

水平加振を受ける偏心二重円筒タンク内容液の動的挙動

Dynamic responses of a liquid in annular and cylindrical tanks with not co-axis
subjected to forced horizontal oscillation

高西照彦*・水田洋司**・川口周作***

Teruhiko Takanishi, Yoji Mizuta and Shusaku Kawaguchi

* 工博 九州工業大学名誉教授 (〒805-0035 北九州市八幡東区山路2丁目4-8)

** 工博 九州産業大学工学部教授 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

*** 新日本製鐵(株)水道施設部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

Theoretical analysis of forced horizontal oscillation of a liquid in annular and cylindrical tanks with not co-axis was carried out by applying bipolar coordinate transform and finite difference method. On the other hand, model of the dual circular cylindrical tanks was made of acrylic acid resin. The model was fixed on shaking table and was oscillated harmonically. Moreover, damped free vibration tests were carried out. Characteristic frequencies of liquid, damping constant, responses of wave height and dynamic water pressure on the tank wall were measured. Analytical results obtained by numerical calculation agreed well with experimental results obtained by using shaking table.

Key Words: annular and cylindrical tanks, vibration analysis, experiment.

1. まえがき

既設の水道用円筒形配水タンクに対して、敷地の有効利用の観点から、耐震補強及び容量の増加を目的として、その外側周りに、さらにもう一つの円筒タンクを築造し、全体として二重円筒タンク(図-1参照)を構成して使用に供する場合がある¹⁾。このとき二重円筒タンクの内槽と外槽の中心軸が一致せず、偏心が生じている場合に、それが地震による水平振動を受けたとき、その内容液の動的挙動を明らかにすることは、この種のタンクの耐震性を考える上に必要なことである。

本論は、偏心二重円筒タンクが水平方向の調和加振を受けたとき、内槽と外槽とに囲まれた領域に存在する内容液の動的挙動を明らかにすることを目的として、まず、双極座標変換と差分法とを用いた理論解析を行った。つぎに、アクリル樹脂製の大小2個の円筒を使って偏心二重円筒を構成し、内容液として水を用いて、これを振動台上に固定して水平方向の調和加振実験と減衰自由振動実験を行い、内容液の固有振動数、減衰定数を求め、さらに、円筒タンクの壁面上の動水圧を計測した。最後に、理論解析によって得られた結果と振動実験によって得られた結果とを比較して、両者が良く一致することを確かめることによって、理論解析の有用性を示した。

単一円筒タンク内容液の動的挙動に対する理論的・実験的研究については、これまでに線形及び非線形の両方面に渡って数多くの研究成果が公表されている^{2)~6)}。また、二重円筒タンク内容液の動的挙動については、同心の場合に対する理論的及び実験的研究が M. Aslam 他⁷⁾によってなされているが、偏心二重円筒タンクに関しては、著者等の知る限りにおいては研究がなされてい

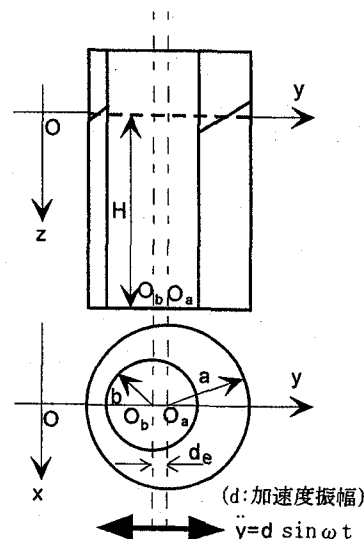


図-1 偏心二重円筒タンク

いようである。

本論では、偏心二重円筒タンクの内槽と外槽に囲まれた領域に存在する内容液の水平方向のスロッシングに対する動的挙動を明らかにすることがその目的であるから、考慮しなければならない振動数の上限値は比較的低い（高々1.5Hz）ので、いまの場合、円筒タンク自体の弾性変形は小さいとしてこれを無視することにした。

2. 解析理論

2.1 基礎方程式

解析に際しては、次のような仮定を採用した。すなわち、内容液の変位は小さく、したがって、線形理論が適用できる。また、円筒タンクは剛である。さらに、その内容液は非圧縮、非粘性で非回転である。

上記の仮定を採用したとき、図-1に示すように、二重円筒タンクの内槽と外槽に囲まれた領域に存在する内容液の運動を支配する微分方程式は、 φ を速度ポテンシャルとして、次のラプラスの方程式で表される。

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

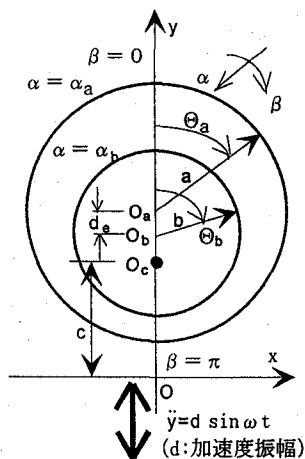


図-2 双極座標

いま、図-2に示すように、直角座標で表した式(1)に対して、 z 座標はそのままにして、 x, y 座標に変換

$$\alpha + i\beta = \log \frac{x + i(y+c)}{x + i(y-c)} \quad (2)$$

を施せば、それは双極座標 α, β を用いて次式のように表すことができる。

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

ここに、 i は虚数単位、 $1/h$ は写像拡大率で

$$h = \frac{1}{c} (\cosh \alpha - \cos \beta) \quad (4)$$

また、 c は図-2に示すように、 y 軸上の定点 O_c までの距離であり、 d_c を2つのタンク間の偏心距離とすれば

$$c = \frac{1}{2d_c} \sqrt{\{(a+b)^2 - d_c^2\} \{(a-b)^2 - d_c^2\}} \quad (5)$$

本論では、後述の実験条件に合わせて、加振方向を、図-2に示すように、2個の円筒のそれぞれの中心軸を結ぶ方向（ y 軸方向）とした。このとき加振速度を $\dot{y}(t)$ とすれば、境界条件式は次のようになる。

$$(i) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (z = -H) \quad (6)$$

$$(ii) \quad h \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} = -\dot{y}(t) \cos \Theta \quad (7)$$

$$(\alpha = \alpha_a, \alpha_b \text{ のとき } \Theta = \Theta_a, \Theta_b)$$

$$(iii) \quad g \text{ を重力の加速度として}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (z = 0) \quad (8)$$

ここに、 α_a, α_b はそれぞれ外槽及び内槽の壁面の位置を表す。また、 Θ_a, Θ_b は図-2に示すように、それぞれ外槽及び内槽の中心軸を中心として、 y 軸から右回りの角を表している。

2.2 方程式の解

いま、式(3)の φ は2つの速度ポテンシャルの和から成っているとして

$$\varphi = \varphi_A(\alpha, \beta) + \varphi_B(\alpha, \beta, z) \quad (9)$$

とおき、 φ_A は微分方程式

$$\frac{\partial^2 \varphi_A}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi_A}{\partial \beta^2} = 0 \quad (10)$$

の解であり、次の境界条件を満足するように定める。

$$h \frac{\partial \varphi_A}{\partial \alpha} = -\dot{y}(t) \cos \Theta \quad (11)$$

$$(\alpha = \alpha_a, \alpha_b \text{ のとき } \Theta = \Theta_a, \Theta_b)$$

また、 φ_B は

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_B}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi_B}{\partial \beta^2} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_B}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

の解であり、次の境界条件を満足するように定める。

$$\frac{\partial \phi_B}{\partial \alpha} = 0, \quad (\alpha = \alpha_a, \alpha_b) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi_B}{\partial z} = 0, \quad (z = -H) \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_B}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_B}{\partial z} = -\frac{\partial^2 \phi_A}{\partial t^2}, \quad (z = 0) \quad (15)$$

まず、式(10), (11)を満たす解 ϕ_A は次式で与えられる。

$$\phi_A = c \left(\frac{\sinh \alpha}{\cosh \alpha - \cos \beta} - 1 \right) \dot{y}(t) \quad (16)$$

次に、 ϕ_B については、式(14)の条件を満たす解を

$$\phi_B = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \phi_m(\alpha, \beta) \cosh \xi_m(z+H) T_m(t) \quad (17)$$

とおき、これを式(12), (13)に代入することによって、次に示すような $\phi_m(\alpha, \beta)$ に関する微分方程式及び境界条件式を得る。

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial \beta^2} \right) + \xi_m^2 \phi_m = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \phi_m}{\partial \alpha} = 0, \quad (\alpha = \alpha_a, \alpha_b) \quad (19)$$

式(17)において D_m は未定定数であり、 $T_m(t)$ は時間の関数である。また、 ξ_m は式(18)より明らかなように、 m 次の固有関数 $\phi_m(\alpha, \beta)$ に対する固有値を表している。いま、未定定数 D_m については、 ϕ_m が与えられたとき、式(15)の境界条件を考慮して

$$\sum_{m=1}^{\infty} D_m \phi_m(\alpha, \beta) = \frac{cg}{2} \left(\frac{\sinh \alpha}{\cosh \alpha - \cos \beta} - 1 \right) \quad (20)$$

が成立するように定めれば、 $T_m(t)$ は式(15)から次の微分方程式を満足するように定めればよいことになる。

$$\ddot{T}_m + 2h_m \omega_m \dot{T}_m + \omega_m^2 T_m = -\frac{2}{g \cosh \xi_m H} \ddot{y}(t) \quad (21)$$

ここに、 ω_m は内容液の m 次の固有円振動数で、 ξ_m を用いて次式によって与えられる。

$$\omega_m^2 = g \xi_m \tanh \xi_m H \quad (22)$$

なお、式(21)においては、実用性を考慮して、左辺第2項に減衰項を加えている。ここに、 h_m は m 次の減衰

定数を表す。

上記の所論から、結局、式(19)の境界条件の下で式(18)を満たす ϕ_m 及び ξ_m さえ得られれば、式(20)から D_m が定められるので、内容液の速度ポテンシャル ϕ は式(9), (16), (17)を用いてこれを求めることができる。

2.3 差分方程式及びその解

式(18)を満たす ϕ_m の解析解を求めることは困難であるから、本論ではそれを差分法によって求めることにした。

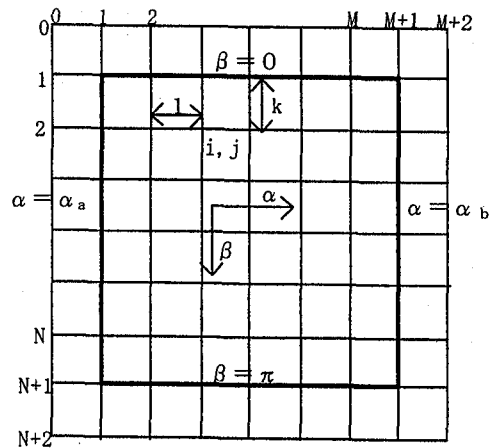


図-3 解析領域とその要素分割

ϕ_m に関してその解析の対象となる領域は、現象の対称性を考慮すれば、図-2において $\alpha = \alpha_a$ 及び α_b 並びに $\beta = 0$ 及び π によって囲まれた領域であるが、この領域は式(2)の座標変換によって、図-3に示すような長方形の領域に変換されている。いま、この領域を α 方向に M 等分、 β 方向に N 等分すれば、分割された小領域の大きさは $l = (\alpha_b - \alpha_a)/M$ 、 $k = \pi/N$ となる。

いま、式(18)において添字 m を省略し、さらに点 (i, j) における ϕ の値 $\phi(\alpha_i, \beta_j)$ を $\phi_{i,j}$ と略記すれば、式(18)は次に示すような差分方程式で近似される。

$$h_{i,j}^2 \left(\frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{l^2} + \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{k^2} \right) + \xi^2 \phi_{i,j} = 0 \quad (23)$$

$$(i = 1, 2, \dots, M+1, \quad j = 1, 2, \dots, N+1)$$

ここに、 $h_{i,j}$ は点 (i,j) における写像拡大率の逆数で、
式(4)より

$$h_{i,j} = \frac{1}{c} (\cosh \alpha_i - \cos \beta_j) \quad (24)$$

また、式(19)の境界条件式は

$$\phi_{0,j} = \phi_{2,j} \quad \text{及び} \quad \phi_{M,j} = \phi_{M+2,j} \quad (25)$$

$$(j=1,2,\dots,N+1)$$

さらに、対称振動の場合には $\beta=0$ 及び $\beta=\pi$ において

$$\phi_{i,0} = \phi_{i,2} \quad \text{及び} \quad \phi_{i,N} = \phi_{i,N+2} \quad (26)$$

逆対称振動の場合には

$$\phi_{i,0} = -\phi_{i,2} \quad \text{及び} \quad \phi_{i,N} = -\phi_{i,N+2} \quad (27)$$

$$(i=1,2,\dots,M+1)$$

を用いればよい。

式(23)から $\phi_{i,j}$ に関する連立同次方程式(固有方程式)を構成し、それを境界条件式(25)の下に、式(26)或いは(27)の場合について解けば、 m 次の固有値 ξ_m 及び離散量で与えられた固有関数 $\phi_m(\alpha_i, \beta_j)$ が得られる。ここに、 m は $m=1,2,\dots,(M+1)(N+1)$ である。

2.4 波高及び壁面動水圧

式(9),(16),(17)を用いれば、図-3における点 (i,j) の速度ポテンシャルは次のように表される。

$$\varphi(\alpha_i, \beta_j, z, t) = c \left(\frac{\sinh \alpha_i}{\cosh \alpha_i - \cos \beta_j} - 1 \right) \dot{y}(t) + \sum_{m=1}^{M_m} D_m \phi_m(\alpha_i, \beta_j) \cosh \xi_m(z+H) T_m(t) \quad (28)$$

ここに、 M_m は、 φ を要求された精度まで算出するのに必要な固有関数 ϕ_m の採用数であり、 $M_m \leq (M+1) \cdot (N+1)$ である。

φ を用いれば、波高は次式で与えられる。

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (z=0) \quad (29)$$

いま、 d を加速度振幅として、偏心二重円筒に対する入力加速度が

$$\ddot{y}(t) = d \sin \omega t \quad (30)$$

で表される調和波であるとき、振動方向の外槽壁面上における波高応答を示せば次の通りである。

$$\eta(\alpha_a, 0, t) = -\frac{dc}{g} \left(\frac{\sinh \alpha_a}{\cosh \alpha_a - 1} - 1 \right) \sin \omega t - \frac{2d}{g^2} \sum_{m=1}^{M_m} \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 D_m \phi_m(\alpha_a, 0) \cdot (F_m \sin \omega t - G_m \cos \omega t) \quad (31)$$

ここに、

$$A_m = \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2h_m \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right) \right\}^2 \quad (32)$$

とすれば

$$F_m = \frac{1}{A_m} \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 \right\} \quad (33)$$

$$G_m = \frac{1}{A_m} \left\{ 2h_m \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right) \right\} \quad (34)$$

次に、壁面動水圧強度は次式で与えられる。

$$\sigma = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (\alpha = \alpha_a, \alpha_b) \quad (35)$$

これより、振動方向の外槽壁面上における動水圧強度を求めるには、式(35)において、 $\alpha = \alpha_a, \beta = 0$ とおけばよい。

入力加速度が式(30)で与えられる場合については

$$\sigma(\alpha_a, 0, z, t) = -\rho dc \left(\frac{\sinh \alpha_a}{\cosh \alpha_a - 1} - 1 \right) \sin \omega t - \frac{2\rho d}{g} \sum_{m=1}^{M_m} \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 D_m \phi_m(\alpha_a, 0) \frac{\cosh \xi_m(z+H)}{\cosh \xi_m H} \cdot (F_m \sin \omega t - G_m \cos \omega t) \quad (36)$$

また、振動方向の全壁面動水圧は次式によって求められる。

$$P_y = \int_{-H}^0 \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} \sigma(\alpha_a, \beta, z, t) a \cos \Theta_a d\Theta_a - \sigma(\alpha_b, \beta, z, t) b \cos \Theta_b d\Theta_b \right\} dz \quad (37)$$

ここに、 a, b はそれぞれ外槽及び内槽の半径である。

また、 Θ と α, β の関係は次式で与えられる。

$$\cos \Theta = \frac{\cosh \alpha \cos \beta - 1}{\cosh \alpha - \cos \beta}, \quad (\Theta = \Theta_a, \Theta_b) \quad (38)$$

式(37)において、まず z の積分を実行し、次に式(38)の關係を用いて積分変数を Θ から β に変換した後、若干の演算を行えば、式(37)は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
P_y = & -\pi\rho H(a^2 - b^2)\ddot{y}(t) \\
& -\rho c H \sum_{m=1}^{M_m} D_m \frac{\sinh \xi_m H}{\xi_m H} \dot{T}_m(t) \\
& \cdot \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \phi_m(\alpha_a, \beta) \frac{\cosh \alpha_a \cos \beta - 1}{(\cosh \alpha_a - \cos \beta)^2} \right. \\
& \left. - \phi_m(\alpha_b, \beta) \frac{\cosh \alpha_b \cos \beta - 1}{(\cosh \alpha_b - \cos \beta)^2} \right\} d\beta \quad (39)
\end{aligned}$$

入力加速度が式(30)で表される場合については、次のようになる。

$$\begin{aligned}
P_y = & -\pi\rho d H(a^2 - b^2) \sin \omega t \\
& -\frac{2\rho c d H}{g} \sum_{m=1}^{M_m} \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 D_m \frac{\tanh \xi_m H}{\xi_m H} (F_m \sin \omega t \\
& - G_m \cos \omega t) \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ \phi_m(\alpha_a, \beta) \frac{\cosh \alpha_a \cos \beta - 1}{(\cosh \alpha_a - \cos \beta)^2} \right. \\
& \left. - \phi_m(\alpha_b, \beta) \frac{\cosh \alpha_b \cos \beta - 1}{(\cosh \alpha_b - \cos \beta)^2} \right\} d\beta \quad (40)
\end{aligned}$$

なお、式(40)における β に関する積分については、 $\phi_m(\alpha, \beta)$ が離散量で与えられることを考慮して、本論では台形則による数値積分法を用いてその積分値を求めた。

3. 定常振動実験

偏心二重円筒タンク内容液の動的挙動を実験的に明らかにするために、実物の約1/20の模型を作製し、これを振動台上に固定して、定常調和加振実験及び減衰自由振動実験を行った。

3.1 実験装置

実験に用いた二重円筒タンクは厚さ1cmの亚克力樹脂製で、外槽の内半径は $a = 0.39\text{m}$ 、内槽の外半径は $b = 0.3\text{m}$ 、高さは0.8mである。内容液としては水を用い、これを内槽と外槽の間に満たした。水深は $H = 0.5\text{m}$ とした。2つの円筒タンク間の偏心は、内槽底面の中心から振動方向に刻まれた細い溝に沿って内槽をスライドさせることによって行い、規定の距離だけ偏心させた後、固定ボルトで内、外槽を互いに固定した(図-4参照)。

動水圧の測定には容量20kPaの水圧計(共和電業製、PSS-02KBF)を用いた。この水圧計を図-4に示すように、それぞれ外槽の内壁及び内槽の外壁に、底面から0, 20, 40cmの位置に3個ずつ合計6個取りつけた。また、振動方向に合わせてデジタルビデオカメラ(SONY製、DCR-TRV10)を設置した。円筒容器の壁面上には静止水面の位置を中心として、その上下に5mm間隔の目盛が刻まれており、これはビデオカメラの記録から壁面波高を読み取るのに利用される。波形をできるだけ鮮明に記

録するために、入浴剤を用いて内容液を青色に着色した。

振動台は動電式2軸同時振動試験装置(IMV社製、DS-2000-15L)を用いた。その加振力は水平・鉛直の両方向共に19.6kNである。

3.2 実験概要

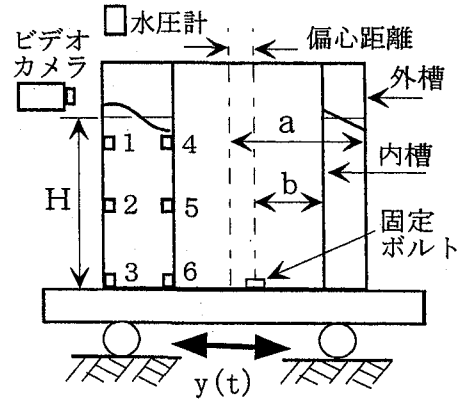


図-4 振動台上に固定された実験装置

図-4に示すように、偏心方向が振動方向に一致するように、偏心二重円筒タンク模型を振動台上に固定して、水平方向に入力加速度2Gal、加振振動数範囲0.5~1.1Hzに渡って、振動数間隔0.02Hz毎に定常調和加振を行った。このとき、タンク壁面上の動水圧を計測し、得られた記録から動水圧の共振曲線を求めた。この振動数の範囲においては亚克力樹脂製タンクは剛だと考えてもよい。また、デジタルカメラを用いて自由表面波形の時間的変化を記録し、これより壁面波高を読み取り、波高の共振曲線を求めた。さらに、内容液の固有振動数と減衰定数を求める目的で、1次の共振振動数(スロッシングの1次の共振点)において減衰自由振動実験を行った。得られた記録をフーリエスペクトル解析することによって、必要な値を求めた。

振動実験において採用した偏心二重円筒タンクの偏心距離は0cm(同心)、 ± 1 、 ± 2 、 ± 4 cmの合計7通りである。また、水深は50cmとした。

4. 実験結果及び数値計算結果との比較

4.1 数値計算について

式(23)で表される差分方程式の数値計算に際しては、図-3に示した解析領域についてこれを長方形要素に分割した。分割数については、種々試算の結果、 α 方向を7等分($M=7$)、 β 方向を19等分($N=19$)に分割した場合を採用すれば、実験値と比較するために必要な精度として十分であることが判った。なお、数値計算で採用した固有関数の個数(M_m)は僅か5でよかった。

4.2 固有振動数及び減衰定数

表-1 円筒タンク内容液の固有振動数
及び減衰定数

偏心距離 (cm)	固有振動数 (Hz)		減衰定数
	実験値	理論値	
0	0.80	0.8042	0.005 ~0.007
1	0.80	0.8049	
2	0.81	0.8091	
3	0.82	0.8165	
4	0.83	0.8274	

壁面動水圧の減衰自由振動実験によって得られた偏心二重円筒タンク内容液の固有振動数と減衰定数及び強制振動実験によって得られた固有振動数を表-1に示す。固有振動数に関しては、自由振動実験と強制振動実験によって求めた値は実験精度の範囲内で互いに良く一致していると思ふことが出来たので、それらを纏めて1つの実験値として示した。表-1には比較のため、数値計算によって求めた固有振動数も示してある。

同表から、固有振動数に関しては実験値と理論値とがよく一致しているといえる。

減衰定数に関しては、偏心距離の違いによる顕著な差は認められず、それらはいずれも0.005~0.007の範囲の値であった。

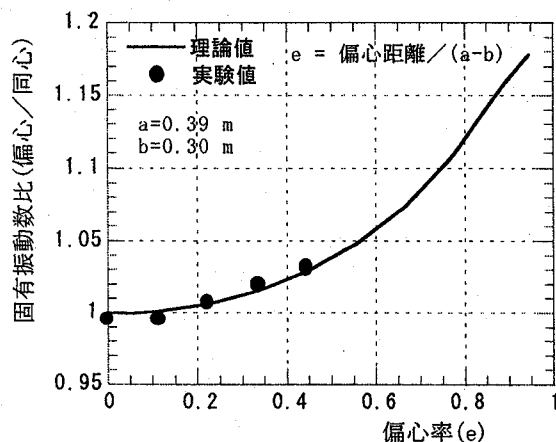


図-5 偏心率と固有振動数比の関係

図-5に偏心率と固有振動数比との関係を示す。図中●印は実験値である。ここに、偏心率 e は両円筒タンクの半径の差に対する偏心距離の比として定義した値である。すなわち、

$$e = \frac{d_e}{a-b} \quad (41)$$

また、固有振動数比は、同心二重円筒タンク内容液の固有振動数に対する偏心二重円筒タンク内容液のそれである。

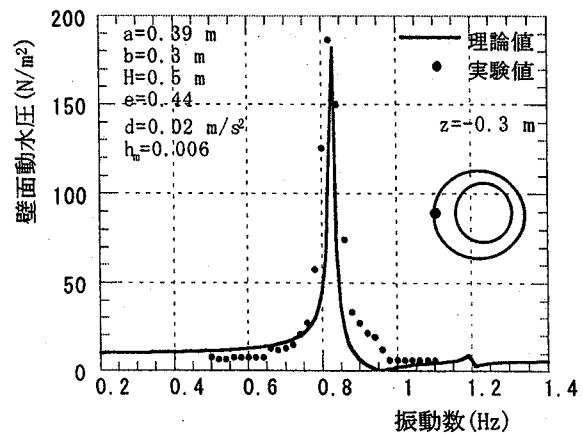


図-6 外槽内壁面上の動水圧強度の応答曲線1

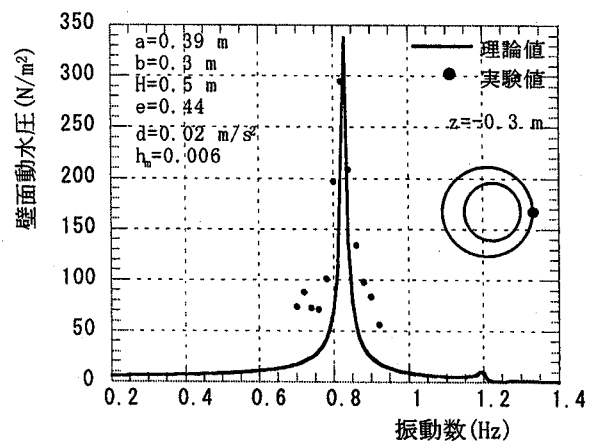


図-7 外槽内壁面上の動水圧強度の応答曲線2

図-5から、偏心率が增大するに従って固有振動数比も増大し、それは、大凡2次関数的であることがわかる。いまの場合、偏心率の値が小さいとき、例えば、それが0.2以下であるようなときは、その固有振動数は同心の場合のそれとほとんど変わらないといってもよい。

4.3 壁面動水圧の応答曲線

図-6,7に一例として、偏心距離が $d_e = 4$ cmで、水深が $z = -0.3$ mにおける振動方向の外槽内壁面上の動水圧強度の共振曲線を示す。図-6は外槽壁と内槽壁との間隔が広い側の結果であり、図-7はそれが狭い側の結果である。●印は実験値を示している。理論値の計算に際しては、表-1を参考にして、減衰定数の値として $h_m = 0.006$ を採用した。

両図に示された結果から、本理論によって得られた共振曲線は実験によって得られたそれによく一致している

といえる。

図-8は、偏心距離が4 cm の場合に対する振動方向の全壁面動水圧の共振曲線の理論値を示したものである。

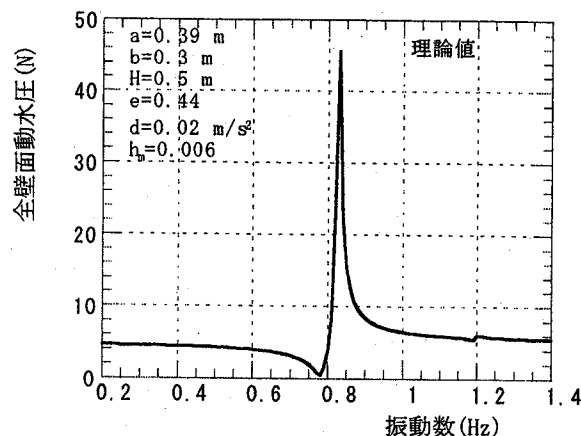


図-8 全壁面動水圧の応答曲線

同図から、壁面動水圧が大きく変化するのはスロッシングの1次の共振振動数の近傍のみに限られていることがわかる。したがって、低振動数領域における偏心二重円筒タンクの耐震性について考える場合には、単円筒或いは同心二重円筒タンクの場合と同様に、内容液の1次のスロッシング振動のみを考察の対象とすればよいことになる。

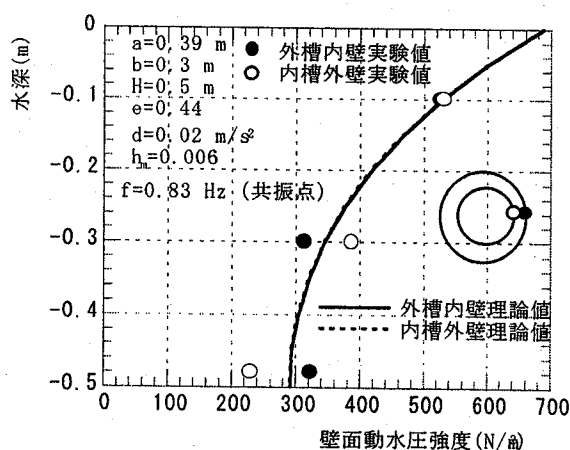


図-9 動水圧強度の深さ方向分布

図-9は偏心距離が4 cm のとき、加振振動数を0.83 Hz (共振振動数) とした場合について、外槽内壁面上の動水圧強度の深さ方向の分布曲線を示したものである。●及び○印が実験値を示している。同図から、水深の深い所で理論値との差が多少生じているが、全体としてこの場合も実験値は理論値から得られた分布曲線に比較的良好に乗っていることがわかる。

4.4 波高の応答曲線

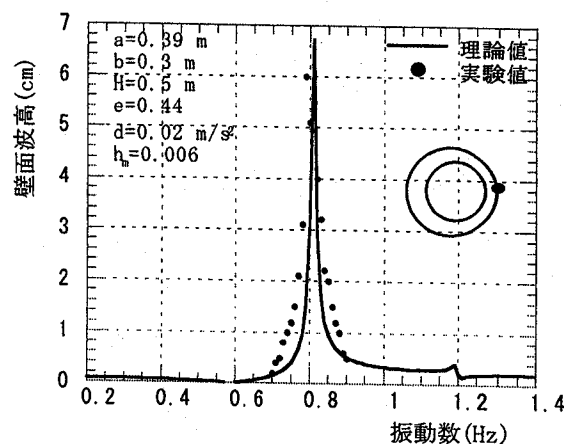


図-10 表面波高の応答曲線

図-10は、振動方向の外槽の内壁面における表面波高の共振曲線を示したものである。これは内槽壁と外槽壁との間隔が狭い側において得られた結果である。●印はデジタルビデオカメラの画像から読み取った壁面波高である。この実験値は最小目盛が5 mm のスケールを用いて、画像から、目視によって波高の頂点の位置を読み取って得られた値であるため、実験値には多少の読み取り誤差が含まれているだろうことを考慮すれば、実験結果と本論による計算結果とは比較的良好に一致しているといえよう。

なお、本論では実験結果について、その一部だけしか示さなかったが、ここでは示さなかった他の実験条件の場合についても、実験結果と本論による数値計算結果とは、ここで示したのと同程度に両者は一致しているといえる。

5. おわりに

本論では、まず、偏心二重円筒タンク内容液が偏心方向に水平調和加振を受ける場合に、その内容液の動的挙動を双極座標変換と差分法を用いて理論的に解析する方法を示し、つぎに、アクリル樹脂を用いて偏心二重円筒タンク模型を作成し、これを振動台上に固定して、定常調和加振実験及びスロッシングの1次共振点における減衰自由振動実験を行うことによって、内容液の固有振動数と減衰定数を求め、さらに振動によって生ずるタンクの壁面動水圧及び壁面波高を計測し、最後に、理論に基づく数値計算結果と実験によって得られた結果とを比較し、検討を行った。

得られた結果を纏めると以下の通りである。

- (1) 水平加振を受ける偏心二重円筒タンク内容液の動的挙動を、双極座標変換と差分法を用いて理論的に

解析する方法を示した。

- (2) アクリル樹脂製の偏心二重円筒タンク模型を用いて、水深を一定とし、偏心距離を種々変化させた場合について、水平方向の定常調和加振実験を行い、内槽タンク外壁と外槽タンク内壁上に取り付けた水圧計によって内容液の動水圧を計測して、共振曲線を求め、これを理論解析の結果と比較して、両者がよく一致することを示した。

また、タンク壁面上の動水圧の分布形状についても、実験結果と理論解析結果とは比較的よく一致していることを示した。

- (3) 偏心二重円筒タンク模型の減衰自由振動実験を行い、内容液の固有振動数と減衰定数を求めた。固有振動数については、偏心距離を4段階に変えたいずれの場合についても、理論解析の結果とよく一致することを示した。

減衰定数については、偏心距離の違いにはほとんど関係なく、0.005~0.007の値が得られた。

- (4) 上記のことから、本論で示した解析法の有用性が示されたといってもよいであろう。

なお、本論の解析法に従えば、深さ方向(z方向)の座標を分離し、双極座標変換を利用することによって、長方形領域に対する2次元の差分方程式を解くだけで、偏心を有する二重円筒タンク内容液の3次元動的挙動を明らかにすることができ、しかも有限要素法等を用いた計算法に比べて、数値計算に必

要な時間が少なくて済むという利点があることを付言する。

参考文献

- 1) 成田幸生 他：既設配水池周りの用地を活用した「大谷低区配水池増設工事」の計画，51回全国水道研究発表会講演集，2000.5.
- 2) 池田駿介・秋山成興・中村広昭・白井伸一：円筒タンク内の液体動揺に関する研究，土木学会論文報告集，第290号，1979.10.
- 3) Housner, G. W. : Dynamic pressures on accelerated fluid containers, Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 47, 1957.
- 4) 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，Vol. 26, No. 7, 1977.
- 5) 大森博司・松井徹哉，日比野浩：液体貯槽における有限振幅液面動揺に関する研究（その1）基礎方程式の誘導とその円筒形貯槽への適用，日本建築学会構造系論文報告集，第375号，1987.5.
- 6) 大森博司・松井徹哉，日比野浩・加藤啓一：液体貯槽における有限振幅液面動揺に関する研究（その2）円筒形模型貯槽の定常加振実験，日本建築学会構造系論文報告集，第380号，1987.10.
- 7) Aslam, M. ,Godden, W. G. and Scalise, D. T. : Earthquake sloshing in annular and cylindrical tanks, Proc. ASCE. , Vol. 105, No. EM3, 1979.6.

(2002年9月13日受付)