

コーティング上からの溶接部検査に係る過去の検討の概要

平成 10 年度及び平成 11 年度の消防庁危険物技術基準委員会において、「新技術を活用した石油タンクの検査・判定方法に関する調査検討」が行われた。この検討会が開催された背景としては、法令上特定屋外タンク貯蔵所のタンク底部の溶接部検査は磁粉探傷試験（浸透探傷試験を含む。）で確認することが定められているが、コーティングを施工している場合には磁粉探傷試験の検査精度を向上させるため当該コーティングを剥離して実施しており、コーティングの剥離、再塗装は開放期間の長期化、施工費等の観点から事業者にとって負担となっていた。このことから、溶接部検査においてコーティングを剥離することなく実施できるシステムが望まれており、この委員会では、コーティング上から行うことができる可能性のある溶接部の非破壊試験の方法を選定して、その検査精度等について実証実験等を行うとともに、一方で強度的に容認可能な欠陥寸法について解析、実験等を行うため、検討項目ごとに 3 分科会を設け検討が行われた。

第 1 分科会：底部溶接判定方法の研究

第 2 分科会：溶接部検査方法の研究

第 3 分科会：板厚の連続測定試験方法の研究

各分科会の検討概要について当該委員会の検討報告書（平成 12 年 3 月）から抜粋して以下に示すが、第 3 分科会については連続板厚測定方法等についてであるので、ここでは省略することとする。

1 第 1 分科会の検討概要

(1) 目的等

特定屋外タンク貯蔵所の底部（底板突合せ継手、底板重ね継手及び側板・アニュラ板継手〔隅角部〕）の溶接部に着目して、使用条件下において当該継手溶接止端部底板又はアニュラ板上面にきずが潜在する場合を想定し、そのきずに対する力学的観点からの評価を行うことを目的とし、下記調査研究項目ア～ケを掲げて、関係規格・基準等の調査及び実験的・解析的研究を行った。なお、対象タンクとして、110,000kl 浮き屋根式タンク（直径：82,000mm、最高液面高さ：21,000mm、底板厚・材質：12mm・SS400、アニュラ板厚・材質：21mm・SPV490Q）及び 9,900kl 円錐型固定屋根式タンク（直径：29,000mm、最高液面高さ：15,000mm、底板厚・材質：6mm・SS400、アニュラ板厚・材質：6mm・SS400）を想定した。

ア 国内外における溶接欠陥に関する規格・基準

イ 静液圧を受ける初期凸状変形又は基礎不支持域を有する底板の計算モデルにおける応力解析

ウ 高レベル地震時浮き上がり挙動するタンク隅角部弾塑性ピークひずみ解析

エ 底板突合せ継手き裂進展性試験（4 点曲げき裂進展性試験及び引張りき裂進展性試験）

オ 底板重ね継手き裂進展性試験（4 点曲げき裂進展性試験）

カ 隅角部隅肉溶接継手き裂進展性試験（L 型曲げき裂進展性試験）

キ 底板突合せ継手き裂進展性解析（4 点曲げき裂進展性解析及び引張りき裂進展性解析）

ク 底板重ね継手き裂進展性解析（4点曲げき裂進展性解析）

ケ 隅角部隅肉溶接継手き裂進展性解析（L型曲げき裂進展性解析）

(2) 国内外における溶接欠陥に関する規格・基準

ア 容器等特定構造物を対象に製造時、供用期間中の欠陥の存在を認めているもの

(ア) (社) 日本ガス協会の「球形ガスホルダー指針：JGA 指-104-89」

(イ) 原子炉機器製造時の ASME「Boiler & Pressure Vessel Code, Section III」

(ウ) 原子炉機器供用期間中検査の ASME「Boiler & Pressure Vessel Code, Section XI」

イ 一般構造物を対象に線形破壊力学に基づく欠陥評価を行うもの

(ア) (社) 日本溶接協会規格 WES2805-1997

「溶接継ぎ手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する評価方法」

(イ) 英国規格 BS PD6493-1991

「Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures」

(3) 底板部の突合せ継手に潜在する初期欠陥のき裂進展性と破断繰返し回数

潜在初期欠陥損傷モードに着目して、底板突合せ継手に作用する所定の応力・ひずみ範囲（応力・ひずみ全振幅）下で、潜在する初期欠陥からのき裂が進展・貫通し、最終限界き裂寸法（き裂が進展・貫通し内容液が漏えいするおそれのある寸法）に至るまでの繰返し負荷回数と、タンク開放検査周期間の空満の繰返し回数（空液位と通常運転時最高液位における等価累積疲労繰返し回数）との比較検討を行った。なお、潜在初期欠陥とは、溶接止端部底板母材の上面における疲労表面き裂を想定したもので、当該溶接線に平行なきずとしている。また、溶接初期欠陥については一切考慮していない。

ア 底板突合せ継手に作用する所定のひずみ基本値

米国石油協会規格 API653-1997「底板の許容凹凸率 ($B/R=0.03083$)」を考慮して、静液圧を受ける初期凸状変形又は基礎不支持域を有する計算モデルにおける底板の応力・ひずみ解析を行い、次のように設定した。

(ア) 底板厚 12mm の場合：最大ひずみ値 0.62%、繰返しひずみ範囲 0.12%

(イ) 底板厚 6mm の場合：最大ひずみ値 0.72%、繰返しひずみ範囲 0.2%

イ 空満の繰返し回数

低温タンクの耐久性委員会報告書（LP ガス協会、1978 年 12 月）における空満の繰返し回数 18.5 回／年等を参考にして、設定回数を 1,000 回とした。

ウ 底板突合せ継手 4 点曲げき裂進展性試験

(ア) 底板厚 12mm の場合

深さ 3mm 長さ 18mm 程度のきずが潜在していた場合、繰返し曲げひずみ範囲 0.12~0.26%において、破断回数は 15,000 回以上で設定回数の 1,000 回を上回り、また、ひずみ範囲 0.26%の繰返し回数 1,000 回では当該初期潜在き裂からのき裂長さの進展はほとんど認められなかった。

深さ 3mm 長さ 12mm 程度のきずが潜在し、繰返し曲げひずみ範囲 0.5%における繰返し回数 1,000 回でも、き裂長さの進展量は 1mm 程度であった。

(イ) 底板厚 6mm の場合

深さ 3mm 長さ 18mm 程度のきずが潜在していた場合、繰返し曲げひずみ範囲 0.2

～0.3%程度において、破断回数は15,000回以上で設定回数の1,000回を上回った。

ひずみ範囲0.2%の繰り返し回数1,000回では当該初期潜在き裂からのき裂長さの進展はほとんど認められず、また、ひずみ範囲0.3%程度でもき裂長さの進展量は1.2mm程度であった。

エ 底板突合せ継手引張りき裂進展性試験

(ア) 底板厚12mmの場合

深さ3mm長さ18mm程度のきずが潜在していた場合、繰り返し引張りひずみ範囲0.12%程度では繰り返し回数15,000回でも破断せず、き裂長さの進展量は0.6mmであった。また、ひずみ範囲0.5%では3,100回の繰り返し回数で破断したが、1,000回繰り返し時におけるき裂長さの進展量は2mm弱であった。

(イ) 底板厚6mmの場合

深さ3mm長さ18mm程度のきずが潜在していた場合、繰り返し曲げひずみ範囲0.2%程度では繰り返し回数15,000回でも破断しなかったが、ひずみ範囲0.3%程度では3,450回で破断した。

オ 底板突合せ継手曲げき裂進展性解析

英国規格 BS PD6493-1991 による解析及び2次元FEM解析を行った。

(ア) 底板厚12mmの場合

深さ3mm長さ6mm程度のきずが潜在している場合、繰り返し曲げひずみ範囲0.114%及び0.228%における繰り返し曲げ破断回数 N_f (60%) は、90,000回及び11,000回と計算され、設定回数の1,000回を上回った。

しかし、2次元FEM解析結果からは、解析の都合上、長さ無限大の帯状2次元きずを設定したため、繰り返し曲げひずみ範囲0.5%において繰り返し曲げ破断回数 N_f (60%) は87回と計算され、設定回数の1,000回を下回ることとなり、有限アスペクト比を有する初期き裂を設けた底板突合せ継手試験片に関する、同程度の曲げひずみ範囲レベル下の4点曲げき裂進展性試験結果と大きく相違する結果となった。

(イ) 底板厚6mmの場合

深さ3mm長さ18mm程度のきずが潜在している場合、繰り返し曲げひずみ範囲0.114%及び0.228%における繰り返し曲げ破断回数 N_f (80%) は、113,000回及び14,100回と計算され、設定回数の1,000回を上回った。

カ 底板突合せ継手引張りき裂進展性解析

底板突合せ継手曲げき裂進展性解析と同様に、英国規格 BS PD6493-1991 による解析及び2次元FEM解析を行った。

(ア) 底板厚12mmの場合

深さ3mm長さ6mm程度のきずが潜在している場合、繰り返し引張りひずみ範囲0.114%及び0.228%における繰り返し引張り破断回数 N_f (60%) は、17,000回及び2,200回と計算され、設定回数の1,000回を上回った。

しかし、2次元FEM解析結果からは、解析の都合上、長さ無限大の帯状2次元きずを設定したため、繰り返し引張りひずみ範囲0.5%において繰り返し引張り破断回数 N_f (60%) は69回と計算され、設定回数の1,000回を下回ることとなり、有限アスペクト比を有する初期き裂を設けた底板突合せ継手試験片に関する、同程度の引張

りひずみ範囲レベル下の引張りき裂進展性試験結果と大きく相違する結果となった。

(イ) 底板厚 6mm の場合

深さ 3mm 長さ 18mm 程度のきずが潜在している場合、繰り返し引張りひずみ範囲 0.114%における繰り返し引張り破断回数 N_f (80%) は 5,060 回と計算され、設定回数の 1,000 回を上回ったが、繰り返し引張りひずみ範囲 0.228%における繰り返し引張り破断回数 N_f (80%) は 634 回と計算され、設定回数の 1,000 回を下回った。

これらの結果は、同程度の有限アスペクト比を有する初期き裂を設けた底板突合せ継手試験片に関する、同程度の引張りひずみ範囲下の引張りき裂進展性試験における破断回数をかなり下回ったが、これは、解析において採用した溶接止端部付近の応力・ひずみ集中係数等が関係しているためと推定された。

(4) 底板部の重ね継手に潜在する初期欠陥のき裂進展性と破断繰返し回数

9,900kl 円錐型固定屋根式タンクの 6mm 底板の重ね継手を想定し、(3)の底板突合せ継手と同様に調査を実施した。

この場合、底板重ね継手において相隣る底板厚さの中央面がオフセットされて接合されているので、底板面内方向の引張り・圧縮を繰り返し負荷するとき当外部の座屈変形等の面外変形によりき裂進展性試験が極めて困難になると推定されたため、底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げき裂進展性試験及び底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げき裂進展性解析のみ行った。なお、潜在初期欠陥とは、重ね継手溶接止端部底板母材の上面における疲労表面き裂を想定したもので、当該溶接線に平行なきずとしている。また、溶接初期欠陥については一切考慮していない。

ア 底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げき裂進展性試験

深さ 3mm 長さ 18mm 程度のきずが潜在していた場合、繰り返し曲げひずみ範囲 0.2～0.3%程度において、破断回数は 15,000 回以上で設定回数の 1,000 回を上回った。

また、繰り返し曲げひずみ範囲 0.2%程度では、繰り返し回数 1,000 回では当該初期潜在き裂からのき裂長さの進展はほとんど認められず、繰り返し曲げひずみ範囲 0.3%程度でもき裂長さの進展量は 1mm 弱であった。

イ 底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げき裂進展性解析

英国規格 BS PD6493-1991 による解析を行った。

深さ 3mm 長さ 18mm 程度のきずが潜在している場合、繰り返し曲げひずみ範囲 0.114%における繰り返し曲げ破断回数 N_f (80%) は、14,100 回と計算され、設定回数の 1,000 回を上回った。また、繰り返し曲げひずみ範囲 0.228%における繰り返し曲げ破断回数 N_f (80%) は、17,600 回と計算され、設定回数の 1,000 回を上回った。

(5) 隅角部の隅肉溶接継手に潜在する初期欠陥のき裂進展性と破断繰返し回数

潜在初期欠陥損傷モードに着目して、高レベル地震時隅角部に作用する所定のピークひずみ範囲下で、潜在する初期欠陥からのき裂が進展・貫通し、最終限界き裂寸法 (き裂が進展・貫通し内容液が漏えいするおそれのある寸法) に至るまでの繰り返し負荷回数について、無欠陥の場合のそれとの比較及びタンク開放検査周期間の高レベル地震時隅角部等価浮き上がり回数との比較検討を行った。なお、潜在初期欠陥とは、溶接止端部アニュラ板母材の上面における疲労表面き裂を想定したもので、当該溶接線に平行なきずとしている。また、溶接初期欠陥については一切考慮していない。

ア 高レベル地震時隅角部に作用する所定のピークひずみ範囲値

危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示（以下、「告示」という。）第 79 条に定められている隅角部終局浮き上がり変位を考慮して、高レベル地震時浮き上がり挙動する隅角部弾塑性ピークひずみ解析を行い、隅角部隅肉溶接止端部に作用する所定のピークひずみ基本値を次のように設定した。

(ア) 想定 110,000kl タンク、アニュラ板厚 21mm の場合：

最大ピークひずみ値 5.5%、繰り返しピークひずみ範囲 1.0%

(イ) 想定 9,900kl タンク、アニュラ板厚 6mm の場合：

最大ピークひずみ値 3.3%、繰り返しピークひずみ範囲 1.3%

イ 浮き上がり繰り返し回数

「石油タンクの耐震性と健全性評価に関する調査・研究報告書」概要（日本高圧力技術協会、平成 10 年 3 月）によると、満液状態にあるタンクが高レベル地震を受け隅角部が不規則に浮き上がり挙動するときの当該隅肉溶接止端部の累積疲労損傷度と等価な損傷を与える、隅角部最大浮き上がり変位の繰り返し回数は数回程度とされていることから設定回数を 100 回とした。

ウ 隅角部隅肉溶接継手き裂進展性試験

(ア) 想定 110,000kl タンク、アニュラ板厚 21mm の場合

深さ 5.3mm 長さ 10.6mm 程度のきずが潜在していた場合、隅角部の隅肉溶接止端部の弾塑性ピークひずみ範囲 0.62%程度は、破断繰り返し回数は 1,312 回で設定回数の 100 回を上回った。一方、同程度のきずで、隅角部の隅肉溶接止端部の弾塑性ピークひずみ範囲が 4～5%程度及び 6.8%の場合の破断繰り返し回数は 97～271 回及び 53 回であった。

(イ) 想定 9,900kl タンク、アニュラ板厚 6mm の場合

深さ 1.5mm 長さ 12mm 程度のきずが潜在していた場合、隅角部の隅肉溶接止端部の弾塑性ピークひずみ範囲 1%程度は、破断繰り返し回数は 1,111 回で設定回数の 100 回を上回った。また、当該きずが潜在し隅角部の隅肉溶接止端部の弾塑性ピークひずみ範囲が 3%程度の場合の破断繰り返し回数は 195 回で設定回数の 100 回を上回った。

エ 隅角部 L 型曲げき裂進展性解析

想定 110,000kl タンク及び 9,800kl タンクの隅角部を対象とし、隅角部 L 型曲げき裂進展性解析（2 次元 FEM 解析）を行った。

(ア) 想定 110,000kl タンク、アニュラ板厚 21mm の場合

隅角部隅肉溶接止端部において、1.0%程度の弾塑性ピークひずみ範囲が繰り返される場合、深さ 5.3mm 長さ 10.6mm 程度のきずが潜在している場合、破断繰り返し回数は 70 回と計算され、設定回数の 100 回を下回ると推定された。

これは、2 次元 FEM 解析においては、解析の都合上、長さ無限大の帯状 2 次元きずを設定したためと考えられ、同程度の曲げひずみ範囲レベル下における深さ 5.3mm 長さ 10.6mm 程度のきずを有する隅角部 L 型曲げき裂進展性試験結果と大きく相違する結果となった。

(イ) 想定 9,900kl タンク、アニュラ板厚 6mm の場合

隅角部隅肉溶接止端部において、1.18%程度の弾塑性ピークひずみ範囲が繰り返さ

れる場合、深さ 1.5mm 長さ無限大のきずが潜在している場合、破断繰り返し回数は 125 回と計算され、設定回数の 100 回を上回った。

一方、当該きずが潜在する場合で、隅角部隅肉溶接止端部に 3.29%程度の弾塑性ピークひずみ範囲が繰り返される場合、破断繰り返し回数は 20 回と計算され、設定回数の 100 回を下回った。これは、2 次元 FEM 解析においては、解析の都合上、長さ無限大の帯状 2 次元きずを設定したためと考えられ、同程度の曲げひずみ範囲レベル下における深さ 1.5mm 長さ 12mm 程度のきずを有する隅角部 L 型曲げき裂進展性試験結果と大きく相違する結果となった。

(6) 今後の課題

ア 既存の各種容量タンクの実態調査等に基づいて底板の初期凸状変形又は基礎不支持域を設定し、当該部の応力解析を行うことが望ましい。

イ 既存の各種容量タンクに関する底板継手溶接部の検査時において検出されたき裂寸法の実態調査に基づいて初期き裂寸法を設定し、当該部位のき裂進展性試験・解析を行うことが望ましい。

ウ 既存の各種容量タンクの運転履歴実態調査に基づいたタンク開放検査周期間の等価空満繰り返し回数を設定し、底板継手部のき裂進展性試験・解析結果の評価が望まれる。

エ 今回のき裂進展性試験は、所定の繰り返しひずみ範囲に対するきずなし試験片及びきずあり試験片とも各々単数であった。試験データの信頼性を向上させるためには、所定の繰り返しひずみ範囲に対する複数の試験片を用いた試験が望まれる。

また、初期き裂導入部以外の溶接金属から破断した試験片も見受けられたことから、溶接止端部の形状、当該部に導入する初期き裂の形状や位置などの各種パラメータがき裂進展性に及ぼす影響を詳細に調査する必要がある。

オ 今回の底板き裂進展性解析は、2 次元平面ひずみ解析モデル(きず長さ無限大モデル)を用いて行った。きず深さが同一でもきず長さが有限になると、所定のひずみ状態における深さ方向のき裂進展速度が遅くなり、破断繰り返し回数が増加するとされている。試験結果を評価・検討するためにも、アスペクト比(きず長さ/きず深さ)を考慮した 3 次元解析モデルによる解析が望まれる。

カ 実タンクの底板継手の溶接部の施工状態、経年的腐食減肉等を考慮したき裂進展性・破断繰り返し回数の評価方法の確立が望まれる。

キ 隅角部アニュラ板の減肉は、一般底板に比べて、地震時の浮き上がり変位や最大ピークひずみ・繰り返しピークひずみ範囲に対する影響が大きいので、今後慎重に検討していく必要がある。

2 第 2 分科会の検討概要

(1) 目的等

タンク底部の溶接部検査に適用されている磁粉探傷試験(MT)は、磁粉模様の形成に対するリフトオフ効果が大きく、そのため内面コーティングを剥離して検査が実施されている。本分科会は、第 1 分科会の有害きずに関する検討結果を踏まえ、有害きずに関し、磁粉探傷試験と同等以上の検出性能を有する代替探傷技術を検討し、更にコーティング上から適用した場合の検出性能を調査研究して、現場での実用の可能性を明確化することを

目的とする。

なお、探傷試験は、放電加工による人工きずや疲労試験機で導入した開口幅の狭い自然きずを有する試験体及び実タンクから採取した試験体を用いて実施した。

(2) 代替探傷試験法

磁粉探傷代替探傷試験法として、次の試験法を候補とした。

- ア 超音波探傷法 (UT) … 斜角探傷法、クリーピング波探傷法、表面 SH 波探傷法
※それぞれ手動と自動
- イ 渦流探傷法 (ET) … 高周波探傷法、低周波探傷法
- ウ 漏洩磁束探傷法 (MFLT)
- エ 交流電磁場探傷法 (ACFM)

(3) 供試試験体

製作した試験体の種類及び導入した設定きずサイズ等をア～クに示す。

自然きずは各試験体ごとに原則として 1 個ずつとし、人工きずは 1 体に 8 個ずつを同一線上に 30mm 以上の一定間隔で導入した。ア～ウは平成 10 年度、エ～クは平成 11 年度に製作した。

- ア 平板 ($t=12\text{mm}$ 、 $t=21\text{mm}$) + 人工きず (6×3 、 6×1.5 、 3×1.5 、 3×0.75 、 10×5 、 10×2.5 、 5×2.5 、 5×1.25)
- イ 突合せ溶接平板 ($t=12\text{mm}$) + 自然きず (6×3 、 3×1.5 、 10×5 、 5×2.5)
- ウ L 型隅肉溶接 ($t=21\text{mm}$) + 自然きず (6×3 、 3×1.5 、 10×5 、 5×2.5)
- エ 平板 ($t=6\text{mm}$) + 人工きず (3×1.5 、 6×1.5 、 9×1.5 、 12×1.5 、 6×3 、 9×3 、 12×3 、 18×3)
- オ 突合せ溶接平板 ($t=6\text{mm}$) + 自然きず (6×3 、 9×3 、 12×3 、 18×3)
- カ L 型隅肉溶接 ($t=6\text{mm}$) + 自然きず (3×1.5 、 6×1.5 、 9×1.5 、 12×1.5)
- キ 重ね溶接 ($t=6\text{mm}$) + 自然きず (6×3 、 9×3 、 12×3 、 18×3)
- ク 実タンク重ね溶接 ($t=6\text{mm}$) + 人工きず (9×3) + 内面腐食
- ケ 平板 ($t=6\text{mm}$) エポキシ樹脂塗装…UT における音響物性の確認用試験体

(4) コーティング材料等

コーティング材料として代表的なエポキシ樹脂系とビニルエステル樹脂系ガラスフレークコーティングの 2 種類を選定した。人工きずの場合は UT におけるコーティング材料の音響物性の影響を確認するために 2 種類のコーティングを個別に施工したが、電磁氣的試験法のきず検出性能は膜厚のみに依存するので 1 種類とし、試験体数量減のため裸鋼板から塗り重ねで設定した膜厚を確保する手法をとった。ただし、電磁氣的試験法に対する導電性のあるジंकの影響をみるため、エポキシ樹脂塗装の下にジंकリッチプライマーを塗布した。なお、平成 10 年度では、自然きずの場合は膜厚 $1,000\mu\text{m}$ まではエポキシ樹脂塗装とし、この塗膜を剥がした上でガラスフレークを膜厚 $2,000\mu\text{m}$ に再塗装したが、平成 11 年度では、一部を除き全てガラスフレーク塗装とし、膜厚を $4,000\mu\text{m}$ まで増大した。

(5) 各探傷試験法の検出性能

ア 超音波探傷法 (UT)

表面きずを対象とすることから 45° 斜角探傷法、クリーピング波探傷法及び表面 SH 波探傷試験法を採用することとし、それぞれ 5MHz、2MHz (斜角探傷法を除く。) の探

触子を用いて 3 種類の手動探傷器と 1 種類の自動探傷器により探傷試験を実施した。

いずれの試験法でも手動及び自動とも長さ 3mm 深さ 0.75mm 以上の人口きずを、エポキシ樹脂塗装の膜厚 1,000 μ m まで、並びにガラスフレーク塗装の膜厚 2,000 μ m まで、また、長さ 3mm 深さ 1.5mm 以上のきずを膜厚 4,000 μ m まで問題なく検出でき、かつ指示長さも測定可能であった。

自然きずの場合は、深さが 1.5mm 以上あれば測定可能であるが、表面 SH 波探傷法は接触条件（接触媒質の粘度、膜厚、接触圧力）の影響を受けやすく、エコー検出に時間を要するので作業性に劣り、また、斜角探傷法は裏面腐食により検出感度低下が認められる。一方、クリーピング波探傷法は塗膜厚による感度の低下は少なく現場に適していると考えられる。

イ 渦流探傷法 (ET)

国内メーカー 3 社の市販探傷器により 100KHz 以上の単一高周波を用いて差動モードで試験を実施した。探傷周波数、位相等は人工きず試験体で設定し、側板・底板隅肉溶接試験体のノイズベースの 3 倍 (S/N=3) をきず検出限界とした。なお、電磁気的手法によるのでコーティングの種別は省略し、1,000 μ m 以下のエポキシ樹脂塗装の場合は予め電導度のあるジンクリッチプライマーを施工した。また、膜厚 3,000 μ m 等については厚さ 1mm 前後のテフロンシートを塗膜の上に重ねて試験した。

サイズの大きいクロスポイントプローブでは塗膜厚さの変動に対するきず信号レベルの変動が少ないが短いきずの検出性能が劣る一方、小さいクロスポイントプローブでは反対にきず信号レベルの変動は大きい短いきずの検出性能が優れる。一様渦電流プローブではきず検出性能はよいが表面の腐食による凹凸等の影響を受けやすい。

探傷周波数は 100KHz 以上の高周波がよく、塗膜厚が変化しても位相の相違は少なくてきず検出性能に影響せず、長さ 3mm 深さ 0.75mm 以上の人口きずを膜厚 2,000 μ m まで、また、長さ 3mm 深さ 1.5mm 以上のきずを膜厚 4,000 μ m まで問題なく検出でき、かつ指示長さも測定可能であった。自然きずの場合は、試験体により、実用上識別が困難又は条件付きで識別可能となる結果であった。なお、電導性のあるジンクリッチプライマーの影響は見られなかった。更にクロスポイントプローブと総称されるような、ガタ信号に影響されにくい特性を持つプローブを用いれば、手動でも十分な検出性能が得られきずの長さ方向に平行な掃引も可能であることが確認された。

一方、12~100Hz 程度の低周波で、8sen./1.8ch.プロトタイプのスキャナーを用いて溶接部とその近傍 10mm 範囲に存在するきずを検出する海外メーカーの低周波渦流試験法は、平成 10 年度の試験体についてのみ膜厚 2,000 μ m までの探傷試験を行ったが、長さ 3mm 深さ 1.5mm 以上の人口きずは検出可能であった。しかし、試験周波数が低いので微細なきずの検出には走査速度が遅く、また、実タンクの一部で溶接部の探傷試験を行ったがきず信号は得られなかった。

更に 200KHz の高周波を使用する海外メーカーの渦流探傷法は、両年度の試験体について膜厚 2,000 μ m まで試験を行ったが、長さ 3mm 深さ 0.75mm 以上の人口きずは検出可能であったが、実タンクの一部で溶接部の探傷試験を行ったがきず信号は得られなかった。

ウ 漏洩磁束探傷法 (MFLT)

平成 10 年度は小型交流電磁石を用いて周波数 8KHz の差動モードで試験を実施したが、やや磁化力不足であったので、平成 11 年度は大型磁化電源を用いて同様の条件で試験を行った。いずれも探傷周波数、位相、感度等は人工きず試験体で設定した。

なお、電磁気的手法によるのでコーティングの種別は省略し、1,000 μm 以下のエポキシ樹脂塗装の場合は予め電導度のあるジンクリッチプライマーを施工した。また、膜厚 3,000 μm 等については厚さ 1mm 前後のテフロンシートを塗膜の上に重ねて試験を行った。きず周辺の凹凸がなく溶接部の仕上げが良好であれば、きず長さ方向に平行掃引しても、長さ 3mm 深さ 1.5mm 以上の人口きずを膜厚 2,000 μm まで問題なく検出でき、かつ指示長さも測定可能であった。しかし、膜厚が 2,000 μm を超えると、基準とした側板・底板隅肉溶接試験体のノイズベースの 3 倍 ($S/N=3$) 以上の信号が得られなくなりきずの検出性能が低下する。

エ 交流電磁場探傷法 (ACFM)

1 チャンネルの探傷器を用い、エッジ用 (粗探傷)、溶接用 (精密探傷) 及びマイクロ (精密探傷) の 3 種類のプローブを使用して、きずの検出と同時に長さ と 深さ 測定値を得た。

なお、電磁気的手法によるのでコーティングの種別は省略し、1,000 μm 以下のエポキシ樹脂塗装の場合は予め電導度のあるジンクリッチプライマーを施工した。また、膜厚 3,000 μm 等については厚さ 1mm 前後のテフロンシートを塗膜の上に重ねて試験した。その結果、人口きずについては、膜厚 2,000 μm で長さ 5mm 深さ 1.25mm 以上を検出した。また、自然きずについては、膜厚 4,000 μm であっても無塗装時と同様に検出できた。

しかし、ACFM は滑らかな表面下を一様に流れる電流をもとに測定する方法であることから、腐食試験体でのきずの検出はできなかった。

(6) 試験に及ぼす要因等

ア 膜厚

無塗装から膜厚 2,000 μm まではいずれの試験法とも長さ 3mm 以上のきずは検出可能であった。膜厚 2,000 μm 以上 4,000 μm (漏洩磁束探傷法は 3,000 μm) までリフトオフを大きくしたが長さ 3mm 以上の人口きずは検出可能であった。しかし、自然きずの場合は、深さが 1mm 以上でかつ単独きずは検出できるが、ごく浅いきずあるいは短いものが複合している場合は検出できない場合があった。

イ 表面形状

製作した試験体は、いずれも平滑面に人口きず又は溶接止端部に自然きずを導入したもので、溶接余盛りがあり、かつ軽微な溶接きずやその研削跡があるものの腐食等による凹凸はなく、コーティングの前処理であるブラストもきず周辺は保護したので、試験を行う上で支障はなかった。

しかし、現場の実タンクでは腐食等による探傷面の凹凸が避けられないことから、実タンクから切り出した激しく腐食して凹凸の大きい試験体に人工きずを導入して検出性能への影響を確認したところ、長さ 9mm 深さ 3mm の人口きずであれば一部の試験法を除き検出可能であったが、探触子が十分に接触しないこともあり検出感度がかなり低下しているので、平滑面と比較して検出限界サイズの低下が予測される。

また、電磁気的な試験法ではきず面からの探傷であるが、超音波の斜角探傷法では裏面からの反射波を用いるので、きず面とは反対（裏面）側の表面形状も試験に影響する。

ウ きず形状

放電加工による人工きずは、その長さ、深さ及び幅とも所定とおりに導入できるので問題は少ないが、疲労による自然きずの場合は、理想的には断面が半円状又は半楕円状であるが、現実的にはこれらは少なく大半が長さの割に浅いもので、近接して短く浅いものが複数存在するものもあった。磁粉探傷試験では、これらごく浅いきずでも検出できるが、有害きずは長さとともにある程度の深さがあるので深さ 1.5mm 以上のきずを対象とすると、いずれの探傷試験法とも膜厚 2,000 μ m までは検出可能であった。

しかし、これら自然きずの場合は開口幅が一定ではなく、試験終了後に破壊してきず断面を観察して断面積を求めても、そのきず部の体積は求まらない。従って、浅いきずで検出性能にバラツキがあるのは、開口幅の差も要因のひとつとみられ、電磁気的な試験法ではその影響が大きいと考えられる。

エ 板厚

板厚ごとの試験体を作成したが、いずれの探傷試験法ともその影響は小さかった。

オ 溶接継手形状

L 型隅肉、突合せ及び重ね溶接の溶接継手形状ごとの試験体を作成したが、いずれの探傷試験法ともその影響は小さかった。

(7) 検出限界

一部を除ききずごとの信号レベルが得られているので、きずサイズ及びコーティング膜厚と信号レベルとの相関をグラフ化し、回帰曲線を引いて検出限界を求めた。これら相関関係を総括すると、人口きずはいずれもきずサイズと相関がよく、特にきず断面積では相関関数が 0.8 以上の強い相関が得られるのに反して、自然きずはバラツキが多くて相関が悪い結果となっており、開口幅の不揃い及びきずの方向性等の影響と考えられる。

(8) 再現性

同一探傷試験法で数種の探傷器を使用した超音波探傷試験法及び渦流探傷試験法、あるいは 1 機種で実施したその他の探傷試験法でも複数の技術者で試験を行い、それぞれの器差や再現性を検討した。

超音波探傷試験法では、3 種類の器差を人口きず試験体の各サイズのきずで調べたが、標準試験片（JIS Z2345 STB-A2）の標準穴（4 ϕ *4）との相対エコー高さで比較すると、器差及び技量差ともほとんどなかった。

渦流探傷試験法でも国内メーカーの 3 種類の探傷器を使用した。使用した周波数プローブ等が異なるので単純には比較できない。しかし、リフトオフ特性、短時間再現性（3 回）及び複数の試験者による結果の偏差とも問題なかった。開口幅が大きい人口きずと比較して、自然きずの場合は開口幅は極小さく深さも種々である。従って、感度差は当然あるが塗膜厚さの差による特性（感度変化、位相変化）は相似している。

漏洩磁束探傷法及び交流電磁場探傷法では、2 名以上の技術者による再現性試験を行ったが、検出性能に差異は認められなかった。

(9) 今後の課題

ア 今回の試験は、試験体が小さくかつ室内で行われているので、実タンクでの実証が望

まれる。

イ 試験体数が少ないので、試験体数を増やして精度の向上を図る必要がある。

ウ きずは全て溶接線検査に平行であり、それ以外の方向のきずの試験をしていないので確認を要する。

エ コーティング塗膜の密着性、探傷面の表面状態、腐食等に関して十分な確認をしていないことから確認を要する。

3 消防庁の動き

当該委員会の検討結果を踏まえ、消防庁では、「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について」（平成 12 年 8 月 24 日付け消防危第 93 号、改正：平成 14 年 1 月 22 日付け消防危第 17 号）を発出している。

当該通知第 2 に以下の内容が示されている。

『新技術による検査方法を用いたタンク底部の溶接部の試験については、危険物技術基準委員会で試作機を用いてコーティング上からの溶接の試験を行った結果、以下に示す内容でその有用性が確認されたところであるが、実用機としての底部溶接部探傷装置は、まだ製作されていない。

このため、新技術による検査方法として使用し得る底部溶接部探傷装置、標準的な試験要領、試験結果の評価について示すこととし、運用等の詳細については、実用機としての底部溶接部探傷装置が製作された段階で、追って通知することとする。』

以上