

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 原田 光男

極低温の液化天然ガス（LNG）の貯蔵施設は、輸入・輸送ルートとエネルギー消費地との関係から、主として日本の大都市臨海部に立地している。そのため、地震と津波に対して高い耐性を有する地下式タンクが首都圏近傍において専ら採用されており、大型化による規模の経済効果も見込まれている。断熱材と鋼製ライナー全体を支持し、かつ地盤や貯留物からの荷重を直接受ける鉄筋コンクリート躯体には、レベル 2 地震動のような強地震動に対しても、十分な変形性能とエネルギー吸収能を付与することが求められる。建設には大規模な地盤掘削が伴うため、地上式タンクと比較して建設費が高くなる。国際競争力を獲得する上でも、設計施工の合理化が特に求められる。終局に至るまでの LNG 地下タンク躯体の耐荷機構と、地盤との相互作用のもとに、終局限界状態を超えた状況での挙動を予測・評価することが設計段階で必要となるのは、以上の理由にもよる。

本研究は LNG 鉄筋コンクリート地下タンク躯体を対象とし、性能設計体系のもとで、地盤-躯体の連成動的 3 次元非線形応答解析を用いた耐震性照査法の開発を行ったものである。論文は以下の章から構成されている。

第一章は序論であり、本研究の目的と背景を述べている。地下式 LNG 貯留施設の基本構成と、鉄筋コンクリート躯体に求められる設計要件を明確にするとともに、基本および詳細設計の変遷と現在の耐震設計体系を整理している。同時に、地震時安全性と地震後の復旧性の確保には、3 次元的な広がりを持つ領域での地盤と躯体との非線形相互作用を設計に直接、取り入れることが極めて有効であることを示している。

第二章では実機の鉄筋コンクリート地下式タンクの諸元を基に、円筒形縮小鉄筋コンクリート模型を用いた交番載荷実験を行い、鋼材降伏時の限界状態と最大耐力以後の変形特性について検討を行っている。交番繰返し荷重下の復元力特性の推移と履歴依存性、最大耐力以後のコンクリートの圧縮軟化領域の広がりや残存剛性率から、シェル構造部材であっても降伏以後の靱性を、周辺地盤以上に確保することが可能であることを示している。この結果は、地震荷重を直接負担するために配置される鉄筋の量を減少させて建設コストを下げながらも耐震性能を向上させることが、地中において可能であることを示すものである。

第三章では、多方向非直交ひび割れを有する鉄筋コンクリート要素モデルを用いた非線形三次元解析の適用性を、第二章で実施した模型実験を用いて検証している。交番繰返しせん断力に対する復元力特性、特にひび割れ交差に伴う復元力と靱性に現れる履歴依存性が再現可能であることを明らかにしている。さらに、構造体として最大耐力が発揮される時点での局所ひずみ分布の実測から、多方向ひび割れを有する有限領域における主圧縮ひずみを指標に用いれば、終局限界状態における安全側の判定が可能であることを明らかに

した。これは、荷重方向が変化すると、その履歴の影響を受けて構造体としての靱性率も見かけ上、変化していく事実にも対応できるため、汎用性が高い。最大耐力以後に徐々に失われていく残存保有耐力も、圧縮軟化領域を適切に評価すれば、予測することが可能であることを示している。

第四章では、第三章で検討した躯体非線形挙動と周辺地盤の非線形性の相互作用に視点をあてて、地盤—躯体系に対する数値解析の適用性について検討を行っている。現存するLNG地下タンク群の過去の地震時応答計測結果と本研究で開発した照査システムとの比較から、地盤応答と構造躯体応答は概略、適合することを確認している。さらに巨大地震に対する実機タンクの応答推定値と、予想される構造躯体の損傷評価を行った。最大耐力よりもタンク自体のせん断靱性を高めることが、総合的に高い復旧性と地震時安全性を地中において実現する上で有効であることを明示している。

第五章は結論であって、実験・解析両面からの検討を踏まえ、地盤との相互作用を考慮可能な動的三次元非線形応答解析に基づく耐震性能設計法の利点を述べている。同時に、実務への適用にあたっての留意事項について工学的観点から取りまとめ、今後の技術展開の方向について論じている。

本研究は、実機 LNG 地下タンク 躯体の耐震設計に当該技術を適用し、高い耐震性と経済性の両者を満たす合理的な設計が可能となることを明らかにし、世界最大規模の地下式タンクの基本設計と実現に大きく寄与した。これらは、現存する実機地下タンク群の地震時挙動記録と縮小躯体実験の両者から検証を得ており、本研究の成果は当該構造物の設計基準類に既に反映されている。

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。