風による円筒タンク浮屋根の挙動シミュレーション* (スロッシング応答解析)

吉田 聖一^{*1}, 黒田 眞一^{*2}, 上島 秀作^{*3}, 石田 和雄^{*4}
白鳥 正樹^{*5}, 関根 和喜^{*1}, 土田 智彦^{*6}, 岩田 克己^{*6}

Simulation for a Floating Roof Behavior of Cylindrical Storage Tank due to Wind Load (Sloshing Response Analysis)

Shoichi YOSHIDA^{*1}, Shinichi KURODA, Hidesaku UEJIMA, Kazuo ISHIDA,
Masaki SHIRATORI, Kazuyoshi SEKINE, Tomohiko TSUCHIDA and Katsuki IWATA

^{*1} Yokohama National University, Center for Risk Management and Safety Sciences
Tokiwadai 79-5, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

The floating roofs are used in large cylindrical storage tanks to prevent evaporation of oil. The single-deck floating roof, considered herein, consists of a thin circular plate called "deck" attached to a buoyant ring of box-shaped cross section called "pontoon". The deck plates are deformed to create waves and they are subjected to cyclic bending due to wind load. This may lead to initiate fatigue cracks at the welded joints. It is important to know the characteristics of waves in the deck plate. The authors have reported the CFD analysis of a cylindrical storage tank due to uniform wind in another paper. This paper presents the axisymmetric finite element analysis for the sloshing response of the single-deck floating roofs in a cylindrical storage tank using the CFD results as the load condition. It is assumed that the liquid is incompressible and inviscid, and the roof is linear elastic while the sidewall and the bottom are rigid. The basic wave characteristics of the deck plate, such as frequency and amplitude, is investigated.

Key Words : Sloshing, Vibration Coupled with Fluid Motion, Finite Element Method, Modal Analysis, Axisymmetric Problem, Floating Roof, Oil Storage Tank, Wind Load

1. 緒 言

円筒形石油タンクの液面上に、油の蒸発防止のために鋼製蓋を浮かせる浮屋根式タンクは、原油やナフサなどの貯槽として、多くの大形タンクに採用されている。浮屋根構造形式の中で、最も基数が多いシングルデッキ形は、「デッキ」と称する薄い円板の周囲に、「ポンツーン」と称する箱型断面のリング状浮きを取付けた構造をしている。2003 年 9 月の平成 15 年十勝沖地震では、スロッシングによって 7 基のシングルデッキ形浮屋根が沈没したことから、浮屋根が注目されるようになった⁽¹⁾。

直径が数 10 m を越す大形タンクのシングルデッキ形浮屋根が風を受けると、デッキ板が波を打つような振動をするといわれている。このとき繰返し曲げ変形が生じ、長期間に亘って風を受け続けると、デッキ板同士の溶接部にき裂が発生し、進展して貫通したときに、浮屋根上に油が滲んでくる。その後も風を受け続けると、き裂が拡大し漏洩量も増加する。台風が頻繁に通る地域でこの問題は起こり得るが、台風が少ない地域でも日常の風で年月が経てば生じる。

* 原稿受付 2012 年 8 月 10 日

^{*1} 正員, 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

^{*2} 正員, (株) I H I 基盤技術研究所

^{*3} (株) I H I 基盤技術研究所

^{*4} 正員, (株) I H I プラントセクター

^{*5} 正員, 名誉員, 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター

^{*6} (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

E-mail: s-yoshi@ynu.ac.jp

風速数 10 m/s の台風級の風を受けるとき、浮屋根がどのように振動するのか、即ち、デッキ板波打ち現象の周期、振幅は、見た人も映像もなく、実は知られていない。筆者らはこの現象の解明を目的に、一様風速を受ける大形浮屋根式円筒タンクの CFD 解析を行い、剛体浮屋根上の流れを別報で報告した⁽²⁾。これによれば、遠方で一様風速を受けても、タンク周りでは剥離や渦が形成され、浮屋根上の流れは非定常になる。

本報では次の段階として、デッキ板波打ち現象とそれに伴う繰返し曲げ変形の振動特性を把握するため、この CFD 解析から得られた面的、時間的に変化する風圧係数に基づき、実機換算された風圧を荷重条件とする、シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクのスロッシング応答解析を軸対称有限要素法で行う。その解析方法は、地震動を受けるときの解析を示した前報^{(3),(4)}と荷重条件のみが異なり、液体領域に動液圧を節点値とする Euler 形式式化、浮屋根を軸対称シェル要素で扱ったものである。それは、非軸対称に分布する風圧、動液圧、浮屋根変位などを円周方向に Fourier 級数展開し、その次数である円周方向波数ごとに解を重ね合わせる線形解析である。

流入境界において一様風速を与えた CFD 解析結果⁽²⁾から得られた風圧係数に基づき、遠方一様風速 30 m/s の場合に実機換算された風圧を荷重条件とし、デッキ板の変位および応力の時刻歴応答値から標準偏差と Fourier スペクトルを求め、その振動特性を考察する。

2. 風を受けるシングルデッキ形浮屋根

シングルデッキ形浮屋根のデッキ板の厚さは、タンク直径と無関係に、国内タンクでは 4.5 mm、海外では一般に 4.76 mm (3/16 inch) である。大形タンクのシングルデッキ形浮屋根が風を受けると、デッキ板が図 1 のような波打ち振動をするといわれている。デッキ板同士の接合は、上面から連続全厚隅肉溶接の重ね継手であり、波打ち振動で繰返し曲げ変形を受けると、溶接部ルートを起点にしたき裂が発生して進展し、溶接部あるいは板厚を貫通したときに浮屋根上に油が滲んでくる。その後も風を受け続けると、き裂が拡大し漏洩量も増加する。このような風による漏洩が原因で、浮屋根が沈没に至った事例はないが、1983 年に英国 Milford Haven において、強風によるき裂拡大で浮屋根上に漏洩した原油に、フレアスタックからの火の粉が落下して、石油タンクの全面火災が生じた⁽⁵⁾。

貯蔵している状態で、浮屋根上での溶接作業は火災の危険性から行えず、応急措置としてき裂貫通部に樹脂を塗ることが行われている。この措置は、漏洩を一時的に防止することはできるが、き裂進展は防げない。したがって、その後のき裂進展によって補修箇所から再度の漏洩が生じる場合がある。溶接による恒久的補修はタンクから油を抜き、内部をクリーニングした後になる。国内タンクでは、法規に基づく約 10 年間隔の開放検査時に合わせて、溶接補修を行っている。

風を受けるシングルデッキ形浮屋根設計の研究として、Palmer⁽⁶⁾は浮屋根設計方法を解説し、Robinson⁽⁷⁾は風による浮屋根スロッシング解析、山崎⁽⁸⁾は CFD 解析と溶接継手部の疲労試験を報告している。また、松井ら⁽⁹⁾は風洞実験から得られた浮屋根上の時間変動圧力によるスロッシング解析を報告している。しかし、いずれの研究も風によるデッキ板波打ち現象とそれに伴う繰返し曲げ変形の周期、振幅などを定量的に解明したものではなく、この問題を根本的に解決する状況には至っていない。

Fig.1 Deformation of deck plate

3. 解析方法

シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクの、地震動によるスロッシング応答を報告した前報^{(3),(4)}の軸対称有限要素解析を、風による応答へ展開する。本章では、解析理論の概要を述べる。

3・1 有限要素

シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクの解析モデルを、図2に示す。内容液を非圧縮性・非粘性流体、浮屋根を微小変形弾性体、タンク側板と底板は剛体を仮定する。液体領域 V 、浮屋根境界 S_1 、側板境界 S_2 、底板境界 S_3 、タンク半径 R 、液高 H とする。円筒座標系 (r, θ, z) の原点を底板中心に置き、タンクは剛基礎上に固定され、浮屋根上に風圧 W が作用するものとする。

図3は4節点長方形の軸対称液体要素である。液体の運動は、節点値を動液圧とする Euler 形定式化で表す。動液圧 p を次の Fourier 級数で展開する。

$$p(r, \theta, z, t) = \sum_{m=0}^N \{p_{mc}(r, z, t) \cos m\theta + p_{ms}(r, z, t) \sin m\theta\} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 m は Fourier 級数の次数でもある円周方向波数である。下添字 mc, ms はそれぞれ、円周方向波数 m の $\cos$ 項と $\sin$ 項を表す。

図4に浮屋根を扱う2節点軸対称シェル要素を示す。これは、Kirchhoff-Love の仮定を用い、要素座標 s に関し子午線方向変位 u_s 一次、円周方向変位 u_θ 一次、法線方向変位 u_w 二次の形状関数を持つ。この変位 u_s, u_θ, u_w を全体座標系変位 u_r, u_θ, u_z に変換し、次の Fourier 級数で表す。

$$\begin{Bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_z \\ \alpha \end{Bmatrix} = \sum_{m=0}^N \begin{bmatrix} \cos m\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin m\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos m\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos m\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{r-mc} \\ u_{\theta-mc} \\ u_{z-mc} \\ \alpha_{mc} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin m\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos m\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin m\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin m\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{r-ms} \\ u_{\theta-ms} \\ u_{z-ms} \\ \alpha_{ms} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

なお、 α は図4に示す円周軸回りの回転角である。 $z=H$ の浮屋根上の風圧 W も、次の Fourier 級数で表す。

$$W(r, \theta, t) = \sum_{m=0}^N \{W_{mc}(r, t) \cos m\theta + W_{ms}(r, t) \sin m\theta\} \quad (3)$$

Fig.2 Floating roof tank

Fig.3 Axisymmetric fluid element

Fig.4 Axisymmetric shell element

3・2 液体の運動方程式

液体の運動は動液圧 p を用いて、次に示す基礎方程式で与えられる。

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (V \text{ 内で}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_L \ddot{u}_z \quad (S_1 \text{ 上で}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (S_2 \text{ 上で}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (S_3 \text{ 上で}) \quad (7)$$

ただし、 ρ_L は液体の密度、 $\cdot$ (dot)は時間微分である。式 (4) は連続の式、式 (5) ～ (7) は液体と構造との境界面での法線方向速度が一致することから導かれる境界条件である。また、浮屋根面での動液圧 p_f は、次式で示される。

$$p_f = p_H - \rho_L g u_z \quad (8)$$

ここで、 p_H は液面 $z=H$ での動液圧、 g は重力加速度である。

式 (4) ～ (7) を満たす汎関数の停留条件⁽³⁾と三角関数の直交性より、液体要素の運動方程式として、円周方向波数 m ごとに独立な式が得られる。要素ごとのそれらを、系全体の方程式に重ね合わせると、次式となる。

$$[K_{L-m}]\{p_{mi}\} + [S]\{\ddot{d}_{mi}\} = 0 \quad (i = c, s) \quad (9)$$

$[K_{L-m}]$ と $[S]$ は、液体の剛性マトリックスと連成マトリックスであり⁽³⁾、 $\{p_{mi}\}$ 、 $\{d_{mi}\}(i=c,s)$ はそれぞれ節点動液圧ベクトルと浮屋根の節点変位ベクトルである。

3・3 液体－浮屋根連成運動方程式

浮屋根を構成する軸対称シェル要素の、節点ごとの等価節点荷重を次の Fourier 級数で表す。

$$\begin{Bmatrix} F_r \\ F_\theta \\ F_z \\ M \end{Bmatrix} = \sum_{m=0}^N \begin{bmatrix} \cos m\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin m\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos m\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos m\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{r-mc} \\ F_{\theta-mc} \\ F_{z-mc} \\ M_{mc} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin m\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos m\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin m\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin m\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{r-ms} \\ F_{\theta-ms} \\ F_{z-ms} \\ M_{ms} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 $F_i(i=r, \theta, z)$ は i 方向等価節点荷重、 M は回転角 α に対応する曲げモーメントである。系全体の等価節点荷重ベクトル $\{F\}$ は、浮屋根下面の動液圧による $\{F_p\}$ と、上面の風圧による $\{F_w\}$ の和になる。すなわち、

$$\{F\} = \{F_p\} + \{F_w\} \quad (11)$$

浮屋根本体の運動方程式も、線形解析では円周方向波数 m ごとに独立な次式となる。

$$[M_s]\{\ddot{d}_{mi}\} + [K_{s-m}]\{d_{mi}\} = \{F_{p-mi}\} + \{F_{w-mi}\} \quad (i = c, s) \quad (12)$$

ここで、 $[M_s]$ は浮屋根の質量マトリックス、 $[K_{s-m}]$ は剛性マトリックスである。下添字 s は軸対称シェル要素を表す。なお、 $[M_s]$ は円周方向波数 m に依存しない。

式 (12) の動液圧による等価節点荷重ベクトル $\{F_{p-mi}\}(i=c,s)$ に、式 (8) を代入して節点動液圧ベクトル $\{p_{mi}\}$ で表し、液体の運動方程式 (9) から導かれる $\{p_{mi}\}$ をそれに代入すると、液体－浮屋根連成系運動方程式が最終的に次式で導かれる。

$$\left([M_s] + \frac{1}{\rho_L} [S]^T [K_{L-m}]^{-1} [S] \right) \{\ddot{d}_{mi}\} + ([K_{s-m}] + [K_a]) \{d_{mi}\} = \{F_{w-mi}\} \quad (i = c, s) \quad (13)$$

$[K_a]$ は付加剛性マトリックスである⁽³⁾。上式を簡単に次式で表す。

$$[M_m]\{\ddot{d}_{mi}\} + [K_m]\{d_{mi}\} = \{F_{w-mi}\} \quad (i = c, s) \quad (14)$$

ただし、

$$[M_m] = [M_s] + \frac{1}{\rho_L} [S]^T [K_{L-m}]^{-1} [S] \quad (15)$$

$$[K_m] = [K_{s-m}] + [K_a] \quad (16)$$

式 (14) 右辺=0 とおくと、円周方向波数 m ごとに固有振動数 ω_{j-m} 、固有ベクトル $\{\psi_{j-m}\}$ が求まる。ここで、下添字 j は振動モードの次数を表す。時刻歴応答解析にモード解析法を適用するために、変位 $\{d_{mi}\}$ は基準座標 q_{j-mi} を用いて次式で表せるとする。

$$\{d_{mi}\} = \sum_{j=1}^J \{\psi_{j-m}\} q_{j-mi} = [\psi_m] \{q_{mi}\} \quad (i=c, s) \quad (17)$$

式 (14) に式 (17) を代入し、左側より $[\psi_m]^T$ を両辺に乗ずれば、固有ベクトルの直交性より、互いに独立な J 個の運動方程式が得られる。この各式に、振動モード間の連成を無視して減衰項を加えれば、次式を得る。

$$\ddot{q}_{j-mi} + 2\zeta_{j-mi}\omega_{j-m}\dot{q}_{j-mi} + \omega_{j-m}^2 q_{j-mi} = \frac{\{\psi_{j-m}\}^T \{F_{W-mi}\}}{\{\psi_{j-m}\}^T [M_m] \{\psi_{j-m}\}} \quad (i=c, s \quad j=1, 2, \dots, J) \quad (18)$$

ただし、 ζ_{j-mi} は j 次減衰比である。

4. 解析条件

4・1 解析モデル

シングルデッキ形浮屋根は軟鋼製で、各部位同士は溶接で接合される。図 5 に示すように、A 点～B 点間のデッキ板とその周囲に取り付けられる箱形断面のポンツーンからなる。ポンツーンは、インナーリム、アウターリム、ポンツーン上板、ポンツーン下板から構成される。またポンツーン内部には、トランスリングと称する円周方向板材が取り付けられる。本報では直径 83.3 m、液高 22.3 m で容量 12 万 m^3 シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクの、風によるスロッシング解析を行う。タンクと浮屋根の寸法および材料定数を表 1、要素分割を図 6 に示す。なお、本モデルでは浮屋根と内容液間に隙間が生じないことを前提としている。

ポンツーン内部にはバルクヘッドと称する半径方向仕切板が、円周方向に約 10 m 間隔で取り付けられる。本解析は軸対称解析であり、これを考慮していない。また、鋼板密度は通常 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 程度であるが、ノズルなどの各種付属品重量も考慮し $12,700 \text{ kg/m}^3$ としている。内容液密度は原油を想定する。さらに、デッキ板同士は重ね継手溶接で接合されているが、本研究ではデッキ板波打ち現象とそれに伴う繰返し曲げ変形の振動特性を把握することが目的であり、重ね継手形状は考慮しない。式 (18) の時間積分は、 $\beta=1/4$ の Newmark β 法で行う。また、すべての円周方向波数 m と次数 j で、式 (18) の減衰比 $\zeta_{j-mi}=0.01$ とする。CFD 解析結果の風圧係数から求めた風圧は、図 5 の A-B-C-E 面に等価節点荷重に換算して与えられる。

Fig.5 Single-deck floating roof

2800 Nodal points, 182 Shell elements, 2600 Fluid elements

Fig.6 Mesh division

Table 1 Numerical example

Tank diameter $2R$ (m)	83.3	Thickness (mm)	Deck	4.5	Density (kg/m ³)	Liquid ρ_L	887	Mesh division	Deck	100
Tank height H_T (m)	24.0		Inner rim	31		Plate	12,700		Pontoon	30
Liquid height H (m)	22.3		Outer rim	6		Air ρ_a	1.225		Liquid height	20
Inner rim radius a_r (m)	37.15		Upper pontoon	6	Wind speed U (m/s)		30		Inner rim	5
Pontoon width b_r (m)	4.5		Lower pontoon	6	Damping ratio ζ_{j-mi}		0.01		Outer rim	7
Inner rim height c_r (m)	0.6		Transring	6	Young's modulus (GPa)		200		Transring	5
Outer rim height d_r (m)	0.9		Acceleration of gravity g (mm/s ²)	9,807	Poisson's ratio		0.3			

4・2 CFD 解析の風圧

平地上に設置された一基のタンク上を過ぎる風の流れの、三次元非定常解析 (CFD 解析) を別報で報告した⁽²⁾。これは、フィルター操作を施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を、疑似圧縮性解法で解析したもので、図 7 の破線円筒内が解析領域である。同図 (A-B-C-G-F-E-A) 面に示す流入面で、 x 方向に一樣風速を与えた。タンクは剛体で、浮屋根は静止しているものとしている。

この問題のレイノルズ数 Re は、次式で与えられる。

$$Re = \frac{U' H_T'}{\nu} \quad (19)$$

ここで、 U' と H_T' は基準流速 (遠方での一樣風速) と基準長さ (タンク高さ)、 ν は流体の動粘性係数である。非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を U' 、 H_T' 、 ν で無次元化すると、 Re を唯一のパラメータとする無次元化された方程式が得られる。実機を想定し、基準流速に台風級の $U' = 30$ m/s、基準長さを実機のタンク高さ $H_T' = H_T = 24$ m、空気の動粘性係数 $\nu = 1.55 \times 10^{-5}$ m²/s とすると、レイノルズ数 Re は 10^7 オーダーとなる。しかしながら、このような高レイノルズ数流れの数値解析は事実上困難であるため、CFD 解析⁽²⁾では、 $Re = 10^4$ として無次元化された方程式を解いた。流速 U' とタンク高さ H_T' を個別に指定したものではないが、 $Re = 10^4$ は風洞実験レベルのレイノルズ数に相当する。本論文では、CFD 解析から得られた風圧係数がレイノルズ数に依存しないと仮定して、実機の風圧を求めている。このことは、風洞実験で得られた風圧係数を用いて、実機に作用する風圧を算定していることと同様である⁽⁹⁾。

CFD 解析⁽²⁾では、図 7 の解析領域を約 547 万点の格子でモデル化した。無次元時間刻み Δt^* を、

$$\Delta t^* = \frac{\Delta t \cdot U}{H_T} = 0.05 \quad (20)$$

として、2 万ステップの時間積分を行った。ここで、 Δt は時間刻み、 U はタンク遠方の一様風速である。2 万ステップ中の最初の 2,000 ステップの時系列解析結果データには、全領域一樣流れ状態から計算を開始した影響が残っていると考えられるため、残りの 18,000 ステップの時系列データで、本報のスロッシング解析を行う。また、実機の風圧 W は、次式で求められる。

$$W = \frac{1}{2} \rho_a U^2 C_p \quad (21)$$

ここで、 ρ_a は空気密度、 C_p は Navier-Stokes 方程式を $Re = 10^4$ で解いて得られた風圧係数である⁽²⁾。

本報では台風級の強風を受けるシングルデッキ形浮屋根式円筒タンクを想定し、タンク遠方の一様風速 $U = 30$ m/s とする。式 (20) にこの風速とタンク高さ $H_T = 24$ m を代入すると、時間刻み $\Delta t = 0.04$ s となる。したがって、これに 18,000 ステップを乗じると、解析継続時間は 720 s である。CFD 解析で得られた浮屋根面の C_p を式 (21) で実機に換算して、本スロッシング解析の荷重データとする。

本解析は、非軸対称分布する荷重、変位、応力等を円周方向に Fourier 級数展開する軸対称解析である。三次元 CFD 解析結果の風圧を、式 (3) で Fourier 級数展開するとき、必要な最小項数を調べたのが図 8 である。同図(a)は、あるステップにおける無次元風圧分布⁽²⁾である。また、同図(b)はそれを Fourier 級数で展開し、式(3)のように項数 $N = 30$ まで重ね合わせたときの分布である。両図はほぼ同じ分布になる。したがって、浮屋根面の風圧分布を表すのに、Fourier 級数の項数 N が 30 以上必要である。そのため、本スロッシング解析では、 $N = 30$ とする。

Fig.7 Analytical domain in CFD

(a) CFD⁽²⁾ (b) $N=30$

Fig.8 Wind pressure expressed by Fourier series expansion

5. 解析結果

5・1 浮屋根上の風圧

図9に示すように、タンクは遠方で一様風速 $U=30$ m/s を受け、半径 $r=0$ の浮屋根中心に対し、 $\theta=0$ を風下側、 $\theta=180^\circ$ を風上側とする。図10はCFD解析結果⁽²⁾の風圧係数 C_p から式(21)で実機換算の風圧を算定し、浮屋根上の各位置における18,000個の時系列データの平均と標準偏差を示したものである。標準偏差は平均値からの変動(ばらつき)を意味する。

遠方で一様風速を受けても浮屋根上は非定常流れで、かつ $\theta=0^\circ$ — 180° に関して各瞬間で対称にはならない。これは、一様流中の二次元円柱のレイノルズ数 Re が50を越えれば、円柱後方にカルマン渦が互い違いに2列で生成され、流れが非定常かつ非対称となることと、基本的には同様である。図8(a)は図の左側から遠方で一様風速を受けているときの、ある瞬間の浮屋根上の無次元風圧分布であるが、上下で対称にはなっていない。しかし、継続時間の平均をとれば、図10(a)に表すように、ほぼ対称になる。

図10より、風上側で平均風圧は負圧、風下側で正圧になる。また、標準偏差は27.4 Pa~111.4 Paで、 $\theta=90^\circ$ — 270° 線上でそれが大きくなる。

本報では半径 $r=20$ mでの各応答を調べる。図11は $r=20$ mの $\theta=0^\circ$ における風圧の時系列データである。最大風圧(絶対値)は、511.68 sで285.3 Paである。図12は $r=20$ mで $\theta=0^\circ$, 90° , 180° の時系列風圧データのフーリエスペクトルである。同図の縦軸は、有限Fourier係数のcos項とsin項の二乗和平方根である。地震動では通常、有限Fourier係数の二乗和平方根に地震継続時間の1/2を乗じたものが、フーリエスペクトルになる。本論文では二乗和平方根そのものを、フーリエスペクトルとしている。図12より、スペクトル値は広い周期領域で高くなり、風圧は卓越周期を有していないことがわかる。

Fig.9 Definition

(a) Average

(b) Standard deviation

Fig.10 Wind pressure in $U=30$ m/s

Fig.11 Time series of wind pressure at $r=20$ m, $\theta=0$ Fig.12 Fourier spectrum of wind pressure at $r=20$ m

5・2 変位

式 (14) の右辺=0 とした固有値解析結果の固有周期 $T_{j,m}$ を、円周方向波数 $m=0\sim30$ の次数 $j=1\sim5$ について、図 13 に示す。また図 14 には、 $m=0, 1, 20$ で $j=1\sim5$ の対応する振動モードを示す。これらのモードは、 $\theta=0$ の断面におけるものであり、円周方向には $\cos m\theta$ で分布する。浮屋根式タンクのスロッシング固有周期については、低次では自由液面の場合とほぼ同一であり、高次で自由液面より短くなる傾向が、地震動に関連する研究で示されている^{(3),(4)}。

浮屋根鉛直変位 u_z に関する 18,000 個の時系列データの、平均と標準偏差を示したものが図 15 である。同図はデッキ板とポンツーン上板で表しており、両板境界では不連続になる。風上側 ($\theta=180^\circ$) での平均変位は上向き (正) で、風下側 ($\theta=0^\circ$) で下向き (負) になる。また、デッキ板変位の標準偏差の最大値は 45.1 mm であり、風下側のほぼ全面で約 40 mm の標準偏差になる。

図 16 は半径 $r=20$ m の $\theta=0$ における、変位 u_z の時系列データである。最大変位 (絶対値) は、421.24 s で 145.1 mm である。図 17 は $r=20$ m で $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ の時系列変位 u_z のフーリエスペクトルである。図 17 より、一様風速 $U=30$ m/s を受けるとき、 $r=20$ m の位置における鉛直変位の卓越周期は、 $\theta=0^\circ, 180^\circ$ で約 5 秒と約 11 秒、 $\theta=90^\circ$ で約 5 秒になる。

デッキ変位 u_z による局所的凹凸が、波打ち現象に相当する。図 14 より、周期 11.0 秒は円周方向波数 $m=1$ の 1 次固有周期であり、振動の不動点である節が、半径方向には中心点以外に振動モードに生じていない。円周方向の節は $\theta=90^\circ, 270^\circ$ で生じ、浮屋根全体の一様傾斜運動に近い変形であり、デッキの局所的凹凸を生じるモードではない。図 13 より、 $m=0$ の 2 次、 $m=2$ の 2 次、および $m=4$ の 1 次固有周期が 5.0 秒、 $m=1$ の 2 次固有周期が 5.6 秒となる。これらのモードが卓越すると考えられる。

変位に関してまとめると、風速 $U=30$ m/s のとき、卓越周期は約 5 秒、片振幅の標準偏差最大値は 45.1 mm になる。

Fig.13 Natural period

Fig.14 Vibration modes

Fig.15 Vertical displacement u_z of floating roof in $U=30$ m/s Fig.16 Time series of vertical displacement u_z at $r=20$ m, $\theta=0$

Fig.17 Fourier spectrum of vertical displacement u_z at $r=20$ m

5・3 デッキ板曲げ応力

図 18 はデッキ板の半径方向曲げ応力について、18,000 個の時系列データの平均と標準偏差を示したものである。同図は直径 74.3 m のデッキ板のみ示している。デッキ板曲げ応力の平均は全面でほぼ零であり、標準偏差の最大値は 10.4 MPa である。また、標準偏差は、 $\theta=90^\circ$ — 270° 線上で大きくなる。

図 19 は半径 $r=20$ m の $\theta=0$ における、半径方向曲げ応力の時系列データである。最大曲げ応力（絶対値）は、306.48 s で 24.15 MPa である。図 20 は $r=20$ m で $\theta=0^\circ$, 90° , 180° の時系列半径方向曲げ応力のフーリエスペクトルである。これより、一様風速 $U=30$ m/s を受けるときの、 $r=20$ m の位置における半径方向曲げ応力の卓越周期は 1 秒～3 秒の範囲である。

図 17 と図 20 より、波打ち現象に関連するデッキ板鉛直方向変位と、繰返し曲げ応力に関連する半径方向曲げ応力の卓越周期は異なり、曲げ応力の方が短くなる。スロッシング応答に含まれる高い円周方向波数 m と高次モードの影響は、変形としてわずかであっても、曲げ応力としては大きくなる。シングルデッキ形浮屋根スロッシングの自由振動において、各振動モードの最大値を同一にして応力-変位関係式から曲げ応力モードを求めると、 m が大きいほど、あるいは高次ほど曲げ応力は大きくなる⁽¹⁰⁾。そのため、高い m あるいは高次モードの固有周期である短周期へ、曲げ応力の卓越周期が移る。浮屋根式タンクの地震応答でも、同様の傾向が見られる⁽¹¹⁾。デッキ板のき裂進展における繰返し回数は、波打ち現象の回数ではなく、曲げ応力の繰返し回数を考えなければならない。

Fig.18 Radial bending stress of deck plate in $U=30$ m/s

Fig.19 Time series of radial bending stress at $r=20$ m, $\theta=0$ Fig.20 Fourier spectrum of radial bending stress at $r=20$ m

本解析は軸対称シェル要素による線形弾性解析であり、応力として膜応力と曲げ応力が得られる。デッキ板の膜応力は、平均、標準偏差とも半径方向曲げ応力の数%程度である。また、曲げ応力には、半径方向の他に、円周方向曲げ応力とねじり応力がある。そのため、浮屋根上の1点の曲げ応力の主方向は、常に変化する。本研究の目的は、デッキ板曲げ応力の繰返し回数を把握し、き裂進展検討に資することにある。き裂進展にはき裂を開く方向の曲げ応力の振幅と回数が重要であり、それを半径方向に代表させた。

シングルデッキ形浮屋根デッキ板の繰返し曲げ応力についてまとめると、風速 30 m/s の風を受けるとき、卓越周期は 1 秒～3 秒で、片振幅の標準偏差最大値は 10.4 MPa になる。卓越周期が変位のそれより短くなるのは、前述のように高い円周方向波数と高次モードが、曲げ応力に大きく影響するためである。

図 19 より、半径 $r=20$ m の $\theta=0$ における最大半径方向曲げ応力は、306.48 s で生じた。図 21 はこの時刻における、浮屋根変形とデッキ板半径方向曲げ応力の分布を示している。浮屋根変形とデッキ板半径方向曲げ応力では、その分布パターンが異なり、曲げ応力の方が細かく変化する。このことは、地震時のスロッシング応答解析でも同様である⁽³⁾。

Fig.21 Response at 306.48 s

6. 結 言

円筒タンクのシングルデッキ形浮屋根が風を受けるときの、デッキ板の波打ち現象とそれに伴う繰返し曲げ応力の周期と振幅を把握するため、軸対称有限要素法でスロッシング応答解析を行った。浮屋根上の風圧は別報⁽²⁾で報告した、浮屋根を剛体と仮定した CFD 解析結果から得られた風圧係数に、実機換算の速度圧を乗じて算定したものである。その前提条件は、周囲に他のタンク等の構造物が存在しない、孤立した 1 基のタンクを対象に、流入境界に一樣風速を与えたレイノルズ数 $Re=10^4$ の Navier-Stokes 方程式を解いたものである。また、スロッシング応答解析では浮屋根と内容液との連成振動を考慮し、風圧は荷重として扱った。

風速 30 m/s を受けるときの振動特性として、以下の知見が得られた。

- 1) デッキ板の波打ち現象の卓越周期は 5 秒前後、片振幅の標準偏差最大値は 45.1 mm
- 2) デッキ板の繰返し曲げ応力の卓越周期は 1 秒～3 秒、片振幅の標準偏差最大値は 10.4 MPa

以上の卓越周期と標準偏差は、風速やタンクサイズに依存すると考えられ、その解明が次の研究課題になる。また、本研究成果であるデッキ板の繰返し曲げ応力の周期と振幅は、同板重ね継手溶接部のき裂発生寿命、き裂進展寿命の検討に用いられ、シングルデッキ形浮屋根の構造健全性の確保に資することになる。

なお、本研究は、横浜国立大学における（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構からの受託研究「平成 22 年度陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討」において実施したものであり、関係者に謝意を表す。

文 献

- (1) 危険物保安技術協会, “釧路市, 苫小牧市および苫小牧東部工業地域における屋外タンク貯蔵所の被害状況”, *Safety & Tomorrow*, No.95 (2004), pp.23-39.
- (2) 黒田眞一, 上島秀作, 石田和雄, 吉田聖一, 白鳥正樹, 関根和喜, 土田智彦, 岩田 克己, “風による円筒タンク浮屋根の挙動シミュレーション(CFD 解析)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.1350-1366.
- (3) 吉田聖一, 関根和喜, 光田司, “浮屋根式円筒タンクのスロッシング応答の軸対称有限要素解析”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.740 (2008), pp.814-822.
- (4) 吉田聖一, 赤松重則, 関根和喜, 光田司, “シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクのスロッシング特性 (固有周期と固有振動モード)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.745 (2008), pp.2153-2161.
- (5) 若狭勝, “風荷重による浮屋根損傷に起因した石油タンク全面火災事故”, 圧力技術, Vol.48, No.6 (2010), pp.311-320.
- (6) Palmer, S.C., “Design of Floating Roofs on Oil Storage Tanks to Withstand Wind Loadings -A Review with Recommendations”, *Institution of Mechanical Engineers*, No.C257 (1986), pp.23-31.
- (7) Robinson, N.J., *The Wind Induced Vibration and Fatigue of Floating Roofs on Oil Storage Tanks* (1990), Dissertation of Cambridge University.
- (8) 山崎将史, “浮屋根式貯槽の耐風設計についての一考察”, 圧力技術, Vol.32, No.4 (1994), pp.191-199.
- (9) Matsui, T., Uematsu, Y., Kondo, K., Wakasa, T and Nagaya, T., “Wind Effects on Dynamic Response of a Floating Roof in a Cylindrical Liquid Storage Tank”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.131, No.3 (2009), pp.031307.1-031307.10.
- (10) 吉田聖一, 関根和喜, 光田司, “シングルデッキ形浮屋根式円筒タンクのスロッシング特性 (動液圧モードと浮屋根強度モード)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.750 (2009), pp.318-326.
- (11) 松井徹哉, “浮屋根式円筒液体貯槽の地震時スロッシング応答の解析解”, 日本建築学会構造系論文集, No.594(2005), pp.167-173.