

三井造船(株)千葉研究所

南 真和

三井海洋開発(株)

正員

○ 島田 生徳

三井造船(株)千葉研究所

金広 和彦

1. 緒 言

一般に、海洋における大型固定構造物が地震動も受けると周囲の流体から抵抗を受けて物体の質量があたかも増加したかのような挙動を示すことが知られている。従来のこの効果に関する研究は、円柱橋脚等の細長比の小さいしかも全頭出型と考えられる形状を対象としたものでかつ理論的検討が大部分のようである。本研究は、円柱の全没型に対する解析解を誘導して没水の程度による影響も吟味すると共に、任意形状物体に対する拡張も考慮して有限要素法による上述の効果を詳細に検討した。並行して海底地震をモデル化した装置を用いて模型によるシリーズ実験を行い数値計算との比較を試みた。更に、付加質量の定義に関連した自由振動実験も追加した。

2. 模型による振動実験

実験は、動水圧測定用の正弦波加振実験と付加質量測定用の自由振動実験とから成り Table 1 に示す円柱、角柱、円錐台の3形状の剛体模型を使用して行った。強制加振実験は Fig. 1 の概念図に示した様に、水槽底部には約 1200×1,000 の穴をくり抜きこの下に配置した振動板との間に防振ゴムを取り付けて水槽自体には振動が伝達せずしかも防水性が保たれる構造とした。水槽内の周囲にはグラスウールをめぐらせることにより消波及消圧効果を持たせた。加振は動電型加振機も油膜形式の水

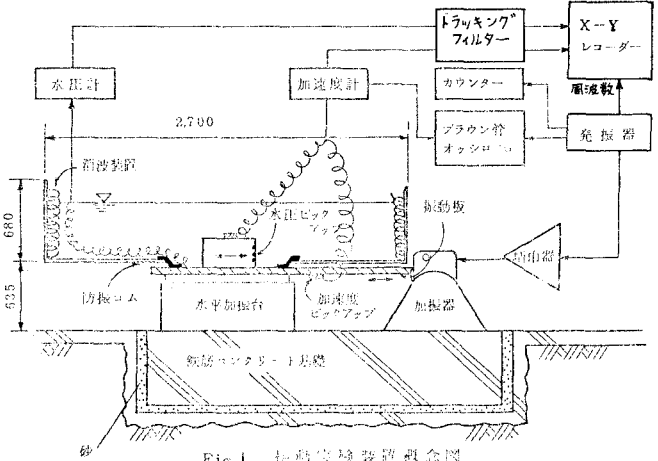


Fig. 1 強制加振装置概念図

平加振台に直結して行い、振動板の上下左右方向の自由度はガイドにより拘束する形式とした。模型は底部より鉄板のツバを張り出しこれと振動板ともボルト結合した。水圧ピックアップは模型の対称性を考慮して水深及周方向の所要の位置に取り付け、入力加速度及模型の弾性変形を確認するため模型頂部と振動板とに加速度ピックアップも配置した。計測にはトラッキングフィルターによってノイズも除去し加振周波数成分のみが得られる装置を用いた。実験は正弦波、振幅 4 mm (P-P) まで、周波数 100 Hz までの範囲で行い、水深、形状、縮尺を変化させて動水圧、振動加速度、振動周波数を計測した。付加質量測定実験は、模型に板バネを取り付けこれを水中及空中で自由振動させて各々の固有振動数から付加質量を求めた。

Table - 1 模型の諸元

タイプ 縮尺	円 柱	角 柱	円 錐 台
船 尺	φ100mm×H50mm	480mm×80mm×H40mm	φ100mm×φ50mm×H50mm
1/150	○	○	○
1/300	○ (スチールエポキシ検討用)		
1/500	○ (")		
1/1000		●	●

注) ○ 動水圧測定用(木製)
● 付加質量測定用(アクリル樹脂)

3. 理論的検討 §3-1: 水没円柱のまわりの流れ

完全流体として発生波の速度ポテンシャル至も求めることも考える。Fig. 2 に示す円柱座標を用いて至= $\phi(r, \theta, z) e^{i\sigma t}$ (σ : 角周波数) とすると、領域 I では

$$\text{連続の式 } \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (1) \quad \text{圧力の式 } \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = 0 \quad (2)$$

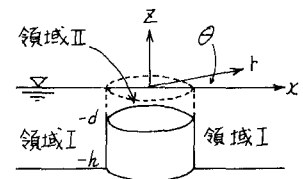


Fig. 2 座標系

自由表面条件 $\frac{\partial \Phi}{\partial z} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ (3) 海底条件 $\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0$ (4) ここに、 P : 変動圧、 ρ : 流体の密度
 g : 重力加速度である。

が成立する。領域Ⅱでは、(4)の代わりに円柱上面条件 $\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ (5) とするだけで他は領域Ⅰと同様に表現される。これより速度ポテンシャルは各々次の様に求まる。

$$\Phi_1 = [A \cdot H_0^{(2)}(k_1 r) \frac{\cosh k_1 (h+z)}{\cosh k_1 h} + \sum_j D_j \cdot K_0(k_{1j} r) \frac{\cos k_{1j} (h+z)}{\cos k_{1j} h}] \cdot \cos \theta, \quad \sigma^2 = k_{1j} g \tanh k_{1j} h = -k_{1j} g \tan k_{1j} h \quad (j=1, 2, \dots) \quad (6)$$

$$\Phi_2 = [B \cdot J_0(k_2 r) \frac{\cosh k_2 (d+z)}{\cosh k_2 d} + \sum_j E_j \cdot I_0(k_{2j} r) \frac{\cos k_{2j} (d+z)}{\cos k_{2j} d}] \cdot \cos \theta, \quad \sigma^2 = k_{2j} g \tanh k_{2j} d = -k_{2j} g \tan k_{2j} d \quad (j=1, 2, \dots) \quad (7)$$

ここに、 $H_0^{(2)}$: 2種ハングル関数、 K_0 : 2種ベッセル関数、 J_0 : 1種円柱関数、 I_0 : 1種変形ベッセル関数である。円柱が $Y=f(x)e^{i\sigma t}$ なる正弦波振動するとして円柱表面条件、領域ⅠとⅡの境界での流速及圧力の連続条件から未定係数 A, B, D_j, E_j が決定されるが、 $\cosh$ 等の直交性が利用できないので一般的に求めることはできない。本研究では、次の様な収束計算によって求めることを考えた。すなわち、円柱表面条件を満たす解を領域Ⅰで仮定しこの解と圧力連続な解を領域Ⅱで仮定する。次にこのⅡの解と流速が連続となる様にⅠの解を修正する。この修正でⅡの圧力連続がずれるので圧力連続も満たす様にⅡの解も修正する。以下収束するまで修正を繰り返す。変動圧は(2)、(6)、(7)より求まる。

§3-2 有限要素法による誘導：変分原理によれば、(1)を(2)～(5)の境界条件で解く問題は(8)の汎関数を極小にする P を求める問題と等価になる。

$$X(P) = \iiint_V \frac{1}{2} \{ (\frac{\partial P}{\partial x})^2 + (\frac{\partial P}{\partial y})^2 + (\frac{\partial P}{\partial z})^2 \} dx dy dz + \int_A \frac{\partial P}{\partial n} dA - \frac{1}{2} \int_A \frac{\sigma^2}{g} P^2 dA \quad (8)$$

ここに、 V : 定義領域、 A : 境界面、 $\frac{\partial P}{\partial n}$: 物体表面の法線方向速度である。 V を有限個の四面体要素に分割し各々での要素内における P の値を1次分布で仮定して(8)の積分を実行し、 $\frac{\partial X}{\partial P_i} = 0$ ($i=1, 2, \dots, N$; N : 節点数) とおくと P_i に関する N 元連立1次方程式 $A \cdot P = R$ (9) が得られる。(9)の解として変動圧が求まる。電算プログラムでは要素を自動的に分割して計算するようにした。

4. 結果及考察

Fig3は変動圧分布に関する結果の一例を示したものであるが、全般的には実験値と計算値はかなりの良い一致が見られ理論の妥当性が明らかとなった。水没型では顕出しの場合よりも分布が水深方向に一樣に近い形となった。形状による変動圧分布の差をみると、円錐台では基部より少し浅い所で最大の変動圧が出ていた他は全て基部であった。その中では円柱と角柱が大きく分つほぼ同じ値を示した。スケールエフェクトの検討実験に関しては小さい模型程計算値に近い値が測定されたものの、相似律は満足されていることを確認した。自由表面の影響については、水没距離の増加と共に収束の傾向を示しながら変動圧は増し、水深が模型高さの2倍の場合で顕出しの値の20%程度の増加であった。付加質量係数は、同形状に関しては細長比の小さい細長いもの程大きく細長比が大きくなるに従って減少することが判った。

尚、本研究は日本海洋開発産業協会による昭和48年度石油の海洋備蓄システムの技術検討に関する調査の一環として行なわれたものである。又、東大地震研究所伯野元彦助教授、東工大水工研究室椎見博美助教授及沢本正樹助、三井造船(株)千葉研究所土屋九一所長及沢柳政弘氏から貴重な助言をいただいた。

参考文献 1) 伊藤喜行・木原 力: 円柱の動揺に伴う造波抵抗; 運輸省港湾技術研究所報告オ11巻3号 1972 2) O.C. Zienkiewicz: The Finite Element Method in Engineering Science; McGraw-Hill 1971

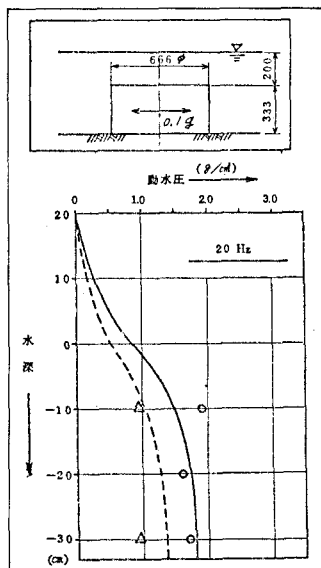
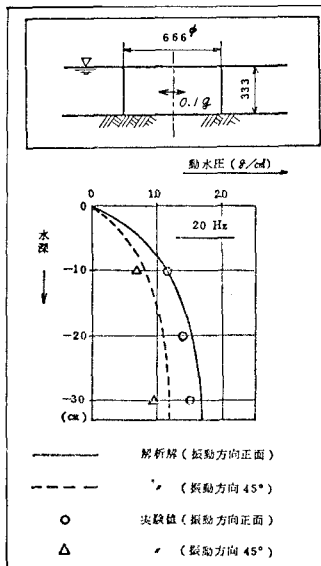


Fig3 円柱の変動圧分布