

# 阿蘇にしはらウインドファーム 熊本地震による被災と復旧について

2018年8月28日

(株)ジェイウインドサービス

# 1. 設備と被災の概要 — 1.1 設備の概要 —

## ウインドファーム設備諸元

名 称	阿蘇にしはらウインドファーム
事業会社	(株)ジェイウインド
設置者	(株)ジェイウインドサービス
所在地	熊本県阿蘇郡西原村
発電所出力	17,500kW (1,750kW × 10基)
風力発電機	Vestas製 V66 ・ハブ中心高さ 60m ・ローター径 66m
風車基礎の形式	杭基礎:1・8号機 直接基礎:2・3・4・5・6・7・9・10号機 (十字形)
運転開始	2005年2月



ウインドファーム全景(1号機から2~10号機を望む)



ウインドファーム関連設備位置

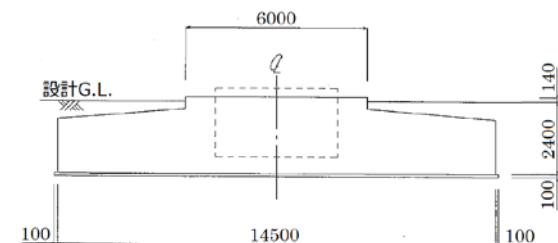
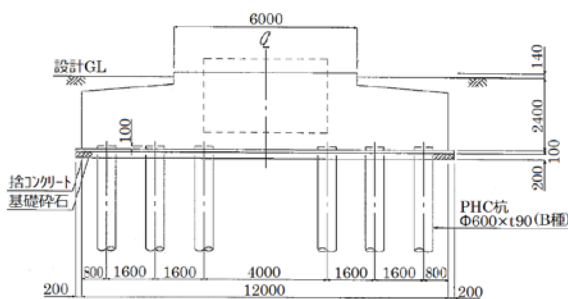


# 1. 設備と被災の概要 — 1.2 被災の概要 —

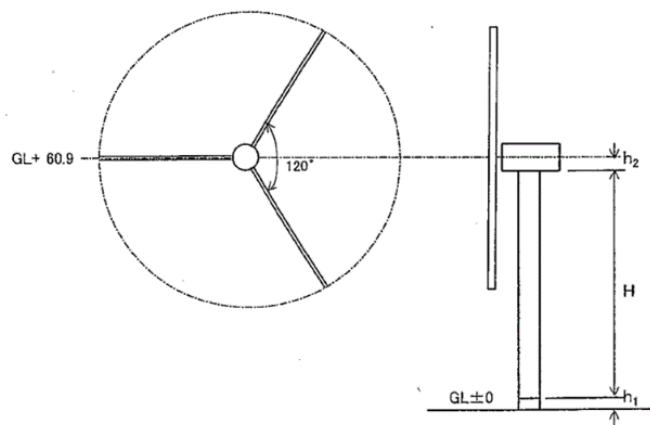
## ● 熊本地震(本震)\*により風車支持構造物(基礎)が被災

\*平成28年(2016年)熊本地震(以下、熊本地震という)は日奈久・布田川断層帯を震源に発生し、M6.5の前震が発生した約28時間後にM7.3の本震が発生した。

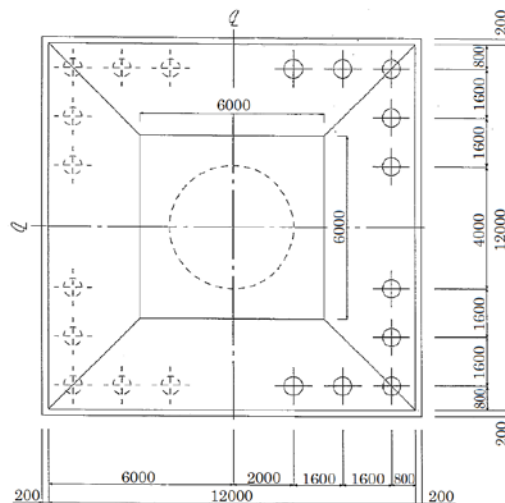
構造	鉄筋コンクリート造 (コンクリート設計基準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ ) (鉄筋SD-295A)
型式	正方形床板杭基礎(1,8号機) 十字マット直接基礎(2~7,9,10号機)
設計	許容応力度法(耐震設計:震度法)



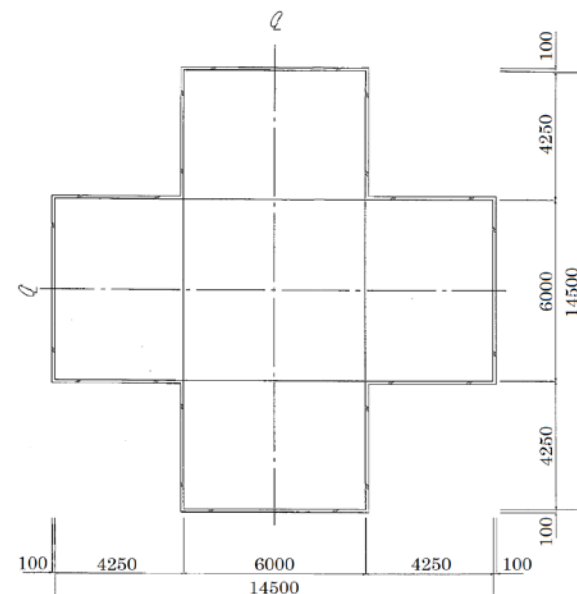
風車支持構造物(基礎)の諸元



風車の概念



杭基礎(8号機の例)



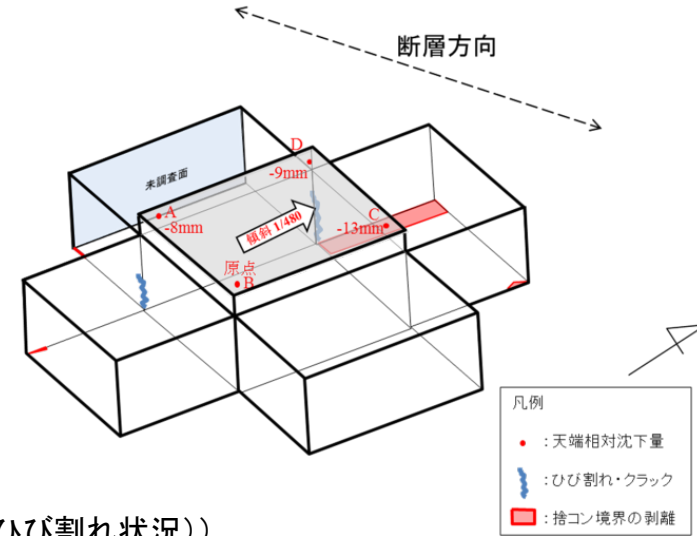
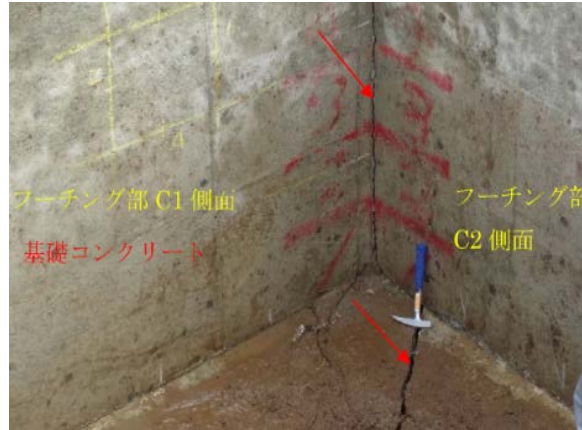
直接基礎

風車支持構造物(基礎)の断面および平面

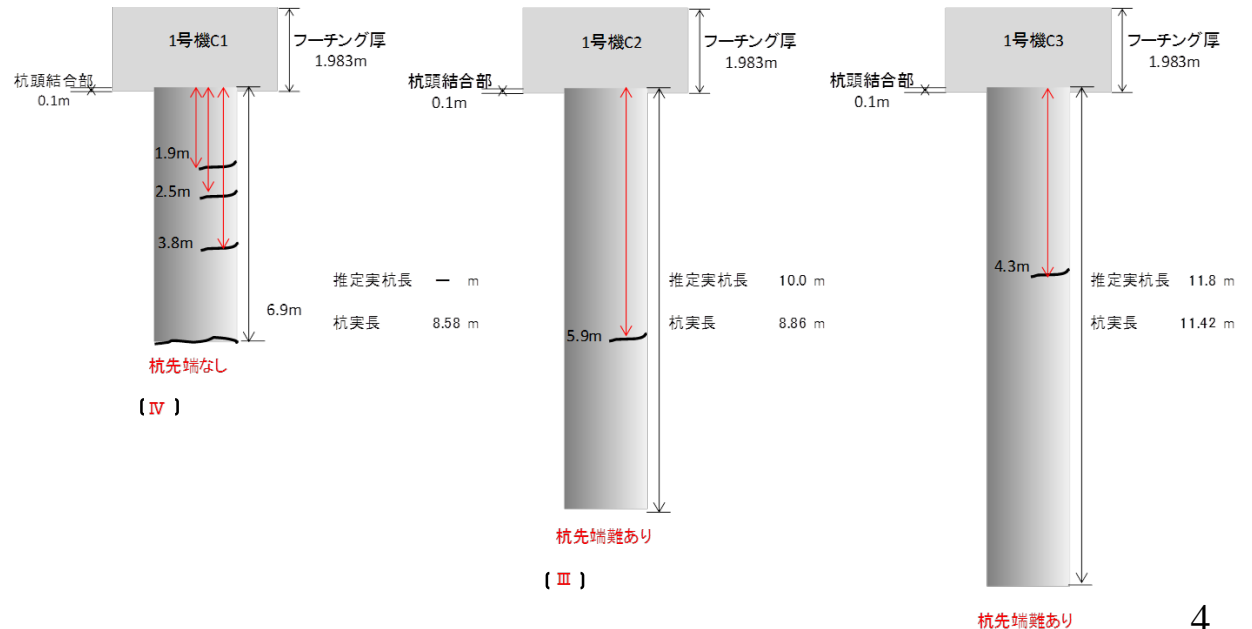
# 1. 設備と被災の概要 — 1.2 被災の概要 —

風車支持構造物(基礎)の被災概要

型式・号機		被害概要
杭基礎	1	杭にダメージの大きいひび割れ
	8	杭に軽微なひび割れ
直接基礎	6	被害無し
	6以外	基礎のひび割れ(1~2mm程度)



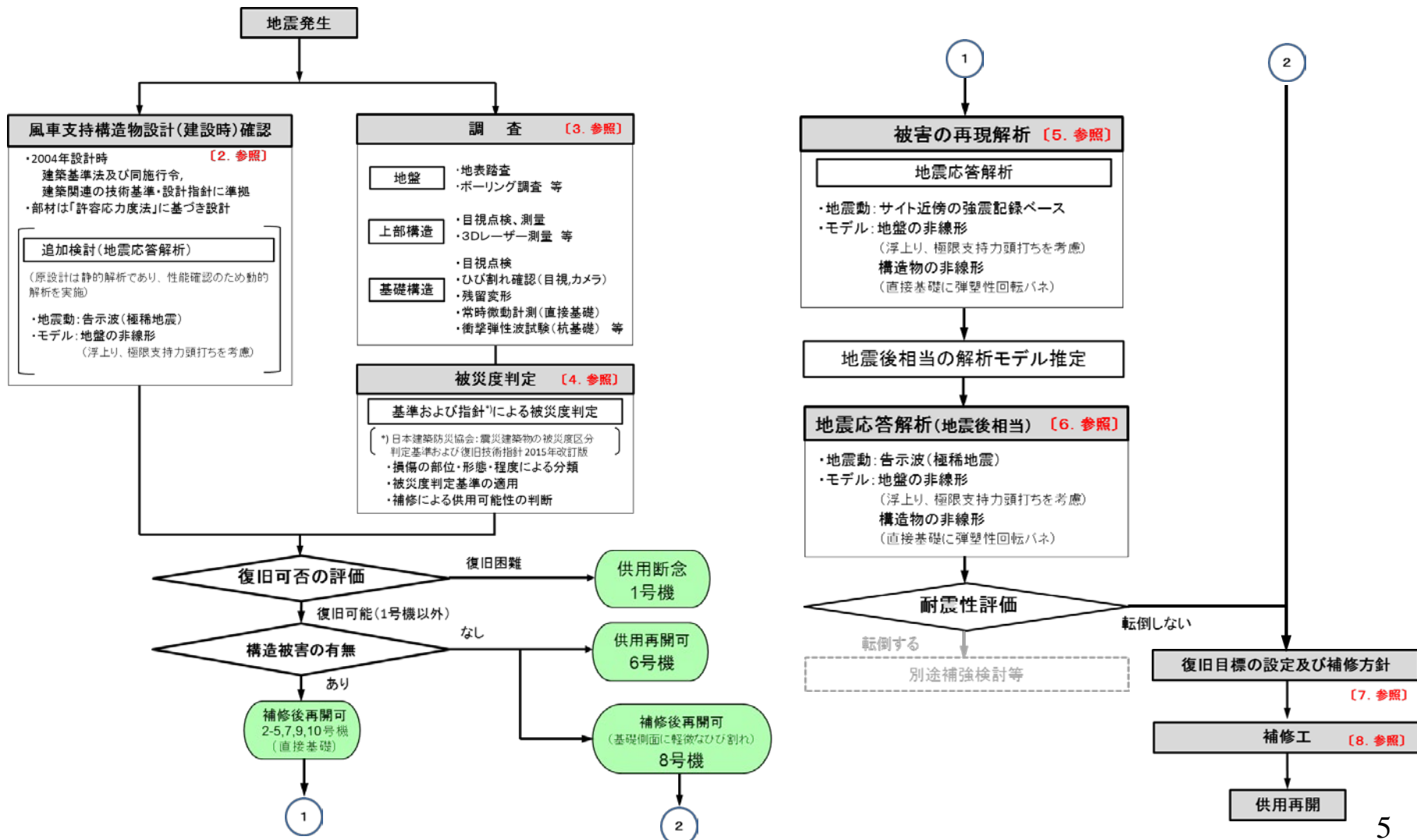
被災例(3号機(ひび割れ状況))



被災例(1号機(杭損傷状況(衝撃弾性波試験結果模式図)) (III)

# 1. 設備と被災の概要 – 1.3 復旧に向けた検討結果の概要 –

- 風車支持構造物(基礎)の被災を受け、下図による調査・検討を実施
- 検討の結果、6号機は運転再開、1号機は復旧断念、その他号機は補修により復旧と評価



地震による被災度調査・判定から供用再開までの概要



## 2. 風車支持構造物の設計(建設時)確認

- 阿蘇にしはらウィンドファームの風車支持構造物は、2004年設計時の建築基準法及び同施行令、建築関連の技術基準や設計指針に準拠し、部材は「許容応力度法」に基づき設計
- 上部の支持構造物であるタワーから基礎に作用する設計荷重としては、基準に基づき、地震時より大きな暴風時荷重(32m/s<sup>\*</sup>)を採用 (\*建設省告示第1454号より)
- 以下、支持構造物(タワー,杭基礎,直接基礎)の安定・応力度が許容値内であることを確認

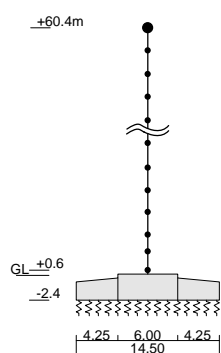
風車支持構造物の建設時設計確認

タワー	鋼材の圧縮・曲げ応力度 (常時、カットアウト時、暴風時、地震時(稀地震))	許容値内
杭基礎	安定・部材応力度 (杭の最大反力、杭頭の水平変位量、杭体の圧縮・引張応力度 鉄筋の引張応力度)	
直接基礎	安定・部材応力度(最大反力、転倒モーメント、部材応力度)	

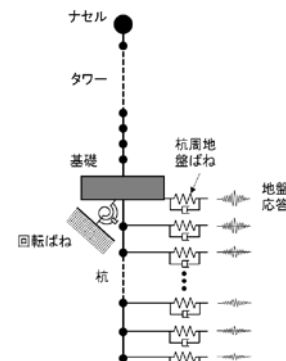
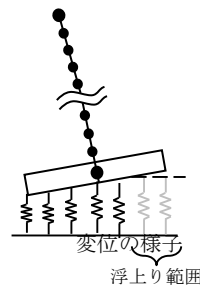
## 2. 風車支持構造物の設計(建設時)確認

### 【追加検討(地震応答解析(建設時の性能確認))】

- 原設計は静的解析であったため風車の耐震性(建設時相当)を確認するために、現行の発電用風力設備に関する技術基準に示される告示波(極稀地震(500年再現期間を考慮したレベル2地震))による地震応答解析を実施
- 解析モデルとしては、実現象を考慮し、直接基礎は浮上りを考慮したモデル、杭基礎はタワーと杭基礎一体型モデルとした
- 風車の倒壊や基礎の損傷が生じないことを確認(下表、確認結果の例 参照)
- ただし、1号機は杭が許容応力度を超えることを確認



直接基礎の解析モデル(浮上り考慮)



杭基礎の解析モデル

### 解析モデルの概念

確認結果の例(6号機(直接基礎の代表)、8号機(杭基礎の代表)を例示)

直接基礎(6号機)		杭基礎(8号機)	
タワーせん断力	短期許容以下	タワーせん断力	短期許容以下
タワー曲げモーメント	短期許容以下	タワー曲げモーメント	短期許容以下
基礎曲げモーメント	短期許容以下	杭せん断力	短期許容以下
基礎転倒	なし	杭曲げモーメント	短期許容以下

# 3. 調査結果の概要

号機	地盤		上部構造		基礎構造									
	土質*		ブレード・ナセル・タワー		躯体				基礎杭					
	ボーリング調査 (標準貫入試験、PS検層)	弾性波 探査	目視 点検	タワー 3Dレーザー 計測	水準測量 (傾斜)	外部 ひび割れ 幅計測	内部 (基礎下面) ひび割れ 幅計測	鉄筋調査 (腐食状況 鉄筋径)	圧縮 強度 試験 (N/mm <sup>2</sup> )	固有 周期 計測 (s)	衝撃弾性波試験 (オーリス法)	試掘調査	BHTV 観察	
1	抗基礎	【標準貫入試験】 GL-12m以深 N値≥50 【PS検層】 GL-12.15m以深 Vs≥0.4km/s	速度構造に大きな変化無し	変化無し	—	1/213 (西→東)	無し	—	—	—	タイプII:9本 タイプIII:2本 タイプIV:1本 合計12本	—	破断及びひび割れ無し	
2	直接基礎	—			—	1/500 (南→北)	最大4.0mm (隅角部)	平均 1.5mm	—	33.8	—	—	—	—
3		—			傾斜角度0.21° <定格風速時の傾斜角度 0.24°	1/189 (南東→北西)	最大7.0mm (隅角部)	平均 1.7mm	—	29.6	—	—	—	—
4		【標準貫入試験】 GL-3m以深 N値≥50 【PS検層】 GL-3m以深 Vs≥0.4km/s			—	1/270 (南東→北西)	最大9.5mm (隅角部)	平均 1.8mm	【腐食状況】 若干の発錆 (減肉なし) 【鉄筋径】 北面23.7mm 東面24.1mm	31.8	—	—	—	—
5		—			—	1/294 (南東→北西)	最大5.5mm (隅角部)	平均 1.4mm	—	26.8	—	—	—	—
6		—			傾斜角度0.08° <定格風速時の傾斜角度 0.24°	1/1,111 (南東→北西)	連続性 のない 0.3mm (隅角部) (1箇所)	—	—	—	2.28	—	—	—
7		【標準貫入試験】 (北東側) GL-17m以深 N値≥50 (南東側) GL-4m以深 N値≥50 【PS検層】 GL-16.50m以深 Vs≥0.4km/s			—	1/323 (南東→北西)	最大3.5mm (隅角部)	平均 1.0mm	—	36.5	2.16	—	—	—
8	抗基礎	【標準貫入試験】 GL-9.5m以深 N値≥50 【PS検層】 GL-10m以深 Vs≥0.4km/s			—	1/213 (北西→南東)	最大1.5mm (側面)	—	—	—	—	タイプII:19本 未調査:1本 合計20本	杭の上から -1.6m,-2.5m でひび割れ線 を確認 →目視では 密着	—
9	直接基礎	—			—	1/263 (北西→南東)	最大1.4mm (隅角部)	平均 1.2mm	【腐食状況】 腐食なし 【鉄筋径】 西東面25.1mm 北南面24.9mm	31.3	2.16	—	—	—
10	—	—			—	1/303 (東→西)	最大6.5mm (隅角部)	平均 1.4mm	—	38.3	—	—	—	—
備考							鉄筋径(設計) D25	設計 基準 強度 24.0		【衝撃弾性波探査のタイプ分類】 タイプII: 微細・軽微なひび割れ タイプIII: 比較的大きなひび割れ タイプIV: ダメージが大きいひび割れ				

\*土質調査の実施にあたり、地表踏査、熊本地震前後の航空レーザー計測比較調査を実施

\*「—」: 調査せずを示す



### 3. 調査結果の概要

#### (1) 地盤

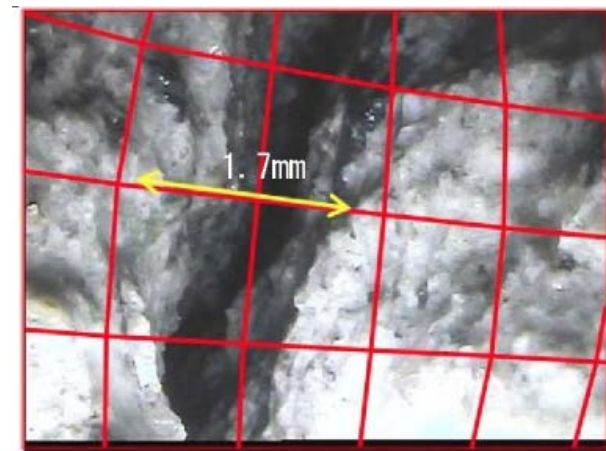
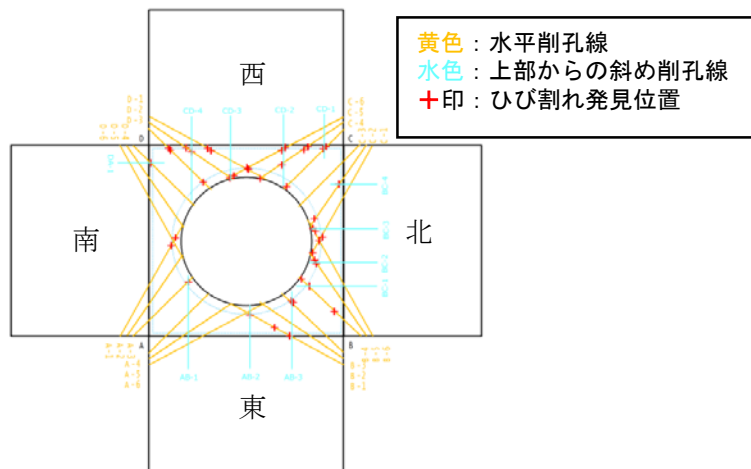
- 地表踏査、熊本地震前後の航空レーザー計測等から、周辺地盤の崩壊がないことを確認
- 追加ボーリング調査と地盤の弾性波探査(速度構造調査)を実施

#### (2) 上部構造(タワー等)

- タワー座屈等の損傷はなく、タワーの残留傾斜も小さいことを確認

#### (3) 基礎構造

- 【共通】基礎の残留傾斜と沈下を調査(残留傾斜:1/150以下、沈下:0.1m未満)
- 【杭基礎】衝撃弾性波探査を実施  
(1号機の杭体が損傷、8号機の杭体の被害が軽微であることを確認)
- 【直接基礎】内部のひび割れ調査を実施(基礎内部下面の平均ひび割れ幅:1~2mm)  
(下図に基礎内部ひび割れ調査削孔位置とひび割れ状況の例を示す)



基礎内部ひび割れ調査削孔位置とひび割れ状況の例 (3号機)

## 4. 被災度判定結果および復旧可否の評価

### (1) 判定方法

- 「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針 2015年改訂版」(社)日本建築防災協会(以下、「基準および指針」という)に準拠し、被災度判定および復旧の可否判断を実施

### (2) 判定結果(被災度判定および損傷度総合判定結果)

#### ① 上部構造

- 被災なし

#### ② 基礎構造

- 風車2～10号機は復旧可能と判断

基礎の損傷度総合判定（「基準および指針」による）

基礎形式	基礎番号	損傷度 <sup>*1)</sup>		復旧の可否
		基礎コンクリート	杭体 <sup>*3)</sup>	
杭基礎	1	—	[IV]	杭体損傷度[IV]より不可
	8	Ⅲ [ただし側面のひび割れ] <sup>*2)</sup>	[I]	可
直接基礎 (十字型)	2	Ⅲ	—	可
	3	Ⅲ	—	可
	4	Ⅲ	—	可
	5	Ⅲ	—	可
	6	I	—	可(運転再開済み)
	7	Ⅲ	—	可
	9	Ⅲ	—	可
	10	Ⅲ	—	可

\*1) 基礎コンクリートの損傷度はひび割れ幅の程度をいう  
(I : 0.2mm以下、  
Ⅲ : 1～2mm程度)。

\*2) 8号機は、基礎コンクリート側面にひび割れが1カ所(幅1.5mm程度)確認されたが、直接基礎とは異なり、側面にある局所的なひび割れであり、構造耐力を損なうものでないと判断した。そこで、当該箇所は耐久性確保を目的にひび割れ補修を実施。

\*3) 杭の損傷度の[ ]表示は「衝撃弾性波探査」による分類を示す。

## 5. 被害の再現解析 — 5.1 熊本地震の概要 —

### 【再現解析の目的】

- 現行基準の「告示波」に対し、風車の倒壊、基礎の損傷が生じないことを確認(2項参照)
- 本地点は、周辺の地震観測記録から「告示波」以上の地震動を受けたと推察
- 基礎の損傷状況を確認するため、周辺で観測された地震動を用いて再現解析を実施

### 【阿蘇にしはらウインドファーム周辺で観測された代表的な強震記録】

- 阿蘇にしはらウインドファームでは強震観測を行っていなかったため、周辺約10km圏内で観測された強震記録を下表に整理した。最寄りの観測記録は「西原村小森」となる。

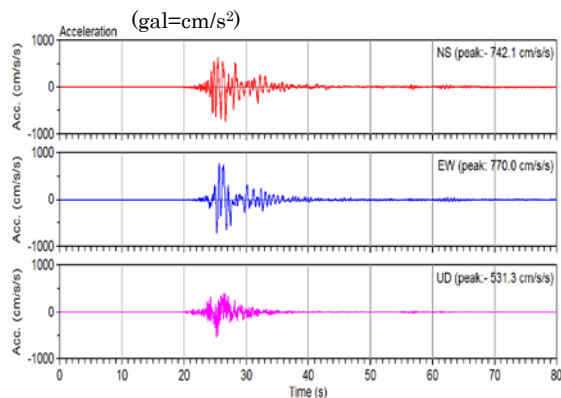
阿蘇にしはらウインドファームから10km圏内にある強震観測点

管理者	観測点	震央距離	観測点までの距離	備考
熊本県	南阿蘇村河陽 (旧南阿蘇村長陽庁舎)	25.3 km	3.7 km	不適切 <sup>※1</sup>
熊本県	西原村小森 (西原村役場)	16.0 km	6.1 km	
熊本県	南阿蘇村河陰 (旧南阿蘇村久木野庁舎)	26.5 km	7.7 km	
NIED	K-NET大津 (大津町文化ホール)	17.3 km	8.1 km	
熊本県	大津町大津 (大津町役場)	17.0 km	9.0 km	

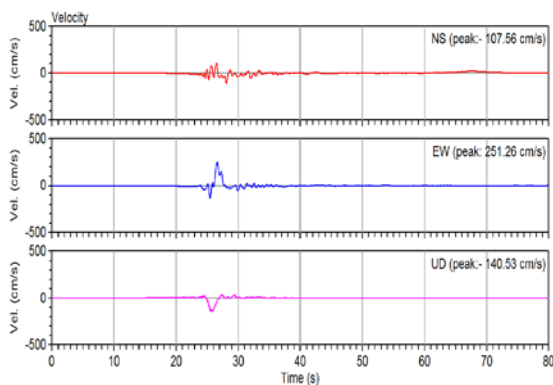
※1 福岡管区気象台[震度観測点の設置状況の点検結果について、報道発表資料,平成28年4月28日]による地震計設置状況点検により当該地点の記録は不適切としている。

# 5. 被害の再現解析 — 5.1 熊本地震の概要 —

- 「西原村小森」の本震記録を下図に示す。
- 最大加速度は水平動で800gal程度、鉛直動で500gal程度であり、疑似速度応答スペクトルから、周期(Period)0.8秒付近や2秒付近(風車の1次固有周期付近)で告示波(極稀地震)を上回っていることを確認。

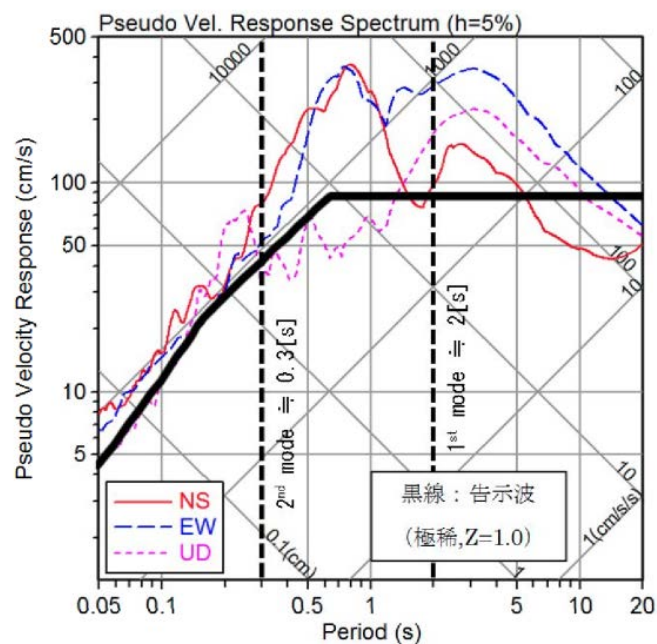


(a) 加速度波形



(b) 速度波形

NS : 北-南  
EW : 東-西  
UD : 上-下



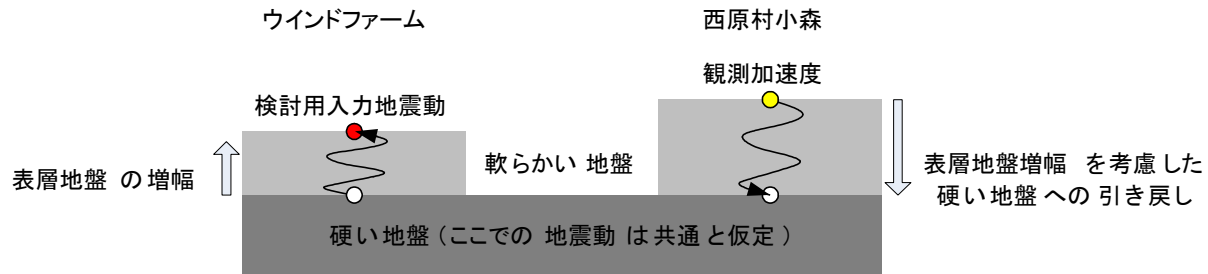
(c) 疑似速度応答スペクトル

# 5. 被害の再現解析 — 5.2 再現解析 —

- 地盤、構造物の非線形特性を考慮した地震応答解析を実施(再現するまで入力レベル調整)
- 西原村小森で観測された本震記録相当の揺れに見舞われたものと推測

## (1) 地震動の設定

- 西原村小森における熊本地震(本震)の強震記録をもとに、下図の概念によりウインドファーム各号機地点での検討用入力地震動を作成

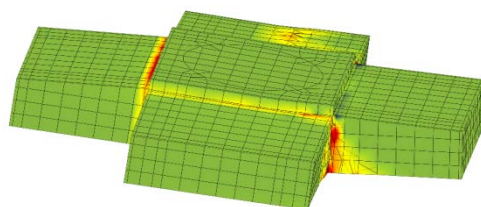


検討用入力地震動の推定概念図

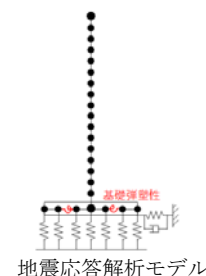
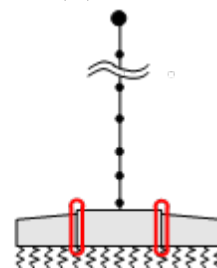
# 5. 被害の再現解析 — 5.2 再現解析 —

## (2) 解析モデルの設定

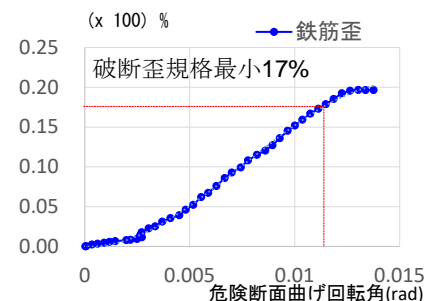
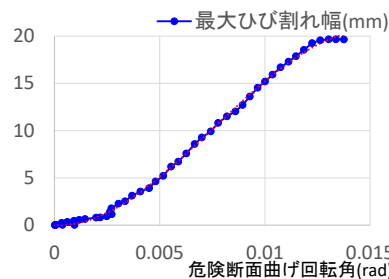
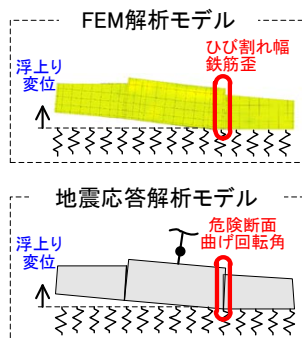
- 地震発生後の状態に相当する解析モデル(弾塑性及び浮上り考慮モデル)を構築
- 基礎コンクリートをソリッド要素でモデル化したFEM解析を行い、基礎危険断面位置に変形(損傷)が集中し、実被害とよく一致することを確認((a)図参照)
- FEM解析に基づいて基礎危険断面位置に集中する変形を表す弾塑性回転ばねを設定((b)図参照)
- 地震応答解析結果から基礎の損傷を推定するため、回転ばねの変形(と荷重)と基礎の損傷(ひび割れ、鉄筋歪)の関係を対応付け((c)図参照)



(a) FEM解析による損傷集中確認



(b) 基礎危険断面位置の弾塑性回転ばね



(c) 回転ばね変形(回転角)と基礎損傷の関係

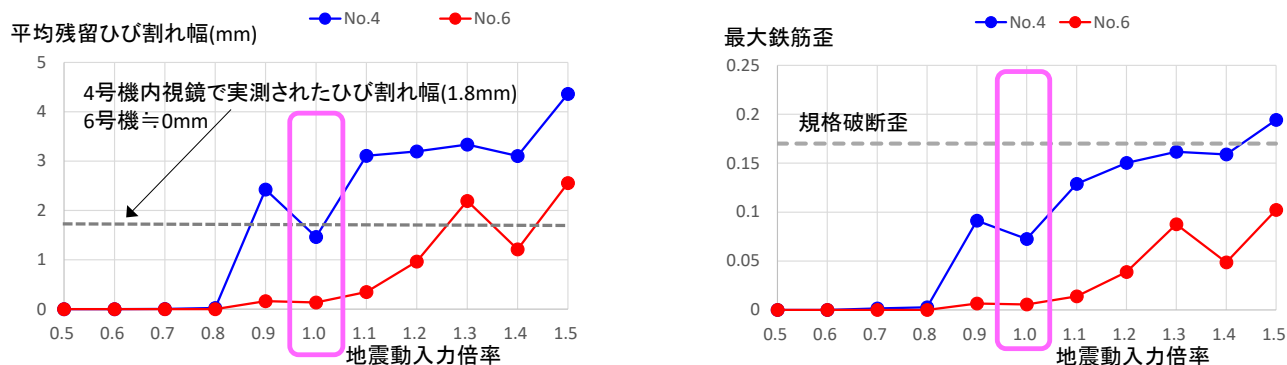
地震応答解析モデルの危険断面位置の変形と損傷との対応



# 5. 被害の再現解析 — 5.2 再現解析 —

## (3)被害の再現

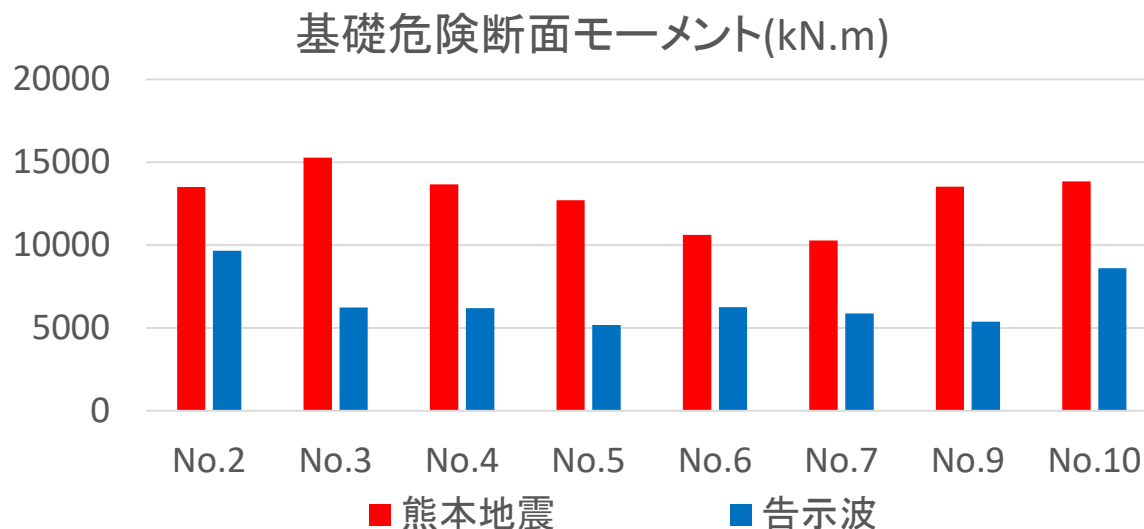
- 地震動を係数倍入力する非線形地震応答解析を、地震被害の生じた4号機(比較的地盤が硬い)と6号機(比較的地盤が軟らかい)について実施
- 解析の結果として、地盤が軟らかい方が基礎に生じる応力は小さく、4号機の被害(ひび割れ幅1.8mm)、6号機の無被害を再現できた。また、最大鉄筋歪は、規格破断歪に至らず破断しないこと、実測残留ひび割れ幅より、入力倍率を1.0倍程度(ウインドファームの地震動が西原村小森の地震動と同程度)とすれば実被害と整合する傾向があることを確認



入力地震動のレベルを変えた応答解析結果

## 6. 大規模地震に対する耐震性評価(地震後相当を対象)

- 今後、サイトで発生しうる大規模地震を現行基準(発電用風力設備に関する技術基準)に基づき告示波(極稀地震(500年再現期間を考慮したレベル2地震))と想定
- 地震後の状態に相当する解析モデルを用いた地震応答解析において、風車が倒壊・崩壊していない熊本地震により生じる基礎危険断面モーメントより告示波によるモーメントは小さく、風車が倒壊・崩壊しないことを確認  
(損傷を受けた状態(補修をしない状態)でも耐震性を確認)



入力地震動のレベルを変えた応答解析結果

# 7. 復旧目標の設定および補修方針

## (1) 復旧目標の設定

- 復旧の対象は直接基礎(2~5,7,9,10号機),杭基礎(8号機)  
(1号機は、杭が損傷していると推測されるため復旧不可)
- 主たる目標は「耐久性確保」(内部鉄筋の腐食抑制)
- 構造上重要な部分(直接基礎)については、剛性、耐力に関しても可能な限りの原状回復を目標に設定

## (2) 基礎構造の補修方針

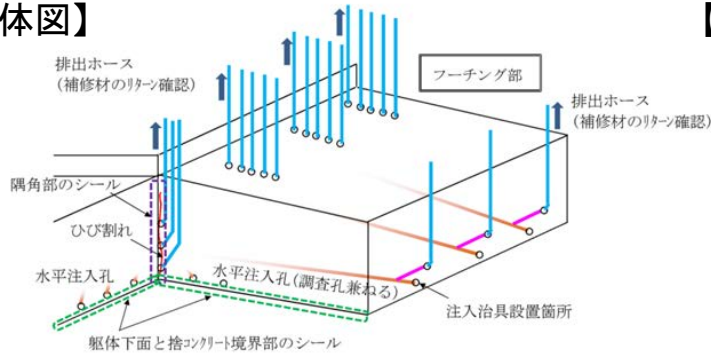
- 基準および指針によりひび割れ補修は「注入工法」を採用

# 8. 補修工

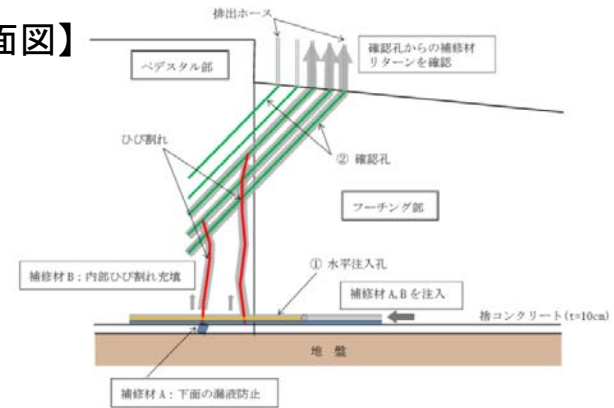
## (1) 注入工法

- 注入による補修とし、ひび割れ範囲が大きいいため超微粒子セメントミルクを使用
- 1次注入で下面への流出路を閉塞、2次注入でひび割れ内部に補修材を充填

### 【全体図】



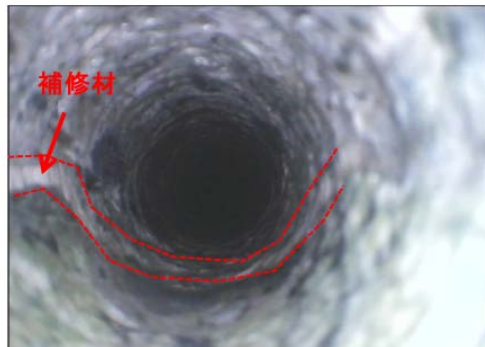
### 【断面図】



注入工法 の概念

## (2) 充填状況の確認・評価

- 排出用ホースからの補修材の溢流を確認
- 確認孔の削孔、内視鏡挿入、供試体採取により注入状況を確認
- 水平方向の衝撃弾性波探査によりひび割れ箇所の反射波がないことを確認(充填を確認)



内視鏡確認の例 (9号機)



9号機の供試体の補修材確認

## 9. まとめ

- ① 2016年の熊本地震により、阿蘇にしはらウインドファームの風車基礎にひび割れが生じた。
- ② 風車の設計は、建設当時の基準である建築基準法に基づき実施しており、ひび割れは生じたが、倒壊・崩壊はしていない。また、熊本地震は、現行基準で検討対象としている告示波（極稀地震）より強い地震であったことを確認した。
- ③ 各種調査を実施し、基礎にひび割れが確認されたが1～2mm程度であること、上部工（ナセル、タワー）が健全であることを確認した。
- ④ (社)日本建築防災協会の「基準および指針」に基づき、被災度判定、復旧可否、補修方法を検討した。
- ⑤ 被害の再現解析および今後の大規模地震（極めて稀に発生する地震動）に対する耐震性評価を実施し、風車が転倒・倒壊しないことを確認した。
- ⑥ 上記の結果、1号機以外の復旧は可能（6号機は無被害で運転再開済み）で、ひび割れへのセメントミルク注入による補修を実施した。
- ⑦ 各号機の被害状況、調査結果、復旧可否、対策、今後の大規模地震に対する安全性と今後の方針を下表に示す。

各風車基礎の被害・復旧可否・対策・大規模地震時の安全性・方針

号機		地震被害	復旧	対策 (補修の方法)	極稀地震*1に 対する安全性	今後の 方針
基直 礎接	6	被害無し	可	—	○	(再開済)
	2～5,7,9,10	基礎のひび割れ (1～2mm程度)	可	ひび割れ補修 (注入工法:セメントミルク)	○	供用再開
杭 基礎	1	杭にダメージの大きい ひび割れ	不可			
	8	杭に軽微なひび割れ (閉じている)	可	(側面のひび割れ補修)	○	供用再開

\*1: H12建設省告示1461号に示された「極めて稀に発生する地震動」 19