

垂直加振を受ける円筒形 FRP 貯槽の応答解析と実験に関する研究

邊 吾一 (機械工学科)

1. 緒言

貯槽の形状には主に円筒形が用いられており、工場で成形後の運搬上の制限や容量の問題から高さ半径比の大きい、いわゆる“のっぼ”な形状を用いるケースが多くある。この場合、高さ半径比の小さな“でっぷり型”の貯槽に比べて、地震動に対して非常に不利な形状となる。1995年の阪神大震災では水槽が様々なモードで破壊し¹⁾、これを受けてFRP製水槽に関しては、(社)強化プラスチック協会によって1996年に耐震設計基準が改訂されたが、設計要求に対してすべての問題を考慮した設計をすることは大変困難である。

貯水槽の地震動による破壊の主要因として、内容液の自由表面の共振現象(スロッシング現象)と内容液と貯槽の連成によるタンク下部の弾性変形(バルジング現象)が考えられる。水平方向振動と垂直方向振動の連成によって被害が拡大する可能性も報告されており²⁾、垂直振動による共振現象は貯槽下部の座屈現象(EFB, 象の足現象)を引き起こす重要なファクターであると言われている。特に高さ半径比の大きい貯水槽に関して、水平加振だけでなく垂直加振による内容液の挙動が貯槽に及ぼす

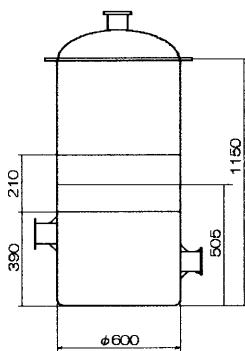


Fig.1 Schematic view of FRP cylindrical liquid storage tank (unit:mm)

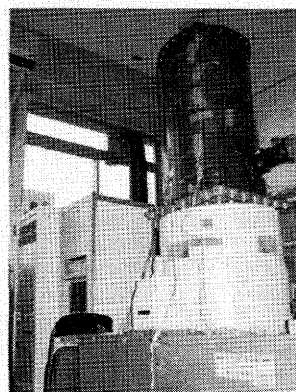


Fig.2 FRP cylindrical liquid storage tank

影響を研究することは必要不可欠であると思われる。

本研究では汎用有限要素法ソフトを用いた

解析を行い、実験結果と比較・検討することで妥当な解析方法を得たので、その結果について報告する。

2. 垂直加振実験

2.1 供試体 供試体は平山ら^{3)~5)}が用いたGFPR製円筒形実験用貯槽を、加振機の最大搭載重量である300kgを超えない範囲で高さを短くした貯槽(Fig.1とFig.2)で、強化繊維にガラスファイバーチョップドストランドマットおよびガラスファイバークロスを、マトリックスに不飽和ポリエステル樹脂を用いてハンドレイアップ法によって製作された。板厚は側壁下部が6.4mm、側壁部及び底部は3.2mmである。

Table1. Material properties

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

容器下部には加振台設置用治具の取り付け部が4つ設けてある。改修時の側壁切り接ぎ部はガラスファイバーのマット材でオーバープライされており、他の側壁部より板厚が増している(プライ数の計算より約8.8mm)。ガラス繊維の平均体積含有率 V_f は約20%であり、試験結果から求めたFRPの材料物性値と解析に使用した内容液である水の物性値をTable1に示す。

2.2 周波数応答実験 内容液の水位を1000mm、加振機の設定加速度を $3m/sec^2$ として正弦波による垂直加振を行い、各周波数において実験データを記録した。加振台には加振状況をモニタリングするために、貯槽には側壁の振動状況をモニタリングするためにそれぞれ加速度センサーを取り付けた。貯槽内壁に側壁部下端より100, 250, 550, 850mm位置に圧力ゲージ、貯槽外壁に側壁部下端より100mmごとにひずみゲージを張り付けた(Fig.3)。なおひずみゲージは2軸ゲージを使用し、A/D変換器で記録後、数値計算ソフトを用いてバンドパスをかけて実験データを整理した。実験によっ

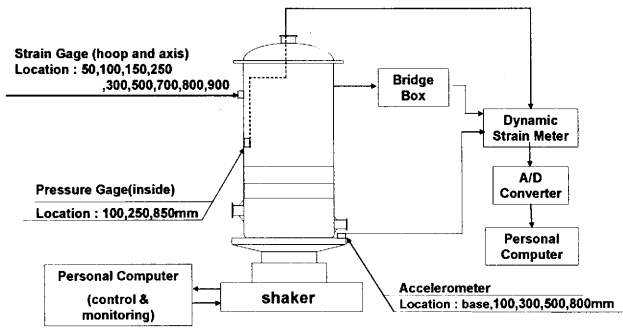


Fig.3 Experimental apparatuses

て得られたバルジング共振点から離れた 5Hz 時とバルジング共振点である 42Hz における、貯槽の高さ $h=100\text{mm}$ 位置における動水圧の変化を Fig4 と Fig.5 に示す。実験よりバルジング共振点から離れた 5Hz で調和振動させた場合、動水圧の変化はほぼ

$$p = \rho \cdot \alpha \sin(2\pi ft) \cdot z \quad (1)$$

で表せる値が、42Hz における圧力変化は式(1)で与えられる値の約 2 倍の動水圧が貯槽下部に発生しており、この実験結果と周波数応答実験によって試験体のバルジング共振点は 42Hz にあることは明確である。

貯槽中央部の切り接ぎ部はオーバープライにより、貯槽下部は設置金具の取り付けにより板厚が増しているため軸、周方向どちらのひずみに関しても緩和している (Fig.6 および Fig.7)。また周方向においては軸方向のひずみ

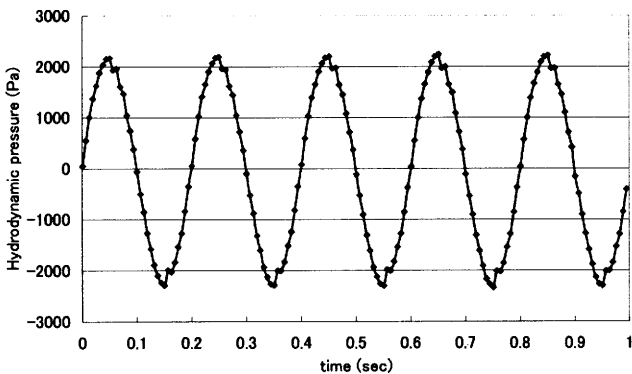


Fig.4 Hydrodynamic pressure (f=5Hz)

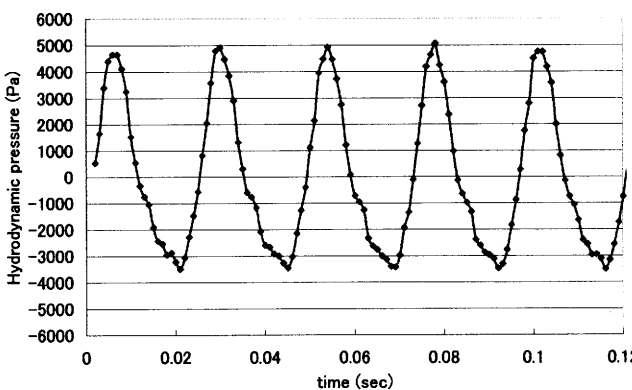


Fig.5 Hydrodynamic pressure (f=42Hz)

と同等以上のひずみが発生しており、先に述べた貯槽下部が半径方向に膨らむ特有の現象を確認することができた。バルジング共振点では

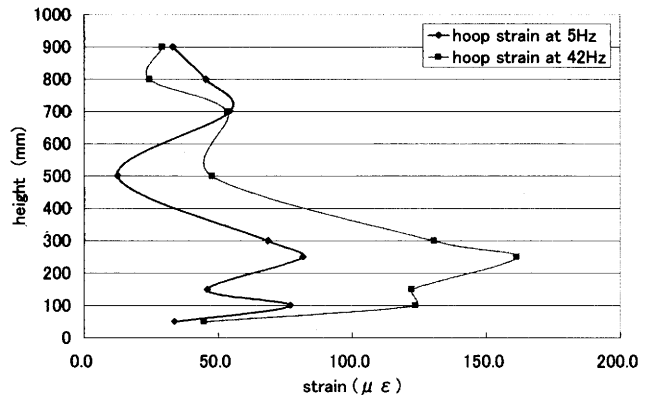


Fig.6 Comparisons of hoop strain

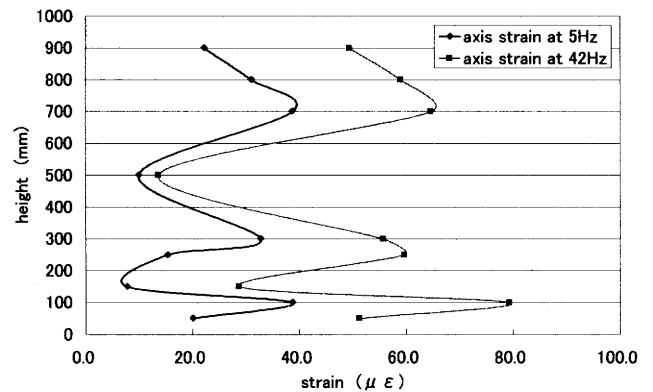


Fig.7 Comparisons of axial strain

軸方向、周方向どちらのひずみにおいても、共振点から離れた 5Hz 時の 1.5~2 倍のひずみが発生しており、このことから垂直加振時のバルジング現象が無視できないことが明らかである。

2.3 減衰実験 FRP 製円筒形貯槽において、設置金具等接合部による機械的減衰や FRP の材料による減衰は大きく、後に述べる FEM を用いた解析において無視すること出来ない。時刻歴応答解析の場合支配方程式は

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

となり、本研究に用いた汎用有限要素法ソフト ANSYS においては(2)式の減衰マトリックスを質量マトリックスと剛性マトリックスの一次結合で表されるレーリー減衰を用いている。減衰マトリックスを質量マトリックスの重みを α 、剛性マトリックスの重みを β で表すと、

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

と表せる。これらの係数は、特定の 2 種類の周波数において空のタンクを強制加振後の自由減衰波を測定し、それぞれの臨界減衰率を求め

Table2. Coefficients of mass matrix and stiffness matrix for Rayleigh damping

		α	β
a	$\omega_{(1)} = 70\text{Hz}$ $\omega_{(2)} = 80\text{Hz}$	9.803	-0.0008
b	$\omega_{(1)} = 80\text{Hz}$ $\omega_{(2)} = 90\text{Hz}$	15.8239	-0.0017
c	$\omega_{(1)} = 106\text{Hz}$ $\omega_{(2)} = 123\text{Hz}$	7.9665	-0.0005

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2} \quad (4)$$

ることで Table2 に示すように決定できる。しかし ANSYS では構造減衰を表す際の臨界減衰率において粘性減衰を無視するため、

$$\xi' = \frac{\beta'\omega}{2} \quad (5)$$

となり、実際剛性マトリックスの係数 β' を材料物性値として書き込むフォームがある。空のタンクのみ減衰実験によって得られた α と β を、この機能を用いるため次のように式を変形した。

$$\frac{\beta'\omega}{2} = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2} \quad (6)$$

$$\therefore \beta' = \frac{\alpha}{\omega^2} + \beta \quad (7)$$

このようにして剛性マトリックスの係数 β' を GFRP の材料物性値として用いた。一方、周波数応答解析においては計算時間短縮のため、流体を含むモデル全体の各減衰係数を直接指定できる ANSYS の機能を利用して解析を行ったが上記の方法とほぼ一致した値が得られた。

内容液の自由表面の減衰に関しては本研究で用いた流体要素の特徴である、自由表面各節点を重力バネで固定することによって模擬した復元力によって再現した。

3. FEM 解析^{6)~8)}

3.1 解析方法 解析には汎用の有限要素法⁶⁾

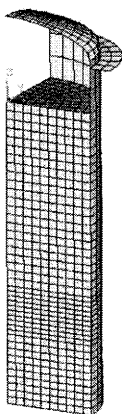


Fig.8 FRP cylindrical storage tank model in

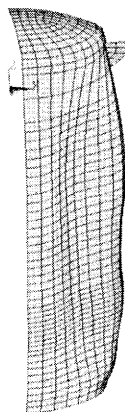


Fig.10 Mode at near bulging frequency

プログラム ANSYS Rev7.0 を用い、FRP 製貯槽を三次元弾性シェル要素でモデル化し、内容物である流体を流体要素でモデル化した (Fig.8)。流体と貯槽の連成現象を再現する方法として、双方の同一箇所において二重節点を設け、変位成分を連動させる方法 (以下 Coupling 法) と、双方の表面に接触要素を設け、連成現象を表現する方法 (以下 Contact 法) 等が考えられるが、計算時間を考慮して先ず Coupling 法を用いた解析を行った。

解析方法は先ず各周波数における発生動水圧の時間に対する変化を検討するために時刻歴応答解析を行い、続いてある周波数による応答の変化を見るためにモーダル (固有値) 解析並びに周波数応答解析を行った。

周波数応答解析においては内容液の自由表面にかかる減衰力のために重力加速度の下で加振加速度を与えるが、全体座標系に上記 2 つの加速度を与えると重力加速度まで調和振動してしまう。この問題を解消するため、本研究では重力加速度のみをかけて静解析を行い、その上で加振加速度のみをかけて周波数応答解析をおこなうプリストレス (初期応力) 法を用いた。ANSYS においては初期応力を面外応力と面内応力の合成成分として扱う。

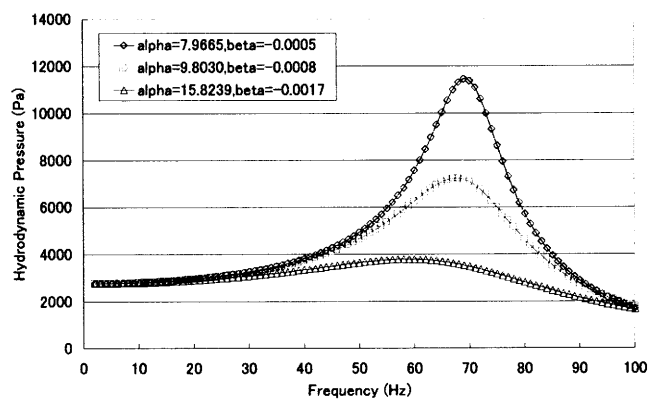


Fig.9 Pressure vs. damping coefficients (coupling model, at perfect fixed condition)

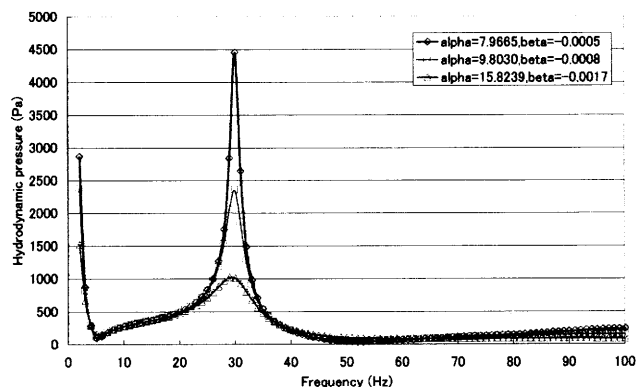


Fig.11 Pressure vs. damping coefficients (coupling model, at jig fixed condition)

3.2 Coupling 法 計算時間の短縮を狙うため最初は貯槽下部を全面固定とした。この条件で発生動水圧の、減衰係数による比較を Fig.9 に示す。バルジング共振点は 59~68Hz となり実験によって得られた値とはかなりの誤差があり、減衰係数によって共振点がシフトしていることがわかる。しかしながらバルジング共振点から離れた周波数域においては式(1)で求められる動水圧が発生しており、プリストレス法が妥当であることがわかった。

解析モデルをさらに実際の加振条件に近づけるため、貯槽の下部に設けられた設置用金具の取り付け位置において完全固定として再度解析を行った。その結果共振点は実験値に近づいたものの共振点から離れた振動数域においては発生動水圧が(1)式以下の動水圧となった (Fig.11)。今回は発生動水圧に注目したため底部完全固定によって解析を行ったが、兵庫県南部地震の際に報告が多かった貯槽固定部や排出口付近の破壊との関連を詳細に検討する際には設置金具のモデリングが必要である。

3.3 Contact 法 Coupling 法からさらに実際の加振実験に近づけるべく、貯槽壁面と内容液間の摩擦の影響や接触状況を考慮した、接触要素を用いた解析モデルを作成した。Contact 法も Coupling 法同様、固定条件の違いによる発生動水圧、バルジング共振点の変化を調べた。

底部を完全固定したモデルの解析によって得られた、バルジング現象の1次モードを Fig.10 に示す。2.2 で述べたように貯槽側壁には加速度ゲージを張り付けており側壁の振動状況をモニタリングすることができるが、今回は高さ方向の一直線上に4カ所設置したため、軸対象変形以外のモードを測定することができなかった。そのためモードに関する実験と解析の一致、不一致を検討することは難しいが、局所的にはあるが測定結果と同様貯槽下部が半径方向に膨らんでおり、タンク下部の弾性変形へ寄与する形になる。

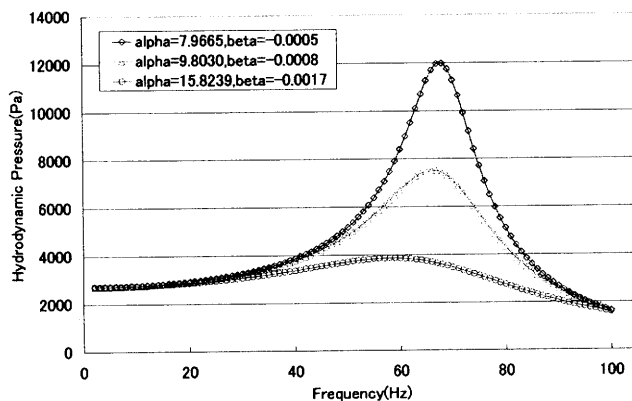


Fig.12 Comparisons of hydrodynamic pressure varying with coefficient (contact model)

次に減衰係数による発生動水圧の変化を Fig.12 に示す。減衰係数が変化することで、バルジング共振点は 59Hz から 68Hz へシフトしており、発生動水圧についても coupling 法とほぼ同様の結果となった。また減衰実験において減衰係数の大まかな予測をすることができる可能性も見出すことができた。

壁面の摩擦係数については一桁程度違う値を用いて比較したがこれによる違いはほとんど見られなかった。

減衰実験において剛性マトリックスの係数 β は絶対値が非常に小さな値であるが正負の違いによる発生動水圧の変化は大きく、無視できない値であることもわかった。

4. 結言

今回は実スケールに近い貯槽の周波数応答実験を行い、発生動水圧と貯槽に発生するひずみについて着目した。

加振実験においては、周方向ひずみの変化が顕著であり、冒頭で述べた EFB の一因である可能性を確認することができた。また空の貯槽をもちいた減衰実験を行い、各減衰係数を求め FEM 解析へ代入し摩擦係数、減衰係数による発生動水圧の変化に着目した。その結果実験によって妥当な減衰係数範囲を予測することができた。また、質量マトリックスの係数はもちろん、剛性マトリックスの係数による変化も無視できないことを示した。内容液・貯槽間の摩擦による応答の変化はなかった。

解析においては実験値との誤差がまだ大きい、面-面接触を用いたものとカップリングを用いた方法ではほぼ同じ値を出すことができ、カップリング法が垂直加振においても有効であることを示した。また重力加速度と加振加速度の競合をさけたプリストレス法の妥当性を確認することができた。

<参考文献>

- 1) 多田直美, 強化プラスチック, 41-10(1994), 358-365
- 2) 後藤, 大矢, 小林, 圧力技術, 18-4(1980), 207
- 3) 平山紀夫, 邊吾一, 日本複合材料学会誌, 29 巻 1 号(2003), 9-16
- 4) 平山紀夫, 邊吾一, 日本複合材料学会誌, 29 巻 2 号(2003), 58-64
- 5) 平山, 邊, 宮永, 強化プラスチック, 47 巻, 11 号(2001), 451-457
- 6) 矢川, 吉村: 有限要素法, 培風館(1991)
- 7) 山本: マトリックス有限要素法, 科学技術出版社(1974)
- 8) 平野, 戸川他: 計算技術および数値計算法, 培風館(1971)