技術資料

応力集中*

Stress Concentration

第Ⅱ部 溶接構造物の設計と応力集中

成田 罔 郎**

Design of Welded Structures to prevent Adverse
Effect of Stress Concentration

by Kunio Narita**

1. はじめに

第Ⅰ部で述べたように、構造物の破壊と安全性、あるいは実質的な強度に大きなかわりを持つ応力集中の発生の根源及び防止対策の基本は設計にある。溶接構造物の品質の基本である設計の品質を規定するのは設計であり、そのために設計技術者は溶接を理解することを要求されるが、応力集中は構造設計あるいは強度設計の基本的な課題の一つであり、特に理解と実設計への活用が望まれる。

紙数の関係で、ここでは設計上考慮すべき応力集中の諸問題についてごくいつまんで説明するに止めるが、応力集中に関する問題点と実例の理解を深め、設計に反映させていただきたい。また、溶接施工に関係される方々も、第Ⅰ部、第Ⅲ部と併せて応力集中の重要性と防止対策の理解を深め、実務に効果を挙げていただきたい。

2 溶接構造物の破壊と応力集中

2.1 静的破壊と応力集中

延性材料に切欠きを付けて引張っても、切欠きによる断面減小が著しくなければ、引張強さはまず低下しない。しかし、ひずみ集中の影響のため、伸びすなわち塑性変形能力が低下することはよくある。曲げを受ける場合には、応力が最大になる表面が早期に降伏するため、応力集中部から容易に破断することがある。

圧縮座屈の場合には、補剛に伴う応力集中は一般に座屈強度を低下させないが、構造不連続による二次応力や偏心荷重に注意が必要である。薄肉曲がり管の曲げでは、たわみ性により降伏（屈伏）が容易に生ずる。

2.2 疲れと応力集中

疲れ破壊が応力集中と深い関係を持つことはよく知られている。表面を仕上げない完全溶込み突合継手の静的強さは母材と同等であるが、疲れ強さは母材よりかなり低くなる。平板をすみ肉溶接による当て金で補強すると、疲れ強さはかえって低下する。

疲れ強さの面から、溶接継手の種類・仕上げ、応力の種類・方向などに関する区分を設けている規格やマニュアルもある。

2.3 ぜい性破壊と応力集中

溶接構造物のぜい性破壊事故例では、構造不連続による応力集中部から破壊が発生した例が多い。研究結果でも、著しい応力集中や目違い・角変形等の工作誤差などの影響が明らかにされている。

溶接継手形状については、WES 2805（ぜい性破壊発生に対する評価方法）は、引張・曲げの境界力によるひずみ e_1 、溶接残留応力によるひずみ e_2 と併せて、溶接継手形状（種類、方向など）による集中ひずみ e_3 を考慮している。同規格では、欠陥に作用する力学的条件として応力でなくひずみを採用している。 e_3 は $(K_t - 1) e_1$ で表され、 K_t は溶接継手形状に応じて決められる。

2.4 応力腐食割れ

応力腐食割れには、溶接残留応力とともに応力集中が大きく影響する。腐食疲れは、一般の疲れよりも激しく起こり、それだけ応力集中の影響が大きい。熱疲れにも応力集中が極めて有害なことは明らかである。

これらの発生しやすい環境及び使用条件が避けられない設備では、応力集中の排除について特に慎重な配慮が要求される。

3. 構造設計と応力集中

構造物には、強度部材の接合、補強・補剛材等の取付

*原稿受付 昭和60年7月5日

**正 員 日本鋼管(株)技術開発本部企画部
Member Nippon Kokan K.K.

け、負荷に応ずる必要断面の変化、人や物の出入又は温度や圧力計測のための開口又は貫通部の設備などが必要であるが、これらは往々にして有害な応力集中の原因になる。これらの構造物を、構造物に応力集中の悪影響を及ぼさないように設計することは、すべての構造物の設計者が忘れてはならない要点である。

3.1 開口部

出入口、マンホールや管等の貫通部など、構造物の機能、保守、安全等の面から必要な開口はいろいろある。開口のために減小する部材断面は、必要があれば補強されるが、開口部の形状や補強を含む構造が著しい応力集中を生じないように配慮する必要がある。

図15 開口の丸み

図17 スチフナ端部などの形状

鍛造品の使用

図16 圧力容器ノズル貫通部の例

開口は円形、長円形がよいが、角形の場合には十分な曲率半径で角に丸みを付ける。開口部の補強は、設計条件に応じて構造を検討することが必要である。压力容器等のノズル貫通部には、図16に示すほか、多くの形式があり、重要な部分では鍛造品を使用するなどして形状を改善し、応力集中を緩和している。

3.2 突起の端末、付属物、継手の交差部など

突起の端末や付属物の取付け部は応力集中が生ずるので、設計条件に応じて応力集中の緩和を図る。取付け部の端末の例を図17に示す。この場合、取付け物の端部は、本体表面と直角にするなど、この部の溶接が確実に行われるようにする。特別な整形は溶接後に行う。

継手の交差は、平面上の突合せ溶接では一方の溶接が完了してからこれらに交差する継手を溶接することが望ましい。立体的な部材の交差部では、多数の部材の継手が集中することを避け、また、4.4で述べるスカラップを有効に使用すべきである。

3.3 幅、厚さ、曲率などの変化の移行

幅の異なる部材の突合せ継手では、広い方の部材の接合端の付近を図18に示すように狭い方の部材の幅に合わせる。部材の厚さが異なる場合には、図19に示すような移行の方式が取られる。テーパは $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 程度である。曲率や円筒胴の直径の移行では、図20に示すような方法が取られる。

3.4 表面及び端面の状態

母材の表面は、有害なきずやへこみなどがあってはならない。母材の端面、特にシャー切断や熱切断による端

図18 幅の移行

図19 厚さの移行

図20 曲率又は直径の移行

面は、形状、切断きずに注意し、必要な修正を行うべきである。鋭い形状や切欠きが切断面の硬化と重畳すると、ここが破壊発生部となることがある。

溶接部の形状については4.4及び第Ⅲ部で述べる。

図21 ガス切断縁の仕上げ

3.5 事故例

(1) 開口部の設計が今日のように分類され、ランク付けされているのは、過去の疲れき裂発生などの経験に基づいている。

(2) 突起の末端等では、図17に示す取付材やパイプ構造のフランジ接合部補強リブの溶接止端から割れが発生した例がよくある。その多くは疲れによるものである。

(3) 厚さの移行を正規の方法で行わなかったために、溶接部の形状と併せて、疲れ又は過負荷による破損がここから生じた例がある。

4 溶接継手設計と応力集中

4.1 溶接継手の種類と応力集中

主な溶接継手の種類は開先溶接とすみ肉溶接であるが、その複合形式もある。

(1) 突合せ継手 強度部材の代表的な継手で、溶込みの状態、表(裏)面の形状、裏当て金の取扱いなどによって応力集中の程度は異なるが、完全溶込みで表裏面を仕上げた突合せ継手は、応力集中防止の点で最も優れ

図22 管構造フランジ取付補強部の疲れ

図23 突合せ継手の応力集中

ている。目違いは応力集中を助長する。

(2) すみ肉継手 突合せ継手と異なり、すみ肉継手では、ルート部及び止端(母材に対して角度を持つ)の応力集中は避けられない。このため、開先溶接との混合継手としたり、不等サイズ、へこみすみ肉の採用や表面の仕上げなどが必要に応じて行われる。

(3) T継手、十字継手など 図25に示すようにT継手、十字継手などでは、荷重の種類及び方向に応じて、応力集中の有害な影響を緩和する手段が採られる。

4.2 応力集中と継手の位置など

厚さや幅の変化の移行では、継手の位置を形状変化部から離すのが望ましいが、一般には図18, 19に示したような方法が採られる。曲率の変化部も、継手をこの部分から離すのがよい。曲げ応力の大きい部分での溶接は、一般に望ましくない。これらのことは、多くの構造物の技術

図24 すみ肉継手の応力集中

図25 T継手のすみ肉形状改善

基準類に規定されている。

4.3 断続溶接と端処理

応力集中の点からは、断続溶接よりも連続溶接が望ましいが、経済性、ひずみ及び作業性の面から、補強材の取付けなどには断続溶接がよく用いられる。この場合には、千鳥溶接のときにも部材の端部では並列溶接とし、かつ、回し溶接などにより、すみ肉溶接端部の応力集中を避けるべきである。

図26 断続溶接の端処理

図27 スカラップと回し溶接

4.4 スカラップ

溶接線が集中すると、この部分が施工しにくいので、形状不良や欠陥による応力集中が生じ、また、施工順序

によっては複雑な残留応力が発生することがある。そこで、溶接線の立体的な集中・交差を避ける目的でスカラップが設けられる。

スカラップは、そこに集まるすべての溶接が適正に施工できる形状・寸法のものとする必要があるが、あまり大きくなるのは好ましくなく、このため、すみ肉溶接に対しては5.3の回し溶接の考え方を適用する。

図28 スカラップ

4.5 事故例

地震や強風の際の建築構造物の損傷では、強度部材間の重要な継手を突合せ溶接とするよう図面で指示しなかったため、すみ肉継手で施工されたというひどい例がある。このほか、継手形式や完全溶込みの指示を過ったために、過負荷を受けたときに溶接部で破断した例もある。

使用中の事故ではないが、船の船尾骨材、舵などの構造部材を溶接後熱処理（応力焼鈍）するときに、鍛造品と板の連続すみ肉溶接の端部を回し溶接しなかったため、この部分から昇温時に溶接部の破断が生じた例がある。

5. 溶接継手の形状と応力集中

施工に係わる詳細は第Ⅲ部で述べることにして、ここでは基本的な問題の概略を述べる。形状の基本は、設計の品質として規定すべきものである。3と併せて、過剰品質でない適正な品質要求を定める必要がある。

5.1 突合せ継手

部分溶込み突合せ継手は、のど厚が小さい上にルート部の応力集中がある。裏当て金を用いる片面突合せ溶接

は、当て金を除去しないと応力集中が大きく、特に、腐食のおそれがあるときには好ましくない。

突合せ継手の表(裏)面形状では、図29に示す余盛の幅と高さ、止端形状(アンダカット深さと底部曲率、余盛角度)が表面の凹凸とともに問題になる。設計条件に応じて図30に示すような仕上げが必要になる。通常の使用条件では鋭くなく、浅いアンダカットは有害ではなく、また、アンダカットの発生を完全に防止することは極めて困難なので、過大な品質要求は避けるべきである。

図29 溶接の表面形状

(a) 溶接のまま

(b) ビードの波仕上げ

(c) 滑かに仕上げ

(d) 平らに仕上げ

図30 溶接部の仕上げ

5.2 すみ肉継手、混用継手など

すみ肉継手は、溶接止端部及びルート部の応力集中が不可避である。このため、曲げ応力が重要な場合には、必要に応じて図252に示すようにへこみすみ肉として、止端角度を小さく、曲率半径を大きくする手段が取られ

る。グラインダなどによる仕上げも行われる。

繰返し引張荷重を受けるため、ルートの応力集中をなくしたいときは、図254に示す完全溶込み開先溶接との混用継手が用いられる。その中間の(5)に示す部分溶込み開先溶接との混用継手もある。これらの場合、開先角度は、融合不良などの有害な欠陥を生じないように、過小であってはならない。

5.3 回し溶接

突合せ継手でエンドタブを用いるように、すみ肉溶接の端部では図26、27に示すように回し溶接がよく用いられる。回し溶接は、一般に主たるすみ肉溶接に付加される延長部で強度計算には入れないので、サイズやのど厚にこだわらずに、へこみ形で外観の良い、応力集中の少ないものとすべきである。

脚長やのど厚を増やすために回し溶接をこてこて盛ることは、応力集中をかえて増幅することになるので好ましくない。

5.4 形状の指定と検査

疲れ、応力腐食割れなどに基づいて、応力集中の面から溶接部の形状を規制し、又は仕上げを要求するときは、仕様書、図面等でこのことを具体的に規定しておかなければならない。この規定は、溶接方法・施工条件の選定、見積、日程計画などに重要な関係があるからで、また、この点から施工側と十分協議することが望ましい。

この際、形状検査の方法と条件も明らかにしておかないと、後のトラブルの原因となることがある。

5.5 事故例

裏当て金を残した管の円周継手で、その応力集中部から応力腐食割れが発生した例がある。溶込みが不足したり、ルート部に著しいアンダカットがあったり、逆に著しい余盛過大や垂込みがあると、これらが応力腐食割れを誘発することがよくある。一方、十分溶かされたルート部のなだらかなへこみは有害ではない。

深い、鋭いアンダカットや、余盛角度過大などが疲れ強さを低下させ、事故の原因となることはよく知られている。反面、通常の使用条件では、一般的にアンダカットが破損を助長する例はあまりない。