

○ 中央大学 学員 山本 兼哉
中央大学 正員 川原 睦人

1 はじめに

今日、土木技術の進歩に伴い構造物が高層化、長大化する反面、それを利用する人々は快適な空間を求め、その要求を満たすことは今後の土木においては必要不可欠である。快適性を考えるとき、風荷重による振動は重要な問題となる。流体力を利用する TLD は、制震技術の一種でその簡易性より一部の構造物に設置されている。この効果を数値解析的に調べるには、TLD- 構造系の連成解析が要求される。

そこで本研究の目的は、大振幅スロッシング問題を長時間安定に解けるスキームの開発と、TLD の制震効果の有効性を検討することである。

2 流体解析

自由表面問題を扱う場合、ポテンシャル流れ等の近似的解法がよく用いられてきたが、大振幅スロッシングのように自由表面上での変動量が大きな場合、現象をより正確に把握するためには、ナビエストークス解析が最も的確であると思われる。一方、移動境界を捕らえる手法として直接的なラグランジュ法と間接的なオイラー法とがあるが、本研究では、両者の中間的手法で境界を容易に表わせ、また移動の際に生じるメッシュの歪みが調整可能な ALE 法を適用する。

ナビエストークス方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + (U_j - W_j)U_{i,j} + \frac{1}{\rho}P_{,i} - \nu U_{i,jj} = F_i \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

連続式

$$U_{i,i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

U_i ($i = 1, 2$) は方向流速、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 ρ は密度、 F_i は外力を表す。

また、 W_i はメッシュ速度を意味し、次式で与える。

$$W_i = \frac{X_i^{n+1} - X_i^n}{\Delta t} \quad (3)$$

3 数値解析法

非圧縮性流れの基礎方程式であるナビエストークス方程式の離散化については、安定にかつ高速計算が可能な改良型 BTD 法を適用する。改良型 BTD 法で用いる Taylor 展開の形は、以下のように表すことができる。

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \Delta t \frac{\partial U_i^n}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 U_i^{n+\frac{1}{2}}}{\partial t^2} \quad (4)$$

4 リメッシング

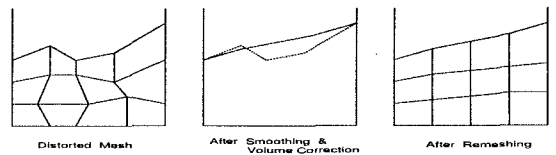


図 1: Remeshing の概略図

TLD タンク内の流体の運動に合わせ節点を移動させることにより、解析上不安定なメッシュが形成されることがある。そこで自由表面上に現われる凹凸をスムージング (平滑化) することで安定したメッシュを形成する。

$$\bar{X}_{2(j)} = X_{2(j)} - \frac{\alpha}{2}(X_{2(j-1)} - 2X_{2(j)} + X_{2(j+1)}) \quad (5)$$

ここで α は、平滑化の割合を定めるパラメータである。更に、スムージングを毎ステップ実行する際に体積の増減分が誤差として蓄積される。数値解析的に長時間の解析を行う場合これは重大な問題で、解析の不安定要因にもなる。そこで、体積補正も考慮する必要がある。

$$X_2^A = \bar{X}_2 + \Delta X_2 \quad (6)$$

ここで、 $\bar{X}_2$ はスムージングに、 ΔX_2 は補正量により求まるものである。以上の手順に従い、新たな座標 X_2^A を毎ステップ更新し、安定した計算が可能となる。図 2 に、スムージングの効果及び実験値との比較を示す。

5 TLD- 構造系連成解析

構造系の運動方程式は、次式により表される。

$$M_{ij}\ddot{X}_j + C_{ij}\dot{X}_j + K_{ij}X_j = L_i + H_{ji} \quad (i, j = 1, m) \quad (7)$$

時間方向の離散化に Newmark's β 法を適用し繰返し計算により未知量を求める。ここで H_{ji} は、TLD より得られる制御力を意味し、タンク両壁面の圧力積分差を

用い、次式により求めるものとする。

$$H_{fi}^{n+1} = H_{fi}^n + (N_{TLD} \times l_z) \cdot \int_{S_1} (P^n - P^{n-1}) dS_1 \quad (8)$$

N_{TLD} は、TLD 容器の総個数である。

6 数値解析例

マリントワーに TLD を設置しその効果について検証する。幅 42cm、奥行き 45cm の TLD 容器に、水深 2.1cm に水を貯めたものを 390 個タワー上層部に設置する。一方、外力として、マリントワーの一次の固有周期である $T = 1.80(sec)$ と同じ周期で、振幅 $A = 0.10(cm)$ の SIN 波を与える。

その解析結果を図 3,4,5 に示す。

7 おわりに

TLD- 構造系の挙動を数値計算により求めた。

まず、大振幅スロッシング問題において生じるメッシュの大変形に伴う計算の不安定要因を解消するために、リメッシングスキームを確立し、図 2 に示すように、実験値にほぼ一致し安定した計算が可能となった。

次に、流体と構造の連成解析を行い TLD による制震効果を調べ、TLD を設置することにより設置前と比べ、構造物の振動が約 3 割に低減されることが確認できた。

参考文献

- 1). 若原, 大山, 藤井, '液面動揺の非圧縮線形性を考慮した TLD- 構造系の風応答解析', 日本建築学会構造系論文報告集, 1991
- 2). 林 正宏, '分離型法を用いた非圧縮性流れの有限要素法解析に関する基礎的研究', 修士論文, 1990
- 3). 数値流体力学編集委員会編, '移動境界流れ解析', 東京大学出版会, 1995
- 4). Seiichi SUZUKI, 'Numerical Study on Control Problems in Civil Engineering Based on Finite Element Method', pp.95-pp.121, thesis, 1996
- 5). 丸岡, 太田, 平野, 川原, '同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析', 構造工学論文集, 1997

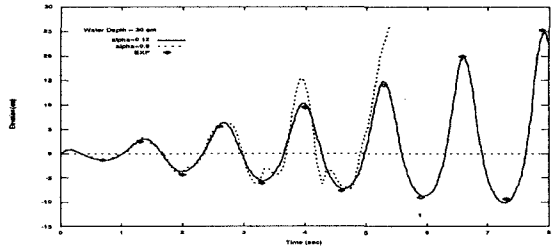


図 2: タンク左壁面のかけあがり高さ

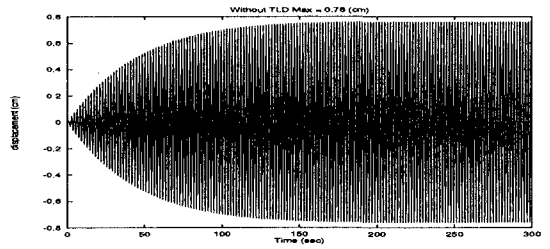


図 3: TLD 設置前のマリントワーの変位

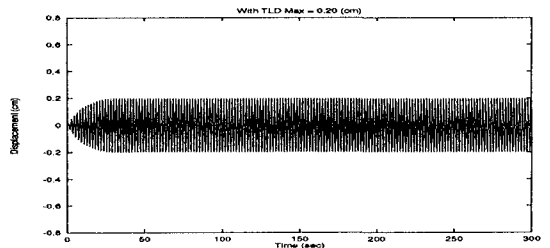


図 4: TLD 設置後のマリントワーの変位

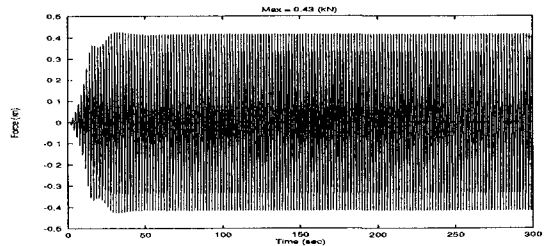


図 5: TLD から得られる流体力