

川崎重工業(株) 正員 ○ 坂井 藤一
川崎重工業(株) 玉木 利裕

[1] はじめに

1983年5月26日の日本海中部地震では、多くの石油タンクでスロッシングに起因すると考えられる内容液の溢流、浮屋根部の損傷などの被害が生じている(*1)。石油タンクでは浮屋根が設けられることが多いが、浮屋根の影響を考慮したスロッシング解析はあまり多く見られない。本論文では、筆者らの一人が既に発表している浮屋根タンクのスロッシング解析法(*2)により、実機相当のタンクを対象とした数値解析を報告する。

[2] 浮屋根タンクのスロッシング応答解析

タンク底板・側板を剛体と仮定し、内部液体を非粘性・非圧縮性流体とする。浮屋根～流体系のLagrangianは、

$$L = L_e + L_f^c \quad (1)$$

$$L_e = \int_{S_f} \left[\frac{1}{2} m \dot{\Phi}_t^2 - \frac{1}{2} D_r \eta_r^2 - \frac{1}{2} D_\theta \left(\frac{1}{r} \eta_{,\theta\theta} + \frac{1}{r} \eta_{,rr} \right)^2 \right] ds \quad (2)$$

$$L_f^c = \int_{S_f} \rho \left[-\frac{1}{2} \Phi_z \Phi + \dot{\eta} \Phi - \frac{1}{2} g \eta^2 \right] ds \quad (3)$$

で表される。ここに、

m, D_r, D_θ : 浮屋根の単位面積質量、板剛度

ρ, Φ : 内部液体の密度、速度ポテンシャル

η : 浮屋根の変位

である。 η, Φ を次式で離散化する。

$$\eta(r, \theta, t) = \sum_{i=1}^L B_i(t) f_i(r) \cos \theta \quad (4)$$

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \left[\sum_{k=1}^N A_k(t) \frac{J_1(\epsilon_k \frac{r}{a})}{J_1(\epsilon_k)} \frac{\cosh(\epsilon_k \frac{z}{a})}{\cosh(\epsilon_k \frac{H}{a})} + r \bar{X} \right] \cos \theta \quad (5)$$

ここに、 $J_1(x)$ は第1種Bessel関数、 ϵ_k は $dJ_1(x)/dx=0$ の k 番めの正根、 $\bar{X}$ は入力加速度、 f_i は形状関数である。

これらを用いてHamilton原理 $\delta \int L dt = 0$ により、次式を得る。

$$P \ddot{\mathbf{b}} + Q \mathbf{b} + \rho T \dot{\mathbf{a}} + \rho g U \mathbf{b} + \rho I F \ddot{X} = 0 \quad (6)$$

$$-S \mathbf{a} + T^t \mathbf{b} = 0 \quad (7)$$

(7)を(6)に代入して、

$$(P + T S^{-1} T^t) \ddot{\mathbf{b}} + (Q + \rho g U) \mathbf{b} = -\rho I F \ddot{X} \quad (8)$$

となり、 $\mathbf{b}$ についての通常の2階の方程式に帰着される。 $\mathbf{b}$ が求められると、(5)により変位が求められさらに応力、圧力等が得られる。

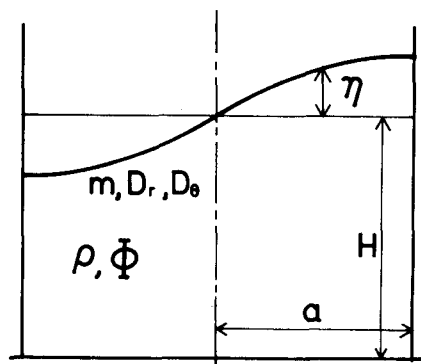


図-1 浮屋根-流体系

〔3〕 日本海中部地震の特徴

日本海中部地震では、ほとんどの気象庁1倍強震計で測定可能な限界を越え、スロッシング現象に重要な意味をもつやや長周期の成分についての詳しい情報は得られていない。

図2は、地震直後に新潟地区で観測された石油タンク側板部の痕跡からスロッシング波高をもとに、

$$\eta_{\max} \approx \frac{D}{2g} \frac{2}{\epsilon_1^2 - 1} \frac{2\pi}{T} S_v \quad (9)$$

により、スペクトル値を概算したものである。

地震のマグニチュードは $M=7.7$ であり、新潟では震源距離 $R=260$ kmであった。次の書式で推定される、フーリエ振幅スペクトル、応答スペクトル値に比べると(9)から計算されるスペクトル値は、非常に大きい。

$$A = 4.7 \cdot 10^{0.5M-1} \cdot R^{-1} \quad (\text{太田、鏡見})$$

$$A = 7.2 \cdot 10^{0.5M-2} \cdot R^{-0.5} \quad (\text{工藤})$$

$$A = 0.0085 \cdot 10^{0.74M} \cdot R^{-0.89} \quad (\text{田中、吉沢、大沢})$$

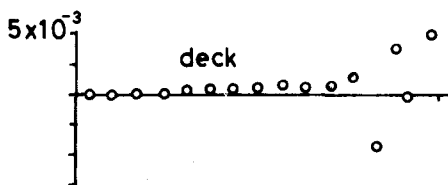
$$S_v = 20 \cdot 1.5 \text{ kine} \quad (\text{土木学会})$$

気象庁1倍強震計記録では、ほぼ周期10秒の波が20波ちかく継続しており、図-2の $T=10$ 秒でのピークと符合する。

〔4〕 固有値解析結果

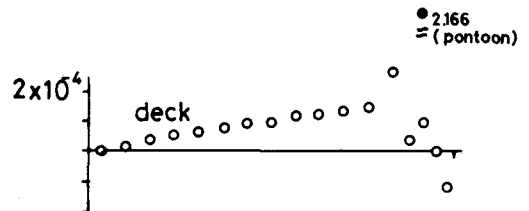
図-3に〔2〕の定式化による、固有値解析を行なった結果を示す。対象は外周部にポンツーンを設けたシングルデッキタイプの浮屋根である。

固有値解析結果をもとに、〔3〕の速度応答スペクトルを用いて2乗和平方根法により応答を計算すると、かなり大きな値となる。



曲げモーメント M_r

$$\approx 1.615 \times 10^{-2} \text{ (pontoon)}$$



曲げモーメント M_o

図-3 固有モード

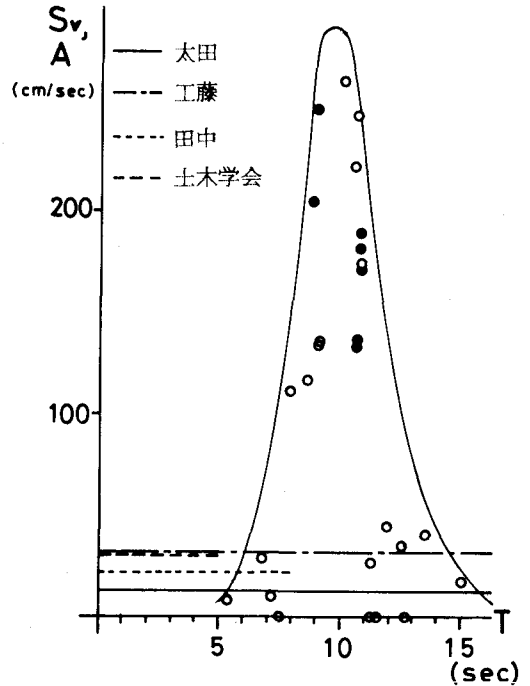
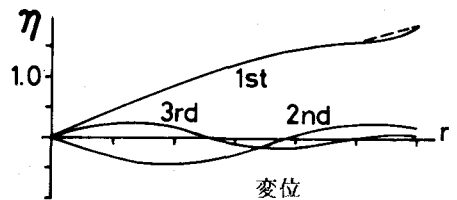


図-2 推定速度応答スペクトル
日本海中部地震(新潟)



- 〔参考文献〕 1. 東京消防庁, 「日本海中部地震調査報告書」(1983) 2. 坂井藤一他, 「浮屋根式石油貯槽のスロッシング性状に関する研究」川崎技報, No 74 (1980) 3. 柴田碧, 「円筒液体貯槽の地震被害と耐震設計の今後の課題」, 機械学会予稿集, (1984) 4. 工藤一嘉, 「日本海中部地震による新潟での石油溢流について(1)」, 地震学会講演予稿集(1983)