

京都大学工学部 学生員 ○佐藤 駿洋
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

京都大学大学院 正会員 宇都宮 智昭
 京都大学大学院 正会員 橋本 国太郎

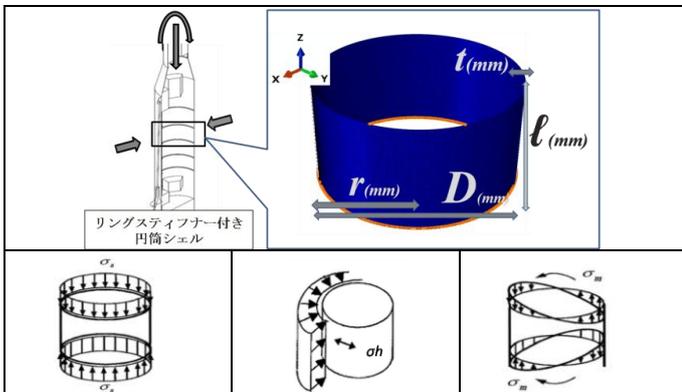
1. 研究背景と目的

円筒をリングスティフナーで補強した構造「リングスティフナー付き円筒シェル」は、スパーク型浮体式洋上風力発電施設をはじめとして、様々な構造物に適用されている。本研究では、軸力、水圧、および曲げモーメントを受けるリングスティフナー付き円筒シェルを対象としてその合理的な設計手法について検討する。設計手法としては海洋構造物設計基準に従った設計を前提とし、ABS¹⁾、API²⁾およびDNV³⁾を対象としてこれら三つの設計基準の基礎的な比較資料を作成する。さらにFEM解析を実施し、これらの設計基準の適用性を検討した。

2. 円筒シェルの構造パラメータ

設計に用いる円筒シェルの構造パラメータを以下に示す。円筒の長さ l (mm)、直径 D (mm)、板厚 t (mm)、半径 r (mm)とする。

表 1 設計に用いられるパラメータ



Z_l	長さの指標: $0.954 l^2/rt$	(範囲 10~100)
D/t	径厚比	(範囲 0~300)
σ_y	高張力鋼 KA-32 相当とし、材料降伏応力 315 N/mm^2 と定める	
σ_a/σ_y	軸圧縮応力を降伏応力で除したもの	(範囲: 0~1.0)
σ_h/σ_y	周方向応力を降伏応力で除したもの	(範囲: 0~0.20)
σ_m/σ_y	曲げ応力を降伏応力で除したもの	(範囲: 0~0.20)

3. 設計耐力曲線の作成

本研究ではリング補剛板の剛性が十分に保たれているとし、リング補剛板間に局部座屈が生じたときを崩壊とみなした。

各種基準における局部座屈に関する強度評価式を整理した。強度評価の流れは図1のように、まず材料条件、構造寸法および設計外力の入力を行う。入力され

た寸法から軸、曲げおよび周方向の設計耐力と安全率の算定をおこなう。最終的に、設計外力/設計耐力 ≤ 1 を基本とし、組み合わせ荷重の関数 $f \leq 1$ の評価が行われる。この組み合わせ荷重の評価は基準によって異なり比較の指標とならないため、強度評価式を D/t と Z_l を用いて整理したうえで、 σ_m/σ_y を縦軸に、 D/t を横軸にとった設計耐力曲線を作成した。この流れを図2に示す。図2のフローチャートに長さの指標 Z_l に関して10と100の2ケース、荷重に関して σ_a/σ_y と σ_h/σ_y に0、0.1および0.2の3ケースの組み合わせを与えて設計耐力曲線を得た。図3にその一例を示す。なお、図3を用いて評価する際、ABSとAPIは許容応力度設計法に基づくものであること、DNVは限界状態設計法に基づく設計であることを考慮し、図3に表示されるDNVの設計耐力と荷重を比較する際には安全率が乗じられることに注意しなければならない。

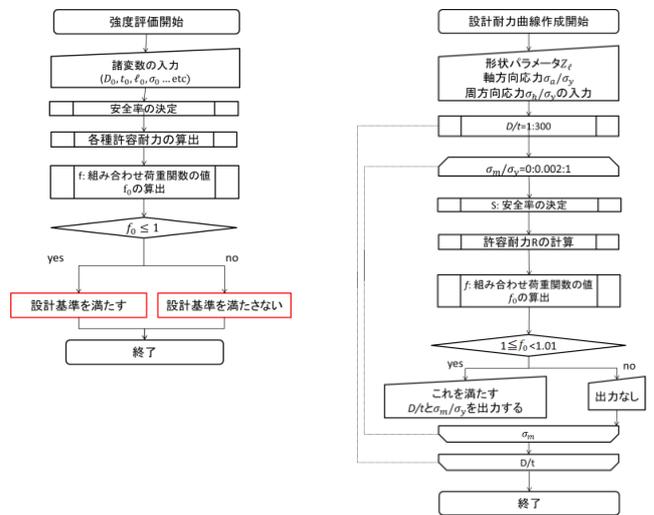


図1 強度評価の流れ

図2 設計耐力曲線作成

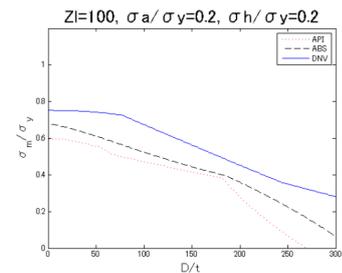


図3 各基準から算出される曲げ方向の設計耐力(設計耐力曲線)

4. 円筒シェルモデルの弾塑性有限要素解析

解析モデルは、2MW 風車を搭載するスパー型浮体の直径を想定し、直径 8000(mm)を基準とする。その他の寸法に関しては 3 章で作成した設計耐力曲線に合わせ、 Z_0 に関して 10 と 100 の 2 ケース、径厚比 D/t に関して 100,200,300 の 3 ケース、計 6 ケースの解析モデルを作成し解析を行った。解析には ABAQUS を用い、シェル要素でモデル化した。材料硬化則には等方硬化則を用い、応力-ひずみ曲線はバイリニア型とした。解析で用いる鋼材は日本海事協会の規定する高張力鋼 KA32 相当とし、降伏応力の値に $315(N/mm^2)$ 、引張強度の値に $440(N/mm^2)$ 、そして引張強度時の塑性ひずみの値には 0.21 を用いた。境界条件に関しては、円筒シェルが浮体の一部であることを考慮し、安全側の設計を想定してピン支持とした。

なお、3 節で述べたように完全な剛性を保つリングステイフナーを想定し、上面、下面とも剛体結合し、図心に対して並進方向の面外変位は拘束したが回転自由度は与えた。軸力と水圧に関しては 2 節で設定したとおり降伏応力の大きさの 0~0.2 倍の大きさの荷重をはじめに与えた、その後回転変位を両端に与え、片端に発生する反モーメント と上面と下面の回転変位の和 θ の関係を出力した。

初期たわみの形状として非軸対称初期不整を採用した。図に示すように、周方向と縦軸方向に sin 波をそれぞれ k 波、 j 半波与えた形状である(図4)。

非軸対称初期不整を直接 Abaqus/CAE で与える方法はない。ここでは Abaqus/CAE で作成した真円円筒の各節点座標 x,y に Matlab を用いて式(1)をそれぞれ初期たわみ形状として与えた。 x',y' を初期たわみを与えた際の座標、 w_0 を初期たわみの大きさとする。

$$\begin{aligned} x' &= \left(1 + w_0 \sin\left(\frac{kx\pi}{2\pi r}\right) \cos\left(\frac{jz\pi}{l}\right)\right)x \\ y' &= \left(1 + w_0 \sin\left(\frac{kx\pi}{2\pi r}\right) \cos\left(\frac{jz\pi}{l}\right)\right)y \end{aligned} \quad (1)$$

製造と照査に関する基準 DNV-OS-C401⁴⁾の定める製作誤差の範囲内で最小耐力を検討し、概ね終局強度が収束した際のをを用いた。ここに示す図 5.2 の $Z_0 100D/t200$ のモデルに対しては $(j,k)=(5,8)$ 、初期たわみの大きさ w_0 には 11.3(mm)を適用した。

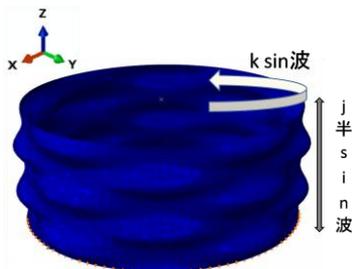


図 4 非軸対称初期不整

5. 結果

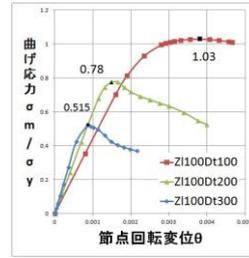


図 5.1 曲げ応力と節点回転変位曲線

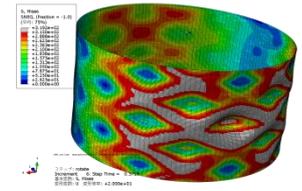


図 5.2 終局状態($Z_0 100D/t200$)

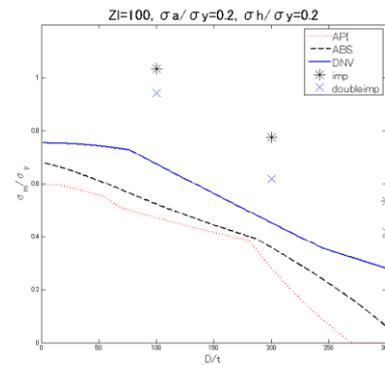


図 6 設計耐力曲線と解析結果の比較

4節で定めた初期たわみを適用し、 σ_a/σ_y 、 σ_h/σ_y 、 Z_0 、および D/t が2節で定める範囲について解析を行い、図 5.1に基準値に従った初期たわみを与えた時の節点回転変位と曲げ応力の関係を示した。その終局強度を設計耐力曲線上に*印として、また基準の二倍の初期たわみを与えた時の終局強度も青のx印としてプロットした。ここには $Z_0 100$ 、 $\sigma_a/\sigma_y=0.2$ 、 $\sigma_h/\sigma_y=0.2$ の結果のみ示す(図6)が、その他のパラメータの組み合わせにおいても同様の結果が得られた。これより、今回の解析条件下ではいずれの設計基準を用いても十分な安全性が確保されているといえる。

6. 結論および課題

- 三つの設計基準の基礎的な比較資料として、各々の強度評価式から曲げに対する設計耐力と径厚比の関係を抽出し、設計耐力曲線を作成した。
- 作成した設計耐力曲線と、本研究の解析条件下で得られた結果を比較した場合、三つの設計基準は十分な安全性を有することがわかった。
- 本研究ではリングの剛性が十分に保たれるという前提で解析を行ったが、今後はリング剛性の影響が反映されるモデルを作成し、設計耐力曲線と比較することが望まれる。

【参考文献】 1) ABS: ABS GUIDE FOR BUCKLING AND ULTIMATE STRENGTH ASSESMENT FOR OFFSHORE STRUCURES2013 2) API:API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD 2003 3) DNV: DNV-RP-C202 Buckling Strength of Shells 2013 4) DNV: DNV OS-C 401 FABRICATION AND TESTING OF OFFSHORE STRUCTURES 2010 Oct