

時間的に不連続な挙動を示す エネルギー関連設備の耐震設計法の開発

工学部 社会システム土木系学科 教授 谷口朋代

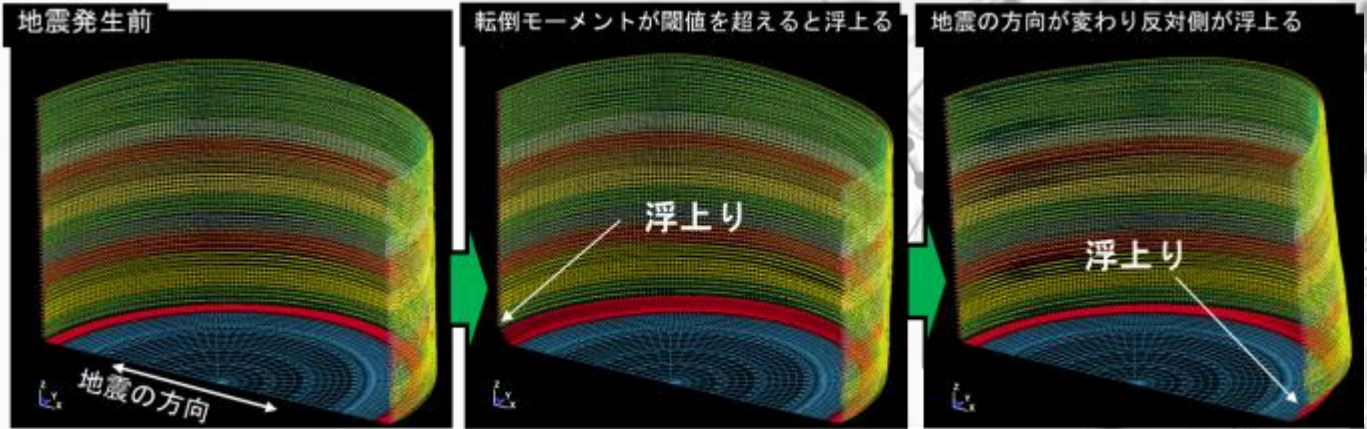


図-1 地震時にタンク底板が浮上る様子の模式図

研究概要:

- 地震時に、エネルギー関連設備を構成する平底円筒貯槽（以下、タンク）の底板は浮上るので、底板浮上り現象の動的メカニズムを考慮した設計法の確立が国内外で望まれている。
- 本研究では、底板浮上り現象を説明する動力学モデルの構築、浮上りに寄与する各種物理量の定量化、浮上り応答の簡易算定式法の開発、を行った。

基礎の上に置かれただけの構造物が地震に遭遇した場合、構造物の応答がある閾値を超えると、滑動、浮上り、滑動—浮上り相互作用や跳躍といった時間的に不連続な挙動を示す。本研究では、地震時に、剛直方体が見立てた内部に振動子を有する直方体に適用して、タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルを構築した。そして、底板浮上り現象に寄与する内容液の存在確認と定量化、同力学モデルと地震応答スペクトルとを組み合わせることで底板浮上り時の最大応答加速度、同角加速度を手計算で求める簡易算定式を開発した。現在、底板浮上り高さやタンク側板—底板隅角部応力の近似算定法の開発などに取組んでいます。

本研究は、下記1)～6)の事柄から成る。

1) 地震時に剛直方体が見立てた内部に振動子を有する直方体に適用して、タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルを構築した。

地震時に、基礎の上に置かれた剛直方体が見立てた内部に振動子を有する直方体に適用して、タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルを構築した。そして、底板浮上り現象に寄与する内容液の存在確認と定量化、同力学モデルと地震応答スペクトルとを組み合わせることで底板浮上り時の最大応答加速度、同角加速度を手計算で求める簡易算定式を開発した。現在、底板浮上り高さやタンク側板—底板隅角部応力の近似算定法の開発などに取組んでいます。

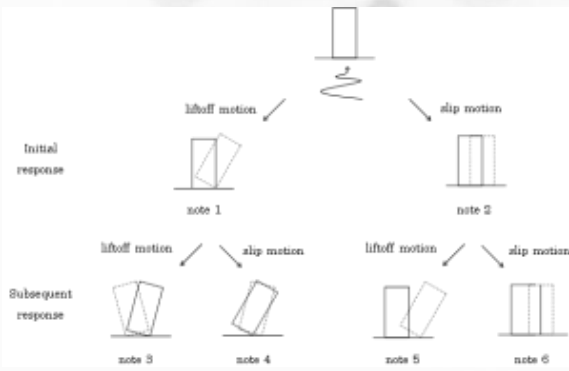


図-2 地震時に剛直方体が見立てた内部に振動子を有する直方体に適用して、タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルを構築した。

図-3 熊本地震時に報告された手水舎の跳躍現象

- T. Taniguchi: Nonlinear response analyses of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 31, Issue 8, pp. 1481-1500, 2002.
- 杉本和俊、谷口朋代、向坊恭介、小野祐輔：時間的に不連続な系の運動の観点に基づく手水舎の跳躍現象の説明，土木学会，構造工学論文集 Vol. 63A, pp. 279-288, 2017.

2) タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルの構築

タンクを、内部に振動子を有する直方体と見立てて1)の結果と組み合わせることで、タンクの底板浮上り現象を説明する力学モデルを構築した(3) (図-4 参照)。具体的には、既往の固定式タンクの地震応答を与える流体-側板弾性連成系で記述される時間的に連続な系と、側板とその近傍の内容液が共に浮上り運動する時間的に不連続な系との相互作用系として表した。【2015 ASME PVPD Conference Award受賞】

3) タンクの底板浮上り現象に寄与する内容液の有効質量の存在予測と定量化

1)の力学的類推から、底板浮上り現象に寄与する内容液の存在を予測し、質量が無視できる模型タンクを用いた浮上り実験より、底板浮上り部の上方に位置する液塊が、底板浮上り現象に寄与することを明らかにした。そして、同液塊の見かけの質量(以下、ロッキング有効質量)が、液体中の微小体積に作用する力の釣合いに基づき、液体の圧力勾配の関数として求められることを示した(図-5 参照)。

4) 相互作用系に寄与する内容液の有効質量の存在予測と定量化

3)で求めた底板浮上り現象に寄与する液塊の成因と、既往の流体-側板弾性連成系に寄与する液塊の成因が異なることから、2)で構築した相互作用系に寄与する内容液の存在を予測し、その液塊の見かけの質量(以下、ロッキング-バルジング有効質量)が、それぞれの液塊の見かけの密度の積を内容液の密度で除したものと与えられることを示した(4)。【2011 ASME PVPD Conference Award受賞】

5) タンクの耐震設計に用いる内容液の有効質量の定量化

耐震設計に用いる量として、ロッキング有効質量やロッキング-バルジング有効質量を、厳密に定義する必要がある。そこで、タンク底板は上面から見ると三日月状に浮上るので、底板浮上りに伴う非軸対称な境界条件の数学的取扱いを容易にするために、円筒タンクを矩形タンクの集合と見なして内容液の速度ポテンシャルを解くスライスモデルを考案し、それら有効質量を定量化した(5) (図-6 参照)。

6) 浮上り応答の簡易算定式法の開発

現状では、有限要素法を用いた時刻歴解析でしか、タンクの浮上り応答は求められない(図-1 参照)。そこで、設計での簡便性を考え、2)で構築した力学モデルに地震応答スペクトルを組み合わせ、底板浮上り時のタンクの最大応答加速度と同角加速度を、手計算で求める簡易算定式を開発した(6)。

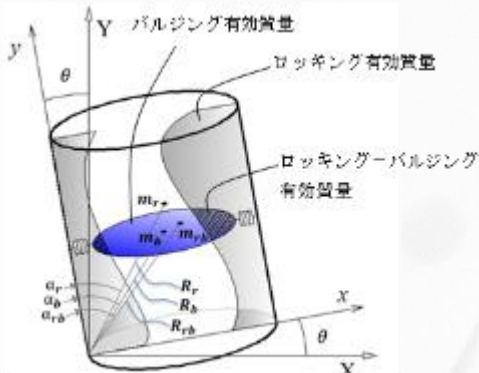


図-4 タンクの浮上り現象の力学モデル

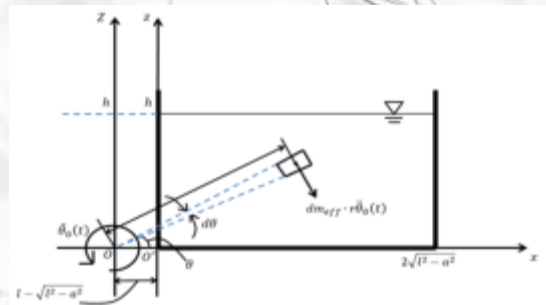


図-5 微小体積に作用する力の釣合い

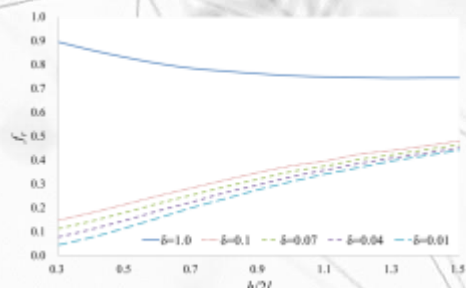
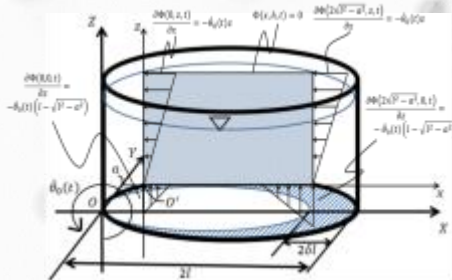


図-6 スライスモデルの模式図(左)と無次元化されたロッキング有効質量(右)

- (3) T. Taniguchi, D. Okui: A Case Study of Evaluation of Tank Rock Motion with Simplified Analysis Procedure, Proc. ASME. 46070; Volume 8: Seismic Engineering, V008T08A044, 2014.
- (4) T. Taniguchi: Effective mass of fluid for rocking-bulging interaction of rigid rectangular tank whose bottom plate rectilinearly uplifts, Proc. ASME. 49279; ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 8, pp. 99-106, 2010.
- (5) T. Taniguchi, Y. Katayama: Masses of Fluid for Cylindrical Tanks in Rock with Partial Uplift of Bottom Plate, Journal of Pressure Vessel Technology. ASME, Vol. 138, Issue 5, 051301-1-051301-13, doi: 10.1115/1.4032784, 2016.
- (6) M. D'Amico, T. Taniguchi, T. Nakashima: Simplified Analysis of The Rocking Motion of a Cylindrical Tank Focusing on The Role of Dynamic Forces Involved in Rocking-Bulging Interaction, Proc. ASME. 57984; Volume 5: High-Pressure Technology; ASME Nondestructive Evaluation, Diagnosis and Prognosis Division (NDPD); SPC Track for Senate, V005T11A024. July 16, 2017, PVP2017-65442, doi: 10.1115/PVP2017-65442