

防波堤における風力発電事業の検討

○中央大学 学生員 小林 史和
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

近年、環境問題への関心の高まりから風力エネルギーが注目を集め、各分野で研究が進められている。風力発電システムは建設時に多額の費用を必要とする。しかし、運転・保守費用の割合は相対的に低く、エネルギーコストがかからないことや、インフレ等による影響が少なく、発電コストは長期的に安定している。

我が国における風力発電の設置場所は、平野部において適地が減少し、山岳部ではアクセス道路整備などのコスト負担が増加していることから、今後風力発電の導入拡大には長い海岸線が期待されている。

風力発電の特徴として、発電量は風速の 3 乗に比例する。さらに、風速は地表面、建物などの障害物による摩擦の影響から、高さに依存し、風速の確保には、高さが必要になる。

本研究では、防波堤上に風車を設置することによる発電効率の向上と、防波堤の滑動を防ぐことによる安全性の向上を目的とする。前者については、高さを確保することで、発電量を増加させることができる。後者については、風車タワーのせん断抵抗が働き、破壊事象である滑動に対する安全性が増すと考えられる。

2. 研究概要

既設の防波堤に対して風力発電の設置工事を行うことは、建設方法とコストの面から困難であるため、新規事業として取り扱う方が有効であると考えられる。そのため、新規 PFI 事業として採算性評価を行うこととする。

まず、風車設置にあたり防波堤の選定地域を決める。次に、選定した防波堤の安定計算を行い、風車を設置した際の全体の安定計算を試みる。同時に風車設計を行い、安全性を確保する。

最後に、事業採算性を判断するために財務諸表を作成し、費用便益比 (B/C) による検討を試みる。その際、風力発電の規模は財務評価の設定上、定格出力 2000kW を用いる。

3. 検討内容と結果

3.1 風力発電設置地域の選定

風力発電設置地域の選定にあたり、新規事業が予定されている 3.11 被災地である東北地方での選定が効果的だと考えた。表-1 に、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の局所風況マップを参考に選定した地域の風況および求めた各値を示す¹⁾。風況、防波堤構造、需要 (人口) の 3 要素を調べ、設置地域を選定した。表-1 から八戸港は効率が良く事業価値があるため、この防波堤による検討を行った。

3.2 防波堤における安全性評価

風車の有無による比較を行い、安全性向上度を判断するために防波堤のみの滑動、転倒、支持力に対する安全率を算出した。図-1 に八戸港における防波堤モデルを示す²⁾。支持力に関しては、式(1)に示す簡易

表-1 選定地域の各値

	八戸港	小名浜港	大船渡港	石巻港
平均風速(m/s)	7.56	5.81	5.20	6.38
正味年間発電量(kWh)	7001185	3010885	2275060	3993115
設備利用率	0.40	0.17	0.13	0.23
世帯数(件)	1945	836	632	1109
人口(万人)	23.54	7.76	3.88	14.91
防波堤高さ(m)	6.7	6.0	3.0	5.0

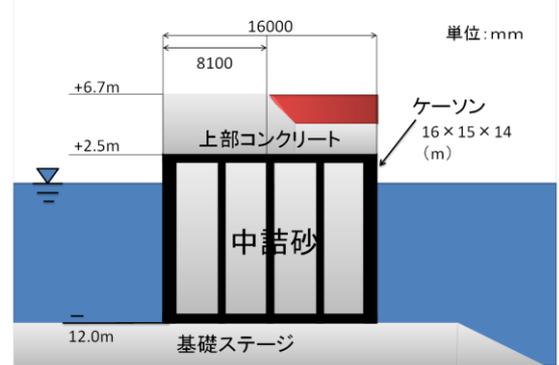


図-1 八戸港における防波堤モデル

表-2 防波堤安定計算結果

安全率	滑り出し	転倒	支持力
安定計算結果	2.004	3.125	1.0075
設計上の安全率	1.2	1.2	1.0

表-3 定格出力 2000kW における風車タワーの座屈照査

セクション番号	設計応力				ob= M/Z (N/cm2)	os= 2Q/A (N/cm2)	座屈照査	判定
	軸力 W (kN)	曲げモーメント	ねじれモーメント	せん断力 Q (kN)				
①	1175	8050	1244	843	4535	809	0.23	OK
②	1339	13568	1244	895	6391	748	0.31	OK
③	1532	19422	1244	949	7740	697	0.37	OK
④	1743	25617	1244	1003	8725	654	0.41	OK
⑤	1978	32154	1244	1057	9445	616	0.44	OK
⑥	2219	39035	1244	1111	10680	625	0.50	OK
⑦	2453	46259	1244	1165	11817	633	0.55	OK
⑧	2713	53823	1244	1218	12007	597	0.56	OK
⑨	2974	61720	1244	1270	12912	603	0.60	OK
⑩	3235	69941	1244	1320	13748	608	0.64	OK
⑪	3499	78469	1244	1367	14521	610	0.68	OK
⑫	3839	87392	1244	1444	13072	536	0.61	OK

bishop 法を用いた。

$$F_s = \frac{1}{\sum (W + q) \sin \alpha} \sum \frac{(cb + W' \tan \phi) \sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi) / F_s} \quad (1)$$

ここで、 F_s はすべり面の安全率、 c は粘着力、 b は分割幅、 W' は分割片の有効重量、 α は分割片底面が水平面となす角、 ϕ はせん断抵抗角である。

算出した安全率の結果を表-2 に示す。滑動、転倒、支持力の 3 つの事象に対して、すべて設計上の安全率を満たしていることが確認でき、滑動、転倒に関しては、設計上の安全率に余裕がある結果となり、風車設置の際、規模に幅を持てると考えられる。

3.3 風車設計

防波堤と風車全体の安全性を評価するにあたり、設計書を参考に風車の構造計算を行った³⁾。表-3 に定格出力 2000kW における風車タワー座屈照査の結果を示す。荷重として、風荷重と波荷重を算出し、タワーを

12 分割してセクションごとに評価を行った。この評価は設計応力だけでなく、タワーの厚さや外径にも依存している。そのため、経済性考慮の下、部材の厚さを調整し、基準を満たす設計を行った。座屈照査において、基準の 1.0 を下回っているため安全性を確認できた。同様に定格出力 500,600,1000,1500,4500kW の検討も済み、安全性を満たす結果を得た。

3.4 防波堤と風車全体の安全性評価

3.2, 3.3 での構造計算を応用し、防波堤と風車全体の安全性評価を行った。その際、防波堤と風車を一体化した一つの構造物として検討した。

図-2 に定格出力に対する安全率の推移を示す。滑動に関しては、重量、タワー基部(セクション番号⑫)のせん断抵抗を考慮した結果、大規模になるほど安全率が向上している。これは、タワーのせん断抵抗が顕著にあらわれたためであり滑動を防ぐ設計が果たされたと考えられる。

転倒に関しては、設計風速と設計波力の同時発生の際、風車に対するモーメントの影響が大きく、防波堤のみと比べ安全性は低下する。また、大規模になるほど安全率は低下し、定格出力 4500kW の風車では、設計基準の 1.2 を下回っている。

支持力に関しては、風車の規模に対して大きな変化はなかった。支持力は重量と荷重の偏心距離に依存する。しかし、防波堤に対する風車の設置場所ほどの規模でも同様のため、偏心距離の変化はほとんど変わらず、設置風車重量と防波堤削孔量がほぼ等しいことから、規模に対して変化がほぼなかったと考えられる。

また、図-2 の結果から、設計基準を下回る規模は、定格出力 4500kW の転倒事象のみであり、定格出力 2000kW の風車では、安全性を確保できている。

3.5 採算性評価

事業採算性を評価するにあたり、貸借対照表(B/S)と損益計算書(P/L)から成る財務諸表を作成し、発電コスト、B/C による評価を行った。その際、NEDO が示すデータを用いた¹⁾。設定上、定格出力 2000kW の風車を 10 基設置した総出力 20000kW を想定しているため、それに従い検討を行った。また、防波堤上に設置するにあたり、防波堤管理側に土地代(使用料)を支払う必要があるため、一般的な値である 0.1 万円/m² から 20 億円と算出した⁴⁾。

図-3 に定格出力に対する発電コストの推移を示す。定格出力 2000kW において洋上目標値である 12~17 円/kWh を下回る結果を得た。これは、防波堤上設置により高さが確保されたためであり、発電効率の向上が果たされたと考えられる。

図-4 に供用年数に対する B/C の推移を示す。供用 17 年で基準の 1.0 を超えるため、利益を生じる結果が得られた。しかし、発電量が得られないことや故障のリスクを考慮した際に事業が成り立つかが問題である。

4. おわりに

構造的安全性に関して、設置風車の規模増加により、滑動事象に対する安全率は上昇し、転倒事象に対して減少、支持力事象に対してはほぼ変化がなかった。滑動事象に関しては、防波堤のみに比べ風車設置により、安全率が上昇する結果が得られ、滑動を防ぐ設計が実

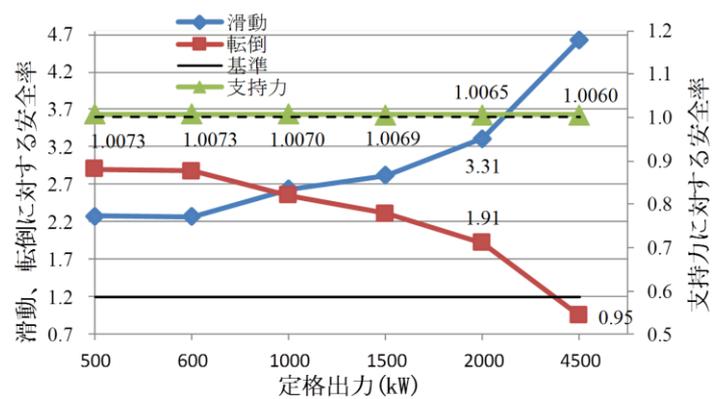


図-2 定格出力に対する安全率の推移

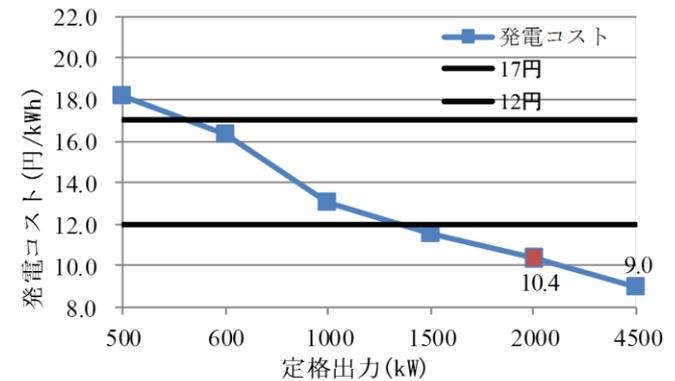


図-3 定格出力に対する発電コストの推移

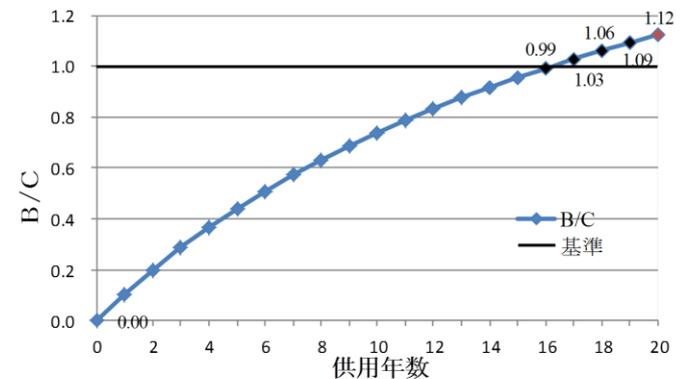


図-4 供用年数に対する B/C の推移

現されたと考えられる。また、定格出力 2000kW の風車において安全性を確認できた。

採算性評価に関しては、定格出力 2000kW における財務諸表の作成を行い、発電コストと B/C で評価した。発電コストが洋上目標値である 12~17 円/kWh を下回っているため、事業性はあると考えられる。

課題として、リスクを考慮した際の事業採算性を計る必要がある。そのため、信頼性評価を行い、事業価値を判断する。また、規模に関して信頼設計の観点から定格出力 2000kW 以上において安全性が確保できるか検討を行い、より採算性を高める。

<参考文献>

- 1) NEDO：再生可能エネルギー技術白書
- 2) 鹿島建設土木設計本部：海洋・港湾構造物
- 3) 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)
- 4) 環境省：風力発電の賦存量および導入ポテンシャル