

## 大開口比を有する風力発電設備鋼製タワーの座屈耐力解析

横浜国大 学生員 ○レ・アン・トゥアン 横浜国大 正会員 勝地 弘  
 横浜国大 フェロー 山田 均 横浜国大 正会員 佐々木栄一

## 1. はじめに

風力発電設備鋼製タワーの基部には維持管理のための開口部があり、強度上の弱点となっている。この開口部に対する座屈耐力の照査法として、「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」<sup>1)</sup>(以下、指針)では、次に示す開口部の開口角度とタワー半径板厚比に応じた許容応力低減係数を導入した照査式を導入している。ただし、この許容応力低減係数は、開口比3以下の適用範囲となっており、近年建設されている鋼製タワーにおける開口比3以上には適用できない問題点が指摘されている。

$$\text{応力照査式: } \frac{\sigma_c + \sigma_b}{C \cdot f_{cr}} \leq 1, \quad \text{許容応力度低減係数: } C = A - B(r'/t)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ は開口角度に応じた係数、 $r'/t$ は開口部のタワー半径板厚比である。

本研究は、指針における開口部座屈耐力照査における許容応力度低減係数の適用範囲を4程度までに拡張することを目的とし、開口を有する風力発電設備鋼製タワーの座屈耐力を FEM 解析によって検討したものである。

## 2. 解析条件

対象とした鋼製タワーは、指針の例題として示されている400kW ストール制御風車(高さ35m, 直径1.4~2.4m, 板厚10~12mm)のものと、500kW ピッチ制御風車(高さ42m, 直径1.2~2.1m, 板厚10~25mm)のもの2つとした。指針では、2つの風車とも開口部開口比(高さ/幅)は約2.5であるが、本研究では、開口幅(750mm)を固定し、開口高さを変化させて開口比が3, 3.5, 4の鋼製タワーモデルを作成した。鋼製タワー本体の諸元、開口部の補強部材諸元は、すべてのモデルを通して指針の例題と同じとした。これは、本研究では、開口比の増大が座屈耐力に与える影響を検討することを目的としたためである。

解析は、SAP2000を用い、幾何学的非線形を考慮して塔頂水平変位を逐次増加させながら塔頂水平反力を求めることで行った。タワーの要素分割についても基本的に指針と同じとし、開口部付近は詳細に要素分割を行った(図1参照)。材料特性は、指針、文献<sup>2)</sup>を参考にし、降伏応力度250MPaをもつバイリニア型の応力ひずみ関係を用いた。また、塔頂にはロータ、ナセルの自重を鉛直力として作用させ、 $P-\Delta$ 効果を考慮した。

## 3. 座屈耐力

図2, 3に高さ35m, 42mの解析結果をそれぞれ示す。いずれのタワーも最初は荷重、変位が線形関係を示すが、やがて線形関係から外れ、最大耐力を示した後、荷重が低下し解析が終了する。図4は、開口比4の35m高さタワーの荷重360kN付近での応力分布を示しているが、開口部上下角では応力集中により局部的に塑性化が生じているものの、タワー全体としては線形関係を保っていることが判る。

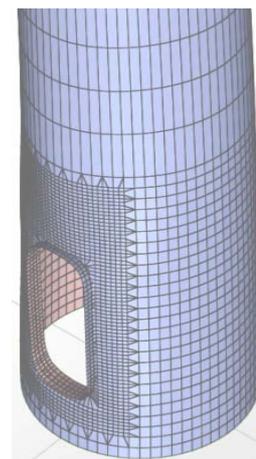


図1 タワー要素分割図

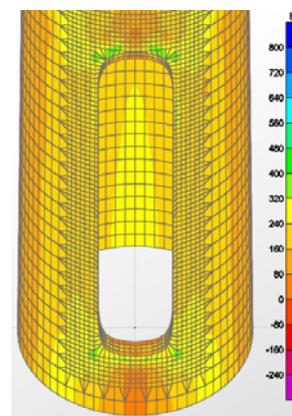


図4 開口部応力分布

キーワード： 風力発電タワー、開口部、座屈、FEM解析

連絡先： 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 TEL 045-339-4243, FAX 045-348-4565

開口比が増大するに伴い徐々に最大耐力が低下している．表 1, 2 に開口比 2.5 および 3 での最大耐力を 1 としたときの，その他の開口比での最大耐力の比を示す．35m タワーの場合には，開口比が 4 になることで 2.5 の場合と比較して 12%，42m タワーの場合には，約 7%最大耐力が低下する．指針では，照査式の適用範囲が開口比 3 までとなっているため，これを基準とした場合にはそれぞれ 12%，7%程度，最大耐力が低下する．42m タワーでの低下率が 35m タワーのそれよりも小さい理由としては，タワー全体に占める開口部の比率が相対的に小さいことが理由の 1 つと考えられる．

指針での照査式をもとに，タワーの構造諸元，材料強度から許容塔頂水平荷重を逆算すると，高さ 35m，42m タワーの場合，それぞれ 250kN，360kN となる．図 2, 3 より，開口比 4 においても指針で与えられる座屈強度（許容塔頂水平荷重）を十分に上回る座屈耐力を有しており，指針式を開口比 4 まで拡張適用しても問題はないと考えられる．ただし，FEM 解析の精度，他のタワーへ適用する際の安全性を確保する観点から，開口比 3 を超える場合には許容応力度低減係数をさらに低減するのが適切と考えられる．

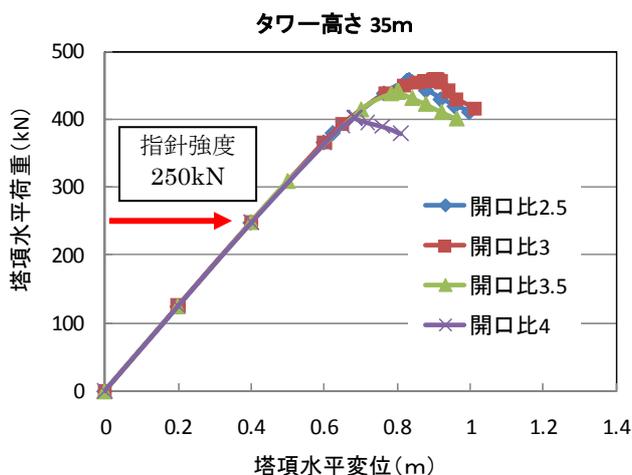


図 2 塔頂水平荷重と水平変位の関係（高さ 35m）

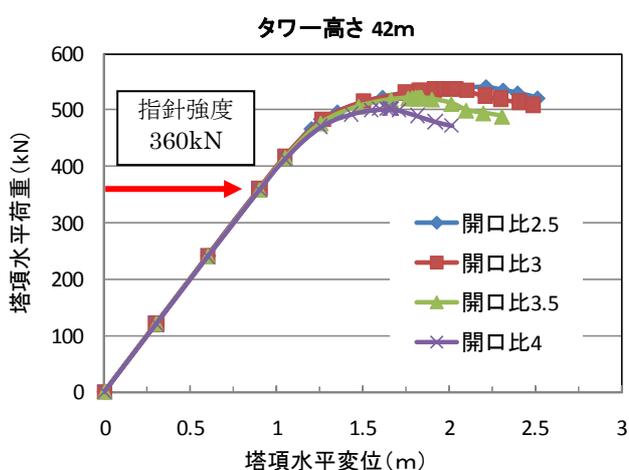


図 3 塔頂水平荷重と水平変位の関係（高さ 42m）

表 1 開口比と最大耐力（高さ 35m）

開口比	最大荷重 (kN)	耐力比	耐力比
2.5	458	1.0	1.00
3	457	0.998	1.0
3.5	440	0.961	0.963
4	403	0.880	0.882

表 2 開口比と最大耐力（高さ 42m）

開口比	最大荷重 (kN)	耐力比	耐力比
2.5	541	1.0	1.01
3	538	0.994	1.0
3.5	523	0.967	0.972
4	502	0.928	0.933

#### 4. まとめ

風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（土木学会）での開口部を有する鋼製タワーの座屈照査式の適用範囲を拡張することを目的として，高さ 35m，42m の風力発電設備鋼製タワーを対象に開口比が 3 を超える場合の座屈耐力を FEM 解析によって検討した．その結果，開口比が 3 を超え，4 までの範囲で座屈耐力が線形的に低下することが判明した．構造安全上は，開口比が 4 でも十分な安全性を有すると判断されるが，指針式を適用するに当たっては，開口比 3 以上に対して許容応力度低減係数をさらに低減することが適切と考えられる．

#### 参考文献

- 1) 土木学会，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説，2007.
- 2) 沖縄電力，台風 14 号による風力発電設備の倒壊等事故調査報告書，平成 16 年 6 月.
- 3) レ・アン・トゥアン，開口部のある風力発電タワーの座屈照査式拡張に関する研究，横浜国立大学修士論文，2010.3.