

B-6

長周期地震動による円筒形タンク内の液面動揺解析

Nonlinear analysis of sloshing of cylindrical tank due to long-period ground motion

○櫻井郁斗¹, 近藤典夫²

Fumito Sakurai¹, Norio Kondo²

Abstract: Nonlinear analysis of sloshing of a cylindrical tank is, in this paper, carried out by the use of the Navier-Stokes equations. The height of the free surface is obtained from the computation of the equation of height function. On the other hand, the computation of sloshing has been performed by using the Laplace equation based on potential theory. The validation of our methodology is fully shown from this study.

1. はじめに

日本に設置されている貯槽タンクは、大きな地震動によって多数の被害が報告されている。それらの解明のために、実験や数値シミュレーションによる原因の追究が行われてきた。この時の数値シミュレーションでは、線形ポテンシャル理論が使われていることが多い。そこで本論文では非線形解析が可能なナビエ・ストークス方程式を用いて、タンク内のスロッシング解析を行ない、十分に計算可能であることを示す。本研究では、地震動を十勝沖地震波(苫小牧)とした。これは、長周期地震動である。ナビエ・ストークス方程式の離散化には有限要素法を使い、時間方向の離散化にはクランク・ニコルソン法を適用した。

2. 計算モデル

本論文で使用した円筒形タンクのモデルは Fig.1 に示すように、剛体モデルとして扱いスロッシングの解析を行った。円筒形タンクのサイズは直径 $D=50.0\text{m}$ 、水深 $H=20.0\text{m}$ の大型タンクを元に無次元化を行ない、液面動揺の解析を行なった。この時の代表長さ L を $D=50.0\text{m}$ 、代表速度 V は $1.0[\text{m/s}]$ に決定した。また、外力として2003年9月26日に発生した十勝沖地震波(苫小牧)を用いる。

点 A, B, C は波高 h の計測点である。

3. 波高計算

本論文では流体の運動を解析するために以下のナビエ・ストークス方程式を採用した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + X_i \quad (1)$$

$$P = p + \frac{x_3}{Fr^2} \quad (2)$$

ここで、 u は流速ベクトル、 P は動圧、 Re はレイノルズ数、 Fr はフルード数を示す。

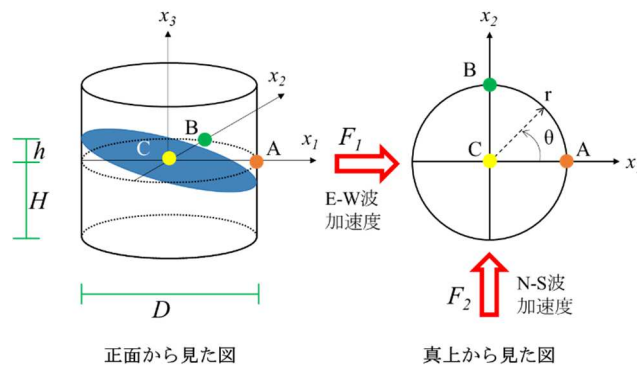


Figure.1 円筒形タンクのモデル

また、密度 ρ が一定である流体であるとし、運動中に体積変化が無いという仮定から以下の連続方程式を使用する。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

液面の変位高さ h を決める式は以下の式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (u \cdot \nabla)h = u_3 \quad (4)$$

4. 数値結果

Fig.2 と Fig.3 は十勝沖地震波の E-W 成分と N-S 成分の加速度を示す時刻歴曲線である。地震波はいずれも 290.0s まで記録されている。

E-W 方向のみ加振した場合の液面動揺の解析結果を Fig.4, 5, 6 に、N-S 方向のみ加振した場合の解析結果を Fig.7, 8 に示す。また、E-W 方向加振時の結果は A, B, C 点のものを載せるが、N-S 方向加振時は A, C 点のみの解析結果を載せる。いずれの時刻歴曲線も $t=0.0 \sim 1000.0[\text{s}]$ まで示す。

Fig.4, 5 の青線はポテンシャル理論による線形解、赤線が N-S 式による非線形解を表す。

5. おわりに

E-W 方向加振時の A 点での解析結果を見ると最大

1 : 日大理工・院(前)・海建 2 : 日大理工・教員・海建

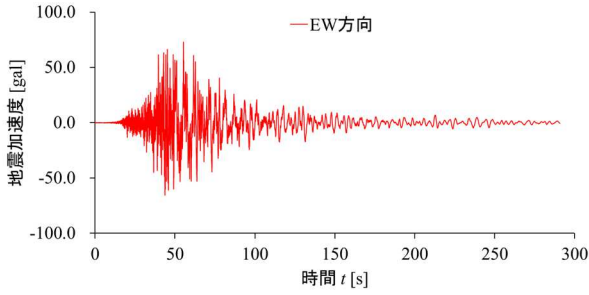


Figure.2 十勝沖地震加速度 (E-W 成分)

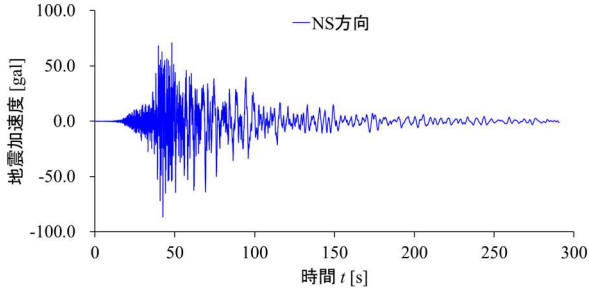


Figure.3 十勝沖地震加速度 (N-S 成分)

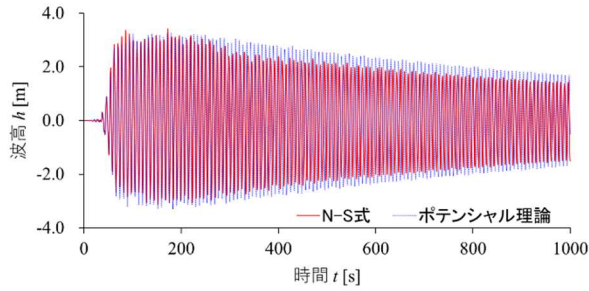


Figure.4 A点での波高 h , E-W 方向

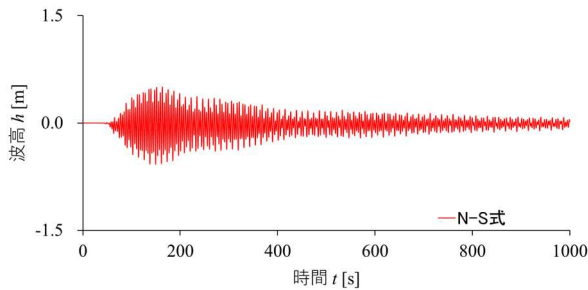


Figure.5 A点での波高 h , E-W 方向

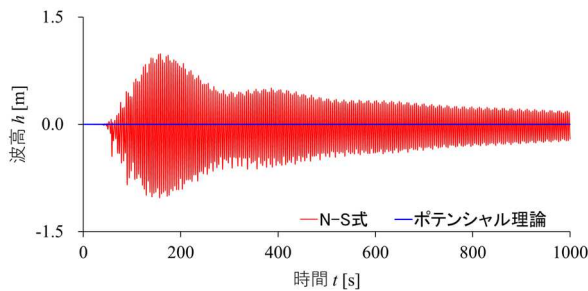


Figure.6 A点での波高 h , E-W 方向

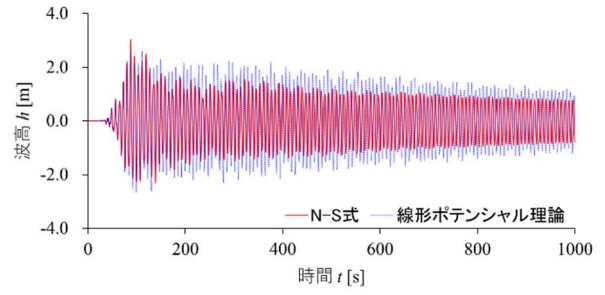


Figure.7 B点での波高 h , N-S 方向

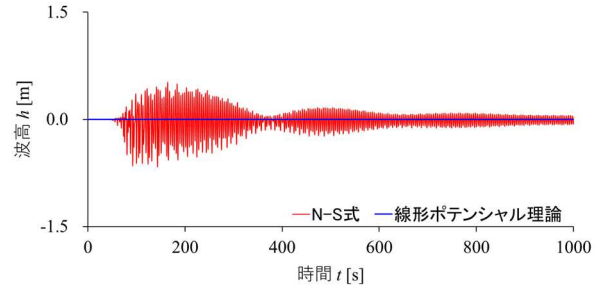


Figure.8 B点での波高 h , N-S 方向

波高は線形解で $h=3.25[\text{m}]$ ($t=171.3[\text{s}]$), 非線形解で $h=3.41[\text{m}]$ ($t=172.6[\text{s}]$) となっており, N-S 方向加振時の A 点での解析結果を見ると最大波高は線形解で $h=2.59[\text{m}]$ ($t=111.0[\text{s}]$), 非線形解で $h=3.41[\text{m}]$ ($t=172.6[\text{s}]$) となっている. いずれも, 線形解よりも非線形解の方が変位が大きく E-W 加振時で 5.0%, N-S 加振時では 17.4% もの線形解による過小評価が見られた. このことから大型タンクの長周期地震動を考慮した設計には非線形解析が重要であると言える.

一軸方向のみ加振した場合でも実際の液面動揺では一軸方向のみの液面変位から時間経過とともに回転運動へと変化する. 今回の解析では, 加振中及び加振終了後に発生する回転運動について解析することが出来ており, 現実問題に即した解析が出来ていると言える.

今後, 実験を行ない数値解析結果との比較を行う予定である.

6. 参考文献

- [1] 曾我部潔, 重田達也, 柴田碧:液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 東京大学生産技術研究所報告, 第26巻 第7号, 昭和52年3月
- [2] 松井徹哉: 浮屋根との連成を考慮した大型液体貯槽の地震時スロッシング応答とその抑止策, 平成17年度~平成19年度 科学研究費補助金 基盤研究(B) 研究成果報告書, 平成20年5月