3 次元連成解析による円筒形タンクを対象としたスロッシングの基礎検討

応用地質株式会社　正会員　○藤井紀之
一般社団法人 FLIP コンソーシアム　正会員　井合　進
株式会社明窓社　正会員　小堤　治
東亜建設工業株式会社　正会員　田代聡一
東亜建設工業株式会社　正会員　細田勝也
株式会社海洋河川技術研究所　正会員　鈴木明憲

1 はじめに

地盤－流体－構造物の連成解析を行い，液体貯槽のスロッシングやバルジングといった現象を表現するための機能が FLIP ROSE 3D[1]に付与された．本検討では，スロッシングに対する基礎検討の一環として FLIP ROSE 3D による円筒形タンクを対象とした固有値解析の妥当性について検証を行った．

2 検討内容

本検討では，剛基礎上円筒形タンク(柔タンクおよび剛タンク)の固有振動モードの妥当性の検証を行った．柔タンクに対しては，池田ら[2]が実施した横スロッシングを対象とした模型実験結果と固有値解析結果を比較した．剛タンクに対しては，同文献の模型タンクの壁厚やタンク材料のヤング係数を調整することで剛タンクとみなし，そのタンクに対する固有値解析結果と理論解で得られる固有値を比較した．なお，解析には FLIP3D ver166 を用いた．

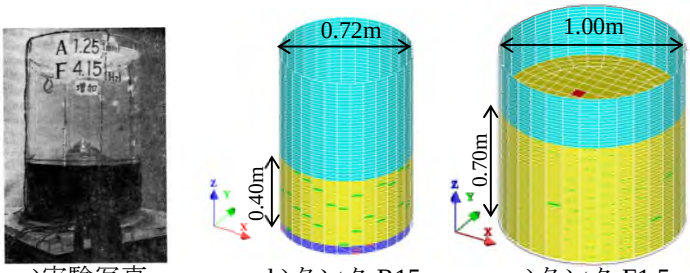
3. 柔タンクに対する検討

既往文献[2]の模型タンクの形状および実験条件を表 1-に示す．柔タンクに対する検討は，壁厚の相違による固有値解析への影響を考慮するため，表-1 中のタンク R15 とタンク F1.5(水深直径比 0.7)の 2 ケースを対象として実施した．なお，タンク高さが不明であったため既往文献[1]中の写真を参考に 1.0m とした(図-1a)参照)．作成したメッシュ図のうちタンク R15 を図-1b)に，タンク F1.5 を図-1c)に示す．

タンク R15 に対する固有値解析結果および既往実験結果の比較を図-2 に示す．同図は，実験結果[2]に解析結果(刺激係数の絶対値)を赤丸でプロットした図となる．刺激係数は右側の軸に対応しており，その他のプロットや実線は，文献 2)で示された実験値あるいは理論値であり左側の波高目盛に対応する．図-2 に示すとおり，音速∞と 1500m/s の両者ともに 1 次モード，2 次モードでは解析値と実験値(あるいは理論値)がほぼ一致したが，高次モードになるほど解析値のほうが高い振動数を示す結果となった．解析結果の一例として，音速 1500m/s の代表振動モードに対する動水圧分布図および固有振動モードを図-3 に示す．同図に示すとおり，振動次数の相違によるスロッシング現象を表現できた．また，モード次数が高くなるに従い動水圧の変動が大きくなる傾向を示していることが分かる．なお，図中に併記した(n,i)は，n が円周方向波数,i がモード次数である．

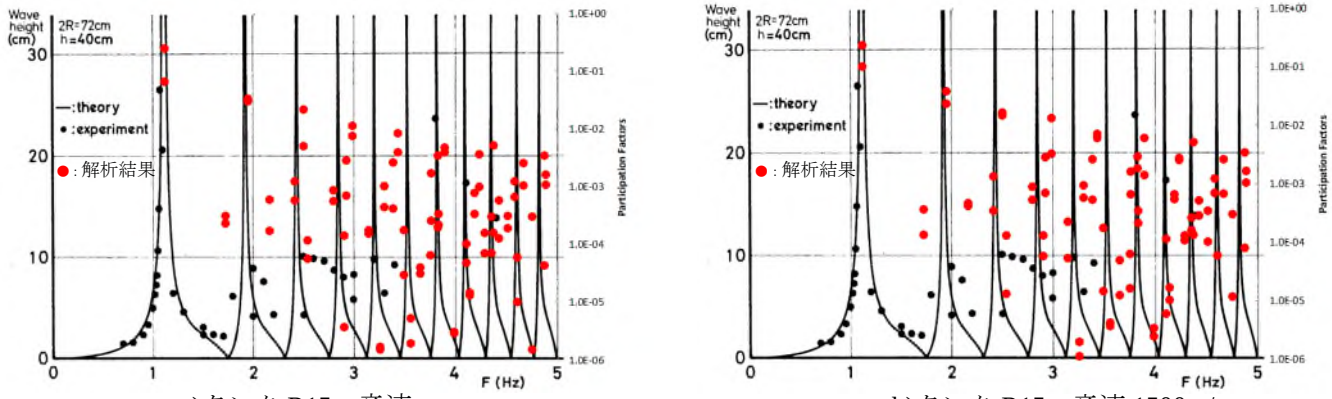
表-1　模型タンクの形状および実験条件[1]

タンクの種類	直径 2R (cm)	壁厚 h_s (cm)	$h_s/2R$	水深直径比 $h/2R$	外力の周波数 (Hz)	タンク材料のヤング率 E (kg/cm²)
タンクR15	72	1.5	0.0208	0.56	0.7～5.0	4×10⁴
タンクR5.5	39.5	0.55	0.0127	0.5,0.3	1.0～5.0	4×10⁴
タンクF1.5	100	0.15	0.0015	0.3,0.5,0.7	0.5～20	4×10⁴
タンクF1.0	100	0.10	0.0010	0.3,0.5,0.7	0.5～20	4×10⁴



a)実験写真　b)タンク R15　c)タンク F1.5

図-1　タンク高さ設定に参考にした写真およびメッシュ図

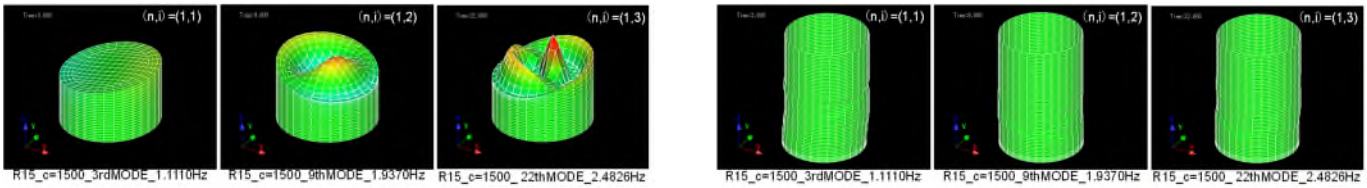


a)タンク R15　音速∞　　b)タンク R15　音速 1500m/s

図-2　タンク R15 に対する固有値解析結果および既往実験結果の比較

キーワード：3 次元連成解析，円筒形タンク，スロッシング，固有値解析
連絡先　〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町 2-61-5　応用地質株式会社 流域・砂防事業部 T EL 048-652-3330

© Japan Society of Civil Engineers

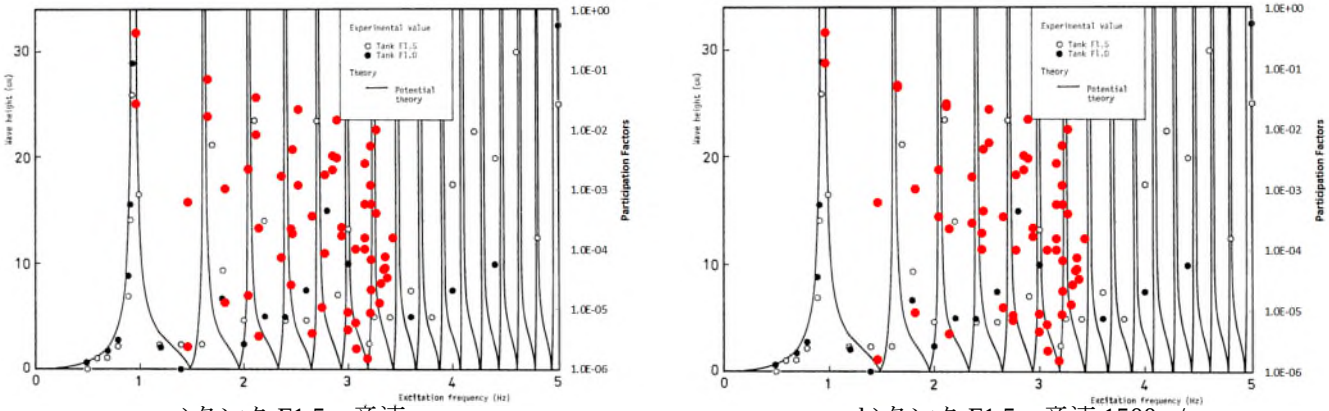


a)動水圧分布　　b)固有振動モード

図-3　タンク R15 に対する解析結果(音速 1500m/s の例)

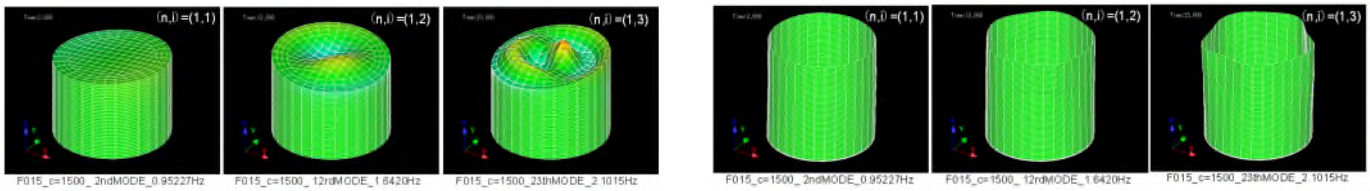
タンク F1.5 に対する固有値解析結果および既往実験結果の比較を図-4 に示す．なお、既往実験結果は，タンク F1.5 他で最も水深が深い場合の結果である．タンク R15 と同様，音速∞と 1500m/s で極値を示す振動数は同様の傾向を示した．同図に示すとおり，1 次モード，2 次モードでは解析値と実験値(あるいは理論値)がほぼ一致した．ただし, 高次モードになるほど解析値のほうが高い振動数を示す結果となり, この傾向はタンク R15 と同様であった．

代表振動モードに対する動水圧分布図および固有振動モードを図-5 に示す．同図に示すとおり，タンク R15 と同様，振動次数の相違によるスロッシング現象が表現できており，また，動水圧の変動も高次モードになるほど大きくなる傾向を示す結果となった．



a)タンク F1.5　音速∞　　b)タンク F1.5　音速 1500m/s

図-4　タンク F1.5 に対する固有値解析結果および既往実験結果の比較



a)動水圧分布　　b)固有振動モード

図-5　タンク F1.5 に対する解析(音速 1500m/s)

4. 剛タンクに対する検討

図-1b) に示す R15 のモデルの壁厚を 1.0m、底版剛性を 100 倍として剛タンクをモデル化し，固有値解析を行い，理論値 [3]と解析値の比較検証を行った. 表-2 に示すとおり，1 次モードでは 0.263%と非常に小さい誤差であったが、高次モードになるに従い両者の誤差に乖離が生じ，解析値のほうが高い固有振動数を示す結果となった.

表-2　剛タンクに対する固有振動数の比較

	(n,i)=(1,1)	(n,i)=(1,2)	(n,i)=(1,3)	(n,i)=(1,4)	(n,i)=(1,5)
理論値(Hz)	1.108	1.917	2.426	2.841	3.201
解析値(Hz)	1.111	1.937	2.483	2.965	3.416
誤差(%)	0.263	1.025	2.327	4.372	6.699

5 まとめ

円筒形タンクに対して FLIP ROSE 3D を用いて固有値解析を行った結果，1 次モード，2 次モードでは解析値と実験値(あるいは理論値)がほぼ一致したが，高次モードになるほど解析値と理論値との固有振動数に生じる乖離が大きくなり，解析値のほうが高い振動数となった．このことは，高次モードになるほど動水圧の変動が大きくなるものの，メッシュサイズを固定していることからその挙動を追随できず，固有振動数が高く評価された結果(固いと評価された結果)と考える．今後はメッシュ分割数が解析結果に及ぼす影響を確認するとともに，新たに動的応答に対する検討も行う予定である．

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである．

参考文献：1) Iai S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils & Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199,1993. 2)池田駿介,秋山成興,中村広昭,白井伸一:円筒タンク内の液体動揺に関する研究,土木学会論文集 第 290 号 1979.10. 3)小松敬治：スロッシング　液面揺動とタンクの振動,森北出版株式会社,2015.

© Japan Society of Civil Engineers