

(様式2)

学位論文の概要及び要旨

氏 名 中島 照浩 印

題 目 平底円筒貯槽の地震時浮上り挙動の半解析的有限要素法に基づく
静的有限変位解析に関する研究

学位論文の概要及び要旨

本論文では、アンカーのない平底円筒貯槽（以下タンクと呼ぶ）の設計過程や設計照査に適用する地震時のロッキング振動に伴う底板の浮上り量を解析する方法について検討を行った。

はじめに、既存の動的陽解法について、水を充填したアクリル製タンクの自由落下実験と3次元の立体モデルによる解析結果との比較により、実務設計への適用の可否について検討した。動的陽解法は、タンクの浮上りの変位の時刻歴やロッキング振動に伴う底板の浮上りによる動液圧は精度よく解析できるが、応力については、タンクが基礎に接触する場合に生じる衝撃に伴う応力の振幅が大きく、工学的判断が必要なため、直ちに設計には適用できないと結論付けた。また、タンクの構造解析に適した解析法を抽出するために、既存の有限要素法と半解析的有限要素法を厳密解と比較し、半解析的有限要素法が既存の有限要素法より精度良く厳密解を解析できることを示した。

これらのことより、設計過程や設計照査に適用する地震時のロッキング振動に伴う底板の浮上り量を解析するためには、半解析的有限要素法を用いてタンクをモデル化し、静的な解析を行う必要があると考えた。タンクが円筒形であることと、タンクに作用する外力が円周上に滑らかに分布することから、タンクモデルは、円周方向に級数展開する半解析的有限要素法に基づいて、タンクの側板には円筒シェル要素、底板には円形リング要素と、基礎との接触を考慮するための部分的に配置するバネ要素を組み合わせて作成することにした。さらに、タンク底板をモデル化する構造要素は、局所的に大きな変形を伴うことから、幾何学的非線形性を考慮することとした。

まず、タンクの側板に用いる円筒シェル要素は、既存の微小変形理論に基づく半解析的有限要素法によって定式化された要素を用いた。

次に、タンクの底板に用いるリング要素は、幾何学的非線形性を考慮する半解析的有限要素法を用いてリング要素の定式化を行った。円形板をモデル化して有限変位解析を行い、Federhofer, Eggerが示した厳密解による荷重-変位曲線と比較し、良好な解析精度であることを確認した。また、タンク底板の浮上り挙動を想定した非軸対称状の荷重を載荷させたところ、発散することなく解が求められることを示した。さらに、タンクの側板と底板の結合を想定して、半径方向に移動可能な境界条件を設定し、静水圧を受けるアルミニウム製円板の面外方向の変位を計測する実験結果と比較したところ、幾何学的非線形性の効果を含んで、円板の面外方向と半径方向の変位を精度良く求められることを示した。

そして、底板と基礎の接触領域と浮上り領域を表現するために、底板をモデル化するリング要素に部分的に取り付けるバネを、微小変形理論に基づく半解析的有限要素法を用いてバネ要素の定式化を行った。部分的に取り付けたバネの剛性を円周方向にフーリエ級数展開することから、解析に必要な級数の項数について検討し、級数の項数を $m=10$ 以上とることによって、解の収束値が得られることを示した。さらに、部分的にゴムで支持するアルミニウム製円板に静水圧を載荷する実験結果と比較したところ、円板断面の鉛直方向の変位が精度良く求められることを示した。

荷重は、タンク自重、静液圧、水平地震動によるタンクの絶対応答加速度やロッキング振動による角加速度から定まるタンクの慣性力の他に、これまでに解明されつつある研究成果を踏まえて、水平地震動によるタンクの絶対応答加速度から定まるバルジング応答に伴う動液圧、ロッキング振動による角加速度から定まる浮上り応答に伴う動液圧を用い、ロッキング応答とバルジング応答の相互作用によるバルジング応答の低減効果を考慮した。

前述の半解析的有限要素や荷重を組み合わせ、実機のLNGタンクのモデルを作成し有限変位解析を行い、タンクのロッキング振動に伴う底板の浮上り量を計算した。解析結果を、Hayashiらが示した陽解法によるタンク底板の浮上り量の時刻歴の最大値と比較したところ、良好な結果を得ることができたと考える。さらに解析結果は、本研究で用いたタンク底板の浮上りのメカニズムやそれに寄与する物理量の適正さの傍証となるとともに、次に示す底板の浮上りを許容するタンク的设计に考慮すべき新たな事柄やAPIやEuro-codeなどの既存の設計基準の誤りを浮き彫りにするものとなった。

1つ目は、側板の最上縁に取り付けられたトップリングの剛性によって底板の浮上り量は大きく変化するので、トップリングの適切な設計が、タンク底板の浮上り量を制御するためには欠かせないことを明らかにしたことである。これは、タンクの側板上縁部が楕円形状に変化した場合、変形のつじつまを合わせるために、タンクの底板が大きく浮上ることが分かったからである。

2つ目は、APIやEuro-codeなどの設計基準は、過大なタンク底板の浮上り量を与えていることを明らかにしたことである。これら設計基準の基になる解析を再現したところ、側板の最上縁の要素の剛性を大きくした場合であっても、最大浮上り変位量が2.0mを超える現実離れした底板の浮上り量となったからである。

以上のことより、タンクのロッキング振動に伴う底板の浮上りのメカニズムやそれに寄与する物理量を明らかにし、タンク的设计に資する解析方法を提案できたと考える。