

## 論文の内容の要旨

熱・水・力学応答連成解析による LNG 地下タンク躯体の  
温度応力による剛性低下の解明とひずみによる耐震性能照査

高橋 智彦

研究で対象とする LNG 地下タンク躯体は、危険物である LNG を貯蔵する設備であり、常時に LNG の冷熱による非常に大きな温度応力が作用しているとともに、特に高い耐震性能が求められる構造物である。

LNG 地下タンクの躯体に温度応力が作用すると、躯体にはひび割れが発生し、躯体の剛性が低下することが確認されており、既往の研究成果から剛性を 1/2 に低減して構造設計を行っている。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、剛性低下率の違いが常時もしくはレベル 1 地震時の配筋を大きく左右する。しかしながら、既往の地下タンク躯体の配筋はレベル 2 地震動で決定されており、温度応力による断面剛性の低下については、詳細な検討は実施されてこなかった。

一方で、既設タンクの耐震性能を評価する手法として、レベル 2 地震動に対して、ひずみ照査が適用されており、同様な評価を新設構造物に適用することで躯体の鉄筋量を削減することが提案されていた。しかしながら、新設構造物にひずみ照査を適用するには、いくつかの課題があるものと筆者は考えている。

- ✓ レベル 2 地震動に対してひずみ照査を適用すると、躯体の鉄筋量が常時もしくはレベル 1 地震動等で決定する可能性があるものの、その際に用いる温度応力による剛性低下は現状の評価方法が妥当なものか
- ✓ 既設構造物の耐震性能評価で用いている手法では、面内せん断に対する評価指標と限界値が示されているものの、面外せん断に対しては断面力・断面耐力による照査方法しか示されておらず、ひずみによる直接的な評価手法が確立されていない
- ✓ 前記 2 つの課題を解決した上で、鉄筋量を大幅に削減して新設される LNG 地下タンクは、どのようなモードで破壊が進展し、どの程度耐震に対する余裕があるかを事前に評価しなければ、想定以上の地震動が作用した時に脆性的な破壊を起こす可能性も否定できず、トータルとしてみたときに合理的な設計になっているかが分からない

そこで、これらの課題を解決するために、本研究においては、後述する検討を行った。

任意の材料・配合，構造諸元および養生・環境条件のもとで，水和反応の開始から長期供用期間におよぶ性能と応答を統一的な手法で評価するためのマルチスケール統合解析を用いて，100年間にわたる挙動の一元的な評価を試みた。

コンクリート打設時や硬化時などの躯体構築時の経時変化，LNG封入後から定常状態に至るまでの経時変化，長期材齢時の経時変化と躯体損傷を評価した結果，ひび割れ損傷は躯体表層部に限定的に発生しているだけで，躯体内部にまでは進展していないことが確認された。なお，躯体表層部で発生しているひび割れは，最大でも引張軟化し始める程度に留まっている。

また，常時の荷重のみが作用している状態での断面力の経時変化を確認したところ，温度や含水状態の変化に伴う体積変化等によって断面力が変化し，5～10年程度でほぼ定常状態となった。さらに，躯体に発生する軸力，せん断力，曲げモーメントは断面剛性低下率を1/2とした場合と一致しており，従来の設計手法の妥当性が確認された。従来，断面剛性の低下はひび割れの発生によるものと考えられていたが，その影響よりもクリープによる低下の方が支配的であることが明らかとなった。

LNG地下タンクの実施設計段階で地盤-タンク連成3次元動的な非線形解析を用いてレベル2耐震性能評価を行った。また，解析応答値のひずみを直接的に評価する指標を構造物の目標性能に応じて適切に設定して評価する耐震設計を提案した。

これまで構造物の設計は「断面力」という概念の元に，その部材の耐力で照査する方法が一般的であった。一方で，解析技術の進展に伴い，設計段階で動的な非線形解析を行うことが可能となってきた。

今回対象としたLNG地下タンク躯体においては，常時，異常時およびレベル1地震動で決定した配筋に対して，レベル2地震動を作用させてひずみ照査を行った。その結果，鉄筋を増やすことなく照査値を満足することができ，大幅な合理化を図ることが出来た。

さらに，LNG地下タンク躯体にレベル2地震動を越えるような想定以上の地震動を作用させて，破壊形態や保有性能について検討した。その結果，LNG地下タンク躯体はウェブ面の面内せん断損傷が先行することが明らかとなり，既往の知見と一致する結果となった。また，LNG地下タンク躯体の保有性能は非常に高く，レベル2地震に対して5倍程度の耐荷性能や変形性能があることが分かった。

このように設計段階において想定以上の地震力が作用した場合の性能を評価しておくことは，LNG地下タンクの所有者・管理者にとって，運用中に発生する地震リスク評価を定量的に行うことが出来ることから，事業継続計画（BCP）に役立てることが可能であるとともに，熊本地震のように比較的大きな地震が再来した場合の構造物健全性評価にも活用が可能である。

実構造物へ適用した結果をもとに、躯体鉄筋量の要因別合理化効果を整理した。その結果、従来号機を 100%とし、荷重レベルの引き上げ（レベル 2 地震動の照査付加）を行ったにも係わらず、最新の 9,12 号タンクではレベル 2 地震動にひずみ照査を取り入れることによって大幅な鉄筋量の削減がなされており、鉄筋量は従来号機の 55%となった。また、建設コスト全体も大幅に削減できており、コストは従来号機を 100%とした場合に 64%まで低減できた。

さらに、今回の地下タンクでは、底版鉄筋の合理化等を図るために、底版と躯体を一体化する剛構造を採用した。これにより、ピン結合構造の場合に必要な目地部の支承構造や止水構造を省略でき、非常にシンプルな構造とすることが可能である。一方で剛結部の配筋は複雑となり、施工の簡略化が必要であった。今回の一連の検討結果から、剛結部が LNG 地下タンク躯体の破壊の起点とならないことや、レベル 2 地震動に対しても十分な安全性を有していることが確認されたため、剛結部においては同一断面に継手部を集中させても構造物の性能には影響を及ぼさないと判断し、一体化施工を行うことで大幅な工程短縮を図ることが可能となった。