

円筒型 FRP 製容器のスロッシング及びバルジング解析に関する研究

邊 吾一 (機械工学科)

1. 緒言

FRP 製容器の設計業務では、内部の液体から受ける静水圧荷重などの長期的な荷重に対する安全性の評価以外に、短期的な荷重として地震による動的な荷重に対して十分な検討を行わなくてはならない。FRP 製水槽に関しては、(社)強化プラスチック協会が「FRP 水槽耐震設計基準」を作成し構造設計の指針を提示している¹⁾。しかしながら、1995年1月17日(火)未明に発生した兵庫県南部地震では、残念ながら多数のFRP製水槽の被害状況が報告された²⁾。この報告によれば、FRP製水槽の破壊モードは、スロッシングによる天井部の破壊から水槽固定部の破壊まで非常に多様であり、従来のFRP製容器の耐震設計にはまだ多くの問題点が残されていることが明らかになった。これらの課題をすべて解決するような構造設計を行うことは非常に困難であるが、少なくともFRP製容器の固定条件や内容物である流体とFRP外殻シェル構造の連成挙動を十分に検討し、構造解析・設計を行う必要がある。特に、最近市場に投入されているFRP製の薬液容器では、容量と運搬する車等の制限からほとんどが高さ/半径比の大きい円筒型が一般的であり、地震動に対しては非常に不利な構造となっている。

このため、有限要素法を用いて高さ/半径比の大きい円筒型の薬液容器の構造解析を行い、最適な構造設計を行う試みがされてきた³⁾⁴⁾。しかしながら、今までの多くの研究では、変動液圧分布を仮定して構造解析が進められており、多様な荷重条件や固定条件に対応ができていなかった。また、構造と流体の連成を考慮した解析法の研究もされているが⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾、容器の内容物である流体の圧縮性や粘性を考慮し、FRP製容器の耐震設計に固定条件がおよぼす影響まで検討した例は非常に少ない。

そこで、本研究では容器の内容物である流体の圧縮性や粘性を考慮したFRP構造と流体の連成解析を有限要素法により行い、円筒型FRP製薬液容器の耐震設計に固定条件がおよぼす影響を検討した。また、加振装置を使用した周波数応答実験を行い、従来の慣用計算法で使用される変動液圧分布と有限要素法による解析結果と比較・検討を行った。

2. FEM解析

2.1 FRP容器の解析モデル

解析には汎用の有限要素プログラムANSYS Rev5.6を用いた。FRP容器を3次元シェル要素でモデル化し、内容物である流体を3次元流体要素でモデル化した。構造要素と流体要素との境界面では式(1)の条件を満足する必要がある。

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}(U_n) \quad (1)$$

ここに、 p は流体圧力、 ρ は流体の密度、 U_n は変位の法線方向成分を表す。式(1)は、境界で構造と流体が固体で同一の運動をする、つまり加速度が等しいことを示している。また、自由表面など圧力変動のない点における境界条件は次式で表せる。

$$p = 0 \quad (2)$$

汎用の有限要素プログラムにおいて、式(1)の構造要素と流体要素との連成をモデル化する方法には2つの方法が考えられる。一つの方法は、流体要素と構造要素の節点の座標値を一致させ、節点座標系を境界面とその法線方向を主軸とする座標系に回転させ、法線方向の変位成分を拘束して(流体要素の変位と一致させる)連動させ

方向を主軸とする座標系に回転させ、法線方向の変位成分を拘束して（流体要素の変位と一致させる）連動させる方法である。もう一つの方法は流体要素と構造要素の境界面に面一面接触要素を作成して、流体要素と構造要素の境界面での連成を表現する方法である。

これらの2つのモデル化方法は、どちらも式(1)で示す境界条件を満足させることができるが、面一面接触要素を使用して連成させる方法は、接触要素を使用するため非線形解析となり解析時間が膨大となる欠点がある。本研究では、構造要素である3次元シェル要素と流体要素の境界面での法線方向の変位成分を拘束方程式により連動させる方法で解析を行った。

図1に解析の対象とした実験用FRP薬液容器の設計図を示す。解析モデルは、図2に示すように、図1の実験用FRP薬液容器の詳細部を省略し、円筒モデル近似したtype1と固定条件や天井部を詳細にモデル化したtype2の2つのモデルを作成した。この2つの解析モデルの比較により、FRP製容器の耐震設計に固定条件がおよぼす影響を検討する。

2.2 FRP容器の減衰のモデル化

実際のFRP製容器の設計では、FRPとしての材料減衰や固定部での構造減衰の影響が無視できないため、運動方程式は式(3)で表される。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (3)$$

ここで、 X と F はマトリクスで表記した各節点の変位と各節点に作用する外力、 M は質量マトリクス、 C は減衰マトリクス、 K は剛性マトリクスである。

しかしながら、式(3)で示される減衰マトリクス C の要素を厳密に求めることは困難であり、本解析では、ある振動モードに対する減衰マトリクスを近似的に式(4)に示すレーリー減衰で表現する。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

レーリー減衰は、質量マトリクス M と剛性マトリクス K の1次結合を仮定しており、 α 、 β はその重みである。また、モード減衰定数と α 、 β には式(5)の関係がある。

$$\xi^{(j)} = \frac{\alpha}{2\omega^{(j)}} + \frac{\beta\omega^{(j)}}{2} \quad (5)$$

本解析では、2つの特定の振動数に対する減衰定数を加振実験から算出し、式(5)を α 、 β の連立方程式とみなして、これらから定数 α 、 β を決定した。

3. 実験

3.1 供試体のFRP容器

図1の設計図をもとに、HLU法にて成形した実験用FRP製薬液容器を図3に示す。実験用FRP薬液容器は、屋根、側壁、底壁部で構成され、直径600mm、側壁部高さ1800mmの円筒型容器で、板厚 t は、側壁部は容器下端から230mmまで6.4mm、230~1800mmまで3.2mmであり、底壁部は3.2mm、屋根部は2.4mmとなっている。また、容器下部には薬液の入口が2つと、治具取り付け箇所が4つ設けてあり、その接合部分付近の板厚はFRPのオーバーレイにより厚くなっている。容器の材質は、強化材がガラス繊維チョップドストランドマット(MC450C:日東紡績特製)とガラス繊維ロービングクロス(WR570C:日東紡績特製)およびガラス繊維

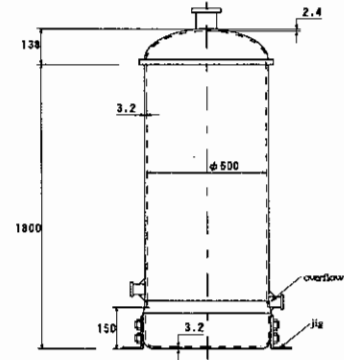


図1. 実験用円筒FRP容器概略図 (単位:mm)

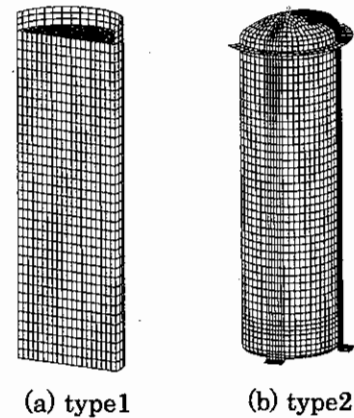


図2. FEM解析モデル

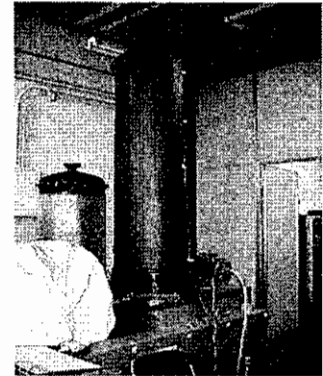


図3. 円筒形FRP製薬液容器概観図

サーフェスマット (MF30P:日東紡績(株)製)であり、チョップドストランドマット+ローピングクロス+チョップドストランドマット+サーフェスマットの積層構成である。また、母材は不飽和ポリエステル樹脂 (エポラック RF-701: (株)日本触媒製) である。材料物性試験用のサンプルは、これら容器の積層構成と同様な条件で、平板の成型型に HLU 法で積層し、常温、大気圧下で硬化させた後、80°C×3h のアフターキュアを行い成形した。積層板の仕上がり寸法は 400×400×3.2mm、であり、ガラス繊維の体積含有率 V_f は約 20% であった。この積層板から強度試験用の試験片を作成し、JIS K7054 に準じた引張試験と JIS K7055 に準じた曲げ試験を行った。

強度試験結果から算出した FRP の材料物性値と解析に使用した内容液の物性値を表 1 に示す。

3.2 振動減衰試験

ある周波数 ω_j での減衰振動曲線の相隣るピークの振幅比 x_m/x_{m+1} と対数減衰率 δ と減衰定数 ξ の間には式(6)が成立する。

$$\delta = \ln(x_m/x_{m+1}) = 2\pi\xi / \sqrt{1-\xi^2} \quad (6)$$

式(4)のレーリー減衰の定数 α 、 β を求めるために、周波数 5Hz と 10Hz で自由減衰法により対数減衰率 δ を求め、式(6)より減衰定数 ξ を算出した。この 2 つの周波数と減衰定数 ξ を用いて、式(5)より、レーリー減衰の定数 α 、 β を求めた。表 2 に自由減衰法により測定した減衰定数 ξ の値と算出したレーリー減衰の定数値を示す。

3.3 周波数応答実験

本実験で用いた実験装置の概略を図 4 に示す。実験用 FRP 薬液容器は、加振方向に対し $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ 方向の位置で 4 箇所、固定用治具を用いて水平加振台に固定されている。本実験では、内容液である水の水位が 1800mm (満水位) の状態で、最大加速度 2m/sec² の正弦波による水平加振を行い、圧力センサ、加速度センサ、ひずみゲージを用いてデータ測定を行った。圧力センサは、容器の加振方向に対し 0° の位置に設置し、静水圧を除いた変動水圧のみを測定した。また、加速度センサは、水平加振台の加速度とタンク側壁の加速度を測定し、ひずみゲージは、容器の下端から 60、360、660mm の位置で周、軸及び円筒軸の 45° 方向に 3 軸ひずみゲージを貼り、周波数を変化させてデータのサンプリングを行った。

4. 結果と考察

4.1 スロッシングおよびバルジング振動数について

地上設置の容器構造物の設計では、地震波のなかでも比較的長周期領域の卓越波にたいして容器内部の液体の自由表面が共振して大振幅になるスロッシング共振点と、スロッシングの固有周期よりも十分に短い周期で、容器内部の液体の付加的な質量により内容液と容器が連成振動するバルジング共振点の把握が非常に重要である。

円筒型容器のスロッシングにおいては、容器を剛体とみなすと第 i 次モードの固有角振動数 ω_i は式(7)で求められる⁹⁾。

$$\omega_i = \sqrt{\frac{g}{R} \varepsilon_i \tanh\left(\varepsilon_i \frac{H}{R}\right)}, \quad T_s = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (7)$$

ここで、 R は容器の半径、 g は重力加速度、 H は水面の高さ、 ε_i は第 1 種 Bessel 関数 $J(\varepsilon)$ の 1 階導関数 $J'(\varepsilon)=0$ の第 i 番目の正根である。

表 1. FRP の材料物性値と FEM に使用した内容液の物性値

	FRP	Liquid
Tensile Modulus (GPa)	9.54	—
Bending Modulus (GPa)	6.29	—
Bulk Modulus (GPa)	—	2.07
Poisson's ratio	0.32	—
Viscosity μ (Pa·s)	—	1.0×10^{-3}
Density (g/cm ³)	1.52	0.998

表 2. 減衰定数 ξ とレーリー減衰 α 、 β

damping factor α	7.561×10^{-1}
damping factor β	2.913×10^{-4}
damping factor ξ at 5Hz	1.661×10^{-2}
damping factor ξ at 10Hz	1.517×10^{-2}

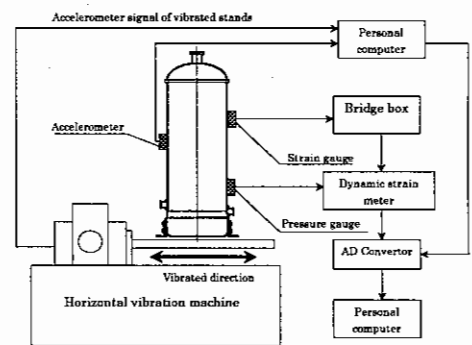


図 4. 実験装置概略図

一方、飯島らによると、満水状態の円筒型容器のバルジング固有周期 B は次式で求められる¹⁰⁾。

$$B = \frac{\pi H^2}{R} \sqrt{\frac{2q'}{3gE} \left(1 + 12 \left(\frac{R}{H} \right)^2 \right)} \quad (8)$$

ここに、

$$q' = q + \frac{q_0 R}{2t} \cdot \frac{\tanh \sqrt{3} \left(\frac{R}{H} \right)}{\sqrt{3} \left(\frac{R}{H} \right)} \quad (9)$$

ここで、 q_0 は液体の単位容積重量、 q は容器の単位容積重量、 t は容器の板厚、 E は容器の縦弾性係数である。

まず、本解析モデルと解析方法の妥当性を検証する目的で、図2に示す2つのタイプの本解析モデルでスロッシングおよびバルジングモードを計算し、式(7)~(9)で与えられている理論解および、図4の振動実験装置を用いた周波数応答実験の実験値と比較・検討した。

検討結果を表3に示す。この表から明らかなように、理論計算の前提条件である円筒形状の底部を全面拘束したモデルの type1 では、スロッシングおよびバルジング両周波数に関して FEM の解析値が理論解とよく一致した。

一方、実験用の FRP 円筒容器に準じて作成し、容器固定治具を考慮したモデルの type2 では、FEM の解析によるバルジング周波数が周波数応答実験の実験値とよく一致した。このことから、本 FEM の解析方法の妥当性が確認できた。さらに、この解析値と実験値の両方が示すように、現実的な容器固定条件を考慮しない円筒形状の理論計算では、バルジングの共振点が実際の容器よりもかなり大きく評価されることがわかる。すなわち、円筒形状で近似した理論計算だけで、容器のバルジングの共振点を地震波の卓越する周波数域から外れるように設計しても、容器の固定条件によっては、共振点が地震波の卓越する周波数に近づく危険性があると言える。

また、本研究では、実験装置の制限でスロッシング周波数が実験的に求められなかったが、2つの解析モデルともに理論解とよく一致した。スロッシング周波数に関しては、容器の固定条件の影響は少ないと言える¹¹⁾。図5には type1 の解析モデルで計算した1次のスロッシングモードを示す。

4.2 変動水圧について

液体を含む容器の振動解析の研究は非常に数多くあるが、変動水圧を仮定する慣用耐震解析法では、Housner の理論に立脚している場合が多い。本研究でも、この Housner の理論による変動水圧分布と実験値および FEM 解析結果を比較することで、本 FEM 解析の有効性について検討する。

Housner の理論によれば、液体を含む容器に衝撃圧 p_w は以下の式で表される¹²⁾。

$H \leq 1.5r$ の場合

$$p_w = \sqrt{3} q_0 \cdot k_H \cdot H \left\{ \frac{z}{H} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right\} \tanh \left(\sqrt{3} \cdot \frac{r}{H} \cdot \cos \theta \right) \quad (10)$$

$H > 1.5r$ の場合

$0 \leq z \leq 1.5r$ の部分

$$p_w = \sqrt{3} q_0 \cdot k_H \cdot r \left\{ \frac{z}{r} - \frac{1}{3} \left(\frac{z}{r} \right)^2 \right\} \tanh (1.15 \cdot \cos \theta) \quad (11)$$

表3. バルジング及びスロッシング周波数の比較

	Theory	Experiment	FEM (type1)	FEM (type2)
Sloshing Frequency (Hz)	1.23	-	1.22	1.22
Bulging Frequency (Hz)	14.1	10.6	15.7	10.9

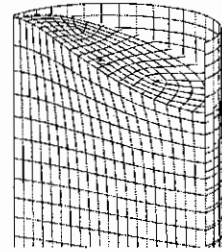


図5. 1次スロッシングモード (type1)

1.5r < z ≤ H の部分

$$p_w = q_0 \cdot k_H \cdot r \cdot \cos \theta \quad (12)$$

ここで、 H は容器の水位で r は容器の半径、 z は底面からの座標、 q_0 は液体の比重量、 k_H は容器に作用する水平震度である。

以上の Housner の理論解と入力最大加速度 2.0m/sec² で入力周波数を変化させた正弦波加振実験の変動水圧分布の比較を図 6 に示す。この結果から明らかなように、バルジング共振点と十分にはなれた周波数領域では、Housner の理論解は実験値とよく一致している。しかしながら、バルジング共振点に近づくにつれて、実験値は Housner の理論解から大きくずれ、バルジング共振点近傍では、10 倍以上も大きくなるのがわかる。また、変動水圧の分布形状は容器の上部において大きくふくれた形状を示すことが明らかになった。この結果は、坂井らの研究結果¹³⁾と傾向が一致している。このことから、実際の FRP 製薬液容器の設計においては、内容液の入った状態での FRP 製薬液容器のバルジング共振点を地震波の周波数域から十分に離さなくてはならないことが明らかである。

しかしながら、その一方で、バルジング共振点から十分に離れた 5Hz~8Hz の変動水圧は、Housner の理論解は実験値とよく一致している。このことから、バルジング共振点を避ける構造設計を行えば、本研究で対象としている高さ/半径比の大きい円筒型 FRP 製薬液容器の構造設計にも、Housner の変動水圧を仮定する慣用耐震解析法が適用できると考えられる。

変動水圧が最も大きくなる容器の下端から 1200mm の位置に設置した圧力センサの実験値と type2 の FEM 解析結果による変動水圧の値を比較して図 7 に示す。両者を比較すると全体に FEM 解析結果が大きくなる傾向がありバルジングの 2 次の共振点がずれているが、設計上重要であるバルジングの 1 次の共振点までは良い一致を示している。したがって、加振実験装置による大掛かりな周波数応答実験を行わなくても、本 FEM 解析手法を用いることで現実的な固定条件を考慮した FRP 薬液容器の構造設計が可能である。

4.3 応力レベルについて

従来の円筒型容器の構造設計では、仮定した変動液圧分布を荷重条件として円筒シェル底部を完全固定した拘束条件により解析が行われている。しかしながら、現実の FRP 製薬液容器の固定条件は固定治具による部分固定が一般的である。特に今回の研究対象である、高さ/半径比の大きい円筒型の FRP 製薬液容器では、この容器の固定条件による応力集中の影響が大きいと予想され、固定条件が構造設計に及ぼす影響が無視できないと考えられる。

今回の type2 の解析モデルを用いて、固定治具による部分固定を行った FRP 部にどの程度応力集中が発生しているか検討した。バルジング現象の影響がない周波数 5Hz での type2 の解析モデルに発生している相当応力分布を図 8 に示す。この図からもわかるように、変動水圧が最も大きくなる容器の下端から 1200mm 近傍の相当応力と比較すると、3 倍以上の高い応力値が固定治具による部分固定を行った FRP 部に発生している。

したがって、現実の FRP 製薬液容器の現実的な構造設計では、FRP 製薬液容器の実際の固定条件を表現した解析モデルで、固定治具部分の FRP に発生する応力レベルを詳細に検討し、部分固定部の FRP を増厚するなど

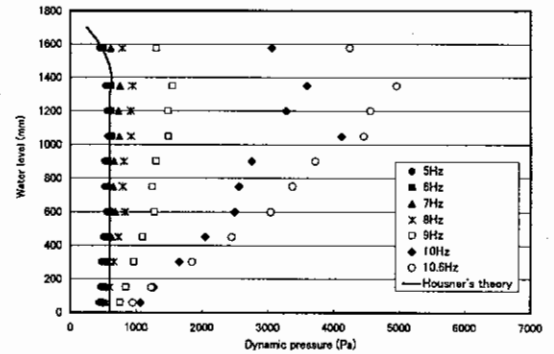


図 6. Housner の理論解と実験値の変動水圧分布の比較

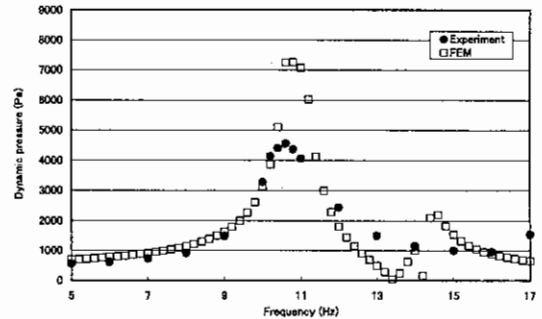


図 7. FEM 解と実験値の周波数応答結果の比較

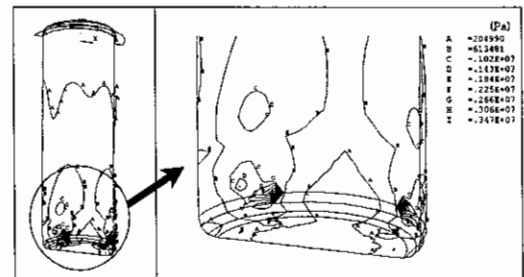


図 8. 容器底部の相当応力分布

の対応が必要である。

5. 結 言

本研究では容器の内容液である流体の圧縮性や粘性を考慮した FRP 構造と流体の連成解析を有限要素法により行い、円筒型 FRP 製薬液容器の耐震設計に固定条件がおよぼす影響を検討した。

さらに、加振台を使用した周波数応答実験を行い、従来の慣用解析法で使用される変動水圧分布と有限要素法による解析値と比較・検討を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

1. FRP 構造と内容液である流体の連成を考慮し、容器の実際の固定条件を考慮した本解析結果は、加振実験結果と良く一致し、高さ／半径比の大きい円筒型 FRP 製薬液容器の構造設計に実用上有効である。
2. 治具による部分固定を行っている円筒型 FRP 製薬液容器の構造設計では、バルジング共振点の計算結果に固定条件の影響が大きいことを明らかにした。すなわち、円筒形状で近似した FEM 解析や理論計算結果だけで、容器のバルジングの共振点を地震波の卓越する周波数域から外れるように設計しても、容器の固定条件によっては共振点が地震波の卓越する周波数に近づく危険性がある。
3. 従来の慣用解析法で使用される Housner の変動水圧分布は、バルジング共振点から十分に離れた周波数域で成立する。すなわち、バルジングの共振点から離れた周波数域では、高さ／半径比の大きい円筒型 FRP 製薬液容器にも適用できることを明らかにした。
4. 高さ／半径比の大きい円筒型の FRP 製薬液容器では、この容器の固定条件による応力集中の影響が大きくなり、固定条件が構造設計に及ぼす影響が無視できないことを示した。

<参考文献>

- 1) FRP 水槽構造設計委員会：FRP 水槽構造設計法：強化プラスチック，（1981）
- 2) 多田直美：強化プラスチック，41，10（1994），358-365。
- 3) 青木義男，邊吾一：強化プラスチック，30，9（1984），373-380。
- 4) 邊吾一，前川欣之：第 28 回 FRP シンポジウム講演論文集，（1999），149-150
- 5) Zienkiewicz, O.C. and Newton, R.E. : Proceedings of the Symposium on Finite Element Techniques, (1969), p. 359-370.
- 6) 清水信行，山本鎮雄，河野和間：日本機械学会論文集（C 編），48，427（1982），328-348
- 7) 高柳政明：日本機械学会論文集（C 編），53，487（1987），598-604
- 8) 笠原雅之，石井博，高木亨之，川本一俊：日本機械学会論文集（C 編），60，571（1994），743-748
- 9) 白木万博，藤田勝久：三菱重工技報，12，3（1975），282-294。
- 10) 飯島延恵，萩原敏雄：土木学会誌，44，10（1959），19-24。
- 11) 平山紀夫，邊吾一，宮永直弘，鷺尾宰司：第 25 回複合材料シンポジウム講演要旨集，（2000），161-162
- 12) Housner G.W. : Bulletin of the Seismological Society America, 47, 1 (1957), 15-35
- 13) 坂井藤一，迫田治行，小川浩：川崎重工技報，71，7（1979），52-59。