

埼玉大学 理工学部 ○ 中村 広昭

今 嶋 祐 一

はじめに 最近では、直径が30mを超えるような大型の水道あるいは石油タンクの建設が計画されるようになってきた。この場合水面の1次共振周期は6〜7秒前後となり、地震波の特性(S波あるいは表面波)によっては水槽水面の動揺が甚しくなるおそれがあるために、構造設計上の特別の考慮を払う必要が生じている。すなわち、水槽水面の共振周期は無数にあるとしても、低次の共振時には振幅の増加とともに水槽にかかる偏圧が著しくなること、および低次の共振時ほど内部粘性による減衰効果が少いため振幅自体が増大する可能性が強いこと等の理由によるものである。

本研究は上記の問題に対処するための基礎的な考察を行なうため、まず円型水槽水面の動揺に関する周波数特性の理論と実験との対比を行ない、次に水槽内に表-1に示すような各種工作物を設けた場合、水面の動揺に對しどのような防止効果が期待できるかについて実験的考察を行なったものである。

1) 円形水槽水面の動揺特性

(a) 水面の共振特性 図-1に示すように、静止水面上に円筒座標系を設定すれば、粘性を無視した場合速度ポテンシャル φ の満足すべき条件式は、周知のように次式で示される。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{いま } z = -h, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \\ r = a, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} &= A v \cos v t \cdot \cos \theta \\ z = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

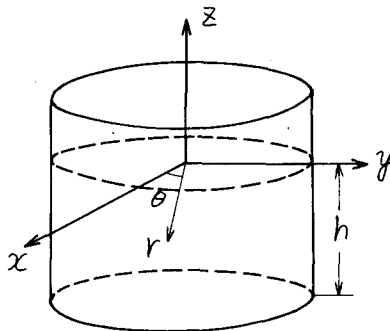


図-1 水槽の座標系

を満足する解(z方向に水槽壁面の変位が $A \sin v t$ で与えられる場合)は、千田・中川により次式のように示されている。

$$\varphi = A v \cos v t \cos \theta \left\{ r + \sum_{m=1}^{\infty} a J_1\left(\frac{\lambda_m}{a} r\right) \cosh \frac{\lambda_m(z+h)}{a} \times \frac{2 v^2}{J_1(\lambda_m) \cdot (\lambda_m^2 - 1) \cdot (n_m^2 - v^2) \cosh \frac{\lambda_m h}{a}} \right\} (3)$$

$$\text{ここに } n_m^2 = \frac{\lambda_m g}{a} \tanh \frac{\lambda_m h}{a}, \quad J_1'(\lambda_m) = 0 \quad (4)$$

水面の変位を η とすれば

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{z=0} = \frac{A v^2}{g} \sin v t \cos \theta \left\{ r + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 a v^2 J_1\left(\frac{\lambda_m}{a} r\right)}{J_1(\lambda_m) \cdot (\lambda_m^2 - 1) \cdot (n_m^2 - v^2)} \right\} \quad (5)$$

(b) 実験結果との比較 (4) および(5)で示される水面動揺の周波数特性を検証するため、振動台(島津サーボパルス:EHV-05105)上に水槽(内径 $2a=72\text{cm}$)を設置し、水面の共振特性を調べた。写真-1はその状況を示すものであり、壁面附近に電気的水位計を置き水面の動揺を記録している。

図-2は、水深 $h=40\text{cm}$ 、振幅 $2A=1\text{cm}$ の場合の共振特性に関する理論と実験結果との対比を示すものである。この図より以下の事項が指摘される。①;低周波(2.5Hz以下)では両者は極めて良く一致する。

② 周波数が大きくなると、減衰効果が現われるため、完全な共振あるいは振幅増大の状態は記録し難くなる。③ 全般的に、共振周期は良く一致するが、とくに振幅増加の顕著な領域は1〜2Hz附近と3.5〜4.5Hz附近に現われる。

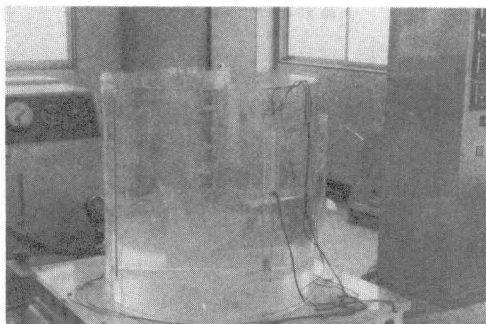


写真-1 実験状況

前記理論は、 y 軸を $\gamma=0$ とする水面の動揺を示しているが、 γ 1次共振点 1.12 Hz をや γ 超えると、実際の水面の振動には z 軸の廻りの回転運動が発達する。

この事は、振動台のきわめてわずかな偏心作動に起因するものと思われるが、回転運動として生長することは実験的事実として注目に価することと思われる。

2) 水面動揺の防止効果に関する実験

水槽内に同心の円筒を設置し、内部円筒の直径、円筒にあけた孔径、円筒の上下位置および平均水深を表-1に示すように変化させた場合、振動台振幅を一定とし、それについて共振特性を調べることにより、各種工作物の水面動揺に対する防止効果を検討した。なお、このような工作物が動揺防止に効果的であると考えられる理由は次のような点である。

①内部円筒の多くの孔が流体抵抗を与え、減衰要素として働くこと。

②隔壁を設けることにより、振幅が減少すること。

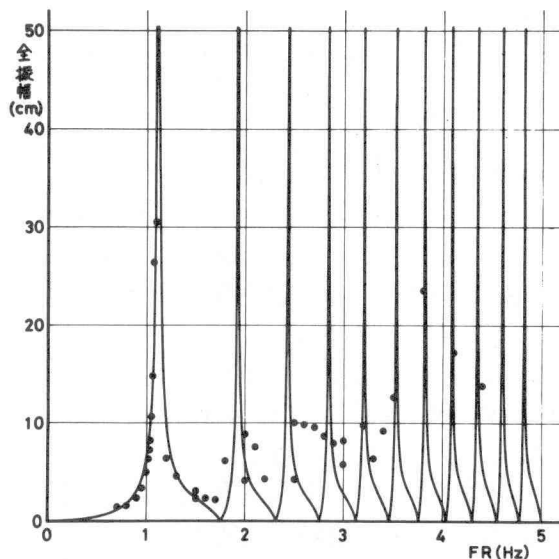
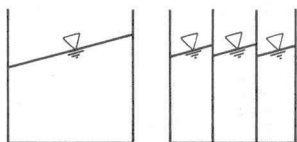


図-2 円形水槽水面の共振特性

表-1 内部円筒の種類および分類記号

条 件	記 号 等							
円筒なし	χ							
円筒下(底面は一致)	α							
円筒上(底面212cm)	β							
円筒の大小	A (大)				B (小)			
円筒の直径(cm)	34				22			
円筒の側面積(cm ²)	7916.8				5066.8			
横方向の孔の数(約3cm間隔)	32				20			
縦方向の孔の数(3cm間隔)	24				24			
孔の全個数	768				480			
孔の種類	a(大)	b(中)	c(小)	d(孔なし)	a(大)	b(中)	c(小)	d(孔なし)
孔の直径(cm)	2.6	1.4	0.8	0	2.6	1.4	0.8	0
空隙率(%)	51.5	14.9	4.87	0	50.3	14.6	4.76	0
水槽水深(cm)	30				40			
					50			

注. 孔の個数及び位置は直径の大小によって変化せず

③共振周波数が増加し、それだけ粘性減衰が期待されること。

図-3は、1例として $Aa\alpha$ および $Ad\alpha$ の内部円筒を設置した場合の共振特性を示したものである。この図より、先ず内部円筒のない場合に比してその個数多くの共振点が実験的には現れられないことが知られる。すなわち、 $1\sim 2\text{ Hz}$ 付近で γ 1のピークが現れ、 $3\sim 5\text{ Hz}$ 付近で γ 2のピークが現れる。以後は前者を γ 1次共振点附近、後者を γ 2次共振点附近と呼ぶこととする。次に $Ad\alpha$ は内部円筒により完全に水槽の内外が遮断されているため、厳密な意味での γ 1次共振周波数は $Aa\alpha$ のそれよりも大きくなる。したがって、図-4においてはこの周波数における最大振幅は $Ad\alpha$ とし、 $Ad\alpha$ (1 Hz 前後)のものと区別して示すこと

にしている。

図-3は第1次共振点附近で得られた最大全振幅を、設置した内部円筒の種類、円筒の上下位置、平均水深ごとにプロットし、内部円筒を設置しなかった場合の最大全振幅と比較したものである。

図-4は第2次共振点附近で得られた最大全振幅について同様なプロットを行なったものである。

これらの図より、内部円筒の動揺防止効果について、以下の事項が指摘される。

①：第1次共振点附近では、A β が最も水面の防止効果が優れ、設置しない場合に比し振幅は $1/4.5$ となる。②：内部円筒の直径に関しては大きい方が効果的であり、前述の回転運動も起り難い。③：内部円筒の上下位置に関しては、円筒を底面まで付けた方が、わずかに効果的である。④：水槽の平均水深が大きい程、最大振幅は上昇する。⑤：内部円筒の大きい場合には、孔径が小さいと1Hz附近より2Hz附近の最大振幅が大きくなり、内部円筒の径の小さい場合には逆の傾向になる。

⑥：第2次共振点附近では、全般的に第1次共振点附近程動揺に対する防止効果は顕著ではない。それでも最大振幅は0.6~0.7位に減少させることが出来る。⑦：すべての実験条件を通じて、最も効果的な内部円筒の型式はA β あるいはA β である。

水槽の構造設計上、最も偏圧のかかるのは第1次共振点附近であるので、これに対してはA β は十分その機能を発揮しているものと見なされる。一方、第2次共振点附近では、短い波長の波が円周方向に相互に反対方向に伝わり、両者の衝突によって波高が瞬間的に高くなる性質を持つ。これに対しては、天井の付根に波返しを設けるか、天井の構造を丈夫にするかの対策を施すことが考えられる。あるいは、円周方向に直角にいくつかの隔壁を設けることにより、動揺を防止することが考えられるが、この点についてはさらに実験を進めつつある。

本研究を実施するにあたって、文部省科学研費、(一般研究A代表者岡本銈三教授)の補助を受けた。また、実験および計算にあたり村計佐道技官および名倉直行、海老名行男両氏ならびに大成建設設計部より多大の協力を得たので、この機会に関係各位に謝意を表する次第である。

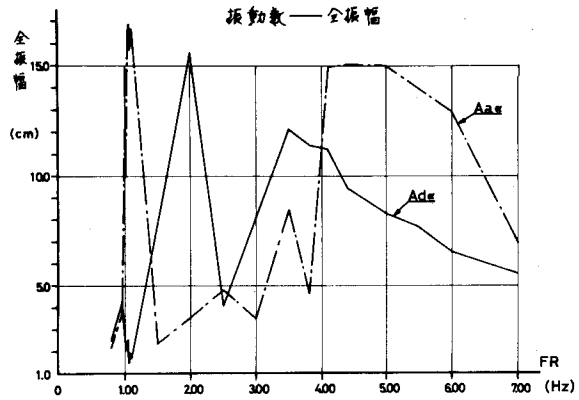


図-3 内部円筒を設置した時の共振特性

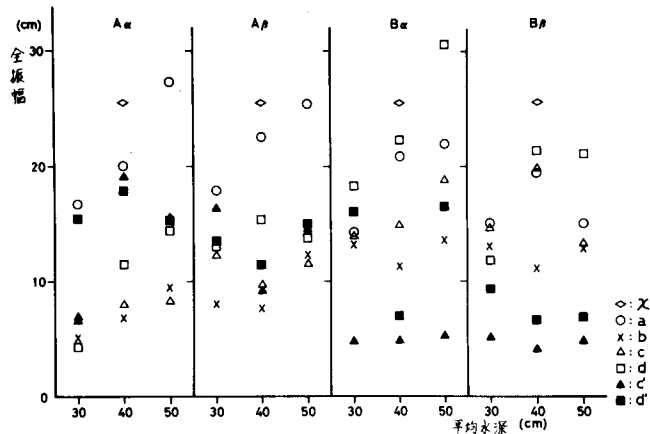


図-4 第1次共振点附近の全振幅と内部円筒との関係

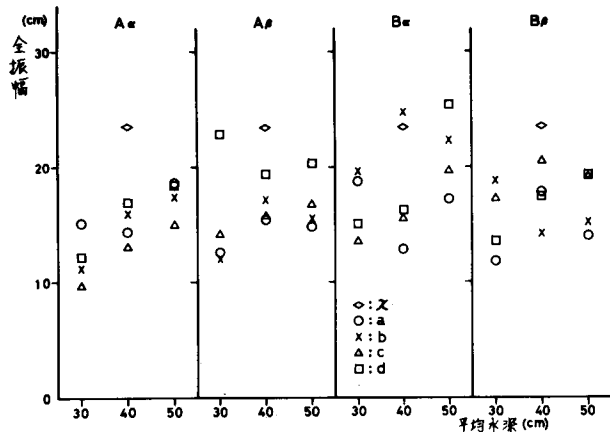


図-5 第2次共振点附近の全振幅と内部円筒との関係