

風車タワー基礎への確率論的リスク評価手法の適用検討

東電設計(株) 正会員 ○信岡 卓 , 正会員 山谷 敦
 東電設計(株) 正会員 飯塚 敬一, 正会員 茂木 寛之

1. 背景および目的

従来から、土木構造物の設計は決定論に基づく安全率評価で行われており、内在するリスクは閾値に対する安全率の裕度で判断している。一方近年においては、原子力施設を代表とする電力関連施設において、地震ハザード曲線とフラジリティ曲線の概念に基づく確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment, 以下 PRA) 手法で得られる年損傷確率により、リスクを確率論的に評価している。

本検討では、再生可能エネルギーとして太陽光発電とともに需要が高まっている風力発電の風車タワー基礎に PRA を適用して、内在するリスクの定量的評価を試みた。風車タワーの構造条件と建設地点は、既存施設と設計指針¹⁾を参考に仮想施設として定義した。

2. 試設計概要

風車タワー：既存の風車タワーを参考にして、代表的な構造条件として下記を仮定する(図-1 参照)。

地上タワー：ハブ高さ 80m, ロータ径約 40m

タワー基礎：最大幅 17m, PHC 杭_φ900C 種 8 本

検討地点：設計指針¹⁾では、風車設計に適用する基準風速が地域別に定められている。本試設計では、関東地方において基準風速が最も大きい地域(38m/s)に含まれる仮想地点を対象とする。

リスク評価項目：風車タワー基礎のリスク要因として地震力、風力、積雪が挙げられ、本検討では短期暴風時をリスク要因とする。リスク評価項目としては、PHC 杭に関する下記 4 項目とする。

○杭の押し込み時と引き抜き時の支持力

○杭の押し込み時と引き抜き時の曲げ終局耐力

3. 設計風速と風速ハザード

算定方法：検討地点である仮想地点のハブ高さ 80m における設計風速(50 年再現期間に相当)と風速ハザードを風況解析(解析コード：MASCOT²⁾)により求める。

風速ハザードは 1977~2007 年まで 31 年間の台風情報に基づき 1000 年間の台風シミュレーションを行い、再現期間 1, 10, 100, 1000 年に対する最大風速を求める。

算定結果：設計風速は、基準風速 38m/s に対して 48.2m/s が得られた。風速ハザードのシミュレーション結果と

して、再現期間 T 、最大風速 w 、年超過確率 P の関係を表-1 に示す。 T と P の関係は下記である。

$$P=1-\exp(-1/T)$$

各再現期間に対する w と P の関係を、ガンベル分布で回帰した結果を図-2 に示す。この回帰曲線が風速ハザード曲線となる。

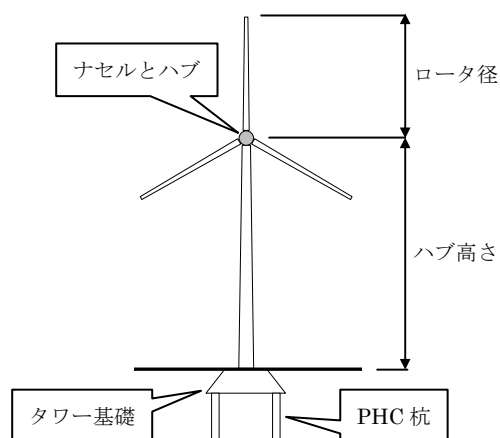


図-1 風車の概要

表-1 風況解析結果

再現期間 T (年)	最大風速 w (m/s)	年超過確率 P
1	22.3	6.321E-01
10	40.4	9.516E-02
100	50.7	9.950E-03
1000	58.4	9.995E-04

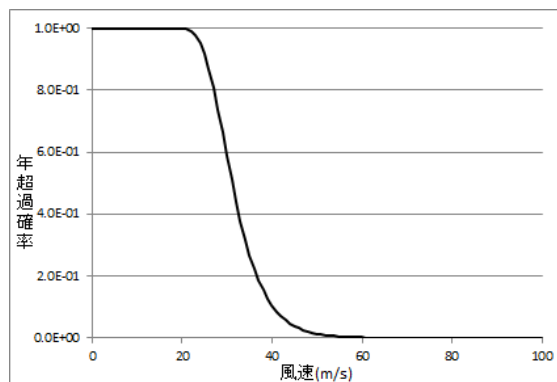


図-2 風速ハザード曲線

4. フラジリティと年損傷確率

損傷確率の算定(支持力)：支持力の損傷確率は、安全

キーワード リスク評価, 風力発電, 風速ハザード, 杭フラジリティ, 年損傷確率

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 東電設計株式会社 E-mail jnoubu@tepsco.co.jp

率 F_s が 1 以下となる累積確率とする。 F_{s1} が押し込み時、 F_{s2} が引き抜き時の安全率である。

$$F_{s1} = (\text{先端支持力} + \text{周面摩擦力}) / \text{杭押し込み力}$$
$$F_{s2} = \text{周面摩擦力} / \text{杭引き抜き力}$$

先端支持力と周面摩擦力はばらつきを考慮する N 値の一次関数であり、確率変数として定義する。 N 値の変動係数は、「土質工学会編 土質工学ライブラリー28 土質基礎の信頼性設計」より 0.3 とする。杭押し込み力と引き抜き力は最大風速 w の関数であり、確定値で定義する（∵安全率は確率分布となる）。損傷確率は、 N 値を平均値 $\pm 1\sigma$ とした場合の 2 点の安全率から確率密度関数を推定して求める（2点推定法）。

損傷確率の算定(曲げ耐力)：曲げ耐力の損傷確率は、安全率 F_s が 1 以下となる累積確率とする。 F_{s3} が押し込み時、 F_{s4} が引き抜き時の安全率である。

$$F_{s3} = \text{押し込み時曲げ耐力} / \text{押し込み時モーメント}$$
$$F_{s4} = \text{引き抜き時曲げ耐力} / \text{引き抜き時モーメント}$$

曲げ耐力はコンクリートと鋼材強度、断面寸法を条件としてファイバーモデルで算定し、このうちコンクリート強度のばらつきを考慮して確率変数として定義する。強度の変動係数は、「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」より 0.13 とする。押し込み時と引き抜き時のモーメントは最大風速 w の関数であり、確定値で定義する。損傷確率は、コンクリート強度を平均値 $\pm 1\sigma$ とした場合の 2 点の安全率から確率密度関数を推定して求める（2点推定法）。

フラジリティ曲線：再現期間 1, 10, 100, 1000 年に相当する各風速と仮想的な風速 85m/s に対して損傷確率を求めて、これら 5 点の損傷確率を対数正規曲線で回帰したフラジリティ曲線を図-3 に示す。また、偶然的な不確実性を表-2 に示す。

年損傷確率の算定：ハザード曲線とフラジリティ曲線の関係を図-4 に示す。年損傷確率は、両曲線の重畳積分で求められる。各評価項目の年損傷確率を表-2 に示す。年損傷確率の大小関係は「曲げ押し込み<支持力押し込み<支持力引き抜き<曲げ引き抜き」である。

主な傾向：主な傾向として下記の 2 点を挙げる。

1 点目：支持力、曲げ耐力ともに、押し込み時よりも引き抜き時の年損傷確率が大きくなる。2 点目：年損傷確率が最大となる曲げ耐力の引き抜き時のフラジリティ曲線が最も急角度(偶然的な不確実性が小さい)であり、脆性的な損傷形態であると解釈できる。

5. まとめ

本検討では、短期暴風時に対する風車タワー基礎のリスク評価を行い、4 種類の損傷形態の年損傷確率と引き抜き時の支持力のリスクが大きいことを提示した。風車タワーのリスク要因は暴風時の他に、地震力、降雪荷重、疲労荷重等が挙げられ、損傷形態は基礎の支持力と曲げの他に、せん断破壊、タワー本体の座屈、ブレードの損傷など多岐に亘る。

今後は、風速リスクに関する定量的なハザードマップの作成や、上記の多岐に亘るリスク要因への PRA 手法の展開を模索して、風力発電設備の合理的なリスク評価手法を確立したい。

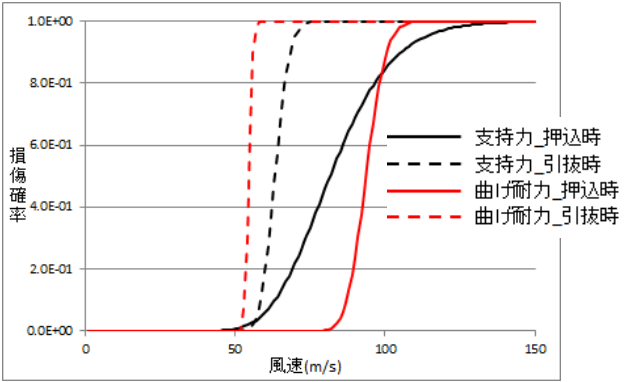


図-3 フラジリティ曲線

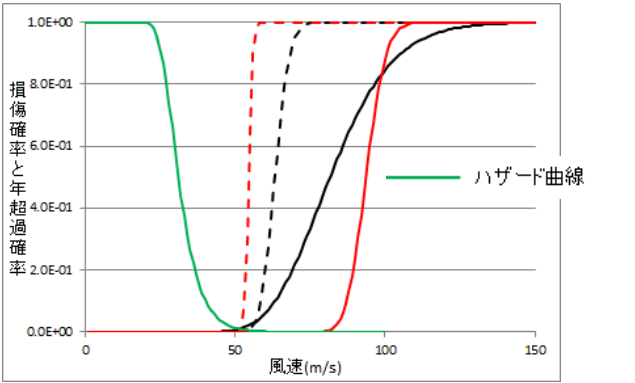


図-4 ハザード曲線とフラジリティ曲線

表-2 偶然的な不確実性と年損傷確率

評価項目	偶然的な不確実性	年損傷確率
支持力_押し込み時	1.99E-01	5.22E-04
支持力_引き抜き時	6.09E-02	1.05E-03
曲げ耐力_押し込み時	5.56E-02	2.44E-06
曲げ耐力_引き抜き時	2.03E-02	4.93E-03

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(2010年版), 構造工学シリーズ 20, 2010
2) 石原 猛：Microclimate Analysis System for Complex Terrain, Ver. 3.0