

平底円筒貯槽のロッキング応答がバルジング応答に及ぼす影響

鳥取大学大学院 学生会員 ○今井 康二 鳥取大学工学部 フェロー会員 上田 茂
 鳥取大学工学部 正会員 谷口 朋代 鳥取大学工学部 正会員 池内 智行

1. はじめに

地震時に平底円筒貯槽に生じる挙動としての1つにバルジングが挙げられる。バルジングとは、貯槽本体と貯槽内容液が一体となって運動する挙動であり、貯槽の耐震安全性を考える上で重要な問題として、数多くの検討がなされた。また、バルジングの作用により貯槽のロッキング（浮き上がり）が発生することが知られている。ロッキングも貯槽の耐震安全性を考える上で重要な問題であるが、ロッキングに関しては不明確な部分が多いのが現状である。そこで、本研究ではロッキング応答がバルジング応答に及ぼす影響について検討した。

2. 解析モデルについて

平底円筒貯槽の底板は柔な構造であるため底板全体が浮き上がることはなくその一部だけが浮き上がる。立面図で見れば底板がたわんだ形で一部に浮き上がりが生じ、底板の平面図で見れば浮き上がり範囲は三カ月形となる（図.1を参照）。しかし、このような浮き上りを解析することは現状では困難であるので、本研究では底板の一部が剛であるタンクモデルを用いて解析を行った（図.2を参照）¹。

3. ロッキングしない場合の運動方程式

ロッキングしない場合に貯槽に生じる応答は、バルジング応答のみであるから、1自由度ばね質点系の解析モデルで考えることができる。すなわち、水平地震加速度 $\ddot{z}_h$ が作用した時のバルジングに関する運動方程式は次式で表される。

$$M_I(\ddot{x}_I + \ddot{z}_h) + C_I \dot{x}_I + K_I x_I = 0 \cdots \textcircled{1}$$

4. ロッキング開始条件

貯槽が地震加速度を受けてロッキングを開始する条件はO点まわりの転倒モーメントと抵抗モーメントの釣り合いから、次式が得られる。

$$M_E g D / 2 < |H_I(C_I \dot{x}_I + K_I x_I)| \cdots \textcircled{2}$$

5. ロッキングする場合の運動方程式

貯槽にロッキングが生じる場合には、ロッキングとバルジングの連成振動を考えなくてはならない。解析モデルを図.3のように考えると運動方程式は、次式となる。

$$I_E \ddot{\theta} = -M_E g R_0 \sin(\alpha_0 - \theta) - \lambda H_I (C_I \dot{x}_I + K_I x_I) \cdots \textcircled{3}$$

$$M_I \ddot{x}_I + \lambda M_I g \sin \theta - \lambda M_{rh} R_I \dot{\theta}^2 \sin \alpha_I - \lambda M_{rh} R_I \ddot{\theta} \cos \alpha_I + M_I \ddot{z}_h \cos \theta + C_I \dot{x}_I + K_I x_I = 0 \cdots \textcircled{4}$$

ここに、 $\ddot{x}_I$ 、 $\dot{x}_I$ 、 x_I はバルジングの応答加速度、応答速度、応答変位、 $\ddot{\theta}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 θ はロッキングの応答角加速度、応答角速度、応答角度、

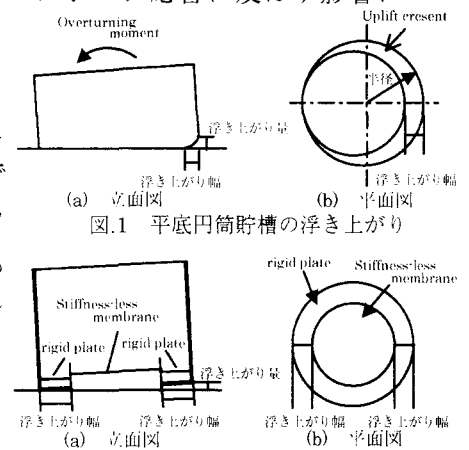


図.1 平底円筒貯槽の浮き上がり

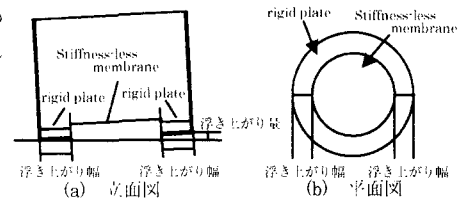


図.2 解析モデルの浮き上がり

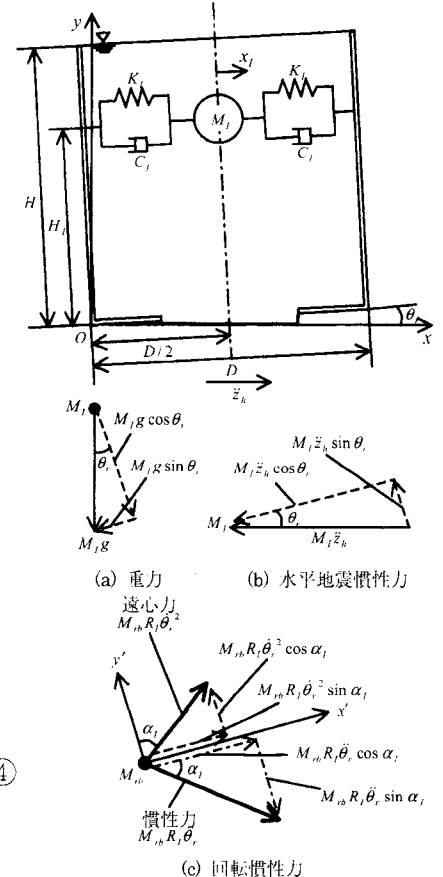


図.3 解析モデル

M_I , C_I , K_I はバルジングに関する有効液質量²⁾, 減衰係数, ばね定数, M_E , I_E は中空円柱状に分布するロッキングに関する有効液質量, 側板下端まわりの慣性モーメント, H_I は底板から M_I の重心の位置までの距離, M_{rb} はバルジングに関する有効質量のうちロッキングに伴う回転慣性力の作用を受ける質量, R_0 , R_I はO点からそれぞれ, M_E , M_{rb} の重心までの距離, α_0 , α_I はそれぞれ R_0 , R_I と側板のなす角度, λ はロッキングの方向を区別する指標である。

6. 解析結果および考察

解析は式①, 式③, 式④に入力地震動として, 絶対最大加速度を400galとしたエル・セントロ地震(卓越周期0.5 sec), タフト地震(卓越周期0.3 sec)を用いた。また, 比較用に正弦波地震動を用いた。正弦波地震動の周期は, 対象としたタンクのバルジングモードの固有周期(0.36~0.43 sec)を包含するように0.1~0.5 secとした。

図.4に, 2つの地震動を入力した場合の解析結果を示す。応答加速度の減少率とはロッキングを考慮しなかった場合のバルジング応答加速度からロッキングを考慮した場合にバルジング応答加速度が減少した割合であり, 減少率が正であればバルジング応答加速度が減少することを表し, 負であれば増加することを表す。尚, 浮き上がりの範囲として, 貯槽の直径の3%, 5%, 7%, 10%を仮定し, 浮き上がり量の限界として貯槽の直径の1%の制約を設けた。また, H/D は高さ直径比のことである。

実地震動の解析結果からは, バルジング応答加速度に2割程度の影響があること, 貯槽のロッキング応答によりバルジング応答加速度が増加する場合と減少する場合があることが分かる。また, エル・セントロ地震とタフト地震では H/D に対するバルジング応答の増加と減少の傾向がほぼ逆転していることが分かる。

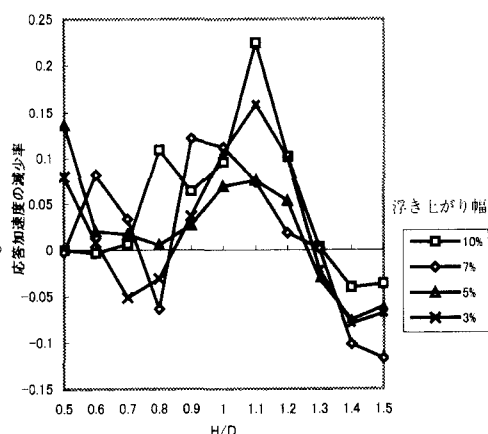
図.5は同じ貯槽に周期の異なる正弦波地震動を入力した場合の減少率の結果であり, 横軸は入力正弦波の周期である。ここで, H/D が0.5, 1.0, 1.5の貯槽はバルジングモードの貯槽の固有周期がそれぞれ0.362, 0.368, 0.425(sec)である。これより, 貯槽の固有周期より地震動の周期が小さい範囲ではバルジング応答加速度は増加する傾向にあり, 地震動の周期が大きい範囲では減少する傾向にあることを示す。この傾向は, 実地震動の解析結果と合っていると考えられる。

7. おわりに

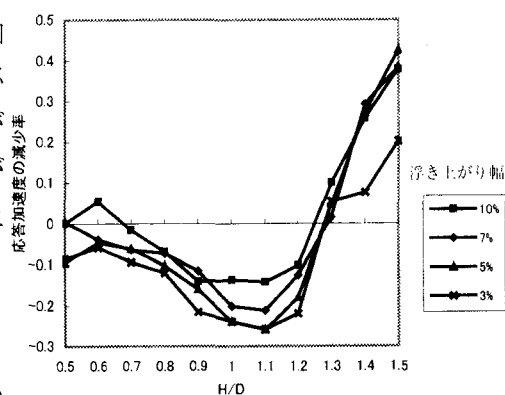
平底円筒貯槽のロッキング応答がバルジング応答に及ぼす影響は2割程度あり, ロッキングを適切に考慮する必要があることを示した。

<参考文献>

- 1) Tomoyo Taniguchi: Experimented and analytical studies of rocking mechanics of unanchored flat-bottom cylindrical shell model tanks, Seismic Engineering, ASME PVP, 2004. (in press)
- 2) 高圧ガス整備等耐震設計基準, 通商産業省告示第515号, 1981.10.26



(a) エル・セントロ地震



(b) タフト地震

図.4 実地震動の解析結果
(絶対最大加速度 400gal)

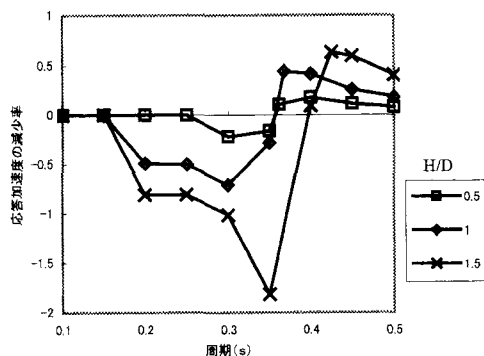


図.5 正弦波地震動による解析結果

(絶対最大加速度 400gal 浮き上がり幅 7%)