

屋外タンク貯蔵所の安全対策のための技術・研究について

元消防庁消防研究センター 山田 實

1 はじめに

1974年に発生した三菱石油水島製油所の屋外タンク貯蔵所（以下「石油タンク」という）の重油流出事故を受けて、1979年に消防法が大きく改正され、石油タンクの基礎地盤及び本体等に関する技術基準が規定された。

事故の原因は、主に、石油タンクの水張検査中に直立階段の設置工事を行ったために、その部位の基礎地盤が十分に締め固められなかったこと、運用開始後、石油タンクの荷重により基礎地盤に局所的な沈下が生じ、石油タンクに過大な応力が作用して、底部の破断に至ったということである¹⁾。

この事故を契機として、容量が1,000KL以上の石油タンクについて、底部の板厚測定及び溶接線全線の検査等、いわゆる開放検査が義務付けられた。この開放検査が義務付けられたことにより、石油タンクからの危険物大量流出事故は、1978年宮城県沖地震による東北石油の流出事故を除いては皆無であるといえる。

このような石油タンクからの流出事故は、主に破壊によるものと腐食によるものとに分けられる。これまで石油タンクの破壊と腐食に対する安全対策の研究が数多く行われており、著者が所属していた消防研究所（現消防研究センター）においても、実施されてきた。ここでは、主に消防研究所で行われた石油タンクの破損と腐食に関する研究を紹介するとともに、関連する研究機関等の成果についてもその概要を述べる。

2 石油タンクの安全対策

2-1 破壊

(1)石油タンクの構造強度

石油タンクは、側板と呼ばれる円筒状の構造物に円形の底部（底板とアニュラ板を含む）を溶接した構造物である。

石油タンクを図1に示すような軸対称の弾性体と仮定し、側板と底板との溶接接手近傍に生ずる最大曲げ応力とモーメントに及ぼす石油タンクの諸元等の影響を解析した結果²⁾、主な結論として、以下のものがあげられる。

- ・最大曲げ応力の発生場所は、張り出し部を含めた底部では、底部と側板内表面との継手部、側板では最下端部である。
- ・底板板厚を増すと底板の最大曲げ応力は減少するが、側板の最大曲げ応力は次第に増大し、底板の曲げ応力より大きくなる。即ち、最適な厚さが存在する。
- ・側板の板厚を増すと側板の最大曲げ応力は急激に減少する。底板の最大曲げ応力は板厚の増大とともに大きくなるが、次第に増加量は少なくなり極大値を取ったのち減少する傾向を示す。従って側板板厚は厚いほどよいと言える。
- ・現実に使用されているタンクを考える限り、底板を矩形板に近似して扱っても³⁾、実用上問題はない。

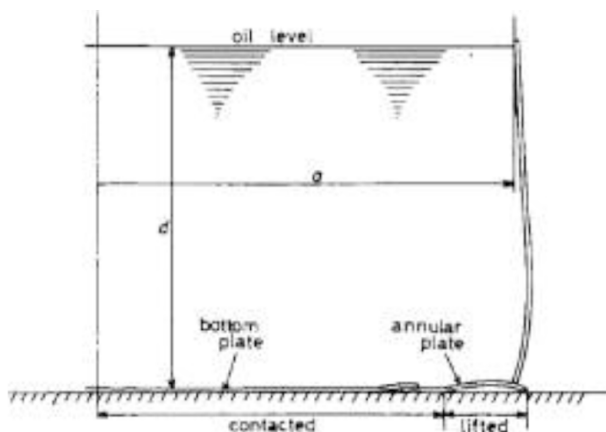


図1 軸対象を仮定した石油タンク

次に、図2に示すように石油タンクの基礎地盤が部分的に崩壊や沈下した場合、底部にどのような応力が発生するかを検討された⁴⁾。その主な結論は、

- ・最大曲げ応力はアニュラ板と側板との接合部に生じ、石油タンク内側表面に引張り力が作用する。
- ・最大曲げ応力は、タンク中心方向の崩壊長が増すと急激に大きくなる。
- ・最大曲げ応力は、側板に沿う円周方向崩壊長が増すと一定値に漸近的に増大する。
- ・アニュラ板の板厚を増すと最大応力は急に減少する。

上述の二つの解析結果から、側板と底部との溶接継手内部にかなり高い引っ張り応力が発生したものと考えられる。この部位にき裂が発生し、それらが結合して破断が生じ、内容物の流出により基礎地盤の崩壊が円周方向に拡大する。基礎地盤の崩壊が拡大すると、曲げ応力が急激に大きくなり、破断部がさらに拡大して内容物の大量流出事故へとつながる可能性があることが想像できる。これが側板と底部の継手部とその直下の基礎地盤が強度の観点から重要視される理由である。

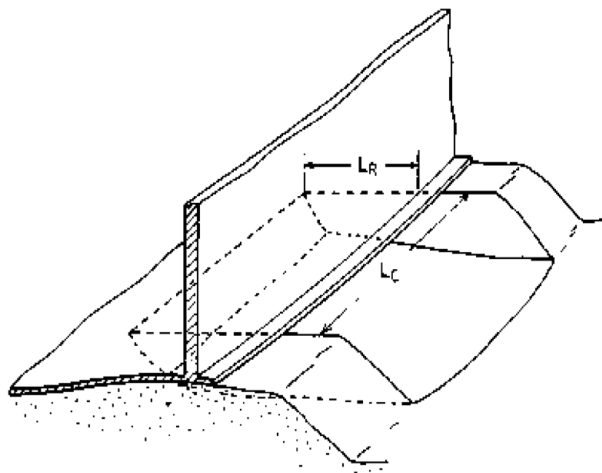


図2 崩壊を有する石油タンクの基礎地盤

(2)石油タンクの地震による底部浮き上がり挙動

1994年三陸はるか沖地震により、10万KL級石油タンクの設置事業所で表面加速度300galが観測された。この地震動により、石油タンクの底部が浮き上がった痕跡がみられたため、側板とアニュラ板の溶接継手部内側の損傷発生の可能性について、解析が試みられた。

石油タンクの浮き上がり挙動については、地震時に側板下端が浮き上がる状態を動的に評価するため、図3に示す質点系ロッキング振動モデルによる非線形時刻歴応答解析を10万KL級の石油タンクについて実施し、実地震波による浮き上がり挙動が検討された⁵⁾。この解析から石油タンクの側板とアニュラ板の溶接継手部内側に施工されている内面コーティングが、地震時の曲げ変形により損傷を受ける可能性について検討された。その結果、解析では、底部の浮き上がり量が約10.04cm、溶接継手部のピークひずみが約0.69%であるという値が得られた。

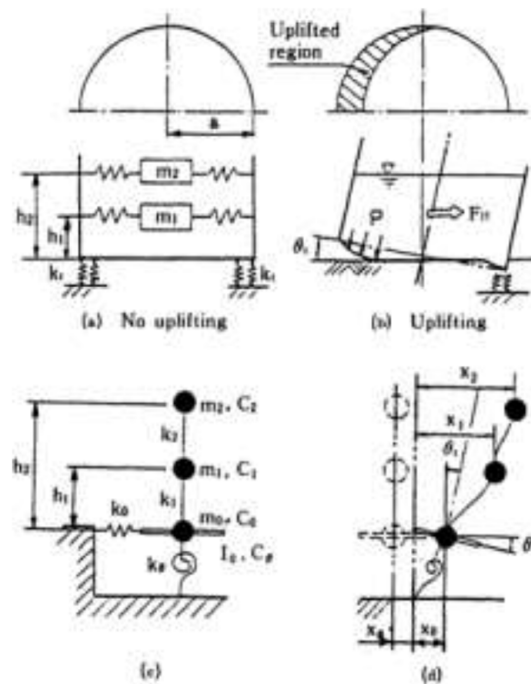


図3 石油タンクのスプリング-質量系へのモデル化

次に、内面コーティング（ビニルエステル樹脂系ガラスフレーク）を施した鋼板試験片の曲げ試験が実施された⁶⁾。曲げ試験結果と上記の解析結果を比較すると、ある特定のコーティングに割れが発生する鋼板表面ひずみは、地震応答解析より得られた側板-アニュラ板接合部の最大ピークひずみより小さく、その他のコーティングでは大きいことが分かり、浮き上がりが生じた石油タンクにおいて、内面コーティングに割れが発生する可能性があることが分かった。その後の開放検査で母材には割れ等の欠陥が全く生じていなかったことが報告されている。

Coating Thickness	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅	
	Li+L2 (mm)		Li+L2 (mm)		Li+L2 (mm)		Li+L2 (mm)		Li+L2 (mm)	
1 mm	0		25(30)		0		0		12(18)	
3 mm	18(30)		60(63)		2(3)		0(5)		30(38)	

図4 曲げ試験によるコーティングの剥離範囲

このように、地震動による石油タンク底部の浮き上がり挙動については、十分な精度で解析可能であることが分かった。

(3)スロッシングによる石油タンクの浮き屋根の構造強度

2003年十勝沖地震において、石油タンクの浮き屋根が大きく揺動し、浮き屋根は破損して沈没し、石油タンクのナフサが大気に露出するという状況であった。その後、ナフサに着火し、約44時間燃え続けるという全面火災が発生した。

ここでは、浮き屋根の破壊メカニズムの解明と浮き屋根が損傷するときのスロッシングの大きさの簡易評価手法の提案が実タンクを用いた実験が行われ、消防法令における技術基準へ寄与した研究を紹介する^{7,8)}。



図5 実規模タンクでの浮き屋根揺動実験

実験に用いたのは、直径38m、側板高さ約13.7m、容量約15,000KLのシングルデッキ型浮き屋根の石油タンクである。液高は10mであり、内容液は海水を使用した。このタンクの浮き屋根を空気シリンダーで直接加振し、浮き屋根を揺動させ、その変位挙動、減衰定数、発生ひずみ等の測定を実施された。その結果、

- ・スロッシング1次モードに対する減衰定数は、1%未満の小さな値を取り、消防法令で想定されている値とほぼ整合する。
- ・消防法令のポンツーンに生じるひずみ算定式から計算されたひずみ波形と、実験で測定されたひずみ波形とを比較すると、両者は位相、値ともほぼ等しくなり、消防法令における算定式は妥当なものである。

以上のように、消防法令に定められている算定式から得られる減衰定数やポンツーンに発生するひずみ波形は、実規模の石油タンクにおいて妥当な値を有していることが証明された。

2-2 腐食

(1)石油タンク底部裏面の腐食

1978年宮城県沖地震による東北石油での流出事故を引き起こした石油タンクの一部が消防研究センターに保存されており、側板直下の底部裏面の腐食状況の一例を図6に示す。図の右側(黄色の破線で示した部分)には、腐食による激しい凹凸がみられる。この部分には数多くの微小き裂がみられるが、腐食がない部分(赤色で示した部分)にはき裂がみられない。これらの部分の地震動が大きく異なることは考えにくいので、き裂の発生の原因は「腐食」に起因するものと考えられる。

この原因は、地震動により鋼板が繰り返し曲げ荷重を受けると、腐食による鋼板板厚の減少より腐食の凹凸による応力集中の影響が大きく、腐食のない部分よりより大きな荷重を受けることとなるためである。石油タンク底部の腐食に対する維持管理が非常に重要であることがこの事例により分かる。このように、鋼板が腐食を受けながら繰り返し荷重が作用している現象を「腐食疲労」と呼ばれる。腐食疲労では、き裂が腐食のない場合と比較して早期に発生し、き裂は腐食溝から発生する^{9,10)}。また、腐食疲労では、疲労限(繰り返し荷重を何回受けても破壊しない応力)と呼ばれる値が

存在しないことが知られている。

腐食と地震動により発生した底部裏面での微小き裂がさらなる地震動により成長して板厚を貫通し、内容液が流出した。流出した内容液により側板直下の基礎地盤の一部が、2-1(1)で紹介したように崩壊し、破断部にさらなる高い応力が生じて、基礎地盤の崩壊が円周方向に広がり、石油タンクのほぼ全周にわたる破断が生じたものと想像できる。

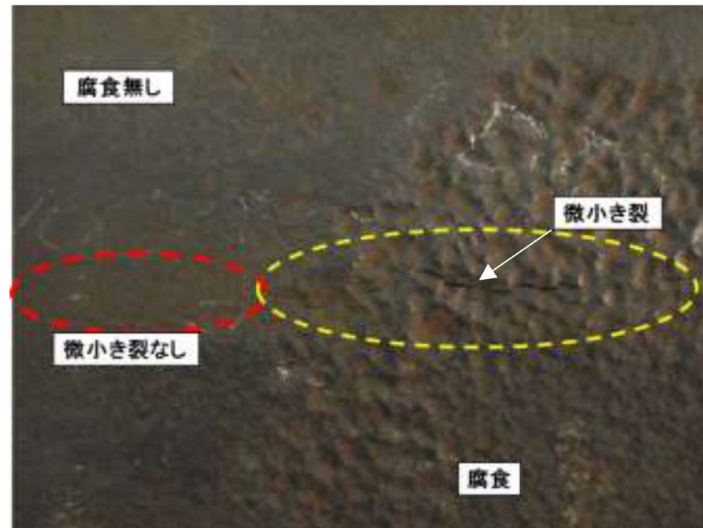


図6 実タンクの底部裏面の腐食と微小亀裂

(2)石油タンク底部内面の防食

近年、石油タンク内面の防食措置及び製品の品質管理としてガラスフレーク樹脂によるコーティングを施工したものが多くなっている。このコーティングは、剥離や傷がなく健全であれば、その防食効果は非常に大きいといえる。しかし、コーティングの施工不良や長期間の使用によりその耐久性が低下すると、膨れが多く発生することがあり、まれに素地鋼板に腐食が発生する場合もある。このようなことから、コーティングの耐久性評価が非常に重要となる。

コーティングの劣化度の評価には、インピーダンス測定法と呼ばれる手法が使われる。これは、タンクの底板表面に100cm²程度のアルミ箔を複数個所に貼り付け、電気特性 (R,C,L) を測定するものである。

これまで、tanδと呼ばれるインピーダンス測定によりその耐久性が評価されてきたが、tanδとコーティングの使用期間との間に高い相関関係がみられず、コーティングの耐久性評価方法としては十分な精度が得られない状態であった。

近年、分布定数素子CPE (Constant Phase Element) と呼ばれるインピーダンス評価を用いたコーティングの耐久性評価方法が検討されている。ここでは、CPEを用いた評価手法の一例を紹介する¹¹⁾。

コーティング耐久性評価として電気化学インピーダンス法を用いた場合の電気回路モデルを仮定し、膨れが発生する前のコーティング自体の劣化進行を表現するために、式(1)に示すCPEを適用させ、そのフィッティングパラメータであるT値及びp値を最終的な解析値として取り扱う。

$$Z = \frac{1}{T(j\omega)^p} \quad (1)$$

Z: CPE のインピーダンス

j: 虚数、 ω : 角速度、p: CPE 乗数[-1≤p≤1]

T: CPE 定数

p値は、コーティングにおいて p=1 の場合、コンデンサとしての性質を示し、p=0 の場合、抵抗としての性質を示す。実際には、この範囲内の値を示し、性質のレベルを数値的に示していると考えられる。

耐久性限界線としては、ここでは詳細は省略するが、電解質溶液分布の理論的考えを基に式(2)を用いて、図7に示す3つの劣化現象を基準とする限界線を設定している。

$$\ln(1-p) + \frac{\ln T}{1-p} = \text{Const.} \quad (2)$$

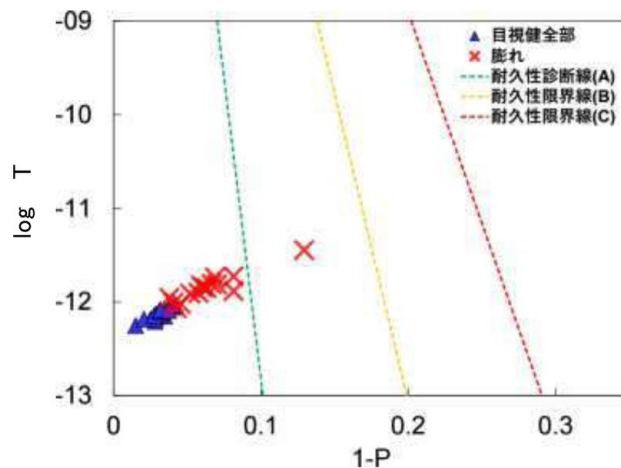


図7 耐久性限界線の設定と実タンクのデータ例

図7の左から耐久性限界線(A)は、目視で膨れは確認できるが、水分は素地へ到達していないため、電気特性の変化は小さい。層間膨れもこの傾向に含む。したがって、この限界線をコーティングの防食性能保持ラインとする。耐久性限界線(B)は、全体的に、黒色の腐食痕跡が存在する部分である。一部、茶色い痕跡が存在する。したがって、この場合も水分は素地へ到達し、電気特性が大きく変化したと考えられ、コーティングの防食性能低下ラインとする。耐久性限界線(C)は、全体的にプライマーと下塗りは残存しているが、茶色い腐食痕跡が存在する部分である。したがって、水等は素地へ到達し、電気特性は大きく変化したと考えられ、素地の腐食進行ラインとする。

実タンクで計測されたデータを解析した結果を図7中に示す。この結果より、施工時からの経年劣化部は、図の左下に位置し、膨れ部は(A)線に近い傾向となった。一箇所のみ耐久性限界線(A)を越えた結果となったが、全体的には、経年劣化が進行していない傾向であった。

この解析を用いることにより、測定データは高い相関性を示すとともに、コーティングの耐久性限界を把握することができるものと考ええる。

2-3 石油タンク内面コーティング上からの溶接線検査技術

現在、開放検査時に行われている底部の溶接線検査は、内面コーティングを剥離して実施されている。コーティングを剥離しないで検査ができれば、開放検査の工期や経費等の効率化が図れる。

近年、渦電流探傷法については、デジタル技術の進歩により探傷機器の性能及び検出精度が向上しており、更に検査用プローブも優れたアレイ方式やマルチ方式などが開発され実用化されてきている。

このような経緯のもと、危険物保安技術協会では、令和4年度から渦電流探傷法が溶接線検査の手法の一つとして適用の可能性について検討が開始されたところである¹²⁾。渦電流探傷法における課題は、コーティングの厚さ及び材質、スリットに対する応答、自然きずの検出性等があげられる。

これらの課題に対して、(一社)日本非破壊検査工業会の協力を得て詳細に検討され、得られた内容を以下に紹介する。

(1)検査手順の中で求められる探傷器の感度設定のための「基準きず」、きず判定のための「検出レベル」及びきず長さ「サイジング方法」についての案が検討された。

- (2)きず長さ4mmの検査手順の妥当性を確認するため、溶接部に付与された長さ25mmの自然きず(割れ)に対して試験した結果、容易に検出することが出来た。
- (3)応答領域を用いたきず長さサイジングにおいて、長方体スリットきずは、応答領域の長さ>きず長さ、自然きずは、応答領域の長さ<きず長さという傾向を得られた。
- (4)コーティング厚さによって検出感度が変わるため、測定箇所のコーティング厚さが既知であることが重要であることを確認した。
- 現在、渦電流探傷法による溶接線検査について、消防庁においてさらなる検討が始められているところであり、今後、その実用化が図られることが期待される¹³⁾。

3 まとめ

三菱石油水島製油所の石油タンクの重油流出事故後、50年にわたり石油タンクの安全対策についての研究と検査技術の一部についてその概要を紹介した。石油タンクの通常時の構造強度、基礎地盤の一部崩壊による石油タンク底部の応力状況、今後も発生が危惧されている地震動による石油タンクの底部あるいは浮き屋根の強度について紹介した。さらに、今後の石油タンクの維持管理に重要な底部内面コーティングの耐久性評価法や開放検査時の溶接線検査における渦電流探傷法の適用の可能性についても紹介した。

年々、石油タンクの設置数は減少傾向にあるが、今後それらの安全性を確保していかなければならない。大規模地震が叫ばれる昨今、石油タンクの地震時の挙動だけでなく腐食や検査手法についても技術・研究を進めるうえで、多少でも参考になれば幸いである。

参考資料

- 1) 例えば、失敗事例>水島のタンク破損による重油流出
<https://shippai.org/fkd/cf/CB0012040.html>
- 2) 亀井浅道、「大型石油タンクに生ずる応力-軸対象弾性体としての解析-」、消防研究所報告、通巻46号(1978)7-20
- 3) Denham, J.B.et al:How to Design 600,000-Bbl.Tank,Hgdrocarbon Processing,47,137(1968)
- 4) 亀井浅道、「石油タンク底板に生じる応力-盛り土に局部的崩壊がある場合-」、消防研究所報告、通巻47号(1979)1-8
- 5) 石田和雄、その他、「大型石油タンクの実地震波に対する浮き上がり挙動」、圧力技術、35-6(1997)308-316
- 6) 山田實、その他「石油タンク内面防食用コーティング材の損傷と強度」、圧力技術、35-5(1997)346-350
- 7) 西春樹、「地震時における石油タンク浮き屋根の揺動挙動と安全性に関する研究」、博士論文、平成20年2月
- 8) 西春樹、その他、「実規模浮き屋根式石油タンクを用いた浮き屋根の揺動挙動実験」、圧力技術、46-1(2008)4-17
- 9) 亀井浅道、その他、「大型石油タンクのT型すみ肉溶接継手近傍の低サイクル疲労強度」、消防研究所報告、通巻51号(1981)35-43
- 10) 山田實、その他、「腐食疲労亀裂長さとピットの大きさに関する研究」、消防研究所報告、通巻62号(1986)32-43
- 11) 伊藤大輔、その他、「電気化学インピーダンス法による新しい解析値を用いた石油タンク底板塗膜の防食機能評価」、電気学会誌143-6(2023)335-337
- 12) 危険物保安技術協会、「(令和4年度)渦電流探傷試験によるコーティング上からの溶接線検査の適用に向けた調査研究報告書」、令和5年3月
- 13) 消防庁、「新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会」
https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/post-162.html