

川崎重工 正員 飯井 藤一
 同上 正員 〇 迫田 治行

1. まえがき 液体タンクの地震に対する安全性の検討は、地震を静的な荷重に置換して解析する方法が一般に用いられてきた。このような地震の静的な荷重への置換方法として G.W. Howson⁽¹⁾、山本・清水⁽²⁾などの方法があるが、これらはいずれもタンク壁は剛体であるとして動液圧を求めている。しかしながら近年の大型タンク建設の増加に伴って、地震力の推定の際、タンク壁の変形を考慮することも検討する必要があると考えられる。タンク壁の変形を考慮した振動解析については、今日迄のところ、多くの研究報告がなされているとは言えない⁽³⁾。本報告では、タンクを弾性シェル-液体連成振動系として有限要素法を用いて解析した結果について述べる。

2. 解析方法 解析の対象は、図-1に示す液体貯蔵用の円筒形タンクであり、これと F.E.M.により解析する。タンク壁は軸対称回転薄肉シェルと考え、円筒をリング要素に分割した。シェルの運動方程式は、文献(4)(5)などに述べられているのと同様のものである。液体に関しては、図-1に示す様な節点円板要素を用い、鉛直方向の要素分割はシェルの要素分割と一致する様にした。液を非粘性、非圧縮性の滑りし流れと仮定すると、水平振動に対して液体の運動に関する基礎微分方程式は、次式で与えられる。

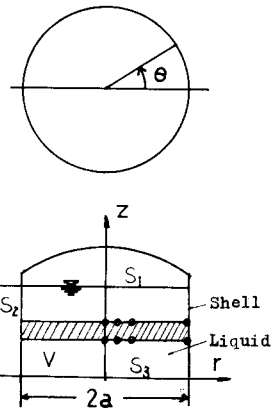


図-1 解析対象タンク

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (\text{in } V), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (\text{On } S_3), \quad -\frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{On } S_2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \Big|_{z=H} = 0 \quad (\text{On } S_1), \quad (\varphi: \text{速度ポテンシャル}, u: \text{タンク壁水平変位})$$

上式に対応する汎函数 $I(\varphi)$ を次式のように定義する。

$$I(\varphi) = \frac{\rho}{2} \int_V \left\{ \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right)^2 \right\} dV + \rho \int_{S_1} \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \varphi r d\theta dz + \rho \int_{S_2} \frac{\partial u}{\partial t} \varphi r d\theta dz$$

速度ポテンシャル φ を次のように円筒方向に Fourier 級数表示する。

$$\varphi(r, \theta, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(r, z) \cos n\theta$$

更に $\varphi_n(r, z)$ を要素円板座標 r, z の 2 変数関数と近似する。 φ と汎函数 $I(\varphi)$ に代入し、 $\delta I(\varphi) = 0$ なる変分原理を適用すると液体の運動方程式が得られる。タンク壁は液体から動液圧を受けていることを考慮し、シェルと液体の運動方程式を結合すると最終的に次の運動方程式を得る。

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{ M_n \ddot{d}_n(t) + K_n d_n(t) = P_n(t) \} \quad (n: \text{Fourier の次数})$$

この場合 $d_n(t)$ は、シェルの変位と液体の自由表面上での速度ポテンシャルから液高から成る列ベクトルである。上式をモダンマトリクスを用いて応答解析する。

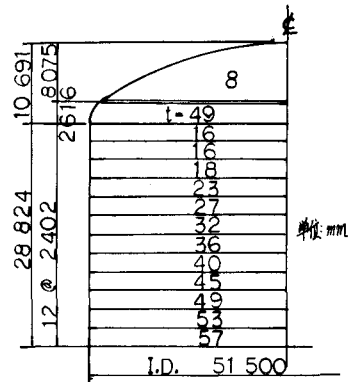


図-2 計算モデル

3. 計算例 図-2は 60000^{kl} LNG タンク(2重殻)の内槽の概略図である。タンク壁は JIS A5083 (AL) であり、内容液は LNG (比重 0.7) である。解析には板厚公差を考慮した板厚を用いた。水平地震動と関連する Fourier 次数 $n=1$ の場合についての系の固有振動周期および固有振動波形の一例を表-1 および図-3に示す。表-1には、参考値としてシェルのみ(空の状態)およびタンク壁と剛体と仮定したときの液体運動のみの固有振動周期も合わせて示す。この種のタンクの固有振動の代表的なものとして、主として液面上下動を支配するスロッシングと、主にタンク壁体の振動を支配するバルジングとがあるが、タンク

壁の変形を考慮しても、スロッシングの固有振動周期は剛体容器内の液体運動のそれと差はないことがわかる。

バルジングはタンク壁の変形を考慮することにより抽出できる固有振動波形であり、この場合 0.4 sec というかなり長い第1次固有振動周期を有する。バルジングの固有周期は、タンク壁体の剛性が大きくなる程また液頭高が小さくなる程短くなる。以上示した固有振動に関する特性はこの計算例のみならず他の種々の計算結果からも認められることができる。

地震応答解析の一例として図-2に示したタンクの基礎に TAFT S69E (U.S.A., 1952) 地震波⁽⁶⁾と与えられたときの、応答解の一部を図-4、図-5に示す。図-4は地震方向側壁上の液面上下動の、図-5は地震方向側壁(高さ 22.819 m)における変位 (u, v, w) ⁽⁵⁾ の時刻歴応答図である。後者には、静液圧、ガス圧、および自重など静荷重による変形も含まれている。タンク壁の変形がどの程度影響するかと調べる為に最大水平力および最大液面液高について F.E.M. 解と Housner の方法による結果とを比較すると表-2 のようになる。

表-2 最大水平力 および 最大液高

	最大水平力 (t)	最大液高 (cm)	F.E.M. 解
Housner	2928	37	F.E.M. 解の最大水平力にはタンク壁体の慣性力も含まれているが、タンク壁体の質量は小さいので
F.E.M.	7661	66	水平力の大部分は動液圧と表す良い。

F.E.M. 解はタンク壁と剛体として Housner の方法による結果よりかなり大きな値を示し、タンク壁の変形の影響が相当あることが判る。この傾向は他の地震波に対しても認められた。

4. まとめ

- (1) スロッシングの固有振動周期は、タンク壁の変形を考慮してもタンク壁と剛体と仮定した時のそれと差はない。
- (2) 大型タンクではバルジングの固有振動周期はかなり長く、通常の地震波の卓越周期範囲に入ることもある。またバルジングの固有周期は、液頭高が大きい程およびタンク剛度が小さい程長くなる。
- (3) 大型タンクでは、タンク壁の変形の影響を考慮すると剛体容器と考えた場合より動液圧等が小さくなる傾向にある。

以上、数少ない計算結果から得られた大型液体タンクの振動特性について述べたが、今後種々のタンクに対する F.E.M. の適用および模型実験と通して、より詳細な検討を行ない、その振動特性を確認する予定である。

参考文献

- (1) 参考 Housner "Dynamic Analysis of Fluids in Containers Subjected to Acceleration"
- (2) 山本・清水 "地震波の長周期成分が長期構造物に及ぼす影響" 建築技術 1979.6
- (3) 栗田・藤野 "液体-弾性体の固有値解析に対する一考察" JSSC 共同研究成果 講演集
- (4) JSSC 編 "江湾構造解析" JSSC-9による構造工学講座
- (5) 藤野・田中 "有限要素法を用いた回転体の振動解析" 球技 29回年次学術講演会講演集
- (6) 九州四国連絡橋技術報告書 付属資料 2. S42.7

表-1 固有振動周期 (単位: sec)

Mode No.	Shell - Liquid		空のタンク Shell のみ	剛体容器 液体のみ
	Sloshing Mode	Bulging Mode		
1 st	7.64	0.40	0.071	7.63
2 nd	4.41	0.22	0.058	4.41
3 rd	3.48	0.16	0.056	3.49

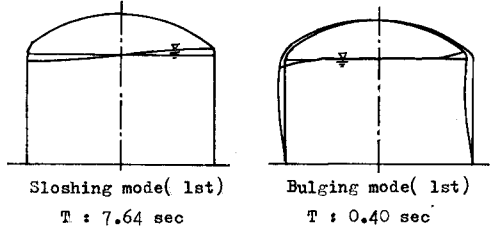
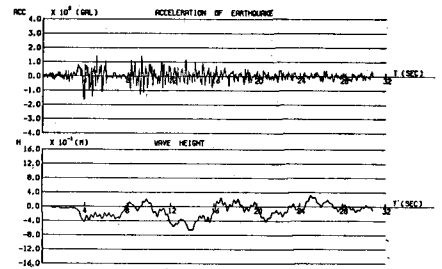
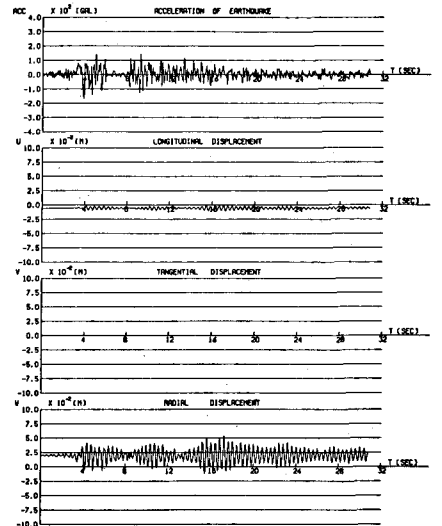


図-3. 固有振動波形の一例



WAVE HEIGHT ON FREE SURFACE OF LIQUID (NOODL. CIRCLE NO. = 7, ANGLE = 0 DEGREE)
EARTHQUAKE= TAFT S-69-E CALIFORNIA IN USA (1952) (MAX. ACC.=1.65 GALS)
PAR. MODEL= 6000 RL LING-TANK (SUPERSTRUCTURE) DRIPPING RATIO=0.01 = VIB. SYSTEM= SHELL-LIQUID

図-4 液面液高



DISPLACEMENTS OF SHELL (NOODL. LINE NO. = 21, ANGLE = 0 DEGREE)
EARTHQUAKE= TAFT S-69-E CALIFORNIA IN USA (1952) (MAX. ACC.=1.65 GALS)
PAR. MODEL= 6000 RL LING-TANK (SUPERSTRUCTURE) DRIPPING RATIO=0.01 = VIB. SYSTEM= SHELL-LIQUID

図-5 タンク側壁変位