

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21560242

研究課題名(和文) 浮上りを許容する平底円筒貯槽の耐震設計法の開発

研究課題名(英文) Development of seismic design method for flat-bottom cylindrical tank allowing uplift

研究代表者

谷口 朋代 (TANIGUCHI, Tomoyo)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90346370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：平底円筒貯槽(以下タンク)のロッキング運動によって非軸対称状に浮上るタンク底板の影響を考慮して速度ポテンシャルを解くスライスモデルを考案し、ロッキング運動に伴う動液圧を求めた。また、タンクのロッキング運動に寄与する内容液の見かけ上の密度は、動液圧の圧力勾配に比例することを見出し、ロッキング運動、及びロッキング-バルジング連成振動に寄与する内容液を求めた。そして、半解析的有限要素法に基づく静的解析法を考案し、タンクのロッキング運動の動的メカニズムに関わる物理量を全て考慮すれば、タンク底板の浮上り変位量を精度良く計算できることを明かにした。

研究成果の概要(英文)：This research proposes the slice model that enables to estimate the dynamic fluid pressure due to the tank rocking motion with effects of asymmetrically uplift of the tank bottom plate by solving the velocity potential. In addition, employing an assumption that the tank contents are under the same action of the inertia force induced by the tank rock motion, the fluid contributing to the tank rock motion and rocking-bulging interaction are quantified. This research also develops a static analysis method based on the semi-analytic finite element method and clarifies that accurate calculation of uplift of the tank bottom plate needs all physical quantities related to the dynamical mechanism of the tank rock motion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：耐震設計 動液圧 スライスモデル 速度ポテンシャル 有限変位解析 半解析的有限要素 接触

## 1. 研究開始当初の背景

一般に平底円筒貯槽(以下、タンク)にアンカ-をとることは難しい。そのため、地震時にはタンク底板に浮上りが生じ、破損の一因となっている。浮上りを許容するタンクの耐震設計基準に API 基準があるが、物理的背景の不明な点が数多く指摘されている。そこで、タンクの浮上り挙動に寄与する物理量を明らかにし、それらを用いてタンクの浮上り量や側板や底板に生じる応力を算定する手法を開発する。

研究代表者は、1)タンクの浮上り挙動の動的メカニズムを、バネ-質点-剛体連成系の力学モデルの類推から説明する、2)剛な同心円状底板を有する仮想的なタンクを用いて、ロッキング運動とロッキング-バルジング連成振動に寄与する内容液を定量化する、ことを行ってきた。そして、精緻な振動実験と比較して提案した力学モデルの有効性を示し、バルジング応答、ベースシエア、浮上り量が時刻歴で解析できることを世界で始めて示した。また、剛なタンクを対象に、内容液の挙動が速度ポテンシャルで表せると仮定して、浮上り加速度に伴ってタンクに作用する衝撃圧の数学解を世界で始めて導出した。これを陽解法による数値解と比較して、陽解法は負圧を含む衝撃圧を概ね算定できるが、流体と弾性体との境界面での圧力の授受を計算するルーチンに問題があり、実用的な浮上り加速度に伴う動液圧や隅角部の動液圧が解析できないことも明らかにした。尚、本研究が世界で初めてタンクの流体-弾性連成振動に陽解法を適用した研究である。

以上に示したように、これまでは剛な底板を仮定するなど問題を簡略化して、タンクの浮上り応答の基礎的かつ支配的なメカニズムの解明に努めてきた。しかし、耐震設計法の構築を見据えれば、タンク部材の剛性を適切に反映したものでなければならぬのは明らかである。

## 2. 研究の目的

タンク部材の剛性を適切に反映し、浮上りを許容するタンクの耐震設計手法の確立に向けて次の研究を行う。

(1) 底板の変形と動液圧分布との関係を明らかにし、底板の変形を簡単な曲線で近似するなどして、浮上りに伴う動液圧を定量化する手法を開発する。

(2) 底板の変形とロッキング有効質量の分布範囲との関係を明らかにし、バネ-質点-剛体系の連成を考慮した力学モデルに組み込む手法を開発する。

(3) 前述の(1)と(2)を関連付け、底板の浮上り量、浮上り範囲、動液圧、バルジング応答、ベースシエアを時刻歴で解析する手法を開発する。

(4) 半解析的要素を用いた専用プログラムの開発や、陽解法を詳細設計あるいは応力照査を行う際のツールとして使用できるレベルになるように改良する。

(5) 動液圧分布、浮上り量、浮上り範囲等の特徴を抽出し、浮上りを許容するタンクの耐震設計手法を提示する

## 3. 研究の方法

本研究では、動液圧算定方法の開発、有効質量算定方法の開発と半解析的要素の開発を行うが、開発対象毎に研究方法が異なるので、それぞれについて説明する。

(1) 底板に三日月状の浮上りを有する円筒タンクに作用するロッキング時の動液圧分布の算定方法の開発について

容器内の動液圧分布の厳密解は、速度ポテンシャルによって与えられることが知られている。タンクでは、円筒座標系上で速度ポテンシャルを記述することが一般的であったが、円筒座標系上で底板が三日月状に浮上るような非軸対称状の境界条件を扱うことは難しい。そこで、動液圧算定の精度を犠牲にすることなく、非軸対称状の境界条件を近似的に扱える数学的手法を開発する。

(2) タンクのロッキング運動に寄与する内容液の厳密な定量化手法の開発について

タンクの運動に寄与する内容液の質量は、全内容液がタンクと共に運動すると見なす場合の動液圧と、実際に作用する動液圧との比から求められていた。タンクのロッキング運動の場合、タンクと共に運動すると見なす場合の動液圧に負値や零値が含まれ、従来手法が適用できないことから、タンクのロッキング運動に寄与する内容液を厳密に定義する新たな力学的手法を開発する。

(3) 半解析的有限要素法を用いた静的解析法の開発について

タンクの底板に生じる三日月状の浮上り量を求めるためには、幾何学的非線形性を取り入れた解析が必要であることが知られている。動液圧の数学解が円筒座標系上で記述されることや、タンクの底板は円形であることから、円周方向に級数展開法を用いる半解析的有限要素法に基づく円形リング要素を開発する。

## 4. 研究成果

前章に示した3つの研究方法について、得られた研究成果を示す。

(1) 底板に三日月状の浮上りを有する円筒タンクに作用するロッキング時の動液圧分布の算定方法の開発について

タンクの底板が部分的に三日月状に浮上

った場合にタンクに作用する衝撃圧の数学解は、これまで明らかにされてこなかった。その理由は、底板に部分的に生じる三日月状の浮上りは、底板が非軸対称状に浮上ることを意味しており、それを円筒座標系で扱うには、数学的な困難が伴うからであると考えている。

そこで平底円筒タンクを、タンクの中から放射線状に配置された単位奥行きを有する剛な矩形タンクの集合体と見なす「スライスモデル」を考案した(図-1 参照)。スライスモデルの利点は、平底円筒タンクの底板に部分的に生じる非軸対称状の三日月状の浮上り部の断面を捉えて、直交座標系上の底板が部分的に角折れ状に浮上る単位奥行きを有する剛な矩形タンクの境界値問題として扱えるようにしたことである(図-2 参照)。そして、直交座標系の境界上で液体の速度ポテンシャルの法線導関数に関数が規定されている Neumann 問題として方物形の偏微分方程式を解くことで、スライスモデルの配置位置と平底円筒タンク底板の浮上り範囲に応じたスライスモデルに作用する衝撃圧が順次求められ、平底円筒タンク一周分の衝撃圧が算定できることを世界で初めて示した(図-3, 4 参照)。

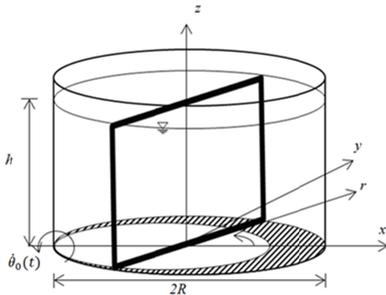


図-1 スライスモデルの配置  
(斜線部が底板浮上り部)

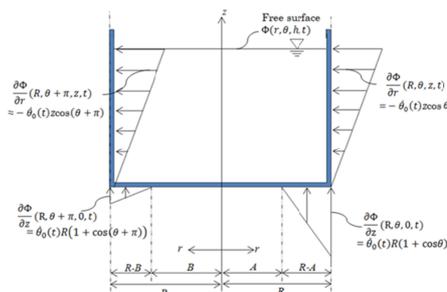


図-2 スライスモデルの境界条件

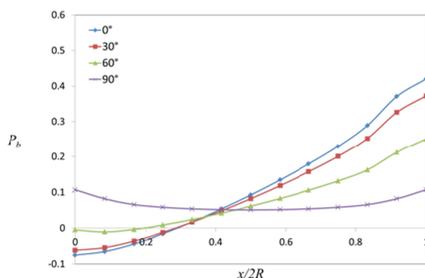


図-3 底板部動液圧(h/R=2.0, a/R=5/6)

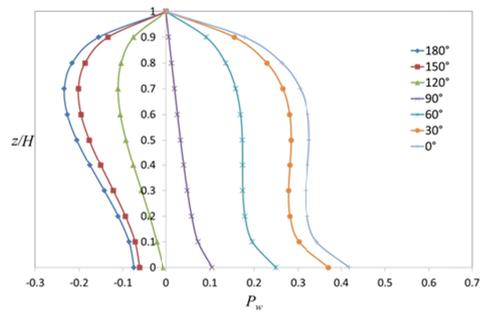


図-4 側板部動液圧(h/R=2.0, a/R=5/6)

(2) タンクのロッキング運動に寄与する内容液の厳密な定量化手法の開発について

タンクのロッキング運動に寄与する内容液に作用する慣性力は、見かけ上、タンクの浮上り運動の加速度と同じ加速度が作用した場合に生じる慣性力と等しくならなければならないと考えた。そこで、内容液内の微小六面体に着目し、微小六面体に作用する慣性力が、タンクのロッキング運動と同じ加速度を受けたときの慣性力と等しくなるように内容液の見かけの密度を定めた結果、それがタンクのロッキング方向の内容液の衝撃圧の圧力勾配をタンクの回転中心から着目した微小六面体までの距離の二乗で除したもので表されることを世界で初めて導いた(図-5a, 5b 参照)。内容液の見かけの密度を有する微小六面体の質量をタンク全体に亘って積分したものが、タンクのロッキング運動に寄与する内容液の質量であり、これをロッキング有効質量と呼ぶこととした。衝撃圧の数学解を用いて、内容液の見かけの密度とロッキング有効質量の数学解を導き、タンクの縦横比とタンク底板の浮上り範囲をパラメータとしてそれらを図示し、その特徴について考察を加えた(図-6 参照)。

一方、研究開始当初の背景に示したように、研究代表者は、タンクのロッキング応答とバルジング応答の両方に寄与する内容液の有効液質量(ロッキング-バルジング有効質量)の存在を予測し、力学的類推に基づいてそれを定量化していたが、耐震設計に用いる設計量としては、厳密性に欠けていた。そこで、前述のタンクのロッキング応答とバルジング応答に寄与する内容液の有効液質量の数学解を用いて、ロッキング-バルジング有効質量の厳密化に取り組んだ。

まず、ロッキング応答とバルジング応答のそれぞれに寄与する内容液の見かけの密度の数学解を導いた(図-7a, 7b 参照)。そして、ロッキング応答とバルジング応答の両方に寄与する内容液の見かけの密度は、それぞれの応答に寄与する内容液の見かけの密度の積と元の内容液の密度との商で表されると仮定し、ロッキング-バルジング有効質量の数学解を世界で初めて導いた。矩形タンクの縦横比とタンク底板の浮上り範囲をパラメータとして、ロッキング応答とバルジング応答の両方に寄与する内容液の見かけの密度

の分布や、ロッキング - バルジング有効質量を図示し、考察を加えた (図-8 参照)。

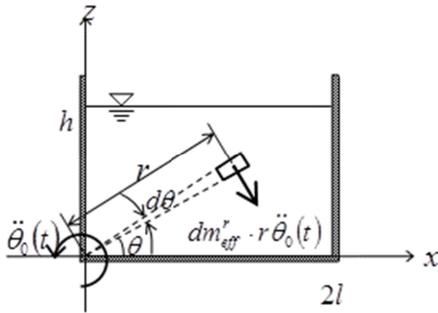


図-5a タンクのロッキング加速度を受ける微小六面体

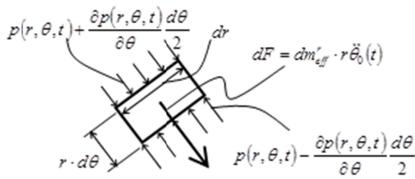


図-5b 微小六面体の力のつり合い

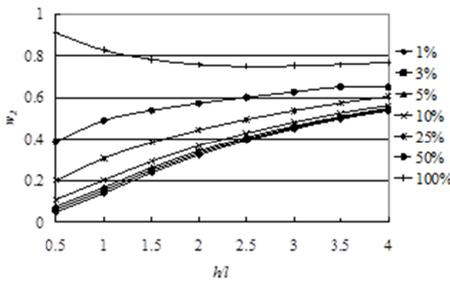


図-6 タンク形状、底板浮上り幅とロッキング有効質量の関係

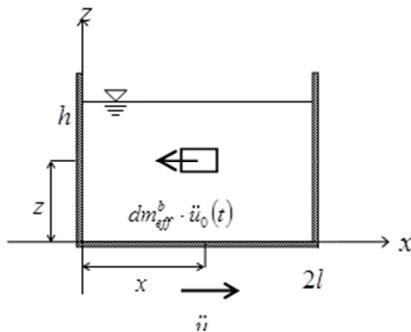


図-7a 水平加速度を受ける微小六面体

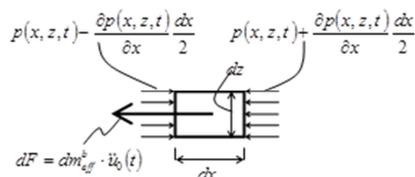


図-7b 微小六面体の力のつり合い

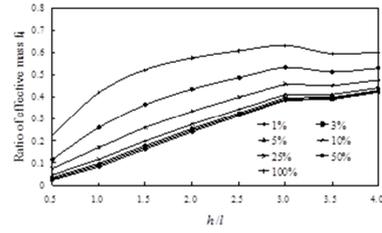


図-8 タンク形状、底板浮上り幅とロッキング - バルジング有効質量の関係

(3) 半解析的有限要素法を用いた静的解析法の開発について

ロッキング応答に伴いタンクに生じる応力を求めるためには、タンク底板と基礎との間の接触を考慮し、かつ浮上りによる大変形を考慮しなければならない為、既存の有限要素解析法では適用に限界があることを、これまでに示してきた。そこで、ロッキング応答に伴う応力を精度よく解析するために、幾何学的非線形性を考慮できるリング状の半解析的要素を開発し、静水圧を受ける円板の実験との比較から、タンクのロッキングに伴う応力を精度よく解析できることを確認した。(図-9, 10 参照)

また、基礎と底板の間の接触を考慮するために底板をモデル化するリング要素に部分的に配置するバネ要素の開発を行った。そして、部分的に弾性支持された静水圧を受ける円板の変形を計測する実験との比較から、大変形を考慮できるリング要素に本研究で開発したバネ要素を部分的に配置すれば、実験結果を精度よく解析できることを示した。(図-11, 12 参照)

最後に、タンク側板に弾性のシェル要素を、タンク底板に幾何学的非線形性を考慮できるリング要素を、底板と基礎との接触の判定にリング要素に部分的に配置するバネ要素を組合せて平底円筒貯槽の数値解析モデルを作成し、タンク死荷重、静水圧、タンクの水平慣性力、バルジングによる動液圧 (ロッキング - バルジング相互作用によるバルジング応答の低下を含む)、タンクのロッキングに伴う鉛直慣性力、ロッキングによる動液圧を載荷して、タンク底板の浮上り変位量を静的解析で求めて、動的陽解法で求めたタンクの浮上り挙動の時刻歴の最大値と比較した。(図-13、表-1 参照) 尚、本解析が、タンクのロッキング挙動の動的メカニズムを取入れて行われた世界初の静的解析である。

その結果、タンク底板の浮上り変位量を精度良く計算するには、タンクのロッキングのメカニズムに関わる物理量を全て考慮する必要があること、既存の API や Euro-code 等の設計基準で採用されている手法では、タンク底板の浮上り変位量を 20 ~ 30 倍過大に評価すること、タンクは部材の長さを含むように、側板の面外方向の変形に応じて底板浮上り量が変化すること、などを明ら

かにした。

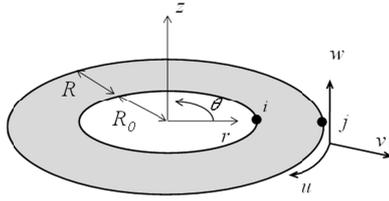


図-9 リング要素の定義

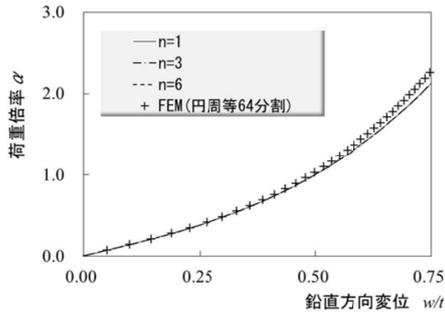


図-10 リング要素の解析精度

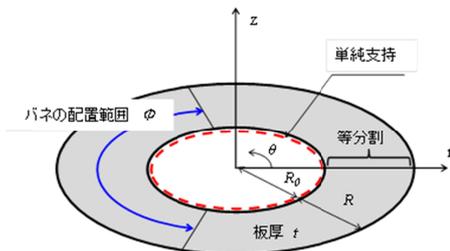


図-11 バネ要素の定義

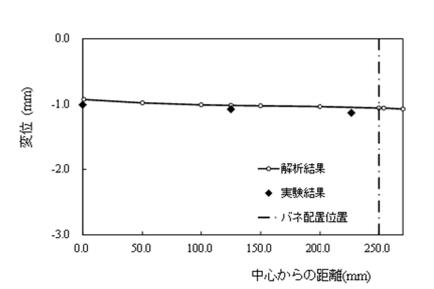


図-12 バネ要素の解析精度

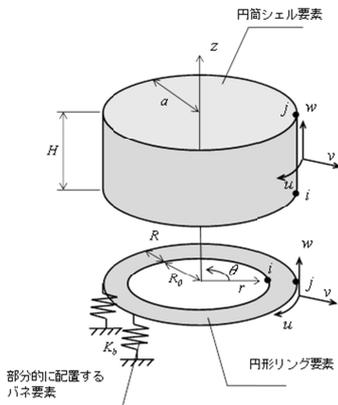


図-13 タンクの解析モデル図

表-1 提案した静的解析手法の解析精度

解析モデル	荷重状態	浮上り量(mm)
底板は微小変位理論	バルジング動液圧 (既存基準相当)	2373
底板は微小変位理論	バルジング+ロッキング動液圧	513
底板に幾何学的非線形性を考慮	バルジング+ロッキング動液圧	156
底板に幾何学的非線形性を考慮	バルジング (25%減)+ロッキング動液圧	18
動的陽解法	液体 Euler 要素	10

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

T. Taniguchi, T. Shirasaki: Approximation of Fluid Pressure on the Cylindrical Tanks in Rock With the Crescent-Like Uplift Part in the Bottom Plate by Radially Sliced Tank Model, 2013 Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2013), ASME, 査読有, Vol. 8, paper#PVP2013-97306, 2013.

T. Taniguchi: Contributions of Fluid to Rocking-Bulging Interaction of Rectangular Tanks Whose Walls are Rigid and Bottom Plate Rectilinearly Uplifts, Journal of Pressure Vessel Technology. ASME, 査読有, Vol. 135, Issue 1, pp. 011304-1-011304-7, 2013.

DOI: 10.1115/1.4007286

中島照浩、谷口朋代: リング状の半解析的要素を用いた静水圧を受けるアルミニウム製円板の有限変位解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol. 67, No. 2, pp. -127- -136, 2011.

T. Taniguchi, Y. Ando: Fluid pressures on unanchored rigid flat-bottom cylindrical tanks under action of uplifting acceleration, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, 査読有, Vol. 132, No.1, pp. 011802-011802-8, 2010.

DOI: 10.1115/1.4000374

T. Taniguchi, Y. Ando: Fluid pressures on unanchored rigid rectangular tanks under action of uplifting acceleration, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, 査読有, Vol.132, No.1, pp.11801-1-11801-5, 2010.

DOI: 10.1115/1.4000546

〔学会発表〕(計3件)

奥井大輔、谷口朋代: 平底円筒貯槽の底板浮き上がり現象を特徴付ける物理

量の簡易算定法に関する検討，第 65 回  
土木学会中国支部研究発表会発表概要  
集， - 5, 2013 年 5 月 25 日，鳥取大学。  
中島照浩，谷口朋代：半解析的リング  
要素に部分的に配置するバネ要素の定  
式化について，計算工学講演会論文集，  
Vol.17, 2012 年 5 月 31 日，京都教育文  
化センター。

白崎拓実，谷口朋代，小野祐輔：底板  
が三日月状に浮き上がる円筒タンクに  
生じる衝撃圧の矩形タンクモデルによ  
る推定，第 64 回土木学会中国支部研究  
発表会発表概要集， -33, 2012 年 6 月  
9 日，呉工業高等専門学校。

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

谷口 朋代 (TANIGUCHI, Tomoyo)

鳥取大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：9 0 3 4 6 3 7 0