

スロッシングによる溢流量の計算

(消防庁 石油コンビナートの防災アセスメント指針から抜粋)

参考資料 3 スロッシングによる溢流量の計算

危険物タンクのスロッシング最大波高の推定には、速度応答スペクトル法¹⁾がよく用いられ、観測値との整合性がよいことが確認されている。ただし、速度応答スペクトル法は微小波高を仮定したものであり、溢流が生じるような大きなスロッシングの場合には、非線形性の影響を考慮する必要がある。西ら²⁾は、振動台による模型タンクの揺動実験を行い、速度応答スペクトル法による線形解に非線形性を考慮した補正値を導入し、溢流量と溢流量の関係を実験的に求めている。

1. スロッシングの非線形性を考慮した最大波高の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高は、式(1)により表される。

$$\eta^+ = \eta^{(1)\max} + \Delta\eta \dots\dots\dots(1)$$

η^+ : 非線形性を考慮したスロッシング最大波高

$\eta^{(1)\max}$: 速度応答スペクトル法に基づくスロッシング最大波高(線形解)

$\Delta\eta$: 非線形液面増分

$\Delta\eta$ は、直径 7.6m の模型タンクによる振動実験に基づき、式(2)のように表される。

$$\Delta\eta = 0.91 \cdot R \cdot \left(\frac{\eta_{\max}^{(1)}}{R}\right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

R : タンク半径

2. 溢流量の推定

非線形性を考慮したスロッシング最大波高(η^+)とタンクの側板高さとの差を溢流量 δ (δh)、スロッシングによる液面減少高さ(溢流により減少した液レベル)を Δ とする。溢流量 δ (δv)が式(3)で表されるとすると、 Δ 、 δv 、 δh は式(4)で表される関係がある。ここで、 r_0 は式(5)において $\eta^+(r_0, 0)=H_c$ を解いて求められ、 θ_0 は式(5)において $\eta^+(R, \theta_0)=H_c$ を解いて求められる。

$$\delta v = \delta h \cdot (R - r_0) \cdot R \theta_0 \dots\dots\dots(3)$$

δv : 溢流体積(図 1 の斜線で示す部分)

δh : 溢流高さ

r_0 : タンク側板高さにおける $\theta=0^\circ$ の半径との交点

θ_0 : 側板近傍においてスロッシング波高が H_c と等しくなる円周方向角度

$$\frac{\Delta}{R} = \alpha \cdot \frac{\delta v}{R^3} = \alpha \cdot \frac{\delta h}{R} \cdot \frac{R - r_0}{R} \cdot \theta_0 \dots\dots\dots(4)$$

α : 比例係数(自由液面 : 0.659、浮屋根 : 0.4023)

$$\eta^+(r, \theta) = \eta_{\max}^{(1)} \cdot \frac{J_1(\epsilon_1 \cdot \frac{r}{R})}{J_1(\epsilon_1)} \cdot \cos \theta + \frac{r}{R} \cdot \Delta \eta \cdot \cos 2\theta \dots \dots \dots (5)$$

J₁ : 第 1 種ベッセル関数(1 次)

ε₁ : J₁ の dJ₁(x)/dx=0 の 1 番目の正根 (=1.84118)

従って、溢流量の推定値は式(6)により求められる。

$$\begin{aligned} \Delta v &= (R^2 \pi) \cdot \Delta \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta v / R^2) \\ &= (R^2 \pi) \cdot (\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0 / R) \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

Δ : スロッシングによる液面減少高さ

α : 0.4023 (浮屋根)

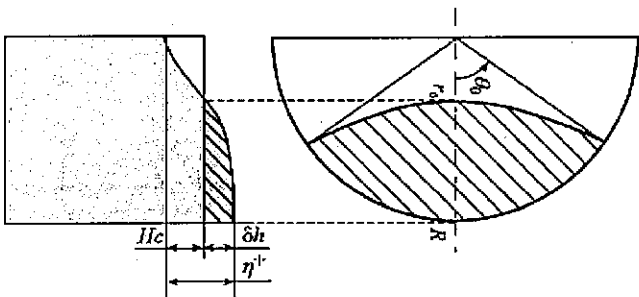


図 1 非線形スロッシングによる溢流量の模式図²⁾

西らは、これらの結果について過去の地震による実際の溢流量との比較検証を行い、2003 年十勝沖地震に対して十分な適用性があることを確認している。

参考資料 3 参考文献

- 1) 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二,三の提案, 圧力技術, Vol118, No.4, 1980
- 2) 西晴樹、山田實、座間信作、御子柴正、箕輪親宏：石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定, 圧力技術, Vol.46, No.5, 2008