

地震時のタンク内の液体と上蓋の挙動

早稲田大学 学生会員 ○稲葉 淳
学生会員 杉浦 太一
フェロー 清宮 理

1 はじめに 2003年9月に発生した苫小牧地震では、震源から約200km離れた苫小牧地区を中心に多くの石油タンクが被害を受けた。地震による主な被害はタンクの浮屋根の損傷、それに伴う火災が挙げられる。このような事態が生じた原因の1つには、約3～15秒のやや長周期地震が2分以上続いたため、石油タンクのスロッシングが生じて想定以上に液面が揺れ、浮き屋根を破壊、また浮き屋根型は油と接する蓋部分が動くためにタンクの内側と接触、摩擦や静電気により出火したと考えられている。今後予想される巨大地震によるスロッシングの現象を把握するため長周期地震動およびスロッシングの解析が必要である。地震時のタンク内の液体と上蓋の挙動を把握するために模型振動実験と有限要素法による解析を行ったのでこれらの結果について述べる。

2 模型実験 図-1のような円筒タンクの亚克力模型を使い二次元振動台による振動実験を行った。

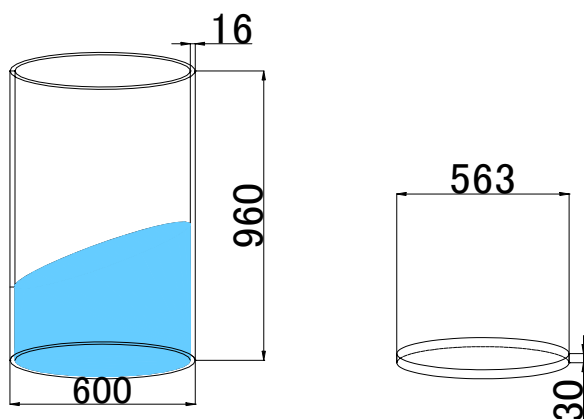


図-1 タンク及び上蓋模型図 単位(mm)

実験ケースを以下に示す。入力地震波は苫小牧、小千谷、広尾、正弦波の4ケース。水深は120mm、180mm、240mm、3ケース。水深120mmのケースでの正弦波入力の周期0.512Hz、2.048Hzの2ケースを追加。以上の条件下で蓋の有無により全28ケー

スの振動実験を行った。

3 実験・解析方法 タンクの固有周期は水深(H)と内径(R)に依存しており以下の(1)式により与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{1.845} \coth\left(\frac{H}{R}\right)} \quad (1)$$

(1)より求めたタンクの固有周期と同周期の正弦波を入力、加振して液面変位(タンクの端)及び蓋を有する場合の天板のひずみ(蓋中心部の裏表、両端の計4箇所)を測定する。次にタンクの縮尺に合わせて相似則で苫小牧地震、広尾地震、小千谷地震を入力し液面変位、天板のひずみを測定する。有限要素法解析は汎用プログラムソフトSOLVIAを用いて行う。解析モデルは蓋をシングルデッキと仮想し、減衰定数は0.5%とする。解析は実験と同条件で行うため実験時に計測した加速度で解析を行った。

4 実験・解析結果 実験結果における蓋の有無の最大値、最小値をそれぞれ表-1、表-2、表-3、液面変位の実験結果を図-2、解析結果を図-3に示す。

表-1 苫小牧地震水深120mm 最大、最小値

	ふたなし		ふたあり	
	変位(mm)	時刻(sec)	変位(mm)	時刻(sec)
最大値	53.71	34.87	36.06	23.00
最小値	-29.85	34.33	-36.20	22.40

表-2 小千谷地震水深120mm 最大、最小値

	ふたなし		ふたあり	
	変位(mm)	時刻(sec)	変位(mm)	時刻(sec)
最大値	31.59	6.20	24.82	6.20
最小値	-21.00	6.67	-18.64	5.73

表-3 広尾地震水深120mm 最大、最小値

	ふたなし		ふたあり	
	変位(mm)	時刻(sec)	変位(mm)	時刻(sec)
最大値	9.40	12.13	9.44	12.60
最小値	-12.13	11.67	-8.88	12.07

キーワード 長周期地震動、スロッシング、相似則、タンク

連絡先 〒160-0017 新宿区大久保3-4-1 早稲田大学51号館16F-01 TEL03-5286-3852 Email atsushi@rurilwaseda.jp

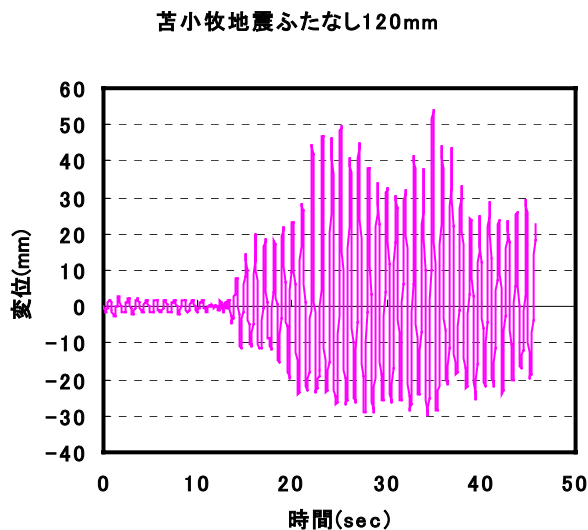


図-2 表面の鉛直変位の実験結果

苦小牧地震ふたなし 120mm

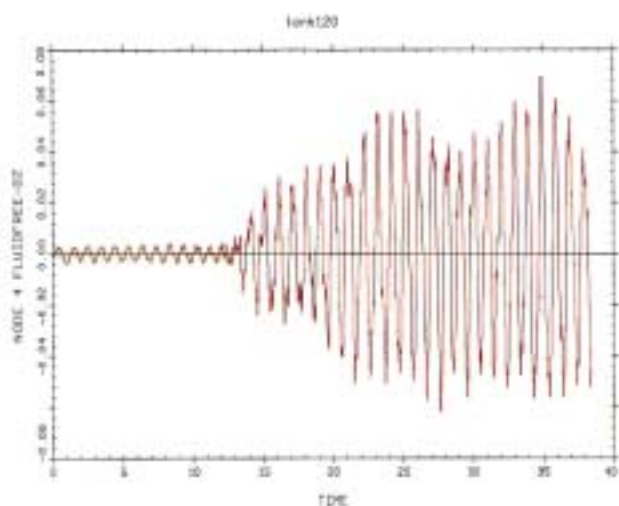


図-3 表面の鉛直変位の解析結果

苦小牧地震120mm

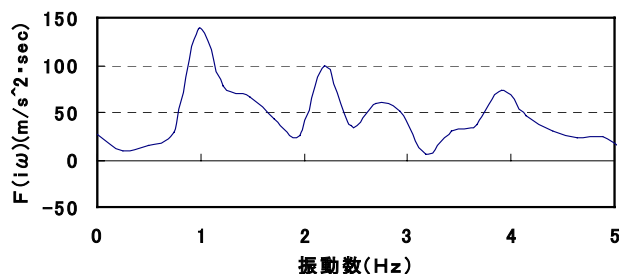


図-4 表面の鉛直変位の実験結果

表-4 表面の鉛直変位の実験結果

最大値	138.661
卓越振動(Hz)	0.977
固有振動数(Hz)	0.978

図-2 に（苦小牧地震蓋なし 120mm の場合）液面変位の時間変化を示す。経過時刻が 15 秒過ぎのあたりから共振に近い形になっていた。解析結果と比較してみると波形、振幅ともに実験結果に近い値を得ることができた。最大値、最小値ともに実験のほうが若干小さい値になった。広尾地震や小千谷地震については苦小牧地震と比べて長周期成分が卓越していないため共振が起こらず液面に大きな動揺は見られなかった。解析においては共振している苦小牧地震と比べ実験結果と解析結果により大きな誤差が生じた。これは振動中の水の非線形性を考慮していないためと考えられる。ただし水深の違いによりタンクの固有周期が変わってくるので同じ地震波においても液面変位に影響が出ていた。実験結果においては浮き屋根を有する場合の方が無い場合と比べて液面変位が小さくなっていた。また、実験・解析の入力地震動（苦小牧地震水深 120mm の場合）をフーリエ解析した結果を図-4・表-4 に示す。入力地震動は固有振動数とほぼ一致する振動数が卓越していると言えるが実際の苦小牧地震とは入力地震動が若干異なってしまった。入力地震動は実験時に二次元振動台から計測したものであり液体を振動させたことにより実際の苦小牧地震を厳密には再現できなかった。

5 まとめ 長周期をもつ苦小牧地震ではスロッシング現象が顕著に見ることができた。またその他の地震においても一時的に大きな液面変位が見られた。現在解析において浮き屋根と液面間の境界が離れる場合は考慮に入れていないので今後は境界条件について、検討する必要がある。また波形勾配が大きいときには水の非線形性が強く現れるため考慮する必要がある。上蓋のひずみを正確に測定し安全性の確認また材料を考慮する必要がある。今後制震材を用いた場合の挙動及び有効性などについても検討、実験していきたい。

【参考文献】

1)長沼寛樹, 松田宏: 浮き屋根式タンクのスロッシング解析手法に関する基礎的研究、タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集 2005 年 7 月 pp19-22