A104

LES による水槽内のスロッシング現象の再現

野田 博[○](三井住友建設), 中山 昭彦(神戸大学), 長谷川 功(三井住友建設)

Reproduction of Sloshing Phenomena in Rectangular Tank by LES

Hiroshi NODA, Akihiko NAKAYAMA and Ko HASEGAWA

ABSTRACT

Sloshing phenomena of liquid in a rectangular tank have been simulated by a CFD method, namely a large eddy simulation with standard Smagorinsky model. The free surface displacement was determined by solving the continuity equation for flow with unsteady moving boundary in the HSMAC iteration of determining the pressure and velocity. The calculated sloshing amplitudes are in good agreement with the experiment. The details of the sloshing phenomena, particularly the dynamic changes of the velocity and pressure distributions in the tank in forced oscillation could be studied effectively by a visual investigation.

Keywords: CFD, LES, Sloshing, Rectangular Tank, Free Surface

1. はじめに

タンク内の液体スロッシングの現象把握は、液体同調ダンパーの調整、地震時の石油タンク内や貯水池内の液体挙動の解明等、様々な分野に展開できる。本論文では、矩形水槽内における水のスロッシングの様子を数値流体計算により詳細に調査した。

2. 対象とした水槽

本論文で対象とした水槽はFig.1に示す長さ588mm、幅278mmの矩形水槽である。水槽内には高さ150mmまで水が入った状態とした。また、計算では水槽中央部にスロッシングの低減を目的とした減衰ネット(線径0.55mm, 8メッシュ, 開口率68.3%)を設置した場合と設置しない場合の2通りについて検討した。

3. 計算方法

3.1 数値流体計算方法

数値流体計算手法にはスタッガード格子による差分法を用いた。乱流モデルは標準スマゴリンスキーモデルによるLarge Eddy Simulationとした。モデル係数 C_s は0.1とした。スロッシング直交方向の計算領域は、現象の一樣性を考慮して実物の1/2とした。計算方法ならびに計算条件をTable 1に示す。

3.2 水面位置の計算方法

自由水面位置は連続の式を修正して算出した¹⁾。ひと

つの面が自由水面を有する微小平行六面体を考える

Fig. 1 Model Tank

Table 1 Summary of computational method and conditions

空間差分	移流項 3次風上 (UTOPIA) その他 2次中心
時間進行法	Adams-Bashforth法
計算アルゴリズム	HSMAC法
乱流モデル	標準Smagorinsky Model($C_s=0.10$)
計算領域 [mm]	$x \times y \times z = 588 \times 139 \times 200$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 101 \times 21 \times 51$
格子幅 [mm]	$dx=5.88, dy=6.95, dz=4.00$
計算時間 [sec.]	$T=300$
時間間隔 [sec.]	$\Delta t=5.0 \times 10^{-4}$
壁面境界条件	Non slip
加振振幅 [mm]	$a=0.2$
加振振動数 [Hz]	$f_0=0.833, 0.928, 0.937, 0.943, 1.000$
ネット抵抗係数	$K=0.58$
計算ケース	Case1: without Net, Case2: with Net

(Fig. 2)。このとき、微小時間 δt の間に自由水面以外の面からの流入流出量が δt 後の自由水面の移動量として水面位置を算出した。

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x \delta t + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \delta t + w \delta t \quad (1)$$

この条件のほか、自由水面上の圧力は0という条件を設定した。

$$p_{\text{surface}} = 0 \quad (2)$$

Fig. 2 Free-surface displacement from unsteady continuity equation

3.3 減衰ネットの再現方法

スロッシングの低減を目的とする減衰ネットは、設置位置に(3)式の抵抗力を Navier-Stokes 方程式に付加することで再現した。ネットの抵抗係数 K は、開口率から 0.58 とした²⁾。

$$F_i = K \cdot \left(\frac{A}{2L^3} \right) \cdot u_i \sqrt{u_j^2} \quad (3)$$

F_i : i 方向抵抗力, K : 抵抗係数, A : ネット面積, L^3 : ネット位置の体積, u_i : i 方向流速 ($i=1$: x 方向, $i=2$: y 方向, $i=3$: z 方向)

4. 計算結果

加振振動数と最大波高振幅の関係を Fig. 3 に示す。図中には計算結果の検証のため実施した実験結果も付記する。また縦軸の最大波高振幅は加振振幅で除した値である。ネットがない場合、計算で求めた共振時の最大振幅は実験結果とよい対応をしている。ただし、共振振動数に差異が認められるがその差は僅かである。ネットがある場合には共振振動数付近で計算と実験で減衰ネットの効果に差異があり、計算による最大波高振幅は実験結果より大きくなっている。これは抵抗力を表す(3)式における流速を計算ではネット内の流速を用いており、抵抗係数 K の定義時の流速とは異なるためと考えられる。

減衰ネットがない場合の共振時における水槽内の流速ベクトルと自由水面を Fig. 4 に示す。Fig. 4 により以下のことが言える。波高振幅が殆ど 0 のときに流速が高くなり、最大となる場所は中央部水面付近である。これは微小振幅を仮定した波動理論による解と定性的に等しい。しかし、底面付近等他の場所でも流速が高くなっており、

このような性状は理論解では得ることはできない。波高振幅が最大となる場合にはいずれの場所においても流速が低くなるが、一様に低くなるのではなく場所により流速に差異があることが分かる。

5. おわりに

本論文では、自由水面を有する矩形水槽内のスロッシングを LES により再現し、計算結果を可視化することによりスロッシング時の流れの様子を詳細に観察した。

参考文献

- 1) 中山昭彦, 江田智行, 松村友宏: 修正 HSMAC 法による管水路乱流の LES, 水工学論文集, Vol. 49, pp. 661-666, 2005.
- 2) 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗: 日本機械学会, p. 112

Max. wave Amp./ Excitation Amp.

Fig. 3 Wave amp. vs. excitation freq.

(a) at max. velocity

(b) at max wave amplitude
Fig. 4 Wave surface and vector
(w/ Screen, $f=0.928$)