

## 審査の結果の要旨

氏名 高橋 智彦

LNG（液化天然ガス）地下タンクは危険物である LNG を貯蔵する設備であり、LNG の冷熱に起因する大きな温度応力を受けるとともに、高い耐震性能が求められる構造物である。LNG 地下タンク躯体に温度応力が作用すると、ひび割れ発生に伴う剛性低下が懸念される。これまでは、室内実験を根拠として、躯体の剛性を 1/2 に低減するという設計法が適用されてきた。この剛性低下率は、躯体に発生する応力に大きく影響を及ぼし、常時およびレベル 1 地震時の配筋を左右する。しかしながら、これまで地下タンク躯体の配筋はレベル 2 地震動で決定されることになるため、温度応力による断面剛性低下について、詳細な検討が行われてこなかった。

一方で昨今、レベル 2 地震動作用下における構造応答と損傷を精緻に評価可能な 3 次元動的非線形有限要素法解析の活用が進みつつあり、LNG 地下タンクの破壊に対する適切な評価指標を定めることによって、躯体の鉄筋量を大幅に削減できる可能性がある。この場合、躯体の配筋は、常時およびレベル 1 地震動で決定される可能性があるため、剛性低下の評価が極めて重要になる。

以上の背景を踏まえ、本論文では、LNG 地下タンクの建設から運用に至る過程での温度応力による剛性低下について、水一熱一力学応答マルチスケール連成解析によって精緻な評価を行っている。さらに、レベル 2 地震動における面外せん断に対して、従来の断面力に着目した照査に代わって、ひずみによる照査を導入することで、鉄筋量の大幅な削減につながる合理的な設計法を提案し、LNG 地下タンク建設の大幅なコストダウンを実現している。

第 1 章では、LNG 地下タンクの概要と運用状況、LNG 地下タンク躯体に発生する温度応力と設計時における剛性低下の取り扱い方、およびレベル 2 地震動に対する現行の耐震性能照査方法を概説したうえで、研究の目的、対象、方法論と論文の構成について示している。

第 2 章では、LNG の冷熱に起因する温度応力によって生じる地下タンクの剛性低下を精緻に評価するために、熱一水一力学応答を連成させたマルチスケール統合解析を用いて、100 年単位の時間スケールにおけるシミュレーションを行っている。LNG 地下タンクと周辺地盤から構成される有限要素解析モデルを用いて、連壁構築、底板打込み、躯体リフト

施工、LNG 封入といった LNG タンクの段階施工から運用に至る過程を極力現実に即した形で数値解析を行うために、環境・境界条件を 26 回切り変えてコンクリート部材の時間依存力学応答を追跡している。その結果、解析モデルは水和発熱に起因する初期の温度上昇を良好に予測できること、躯体に発生するひび割れは表層に留まり断面を貫通する過大なひび割れが生じないこと、また LNG 封入以降の躯体および底版の断面力を時系列で算出したところ、5 年から 10 年程度でほぼ定常状態となり、断面剛性を一律  $1/2$  とした従来手法の値と概ね同程度であることを示している。ここで、断面剛性の低下するメカニズムは、ひび割れ発生に起因するものではなく、材料のクリープによる低下であることも明らかにしている。

第 3 章では、3 次元動的非線形 FEM 解析を用いて、レベル 2 地震作用時の LNG 地下タンク躯体の耐震性能評価を行っている。面外せん断破壊に対する新たな評価指標として、せん断補強鉄筋の降伏、コンクリートの圧縮破壊、躯体厚さ方向の連続性に着目し、従来の面外せん断耐力に代わる限界値として、それぞれのひずみの限界値で照査する手法を提案した。その結果、レベル 2 地震作用下における面外せん断破壊に対しては十分な余裕があることを示すと共に、レベル 2 地震を超える地震荷重作用として応答震度法によるプッシュオーバー解析を行い、レベル 2 地震時の層間変形角および圧縮ひずみに対して 5 倍程度の余裕度を有していることを示した。

第 4 章では、本論文で提案する設計法の意義を、過去の経緯を踏まえて整理するとともに、解析照査の結果に基づいた実 LNG タンクの施工の合理化および工期短縮への展開を図っている。まず、躯体の鉄筋量は常時の温度応力が支配的であり、温度応力およびレベル 1 地震動に対する配筋によって、レベル 2 地震動作用時の照査値を満足することを確認している。その結果、従来の地下タンクと比較して鉄筋量は約 55%、建設コストは約 64%となるなど、大幅なコストダウンにつながるものとなった。また、レベル 2 地震作用時における 3 次元動的非線形解析の結果から、底板と躯体の剛結部は破壊の起点とならないことが確認されたため、底板と躯体の一体化施工、重ね継手における継手位置を同一断面に集中させるなど、施工の合理化を実現し、生産性の向上につなげている。

第 5 章では、本研究のまとめと今後の展望を示している。

以上、LNG 地下タンクを対象として、マルチスケール統合解析技術を最大限活用することで、設計および施工の合理化を図ることに成功しており、学術的および工学的観点の両者から研究の意義が認められる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。