動揺する角型タンク内の動的水圧—II

木村 隆一*・今枝 彬郎*

Dynamic Pressure in Oscillating Rectangular Tank—II

Ryuichi KIMURA and Yoshiro IMAEDA

Abstract

Dynamic pressure of water on the wall was measured using a rigid rectangular model tank (Dimension: 100 cm×100 cm×30 cm) which was forced to roll with constant amplitude of 6 degrees.

A series of experiments were made for a numerous combinations of three factors: water levels (WL), the oscillation periods(T) and the distance(D) between the center of oscillation and that of the tank.

The effect of the said distance D appears to prevail over that of the water levels(WL) and period(T).

That is, the more D is increased,

- i) the larger the dynamic pressure grows over the wider area of the wall.
- ii) the larger the dynamic pressure begins to the exert at larger period(T) compared to the resonance period.

1. はじめに

我々は先に発表した論文¹⁾において模型タンクの側壁部、天井部に圧力計を取り付け、タンクにかかる動圧の分布等を実測し報告した。

前報では水位を 90%, 60%, 30% と変え動揺周期も種々に変えて実測した。その結果いずれの場合でも静水面付近の側壁の位置で大きな動圧を発生し、また衝撃圧が発生する場合では水位が変わることにより衝撃圧発生機構が異なることがわかった。

しかし前報の実験では動揺試験装置の構造上、タンクの底が動揺台の動揺中心より 38 cm 上にある場合しか実験出来なかった。

今回、我々はこの動揺試験装置に鉄骨の枠組を設けタンクをその枠に沿って上下出来るようにした。したがって動揺中心とタンク中心との距離を種々に変化させることが可能となった。

本論文では主にタンクと動揺中心との距離に着目して水位、動揺周期を種々に変えた時のタンク内に発生する動圧について考察した。

2. 実験

2.1 動揺装置

実験は前報で使用した動揺試験装置を用いた。図1に示すように動揺装置の載貨台の左端に鉄骨の枠組を設け、枠組内にタンクを置くようにした。タンクは枠組内で上下に移動出来るようになっているためタンク中心と動揺中心とは 80 cm 程自由に換えられるようになった。またタンクを最下端まで下降させた時はタンク中心と動

* 正会員 神戸商船大学 (神戸市東灘区深江南町5丁目 1-1)

図 1 動揺装置

図 1 に示す模型タンクはほとんど透明塩ビ板を使用している。周辺部に補強材の L 型アングルを用いているがタンク内壁はタンクの両端部よりそれぞれ 10 cm 内側に設けたため液体の運動する部分は十分観察出来るようになっている。

圧力計はこの内壁に取り付けるようにした。そして圧力計はこの側面上において垂直方向であればどの位置にでも、また複数個でも固定出来るようになっている。

3. 実験結果

3.1 水位変化

図 1 に示す動揺中心軸 A—A に対し、左端の模型タンクを上下に移動して、タンクの位置を 3 段階に変化させた。それぞれのタンクを固定した位置で水位を変えた時の圧力特性を図 3 に示した。図中の z_1 , z_2 , z_3 はタンクがどの位置にあったかを表わしたものである。(z_1 : タンク中心と動揺中心が一致した時, z_2 : 動揺中心から上方 35 cm にタンク中心がある時, z_3 : 動揺中心から上方 80 cm にタンク中心がある時) 横軸はタンクの高さ 1000 mm を 100% としてタンクに満たした水の高さを % 表示している。縦軸は動圧 ΔP をタンク幅 $2a$ で無次元化した値を示している。動揺周期は $T/T_n=1.0$ と 1.1 (T : 強制動揺周期, T_n : タンク内の流体の自然固有周期) の場合を図 3 の上図と下図に示した。圧力の測定場所は側壁上で液面の位置とした。

タンクが z_1 の位置にある時は図 3 の上図, 下図共に ($T/T_n=1.0, 1.1$ の場合) 水位 10% から水位 90% まで特に高い圧力を出す水位はなくほぼ一定の低い値となっている。その最高値でも 0.3 位の値である。しかし、タンクを上昇させて z_2 の位置になると水位によって圧力の値が大きく変わるようになる。上図 $T/T_n=1.0$ の場合、水位 20% の所で $\Delta P/2a$ が 2.2 程度の非常に大きな値を示している。又水位 90% でも 0.6 程の圧力となっている。

図 3 の下図において、 z_2 で $T/T_n=1.1$ では水位 20%, 50%, 90% で高い圧力を出している。水位 20% の時は $T/T_n=1.0$ と比べると急激に減少して 0.6 位の値になっている。さらにタンクを上昇させた z_3 の位置では $T/T_n=1.0$ の時、水位 60% から 90% まで 0.6~1.0 位の高い圧力を発生している。水位 20% でも 0.6 位の値を示している。 $T/T_n=1.1$ になると水位 20% で特に高い 3.0 に近い値を示す。水位 30% から水位 90% までは大体 0.6~0.8 程度の値となっている。

これらのことよりタンクが z_1 の位置ではどの水位においてもあまり大きな圧力はとらないが z_2 になると特に高い圧力を出す水位 20% および 50%, 90% という高い圧力を出す水位があることがわかる。そして z_3 になるとどの水位でも全体的に高い圧力を出すようになる。

3.2 タンク位置の変化

揺動中心が一致するようになっている。

この動揺装置は上下動、縦揺れ、横揺れ等の動きをさせることが出来るが今回の実験では横揺れのみを使用した。この動揺装置で横揺れとは図中の A—A 軸の回りに回転することを言う。

2.2 模型タンク

実験には図 2 に示すような模型タンクを製作した。前回使用したタンクは鉄板製で正面に透明塩ビ板を用いたが、その正面においても透明塩ビ板の取付部があったためタンクの正面周辺部では液体の動きを観察出来なかった。図 2

図 2 模型タンク

図 3 水位変化

図 4 タンク位置の変化 (水位 90%, 60%, 30%)

図 5 タンク位置の変化 (水位 20%)

水位を一定にしてタンクの位置を動揺中心に対して連続的に変化させた時の圧力変化を図 4, 図 5 に示す。図 4 には水位を 30%, 60%, 90% とそれぞれ一定水位のもとで行なった実験結果を示す。水位 20% の場合は図 3 でもわかるように特に高い圧力を示すので別に図 5 として示している。

図 4, 図 5 の横軸は、動揺中心からタンク中心までの距離である。従って横軸の 0 は動揺中心とタンク中心が一致した時であり、右端の 80 はタンクが動揺中心より上方に最も離れた時である。なお横軸上の z_1, z_2, z_3 は図 3 のようにタンクの位置を固定して実験したときのタンクの位置を示している。縦軸は動圧 ΔP を無次元化した値である。圧力計はいずれも側壁の静水面の位置に取り付けて測定した。

図 4 において水位 30% の場合は $H=0$ の時圧力は約 0.2 で H が増加すると共に圧力も徐々に増加し、 $H=30$ から圧力上昇が少し大きくなる。これは水位 30%, $H=30$ cm の時、丁度水面と動揺中心が一致し、 $H=40$ cm では水面の方が動揺中心より上にくる。したがって、水の運動が $H=30$ を境に変わるためであると思われる。

水位 60% の場合も $H=0$ では圧力 0.2 程度である。 H の増加と共に $H=50$ 位までは圧力が徐々に増加する。 $H=50$ から $H=60$ の間で急激な圧力の増加がある。これは H の増加と共に水の動きが激しくなり、前報で報告した様にタンクの側壁面に沿って上昇した水が天井に沿って流れ次に天井から反対の壁に向かって激突する。つまり $H=50$ から $H=60$ の間でこの激突する現象が起きる。したがって $H=60$ では圧力が 0.8 程度の大きな値になる。

水位 90% では $H=0$ から $H=80$ まで大体一定の割合で圧力が増加している。水位 90% の時水面付近の大きな圧力は水面が天井に衝突することによって発生する衝撃圧によるものであることは前報でも述べた。したがって H の値が大きくなり水の動きが激しくなればそれだけ天井に当たる衝撃も強くなる。つまり水位 90% では水位 30% や水位 60% のように H の値によって水の動きが大きくなり壁に激突するような現象は生じないため大体一定の割合で圧力が増加する。

図 5 の水位 20% の場合、動揺周期は $T/T_n=1.0$, $T/T_n=1.05$, $T/T_n=1.1$ の三種類を示した。この図より水位 20% では H の値によって圧力は非常に大きな変化をすることがわかる。 $H=0$ から $H=20$ までは $T/T_n=1.0$, 1.05, 1.1 とともに圧力 0.2 程度の小さな値である。これは水位 30% のところでも述べたが、 $H=20$ の時は水面が動揺中心よりも下にあり水が動きにくいと考えられる。

$T/T_n=1.0$ で動揺させると $H=30$ 位から圧力は急激に増大し $H=35$ で最大値 2.2 程度の非常に大きな圧力を発生する。しかし H の値が 35 以上になると次第に圧力は減少して、 $H=80$ (z_3) の位置ではほぼ 0.6 前後の値になる。又 $T/T_n=1.05$ では $H=55$ 位で最大圧力 2.5 程の値をとっている。そして $T/T_n=1.1$ では H が最大の値をとる $H=80$ (タンクを最上端まで上昇させた時) で最大圧力 2.5 位の値となっている。このよ

うに動揺周期 (T/T_n) がおそくなると共に最大圧力を発生する所が H の値の大きい方へと変わっていくことがわかる。つまりタンクが動揺中心から離れるほど $T/T_n=1.0$ よりおそい周期で共振のようになり最大圧力を発生する。したがって $T/T_n=1.0$ の時は $H=35$ (z_2) の位置で最大圧力となっているにもかかわらず、動揺周期の少し違った $T/T_n=1.1$ では圧力 0.3 程度の非常に小さな値となっている。しかし $H=80$ においては逆に $T/T_n=1.1$ の方が大きい値になっている。

つまり動揺周期が $T/T_n=1.0$ の付近では少しの動揺周期の変化で圧力が非常に大きくなったり小さくなったりすることがわかる。したがって水位 20% の場合で動揺中心が水面より下にくると $T/T_n=1.0$ 付近では常に大きな圧力が発生するものと考えなければならないであろう。

3.3 タンクの側壁における圧力分布

3.3.1 水位 90%

3.2 の水位変化, 3.3 のタンク位置による圧力変化の実験はすべて圧力測定位置が静水面付近であった。ここでタンクの位置の変化によって側壁面上での圧力分布がどのようなかを考えてみる。図 6 は水位 90% の場合の圧力分布図である。縦軸はタンク高さ 1,000 mm を 100% としして圧力測定したタンクの側壁面上の高さ方向の位置を% 表示している。横軸は圧力を表している。図中の 1.0, 1.5……等の数字は動振周期を表しており T/T_n の値である。図中の●○△等の記号は発生した圧力が衝撃的な圧力であったことを表わす。また壁の位置 100% での圧力は天井部 (壁から 5 cm 離れた位置) において発生したものである。

図 6 ではタンク位置が 3 通りの場合を示している。上図はタンクの位置が z_3 (タンク中心が動揺中心より 80 cm 上にある) の場合である。中央の図はタンク中心が動揺中心より 35 cm 上にある z_2 の場合である。下図はタンク中

図 6 水位 90% 時の壁における圧力分布

心と動揺中心が一致した z_1 の場合である。

図6の3つの図を比べると明らかにタンク中心と動揺中心とが近づくほど ($z_3 \rightarrow z_2 \rightarrow z_1$ となるに従って) 発生する圧力が小さくなって来ていることがわかる。たとえば $T/T_n=1.0$ の時、壁の高さ 95% での圧力は z_3 では 1.1, z_2 で 0.7, z_1 で 0.3 となっている。特に $T/T_n=1.0$ の時、圧力が増加し始める壁の高さは z_3 で 60~70% の位置, z_2 で 70~80% の位置, z_1 で 80~90% の位置となっておりタンク中心が動揺中心に近づく程高い位置へと移っていることがわかる。それと共に発生する圧力も小さくなり z_1 の位置での最大値は 0.4 程度であり, z_3 での最小値とほぼ同じ位の圧力となっている。よってタンク中心と動揺中心が一致した場合は $T/T_n=1.0$ の共振でもあまり大きな圧力は出さない。(前報のようにタンク中心が動揺中心より 38cm 上にある場合では $T/T_n=2.0$ で 0.9, $T/T_n=3.0$ でも 0.4 程度の圧力を発生した。) $T/T_n=1.5, 2.0$ でもタンク中心と動揺中心の距離によって発生する圧力は大きな影響を受ける。 $T/T_n=1.5$ では圧力の最大値が 0.45 (z_3), 0.45 (z_2), 0.25 (z_1) となっており圧力分布の特長としては静水面より上で静水面下の圧力と比べて少し大きい値となっている。 $T/T_n=2.0$ では z_3 の時のみ壁の高さ 80% 位から大きな値を出す。しかし z_1, z_2 の位置では高い圧力を出すこともなく、壁の分布でもほとんど一定の値をとっており、特に高い圧力を示す位置はない。 $T/T_n=2.5, 3.0$ ではタンクが z_3, z_2, z_1 のどの位置にあっても壁面上での圧力分布はほとんど一定の値でありあまり問題とならない。

3.3.2 水位 60%

図7に水位が 60% の場合の z_3, z_2, z_1 における壁の圧力分布を示す。図7の座標等は図6と同じ表わし方をしている。

水位 60% でも z_3, z_2, z_1 の三図を比べるとタンク中心と動揺中心が近づくほど発生する圧力は小さくなるという傾向は水位 90% の時と同じである。ただ衝撃圧が発生して高い圧力となるのは $T/T_n=1.0$ の時だけであり、しかも z_3 と z_2 の場合のみである。その最大値は 1.4 (z_3), 0.5 (z_2) となっている。さらに z_3 と z_2 を比べるとかなりの違いがあることがわかる。つまり衝撃圧によって高い圧力を発生し始める壁の高さは z_3 で 50% 位であり, z_2 で 80% 位から上の位置である。したがって z_3 では広範囲に高い圧力が壁にかかることになる。そして z_1 の位置になると $T/T_n=1.0$ でも大きな圧力を出すこともなく、壁全体にわたりほぼ一定の圧力分布であることがわかる。これはタンクの位置が z_1 (動揺中心とタンク中心が一致した時) で水位 60% であるため水面と回転中心との距離は 10 cm しかなく水が激しく揺れることがないためである。

$T/T_n=1.0$ 以外の動揺周期では $T/T_n=1.5$, タンク位置 z_3 の時だけ少し大きな値をとるが他の周期では大きくても圧力が 0.3 位までである。タンク位置が z_2, z_1 になると、いずれの動揺周期でも壁の圧力分布は一定であり、その値は小さい。

3.3.3 水位 30%

図8には水位 30% の場合の壁における圧力分布図を示す。図の表わし方は水位 90% の場合と同じである。

水位 30% でも高い圧力が出るのはタンク位置が z_3 で

図7 水位 60% 時の壁における圧力分布

図 8 水位 30% 時の壁における圧力分布

は $T/T_n=1.0$ の時のみ図に表わした。

前述の他の水位と同様に高い圧力は z_3 , z_2 , z_1 の順に発生する。壁における圧力分布をみると z_3 ではタンクの底から壁の 25% 位の間で非常に高い 3.0 前後の圧力を発生している。 z_2 になると底でも圧力 1.0 という大きい値ではあるが、特に高い 2.0 程度の圧力が発生する壁の高さは、水面付近の 20% 前後とごくせまい範囲に限られている。

z_1 になると動揺中心より水面の方が下方になり高い圧力も発生せず、0.2 前後の小さい値でほぼ均一に分布していることがわかる。

3.4 周期—圧力特性

図 10 から図 13 までは各水位における動揺周期と圧力の関係である。縦軸は $\Delta p/2a$ の値で横軸は T/T_n の値である。各図の中にタンク位置 z_3 , z_2 , z_1 の場合を示した。図中の○, △の記号は衝撃的な圧力であったことを示す。

図 10 の水位 90% の場合、タンク位置が z_3 では $T/T_n=2.0$ 位から動揺周期が速くなるほど圧力が高くなる。これはこの周期から衝撃圧が発生し始めたためである。 z_2 になると衝撃圧が発生して圧力が高くなり始めるのは $T/T_n=1.6$ 位からである。そして z_1 になると $T/T_n=1.2$ 位から少し圧力が高くなる程度である。図

図 9 水位 20% 時の壁における圧力分布

$T/T_n=1.0$ の時である。この時の圧力分布で特に高い圧力を示すのは水面付近であり、その値は約 0.55 である。タンク位置が z_2 で $T/T_n=1.0$ の時も圧力が最大値となるのはやはり水面付近であるが値は約 0.35 と小さい。タンク位置が z_1 では水面が動揺中心よりも下方に 20 cm の位置にあるため、水の動きは非常に少なく $T/T_n=1.0$ でも最大値を示す壁の高さ 40% の位置で 0.25 と非常に小さい値であった。

$T/T_n=1.0$ 以外の動揺周期ではどの周期でも、又タンクが z_1 , z_2 , z_3 のどの位置にあっても圧力の高い部分と低い部分の圧力の差は 0.1 以内でありほぼ一定の圧力分布となっていた。

3.3.4 水位 20%

図 9 は水位 20% の時の壁における圧力分布である。縦軸は前述の他の水位と同じく壁の高さを%表示している。横軸は他の水位の時と同様に動圧 Δp をタンク幅で除した数値としている。水位 20% では $T/T_n=1.0$ の付近のみ非常に高い圧力を発生する。したがって特に高い圧力を発生する動揺周期を選んで z_3 では $T/T_n=1.1$, z_2 と z_1 で

図 10 水位 90% 時における圧力と周期の関係

図 11 水位 60% 時における圧力と周期の関係

図 12 水位 30% 時における圧力と周期の関係

図 13 水位 20% 時における圧力と周期の関係

11, 図 12 の水位 60%, 30% の場合もほぼ同ような傾向にあると言える。

ただタンクの位置が z_1 の時は水位 30% において $T/T_n=1.05$ で他のどの周期よりも小さい圧力となっている。 $T/T_n=1.05$ は共振に近い動揺周期であり、他のタンク位置ではほぼ最高圧力に近く z_3 で 0.55, z_2 でも 0.4 位となっている。にもかかわらず 0.05 程度の非常に小さい値である。これは水の固有周期と強制動揺周期が一致したため見かけ上タンク内で水は動かなくなるためである。したがって $T/T_n=1.05$ より遅い周期では傾斜水圧が出ていたが、その傾斜水圧も $T/T_n=1.05$ では出なくなる。

図 13 の水位 20% では z_3 と z_2 で非常に高い圧力を発生しているが、 z_3 , z_2 共に急激に圧力が上昇し始めるのは $T/T_n=1.2$ 位からである。 $T/T_n=0.9$ ではどちらも 0.2~0.4 位の値となり高い圧力が発生するのは $T/T_n=1.0\sim1.2$ という非常にせまい範囲であることがわかる。 z_1 では動揺周期が速くなって $T/T_n=1.0$ に近づいても圧力は 0.1~0.05 位しか増加せず、ほとんど一定の値になっている。

以上、水位を 90%, 60%, 30%, 20% にした時の圧力と周期の関係について述べたが、大体どの水位においてもタンク位置が z_1 から z_2 , z_3 と上昇するたびに圧力の値も大きくなり、高い圧力が発生する周期も広い範囲になっている。

3.5 計算値と実験の比較

図 15, 図 16 には水位 90% と 60% の時の計算値と実験値が示してある。この計算は O. M. Faltinsen²⁾ の非線型理論を用いた。この理論では液体を非圧縮、非回転流とした時液体内では次のラプラスの式 (1) を満足する。(図 14 参照)

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

(2) 式, (3) 式に波の表面の条件を示す。

$$g\zeta + \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \quad z = \zeta(x, t) \quad (2)$$

図 14

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad z = \zeta(x, t) \quad (3)$$

タンク壁との境界条件は (4), (5) 式である。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad x = \pm a \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -h \quad (5)$$

(1) 式から (5) 式までの条件を満足する ϕ を求めるために ϕ を (6) 式のようにおいて係数を求め、その ϕ を用いると圧力 P は (7) 式のようにかける。

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \varepsilon^{n/3}, \quad \varepsilon = \frac{A}{2a} \quad (6)$$

$$-\frac{P}{\rho} = \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \theta_0^{1/3} + \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \theta_0^{2/3} + \frac{\partial \phi_3}{\partial t} \theta_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 \theta_0^{2/3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right)^2 \theta_0^{2/3} \\ + \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \theta_0 + \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \theta_0 + \frac{\partial \phi_c}{\partial t} \quad (7)$$

図 15, 図 16 の実線は実験値, 点線は計算値を示している。縦軸は圧力, 横軸は時間である。動揺周期は $T/T_n = 1.0$ と 1.5 との二種類とし、動揺角度は 6° 一定としている。また圧力測定場所は側壁面上で静水面と底から 40% の位置および底としている。 $T/T_n = 1.5$ の場合は水位 90% でも 60% でも大体計算と実験とはよくあっている。特に水面下の場合がよく一致している。 $T/T_n = 1.0$ では水面下の場合、大体実験と計算の波形は似ているが、水面の位置になると水位 60% の場合も 90% の場合もかなり違っている。また波形がよく合っている場合でも変動圧の値で実験と計算を較べるとかなりの違いがあることがわかる。たとえば水位 60%, $T/T_n = 1.5$, 測定位置 40% のとき、実験の変動圧 0.2 位であるのに対し計算では 0.35 位の値となっている。

また水位 90% の実験値は $T/T_n = 1.0, 1.5$ 共に衝撃圧を水面で発生している。この衝撃圧は水面が上昇し

図 15 水位 90% における計算と実験の比較

図 16 水位 60% における計算と実験の比較

て天井にあたることにより発生するものである。(このことは前にも述べた) Faltinsen の理論ではオープンタンクとして計算しているのこのような衝撃圧は発生しない。したがってこの衝撃圧については他の方法で理論的に考えていかなければならない。

4. む す び

模型タンクを動揺台に取り付け、水位、動揺周期、タンク中心と動揺中心の距離を変えて実験を行なった。その結果、内部の液体が動揺することによってタンク壁に発生する動圧はタンク内の水量、動揺周期等によって変化するのはもちろんのことであるが、さらにタンクと動揺中心との距離に大きな影響を受けることが明らかになった。

それは次のような点である。

(1) 側壁における圧力分布では水位をどのように変えてもタンク中心と動揺中心の距離が大になるほど高い圧力が広い範囲の側壁にわたって発生した。

(2) 圧力一周特性の場合もタンク中心と動揺中心の距離が大きくなるほど低い周期から圧力が高くなり始める。

(3) 理論値と実験値を比べると水面下の圧力波形はほぼ一致することが分った。ただ水面付近になると異なってくる。天井部に発生する衝撃圧は Faltinsen の理論では天井を考えていないので別の理論を考える必要がある。今後この点について検討を加えていくつもりである。

最後に、本研究の実験装置等の製作およびデータの整理等について卒業研究の学生 亀谷、中野、坂東、山口の諸君に協力を得たことを付記してお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 今枝, 木村: 動揺する角型タンク内の動的水圧, 日本航海学会論文集, 59 号 (昭 53/8)
- (2) O.M. Faltinsen: A Nonlinear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks, J. of Ship Res. Vol. 18, No. 4, Dec. (1974)