

論文の内容の要旨

論文題目：LNG 地下タンク躯体の耐荷機構と

地盤との相互作用を考慮した 3 次元動的非線形 FEM 解析による耐震性能照査

氏 名：原 田 光 男

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、特に高い耐震性能が求められる構造物である。

耐震性能の照査で対象とするレベル 2 地震動は極めて稀であるが、非常に強い地震動を定めるものであって、終局変位に至らない範囲で構造物が損傷を受けることを考慮し、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の性能を照査することが求められる地震動である。

筆者は、このような強い地震動に対して、高い耐震性能が求められる LNG 地下タンク躯体の安全性を確保するには、躯体の持つ変形性能（エネルギー吸収能）を活用することが合理的であると考えている。

LNG 地下タンク躯体の持つ変形性能を活用し、合理的な耐震性能照査を実現するためには、載荷経路に依存した LNG 地下タンク躯体の損傷程度や変形量を必要な精度で評価することが求められるが、それには、地震の作用に対する LNG 地下タンク躯体の耐荷機構に対する理解と、その非線形な挙動を予測できる解析手法が必要である。また、地震の作用を極力実際に近いかたちで考慮し、実現象を直接評価するには、地盤との相互作用を考慮した 3 次元動的非線形 FEM 解析を適用することが必要である。

本研究の目的は、LNG 地下タンク躯体を対象に、地盤-LNG 地下タンク躯体連成 3 次元動的非線形 FEM 解析を用いた耐震性能の照査方法を実用化するとともに、この方法を適用して実機 LNG 地下タンク躯体の耐震性能を照査し、その性能レベルについて検討することである。

本研究で対象とする解析手法は以下の通りとする。

- ・ COM3: 東京大学コンクリート研究室が開発した RC 構造物の 3 次元非線形 FEM 解析コード。RC 要素や地盤要素の履歴依存型非線形構成則を装備
- ・ RC モデル: 岡村・前川モデル (tension stiffening, ひび割れたコンクリートのモデル, 鉄筋のモデル, etc.)
- ・ 地盤モデル: 大崎モデル
- ・ 地盤と構造物の相互作用: すべり・剥離を考慮した接合要素
- ・ 運動方程式の解法: Newmark の β 法による時間積分, Newton-Raphson による収束計算
- ・ 入力地震動: 地震動の多方向性を考慮して, 水平 2 方向によるレベル 2 地震動入力

研究では, 実機 LNG 地下タンク躯体の縮小模型実験に基づいて, 地震時におけるタンク躯体の耐荷機構を明らかにし, その変形性能を定量的に把握した。次に, 3 次元材料非線形 FEM 解析により実験をシミュレーション解析し, 解析手法の適用性を評価するとともに, 解析的に変形性能を評価する指標とその限界値を検討した。

更に, 実機 LNG 地下タンク躯体を対象に地盤-LNG 地下タンク躯体連成 3 次元動的な非線形 FEM 解析に用いるモデルを構築し, 既往の地震観測記録をシミュレーション解析することで, 地盤と構造物のモデル化や地震応答解析手法の適用性を評価した。

最後に, 構築した 3 次元モデルに水平 2 方向からレベル 2 地震動を入力し, 実機 LNG 地下タンク躯体の耐震性能を照査し, その結果を考察した。

—縮小模型実験で明らかとなった地震時の LNG 地下タンク躯体の耐荷機構—

地震時に周辺地盤の変位や変形の影響を受けて LNG 地下タンク躯体がせん断変形すると, 載荷側のフランジ面では面外の曲げモーメントが, 変位方向と平行するウェブ面では面内せん断力が作用するが, 面内力が面外力に比べて卓越するため, 躯体全体の耐荷機構は主に面内力が卓越するウェブ面の耐荷機構に支配される。この試験体は鉄筋比が 0.8% と比較的小さいため, コンクリートの圧縮破壊に対して鉄筋の降伏が先行し, 鉄筋降伏以降も耐力が低下することなく変形性能が期待できることが明らかとなった。ここで, 面内力を受けるウェブ面の耐荷機構は, 鉄筋による引張抵抗機構と, ひび割れたコンクリートが伝達する圧縮抵抗機構の組み合わせで構成されるものである。

躯体と底版が PC 鋼棒により結合されているこの試験体は, 最終的にはウェブ中腹部に主圧縮ひずみの局所化領域を形成し, 圧縮抵抗機構が消失することで, 鉄筋による引張抵抗機構も失われ破壊に至った。破壊は, 最大耐力以降比較的早い段階で生じた。

載荷にともなう LNG 地下タンク躯体の剛性低下は, 斜めひびわれの発生から鉄筋の降伏までの範囲で著しく, 鉄筋降伏時の残存剛性率は 30%, 最大耐力点以降では 10% 以下となった。2 方向載荷による先行損傷の影響は剛性の低下として現れたほか, 同一荷重時の変位が若干大きくなる方向に作用した。

－3次元材料非線形 FEM 解析の適用性と LNG 地下タンク 躯体の耐震性能を解析的に評価する照査項目とその限界値－

COM3 による実験のシミュレーション解析結果は、最大耐力までの範囲において、正負交番 1 方向載荷試験から得られた荷重－層間変形角関係を精度良く再現できている。さらに、3 方向にひび割れが入り剛性が低下する正負交番 2 方向載荷試験の荷重－層間変形角関係も良好に再現することができた。

解析では荷重－層間変形角関係の再現性が最大耐力までの範囲であること、実験では最大耐力以降比較的早い段階で破壊が生じたことなどから、解析で LNG 地下タンク 躯体の変形性能照査を行う場合、安全側に、最大耐力時の層間変形角を終局変位とする必要がある。

解析的に LNG 地下タンク 躯体の変形性能を評価する指標として、コンクリートの圧縮抵抗機構がタンク 躯体の耐荷機構に大きな影響を与えることから、コンクリートが圧縮されることで生じる損傷度をもって、構造全体の損傷を代表させることとし、主圧縮ひずみをその指標とした。

要素の主圧縮ひずみの最大応答値がコンクリートの圧縮強度に達するひずみ ε'_{peak} の 2 倍となる変位は、最大耐力時の変位に良く一致し、主圧縮ひずみの最大応答値を指標とし、その限界値を $2\varepsilon'_{peak}$ とすることで、載荷経路に依存する構造物の終局変位を直接評価できることを明らかとした。

－地盤との相互作用を考慮した 3 次元動的な非線形 FEM 解析を用いて行った LNG 地下タンク 躯体の耐震性能照査結果－

1992 年 2 月 2 日に発生した東京湾を震源とする地震 (M5.7) の観測記録に基づいて、地盤と構造物のモデル化や地震応答解析手法の適用性について評価した。その結果、LNG 地下タンク 躯体周辺地盤、タンク 躯体頂部、タンク 底版中央などの加速度応答時刻歴について、解析結果は観測記録をほぼ再現できることを確認した。

次に、F 地点で想定されるレベル 2 地震動に対して、地盤－LNG 地下タンク 躯体連成 3 次元動的な非線形 FEM 解析によって、実機 LNG 地下タンク 躯体の耐震性能照査を行った。その結果、遠方自由地盤におけるせん断ひずみはレベル 2 地震動の入力レベルに対応した大きさであるのに対し、タンク 躯体の層間変形角は小さく、LNG 地下タンク 躯体には鉄筋コンクリートが塑性化するようなひずみが発生しないことが明らかとなった。これは、レベル 2 地震動のような強い地震動に対して、LNG 地下タンク 躯体が十分に安全であることを示すものであるが、一方で、更なる合理化の余地があることを示している。

今回、地盤との相互作用や、系を構成する材料の履歴に依存する非線形特性を考慮した 3 次元動的な非線形 FEM 解析を実用化し、LNG 地下タンク 躯体の耐震性能をその損傷過程にまで立ち入って評価することにより、レベル 2 地震動のような強い地震動に対する LNG 地下タンク 躯体の真の耐震性能を初めて明らかにすることができた。

この手法を用いることで、地震時の耐荷性能はもとより、地震後の残留変形量や残留ひずみ（残留ひび割れ幅）など、LNG地下タンク躯体の損傷程度を評価することが可能となり、地震後の耐荷性能や止水性能を判断するうえで必須不可欠な情報を直接得ることができるようになった。