

日本鋼管(株) 正会員 榊 信昭
 同上 同上 岡本 隆
 東京瓦斯(株) 同上 小山 和夫

1 まえがき

近年, LPG, LNG, 石油貯蔵用の貯槽は大型化しており, これらの貯槽は地震動をうけると液面が動揺する。ここでは大型LNG地下式貯槽の地震時のスロッシング波高を測定し, 波高の予測によく用いられる速度ポテンシャル理論を用いてその解析をし, スロッシング現象について若干の検討をした。

2 地震観測の概要

液面波高の観測は神奈川県にあるLNG地下式貯槽で行った。液面計の設置位置, 解析に用いた入力地震動加速度の記録位置および貯槽の主な諸元を図1に示す。液面計はフロート型(東京計装(株)製)で, 45°間隔で4台設置している。同液面計の波高の測定分解能は1mmである。実験で求めた同液面計の測定範囲は図2の曲線より上の領域である。加速度はサーボ型加速度計(東京測振(株)製)を用いて測定し, その測定範囲は0.015~30galである。解析に用いた地震記録, 液深等を表1に示す。

3 解析方法

液面波高は, 速度ポテンシャル理論¹⁾を用いて, 剛な円筒形貯槽内に, 非圧縮, 非粘性の完全流体があるときの渦無し流の波高²⁾ H_w として(1)式で求めた。 $H_w = R/g \sum_{i=1}^{\infty} \{ \{ 2/(\epsilon_i^2 - 1) \} \{ J_1(\epsilon_i r/R) / J_1(\epsilon_i) \} \{ \dot{v}_i - \dot{u}_g \} \} \cos \theta$ (1) ここで R : 貯槽半径, r : 解析位置の半径, g : 重力加速度, J_1 : 1次1種のベッセル関数, ϵ_i : $J_1'(\epsilon) = 0$ の第 i 番目の正根, $\dot{v}_i$: 液体の応答速度, $\dot{u}_g$: 入力加速度, θ : 水平加振方向からの円周方向角度である。同式でモードは $i = 1 \sim 10$ 次までとした。

4. 波高の観測値と解析値の比較

(a) 日本海中部地震 ここで用いた加速度記録は, 加速度計の振子の固有振動数 $f_n = 5 \text{ Hz}$, 減衰定数 $h = 150$ として, 振幅と位相差の振動数特性の補正をした。また波形の長周期成分のドリフトは文献3)の方法で除去した。同方法は結果として地震動の円振動数成分 ω に対し, $\omega^4/(\omega^4 + \lambda)$ の係数が乗じられる High Pass Filter となっている。 λ の値は加速度記録位置から約4.6km離れた横浜地方気象台の1倍強震計記録から得られた地動変位と, 入力地震動加速度をフーリエ変換による方法で積分して求めた変位を, スロッシングの1次固有振動数を含む0.04~0.072Hz(同期13.9~25秒)の成分について比較し(図3), その最大振幅が一致する $\lambda = 0.0045$ を用いた。入力地震動の例として, 貯槽中心から液面計L2の方向のN 82.125°E成分の加速度と変

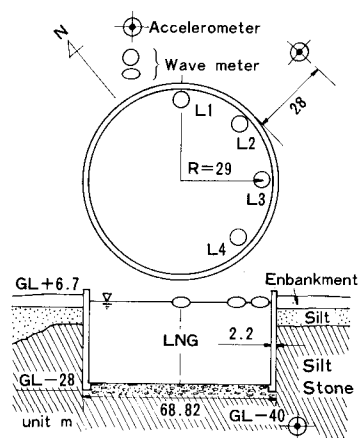


図1 計器配置図

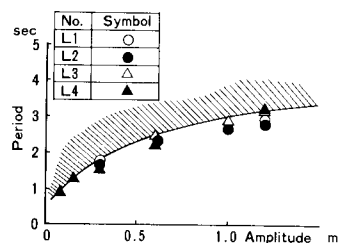


図2 波高測定範囲

表1 解析地震記録

地震名	発生年月日	震源	マグニチュード	震度階	LNG液深m	記録最大変位cm	スロッシング1次固有周期秒
日本海中部地震	58.5.26	40.35°N139.08°E	7.7	I	5.89	20.6	14.74
茨城沖地震	57.7.23	36.18°N141.95°E	7.0	III	4.567	6.6	16.61

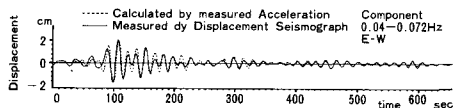


図3 変位波形

位波形を図4(a)に、その加速度のパワースペクトルを図5(a)に示す。減衰定数を0~0.01まで変化させたときの、液面計L3の位置の解析波高を図6に示す。解析では、減衰定数 ξ は全モードで同一とした。同図から減衰定数は最大波高が観測波高と一致する $\xi=0.001$ を用いた。図7に観測波高と解析波高を比較して示す。両者は波形、最大値ともよく一致している。また同図にはパワースペクトルを比較して示すが、固有振動数、パワースペクトル値ともよく一致している。(b) 茨城県沖地震 入力に用いた加速度記録の振動数特性の補正とFilterのパラメータ λ は日本海中部地震と同じ値とした。入力地震動の例として、N82.125°E成分の加速度と変位波形を図4(b)に、その加速度のパワースペクトルを図5(b)に示す。スロッシング応答の減衰定数は、固有円振動数の i 次モードに対して $\xi_i=0.001\omega_i/\omega_{0i}$ (2)として与えた。観測波高と解析波高を比較して図8に示す。両者は波形、最大値ともよく一致している。またパワースペクトルを比較して同図に示すが両者は、固有振動数はよく一致しているが、パワースペクトルの値は、2次以上の高次モードで解析値が大きくなっていることが認められる。

5 まとめ

(1) 速度ポテンシャル理論の線形解を用いた解析波高は観測波高と波形、最大値、固有振動数においてよく一致した。(2) LNGの場合スロッシング波高に対しては、2種類の地震における波高の解析から、その減衰定数は1次モードにおいて0.001程度を用いればよいと思われる。(3) 2次以上の高次モードに対する減衰定数は固有振動数に逆比例するものとして与えた場合、小さめに評価した傾向にある。

ここでの解析は $H_w/R \leq 0.0065$ という微小振幅における場合であるが、今後は大振幅の波高に対する速度ポテンシャル理論の線形解の適用性の検討が必要であろう。

〔参考文献〕

- 1) 曾我部, 柴田 (1974) : 円筒液体貯槽の液面動揺の応答第1報—基礎式と正弦波解—, 生産研究, 26巻, 3号, PP119-122.
- 2) 榊, 横山, 長岡 (1980) : 剛体円筒貯槽の液面動揺解析, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第1部, PP568-569.
- 3) 吉田, 岡山 (1974) : 地震加速度記録の積分における雑波計算のアルゴリズム, 土木学会論文報告集, 第221号, PP25-38.

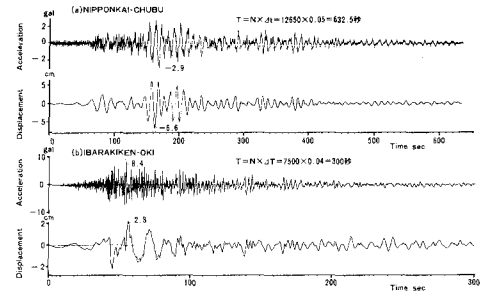


図4 入力地震動

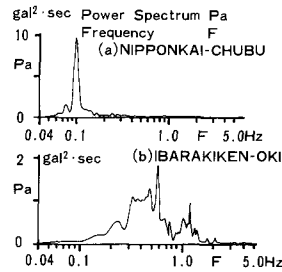


図5 入力加速度波形のパワースペクトル

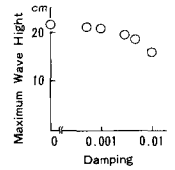


図6 最大波高と減衰定数

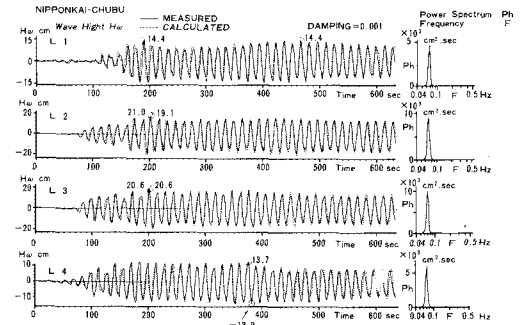


図7 液面波高の波形とパワースペクトル (NIPPONKAI-CHUBU)

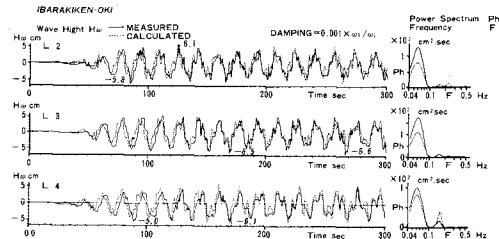


図8 液面波高の波形とパワースペクトル (IBARAKIKEN-OKI)