

3. 円筒貯槽液面のスロッシング現象に関する振動台実験

奥村哲夫・鈴木森晶

1. はじめに

石油タンク内の液面は、人体に感じない程度の加速度（10gal以下）で、周期が数秒から十数秒程度の非常にゆっくりとした地震動、いわゆる長周期地震動を受けると液体の共振によって長時間に亘って大きく揺動（Liquid Sloshing）し、これがタンク本体に多大な被害をもたらすことが知られている。たとえば、新潟地震（1964年、M=7.5）や十勝沖地震（2003年、M=8.0）では、石油タンク内液面上の浮き屋根が大きく上下に揺れ、これによって浮き屋根の破壊や浮き屋根周面とタンク側面との摩擦に起因した火災が発生した（写真1）。

現在、我が国には約8万基のタンクが存在し、その一部は直径40m以上の浮き屋根式の大型石油タンクである。特に中部圏においては、伊勢湾岸を中心に数多くの石油基地が存在し、大型タンクの長周期地震動に対する対策手法の確立が急務とされている。しかしながら、この種の研究は殆どなされておらず、早急に現象を解明し、地震時における安全性を確保する必要があると考えられる。



写真1 石油タンクの火災（新潟地震、文献1）

2. 実験

実験に用いた円筒貯槽は内径4.0m、高さ2.5mの鋼製であり、側壁には液面変化を監視するためのアクリル製の窓が設けられている（写真2参照）。液面上に設置する浮き屋根（写真3）は、振動時の側壁との緩衝および液体漏れを防ぐ目的で周面にゴム製のバッファを取り付けている。なお、貯槽内の液体には水を使用し、貯槽の加振は、寸法11×6m、ストローク±30mm、最大加振力2000kNの振動台を用いて行った。

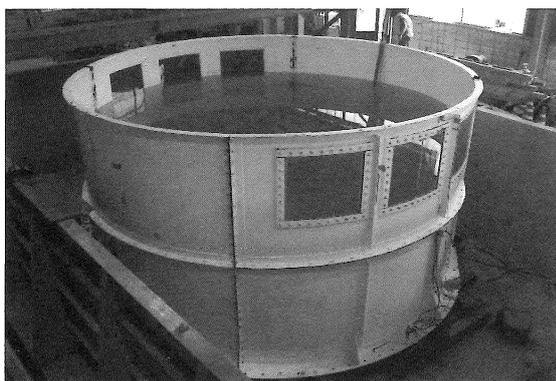


写真2 振動台上に設置した円筒貯槽

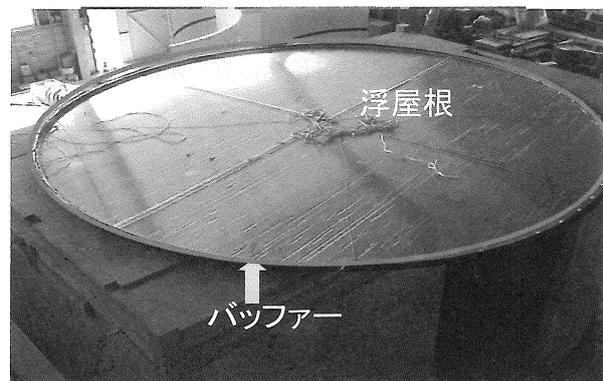


写真3 バッファを取り付けた浮き屋根

実験は、スロッシング現象の基本的特性を把握するために、加振振動数 f と液深 H を種々に変化させ、また、浮き屋根の効果を調べる目的で浮き屋根を設置しない実験も行った。

3. 結果と考察

図1は、固有振動数と液深の関係を調べた結果であり、1次および2次モードについて、浮き屋根の有無の違いを記号を変えて示している。なお、スロッシング発生時の固有振動数は波高変動の最大時の振動数とした。図から、液深の増大に伴って固有振動数は増加するが、モードの違いおよび、浮き屋根の影響は全く認められないことが分かる。また、図中の曲線は理論式（下式-1）から得られる両者の関係であるが、実験値と理論値の差は認められない。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r} \times \varepsilon_i \times \tanh\left(\varepsilon_i \times \frac{H}{r}\right)} \quad (1)$$

ここに、 f ：固有振動数 (Hz)、 H ：液深 (m)、 g ：重力加速度 (m/s^2)、 r ：タンクの半径 (m)、 ε_i ：1次モードでは 1.841、2次モードでは 5.33 である²⁾。

図2は、1次モードにおける波高変動の最大値（最大波高）と液深との関係を示している。図によると、浮き屋根を設置した場合の波高は、設置しない場合と比較していずれの液深においても低い値（20～30%）となっており、浮き屋根による波高の抑制効果が認められる。

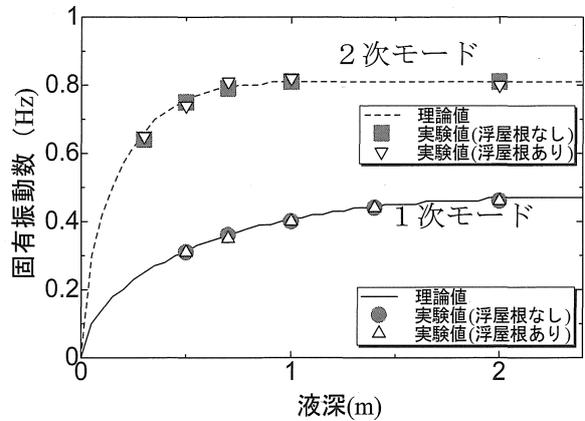


図1 固有振動数と液深の関係

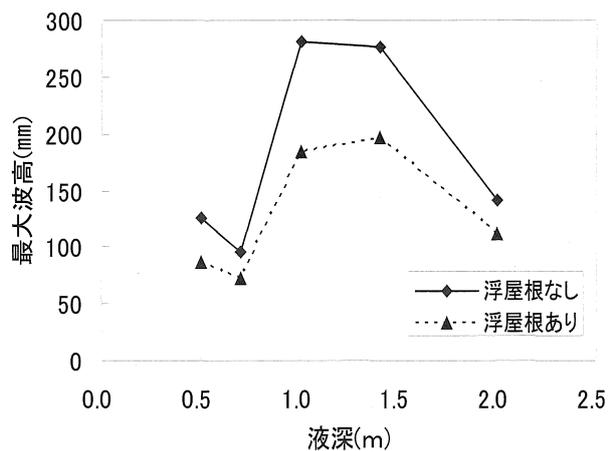


図2 最大波高と液深の関係

4. まとめ

大型石油タンクの地震時スロッシング現象の基本

特性を把握することを目的とし、振動台上に直径4mの円筒貯槽を設置して加振実験を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 浮き屋根の有無に関わらず、液面の固有振動数は液深の増大に伴って高くなる。また、液面の固有振動数は理論式に一致する。
- (2) 浮き屋根による波高の抑制効果が認められ、本実験の場合20～30%であった。

【参考文献】

- 1) 1964年新潟地震液状化災害ビデオ・写真集、地盤工学会
- 2) 石橋博人, 葉山真治: 浅水波理論を応用したスロッシングの非線形応答 (第2報, 長方形容器と円形容器における非線形応答), 日本機械学会論文集 (C編) 55巻 511号, 1989.3.

【写真資料】



写真1 浮き屋根大変動時の越流状況

【映像資料】

- S実験映像1：(No.1-2)、液深 1.93m、台振幅 $a = \pm 4.0\text{mm}$ 、振動数 $f = 0.46\text{Hz}$ 、正弦波入力、最大加速度 3.4gal、浮き屋根：無し／有り
- S実験映像2：(No.15)、液深 2.00m、台振幅 $a = \pm 0.7\text{mm}$ 、振動数 $f = 0.46\text{Hz}$ 、正弦波入力、最大加速度 0.6gal、浮き屋根：有り
- S実験映像3：(No.10)、液深 2.00m、台振幅 $a = \pm 0.7\text{mm}$ 、振動数 $f = 0.46\text{Hz}$ 、正弦波入力、最大加速度 0.6gal、浮き屋根：無し
- S実験映像4：(No.5-6)、液深 2.20m、台振幅 $a = \pm 10.0\text{mm}$ 、振動数 $f = 0.46\text{Hz}$ 、正弦波入力、最大加速度 8.5gal、浮き屋根：無し／有り