浮屋根式石油タンクのスロッシング解析・設計への考察

# 1. まえがき

2003 年十勝沖地震の石油タンク被害に見られるように、長周期地震動により励起されたスロッシングに伴う石油タンク浮屋根の性状は耐震設計上非常に重要であるが、まだほとんど解明されていない。ここでは、坂井等が以前から展開している<sup>1)</sup>浮屋根-内部液体連成振動効果を考慮した FEM 解析を行い<sup>20</sup>、シングルデッキ形式及びダブルデッキ形式の浮屋根に対するスロッシング性状を明らかにし、耐震設計を考える上での基礎的な着眼点を摘出し論じる。以下では、簡単のため、浮屋根と液体の連成振動を考慮した(流力弾性)スロッシングを浮屋根スロッシングと略称する.

### 2. 浮屋根スロッシングの解析

## 2.1. 解析手法

液体表面に弾性的な浮屋根が存在する場合について, 坂井等<sup>1)</sup>は実際の浮屋根構造を扱うことを念頭におい て,半径(r)方向と円周(θ)方向に異方性を有す る直交異方性平板として浮屋根をモデル化し,また場 所により剛性が異なることを考慮し得るように有限要 素法による解析を実施している.すなわち,一般的な 変分原理から流力弾性振動の BEM (境界要素法)プロ グラムを開発しているが,これは線形振動と軸対称構 造の仮定の下にシングルデッキ・ダブルデッキ形式, あるいは任意の形式の浮屋根スロッシングを簡便に解 析できるプログラムである.

浮屋根ないしは液体表面の z 方向変位 η を補間関数 と未知係数 {A} (列ベクトル)で表し,液体の速度ポ テンシャルφを液体内部 V の Laplace 方程式およびタ ンク側板 Sw・底板 Sb の境界条件を満足する解析解と 未知係数 {B} (列ベクトル)で表す.浮屋根と液体が 接する面で流力弾性振動の変分原理を適用すれば,次 の平衡方程式(1)と連続の式(2)が得られ,

茨城大学工学部	正会員	〇井上 涼介
術FS 技術事務所	フェロー	坂井 藤一

$$[P]\{\ddot{A}\} + [Q]\{A\} + \rho[T]\{\dot{B}\} + \rho g[U]\{A\} + \rho \{F\}\ddot{X} = \{0\},$$
(1)

$$- [S] \{B\} + [T^{t}] \{\dot{A}\} = \{0\}.$$
<sup>(2)</sup>

これより次の最終的な振動方程式を導くことができる.  $(P] + \rho [T S^{-1}T'])(\ddot{a} + ([Q] + \rho g [U]) \{A\} = -\rho \{F\} \ddot{x}$ . (3)

式(3)において、[P]は浮屋根の質量マトリックス、 [ρTS<sup>-1</sup>T<sup>t</sup>]は液体の付加質量マトリックス、[Q]は浮屋 根の剛性マトリックス、および[ρgU]は液体の重力効 果を表わすマトリックスであり、右辺は地震の外力ベ クトルである.式(3)は、標準的な振動方程式であり、 Rayleigh 減衰を仮定することによりモーダルアナリ シスの適用が可能となる.以下の解析では、モーダル アナリシスによりスロッシング各次モードの応答スペ クトルに対する結果を求めている.

式(3)より{A}が決定されれば,変位 η が求められ, 続いて{B}が決定されて,速度ポテンシャル φ が求めら れる.これより,浮屋根に作用する動圧力 p は圧力方 程式により決定される.

#### 2.2. 浮屋根のモデル

ここでは、2.1.の手法によって具体的なモデルの FSI スロッシング解析を実施し、シングルデッキおよびダ ブルデッキ両形式の浮屋根に関する耐震設計を考察す る。表-1 および図-1 に解析モデルとして取上げられ た 65,000k1 シングルデッキ浮屋根式タンクの緒元を 示す。また、同じタンクにダブルデッキ浮屋根が用い られる場合を考えて、そのダブルデッキ浮屋根の解析 モデルを図-2 に示す。ダブルデッキ浮屋根では内部骨 組構造を解析する必要があるので、この解析では、円 周方向の充腹桁またはトラス桁が r=5m、10m、15m、 20m、25m、29m および 32.3m の位置に配置されている とし、それによる円周方向の換算曲げ剛性とその 1/2 の半径方向曲げ剛性を設定している。

キーワード タンク 長周期地震動 スロッシング 浮屋根 構造-流体連成 (FSI) 解析 連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL 0294-38-5167 E-Mail: <u>inoue@mx.ibaraki.ac.jp</u>

# 3. 解析結果

図-3 および図-4 は、それぞれシングルデッキ浮屋根 の場合とダブルデッキ浮屋根の場合に対する解析結果 を示している。ここでは、1次から3次までの固有モー ドについて、各モードとも速度応答 100kineの応答が生 じると仮定して求めた、浮屋根の変位と動圧力の半径方 向分布をプロットしている。

図-3(a)の変位分布を見ると、シングルデッキ浮屋根のスロッシング形状は、全体的に1次から3次まで自由表面の場合とほとんど変らない。これはシングルデッキ浮屋根の剛性が全体に非常に小さいためであるが、一方剛性が高いポンツーン部では自由表面形状からずれていることが分る。

図-3(b)の動圧力分布を見ると,自由表面の場合と異なり,液面に動圧力が生じる。1次モードでは,液面の 上昇に対しポンツーン部で負圧が生じ,そのオーダーは 剛体浮屋根の場合の半分程度になる。2次・3次モード におけるデッキ部圧力はその 1/10 程度である。

図-4(a) は、ダブルデッキ浮屋根の変位分布を示して いる。これを見ると、1 次モードについては剛体浮屋根 の変位とほとんど一致する。また、剛体仮定では生じる ことのない 2 次・3 次の高次モードが生じることが特徴 であるが、浮屋根の全体変位(図中の破線)のオーダー は自由表面の場合よりもずっと小さいことが分る。これ は、剛性の大きなダブルデッキ浮屋根が波面の凹凸を抑 制している結果である。一方、液面と直接接しているダ ブルデッキの下板は動圧力を受けて、内部骨組み材の間 で局部変形(図中の実線)を生じているが、このオーダ ーは全体変形のオーダーより高次になるほどずっと大 きくなっている。

図-4(b)の動圧力分布を見ると、1次モードについて は剛体浮屋根の場合とほとんど一致するが、全体にやや 低めである。注目すべきは、2次・3次モードの動圧力 であり、1次の場合に匹敵するか、またはそれ以上のオ ーダーになっていることが分る。この大きな動圧力によ ってダブルデッキ浮屋根に発生する曲げモーメントを 示すと、図-5のようになる。

図-5 において、(a)は半径方向曲げモーメント、(b) は円周方向曲げモーメントの半径方向分布を示してい る。これらによれば、どのモードにおいても両方向の

#### 表-1 解析対象タンクモデルの諸元

Tank diameter: 65.000m	Liquid specific weight: 0.98			
Floating-roof radius:32.300m	Seal width: 0.200m			
Floating-roof pontoon				
Radial bending rigidity:				
(inside) 37,040kN*m²/m	(outside) 63,800kN*m²/m			
Circumferential bending rigidity:				
(inside) 200,400kN*m²/m	n (outside) 345,400kN*m²/m			



図-1 シングルデッキ形式浮屋根の解析対象モデル



#### 図-2 ダブルデッキ形式浮屋根の解析対象モデル

曲げモーメント分布ともにダブルデッキ外周部よりも 中央部の方に大きな曲げモーメントが発生することが 分る。これはシングルデッキ浮屋根の場合とか異なる点 である。また,1次モードよりも2次モードに対するオ ーダーが大きくなっており,高次モードの影響について 留意が必要であることが分る。

解析結果を量的に整理したものが 表-2 である。図 -3, -4, -5 および 表-2 の結果を合わせてまとめると, 次のようになる。

(1) 固有周期

スロッシング1次モードの固有周期は,浮屋根の有 無にかかわらず,また浮屋根の剛性の大きさにかかわ らずほぼ一致しており,したがって浮屋根の存在を考



図-3 シングルデッキの応答 (a)変位 (b)動圧力



慮した場合でも自由表面の場合における固有周期 の式を適用してよい。これは自由表面の場合も

含めて1次モードの変位形状が剛体的な回転運動



(a)半径方向 (b)円周方向

に近いことによる。

シングルデッキ浮屋根の場合,2次・3次の高次 モード固有周期も自由表面の場合とほぼ等しい。 しかし,ダブルデッキ浮屋根の場合には,2次・3次 の固有周期はあきらかに自由表面の場合とは異な り,いわゆる長周期帯域からかなり短周期帯域に推 移する。浮屋根スロッシングの高次モード応答を考 える際には,地震波の選択に注意が必要である。 (2)波高(変位)

地震による最大波高応答を考えると、いずれの 場合も1次モードが支配的であり、各ケースで 2.232m(+20%)となり、浮屋根の存在を考慮する と両者の中間の値になる。浮屋根の変位形状は、 シングルデッキ場合は自由表面の場合に近く、ダ ブルデッキの場合には剛体浮屋根の場合に近い。 シングルデッキの場合,2次・3次の高次モード 変位形状は自由表面の場合に近く,2次モードでは シングルデッキ部で最大 0.5m 程度になる。このデッ キ中央部のたわみは,板厚4.5mmのデッキ板にかな りの膜力を誘発し,この膜力がポンツーン部に座屈 の原因となる大きな円周方向圧縮応力を発生させる 可能性があり,これが新消防法(2005.4)の規定に関 連する現象の説明になる。

ダブルデッキの場合には,浮屋根の全体変位は剛 性の大きな浮屋根によって抑制され,むしろ内部骨 組み材の間での局部変形が大きくなる。すなわち,2 次モードでの最大変位 0.4m の中で局部変形が 0.25 m と卓越している。3 次モードでは,この傾向が さらに強くなる。

(3) 動圧力と浮屋根の曲げモーメント

浮屋根にはスロッシングに伴う地震力として動 圧力が作用する。シングルデッキの場合,1 次モー ドにおいてポンツーン部に剛体浮屋根の場合の半 分程度のオーダーの動圧力が作用する。これによっ てポンツーン部に 96kN\*m/m 程度 (Sv=100kine)の

円周方向曲げモーメントが発生するが,これによる 圧縮応力のオーダーは 4.5mm の薄板を座屈させる 原因になり得るが,降伏応力に比べるとかなり小さ

く,十勝沖地震の際のようなポンツーン座屈を十分 に説明するには不十分である。

新消防法では、これを1次モード波動の有限振 幅効果によって説明している。すなわち、Sv=200kine 相当で波高は4m程度となるが、有限振幅波動を考 慮すると、波動が4-5%増加するので、この効果がポ ンツーンを破壊する圧縮応力の主原因としている。 いずれにしても、このような問題に関する研究はま だ十分ではないので、今後の解明が待たれる所であ る。

2次・3次の高次モードについてのデッキ動圧力 は、オーダーは小さいけれども、前述のデッキ膜力 を誘発する原因となっている。

ダブルデッキの場合には、1次モードで剛体浮

### 表-2 65,000k1 モデルにおける数値結果

(a) Case of a free surface (Theory)

Mode	Period	Max. wave height	Wave height at	
	(sec)	(m)	perimeter (m)	
1st	9.358	1.863	1.863	
2nd	4.962	0.5148	0.3062	
3rd	3.916	0.3152	0.1481	

(b) Case of a rigid floating-roof (Theory)

Mode	Period	Max. displacement	Max. dyn. pressure	
	(sec)	(m)	$(kN/m^2)$	
1st	9.335	2.232	2.769	

(c) Case of a single-deck type floating-roof

Mode	Period (sec)	Max. disp.	Max. dyn. pressure	Pontoon bending moment (kN*m/m)	
		(m)	$(kN/m^2)$	Mr	$\mathbf{M}_{\theta}$
1st	9.369	2.017	1.385	4.002	96.13
2nd	4.947	0.4917	0.1360	2.978	41.20
3rd	3.739	0.2810	0.1867	2.724	43.10

(d) Case of a double-deck floating-roof

Mode	Period	Max.	Local	Max.	Deck bend-	
	(sec)	disp.	deform.	dyn.	ing moment	
		(m)	(m)	pressure	(kN*m/m)	
				$(kN/m^2)$	$M_r = M_{\theta}$	
1st	9.359	2.127	0.0670	2.117	50.05 45.58	
2nd	3.524	0.4056	0.2515	3.850	131.1 118.9	
3rd	2.238	0.2218	0.2146	2.602	25.19 23.51	

屋根の場合に近い動圧力が作用し、それによって 50kN\*m/m 程度の曲げモーメントが半径方向・円周方 向に発生するが、2次モードでも Sv=100kine の応答 とすると、130kN\*m/m 程度の大きな曲げモーメントが 両方向に作用する。また3次でもかなりのオーダー の曲げモーメントが作用する。これらはいずれもデッ キ中央部に発生し、Sv=200kine レベル相当では高い レベルの圧縮応力の作用になり、ダブルデッキの上下 デッキ板等に座屈破壊を誘起する可能性があるこ とに注意が肝要である。

#### 謝辞:

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費基盤研 究(C)課題番号 17560420 の援助を受けた。

#### 参考文献:

- 1) 坂井藤一,西村正弘,小川浩:川崎重工技報, No. 74, 1980年.
- 2) Sakai, Inoue and Hayashi: PVP-2006-ICPVT -11-93622.