

○(株) 間組 正員 榎出正人, 武蔵工大 正員 星谷 勝
(株) 間組 正員 辻田 蒼, 日揮(株) 正員 永田 茂

1. 概要

近年、液体貯蔵タンクの大型化に伴い、地震時の安全性に関する検討は重要となっている。地震動の変位波において卓越する長周期成分波とタンク内部の液体自由表面が共振状態にある場合には液面動揺(スロッシング)が顕著となり、液体の溢流の危険性も生じる。さらに、タンク構成部に動液圧が作用することになるため、スロッシング現象に関する検討は、タンクの耐震安全性検討の際の重要項目となっている。

スロッシング現象に関する研究は数多く行われてきており、その解析手法は現象をほぼ説明できるとなってきた。しかしながら、スロッシング解析に係る入力地震動に関する研究は不十分であり、実際の検討に当っては常に入力地震動の問題が大きな障害となっているのが現状である。スロッシング現象に多大な影響を及ぼすのは、地震動における数秒から10数秒程度の「やや長周期」成分であり、従来の構造物を対象に蓄積された比較的短周期領域での入力地震動に関する知見をそのまま適用することは困難と言える。

これらの入力地震動に関する問題の解決手段として、近年の地震学の知見を工学に取り入れた地震動の設定が行われており、中でも「断層モデル」¹⁾を用いた入力地震動の設定が実用化されつつある。これによって、今まで設定が難しかった「やや長周期」地震動の設定が可能となって来ている。しかし、耐震工学上非常に有効な手段とも言えども未だ確立されたとは言えず、その使用に当っては不確定要素の取扱いに關して多くの問題が残されているのが現状である。

そこで、本研究では現状での「断層モデル」で得られる有効な情報を生かしつつ、地震動の持つ不確定性・非再現性を補った合理的な入力地震動の確率過程モデルの設定方法を提案すると共に、これを取り入れた確率的評価法の確立を試みた。具体的には、「断層モデル」を用いた数十回の模擬によって「やや長周期」領域での周波数特性(パワースペクトル)、振幅包絡線および振幅強度特性(平均速度応答スペクトル)を抽出し、これらを用いて非定常自己回帰過程²⁾による地震動のモデル化を行った。さらに、確率過程モデルのほうつきを考慮したスロッシング応答解析を効率良く行うために、星谷³⁾によって提案された応答共分散漸化式を用いた不規則振動解析と最大応答値の整理までの一連の確率的解析手順を構築したものである。

2. 入力地震動モデルの設定

近年、断層モデルと表面波励起理論(正規モード理論)を組み合わせた物理モデルを構築し、地震動変位波の再現・予測を行ったものがいくつか発表されている。井上⁴⁾は、南海道トラフ沿いに周期100~150年で発生しているマクニチュード8クラスの巨大地震による周期5秒以上の表面波の模擬を行っている。この際、断層面上の食い違いの進行を2次元的に仮定すると共に、断層面上での破壊伝播の不均一性を考慮して破壊速度 V_R を $V_R = 1.5 \sim 3.0 \text{ km/s}$ の一樣乱数で与えることによって、より現実的な波動の模擬が可能となることを報告している。

さて、破壊速度を確率量として扱うことは、破壊フロントの広がり方にゆらぎを与えることであり、破壊フロントが到達した断層面上の各小断層(点震源)から放出される小波動間の時間的ずれの不確定性を考慮して重ね合わせを行い、観測点での地震動を作成することになる(図-1)。よって、「断層モデル」の破壊速度を一樣乱数で与えに数十回の模擬によって予測されるやや長周期地震動の周波数特性・振幅包絡線および振幅強度特性を同時に満足し、かつ乱数位相特性を表現できる確率過程で地震外力を表現することは、破壊速度を確率量とし

て与えたものと平均値に等価な不確定性を表現することになるため、適切な地震動のモデル化が可能となると考えられる。

そこで、本研究では「やや長周期傾式」での周波数特性、振幅強度特性を満足する定常自己回帰過程 $\tilde{z}_s(k)$ ($t=k \cdot \Delta t$) と振幅包絡曲線 $g(k)$ より、次式のような非定常自己回帰モデル $\tilde{z}_g(k)$ を構築している。

$$\begin{aligned} \tilde{z}_g(k) &= g(k) \cdot \tilde{z}_s(k) \\ &= g(k) \times \left\{ \sum_{j=1}^M b(j) \tilde{z}_s(k-j) + \varepsilon_s(k) \right\} \\ &= \sum_{j=1}^M \{g(k) \cdot b(j) / g(k-j)\} \{g(k-j) \cdot \tilde{z}_s(k-j)\} + \{g(k) \cdot \varepsilon_s(k)\} \\ &= \sum_{j=1}^M b(j, k) \tilde{z}_g(k-j) + \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (1)$$

3. スロッシングの不規則振動解析

上述したような入力地震動の特性を生かしたスロッシング応答解析を行うために、従来のスロッシング応答解析に用いられている速度ポテンシャル理論により応答共分散漸化式の定式化を行って解析に使用している⁴⁾。応答共分散漸化式では、式(1)の非定常自己回帰過程によって入力地震動を与えているために、やや長周期地震動の地震動特性、地震動の非定常性とはうつきを考慮したスロッシング応答解析を効率良く行うことが可能となるものである。なお、応答共分散解析の結果として非定常応答のはらつきを示す r.m.s. 応答 (root-mean-square 応答) が時系列で得られるが、最大応答理論⁵⁾により r.m.s. 応答から最大応答の確率分布を推定することも可能になる。このため、従来の決定論的スロッシング応答解析法と同様に最大応答値を算出できるばかりではなく、各最大応答の信頼性を算出できるために解析結果の定量的評価を行う上で非常に有効な手段となるものである。

4. 数値計算例

入力地震動の確率過程モデルとしては、文献6)を参考にして「仮想東海地震」における東京近辺でのやや長周期地震動モデルを作成して、表-1の各モデルに関する不規則振動解析を行った。解析結果を平均最大応答と90%信頼性区間の形に整理して図-2に示した。なお、図-2には、化学プラント関係で現在用いられている耐震解析用スペクトル⁷⁾を入力とした場合の表-1の各モデルに関する応答を応答スペクトル法により算出して示してある。

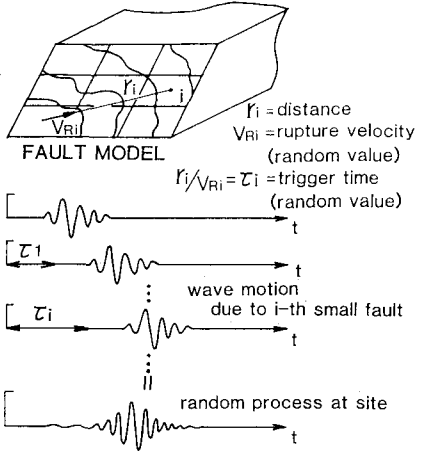


図-1 震源破壊過程モデル

表-1 解析モデルの諸元⁶⁾

	Model No.	容量 (kl)	内径 (m)	液面高さ (m)	1次のスロッシング固有周期 (秒)
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
矩形タンク	4	21,000	112.0	12.5	20.7

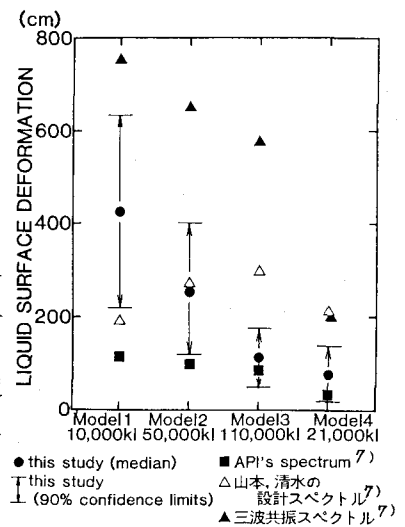


図-2 液面上昇量の比較図

参考文献

1)井上、藤野、松原、伯野：土論集，第317号，1982。2)Hoshino, M. and T. Chiba: Proc. of JSCE, No. 296, 1980。3)星谷、石井、永田：土論集，第341号，1984。4)辻田、樫出、永田：第10回関東学術会議概要，土木学会，1984。5)Yang, J.N. and S.C. Liu: ASCE, Vol. 107, No. EM6, 1981。6)動床試験設備耐震安全性委員会報告書，土木学会，SS2, 12。7)山本、清水：高圧力入，Vol. 18, No. 4, 1981