

## 大型陸上風力基礎のアンカーボルト作用荷重が基礎コンクリートに及ぼす影響

(株)大林組 正会員 ○ 山口 裕和 (株)構造計画研究所 正会員 秦 逸平  
(株)ユーラスエナジーホールディングス 齋藤 智久 (株)関電工 加藤 一郎

### 1. はじめに

風車タワーの基礎への定着方式の一つとしてアンカーボルト（以降ABL）形式があり，その風車設置時における設計ボルト張力は，風車運転時荷重や地震時荷重等の影響を考慮した規定がなされている<sup>1)2)</sup>．一方，陸上風力発電機は大型化の一途を辿っており，ABLに作用する荷重値も同じく増加している．

本稿では，ABLに載荷される荷重（ABL張力含む）が，ベースプレート（以降BPL）およびアンカープレート（以降APL）を介して基礎コンクリートおよびグラウトに及ぼす影響を3次元FEM解析により定量的に確認し，局所的に発生する圧縮力や引張力に対する耐力，ならびに疲労強度に対する検証を実施した．

### 2. 構造および使用材料

風車およびABL部の構造図を図-1に示す．ABLの設計ボルト張力は，疲労耐力設計法<sup>2)</sup>により659kNと設定した．ABL本数は160本（80本，2列），サイズはM48，強度区分は8.8となる．表-1に材料物性を示す．

### 3. 解析モデル

解析モデルは，ABLを除く各部材をソリッド要素と

表-1 材料物性

	規格	設計基準強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ]
基礎コンクリート	-	36	25,900	0.2	24.0
グラウト	-	90	43,000	0.2	26.5
ベースプレート	SM520	325	205,000	0.3	77.0
アンカープレート	SM520	335	205,000	0.3	77.0
アンカーボルト	-	-	205,000	0.3	77.0

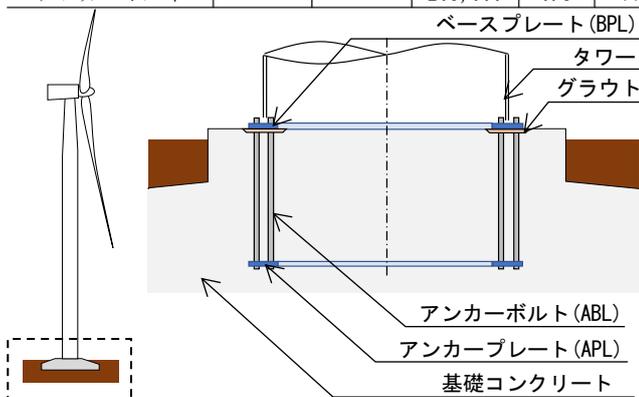


図-1 風車およびアンカーボルト部

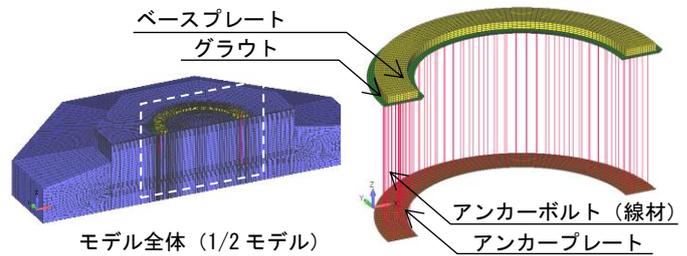


図-2 解析モデル図

表-2 ステップ解析

Step	作用	荷重
1	永続作用荷重1	基礎躯体自重（コンクリート，グラウト，ベースプレート，アンカープレート）
2	永続作用荷重2	アンカーボルト設計ボルト張力 (659kN/本×160本=105,440kN)
3	永続作用荷重3	タワー，風車自重(4,721kN)
4	変動作用荷重	代表的な風荷重：表-3 (タワー基部での水平力，曲げモーメント)

表-3 タワー基部における変動作用

照査項目	荷重ケース	水平力 F(kN)	曲げモーメント M(kNm)	繰返し回数 N(回)
長期	定格運転時最大	780	55,500	-
短期	発電時最大	1,260	107,900	-
疲労	定格運転時平均	460	36,000	5×10 <sup>6</sup>

した1/2面对称モデルとした．ABLは線材とし，初期軸力として設計ボルト張力を入力した．APLとコンクリート間は，非線形ばね要素により剥離を考慮し，他は線形要素とした．図-2にモデル図を示す．解析は各荷重状態を考慮したステップ解析とし（表-2），変動荷重は照査項目に応じて設定した（表-3）．

### 4. 解析結果と補強策

(1) 永続作用荷重載荷時（Step3完了時）

変形図，鉛直方向変位コンター図を図-3に示す．ABL張力が支配的であり，BPLおよびAPLを介してコンクリートおよびグラウトに圧縮力が作用する．APLの上部における変形に伴いAPL端部のコンクリートは引張応力が発生する．

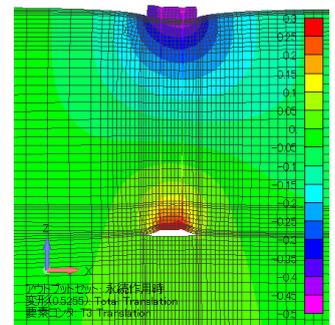


図-3 変形図，鉛直方向変位コンター図

キーワード 陸上風力発電，アンカーボルト，グラウト，疲労検討

連絡先：〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組土木本部生産技術本部設計第三部 TEL03-5769-1314

(2) 定格運転時最大荷重載荷時（長期荷重時照査）

コンクリートの引張最大主応力を図-4に示す。引抜き側、APL 端部近傍のコンクリートに、引張強度を超える引張応力が集中する範囲が確認された（図-5）。この応力は上述のABL張力による影響が大きく、永続して作用する。そこで、指針<sup>1)</sup>に準じた補強鉄筋の配置を工夫し、この引張力を負担すべく当該箇所の補強鉄筋量を増やし配置した（D35、80本）（図-6）。

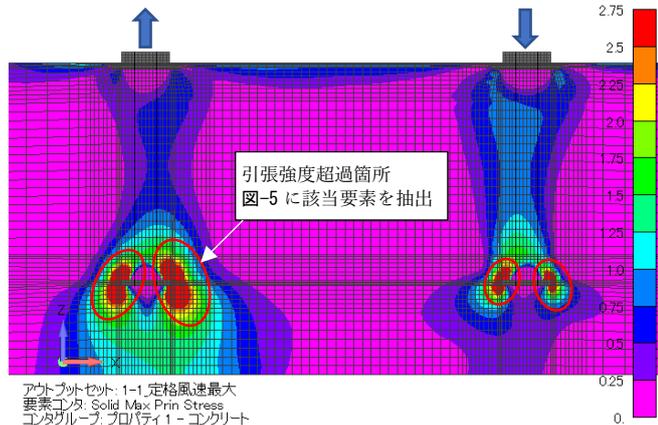


図-4 コンクリートの引張最大主応力

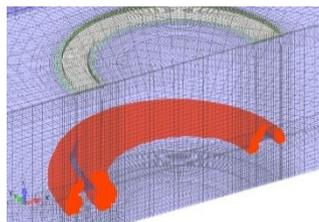


図-5 引張強度超過箇所

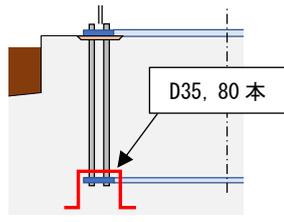


図-6 補強鉄筋

(3) 発電時最大荷重載荷時（短期荷重時照査）

短期での荷重値が最大となる緊急遮断時のケースとなる。グラウトおよびコンクリートの圧縮応力は短期許容応力度以内であった（図-7）。ただし、引張側のBPL付近のコンクリートで局所的に引張強度 $1.6\text{N/mm}^2$ を超える応力が発生した（図-8）。当該箇所は天端のかぶり範囲のため、SUS材の溶接金網による補強を行った。

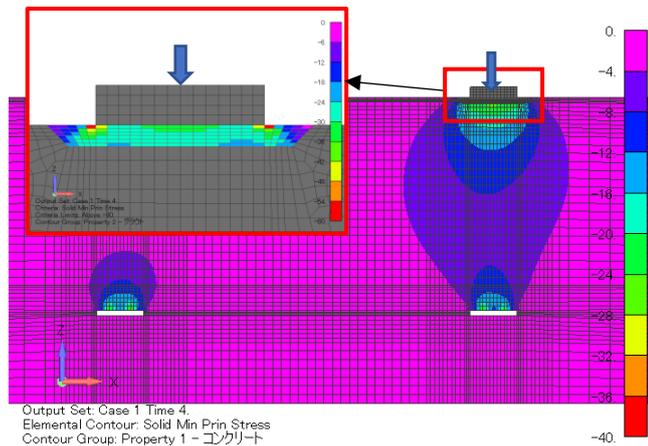


図-7 コンクリートの圧縮最小主応力

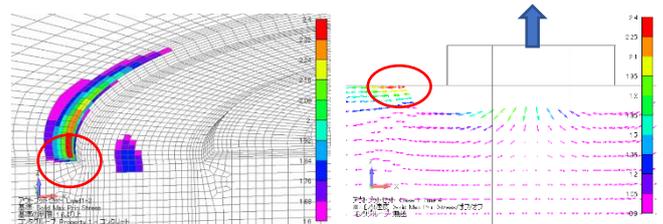


図-8 コンクリート引張応力コンター図、ベクトル図

(4) 定格運転時平均荷重載荷時（疲労照査）

本稿では、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>における設計疲労強度を用いグラウトおよびコンクリート部に対する疲労照査を実施した。検討は、変動する荷重に対し等価な荷重値を1つ設定する簡便法とし、繰返し回数を一般的な疲労限とされる $5.0 \times 10^6$ 回にて設定した。照査は、コンクリートに作用する変動荷重が顕著となるグラウト直下（BPL 下面）およびAPL 上面にて実施した。変動応力最大値を設計疲労強度で照査した結果を図-9に示す。全て疲労寿命は $10^9$ 回以上であり、十分な裕度を有していることを確認した。

なお、BPL およびAPL に発生する応力は、全荷重ケースの各許容値を下回ることを確認している。

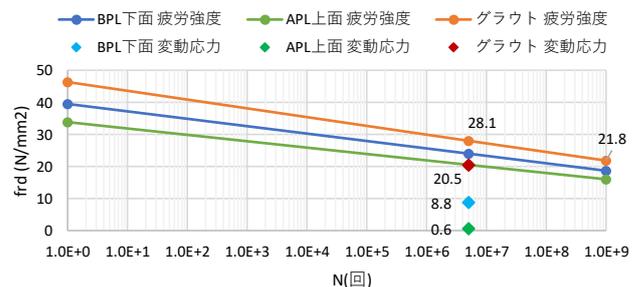


図-9 グラウト、コンクリート疲労照査

5. おわりに

本解析を通し APL 近傍のコンクリートには大きな引張応力が発生し、補強鉄筋を要することが改めて確認された。また、BPL 付近のコンクリート部においても局所的に引張強度を超える応力が発生する事を確認したが、溶接金網による補強で対処できることも合わせて確認した。一方、繰返し荷重による疲労破壊は、その設計疲労強度に対して荷重値が十分小さい値であり、安全であることが確認できた。

参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版]，2011
- 2) 日本海事協会：アンカーボルトの設計ボルト軸力に係る今後の取り扱い（案），2019
- 3) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書 設計編，2018