

# 鋼製円筒橋脚の座屈評価法と数値解析技術

中村 秀治\*

\*工博 (財) 電力中央研究所構造部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

塑性せん断-曲げ座屈, および塑性軸圧縮座屈領域にある鋼製円筒橋脚の, 水平・上下地震力に対する座屈評価を適切に行うためには, ①静的座屈荷重評価法, ②動的荷重効果推定法, ③耐震裕度評価法, 等の確立が不可欠である. 本論文では, 既往の計算結果に基づいて, 鋼製円筒橋脚の地震時座屈挙動特性について述べた後, ①に関連して著者らの既往の実験データに基づく静的座屈評価式を提示する. さらに, 上記①~③を解決する一手段としての有限要素解析技術について, 座屈解析の精度を保つ立場から共通の留意事項の指摘を行う.

*Key Words : steel pier, shear-bending buckling, buckling strength formula, dynamic buckling numerical analysis*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震によって, 鋼製円筒橋脚の基部あるいは中間部に, 全周あるいは半周程度のバルジ状の曲げ座屈変形が生じ, 一部にせん断座屈の連成効果の見られる場合, あるいは脆性破壊を生じた場合も見受けられた(図1~3). 設計で想定したレベルをはるかに超えた地震力による座屈破壊に対して, 外観調査のみでは破壊部位および破壊モードの必然性を確認するに至らない場合が多く, 各機関で現象解明が進められている.

鋼製円筒橋脚の代表的形状パラメータである半径対板厚比は50程度であり, 水平・上下地震力に対して塑性せん断-曲げ座屈および塑性軸圧縮座屈の発生領域にある. この領域のせん断-曲げ座屈試験データは少なく, 既往基準類においても必ずしもせん断-曲げ座屈評価規定があるわけではない. 評価規定が有る場合でも, 座屈応力は降伏応力で頭打ちにしている場合が多く, 強度安全係数で除して許容座屈応力が定められている<sup>1)</sup>.

具体的に鋼製円筒橋脚の座屈評価を行うためには,

- ①静的座屈荷重評価
- ②線形系としての応答に対して, 塑性による応答低減などを考慮した動的荷重効果の推定
- ③設計荷重状態から, 設定した終局状態に至るまでの耐震裕度評価

等を適切に行える評価手法が必要があるが, 現状において十分整備されているとは言いがたい.

そこで, 本論文では, 既往の計算結果に基づいて, 鋼製円筒橋脚の地震時(座屈)挙動特性について概略述べた後, ①に関連して著者らの既往の実験データに基づく静的座屈評価式を提示する. さらに, 前記①~

③を実施する一手段としての有限要素解析技術について, 座屈解析の精度を保つ立場から共通の留意事項の指摘を行うことを目的としている.

円筒殻の静的座屈評価式については, 過去の実験データを参照しつつ, 著者らの実験データを加えて95%信頼下限相当の評価となるように定めたもので, 3章でせん断座屈, 曲げ座屈, 軸圧縮座屈に対する評価式を具体的に示す<sup>2)</sup>.

有限要素解析の共通の留意事項については, 前記①, ②, ③について, 解析の内容が相違するため, 各々全く異なる. ②, ③については, 少数の自由度の非線形系モデルに置換しての検討となるため, 骨格曲線や履歴則の設定が本質的に重要である. 一方, ①については, 大自由度モデルの弾塑性大変形解析が中心となり, 解析結果を座屈強度評価に用いるためには,

- (1) 座屈荷重値
- (2) 座屈モード
- (3) 座屈前の荷重-変位関係 (特に, 初期剛性)
- (4) 座屈時の非線形係数
- (5) 座屈後の荷重低下特性
- (6) 座屈のしわを発生した部分での局所的応力分布
- (7) 繰り返し荷重下での挙動

について, 信頼に足る結果を出す必要がある. 有限要素変位法の宿命として, 非安全側の評価にならざるを得ないことを念頭に置き, 座屈実験値と有限要素解析値の大小程度の間隔を, 解析条件との関連で把握しておくことは実用上極めて重要である. 以上の理由から, 4章では前記①を対象として, 座屈解析のガイドラインについて述べる<sup>3)</sup>.

## 2. 鋼製円筒橋脚の地震時座屈挙動特性

阪神高速3号神戸線P-584橋脚の解析結果<sup>1)</sup>に基づいて、鋼製円筒橋脚に共通する構造パラメータを念頭に置きつつ、鋼製円筒橋脚の地震時座屈挙動特性について検討すると、以下の通りである<sup>1)</sup>。

### (a) 動的応答

鋼製円筒橋脚の断面形状は、半径/板厚=50以下程度でやや厚肉の円筒殻である。従って、曲げ座屈発生前に塑性による非線形効果（エネルギー吸収による応答低減効果）が期待でき、座屈後の挙動も穏やかで、急激な耐荷力低下は生じにくい。従って、座屈発生以上の強い地震動に対しても、直ちに発散的に変位が増大することはない。P-584橋脚の場合、解析によれば、神戸海洋気象台における記録波の1.5倍のレベルにおいてもなお、特に発散的に変位が増大することもなく、力に比例した最大変位が生じる程度と考えられる。

### (b) 応答低減効果

半径/板厚=50以下程度のパイプ断面橋脚で、地震荷重下において、座屈前・後の応答低減効果が期待できるか否かは、地震波の特性によるところが大きいため、構造側だけの条件で応答低減を推定するのは難しい。線形動的応答解析の結果として、応答倍率が4、5倍以上出るようであれば、かなりの応答低減が見込めるが、応答倍率が2倍程度以下で小さければ、応答低減を見込むべきでない。

### (c) 座屈発生

地震荷重下でのひずみ速度程度であれば、鋼の材料物性に変化をもたらすことはなく、座屈は動的荷重が静的座屈荷重に達した時点で発生する。

半径/板厚=50以下程度の鋼製円筒橋脚では、実際の現象として、降伏モーメントまでに座屈発生することはない。初期不整に対してもそれほど敏感ではない。施工・維持・管理に特に問題が無ければ、全塑性モーメント（降伏モーメントの1.27倍）以上で現実の座屈発生を想定してよいと思われる。

### (d) 耐震裕度

半径/板厚=50以下程度の鋼製円筒橋脚の限界状態に関する統一見解が無いので、仮に座屈発生時点を限界状態と定義すれば、現行の設計でもある程度（2倍程度以上）の耐震裕度は確保される。ただし、そのためには疲労破壊、脆性破壊など、座屈以外の破壊が先行しないことが前提となる。

### (e) 上下動の効果

上下動の影響については、今後とも検討が必要であるが、基本的に、座屈発生に寄与するのは水平動であり、上下動の影響は少ない。一般的には、上下動が重なった場合の方が、若干、振幅が大きくなると考えられているが、地震波の位相によっては、逆に水平動単独の場合より、振幅が小さくなる場合もあり得る。

## 3. やや厚肉円筒殻の座屈強度評価法について

### 3.1 既往の関連基準類

許容座屈強度について参照すべき基準類としては、まず、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編<sup>4)</sup>12章12.3許容応力度の条項がある。鋼管部材を対象としており、相互作用則としては、（軸圧縮応力+曲げ圧縮応力）について1次、せん断応力について2次の相互作用則を採用している。

この規定は鋼管部材を使用する上部構造の設計に適用すると範囲が定められており、橋脚について規定した道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編<sup>5)</sup>には、円筒橋脚を対象とした同種の記述は見出せない。

円筒構造に関して参照すべき他の基準類としては、

- ①座屈設計ガイドライン（土木学会）
- ②容器構造設計指針・同解説（建築学会）
- ③塔状鋼構造設計指針・同解説（建築学会）
- ④ASME Sec. III, Code Case N-284（米国）
- ⑤DnV（ノルウエー）
- ⑥原子力発電所耐震設計技術指針（電気協会）

などが上げられる。これらの対象構造物は海洋構造物、原子力プラント等様々であり、策定過程の異なる基準類であるが、いずれにおいても、鋼製円筒橋脚のように半径対板厚比が50以下の場合、座屈応力は降伏応力で頭打ちとし、荷重種や構造物の重要度に応じて、1.0~1.7程度の安全率を取って許容値を定めている。すなわち、厚肉になるほど試験データのバラツキも少なくなり、概ね降伏応力で頭打ちにすることで、曲げ座屈試験データの下限を確保し、他の規定との整合を図りつつ安全率を設定し、相互作用則としては（軸圧縮応力+曲げ圧縮応力）について1次または2次、せん断応力について2次の相互作用則を採用しているのが実態である。

### 3.2 提示する座屈評価式のバックデータと適用範囲

以下に示す座屈評価式のバックデータは、図4に示す試験装置を用い、下記の形状パラメータ範囲で試験し、収集されている。せん断座屈と曲げ座屈の発生領域は、図5に示した通りである。

- ・半径対板厚比 (R/t) : 50~400
- ・円筒長さ対半径比 (L/R) : 1.0~5.0
- ・最大曲げ応力対最大せん断応力比: 1.0~5.0
- ・鋼材: SUS304, SUS316, 軟鋼
- ・形状不整: 板厚以内

従って、上記パラメータ範囲が座屈評価式の適用範囲となるべきであるが、形状パラメータのわずかな変化による急激な現象変化は認められないので、形状パラメータに関する限り大幅に外れなければ、適用可能である。

材料については、ステンレス製試験体による結果が多いが、座屈荷重に関する限り、SS, SM材に対しては、より安全側評価を与えるものと考えられ、適用可能である。

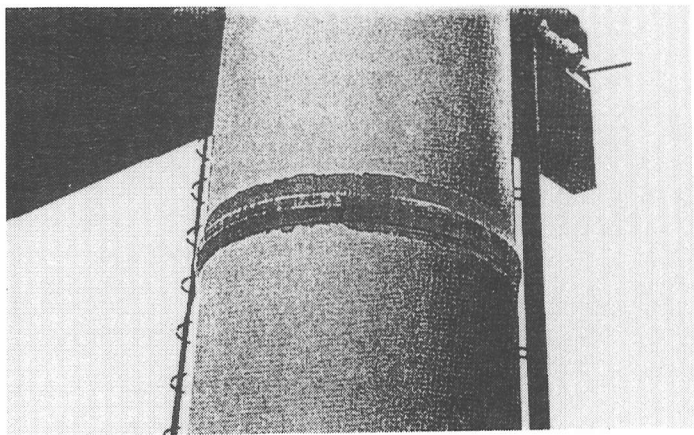


図1 国道2号浜手バイパスP-49橋脚

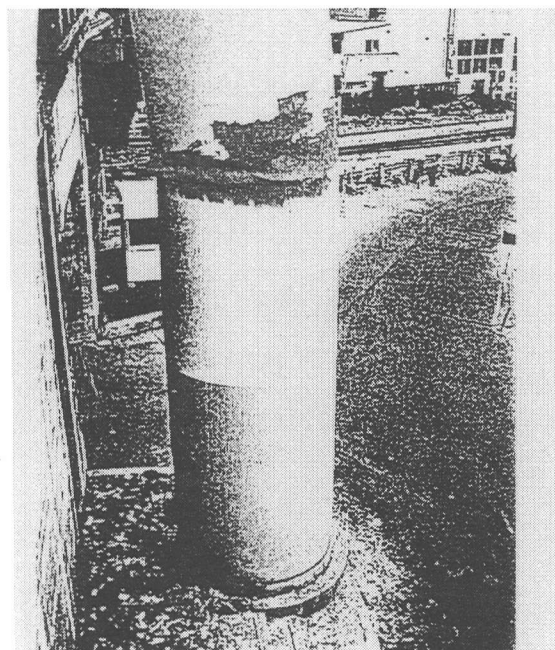


図2 阪神高速3号神戸線P-584橋脚

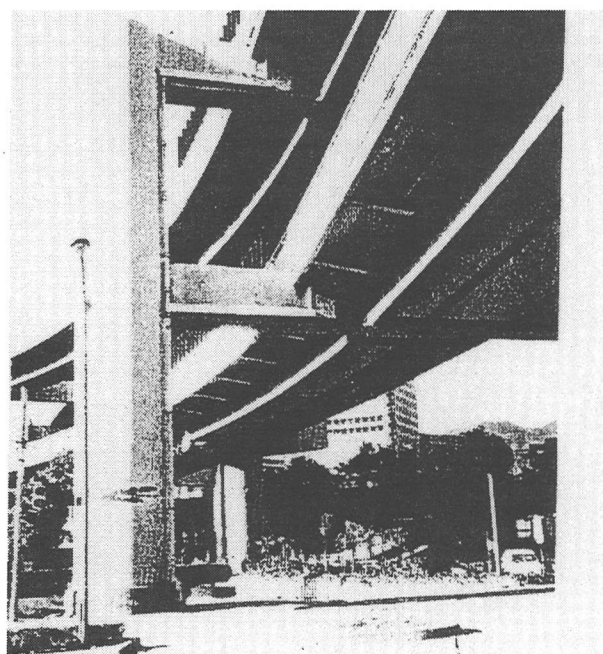


図3 ハーバーハイウェイ浜手バイパス、二層ラーメン柱

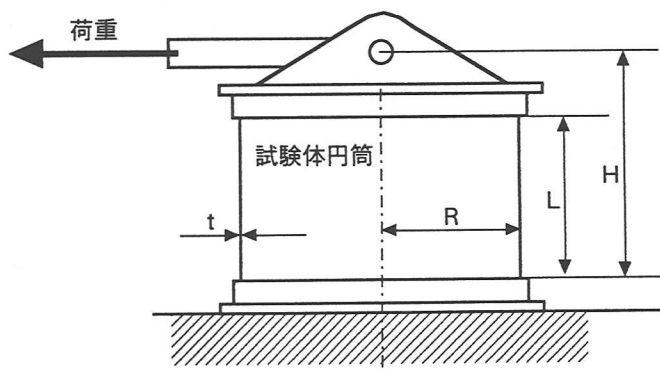


図4 座屈試験状況概略図

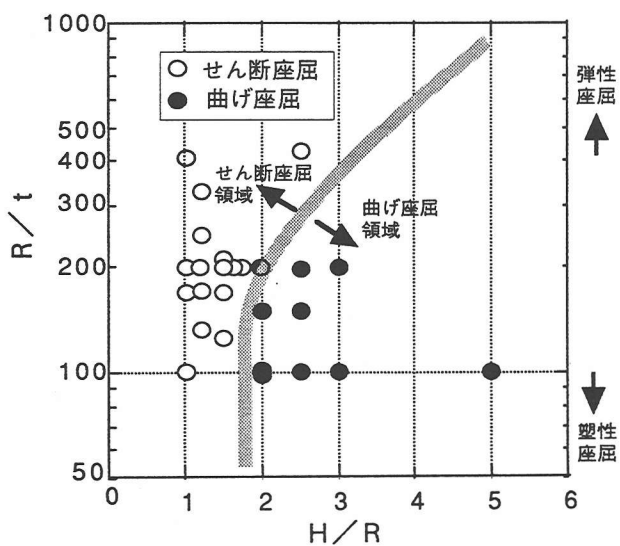


図5 円筒殻のせん断座屈と曲げ座屈の発生領域

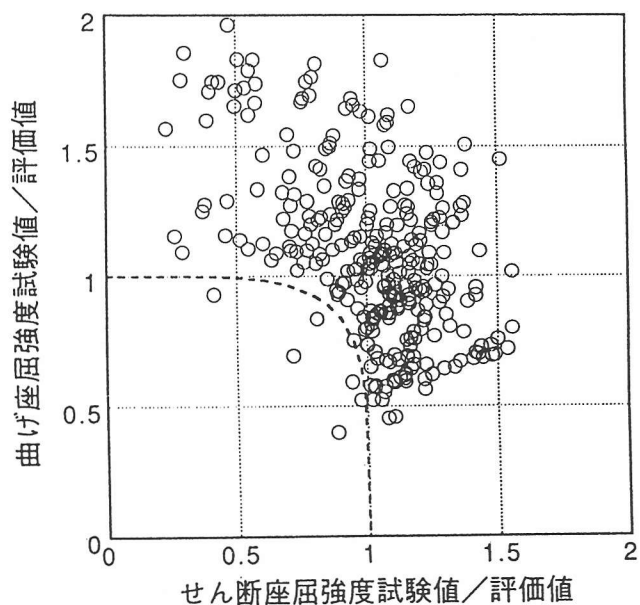


図6 円筒殻のせん断座屈と曲げ座屈の相互作用

### 3.3 許容せん断座屈強度評価式

Timoshenkoによる円筒殻の純ねじり座屈式<sup>6)</sup>が、横せん断弾性座屈データのほぼ下限に位置する事実に注目し、また、実験での座屈荷重値のばらつきおよび曲げの影響による座屈荷重低下を考慮するための係数0.8を乗じたものをせん断座屈応力評価式として採用している。さらに、弾性1次、塑性2次の塑性修正を加えて弾塑性せん断座屈応力を評価する。せん断座屈強度は弾塑性せん断座屈応力を水平荷重に換算したものである。

$$\tau_{cr}^e = 0.8 \frac{4.82}{\left(\frac{L}{\sqrt{Rt}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.0239 \left(\frac{L}{\sqrt{Rt}}\right)^3} \frac{Et}{R}$$

$$\frac{\tau_{cr}^p}{\tau_{cr}^e} + \left(\frac{\sqrt{3} \tau_{cr}^p}{1.27 S_y}\right)^2 = 1 \quad (\text{塑性修正})$$

$$Q_{cr} = \tau_{cr}^p \pi R t \quad (\text{せん断座屈強度})$$

### 3.4 許容曲げ座屈強度評価式

弾性曲げ座屈強度評価式としては信頼度の高いNASAの下限式を用い<sup>7)</sup>、弾性1次、塑性2次で塑性修正を加えて弾塑性曲げ座屈応力を評価する。曲げ座屈強度は、上記の弾塑性曲げ座屈応力を曲げモーメントに換算したものである。

$$\sigma_{b,cr}^e = 0.6 \left[ 1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right\} \right] \frac{Et}{R}$$

$$\frac{\sigma_{b,cr}^p}{\sigma_{b,cr}^e} + \left(\frac{\sigma_{b,cr}^p}{1.27 S_y}\right)^2 = 1 \quad (\text{塑性修正})$$

$$M_{cr} = \sigma_{b,cr}^p \pi R^2 t \quad (\text{曲げ座屈強度})$$

ここで、 $S_y$ : 設計降伏応力

### 3.5 許容軸圧縮座屈強度評価式

弾性軸圧縮座屈強度評価式としては信頼度の高いNASAの下限式を用い<sup>7)</sup>、弾性1次、塑性2次の塑性修正を加えて弾塑性軸圧縮座屈応力を評価する。軸圧縮座屈強度は、上記の弾塑性軸圧縮座屈応力を軸圧縮力に換算したものである。

$$\sigma_{a,cr}^e = 0.6 \left[ 1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right\} \right] \frac{Et}{R}$$

$$\frac{\sigma_{a,cr}^p}{\sigma_{a,cr}^e} + \left(\frac{\sigma_{a,cr}^p}{S_y}\right)^2 = 1 \quad (\text{塑性修正})$$

$$F_{cr} = \sigma_{a,cr}^p 2 \pi R t \quad (\text{軸圧縮座屈強度})$$

### 3.6 せん断座屈、曲げ座屈と軸圧縮座屈の相互作用則

比較的短い鋼製円筒橋脚に水平地震動によるせん断力と曲げモーメントが同時に作用した場合、発生する可能性のあるのは、せん断座屈および曲げ座屈である。また、軸圧縮力が上下地震動により発生する。従って、座屈に関する耐震安全性の判定に当たっては、各座屈モード単独のみでなく、これらが重畳した場合の座屈防止を考慮する必要がある。

円筒殻のせん断座屈、曲げ座屈、軸圧縮座屈の各モードの重畳に対しては以下のような特徴がある。

- せん断座屈と曲げ座屈はそれぞれの最大応力の発生場所が異なり、相互の連成は小さいが、わずかながら曲げ-せん断の重畳による座屈荷重の低下がある。
- 曲げ座屈と軸圧縮座屈については、発生応力、座屈変形とも類似しているため、相互の連成は大きい。
- せん断座屈と軸圧縮座屈については、軸圧縮力が付加的に作用する限り相互の連成は小さい。
- 塑性せん断-曲げ座屈に対する軸圧縮力の影響については、軸圧縮力が軸圧縮座屈荷重の約20%程度までの範囲では、軸圧縮力の増加とともに座屈荷重の多少の低下が見られるが、わずかである。また、座屈前後の荷重-変位関係の基本的特性もほとんど変化しないため、軸圧縮力の作用しない場合の判定式がそのまま用いられるものと考えられる。これに対し、軸圧縮力が軸圧縮座屈荷重の50%程度まで達すると、曲げ座屈荷重の低下、座屈後の耐荷力の低下が著しくなる。

以上のa)~d)を考慮し、曲げと軸圧縮には線形の相互作用則を、せん断と曲げの間では下式のとおり、5乗の相互作用則を採用するのが適切と判断できる。

$$\left\{ \frac{Q}{Q_{cr}} \right\}^5 + \left\{ \frac{M}{M_{cr}} + \frac{F}{F_{cr}} \right\}^5 < 1$$

ここに提示した評価式により、著者等の実験データおよびLundquist<sup>8)</sup>、Galletry<sup>9)</sup>、秋山<sup>10)</sup>、および他の実験データを整理した結果を図6に示す。全データを整理したものは非常に広い形状比(例えば、半径対板厚比=1300程度、長さ対半径比4以上を含む)、種々の材料、製法の供試体による試験結果を含んでおり、形状不整等の情報がないものがほとんどである。そのため厳密な定量的検討には適当ではないが、本評価式が曲げ座屈からせん断座屈、弾性から塑性の広い範囲で、どの程度既往の実験値をカバーしているかを把握することができる。

これらの図から、上記の評価式は、せん断座屈、曲げ座屈を発生する弾性座屈から塑性崩壊に近い領域までの広い範囲でほぼ保守的な評価を与えることがわかる。

## 4. 座屈解析のガイドライン

円筒殻の弾塑性せん断-曲げ座屈試験と併行して、シミュレーション解析を行い、解析コードの選択、使用する要素の選択、材料物性値、要素分割、増分量の設定、収束判定法等が、解析結果へ及ぼす影響を検討した。結論として円筒殻のせん断-曲げ座屈について概ね言えることは、「解析モデルの作成と増分計算の実行条件に留意すれば、座屈荷重そのものは試験結果より平均0~20%程度高めとなるが、従来、文献類<sup>11),12)</sup>に示されているよりも座屈現象を精度よく推定することが可能である。」ということである。図7に既往の検討例36ケースに対する解析値と実験値の比較結果を示す。

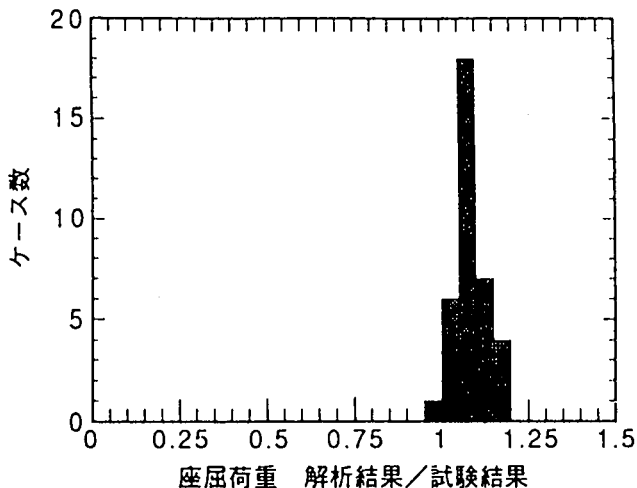


図7 座屈荷重に関する解析結果と試験結果の比較

これら弾塑性座屈解析結果と実現象の関係は、理論的説明が困難であるにもかかわらず、実用上極めて重要な問題であるため、以下に、円筒殻のせん断一曲げ座屈解析上の共通的な留意点を述べる。なお、本検討に主として用いた解析コードは、MARC, ABAQUSである。

#### 4.1 材料物性値の設定

解析に用いる降伏応力 (0.2%耐力) と弾性係数は、関連基準類に従うものとし、応力-ひずみ関係は、可能な限り実際に近い多直線近似、または、曲線近似により与えるものとする (ステンレスのような材料の場合、0.2%耐力までに4直線以上の近似が望ましい。)

#### 4.2 降伏条件と構成式

非弾性解析を行なう場合の降伏条件としてはミーゼスの条件を、流れ則としてはJ2流れ則を用いてよい。また、単調載荷により座屈・崩壊強度を求めるための解析には硬化則として等方硬化と移動硬化のどちらを用いてもよい。

ただし、より厚肉で材料非線形の影響が大きい構造物に対して繰り返し載荷する場合は、等方硬化が必ずしも実際の挙動を良くシミュレートしないので、移動硬化もしくはより適切な構成則を用いる必要がある。一般に、薄肉円筒の場合は材料的な効果よりも形状の非線形効果の影響が強く硬化則の影響は小さい。

なお、座屈荷重付近までのひずみは、特にせん断座屈の場合0.2%以下程度で小さいので、そのひずみ領域での応力-ひずみ関係が座屈までの荷重-変位関係に大きく影響する。従って、ステンレスのように小さいひずみ領域で応力-ひずみ関係に非直線性が現れる材料では、0.2%耐力付近までを細かく設定する必要がある。

#### 4.3 解析モデルに採用する要素の選択

要素の選択にあたっては、ロッキング等の数値的悪条件の発生を回避し得るような弾塑性・大変形シェル要素を選択する。内挿関数の次数としては、2次以上が望ましい。また、弾塑性解析では層分割法のようにシェル断面内の一部降伏を十分考慮できる要素を選択する。

#### 4.4 要素分割

解析モデルの作成にあたっては、要素の形状比に配慮して、収束した適切な解が得られるよう、座屈変形や大きなひずみの発生が予想される箇所に十分な数の要素を配置する。2次の要素を用いた場合の要素分割の目安は次に示す通りである。

##### (1) 円筒殻のせん断座屈を対象とする場合

###### (a) 周方向分割

円筒の側面 (水平力の加力軸から周方向に90° ずれた部分) を中心に、せん断座屈のしわの波長に対して、6~8要素以上の分割とする。座屈のしわの波長は  $2.02 \sqrt{L \sqrt{R t}}$  程度である。

###### (b) 軸方向分割

要素の形状比が悪くならない程度に分割する。曲げ変形が予想されるならば、円筒固定端部付近を多少細かく分割する。軸方向分割が解に与える影響は比較的小さい。

##### (2) 円筒殻の曲げ座屈を対象とする場合

###### (a) 周方向分割

要素の形状比が悪くならない程度に分割する。せん断変形が予想されるならば、円筒側面部付近を多少細かく分割する。周方向分割が解に与える影響は比較的小さい。

###### (b) 軸方向分割

円筒の固定端部の象脚型座屈変形が発生する円筒の軸方向範囲に対して、5要素以上の分割とする。象脚型の座屈変形は円筒下端部から約  $3.0 \sqrt{R t}$  の間に生じる。

##### (3) その他の留意事項

(a)要素分割のパターンとしては、長方形の格子状分割が解析上の問題は少ない。

(b)要素の形状比はせん断座屈の場合、1に近付けるのが望ましい。

(c)座屈後、さらに大きな変形まで解析する場合には、初期の座屈変形以外の2次的な変形が生じることもあるので、要素分割にあたって注意すべきである。

#### 4.5 境界条件、荷重条件

境界条件と荷重条件については、構造物の力学的特性、数値解析法の特性を念頭におき、各節点ごとに設定するが、対象部位が柔らかな荷重伝達経路を有する場合、座屈後の耐荷力の急激な低下と大きな変形の発生の恐れがあるため、モデル化の範囲と解析結果の評価には注意が必要である。

#### 4.6 増分量の選択、収束条件

増分計算で座屈解析を行なう場合、増分量の選択と収束条件の設定は、採用している要素とソルバーにより異なるので一律には決められないが、荷重増分、変位増分、弧長増分のいずれの場合でも、解の収束性、精度を考慮し、最適な増分幅を選択する必要がある。一般には、座屈点近傍において増分幅をかなり小さくする必要がある。

荷重増分の場合、最大荷重点を越えることは不可能であり、解析可能な最大荷重もしくは最大荷重点近傍での固有値解析により座屈荷重を求める。変位増分または弧長増分を用いれば、適切な初期不整を与えることで、最大荷重点を越えることが多くの場合可能であり、最大荷重点をもって座屈荷重とする。この場合は、座屈後の耐荷力の低下と変形の関係も得られる。

#### 4.7 不整の導入

製作上、特定の形状不整の現れることが確認されている場合は、それを用いるものとし、不整量は製作基準で与えられる公差程度とする。それ以外の初期形状不整は、座屈に対して最も厳しいモードで与えるのを原則とし、通常、弾性固有値解析による最低次の固有モードを初期不整とするが、弾塑性座屈解析を行なって得られた座屈モードが弾性座屈モードと著しく異なる場合は、弾塑性座屈モードを不整として用いるものとする。また、円筒殻の曲げ座屈の場合、象脚型の変形よりも全周一様のバルジ型変形の方が、不整形として厳しいので注意すべきである。

#### 5. まとめ

以上、本論文では、筆者らの座屈試験データと、試験シミュレーション解析の比較検討結果に基づいて、やや圧肉円筒殻の単独のせん断・曲げ・軸圧縮座屈評価式、および相互作用則を提示した。さらに一般シェル要素を用いた有限要素法による座屈解析の精度維持・向上のためのガイドラインを示した。大規模な解析モデルを用いた弾塑性大変形解析は計算量が膨大で負担も大きいため、実用上特に重要な材料物性値の設定、降伏条件と構成式、要素の選択と要素分割については、定量的に記述した。

#### 参 考 文 献

- 1) 中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集No.549/I-37, 1996
- 2) 松浦真一・中村秀治・村上俊明・川本要次・小木曾誠太郎・秋山 宏：高速増殖炉容器の耐震座屈設計法に関する研究（第2報、炉容器のせん断-曲げ座屈評価式）、機械学会論文集A編、60巻575号、1994
- 3) 松浦真一・中村秀治・小木曾誠太郎・大坪英臣：高速増殖炉容器の耐震座屈設計法に関する研究（第5報、座屈解析法の適用性評価）、日本機械学会論文集（A編）、61巻585号、1995
- 4) 日本道路協会：道路橋設計示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編，pp.314-317、1994
- 5) 日本道路協会：道路橋設計示方書・同解説、Ⅳ下部構造編，pp.314-317、1994
- 6) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. : Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1961
- 7) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，JEAG4601-1987, 1987
- 8) Lundquist, E.E.: Strength Tests of Thin-Walled Duralumin Cylinders in Combined Transverse Shear and Bending, NACA-TN-No.523, 1935
- 9) Galletly, G.D. and Blachut, J.: Plastic Buckling of Short Vertical Cylindrical Shells Subjected to Horizontal Edge Shear Loads, J. of Pressure Vessel Technology, Vol.107, 1985
- 10) 秋山 宏，他：曲げせん断荷重を受ける鋼製円筒殻の座屈実験，日本建築学会構造系論文報告集，第371号，1987
- 11) Combesure, A. : A review of ten years of theoretical and experimental work on buckling, ASME PVP-Vol. 89, 1984
- 12) Bushnell, D. : Static collapse ; A survey of methods and modes of behavior, ASME PVP-Vol. 89, 1984

## Formulae for Evaluating Shear-Bending Buckling Strength of Steel Piers with Circular Cross Section and Applicability of the Numerical Buckling Analysis Method

Hideharu NAKAMURA

Although plastic shear-bending buckling of the steel piers with circular cross section under horizontal earthquake loading is one of the most important problems in seismic design, the evaluation method of buckling strength is not specified in related standards. The purpose of this paper is to present formulae for determining the buckling strength of the steel piers based on the results of buckling tests of the cylindrical shells, and to describe the buckling analysis strategy, based on the experience of those buckling tests and analyses. Available finite elements and computer codes, mesh division, modeling of shape imperfection, material property, yield condition, constitutive equation and others are discussed.