地盤との相互作用を考慮した風力発電設備の地震応答に関する研究

東京大学 学生員 大胡賢一
東京大学 正会員 石原孟

1. はじめに

筆者らはこれまで基礎固定モデルを用いて風車停止時および発電時の地震応答についての研究を行ってきた [1]. 今後，風力発電導入量の拡大に伴い、地盤条件の悪い沿岸地域や洋上に風車が建設されていくと予想される。一般的に高層建築物は固有周期が長いため、地盤との相互作用を考慮した場合と考慮しない場合とでは、地震荷重の変化は小さい。しかし風車の構造減衰は一般建築物の 1/10～1/4 にあたる 0.5%であり非常に小さいため、地盤と風車との相互作用が地震荷重に与える影響を明らかにする必要がある。

そこで本研究では複数の地盤条件と異なる規模の風車に対応するモデルを構築する。このモデルを用いて規則波による共振時の 1 質点系応答解析と、地震波による多質点系応答解析を行い、相互作用が地震荷重に与える影響を定量的に評価する。

2. 地盤との相互作用を考慮したモデルの構築

地盤と風力発電支持物との相互作用を考慮したモデルとして，水平地盤ばねと回転地盤ばねを風車基部に付与した SR モデル [2]を採用した（図 1）。上部構造は固有周期の異なる 3 基の風車を用いてモデル化した。直接基礎と杭基礎 2 つの基礎形式と、第Ⅰ種～第Ⅲ種の 3 つの地盤の組み合わせを 4 ケース作り、上部構造と合わせて計 12 の相互作用モデルを作成した（表 1）。それぞれの相互作用モデルに対して直接基礎の場合はコーンモデルを用いた限耐法、杭基礎の場合は郡杭全体の地盤ばねから基部のばねを求める方法で、ばね定数と減衰係数を算定した [2]。

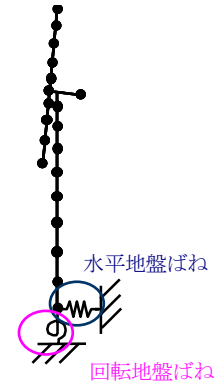

図 1 SR モデル

上部構造	
定格	固有周期
100kW	0.485
400kW	1.208
500kW	1.976

基礎＋地盤		
場合分け	基礎	地盤種別
case1	直接	第Ⅰ種
case2	直接	第Ⅱ種
case3	杭	第Ⅱ種
case4	杭	第Ⅲ種

表 1 12 の相互作用モデル

また建設省の告示に則り，応答スペクトルを用いて地震波を発生させた。位相には乱数位相、JMA 神戸 NS 位相、八戸港湾 NS 位相、八戸港湾 EW 位相を使用した。

3. 規則波による 1 質点系地震応答解析

風車の全応答に対する 1 次モードの寄与率は 7～9 割を占めるため、本研究ではまず 1 質点の解析を行うことで相互作用の影響を評価する。

SR モデル（図 1）の質点の運動方程式より 1 質点モデルを導く。風車発電時に基部に地震動のような外乱として加速度 y を受ける多質点系モデルの風方向の運動方程式は次式のように表される。

$$[m]\{\ddot{x}\}+[c]\{\dot{x}\}+[k]\{x\}=-[m]\{e\}y+\{f(t)\} \tag{1}$$

ここで，$\{x\},\{\dot{x}\},\{\ddot{x}\}$ はそれぞれ変位ベクトル，速度ベクトル，加速度ベクトル，$[m]$ は質量マトリクス，$[c]$ は減衰マトリクス，$[k]$ は剛性マトリクスを表す。$\{e\}$ は全要素が 1 のベクトルである（基礎固定時）。$\{f(t)\}$ は風車に作用する風力ベクトルとなる。この運動方程式より下式が導かれ [3]、1 質点モデルの質量 m_e と高さ h_e を算定した。X_1 は 1 次モード形、z_i はタワー基部からの高さ、H_t はタワー高さ、C_s は高次モード補正係数、T_e は 1 次固有周期である。構造減衰 ζ_e は 0.5%とした。

$$m_e=\{X_1\}^T[m]\{X_1\} \tag{2}$$

$$X_{i1}=\mu(z_i)=(z_i/H_t)^2 \tag{3}$$

$$h_e=\frac{0.934+0.5C_s}{1+C_s}H_t \tag{4}$$

$$C_s=\begin{cases}0 & T_e\le 0.7\\ 0.075(1-e^{0.7-T_e}) & T_e>0.7\end{cases} \tag{5}$$

また 1 質点の SR モデルを用いて相互作用を考慮した固有周期 T_t と減衰定数 ζ_t を導出した [4]。T_h 、T_r は建築物を剛体と仮定したときのそれぞれスウェイ、ロッキングによる固有周期、同様に ζ_h、 ζ_r はそれぞれスウェイ、ロッキングによる減衰定数を表し、地盤ばねの値より算定した。

$$T_t=\sqrt{T_e^2+T_h^2+T_r^2} \tag{6}$$

$$\zeta_t = \zeta_e\left(\frac{T_e}{T_t}\right)^3 + \zeta_h\left(\frac{T_h}{T_t}\right)^3 + \zeta_r\left(\frac{T_r}{T_t}\right)^3 \quad (7)$$

1 質点系の運動方程式(8)より、規則波 $y=\sin\omega_{e,t}t$ を与えた時の基部の最大曲げモーメント M_{max} は式(9)となる。また基礎固定時と SR モデルの応答を比較するため、基部の最大曲げモーメントの比 A を(10)式で定義する。

$$\ddot{x} + 2\zeta_{e,t}\omega_{e,t}\dot{x} + \omega_{e,t}^2 x = -y \quad (8)$$

$$M_{\max} = mh\frac{\sqrt{1+4\zeta_{e,t}^{\ 2}}}{2\zeta_{e,t}} \quad (9)$$

$$A = \frac{SR\text{モデルの}M_{\max}}{\text{基礎固定時の}M_{\max}} \quad (10)$$

12 の相互作用について A を求めると図 2 となり、このとき構造減衰 ζ は図 3 となった。また、風車の構造減衰を 5%として一般の建築物と仮定すると、A は図 4 の値となった。

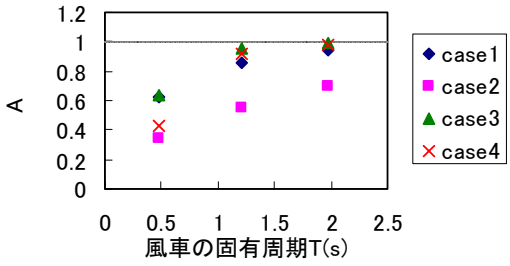

図 2　1 質点モデルの基部の最大モーメントの比

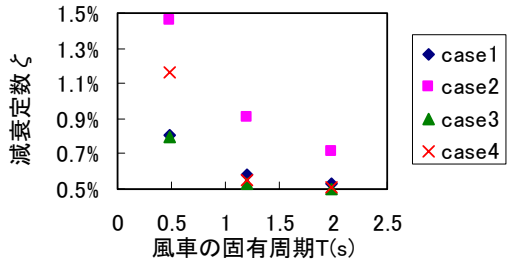

図 3　相互作用を考慮した 1 質点モデルの減衰定数

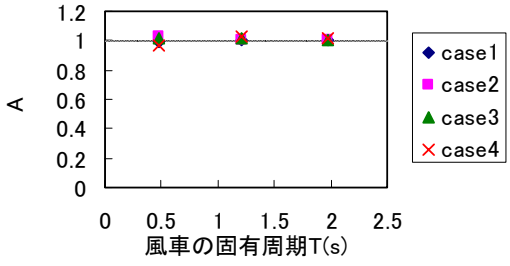

図 4　構造減衰を 5%としたときの基部の最大モーメントの比

図 3, 4 より相互作用を考慮すると逸散減衰が大きくなるにつれて共振時の応答が最大約 70%低下することがわかった。また図 3,5 より風車の構造減衰が 0.5%と小さいため、相互作用を考慮した時の逸散減衰が相対的に大きくなり応答が低下することがわかった。

4.　地震波による多質点系地震応答解析

多質点モデルの基部に地盤ばねを付与し、レベル 2 の 4 つの地震波を与えて応答解析を行い，それぞれの地震波によるばらつきを小さくするため 4 波の応答の平均値を利用して評価した．また，固有周期の変化による応答スペクトルの値の変化を補正して基部の最大モーメントの比 A を求めた．その結果を図 5 に示す。図 5 より実際の地震波と多質点モデルを用いた場合、相互作用を考慮すると全体として応答は低下し、固有周期の短い 100KW 風車や第Ⅱ種地盤上直接基礎の大型風車では最大で 15～20%応答は低下することがわかった。

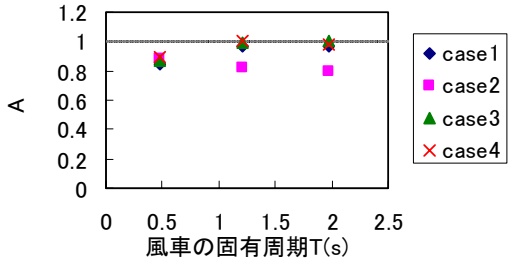

図 5　多質点モデルの基部の最大モーメントの比

5.　まとめ

本研究では複数の地盤条件と異なる規模の風力発電設備支持物に対して地盤との相互作用を考慮したモデルを構築した。このモデルを用いて規則波による 1 質点系応答解析を行い、風車の構造減衰が小さいために、相互作用を考慮すると風車の応答は大きく低下することを明らかにした。さらにレベル 2 の地震波による多質点系応答解析を行い、相互作用を考慮すると最大で 15～20%応答が低下することがわかった。

参考文献

1) 石原孟他: 風力発電設備停止時と発電時における地震応答予測に関する研究, 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2007. 2)日本建築学会：建物と地盤との相互作用を考慮した応答解析と耐震設計 2006　3)土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2007. 4)日本建築学会：建築物荷重指針同解説 2004