

浮屋根を有する貯水タンクの地震時スロッシングへの入力地震動の影響

早稲田大学 学生会員 杉浦 太一
 早稲田大学 フェロー 清宮 理
 (株)エス・イー・エイ 古川 巖

1. はじめに 近年、コンビナートの巨大化と過密化に伴い安全性の確保が重要な課題となっており、特に液体貯槽は内容物が可燃性の危険物であることから、地震時における液体の動揺が貯槽の耐震設計上で大きな問題となっている。例えば平成15年9月に発生した北海道十勝沖地震では、苫小牧の製油所内において石油貯蔵タンクの浮屋根が沈没し、石油貯蔵タンクの全面火災にまで拡大し、大きな社会的影響を与えた。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動が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（地震の揺れがそれほど大きくなくても、揺れが繰り返し続いていると、中の液体の揺れが大きくなり）浮屋根を破壊、また、浮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、摩擦や静電気が出火につながったと考えられている。このように、液体貯槽の大型化によって、固有周期が長くなり、地震波の長周期成分と共振してスロッシング現象を引き起こし、様々な問題を引き起こす恐れがある。そのため、液体の自由表面が共振して大振幅になるスロッシング現象を把握することは今後のスロッシング対策を考える上で重要な課題となってくる。本論文は、浮屋根を有する貯水タンクにおけるスロッシングの応答解析について検討したものである。

2. 検討方法 浮屋根式円筒型タンクを検討対象にする。タンクのモデルは直径50m、高さ10m、内容液の深さ5mである。浮屋根をモデル化する際浮屋根と液面に同一接点を用いている。有限要素解析にはSOLVIA03を用いる。このモデルに下方より地震波を入力、解析し波高の時刻歴を推定、およびその影響を検討する。ただし、表層地盤とは一体化しておらず入力タンク下面とする。この条件での液面の1次固有振動周期は9.336[S]である。解析には、タンク構造の軸対称性を考慮して外側を軸対称平面要素(shell)、液体の流動性を考慮して線形流体要素(fluid3)、浮屋根を平面要素(shell)、天板に浮力を与えるためにバネ要素(ortho)を用いる。今回は浮屋根と外壁とは離れており、また浮屋根のガイドはモデル化していない。入力地震波は気象庁の観測波形記録による苫小牧・広尾・小千谷での加速度記録を用いる。また、入力した地震波がどのような特性・成分を帯びているのかを調べるためにフーリエ解析を行い、波高・モデルの固有周期との関係を検討する。

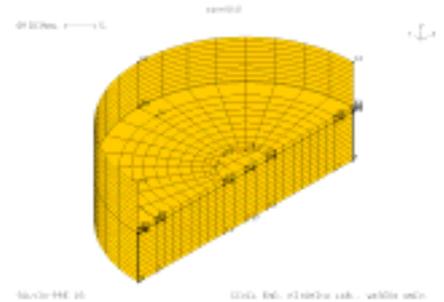


図1. 円筒形タンクモデル

3. 検討結果 図2に地震波のフーリエ振幅スペクトルとモデルの1次・2次・3次固有周期を示す。この結果を見ると、広尾・小千谷に関しては比較的短周期成分が卓越していることが分かる。そこで、地震波のフーリエスペクトルとモデルの液面動揺固有振動数を比較すると、広尾・小千谷に関しては、地震波の周期とモデルの周期が一致していない。よって、広尾・小千谷に関しては共振しないことが予想される。一方で、苫小牧に関しては地震波の長周期成分とタンクの固有振動数がほぼ一致している。苫小牧は共振もしくは共振に近い液面挙動となることが予想される。図3にSOLVIA解析結果の液面変位の時刻歴を示す。まず、時刻歴の波形の形状だけを見てみると、広尾・小千谷は微小時間あたりの動揺は小さい。対して苫小牧においては全体的に激しく動揺していることがわかる。フーリエ解析の予想とSOLVIA解析の結果がほぼ一致している。共振波形でない広尾・小千谷の液面最大波高はそれぞれ0.42(m)、0.68(m)と小さな値となっている。苫小牧に関しては広尾・小千谷とあまり変わらず、0.89(m)と小さな値となっている。苫小牧が共振波形に近いにもかかわらず液面最大波高が他の地震波とさほどの違いが見られない。ここで波高を正規化する。「正規化する」というのは最大加速度が違う地震波を同じ加速度(100(gal))で

キーワード スロッシング、浮き屋根式円筒形タンク、SOLVIA、フーリエ解析、固有周期

連絡先 〒160-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 51号館16-01 清宮研究室 : 03-5286-3852

統一させることをいう。正規化した結果を図4に示す。苫小牧は他の地震波に比べ最大加速度が小さいために図3では分からなかったが、最大波高が比較的大きな値となっていることがわかる。つまり共振に近いのに最大波高が小さいのは最大加速度が小さいためであり、もし周期が同じで最大加速度が大きくなれば液面の最大波高が上昇するといえる。また、図3からも分かるように苫小牧の地震波が他の地震波に比べ小さな値となり、地震の振幅事態が小さいことが最大波高の上昇につながらなかったこともいえる。逆に、広尾・小千谷は地震波の振幅特性や最大加速度が大きいにもかかわらず、共振していないために最大波高の値が小さいことがわかる。また、以上の検討結果はすべて浮き屋根を考慮しての解析結果を基にしているが、液面フリーで同様の解析を行ったときも結果には大差なかった。

4．結論 地震波の長周期成分が卓越している場合、その長周期成分とタンクの固有周期（固有振動数）が一致もしくは近似する時、共振又は共振に近い液面挙動になりやすい。その時の最大波高も共振しない場合に比べ値が大きくなる。しかし地震波の長周期成分が卓越していても、最大加速度や振幅特性が小さければ共振しても最大波高は比較的小さい。逆に全般的な地震の振幅特性や最大加速度が大きくても、長周期成分が卓越していなければ共振につながらず、なおかつ振幅特性が小さいので液面最大波高が大きくなることはない。また浮き屋根は液面と同様の挙動をとった。この点に関して液体と浮屋根間に空隙が生じたときのモデル化が十分ではないので今後検討する。共同研究者の藤本久記氏（現山梨県庁）には計算において協力して頂いた。ここに敬意と感謝の意を表す。

参考文献 1) 河野和間：円筒形貯槽の液面動揺最大波高算定に関する各種耐震設計基準における設計地震動の比較・検討、基本方針専門委員会資料、2003年11月

2) 平山紀夫 遠吾一 小島淳司：ANSYS/LS-DYNAのALE機能を利用したスロッシング解析

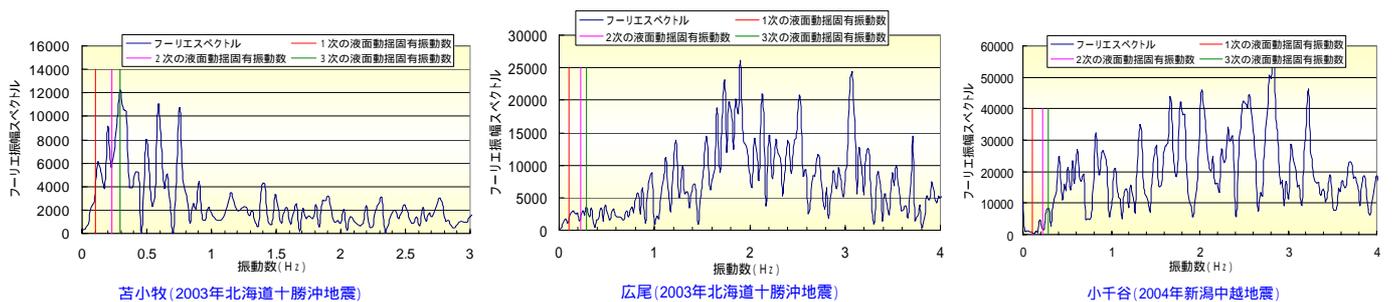


図2．地震波のフーリエ振幅スペクトルとモデルの1次・2次・3次固有周期

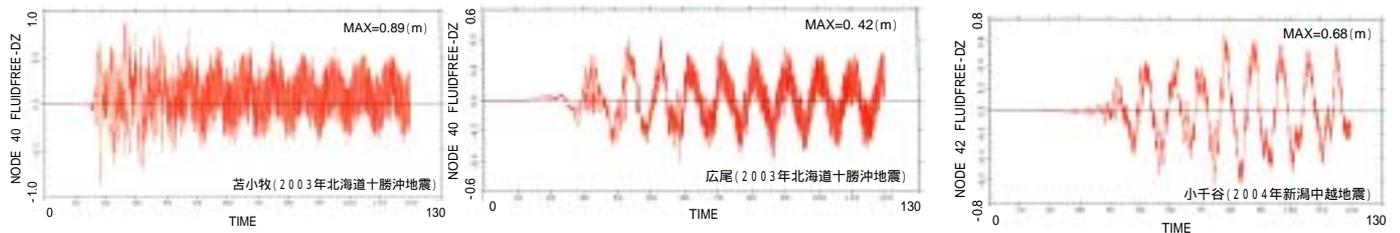


図3．SOLVIA 解析結果の液面変位の時刻歴

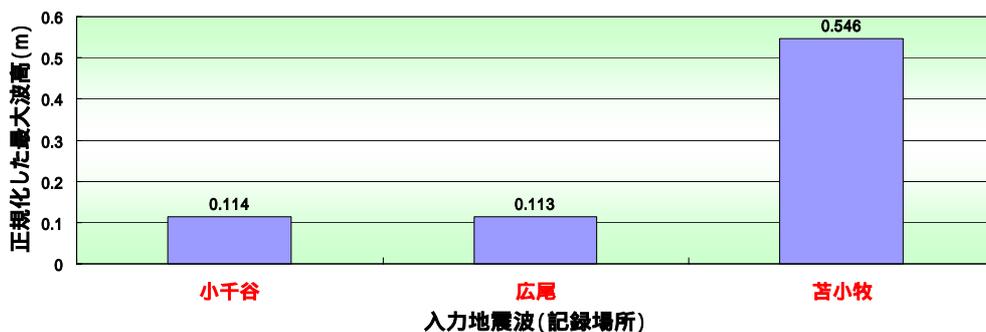


図4．入力地震波を正規化したときの最大波高の比較