

軸圧縮・曲げ・せん断荷重を受ける無補強およびリ ング補強円筒殻の座屈強度に関する研究

岡藤, 孝史

<https://hdl.handle.net/2324/4784598>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 岡藤 孝史

論 文 名 : 軸圧縮・曲げ・せん断荷重を受ける無補強およびリング補強円筒殻の
座屈強度に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

円筒殻は、基本的な構造要素であり、火力発電プラント、原子力発電プラント、化学プラントをはじめとした各種プラントにおける容器やその支持構造、LNG 船タンクの支持構造、風車タワーや煙突といった塔状構造など、多種多様な構造物に適用されている。近年、それらの製品が大出力化、大容量化しており、それに伴って円筒殻についても大型化し、従来よりも相対的に薄肉化している。また、設計荷重についても、例えば原子力プラントにおいては 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震を契機に、さらなる安全性向上を目的とした新規制基準が制定されるなど、増大の傾向にある。このような状況により、大型円筒殻は構造、荷重のいずれの面からも座屈強度が厳しくなっている。一方で、製品の競争性の観点からは、大型円筒殻は更なる薄肉化や効率的補強によるコスト低減が求められている。

これを受け、本研究では、軸圧縮荷重、曲げ荷重、せん断荷重を受ける大型円筒殻において、合理的かつ信頼性の高い座屈強度設計を達成する手法について検討した。大型円筒殻の座屈設計は、一般的に、設計の初期段階において設計式により円筒殻の径、高さ、板厚などの体格を決定する基本設計を行った後、開口部や部分補強、工作精度などの影響を考慮した詳細設計を行う流れになっており、本研究ではそれぞれのフェーズに対応した合理化策について検討した。まず、基本設計段階に対しては、大型円筒殻の適用製品の多様性により、寸法、材料、軸圧縮・曲げ・せん断の荷重比率も広範囲にわたるが、これらを網羅するため、各種の座屈形態に対して、厚肉・低降伏応力の材料の円筒殻で発生する塑性座屈から薄肉・高降伏応力の材料の円筒殻で発生する弾性座屈まで評価可能な座屈設計式を提案した。また、詳細設計段階に対しては、不連続なリング補強材により円筒殻の付帯構造との干渉を回避しつつせん断座屈強度を向上させる補強方法、有限要素解析を用いて保守的かつ合理的な座屈設計を行う手法、および座屈強度を低下させる初期不整量を管理するための製作精度要求の緩和策について提案し、それぞれ試験・解析による検証を実施した。これらの研究結果をまとめた本論文は、6 章により構成されている。

第 1 章は緒論であり、研究背景および本研究の目的について述べている。

第 2 章では、まず、軸圧縮座屈、曲げ座屈、せん断座屈およびそれらの組合せに対する従来の評価式を整理した上で、既往研究で提唱された低降伏応力のステンレス鋼製の円筒殻向けの座屈設計式をベースとして、地震荷重の低減策として採用される水平免震設計における、長周期の水平荷重下での大きな軸圧縮荷重の繰り返しによる座屈強度低下について現象の考察および解析による定量化を行い、これを考慮した補正式を追加した座屈設計式を提案した。また、座屈試験および広範囲のパラメータ解析により、これまで未検証であった高降伏応力の合金鋼への座屈評価式への適用性を評価し、座屈強度が厳しくなるような、座屈モード形状に対応した初期不整が付与された場合に

においても、座屈設計式により座屈強度を保守的に評価できることを確認した。

第3章では、せん断座屈が支配的な円筒殻の座屈強度向上策として、付帯構造との干渉を回避した不連続なリング補強による座屈補強策を考案した。円筒殻のせん断座屈補強としては、周方向に連続したリング補強が有効な対策の一つと考えられているが、既設構造への追加補強時をはじめとして、開口や配管といった付帯構造との干渉回避のため、リング補強材を不連続に配置せざるを得ない場合がある。このため本研究では、付帯構造の存在により周方向にせん断座屈の半波長を超えるようなリングの不連続部が生じる箇所には、不連続部の上下に短いリング補強材を配置することにより、不連続な低剛性部の存在による座屈強度低下を防止するリング補強の配置を考案した。この不連続部を有するリング補強の有効性を検証するため、原子炉格納容器の円筒殻の縮尺モデルを用いた静的座屈試験、および試験に対応する静的弾塑性座屈解析を実施した。その結果、提案した不連続なリング補強によって、連続したリング補強と同等のせん断座屈補強効果が得られることを確認した。

第4章では、有限要素解析を用いた弾塑性座屈解析による設計手法を提案した。弾塑性座屈解析は、部分的な開口や補強をモデル化できるなど詳細な座屈強度評価が可能な一方で、解析条件設定によっては実態より座屈強度を過大に評価する可能性があるため、これまで各種設計規格において、弾塑性座屈解析による座屈設計手法は具体的に示されていなかった。そこで、本研究では、原子炉格納容器を例題として、円筒殻の耐震設計における座屈強度設計手法として静的弾塑性座屈解析を用いた設計手法を提案するとともに、材料特性、要素種類・寸法、解析の制御法、初期不整などのパラメータに対する感度解析を実施し、座屈荷重を保守的かつ合理的に評価するためのパラメータの設定方法を含む設計解析ガイドラインを提案した。また、既往の座屈試験を対象として、提案した設計手法に従った静的弾塑性座屈解析を実施し、実験結果と比較することで、座屈強度を保守的かつ合理的に評価できることを確認した。

第5章では、溶接により製作される大型円筒殻における、円筒殻全体にわたる初期不整や、局所的な溶接残留応力・変形が座屈強度に与える影響について評価した。大型円筒殻は機械加工では製作困難なため、多数の曲面板の溶接により製作されるが、曲面板同士の接合位置・角度の誤差の積み上げにより、円筒殻全体としては機械加工よりも大きな初期不整量となることが想定される。そこで、円筒殻全体にわたる代表的な長波長の初期不整としてオーバルモードを考え、最も座屈強度を低下させると考えられる座屈モード形状の初期不整と組み合わせた解析モデルの弾塑性座屈解析を実施した結果、円筒殻全体にわたる初期不整は座屈強度の低下にほとんど寄与しないことを確認した。そのため、実機円筒殻の座屈設計においては、初期不整量は、座屈モードに相当する基準長さ（ゲージ長）あたりの初期不整量にて管理すれば良く、円筒殻全体にわたる初期不整は無視できると考えられる。また、溶接による局所的な残留応力・変形についても、これらを考慮した解析により、座屈強度への影響は小さいことを確認した。

第6章では、本論文の結論を述べるとともに、本研究に関連する将来の課題について言及している。

〔作成要領〕

1. 用紙はA4判上質紙を使用すること。
2. 原則として、文字サイズ10.5ポイントとする。
3. 左右2センチ，上下2.5センチ程度をあげ，ページ数は記入しないこと。
4. 要旨は2,000字程度にまとめること。
(英文の場合は，2ページ以内にまとめること。)
5. 図表・図式等は随意に使用のこと。
6. ワープロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」
の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。