

地盤～タンク連成 3 次元 RC 非線形モデルを用いた LNG 地下タンクの耐震設計その (3)

～最終破壊形態の評価～

東京電力フュエル&パワー株式会社
大成建設株式会社

正会員 高橋 智彦¹⁾ 正会員 山邊 洋之¹⁾
正会員 ○山本 平²⁾ 正会員 山梨 達哉²⁾

1.はじめに

LNG 地下タンクの破壊形態は、側壁の面内挙動によるコンクリートの圧縮破壊が支配的であることが既往の研究¹⁾より明らかにされている。想定を超える地震力作用時の破壊荷重や破壊形態を定量的に把握できれば、施設の運用面においてBCP策定等の観点から非常に有用である。

富津火力発電所に建設中の LNG 地下タンク（底版-側壁剛構造）では、地盤-タンク連成の 3 次元モデルを用いて L2 地震を超える地震荷重作用時の検討を行い、破壊荷重や破壊形態の把握を試みた。本稿では、その評価方法についての一提案を示すとともに、評価結果について述べるものである。

2.解析概要

解析概要図を図 1 に示す。まず、L2 地震に対する地盤-タンク連成の 3 次元 RC 非線形動的解析を行い²⁾、L2 地震による繰返し損傷を受けた状態を再現し、その後、応答震度法によるプッシュオーバー解析を行うこととした。これは、実務設計で用いることを念頭に、解析時間の短縮を図るためである。

荷重の作用方法は、モデル下端を固定境界、側面を水平ローラーとして、モデル全体に一樣な静的水平震度を漸増荷重（10gal 相当毎）させる方法とした。

静的水平震度の作用方向は、L2 地震時に側壁上下端の相対変位が最大となる方向（295°方向）とした。本稿では、結果の一例として、動液圧が作用する満液時に対する検討結果を示す。

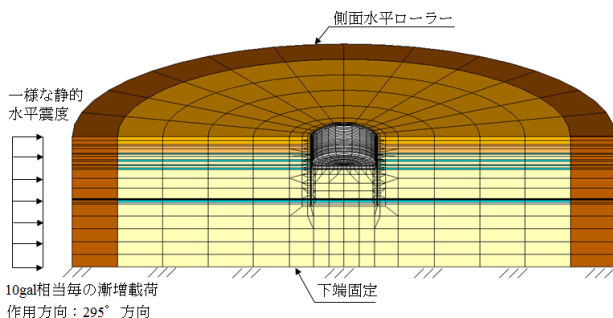


図 1 プッシュオーバー解析概要図

3.レベル 2 地震時の貯槽挙動

L2 地震時の遠方地盤と側壁の層間変形角の関係を図 2 に示す。ここで、層間変形角は側壁上下端の相対変位をその距離で除した値である。本検討では、土圧、動液圧および慣性力は、全て加速度に対して比例関係にあることから、1 次の変形モードが躯体の損傷に支配的であると仮定し、既往の研究¹⁾と同様に側壁の層間変形角に着目して結果を整理することとした。

図 2 より、遠方地盤と比較して L2 地震時の側壁層間変形角は小さく、最大で 0.25% 程度であることが分かる。

4.プッシュオーバー解析結果/躯体の破壊形態

躯体の破壊形態を把握するために、本検討では、各載荷ステップにおける最大（引張）/最小（圧縮）主ひずみ分布および、静的水平加速度と側壁層間変形角増分の関係に着目した。図 3 および図 4 にその結果を示す。

ここで、最大主ひずみが 2000 μ （主筋降伏相当）を超えた範囲を引張損傷、最小主ひずみが -4000 μ （面部材のコンクリートの圧縮破壊相当）を下回る範囲を圧縮損傷と定義すると、図 3 より損傷箇所は側壁が支配的であり、剛結部と底版には側壁程の損傷はないことが分かる。

また、側壁の損傷箇所に着目すると、引張損傷は載荷側（面外挙動卓越）およびウェブ側（面内挙動卓越）ともに卓越し、損傷領域も載荷とともに拡大するが、圧縮損傷は側壁ウェブ側のみで生じることが分かる。

図 4 に各載荷ステップの側壁層間変形角（載荷方向）の増分を示す。側壁層間変形角増分の急増を貯槽の耐力力が低下する時とすると、当該貯槽は 550gal 相当付近で

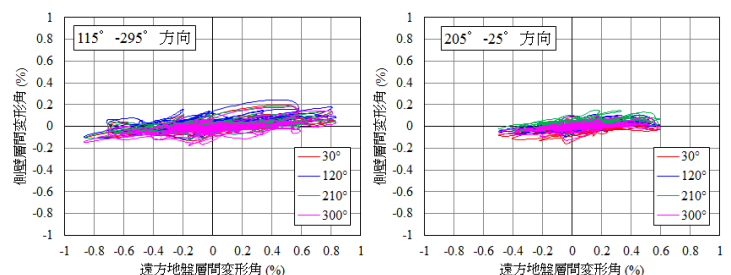


図 2 L2 地震時 遠方地盤と側壁の上下層間変形角関

キーワード LNG 地下タンク、地盤-タンク連成 3 次元 RC 非線形解析、最終破壊形態

1) 〒239-0011 千葉県富津市新富 25 番地 東京電力フュエル&パワー(株) 富津火力発電所 LNG 土木グループ TEL.0439-77-2381
2) 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 土木本部土木設計部特殊構造設計室 TEL.03-5381-5293

変形角増分の急増が見られる。また、図 3より 550gal 相当以降では側壁ウェブ側の圧縮損傷領域が拡大しており、圧縮損傷領域の拡大とともに貯槽の耐力が低下し破壊に至ると考えられる。これは、既往の研究¹⁾における知見と同じ傾向であり、側壁-底版剛結合構造も、躯体の損傷は支配的な加振方向に平行な面（ウェブ側）の側壁の面内挙動による損傷が卓越すると考えられる。

5. 解析結果/材料損傷レベルおよび終局耐力

本検討では、躯体の破壊荷重や破壊形態を材料損傷レベルに着目し評価を行った。材料損傷については「コンクリート標準示方書」³⁾に基づき、表 1に示す指標を用いた。

図 5に側壁ウェブ側における、内外側要素（RC 要素）の各損傷指標の最大応答値と層間変形角の関係を示す。

図 5より、側壁ウェブ側は①斜めひび割れの発生→②鉛直筋の降伏→③円周筋の降伏→④コンクリートの圧縮破壊の順で破壊が進行していくことが分かる。

また、躯体の終局損傷レベルと L2 地震時の損傷レベルの関係を把握するために、側壁全 RC 要素の最小主ひずみとウェブ側側壁層間変形角の關係に着目した。

評価結果を図 6に示す。ここで、コンクリートの圧縮破壊相当のひずみが発生した時を破壊時と定義すれば、その層間変形角は 1.15%である。L2 地震時の最小主ひずみは 766μ で、側壁層間変形角は 0.25%であることより、本貯槽は L2 地震時の 5.3 倍（4082/766）の耐力性能また

は 4.6 倍（1.15/0.25）の変形性能を有すると評価することができる。

6. まとめ及び今後の課題

本検討では、地盤-タンク連成の 3 次元モデルを用いて、躯体の破壊荷重や形態を評価する手法を提案した。提案した手法により、側壁-底版剛結合構造の当該貯槽は、支配的な加振方向に平行な面の側壁のコンクリートの圧縮破壊により躯体が破壊することが分かり、既往の知見¹⁾と一致する結果となった。

また、当該貯槽は L2 地震時に対して 5 倍程度の耐力性能や変形性能を有すると評価できた。

今回用いた静的震度法や層間変形角を用いる評価法などの妥当性について、設計実務という観点から評価を行っていくことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 原田光男, 鬼束俊一, 山谷敦, 松尾豊史: 地震時における LNG 地下タンク躯体の耐力機構, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.3, pp.517-529, 2011
- 2) 高橋智彦, 山邊洋之, 山本平, 山梨達哉: 地盤-タンク連成 3 次元 RC 非線形動的解析を用いた LNG 地下タンクの耐震設計その(1)-レベル 2 地震耐力性能評価-, 土木学会第 71 回年次学術講演会 (投稿中)
- 3) (社)土木学会: コンクリート標準示方書/設計編, 平成 24 年 12 月

表 1 損傷指標

損傷指標	想定する現象	限界値
偏差ひずみの第 2 不変量 J_2	斜めひび割れの発生	1000μ
鉛直方向ひずみ ε_z	鉛直筋の降伏	1800μ 程度
円周方向ひずみ ε_θ	円周筋の降伏	1800μ 程度
最小 (圧縮) 主ひずみ ε_{min}	コンクリート圧縮破壊	4082μ

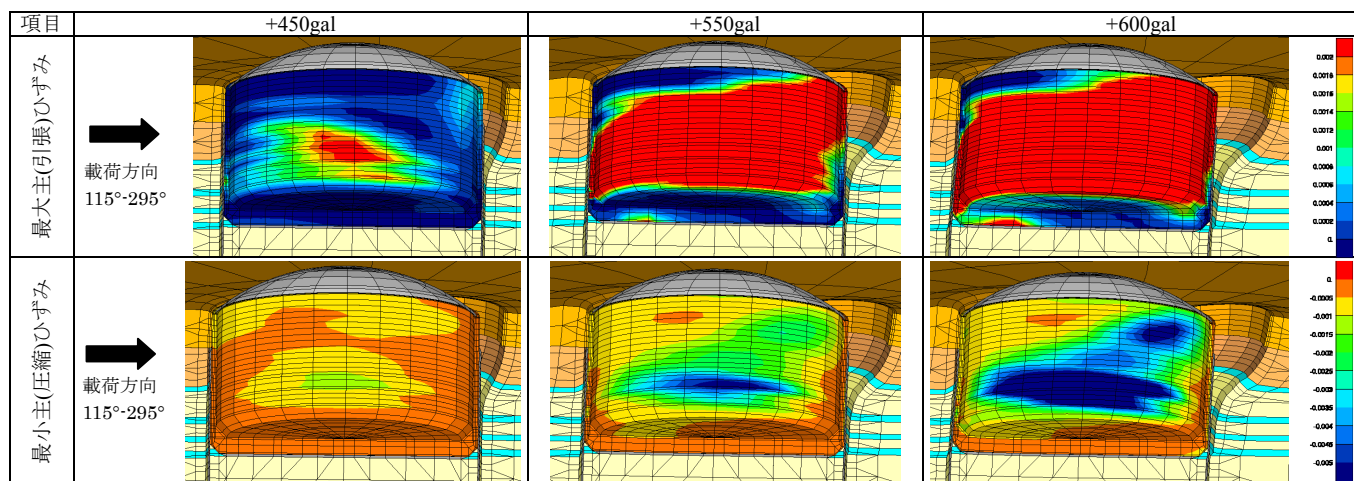


図 3 プッシュオーバー解析結果 (最大最小主ひずみ分布図)

(変形倍率: 5 倍)

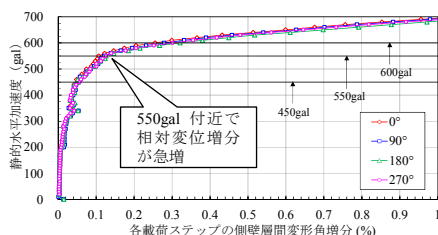


図 4 側壁層間変形角増分の変化

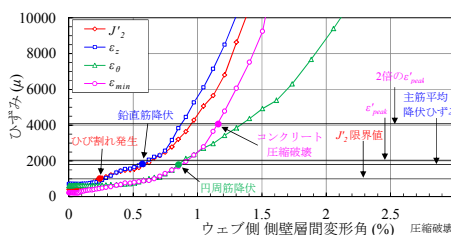


図 5 側壁ウェブ側の損傷過程

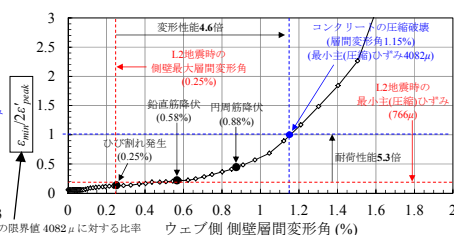


図 6 L2 地震時と終局破壊時の関係