

岩屋ウィンドファーム発電所
11A号風車倒壊事故報告(別紙)

平成19年3月16日

(株)ユーラスエナジー岩屋

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 岩屋 WF と事故の概要 | 2 |
| (1) 岩屋 WF の概要 | 2 |
| (2) 事故の概要 | 6 |
| 3. 事故状況 | 8 |
| (1) 事故発生時の気象状況・風況 | 8 |
| (2) 事故発生時の風車状況 | 8 |
| (3) 風車倒壊状況 | 12 |
| 4. 設計・施工結果の調査・確認 | 17 |
| (1) 基礎設計の概要 | 17 |
| (2) 施工結果の確認 | 17 |
| 5. 倒壊原因の究明 | 18 |
| (1) 方針 | 18 |
| (2) 基礎の材料強度試験 | 18 |
| (3) 倒壊風車基礎の構造解析 | 23 |
| (4) 風応答解析で考慮すべき諸条件について | 42 |
| (5) 倒壊風車の風応答解析 | 44 |
| (6) 倒壊原因のまとめ | 57 |
| 6. 再発防止対策 | 61 |
| (1) 再発防止策の検討 | 61 |
| (2) 再発防止策のまとめ | 65 |
| 7. 今後の対応について | 68 |
| | |
| 岩屋ウィンドファーム風車倒壊事故調査委員会 委員構成 | 69 |
| 岩屋ウィンドファーム風車倒壊事故調査委員会 開催実績 | 70 |

1. はじめに

平成 19 年 1 月 8 日（月）に岩屋ウィンドファーム発電所（以後、岩屋 WF という）の 1,300kW 風力発電設備 25 基の内の 1 基（11A 号）において、風車基礎破壊により倒壊する事故が発生した。

当社は、今回の倒壊事故の重大性に鑑み、事故発生後即、岩屋 WF の全風車の運転を停止するとともに、事故調査委員会（委員構成は 69 頁参照、開催実績は 70 頁参照）を組織して社外学識者・専門家のご指導をいただきながら、風車倒壊事故の原因究明と再発防止対策の検討を行ってきた。原因究明にあたっては、現地風車倒壊状況、事故発生時の風況・風車状況、風車基礎設計・施工結果の調査を実施した他、構造解析により風車基礎の原構造の妥当性と実耐力の算定や風応答解析により風車過回転時の風況・風車状態における風荷重の算定を実施した。これら徹底した事故調査・検討を経て、ここに調査報告書として原因究明および再発防止対策をまとめることができた。

今後は再発防止対策を確実に実施した上で、運転を再開したいと考えている。

2. 岩屋 WF と事故の概要

(1) 岩屋 WF の概要

岩屋 WF の風車レイアウトを図2-1に示す。

本 WF は青森県下北郡東通村岩屋地内に出力 1,300kW の風車 25 基を設置し、平成 13 年 11 月 10 日に運転を開始した総出力 32,500kW のウィンドファームである。

サイト内に設置されている風力発電設備の基本諸元を以下に示す。

【基本諸元】

風 車 : デンマーク ボーナス社 (現 独シーメンス)
種 類 : プロペラ型 アップウィンド式
出 力 : 1,300/250kW (極数切換方式)
回転数 : 19/13rpm
ロータ : 直径 62m, ブレード 3 枚
调速機の種類 : ブレードピッチ角制御 (油圧)
ロータ取付位置 : 地上 68m
支持物 : 鉄塔

風車外形図を図2-2, 基礎構造図を図2-3に示す。

また、風力発電設備の各部位の名称を図2-4に、風車基礎の各部位の名称を図2-5に示す。

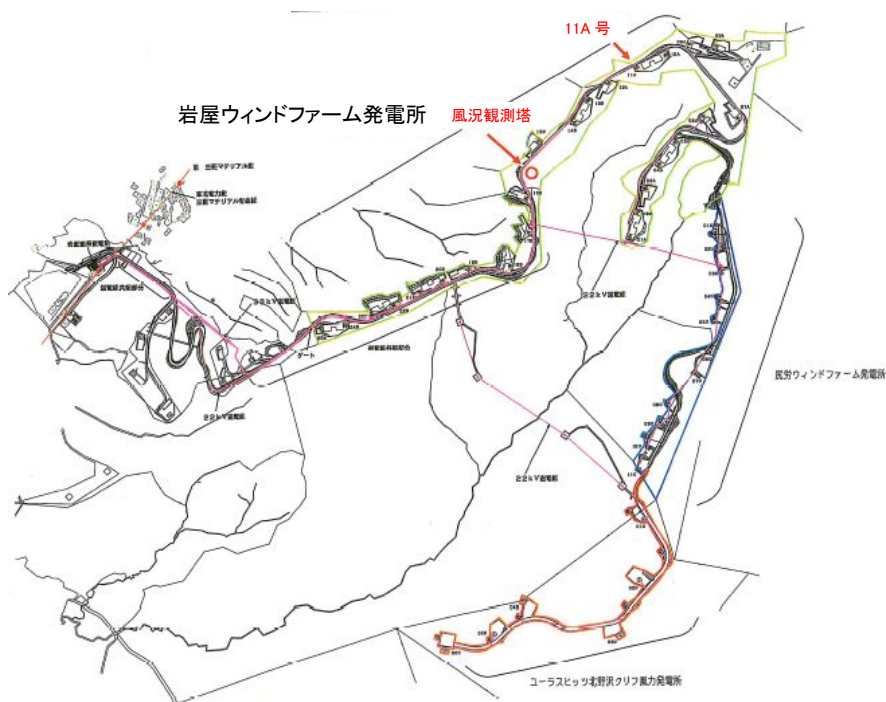


図2-1 風車レイアウト図

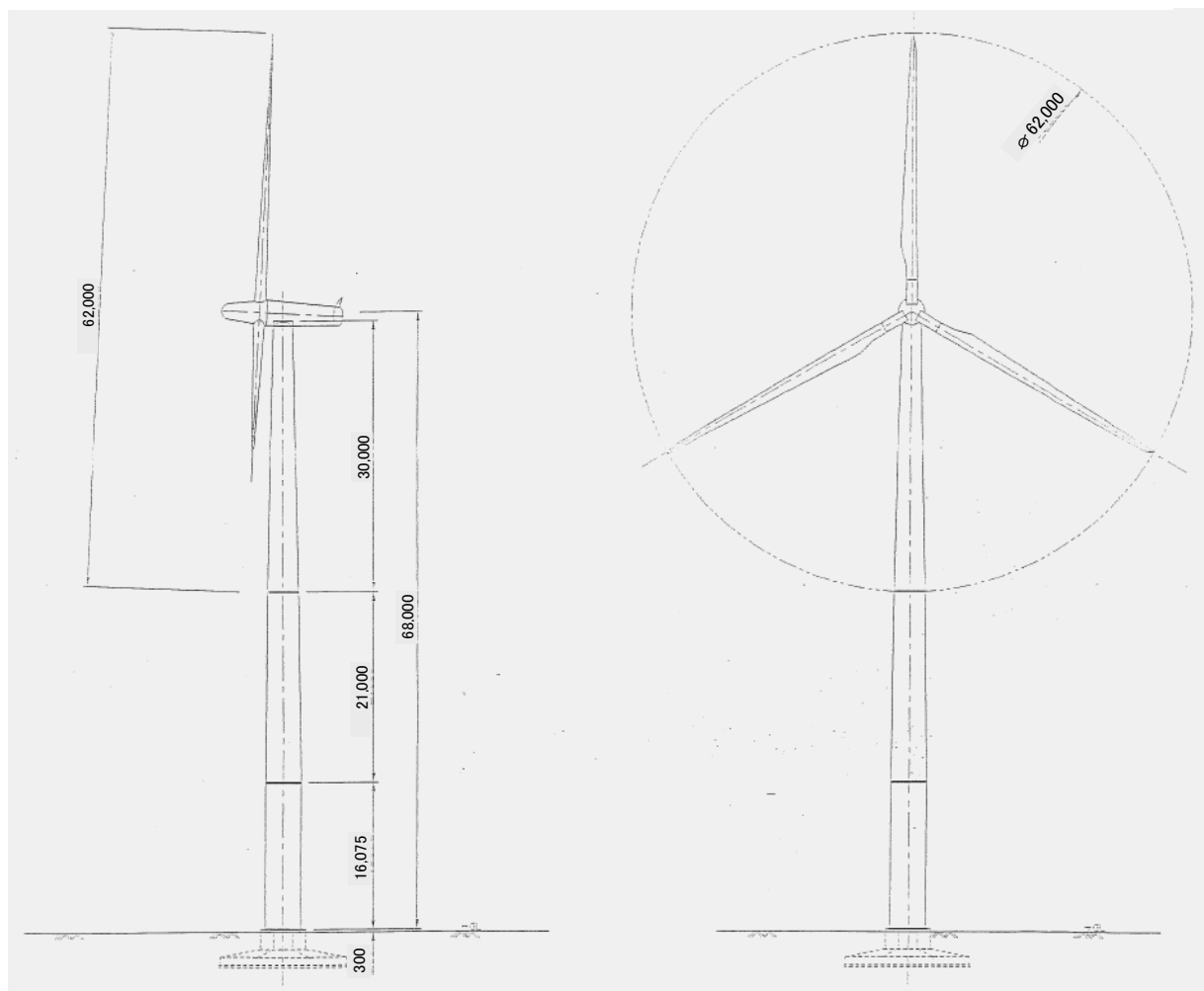
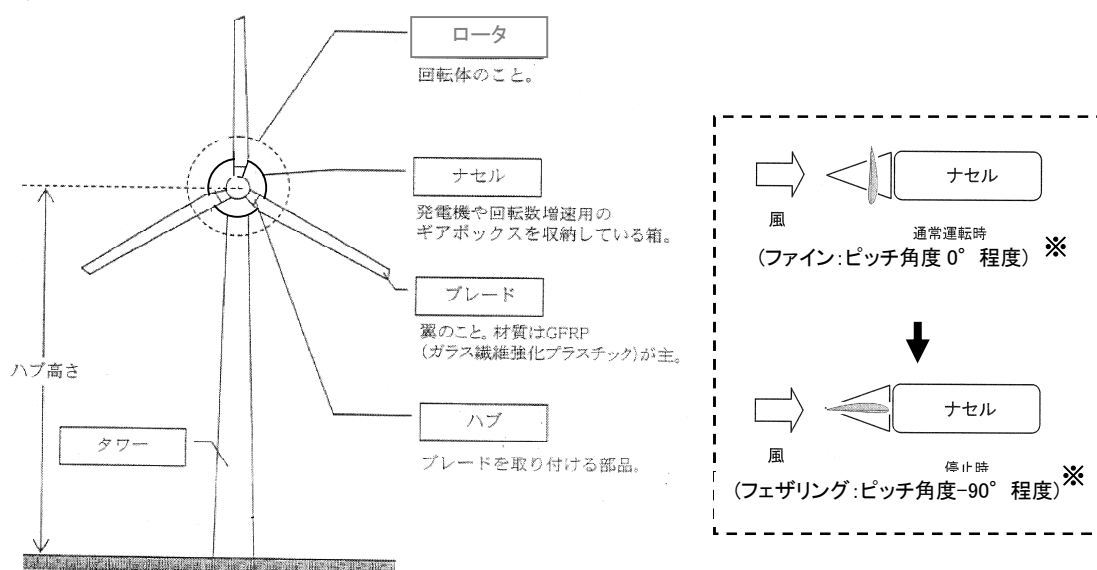


图2-2 風車外形图



※ 本報告書では、ブレードのピッチ角度を限定せず、風を受けやすい状態を「ファイン状態」、風を逃がす状態を「フェザリング状態」と定義した。

図2-4 風力発電設備の各部位名称

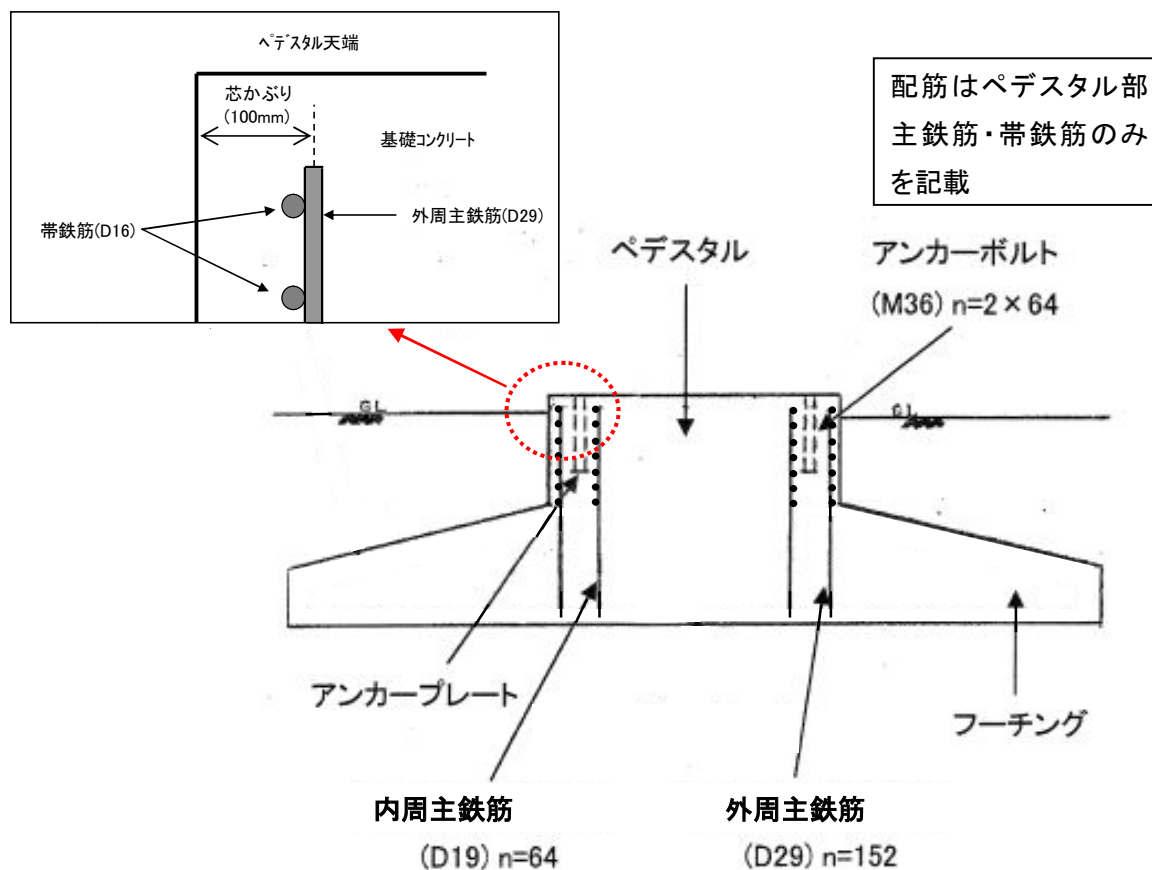


図2-5 風車基礎の各部位の名称

(2) 事故の概要

平成 19 年 1 月 8 日 21 時 51 分，11A 号風車が基礎破壊により倒壊した。

基礎の破壊形態は，風車からの引抜き力を受けたことによる基礎ペデスタル部のコンクリートのせん断破壊である。

風車倒壊の状況を図2-6に，風車基礎の損壊状況を図2-7に示す。



タワー倒壊状況



ナセル損壊状況

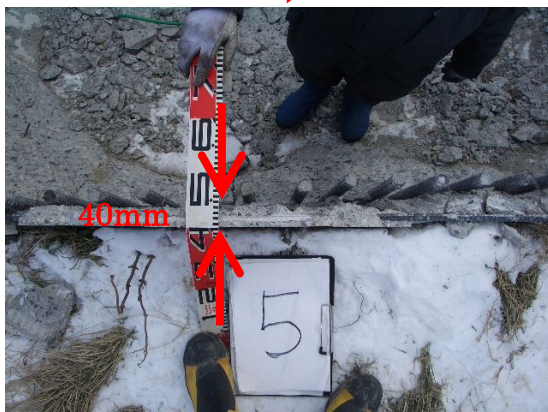
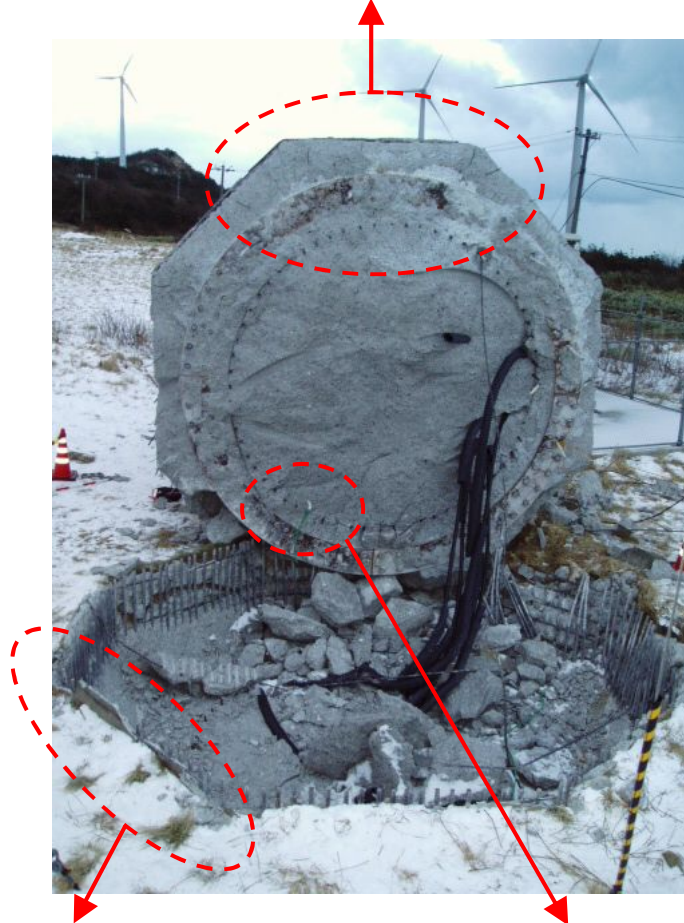


ハブ頭部およびブレード損壊状況

図2-6 風車倒壊状況



せん断破壊面の状況



コンクリートかぶり状況



内周主鉄筋 (D19) の破断状況

図2-7 風車基礎の損壊状況

3. 事故状況

(1) 事故発生時の気象状況・風況

北海道・東北地方は1月6日より発達した低気圧に見舞われ、岩屋 WF においても7日夕方には40m/s を超える最大瞬間風速を記録している。

1月7日～8日の天気図を図3-1に、1月7日～8日の気象状況、岩屋 WF11A 号風車および風況観測塔（設置位置、図2-1参照：11A 号風車より南南西 564m、標高 40m 低）において観測した風況データを図3-2に示す。

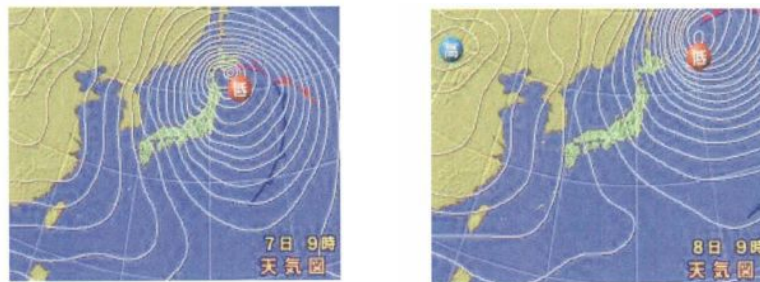


図3-1 1月7日～8日の天気図

事故の発生した8日には、低気圧は東の海上にぬけて次第に遠ざかり、岩屋 WF においても8時以降は最大瞬間風速 30m/s 未満である。

【事故発生前の風速（最終取得データ） 1月8日 21時36分42秒】

| | | |
|--------------|--------|-----------|
| 11A 号風車観測データ | 最大瞬間 | : 25.8m/s |
| | 10 分平均 | : 19.3m/s |
| 風況観測塔観測データ | 最大瞬間 | : 22.2m/s |
| | 10 分平均 | : 18.4m/s |

11A 号風車においては、21 時 36 分 42 秒（以降、21 時 36 分という）以降の風速データを取得できていないが、11A 号風車の風速と同様の傾向・値を示す風況観測塔データでは当該時刻頃に値の大きな変化はない。よって、事故発生時刻に突風があったとは考え難い。

風向については、岩屋 WF に設置してある風況観測塔の記録によれば、1 月 7 日午前から北西～西で安定している。

(2) 事故発生時の風車状況

事故発生前のナセル方向、ブレードピッチ角度、ロータ回転数の経時変化状況とアラームログの発生状況を図3-2に示す。



※1:北を0°とし、時計回りの(90°:南、180°:東、270°:西)を示す)、※2:風向偏差=平均風向-ファイン状態を示す、※3:-90°:フェザリング、0°:フェザリング状態を示す、※4:発着戦軸とロータのギア比は77.73である。

図3-2 11A風車 状況

11A号風車は1月4日以降発電機に損傷（固定子巻線の層間短絡）が発生したため、運転を停止し、メーカーマニュアルに基づき、アイドリング状態に設定されていた。

アイドリング設定とは、風車がブレーキによる強制制動を長時間継続した場合に主軸受けや増速機内部にフレットング磨耗によるダメージを受けないよう主軸ブレーキを開放状態でロックすると共に、万一の停電による圧油装置の停止や破損により油圧が低下してもブレードがピッチ動作することのないよう、ピッチ固定用ブロックにより、フェザリング状態でブレードピッチ角を固定するものである。ブレードピッチ固定用ブロックの設置状況を図3-3に示す。

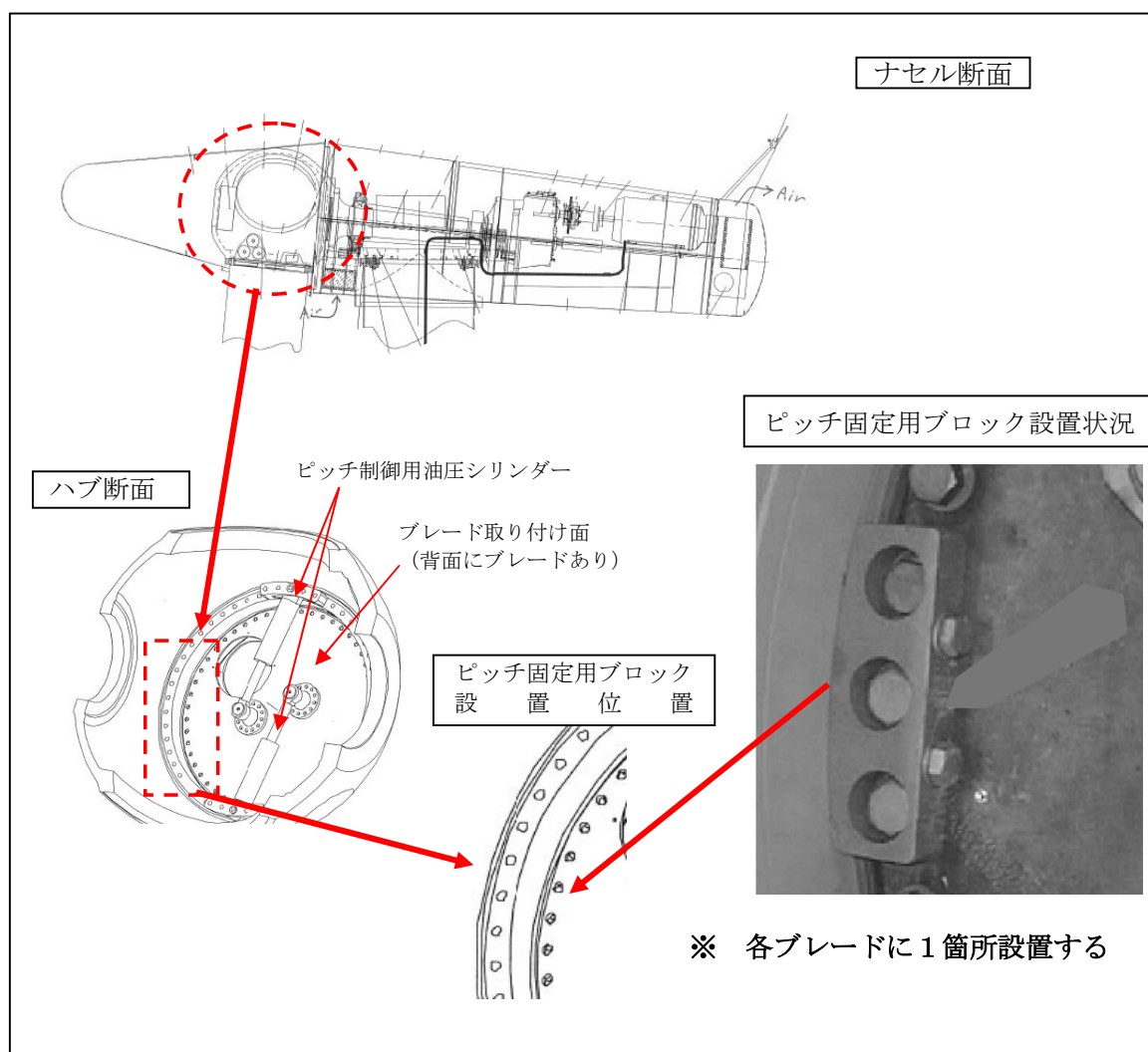


図3-3 ブレードピッチ固定用ブロックの設置状況

a. ナセル方向

11A 号風車のヨー制御状況を確認するため、風況観測塔の風向データと比較したところ若干の偏差は見られるが 8 日 6 時 06 分頃までのヨー制御は正常に行われていたことが判った。6 時 06 分以降ヨー制御が停止しているのは、5 時 56 分 41 秒に発生したアラーム（ブレーキを開放状態でロックしていたことに起因する）によるもので、制御システム上も正動作である。21 時 36 分のナセル方向は 309° ，風向は 287° ，風向偏差は -22° である。

b. ピッチ角度(ブレード)

A・B・C の 3 枚とも 1 月 8 日 1 時ごろにはピッチ角度に変化が見られ、C ブレードは、8 日 3 時 30 分ごろから 7 時 10 分ごろまでのおよそ 3 時間半をかけてファイン状態へ変化し、A ブレードは 8 日 5 時 50 分ごろから 6 時 50 分ごろの 1 時間ほどの間にファイン状態へ変化している。一方、B ブレードは、8 日 1 時 20 分ごろから変化しているものの、最終データである 8 日 21 時 36 分まで -80° を維持している。

ピッチ角度は、圧油装置にて制御されている。ナセルより供給される油圧はハブ内でブレード毎に分岐し、それぞれのブレードピッチ角度は独立して制御されている。ピッチ制御の概要を図 3-4 に示す。

フェザリング側へのピッチ制御においては、ポンプは使用せず、アキュムレータに蓄圧された油圧にて行っている。つまり、シリンダーは、常時、フェザリング側に押された状態となっている。

一方、ブレードをファイン側へ制御する場合は、ポンプを起動し、バルブユニットにて加圧側にアキュムレータ圧を超える圧力を与え、ロッドを上方に押し上げている。

アキュムレータの油圧は、圧力センサー 2 において常時監視しており、設定された下限圧力を下回った場合、ポンプを起動し、バルブユニットにてアキュムレータ側に蓄圧する制御を行っている。

1 月 7 日 23 時頃の油圧のピークは、図 3-4 の圧力センサー 1 のものである。各ブレードのピッチ角度指令がフェザリングであったことより、圧力センサー 2 が下限圧力を下回ったため、アキュムレータへ蓄圧するためにポンプが起動したものである。

その後、23 時 50 分 32 秒の「オイルレベル下限」アラームは、ハブ内のいずれかのブレードを制御するアキュムレータ側の漏油により、ポンプ起動によっても蓄圧できず、タンク油面レベルが低下し、発報したものと思われる。(ブレードの特定は不可)

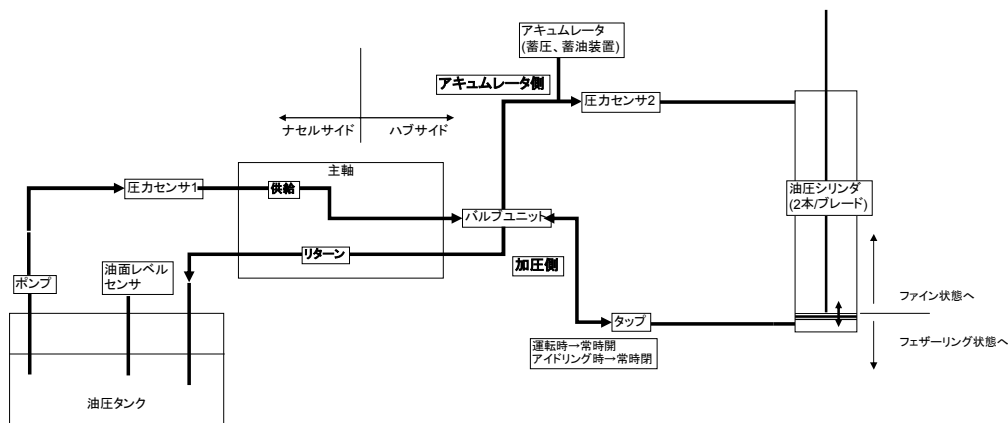


図3-4 ピッチ角度制御用圧油装置

c. 回転数

1月8日3時24分～7時06分にかけて、風速は20m/s前後でほぼ一定なのに対し、回転数は乱高下している。この時間帯はA、Cブレードのピッチ角度がファイン状態へと変化する時間帯に整合している。

その後は2～4rpm程度ではほぼ風速の変化に対応している。

d. アラームログ

1月7日23時50分32秒の「オイルレベル下限」アラーム発報以降は、風車挙動の異常を示すエラーが発生している。

事故・故障ほか異常発生時の対応は運転保守要領に規定しているが、長期停止中の風車に発生したエラーへの対応については規定していないことから、運転員はエラーの発生を把握することなく、対応もとらなかった。

事故発生直前の21時47分52秒～21時48分18秒にはロータ・発電機軸の回転数が定格を超えたこと（過回転）を示すエラーが連続して発生し、この間にロータ回転数が23→38rpmへ急激に上昇したことが判る。

(3) 風車倒壊状況

a. 倒壊方向

倒壊、ナセルおよび風の方向を図3-5に示す。風車の倒壊方向は108.4°であり、倒壊時の風向は290.2°（西北西）であることから、風車はほぼ風下側へ倒壊したと言える。この時のナセル方向は309°であることから、風向との偏差は約19°である。また、ナセルはほぼ左側面で横向きに着地していることから、ナセルは倒壊時にタワー基部座標系Z軸正方向を見て、時計方向に約110°回転したと思われる。

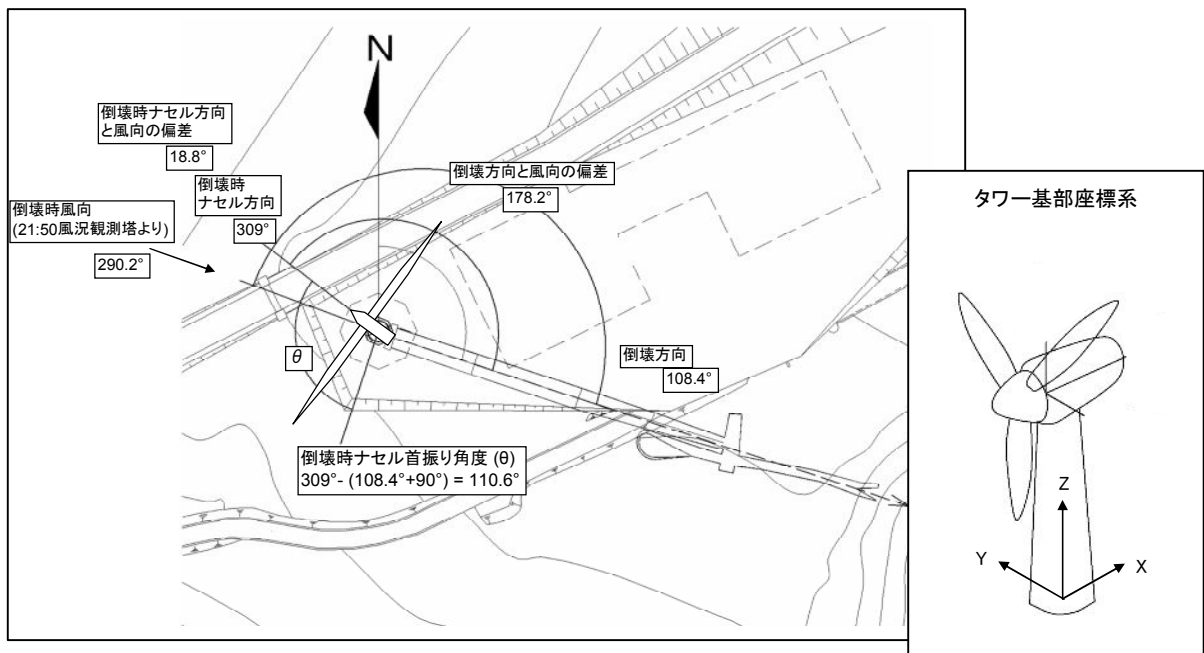


図3—5 風車タワー倒壊, ナセルおよび風の方向

タワーの偏心量と回転方向を図3—6に示す。基礎中心から倒壊方向角への直線即ちタワーがまっすぐ倒れた場合に想定されるタワー軸方向中心と実際の倒壊したタワー中心の距離の偏心量は310mmであること、タワーは倒壊時にタワー基部座標系に対しZ軸正方向を見て、時計方向に46.3°回転していることが判った。

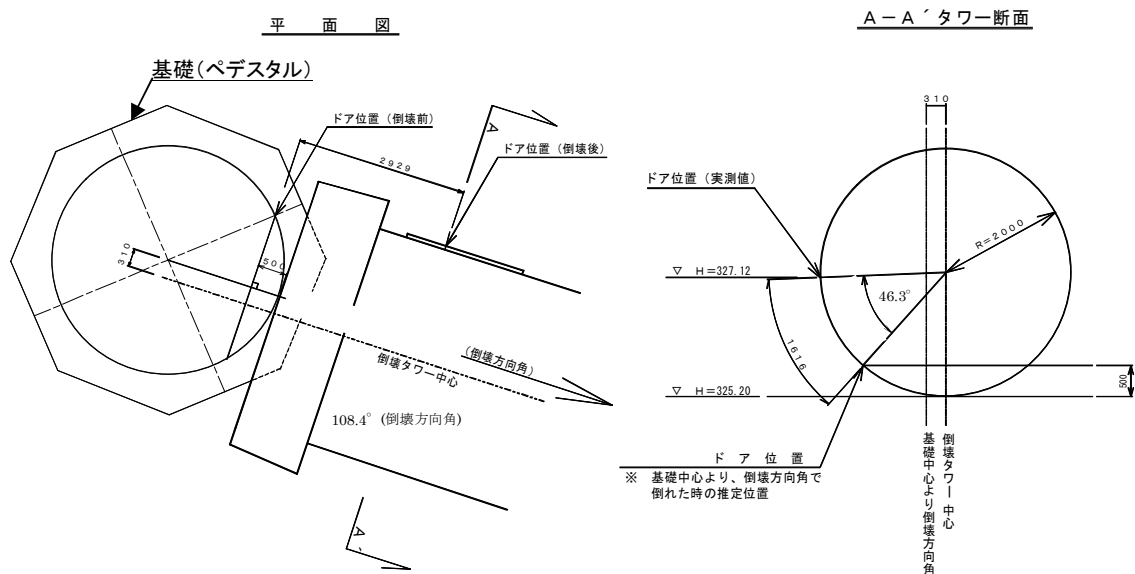


図3—6 タワーの偏心量と回転量方向

b. 基礎の状況(図2-7参照)

風車基礎の損壊状況の目視調査結果は以下のとおり。

- 外観上、基礎とタワーをつなぐ長さ 1,500mm のアンカーボルト (M36, 円周状 2 列に各 64 本) に破断等の異常は見られず、基礎コンクリートはアンカーボルト 下端のアンカープレート外周側下端面から外周へ向かっておよそ 45° の角度(コーン状)でせん断破壊面を形成し、外周主鉄筋に到達した後、外周主鉄筋の界面で剥離したように破壊している。このアンカープレート外側のせん断破壊面は凡そ平滑で擦れた様子はない。一方、アンカープレート内側の破壊面については、コーン状ではなく凸状である。
- 残存する基礎側コンクリート破壊面は、すり鉢上の形状を呈しており、内周主鉄筋 (D19, 円周状に 64 本) は全て引張により破断している。
- 外周主鉄筋 (D29, 152 本) は破断しておらず、倒壊方向以外では曲がりはなく直のまま残存している。鉄筋表面が露頭しているものが多い。
- 外周主鉄筋背面のかぶりコンクリートは多くが剥離しており、コンクリートかぶり (芯かぶり) は計測できた範囲で 40mm~130mm であり、設計値 100mm とは差異がある (帯鉄筋表面からのかぶりで凡そ 10mm~100mm)。かぶり側、引抜け側とも鉄筋との付着跡は半円形状で異型節形状を残している。
- 外周・内周とも主筋の本数・ピッチは設計とおりである。鉄筋加工仕様のとおりフックはない。
- 帯鉄筋については、外側のかぶりコンクリートと共に多くは引き上げられ位置がずれているものが多い。残存するものは凡そ設計どおりのピッチであった。鉄筋加工仕様のとおりフックはない。

c. タワーの状況

タワー本体は、フランジ部の損傷など倒壊の衝撃によると思われる損傷・変形が見られる。また、ナセル下 16~30m にわたりブレード接触痕と思われるスクラッチ状の痕跡があるほか、タワー軸方向で全域にわたって漏油の痕跡がある。

d. ブレードの状況

ブレードの損壊状況を図3-7に示す。倒壊後のブレードピッチ角を測定したところ、いずれのブレードにおいても倒壊前に記録されたピッチ角とは差異があり、倒壊によりピッチに動きがあったものと推察される。

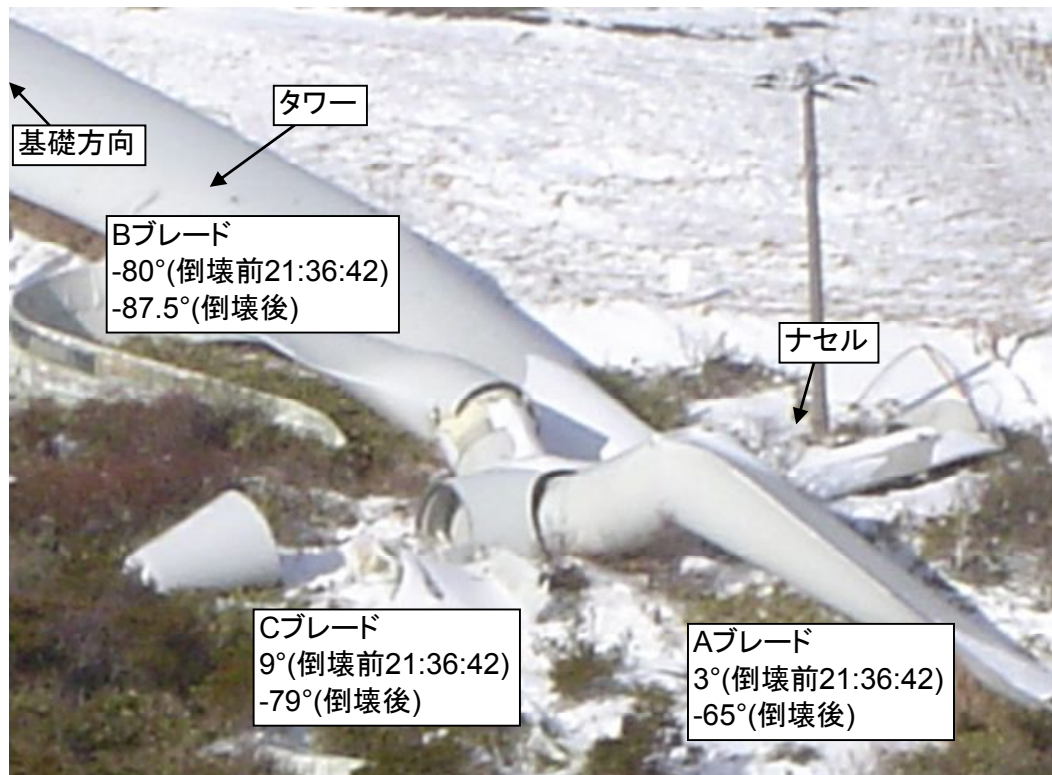


図3—7 ブレードの損壊状況(ピッチ角度)

【Aブレード】

倒壊の衝撃によると思われる損傷は激しいものの、ほぼ原形をとどめ、外皮や桁などの破片が周囲に飛散した形跡も殆んどない。

【Bブレード】

ブレードのほぼ中間部となる付根から 15.5m 付近で折損し、先端部と外皮は飛散していないが、中間より先端側のおよそ 9m にわたって桁が残存せず飛散している。

【Cブレード】

倒壊時に地面に突き刺さったと思われる様相を呈しており、原形をとどめていない。

e. 落下物の飛散状況

ブレード破片などの落下物の多くは、風車基部から倒壊方向に散在している。ブレード桁は風車位置より東方向に飛散しているものも複数あり、その飛散距離は確認された範囲で 100m を超えるものもある。

ブレードのピッチを固定していたはずのピッチ固定用ブロック 3 個(1 個／ブレード)のうち 2 個と取付けボルト 2 本が風車基部に落下しており、少なくともこれらは風車の倒壊前に脱落、落下したものと推測される。ブロックは重量約 7 k g の鉄製で、全体

に打痕が見られるが、ボルトにはネジ山のつぶれなど目だった損傷はない。

f. ハブ内の状況

前述のとおり、落下物として確認できたピッチ固定用ブロックは2個のみであるが、ハブ内を確認したところ残る1個も設置した箇所ではなく、脱落していることを確認した。

ハブ内には打痕と見られる表面塗装の剥離や傷等が確認され、脱落したピッチブロックやその他のハブ内取付品がはずれ、ロータ回転により内部に激しく当たったことがうかがえる。さらに、全てのブレードでピッチを駆動する圧油装置の接続部に緩みがあり、操作油が漏洩していることを確認した。

ピッチブロックが脱落し、圧油装置接続部の緩みにより油が漏洩すると、油圧が低下しブレードをフェザリング位置で適正に保持することは不可能となる。但し、ピッチ固定用ブロックが脱落した場合においても油圧（残圧）が確保されている限りにおいては、ブレードピッチは固定状態を保持できることから、ピッチ固定用ブロックの脱落時刻とピッチ角変化時刻は必ずしも一致しない。

当該風車の最終作業員からヒアリングしたところによると、本来はブレード1枚に対して1個のブロックを、ボルト2本で固定（合計6本のボルト/風車）すべきところを、1月4日の作業ではナセル上にはボルトが5本しかなかったため、1枚のブレードはボルト1本のみでブロックを固定していたことが判明した。

また、メーカーマニュアルによれば、ワッシャー並びにトルクレンチを用いて600Nmで締付けるべきところ、ワッシャーを付けず小型レンチで締付けていたことが判った。

4. 設計・施工結果の調査・確認

(1) 基礎設計の概要

風車基礎の設計にあたっては、まず地質調査結果等に基づき、基礎形状・寸法の設定を行ったのち、図4-1に示すとおり、①定格運転、カットアウト、暴風の風況条件等毎にナセル・ブレード・タワーなどの固定荷重、タワーへの風荷重、ブレードおよびナセルからタワーへ伝達される機械荷重（空力計算によるものでメーカーによる算定値、風荷重を含む）、地震時荷重等など風車からの伝達荷重に加え、基礎自重・埋戻し土重量等の作用荷重を算定した後、この作用荷重をもとに、②基礎体の地盤支持力、転倒、滑動の安定性照査並びに③鉄筋コンクリート構造としての構造計算を実施し、部材に発生する応力が許容応力度以内となるよう鉄筋量の算定を行っている。但し、アンカーボルト部の引抜きに対する検討は為されていない。

なお、基礎の設計は、事業者の責任で行うが、風車メーカーから供与された基礎配筋の参考図には、この引抜き力に対すると想定されるせん断補強筋が明示されている。

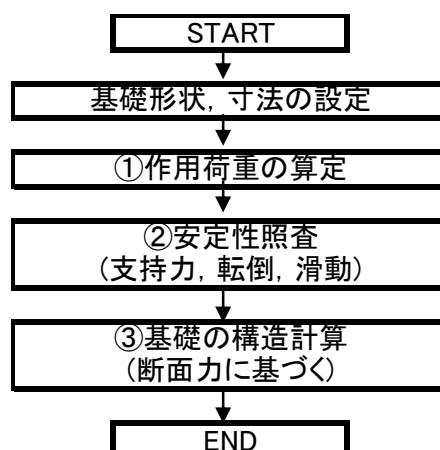


図4-1 基礎設計のフロー

(2) 施工結果の確認

11A 号基礎ペデスタルを対象に配筋工、型枠工、アンカーボルト設置工、コンクリート工、出来形寸法の調査を工事記録（試験成績表、工程内検査シート、記録写真等）並びに基礎損壊箇所における目視・スケール調査により実施した。その結果、前述したとおりコンクリートの芯かぶりが、40mm～130mm（設計値 100mm）であることを除き、設計図書との相違は認められなかった。

5. 倒壊原因の究明

(1) 方針

今回倒壊した風車の倒壊原因について、基礎の構造解析および風応答解析を行い、これらの結果から、解析的に原因を究明する。

解析では、倒壊した基礎の材料強度試験結果と実構造諸元を用いて構造解析を行い、基礎の実耐力を評価する。また、風車倒壊時の風況や風車の状態を模擬した風応答解析を行い、倒壊した基礎に事故当時どのような荷重が作用したかを考察する。

倒壊原因は、基礎の構造解析から得られる耐力と、風車の風応答解析から得られる作用荷重を比較して考察する。なお、解析は、原因の解明のために必要なケースについて複数行うこととする。

倒壊原因の解明の検討フローを図5-1に示す。

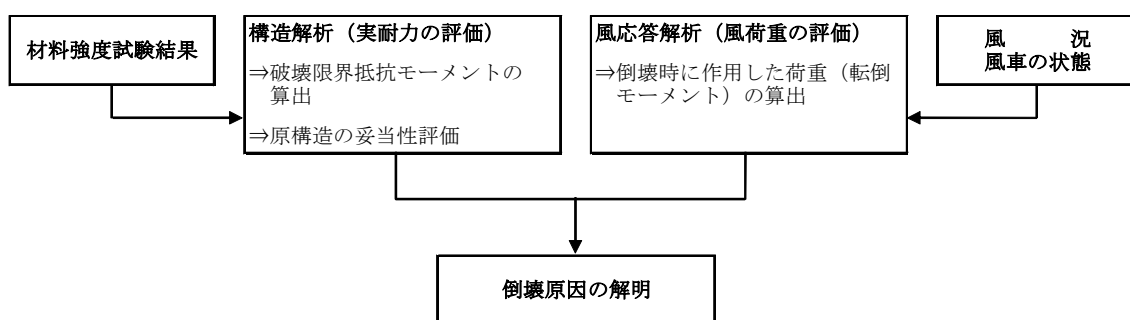


図5-1 検討フロー

(2) 基礎の材料強度試験

a. 試験の概要

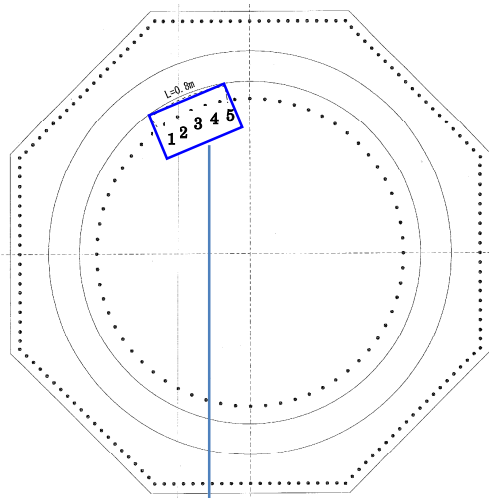
倒壊した風車基礎から、基礎コンクリートのコア抜き、鉄筋の切出しを行い、風車基礎の材料強度試験を実施した。これにより、基礎の材料強度が設計値を満足することを確認するとともに、材料強度試験結果を風車基礎の構造解析に用いて、解析の適正化を図る。

b. 材料試験片の採取と加工

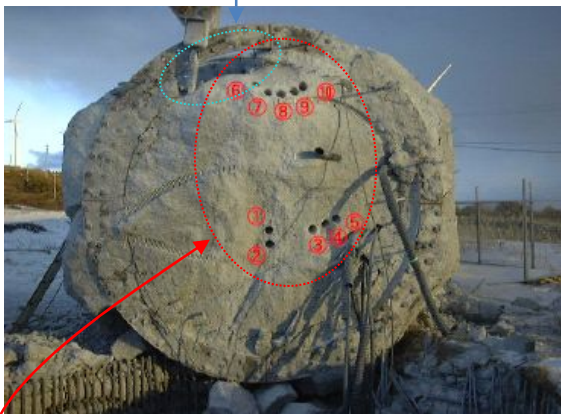
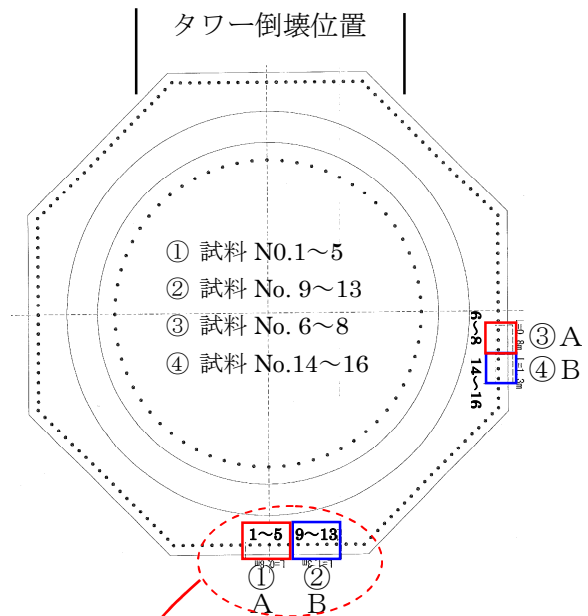
(a) 材料試験片の採取

平成19年1月24～25日に、倒壊した風車基礎ペDESTAL部からコンクリートおよび鉄筋の試験片の採取を行った。採取状況および試験状況については、図5-2に示す。

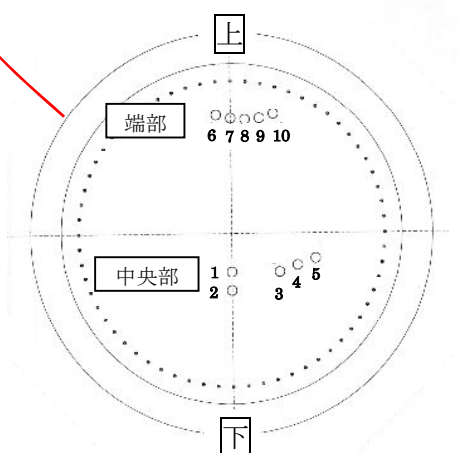
内周主鉄筋 D19 の採取位置



外周主鉄筋 D29 の採取位置



コンクリートコアの採取位置



外周主鉄筋 D29 の採取位置（高さ）

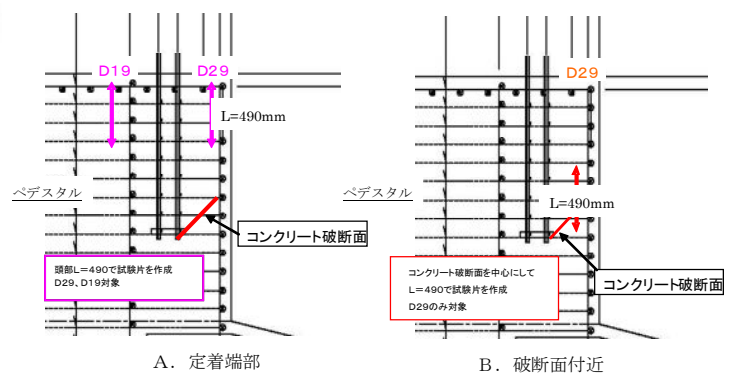


図5-2 材料強度試験片の採取状況

①コンクリート

コンクリートについては，倒壊した風車ペデスタル底部の上部側（倒壊方向から時計回りに 180° 位置の風車基礎端部）および中央部から，コンクリートコアをそれぞれ 5 試料（ $\phi 100\text{mm} \times H300\text{mm}$ ），採取した。

②鉄筋

外周主鉄筋 D29 については，風車倒壊方向から時計回りに 90° 位置でコンクリートの一部をハツリ切出した試験片（破断部）と，破断面より上側から切出した試験片（定着端部）をそれぞれ 3 試料採取し，時計回りに 180° 位置で破断部から 5 試料，定着部から 3 試料採取した。

ここで，破断部から試験片を採取したのは，この部分で鉄筋が倒壊に際して降伏強度を超えたか否かを確認するためである。

また，内周主鉄筋 D19 については，風車倒壊方向から 180° 位置からコンクリートをハツリ切出した試験片（定着端部）から 5 試料採取した。D19 は倒壊時に破断しているため，破断面近くは塑性硬化していると考えられることから，鉄筋の降伏強度が正しく求められるように，コンクリートを深くハツリ，鉄筋を採取した。

(b)材料試験片の加工

試験試料片は，(財)建材試験センターにおいて，強度試験に適合した試験片に加工した。

①コンクリート

「JIS Z 1132」に準拠して直径 100mm，高さ 200mm の供試体に加工するため，端部をコンクリートカッターで切断した後，端面を研磨機で平滑に仕上げた。

②鉄筋

「JIS Z 2201」に準拠して長さ 50cm（直径の 10 倍以上）に切断した。

なお，外周主鉄筋 D29 については，鉄筋が降伏しているか否かを確認するため試験片にひずみゲージを等間隔に複数貼付け，ひずみの計測も行った。

c. 材料試験の実施

(a)コンクリート圧縮強度試験(JIS A 1108)

2000kN 圧縮試験機(前川式油圧堅型 ACA-200A)を用いてコンクリートの圧縮試験を実施し，コンクリートの圧縮強度を求めた。

(b)鉄筋引張試験(JIS Z 2241)

1000kN 万能試験機(前川 MR 式油圧堅型 MR-100-ACT)を用いて，鉄筋の降伏点，引張強さ，伸び，応力～ひずみ関係を求めた。

d. 材料試験結果

(a)コンクリート

倒壊した風車基礎から採取したコンクリートの圧縮強度試験結果を表5-1に示す。

設計基準強度 24N/mm^2 に対して、コンクリートの平均圧縮強度は、中央部で 35N/mm^2 程度、端部で 48N/mm^2 程度で、全体の平均は 41N/mm^2 程度となっている。実際の強度が設計基準強度よりも大きいのは、実強度が設計基準強度を 5%以上の確率で下回らないようにコンクリートの配合を決めているためである。

表5-1 コンクリートの圧縮強度試験結果

| 採取位置 | No. | 圧縮強度 (N/mm^2) | 平均 (N/mm^2) |
|------|-----|-----------------------------|---------------------------|
| 中央部 | 1 | 30.8 | 34.9 |
| | 3 | 34.1 | |
| | 4 | 39.7 | |
| 端部 | 6 | 48.1 | 48.3 |
| | 7 | 47.0 | |
| | 8 | 49.9 | |
| 全平均 | | | 41.6 |
| 設計強度 | | | 24.0 |

(b)鉄筋

倒壊した風車基礎から採取した外周主鉄筋 D29 および内周主鉄筋 D19 の引張試験結果を表5-2に示す。また、図5-3に外周主鉄筋 D29 の応力～ひずみ関係を示す。

表5-2 外周主鉄筋 D29・内周主鉄筋 D19 の引張試験結果

| 公称直径 | 採取位置 | No. | 降伏点 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 伸び (%) | 備考 |
|-----------------|--------|-----|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|
| D29 | ① A | 2 | 423 | 601 | 20 | 風車倒壊方向から180° |
| | | 4 | 423 | 602 | 21 | |
| | | 5 | 425 | 601 | 23 | |
| | | 平均 | 424 | 601 | 21 | |
| | ② B | 9 | 422 | 601 | 23 | 風車倒壊方向から180° 破断面付近 |
| | | 10 | 422 | 599 | 21 | |
| | | 11 | 427 | 606 | 21 | |
| | | 平均 | 424 | 602 | 22 | |
| | ③ A | 6 | 423 | 602 | 22 | 風車倒壊方向から90° |
| | | 7 | 413 | 593 | 21 | |
| | | 8 | 425 | 607 | 22 | |
| | | 平均 | 420 | 601 | 22 | |
| | ④ B | 14 | 414 | 604 | 22 | 風車倒壊方向から90° 破断面付近 |
| | | 15 | 414 | 598 | 22 | |
| | | 16 | 423 | 604 | 22 | |
| | | 平均 | 417 | 602 | 22 | |
| 平均 | | | 421 | 602 | 22 | |
| D19 | | 1 | 387 | 556 | 25 | |
| | | 2 | 385 | 552 | 21 | |
| | | 4 | 396 | 558 | 27 | |
| | 平均 | | | 389 | 555 | |
| JIS G3112 SD345 | | | 345-440 | 490 以上 | 18 以上 | |

※添付資料5-1 参照

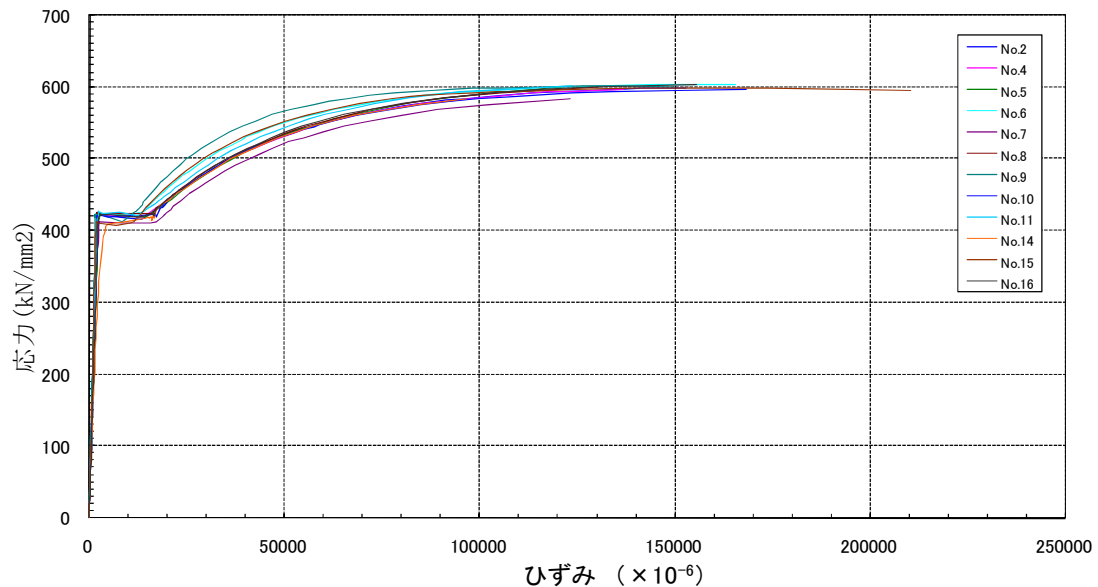


図5-3 外周主鉄筋 D29 の応力～ひずみ関係

e. 考察

(a)コンクリート

実際の強度は設計強度を上回っており，適正な強度のコンクリートが使用されている。

(b)鉄筋

外周主鉄筋 D29 および内周主鉄筋 D19 の何れも JIS 規格値を上回っており，適正な鉄筋が使用されている。外周主鉄筋 D29 の応力～ひずみは，試験片の曲がりなどによる影響と考えられるバラツキが認められるものの，破断部と定着端部で差異はなく，概ね同様な傾向を示している。破断部の鉄筋に降伏した形跡は認められない。

f. まとめ

倒壊した風車基礎から採取したコンクリートおよび鉄筋ともに，所定の強度があり，適正な材料が使用されていたと判断される。

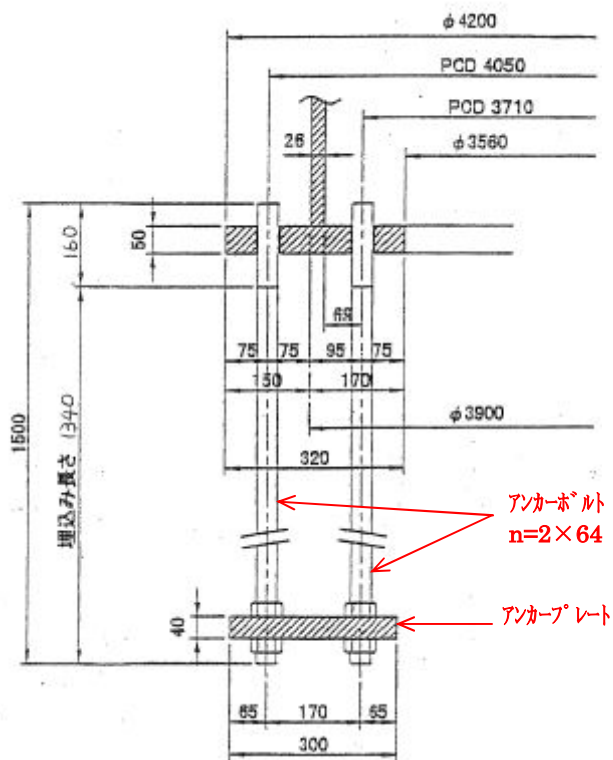
(3)倒壊風車基礎の構造解析

a. 解析手法

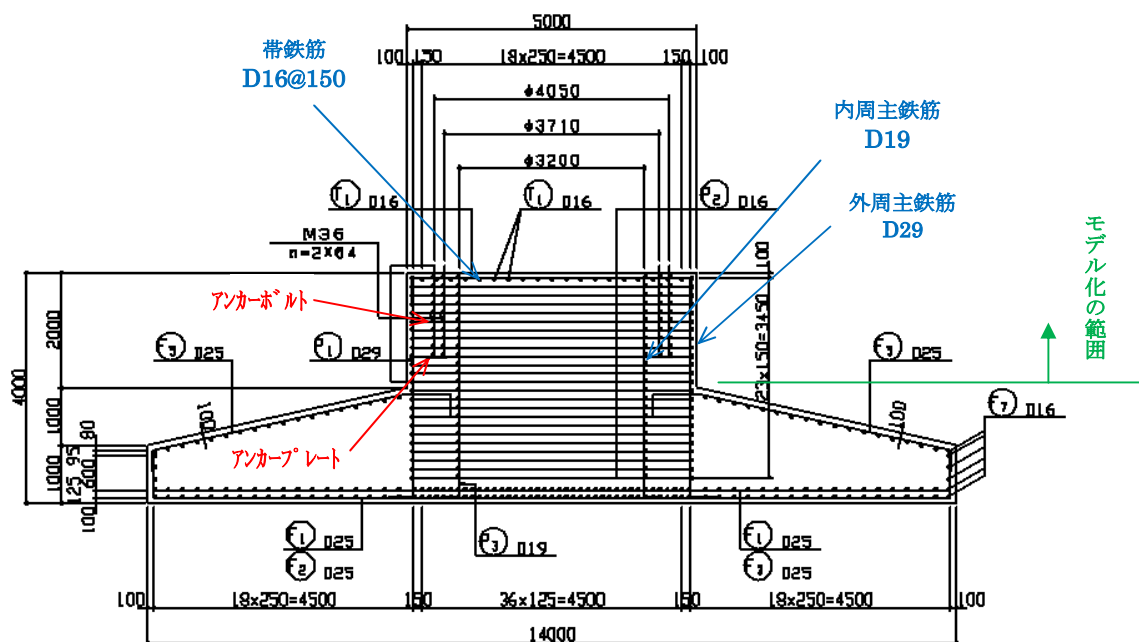
(a)解析対象

本解析の対象構造物は図2-2および図2-3に示す11A号風車である。風車基礎は，ペデスタル部において，アンカープレート付近でコーン状のせん断破壊面がみられたことから，構造解析にあたってはペデスタル部分に着目してモデル化した。

11A号風車基礎のペデスタル部分の配筋図を図5-4に示す。



(b) アンカーボルト詳細



(c) 側面

図5-4 11A号風車基礎ペデスタル部の配筋図

(b)解析手法の概要

構造解析には東京大学で開発された「多方向・非直交ひび割れ群を考慮した鉄筋コンクリート構造の3次元非線形解析コード (COM3)」を用いた。この解析コードは、鉄筋コンクリート構造のせん断耐力についても精度よく算定できることが確認されているコードであり、詳細は論文・著作物などに報告されている。既設構造物の耐震診断、事故調査、新設構造設計の照査に適用実績がある。

本解析に用いた解析手法の概要を表5-3に示す。

表5-3 解析手法の概要

| 項目 | 手法・内容 | 備考 |
|--------|----------------------|--------------------------------|
| 解析コード | COM3 | RC構造物の3次元非線形解析コード |
| 解析方法 | 3次元非線形解析 | |
| 解析領域 | 1/2対称モデル (ハーフモデル) | 構造物の対称性を考慮して、1/2モデル(ハーフモデル)とした |
| モデル化構造 | タワー、基礎(ペデスタル部のみ) | 倒壊状況を考慮して、基礎はペデスタル部のみモデル化した |

(c)解析モデル

転倒モーメントを耐力以後の軟化領域においても解析するために、ペデスタル(鉄筋、コンクリート、アンカーボルト、アンカープレート)とともに、タワーも一体としたモデル化としている。タワーおよびペデスタルのモデル化の概要を表5-4に、解析モデル図を図5-5～図5-7に示す。

モデル化にあたっては、鉄筋コンクリート部分はコンクリートと鉄筋の構成則を組合せた RC 要素でモデル化し、外周主鉄筋 D29 位置の RC 要素部分には帯鉄筋 D16 も考慮している。

また、内周タワーから基礎コンクリートに伝達される引抜き力がアンカーボルトを介して直接アンカープレートに伝達するように、アンカーボルトとコンクリートの付着を切るためにアンカーボルトを線材要素 (Line 要素) でモデル化した。ベースプレートと基礎コンクリートの接触面には境界接合要素 (Bond 要素) を配置し、圧縮時には直接コンクリートに支圧力が伝達し、引抜き時にはベースプレートと基礎コンクリートが離隔し、ベースプレートからの引張力が直接コンクリートに伝達しないモデルとしている。

解析モデルはその目的別に以下の3種類を作成した。

(解析モデル:C-1)破壊モードの再現や基礎の実耐力評価を行う基本モデル

設計図面とおりに構造諸元をモデル化したもの。外周主鉄筋 D29 の芯かぶりを

設計値 100mm とした。

(解析モデル:C-2)鉄筋かぶりが薄いことを考慮したモデル

鉄筋の芯かぶりを実測最小値 40mm としたモデル。外周主鉄筋 D29 の位置やペデスタルの諸元その他は C-1 と同じ。

(解析モデル:C-3)かぶりコンクリートが機能せず、外周主鉄筋 D29 が構造本体との一体性を失ったと仮定したモデル

設計図面とおりにモデル化したもの (C-1) に対して、外周主鉄筋 D29・帯鉄筋 D16 が機能しないと仮定したモデル。このモデルはかぶりが薄く、鉄筋とコンクリートが一体となって機能できない状況になったと仮定した場合のモデルである。

C-1 (基本モデル) と C-2 (鉄筋かぶりの薄いモデル) の解析結果を比較することにより、鉄筋のかぶり厚さの影響を、C-1 (基本モデル) と C-3 (外周主鉄筋 D29 が全く機能しないモデル) の解析結果を比較することにより、倒壊に際して外周主鉄筋が力学的に働いたか否かを考察することができる。

表5-4 モデル化の概要

| 構造 | | 要素種類 | モデル概要 |
|------|----------|---------|-----------------------|
| タワー部 | タワー | Solid要素 | バイリニアモデル |
| | ベースプレート | Solid要素 | バイリニアモデル |
| 接合部 | — | Bond要素 | 接合部の引張剥離を考慮したモデル |
| 基礎部 | 鉄筋コンクリート | RC要素 | コンクリートと鉄筋の構成則を組合せたモデル |
| | 無筋コンクリート | PC要素 | 引張軟化、せん断軟化を考慮したモデル |
| | アンカーボルト | Line要素 | バイリニアモデル |
| | アンカープレート | Solid要素 | バイリニアモデル |

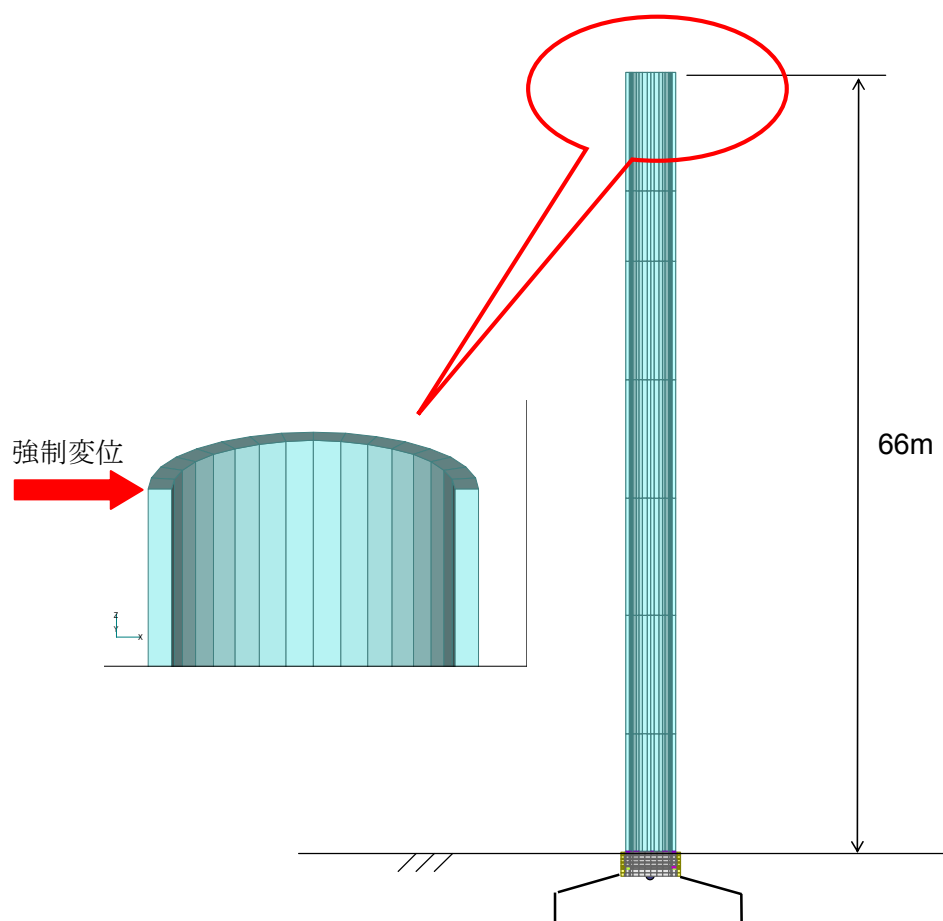


図5-5 解析モデル図(要素分割, タワー部)

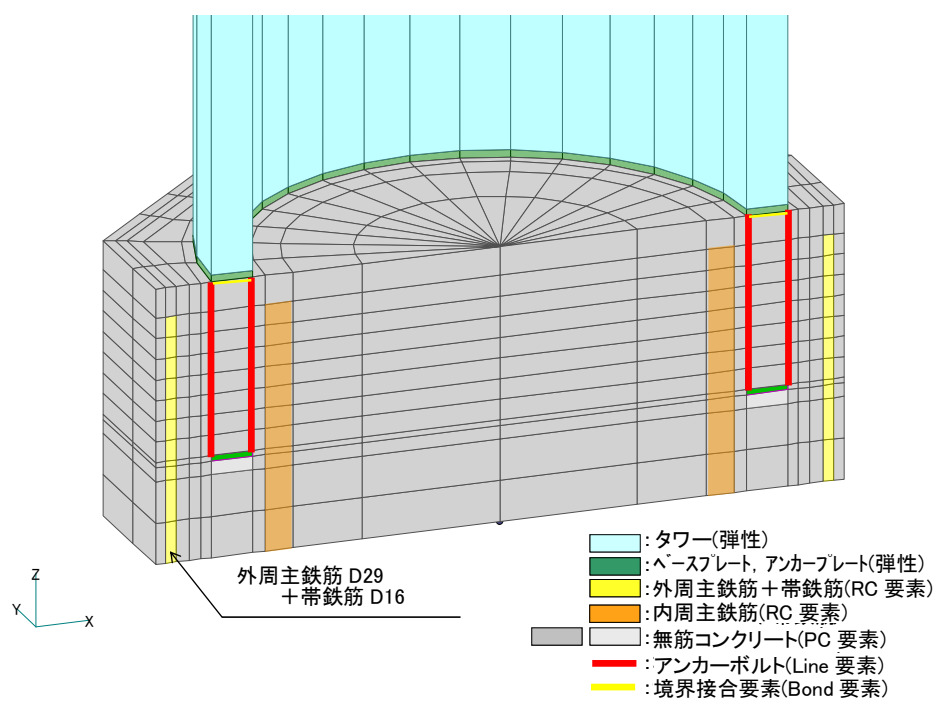


図5-6(1) 解析モデル図(C-1:かぶり 100mm, 要素分割, ペデスタル部)

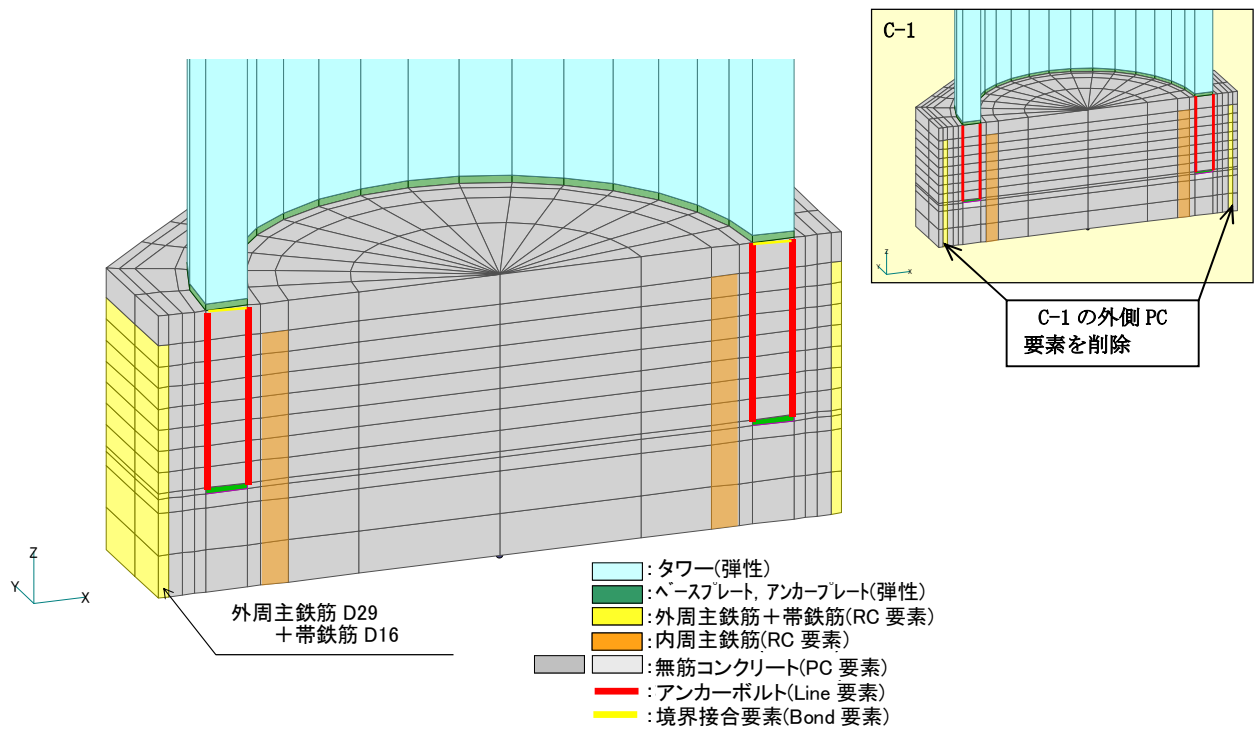


図5-6(2) 解析モデル図(C-2:かぶり 40mm, 要素分割, ペデスタル部)

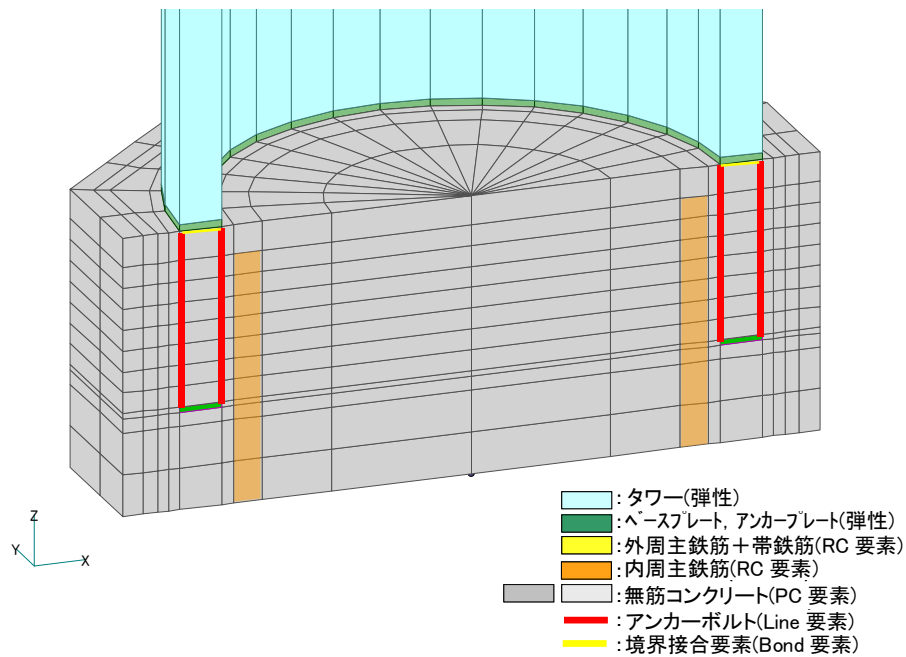


図5-6(3) 解析モデル図(C-3: D29+D16 なし, 要素分割, ペデスタル部)

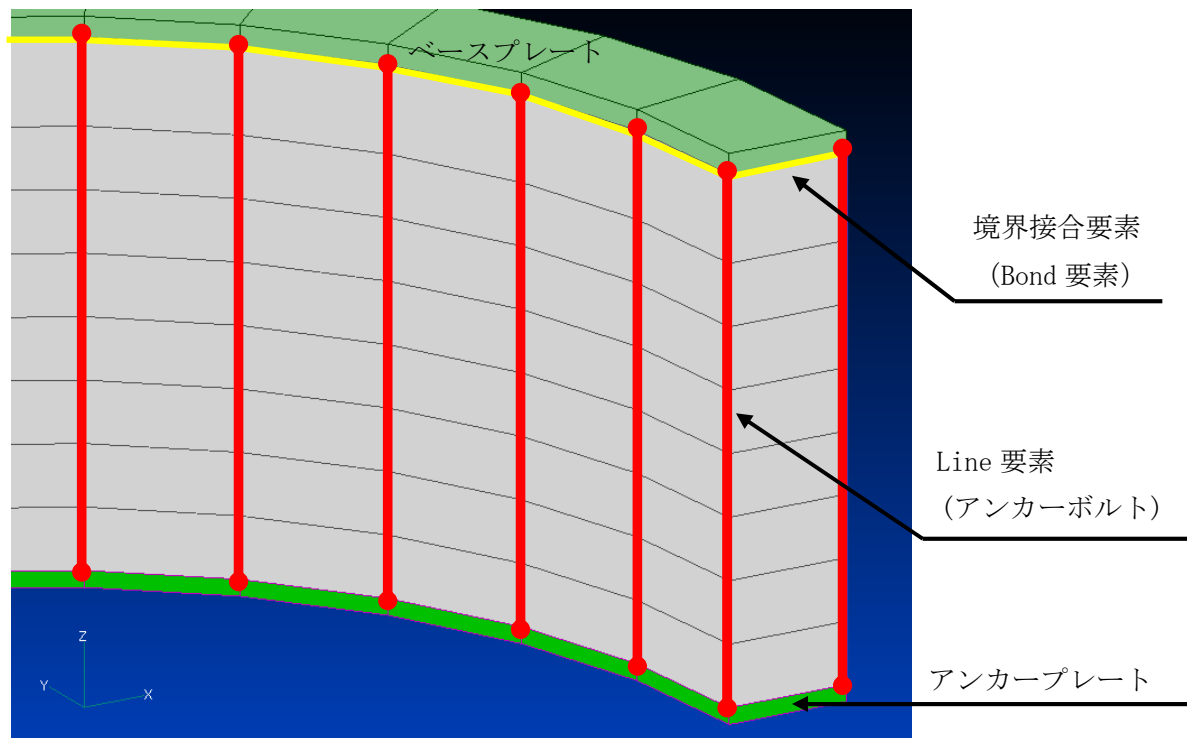


図5-7 解析モデル図(アンカーボルト詳細)

(d)解析条件

①入力物性値

本解析で用いた入力物性値を表5-5に示す。

コンクリートの圧縮強度については、材料強度試験結果から、端部と中央部で強度に差が認められたため、耐荷力を過大に算定しないように下限値を採用した。

外周主鉄筋 D29 の降伏強度は、採取位置などによるバラツキも殆ど認められないことから、採取位置毎の平均値の下限値を採用し、内周主鉄筋 D19 の降伏強度については、バラツキも殆ど認められなかったことから、平均値を採用した。一方、帯鉄筋 D16 の降伏強度については、今回材料強度試験を実施していないことから、建設当時のミルシートに示されている降伏強度の平均値を採用した。

なお、その他の材料については、表5-5に示す規格値を採用した。

②境界条件

本解析では、図5-8に示すとおり、境界条件として、モデル下端（ペデスタル下端）は固定境界、1/2 対称面は y 軸方向を拘束したローラ支承とした。

③荷重条件

本解析は、ナセル、ハブ、ブレードおよびタワーの自重を基礎ペデスタル部に載荷した後、タワーの頂部に水平方向に単調増加の強制変位（3mm/step）を与え

ることにより，タワーから基礎に変位制御で転倒モーメントを作用させている。

なお，解析は，作用する転倒モーメントが最大値となった後，数 step 計算して打ち切っている。

表5-5 入力物性値

(1)タワー

| | 材質 | 厚さ T(mm) | 弾性係数 $E_s(N/mm^2)$ | 降伏強度 $f_y(N/mm^2)$ | ポアソン比 ν |
|----------|-------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| タワー | SM520 | 26 | 200,000 | 355 | 0.30 |
| ベースプレート | SM520 | 50 | 200,000 | 335 | 0.30 |
| アンカープレート | SM520 | 40 | 200,000 | 335 | 0.30 |

(2)風車基礎(鉄筋, アンカーボルト)

| | 材質 | 径 mm | 弾性係数 N/mm^2 | 降伏強度 N/mm^2 | 有効断面積 mm^2 |
|---------|-------|---------|------------------|------------------|-----------------|
| 外側主鉄筋 | SD345 | 29 | 200,000 | 417 | 642.4 |
| 内側主鉄筋 | SD345 | 19 | 200,000 | 389 | 286.5 |
| 外側内側帯鉄筋 | SD345 | 16 | 200,000 | 399 | 198.6 |
| アンカーボルト | 8.8 | 36 | 200,000 | 900 | 816.7 |

(3)風車基礎(コンクリート)

| | 材質 | 圧縮強度 f_c | 引張強度 $f_t(N/mm^2)$ | 弾性係数 $E_c(N/mm^2)$ | ポアソン比 ν |
|----------|-----|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| ペDESTAL部 | 最小値 | 31 | 2.62 | 27,000 | 0.167 |

(注) 引張強度，弾性係数は，圧縮強度から設定。

(4)タワーと風車基礎との境界部(ボンド)

| | 圧縮強度 $f_c(N/mm^2)$ | 引張強度 $f_t(N/mm^2)$ | せん断弾性係数 $G(N/mm^2)$ | 引張弾性係数 $E_t(N/mm^2)$ |
|-----|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 最小値 | 31 | 0.5 | 10,700 | 0.01 |

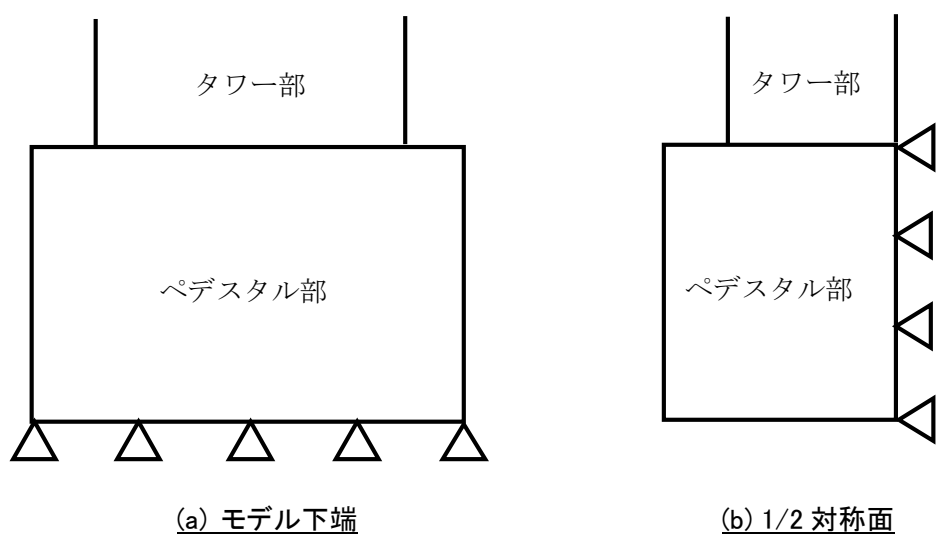


図5-8 境界条件

b. 解析結果

(a) 破壊限界抵抗モーメント

図5-9に、破壊限界抵抗モーメントと回転角の関係を示す。ここで、基礎の回転角は、外周部アンカーボルトの最大相対変位をその設置外径で除したものである（図参照）。

図には、C-1（基本モデル）、C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）、およびC-3（外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により機能しないと仮定したモデル）の 3 ケースを併記している。

(b) 変形図

図5-10に各 step の変形図を示す。変位は 200 倍に拡大して表示している。図5-10(1)が C-1（基本モデル）、図5-10(2)が C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）、図5-10(3)が C-3（外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により機能しないと仮定したモデル）の変形図である。

(c) 主ひずみコンター

図5-11に各 step の主ひずみ分布を示す。図5-11(1)が C-1（基本モデル）、図5-11(2)が C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）、図5-11(3)が C-3（外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により機能しないと仮定したモデル）の主ひずみである。

(d) 鉄筋ひずみ

図5-12に、C-1（基本モデル）と C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）の解析ケースについて、鉄筋（外周主鉄筋 D29 と内周主鉄筋 D19）のひずみの履歴を示す。

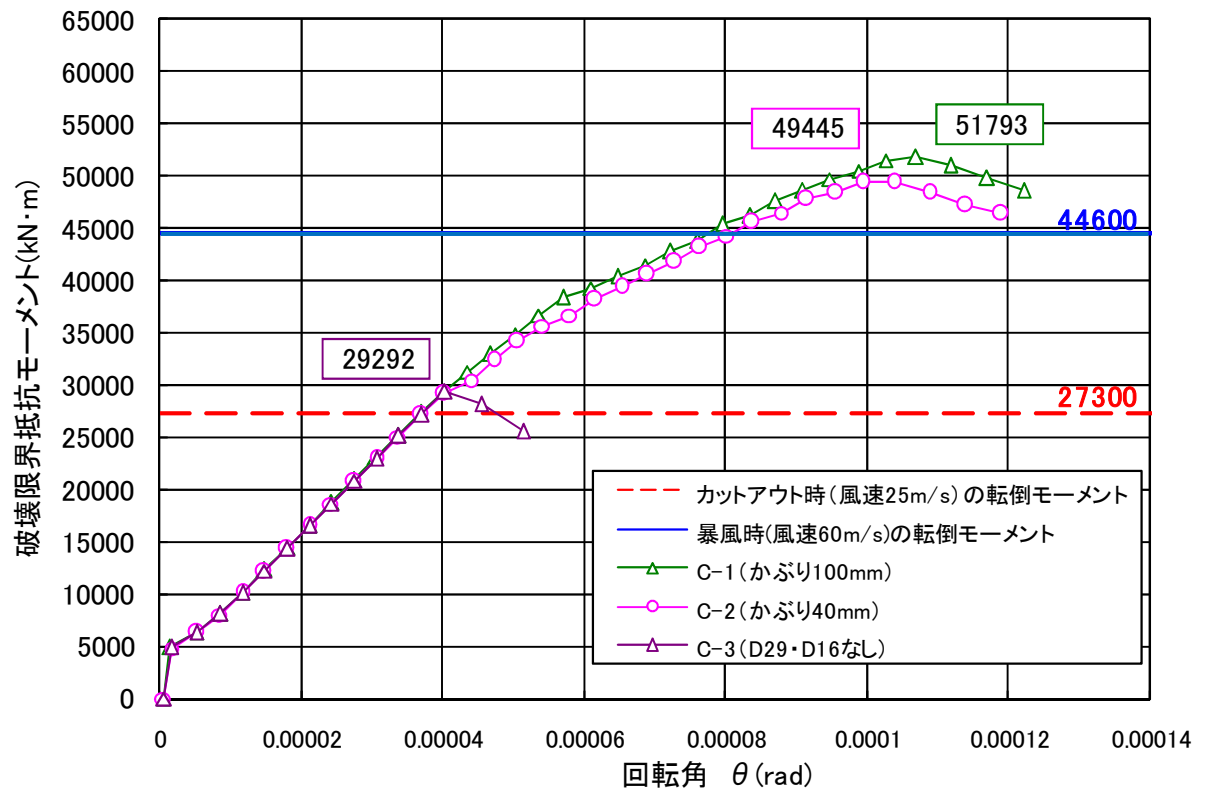
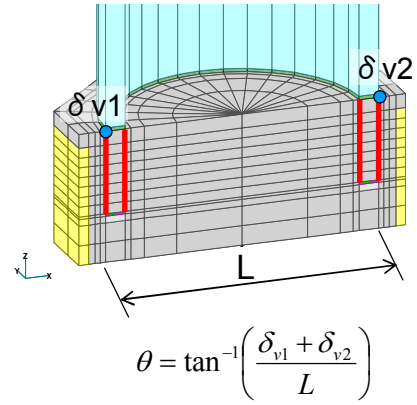
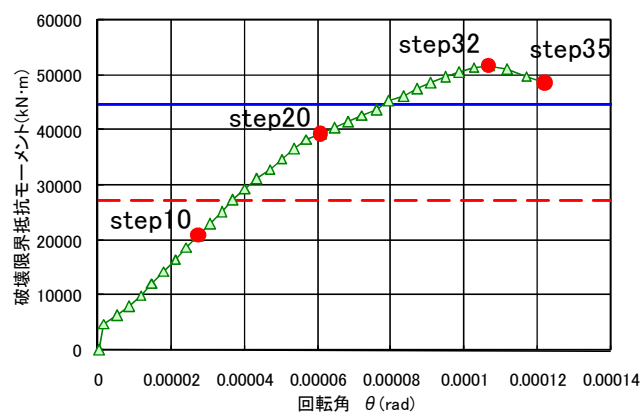


図5-9 破壊限界抵抗モーメント図



変位を 200 倍に
拡大して表示

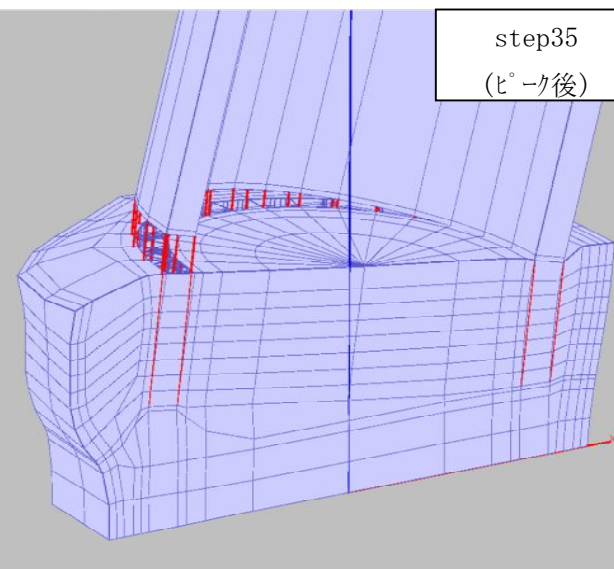
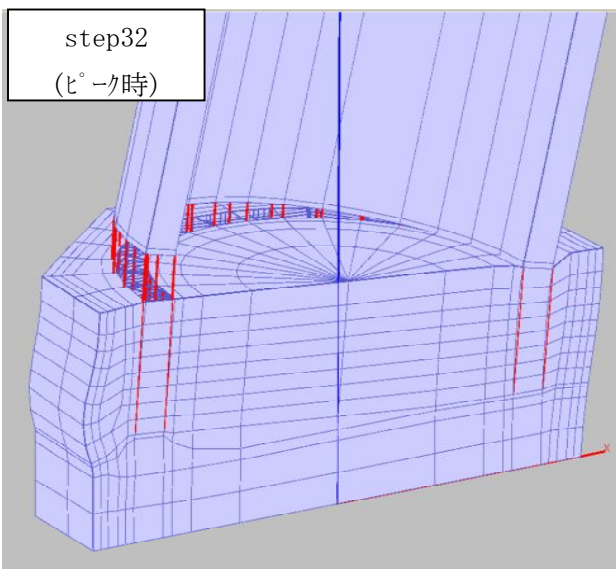
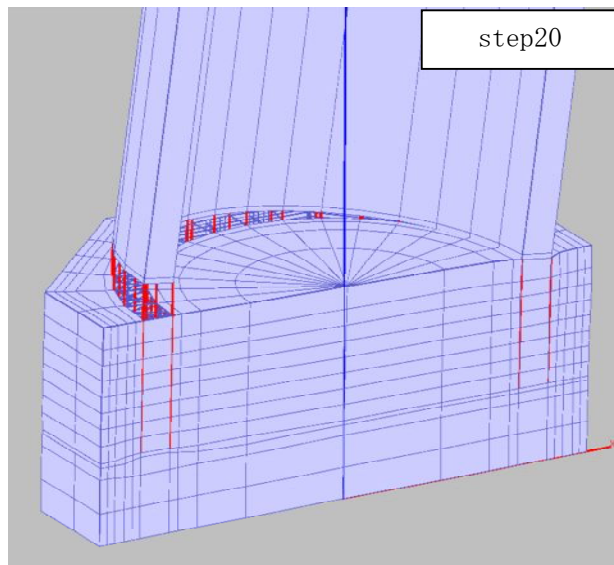
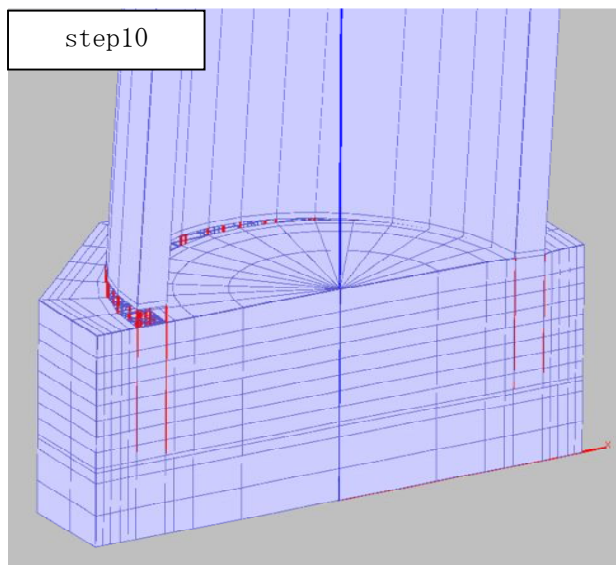
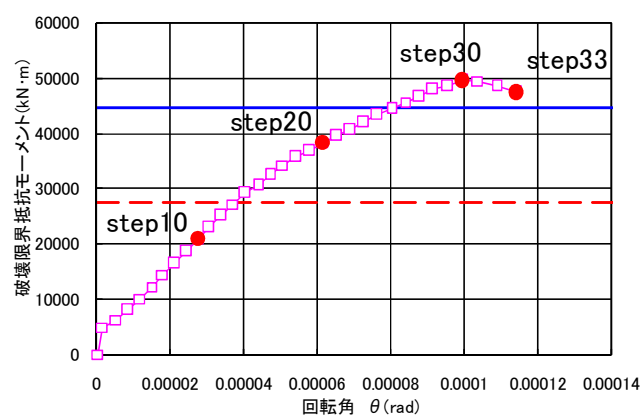


図5-10(1) 変形図(C-1:かぶり 100mm)



変位を 200 倍に
拡大して表示

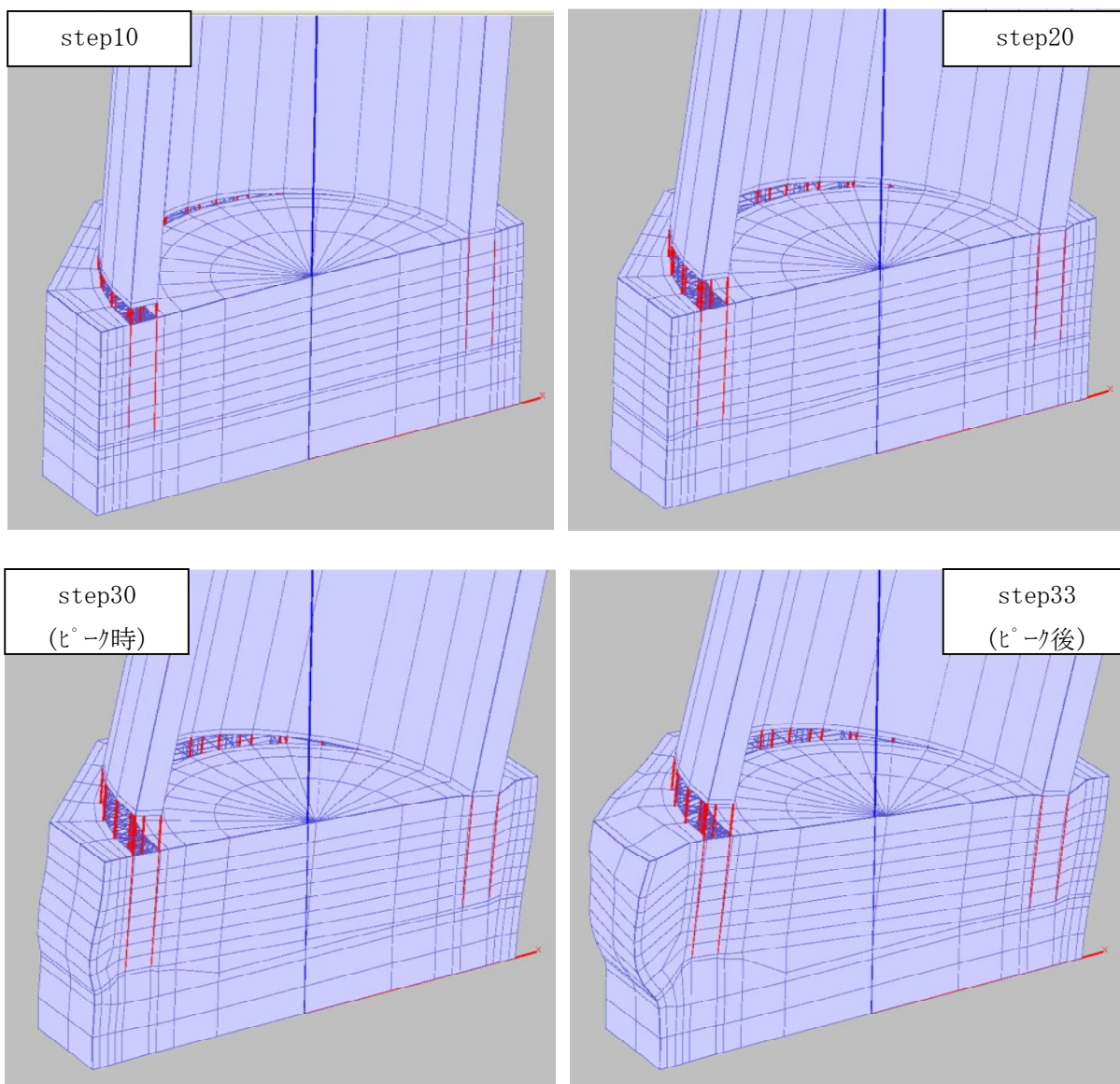


図5-10(2) 変形図(C-2:かぶり 40mm)

変位を 200 倍に
拡大して表示

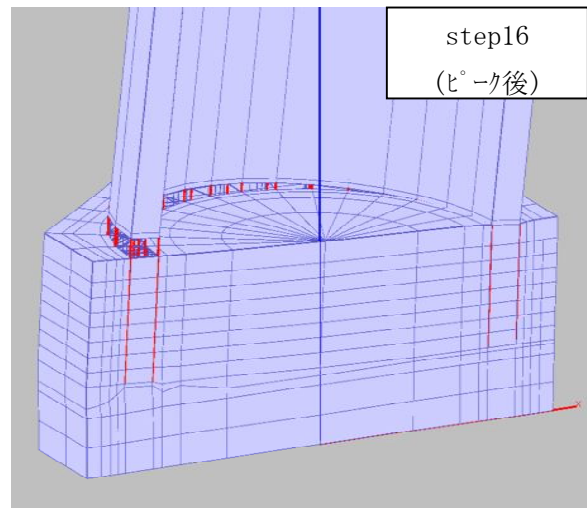
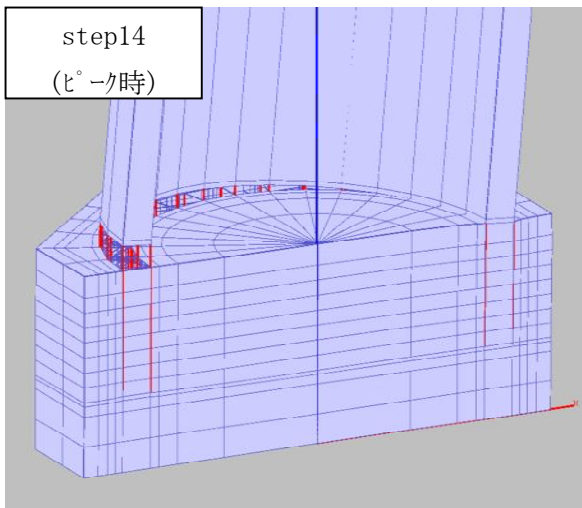
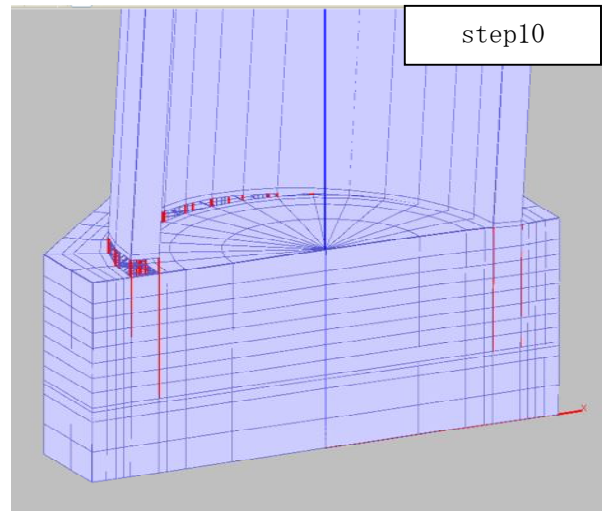
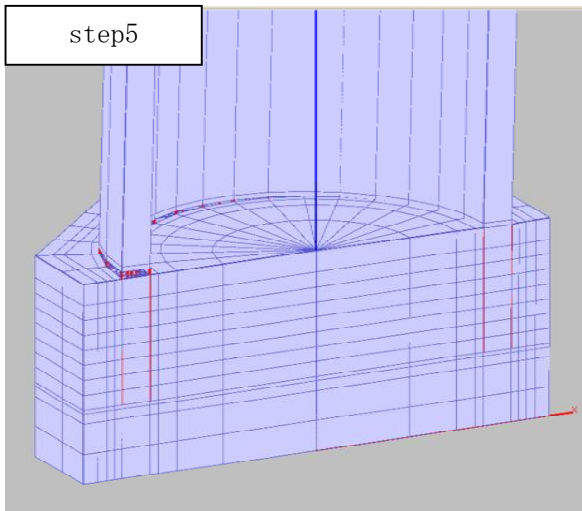
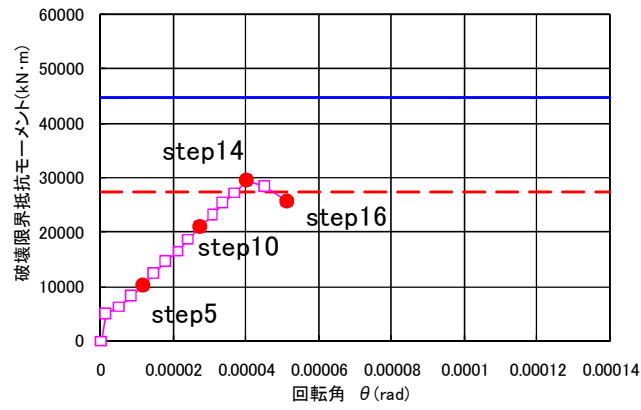
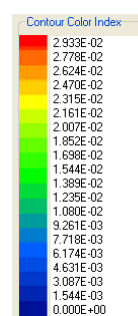
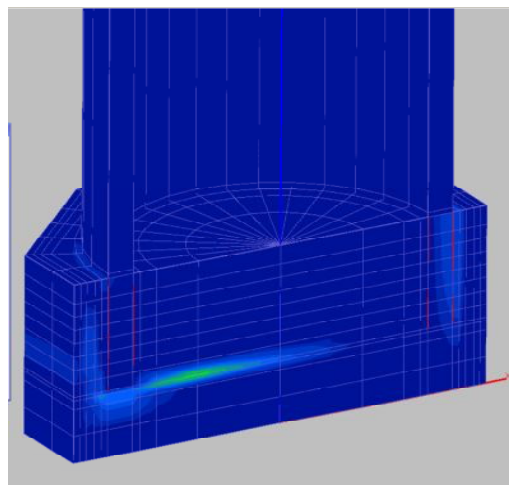
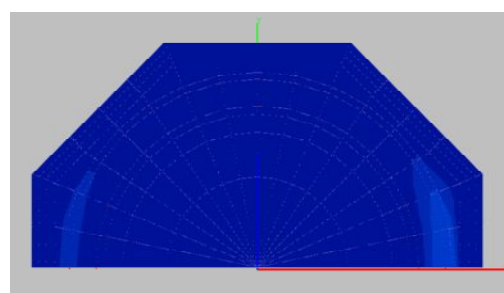


図5-10(3) 変形図(C-3:D29+D16なし)

step32
(ヒール時)

ペデスタル部天端



step35
(ヒール後)

ペデスタル部天端

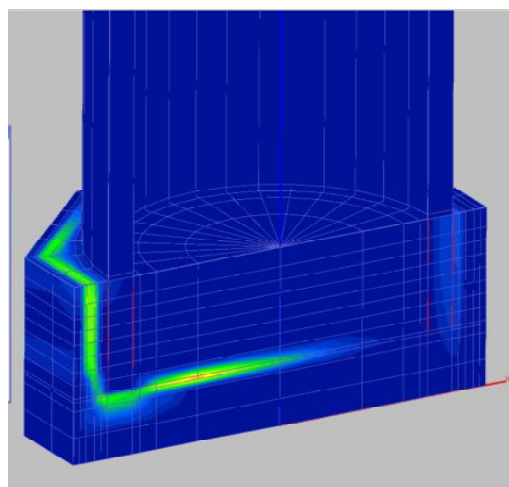
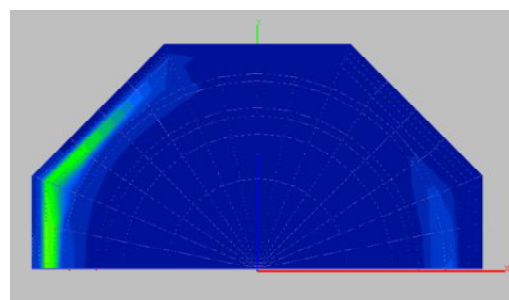
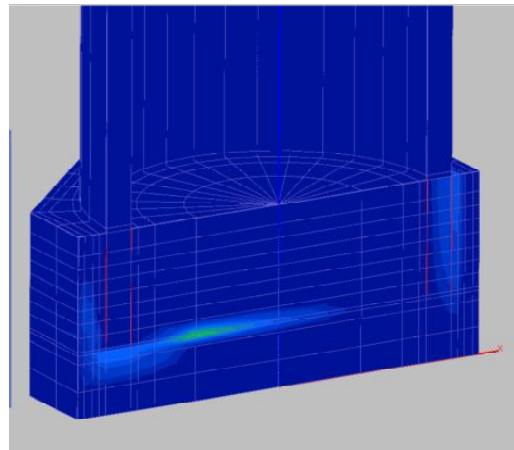
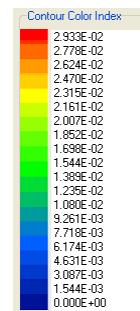
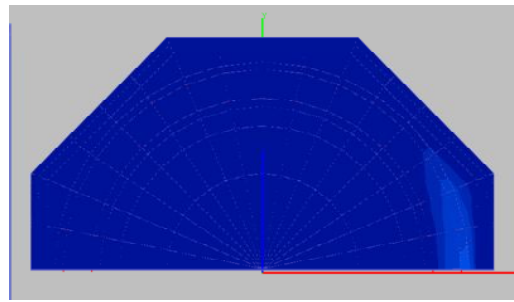


図5-11(1) 主ひずみコンター図(C-1:かぶり 100mm)

step30
(ヒーク時)

ペデスタル部天端



step33
(ヒーク後)

ペデスタル部天端

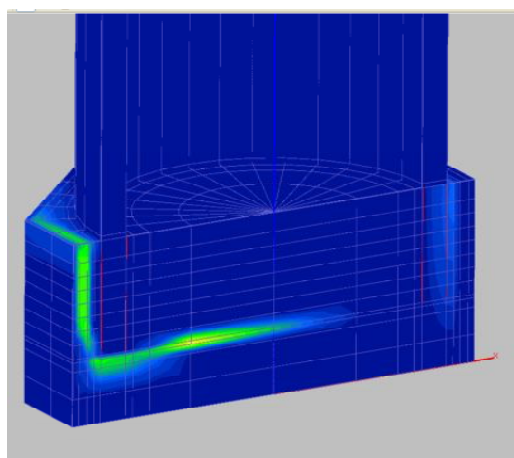
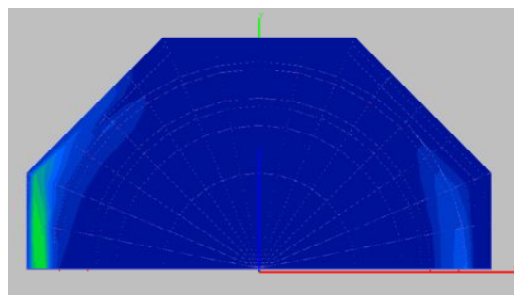
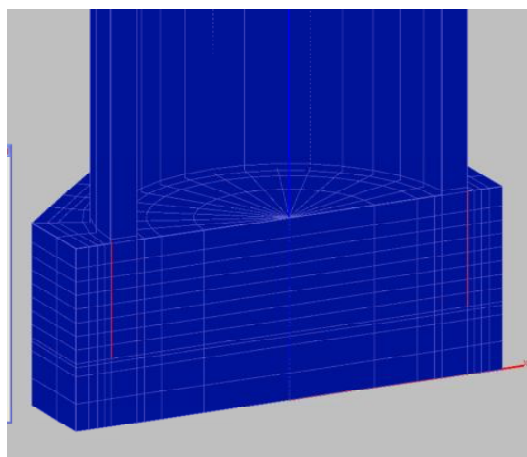


図5-11(2) 主ひずみコンター図(C-2:かぶり 40mm)

step14
(ヒーク時)



step16
(ヒーク後)

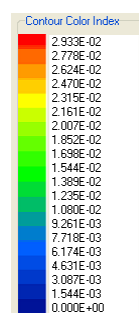
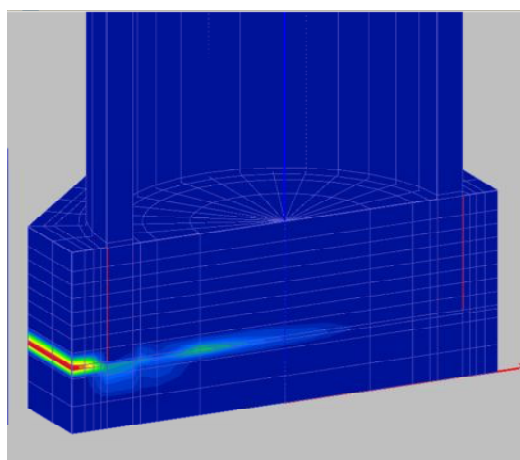


図5-11(3) 主ひずみコンター図(C-3:D29+D16 なし)

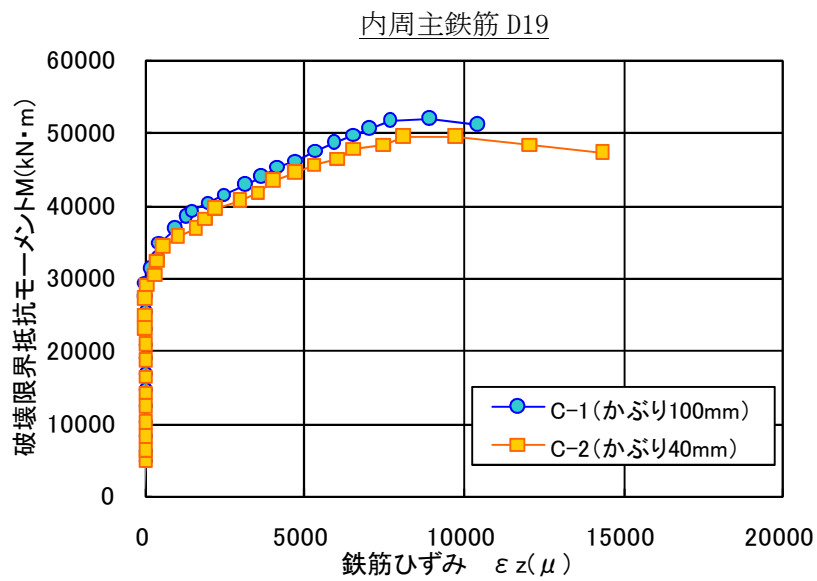
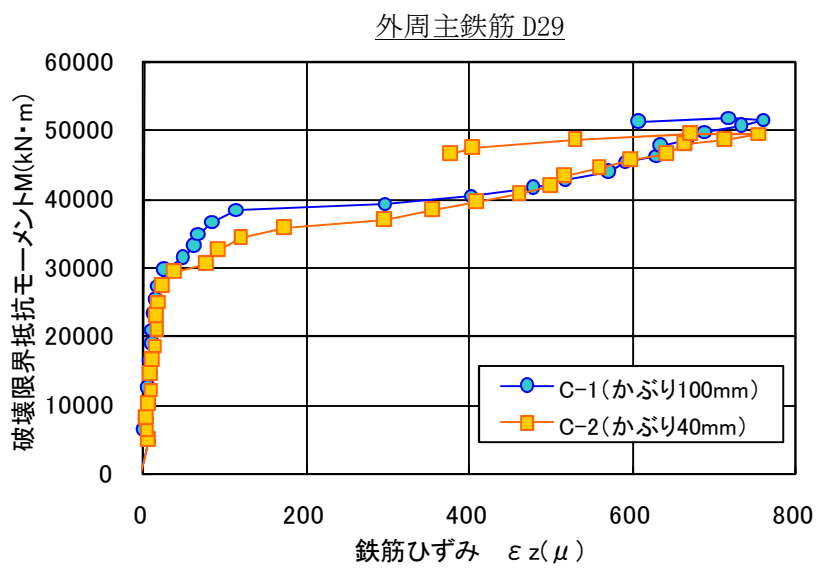
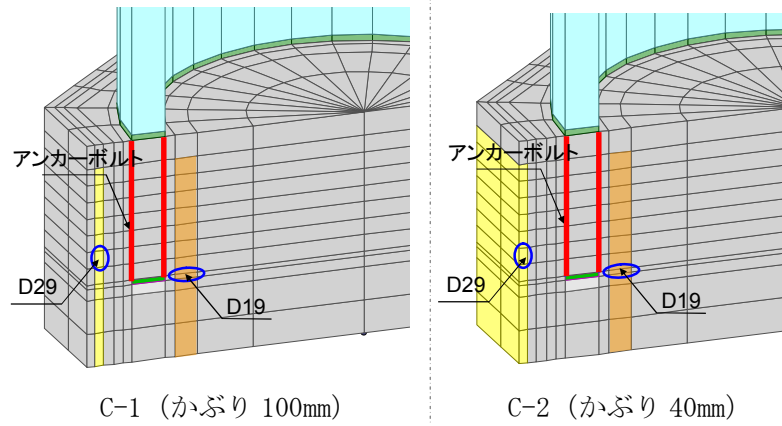


図5-12 鉄筋ひずみ(C-1, C-2)

c. 考察

今回実施した倒壊風車基礎の構造解析結果から、以下のことが明らかとなった。

(a) 基礎の耐力

- ・破壊限界抵抗モーメント～回転角の関係からその破壊限界抵抗モーメントを求めると、C-1（基本モデル）で 51,800kNm 程度、C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）で 49,400kNm 程度、C-3（外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により機能しないと仮定したモデル）で 29,300kNm 程度となっている。この破壊限界抵抗モーメントは各解析ケースの基礎の耐力に相当する。
- ・解析から得られる基礎の耐力は $C-1 \div C-2 > C-3$ の順で、機構的にみても自然な結果を与えている。
- ・C-2 の基礎耐力は C-1 の 95%程度と、C-1 と C-2 で殆ど差がないのに対し、C-3 の基礎の耐力は、C-1 の 56%程度と小さな値となっている。

(b) 破壊モード

- ・変形図および主ひずみ分布から読み取れる破壊モードは、C-1（基本モデル）と C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）では、引抜き力の増大に伴い、アンカープレート下端から凡そ 45° 方向上部外側に向かってコーン状にせん断破壊面が形成され、外周主鉄筋 D29 の界面に沿って破壊するものである。
- ・C-1 と C-2 の破壊モードは、風車の倒壊現場で観察された破壊形態と良く似ている。
- ・C-3（外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により機能しないと仮定したモデル）では、引抜き力の増大に伴い、アンカープレート直下のコンクリート要素を起点に水平方向に破断面が形成され、その面に沿って破壊するものである。
- ・C-3 の破壊モードは、風車の倒壊現場で観察された破壊形態と大きく異なる。

(c) 鉄筋のひずみ

- ・鉄筋ひずみの履歴から、外周主鉄筋 D29 の最大ひずみは 800μ 程度であり、鉄筋は降伏するに至っていない。このことは、外周主鉄筋 D29 の材料強度試験結果において、鉄筋は凡そ $2,000\mu$ 程度（図5-3参照）で降伏すること、破断部の鉄筋に降伏した形跡が認められなかったこととも符合する。
- ・内周主鉄筋 D19 の最大ひずみは $5,000\mu$ を越えており、鉄筋は降伏している。
- ・このような鉄筋ひずみの履歴は、C-1（基本モデル）と C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）で違いはない。

d. まとめ

- C-1（基本モデル）もしくは C-2（鉄筋かぶりの薄いモデル）の解析結果から、かぶりコンクリートの寸法差は殆どペデスタル部の転倒モーメントに対する基礎の耐力に影響しないと考えられる。
- 外周主鉄筋 D29 がかぶり不良により、力学的に全く機能しなかった（C-3）とすると、実際の破壊モードと大きく異なることから、アンカープレートから進展したと想定される斜めせん断ひび割れが外周主鉄筋 D29 に到達するまでは、外周主鉄筋 D29 は構造的に機能（すなわち、斜めひび割れを誘導し、コンクリート部に斜めせん断圧縮力を形成するに足る剛性をコンクリート外周部に付与）したものと考えられる。
- 基礎の材料強度試験結果からも明らかなとおり、外周主鉄筋 D29 は降伏強度までは機能しなかったが、斜めひび割れが形成されたことから、外周主鉄筋 D29 とアンカープレートにはさまれるコンクリートに斜めせん断圧縮力が形成されたことは明らかである。少なくともアンカープレートからの斜めせん断ひび割れが外周主鉄筋 D29 に到達するまでは、定着せん断力に抵抗したと考えられる。
- 風車基礎の原設計では、アンカーボルト部の引抜きに対する検討は為されていないものの、材料強度試験結果（コンクリート、外周主鉄筋 D29、内周主鉄筋 D19）などを用いた基礎の破壊限界抵抗モーメントは 49,400kNm（C-2）であったことから、原基礎構造は、設計で考慮した最大転倒モーメント（暴風時、風速 60m/s）44,600kNm と同程度の耐力を確保できていたと考えられる。

(4) 風応答解析で考慮すべき諸条件について

風応答解析においては、風車過回転時に作用する転倒モーメントや風車状況を推定することを目的とするが、解析に使用するための諸条件は、過回転時のピッチ角度、ロータ回転数等、記録されたデータで確認ができない状況にあるものが多い。

すでに記述しているが、解析に先立ち、本解析内で考慮すべき諸条件および状況を以下のとおり再度整理した。

a. 風況および風車の姿勢

解析に用いる風況および風車の姿勢については、極力、実測されたデータを使用することとした。

11A号風車においては、1月8日21時36分42秒が最終データである。

風車最終取得データにおける風速は、最大瞬間風速25.8m/s、10分平均風速19.3m/sであることが、また、風向290°、ナセル方向309°であることがわかっていることから、過回転発生前の風況については、11A号風車の実測データを採用することとした。

一方、倒壊事故発生時刻と推定している21時51分（正確には、配電線事故時刻、21時51分46秒）を含む過回転時の風況については、11A号風車データにおいては確認できないため、風況観測塔データを採用することとした。21時51分を含む21時46分から21時56分までの風車過回転時の風況観測塔データは、最大瞬間風速21.7m/s、10分平均風速18.5m/s、乱れ強度7.24%、風向293°、ナセル方向309°である。

b. ロータ回転数

11A号風車最終取得データ(1月8日21時36分42秒)におけるロータ回転数は3.5rpmである。

また、アラームログによれば、21時47分52秒に23rpmを記録し、その26秒後の21時48分18秒に38rpmを記録している。

23rpmを記録してから3分54秒後(234秒後)の21時51分46秒に倒壊時刻としている東北電力配電線事故が発生している。

c. ピッチ角度

1月8日1時16分42秒以降、各ピッチ角度に変化が見られる。角度変化量は、最大で、0.043°/s(Aブレード：5時56分42秒～6時16分42秒)である。

角度変化は、1月8日7時6分42秒までには終了し、その後、21時36分42秒の最終取得データまで、A、BおよびC各ブレードのピッチ角度は、それぞれ、3°、-80°および9°となっている。21時36分42秒以降の各ピッチ角度データは無く、各ブレードの動きについては、確認できない。

d. 風車諸元

解析対象となる風車の諸元は以下のとおりである。

なお、前述のとおり、11A号風車は、1月4日に発電機の層間短絡が発生したため、系統からは切り離されており、ロータ回転に対する電氣的な負荷は全く掛かっていない状況であった。

【基本諸元】

風 車 : デンマーク ボーナス社 (現 独シーメンス)

種 類 : プロペラ型 アップウィンド式

出 力 : 1,300/250kW (極数切換方式)

回転数 : 19/13rpm

ロータ : 直径 62m, ブレード 3 枚

調速機の種類 : ブレードピッチ角制御 (油圧)

ロータ取付位置 : 地上 68m

支持物 : 鉄塔

ブレード質量 : 17,900kg/3 ブレード

固有振動数 : 0.41Hz

平成 14 年 12 月, 実測データ

(株)東京測振 速度計 VES-15D および同接続用振動計 SPC-35N にて測定

(5) 倒壊風車の風応答解析

a. 解析の進め方

解析の進め方を図5-13に示す。

まず、1月8日21時36分までの過回転発生前のブレードピッチ角度の状況と風況にて解析を行い、同条件下では、風車は過回転には至らないことを、解析結果においても確認した。

さらに、過回転時における風車ロータ回転数と作用する転倒モーメントを調査するため、動きの確認できていないBブレードのピッチ角度をパラメータとして、ピッチ角度と回転数の関係を調べた。この解析結果により、実測されたロータ回転数に対応するBブレードのピッチ角度を確認するとともに、風車タワー基部に基礎耐力を超える転倒モーメントが作用する可能性のある、ピッチ角度およびロータ回転数を確認した。

最後に、Bブレードのピッチ角度に変化を与えながら、風車倒壊状況の推定を行った。



図5-13 解析の進め方

b. 解析手法

(a) 解析対象

本解析の対象構造物は、図2-2に示した11A号風車である。タワー、ナセル、ハブおよびブレード部をモデル化し、解析を行った。

(b) 解析の概要

本風応答解析においては、ガラードハッサンアンドパートナーズリミテッドの「BLADED」を適用した。「BLADED」は、昭和59年から研究コードの開発が始まり、昭和60年には空力弾性モデルを採用した。平成8年に販売を開始し、平成16年時点で世界中に100ライセンスが販売されている。ガラードハッサンアンドパートナーズリミテッドは、「BLADED」にて多くの実証確認を行っており、また、現在風車設計の標準コードでもあり、国際認証機関GL-Windのプログラム型式認証を取得している。

「BLADED」による風応答解析は、①入力データの作成、②応答解析、③計算結果の分

析の3つのステップに分けられる。入力データの作成では、風車（ブレード、ナセル、タワー）の形状と構造データ、風車の空力性能データ、風況データ、制御条件（発電機、ピッチ制御）等解析に必要なデータを決定する。応答解析では風車の姿勢（ブレードのピッチ角度または時間変化量）を設定し、時刻歴解析により風車の動き（ロータ回転数等）及び風車の各部位に作用する風荷重（モーメント等）の時間変化を求める。計算結果の分析では応答解析結果からロータの回転数の平均値や風車に作用する最大風荷重を求める。「BLADED」の概要を表5-6に示す。

表5-6 GH BLADED の概要

| 要素 | 説明 |
|--------|------------------|
| 自然風の再現 | Von Karma model |
| 空気力の評価 | 翼素理論、各諸補正モデル |
| 構造の表現 | モードの組み合わせ |
| 数値積分 | 時間領域、直接積分 |
| 時間間隔 | 自動、可変 |
| 応答解析 | ロータとタワーとの連成振動の考慮 |

本解析では風車の諸元及び風況（風速、風向、最大瞬間風速、乱れ強度等）データは実測値を用い、発電機は解列状態に設定した。また応答解析に必要な風車の姿勢（ブレードのピッチ角度または時間変化量）は、実測値が得られた場合には、実測値に基づき設定し、実測値が得られていない場合には、実測値から推定された範囲内に設定した。応答解析から得られたロータ回転数及び風車タワー基部に作用する最大転倒モーメントをロータ回転数の実測値及び基礎の構造解析から得られた実耐力と比較することにより、過回転発生後の風車の姿勢及び風車倒壊メカニズムを明らかにする。

(c) 解析用風車モデル

各コンポーネントを分割し、解析用風車モデルを作成した。要素分割方法および分割数を図5-14に示す。

作成した解析モデルにおける固有値解析の結果、タワーの固有振動数は 0.41Hz と算出された。この値は、実測から得られたタワーの振動数 0.41Hz とよく符合し、モデルの妥当性が確認された。

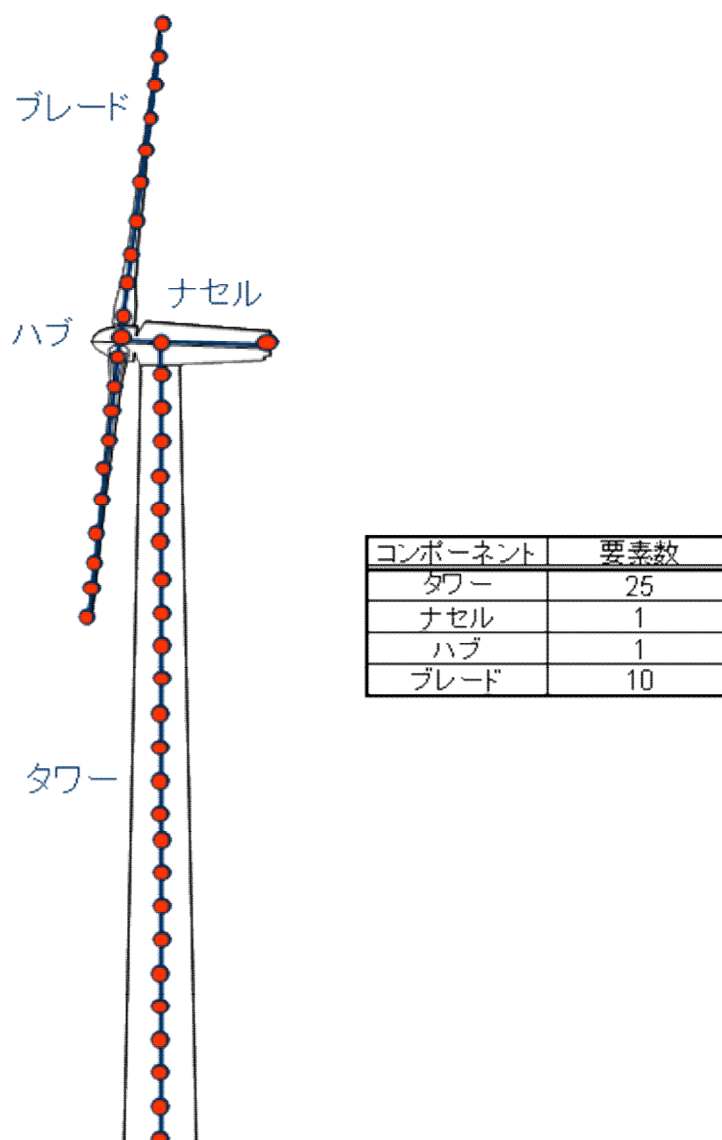


図5-14 要素分割数

(d) 空気力係数

解析用風車モデルに対しては、タワー、ナセルに作用する空気力としては抗力を、ブレードに作用する空気力としては、抗力および揚力を考慮して解析を行った。

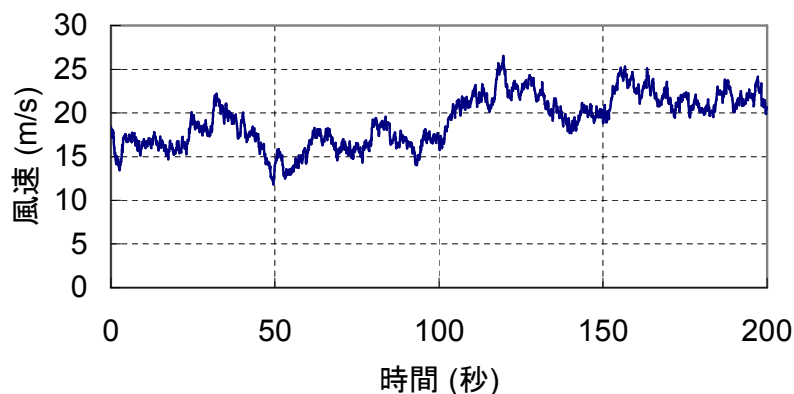
(e) 各解析ケースと自然風の作成

1月8日21時36分までの過回転発生前のケース(解析ケース1)と倒壊事故発生時刻と推定している21時51分を含む過回転時のケース(解析ケース2および3)、計3ケースについて解析を行った。

解析ケース1において過回転発生前の各ブレードピッチ角度におけるロータ回転数の確認、解析ケース2においては過回転時のBブレードのピッチ角度(角度一定)とロータ回転数および作用荷重の関係把握、解析ケース3においては、Bブレードのピッチ角度へ時間変化量を与えて風車倒壊状況の推定を行った。

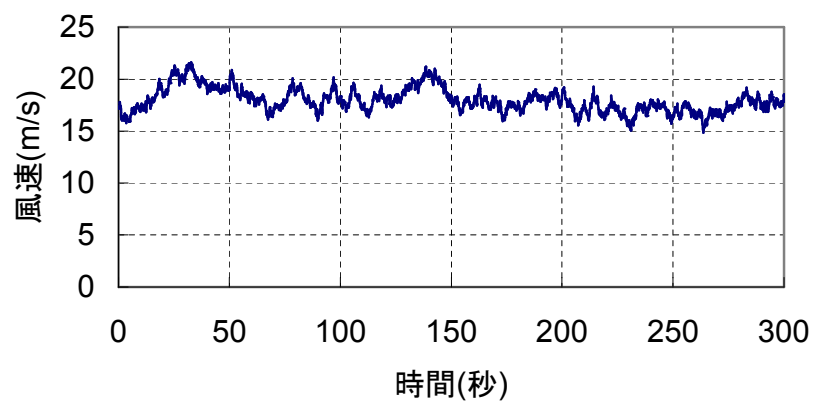
過回転発生前のロータ回転数確認用の自然風(解析ケース1)は、11A号風車の実測データ(平均風速19.3m/s、最大瞬間風速25.8m/s)を目標に作成し、その結果、平均風速19.3m/s、最大瞬間風速26.1m/sとなった。

過回転時のBブレードのピッチ角度とロータ回転数および作用荷重の関係把握用(解析ケース2)、風車倒壊状況の推定用(解析ケース3)の自然風は、風況観測塔データ(21時46分～56分データ)から実測された平均風速と乱れ強度に基づき作成した。作成した各自然風を図5-15に示す。



| | |
|--------------|------|
| 平均風速 (m/s) | 19.3 |
| 最大瞬間風速 (m/s) | 26.1 |
| 風向 (°) | 290 |
| ナセル方向 (°) | 309 |

図5-15 (1) 解析ケース1に用いる自然風



| | |
|--------------|------|
| 平均風速 (m/s) | 18.5 |
| 最大瞬間風速 (m/s) | 21.7 |
| 乱れ強度 (%) | 7.24 |
| 風向 (°) | 293 |
| ナセル方向 (°) | 309 |

図5-15(2) 解析ケース 2, 3 に用いる自然風

(f) 各解析ケースのブレードピッチ角度の状況

各解析ケースのブレードピッチ角度の状況を図5-16に示す。

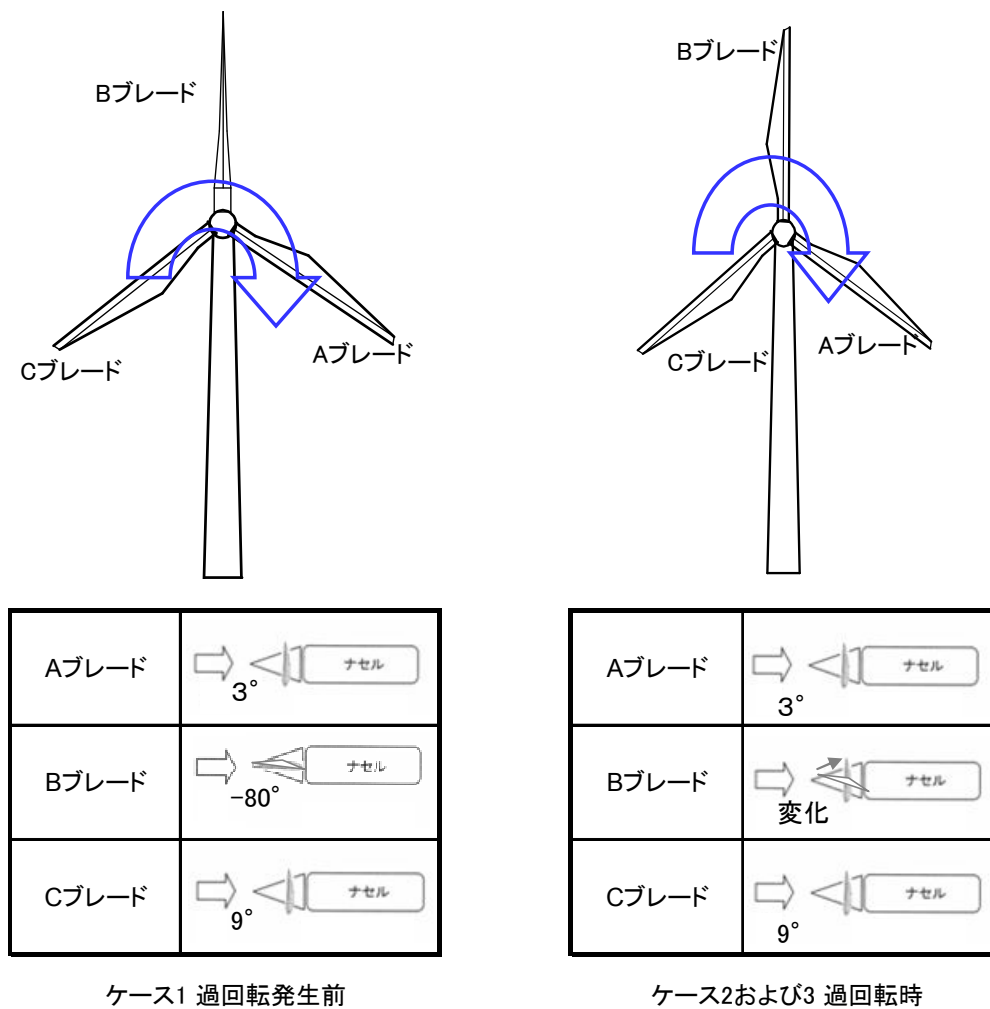


図5-16 各解析ケースにおけるブレードピッチ角度の状況

b. 解析結果

(a) 解析ケース 1：過回転発生前のロータ回転数の確認

解析ケース 1 においては，過回転発生前のブレードピッチ角度の状況と作成した自然風において，風応答解析を行い，ロータ回転数を確認した。

ロータ回転数の解析結果を図5-17に示す。

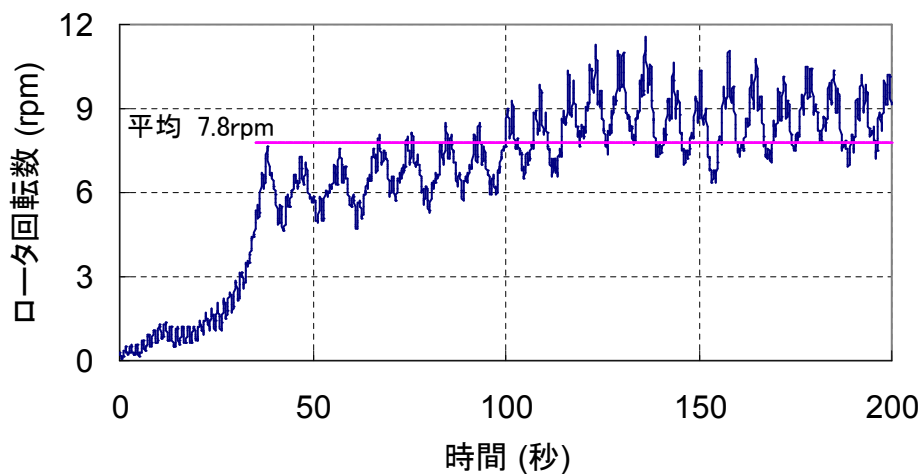


図5-17 過回転発生前のロータ回転数解析結果

本解析結果より，ロータ回転数は 8rpm 程度で安定することがわかった。1 月 8 日に実測されたロータ回転数および本解析結果から，B ブレード 1 枚が -80° を維持している状況では，過回転には至らないことが確認された。

(b) 解析ケース 2 : 過回転時の B ブレードのピッチ角度とロータ回転数および作用荷重の関係把握

解析ケース 2 においては、解析用に作成した過回転時の自然風を用い、動きの確認できていない B ブレードのピッチ角度をパラメータとして、 -50° から -10° までのピッチ角度に対応するロータ回転数を調べ、過回転となり得る B ブレードのピッチ角度および実測されたロータ回転数に対応する B ブレードのピッチ角度を確認した。

また、風車タワー基部に基礎の実耐力を超える転倒モーメントが作用する可能性のあるピッチ角度および回転数も確認した。

B ブレードのピッチ角度とロータ回転数の関係を表 5-7 および図 5-18 に示す。

また、B ブレードのピッチ角度 -15° におけるロータ回転数およびタワー基部に作用する転倒モーメントを図 5-19 に、B ブレードのピッチ角度 -10° におけるロータ回転数およびタワー基部に作用する転倒モーメントを図 5-20 に示す。

表 5-7 B ブレードピッチ角度とロータ回転数の関係

| B ブレードのピッチ角度($^{\circ}$) | ロータ回転数 (rpm) |
|----------------------------|--------------|
| -10 | 79 |
| -15 | 59 |
| -20 | 33 |
| -30 | 25 |
| -40 | 22 |
| -50 | 17 |

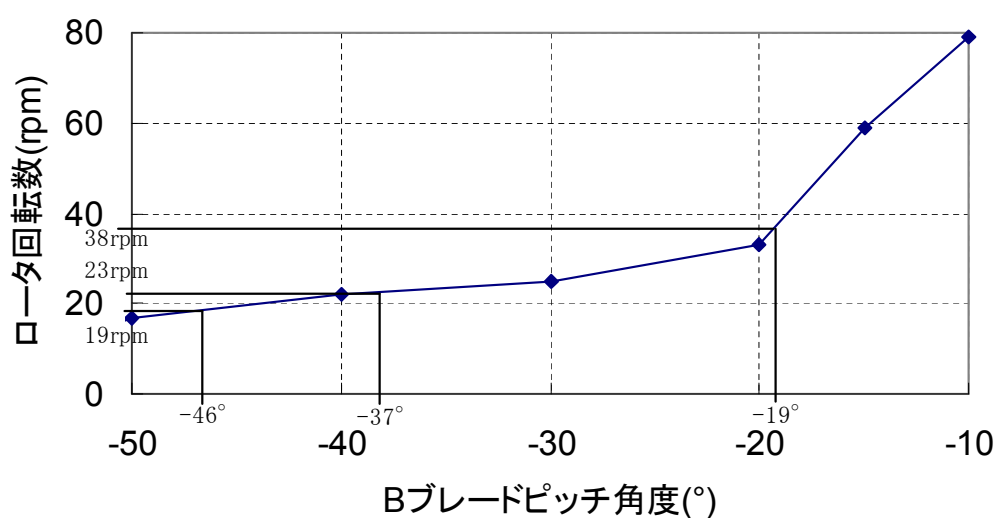
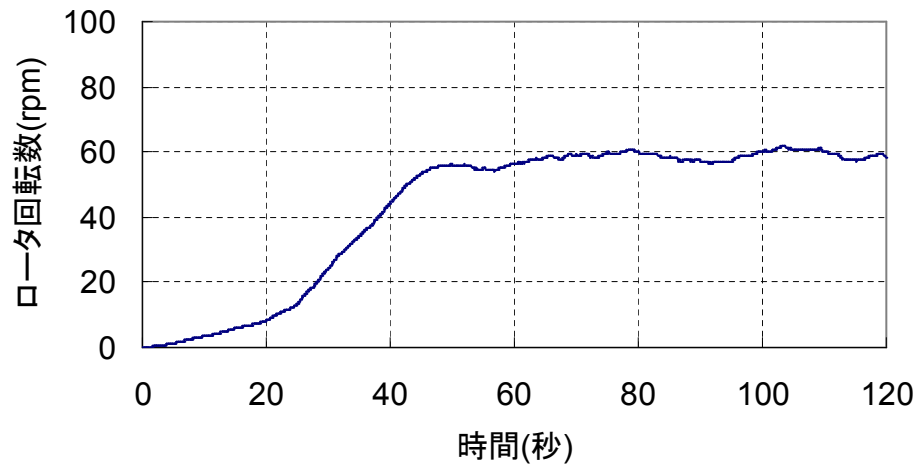
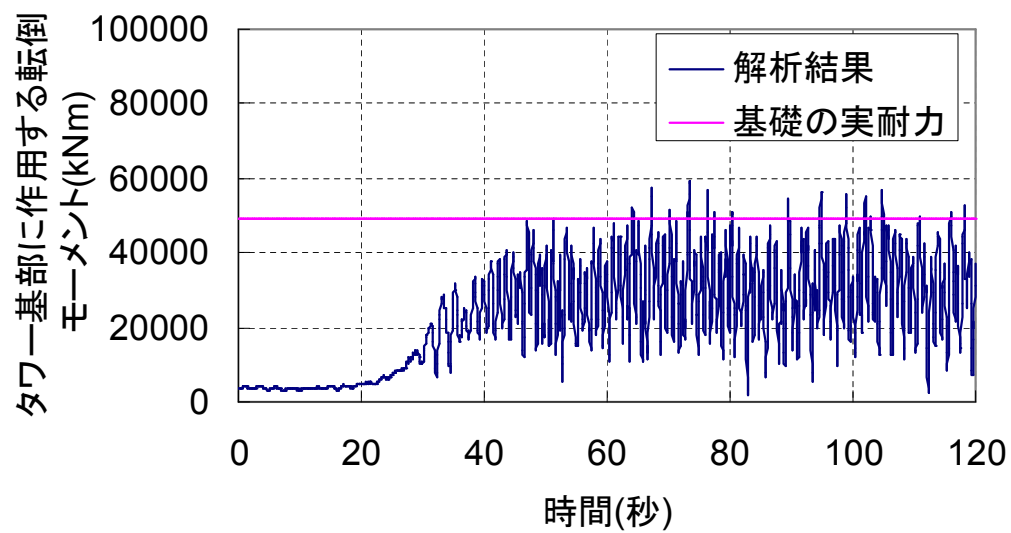


図 5-18 B ブレードピッチ角度とロータ回転数の関係

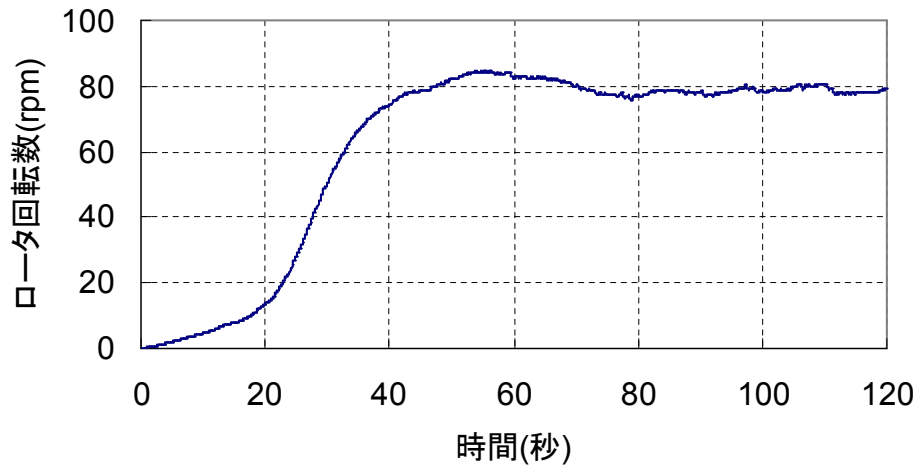


ロータ回転数の経時変化

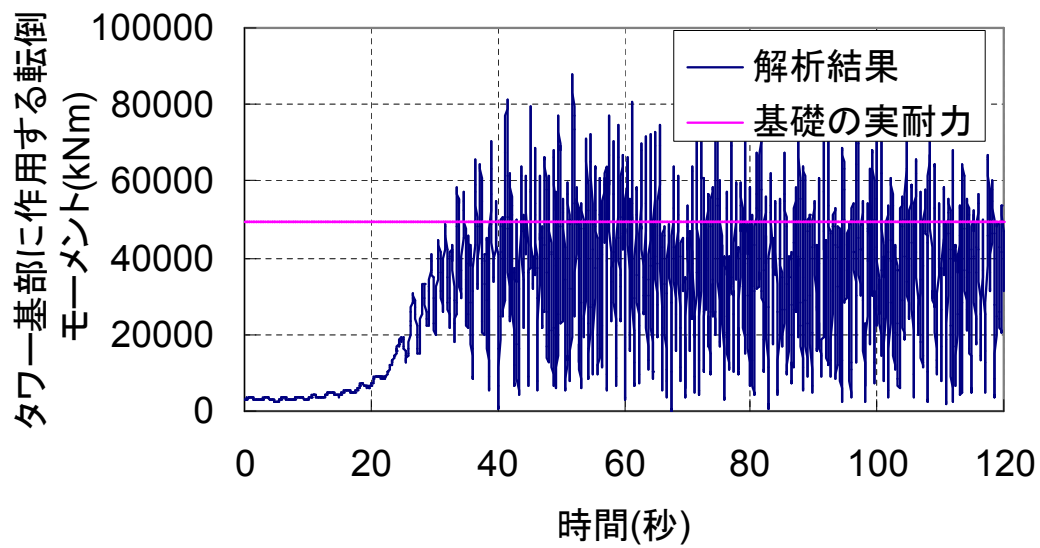


転倒モーメントの経時変化

図5-19 ピッチ角度 -15° におけるロータ回転数と基部に作用する転倒モーメントの経時変化



ロータ回転数の経時変化



転倒モーメントの経時変化

図5-20 ピッチ角度 -10° におけるロータ回転数と基部に作用する転倒モーメントの経時変化

本解析結果(表5—7, 図5—18)から, Bブレードのピッチ角度が -46° 程度になるとロータ回転数は, 定格回転数の 19rpm となり, -37° 程度で 23rpm, -19° 程度で 38rpm にそれぞれ達することが確認された。

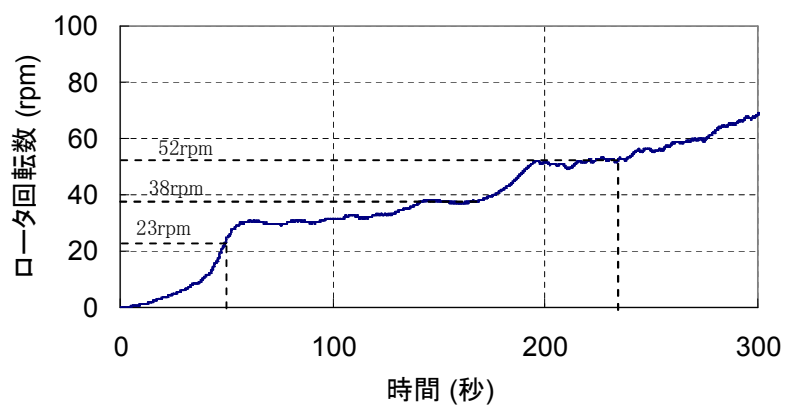
また, 図5—18からピッチ角度が -20° を超えると, ロータ回転数が急激に上昇することが, 図5—19からはピッチ角度が -15° の場合, タワー基部に作用する転倒モーメントは, 基礎の実耐力, 49,400 kNm を超えることがわかった。

(c) 解析ケース 3 : 風車倒壊状況の推定

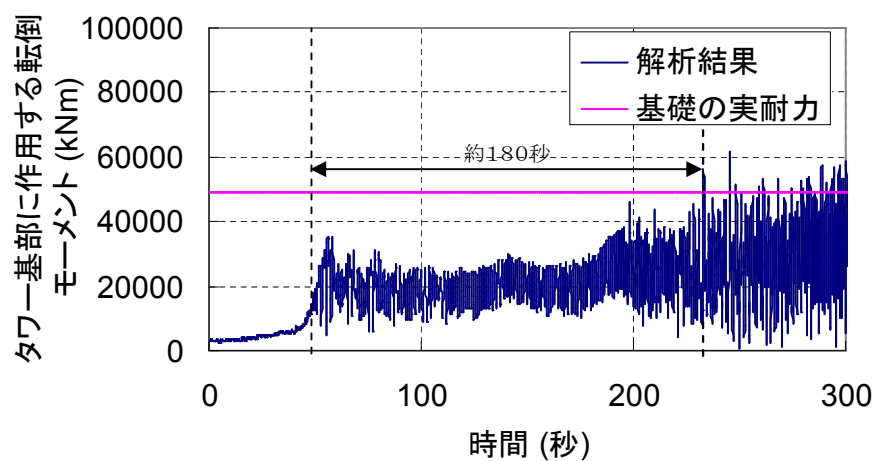
以上の解析結果を踏まえ, 解析ケース 3 においては, 作成した過回転時の自然風を用い, Bブレードのピッチ角度を徐々にファイン側へ変化させながら, ロータ回転数とタワー基部に作用する転倒モーメントの経時変化を確認し, 風車の倒壊状況を推定した。

本解析では, Bブレードの初期ピッチ角度を 38rpm 時のピッチ角度(-19°)に達する少し前の -25° とし, ピッチ角度の時間変化量は, 実測された最大値, $0.043^{\circ}/s$ とした。

変化を与えたピッチ角度とそれに対応するロータ回転数およびタワー基部に作用する転倒モーメントを図5—21に示す。



ロータ回転数の経時変化



タワー基部に作用する転倒モーメントの経時変化

図5-21 ピッチ角度とロータ回転数およびタワー基部に作用する転倒モーメントの関係

解析結果から、Bブレードのピッチ角度の変化に伴い、ロータ回転数が急激に上昇し、ロータ回転数が 52rpm に達した時点で、タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力 (49, 400kNm) を超過することがわかった。

また、回転数が 23rpm に達してから、基礎の耐力を超えるまでの時間は 180 秒程度と算出され、アラームログに残された実測時間 234 秒と近い値となっている。

c. まとめ

過回転が発生する前後の B ブレードのピッチ角度および時間変化量の実測データが得られていないことから、決定論的に倒壊時に風車タワー基部に作用した転倒モーメントを求めることができないが、風応答解析の結果から、以下の結論を得た。

- ① 過回転発生前の状況、つまり、ピッチ角度がそれぞれ、A ブレード 3° 、B ブレード -80° および C ブレード 9° では、解析結果においても過回転には至らない。
- ② B ブレードのピッチ角度が -46° 程度となるとロータ回転数は定格回転数 19rpm となり、 -37° 程度で 23rpm、 -19° 程度で 38rpm にそれぞれ達する。また、 -15° 程度でタワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力 (49, 400kNm) を超える。
- ③ 実測から得られた A ブレードのピッチ角度の変化量 ($0.043^{\circ}/s$) や A、C ブレードの最終ピッチ角度 (各 3° および 9°) から勘案して、38rpm のアラーム (B ブレードのピッチ角度 -19° 程度) が記録された後に、B ブレードのピッチ角度が -15° に達することが十分にありうる。
- ④ 倒壊に至る風車挙動の推定結果の一例として、B ブレードのピッチ角度に時間変化を与えた解析から、ロータ回転数が 38rpm を超えた後、急激に上昇し、タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力を超え、倒壊に至ったことが裏付けられた。

(6)倒壊原因のまとめ

基礎の材料強度試験結果に基づく基礎ペデスタル部の構造解析により求められた破壊限界抵抗モーメント（引抜き力に対する実耐力）と風応答解析により求められた風車基部に作用する転倒モーメントの比較により，風車倒壊原因について考察した。

また，過回転に至った経緯を整理し，根本原因を検討した。

a. 基礎構造解析の結果

設計において今回のような引抜きせん断破壊モードが考慮されなかったこと，また，施工において倒壊後の現地調査から基礎ペデスタル部外周主鉄筋 D29 のコンクリートかぶりの一部が設計値を下回っていることが判明した。

これらの基礎構造の諸元を織込んだ構造解析を実施した結果，設計で考慮した最大転倒モーメント（暴風時：風速 60m/s）44,600kNm に対して，構造解析により求められた基礎の破壊限界抵抗モーメント（実耐力）は 49,400kNm であった。当該ペデスタルは曲げ破壊モードを対象に設計されているが，今回の破壊は曲げではなく，せん断で破壊したので構造解析により実耐力を求めたものである。結果として，曲げで設計していた最大転倒モーメント相当の実耐力を有していたことから，倒壊原因は設計や施工（かぶり寸法の差異）に起因したものではないと判断できる。また，かぶりの一部が設計値を下回っていたが，かぶり寸法の差異による基礎ペデスタルの実耐力に殆ど相違はないことが判った。

b. 風応答解析の結果

風応答解析では，以下の 4 点が判明した。

- ① ブレード 2 枚がファイン状態になっても，残る 1 枚がフェザリングしていればロータ回転数は数回転程度で安定し，過回転には至らないこと。（図5-17参照）
これは，1 月 8 日の風車状況からも確認できる。（図3-2参照）
- ② 実測されたロータ回転数 38rpm 時の B ブレードのピッチ角度は -19° であり，ピッチ角度が -15° になると，風車基部に作用する転倒モーメントは基礎ペデスタルの実耐力 (49,400kNm) を超えること。
- ③ 実測から得られたピッチ角度の変化状況から，38rpm のアラーム (B ブレードのピッチ角度 -19° 程度) が記録された後に，B ブレードのピッチ角度が -15° に達することが十分にありうること。
- ④ 倒壊に至る風車挙動の推定結果の一例として，B ブレードのピッチ角度に時間変化を与えた解析から，ロータ回転数が 38rpm を超えた後，急激に上昇し，タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力を超え，倒壊に至ったことが裏付けられた。（図5-21参照）

c. 比較検討結果

以上の解析より，風車ロータ回転数が上昇して過回転状態に至った場合，タワー基部に作用する転倒モーメントは基礎の設計値および実耐力を超過し，基礎破壊に至ることが判った。

d. 風車倒壊事故の経緯と倒壊メカニズム

以上の解析および検討より，今回の風車倒壊事故は以下の経緯・原因により発生したものと判断する。

- ① ブレードをフェザリング状態に保持する機能を喪失した。
 - ・ ボルトの数量不足，ワッシャー不使用ならびに適正工具(トルクレンチ)を使用せず小型レンチを使用したことによるトルク不足など，不適切な作業と低気圧による強風によりピッチ固定用ブロックが脱落
 - ・ 脱落したブロックがピッチ操作油圧系統を損傷し，漏油が発生
(二重化された固定機能の一方が他方を破損し，機能を喪失)
- ② 漏油のためブレードピッチを拘束する力が低下し，構造的に操作力(保持力)が喪失したため，ブレードピッチは風の影響により徐々にファイン状態に移行した。
- ③ ブレード2枚がファイン状態に至るまでに，油面低下やブレードピッチ角度異常などのエラーが断続的に発生したが，連続停止中のため運転保守員は当該風車のエラーを把握しておらず対応もとらなかった。
- ④ 3枚目のブレードがファイン状態に移行するに至って，ロータ回転数が急激に上昇した。
- ⑤ ロータ回転数の急上昇に伴って風車へ作用する風荷重が増大し，タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力を上回って基礎ペデスタル部が破壊し，風車倒壊に至った。

運転記録の最終データから，当該風車は2枚のブレードがファイン状態であり，倒壊前には定格回転数の2倍を越える過回転状態にあったことが風車状況から確認されている。過回転に至る経緯を表5-8に，また経緯から推定される事象を以降に示す。

表5-8 風車過回転までの経緯

| 2007/1/4 14:39:00 | | 発電機層間短絡のため運転不可。長期停止に備えて以下の処置を実施(作業日報にて確認) ①ブレードピッチをブロック・ボルトにて固定 ②主軸ブレーキを動作しないよう設定 【作業不適事項】 (事故発生後に実施したヒアリング調査にて確認) ・3個の固定ブロック(1個/ブレード)のうち、1つはボルト1本で取付け(通常はボルト2本) ・ワッシャー不使用 ・トルクレンチ不使用 | | | |
|----------------------|----------------------|--|----------------------------|----------------------------|--|
| 月日 | 時刻 | 運転記録 | | アラームデータ | 現象 |
| 1/7 | 16:56:00 | 最大瞬間風速 40.7m/s | | | 低気圧による強風 |
| | | | | | いずれかのピッチ固定ブロックが脱落 ハブ内のブレードピッチ操作シリンダーのフェザリング操作油圧系統を損傷し、操作油が漏油 |
| | 23:30:00 23:50:32 | 油圧ポンプ運転 (~1/8 0:30まで) | | 油圧タンク油面レベル下限 | |
| 1/8 | 0:30:00 | | | | |
| | | | | | |
| | 1:20:00 | | | | この時点までにBブレードのピッチ固定ブロックが脱落し、ブレードピッチの操作油圧系統を損傷。 漏油に伴いアキュムレータ蓄圧が低下し、ブレードは徐々にファインへ移行 |
| | 2:00:00 | Aブレード ピッチ角度 | Bブレード ピッチ角度 | | この時点までにAブレードのピッチ固定ブロックは脱落。ただし、ブレードピッチはフェザリングへ移行していることから、ブレードピッチのフェザリング操作油圧系統に損傷はない |
| | 2:20:00 | -86° ↓ -92° | -89° ↓ -80° | | |
| | 2:30:08 | | 以降、 最終取得 データまで 一定 | Bブレードピッチ角度異常 | |
| | 2:50:00 | | | | Bブレードが-80°を保持している理由は不明 (漏油がおさまった、ブロック等が操作機構に噛み込んだ、等が考えられる) |
| | 3:30:00 | | | | この時点までにCブレードのピッチ固定ブロックが脱落し、ブレードピッチのフェザリング操作油圧系統も損傷 漏油に伴いアキュムレータ蓄圧が低下し、ブレードは徐々にファインへ移行 |
| | 3:31:43 | | | Cブレードピッチ角度異常 | |
| | 5:30:00 | Aブレード ピッチ角度 | | Cブレード ピッチ角度 | この時点までにAブレードのブレードピッチのフェザリング操作油圧系統が損傷 漏油に伴ってアキュムレータ蓄圧が低下し、ブレードは徐々にファインへ移行 |
| | 5:51:07 | -92° ↓ 3° | | -88° ↓ 9° | Aブレードピッチ角度異常 |
| | 6:50:00 | 以降、 最終取得 データまで 一定 | | 以降、 最終取得 データまで 一定 | |
| | 7:10:00 | | | | |
| | | | | | ブレード2枚(A・C)がファイン状態でロータ遊転 【ロータ回転数】2~4rpm |
| | 21:36:42 | 最終運転データ取得 【ブレードピッチ角度】 A:3°, B:-80°, C:9° 【ロータ回転数】3.5rpm | | | |
| | 21:47:52 | | | ロータ回転数23rpm(機械検出一遠心力) | 風車過回転 |
| | 21:47:53 | | | ロータ回転数23rpm超過(ハルス検出) | |
| | 21:48:18 | | | ロータ回転数38rpm超過(ハルス検出) | |
| 以降の記録なし | | | | | さらに回転数が上昇し風車倒壊 |

【「固定ブロックの脱落」および「固定ブロックによるハブ内油圧系統の損傷」について】

運転記録および現地調査の結果から下記の事項が推定される。

- ハブ内に打痕が散在していることおよび落下したブロックにも打痕が認められることから、脱落したブロックが遊転によりハブ内を転げ回る間に周囲に激突した。油圧シリンダーポート部あるいは油圧ホース接続金具にも打痕が見られることから、脱落したブロックが激突し、油圧系統を損傷した。
- 固定ブロックは3個とも設置した位置に残存しておらず、3個のブロックのうちの2個とボルト2本はタワー基部に落下していたことから、これらはタワーが傾斜する以前に落下した。(残る1個の所在については不明)
- 3枚のブレードに取付けた固定ブロックが脱落した時刻および順序は不明であるが、1月7日23:30に油圧ポンプが運転する時点では、少なくとも1枚のブレードにおいてブロックが脱落して油圧系統の損傷が発生し、A・B・C各ブレードのピッチ角度に変化が見られる時点ではそれぞれのブロックは脱落し、油圧系統も損傷していた。

【当該風車のブレードピッチ固定フリー時のピッチ動作について】

本風車は、停止時はブレード後縁を前面(風向側)に向けており、ピッチ稼働範囲はファイン側へ凡そ100°である(図2-4参照)。事故発生前は、ブレードを固定するブロックと操作油圧の両方を喪失したフリーな状態であったことから、風によりブレードがファイン状態になったものである。また、一旦ファイン状態となったブレードをフェザリングするには油圧操作機構によるほかはない。

6. 再発防止対策

発電所の保安管理・運営管理にあたっては、関東東北産業保安監督部長へ届出ている「保安規程」をはじめ、業務上の基本的事項や標準的な方法を「保安運用管理規程」および「運転保守」・「安全作業」・「災害対策」・「事故報告」の社内規程・要領に定め、これをもとに日常の業務を実施している。

運転保守員の多くは、発電所運転開始後の2年間（設備の初期不具合が沈静化して安定操業に移行するまでの目安として設定した期間）、当地に駐在して運転保守業務にあたった風車メーカー技術員の指導を受けて、操業に必要な技術を習得している。また、風力発電所の運転保守業務に求められる技術の項目・水準を明確にし、すべての運転保守員が求められる水準へ効率的に到達することを目的に、社内技能認定制度を制定して育成にあたっている。

(1)再発防止対策の検討と結果

前章までの検討で、今回の風車倒壊は風車が過回転状態となったために設計条件を上回る風荷重を受けたためであることが判った。また、過回転に至った主要因は5. (6)d. で整理したとおり、

- ・ピッチ固定用ブロックが、取り付け作業の不備により脱落したこと
- ・二重化されたピッチ固定機能の一方が破綻し、他方を破損させたこと
- ・風車エラーの発生を把握し、適切な対応をとる体制ができていなかったこと

と分析された。

抽出された上記3点について、さらに根本原因を洗い出し、これを解決するために要求される事項を明らかにして、再発防止対策を検討した。(表6-1参照)

今後の運転にあたっては、以下に示すとおり過回転を再発させないための改善および従来からの取組みの強化をはかることとする。

a. ピッチ固定用ブロックの脱落防止(表6-1 対策項目1)

ピッチ固定用ブロックは、所定の位置にブロック1個あたり2本のボルトで取り付ける。このボルトが緩んで抜け落ちることがなければブロックも脱落することはない。

このため、ブロック固定ボルト頭部に環状の鋼材を溶接し、ボルト締付け後に2本の環をワイヤーまたはチェーン（以下、ワイヤーという）で連結して個々のボルトが回転することを防止する。

必要なボルトの加工および部材準備は4月20日までに実施する。

なお、ボルト加工および部材準備が完了するまでの間にアイドル状態に設定するこ

とが必要となった場合は、以下の対策を実施することで、万一の場合でも過回転が発生しない状態を確保し、運用する。

- ① ピッチ固定用ブロックを取付けず、油圧制御のみでのフェザリング状態を保持する。
- ② ブレーキを開放状態でロックすることはせず、通常通り動作可能な状態を確保する。

b. 当該作業に必要な部材の継続的確保(表6-1 対策項目2)

ピッチ固定用ブロックの設置に必要な部材が準備されていなかったことに問題があることから、必要な部材を準備し、今後も継続的に確保できるシステムとする。

このため、全ての風車に備え付けのブロック、ボルトおよびワッシャーの数量を確認し、不足しているものは購入のうえ全数を補充した。(1月31日実施済み)

今後は、風車1基分相当の予備品および必要な工具を管理棟倉庫に常備する。

(2月13日実施済み)

また、風車の定期巡視項目へ、ピッチ固定に必要な物品(ブロック・ボルト・ワッシャー)の確認を追加し、1回/月の巡視時に各風車ナセルに備え付けの数量・破損の有無等、使用の可否を確認する。不備を確認した場合は速やかに倉庫に保管する予備品から補充するとともに、巡視記録に記録し所長まで報告する。(1月29日実施済み)

なお、ピッチ固定用ブロック脱落防止用のワイヤーについては運用開始時に速やかに巡視表へ反映し、以後の管理は上記物品と同様に実施する。

c. 当該作業を確実にを行うための実施管理の追加(表6-1 対策項目3)

ピッチ固定用ブロックの脱落原因として、事前にメーカーマニュアルを確認しておらず、当該作業に求められる要件を十分に認識していなかったことに加えて、適切な作業手順や確認事項を記した「作業要領書」や、作業の実施結果をチェックして不適切な作業を防止する仕組みがなかったことがある。

あらかじめ、メーカーマニュアルに従い「作業要領書」を作成するとともに、作業のチェックポイントを定め、作業のステップごとに、作業実施者が共同作業者とともに当該作業が所定の要件を満足していることを確認することで、不適切な作業を防止することができる。

当該作業における主なチェックポイントは以下の3点である。

- ・ひとつの固定ブロックを2本のボルトで固定すること。
- ・ボルトはトルクレンチにて、規定の600Nmで締付けること。
- ・ワッシャーを使用すること。

チェックポイントは、後述する「作業チェックリスト」に明記し、作業および作業終了後の確認を以下のとおり実施する。

- ① アイドリング状態に設定する作業を「重要作業」と位置づけ、あらかじめ作成した

「作業チェックリスト」に基づいて実施する。

- ② 図や写真を記載した「作業要領書」を作成し、各風車ナセルに備え付ける。
- ③ 重要作業においては、共同作業相互による終了確認を義務付ける。
- ④ 所長は「作業チェックリスト」により当該作業が所定の要件を満足していることを確認する。
- ⑤ 定期巡視項目へピッチ固定用ブロックの取付け状態の確認を追加し、巡視の都度、確認する。

(以上の対応は3月6日実施済み)

なお、ピッチ固定用ブロックの脱落防止対策のうち固定ボルト頭部のワイヤーによる結束ならびに次項dに示すブレード操作ピッチシリンダーの油圧保持対策のうちボールバルブの閉塞については、運用開始時に速やかに「作業要領書」ならびに「作業チェックリスト」へ反映する。

また、メーカーマニュアルにて当該作業の正規の実施方法について所内で勉強会を行い、作業に携わる運転保守員全員に再周知した。(1月15日実施済み)

なお、メーカーマニュアルに加えて新たに実施する作業実施管理方策の運用についても運転保守員全員に周知するため勉強会を実施する。(4月20日実施予定)

d. ブレード操作ピッチシリンダーの油圧保持(表6-1 対策項目4)

ピッチ固定用ブロックが脱落して、ブレード操作用ピッチシリンダーの油圧系統がブロック等の激突の衝撃により損傷し、操作油が漏洩して油圧が低下すると、ブレードを一定位置に維持・拘束することができなくなる。フェザリング状態に制御するアキュムレータ側の油圧を喪失すると、風によりブレードがファイン状態になることを抑制することができないことから、ブレードをフェザリング状態に維持するには、そのための油圧を保持する必要がある。

このため、ブレード操作用ピッチシリンダーのアキュムレータ側給油口を並列化し、一方にボールバルブ、もう一方にチャッキバルブを設け、当該部への外部からの衝撃を防止する鋼製ガードを設置する等の対策を実施する。アイドル状態に設定するときはボールバルブを閉塞することで、万一、アキュムレータ～シリンダー間の油圧ホース等、シリンダー外部の油圧系統を損傷してもシリンダー内の油圧は保持され、ブレードがファイン状態になることを防止する。

以上の対応は5月20日までに実施する。

なお、油圧保持対策が完了するまでの間にアイドル状態に設定することが必要となった場合は、以下の対策を実施することで、万一の場合でも過回転が発生しない

状態を確保し、運用する。

- ① ピッチ固定用ブロックを取付けず、油圧制御のみでのフェザリング状態を保持する。
- ② ブレーキを開放状態でロックすることはせず、通常通り動作可能な状態を確保する。

e. 特定の風車のエラーに即応可能な監視システムと運用ルールの整備

(表6-1 対策項目5)

過回転に至る以前の段階で、風車は通常運転中とは異なる状況を呈しエラーを発報している。これらのエラーを認知した段階で風車状況を確認し、各断面で可能な対応をとることで、過回転を未然に防ぐことが可能である。(③参照)

また、あらかじめエラー認知時の行動基準や対応ルールを定め、運転保守員に周知することで万一の場合により適切に状況を判断し、設備および保安に関する危険な状況を回避できる。

このため、アイドリング状態に設定した風車等、特定の風車のエラーに即応できるよう監視システムを改修し、運用ルールを整備する。

① 監視システムの改修

【平日昼間】

当該風車のエラー発生時は、支店および管理棟（運転保守員の勤務箇所）に警報を鳴動する機能を追加する。

【休日・夜間】

当該風車のエラー発生を、運転保守員待機者へ通報する機能を追加する。

② 運用ルールの整備

【平日昼間】

当該風車のエラー発生時は、エラーの内容を確認し、所長指示により復旧対応を実施する。

【休日・夜間】

エラー通報を受信した運転保守員は、エラーの内容を確認し、所長と協議のうえ応援者の招集、復旧対応にあたる。

既に勤務箇所への警報鳴動については実施済みであり、待機者への異常通報機能も3月末までに実施する。機能追加が完了するまでの間は、待機者と管理棟常駐の変電所運転員が電話連絡をとることにより上記機能を代行する。

③ アイドリング中の風車エラー対応要領制定

アイドリング状態に設定した風車について、エラー発生時の対応における責任の所在や役割分担、業務の手順等、行動の基準となる「アイドリング中の風車エラー対応要領（仮称）」を制定し、異常対応の標準化と適正化をはかる。

今回の過回転発生から倒壊へ至った事故のケースで考えると、

①圧油タンク油面低下

②ピッチ角度異常

等のエラーを認知し、その時点でハブ内の状況を確認することで

- ・ブレーキを使用してロータの回転を停止する。
- ・手動でヨー制御を実施し、ナセル方向を風向に対し 90° とする。
- ・ブレードピッチ角度を、現在位置以上にファイン状態へ移行させないよう再度固定する。

等の対応が可能であり、過回転の発生を回避できる。

「アイドリング中の風車エラー対応要領（仮称）」標準要領は、ユーラスエナジージャパン技術部が作成し、3月20日までに発電所へ周知・運用開始とする。

上記 a. ～ e. の対応については社内要領（運転保守要領）の改訂へも反映し、標準化と継続的な実施の基本とする。3月末までにユーラスエナジージャパン技術部にて標準要領を改訂し、4月末までに発電所個別要領を改訂する。なお、要領書の改訂は4月となるものの、各対策については、改訂に先立つ社内指示に基づき、順次実施を開始している。実施時期の一覧については、表6-1参照。

(2)再発防止対策のまとめ

再発防止対策は、6（1）記載のとおり実施するものであるが、以下に再発防止対策をまとめる。

a. 設備面での対策

① ピッチ固定用ブロックの脱落防止

2本のボルト頭部の環をワイヤーで連結する。

② ブレードピッチ操作用シリンダーの油圧保持

万一、脱落したピッチ固定用ブロックの衝撃等があってもシリンダー内の油圧が保持できるよう給油口へのバルブ設置と当該部の衝撃防護等対策を実施する。

b. 作業実施面での対策（準備を含む）

① 作業に必要な部材の継続的確保

② 作業チェックリストの作成・活用による作業実施結果の多面的チェック等作業実施管理

c. 風車運転監視面での対策

① 監視システムの改修・運用ルールの整備

風車運転監視システムへ、エラー発生時の警報鳴動機能や通報機能を追加すると

共に、この運用・対応ルールを整備，実施する。

② アイドリング状態に設定した風車のエラー対応規基準

「アイドリング中の風車エラー対応要領（仮称）」を制定し，エラー発生時の対応の標準化と適正化をはかる。

上記の再発防止策により，風車の過回転発生を防止し，再び倒壊事故を引き起こさない運用管理を実施する。

表6-1 停止中の風車が過回転に至った問題点・根本原因および対策

| 問題点 | 根本原因 → 要求事項 | 対 策 | 実施時期 |
|---------------------------------|---|---|--|
| ピッチ固定ブロックが取付け作業の不備により脱落したこと | ピッチ固定用ブロックの脱落防止対策が施されていないこと → ブロックを固定するボルトが緩まないこと | 1. ピッチ固定用ブロックの脱落防止 固定ボルト頭部に環を溶接し、2本のボルト頭部をワイヤーまたはチェーンで連結してそれぞれボルトが回転すること防止をする。 | ～4/20 |
| | 作業準備および日常管理の不備 ○必要な部材が準備されていなかったこと (ボルト・ワッシャー) ○必要な部材が不足していることを問題と認識しておらず、所長への報告や情報の共有がされていなかったこと → 常に必要な部材が準備されていること、不足・不備などは速やかに補填され、作業の際に不足・不備のないこと | 2. 当該作業に必要な部材を準備し、継続的に確保する (1) 必要な資機材の準備 a. 必要な用具(ボルト・ワッシャー)は十分な数量を購入、準備する。 b. 風車1基分相当の予備品および必要な工具を管理棟倉庫に常備する。 (2) 巡視基準の見直し(巡視項目の追加) ピッチ固定に必要な物品(ブロック・ボルト・ワッシャー)の数量および状態の確認を追加し、不備のある場合は直ちに補充する。(ボルト連結用のワイヤーについては運用開始時に巡視項目へ反映する) | 実施済 1/31～ 実施済 2/13～ 実施済 1/29～ |
| | 作業実施結果の確認不足 ○作業チェックリストを使用せず、各作業員の理解に頼った作業だったこと ○共同作業によるダブルチェック体制が機能しなかったこと ○所長による実施内容の確認が不十分だったこと → 作業ステップを明示し、ステップごとに実施内容を確認すること、終了時確認を確実に行うこと | 3. 当該作業を確実に実行するための実施管理の追加 (1) 作業実施結果の確認(ステップごと、最終確認) メーカマニュアルに従い「作業要領書」を作成するとともに、作業のチェックポイントを定め、作業ステップごとに実施内容を確認する「作業チェックリスト」を作成して、作業はこのリストに基づき実施する。 a. 「作業チェックリスト」を作成する。 b. 図・写真入りの「作業要領書」を作成し、風車ナセルへ備え付ける。 c. 作業はこの「作業要領書」およびリストに基づき実施し、作業者相互による終了確認を義務付ける。 d. 所長は「作業チェックリスト」により実施内容を確認する。 e. 巡視項目にピッチ固定用ブロックの取付け状態の確認を追加し、巡視の都度、確認する。 対策(事項4、ボルトバルブ閉塞)についても運用開始時に「作業要領書」および「作業チェックリスト」へ反映する。 | 実施済 2/22～ 実施済 3/6～ 実施済 2/22～ 実施済 2/22～ 実施済 2/22～ |
| 二重化されたピッチ固定機能の一方が破綻し、他方を破損させたこと | → 個々の作業者に適切な作業方法・要領を理解させること 作業者自ら、事前に作業要領を確認すること | (2) メーカマニュアル内容の周知・徹底 a. メーカマニュアル記載内容の再確認、再周知の指示(所内勉強会の実施等による) b. メーカマニュアルに加えて新たに実施する作業実施管理方策について、運転保守員に周知する勉強会を実施する。 | 実施済 1/15～ 4/20 実施予定 |
| | 脱落したブロックが油圧系統を破損して油圧が低下したため、 → ブロックが脱落、激突してもアキュムレーター側シリンダー油圧を維持すること | 4. プレート操作ピッチシリンダーの油圧保持 プレート操作ピッチシリンダーのアキュムレーター側操作油供給口を並列化し、一方にボルトバルブ、もう一方にチャッキバルブを設け、鋼製ガードを設置する等の対策を実施する。アイドリング状態に設定する時はボルトバルブを「閉」、万一、油圧系統を損傷してもシリンダー内の油圧を確保する。 | ～5/20 |
| エラーの発生を把握し適切な対応をとる体制ができていなかったこと | 風車状態監視および異常時の対応についての詳細なルール(頻度、内容)が確立されていなかったこと(特に夜間・休日の対応) → 監視および異常対応ルールの確立、システム構築 | 5. アイドリング状態に設定した風車等、特定の風車のエラーに即応可能な監視システムと運用ルールの整備 (1)【平日昼間】 a. システム改修：当該風車のエラー発生時に警報を鳴動する機能を追加する。(支店・管理棟) b. 運用ルール：当該風車エラー発生時は即時対応する。 (2)【休日・夜間】 a. システム改修：当該風車のエラー発生を運転保守員待機者へ通報する機能を追加する。 b. 運用ルール：エラー通報を受信した待機者は即時対応する。(状況確認、応援者の招集、復旧対応) | 実施済 2/23～ |
| | → 常時と異なる風車の状態監視ルール、システム構築 | (3) アイドリング中の風車エラー対応要領を作成する。 | 実施済 3/6～ ※ ～3/20 |

7. 今後の対応について

既に述べたとおり，今回の風車倒壊事故に関する原因究明のための構造解析によれば，原設計時においては今回のような引抜きせん断による破壊モードは検討対象とはしていなかったものの，同様のせん断破壊モードに対しても，基礎の実耐力は設計で考慮していた最大転倒モーメントと同程度は確保できていたものと判断された。

一方で，今回の風車倒壊の原因は，ピッチ固定用ブロックの脱落に伴い風車ロータの回転数が規定の回転数を超えて上昇し，いわゆる過回転の状態に至ったことから，最終的には風車基礎部に設計値及び実耐力を超える転倒モーメントが作用したことであることが判明した。このため，今後は前章にて述べた再発防止対策を早急を実施していくものとし，この間，運転中の風車が故障等により長期停止となる場合は，ピッチ固定用ブロックの設置は行わず，油圧制御によりフェザリング状態を保持すると共に異常時にブレーキが作動できる状態を維持することで過回転の再発防止を図り，風力発電所の安全運転に努めていくこととする。

風力発電事業は地元の皆様のご理解の上に，20年近い長期にわたり継続していくものであり，当社としては，再発防止対策を確実に実行に移すことはもとより，発電所の長期にわたる安全且つ安定した運転を確保するために，今後とも自主的に改善を重ねていく所存である。また，当岩屋ウィンドファームの風車基礎についても，長期的にも万全を期するという観点から，今後，補修・補強を含めた改善策について，早急に検討を進めていきたいと考えている。

【岩屋ウィンドファーム風車倒壊事故調査委員会 委員構成】

| | | | | |
|------|--------|------|-----------------|----------|
| 委員長 | 荒川 忠一 | 東京大学 | 工学系研究科 | 教授 |
| 副委員長 | 関 和市 | 東海大学 | 総合科学技術研究所 | 教授 |
| 委員 | 前川 宏一 | 東京大学 | 工学系研究科 | 教授 |
| 委員 | 金津 努 | 財団法人 | 電力中央研究所 地球工学研究所 | 副所長 |
| 委員 | 中村 成人 | 株式会社 | ユーラスエナジーホルディングス | 常務取締役 |
| 事務局長 | 小松崎 勇一 | 株式会社 | ユーラスエナジージャパン | 技術部長 |
| 事務局 | 石原 孟 | 東京大学 | 工学系研究科 | 助教授 |
| 事務局 | 秋吉 優 | 株式会社 | ユーラスエナジージャパン | 事業開発第一部長 |
| 事務局 | 黒沢 雅人 | 株式会社 | ユーラスエナジージャパン | 技術部課長 |
| 事務局 | 金子 泰之 | 株式会社 | ユーラスエナジージャパン | 技術部課長 |
| 事務局 | 松本 悟 | 株式会社 | ユーラスエナジージャパン | 技術部課長 |

【岩屋ウィンドファーム風車倒壊事故調査委員会 開催実績】

◎第1回委員会

- 日時 : 平成19年1月21日(日)
- 場所 : 岩屋WF, ユーラスエナジー岩屋
- 実施事項 :
 - ・風車倒壊状況現地調査
 - ・風車倒壊状況, 事故発生時の風況・風車状況, 基礎設計・施工記録の報告・審議
 - ・今後の検討の方向性の報告・審議

◎第2回委員会

- 日時 : 平成19年2月2日(金)
- 場所 : ユーラスエナジージャパン本社
- 実施事項 :
 - ・風車倒壊状況測量等追加調査結果審の報告・審議
 - ・基礎の材料試験結果の報告・審議
 - ・基礎構造解析並びに風応答解析の実施状況の報告・審議

◎第3回委員会

- 日時 : 平成19年2月24日(土)
- 場所 : ユーラスエナジージャパン本社
- 実施事項 :
 - ・基礎構造解析並びに風応答解析結果の報告・審議
 - ・倒壊原因究明結果の報告・審議
 - ・再発防止対策検討結果の報告・審議