

風，地震，波浪を同時に受ける洋上風力発電施設の振動解析

早稲田大学 学生会員 小長井 聡
早稲田大学 フェロー 清宮 理

1. まえがき 自然エネルギーの有効利用の観点から風力発電に注目が集まっている．景観や騒音などの環境上の問題，また世界有数の海岸線を持つ国土利便性から「洋上」での風力発電施設¹⁾の設置計画が進められている．最近では風力発電施設が暴風時などに倒壊した事例がおき安全性が問題となってきた．本研究では，有限要素汎用プログラムソフト SOLVIA を用いて風，波，地震を同時に作用させたときの各荷重の影響とタワーの安全性について検討を行った．

2. 解析方法及び入力条件 発電能力 180KW，風車本体重量 218 kN，タワー長 29.8m，ブレード長さ 11.6m，基礎杭 10mのモノパイル式基礎風力発電施設を梁要素で三次元モデル化した．基礎杭 5m部分を X, Y の 2 方向から水平バネ（砂質土 N 値 = 20 に相当）で支持した．海底地盤の水深は 5mとした．風荷重は定格風速（17m/s）と暴風（36m/s）の二種類の風速を対象とし，ブレードには X 方向推進風荷重，ブレードの回転方向接線風荷重を静的荷重²⁾として作用させた．なおブレードはこの接線荷重により回転できるモデルとした．またタワーには定格風速においてガスト影響係数 $G_f=1.35$ ，周期 $T=16s$ の正弦波，暴風時にはガスト影響係数 $G_f=1.2$ ，周期 $T=20s$ の正弦波の動的風荷重を作用させた．波荷重は，

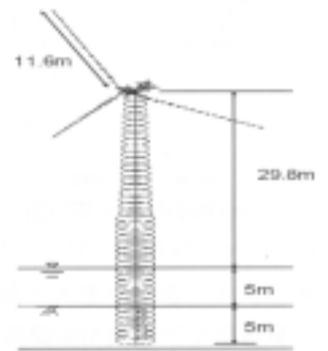


図-1 解析対象モデル
年確率波を対象とし水深 5mにおいて周期 $T=7.8s$ ，波高 $H=2.6m$ ，波長 $L=96.05m$ とし，波荷重は杭の抗力係数 $C_D=1.0$ ，質量係数 $C_M=2.0$ ，海水の単位体積質量 $\omega_0=1.02t$ としてモリソンの公式より算出し，正弦波の波荷重として作用させた．地震動は 1995 年兵庫県南部地震ポートアイランド波の最大入力加速度を 200，400，600，679Gal に基準化し，基盤入力し，計算モデルの減衰にはレーリー減衰を用いた．

3. 解析結果 入力荷重の風，波，地震をそれぞれ単独で作用したときと，三力を同時に作用させたときのタワー頂部の水平変位，頂部の応答加速度，基部の曲げモーメント値の高さ方向の最大応答値分布を図-2～4 に示す．

今回の設置条件での波荷重のタワーへの影響は水平変位，応答加速度，曲げモーメント共に風荷重と地震波に比べ影響は非常に小さいと分かる．また地震動と風はほぼ同じ影響を与える．波力一定，定格風速時 ($V=$

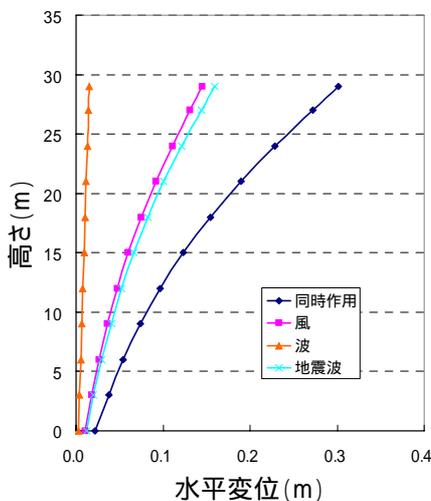


図-2 タワーの水平変位

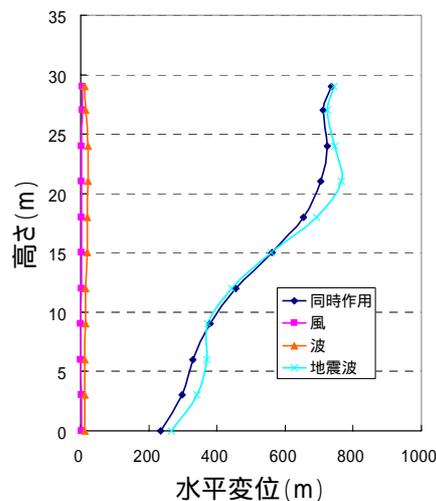


図-3 タワーの応答加速度

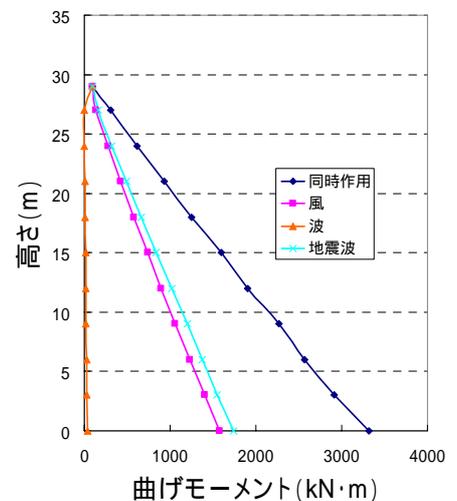


図-4 タワーの曲げモーメント

キーワード 荷重の組み合わせ，ブレード，降伏曲げモーメント，フェザリング

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学社会環境工学科 清宮研究室 TEL 03-5286-3582

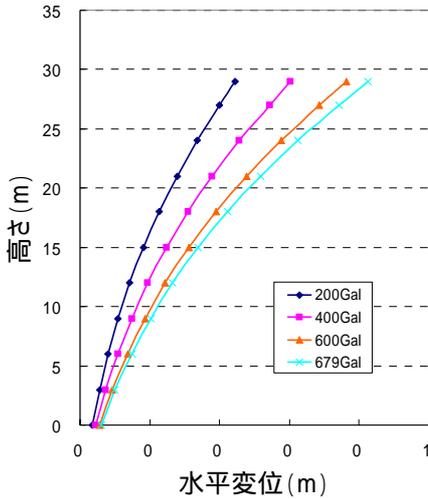


図-5 タワーの水平変位

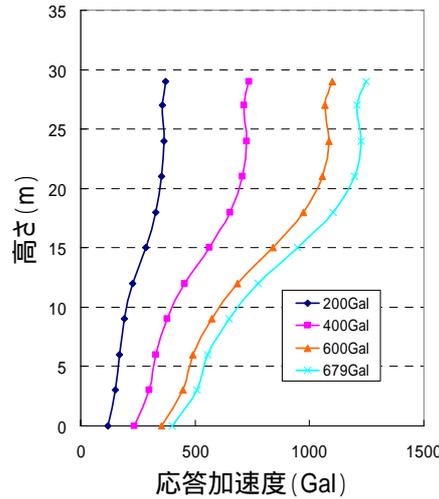


図-6 タワーの応答加速度

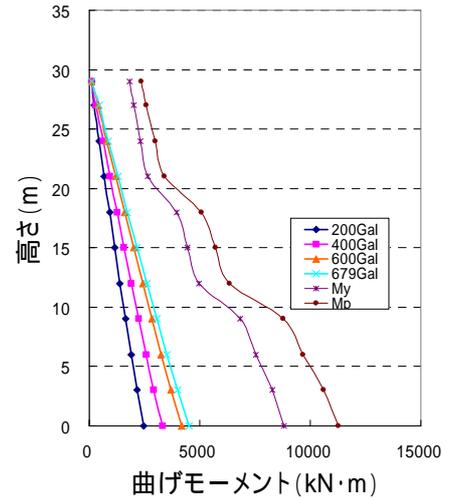


図-7 タワーの曲げモーメント

17m/s)で入力地震動を 200~679Gal と変化させたときの各種最大応答値の変化を図-5~7 に示す。図-7 では降伏曲げモーメント M_y と全断面塑性モーメント M_p も図中に示す。ただしタワーの径、板厚は高さ方向に異なっている。

水平変位、応答加速度、曲げモーメントともに入力地震動の増加に伴い応答値も大きくなる。入力加速度 400Gal の場合、タワーの頂部水平変位は最大 30.2cm である。加速度応答倍率は基盤面に対して 2 倍程度であり、変位は正弦波動的な振動が卓越していた。曲げモーメントは、タワー方向全高さで降伏モーメント M_y を超えなかった。入力地震動ごとのタワーの頂部と基部の各最大応答値結果を表-1 に示す。

波力一定、入力地震動 400Gal 時における定格風速と暴風時のタワー基部の曲げモーメントと降伏モーメント M_y と全断面塑性モーメント M_p を比較した図を以下の図-8 に示す。一方暴風時 ($V=36m/s$) のタワーの安全性について定格風速時には降伏モーメント以下であったが、暴風時に 300Gal を超える地震波が同時作用した場合、降伏モーメントを超えた。しかし遭遇確率の問題として暴風とレベル 2 地震動が同時に発生する可能性は非常に低く³⁾、通常設計では考慮に入れていない。

表-1 入力加速度とタワーの最大応答値

入力加速度 (Gal)	着目位置	最大変位 (cm)	最大加速度 (Gal)	最大曲げモーメント (kN・m)
200	タワー-基部	1.73	119	2445
	タワー-頂点	22.2	370	96
400	タワー-基部	2.22	236	3314
	タワー-頂点	30.2	736	98
600	タワー-基部	2.81	353	4184
	タワー-頂点	38.1	1102	101
679	タワー-基部	3.04	399	4527
	タワー-頂点	41.3	1246	102

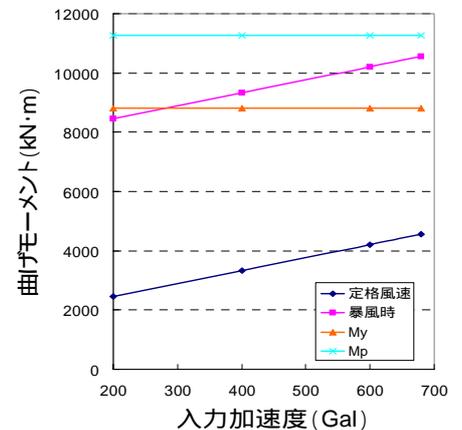


図-8 タワー基部の曲げモーメント

4. 結論 (1) 今回の計算モデルと計算条件下では、風と地震の影響はほぼ同じで波の影響は小さかった。(2) 通常の構造設計での荷重の組み合わせを考慮すると、暴風時の風荷重で設計しておけば地震時に定格風速の荷重との組み合わせでも安全性が確保されていた。

参考文献 (1) 財団法人 沿岸開発技術研究センター(平成 12 年 11 月)洋上風力発電基礎工法の技術(設計・施工)マニュアル(案)(2) 井山 泉 著 風車工学入門 森北出版株式会社(3) Osamu Kiyomiya, etc, Dynamic Response Analysis for Onshore Wind Energy Power Units during Earthquakes and Wind, The 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, 2002. May. pp.520-526