

I-556

スロッシング現象の信頼性解析

東京大学生産技術研究所 正会員 ○永田 茂
東京大学生産技術研究所 正会員 片山 恒雄

1. はじめに

スロッシング現象に関する研究は、現象を適切に評価できる解析方法の提案や長周期地震動特性を考慮した解析用地震動の設定方法を中心に進められており、特にスロッシング応答解析の結果に大きな影響を与える長周期地震動特性に関しては有益な報告がなされている¹⁾²⁾。しかしながら、これらの研究では地震の規模や解析対象サイトまでの伝播距離などのように、推定に多くの誤差を含むパラメータの不確定性を考慮した解析は十分行われていないのが現状である。

そこで、本報告では、解析対象サイトの地震動に直接影響をおよぼすマグニチュードと震央距離の不確定性を考慮することにより解析用の速度応答スペクトルの確率分布を決定し、これを応答解析の入力としたときのスロッシングによる液面変位の信頼性解析例を示している。なお、ここでは信頼性解析方法としては、1次近似修正2次モーメント法を用いた。

2. 解析の概要

(1) スロッシングの信頼性解析

応答スペクトル法を用いると、円筒形および矩形貯槽の最大液面変位がある限界値を超過する場合の性能関数はそれぞれ式(1)、式(2)となる。

$$Z_c = \eta_u - \eta_c$$

$$= \eta_u - 0.00245 \cdot T_c \cdot \tanh(1.84H/R) \cdot S_v(T, h) \quad (1)$$

$$Z_r = \eta_u - \eta_c$$

$$= \eta_u - 0.00203 \cdot T_r \cdot \tanh(1.57H/\ell) \cdot S_v(T, h) \quad (2)$$

$$T_c = 2\pi / \sqrt{g/R \cdot 1.84 \cdot \tanh(1.84H/R)} \quad (3)$$

$$T_r = 2\pi / \sqrt{g/\ell \cdot 1.57 \cdot \tanh(1.57H/\ell)} \quad (4)$$

ここで、 η_u ：各信頼限界に対応する最大液面変位(m)、 η_c ：貯槽の最大液面変位(m)、 T_c 、 T_r ：円筒形および矩形貯槽の1次のスロッシング周期であり式(3)あるいは式(4)により計算される(sec)、 H ：貯槽の液面高さ(m)、 R ：円筒形貯槽の半径(m)、 ℓ ：矩形貯槽の幅の半分の長さ(m)、 g ：重力加速度(m/sec²)、 $S_v(T, h)$ ：固有周期 T 、減衰定数 h の速度応答スペクトル値(cm/sec)である。式(1)、(2)において $S_v(T, h)$ はマグニチュード M 、震央距離 Δ の関数で表される確率変数とし、 H 、 R 、 ℓ のばらつきは $S_v(T, h)$ の設定に伴うばらつきと比較して十分小さいと考えられるため確定値とした。

以上の性能関数の速度応答スペクトルの値を確率変数と考え、1次近似修正2次モーメント法を適用すると各信頼限界、つまり性能関数が負となる確率 $P(Z \leq 0)$ に対応する最大液面変位の限界値 η_u が求められる。1次近似修正2次モーメント法に関する詳細は文献3)などを参照していただきたい。

(2) マグニチュードおよび震央距離の不確定性を考慮した応答スペクトルの設定

近年、気象庁一倍強震記録の数値化データを統計処理することにより、スロッシング応答解析で用いる長周期地震動の速度応答スペクトルの距離減衰式がいくつか提案されている。これらの距離減衰式はマグニチュード M や震央距離 Δ の関数であり、特定の M と Δ の地震に関する応答スペクトルの平均的な情報を容易に得ることができ一方、これから起こるであろう地震の M や Δ の不確定性を考慮できる方法とはなっていない。そこで、本報告では、気象庁一倍強震記録をもとに作成した距離減衰式²⁾(式(5))のマグニチュード M と震央距離 Δ を確率変数と考えることにより、長周期地震動の速度応答スペクトルの確率分布の設定を行った。

$$S_v(T, h) = S_A(T, h) \cdot T / 2\pi = a \cdot 10^{b \cdot M} \cdot (\Delta + 30)^c \cdot T / 2\pi \quad (5)$$

なお、式(5)の係数 a 、 b 、 c は固有周期 T 、減衰定数 h 、地盤種別の関数である。

3. 数値計算例

以下ではマグニチュードと震央距離を確率変数とした場合のスロッシングによる最大液面変位の信頼性評価の例を示すとともに、既往の確定論的および確率論的なスロッシング応答解析結果との比較を行った。具体的には、東海地方を震源とする地震の最大マグニチュード M および震央距離 Δ の確率分布をそれぞれ $N(7.9, 0.2)$ 、 $N(150\text{km}, 25\text{km})$ としたときの速度応答スペクトル(減衰定数 $h=0.02$) の期待値(◆の直線)と標準偏差(■)を図-1のように設定した後、これを用いて最大液面変位に関する信頼性解析を行った。なお、 M および Δ の確率分布形は数値解析を容易にするため正規分布に仮定している。以上のデータを用いて4種類の貯槽(表-1)の最大液面変位の期待値(◆印)と90%の信頼性限界を計算して図-2に示した。さらに図-2には、比較のために本計算例と同様な震源域を想定したときの既往の解析結果⁴⁾も示している。

4. まとめ

本報告では、気象庁一倍強震記録から求めた速度応答スペクトルの距離減衰式のマグニチュードおよび震央距離を確率変数としたときのスロッシング現象の信頼性解析例を示した。ここで用いた速度応答スペクトルの確率モデルは、今後の一倍強震記録の増加によりさらに精度を向上させることができる。また、信頼性理論を用いたスロッシング応答解析の結果は、施設あるいは都市の安全性・信頼性評価の際にも有効な情報を与える。

表-1 解析モデルの諸元⁴⁾

	Model No.	容量 (kl)	内径 (m)	液面高さ (m)	スロッシング固有周期(秒)		
					1次	2次	3次
円形タンク	1	10,000	25.4	19.8	5.3		
	2	50,000	56.7	19.8	8.5		
	3	110,000	80.0	21.6	10.7	5.5	
	Model No.	容量 (kl)	タンク幅 (m)	液面高さ (m)	スロッシング固有周期(秒)		
					1次	2次	3次
矩形タンク	4	21,000	112.0	12.5	20.7	7.8	5.5

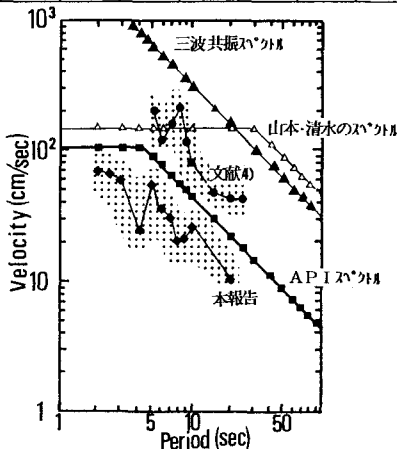


図-1 本報告で用いた応答スペクトルと各種の設計スペクトル

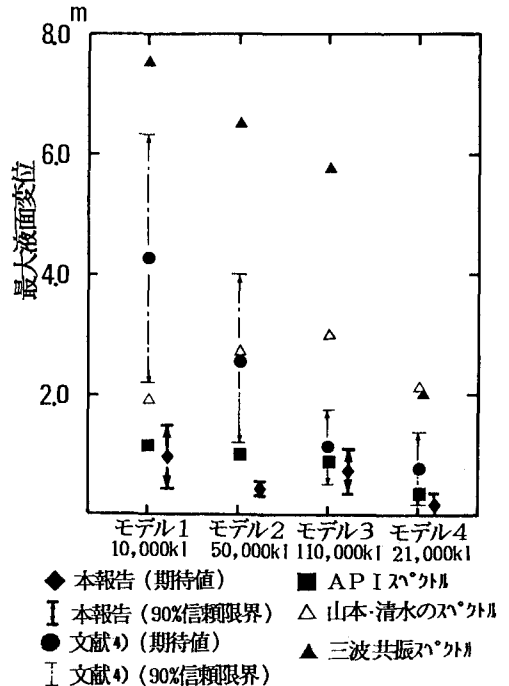


図-2 最大液面変位の比較

参考文献 1)片山・篠,「気象庁変位強震計記録の数値化と解析(Ⅱ)ー北美濃、新潟、十勝沖地震(本震、余震)ー」,昭和59年度科学研究補助金(総合研究A)研究成果報告書 研究代表者:片山恒雄, pp. 29-64, 1985. 2)「土木研究所資料:気象庁一倍強震記録に基づく長周期地震動特性の解析」,建設省土木研究室地震防災部振動研究室, 1985. 3)Ang and Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol. II", John Wiley & Sons, 1984. 4)星谷・永田ほか,「断層モデルを用いたスロッシング解析の確率論的評価法」,土木学会論文集,第350号, I-2, pp. 311-319, 1984.