

タンク側板剛性が強震動時の底板の浮上りに及ぼす影響に関する解析的検討

Analytical study on the effect of tank side wall stiffness on
uplift of bottom plate due to harmonic excitation

中島照浩¹⁾, 谷口朋代²⁾

Teruhiro Nakashima and Tomoyo Taniguchi

1) 博(工) 日本水工設計株式会社 (〒541-0044 大阪市中央区伏見町4丁目1-1)

2) 博(工) 鳥取大学 教授 (〒680-0945 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101)

Storage tanks are subjected to damage due to causes of rocking motion by the overturning moment during a strong earthquake. To reduce damages of earthquake hazard, it is essential to comprehend the bulging response of structures. The dynamic response analysis is conducted using a three-dimensional finite element method. The Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) approach is employed to model fluid-structure interaction (FSI). This study investigates the effect of tank wall stiffness on uplift of bottom plate due to harmonic excitation.

Key Words : Rocking Motion, Tank, Uplift, Explicit Analysis, FEM

1. はじめに

石油などの貯蔵・備蓄を目的としたアンカーの無い平底円筒貯槽（以下、タンクと呼ぶ）は、強震動による転倒モーメントでロッキング振動を引き起こし、底板の浮上りに伴う側板—底板溶接部近傍（以下、隅角部と呼ぶ）の損傷や側板の局部座屈など、さまざまな損傷被害[1,2]を引き起こす。強震動を受けるタンクの被害は、アラスカ地震（1964年3月）、サンフェルナンド地震（1971年2月）、宮城県沖地震（1978年7月）、東北地方太平洋沖地震（2011年3月）などで確認されている。例えば、東北地方太平洋沖地震では、タンクの上下動とみられる屋外タンク貯蔵所のアンカーボルト破断・引き抜けといった、タンクの底板に浮上りの痕跡や[3]、宮城県沖地震では、隅角部の損傷による重油の大量流出[4]が報告されている。

一般に、タンクの地震時の応答には、貯槽内の液体の自由表面が低振動数で大きく揺動するスロッシング現象と共に、高振動数で貯槽の側板と液体の連成によって振動するバルジング現象[1]が知られている。バルジング現象は、地震動の高振動数成分で励起され、スロッシング現象と異なり自由液面はほとんど揺れない[5]。そのため、前出の強震動下での転倒モーメントに伴うロッキング振動による損傷被害は、バルジング現象の起因によるものと推定される。また、Veletosos[6]は、液体タンクの変形モードを考慮して、その動的特性について、地震時の動液圧の分布形状が側板の変形モードに依存することを指摘した。さらに、前川ら[7]は、屋根付きの円筒タンクの振動実験

と構造解析を併用し、側板のオーバル変形に着目し曲げ振動とオーバル振動の連成効果によって、タンクの地震時の応答が低減されることを示している。しかし、今なおバルジング現象に起因するロッキング振動（以下、ロッキング振動と呼ぶ）によるタンクの底板の浮上り応答のメカニズムが解明されたとは言い難い。

著者らは、強震時のタンク側板の剛性に着目して、3次元有限要素モデルの液体に簡易な流体特性を適用して、構造—流体連成を考慮した固有値解析を実施し、固有振動モードの検討を行った。その結果、側板の面外剛性が小さい場合、バルジング現象の振動域において、花びらモード（ここでの花びらモードは、タンクを真上から見た際に、タンクトップが側板の面外方向に波状に応答変位するモードを指す）が現れることを確認[8]した。その上で、さらにタンクの側板の面外剛性を変化させ固有振動モードを抽出し分析すると、花びらの波数の現れ方に変化が見られる事を示した。このように、地震荷重下でのタンクのロッキング振動による底板の浮上りは、その応答のメカニズムを考察する上で、側板の変形モードに着目することも必要と考えられる。

本研究では、強震動を受けるタンクのロッキング振動について、側板の変形が底板の浮上り量に与える影響に着目し検討を行った。検討は、3次元の有限要素法（以下、FEMと呼ぶ）を用い、構造特性に構造—流体連成（Fluid-Structure Interaction, FSI）と、タンク本体と基礎構造との接触を考慮し動的解析により進めた。

なお、解析は、運動方程式の解法に動的陽解法を適用する汎用の構造・流体連成解析プログラムであるLS-DYNA[9]を用いた。

2. 解析モデル

(1) 貯蔵タンクの概要

検討に用いるタンクの形状寸法を図-1に示す。本研究では、表-1に示すように直径(D)と液深(H_w)の比 H_w/D が0.9の一般的な実機相当のタンクを解析対象とした。また、当該タンクの特性値を表-2に示す。ここに、タンク内の流体は水である。

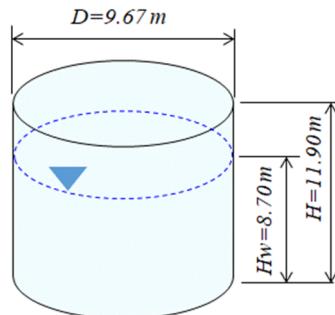


図-1 モデルの形状

表-1 モデルの寸法(m)

	直径 D	高さ H	水位 H_w	H_w/D
形状	9.67	11.90	8.70	0.9

表-2 特性値

		単位	特性値
板厚	底板	mm	8.2
	側板	mm	8.0~4.0
ヤング係数		GPa	200
構造物のポアソン比		-	0.3
質量	タンク本体	kg/m ³	7930
	液体	kg/m ³	1000
液体の粘性係数		$\mu Pa \cdot s$	1.0×10^{-20}

(2) FEMモデルの概要

ここでは、自由液面を有する流体を対象として、流体が構造体との境界面を移動する問題の解析手法としてALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法を適用し構造-流体連成 (FSI) を考慮した。FEMモデルは、流体にメッシュを解析空間に対して固定するEuler要素を、構造体 (タンク

と基礎構造) にLagrange要素をそれぞれ用いた。また、構造体の材料特性は弾性体として扱った。尚、モデルは、加振方向と直交する成分に逆対称モードが現れる可能性も考えられるが、加振方向に支配的な応答モードではないので、計算コストを優先し対称性を考慮する1/2モデルを採用した。対称性を考慮したFEMモデルのメッシュ形状を図-2に示した。図-2のメッシュ形状は、タンクの側板、底板に3節点あるいは4節点のシェル要素、基礎構造に8節点のソリッド要素、流体に6節点あるいは8節点のソリッド要素を用いた。さらに、タンク底板と基礎構造の間には接触条件を設定した。そして、流体の特性は、著者らがこれまでに検証[10,11]を行った成果に基づき与えた。ここに、FEMモデルの節点数は46,258点、各要素数は、構造体のSHELL要素が2,912要素、基礎構造のSOLID要素が800要素、液体のSOLID要素が(空気層を含む) 42,240要素である。

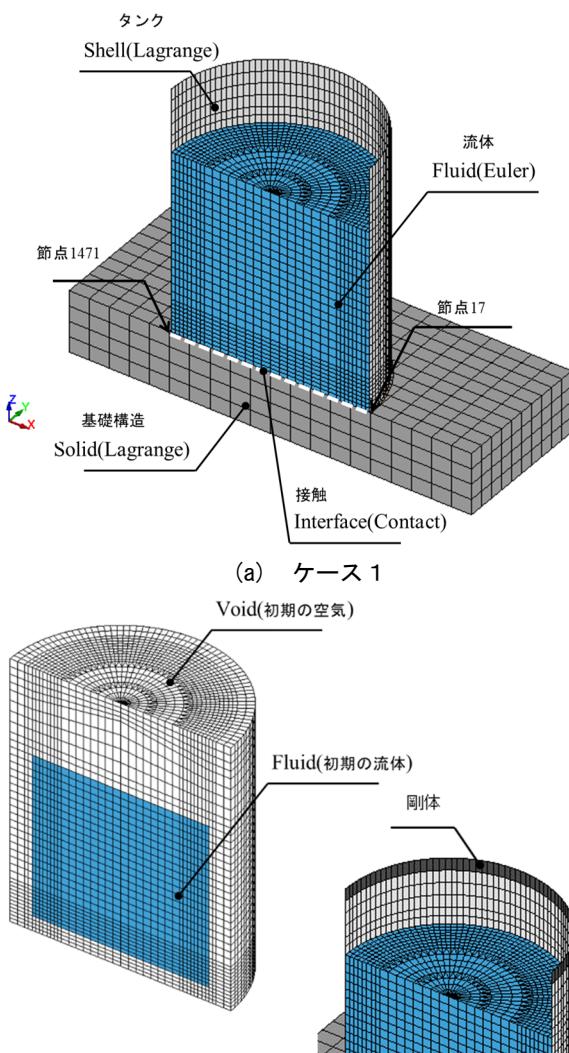


図-2 FEM形状図

(3) 解析ケース

タンクのロッキング振動に伴う底板の浮上りについて、側板剛性の影響を検討するために図-2に示す解析モデル

を作成した。図-2(a)のケース1は、オープントップのタンクの基本モデル、図-2(b)のケース2は、屋根付きのタンクを想定し、側板の上縁の1層の要素群に剛体特性を与えたモデルである。両者にそれ以外の差異はない。ここに、ケース2は、加振時にタンクトップの花びらモードが屋根により拘束されて小さくなることを想定した。

(4) 時間積分間隔の設定

タンク底板の浮上り現象では、地震動によって底板が浮上り・着地を瞬時に繰り返して、底板と基礎構造の接触時に衝突を伴うことから、本解析では、運動方程式の解法に中間差分による動的陽解法を用いた。尚、動的陽解法は条件安定な解法であり、時間積分間隔が解の数値安定性に対して非常に重要となる。ここでは、時間積分間隔にクーラン(Courant)の条件により制限される Δt_c を用いて、時間間隔 Δt は式(1) [9]のように設定した。

$$\Delta t = \alpha \Delta t_c \quad (0 < \alpha < 1) \quad (1)$$

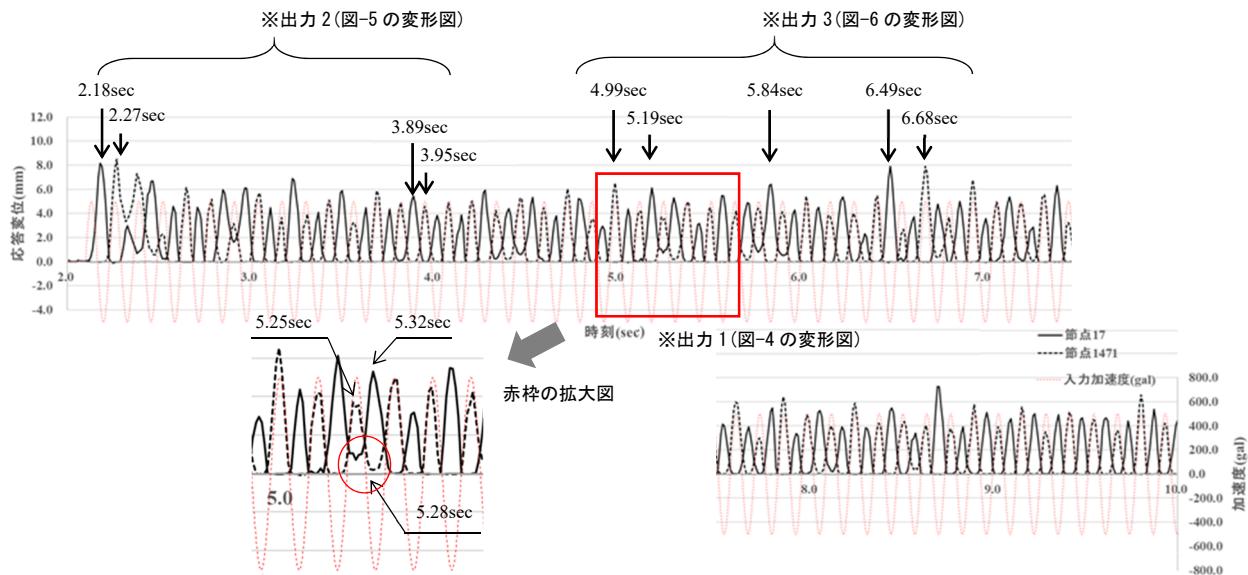


図-3-1 ケース1の浮上りの時刻歴応答

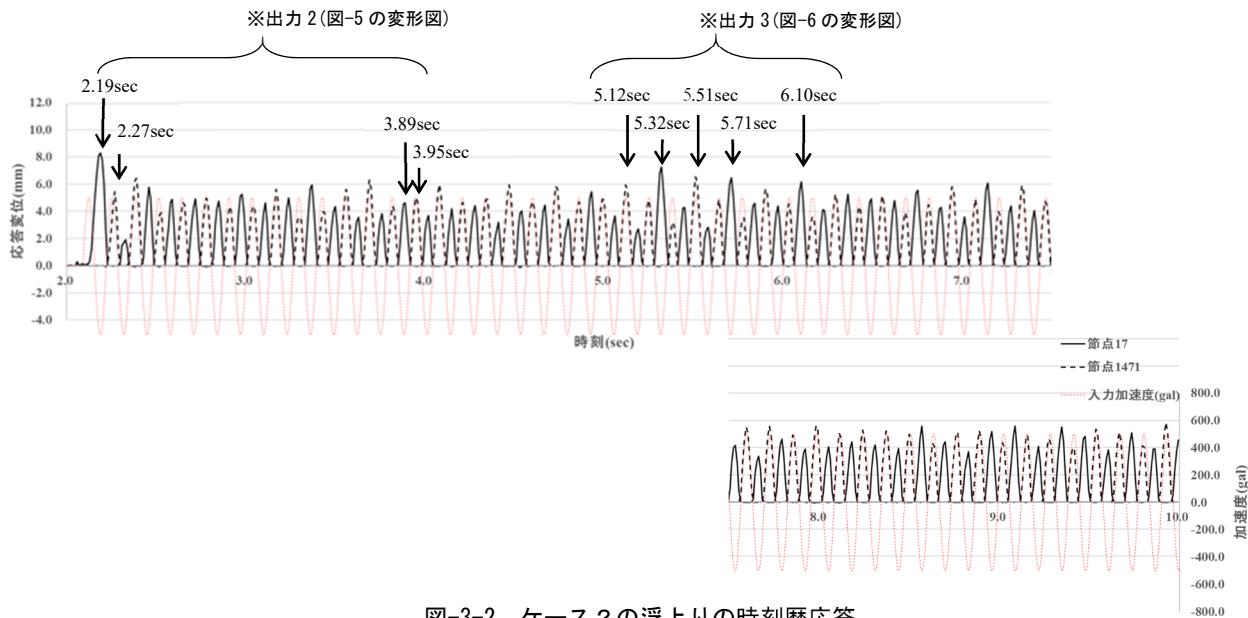


図-3-2 ケース2の浮上りの時刻歴応答

ここに、クーランの条件に基づく時間間隔 Δt_c にかかる係数 α ($0 < \alpha < 1$) は、LS-DYNA[9]の標準値を参考に0.9を採用した。

(5) 動的解析

解析は、タンク底板と基礎構造の間に接触条件を定義しているため、自重が接触の初期圧力として作用するように、2秒間の自重解析を行った。

動的解析は、自重解析の状態を引き継ぎ、構造体の振動が収まったことを確認したうえで地震波を2.1秒から8秒間(62波程度)作用させた。ここで時間積分間隔は、クーランの条件と式(1)から $\Delta t = 8.57 \times 10^{-7}$ (sec)とした。地震波は、最大加速度0.5G、当該タンクのバルジング現象の固有周期 T_b [12]と同じ周期0.13(sec)を有する周期波とし基礎構造上縁に作用させた。図-3-1及び図-3-2の赤線に入力した地震波を示した。本解析における計算時間は、標準的なシングルCPUのパソコンを用いて、自重解析における初期状態の設定を含め 7日程度要した。

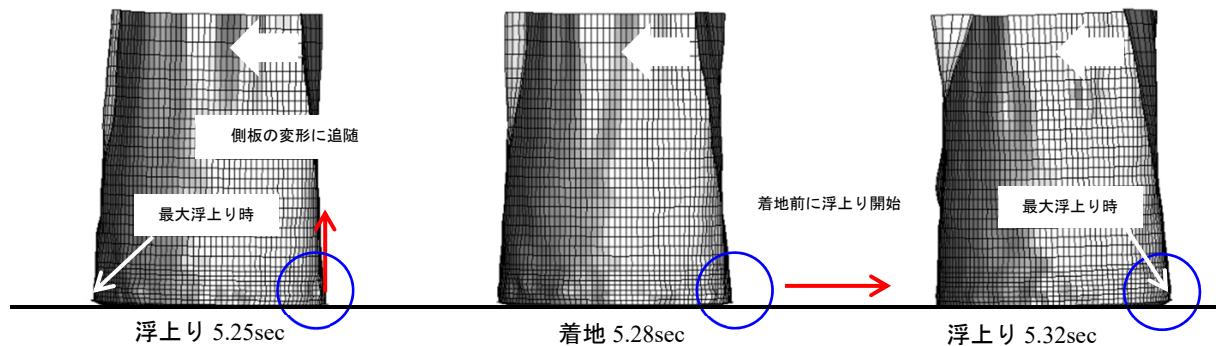


図-4 タンク本体の応答変位（変形倍率 50倍）

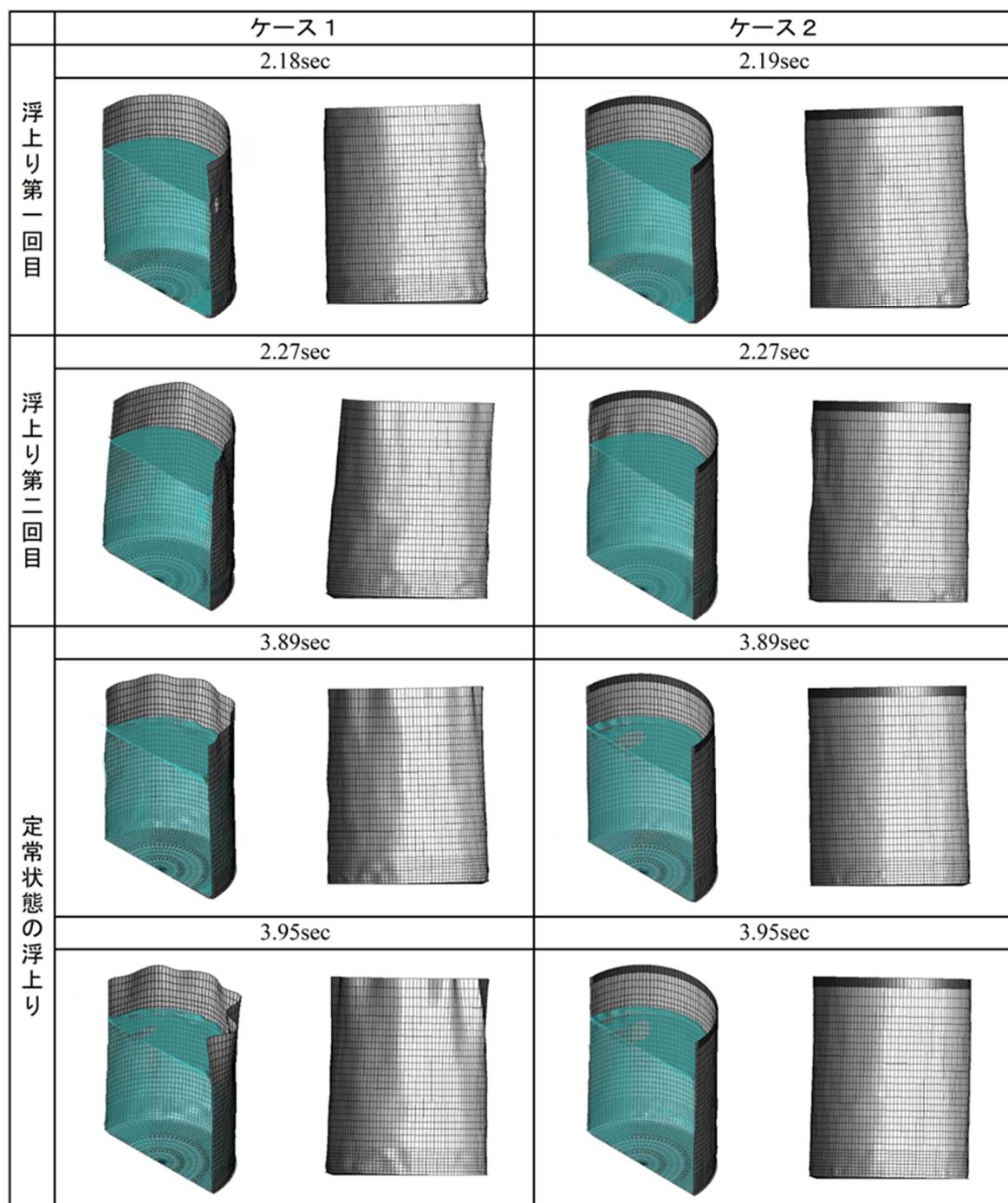


図-5 初期浮上り時と定常状態の時間断面の応答変位（変形倍率 30倍）

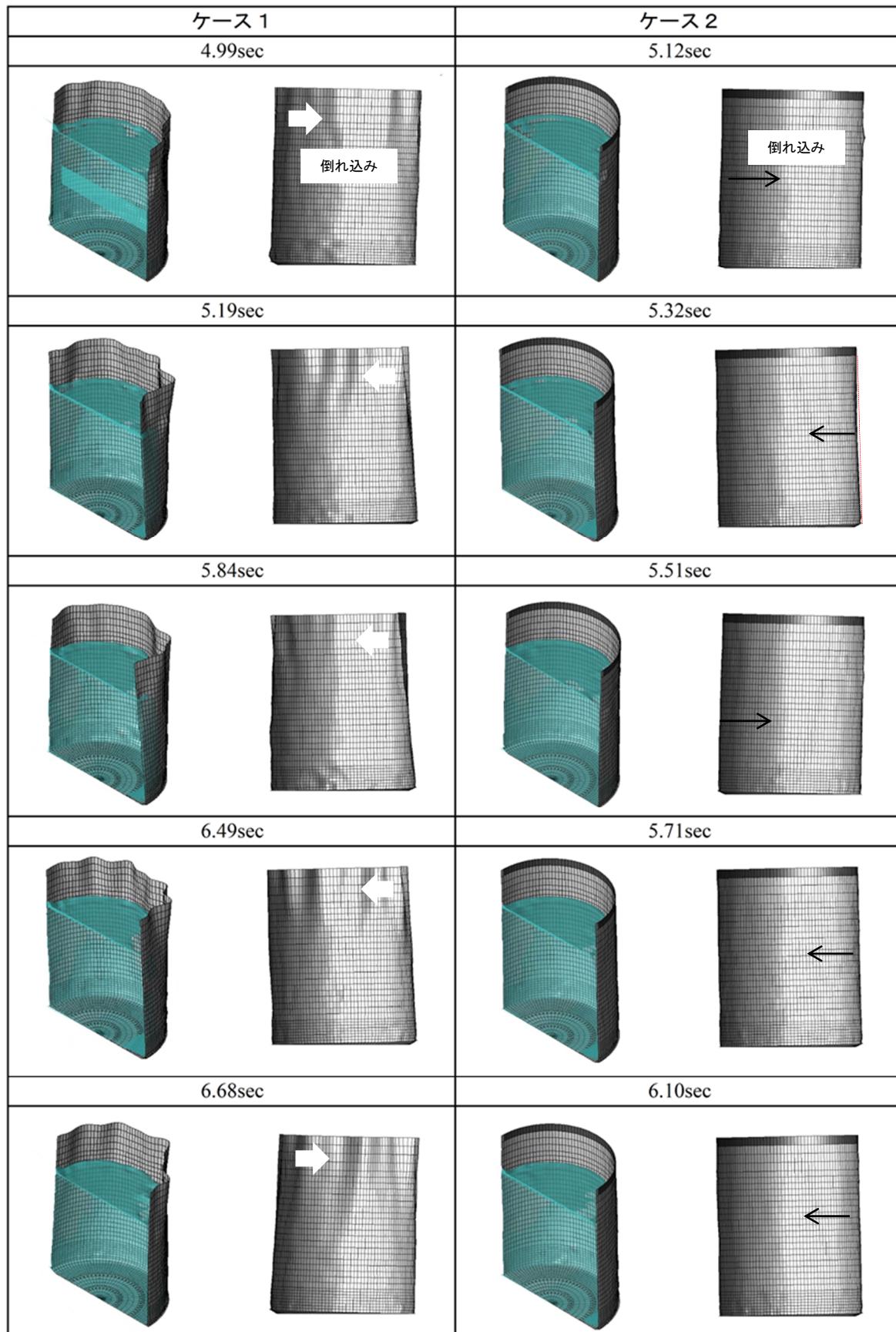


図-6 浮上り高が顕著な時間断面の応答変位（変形倍率 30倍）

3. 解析結果

(1) 時刻歴応答変位

図-2に示すタンクの底板の節点1471(点線)と節点17(実線)の鉛直方向の時刻歴応答変位の履歴図を図-3-1, 2に示す。ここに、図-3-1がケース1、図-3-2がケース2の履歴図である。これらの図から、両ケース共、周期波の入力後約1秒で定常状態の応答になることが確認できた。また、ここでの最大浮上り量は、ケース1が8.5mm、ケース2が8.2mmと同程度の結果であった。図-3-1, 2には、※で示した出力1～3の各範囲のブロックに分けて、後述するタンク本体の変形図の抽出時刻を示した。そこで、底板の浮上りの時刻歴応答について、図-3-1の出力1の赤枠で囲む拡大図の中で丸印を付した応答変位に着目すると、着地前に再浮上りが見られる。その時刻のタンクの変形図を図-4に示す。これを見ると側板の倒れこみが大きく、交番する加力に側板の応答が追随できず、側板の変形に伴い底板が引き上げられる状態が継続し、丸印のように底板が着地することなく再浮上りを始めることができた。尚、ケース2は、その現象が見られなかった。

(2) 初期浮上りと定常状態での応答変位

図-3-1, 2の時刻歴応答変位図の出力2の各時刻の初期浮上りと定常状態におけるタンクの変形図を図-5に示した。ケース1では、第一回目及び第二回目の応答時に、タンクの上縁に花びらモードが現れず、側板の倒れこみが大きいことが分る。そして、定常状態ではタンクの上縁に花びらモードを形成しながら応答している様子が分る。一方で、ケース2では、側板の倒れこみが見られず、タンクの形状を維持し剛体の円筒の様なロッキング振動を繰り返した。

(3) 側板の外面変位の影響

図-6は、図-3-1, 2の時刻歴応答変位図に示した出力3のブロックの中で、浮上り量が大きくなる各時刻のタンクの変形図である。この図からケース1は、上縁の花びらモードと連成して、浮上り側の側板が内側に倒れこみを生じており、それが底板の浮上り量を大きくしたと考えられる。ケース2は、剛体の様なロッキング振動となるものの、側板高の約1/2の高さで側板が内側に倒れ込みを生じており、この場合もケース1と同様な現象と考えられる。これらの結果から、側板の変形が底板の浮上り量に影響を与えたと考える。

4. おわりに

本研究では、タンクの地震時のロッキング振動に伴う底板の浮上り応答の振動特性を把握するために、FEMモデルを作成しバルジング現象の固有周期相当の周期波を作用させ解析を行った。解析結果から、タンクのロッキング振動では、タンクトップに花びらモードの応答変位と、側板の倒れ込みが底板の浮上り高に影響することを示し

た。以下に得られた知見を示す。

- ・解析結果の応答変形図から側板の倒れ込みが底板の浮上りを増加させることが分った。
- ・浮上り応答はタンクトップの剛性が大きいと、浮上りと着地を交互に繰り返し、剛体の円筒の様なロッキング振動を続けた。
- ・タンクトップの剛性が小さいと、地震荷重の交番に側板が追随できず、底板が完全に着地することなく浮上りを開始した。短周期地震波での応答では、さらに浮上りを増幅させることが示唆される。

本研究では、タンクの形状が $h_w/D=0.9$ の結果である。 h_w/D の異なる場合の現象確認は、今後の課題として残される。

謝辞: 本論文の数値計算と結果の抽出に、鳥取大学工学部の学生諸氏の協力を得たことを記し謝意を表す。

参考文献

- [1] 坂井藤一: 液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題, 土木学会論文集, 第362号/ I-4, 1985.
- [2] 座間信作: 巨大地震による石油コンビナートの被害と防災・減災対策, 安全工学, 56巻, 2017.
- [3] 鹿島地方事務組合消防本部: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による危険物施設等被害調査報告, 平成23年6月
- [4] 宮城県総務部消防防災課: 1978年宮城県沖地震東北石油(株)仙台製油所流出油事故の概要, 宮城県, 1978.
- [5] 近藤尚夫: 円筒タンクの軸対称自由振動解析, 日本機械学会論文集C編, 46巻/405号, 1980.
- [6] Veletsos, A.S: Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks, Proc.5 WCEE, Rome, 1973.
- [7] 前川晃, 鈴木道明, 清水泰貴, 藤田勝久: 振動試験による円筒形貯水タンクの耐震性評価(第2報)-曲げ振動とオーバル振動との連成効果-, INSS JOURNAL, Vol.12, 2005.
- [8] 中島照浩, 谷口朋代: 3次元有限要素モデルに簡易な流体特性を適用した貯蔵タンクの固有値解析, 計算工学講演会論文集, Vol.29, 2024.
- [9] LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY: LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, LSTC, 2020.
- [10] 中島照浩, 安藤嘉紀, 谷口朋代: 平底円筒貯槽の浮上り挙動への陽解法の適用性に関する基礎的研究, 応用力学論文集, Vol.11, 2008.
- [11] T. Taniguchi, Y. Ando and T. Nakashima: Fluid pressure on unanchored rigid flat-bottom cylindrical tanks due to uplift motion and its approximation, Journal of Engineering Structures, 31巻 11号 (p2598 ~p2606), 2009.
- [12] 畑山健: 石油タンクのバルジング固有周期の実測, 危険物保安技術協会, Safety & Tomorrow, 第211号, 2023.