

風力発電タワー

－ Hexcrete による大型化が再生可能エネルギーの普及を拡大する －

著：Sri Sritharan
訳：高津比呂人

風力発電量が米国の中西部では急速に増加しているが、その他の地域では増えていない。ハブ高さ（訳者註：風車回転軸の中心高さ）が 100 ～ 140 m の風力発電タワーが増加すれば、この状況を劇的に改善することができる。風力発電タワーの高さが 80 m より高くなると、鋼製のものよりもコンクリート製タワーの方がコスト面で有利となり得る。Hexcrete のコンセプトは、100 m 以上のハブ高さの風力発電タワーにおいて大変革をもたらそうという考えのもと開発されたものである。このタワーは六角形のポストテンション柱と、それをつなぐ長方形あるいは台形のパネルによって構成されている。この工場製作の部材を、六角形の断面を有する先細りのタワーにポストテンションを用いて組み立てる。この Hexcrete ユニットと、その接続部の性状を検証するための大規模実験が実施された。

キーワード：エネルギー、六角形、Hexcrete、ハブ高さ、風力発電タワー

1. はじめに

米国内に導入された風力エネルギーは、ここ 10 年間で大きく増加してきた。2014 年末の時点で、米国では 66 GW の風力発電容量が設置されている。世界の中で米国は第 2 位の設置容量を有しており、年間の風力発電量に直すと、現在第 1 位にランク付けされる。2014 年の米国の風力発電量は、1700 万世帯の平均的な米国の家庭に電力を供給するのに十分な量であり、全米での電力発電量の約 4.4 % に相当する。2015 年に米国エネルギー省 (DOE: Department of Energy) が発行した Wind Vision (米国における風力発電の新時代) では、風力エネルギーによる発電量が、2020 年には全体の 10%、2030 年には 20%、2050 年には 35% に成長すると予測している。

これらのシナリオは、風力エネルギー技術の継続的な進歩と、均等化発電コスト (LCOE: Levelized Cost of Energy, 1 kW 時あたり何セントで発電できるかという指標) の削減により確実に達成可能となる。現在、米国における導入済み風力発電容量は、2007 年時点の 4 倍となっており、2020 年までに風力発電量 10% を達成することは困難な作業ではないと推定される。2030 年と 2050 年のシナリオを達成するためには、追加でそれぞれ 136 GW と 252 GW の陸上での風力発電容量が必要であり、2050 年までに 10 万基以上の風力発電タワーを建設する必要があることを意味する。現在の風力発電タワーは 20 ～ 25 年の供用期間で設計されており、それらを新しい風力発電タワーに更新する需要が高まると考えられる。

テキサス州、カリフォルニア州、アイオワ州が、現在の米国の風力発電容量の導入をリードしている一方、他の州（とくに中西部）で急速に風力発電量が増加している。中西部の州はもっとも良好な風力資源を有すると考えられるので、実用規模の風力タービンのハブ高さは、通常 80 m のものである。2014 年の時点で、アイオワ州

は風力による発電量が国内で 1 番の 28.5 % に達しており、米国風力協会は次の 5 年でアイオワ州の風力による発電量が、電力需要の 40 % に達すると予測している。2014 年の時点では、風力発電による電力供給量が 7 州で 15% 以上、9 州で 10% 以上、19 州で 5% 以上となっている。

設置された風力発電容量が大幅に増加しているのにも関わらず、この業界ではつねに 1 つの問題を抱えている。風力発電が中西部で急速に成長してきたのに対し、電力需要の非常に高い、東海岸や西海岸では同じようにできていないことである。一部の州（たとえば南東部）では、まったく風力発電に対する潜在能力がないと考えられ、現在の再生可能エネルギー容量はほぼゼロである。もし、ハブ高さを 100 ～ 140 m まで増加させることができると、状況は大幅に改善される。

2015 年、DOE はより高い高度での風力発電を求める報告書を発表した。米国エネルギー長官のアーネスト・モニスは、140 m のハブ高さの風車を使えば、全 50 州で風力発電ができる可能性があることを述べている。DOE のレポートから転載した図 - 1 は、新規に風力発電が可

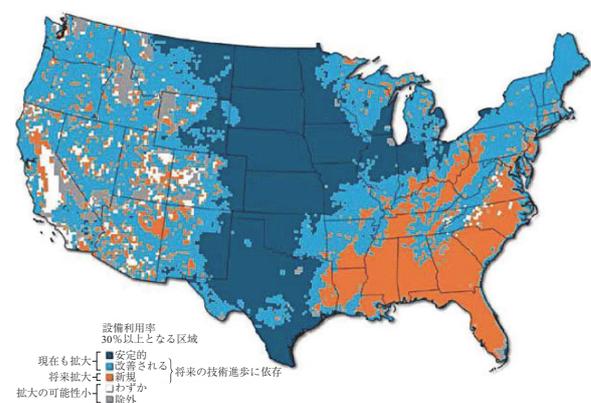


図 - 1 140 m のハブ高さで風力発電の設備利用率が 30% 以上になる地域

能になるあるいは、大きく改善される可能性がある地域が示されており、いくつかの南東部の州も風力発電の新規地域として特定された。電力需要が大きな地域で風力発電量が増えると、風力発電の役割がより重要となる（再生可能エネルギーの増加、温室効果ガス排出量、大気汚染および水消費量の大幅な削減に寄与する）。たとえば、2013年に米国の風力発電では、1.25億トン以上のCO₂排出量、173,000トンのSO₂排出量、1382億リットルの水消費量を削減したとの報告もある。

2. 高層風力発電タワー

どの地域でも、タワーを高く、ハブの位置を高くすることで、より風速があり、安定して吹く風域に達することができる。ハブ高さを20m増加させると、風力エネルギー産出量が10%増加する可能性が研究により示されている。ハブ高さを高くすれば、現在開発中のものより大容量のタービンと長いブレード（訳者註：羽根）も必要となる。ローター（訳者註：風車部分）の直径が増加した大容量の風力タービンシステムにより、同じ発電量を得るのに必要な風力発電タワーの基数を減らすことができる。上記の機構により、風力発電の初期投資と生産コストを下げるのが期待される。

ハブ高さを高くすることの利点は、古くから認識されており、風力発電タワーの高さは1990年代には40m未満だったものが次第に増加し、現在では実用規模のもので80mとなっている。現状、それぞれ工場で作られた3つの鋼管を特殊なトレーラーで現場に運んで80mのタワーを組み立てている。鋼管基部の直径は約4.1mで、高速道路の幅高さ制限に近い値になっている。鋼製タワーのハブ高さを高くすると、タワーのコストがかなり増加する。この理由として、100mを超えるような高いタワーを実現するためには、高強度鋼を使うか、断面を分割して現場で組み立てる設計とする必要があるからである。

3. コンクリートタワー

80mを超える風力発電タワーの場合、鋼製に比べてコンクリート製の方がコストに優れる可能性が報告されている。風力発電タワーにコンクリート構造を採用するにあたって、2つのコンセプトが研究されている。第一のコンセプトは、鋼製の考え方を拡張したもので、コンクリートシェルをタワーに用いる方法である。この考え方は最初に欧州で採用されたもので、プレキャストコンクリートのモジュールを、鉛直方向や水平方向に接続する必要がある。普通強度のコンクリートを使う場合、この方法では設置面積が40～50%増加し、同じ高さの鋼製のタワーに比べて断面の厚さは5倍以上になる。設置面積が大きくなることで、ブレードの先端とのクリアランスの問題が生じる。また、壁厚が増えることでタワーの重量が増すので、運搬コストや建方コストも増加する。さらに、変断面コンクリート（タワーは先端に行くにしたがって、直径が小さくなるので）の製造には特別な型

枠が必要となり、その初期投資がかさむため、コンクリート製タワーの製造は少なくなり、市場競争力を失う。セグメントの作り方によって、変断面コンクリートシェルの形が異なるので、輸送上の課題も生じる。

第二のコンセプトは、コンクリートを鋼製のタワーの支持に用いる複合構造である。この場合、コンクリートは基礎の台座として使用される。鋼材とコンクリートを組合せる方法は確かに斬新ではあるが、コンクリートのセグメントを鋼管タワーを支持するためだけに使うのでは、プレキャストコンクリート業界が風力発電分野へ提供できる技術革新に限られるうえに、コンクリートも鋼材も効率的に使用できていないことになる。

4. Hexcrete タワー

Hexcreteのコンセプトは、ハブ高さが100mを超える風力発電タワーに革新をもたらすことを目的に開発された。まず最初に、高いタワーをプレキャストコンクリートで製造するのに障害となる事項が特定された（たとえば、製造しやすく、同じ断面の部材が繰り返され、輸送と搬入の課題が少ない）。Hexcreteのコンセプトは、こうしてもっとも斬新な変化を実用規模の風力発電タワーに導入し、複合的な利益をもたらすために考案された。

このタワーは、ポストテンションの六角形柱と、それらをつなぐ長方形あるいは台形パネルから成る。図-2に模式図を示す。柱やパネルは簡単に工場製作できるよう設計されている。高性能コンクリート（HPC）や高強度コンクリート（HSC）、および超高性能コンクリート（UHPC）が柱やパネルに使用される。HPCやHSCの圧縮強度は50～100MPaで、UHPCの平均圧縮強度は180MPaである。工場製作のモジュールは、ポストテンションにより、六角形の断面をもつ、テーパの付いたタワー形状に組み立てられる。

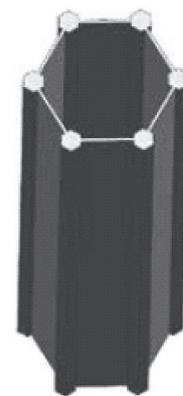


図 - 2 Hexcrete タワー断面の模式図

5. Hexcrete タワーの特徴

幅広く適用するために、Hexcreteのコンセプトの開発にはいくつかの特性がある。まず、タワーの個々の構造部材の寸法とタワーの寸法を最小限に抑えるために、高

強度セメント系材料およびプレストレスを利用している。部材断面形状は、高価で特殊な型枠を使わないよう、組立コストを最小化するようなものを選択した（図 - 3）。モジュールも、専用トレーラーを必要とせずに容易に輸送できるように設計された。さらに、モジュールを工場または建設現場両方でプレハブ化できるようにしたことで、地元の建設業者のコストを最小化し、建設現場での建て方効率を最大化することができる。プレキャストコンクリート製品を使用するにあたって、プレキャストコンクリート柱とパネル間の信頼できる接続方法が開発された。最後に、建設業者には複数の建て方の選択ができ、タワーは Hexcrete のセルを垂直に積み重ねることもできるし（図 - 4）、または、まず柱を所定の高さまで建て、パネルを取り付ける前に PC 鋼材で締め付けても良い。

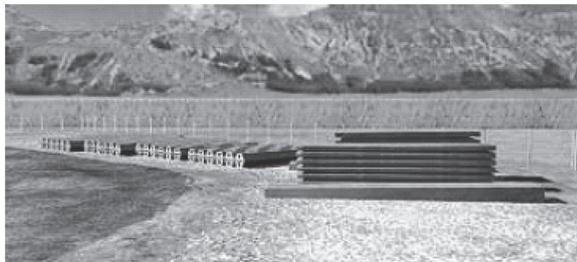


図 - 3 タワー建設サイトに搬入された Hexcrete を構成するプレキャストコンクリート部材

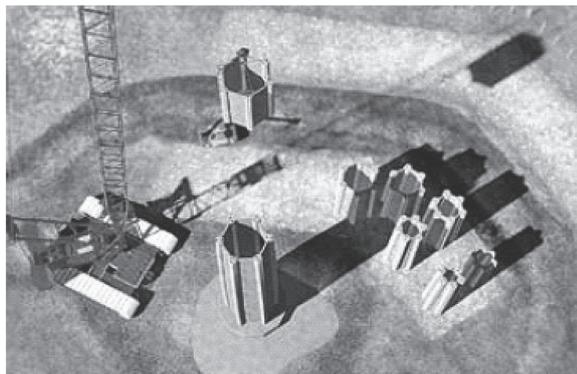


図 - 4 Hexcrete の建て方（あらかじめ Hexcrete セルを組み立てた場合）

Hexcrete タワーは、セルフクライミング方式も導入できる。もっともコスト効率の良い建て方の方法が、Hexcrete が広く使われだすと進化するであろう。タワーの鉛直荷重は、柱を伝わって流れるので、浅い基礎、深い基礎の両方において Hexcrete タワーを支持することになる。最近では風力発電タワーの基礎に通常浅い基礎が使われているが、これがどの風力発電所にとってもコスト効率の高い方法という訳ではない。

6. Hexcrete タワーの利点

鋼製やコンクリート製のタワーと比較して、ユニーク

な多くの便益を Hexcrete タワーでは実現することができる。まず、建設現場と工場のプレハブ化を効率的に促進することができる。第二に、特殊な型枠を必要としない。第三に、工場製作のプレハブモジュールは、特殊な輸送の必要性がない。第四に、鋼管タワーの場合、時には海外で生産し、米国内の現場に出荷されているのに対し、任意の風力発電所の建設可能性がある地域の近くで、プレキャストコンクリート工場を見つけることが容易である。

Hexcrete は、基礎の設置面積や柱の直径、壁の厚さを増やしたり、それに合わせてプレストレスを変更することによって、さまざまなタワーの高さに対応することができる。鋼製タワーの設計は疲労によって支配され、20年から25年の供用期間で設計されている。Hexcrete を使用すると、疲労が支配的ではなくなるので、大きなコストアップをとまわずにタワーの寿命を容易に倍増させることができる。最後に、タワーを容易に小さいモジュールに分解することができるので、タワーの撤去コストを削減できる可能性もある。

7. さらなる助成研究

Hexcrete タワーコンセプトの成功と、重要な接合部の試験の完了により、多くの専門分野にわたるプロジェクトチームは高層風力発電タワー推進の助成金と技術をさらに進めるための追加の資金を確保し、商業的使用のための準備が整った。

この取組みの一環として、異なるタービンサイズの、120 m と 140 m のハブ高さの Hexcrete タワーの設計がなされ、汎用性を実証した。また、Hexcrete と鋼管タワーの組合せによるコスト効率についても検討がなされている。プロジェクトチームでは、120 m と 140 m のハブ高さの Hexcrete タワーの競争優位性を、LCOE を算出し他の技術と比較することで評価している。

2.3 MW のタービンと直径 108 m のローターを支持する 120 m の Hexcrete タワーの複数のオプションを完成させた。このタービンは、2004 年に直径 82 m のローターのために設計されたが、タワーの高さとブレード技術の進歩により、ローターの直径は、2015 年に受風面積が約 2 倍となる 120 m に増加した。120 m の Hexcrete タワーの最適設計は、HSC 柱と UHPC パネルとが水平方向のプレストレスにより相互に接続された構造とした。また、べつの組立方法も検討され、2つの可能性のある方法が導き出された（図 - 5）。

一つ目は、8つのセルを用いて Hexcrete タワーを全高の 2/3 まで組み立て、鋼管を上部 1/3 に用いる方法である。二つ目は、11 個の Hexcrete セルを用いてタワーを完成させる方法である。組立方法のアニメーションを <https://youtu.be/XizC5spy3mg> で見ることができる。現在利用可能なクレーンの能力を考慮し、その賃料が最小となるようにタワーセルの数・サイズ・建て方の順序を決定した。一つ目の組立方法の設計図・建て方図が製作され、承認が得られ次第公表される。最初のオプションが、2つ目



図 - 5 Hexcrete のオプション (左: 8つの Hexcrete セルと鋼管を組み合わせる方法, 右: 11個の Hexcrete セルですべてを組み立てる方法)

の Hexcrete をすべてに使うオプションに比べて、LCOE において若干のアドバンテージを有しているが、多くのタワーが建てられ、現場での革新的な建て方の方法が開発されると状況が変わるであろう。予備の評価結果では、どちらの Hexcrete オプションでも、一般的なサイトにおける 80 m の鋼製のタワーの風力発電施設よりも LCOE において競争力がある。

現在進行形のプロジェクトには、2つの大規模実験が含まれている。120 m のタワーの上部の実物大の Hexcrete セルを組み立て、稼働時・極限時・終局時の状態を確認する荷重を加えた (図 - 6)。主目的は、接続部の挙動の確認と、いくつかのプレキャストコンクリートモジュールを組み立てた Hexcrete セルが、全体としてねじれ荷重を含むタービン荷重を伝達する能力について評価することである。稼働時・極限時のさまざまな組合せ荷重の載荷時には、タワーセグメントは損傷することなく荷重を伝達することができた。さらに、破壊メカニズムを確認するため、追加の変位制御による試験が実施された。このフェーズの試験で、Hexcrete はじん性に富む挙動を示し、タービンとローターの自重による軸力を保持し続け、損傷は主に HSC 部材のかぶりコンクリートの剥落に限定されていた。2つ目の実験は、部材と接合部の耐疲労性を評価するものである。

プロジェクトの次のフェーズは、2.3 MW と 3.2 MW のタービンを支持する、高さ 140 m の Hexcrete タワーである。これは、風力エネルギー産業に変革をもたらすの

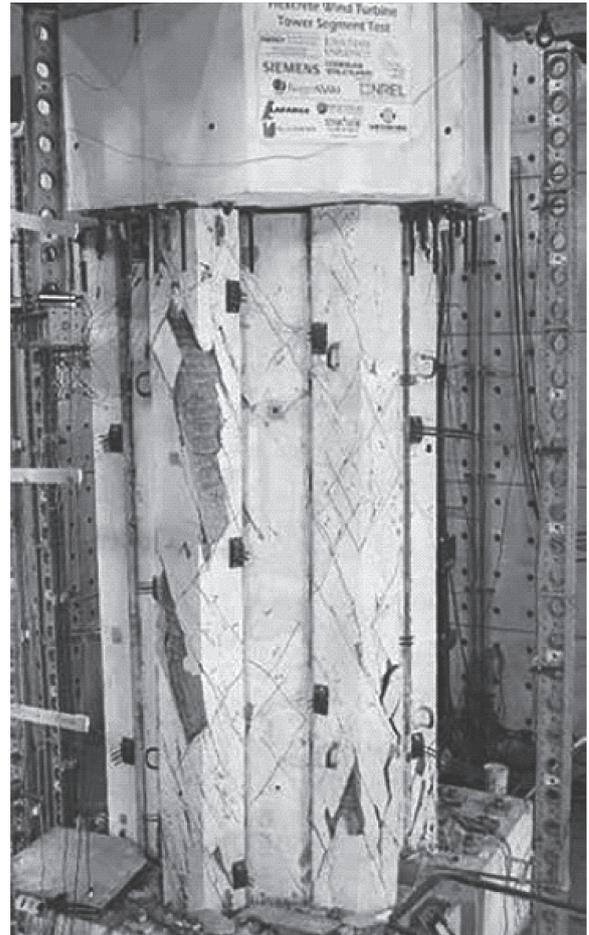


図 - 6 Hexcrete の実大実験 (120 m のタワーの上部付近を模擬)

に必要な事業化計画の策定と共に完成する見込みである。風力エネルギー業界とプレキャストコンクリート業界にとって、プロジェクトの次のフェーズの一部の成果について情報収集し、事業化計画に貢献する好機となるであろう。この活動に参加したい PCI メンバーは、<http://sri.cce.iastate.edu/hexcrete/> でプロジェクトのウェブサイトにサインアップすることができ、追加の情報やプロジェクトの進捗状況に関する情報を得ることができる。

原 典

Sri Sritharan: Wind turbine towers, PCI Journal, vol.60, No.6, pp.33-38, 2015

[2016年3月28日受付]