

東日本大震災と風力発電設備支持物の耐震設計

東京大学 大学院工学系研究科
石原孟, 山口敦, 高本剛太郎

1. はじめに

2011 年 03 月 11 日 14 時 46 分、東北地方太平洋沖の深さ 24km を震源とするマグニチュード 9.0 の地震が発生し、栗原市築館で震度 7 が観測された。本地震による直接的な被害に加え、津波により東北から関東にかけて青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉各県の太平洋岸に甚大な被害をもたらされた¹⁾。

地震発生直後、日本風力発電協会(JWPA)は会員企業に対して電話調査を実施し、国内にある 407 の風力発電所(1742 基、設備容量 2303MW)の内、会員企業が所有する 199 の風力発電所(1150 基、設備容量 1695MW)は、今回の地震により運転不能となった風車はなかったことが報告された²⁾。一方、JWPA 会員以外の企業や自治体が所有する風車の中では、茨城県の鹿嶋発電所のように、今回の地震の影響で基礎に被害を受けた例が報告された³⁾。

国内にある風力発電設備の多くは2007年建築基準法改定前に設置されたものである。今回の地震により風車本体が被害を受けた例は報告されていないが、風車の基礎は今回の地震で被害を受けたことから、今後その対策を講じる必要性が出てくる可能性がある。

本報告では、まず今回の東北地方太平洋沖地震を概説すると共に、各地で観測された地震波と津波の特徴を明らかにする。そして、今回の地震の影響を受けた鹿嶋発電所およびその周辺の被害状況を報告する。最後に、東日本大震災と阪神淡路大震災で観測された地震動および風力発電設備支持物の耐震設計に用いられている地震動との関係を調べると共に、2007年建築基準法改定前と改定後に設計された風力発電設備支持物の耐震性能を明らかにする。

2. 東北地方太平洋沖地震の概要

東日本大震災が風力発電所およびその関連設備に与える影響を理解するために、まず今回の地震の発生メカニズムおよびそれに伴う地震波と津波の特性について明らかにする。

(1) 地震発生のメカニズム

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、宮城県栗原市で震度7が観測されたほか、岩手県から茨城県にかけての太平洋岸の広い範囲で震度

6強や6弱の揺れが記録された。図1には今回の地震の震度分布を示す。防災科学技術研究所の強震観測網で捉えられたこの地震による最大加速度は、栗原市築館における2933ガル(三成分合成値)である。震度7が我が国で観測されたのは、1995年兵庫県南部地震(M7.3)、2004年新潟県中越地震(M6.8)に次いで3度目である。

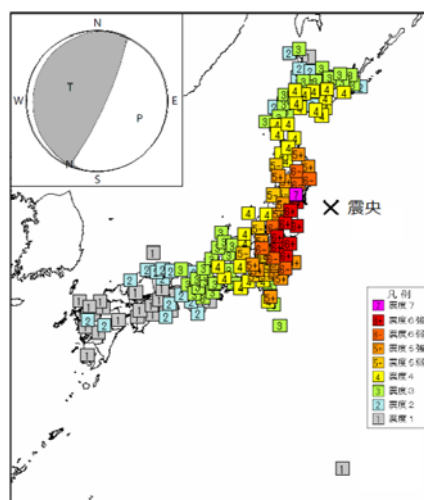


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の震度分布⁴⁾

図2には、海溝型大地震発生の模式図を示す。今回の地震は、日本海溝から沈み込む海側プレート(太平洋プレート)に引きずり込まれた陸側プレート(北米プレート)が跳ね返ることによって発生している。

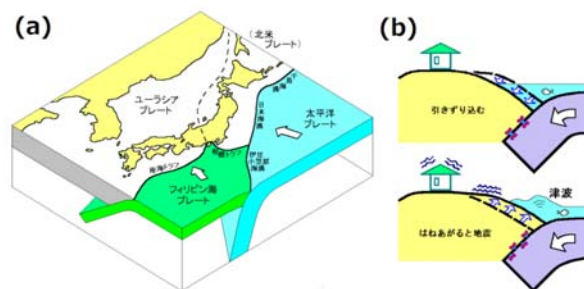


図2 プレート構造(a)とプレート沈み込み(b)による海溝型大地震発生の模式図⁴⁾

(2) 地震動

図3には、防災科学技術研究所の強震ネットワーク(K-NET)で観測された波近地強震動波形⁴⁾を示し、加速度波形には50秒付近と100秒付近に顕著な2つのピーク

が見られる。このことから、少なくとも2つの大きなすべりがあったことを示唆している。北（種市）では1つ目のピークが卓越するのに対し、南（日立）では1つ目のピークはほとんど見られず、2つ目のピークのみが見られる。これら2つのピークは、北および南に位置するすべりに対応すると考えられる。リアルタイム震度の立ち上がり早いものと遅いものがあるが、いずれのすべりで最大震度が出ているかに対応すると考えられる。

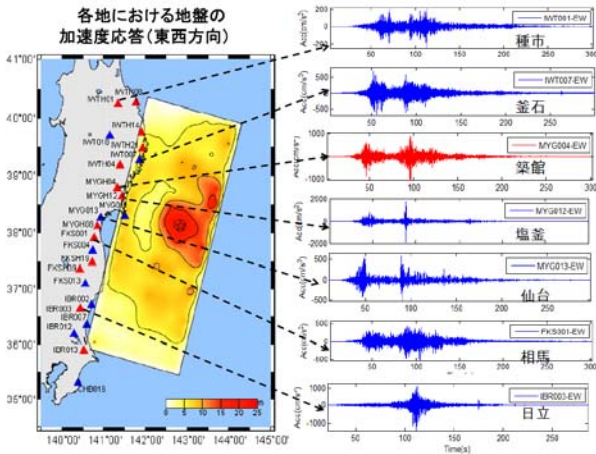


図3 各地で観測された近地強震動波形

(3) 津波

海溝型の大地震は大きな津波を伴うことが常であるが、今回の地震はM9.0という超巨大なものであったため、津波の規模も大変に大きかった。我が国では、北海道から沖縄にかけての太平洋沿岸で高い津波が観測されたほか、日本海、オホーツク海、東シナ海の沿岸でも津波が観測され、さらに、ハワイや北米・南米、および太平洋諸国にまで津波が到達した。図4は、観測された全国の津波最大波高の分布を示しており、岩手県の釜石で8.1m以上、大船渡で8.0m以上、福島県相馬で7.3m以上、茨城県大洗で4.2mなどの最大波高が記録されている。

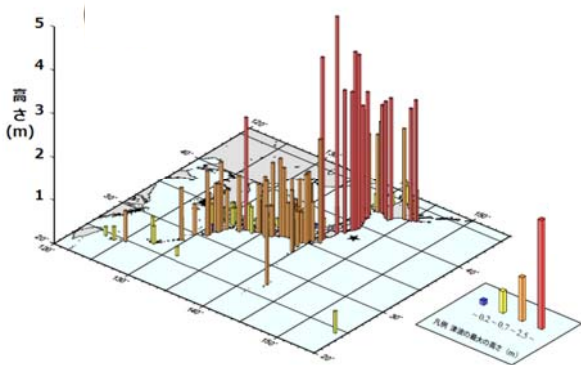


図4 太平洋側から見た津波最大波高の分布 (8m以上を記録した宮古、大船渡のデータは含まれていない) 4)

今回の地震で津波の直撃を受けたウインドファームは神栖洋上風力発電所のみである⁹⁾。風車付近に達した津波は、海面より約5m程度と推測されている。当ウインドファームの風車はドアハッチ部及び電気設備が海面より10m弱の位置に設置されるため、津波による風車内部への浸水、電気設備への被害はなかった。神栖洋上風力発電所は3月14日に再開し、その後発電し続けている。図5には神栖洋上風力発電所の地震後の様子を示す。



図5 神栖洋上風力発電所

3. 風力発電設備支持物の耐震設計

本章では、今回の東日本大震災が風力発電所およびその周辺設備に与える影響を明らかにする。まず鹿嶋発電所とその周辺の被害調査の結果について報告する。そして、東日本大震災と阪神淡路大震災で観測された地震動および現在風力発電設備支持物の耐震設計に用いられている地震動との関係を明らかにする。最後に2007年建築基準法改定前と改定後に設計された風力発電設備支持物の耐震性能を明らかにする。

(1) 鹿嶋発電所とその周辺の被害状況

図6には5月4日に実施した鹿嶋発電所とその周辺の被害調査の結果を示す。鹿嶋発電所¹⁰⁾にはガメサ社製の2MW風車10基が設置されている。今回の地震では3号機のみ(図中の丸の位置)が被害を受けた。風車本体(ナセル、ローター)および風車タワーには被害がなかったが、風車全体が基礎から北東方向(図中の大きな矢印の方向)におよそ1.6度³⁾傾いている(図6の①②③④)。また図中の小さな矢印の方向は①から⑧までの写真が撮影された方向に対応している。図6の⑤と⑥は海側の道路周辺の液状化の状況を示す。液状化により、元々海に伸びている排水管は空を指しており、周辺道路も至るところにひび割れが見られた。図6の⑦には、3号機南側の道路脇の水路の被害を示す。水路の護岸は数kmにわたって完全に崩壊しており、地震により地盤が南東方向に大きく移動したと思われる。また地下に埋設した



図6 鹿嶋発電所3号機とその周辺の被害状況

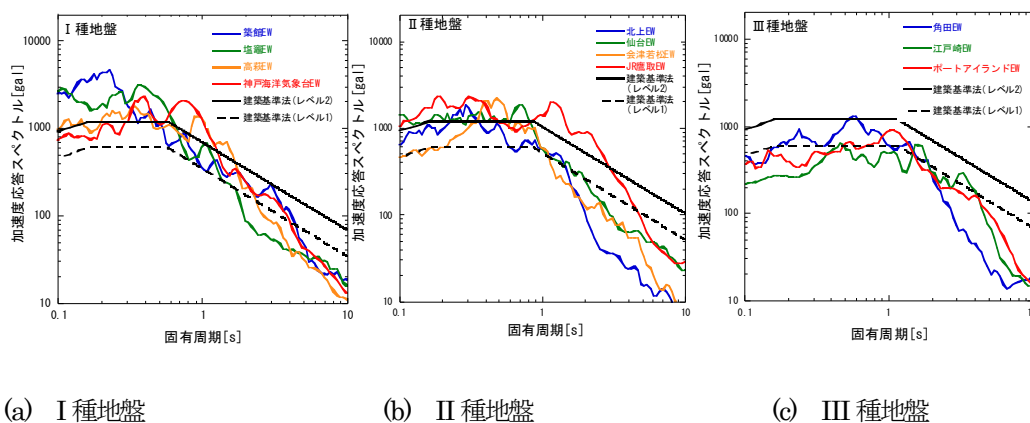


図7 地盤種別加速度応答スペクトルの観測値と設計値との比較

送電線は液状化により図6の⑧に示すように露出したところが見られた。

(2) 観測地震動と設計用地震動との比較

地震が風車に与える影響は地震動の加速度応答スペクトルに依存する。図7には今回の東北地方太平洋沖地震と1995年の兵庫県南部地震で観測された地震波に基づき

求めた加速度応答スペクトルを示す。観測された地震波は地表付近の地盤の影響を受けるため、加速度応答スペクトルは地盤種別に整理した。兵庫県南部地震において観測された地震波は、I種地盤の代表として神戸海洋気象台、II種地盤の代表として鷹取、III種地盤の代表として神戸ポートアイランドで観測された地震波をそれぞれ示す。また比較するため、図7には風力発電設備支持物構

造設計指針・同解説に示されているレベル1とレベル2地震動の加速度応答スペクトルも示す。図7から、今回の東北地方太平洋沖地震による地震応答は兵庫県南部地震によるものとほぼ同じレベルである。また大型風車の固有周期3秒付近でのレベル2の加速度応答スペクトルは、今回の東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の加速度応答スペクトルを包含していることが分かる。

(3) 風力発電設備支持物の耐震性能

第1章で述べたように、我が国における風車の多くは2007年の建築基準法改定前に設計されている。一般に風車本体（ローター、ナセル）は風荷重が支配的であり、地震荷重により風車本体が損傷することは少ない。一方、杭基礎に作用する地震荷重は上部構造（風車本体とタワー）と下部構造（ペDESTAL、フーチング）の両方からなり、地震荷重は支配的になることがある。今回の東日本大震災で被害を受けた風車についても杭の部分が被害を受けたと思われる。2007年の建築基準法改定前と改定後の風力発電設備支持物の耐震性能を明らかにするため、改定前と改定後の地震荷重の変化について標準的な2M風車モデル⁷⁾と表2に示す2M風車の基礎データを用いて杭に作用する地震荷重を試算した。建築基準法改定前の風力発電設備支持物に作用する地震荷重は建築基準法告示により算出した。

表2 2M風車の基礎の構造諸件の例

項目	値
ペDESTAL径 b (m)	6.8
ペDESTAL部高さ h (m)	2.8
ペDESTAL突出し長 h_0 (m)	0.2
フーチング幅 B (m)	17
フーチング厚さ H (m)	2
鉄筋コンクリートの密度 γ_c (kN/m ³)	24
土の密度 π_s (kN/m ³)	15

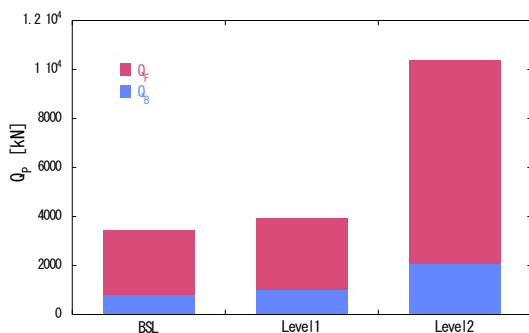


図8 基礎フーチングの底面に作用するせん断力

式(1)は基礎フーチングの底面に作用するせん断力 Q_p を示す。

$$Q_p = Q_b + Q_s = C_B W_s + k \times W_f \quad (1)$$

ここで、 Q_b と Q_s はタワー基部に作用するせん断力と基礎に作用するせん断力、 C_B と k はベースせん断力係数と地下震度、 W_s と W_f は上部構造の重量と基礎重量（ペDESTAL、フーチング、埋戻土の総重量）を表わす。建築基準法告示により規定されたベースせん断力係数と地下震度はそれぞれ0.3と0.1であるのに対して、レベル2の地震動により求め値はそれぞれ0.77と0.32である。図8には基礎フーチングの底面に作用するせん断力を示し、上部構造に作用する地震荷重より基礎に作用する地震荷重が大きい。2007年建築基準法改定前に設計された風力発電設備支持物の耐震性能はレベル1に相当する。

4. まとめ

本報告では、今回の東北地方太平洋沖地震を概説すると共に、各地で観測された地震波と津波の特徴および風力発電設備支持物と関連設備の被害状況を明らかにした。

今回の地震で発生した地盤の液状化により、鹿島発電所の3号機は北東方向に傾斜し、地下に埋設した送電線が露出した。また3号機南側の道路脇の水路の護岸は数kmにわたって完全に崩壊した。

今回の東北地方太平洋沖地震で観測された地震動は兵庫県南部地震と同レベルであり、また現行指針のレベル2の加速度応答スペクトルは、大型風車の固有周期3秒付近で、今回の東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の加速度応答スペクトルを包含していることが分かった。

2007年建築基準法改定前に設計された風力発電設備支持物の耐震性能はレベル1に相当し、地盤条件により今回の東北地方太平洋沖地震と同じレベルの地震により被害を受ける可能性がある。今後建築基準法改定前に建てられた風力発電設備支持物に対して耐震性能の再評価が必要であると思われる。

参考文献

- 1) 気象庁：平成23年東北地方太平洋沖地震について，2011.
- 2) 日本風力発電協会：東北地方太平洋沖地震による風車への影響について，2011.
- 3) Scott A. Ashford, Ross W. Boulanger, Jennifer L. Donahue, and Jonathan P. Stewart, Geotechnical Quick Report on the Kanto Plain Region during the March 11, 2011, Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan, GEER Association Report No. GEER-025a, 2011.
- 4) 防災科学技術研究所：東北地方太平洋沖地震について，速報，2011.
- 5) 上田悦紀，小宮山一，板橋真司，鈴木和夫，池田誠：東日本大震災と風力発電機情報，風力エネルギー，通巻97号，2011.
- 6) 鹿島発電所：http://swp.jp/02business_3kasima.html
- 7) 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，2010.