

鉛直加振が矩形タンクスロッシング波高特性に及ぼす影響に関する実験的研究

岐阜工業高等専門学校  
株式会社横河ブリッジ  
岐阜工業高等専門学校

正会員 ○渡邊 尚彦  
久保田 大地  
宮崎 泰樹

1. はじめに

スロッシングによる貯水槽の破損被害が東北地方太平洋沖地震において多数報告された。ここに、縦スロッシングについては鉛直加振周波数が水平固有周波数の2倍の加振条件下で不安定状態となることが Mathieu 方程式から得られることが知られている。しかし水平・鉛直同時加振作用時に鉛直加振が応答に及ぼす影響について行われた体系的な研究は少ない<sup>1)</sup>。本研究では3軸振動台による矩形タンクの加振実験を行い、画像計測と衝撃圧力の計測によって鉛直加振がスロッシングに及ぼす影響を実験的に考察した。

2. 実験条件

はじめに本実験で用いたタンクの寸法を表1と図1, 2, 3に示す。アクリル製タンク A,B は板厚 5mm, ステンレス製タンク C の板厚は 0.5mm とした。計測システムについては、図4に示すように大変位地震動再現装置(サンエス社製)を使用し振動台上で強制振動を与えた。動画の撮影は正面と側面の二方向から 30fps で撮影を行った。撮影された動画データをフレームごとにキャプチャし画像解析を行うことにより整理を行った。画像解析については、図5のようにキャプチャされた画像の壁面近くを輝度値によりエッジ検出を行い波高時刻歴の整理を行った。

表1 タンク緒元

	材質	寸法(L×H×B)(mm)
タンクA	アクリル製	290×290×140
タンクB	アクリル製	290×290×290
タンクC	ステンレス製	500×500×500

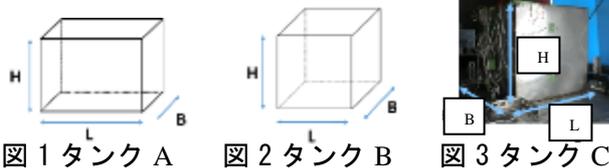


図1 タンク A 図2 タンク B 図3 タンク C



図4 実験風景全景

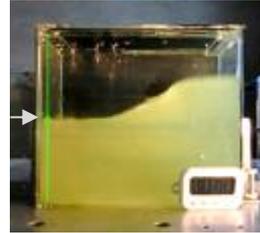


図5 エッジ検出

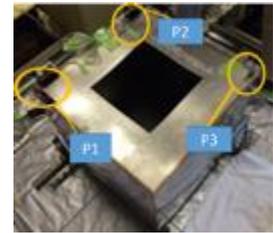


図6 タンク C 圧力計位置

2.1 水平・鉛直一方向加振実験

はじめに、A,B のそれぞれによる水平方向の連続 SWEEP 加振実験を行った。ここでは、1次モードの理論同調周波数周辺で正弦波による定変位振幅加振を行い実験的に同調周波数の特定を行った。その後さらに狭い周波数範囲で一定時間固定周波数における加振実験を行った。動画撮影時間は波が定常状態になる十分な時間として SWEEP 加振実験で 6min, 固定周波数加振実験で 1min とした。液位加振条件については表2に示す。(振幅は, peak to peak である。)鉛直加振実験についてはタンク B 液位 0.4L, 0.6L 条件で水平加振と同様の手順で実験を行い、加速度振幅を 0.2g, 0.3g と一定条件の下で加振周波数を 0.02Hz 刻みで変化させ、波の発生限界下限周波数を特定した。

表2 固定周波数実験条件(0.02Hz 刻み)

	タンクA		タンクB	
	f(Hz)	振幅(mm)	f(Hz)	振幅(mm)
0.2L(※1.224Hz)	1.1~1.4	5,10,20	1.1~1.4	10
0.4L(※1.512Hz)	1.4~1.7	5,10	1.3~1.6	10
0.6L(※1.602Hz)	1.4~1.7	10	1.4~1.7	10

※理論同調周波数

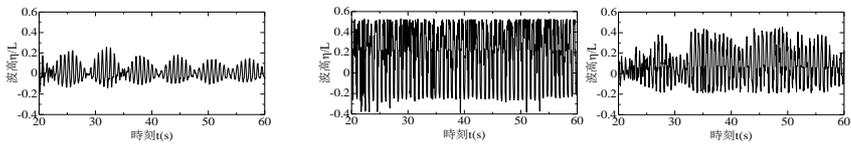
2.2 二方向加振実験

タンク A,B について 2.1 で得られた単独加振実験で得られた結果をもとに、水平方向は同調周波数周辺、鉛直方向は波の発生限界前後の周波数条件で二方向加振実験を行った。またタンク C において圧力計測条件は、水平加振周波数を理論同調周波数  $f_0$  としこれに周波数  $f_z = 2f_0, 3f_0, 2.02f_0, 1.98f_0$  の鉛直加振を加えた条件で行った。

3. 実験結果

3.1 水平方向加振

時刻歴波形の例を図7、各周期中の波高



I うなりを伴う波形 II 一定間隔で最大波高を示す波形 III 非周期的に変化する波形

図7 特徴的な時刻歴波形(タンクB)

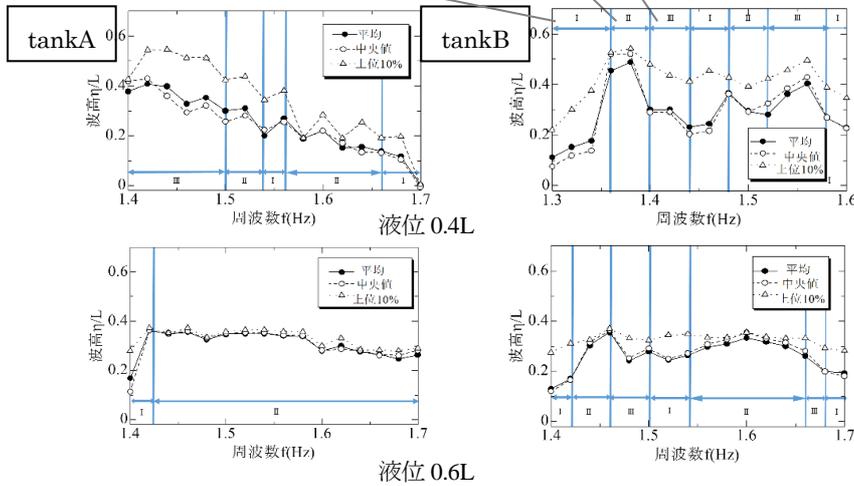


図8 各タンクにおける波高応答曲線と時刻歴タイプ

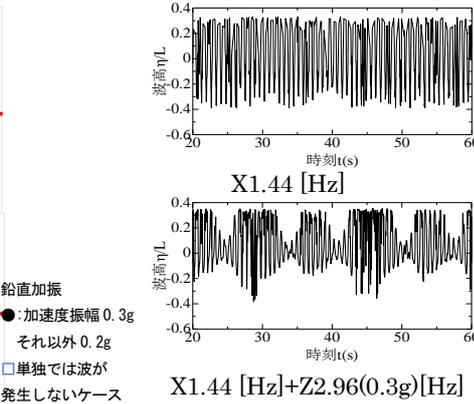
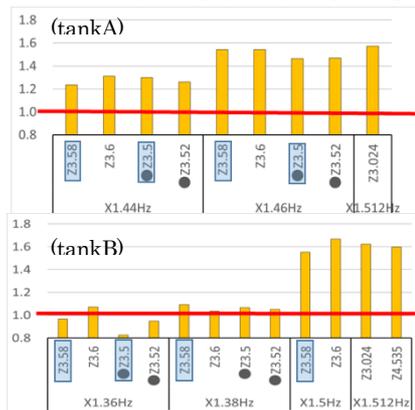


図9 二方向加振時波高増加倍率(液位0.4L)

図10 タンクB時刻歴比較

のピークの集計値についての応答曲線を図8に示す。液面挙動は周波数ごとに変化するが時刻歴波形はそれに依存しI, II, IIIと類型化できる波形パターンを確認した。応答曲線のピーク値は理論同調周波数より低周波数側で現れHardSpring型特性を確認できる。タンク形状についてタンクBは奥行きの影響による周波数に依存する液面形状及び波高時刻歴パターンの挙動の変化がより顕著に見られた。

3.2 二方向加振結果

液位0.4L条件でタンクA,Bについて水平加振に鉛直加振を加えた場合の水平単加振に対する波高平均増加倍率を図8に示す。タンクAでは鉛直加振が加わることで波高がいずれも増大するのに対し、タンクBでは必ずしも波高増大が顕著に見られるわけではないが時刻歴パターンは、変化すること確認できる(図9), タンクCについて図10に圧力履歴を示す。 $f_x = f_0$ .

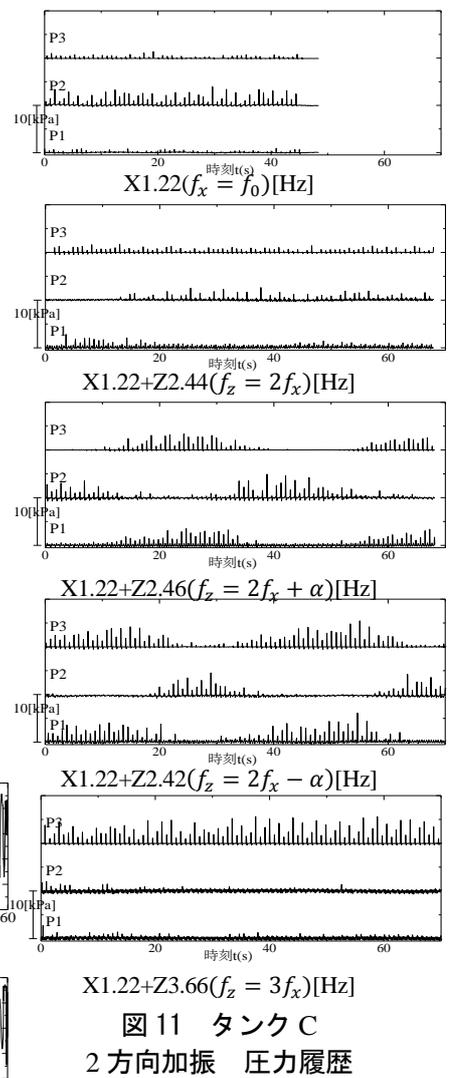


図11 タンクC 2方向加振 圧力履歴

$f_z = 2f_0$ の組み合わせは、水平方向の波を強め合わない一方、 $f_z = 2f_0 \pm \alpha$ の場合には最大圧力値が上昇し、波面挙動についても対角線状に運動に変化したことが圧力履歴から観測された。 $f_z = 3f_0$ の場合にはまた異なる液面モード挙動が確認できる。このように3次元タンクでは、不安定鉛直加振条件である $f_z = 2f_0$ が必ずしも水平加振によって生じる波を強めあうわけではないがそこから若干ずれた周波数条件の鉛直加振が液面圧力作用位置を変化させることを確認した。

4. まとめ

水平単一加振条件に鉛直加振が加わることで2次元タンクにおいてはより大きな波高を引き起こし、3次元タンクにおいては波面と時刻歴特性に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

【参考文献】 1) 高山知司, 西山貴大: 鉛直地震動に伴うタンク内の液面共振現象の解析, 海岸工学論文集 第45巻, pp. 856-860, 2015.