

氏 名	ど 土 岐	ひとし 仁
授 与 学 位	工 学 博 士	
学位授与年月日	昭和 57 年 3 月 25 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	部分的に液を満たした円筒殻の安定性に関する研究	
指 導 教 官	東北大学教授 八 卷 昇	
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 八 卷 昇	東北大学教授 斎藤 秀雄
	東北大学教授 阿部 博之	東北大学教授 渥美 光
	東北大学助教授 谷 順二	

論 文 内 容 要 旨

序 論

円筒殻の座屈問題を解明することは、軽量構造物の強度設計上基本的な重要課題であり、円筒殻に外圧、ねじり、圧縮等の基本的な荷重がそれぞれ単独に作用する場合の座屈問題は、座屈後の挙動も含めて理論的にも実験的にもほぼ解明されたものと言える。なお、これらの荷重が複合的に作用する場合の問題については最近、兎珠、八卷等¹⁾による一連の研究を通じて、かなり明らかにされてきたが、まだ十分な解明はなされていないように思われる。

一方石油貯槽等の大型化や大都市周辺における設置に伴い、それらの地震等における災害の危険性が著しく増大しており、液体貯槽の各種静的並びに動的荷重に対する応答を明らかにして、その安全性を確保することが工学上きわめて重要な課題となっている。

これらの現状に鑑み、部分的に液体を満たした円筒殻に各種荷重が作用する場合の座屈問題を解明することは、複合荷重が作用する場合の座屈問題という観点からも、また、液体貯槽の安全性確保という観点からもきわめて重要である。しかしながら従来の研究は内部液体による静的な変形や応力分布等を取り扱ったものが大部分であり、座屈問題に関してはまだほとんど解明されていない。

以上の観点に立脚して本論文は、部分的に液体を満たした円筒殻に各種荷重が作用する場合の

安定性を、理論と実験の両面から逐次系統的に解明することを目的とするものである。

第 1 部 部分的に液を満たした円筒殻の安定性に関する理論的研究

先ず第 1 部 (第 1 章ないし第 3 章) においては、部分的に液体を満たした円筒殻に外圧、圧縮、ねじり荷重がそれぞれ単独に作用する場合の座屈問題を理論的に解析する。

第 1 章においては、部分的に液体を満たした円筒殻に一樣な外圧 (流体圧) が作用する場合の座屈問題を、両端固定および両端単純支持の境界条件の下に、静液圧および座屈前の有限曲げ変形の影響を考慮に入れた Donnell 型の基礎式に Galerkin 法を適用することにより理論的に解析した。種々の円筒殻形状に対し、液位比 ℓ_0 (液位と円筒殻の長さとの比)、液圧比 p_x (液を満たした時の円筒殻底面における液圧と、空液時の円筒殻の座屈外圧との比) を変化させて詳細な数値計算を行ない、その結果次のことが明らかになった。一般に円筒殻内部に液体がない場合と比較して、座屈圧力および座屈波数は、円筒殻内部液体の液位および液圧の増加と共に逐次増加する。特に液体が円筒殻の半分以上満たされているとき、その影響が大きい。また、液位比 ℓ_0 および液圧比 p_x を一定とした場合、座屈圧力比 \bar{k}_p (円筒殻内部に液体がある場合とない場合との座屈圧力の比)、座屈波数比 $\bar{\beta}$ (円筒殻内部に液体がある場合とない場合との座屈波数の比) は境界条件および円筒殻形状係数 Z によってあまり変化しない。更に、適当な無次元化により、円筒殻形状、液位、液圧の広い範囲に対して、その座屈圧力および座屈波数を容易に推定し得る設計上有益な線図を提示すると共に、内部液体が円筒殻の静変形、座屈直前の変形および座屈波形におよぼす影響をも明らかにした。

第 2 章においては、部分的に液体を満たした両端完全固定の円筒殻に、一樣な軸圧縮荷重が作用する場合の座屈問題を、第 1 章と同様な手法により理論的に解析した。次いで円筒殻形状係数 Z の広い範囲にわたって、液位比 ℓ_0 および液圧比 p_x を種々に変えた場合の座屈荷重比 \bar{k}_c と座屈波数比 $\bar{\beta}$ を算出すると共に、それらと座屈前の有限曲げ変形ならびに座屈波形との関係をも明らかにした。その結果、円筒殻内部液体は軸圧縮座屈に対して安定性を増大させる効果があるものと予想しがちであるが必ずしもそうならず、円筒殻が特に短い場合 ($Z \leq 70$) を除き一般に ℓ_0 を 0 から逐次増加させると、 \bar{k}_c は 1 より小さい範囲で極小、極大をくり返しながらか複雑に変動すること、変動中は p_x の増大と共に増加し、 Z の増大と共に減少すること、 \bar{k}_c の最小値は $p_x = 50$ で $Z = 100, 1000$ の両場合に対してそれぞれ 0.7, 0.9 程度であること、 ℓ_0 が 0.9 以上となると $Z > 100, p_x > 5$ であれば \bar{k}_c は p_x と Z にあまり関係なくほぼ一定値 1.07 に近づくこと、その際座屈直前の曲げ変形の大きさは、液圧のみによる曲げ変形よりも著しく大きくなること等を明らかにした。

第 3 章においては、部分的に液体を満たした円筒殻に一樣なねじり荷重が作用する場合の座屈問題を、両端固定および両端単純支持の 2 つの境界条件の下に、前章と同様な手法により理論的に解析した。次いで円筒殻形状係数 Z の種々の値に対し、液位比 ℓ_0 、液圧比 p_x を変化させて詳細な数値計算を行ない、ねじり座屈荷重比 \bar{k}_s と座屈波数比 $\bar{\beta}$ を算出し、それらと座屈前の有限曲げ変形ならびに座屈波形との関係をも明らかにした。一般に液体が円筒殻の半分以上満たされてい

るとき、その影響は顕著であり、円筒殻内部に液体がない場合と比較して、円筒殻内部液体の液位および液圧が増加するにつれてねじり座屈荷重は増加するが、座屈波数は液位が小さいときは液圧の増加につれて増加し、液位が満液に近づくとある液圧を境にして低下しはじめる。また、液位比 l_0 および液圧比 p_x を一定とした場合、ねじり座屈荷重比 \bar{k}_s は両端固定の方が両端単純支持の場合より大きく、また Z が大なるほど \bar{k}_s は小さくなるがその差は小さく、かつ一定値に漸近する傾向が見られる。以上の結果を第1章同様適当な無次元化により、円筒殻形状、液位、液圧の広い範囲に対して、ねじり座屈荷重および座屈波数を容易に推定し得る線図の形で提示した。

第2部 部分的に液を満した円筒殻の安定性に関する実験的研究

第2部（第4章ないし第7章）においては、第1部の理論解析に対応する実験を行なうことにより、理論の妥当性を確認すると共に、座屈後の挙動について精密な実験的研究を行なう。

先ず第4章では、実験に使用した両端完全固定のポリエステルフィルム製試験円筒殻（ $Z = 1000$, $p_x = 2.93$ ）の材料的性質ならびに製作方法について詳述した。

第5章ないし第7章においては第1章ないし第3章の理論解析に対応する実験、すなわち部分的に液体を満した円筒殻に一樣な外圧、圧縮、ねじり荷重が作用する場合の座屈実験について述べる。試験円筒殻として第4章で示したポリエステルフィルム製試験円筒殻を、円筒殻内部液体として水を用い、水位を逐次段階的に変化させて一定値に保ち、上記各荷重による座屈実験を行なった。使用した実験装置は、偏心や軸力の影響を受けずに各荷重のみが純粋に試験円筒殻に負荷することができるように種々の工夫がなされている。また、たわみ測定装置は片持梁先端の接触子の変位を根元に接着された歪ゲージの曲げ歪を利用して測定するもので、装置全体は半径、軸、円周方向に自由に移動可能であり、これらにより円筒殻の座屈後の軸方向および円周方向たわみ分布をたわみ波形を乱すことなく精密に記録測定することができる。

実験では各水位ごとに、各荷重と軸方向圧縮量あるいはねじり角、内向きおよび外向きの最大たわみ量との関係を求め、更に座屈後のたわみの周方向分布および軸方向分布を詳細に測定し、それを等高線表示することにより、各座屈におよぼす内部液体の影響を実験的に明らかにした。得られた結果を各座屈実験ごとに要約すると以下ようになる。

外圧座屈実験（第5章）

- (1) 液位の増加につれて座屈圧力、座屈後の釣合圧力および周方向波数は逐次増加するが、座屈後の内向きおよび外向きの最大たわみ量は減少する。
- (2) 座屈後のたわみ波形の軸方向および周方向分布を詳細に測定し、更に等高線表示することにより、液位の増加につれて座屈後のたわみ波は逐次上方に移動することを明らかにした。
- (3) 本実験で得られた座屈圧力は第1章において求めた理論値の約90～93%であり、理論と実験は非常に良く一致することが確かめられた。

軸圧縮座屈実験（第6章）

- (1) 座屈後のたわみ波形は、円筒殻内部に液体がある場合でもない場合と同様に非対称型と対称型の2種類のたわみ波形が実現できた。なおここで実験した範囲では自然に得られた波形は全

て非対称型であった。

- (2) ここで実験した液圧比 ($p_x = 2.93$) では軸圧縮座屈荷重は液位によってほとんど変化しないが、座屈後の釣合荷重および周方向波数は液位の増加と共に増大する。これに伴い、座屈後の内向きの最大たわみ量は減少する。
- (3) 座屈後さらに軸圧縮量を増加させると、一般に2次座屈により周方向波数が1つ少ない次の安定な釣合状態に移行する挙動を繰り返す。逆に軸圧縮量を減少させると2次座屈により波数が1つ多い次の釣合状態に移行する挙動を繰り返して座屈前の変形状態に戻る。
- (4) 液位の増加につれて座屈後のたわみ波は非対称型、対称型ともに、逐次上方へ移動する。
- (5) 本実験で得られた軸圧縮座屈荷重は第2章において求めた理論値の約80~82%であり、理論と実験はかなり良く一致することが確かめられた。

ねじり座屈実験 (第7章)

- (1) ねじり座屈荷重、座屈後の釣合荷重並びに周方向波数は液位比 ℓ_0 の増加につれて増大する。ここで実験した範囲では $\ell_0 \leq 0.4$ において2次座屈現象が観測された。
- (2) いずれの液位においても、座屈後の内向きの最大たわみ量はねじり角の増大と共に単調に増加するが、外向きの最大たわみ量は座屈直後に最大となり以後逆に減少する。
- (3) ねじり角を一定とした場合、液位の増加につれて座屈後の軸方向圧縮量は増加するが、内向きおよび外向きの最大たわみ量はわずかに減少する。
- (4) 液位の増加につれて座屈後のたわみ波は逐次上方に移動する。
- (5) 本実験で得られたねじり座屈荷重は第3章において求めた理論値の約90~92%であり、また座屈波数はほぼ理論値と一致していることから理論と実験は非常に良く一致することが確かめられた。

結 論

部分的に液体を満した円筒殻に一樣な外圧、圧縮、ねじり荷重がそれぞれ単独に作用する場合の座屈問題に関して理論的並びに実験的研究を行なった。

先ず第1部においては、静液圧および座屈前の有限曲げ変形の影響を考慮に入れたDonnell型の基礎式にGalerkin法を適用することにより各荷重による座屈問題を理論的に解析するとともに、円筒殻形状、液位、液圧の広い範囲に対して、座屈荷重および座屈波数を正確に算出し、尚その結果を設計上有用な線図の形で提示した。

次いで第2部においては、試験円筒殻としてポリエステルフィルム製試験円筒殻を、円筒殻内部液体として水を用い、 $Z = 1000$ 、 $p_x = 2.93$ に対応する上記各荷重による座屈実験を行ない、第1部において得られた座屈問題の理論解の妥当性を確認すると共に、各場合の座屈後の挙動に関して精密な実験的研究を行なった。

参 考 文 献

1) たとえば

児珠, 八卷, 東北大学速研報告, 43 (1979), pp. 31-76.

八卷, ほか2名, 東北大学速研報告, 43 (1979), pp. 77-88.

S. Kodama and N. Yamaki, *Int. J. Nonlinear Mech.*, 16 (1981),
pp. 337-370.

審 査 結 果 の 要 旨

薄肉円筒殻の座屈および座屈後の挙動を明らかにすることは、軽量構造物設計上の重要課題であり、円筒殻に外圧、圧縮、ねじり等の基本的な荷重が作用する場合の弾性安定問題はほぼ解明されたものと思われる。一方、内部に部分的に液を満たした場合に、それが円筒殻の安定性に如何なる影響を与えるかは、大型石油タンク等の設計とも関連して重要であるが、未だ殆ど研究されていない。著者はこの問題を逐次系統的に解明する事を目的として、理論的並びに実験的研究を行なった。本論文はその成果をまとめたもので、序論、第1部、第2部、結論よりなる。

序論では本研究の目的とその概要について述べている。

第1部は理論的研究に関するもので、3章よりなる。

第1章では、部分的に液を満たした円筒殻に外圧が作用する場合、第2章では圧縮荷重、第3章ではねじり荷重が作用する場合の座屈問題の理論解析結果について述べている。何れの場合も先づDonnellの基礎式にGalerkin法を適用する事により、両端完全固定の境界条件の下に、静水圧及び座屈前の有限曲げ変形の影響をも考慮に入れて正確に解く方法を提示すると共に、円筒殻形状係数 Z 、液圧比 p_x 、液位比 l_0 の広い範囲に亘って座屈荷重並びに波数を正確に算出し、各場合の座屈に及ぼす内部液体の影響を解明している。これは実用上重要な資料を提供したものと見える。なお圧縮荷重の場合には、座屈荷重は液位の上昇に伴い複雑な変動を繰り返す事、満液の際には座屈前の曲げ変形が著しく大きくなる事を明らかにしているが、注目すべき新知見である。

第2部は半径100mm、長さ117mm、厚さ0.13mmのポリエステル製円筒殻に、内部液体として水を用いた場合の実験結果に関するもので、4章よりなる。

第4章では試験円筒殻の材質、諸元および製法について述べている。

第5章ないし第7章ではそれぞれ外圧、圧縮、ねじり荷重が作用する場合の座屈及び座屈後の挙動に関する実験結果について述べている。各場合とも液位を逐次変化させて、一定に保ち、荷重と軸圧縮量、ねじり角、最大撓み量との関係を記録すると共に、代表的な座屈後のたわみ波形を求めている。また液位の変化に伴う座屈荷重および波数の変化は、第1部の理論結果と妥当な一致を示すことを明らかにしている。これらはこの場合の座屈後の挙動に関して貴重な資料を提供したものと見える。

結論では本研究の成果を総括している。

以上要するに、本論文は外圧、圧縮、ねじり荷重をうける円筒殻の座屈に及ぼす内部液体の影響を理論的に解明し、座屈後の挙動に関する重要な資料を提供したもので、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。