

検討結果を踏まえた旧法屋外タンク貯蔵所の 保安検査のあり方に関する方向性について

1 基礎地盤の評価に係るまとめ

旧法タンクの基礎地盤の堅固さを評価するため、水張試験時における実タンクの沈下量計測及び有限要素法による沈下量解析を実施した。

1.1 水張試験の沈下量測定

新法タンクと旧法タンクについて水張試験を行った結果、地盤の締固めの基準がない年代に建設された旧法タンクは、新法タンクに比べタンク内部の沈下量が大きい（タンク底部に引張応力が発生する）という結果となった。これは、タンク底板と地盤面との局所的な隙間（空隙）が影響しているものと考えられる。また、水張水位と沈下量の関係は、注水時と排水時において非線形であることが確認された。

1.2 有限要素法による解析

有限要素法による平板載荷試験の沈下量解析では、地盤性状の持つ荷重と沈下量の非線形性を定性的に表現することが可能であった。また、地盤剛性の設定を詳細に行うことにより、タンク外周部における沈下量と計測結果で、定量的な一致が確認できたことから、屋外タンク貯蔵所が設置されている範囲の地盤剛性をマクロ的に評価する方法として妥当であると考えられる。

また、有限要素法による水張試験のタンク沈下量解析では、外周部については、水張試験の計測結果と解析結果が定量的に一致した。一方で、タンク内部の沈下量については、有限要素法による解析結果が実タンクに水張試験を実施した計測結果と比較し過小評価する結果となった。過小評価となる要因としては空液時に存在する基礎表面とタンク底板との局所的な空隙等の影響が考えられる。

1.3 基礎地盤の評価における今後の課題

有限要素法による解析結果が実タンクによる水張試験の計測結果と比較し過小評価する結果となったが、これはタンクの基礎表面とタンク底板との局所的な空隙等の影響が考えられるが、空隙の範囲や深さについては中性子を用い非破壊的に確認する方法があるものの一般的ではないこと、個々のタンクにおいて基礎の表面及び空隙の状態が異なること等から、タンク底板の沈下に及ぼす空隙等の影響を評価することは現時点では困難であると考えられる。

今後は、水張試験等を利用したタンク底板の沈下量計測の実施と有限要素法を利用した沈下量解析結果を比較したデータの蓄積及びタンク底板の沈下に空隙等が与える影響についてのデータ収集により、基礎地盤を統計的に評価するとともに、基礎表面とタンク底板との空隙測定を実施し空隙の範囲と深さを詳細にモデル化した解析を

行い、液荷重によるタンク底板の沈下に関する種々の要因の影響度について評価することで、今後検証が可能となるものと考ええる。特に外周部に比べ内部の沈下量が大きいというデータが取れたことは、底板に対して引張応力が発生する可能性があることから、これらの評価に関しては、注意を要する。

今回実施した有限要素法のシミュレーション手法を種々の異なる性状の地盤に対して適用していく必要があり、実際に計測した荷重と沈下量の関係とシミュレーション結果の定量的な検証の実施が望まれる。一般的に容量が1万キロリットル以上の屋外貯蔵タンクは、その内径が概ね30mを超えるものが多いことから、地盤の深さ方向の構成がタンクの沈下に与える影響が大きくなってくると考えられる。従って、タンクの沈下シミュレーションを精度よく実施するためには、まずタンク設置位置の原地盤の構成及びその物性を正確に把握し、沈下シミュレーションのパラメータとして設定する必要があると考えられる。

この場合において、定量的に精度の高い沈下シミュレーションを実施することを考えた場合、弾性波探査によって得られる地盤のせん断弾性波速度 V_s や孔内載荷試験から得られる地盤剛性、さらに不攪乱試料を用いた三軸試験から得られる土の剛性および粘着力 c 及び土の内部摩擦角 ϕ 等のデータが有効と考えられる。弾性波探査や孔内載荷試験などの原位置試験と三軸試験のデータを解析して沈下シミュレーションに必要な地盤モデルを構築する場合、地盤剛性は拘束圧や生じたひずみの大きさによって変化するという非線形性があることを考慮する必要がある。

2 溶接部の評価に係るまとめ

旧法タンクの底板に適用されている重ねすみ肉溶接を対象とした4点曲げ試験及びき裂進展解析を実施した。

2.1 溶接部の曲げ試験及びき裂進展解析

溶接部の曲げ試験では、重ねすみ肉溶接部の構造的要因（初層部欠陥の有無、隙間、のど厚）のうち、初層部欠陥の有無及びのど厚の大小が疲労強度に影響を及ぼすことが分かった。

また、有限要素法を用いたき裂進展解析から沈下量と疲労破断回数関係を示す疲労寿命カーブを得た。定量的な評価は困難であるものの、300mm程度の範囲において健全な重ねすみ肉溶接部が鉛直方向に10mmたわむことが考えられる場合は、繰り返し回数が1,000回程度でルート部からのき裂がのど厚の80%まで進展する結果となっている。定性的には当該溶接部ののど厚の減少や初層部の欠陥の存在により疲労強度が脆弱になることが確認されている。繰り返し回数の少ない範囲（概ね1,000回以下）においては、解析結果が4点曲げ疲労試験から得られた結果に対して非安全サイドとなっている点に留意する必要がある。

2.2 溶接部の疲労強度の評価

旧法タンクは新法タンクに比べて地盤の沈下量が大きくなることや、旧法タンクの底板の板厚は新法タンクに比べて薄いこと、水張試験の結果などから、荷重による旧法タンクの底板のたわみ量は新法タンクに比べ、大きくなることが分かった。さらに、旧法タンクは設置から概ね40年以上経過したものが大半であり、底板の重ねすみ肉溶接部には荷重履歴が重ねられていることを踏まえると、底板の重ねすみ肉溶接部の疲労強度を慎重に評価していくことが必要である。

2.3 溶接部の疲労強度を確認するための今後の課題

底板のゆがみによる重ねすみ肉溶接部の疲労強度を定量的に評価するためには、実際のタンクにおいて局所的にゆがみが発生する範囲、その範囲におけるゆがみ量、重ねすみ肉溶接初層部の欠陥の有無、重ねすみ肉溶接ののど厚について把握することが重要になるが、現状の技術ではそれらを把握することは困難であると考えられる。今後、重ねすみ肉溶接初層部の欠陥の有無や重ねすみ肉溶接ののど厚の評価が可能となる検査手法やタンクの液圧の増減等の影響による疲労強度の評価手法が確立されることで、溶接部の疲労強度を評価することが可能になるものとする。なお、空隙の評価において重要なポイントとしては次の点が挙げられる。

- (1) 空隙の形態（基礎表面の沈下、タンク底板の浮き上がり）の整理
- (2) 空隙量が測定した沈下量と液圧の関係から逆算した地盤剛性に与える影響の把握
- (3) 空隙量がタンク底板の疲労強度に与える影響の把握

3 旧法タンク底部の板厚の評価に係るまとめ

3.1 腐食劣化によるタンク底部板厚の影響評価

開放周期の間隔により、底部板に貫通孔が生じることによる流出事故がどの程度増加するかについて、容量1万キロリットル以上の旧法タンクにおいて、過去の開放検査時に測定された腐食深さのデータを用いて模擬的に検討を行った。

- (1) 腐食速度が一定等の仮定をした場合において、内面腐食速度を用いた推定では、一般的な基本開放周期7年の期間で2基に貫通が生じる結果となった。
- (2) 裏面腐食による貫通推定件数においては、内面腐食と同様に腐食速度が一定等と仮定した場合において、連続板厚測定を実施したと想定した場合では、基本開放周期7年の期間で21基に貫通が生じる結果となった。

模擬的な検討により、貫通が生じる可能性が確認できたことから、基本開放周期7年は、過剰に安全余裕を見込んでいるとは考えられない。

これら模擬的な検討には、開放検査時に板厚を測定せずに底板を取替えた場合など腐食深さが測定されなかった旧法タンクのデータが除かれている等の留意点があるほ

か、裏面最大腐食深さは定点測定法による値に対して平均的な係数を乗じた深さとしたこと（実際には、より深いものも考えられる。）や、実際のタンクでは、同じ部位に内面及び裏面の両方に腐食が生じることがあることにも留意が必要である。

また、旧法タンクは新法タンクに比べ、平均的な裏面腐食速度が速いということにも留意する必要がある。

そのほか、底板の腐食速度の変動や定点測定法による板厚測定での最大腐食量を見逃した事等によりタンク底部板に貫通孔が生じることがないように、底部の板厚を厚くする補修を行うことや、開放検査で連続板厚測定法を採用すること等有効的と考える。また、定点測定法による板厚管理を行う場合には、必ずしも最大腐食箇所を把握できるとは限らないことから、腐食速度に対する変動幅等を考慮した板厚管理についても留意していくことが必要と考える。

4 事故事例による評価に係るまとめ

4.1 事故事例の分析

屋外タンクの底部からの危険物流出事故の9割以上は旧法タンクで発生しており、その件数を事故発生年でみると、1980年以降容量1千キロリットル以上の屋外タンクについては減少しているが、これは1977年（昭和52年）に内部開放検査が義務付けられ、1977年以降順次屋外タンクの内部開放検査が実施された効果が出ているものと考えられる。また、容量1万キロリットル以上の屋外タンクは保安検査が実施されているにもかかわらず危険物流出事故の発生が続いている。

容量1万キロリットル以上の旧法タンクにおいて、底部からの危険物流出事故に限定してその部位別に整理すると、底部母材部からが59%（10基）、底部溶接部からが41%（7基）となっている。一方、新法タンクについて同様にみると、流出事故は起きていない。新法タンクに比べ、旧法タンクでは一般的に板厚が薄く、溶接施工方法も突き合わせ溶接と比較して強度の弱い重ねすみ肉溶接が多く採用されていることが、底部母材部及び底部溶接部ともに危険物流出事故が多く発生する原因と考えられる。

屋外タンクの底部からの危険物流出事故について、要因別に整理すると、腐食による事故が大きな割合を占めているのが分かるが、屋外タンク貯蔵所全体に比べ、特定屋外タンク貯蔵所ではその割合が減少している。このことから、内部開放点検時等の底部板厚確認が一定の効果を果たしているものと考えられることができる。一方、底部のき裂による危険物流出事故は特定屋外貯蔵タンクにおいてもその割合が減少していないことから、底部のき裂に対する安全性については慎重に検討する必要がある。

屋外タンクの危険物流出事故に伴う流出量について、通常運転時と地震時に分けて整理したところ、危険物の平均流出量は、容量1万キロリットル以上の屋外タンクがそれ未満のものに比べてかなり多く、特に地震時の平均流出量が多いことが分かった。これは、容量が大きい屋外タンクで危険物流出事故が起こると、その流出を止めるこ

とが非常に困難であるとともに、周辺環境等への影響も甚大であることを意味している。

5 保安検査周期のあり方のまとめ

5.1 保安検査周期のあり方

旧法タンクについては、基礎地盤の堅固さについて具体的な基準がなく建設されていること、溶接部について信頼性の劣る重ねすみ肉溶接が用いられていること、タンク板厚について新法と比較し薄いなどの特性があることから、これらについて総合的に検討を行ってきた。

腐食劣化によるタンク底部板厚の影響評価については、一定の仮定条件をおいた推定結果ではあるが、一般的な基本検査周期7年においても内面腐食又は裏面腐食により底部に貫通が生じる可能性があったことを鑑みれば、基本検査周期7年は合理的な安全性を見込んだものであり、過剰に安全余裕を見込んでいるとは考えられない。また、基礎地盤や溶接部については、現在の技術や知見において、タンクの基礎地盤の空隙を把握する手法、空隙がタンクに及ぼす影響の評価手法、溶接部の初層部の欠陥やのど厚の評価が可能となる検査手法及びタンクの液圧の増減等の影響による疲労強度の評価手法などが確立されていない。

このことから、保安検査周期を延長した場合の影響を評価することは困難であり、現時点において保安検査周期を延長することは適当ではないと考えられる。

5.2 旧法タンクの保安検査周期のあり方を検討するための今後の課題

今後、旧法タンクの保安検査周期の延長を検討するにあたっては、タンクの基礎地盤の空隙を把握する手法の確立、空隙がタンクに及ぼす影響の評価手法の確立、溶接部の初層部の欠陥やのど厚が確認できる検査手法の確立、実タンクでのタンク内面の底板沈下量測定の数値データ及び沈下シミュレーション結果の蓄積やタンク液圧の増減等の影響による疲労強度の評価手法が確立されることで、旧法タンクの保安検査周期の延長の検討が可能となるものと考えられる。