機 械 部 品 お よ び 構 造 物 の 破 損 事 故 *

大 内 田

久 **

Failures of Machine Parts and Structures*

by Hisashi Ohuchida**

1. ま え が き

最近機械構造物がますます大容量、高性能、軽量化する傾向にしたいが、これらの設計に溶接構造を用いることが多くなり、溶接部に働く使用応力もますます高く、応力集中部で塑性変形の繰返しを伴う低サイクル疲れや、合成化学工業の生成物の腐食や大気汚染という特殊の腐食環境下の使用など使用条件が苛酷になってきている。したがって今日では一層合理的な溶接設計と信頼度の高い溶接施工が要望せられるわけである。しかしながら溶接構造物の破損事故例をしらべてみると、不測の過大応力の発生、運転操作の誤りにもとづくものもあるが、なお設計者や溶接作業者の不注意に原因する事故も多い。製品の破損事故となると不名誉なことのため、じゅうらいからこれについての詳細な発表はきわめて少ない。そのなかで1956年より国際溶接会議 (I I W) が各国における溶接構造物の破壊例を集めて討議し、その結果を機関誌の *Welding in the World* に発表していることは敬服に値する。また渡辺¹⁾は溶接構造物にみられた破壊例とその解析について明解な所見と設計者、作業者への指針を与えており貴重なものである。しかし前述の I I W の事故例についても衆知の点で不じゅう分であり、その他の事故例の解説も少なく、種々の機械部品や構造物についての特徴ある事故例の解説が望まれる。

ここに大先輩馬場くめ博士の「改過為福」「失敗は教訓の素」「臭いものには蓋をするな」の落穂の教えにしたいが、前述の I I W で集めた破壊例の文献、Thielsh 著 *Defect and Failures in Pressure Vessels and Piping* やその他筆者の入手した文献や事例を参考として、機械構造物の破損事故についての解説を試み参考にと供することとした。

2. 破 損 の 要 因

溶接された機械部品や構造物の破損の要因を大別する

と次の4つに帰せられるように思われる。

- (1) 溶接設計の不良
- (2) 工作不良
- (3) 材料不良
- (4) 使用条件の把握不良

1 溶接設計の不良

(a) 外力の見積りの誤り 機械部品に加わる外力の大きさと種類に対する見積り違いから生ずる事故が今日なお多い。これは応力、ひずみの測定技術が進歩した今日でもなお機械構造物の実働荷重の測定が困難な場合が多いことに起因している。特に地震、突風、衝突、水撃、共振などの過渡的現象によって生ずる過大荷重の見積りは、過剰品質にならぬようにとの警戒もあり困難なところである。

(b) 応力集中に対する配慮の欠如 形状の不連続部に生ずる応力集中部に、溶接部が一致するとアングカットや溶着鋼の形状、冶金的切欠きなどが重なり、構造物の複雑な3軸応力状態とも影響し合って、応力集中の見積りが困難となることがあり、繰返し荷重の下で思わぬ破損を起こすことがある。

(c) 継手の設計不良 機械部品や構造物の使用荷重の種類、大きさ、繰返し回数、使用環境を考え、それらに応じたじゅう分な強さの継手で、溶接欠陥の生じにくく、非破壊的欠陥検査がじゅう分行なえる形式のものを選ぶべきである。応力集中を生ずる融合不足、スラグ巻き込みなどの溶接欠陥を内蔵し、非破壊検査もできにくい継手は使用を禁止すべきである。

(d) 材料の選定不良 機械部品や構造物の使用条件に適した溶接性のよい材料を選定すべきで、軽量化による製品原価低減のため、溶接性の悪くじん性の低い高張力鋼を使用するとか、溶接熱履歴によって脆化するものの使用、また厚肉の多少欠陥のある鋳鋼品に異種の鋼板を溶接し複合構造にして使用するなどは戒しむべきである。ラミネーション偏析の多い材料は、その異方性のために荷重の負荷方向によっては思わぬ低応力破壊を生ずることがある。

* 原稿受付 昭和43年9月12日

** 正 員 日立製作所 Member, Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.

(e) 溶接作業に対する考慮 溶接作業の難易によって溶接された機械部品の強さの信頼度が異なる。溶接作業が楽で欠陥や変形を生じないような継手や構造物の形を選ぶべきである。また作業上応力除去焼なましのできない場合には、残留応力による変形や強さにおよぼす影響について設計時考慮しておく必要がある。

2 工作不良

現場において実際に機械部品や構造物を溶接する場合、溶接棒の管理、溶接環境の管理が不良のため、溶接欠陥や大きな変形を生じ、これらが破損の原因となる。とくに本体は注意して丁寧に溶接を行なっても、その前後に行なわれる仮付や付加物の溶接作業に対してはじゅう分な配慮がなされなかったため、思わぬ事故を生ずることもある。軸類などで製作時の工作誤りや材質欠陥、使用中に生じた摩耗のため、局部的に肉盛りして溶接補修する場合、予熱後熱の欠如による材質の硬化ぜい化をきたし、溶接欠陥を生じ破損の原因となることも多い。

3 材料不良

設計の項でも述べたが、溶接性の悪い材料、ラミネーション、サルファバンド、ブローホール、非金属介在物のある材料の使用は避くべきである。設計者が材料を指定しても、検収や材料の保管の管理がよくなないと不良材料が知らぬ間に使用されていて破損の後の調査で分る例もある。材料費節約のため、材料の引張強さを高めることに苦しみ、材料の溶接性、じん性を無視したため、製造時応力割れを生ずることがある。

4 使用条件の把握

機械や構造物の使用条件、使用環境をじゅう分事前に調査して製作することが大切である。実際には設計者が考えも及ばなかったような荷重の種類や大きさ、温度、腐食環境に製品がさらされることがある。したがって事前調査を極力行なっており、使用条件に適した溶接設計を行ない、もっとも適した材料の使用、防食対策、応力除去焼なましなどの工作上の処置をしておくべきである。最近化学工業、発電所の増設により大気汚染を生じ、この腐食環境が機械的応力と組合されて疲れ強さが著しく低下し機械が破損する例も生じてきている。

3. 破損例の現象的分類

溶接された機械や構造物の破損例を破壊の現象別に分類してみると次のように大別されるが、もっとも多いのが疲れ破壊である。

- (1) 疲れ破壊 高サイクル疲れ、低サイクル疲れ、腐食疲れ、熱疲れ、高温疲れ
- (2) ぜい性破壊
- (3) 応力腐食

(4) クリープ破断

(5) 遅れ破壊

(6) 水素ぜい化による破壊

以下各種の機械構造物の破損例を色々な破壊現象について数例あげて解説してみたい。

4. 破 壊 例

1 エンジンの揺腕の破損

機械構造物の名称：高圧の空気を断熱膨脹させて低温の空気をつくる膨脹エンジンの揺腕。図-1のようにカムからの上下動をロッドを介して排気弁に伝える。ローラ座の部分と揺腕の部分の二つがボルトで結合されその上側面をスミ肉溶接で連結されている。応力状態：衝撃的に加わる繰返し曲げ応力、スミ肉溶接し端部で最大 12 kg/mm^2 の片振引張り応力、繰返し数約 1.6×10^6 回。破損状況：図-2のようにローラ座と揺腕のスミ肉溶接部および揺腕上面に疲れき裂発生。材料：SC42 破損の推定原因：ローラ座と揺腕の結合がボルト結合だけでは不じゅう分なので側面スミ肉溶接をしたが、揺腕の上面角のスミ肉溶接端部にかえて応力集中を生じ、溶接残

図-1 膨脹エンジンの揺腕

図-2 揺腕溶接部の疲れき裂

留応力の影響と組合されて疲れ破損した。ローラ座と揺腕を一体構造とし、曲り部の曲率半径を $50R$ と大きくすることによって最大応力を 4 kg/mm^2 におさえることができた。

2 フォークリフトのフォークの破損

機械構造物の名称：フォークリフトのフォーク。応力状態：繰返し曲げ応力，悪路走行時にさらに付加応力が働く，使用時間 3,600 時間。破損状況：図-3 のようにフォークの曲りの隅の溶接部に，断面の約 10% に達する疲れき裂が生じ後脆性破断した変形はみられない。図-4 の破面からわかるように内側の表面の多数箇所から疲

図-3 フォーク隅部の破損

図-4 フォークの破面

れき裂が発生しており，これらはこの隅部にある溶接のし端部のアンダーカット部に相当する。前にも破損したため，溶接補修した。その大きな溶接ビードの存在が破損に関係した。材料：引張強さ 87 kg/mm^2 の炭素鋼。推定原因：前にも破損し弱いことがわかっていたフォークの応力の高い部分で溶接を行なった。アンダーカットのある溶接の存在が疲れ強さを低下させた。溶接補修しても早晩破損が起こることが予想するべきであった。非破壊検査で使用中疲れき裂の発生を検査すべきであった。

3 羽根付き軸の破損

(1) 曲げ荷重の場合。機械構造物の名称：鍛造機用電動機，30 kW，6 P.，4 枚羽根。応力状態：回転曲げ応力とねじり応力，周期的に定格の 200% の過大応力が繰返された。稼働後 1 年 8 ヶ月で破損。破損の状況：図-5 のように羽根端溶接のし端部で疲れき裂が発生し，図-6 のような回転曲げの破面を呈して破断している。最終破断部が大きいことから過大応力が作用したことが

図-5 羽根付き軸

図-6 羽根付き電動機軸の破面（回転曲げ）

わかる。材料：S 35 C。破損の推定原因：定格の 200% の過大応力がかかったこと，端の溶接部の仕上げが不じゅう分であったことが原因である。このような羽根端の溶接では溶接線が短く，溶接を羽根の周りに廻す運棒がむつかしいため，この溶接部にプロホール，スラグ巻込，アンダーカットなどの溶接欠陥を生じやすく，疲れ強さ低下の原因となる。直径 $100 \text{ mm}\phi$ の溶接のままの軸の疲れ強さは約 7 kg/mm^2 であるが，機械仕上げ，ショットピーニングを行なうと約 12 kg/mm^2 に疲れ強さが向上する。

図-7 羽根付き発電機軸の破面（ねじり）

(2) ねじりの場合、機械構造物の名称：ディーゼルエンジンに連結された補助発電機、応力状態：ディーゼルエンジン軸との連結軸系のねじり共振により過大ねじり応力材料：S 30 C、引張強さ 52.6 kg/mm^2 、ねじり疲れ限度 14 kg/mm^2 。破損状況：図-7に示すように軸の外周多数箇所から中心に向かってひだが生じているが、ねじり繰返し応力により疲れき裂が外周数箇所より発生、破面が食い違っているひだである。破損の推定原因：軸系のねじり共振により過大応力が生じ、羽根端の溶接部が軸のフィレット部の応力集中にあったこと、溶接部の仕上げがじゅう分でなかったことがあげられる。

4 フランジとパイプの結合部の破損

機械構造物の名称：エンジンの排気管とフランジ、応

力状態：エンジンからの振動による曲げ応力および熱応力の繰返し 破損の状況：図-8からわかるようにフランジとパイプの溶接結合部で疲れ破損をしている。図-9の上図は同様な例で空気圧縮機に用いられたパイプとフランジの結合であるが、350時間使用後に図の位置に疲れき裂を生じた。破損の推定原因：パイプをフランジの内側にはめ込んで溶接した構造のものでは、断面の急変による溶接部の応力集中と振動応力、熱応力の重複によって破損した。図-9の下のようにフランジにテーパをつけ突合せ溶接し、パイプを可撓的にしたもののは強度上好ましいものとして推奨できる。

5 パイプの補強リブの破損

図-8 エンジンの排気管の破損

図-9 フランジとパイプの溶接結合

(a)

(b)

図-10 補強リブのあるパイプとフランジ結合部の破損

図-11 溶接補強リブのあるパイプ

機械構造物の名称：パイプ 応力状態：過大な機械的繰返し応力と熱応力、材料：17-4 pH 不銹鋼 破損の状況：図-10(a)のようにパイプとフランジを補強リブで結合したリブの端部のパイプ部で破損、破面はぢぐぢぐしており過大応力による破損であることがわかる。破損の推定原因：補強リブとパイプの溶接部の断面急変による大きな応力集中と過大応力が原因、図の(b)のように補強リブのテーパを小さくし、リブ端の溶接部を滑らかに仕上げれば強さが改善される。図-11のように補強リブの端の形および仕上げに注意すれば応力集中係数が3.5から1.6に減少し疲れ寿命が70%伸びる。

6 ノズル部の破損

図-12 压力容器ノズル部の破損（ぜい性破壊）

図-13 熱疲れを受ける場合のノズル部の補強

機械構造物の名称：圧力容器のノズル 応力状態：内圧による膜応力および熱応力、13年間使用、内圧繰返し1700回、破損の状況：図-12に示すようにノズル補強板の溶接不完全な応力集中部よりぜい性破壊している。

材料：SB 41 破損の推定原因：低温における過大内圧上昇による過大応力と溶接設計の不良による応力集中によるものと思われる。図-13のように熱疲れも考えられるような場合には(a)のような補強でなく(b)のようにすることが望ましい。

7 ロックゲイト歯車軸の破損

機械構造物の名称：ロックゲイトの歯車 応力状態：回転曲げ応力、繰返し数50,000回、3年間使用 破損状況：図-14に示すようにロックゲイトを動かす車輪と軸

図-14 ロックゲイト歯車軸の破損

受の中間のフレットと肉盛溶接端とが一致した部分より疲れき裂が発生している。この部分は常に海水に浸漬されていた。軸受部の軸の部分が摩耗したため、肉盛溶接を行ない、その後応力除去をまがしてあった。材料：引張強さ 40~50 kg/mm² 炭素鋼。破損の推定原因：破損は応力集中の著しい箇所に肉盛溶接を行なったことに原因する。しかしなかには車輪から30 cmも離れた軸の角柱の部分でき裂が入った場合もあり、これは溶着鋼の端にあたる。このことから溶接はじゅう分満足すべきものであったにもかかわらず操作に問題があったのではないと思われる。とにかく応力集中や腐食環境のある場合の肉盛は著しく疲れ強さを低下させることに注意すべきである。

8 溶接肉盛または補修軸の破損

最近工作不良や使用中の摩耗のために軸受部分や回転軸のカップリングやその他の部材がはめ合される部分に肉盛溶接が溶接設計、溶接作業や軸の材質の検討をよくしないで不用意に用いられ、肉盛後機械仕上げをして体裁をよくして使用されることがあるが、数ヶ月あるいは1~2年を出ないで溶接部やその近くから疲れき裂が発

図-15 溶接補修軸の破面

生して軸が破損する例が多い。図-15に典型的破面の一例を示す。これは溶接補修して再使用後35時間経過して破損している。溶接肉盛軸の場合は溶着鋼の数箇所からき裂を生じて、これらが連らなって破面に多数のひだを生じているのが特徴である。以下に溶接補修によって生じた実際の破損の数例を示す。

9 ポンプ軸の破損

機械構造物の名称：垂直ポンプ、80°C で98%の硫酸を送る。図-16の上はポンプの配置を示す。応力状態：

図-16 垂直ポンプ軸の破損

図-17 ポンプ軸の破面

定常状態ではねじり応力がかかるが、同時に軸受の組立不良や軸の振動によってはポンプを支持している端部に曲げ応力が生ずる。繰返し応力は曲げによるもので回転曲げとなる。応力繰返し回数やポンプの回転速度不明。

材料：不銹鋼，Cr 18，Ni 11，Mo 2，Ti 2%，引張強さ 60~75 kg/mm²。破損の状況：図-17に示すようにキーマゾを通過して軸は破損し、ポンプの最初の軸受の入口で断面変化部から少し離れた箇所。外周の溶接金属部の粗粒状破面の部分を除いては平滑な細粒状の疲れ破面をしている。き裂発生最初の部分はキーマゾ部である。破面からも回転曲げを受けて破損したことがわかる。推定原因：破損は明らかに溶接補修によって生じている。キーマゾ部にみられる溶融不足からみては補修がじゅう分な注意をもって行なわれたとは思われない。

10 エアドロップハンマーのアンピルの破損

機械構造物の名称：エアドロップハンマー、容量 3t、車輛用部品の型打鍛造機、図-18にその概略形状を示す。

図-18 エアドロップハンマーのアンビル

応力の種類および使用履歴：型打ちによりアンピルの隅部には繰返し曲げの衝撃応力が働く。その大きさは10~15 kg/mm²。使用後1.5年でアンビル隅部の材料欠陥（いぐるみ）よりき裂発生、これを溶接補修した。開先の作成は酸素アセチレンバーナによりき裂発生部を流し、後グラインダにて整形した。材料：SC 46，引張強さ 49.4 kg/mm²，衝撃値（Vノッチシャルピー）7.6 kg·m/cm²（20°C），LB-26 溶接棒を使用して手溶接にて溶接し、応力除去焼なましは行なわずピーニングをじゅう分行ない、後手仕上げを行なった。破損の状況：図に示

すように再びアンビル隅部に深さ 60 mm のき裂を発生した。推定原因：すり合せ不良のためくさびが片当りして隅部に型鍛造時過大応力が生じたことと、溶接補修時開先をとるためアセチレンバーナーで局部加熱し、溶接焼なましを行わずピーニングではじゅう分とれない残留応力が残っていたためと思われる。

11 クランク軸の破損

機械構造物の名称：深海トロール船の 6 シリンダ 1,350 HP エンジンのクランク軸。クランクピンにけられた 20 mmφ の油孔が図-19(a) のようにあけるべきを外側表面から内側表面まで (b) のように貫通してけられてしまった。それで内側の開口部はねじをきって栓をして塞ぎその頭を溶接した。応力状態：クランクピンはねじりと繰返し曲げ応力を受ける。応力振巾不明。エンジンの回転数 165 r.p.m. 破損まで 70,000 時間運転されていた。破損の状況：クランクピンを横切り直角に破損がクランクピンの半周にわたり生じている。図-20 からわかるように疲れき裂がねじのせん溶接の頭の周りを二つにわかれ開むようにして進んでいる。図-21 のピンの

図-19 クランクピンにけられた穴の詳細

図-20 せん溶接された外表面の部分に生じた疲れき裂

図-21 クランクピンの破面

破面からわかるように破損は繰返し応力によって進んでおり、最終破断部はクランクピンの外面近くであり、詳細にみると破面は①, ②, ③, ④の4つの部分から成っている。②の部分は目が細かくき裂の進んだ軌跡は直線状である。破損は①の部分で発生しているが、穴を塞いだ溶接部の下より発達した脆い分離破面を呈している。これは溶接時の収縮き裂によって発生したものと思われる。航海中にせん溶接部よりぜい性破損が生ずるような突発事件はなんら報告されていない。材料：S 25 C, 引張強さ 47 kg/mm², U ノッチシャルピー値 2.2~3 kg·m/cm² (0°C) 破損の推定原因：工作の誤りで油孔をクランクピンの内側の外面まで貫通させたので、ねじをきってせん溶接をした。その溶接箇所の材料が多数の硫化物介在物を含んでいたため、収縮き裂を生じ、これから繰返し荷重により疲れ破損が進んだものと思われる。

12 プロペラ軸の破損

機械構造物の名称：トロール船のプロペラ軸、直径 135 mmφ, 長さ 4.83 m 全長にわたり表面に不銹鋼が溶射されている。2 ストローク、6 シリンダ 42 HP のエンジンに 1 段減速で連結されている。応力状態：エンジンからプロペラへ伝達するトルクによるねじり応力と回転部分の重量による回転曲げ応力。エンジンの回転数 375 r.p.m. シャフトの破損まで 20,000 時間使用 破損の状況：プロペラのはめられているテーパ部に、図-22 の

図-22 プロペラ軸の破損の外観

ように斜めのき裂が生じその軸方向となす角度は 55°C である。中央の軸方向き裂の長さは 40 mm で、その破面は多孔性で局部的にスケールが付いている。図-23 からわかるように明らかに疲れ破面を呈している。A の部分は軸の厚さの半分をしめており、A と A' の境より疲れき裂が発達している。A の部分ではき裂が軸方向に走っている。材料：引張強さ 46 kg/mm². 破損部分を腐食してみると図-22(b) のように補修溶接部が発見され

図-23 プロペラ軸の破面

た。破損箇所以外にもテーパ部表面に数ヶ所補修が行なわれていたことがわかる。溶接条件不明 推定原因：主な原因は軸の材料の選定が悪かったことで、軸方向き裂の部分にパイプや偏析などの材料欠陥があった。このような材料欠陥部を溶接した。材料が表面からかなりの深さまで不健全であったので、実際の溶接では変形を生じ軸方向の収縮き裂を生じたが、溶接後の機械仕上げでこのき裂が見えなくなっていた。この重大なき裂が繰返しねじり曲げ応力の下に疲れき裂の進展の源となった。き裂の進行にともない、偏析のためき裂面にピッチング腐食を生じた。このように不健全な鍛造材を最初に完全に欠陥部分を除去しないで、溶接によって補修することがいかに危険なものであるかを警告するよい事故例である。

13 ケーブルカーのハンガーの破損

機械構造物の名称：ケーブルカーのハンガー 図-24のように均加重錘でバランスさせて乗客の乗る船室を吊っているもの。応力状態：船室の重さによる引張応力 破損の状況：破損は図-25からわかるようにハンガーの

図-24 ケーブルカー

図-25 ハンガー破損部溶接趾端1よりき裂発生

垂直管と水平腕との溶接接合部の溶着鋼のし端から発生した疲れ破壊である。破面は疲れ破面の部分は小さくぜい性破面の部分の面積が大きい。材料：C 0.09% 炭素鋼。45° V ノッチシャルピー値 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ (20°C) 破壊の発生点である端部の溶接はアーク溶接で、不幸にも水平腕からの負荷を伝える溶接部にクレータや溶接再開始のつなぎの場所が重なって存在していた、破損の推定原因：疲れ破壊の発生にはクレータや溶接のつなぎ場所が原因しており、大切な応力集中箇所に溶接をもってきた溶接設計にも原因がある。またパイプ材の材質がもろかったことが疲れき裂がわずかに進行して全断面が完全破壊する原因にもなった。

14 リンクチェンの破損

機械構造物の名称：1t 用モートルブロック用リンクチェン、8mmφ。応力状態：荷重の吊上げ吊下げによる引張応力および曲げ応力の繰返し。この例は実際の事故

(a) 溶接部破断

(b) 肩部破断

図-26 リンクチェンの破損

(a) 肩部で破断したもの (b) 溶接部で破断したもの

図-27 リンクチェンのかたさ分布

例ではないが破損の原因が参考になるので、その試験結果について述べる。荷重 1.3 t, 寿命 10^5 回が要求される。破損状況：試験により破損したリンクチェンを図-26に示す。(a)はフラッシュバット溶接部で、(b)は肩部で破断し、前者は 10^6 回の繰返し数で破断荷重 1.4 t, 後者は 1.9 t であった。破断付近のかたさ分布をしらべた結果は図-27のように、肩部で破断したものは溶接部のかたさは一様であるが、溶接部で破断したものは溶接部の突合せ溶接部で著しくかたさの低下がみられる。またこの部をマクロエッチしてみた組織から溶接部で脱炭がみられた。材料：低 Mn 鋼, C 0.2~0.25%, Mn 1.10~1.40% フラッシュバット溶接後高周波焼もどし。推定原因：強さの低下したものはフラッシュバット溶接時過電流が流れ溶接部の脱炭を生じ、局部的に強さの弱い部分ができ、そのため疲れ強さが低下した。

15 圧力容器の破損

機械構造物の名称：液体窒素の蓄冷器、内径 1,800 mm, 長さ 7,000 mm, 板厚 12 mm. 応力状態：常用内圧 5 kg/cm², 下部鏡板付近 -175°C, 内圧は 0~5 kg/cm² と 10 年間に約 3.5×10^4 回の繰返される。破損の出発点となった図-28の下部鏡のマンホールの開口部周縁の最大応力は測定の結果約 15 kg/mm² に達することがわ

図-28 容器の下部鏡板

かった。破損の状況：空気が容器内に流入し 5 kg/cm² に達してから 30 分後に大きな異音を発して破壊した。図-28のマンホールの開口部で、内部の補強板の取付部の溶接部より破壊したものと思われる。ぜい性破壊。破壊開始点に疲れき裂が存在していたかどうかは確かでない。図-29(b)に破壊出発点附近の破面を示す。材料：C 0.16% SS 41 キルド鋼, 引張強さ 40 kg/mm², 45° V ノッチシャルピー値 6.0 kg·m/cm² (20°C) 破損の推定原因：マンホール取付けの溶接と補強板付根の溶接が重なり、内圧により複雑な 3 軸応力となり大きな溶接残留応力を生じ、応力除去焼なましによりこれがじゅう分除去されていなかった。

(a) 破壊した下部鏡板

(b) 破壊開始点と思われるマンホール付根と補強板の溶接の重なった箇所

図-29 容器の損破状況

疲れき裂の存在は確認できなかったが、内圧の繰返しにより、マンホール開口の周縁で補強板付根附近に微細な疲れき裂が発生し、ぜい性破壊へと移行したと思われる。

このような低温で内圧の繰返しがあり、かなり応力の高い压力容器では、応力集中や溶接欠陥の存在のある部分を不銹鋼でつくり、微細な疲れき裂が発生してもただちにぜい性破壊へ移行しない工夫が必要である。

16 ボイラドラムの破損

機械構造物の名称：ボイラドラム、内径 1,524 mm、長さ 14,640 mm、円筒部分の板厚 111 mm、鏡板の板厚 90 mm、常用圧力 147 kg/cm²。応力状態：水圧試験圧力 204 kg/cm² のとき円筒部分の膜応力 15.4 kg/mm²、鏡板で 8.86 kg/mm² マンホールの開口縁 A 点の切線方向応力 30.5 kg/mm²、C 点で 16.4 kg/mm²。破損状況：破壊は 204 kg/cm²（最大使用圧力の1.4倍）の水圧試験時に生じた。水温約 5°C。破壊以前に異常音や変わった状態はみとめられなかった。破壊は図-30に示すようにマンホ

図-30 ボイラドラムの破壊状況

ールの縁より発生し、破面は水平に対し 45° の傾きをもって矢印のように進展している。破壊はほとんど変形なしに生じ、破面はせん維状の脆性破面である。き裂の発生したマンホール縁では巾 10 mm の部分が青味がかった色をしている。材料：C 0.25, Mn 1.45~1.55, Cr 0.3, Ni 0.2, Si 0.2, S 0.035, P 0.025%, 引張強さ 54~63 kg/mm²、伸び 17%, U ノッチシャルピー衝撃値 4 kg·m/cm² (20°C)。材料の組織に異常はみとめないが、鏡板の破壊開始点では過熱により生じた異常なセル粒組織が発見された。そこでこの過熱組織のものと正常組織のものについて V ノッチシャルピー試験を行なったところ、図-31に示すようにせん移温度の相異がみられ、過熱組織のほうがせん移温度が高いことがわかった。工作：鏡板は熱間鍛造焼なましして供給された。マンホールは板を 150°C に局部的に予熱して酸素切断によってつくられた。その後マンホール部は、切断による熱影響部を除去するために機械加工された。切断により局部加熱

図-31 シャルピー V ノッチ衝撃値と温度の関係

された温度は組織からみて 1,250°C と推定され、材料試験はこの温度に過熱したものにつき行なった。ドラムの溶接組立後は 635°C、8 時間の応力除去焼なましを行なった。破損の推定原因：(1) ドラムの鏡板の材料が熱間成形時に過熱されてもろくなった。(2) このもろくなった鋼においてマンホールの酸素切断が行なわれ、熱応力の影響で切断面に垂直方向のき裂を生じた。(3) これらのき裂の伝ばがもろくなった金属に生じ、応力除去されていたにもかかわらず水圧試験で健全な鋼板のほうへ伝ばした。

17 高圧給水加熱器の破損

機械構造物の名称：高圧給水加熱器、水室の板厚 229 mm、内径 460 mmφ のノズル 2 個が図-32のように対称の位置に溶接されている。水室の部分は円筒部に溶接され 530°C に応力除去焼なましされた。水室は仕切り

(a) 円筒部分の方を見た図

(b) 鏡板の部分を見た図

図-32 高圧給水加圧器の破損

図-33 仕切板を水室壁に溶接したところからの破壊状況

板で二つに分割されている。破壊の状況：水圧試験時にぜい性破壊した。破壊時の水圧 371 kg/cm^2 破壊は予告なしに爆発的に生じた。図-32の (a), (b) は破壊時の水室の状況を示す。矢印は破壊の進行状況を示す。材料：ASTM 266-2, C 0.31, Mn 0.69, Si 0.18, S 0.022, P 0.005, V 0.041%, 引張強さ $\sim 49 \text{ kg/mm}^2$, 伸び31%, V ノッチシャルピー衝撃値 $1.6 \text{ kg}\cdot\text{m}$ (20°C) 破壊の推定原因：(1) 鍛造材のせん移温度が高かった。(2) 仕切板を水室壁に溶接したところ (図-33) の熱影響部がぜい化していた。(3) き裂発生部の高い3軸応力が材料が局部的にひずみ応力を緩和する能力を著しく低下させた。

18 不銹鋼円筒の破壊

機械構造物の名称：円筒形貯槽、図-34に示すようにパイプが挿入される部分の貯槽の壁が補強板で溶接補強されている構造。貯槽は H_2 , CO , CO_2 , H_2S の圧力のかかった湿りガスを貯蔵する。温度 $400\sim 450^\circ\text{C}$, 圧力 15 kg/cm^2 。応力状態：主な応力は静的なものであるが、機械的振動がパイプに生ずると溶接部や補強板に動的応力が生ずる。約3年間使用。破壊の状況：き裂は補強板を貯槽に溶接した溶接の先端部に相当する位置の槽の内面から発生した。図-34のように同時に 6 mm の脚長をもった補強板端のスミ肉溶接部からも発生した。疲れき裂は生として槽の内面より生じており、内部の腐食媒質によって誘起されている。図-35は槽の板部からとった顕微鏡写真で槽の内面から生じた多数の腐食疲れき裂を示す。材料：Ti で安定化した18-8不銹鋼。破壊の推定原因：まづ設計時に予知できなかった不明の振巾をもった動的応力が疲れき裂発生の原因の一つで、他の一つは、補強板のスミ肉溶接が断面の急変と“hard spot”をつくった。さらに腐食が疲れき裂発生の有力な原因である。

図-34 貯槽補強溶接部の破壊

図-35 貯槽内面の腐食疲れき裂

5. 結 言

機械の部品や構造物の溶接部の破壊の要因および代表的破壊の数例につき述べたが、破壊例については詳細なデータが不明で、破壊の原因についてもあい昧なものがあり読者は不満に感ぜられることと思うが、溶接部材の破壊がどういふ箇所にとどのような原因で起こっており、設計製作上注意すべき点は何かについて少しでも御参考になれば幸いと存ずる次第である。なおまえがきに述べたようにこれらの破壊例は I I W その他の文献より採用したものであるが、破壊という性質上出所を明確にできないことについてはお許しを願いたい。前記の I I W の事故例についてもその出所は不明にしてある。

これらの溶接破壊例を参考にして再び同様な事故を繰返すことなく、最適の溶接設計、最良の材料、慎重な溶接工作条件の下に高性能で軽量の溶接構造ができ、今日の急速なる技術革新に呼応できることを期待してやまない。

文 献

- 1) 渡辺：機械の研究, 16, 1 (1964) 8/10, 16, 2 (1964) 278/284, 16, 3 (1964) 377/380