

日本鋼管(株) 正員

榊 信昭

" " 横山 幸清

" " 長岡 弘明

" " " " " "

" " " " " "

まえがき 現在、石油・液化天然ガス等の大型液体貯槽が多数建設されているが、地震国日本はしばしば破壊的規模の地震にみまわれているにもかかわらず、これら貯槽の地震時の液面動揺の挙動は未だ明確に把握されていない。そこで、ここでは半径と液深を種々変えた6万KL, 9.5万KL貯槽各5基に6種類の地震波を入れて応答波高と地震波の最大変位振幅に対する波高の応答倍率を求めたので報告する。

解析方法 ここでは貯槽の応答について、液面動揺のみに着目し、貯槽は剛体と仮定する。貯槽半径 R 、液深 H とし、この系が水平方向に $dg(t)$ の変位加振を受けるときを考える。液体は非圧縮性完全流体の渦なし流と仮定し、速度ポテンシャル ϕ を用いると液体の運動の支配方程式は次の四つの式で表わすことができる。¹⁾

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1), \quad -\frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=R} = U_g(t) \cos \theta, U_g = dg \quad (2), \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (3), \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial \phi}{\partial t} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, z=H \quad (4)$$

上式を解くことにより自由表面の変位 η は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=H} = \frac{R}{g} \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} 2 J_1(E_i \frac{R}{H}) \cosh(E_i \frac{H}{R}) \dot{v}_i / \cosh(E_i \frac{H}{R}) - J_1(E_i \frac{R}{H}) U_g \right\} / \{ (E_i^2 - 1) J_1(E_i) \} \cos \theta \quad (5)$$

$$\ddot{v}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{v}_i + \omega_i^2 v_i = -\omega_i^2 U_g \quad (6), \quad \dot{v}_i = \dot{v}_i + U_g \quad (7)$$

ここで μ : 自由表面の液面動揺の減衰定数, g : 重力加速度, E_i : $J_1'(E) = 0$ の第 i 次の正根, J_1 は一次第一種の Bessel 関数, ω_i : 液面動揺の i 次の固有振動数, ζ_i : $= \mu / (2\omega_i)$ 液面動揺の i 次の応答に対する粘性減衰比。

(5) 式の右辺における $\dot{v}_i$ は (6) 式の微分方程式を直接積分法²⁾を用いて得られた $\dot{v}_i$ を (7) 式に代入して求めた。

入力データ 解析貯槽の半径 R と液深 H 、液面動揺の一次固有周期 T_1 ³⁾ を表1に示す。貯槽内部液体の粘性減衰比は、ここでは液面動揺の各次モードに対して一律に $\zeta_i = 0.2\%$ とした。モードは (5) 式において $i=1 \sim 10$ 次まで重ね合わせた。

解析に用いた地震波は表2に示す。入力地震波は原記録波形の長周期成分のドリフトを除くため文献3)で提案されている

方法によって修正を行っている。同文献の方法は一種のハイパスフィルターであるが、そのパラメータ λ ³⁾ のここで用いた値を表2に示す。解析に用いた速度・変位波形は、加速度波形をフーリエ変換し周波数領域の定常振動波形を積分した後、逆フーリエ変換して求めた。加速度・速度波形の例を図2に、その変位波形を図3に示す。変位波形の最大振幅 D_g は表2に示す。

解析結果 貯槽側壁上の最大変位 $\eta_{\max}$ 、応答倍率 $\eta_{\max}/D_g$ を図5、4に示す。図4に周期が T_1 である正弦波で加振したとき⁵⁾ (共振 n 波法)

の応答倍率も同時に示す。図5に共振 n 波法で $D_g = 0.6$ m のときの最大波高を同時に示す。この解析では一次モードの変位が卓越する側壁上より二次モードが卓越する貯槽中心から $R/3$ 近傍で応答継続時間中の最大変位が大きくなるケースが生じた。その一例を図6 (C) に示す。この例の貯槽の液面動揺の三次までの固有振動数 f_1, f_2 が入力地震波の変位のフーリエスペクトルを図7に示す。同図より $R/3$ 近傍の波高が側壁上より大きくなった

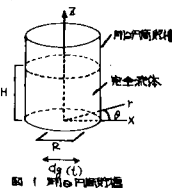


図1 剛体円筒貯槽

表1 解析貯槽

No.	95000 KL			60000 KL		
	R	H	T_1	R	H	T_1
1	20.5	71.56	6.70	16.0	76.60	5.92
2	26.0	44.73	7.55	20.5	45.45	6.70
3	32.0	29.53	8.65	26.0	28.25	7.68
4	38.5	20.40	10.60	32.0	18.65	9.41
5	46.0	14.29	14.96	38.5	12.88	12.40

表2

地震波名	長さ	最大変位	最大速度	最大加速度	最大変位	最大速度	最大加速度
NEAT (NAT)	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
EL (EAT)	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
NEAT	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
EL	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
NEAT	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
EL	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
NEAT	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
EL	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
NEAT	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02
EL	100.00	0.02	0.02	0.02	100.00	0.02	0.02

注: 単位は m/s²

理由は地震波の周波数成分が液面動揺の一次の固有振動数に比べて二次の成分を多く含むためと理解できる。

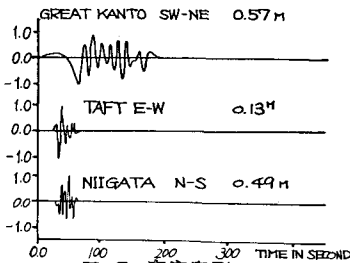
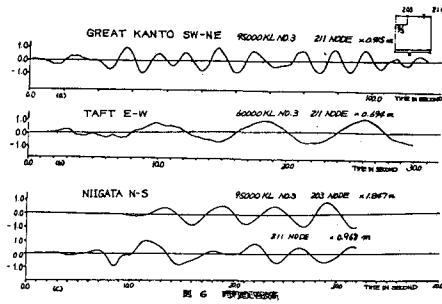
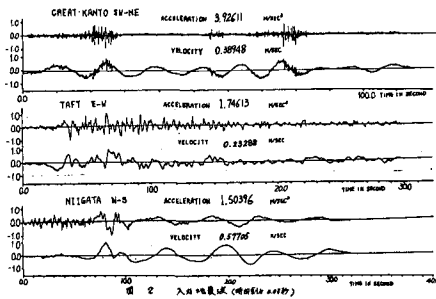


図3 変位波形

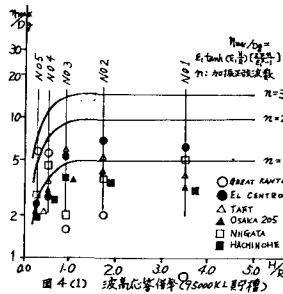


図4(1) 共振増倍率(5000KL貯槽)

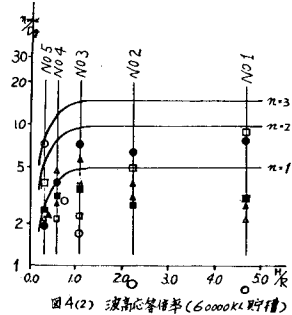


図4(2) 共振増倍率(6000KL貯槽)

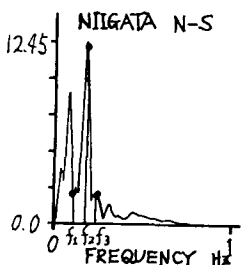


図7 変位レスポンス

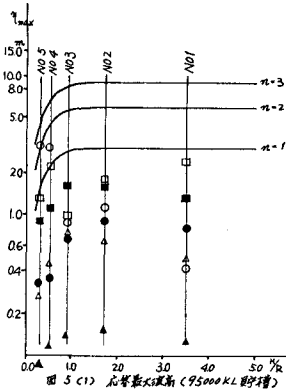


図5(1) 共振最大振幅(9500KL貯槽)

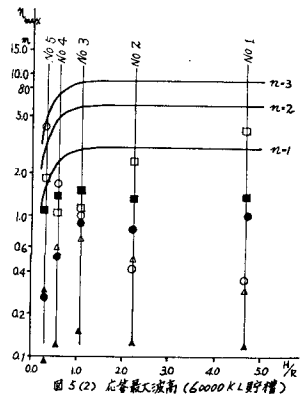


図5(2) 共振最大振幅(6000KL貯槽)

あとがき ここでは剛体貯槽の各種地震波入力時の応答振幅を示した。又応答振幅は液面動揺の固有周期と入力地震波の周波数成分の関係から側壁と自由表面上で最大になるケースが生じることを示した。この解析で用いた貯槽の液面動揺の固有周期は5～14秒のやや長周期の範囲に恒り、入力地震波のこの周期範囲の精度が重要な意味をもってくる。この解析では入力地震波のこの周期範囲に対する精度の確認は十分とはいえずこの点は今後の課題として残された。

参考文献

- 1) 曾我部 崇田(1974) 円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第1報 一基礎式と正弦波解一生産研究 26:3:119-122
- 2) 水田・西山・采井(1977) Newmarkのβ法における位相遅延補正の方法 土木学会論文報告書 268:15-21
- 3) 吉田・岡山(1974) 地震加速度記録の積分における遅延波計算のアルゴリズム 土木学会論文報告書 221:25-38
- 4) 野須 森岡他(1977) 大地震動の数値化と解析(その7) 1923年関東大地震水平動SE-NW成分の地動時変算学会学術
- 5) 曾我部 崇田(1974) 円筒液体貯槽の液面動揺 第2報 一正弦波週波応答解析一生産研究 26:4:152-154 講演要録集515-516