

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420588

研究課題名(和文) シングルデッキ型浮屋根式石油タンクの地震応答性状に関する研究

研究課題名(英文) Seismic Response Behavior of Single Deck Type Floating Roof on Oil Storage Tanks

研究代表者

山本 憲司 (Yamamoto, Kenji)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：70311884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はシングルデッキ型浮屋根式石油タンクにおける一次モードスロッシング時の浮屋根の挙動について調査した。2003年の十勝沖地震では、大型石油タンクの浮屋根に多くの被害が生じた。既往の報告書では、一次モード共振時におけるポンツーンの面外変形がその原因のひとつと考えられている。本研究では浮屋根の挙動の数値シミュレーションを行い、ポンツーンの変形、応力を詳細に調査した。消防庁から通知された設計式で計算されたポンツーンの応力と数値解析結果の比較を行った。その結果、設計式は液深やデッキ張力の影響を考慮しておらず、応力が過小に評価されることを明らかにした。またこれを改善した設計式も提案した。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the behavior of the first mode resonance in the liquid storage tanks with the single-deck type floating roof. In the Tokachi-Oki Earthquake in 2003, the floating roof of the large-sized oil tanks received damage by sloshing. One of the reasons is considered to be out-of-plane deformation of the pontoon by the first mode resonance in the past report. In this paper, the behavior of the floating roof is simulated by the proposed numerical analysis method, 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, it was found that stress is underestimated because the design method does not take into consideration the influences of liquid depth and deck tension. An improved design method in consideration of the influence was proposed.

研究分野：構造力学

キーワード：スロッシング 石油タンク 浮屋根 シングルデッキ ポンツーン

1. 研究開始当初の背景

2003年9月に発生した十勝沖地震では、大型石油タンクにスロッシングによる多くの被害が発生し、特にシングルデッキ型浮屋根に甚大な被害があった。2004年の危険物保安技術協会の報告書ではその原因を詳細に調査しており、浮屋根が過大な力を受けた原因として、「一次モード共振時における流体非線形性により生じるポンツーンの面外変形」と「二次モード共振時におけるポンツーンの楕円化変形」のふたつを挙げている。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4月には消防法告示の改正が行われ、浮屋根の耐震性能確保のための技術基準が示されたが、2005年1月14日の通知ではこの報告書の強度評価式が同時に示された。

この強度評価式は、汎用の有限要素解析ソフトを利用してシングルデッキ型浮屋根の挙動を数値解析し、その解析結果に基づいて作成されている。しかし浮屋根の非線形挙動を解析した例は数が少なく、強度評価式の妥当性については明らかにされていない。

流体と弾性体の非線形相互作用問題は、応用力学や計算工学の分野では未だ発展途上の内容であり、流体と弾性体との非線形相互作用を厳密に扱い、浮屋根式タンクのスロッシング挙動の解析を行っている既往の文献は非常に少ない。汎用解析ソフトにより手軽に検討できる研究内容ではない為である。著者らは流体と弾性体との非線形相互作用を厳密に扱った実用レベルの非線形スロッシング解析プログラムの開発を行っており、また既往の文献には、本研究のように消防法告知で示された強度評価式との比較を行っている研究は殆ど見当たらなかった。

2. 研究の目的

(1)本研究は、シングルデッキ型浮屋根を有する石油タンクにおいて、浮屋根の幾何学的非線形性が地震応答性状に与える影響を、数値解析により明らかにすることを目的とする。浮屋根の非線形振動応答について、本研究では特に「一次モード共振時における流体非線形性により生じるポンツーンの面外変形」及び「二次モード共振時に付随的に生じる高次モード(半径方向一次、周方向三次)」のふたつの挙動の分析を目的とする。

(2)「一次モード共振時における流体非線形性により生じるポンツーンの面外変形」の評価を行う。スロッシング波高が小さい場合には自由液面は左右対称な応答をするが、スロッシング波高が大きい場合、流体の変位は上昇側で大きく下降側では小さくなり、自由液面は反った形状になる(図1)。この為、液面に浮かぶポンツーンは周方向展開次数2次の面外変形を受けることになる。強度評価式では、この周方向2次の面外変形によりポンツーンに生じる最大曲げモーメントが評価さ

れる。タンクの直径、液位、ポンツーン断面等をパラメトリックに変化させて、非線形地震応答解析を実施し、一次モード共振時におけるポンツーンの面外変形挙動を分析する。現在提案されている強度評価式との比較を行い、強度評価式の妥当性について検証する。

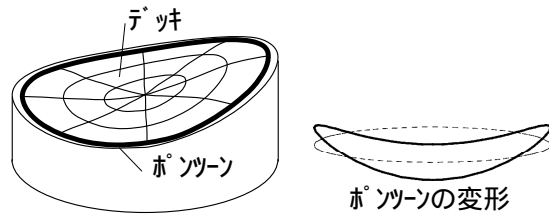


図1 一次モード共振時におけるポンツーンの面外変形

(3)「二次モード共振時に付随的に生じる高次モード」の発生原因と傾向の分析を行う。十勝沖地震で被災した10万kL石油タンクをモデル化して地震応答解析を実施すると、浮屋根が二次モードで共振する際に、半径方向一次周方向三次の高次モードが生起し、ポンツーンに非常に大きな面外曲げモーメントが生じることがこれまで解析で分かっている。このような非線形振動の報告は他の研究者による実験、解析によっても確認されている。この非線形振動によってポンツーンが受ける面外曲げモーメントは大きな値であり、浮屋根が被害を受けた直接の原因である可能性がある。しかし、どのような場合に半径方向一次周方向三次の高次モードが生起するかについては十分に明らかになっていない為、その理由を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)解析モデルは十勝沖地震で被災した石油タンクを参考にし、実機3万kLタンク(M03)、4万kLタンク(M04)、10万kLタンク(M10)のモデルを作成した(図2、表1)。ポンツーン、デッキはそれぞれ幾何学的非線形性を考慮した梁要素と膜要素でモデル化し、流体要素は、流体非線形性を考慮した8節点アイソパラメトリック体要素を用いた。解析領域は対称性を考慮し1/2部分とした。流体要素は独自に提案した定式化に基づくものであり、流体と浮屋根の非線形相互作用を厳密に評価している。

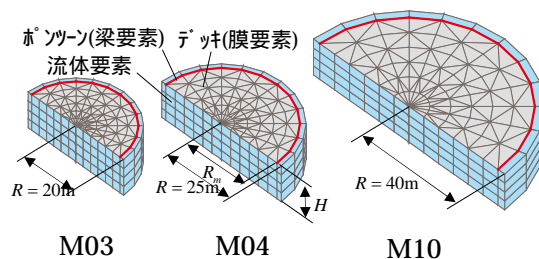


図2 解析モデル

表1 解析モデル諸元

モデル名称	M03	M04	M10
貯槽半径 R(m)	20	25	40
液体深さ H(m)	15		
液体密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	850		
デッキ・ポンツーンヤング率 E(GPa)	205.8		
デッキ・ポンツーンポアソン比 $\nu$	0.3		
デッキ部厚さ td(mm)	4.5		
側壁とポンツーンのクリアランス wc(cm)	25		
ポンツーン断面幅 B(cm)	250	300	500
ポンツーン断面高さ D(cm)	70	70	80
ポンツーン上下単板厚 $t_1$ (mm)	4.5		
ポンツーン内外リム厚 $t_2$ (mm)	12		
ポンツーン断面積 A(cm <sup>2</sup> )	390.8	435.8	639.8
ポンツーン面外断面2次モーメント $I_y$ (cm <sup>4</sup> )	338,100	392,500	810,900
ポンツーン面内断面2次モーメント $I_z$ (cm <sup>4</sup> )	3,738,000	5,727,000	21,180,000
ポンツーンねじり定数 J(cm <sup>4</sup> )	997,700	1,217,000	2,717,000

(2) 上記(1)のモデルを基準モデルとして、ポンツーンの上下単板厚  $t_1$  を基準モデルの 0.5、1.0、2.0、4.0 倍、断面高さ  $D$  を 0.5、1.0、2.0 倍したものを組み合わせ、9 種類のモデルについて解析を行う(当初は面外断面 2 次モーメントのみを単純に変化させたモデルを扱っていたが、ねじれ剛性が応答結果に無視できない影響を与えることが分かったため具体的な断面を仮定することとした)。また、液深は  $H/R=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$  の 4 通りを扱う。解析は、流体と浮屋根を共に微小変形を仮定した線形解析と、大変形を考慮した非線形解析の 2 通りを行う。

入力波は単純な正弦波と人工地震波の 2 通りとする。正弦波は、外力周期をスロッシング一次モードの固有周期に一致させるものとし、入力波数  $n(n=3, 5, 10)$  や外力加速度の振幅(1gal, 2gal, 5gal, 10gal)を変化させて解析を行

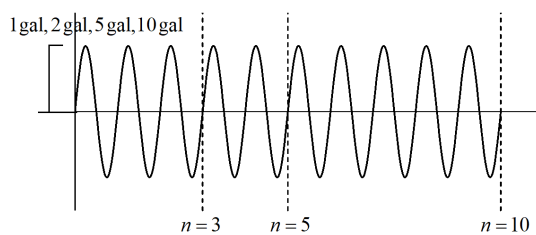


図3 入力正弦波

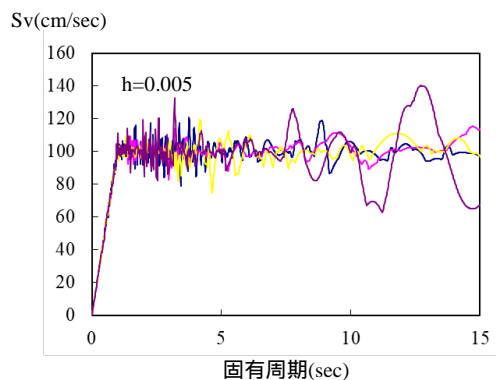


図4 人工地震波の速度応答スペクトル

う(図3)。人工地震波は速度応答スペクトルが固有周期の広い範囲で 100cm/sec で一定となる地震波(図4)を作成して用いる。

(4) 上記のようにタンク容量、液深、ポンツーン断面をパラメータとした数多くの応答解析結果について詳細に分析を行い、応答結果と強度評価式で算定される断面力を比較することによって、強度評価式の力学モデルの妥当性について検証する。この分析によって強度評価式と応答結果の差、強度評価式では評価できない力学挙動を明らかにし、強度評価式の修正を試みる。

(5) 以上は、「一次モード共振時における流体非線形性により生じるポンツーンの面外変形」を分析する為の解析条件であるが、「二次モード共振時に付随的に生じる高次モード」を分析する為に同様の解析モデルを用い、正弦波入力の外力周期を二次モードスロッシングの固有周期に一致させた場合の解析を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 強度評価式は液深がポンツーンの面外変形に与える影響は無いものとしているが、浮屋根(ポンツーン)の面外変形は、自由液面の場合と同様に液深の影響を受けることを明らかにした。図5は正弦波で加振した場合の解析により得られた液面の最大面外変位を表す係数  $\gamma(=\delta R/(\eta^L)^2)$  (ここに  $\delta$ : 液面最大面外変位でありポンツーンの最大たわみを表す、 $R$ : タンク半径、 $\eta^L$ : 線形最大波高) と無次元化液深  $h(=H/R)$  の関係を示したものである。図中の塗りつぶしたマーカーが浮屋根の場合、白抜きマーカーが浮屋根の無い自由液面の場合の結果である。図中の曲線は自由液面に対して既往の文献で示された回帰曲線である。図から浮屋根がある場合においても自由液面の場合と同様に液面の応答は液深の影響を受けることが分かる。この結果は、既往の研究に無い本研究で得られた新しい知見である。

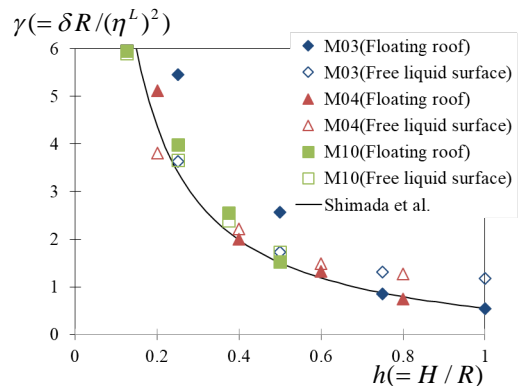
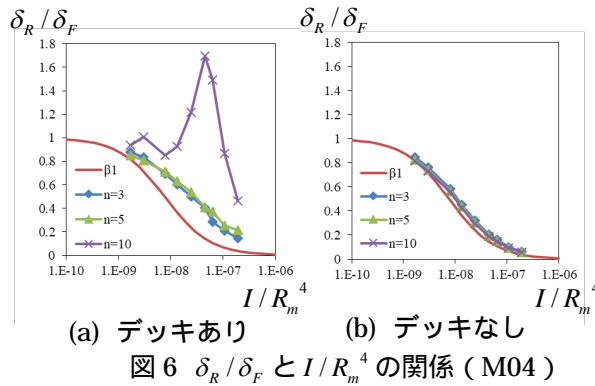


図5  $\gamma$  と  $h$  の関係

(2)デッキに発生する張力が、ポンツーンの面外変形を増幅させることを明らかにした。例として M04 モデルに対し、ポンツーンの曲げ剛性を変化させ、正弦波で加振した場合の結果を示す。ポンツーンの最大面外変形(たわみ)  $\delta_R$  を自由液面の最大面外変形  $\delta_F$  で除した値を縦軸に横軸にポンツーンの無次元曲げ剛性  $I/R_m^4$  ( $I$ :断面 2 次モーメント、 $R_m$ :ポンツーン半径) をとり、グラフにしたものを図 6 に示す。左の(a)図は通常の浮屋根、右の(b)図は浮屋根のデッキ部分の剛性をゼロとした(デッキを取除いた)場合の結果である。縦軸は強度評価式の係数  $\beta_1$  に相当しており、図中のプロットが数値解析による応答結果、赤い曲線は係数  $\beta_1$  の値を表している。この結果から、デッキが無い場合は強度評価式の  $\beta_1$  と応答結果は良く一致するが、デッキが存在する場合は  $\beta_1$  よりも応答が大きく、増幅される傾向があることが分かる。これも既往の研究に無い本研究で得られた新しい知見である。



(3) 上記(1),(2)の結果を元に強度評価式を修正し、新しい評価式を提案した。図 7 に提案した強度評価式のフローチャートを示す。左が現行の評価式、右が提案した強度評価式である。この評価式を用いて、人工地震波を入力時のポンツーンの最大曲げモーメントを評価した結果の例を図 8 に示す。縦軸が最大曲げモーメント、横軸はポンツーンの無次元曲げ剛性を表す。図中の×印が応答解析結果であり、青い曲線は現行評価式、赤い曲線は提案した修正評価式である。現行評価式では特にポンツーンの剛性の大きい範囲で応答結果との差が大きいのにに対し、修正評価式では現行評価式と比べて応答解析結果と良い対応が見られる。ただし、修正評価式は応答結果の下限値に対応しており、まだ危険側の評価となっている。

(4)提案した修正評価式が応答解析結果よりも小さな値となる理由は、ポンツーンの最大曲げモーメントを 1 次モード共振時に発生する周方向 2 次の曲げ変形のみで評価している為である。ポンツーンの面外曲げの主要な変形成分は周方向 2 次であるとは言えるものの

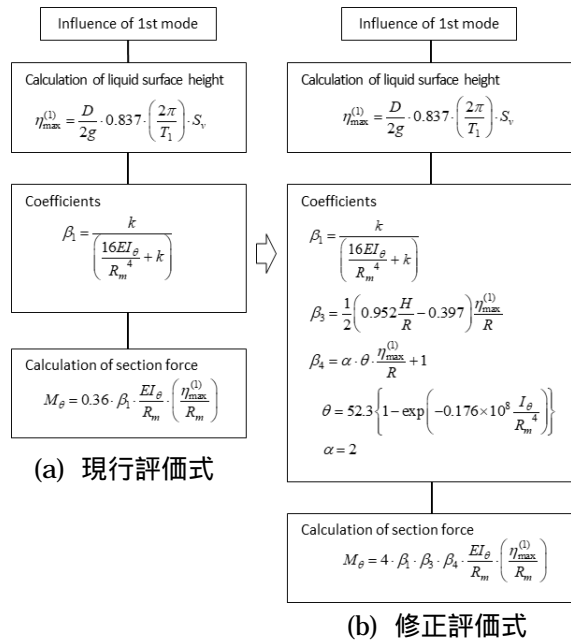
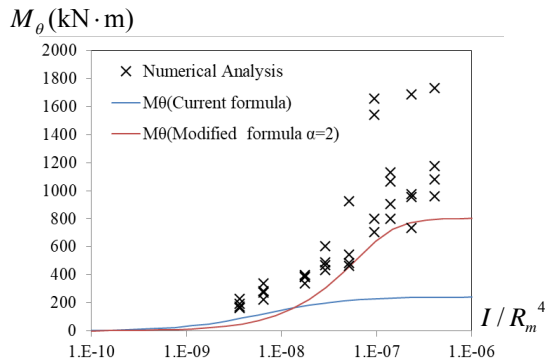


図 7 強度評価式のフローチャート



地震応答解析ではその他の高次モードの影響が少なくなく、正確に予測することが難しいことが分かった。

(5)高次モードが応答に与える影響の一つとして「二次モード共振時に付随的に生じる高次モード(半径方向一次周方向三次)」の挙動の分析を行い、二次モード(半径方向二次、周方向一次)スロッシングの固有周期  $T_{21}$  と半径方向一次、周方向三次の固有周期  $T_{13}$  が近い値をとる時、半径方向一次周方向三次のモードが生起することを明らかにした。

例として正弦波入力時の M04 モデルの応答をモード別に分解し、半径方向 1 次周方向 3 次のモードの最大応答振幅  $\eta_{13}$  を縦軸に、ポンツーンの面外剛性の基準モデルに対する倍率を横軸にとって描いたグラフを図 9 に、固有周期  $T_{21}$ ,  $T_{13}$  とポンツーンの面外剛性倍率の関係を図 10 に示す。図 9 を見ると、図 10 で  $T_{21}$  と  $T_{13}$  が一致する付近で  $\eta_{13}$  の応答が大きくなっており、ただし、入力加速度が大きくなるほどそのピークの位置は左に移動



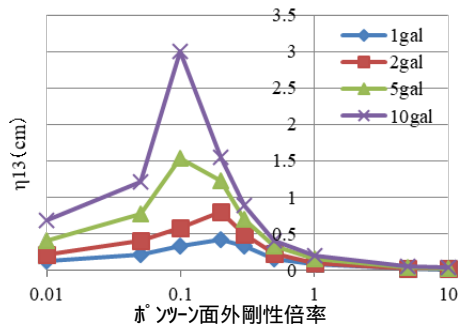


図 9 最大応答振幅  $\eta_{13}$  とポントーン面外剛性倍率

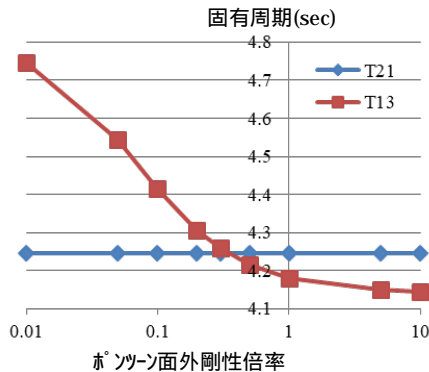


図 10 固有周期  $T_{21}$ ,  $T_{13}$  とポントーン面外剛性倍率

していることがわかる。ピークの位置がずれる理由は、応答が大きくなるにつれ各モードの固有周期が変化する為である。この  $\eta_{13}$  の応答を定量的に予測することは現在までのところ困難であり、今後の課題である。

## 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 0 件)  
(1 件の審査中の論文あり)

〔学会発表〕(計 5 件)

多田遥, 山本憲司, シングルデッキ型浮屋根式石油タンクの非線形スロッシング解析 一次モード共振時におけるポントーンの面外変形挙動, 日本建築学会大会, 2014 年 9 月, 神戸大学 (兵庫県・神戸市)

鈴木達也, 山本憲司, 多田遥, シングルデッキ型浮屋根式石油タンクの非線形スロッシング解析 一次モード共振時におけるポントーンの面外変形挙動討, 第 63 回理論応用力学講演会, 2014 年 9 月, 東京工業大学 (東京都目黒区)

山本憲司, シングルデッキ型浮屋根式石油タンクの非線形スロッシング解析 その 2 ポントーン面外剛性と応答低減率の関係, 日本建築学会大会, 2015 年 9 月, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

山本憲司, シングルデッキ型浮屋根式石油タンクの非線形スロッシング解析 その 3

一次モードスロッシング時のポントーンの面外変形量の評価, 日本建築学会大会, 2016 年 8 月, 福岡大学 (福岡県・福岡市)

山本憲司, 中畝勇, 池谷竜太, シングルデッキ型浮屋根式石油タンク模型の振動実験と数値解析, 日本建築学会関東支部研究報告, 2017 年 2 月, 日本大学 (東京都・千代田区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 憲司 (YAMAMOTO, Kenji)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号: 70311884