

円筒容器における座屈強度の感度解析

Sensitivity Study of Buckling Strength for Cylindrical Shells

加藤 秀雄 (Hideo Kato)* 佐々木 亨 (Toru Sasaki)*

要約 地震時における大型円筒容器の座屈現象を明らかにすることを目的として、まず有限要素法による弾塑性座屈強度評価手法を検討した。次に、高さ(L)、半径(R)、板厚(t)等の形状パラメータおよび圧力の変化等の荷重パラメータによる感度解析を実施することにより、座屈強度と座屈形態(以下、座屈モード)に関する特性を把握した。

弾塑性座屈強度評価手法に関しては、不整形を1次座屈固有モード形状、不整形の最大値を板厚の1%とすることにより真円状態と同程度の座屈強度が得られることを明らかにした。

形状パラメータについては、 R/t が小さい(板厚が厚い)場合に曲げ座屈が発生し、 $2 \leq L/R \leq 4$ 、 $R/t \geq 400$ で弾性座屈であることが分かった。一方、荷重パラメータについては、内圧による周方向応力はせん断座屈強度を増加させるとともに、曲げ座屈強度を低下させ、静水圧による周方向応力は座屈モードを変化させ、局所的な変形を発生させることが明らかになった。

キーワード 有限要素法, 座屈, 座屈強度, 座屈モード, 地震, 感度解析, 円筒容器

Abstract Aiming at making clear buckling behavior of cylindrical shells under earthquake loadings, we investigated the procedure of recent elastic-plastic buckling analysis by finite element method (FEM). Thereby it is confirmed that the buckling strength becomes as well as that of a shell with a cross section of a perfect cylinder, if we apply the first buckling eigenvector to imperfection mode and assume the maximum imperfection amplitude to be 1% of the wall thickness.

And then, by carrying out sensitivity study of buckling with geometrical parameters, such as length (L), radius (R), wall thickness (t), and load parameter, such as pressure, we obtained several characteristics about buckling strength and buckling mode for cylindrical shells. From the geometrical parameter analysis, it is seen that bending buckling occurs for small R/t (thick wall) and elastic buckling occurs for $2 \leq L/R \leq 4$ and $R/t \geq 400$. And from the load parameter analysis, it is shown that hoop stress caused by the inner pressure increases shear buckling strength but decreases bending buckling strength, and hoop stress by hydrostatic pressure changes buckling mode and generates local deformation.

Keywords Finite Element Method, Buckling, Buckling Strength, Buckling Mode, Earthquake, Sensitivity Analysis, Cylindrical Shell

1. 序言

地震発生時における原子力プラント、化学プラント等の大型円筒容器の特徴的な破壊現象として、座屈現象が挙げられる。

理論座屈式による座屈強度は、実験結果を大きく

上回る場合が多いことから⁽¹⁾、NASAは実験結果を包絡した理論座屈式⁽²⁾を基本とする弾性範囲に限った座屈強度評価法を提案している。一般円筒容器の座屈現象は、形状、荷重によっては、塑性の影響を受ける。高速増殖炉(以下、FBR)の座屈研究においては、座屈強度に与える塑性の影響も考慮し、多く

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

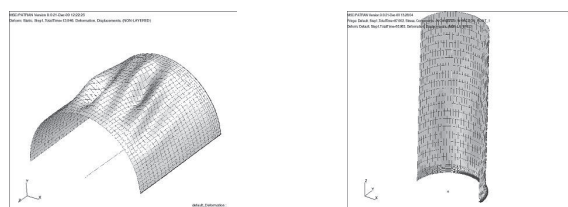
の実験と有限要素法による解析(以下, FEM 解析)をもとにした弾塑性座屈評価式を提案している。⁽²⁾⁽³⁾しかし, FBR 座屈評価式の対象は吊下げ式の原子炉容器であるので, 定置型一般円筒容器とは形状範囲, 内圧, 静水圧による圧力分布が異なっている。

そこで, 本研究において, 一般的な円筒容器を対象に形状および内圧, 静水圧をパラメータとした FEM 感度解析を実施し, 座屈強度および座屈モードに関する特性を把握した。

2. 円筒容器の座屈現象

円筒容器の座屈現象とは, 荷重の増大とともに, 急激に変形(以下, 座屈モードと呼ぶ。)が発生し, 荷重が低下する現象である。

座屈モードには曲げ座屈とせん断座屈の 2 種類があることが過去の知見⁽¹⁾から得られている。せん断座屈は円筒容器胴中央部を中心とした波形が現れる現象であるのに対し, 曲げ座屈は円筒容器下部が象の脚のように膨らむ現象であり, 円筒容器の高さ, 半径, 板厚などの形状によって現れる現象が変化することが知られている。各座屈モード図を図 1 に示す。



せん断座屈

曲げ座屈

図 1 座屈モード図

地震発生時を想定して, 円筒容器の重心点に水平方向荷重をかけると, 荷重と重心点の変位の関係は図 2 に示すような関係が得られる。座屈強度とは, 変位または荷重を変化させた時の最大荷重であり, その点を座屈点と呼ぶ。

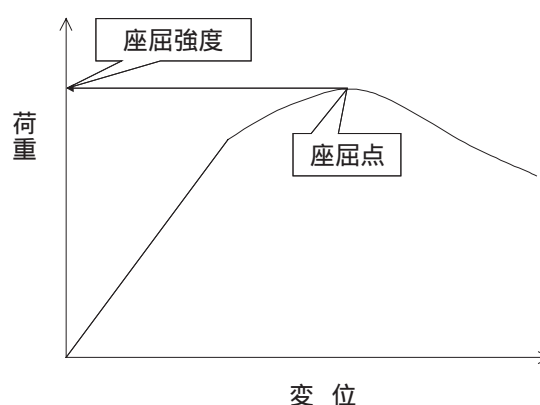


図 2 座屈形態による荷重 - 変位関係

また, 座屈現象には, 弾性座屈と弾塑性座屈の 2 種類がある。それぞれの座屈強度の特性を図 3 に示す。弾性座屈とは, 材料が塑性変形のない状態で荷重と変位の関係が非線形(幾何学的非線形)となり, その後に座屈点に達する現象である。一方, 弾塑性座屈とは, 塑性変形により荷重と変位の関係が非線形(材料非線形性)となり, 座屈点に達する現象である。これらの座屈現象の大きな特徴として, 弾性座屈では, 座屈強度が材料の降伏応力の影響を受けないのに対し, 弾塑性座屈では, 座屈強度が材料の降伏応力の影響を受けるという特徴を持つ。

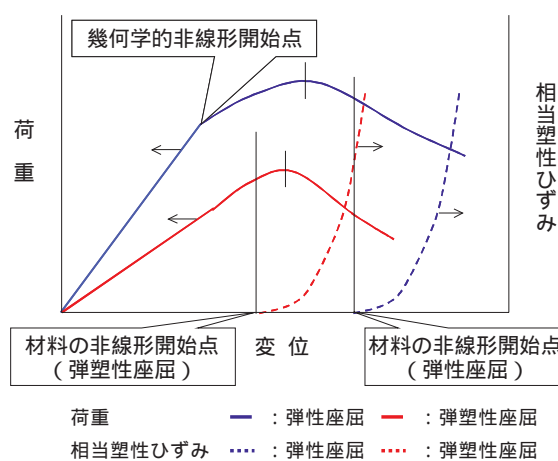


図 3 弾性および弾塑性座屈の荷重 - 変位特性

3. 解析条件

3.1 解析モデルと使用コード

円筒容器においては、地震発生時の荷重は重心位置で代表できることから、FEM 解析モデルにおいても同様に荷重が重心位置にかかるものとした。荷重方向は、地震発生時にかかる荷重方向の内、構造物への影響が大きい水平方向とした。FEM 解析モデルを図4に示す。基礎への固定方法は単純支持とした。一般の円筒容器では天井内部は補強はりにより補強されているため、十分な剛性が確保されていると考え、解析モデルの天井剛性は剛であると仮定した。また、材料特性は弾完全塑性体とした。

解析コードは、汎用陰解法解析コード ABAQUS Ver5.8 を用い、有限要素はシェル要素 (S8R5 : 8 節点低減積分要素) を用いた。要素分割数については、曲げ座屈が発生する場合には座屈変形が発生する円筒容器下部の要素サイズを詳細に分割し、せん断座屈が発生する場合には円筒容器胴中央部の要素の寸法を細かくした。

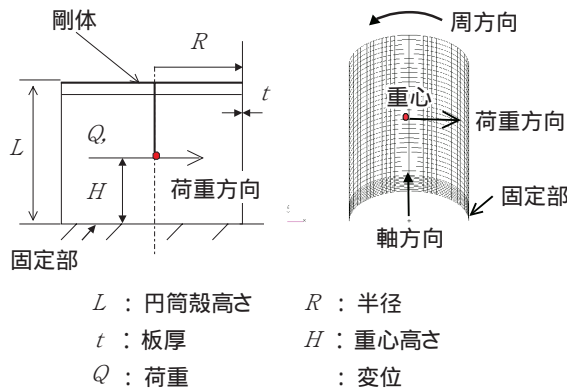


図4 FEM 解析モデル

3.2 感度解析パラメータ

形状パラメータとして、過去の研究³⁾から座屈モード、座屈現象および座屈強度に影響を与える高さ/半径比(以下、 L/R と呼ぶ。)と半径/板厚比(以下、 R/t と呼ぶ。)をとる。FBRの座屈評価における形状適用範囲は $R/t \leq 400$ で十分検討されているが、一般の円筒容器の形状範囲については、 $R/t \geq$

400 の場合も多数ある。そこで、本研究で取り扱う形状範囲は、 $200 \leq R/t \leq 700$ 、 $2 \leq L/R \leq 4$ とした。

一般的な円筒容器の場合は内圧や静水圧が発生するため、座屈強度への影響が懸念される。前述のように FBR 弾塑性座屈評価式はそのまま適用できないという問題点もある。また、文献⁶⁾によると理論的な試みは行われているものの解析的に取り扱っていない。そこで、本研究では荷重パラメータとして内圧と静水圧に着目し、FEM 解析を用いて座屈強度を評価した。

荷重パラメータは、一般的な円筒容器にはガスまたは液体が内包されていることから、圧力をとることとした。また、ガス容器では内圧により圧力が一様に作用し、液体を内包している容器では静水圧が作用していることから、圧力は、一様圧力と静水圧の2種類とした。静水圧の水面高さは円筒容器の高さとした。一様圧力を伴う座屈強度評価では、圧力なしから静水圧による最大周方向応力を発生させる圧力までとした。各パラメータの範囲は半径(R)を 5000 と設定し、以下のとおりとした。

(形状パラメータ)

高さ/半径比(R/t) : 2 ~ 4

半径/板厚比(L/R) : 200 ~ 700

(荷重パラメータ)

一様圧力 : 0 ~ 14MPa

静水圧 : 高さに応じた静水圧

3.3 解析手法

前述の弾性座屈、弾塑性座屈による座屈強度を FEM 解析を用いて求める方法として座屈固有値解析、弾塑性座屈解析がある。各解析法について以下に簡単に述べる¹⁾。

(1)座屈固有値解析

座屈固有値解析とは、弾性変形理論をもとに座屈モードと座屈強度の目安を求める解析手法である。

(2)弾塑性座屈解析

弾塑性座屈解析は、幾何学的非線形性、材料非線形性を考慮した解析手法であるため、弾性座屈、弾塑性座屈のいずれの場合でも座屈モード、座屈強度を求める解析手法である。

4. 座屈強度解析手法の検討

本章では，弾塑性座屈解析により座屈強度を求める手法について検討した．真円形状円筒容器のFEM解析においては，解が見つからない等の問題が発生する．初期不整を与えるFEM解析により上記問題を解決できるが，不整の与え方によっては，座屈強度が真円形状に比べ低下する．形状と荷重をパラメータにした感度解析においては真円形状の座屈が望ましいので，感度解析を実施する前に，座屈強度に影響を与えない不整の与え方を不整形および量について調べた．

真円形状であっても弾性座屈固有値解析により弾性における座屈形状を求めることができるため，不整形は座屈固有値解析で求められた座屈固有モードを不整形として与えることとした．

4.1 座屈固有値解析による座屈固有モード

不整形として与える座屈固有モードを求めるため，座屈固有値解析を以下の真円筒容器形状にて行った．

(円筒容器形状)

$$L/R : 2$$

$$R/t : 200$$

弾性座屈強度と座屈固有モードの関係を図5に，座屈固有モードを図6に示す．

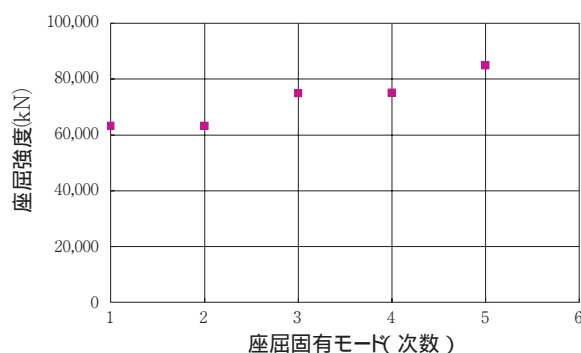


図5 弾性座屈強度と座屈固有モードの関係

図5に示すように座屈強度を評価する上では，座屈強度が最小である1次モードを不整形として用いれば適切と思われる．また，図6に示すように，

形状の特徴として1次モードは軸方向波長が長く，周方向波数が最も少ない変形となっていることがわかる．

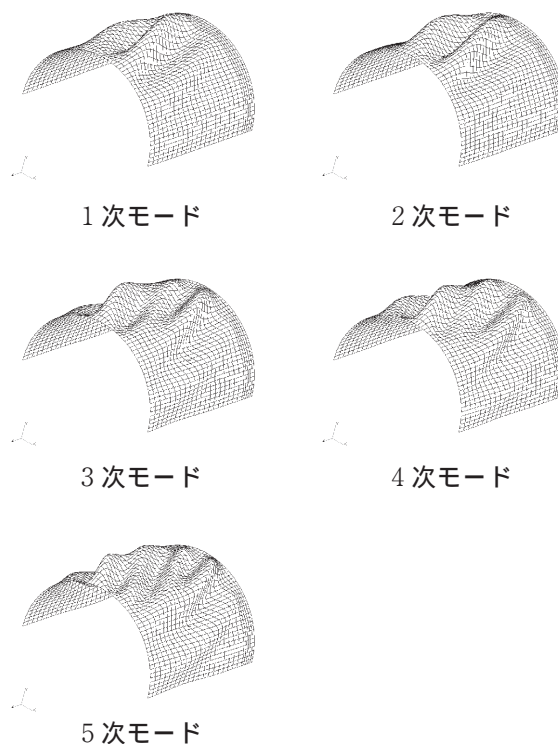


図6 座屈固有モード図

4.2 弾塑性座屈解析による座屈強度に与える不整形と不整量の影響

座屈強度に影響を与えない不整の与え方を不整形および量について調べた．円筒容器の対象は下記に示す形状とし弾塑性座屈解析を実施した．

(円筒容器形状)

$$L/R : 2$$

$$R/t : 200, 700$$

(1) 不整形が与える座屈強度への影響

前項にて座屈固有値解析で得られた1次固有モードを初期形状として採用する目安を得られた．そこで，1次固有モードを初期不整として与える手法の妥当性を弾塑性座屈解析により検討した．最大不整量を板厚の1%とし，1次から5次の座屈固有モードをもとにした不整形を与えた弾塑性座屈解析を実施した．

$R/t=700$ の固有モード毎の初期不整を与えた弾

塑性座屈解析で得られた座屈強度と固有モード次数の関係を座屈固有値解析で得られたモード別座屈強度と合わせて図7に示す。また、荷重と変位およびモデル内で最大となる相当塑性ひずみと変位の関係を図8に合わせて示す。

図8に示すように、塑性ひずみが発生していない状態、すなわち弾性内で荷重と変位の関係に非線形(幾何学的非線形)が現れ、座屈に至っていることから、座屈現象は弾性座屈である。

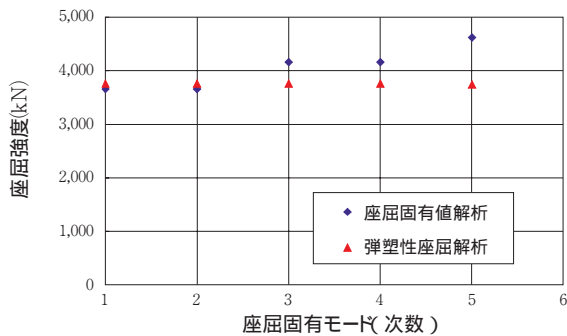


図7 座屈強度と座屈固有モードの関係(R/t=700)

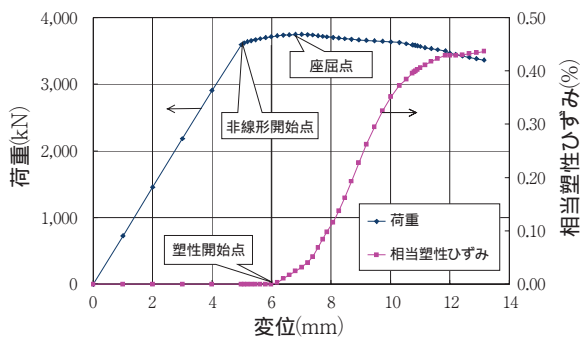


図8 荷重,相当塑性ひずみと変位の関係(R/t =700)

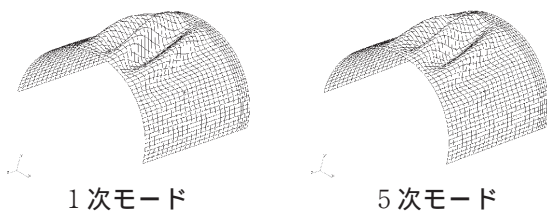


図9 異なる初期不整を与えた弾塑性座屈解析変形図

図7に示すように、弾塑性座屈解析による座屈強度は、座屈固有値解析ほど座屈固有モードに依存せず、ほぼ一定となった。これは、微小な初期不整は単なる座屈のきっかけにすぎず、座屈固有モードの影響はほとんど受けないことを示している。また、図9に示すように座屈固有1次モードと5次モードをもとに不整形状を与えた弾塑性座屈解析変形図は同じ変形となっていることから座屈固有モードの影響はほとんどないことがわかる。

R/t=200の固有モード毎の初期不整を与えた弾塑性座屈解析で得られた座屈強度と固有モード次数の関係を座屈固有値解析で得られたモード別座屈強度と合わせて図10に示す。また、荷重と変位およびモデル内で最大となる相当塑性ひずみと変位の関係を図11に合わせて示す。

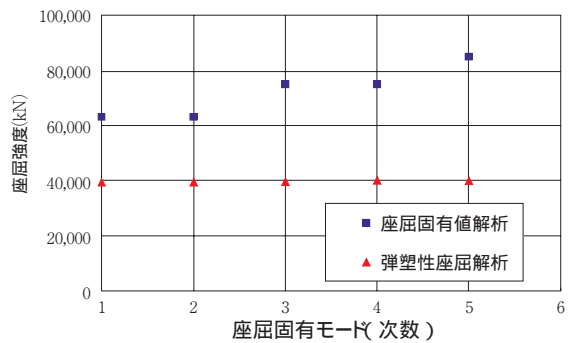


図10 座屈強度と座屈固有モードの関係 (R/t=200)

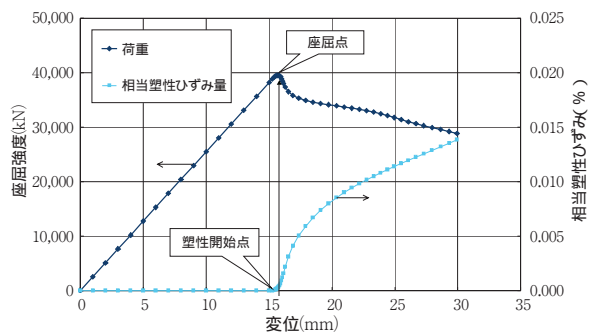


図11 荷重、相当塑性ひずみと変位の関係 (R/t=200)

図11に示すように、相当塑性ひずみの発生と同時に荷重と変位の関係に非線形(材料非線形)が現れ、

座屈に至っていることから、この座屈現象は弾塑性座屈である。 $R/t=700$ の場合と異なり、図10に示すように1次モードの初期不整を与えた弾塑性座屈解析結果は座屈固有値解析結果を大きく下回る座屈強度となった。また、弾塑性座屈解析による座屈強度は、座屈固有値解析ほど座屈固有値モードに依存せず、ほぼ一定となった。

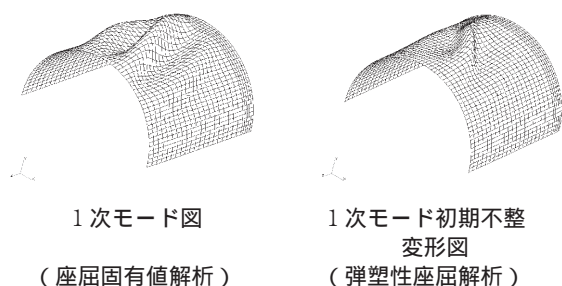


図12 座屈固有値解析によるモード図と弾塑性座屈解析による変形図($R/t=200$)

$R/t=700$ の場合と同様に、初期不整は単なる座屈のきっかけにすぎず、座屈固有モードの影響はほとんど受けないことを示している。また、図12に示すように座屈固有値解析による1次モード図は1次モードの不整を与えた弾塑性座屈解析変形図と異なっていることから座屈固有モードの影響はほとんど受けないことがわかる。

よって、 $R/t=200$ および700の解析結果から、弾性座屈、弾塑性座屈のいずれの場合においても、真円に近い不整量1%程度の微小初期不整であれば、座屈強度は座屈モード、 L/R 、 R/t 等の形状に依存しないことがわかった。そこで、感度解析に用いる不整形は、1次モードとした。

(2)不整量を与える座屈強度への影響

不整形を座屈固有値解析で得られる1次固有モードとし、変位点の最大不整量を板厚の0.1,1.0および10%と変化させて弾塑性座屈解析を実施した。最大変位点以外の不整は、固有モードと最大不整量から設定した。

各不整量による座屈強度と不整量0.1%の座屈強度との比と不整量の関係を図12に、座屈変形図を図13に示す。

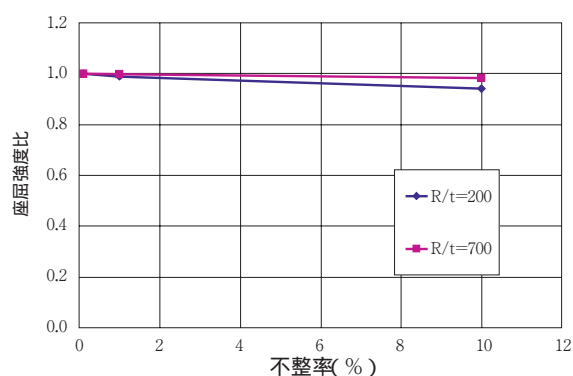


図12 座屈強度比(座屈強度/0.1%の座屈強度)と不整率の関係($L/R=2$)

図12に示すように1%不整量を与えた場合、数%しか座屈強度は低下しない。また、10%の初期不整量を与えた場合でも、座屈強度は低下する傾向は示してはいるものの、座屈強度の低下率は数%であり、不整量による座屈強度への影響はほとんど見られない。

図13に示すように $R/t=200$ においては、不整量が異なっても同じ座屈変形図となっていることから、不整量が座屈モードへの影響を及ぼさないことがわかる。なお、 $R/t=700$ の場合も同様の結果が得られている。

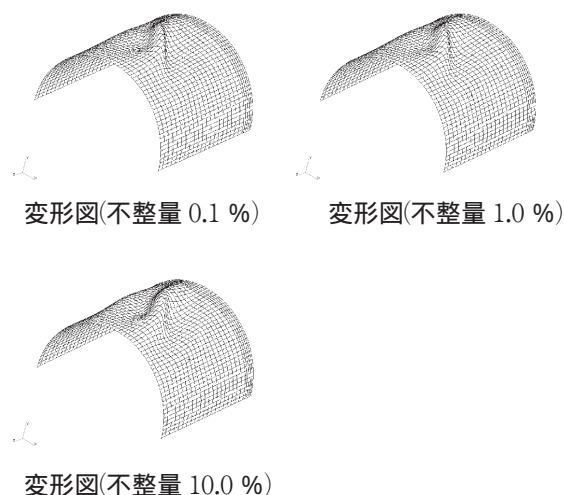


図13 $R/t=200$ における座屈変形図

不整量の与え方として、0.1%の不整量を与えた場合に解が見つからないケースがあったこと、1%程度であれば、座屈強度への影響が少ないことを考慮し、感度解析に用いる不整量は最大不整量を板厚の1%とした。

4.3 座屈強度評価手法のまとめ

4.1 および 4.2 項において，真円状態の円筒容器に初期不整を与える弾塑性座屈解析により，座屈強度に影響を与えない不整形および不整量について調べた．不整形を 1 次座屈固有モード形状，不整量の最大値を板厚の 1% とすることにより真円状態と同程度の座屈強度が得られることを明らかにした．次章の感度解析に用いた弾塑性座屈強度評価手法を以下にまとめる．

初期不整形は，座屈固有値解析で得られる 1 次固有モードとする．
最大不整量は，板厚の 1% とする．
座屈強度評価手法を図 14 に示す．

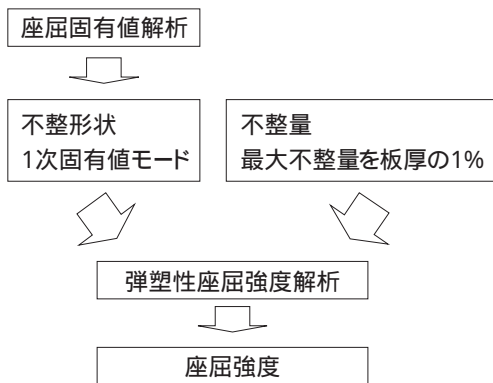


図 14 FEM 解析による座屈強度評価手法

ここで得られた弾塑性座屈強度評価手法を用いて以降の感度解析を行う．

5. 感度解析結果と考察

5.1 形状パラメータによる座屈強度感度解析

円筒容器の形状によって，座屈モードおよび現象が異なってくることが過去の研究³⁾からわかっているが，一般的によく見られる R/t が 400 を超える円筒容器については知見が少ない．本研究では， $200 \leq R/t \leq 700$ ， $2 \leq L/R \leq 4$ の範囲で座屈強度解析を実施した．

解析結果の一覧を表 1 に示す．

表 1 解析結果の一覧

R/t	L/R	座屈強度 [kN]	座屈モード	座屈現象		
200	2	39,510	せん断	弾塑性		
	3	39,739				
	4	34,058	曲げ			
300	2	23,926	せん断		弾性	
	3	20,773				
	4	18,549				
400	2	12,879		せん断		弾性
	3	10,882				
	4	9,660				
500	2	7,846	せん断		弾性	
	3	6,579				
	4	5,815				
600	2	5,248		せん断		弾性
	3	4,368				
	4	3,839				
700	2	3,747	せん断		弾性	
	3	3,095				
	4	2,701				

(1) L/R (高さ / 半径比) による座屈強度への影響

$R/t=200$ および 700 における座屈強度と L/R の関係および座屈変形図をそれぞれ図 15~18 に示す．

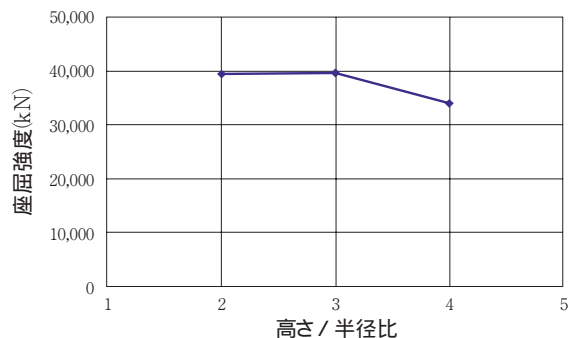


図 15 座屈強度と L/R の関係 ($R/t=200$)

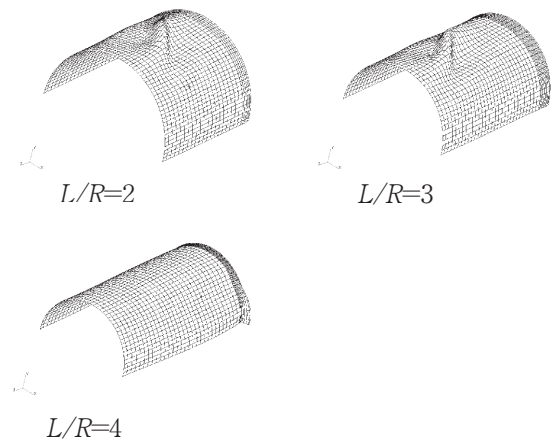


図 16 $R/t=200$ における座屈変形図

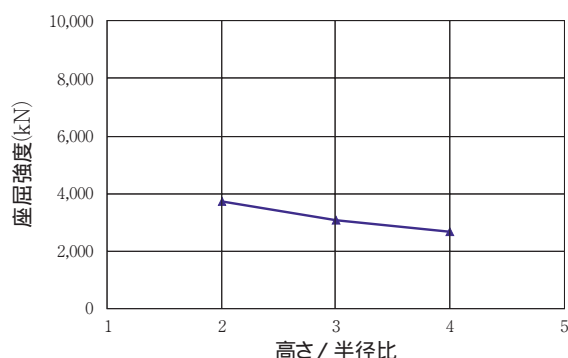


図 17 座屈強度と L/R の関係($R/t=700$)

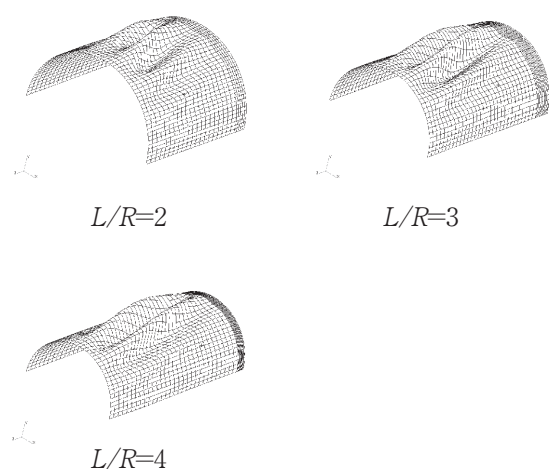


図 18 $R/t=700$ における座屈変形図

図 15 に示すように、 $R/t=200$ の場合、 $L/R=2$ および 3 の座屈強度はほぼ同程度になり、 $L/R=4$ の座屈強度はそれらに比べ小さい結果となった。一方、図 17 に示すように、 $R/t=700$ の場合、座屈強度は L/R の増加に伴い低下する結果となった。両者の傾向が異なるのは、表 1 に示すように座屈モードおよび座屈現象の違いによる。

$R/t=200$ の場合、 $L/R=2,3$ の塑性変形の集中する範囲は図 16 に示すようにせん断モードの特徴である胴の中央部である。また、座屈現象は弾塑性座屈となっている。先に述べたように弾塑性座屈の座屈強度は降伏応力に影響を受けるが、いずれのケースも同じ降伏応力であるので、座屈荷重が同程度となった。 $L/R=4$ については、塑性変形が図 16 に示すように下部に集中する曲げモードとなり、座屈強度が低下している。

$R/t=700$ の場合、表 1 および図 18 に示すようにすべて座屈モードはせん断座屈であり、座屈現象は弾性座屈である。弾性座屈強度は、幾何学的非線形性によって決まることから、図 17 に示すように座屈強度は L/R が増えるにつれて滑らかに低下している。

(2) R/t (半径/板厚比) による座屈強度への影響

弾塑性解析により得られた座屈強度と座屈固有値解析により得られた弾性座屈強度の比および R/t の関係を図 19 に示す。

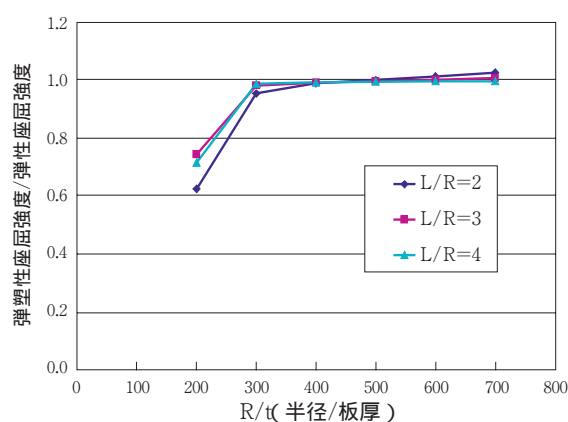


図 19 弾塑性座屈強度 / 弾性座屈強度と R/t の関係

図 19 に示すように、弾塑性座屈解析結果と弾性座屈解析結果の比がほぼ 1.0 となるのは、座屈現象が弾性座屈であることを示しており、表 1 からわかるように、 $R/t \geq 400$ では L/R に関わらず弾性座屈となった。

また、 $R/t=200$ では弾塑性座屈となっているために、座屈強度比が低下しており、中でも座屈モードが異なる曲げ座屈で $R/t=200$ 、 $L/R=4$ の座屈強度比は最も小さい結果となった。

(3) 形状が与える座屈強度特性への影響のまとめ

形状をパラメータとした座屈強度特性を座屈モードと座屈現象に着目し、以下にまとめる。

弾塑性座屈は、 R/t が小さい (板厚が厚い) 場合に発生する。 $2 \leq L/R \leq 4$ の範囲では $R/t \geq 400$ で弾性座屈となる。

5.2 荷重パラメータによる座屈強度感度解析

内圧および静水圧により円筒容器に発生する周方向応力の座屈強度への影響を理論的に求める試みが行われた⁶⁾。内圧荷重は円筒容器に円筒軸方向応力と周方向応力を発生させ、静水圧は周方向応力のみを発生させる。本研究では、周方向応力による座屈強度感度を求めるために、一様圧力(胴部のみ内圧を設定)を与えた内圧解析を実施し、座屈強度への影響を周方向応力で整理、検討した。

(1) 一様圧力が与える座屈強度への影響

周方向応力をパラメータとした一様圧力を伴う座屈強度解析結果の一覧を表2に示す。

$L/R=2$ について、座屈変形図を図20と21に、圧力から求めた周方向応力と座屈強度の関係を図22に示す。

表2 一様圧力を伴う座屈強度解析の結果の一覧

L/R	R/t	周方向 応力 [MPa]	座屈 強度 [kN]	座屈 モード	座屈 現象
2	200	0	39,510	せん断	弾塑性
		20	39,853		
		40	40,696	曲げ	
		70	40,074		
	700	0	3,747	せん断	弾性
		20	7,360		
		40	10,318	曲げ	
		70	9,969		
4	200	0	34,058	曲げ	弾塑性
		40	29,650		
		80	24,148		
		140	12,887		
	700	0	2,701	せん断	弾性
		40	5,885	曲げ	弾塑性
		80	4,701		
		140	2,339		

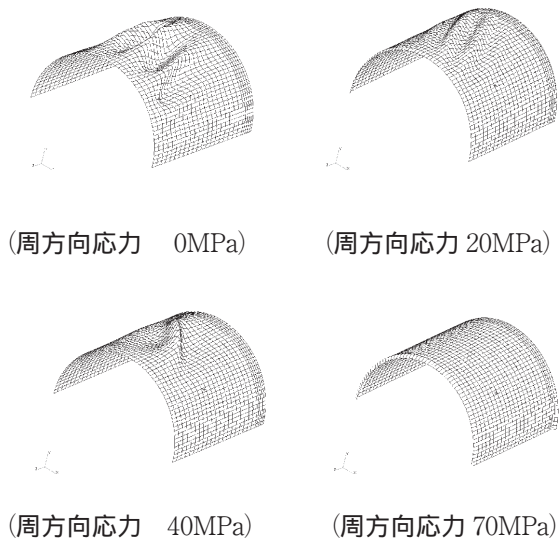


図20 一様圧力による座屈変形図
($L/R=2$ 、 $R/t=700$)

表2、図20に示すように $R/t=700$ の場合、周方向応力が増加するに伴い、座屈モードはせん断座屈から曲げ座屈に変わり、座屈現象は弾性座屈から弾塑性座屈に変わる。

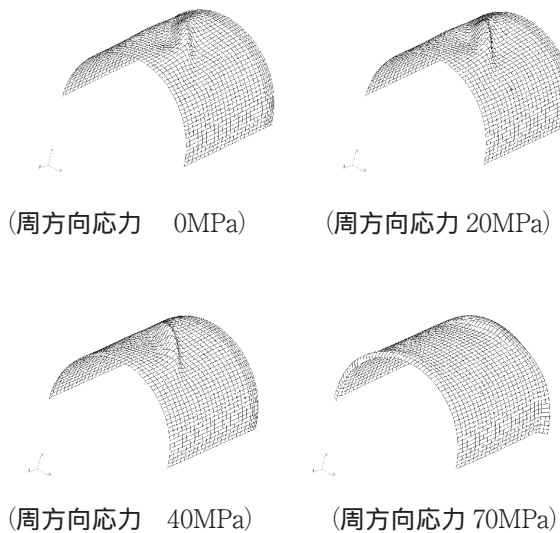


図21 一様圧力による座屈変形図
($L/R=2$ 、 $R/t=200$)

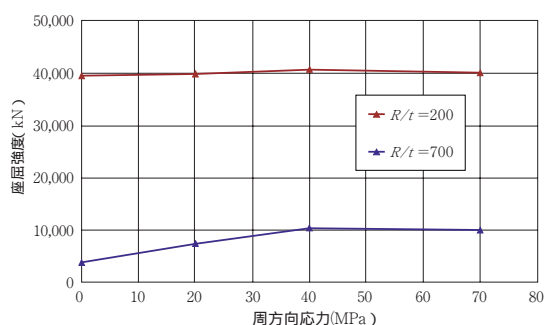


図 22 座屈強度と周方向応力の関係($L/R=2$)

図 22 に示すように座屈強度は、せん断座屈の範囲では、周方向応力の増加に伴って、増加する傾向を示している。図 21, 22 に示すように $R/t=200$ の場合も同様に、座屈モードはせん断座屈から曲げ座屈に変わり、周方向応力の増加に伴い座屈強度は低下する傾向を示した。

$L/R=4$ について、座屈変形図を図 23, 24 に、圧力から求めた周方向応力と座屈強度の関係を図 25 に示す。

表 2, 図 23, 25 に示すように、 $R/t=700$ の場合は、 $L/R=2$ と同様に周方向応力の増加に伴い、座屈モードはせん断座屈から曲げ座屈に変わり、座屈現象は弾性座屈から弾塑性座屈に変わる。座屈強度は、せん断座屈の範囲では増加し、曲げ座屈の範囲では低下する傾向を示した。

表 2, 図 24, 25 に示すように、 $R/t=200$ の場合は、いずれも座屈モードは曲げ座屈であり、座屈現象は弾塑性座屈であった。座屈強度は低下する傾向を示した。

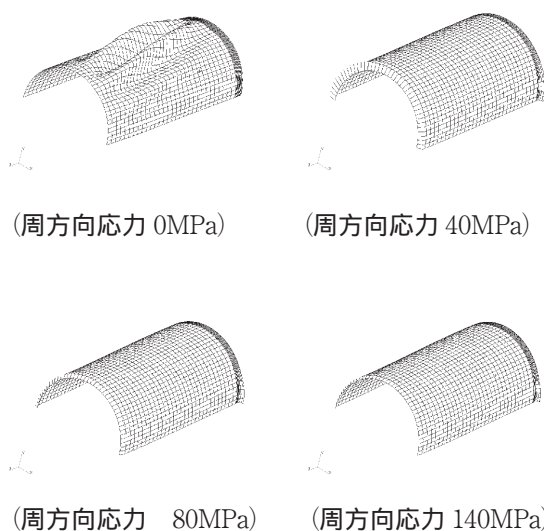


図 23 一様圧力による座屈変形図
($L/R=4$, $R/t=700$)

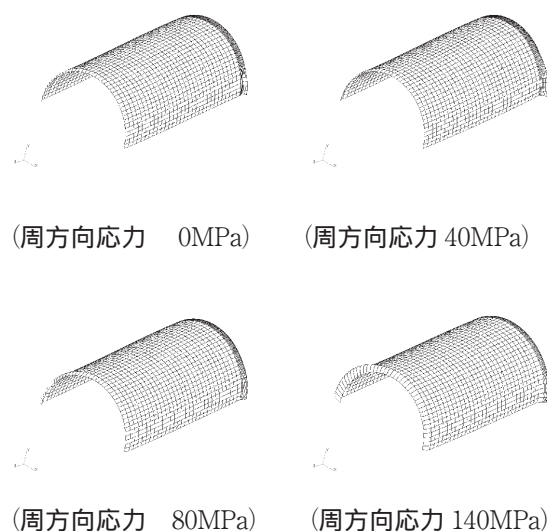


図 24 一様圧力による座屈変形図
($L/R=4$, $R/t=200$)

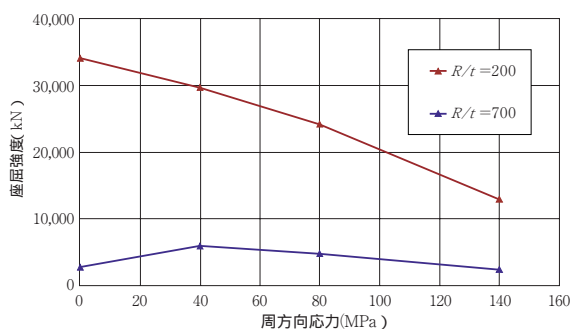


図 25 座屈強度と周方向応力の関係($L/R=4$)

以上の解析結果をまとめると以下ようになる。せん断座屈の範囲では、周方向応力の増加に伴い、座屈強度は増加する。曲げ座屈の範囲では、周方向応力の増加に伴い、座屈強度は低下する。周方向応力の増加により、座屈モードはせん断座屈から曲げ座屈に変わり、座屈現象は弾性座屈から弾塑性座屈に変わる。

せん断座屈が発生する範囲で、周方向応力の増加に伴い座屈強度が増加する理由について考察する。胴部中央には水平荷重による圧縮応力、一様圧力による引張応力が発生し、水平荷重による圧縮応力と一様圧力による引張応力の組み合わせによりせん断座屈となる。そこで、一様圧力による引張応力と水平荷重による圧縮応力が加算された応力は座屈荷重

に影響を及ぼすことから、座屈強度は増加する。

曲げ座屈が発生する範囲で、座屈強度が低下する理由について考察する。胴部下部には周方向応力の引張と軸方向の圧縮により発生する。周方向への引張応力と軸方向の圧縮応力の組み合わせにより、ミーゼスの降伏条件を超え、弾塑性である曲げ座屈となる。一様圧力による引張応力が増大することにより、ミーゼスの降伏応力となるための軸方向の圧縮応力が低下することから、座屈強度は低下する。

周方向応力を変化させることは、すなわち、せん断と曲げの座屈強度を変化させていることと同じである。円筒容器の座屈は、せん断座屈強度と曲げ座屈強度の低い強度で発生するので、周方向応力の増加に伴い座屈モードおよび座屈現象が変化したと思われる。

(2)静水圧が与える座屈強度への影響

一様圧力と静水圧を伴う座屈強度を比較した。静水圧による周方向応力は円筒容器の軸方向に分布がある。比較にあたっては、静水圧を伴う弾塑性座屈解析により変形が発生する箇所の周方向応力を合わせた。曲げ座屈の場合、円筒容器胴下部に座屈変形が発生するため、最下端部の周方向応力とし、せん断座屈の場合は、胴中央部に座屈変形が発生するため、胴中央部の周方向応力とした。

静水圧による解析結果の一覧を表3に示す。

静水圧を伴う座屈強度と一様圧力を伴う座屈強度の比と R/t の関係を図26に、座屈変形図を図27に示す。

表3 解析結果の一覧

L/R	R/t	周方向 応力 [MPa]	座屈 強度 [kN]	座屈 モード	座屈 現象	
2	200	0	39,510	せん断	弾塑性	
		10	39,835		弾性	
	700	0	3,747		弾塑性	
		35	8,839			
4	200	0	34,058	曲げ	弾塑性	
		40	29,727		弾性	
	700	0	2,701		せん断	弾性
		140	2,425		曲げ	弾塑性

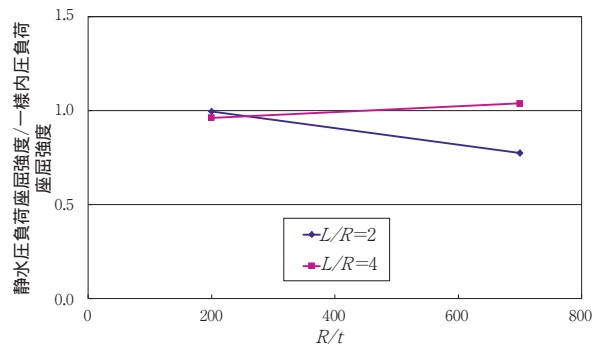


図26 静水圧座屈強度 / 一様圧力座屈強度と R/t の関係

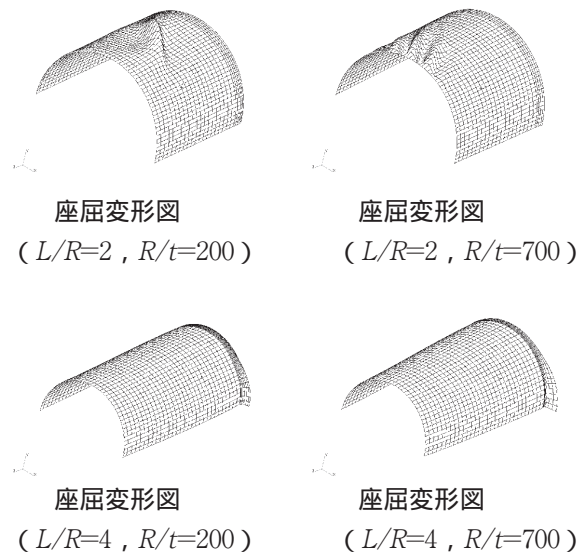


図27 静水圧を伴う座屈変形図

図26に示すように、 $L/R=2, R/t=200$ および $L/R=4, R/t=200$ と 700 の座屈強度は、静水圧と一様圧力を伴う座屈強度とほぼ同じであるが、 $L/R=2, R/t=700$ の静水圧を伴う座屈強度は一様圧力を伴う座屈強度と比べ大きく下回った。

また、表3に示すように周方向応力の増加により座屈モード、座屈現象は、 $L/R=2, R/t=700$ 、および $L/R=4, R/t=700$ の解析結果に示すように、せん断座屈から曲げ座屈に、弾性座屈から弾塑性座屈となった。

座屈形状に着目すると図27に示すように、一様圧力と異なるせん断変形が円筒容器上部に現れている。これは静水圧の場合、上部の周方向応力が小さ

く、中央部の周方向応力が大きいため、上部のせん断座屈強度が中央部の座屈強度を下回ったからと思われる。

(3)荷重が与える座屈強度特性への影響のまとめ

荷重をパラメータとした感度解析結果を以下にまとめる。

一様圧力による周方向応力の増加は、せん断座屈の座屈強度を増加させ、曲げ座屈の座屈強度を減少させる。

$L/R=2$, $R/t=700$ の結果から、静水圧を伴う座屈モードは、せん断座屈であっても一様圧力と異なる部分的な変形が現れる場合がある。

周方向応力の増加により座屈モードはせん断座屈から曲げ座屈に変わり、座屈現象は弾性座屈から弾塑性座屈に変わる。

6. まとめ

感度解析を実施する前に、座屈強度に影響を与えない不整の与え方を不整形および量について調べた。不整形を1次座屈固有モード形状、不整量の最大値を板厚の1%とすることにより真円状態と同程度の座屈強度が得られることを明らかにした。

次に座屈強度の感度解析を実施して、形状パラメータによる座屈強度特性および考慮される荷重パラメータ(一様圧力、静水圧)による座屈強度特性を得た。

まず、前者の結果から、弾塑性座屈は R/t が小さい(板厚が厚い)場合に発生する。圧力荷重がない $2 \leq L/R \leq 4$ の範囲では $R/t \geq 400$ は弾性座屈であることが明らかになった。

次に荷重が与える座屈強度特性への影響として、以下のことが分かった。

一様圧力による周方向応力の増加は、せん断座屈の座屈強度を増加させ、曲げ座屈の座屈強度を減少させる。

静水圧を伴う座屈モードは、せん断座屈であっても一様圧力と異なる部分的な変形が現れる場合がある。

周方向応力の増加により座屈モードはせん断座屈

から曲げ座屈に変わり、座屈現象は弾性座屈から弾塑性座屈に変わる。

7. 謝辞

本研究の遂行に当たり、解析結果の考察について多大な助言をいただきました川崎重工業(株)小木曾誠太郎氏に深く謝意を表します。

文献

- (1) 日本機械学会, 機械工学便覧(1984) .
- (2) 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針(1985) .
- (3) H.Akiyama(Ed.), Seismic Resistance of Fast Breeder Reactor Components Influenced By Buckling, Kajima Institute Publishing (1997) .
- (4) 日本建築学会, 鋼構造設計規準(1973) .
- (5) 日本機械学会, 耐震設計と構造動力学, 日本工業出版(1985) .
- (6) 容器構造設計指針・同解説, 社団法人日本建築学会(1984) .
- (7) 久田俊明, 野口裕久, 機械学会学会論文集 557, (1993), p.203 .
- (8) 藤田勝久, 伊藤智博, 三菱技報, 27-6, (1990) .
- (9) 大坪英臣, 中村秀治, 機械学会学会論文, 58-556, (1992), p.2336 .
- (10) W. E. Baker, J. G. Bennett, Nuclear Engineering and Design, 79, 211-216, (1984) .