

論文 台風 14 号による風車基礎定着部の破壊挙動に関する検討

松尾 豊史*1・金津 努*1・高原 景滋*2・銘苅 壮宏*2

要旨：2003 年 9 月 11 日に宮古島を直撃した台風 14 号において、基礎定着部の破壊により風車が倒壊するという被害が生じた。このため、基礎定着部の破壊メカニズムを解明するために、現地の倒壊状況を調査するとともに、基礎部材の材料試験および基礎定着部を詳細にモデル化した三次元非線形有限要素解析を実施した。この結果、基礎定着部はコーン状の破壊により終局状態に達することが判明し、現地の破壊状況と概ね一致した。

キーワード：風車、基礎、定着、材料強度、有限要素解析、被害調査

1. はじめに

過去 30 年間で最大級の台風 14 号(日最大瞬間風速 74.1m/s)は平成 15 年 9 月 11 日に宮古島を直撃し、公共建築物を始めとして、電力設備にも大きな被害をもたらした。その際、沖縄電力(株)の風力発電実証研究設備(図-1 参照)については、6 基のうち 3 基が倒壊、2 基がブレード破損、1 基がナセルを損傷するという被害を受けた。風車自体の倒壊に至った設備のうち、2 基はタワーの座屈、1 基は基礎定着部の破壊によるものであった。

本論文では、これらの被害のうち、倒壊に至った七又風力 1 号機の基礎定着部の破壊メカニズムを現地調査、材料試験、構造解析などによって明らかにし、設計との対応について考察を加えた。

2. 現地調査結果

基礎破壊風車の現地調査を行った結果から、風車基礎部の特徴的な破壊状況を写真-1 にまとめた。

2.1 基礎定着部の概略

基礎は逆 T 字基礎となっており、基礎上部は直径 4m・高さ 1.8m の円柱型となっている。基礎定着部は、長さ 115cm・直径 36mm のアンカーボルト 88 本で締結されたアンカーリングが埋め込まれている(図-2 参照)。

2.2 アンカーボルト界面

写真-1 (a) から、アンカーボルトの界面において、コンクリートが破壊していることが確認できた。ただし、アンカー部の引張側(写真上部)においては、アンカーボルト界面での破壊が明瞭なのに対して、アンカー部の圧縮側(写真下

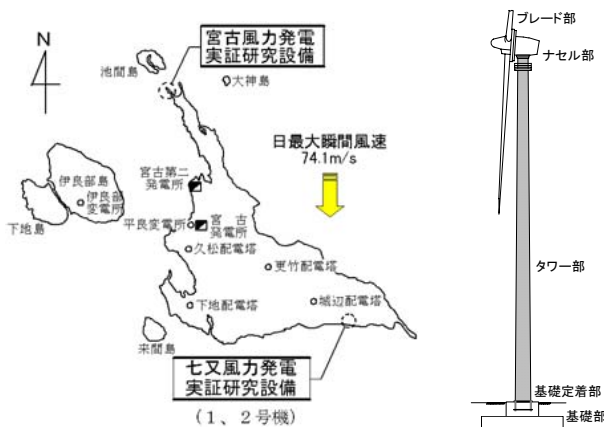


図-1 風力発電実証研究設備の概要

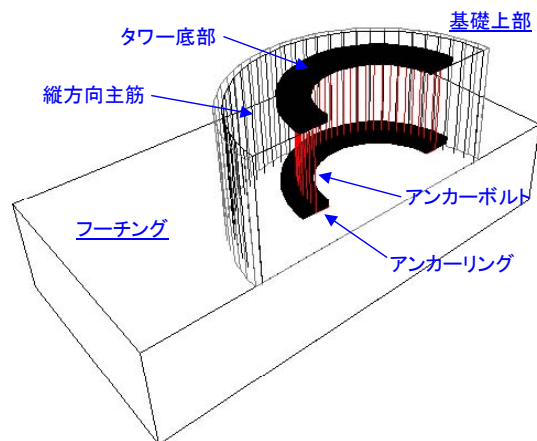


図-2 基礎定着部の概略

*1 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (正会員)

*2 (株) 沖縄電力 研究開発部 (非会員)

部)では、コンクリート片が付着しているため、全周にわたった界面破壊は認められない。アンカー部の底面は、凹状の破壊形状を示している(写真-1 (b)参照)。

2.3 コーン状破壊

写真-1 (c)から、コンクリートがブロック状に鉄筋に沿って破壊しており、アンカー部がコーン状破壊をしたものと推定できる。倒壊後の状態のみで判断することは難しいが、倒壊時には曲げモーメントとせん断力が同時に加わっているため、基礎破壊の過程では、アンカーリング部において局所的な支圧破壊を伴っていた可能性が高い。

2.4 割裂ひび割れ

写真-1 (d)より、基礎の上部に割裂ひび割れが入っていることが観察できた。なお、横方向フープ筋も破断している箇所を確認しており、過大な膨張圧が作用していたと考えられる。

割裂ひび割れがどの時点で発生したかの判断は難しい。ただし、コーン状破壊後に割裂ひび割れが入るとは考えにくいことから、割裂ひび割れがコーン状破壊前に進行していたと推測される。

2.5 縦方向主筋の変形と破断

タワー北側の縦方向主筋は、コーン状破壊した時にコンクリートブロックによって、屈折しており、中には、破断しているものも観察できた(写真-1 (c), (d)参照)。



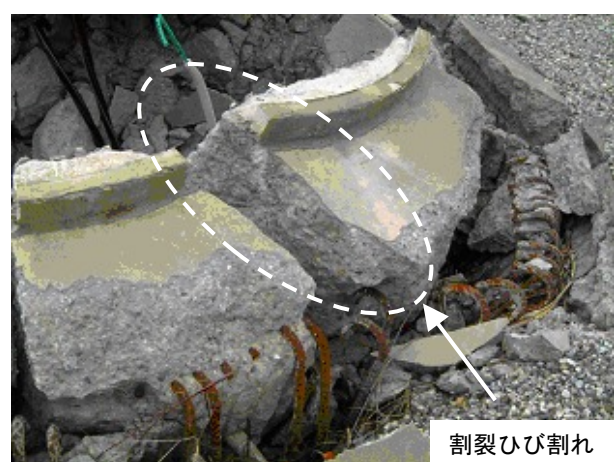
(a)風車倒壊(側面)



(b)風車倒壊(底面)



(c)コーン状破壊



(d)割裂ひび割れ

写真-1 風車基礎部の破壊状況

3. 基礎部材の強度試験

3.1 概要

破壊した基礎から、コンクリートと鉄筋を採取して、材料試験を行い、風車基礎部の材料強度を求め、材料強度の設計値と実強度との関係などを確認した。

3.2 試験結果とその評価

(1) コンクリート

試験片の数は、通常ばらつきの影響を考慮して、3個の平均として示される。今回は実際の基礎コンクリートからのコア抜き試験片であるので、4個の平均とした。表-1(a)に基礎部のコンクリートの圧縮試験結果と割裂試験結果の一覧を示す。

コンクリート圧縮強度は、基礎上部で35.6MPa、フーチング部で39.5MPaとなっており、設計基準強度の24MPa以上であるため、設計どおりの材料が使われていたと判断される。

(2) 鉄筋

試験片の数は、コンクリートと同様に、4本とした。表-1(b)に主筋とフープ筋の引張試験結果の一覧を示す。

鉄筋の降伏強度は、主筋が369.8MPa、フープ筋が344.8MPaであり、引張強度に関しては、主筋が554.6MPa、フープ筋が532.7MPaであった。いずれの鉄筋もSD295の規格を満足する鉄筋であり、設計通りであると判断される。

表-1 材料試験結果
(a) コンクリート($f'_{ck}=24\text{MPa}$)

種別	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	割裂引張 強度(MPa)
基礎上部	35.6	28.6	3.60
フーチング部	39.5	29.3	4.35

(b) 鉄筋(SD295)

種別	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
主筋	369.8	554.6	189
フープ筋	344.8	532.7	187

4. 風車基礎定着部の有限要素解析

4.1 解析概要

(1) 解析対象

本解析の対象は七又風力1号機の基礎定着部である。タワー部の全高は42m、基礎は逆T字基礎となっており、基礎定着部はアンカーボルトで締結されたアンカーリングにより定着されている。なお、地盤の影響は少ないと判断して、モデル化を省略した。

(2) 解析手法

コンクリートおよび鉄筋については、材料の非線形特性を考慮した解析手法を用いた。解析コードには、RC構造物の三次元非線形有限要素解析システムTotal-RC¹⁾を用いた。

(3) 解析モデル

解析要素分割図を図-3に示す。本解析では、タワーおよび基礎部の各構成要素ごとに、詳細にモデル化した。

なお、解析モデルでは、アンカーボルトを梁要素でモデル化しているため、アンカーボルトに被せられたビニールホースの断面積を考慮して、アンカーリングの面積を5%低減した。

(4) 解析条件

a) 入力物性

コンクリートや鉄筋などの解析用入力物性は、表-1の材料試験結果およびコンクリート標準示方書²⁾に基づいて設定した。

b) 境界条件

解析では、対称条件を考慮して、解析対象の1/2のみをモデル化した。1/2対称断面については断面方向に垂直方向の変位のみ拘束し、フーチング底部については全方向の変位を拘束した。

c) 荷重条件

ナセルならびに、ブレード部、タワー部の総自重(650kN)を鉛直方向に載荷した後、タワー頂部に集中荷重として水平方向に強制変位を与えた。

なお、工事施工管理記録によれば、アンカーボルトは、2.12kN・mのトルクで締め付けられていたことが明らかになったため、締め付け力に

についても初期荷重として考慮した³⁾。

4.2 解析結果

図-4はタワー頂部の変位とタワー基部のモーメントの関係を示したものである。この図には、解析結果の応力状態から判断した特徴的な現象が生じたa～fの各段階を示している。また、図-5には、モーメントa～f時に対応した基礎上部(図-3(c)参照)の最大せん断ひずみコンター図を示した。なお、ひび割れ図、主応力図、変形図などを別途出力して、解析結果の考察に用いたが、紙面の都合上割愛した。

(1) モーメント a : 5046 (kN・m)

引張側のアンカーリングの側方方向にひび割れが生じた(図-5(a)参照)。

(2) モーメント b : 10005 (kN・m)

引張側のアンカーリング側方のひび割れが進行し、圧縮側のアンカーボルト上部の圧縮応力度も大きくなり、局所的にひび割れが発生した(図-5(b)参照)。

(3) モーメント c : 14655 (kN・m)

引張側アンカーリングでは、外側・内側で水

平方向にひび割れが進行した。また、引張側のアンカーボルト沿いにもひび割れが発生して、基礎上面でも割裂ひび割れが発生した(図-5(c)参照)。

(4) モーメント d : 19470 (kN・m)

引張側のアンカーボルト沿い、およびアンカーリングの内側方向のひび割れが大きく進行した。また、圧縮側のタワー底部下の基礎上面に局所的に圧縮破壊が生じた(図-5(d)参照)。

モーメント d の段階で、引張側のアンカーボルト沿いにひび割れが進行する状況は、実現象に近いと考えられる。また、アンカーリングの内側方向にひび割れが進行することも、実現象で風車底面が凹状の破壊面となっていることに比較的近い。

(5) モーメント e : 21830 (kN・m)

圧縮側のタワー底部下の基礎上面全体に圧縮破壊が進行し、引張側の基礎上面では割裂ひび割れが大きく進行した。引張側アンカーリングからのひび割れは、外側・内側方向に大きく進行した(図-5(e)参照)。

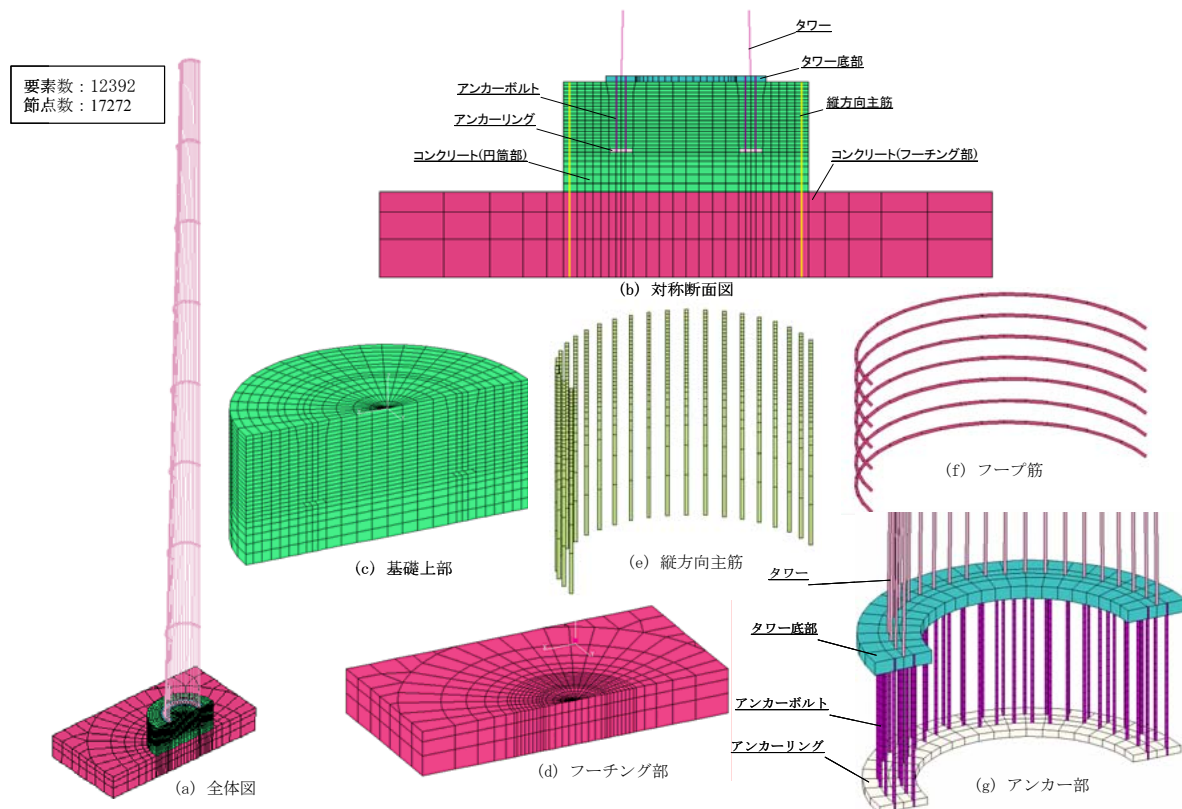


図-3 解析要素分割図

(6) モーメント f : 23868 (kN・m)

モーメント $e \sim f$ の間で、縦主筋 2 本が降伏し、直後に引張側のフープ筋も降伏した。この時、アンカーボルトに発生した最大引張応力は降伏強度の約 83% であった。その後、コンクリートのコーン状破壊に進展すると考えられる斜め方向ひび割れが進展し、ひずみが大きくなっている。また、最大耐力時には、圧縮側タワー底部下では圧縮応力が低下し、引張側アンカーボルト周辺で全体的にひずみが大きくなっている(図-5 (f) 参照)。

この後に、コーン状破壊が進展し、最終的に、引張側の基礎部がアンカーボルト界面に沿って抜け出して、終局状態に達したと考えられる。

以上より、本解析により、概ね基礎定着部の破壊のメカニズムを再現できたと判断できる。

4.3 考察

アンカーのコーン状破壊の耐力評価式⁴⁾は概ね有効投影面積およびコンクリートの圧縮強度の 1/2 乗に比例して増大するため、基礎部における定着力の増加には埋込長を深くすることおよび、有効投影面積内に鉄筋を配置すること⁵⁾

等が有効であると考えられる。また、脆性的な破壊を防止するためには、アンカーボルトの降伏で定着力が決まる方が望ましい⁴⁾。

5. 設計との対応

5.1 強度のばらつきの評価

今回の有限要素解析では、コンクリートと鉄筋の材料特性は試験データの平均値を用いているので、解析結果も平均的な値と考えるのが妥当である。設計強度との対応およびばらつきの影響を考慮して、コンクリートおよび鉄筋に表-1 の設計強度を用いた解析を実施した。

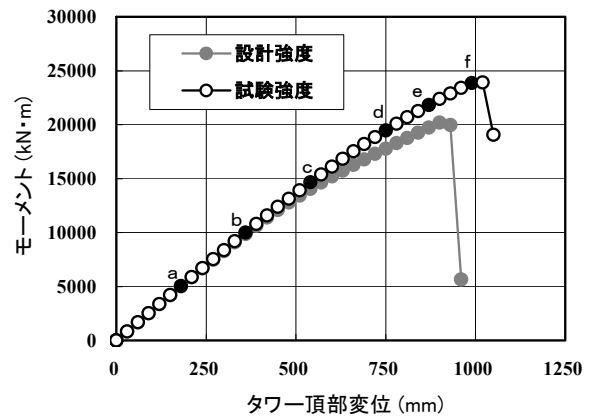


図-4 モーメントータワー頂部変位関係

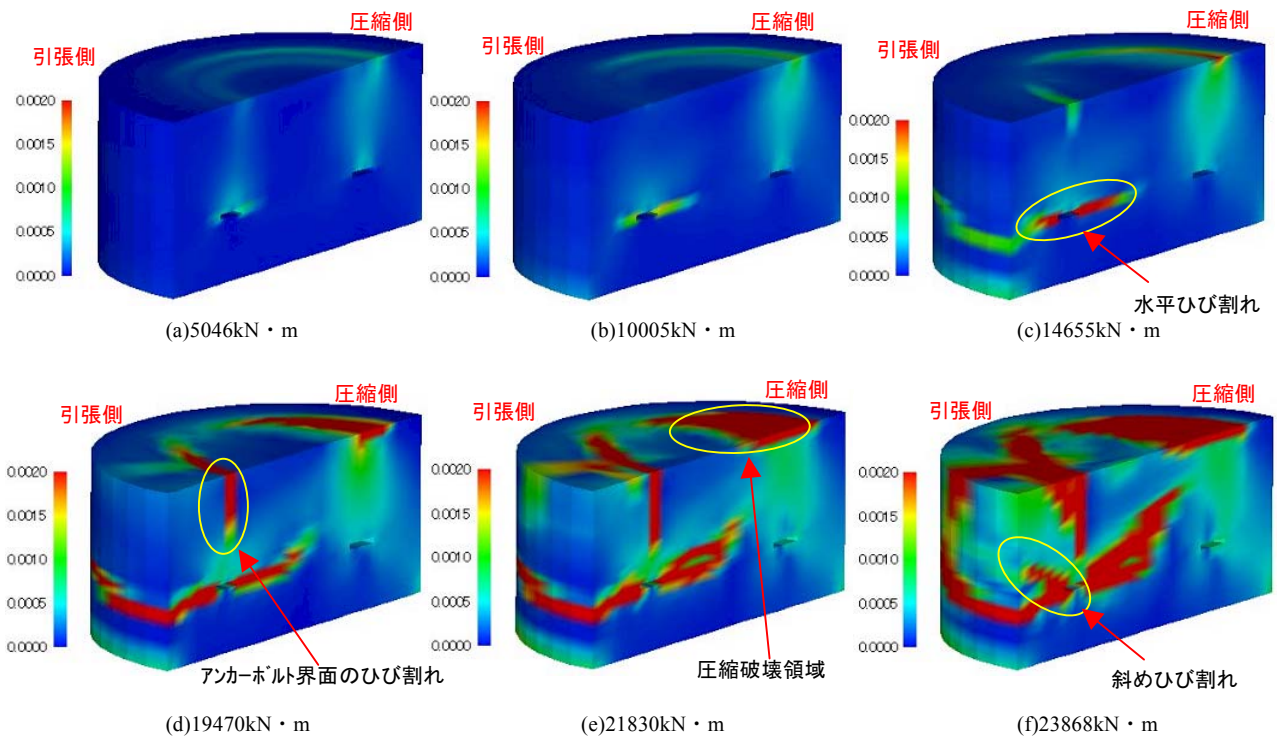


図-5 最大せん断ひずみコンター図

有限要素解析の入力データとしてコンクリートと鉄筋に設計強度を用いた場合は、耐力が約15%低下した(図-4の設計強度を参照)。これは、圧縮側タワー底部下の基礎上面での圧縮破壊する変位が小さく、引張側基礎部の損傷領域も広がるためである。コンクリートと鉄筋の設計強度を特性値と考えることにする。このことより、有限要素解析の入力データとしてコンクリートと鉄筋に設計強度を用いた解析は、概ね解析結果のばらつきの下限と考えることができる。

5.2 設計荷重に関する考察

七又風力1号機の設計で考慮されたタワー基礎部に作用する曲げモーメントは、8273kN・m(=843.6t・m)であった。一方、今回の解析結果の下限値が20186kN・mであり、設計で想定された風荷重に対して約2.4倍以上の風荷重が作用したことになる。これは、設計時の荷重評価では、風車の3本のブレードがすべてフェザリング(ブレードの向きを風の抵抗が最も小さくなるように変更する制御)が有効に作用した場合で荷重算定しているが、現地調査の結果では、2本のブレードがフェザリングされていなかった可能性がある⁶⁾。その結果、風荷重は設計荷重よりも非常に大きくなったと推測される。

一方、設計で想定した土かぶりを含めた基礎全体としての抵抗モーメントは34661kN・m(=3535.4t・m)であったので、解析結果はこの値よりは低い数値になっている。したがって、基礎定着部が抜けなければ、基礎全体としては転倒しなかったものと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた主な知見は、次のとおりである。

- 1) 倒壊した風車の基礎部を調査した結果、アンカーの部のコーン状破壊、割裂破壊、縦方向主筋の変形と破断、アンカーボルト界面の破壊などが観察された。
- 2) 風車基礎部からコア抜きしたコンクリートおよび切り出した鉄筋試験片を用いて材料試験

を実施し、設計上の材料強度との整合性を確認した。その結果、コンクリート、鉄筋ともに、所定の強度を有しており、設計通りの材料が使われていたと判断できる。

- 3) 有限要素解析結果では、斜め方向のひび割れの進展が認められ、コーン状の破壊により終局に至っており、現地の破壊状況と概ね一致している。
- 4) 解析から求めた基礎の破壊曲げモーメントは、設計で考慮された基礎部に作用する曲げモーメントよりも大きいですが、設計で想定した土砂も含めた基礎全体の抵抗曲げモーメントよりは小さい結果となった。

なお、今後、建設時および非常時のコストや安全性を考慮したタワー、定着、基礎を含む風車全体の建設のための設計手法の構築が望まれる。

謝 辞 :

現地調査にあたっては、沖電設計(株)と沖縄新エネ開発(株)の皆様には便宜を図って頂きました。本解析を実施するにあたっては、(株)TOTAL INFORMATION SERVICEの皆様には、多大なるご協力を頂きました。また、本研究のとりまとめにあたっては、電力中央研究所・構造工学領域の皆様には貴重なご助言を頂きました。ここに記して、謝意を示します。

参考文献

- 1) Total-RC 理論説明書(<http://www.total-inf.co.jp/>)
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書・構造性能照査編[2002年制定]，2002.3
- 3) 山本晃：ねじ締結の理論と計算，養賢堂，1970.
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，第4編各種アンカーボルト設計指針・同解説，1984.
- 5) 日本電気協会・電気技術基準調査委員会：機器・配管系のアンカー部評価法，原子力発電所耐震設計技術指針，JEAG4601-1991 追補版，1991.
- 6) 沖縄電力株式会社：台風14号による風力発電設備の倒壊事故調査報告書，2004.