の加工無しに，接合材の隅に溶着金属を盛って継目を造る方法である。準備工作の要らないこのすみ肉溶接は，その利点のため利用価値が高く，多方面で使われている溶接継目である。その一方利点とは逆に，すみ肉溶接は継目の持つ不確定要因が多岐にわたるため信頼性に欠けるのか，構造物の重要な接合部には用いられていないのも事実である。

1970 年制定の日本建築学会の鋼構造設計規準は，応力の伝達できる溶接継目は，突合せ溶接，すみ肉溶接及び部分溶込み溶接による 3 つの継目，としている。しかし，主要な柱はり接合部のフランジ等の溶接は，構造規模に係わらず骨組の変形能力を確保し不良施工を排除する目的で，専ら突合せ溶接継目に限られて使用されている。以来，すみ肉溶接は何とはなしに「劣った溶接」のイメージが定着しているように考えられる。この理由は，すみ肉溶接の施工の容易さに比較して，応力伝達機構及び変形性状

の煩雑さ，破断現象の不確定さ，複雑な溶接部形成要因等，力学的性状の把握の困難さが挙げられる。1920～1940 年頃の溶接技術の発達の初期に，すみ肉溶接の静的強さに関する多くの研究が行われ，応力分布状態の把握及び破断状況の観察等により，一応の目処がつけられた。その後，溶接棒等の材料や溶接法の改良及びより高度な設計法の要求により，破壊機構の解明を中心に，1960～1970 年頃に再度盛んに研究が成された。これは，I. I. W. (国際溶接学会) による国際的に共通した設計方法を確立することを目的とした活動が，引金となったとも考えられる。更に，1980 年代後半からは，I. I. W. の研究成果を基に，数々の検討が加えられ現在に至っている。しかし，未だ，すみ肉溶接に係わる種々の問題が解明されていない状況にあると言える。溶接技術の発達初期に得た成果に比べると，近年の遅々とした進歩は寂しいが，すみ肉溶接の持つ多くの複雑な因子を考えると，やむを得ない状況と言わざるを得ない。

すみ肉溶接が，設計における溶接継目の一つとして突合せ溶接継目と遜色無い取扱を受け，強度上も確たる位置付けが得られる事を目的として本講座に臨む。

2. すみ肉溶接の問題点

すみ肉溶接継目の強さに係わる因子は数多く考え

*原稿受付 平成 4 年 4 月 10 日

**正 員 北海道工業大学 Member, Hokkaido
Institute of Technology*** 北海道工業大学 Hokkaido Institute of
Technology

られている^{1,2)}。又、これらの各因子が互いに独立とは言えず複雑に影響しあつて錯綜していると考えるのが、妥当のようである。その成因から影響因子は次の3つに大別する事ができる。一つは設計に起因する応力の方向と種類、継手の種類、及び継目の形状や寸法、二つ目は材料に起因する母材や溶接材の機械的性質及び溶接性、そして三つ目は、溶接施工に起因する溶込み量、パス数、ルート部やトウ部の又は溶接始末端の温度履歴、及び残留応力の程度等である。以下で、これらを個々に検討する。

2.1 設計に起因する影響因子

すみ肉溶接継目は、一般に接合材(母材)に対して配される形式により呼び名を変えている。前面すみ肉溶接継目は、主板から脚長(サイズ)の範囲の短い区間内で被接合材へ応力を伝達しなければならない。側面すみ肉及び斜方すみ肉溶接継目は、主板から溶接長の範囲の比較的長い区間で被接合材へ応力を伝達する。従つて、接合材と溶接部各々の変形性状(特に塑性変形能力)の相互の差の影響を受け易い。そのため、すみ肉部への応力伝達の大きさは、溶接長さ方向の位置で異なる事になる。図1は、S. C. Hollister & A. S. Gelman³⁾による両面当金継手側面すみ肉溶接継目の力の伝達の様子である。

すみ肉溶接のルート部は、形状上の切欠き部であり、破壊力学で言う図2に示す全ての独立な変形様式を持った問題と考えることが出来る。斜方すみ肉溶接はモードIIとIIIの複合である。延性破壊において、この問題を解くことが容易でないことは周知の事実である。

図1 接合材の応力分布

図2 クラック先端の変形様式

接合材とすみ肉部の各々の存在応力(ひずみ)レベルは、継目の強さに影響を与える。一方が他方を変形拘束することになるからである。当金の厚さ(又は十字板の応力伝達幅)と脚長寸法により当金に生じる付加曲げモーメントも異なる。又、当金と主板の重なり部の摩擦力の存在は、当初より議論されている事である。

すみ肉部の等脚・不等脚等の形状、脚長(のど厚)寸法及び溶接長の影響については、応力集中の観点から、度々議論されている。

2.2 材料に起因する影響因子

すみ肉溶接部は小さな三角柱と考えて良い。二つの脚面は熱影響部及び溶接金属と母材との融合部から成り、他の面は溶接金属と考えられる。又、溶接部各部の冷却過程と融合部の希釈度を一定にすることは不可能といえる。通常のすみ肉溶接ではミルスケールは残存したまま溶接される。従つて、極めて非均質な材となる。しかも、三角柱部分の平均的な機械的性質を実験的に求めることは、非常に困難である。この様に、機械的性質が確かめられずかつ再現性に乏しい事がすみ肉溶接継目の強さの評価を変動させていると言える。

接合材の強度レベルと溶接材の強度レベル関係も影響を与える。特に昨今、JISが存在していながら不十分なためか、接合材と溶接材との強度レベル(特に降伏点)のミスマッチが激しすぎる事は(多くの溶接材がオーバーマッチング)注意を要する。

2.3 溶接施工に係わる影響因子

溶接欠陥等は問題外である。健全な溶接部について、溶接部の溶込み量、特にルート部の溶込み量と、溶接部温度履歴が大きな影響因子と言える。溶接部には溶込みが必要であるが、特にルート部の溶込みは、強度確保の上から溶接の健全性の判断規準ともなっている。すみ肉のルート部は、上述の各項とも係わるが、主材、被接合材(主材と同一鋼の場合もある)及び溶接材の融け合った材質となり、溶接熱拡散の一番大きな部位であるし、すみ肉寸法の大きさ(理論のど厚と実際のど厚の違い)にも影響する。更に、すみ肉のルート部は、形状上の切欠き部であると同時に冶金学的切欠き部でもある。

すみ肉溶接部の冷却速度は、突合せ溶接部に比較して2倍程度早い。又、シングルパスによる場合が多い。多層盛りの場合でせいぜい3パスである。この様に冷却速度が早く、繰り返し熱履歴が少ない結果、溶接部は突合せ溶接に比べ焼入れ効果をより強

く受け、靱性や延性の低下を招く事となる。

凹凸等のビード形状及びビード表面の状態も影響因子と考えられるが、定量的把握は不可能と言える。尚、作用応力が静的な場合、溶接残留応力の強度への影響は少ないと考えられている。

3. 影響因子の評価

既往の研究から、前項の影響因子の強度評価への取扱について考える。但し、最大耐力のみとする。

設計に起因する因子は、溶接部及び境界部の応力分布を調査して、解明が試みられている。前面すみ肉溶接について、G. Bierett と G. Grüning⁵⁾は、軟鋼板 (St37) を機械加工したモデルを使用して、図 3 に示すコタクトゲージで計測した結果を得た。佐藤と瀬尾⁶⁾は、軟鋼板を機械加工した十字継手モデルを使用して、図 4 に示すモアレ法により測定した結果を得た。加藤と森田⁷⁾は、有限要素法により両面当金継手の図 5 に示す数値解析結果を得た。これ等は、前面すみ肉溶接部の応力状態を良く捉えている資料と考えられる。主板と前面すみ肉部の間に作用する付加曲げモーメントは、ルート部の応力集中緩和に有効と考えられる。その点で、当金継手の方が

板同志の摩擦による伝達と併せて十字継手より強いといえる。

側面すみ肉溶接の場合は、その応力伝達機構から、断面内の応力状態より、溶接長方向の応力分布に問題が絞られている。溶接始終端部に応力が集中し、中央部は応力レベルが低い。これは、せん断遅れとして良く知られている⁸⁾。しかし、実用の範囲(鋼構造設計規準では脚長の 30 倍以内)では、降伏後の塑性変形により応力の再配分が行われて、溶接長が長くなっても大きく強度が低下することは無いと考えて良い²⁾。

存在応力レベルの違いは、降伏後の塑性変形による軟化の程度の違いであるから、応力集中の緩和や応力再配分と係わってくる。応力レベルが同じであっても、接合材と溶接部の強度レベルが違う場合にも同じ事が言える。

すみ肉溶接部の機械的性質を定量的に求めることは非常に困難であるから、通常は、全溶着金属の機械的性質をもって溶接部の性質と読み換えている。しかし、すみ肉溶接の場合は、接合材の希釈の影響がより大きいと考え、接合材の強さが 4 割²⁾又は 5 割⁹⁾で、残りが全溶着金属の強さであるとの考え方

図 3 前面すみ肉溶接のひずみ分布

図 4 モアレ法によるひずみ分布

図 5 有限要素法による応力分布

図6 試験体形状・寸法

図7 継目強度比と溶接パス数の関係

も示されている。

すみ肉脚部の溶込みは重要であるが、健全な溶接では十分に溶込みが確保されている。しかし、ルート部の溶込み量を確保するためには慎重さを要する。単なる寸法上の問題に留まらず、溶接部の機械的性質に係わるからである。寸法上だけの問題の時は、実際に計測することは困難を伴うが、実際のど厚を考慮すれば良い²⁾とされている。そこで深溶込み溶接法が採られることもある。深溶込み溶接により応力の伝達機構が変わり、溶込み量を把握できるなら強度上有効である^{10,11)}。

すみ肉溶接は冷却速度が早く、硬化し、溶接部の機械的性質が全溶着金属のそれと異なることは、想像に難くない。しかし、定量的に把握することは困難である。溶接層数を実験因子として筆者が行った実験結果を示す。試験体は図6に示すすみ肉溶接継目 (SM490, JISD5016) で、機械加工により同一形状寸法に仕上げた。1パスのすみ肉は、10 mmの脚長を得るため入熱の大きい施工であった ($\phi 6, 300 \text{ A}$, 7.2 cm/min.)。実際のど断面積で評価すると、図7に示すように5パス以上で、ほぼ全溶着金属の引張強さとなっている。1パスは全溶着金属の1.3倍程度の強度上昇であるが、通常はもっと強度上昇が大きいと考えられる。

4. すみ肉溶接継目の最大強さ

従来から多くの研究者によりすみ肉溶接継目の強度の評価が行われている。しかし前述したように、すみ肉溶接部の強度に及ぼす多数の影響因子は、互いに見え隠れする状況にある。従って、すみ肉溶接継目の強度評価は、高次の不静定問題と考えることができる。既往の幾つかのパラメータを定量的に評価した式は、他のパラメータや範囲を越えたものには適応出来ないのが当然である。その意味で、多国間の共同実験より得られた結果を基にして、I. I. W. が提案した (1) 式 (実験式)⁹⁾は適応範囲が広いと言える。

$$P1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{(1.4 + 0.4 \cdot \cos^2 \theta)}} \cdot \Sigma A_w \cdot \sigma_c / \sqrt{3} \cdots (1)$$

ここに、 θ は作用力の方向と溶接線のなす角、 ΣA_w はのど断面積、 σ_c はすみ肉溶接金属の引張強さである。

現状の溶接材及び構造用鋼材に馴染む強度評価式の例を以下に示す。溶接長の短い側面すみ肉溶接継目は、最小断面 (のど断面) に作用するせん断応力によって決まる (2) 式と考えると問題はない²⁾。長い場合はせん断遅れによる強度低下を考慮する必要があり、H. Troelsch⁹⁾の研究が参考となる。

$$P2 = \Sigma A_w \cdot \sigma_c / \sqrt{3} \cdots (2)$$

両面当金継手の前面すみ肉溶接の場合は、仲・加藤・森田²⁾によって示された (3) 式である。

$$P3 = 1.46 \cdot \Sigma A_w \cdot \sigma_c / \sqrt{3} \cdots (3)$$

十字継手の前面すみ肉溶接の場合は、佐藤・瀬尾がすみ肉溶接部に局部収縮理論を適用して解いた⁹⁾

(4) 式である。(3)、(4)の両式は、共に破壊角度も実験結果と良く適合している。

$$P4 = 1.26 \cdot \Sigma A_w \cdot \sigma_c / \sqrt{3} \cdots (4)$$

斜方すみ肉溶接継目の強さは、側面すみ肉と前面すみ肉との間の強さになる事は示されていたが、適当な評価式は見あたらなかった。(5) 式は、筆者らが A. G. Kamtekar の考え方に基づいて誘導したものの¹²⁾である。側面すみ肉、前面すみ肉及び斜方すみ肉溶接にも適用でき3種類の溶接継目を一本の式で表現できるメリットが (5) 式の特徴¹³⁾である。

$$P5 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1 + \cos^2 \theta)}} \cdot \Sigma A_w \cdot \sigma_c / \sqrt{3} \cdots (5)$$

以上は、全て単一のすみ肉溶接継目の強度評価式で、のど断面積及びすみ肉溶接金属の引張強さ ($\sigma_c / \sqrt{3}$) は von Mises の降伏条件を引張強さまで拡張して

適応させたすみ肉溶接金属のせん断強さとも考えられる)で整理し直したものである。

以上の(1)~(5)式を眺めると、2,3節で述べてきたすみ肉溶接の強度に係わる多くの因子にもかかわらず、すみ肉溶接の単位のご断面積当りの強さは、[熱履歴や希釈をも考慮したすみ肉溶接金属のせん断強さ]と[すみ肉溶接継目の形態(力の作用方向)で決まる係数]とで決定され则认为られる。後者は設計で指定されるから、すみ肉の強さは、如何に一定したレベルの溶接金属を安定的に施工出来るか、又のご断面積(形状寸法)をどれだけ精度良くばらつきを少なく施工出来るか、の溶接技量と溶接技術管理との出来に、強く影響されるということである。結局の所、「すみ肉の強さ」は「溶接施工の能力」と考える。

5. ま と め

すみ肉溶接は安易に多様されるにも拘わらず、その強さの全容が明らかではない。その理由として、溶接施工の不確定要因が大きく左右していると考えている。残念ながら、すみ肉溶接を統計的に取り扱うには、まだまだばらつきが大きすぎる。正当な強度評価式は信頼性の高い溶接施工が生み出すといっても過言ではない。信頼性の高い溶接施工技術を目指して、日頃の研さんを期待する者として、本講座をまとめた。

参 考 文 献

- 1) 太田省三郎『溶接継手の静的強さに関する諸問題』日本機械学会誌, 第 65 巻第 517 号, 昭和 37 年 2 月
- 2) 仲威雄, 加藤勉, 森田耕次『溶接継手の耐力』日本建築学会論文報告集, No. 146, 昭和 43 年 4 月
- 3) S. C. Hollister & A. S. Gelman, A. W. S. Journal, vol. 11, No. 10, 1932
- 4) 木原博, 鈴木春義, 金谷文善『鋼の溶接硬化に関する研究』溶接学会誌, 第 27 巻第 1 号, 昭和 33 年 1 月
- 5) G. Bierett & G. Grüning, Stahlbau, vol. 6, No. 22, 1933
- 6) 佐藤邦彦, 瀬尾健二『引張をうける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度(第 2 報)』溶接学会誌, 第 41 巻第 4 号, 昭和 47 年 4 月
- 7) B. Kato & K. Morita "Strength of Transverse Fillet Welded Joints" Welding Journal, Feb., 1974
- 8) H. Troelsch "Distribution of Shear in Welded Connection" Proc. of ASCE., Nov. 1932
- 9) F. K. Ligtenberg "International Test Series Final report" I. I. W., Doc. XV-242-68, May 1968
- 10) 太田省三郎『深溶込みスミ肉溶接の強度計算について』溶接学会誌, 第 32 巻第 4 号, 昭和 38 年 4 月
- 11) 佐藤邦彦, 瀬尾健二, 樋口元一, 矢田貝隆夫『部分溶込み溶接継手の変形挙動と強度』溶接学会誌, 第 42 巻第 4 号, 昭和 48 年 4 月
- 12) 橋本健一, 田沼吉伸, 鎌田正巳『低温下施工による十字継手すみ肉溶接継目の強度』日本建築学会大会学術講演梗概集 No. 21262~21263, 昭和 62 年 10 月
- 13) 橋本健一, 田沼吉伸『限界状態設計法による鋼構造建築の溶接接合設計』溶接学会誌, 第 59 巻第 8 号, 平成 2 年 12 月

第 14 回自由電子レーザー国際会議

会議の名称: 14th International Free-Electron Laser Conference

開催機関: 平成 4 年 8 月 23 日(日)~8 月 28 日(金)

開催場所: 神戸商工会議所会館

〒650 神戸市中央区港島中町 6 丁目 1 番地
TEL 078-303-5804

主 催: 財団法人 レーザー技術総合研究所

会議内容: 自由電子レーザーの①理論②実験③開発計画
④新概念⑤要素技術(アンジュレーター, 光学系, 加速器等)⑥応用(医用, バイオ, 新

素材, 光化学, プロセッシング, 物質処理, 原子力等)について討議する。

会議の構成: ①招待講演②一般講演(口頭発表, ポスター発表)③プレナリー講演④パネル討論⑤インフォーマルミーティング等

参 加 費: 一般 50,000 円/人, 学生 20,000 円/人
問合せ先: 財団法人レーザー技術総合研究所 総務部

〒550 大阪市西区靱本町 1-8-4
TEL 06-443-6311, FAX 06-443-6313