

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760436

研究課題名(和文) シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析

研究課題名(英文) Nonlinear sloshing analysis of cylindrical liquid storage tank with single-deck type floating roof

研究代表者

山本 憲司 (YAMAMOTO KENJI)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・助教

研究者番号：70311884

研究成果の概要(和文)：シングルデッキ型浮屋根式タンクにおけるスロッシング挙動を解析する手法を提案した。また、この手法を用いて二次モード共振時におけるポンツーンの楕円化変形挙動を解析した。2005年の消防法告示改正の際に、ポンツーンの応力を算定する為の評価式が同時に示されたが、この評価式から算定されるポンツーン応力と提案手法による結果との比較を行い、異なるモデル化や数値解法の立場から評価式の妥当性について検証を行った。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the behavior of the second mode resonance in the liquid storage tanks with the single-deck type floating roof. The behavior of the floating roof is simulated by the numerical analysis method that we propose, and the deformation and stress in the pontoon are investigated in detail. The stress of the pontoon calculated by the design method notified by the Fire Defense Agency is compared with the numerical results. By these results, the validity and the applicability of the design method are discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度			
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：浮屋根, ポンツーン, スロッシング, 楕円化変形, シングルデッキ

## 1. 研究開始当初の背景

2003年の十勝沖地震では、石油タンクの浮屋根がスロッシングにより被害を受けた。危険物保安技術協会の報告書ではその原因のひとつとして二次モード共振時のポンツーンの楕円化変形を挙げている。また、これらの応答に対する簡便な評価式も同時に提案している。2005年の消防法告示改正の際

には、消防庁からの通知にこの強度評価式が同時に示されている。

この強度評価式は汎用の有限要素解析ソフトの解析結果に基づいて作成されているが、これまでに浮屋根の非線形挙動を解析した例は数が少ない為、その妥当性については十分な裏付けがあるわけではない。浮屋根の幾何学的非線形性が応答に与える影響につ

いては十分に明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

(1) 流体と浮屋根の非線形相互作用を考慮したシングルデッキ型浮屋根式タンクの数値解析手法の提案を行う。

(2) 危険物保安技術協会の報告書で提案された強度評価式から算定されるボンツーン応力と本数値解析による結果との比較を行い、異なるモデル化や数値解法の立場から強度評価式の妥当性について検証を行う。特に、二次モード共振によるボンツーンの楕円化変形によって生じる応力を検討対象とする。

## 3. 研究の方法

(1) 流体と弾性体の非線形相互作用問題の定式化は、変分原理に基づいて定式化する。流体はポテンシャル流体とし著者らが過去に提案した流体要素を用いる。シングルデッキ型浮屋根は、デッキ部分を膜要素、ボンツーンを梁要素によってモデル化する (図 1)。

汎関数は流体場圧力を体積積分したエネルギー関数と、弾性体のポテンシャルエネルギー関数の和で表現される汎関数を用いる。この汎関数を離散化してリッツ法を適用することで、力学的な考察を必要とせずに非線形釣合式を簡潔に導出する。

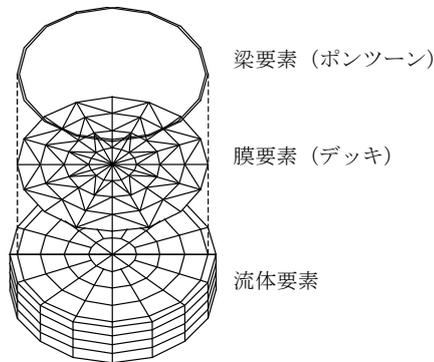


図 1 シングルデッキ型浮屋根式タンクのモデル化

(2) 十勝沖地震で被災した実機 3 万 kL、4 万 kL、10 万 kL タンクをモデル化し、二次モード共振時のボンツーンの楕円化変形挙動を調査する。正弦波入力による定常応答を求め、その応答結果から以下の点について分析する。

- ① ボンツーンの半径方向変位量  $u_{r0}$  とデッキ面外変形量  $\Delta$  の関係 (図 2 参照)
- ② ボンツーンの軸力分布、面内曲げ応力分布

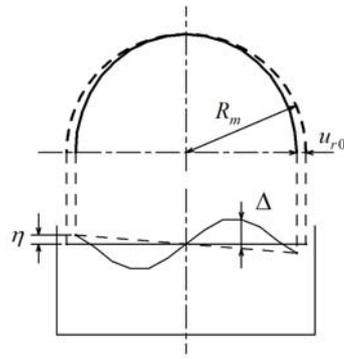


図 2 デッキ及びボンツーンの変位

(3) 十勝沖地震で被災した実機 3 万 kL、4 万 kL、10 万 kL タンクをモデル化し、地震動入力時の過渡応答を解析し、二次モード応答成分の分析を行う。地震動は速度応答スペクトルが周期の広い範囲で凡そ一定となる人工地震動を 4 波作成し、それぞれの地震動に対して時刻歴応答解析を行う (図 3)。応答結果に対して以下の点に注目して分析を行う。

- ① 浮屋根の非線形性による応答低減係数 (非線形応答解析による二次モード液面動揺高さ  $\eta^{NL}$  / 線形応答解析による二次モード液面動揺高さ  $\eta^L$ ) とボンツーン断面関との関係
- ② ボンツーンの半径方向変位量  $u_{r0}$  とデッキ面外変形量  $\Delta$  の関係

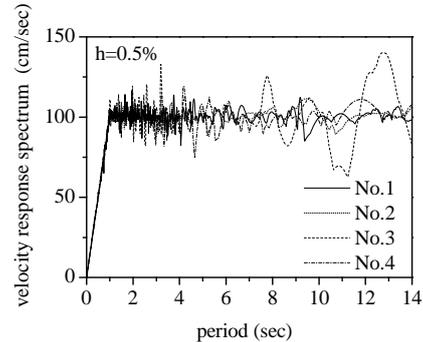


図 3 入力地震動の速度応答スペクトル

## 4. 研究成果

(1) 流体と浮屋根弾性体との相互作用問題を变分原理に基づいて定式化した。これにより、煩雑になりがちなこの問題の非線形釣合式を、流体場での境界条件を意識せずに容易に導出できることが分かった。これにより、これまでにないシンプルな解析手法が示せた。

(2)-① 正弦波入力による二次モード応答時のボンツーンの半径方向変位量  $u_{r0}$  とデッキ面外変形量  $\Delta$  の関係を図 4 に示す。図中の図中の黒い破線は 3 万 kL タンク、灰色の破線は 4 万 kL タンク、薄い灰色の破線は 10 万 kL タンクの結果を表す。図中の実線の曲線は、危険物保安技術協会の報告書で提案された強度評価式を導出する際に仮定されてい

る関係式  $u_{r0} = 0.082\Delta^2$  を無次元化した関係式  $u_{r0}/R_m = 2.98(\Delta/R_m)^2$  を表す。本解析による結果では、強度評価式の関係に比べて、 $u_{r0}$  の値が丁度半分程度となることが分かった。本解析の結果が妥当であるとすれば、強度評価式は安全側の評価となる。

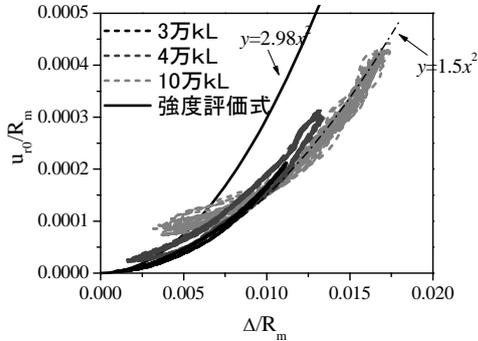


図4 デッキ面外変形量とポンツーン半径方向変形量の関係

(2)・② 浮屋根が二次モードでおよそ定常応答している際の、ポンツーンに最大軸力が発生した時刻の軸力分布を図5に示す(代表例として3万kLタンクの結果を示す)。横軸はポンツーン位置を表し、0度、180度が加振軸上の点となる。図中の点線は危険物保安技術協会の報告書の強度評価式で仮定される、次式の関係を描いたものである。

$$N = \frac{EA}{2R_m} u_{r0}$$

ただし、 $u_{r0}$ には数値解析の結果での最大値を代入して求めた。両者は比較的良く一致することが分かった。

次に、ポンツーンに最大面内曲げモーメントが発生した時刻の面内曲げモーメント分布を図6に示す(代表例として3万kLタンクの結果を示す)。図中の点線は、強度評価式で仮定される、次式の関係を描いたものである。

$$M = \frac{3EI}{2R_m^2} u_{r0}$$

$u_{r0}$ には上と同様に数値解析の結果での最大値を代入して求めた。面内曲げモーメントの場合、0度、180度では上式の値と良く一致するが、90度位置でのモーメントの値が数値解析の結果では数倍大きくなること分かった。仮に本解析の結果が妥当であるとすれば、強度評価式は危険側の評価となり、改善が必要になる。

(3)・① 地震応答解析から得られた応答波形をモード展開して二次モード応答を抽出し、二次モードの最大液面動揺高さ  $\eta_{max}^{NL}$  を求めた。更に、浮屋根及び流体の非線形性を無視した線形応答解析を実施して得られる二次

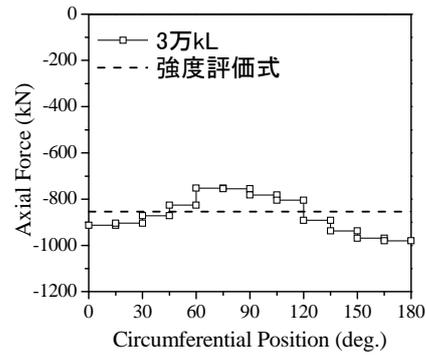


図5 ポンツーンの軸力分布

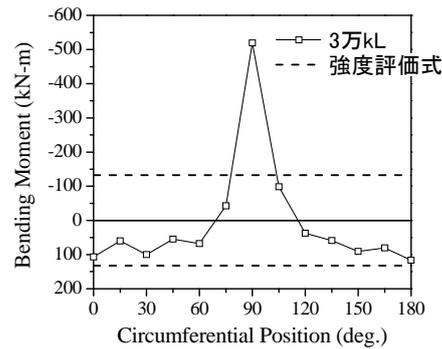


図6 ポンツーンの内面曲げモーメント分布

モードの線形最大液面動揺高さ  $\eta_{max}^L$  も同時に求め、両者の応答の比から浮屋根の非線形性による応答低減係数  $\eta_{max}^{NL}/\eta_{max}^L$  を求めた。図7に応答低減係数  $\eta_{max}^{NL}/\eta_{max}^L$  とポンツーンの断面積(ポンツーン半径で無次元化してある)の関係を示す。地震動の目標応答スペクトルが○印は100cm/s、×印は200cm/sの時の応答結果である。図中の点線は、危険物保安技術協会の報告書の強度評価式で仮定される次の関係式を描いたものである。

$$\frac{\eta_{max}^{NL}}{\eta_{max}^L} = \exp\left(-14500 \times \frac{A}{R_m^2}\right)$$

本解析による結果は、上式の関係よりも応答低減係数は大きくなる傾向があり、浮屋根の非線形性による応答の低減は上式の半分程度となること分かった。仮に本解析の結果が妥当であるとすれば、強度評価式は危険側の評価となり、改善が必要になる。

(3)・② デッキの面外変形量  $\Delta$  とポンツーンの半径方向変形量  $u_{r0}$  の関係を図8に示す。図中●印は地震動の入力時間の中で  $u_{r0}$  の最大値と  $\Delta$  の最大値の関係を表し、■印は  $u_{r0}$  の最大値と  $u_{r0}$  が最大となる時刻における  $\Delta$  の関係、△印は  $\Delta$  の最大値と  $\Delta$  が最大となる時刻における  $u_{r0}$  の関係を表す。  $u_{r0}$ 、 $\Delta$  が最大値をとる時刻は必ずしも同じでない。しかし、それぞれの最大値どうしには、概ね正弦波入

力の場合と同様の相関関係があることが確認できた。これにより、二次モード成分の波高からポンツーンの半径方向変形量を推定する強度評価式の方法の妥当性が確認できた。

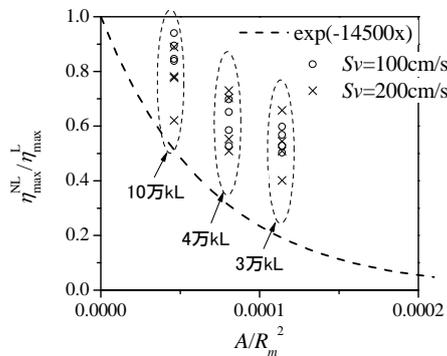


図7 ポンツーン断面積と二次モード応答低減係数の関係

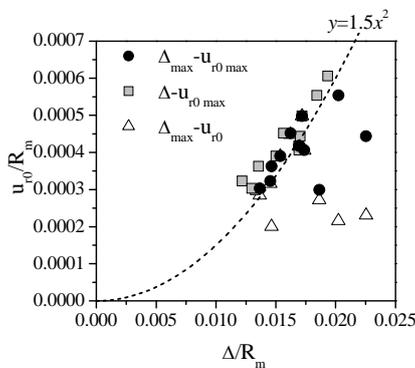


図8 デッキ面外変形量とポンツーン半径方向変形量の関係

(4) 以上のように、提案の解析手法により得られる数値解析結果と、強度評価式で評価される値には若干の差が見られた。どちらが実現象をよく評価しているか十分な知見は得られていない為、今後も、他の実験研究、解析研究との比較を行い、提案の解析手法の妥当性について検証していく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 山本憲司, 皆川洋一: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析, 日本建築学会構造系論文集, No. 643, pp. 1603-1612, 2009. 9, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① 山本憲司: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング

解析—二次モード共振時におけるポンツーンの楕円化変形に関する検討—, 日本建築学会九州支部研究報告, 2011. 3. 7, 鹿児島 (鹿児島大学)

- ② 山本憲司: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析 有限回転を考慮した梁要素の導入, 日本建築学会大会, 2010. 9. 9, 富山 (富山大学)
- ③ 山本憲司: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析, 第59回理論応用力学講演会, 2010. 6. 9, 東京 (日本学術会議)
- ④ 山本憲司: シングルデッキ型浮屋根を有する円筒液体貯槽の非線形スロッシング解析, 日本建築学会大会, 2009. 8. 26, 仙台 (東北学院大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 憲司 (YAMAMOTO KENJI)

鹿児島大学・理工学研究科 (工学系)・助教

研究者番号: 70311884