

# 風車基礎の基礎材定着力に関する検討

日本の風土に適した風車基礎の構築に向けて

## The Fixate Strength of the Anchoring Ring of Windmill Foundations

Toward the Construction of Windmill Foundations Suitable for Japan's Climate

(工務技術センター 風力開発G)

定格出力2MW風車(ハブ高さ80m)のアンカーリング方式による基礎材定着部のコーン状破壊耐力に着目し、縮小模型試験体による引抜载荷試験および3次元非線形FEM解析により効果的な定着力を発揮する基礎材定着方法について検討した。その結果、せん断補強筋・外周鉄筋に荷重を分担させることにより、アンカーリングの埋込深さを短くした改良基礎モデルの実用化に目途をつけるとともに、設計や応力解析に活用できる3次元解析モデルを確立することができた。

(Wind Power Development Group, Electrical Engineering Technology Center)

We studied a method to anchoring it to show more effective fixate strength through pullout load tests using reduced-size models and 3D non-linear FEM analysis, focusing on the conical break strength of the fixate section of a windmill (hub height = 80m) with a rated output of 2 MW. As a result, we were able to get an aim from the practical use of the improved foundation model with shortened anchoring ring embedding depth, by dividing the load on shearing-reinforcing and external reinforcing bars. We were also able to establish a 3D analysis model that can be used in design and applied analysis.

### 1 研究の背景と目的

日本国内への風力発電の導入が進むなか、一部風車において基礎体から基礎材が抜け出し、風車が倒壊する事故が発生している。また、平成19年6月には建築基準法が改正され風車の設計基準が強化されたことにより、設備の安全性が確保される一方で基礎の大型化が懸念される。

そこで、効果的な定着力を発揮する基礎材定着方法を確立するとともに、基礎のコンパクト化について検討した。

### 2 研究の概要

本研究では、風車基礎として近年主流となっているアンカーリング方式の基礎材の抜け出しによるコーン状破壊について、各部位に作用する応力を詳細に把握することを目的として、改正建築基準法に対応し設計した2種類の基礎定着部構造について、引抜载荷試験(実構造物の1/5縮尺模型)と3次元非線形FEM解析を実施した。

#### (1) 引抜载荷試験

第1表に試験体の一覧を、第1図に試験体の配筋図および载荷荷重(曲げモーメント)を示す。試験体は、アンカーリング方式(中間フランジ有)でコーン破壊を想定した抜け出しに対するせん断補強鉄筋および外周鉄筋を配置した定着構造の標準基礎モデル、ならびにアンカーリングの中間フランジを省略するとともに基礎高さの低減を図る代わりにせん断補強筋および外周鉄筋の荷重分担を増大した定着構造を有する改良基礎モデルを設定した。

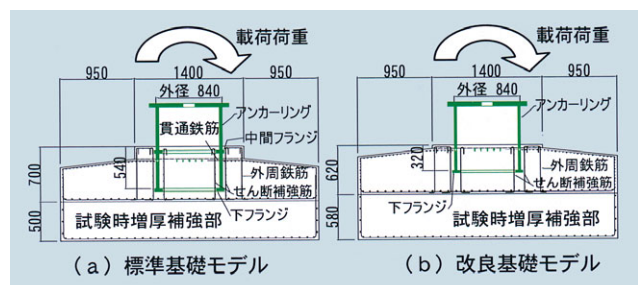
第2図に各試験体の载荷荷重(曲げモーメント)とアンカーリング基部における変位量(回転角)との関係(試

験結果)を示す。試験体No.1,2では、No.2の最大耐力がコンクリート強度の影響から14%大きくなったが、1,500kN・mまで変形状況に変わりはなく、同様な挙動を示すことが確認できた。このため、最大設計荷重20回の正負交番繰返し载荷による耐力低下はないものと考えられる。

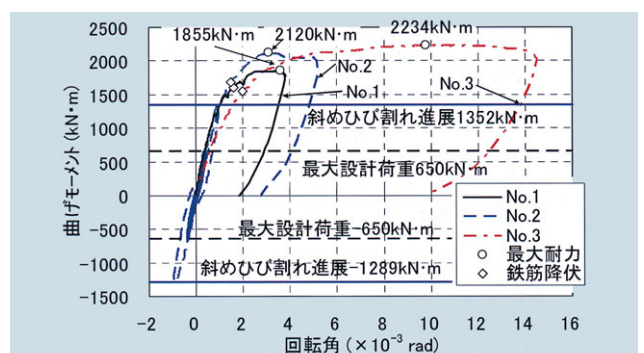
なお、試験体No.1,2と構造の異なるNo.3では、No.1,2と同様に斜めひび割れが進展する挙動を示したが、剛性が若干小さいため、荷重増加に伴い変形は進むものの、せん断補強筋等が有効に作用し、同等以上の耐力を保有することを確認した。

第1表 試験体一覧

試験体	基礎構造	载荷方法
No.1	標準基礎モデル	単調増加
No.2		正負交番繰返し
No.3	改良基礎モデル	単調増加



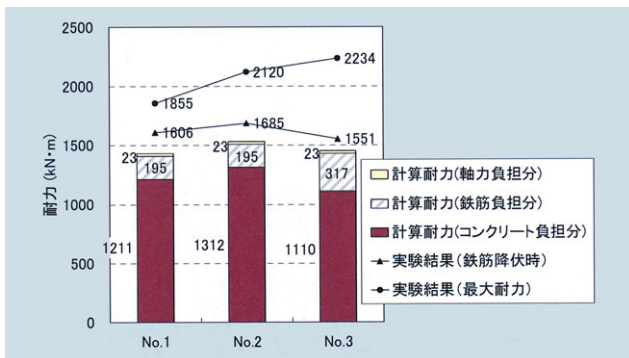
第1図 試験体配筋図および载荷荷重



第2図 载荷荷重(曲げモーメント)と変位量(回転角)の関係

以上のとおり、すべての試験体で、最大設計荷重に対して十分耐力を保持していることを確認した。また、最大設計荷重以上に荷重を増加させることにより、コンクリートにコーン状のひび割れが進展し、最終的にはせん断補強筋等が降伏する引抜きせん断破壊に至ることを確認した。

第3図に試験結果および計算耐力(実験時のコンクリート強度を用いて安全係数をすべて1.0とし現行設計手法により算出した拔出し耐力)を比較した結果を示す。計算耐力に対し、実験結果(鉄筋降伏時)の方が若干大きくなったことから、現行設計手法によってコーン状破壊耐力を安全側に評価できることが確認された。



第3図 耐力の試験値と計算値の比較

第4図に試験体No.1の試験体切断後の中央断面のひび割れ状況を示す。下フランジから斜め上方に向かうひび割れがコーン状破壊面を形成し、ひび割れの始点とフーチング表面に達した位置からひび割れ角度を算出すると、22.5度となった。No.2,3についても、同様なひび割れ状況となり大きな差はなかった。



第4図 試験体切断面のひび割れ状況(試験体No.1)

## (2) 試験の再現解析(3次元非線形FEM解析)

解析には、鉄筋コンクリート構造非線形解析ソフトウェアCOM3Dを用いた。

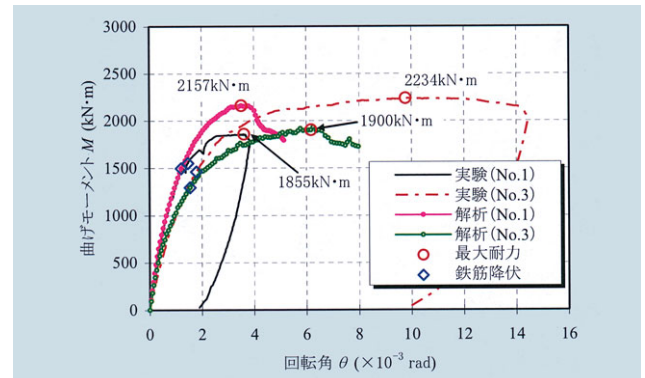
第5図に標準基礎モデルおよび改良基礎モデルの曲げモーメントと回転角との関係を示す。

標準基礎モデル(試験体No.1)では、鉄筋降伏後は実験よりも解析の回転剛性が大きいものの、最大曲げモーメントおよび回転角ともに概ね実験結果を捉えることができた。

改良基礎モデル(試験体No.3)でも、標準基礎モデルと同様に回転角が小さい区間は、初期勾配がよく一致しており、コンクリートの初期状態をよく表現できていると考えられる。一方、鉄筋降伏後は解析よりも実験

の回転剛性が大きくなるとともに、アンカーリング拔出しが生ずる最大耐力値については、試験結果に対して解析結果は±15%程度となった。

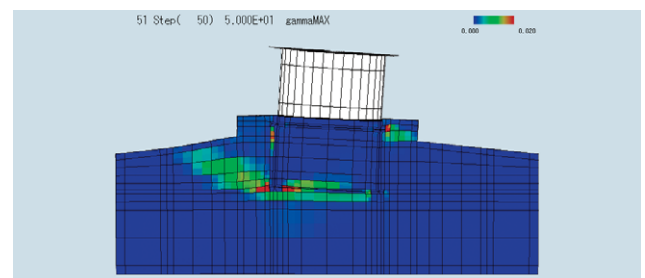
両モデルとも、試験結果と若干差はあるものの、構造物のモデル化や材料特性の設定を適切に実施することによって、3次元非線形FEM解析が、上記試験で確認されたアンカーリングの引抜きせん断破壊耐荷挙動およびコーン状のひび割れが生じる破壊モードを定量的に再現できることを確認した。



第5図 曲げモーメント-回転角関係

第6図に、試験体No.1の最大曲げモーメント時における最大せん断ひずみ分布を示す。第4図に示した試験体切断面のひび割れ状況と比較すると、アンカーリングベースプレート水平面に対して拔出し側に22.5度方向のせん断ひずみが卓越しており、実験結果のひび割れ傾向と一致していることを確認した。

なお、本報告では記述していないが、No.3でも、拔出し側に22.5~45度方向にひずみが大きい要素がみられており、概ね実験結果を捉えられることを確認している。



第6図 最大せん断ひずみ図(試験体No.1)

## 3 今後の展開

今回検討を行った改良基礎モデルについては、載荷荷重に対するアンカーリングの変位量大きいものの十分実用に供する耐力と安全性を保有していることが確認できたため、次期開発地点において適用を検討したい。

また、研究で得られた成果は、土木学会指針に掲載された現行の風車基礎設計手法の妥当性を技術的に裏付けるものであり、幅広く学会等へ公表予定である。



(現所属) 岐阜支店 飛騨電力センター  
秋神ダム管理所

執筆者 / 滝川 浩