

氏名	ちばまさかつ 千葉正克
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和60年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)機械工学専攻
学位論文題目	円筒貯槽の振動と動的安定性に関する研究
指導教官	東北大学教授 谷 順二
論文審査委員	東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 渥美 光 東北大学教授 橋本 弘之

論 文 内 容 要 旨

序 論

近年、工業技術の急速な進展と共に機械や構造物は軽量化、大型化の一途をたどり薄肉円筒殻が軽量構造物の基本的な要素として各方面で広く用いられている。特に液体を満した円筒殻は、ロケット燃料タンク、各種化学プラントの容器、原子炉容器、石油タンク、LNGタンク等々に使用されている。一般に薄肉円筒殻では壁面が変形し易く、かつ最低固有振動数以上の振動数領域で多くの固有振動数が密集して分布していること、さらに内部液体によって最低固有振動数が低下すると共に動的にも不安定になり易くなることが予想される。したがって、液体を満した円筒殻（いわゆる円筒貯槽）の自由振動特性や、動的荷重に対する挙動を明らかにすることは工学的に非常に重要な問題である。しかしながら、本問題は薄肉円筒殻と内部液体が相互に作用し合う連成振動現象であるため、未だ十分に解明されたものとは言えない。

このような現状から、本論文ではまず第1部として、第1章と第2章において円筒貯槽の自由振動特性を精密な実験と理論解析の両面から明らかにする。次にそれらを基礎として第2部では、第3章と第4章において水平又は鉛直方向周期加振力（正弦波）が作用する場合の実験について述べ、第5章において鉛直方向加振力を例にとり動的安定問題に関する理論解析を行う。そしてこれらの実験ならびに理論解析を通して円筒貯槽の自由振動特性ならびに動的挙動に関する基礎的資料を提示することが、本論文の目的とするところである。

第1部 円筒貯槽の自由振動に関する研究

第1章 円筒貯槽の自由曲げ振動に関する実験的研究

試験円筒殻材料として厚さ0.25 mmのポリエステルフィルム，内部液体には水を用いた，内部に液体を含む薄肉片持（固定－自由）円筒殻の自由曲げ振動に関する実験について述べる。本研究では液体運動が支配的なスロッシングタイプの固有振動よりも，殻壁面の運動が卓越するバルジングタイプの固有振動に着目することとし，バルジングタイプの固有振動数は，試験円筒殻を対向した二つの加振機を用いて一定変位振幅の下に正弦波加振し殻壁の周波数応答を非接触で光学的に測定することにより求める。その際二つの加振機を互いに同位相又は逆位相で加振する。このような加振方法は本実験の特長であり，周方向波数が偶数と奇数の固有振動を分離して励起することができ，本場合の如く接近した数多くの固有振動数が存在する場合でも各固有振動数の値を精度良く測定することが可能となる。実験では，内部液体の液位が円筒貯槽の固有振動数ならびに軸方向振動モードに及ぼす影響を明らかにすると共に，“液位および軸方向振動次数 m が同一であっても，周方向波数 N の違いによって軸方向振動モードが変化する”現象を観測した。このような現象は空液の場合には見られず，また未だ報告されていない事実である。さらにバルジングタイプの固有振動数領域においては自由液面も同様な周波数応答を呈していることを明らかにした。

第2章 円筒貯槽の自由曲げ振動に関する理論的研究

円筒貯槽の自由曲げ振動に関する理論解析について述べる。容器は固定－自由の境界条件を有する薄肉円筒殻として扱い，基礎式としてDonnellの式を用いる。一方内部液体は非粘性，非圧縮性の理想流体としてうず無し運動の仮定の下に速度ポテンシャルを導入し，殻壁面と内部液体の連成振動問題として修正Galerkin法等を用いて解析する。なお，解析では自由液面の条件や従来の研究においてほとんど考慮されていなかった静液圧による貯槽壁の初期変形の影響をも考慮に入れた。数値計算は実験（第1章）で用いた二つの試験円筒貯槽に対応した諸元の下に行い，固有振動数に及ぼす内部液体の液位，静液圧の影響ならびに自由液面の条件を明らかにした。その結果，静液圧の影響については一般に各軸方向振動次数 m において，周方向波数 N が最小固有振動数に対応する波数 \bar{N} よりも大きい振動モードを有する場合に，静液圧によるフープストレスの影響で固有振動数は高くなる。また自由液面の運動を無視すると固有振動数は全体として低下する。固有振動数に関する実験結果と理論計算結果は最大でも4%の違いで良く一致し，軸方向振動モードについても同様に良く一致した。さらに実験で観測された“周方向波数 N によって軸方向振動モードが変化する”現象を，両端固定の境界条件を有する円筒貯槽の振動特性と比較して理論的に明らかにした。すなわち，本研究で対象とした一端固定他端自由の境界条件を有する円筒貯槽は，各軸方向振動次数 m における最低固有振動数に対応する周方向波数 \bar{N} よりも比較的大きい波数をもって振動する場合や，逆に $N=0$ の軸対称振動モードを有する場合には自由端の振れが少なくなり，両端固定の円筒貯槽の振動モードに似た形を呈し，対応する固有振動数も両者はほぼ一致するようになる。そしてこの傾向は液位が低い程顕著である。

第 2 部 円筒貯槽の動的安定性に関する研究

第 3 章 水平加振による円筒貯槽の動的安定性に関する研究

円筒貯槽に水平方向周期加振力（正弦波）が作用する場合の動的挙動に関する実験について述べる。自由振動解析の実験（第 1 章）で用いた試験円筒殻に水を入れ、一定加速度、又は一定変位・振幅の下に正弦波加振することにより、加振振動数および加振加速度、又は加振変位・振幅のある条件の下では、円筒貯槽は不安定となりパラメトリック共振による不安定振動が発生し易いことを明らかにした。内部に液体がない空液の場合にはこのような不安定振動は起こりにくく、液体の存在は円筒殻に対して著しい不安定効果を及ぼすことがわかる。また殻壁面の応答は周方向波数 $N = 1$ （円形断面を保ちながら、棒の如く振動するモード）を有する固有振動数近傍の加振振動数領域で激しいが、その場合の振動モードは純粋な $N = 1$ 型ではなく、一般に軸方向振動次数 m が同一で周方向波数 N が互いに一つ異なる二つの固有振動が合わさった、和型の結合型振動モードとなっている。このように周方向波数 N が互いに一つ異なる二つの振動が合わさることにより、殻壁面の周方向振動モード分布は全体として加振方向に振幅が大きい $N = 1$ 型に似た形を呈していることを図示し説明した。そしてこのタイプの振動が最も多く観測され、次は振動数が加振振動数の半分の大きさを有するパラメトリック主不安定振動であった。さらに二つの試験円筒貯槽に対して液位をいくつか変えた場合のパラメトリック共振が生じる不安定領域および振動モードを求めた。この種の結合型不安定振動の発生は未だ報告されておらず、また地震応答解析を中心とした従来の理論解析においては $N = 1$ 型の振動モードのみを考慮していることから、それらに対して修正を促す一つの重要な実験結果と言える。

また殻壁面応答の非線形特性を吟味した。その結果、液位ならびに振動モードには無関係に、一般に壁面の応答が激しくなる各 $N = 1$ の固有振動数近傍の領域で、その振動数よりも低い振動数領域での応答は軟性ばね、高い領域では硬性ばねの非線形特性を有していることを明らかにした。

第 4 章 鉛直加振による円筒貯槽の動的安定性に関する実験的研究

円筒貯槽に鉛直方向周期加振力（正弦波）が作用する場合の実験について述べる。水平加振が作用する場合と同様、内部液体の存在は円筒殻に対して著しい不安定効果を及ぼし、この場合殻壁面は加振振動数が軸対称（ $N = 0$ ）固有振動数近傍で特に激しくなるが、実際観測される振動モードは $N \neq 0$ を有する、パラメトリック主不安定振動と、周方向波数 N が等しく軸方向振動次数 m が異なる二つの固有振動が合わさった和型の結合型不安定振動となっている。前者の型の不安定振動については従来より観測されているが、後者の結合型不安定振動については未だ報告されていない。また殻壁面応答の非線形特性については、一般に壁面の応答が特に激しくなる各 $N = 0$ の固有振動数近傍の領域で、この振動数よりも低い振動数領域での応答は軟性ばね、高い領域では硬性ばねの非線形特性を有することを明らかにした。

第 5 章 鉛直加振による円筒貯槽の動的安定性に関する理論的研究

動的荷重として鉛直方向周期加振力（正弦波）を例にとり動的安定問題に関する理論解析を試み

る。基礎式等は自由振動解析（第2章）で用いた *Donnell* の式等に加振力の項を付け加えた式を用い、解析もほぼ同様な方法をとる。初めにパラメトリック振動が生じる前の自由液面および円筒殻の連成軸対称（曲げ）強制振動問題を解き、次に不安定直後の自由液面ならびに殻壁面に関する運動方程式を周期係数型連立二階常微分方程式（*coupled Mathieus equation*）の型に導く。さらに基準座標を用いて周期係数項に関してのみ連成する型に変換し、*Hsu* の方法によりパラメトリック主および結合型不安定振動が生じる不安定領域を定める方法を示す。数値計算においては実験結果との対応を考えて便宜的にモード減衰項を付け加え、実験（第4章）で用いた試験円筒貯槽に対応した計算を行った。その結果、実験で観測されたパラメトリック主不安定振動と、周方向波数 N が等しく軸方向振動次数 m が異なる二つの固有振動が合わさった和型の結合型不安定振動が発生し易いことを理論的にも明らかにすると共に、不安定領域に関する実験結果と理論計算結果が良く一致することを確認した。

結 論

本研究で得られた結果を総括し要約してある。

付 録

本研究の理論解析において基礎式として用いた *Donnell* の式の適用範囲を明らかにする目的で、*Donnell* の式ならびにより厳密な *Flügge* の式を用いた円筒殻の自由振動問題の理論解析（厳密解）を付録第1章と第2章に示す。

第1章 片持円筒殻の自由曲げ振動

Donnell の式を用いた片持円筒殻の自由曲げ振動問題を、一端完全自由、他端に関しては工学上重要と思われる8種類の境界条件の下に理論的に解析する。各境界条件の下に円筒殻形状係数 Z の広範囲な値に対して、最低次より第4次までの基準振動における最小固有振動数ならびに対応する周方向波数を正確に算出すると共に、周方向波数を変えた場合の固有振動数の変化についても計算を行い、それらから任意形状を有する片持円筒殻の自由曲げ振動特性を容易に推定できるようにした。

第2章 円筒殻の自由曲げ振動—*Flügge* の式による吟味

主として *Donnell* の式の適用範囲外である長い円筒殻に対して、より厳密な *Flügge* の式に基づいた薄肉円筒殻の自由曲げ振動問題を理論的に解析する。これより円筒殻の自由曲げ振動における *Donnell* の適用範囲を明らかにすると共に、円筒殻が長くなるに伴い最小固有振動数は中空棒としての値に漸近することを確認した。

審 査 結 果 の 要 旨

薄肉円筒貯槽は化学や原子力プラントの各種容器ならびにロケットの燃料タンクとして広く用いられており、その高い安全性と信頼性が強く要請されている。それゆえ円筒貯槽の動的挙動を正確に把握することは設計上の重要課題の一つであるが、これは薄肉円筒殻と内部液体の複雑な連成振動現象であるため、未だ十分に解明されていない。著者はこれらに関する基礎的問題として、薄肉円筒貯槽の自由曲げ振動ならびに水平または鉛直方向の正弦加振による動的安定性を取り上げ、精密な実験を行うと共に一部理論解析も行い、その動的挙動を明らかにした。本論文はこれらの成果をまとめたもので、序論、第1部、第2部、結論および付録よりなる。

序論では従来の研究を概括し、本研究の目的とその概要について述べている。

第1部は円筒貯槽の自由曲げ振動に関するもので、第1章では実験、第2章では理論解析について述べている。実験では、水を入れたポリエステル製片持円筒殻を対向した二つの加振機で加振し、殻壁の周波数応答を非接触で光学的に測定することにより固有振動数とモードを求め、それらに及ぼす液位の影響を解明している。理論解析では、自由液面の条件や静液圧による初期変形の影響をも考慮に入れ、円筒殻のDonnellの式と液体の速度ポテンシャルの式とを一緒に高精度で解く方法を提示し、理論と実験の結果は良く一致することを示している。

第2部は円筒貯槽の動的安定性に関するもので、第3章と第4章ではそれぞれ水平と鉛直方向加振の実験、第5章では鉛直方向加振の理論解析を述べている。実験では、自由振動実験と同じ、水を入れた試験円筒殻を一定振幅で加振し、円筒殻がパラメトリック共振を起こす不安定領域と振動モードを、液位を変えて求めている。これより、水平方向加振では、軸方向振動次数が同一で周方向波数が一つ異なる二つの固有振動数が合わさった和型の結合型不安定振動が、鉛直方向加振では、加振振動数の半分の振動数を有する主不安定振動数と、周方向波数が等しく軸方向振動次数が異なる二つの固有振動数が合わさった和型の結合型不安定振動が起り易いこと、さらにその傾向は液位が深くなると強まることを明らかにしている。これは注目すべき新知見である。理論解析では、自由振動解析で用いた式に加振項を加え、ほぼ同様な方法で解き、理論と実験の結果は妥当な一致を示すことを明らかにしている。これらは円筒貯槽の動的挙動に関する貴重な資料を与えている。

結論では本研究の成果を総括している。

なお、付録では空の円筒殻の自由曲げ振動の厳密解をDonnellとFlüggeの式に対して求め、第1部と第2部で用いたDonnell式の適用範囲を明確にしている。

以上要するに本論文は、円筒貯槽の自由曲げ振動を実験と理論の両面から明らかにし、さらにこれを参考にして、円筒貯槽の水平と鉛直方向加振による動的不安定現象を実験と一部理論により解明し、有用ないくつかの新知見を提供したもので、構造工学ならびに機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。