

矩形プールを用いた浮体免震システムの基本特性のポテンシャル流解析による評価 Characterization of Floating Seismic Isolation Systems with Rectangular-Shaped Pools by Potential Flow Analysis

○五十嵐晃・齋田真弓・森隆

○Akira IGARASHI, Mayumi SAIDA, Takashi MORI

The floating seismic isolation system has been studied as a feasible seismic protection measure for critical power plants, offering economical three-dimensional seismic isolation. Instead of offshore installations, artificially created pools are considered to accommodate the isolation system's floating structure for safety and management reasons. In this study, the fundamental characteristics of floating seismic isolation systems are evaluated using potential flow analysis, focusing on the case where the pool and the floating structure are of rectangular shape. Assuming incompressible, irrotational flow of water between the floating structure and the pool surface, the added mass of the fluid and the transmission ratio of earthquake ground motion to the floating body are determined from the evaluated velocity potential of the fluid flow. The relationship between the floating structure-pool surface gap distances and the seismic isolation effectiveness is discussed based on the determined dynamic properties, since the size of the artificially created pool directly affects the cost-effectiveness of this concept.

1. はじめに

浮体式免震システムは、ゴム支承等を用いた従来の免震構造とは異なる方式として以前より研究されてきた地震対策構造方式である。実現されている免震デバイスを用いた免震システムと比べたメカニズム上の利点・欠点を踏まえ、特に地震動の上下動成分への効果を付与した3次元免震を経済的に実現する必要性が高い発電プラントの地震対策としての適用性が現在検討されている。理論的には洋上の海面上に設置した場合、地盤面への水平方向の境界が無限遠となると近似可能であることから、水平方向には完全な免震効果が期待できることになるが、実際上の条件に対する安全性や管理上の理由から、陸地内に人工的に造成されたプールに浮体構造を収容した免震システムが想定されている。

本研究では、プールと浮体構造物が図1に示すような矩形形状である場合に着目し、流体の付加質量と地震動の浮体への伝達率を算出する。人工的に造成されたプールの規模は、このコンセプトの費用対効果に直接影響するため、決定された動的特性に基づいて、浮体構造物とプール表面の隙間間隔と免震効果の関係を検討する。

2. 浮体免震システムの解析手法

本検討では、ポテンシャル流解析を用いて浮体

免震システムの基本特性を評価する。浮体構造物とプール表面間の水は非圧縮性かつ非回転性で流れるものと仮定し、評価された流体流れの速度ポテンシャルに基づき、地震時に浮体に生じる加速度を推定する。

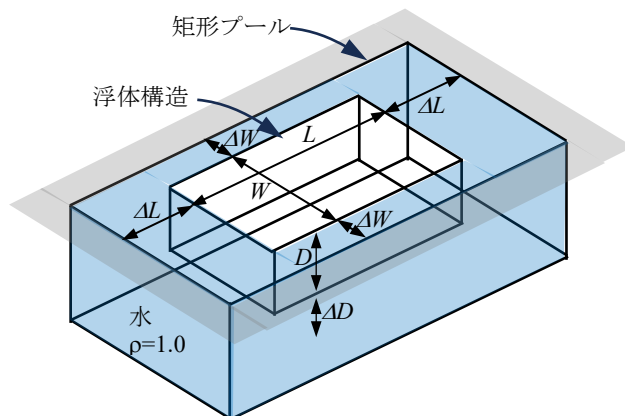


図1 矩形プール浮体免震システム概念図

3. ポテンシャル流解析の定式化

ここでは図1における水平長さ L 方向および鉛直深さ D 方向に関する2次元ポテンシャル流解析の場合の定式化を述べる。

図2のように x, y 座標系ならびに水とプール・浮体境界面の位置を定義する。非回転流を仮定すれば、水の水速度ポテンシャル $\phi(x, y)$ により、座標

位置 (x,y) における速度ベクトル (v_x, v_y) は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

水の非圧縮性を仮定すれば、連続式は速度ポテンシャル $\phi(x,y)$ に関するラプラス方程式で表される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

任意の時刻において地震動によるプール側壁面の水平速度を v_g 、浮体構造に生じる水平速度を v_f 、自由水面を圧力ゼロとした場合、境界条件は下図のようなディリクレ条件とノイマン条件の組み合わせになる。

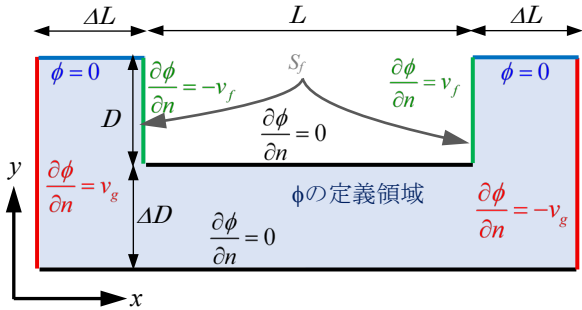


図2 2次元ポテンシャル流問題の境界条件

条件により速度ポテンシャル $\phi(x,y)$ が得られたとすると、すべての速度量がゼロである静止状態からその速度に至る一定加速度がプールに作用した場合に生じる水の速度の増分である、加速度を表している。したがって、 $v_g=1$ を前提として式(2)の入力地震動加速度 $a_g=1$ の場合における速度ポテンシャルの時間導関数 $\partial \phi / \partial t$ に等しい。この時発生する動水圧 p および浮体側面 S_f への動水圧の作用により生じる浮体への水平荷重 P_f は、次式で評価される。

$$p(x,y) = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad P_f = \int_{S_f} p dS \quad (3)$$

さらに、浮体に生じる水平加速度 a_f は、力のつり合いより

$$P_f = \rho V a_f \quad (4)$$

の条件 (V : 浮体の排水体積) を満たす必要がある。これを用いて、 $v_f=a_f$ から得られる (3) 式の結果が (4) 式を満たすような v_f を収束計算により探索して定めている。

4. 浮体－プール間の隙間間隔と免震効果の関係

$L=20\text{m}$, $D=5\text{m}$, $\Delta L=6\text{m}$, $\Delta D=8\text{m}$ のケースのポテ

ンシヤル流解析の結果の例を図3に示す。

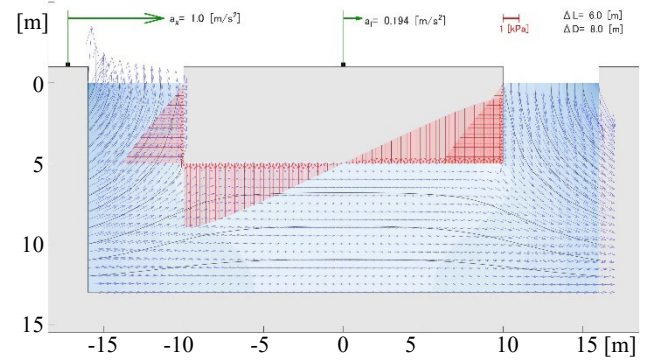


図3 浮体免震システムに生じる流速・動水圧の解の例

このケースの解析結果によれば、浮体水平加速度の水平入力地震動加速度に対する比は **0.184** であり、加速度の大きさを **18.4%** に低減できる特性を有する事を示している。

免震効果の指標としての、浮体／地震動加速度比（あるいは加速度伝達比）は、浮体構造物とプール表面の隙間間隔などの幾何学的条件により変化する。ここでは、上例と同じく $L=20\text{m}$, $D=5\text{m}$ の場合において、水平方向の浮体－プール間の隙間間隔 ΔL を変化させた時の加速度伝達比の変化を求めた結果を示す。

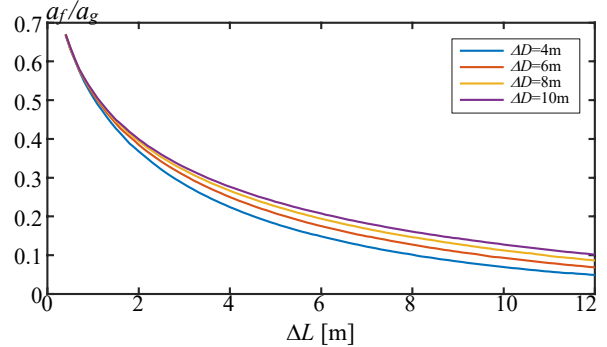


図4 浮体－プール間隔と加速度伝達比の関係

水平方向の浮体－プール間の隙間間隔 ΔL が増加するほど加速度伝達比は減少することから、加速度伝達比を十分に小さくするためには ΔL を十分に大きな値を選ぶことが必要である。なお、浮体・プール底面間の隙間間隔 ΔD も加速度伝達比に影響するが、 ΔD が増加するほど加速度伝達比が増加する傾向が見られる。

なお、この計算は地震動の周期成分は十分に短く、スロッシングや水面波の発生と伝播などに起因するプール水面の水位の変動などの効果は無視した評価である。浮体の流体中の速度応答により生じる抗力やエネルギー吸収などの減衰効果なども考慮しておらず、免震システムの詳細な地震時応答の評価にはより詳細な CFD 解析が必要である。