

報文

# 北海の風力発電基礎における 大口径鋼管杭の衝撃載荷試験と施工管理

マティアス・シャラート\* / オズワルド・クリングミュラー\*\* / 松本 樹典(訳)\*\*\*

本論文は、「Monitoring of driving and high-strain dynamic load tests of open-ended steel pipe foundation piles for offshore wind turbines」の抄訳で、キーワードは「海洋風力エネルギー」「北海での杭打ち」「大口径打込み杭の計測」「衝撃載荷試験」である。要約すると以下のようになる。

2011年に、German Federal Maritime and Hydrographic Agency（ドイツ連邦海事水路機関）は、「海洋風力発電タービンの設計（Design of Offshore-Wing turbines）」解説書を発行した。これによって、ドイツ北部とバルト海の風力発電設備の基礎となる大口径打込み杭に対して、衝撃載荷試験と打込み時の動的計測が義務づけられた。

この論文は、ドイツ北海での最初の商業海洋風力発電所における大口径開端鋼管杭に対する、衝撃載荷試験と杭打ち全プロセスの動的計測の成功適用例を述べる。動的計測は、打撃エネルギーと杭応力の測定を含んでいる。特別な載荷条件、無線計測、杭の準備、計測装置の装着などが述べられ、議論される。そして、衝撃載荷試験を実施することによって、海洋基礎杭についての信頼性の高い劣化検証に関する重要な情報が得られることを示す。

## 1. はじめに

ドイツでは石油やガス採掘における海洋プラットフォームの基礎となる打込み杭の計測は一般的であるが、出力が5 MW以上の海洋風力発電タービンのための大口径基礎杭を水深20mから40mに建設することは新しい挑戦の1つである。ドイツにおける二酸化炭素の排出量を2020年までに40%減少することに関連して、ドイツ政府は海洋風力電力生産に資金援助することを決定した。ドイツ北海およびバルト海において計画または承認された風力発電所のほとんどでは、風力タービンは1本または三脚式の開端打込み鋼管杭の上に建設される。そのような杭では水平外力および繰返し荷重の割合が大きいため、強度の高い土に打込むことが必要である。これらの杭については、打込み中および打込み後の鉛直支持力をできるかぎり正確に評価することが重要である。極限鉛直支持力は、設計において繰返し荷重の影響を考慮したり水平抵抗を評価するための基礎資料となる。これらの杭の支持力に関して、これまで十分な経験がない。50MNまでの静的載荷検証試験は、水深20mから40mの海洋風力

発電施設における基礎杭に対しては適切ではない。

動的計測によって、杭の鉛直支持力という地盤工学的観点に加えて、ハンマー性能のみならず正確な杭軸力分布を求めることができる。

そのため、2001年初期にGerman Federal Maritime and Hydrographic Agency（ドイツ連邦海事水路機関）は、「海洋風力発電タービンの設計（Design of Offshore-Wing turbines）」の解説書を発行した。これによって、ドイツの風力発電設備の基礎となる大口径打込み杭に対して、衝撃載荷試験と打込み時の動的計測が義務づけられた。

## 2. ドイツにおける海洋風力発電所

ドイツで最初の海洋風力発電所であるAlpha Ventusの建設が2009年末に完了した。このプロジェクトは、政府が設立した3つのエネルギー関連会社の試験的・研究プロジェクトであった。風力発電所の建設は2010年4月に開始された。北海沖合60kmの水深30mの箇所建設された6基の三脚式基礎と6基のジャケット基礎の上に、12基の風力タービン（出力5 MW）が建設された。これらの三脚式基礎とジャケット基礎は、外径が約1.8mから3.5m、長さ約40mの打込み鋼管杭で支持されている。風力発電タービンは20年の供用期間に対して設計されており、2011年12月までに230GWhの電力が生産されている。風力発電タービン機材の開発と製作は、ヨーロッパの20社によって行われた。投資額は250万ユーロであった。

この風力発電施設の数km北東の水深38mから33mの場所での別の風力発電施設（Borkum West II）のために、2011年秋から長さ35mから45mの杭が、80基の風力発電タービンの三脚式基礎のために打ち込まれている。三脚式基礎はあらかじめ打ち込まれた杭の上に設置される。

2010年3月から、ドイツ北海における最初の風力発電施設が建設中である。BARD Offshore 1と呼ばれるこの風力発電施設は、沖合約100km北方に位置している。5 MWの発電能力を有する80基の風力タービンが水深40mまでの場所に建設される予定である。これらの基礎は三脚式基礎である。このプロジェクトの詳細については3. で述べる。現在までに約70基の風力タービンが建設されている。

\* Matthias Schallert GSP

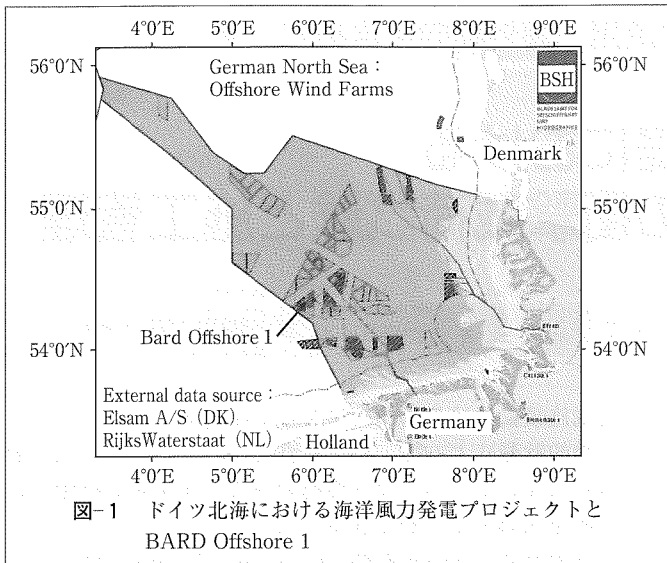
\*\* Oswald Klingmüller 同上

\*\*\* MATSUMOTO Tatsunori 金沢大学 理工研究域 デザイン学系 教授

マンハイム, ドイツ

同上

金沢市角間町



2010年3月に建設が開始されたBaltic 1は、21基の風力タービン (2.3MW) を有するドイツバルト海沖合23 kmに位置する最初の商業風力発電施設である。1脚式基礎となる長さ37m、外径4.3mの杭が水深16mから19mのところ、平均3,000回の打撃回数で約20mの貫入深さに達するまで打ち込まれた。風力タービンのタワーが結合部材を介して杭に連結された。

ドイツバルト海のRügen島の32km北方で、風力発電施設であるBaltic 2の建設が予定されている。出力3.6MWの80基の風力発電タービンが39の1脚式基礎 (最大長さ72m、外径約6m) と41のジャケット基礎 (杭長さ46m、外径約3m) 上に建設される。1脚式基礎は水深23mから35mの場所に、ジャケット基礎は水深35mから44mの場所に建設される。

さらに、いくつかの地点で風速や波高などの重要な環境データの測定のための気象塔が風力施設として (Amrumbank WestおよびNordsee Ost風力施設)、あるいは北海におけるFINO 1とFINO 3やバルト海におけるFINO 2のような研究施設として建設された。

2011年12月時点で、ドイツでは申請中あるいはGerman Federal Maritime and Hydrographic Agency (ドイツ連邦海事水路機関) で計画されていた113の海洋風力プロジェクトが存在した<sup>3)</sup>。

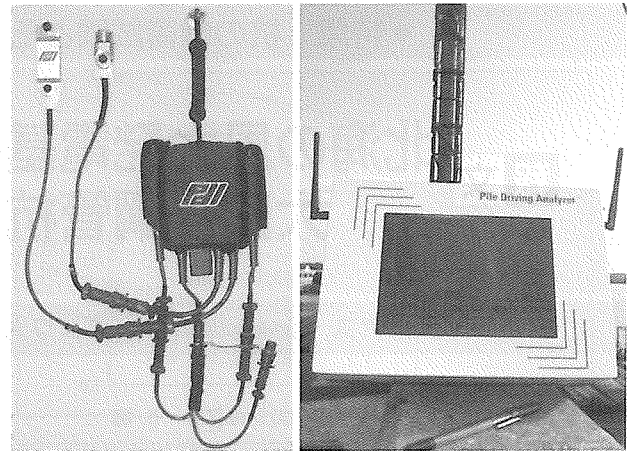


写真-2 ひずみおよび加速度センサー、無線データ転送装置(左)とPile Driving Analyzer - Model PAX(右)

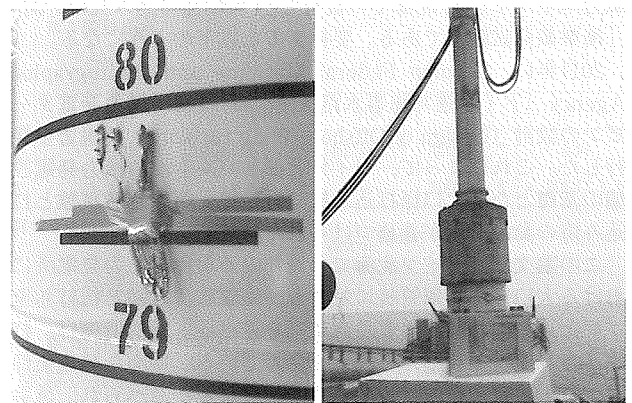


写真-3 ボルト止めされた計測装置(左)と杭打ち計測計(右)

### 3. ドイツ北海における最初の商業風力発電施設の風力タービンの基礎

#### 3.1 事業概要

ドイツ北海における最初の商業風力発電施設であるBARD Offshore 1はまだ建設中である (図-1)。

下層地盤は、シルトと粘土層を介する砂質土から成っている。ほとんどの風力タービン位置の杭先端の砂層は中密あるいは高密である。基礎杭の貫入長さは地盤条件によって異なる。

基礎は3本の鉛直打込み開端鋼管杭からなる三脚式構造を有する (写真-1)。最大水深は約40mであり、杭長は80mから90mである。杭は約3mの外径で、板厚は変化している。2012年7月までに64基 (192本の杭) の風車の基礎が建設されている。

#### 3.2 杭の計測と衝撃 (動的) 载荷試験

打込みハンマーは、ラム質量100tを有する油圧ハンマーMHU1900Sで、杭打ち中に打撃エネルギーが段階的に増加される。Pile Dynamics社製のワイヤレス方式のPile Driving Analyzer (Model PAX) が、杭打ちの測定および再打撃試験に使用された。

無線転送装置、ひずみおよび加速度センサー (写真-2) が杭頭部の対称位置に取り付けられる (写真-3)。衝撃载荷試験における無線データ転送装置利用の利点は、

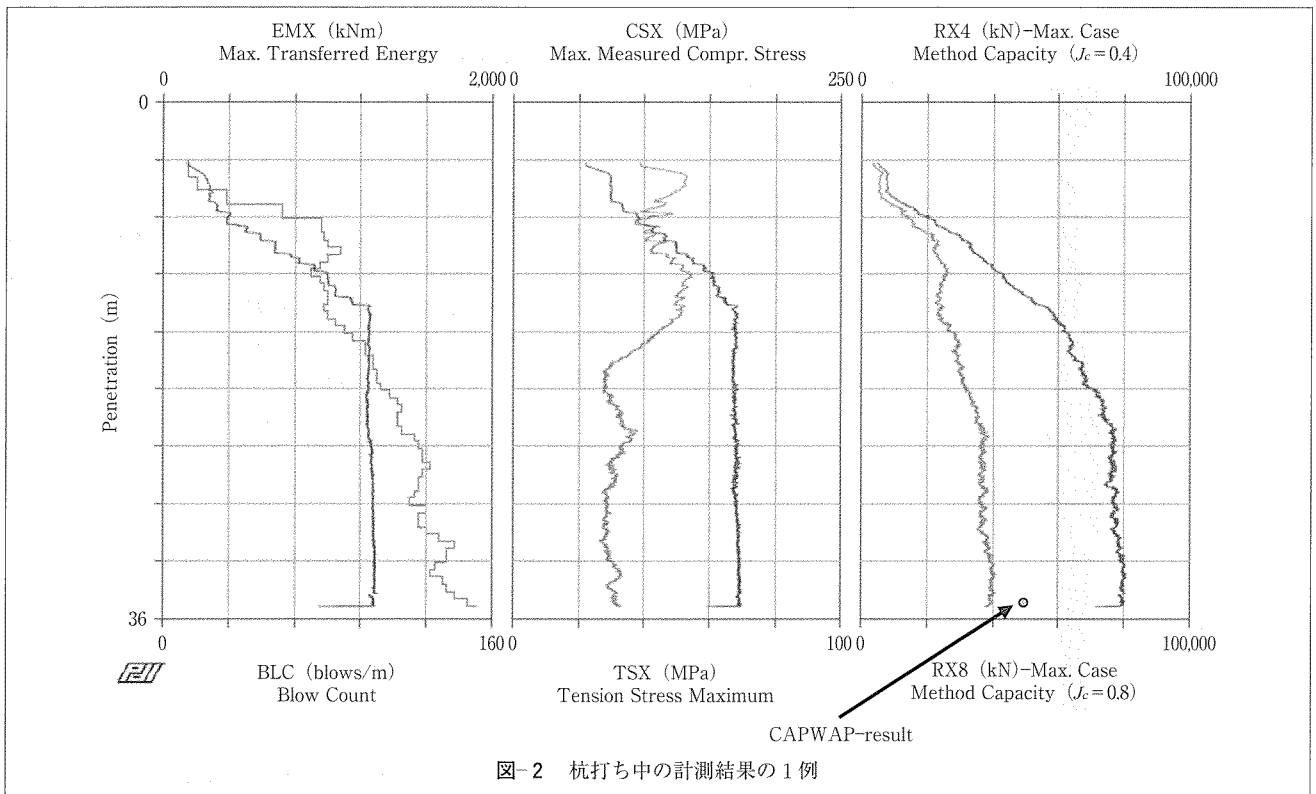


図-2 杭打ち中の計測結果の1例

センサーとデータ記録装置の間のケーブルが要らないことである。そのため、杭打ち作業が大幅に改善され、ケーブルの切断、ケーブルや接続部の湿気の影響による不正な計測を避けることができる。ブルトウス式の無線データ転送距離は100mを超える。無線データ転送は稼働時間30時間の補助電池電源を備えている。測定装置が杭と一緒に釣上げられる前に作動が開始されるため、長時間の稼働時間が重要である。計測装置の取付けと杭打ち作業あるいは気象条件によって、杭打ちの中断の可能性がある。

計測はGSP技術者によって行われた<sup>11)</sup>。「海洋風力発電タービンの設計 (Design of Offshore-Wing turbines)」解説書に従って、計測は約10%の風力発電タービンに対して行われ、計測位置では3本すべての杭に対して実施された。ひずみと加速度は各打撃に対して計測される。

図-2は、これらの杭の計測結果の1例である。左図は、伝達エネルギーEMXと貫入長さ1m当たりの打撃数BLCである。中図は、杭頭のセンサー位置での最大圧縮応力CSXと最大引張り応力TSXである。右図は、 $J_c$ を0.4および0.8と仮定したCASE法による杭支持力である。

最終打撃において、周面摩擦の分布と先端抵抗を求めするために、CAPWAP解析が実施された(図-2右)。

いくつかの風力タービン杭について、養生期間の後に再打撃試験が行われた。これによって、ある特定の地層でセットアップ(杭打ち終了後の時間経過に伴う支持力増加)が評価された。

図-3は、ある砂地盤における3本の基礎杭のCAPWAP解析から得られた杭周面摩擦の分布(平均値)を示している。比較のため、コーン貫入試験の $q_c$ 値の分布も

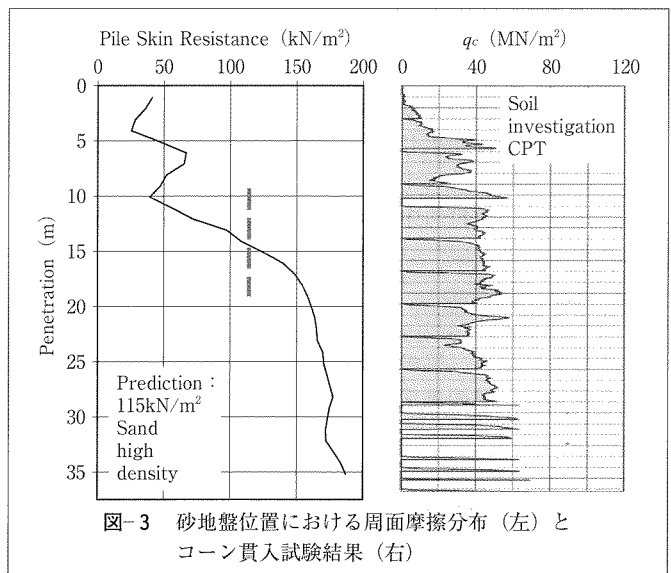
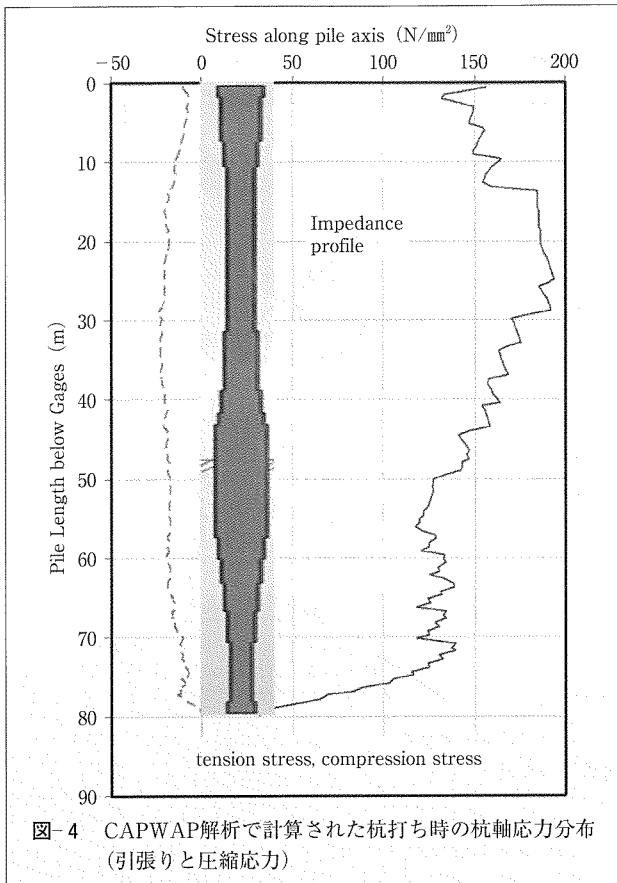


図-3 砂地盤位置における周面摩擦分布(左)とコーン貫入試験結果(右)

示した。さらに、 $q_c$ 値から経験的に求めた砂層の杭周面摩擦(115kPa)も示されている。地盤調査(CPT)結果に基づいたこの砂層での杭の支持力予測結果は、衝撃载荷試験によって動員された支持力を過小評価していることが分かる。このことは杭の過剰設計を導くことになるであろう。ただし、この基礎杭の場合のように大きな繰返し水平荷重が作用する場合、このような荷重成分を設計において考慮することが必要であることは自明である。

さらに、将来施工される類似した場所での杭の設計の最適化のために、一打撃当たりの貫入量が小さな打撃についてのCAPWAP解析が実施された。加えて、杭打ちにおける杭軸応力分布がCAPWAPによって計算された(図-4)。これは、杭体の破壊防止や構造物の耐久性の



評価のために重要である。特に、杭打ち後の水平荷重によって大きな曲げが生じる杭断面では、杭打ち過程が構造物の耐用年数に及ぼす影響を明らかにするために、できるだけ正確に杭打ち中の引張り応力と圧縮応力を知ることが重要である。

#### 4. 考 察

上述した結果は、杭の計測と衝撃試験は安全性の検証、設計の適切性、杭の施工性の確保のために極めて重要である。

CAPWAPによる評価手法は、信頼性の高い支持力予測のために杭と地盤をモデル化する。「最もよいマッチング」のために、この現場での設計において杭インピーダンスの変化を注意深くモデル化する必要があった。

深い海域での風力タービンの基礎となる大口径鋼管杭は、三脚式基礎および一本杭基礎において大きな繰返し水平荷重を受ける。水平荷重条件下では支持力予測のために、これまで多くの経験的計算方法が提案されている。これについてはいまだ研究段階である。

要求される水平抵抗を確保するには、杭を強く圧密された土に十分に貫入する必要がある。したがって、大きな打撃力を杭に与える必要があり、杭打ち計測による打撃応力管理が重要となる。

繰返し荷重杭の鉛直支持力および水平抵抗に及ぼす影響を評価するために、Richter et al.<sup>10)</sup>、Kirsch and Richter<sup>7)</sup>、Achmus et al.<sup>1)</sup>などによる計算方法がある。これらの方法は、静的荷重試験による軸方向（鉛直）支持力

に関する知識に基づいている。すでに述べたように、海洋での静的荷重試験の実施は難しい。衝撃荷重試験が軸方向支持力に関する信頼性の高い結果を得ることができる唯一の計測方法である。根入れ部の強度が杭頭部で測定した動的シグナルの解析によって評価できるため、軸方向衝撃荷重試験によって、水平抵抗を評価するための基礎データを得ることができる。そのため衝撃荷重試験は、特に大口径杭に対して将来的にさらに重要になる。

そのような杭の水平抵抗を直接的に得るために可能な手法は、水深、土の種類および杭径によるが、衝撃荷重試験によって評価された軸方向支持力を利用する。また、そのモデル化が代替案として議論されている<sup>6)</sup>。

慎重なCAPWAP解析によって求めた周面摩擦によって、地盤工学者はこれまでの標準的な地層評価および解釈方法による地層評価を改善することができる。

詳細なモデル化による解析結果は、近似的にバイリニアの水平荷重-水平変位関係を推定するのに利用できる。このためには、杭打ちプロセスの正確な計測および信頼性の高いCAPWAP解析による、それぞれの地層のクェーク値の解析結果が必要である。

CAPWAP解析によって、各地層要素の単位長さ当たりの周面抵抗 $R_{ult,i}$ とクェーク値 $q_i$ が求まる。開端杭では、周面摩擦は外周面摩擦として扱われる。1 mの厚さの地層 $i$ のせん断剛性 $k_s$ は式(1)で与えられる。

$$k_s = \frac{R_{ult,i}}{q_i} \dots\dots\dots(1)$$

せん断剛性 $k_s$ はせん断弾性係数に依存し、水平抵抗は弾性係数に依存する。Cooke<sup>2)</sup>によれば、CAPWAP解析によって求めた $k_s$ から、水平剛性 $k_h$ は式(2)で定義される。

$$k_h = \frac{k_s}{4\pi r_o} \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right) \cdot \frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \dots\dots\dots(2)$$

$r_m = 2.5L(1-\nu)$   $L$  = 杭要素の長さ

$r_o$  = 杭外径  $\nu$  = 土のポアソン比

この水平剛性は杭要素の単位長さ当たりの値である。水平抵抗は繰返し水平荷重の限界の定義と同様に、静的な水平抵抗特性の決定のために重要である。

#### 5. 安全性について

衝撃荷重試験は、軸方向支持力の検証方法として世界の基準のいくつかで認められている。ドイツの指針(“EA-Pfähle”)<sup>4)</sup>では、衝撃荷重試験の実施や極限支持力の決定法の記述がある。DINによって発行されたユーロコード7 (EC7) のハンドブック (Handbook Eurocode 7-Geotechnical design-Part 1: General rules' from 2011) は、DIN EN 1997-1: 2009, DIN EN 1997-1/ NA: 2010 (national appendix) と DIN 1054: 2010 (additional national rules to DIN EN 1997-1) を、ドイツにおける1つの地盤設計規則に統合している。

EC7によれば、衝撃荷重試験結果は同様な杭と地盤における静的荷重試験結果との較正をとる必要がある<sup>8)</sup>。EC7のドイツ国内適用書は、同じ現場、類似の現場ある

いは経験などの静的載荷試験の情報を考慮した安全率（較正係数）を定義している。また、実施された試験数、CASE法かCAPWAP解析かの解釈法の違いが抵抗係数の決定に考慮される。

ドイツ連邦海事水路機関によって発行された「Design of Offshore-Wind turbines基準」の解説書によれば、一般的に杭の衝撃載荷試験は、風力発電所敷地内の風力発電タービン位置の少なくとも10%の風力発電タービンの打込み基礎杭に対して実施されなければならない。全試験数は地盤条件の変化の程度によって異なり、地盤調査技術者によって決定されなければならない。衝撃載荷試験は、風力発電所敷地内のそれぞれの地盤状況において、少なくとも2ヵ所において工事開始段階で実施しなければならない。

ドイツでは、以下の事実がある。

- ・荷重条件や海洋条件であるため、静的載荷試験は現実的ではない。
- ・打込み杭の場合、打撃記録は地盤抵抗に関する情報を与える。また、杭の設置方法の種類は場所打ち杭に比べて少ないと仮定される。
- ・ドイツ北部の砂質地盤における打込み鋼管杭の静的載荷試験と衝撃載荷試験の比較実績が多い。

そのため、海洋杭の支持力の較正には類似した地盤での静的載荷試験に対する較正係数が利用される。したがって、砂地盤に打ち込まれた鋼管杭に対しては、静的載荷試験と衝撃載荷試験は同等であると見なされる。

しかしながら3. で述べた現場においては、DIN 1054:2005で定義されている荷重・抵抗係数設計法が、その当時まだ適用できた。静的支持力は、衝撃載荷試験から決定できる。もし衝撃載荷試験数が静的載荷試験数の2倍以上であれば、静的載荷試験に適用できる抵抗係数および較正係数は衝撃載荷試験にも適用できる。

この現場では、砂地盤における風力タービン位置における3本の杭の衝撃載荷試験の変動は極めて小さい（変動係数が0.05以下）。このことは、上述した静的載荷と衝撃載荷試験の等価性を裏付けている。

現在のドイツ基準は衝撃載荷試験における波動解析を義務付けていない。しかし、安全性を考慮すれば、波動解析（打込み性予測解析）によって杭打ちシステムの適切性を評価することは推奨すべきであろう。ただし、このような波動解析は、同じ現場での衝撃載荷試験の解析に加えて実施することが必要である。海洋の杭に対する波動解析の1つの適用法がRausche and Klingmüller<sup>9)</sup>によって示されている。

特に海洋構造物の基礎杭に対しては、GRLWEAP 2010 Offshore Wave programによる解析結果（疲労解析も含む）は、杭設計の最適化に関する情報を与える。疲労解析は打撃回数、それぞれの深さでの杭の最大圧縮および引張り応力を与える。これらの結果は、衝撃載荷試験結果との比較によって検証あるいは較正される。したがって、衝撃載荷試験の解析法と打込み予測解析法の組み合わせによって、安全率を合理的に減少できることに

なる。

## 6. 結 論

紹介した事例と経験に基づいて、また大きな水平荷重と繰返し荷重を受ける海洋風力タービンの基礎となる大口径打込み鋼管杭の支持力を予測するための信頼性のある計算方法がないため、衝撃載荷試験は経済的な杭基礎建設のために重要な計測法であることが示された。品質評価のための衝撃載荷試験と杭打ちプロセスの計測を行うことで、杭支持力を信頼性高く検証できる。

CAPWAP解析によって計算した軸方向周面摩擦力から水平抵抗力を決めるある1つの方法が示された。特に海洋風力タービンにおける大きな作用荷重条件の場合、衝撃載荷試験以外の方法の実施は難しく、衝撃載荷試験は安全性確保のうえで重要な役割をなす。

## 参考文献

- 1) Achmus, M. et al.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, Technical University of Braunschweig/Germany-Pfahl-Symposium, pp. 137~158 (in German), 2005.
- 2) Cooke, R.W.: The settlement of friction pile foundations. In: Proc. Conf. Tall Buildings, Kuala Lumpur, Vol. 3, pp. 1~16, 1974.
- 3) Dahlke, C.: Offshore Windenergie, Genehmigungsverfahren, Stn und der Planung, aktuelle Entwicklungen, conference "Baugrunderkundung, Gründungsinstallation und -monitoring für Offshore-Windenergieanlagen", 8th to 9th December 2011, HDT Essen/Germany (in German), 2011.
- 4) EAPfaehl: German Geotechnical society (DGGT), Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin/Germany, 2012.
- 5) German Federal Maritime and Hydrographic Agency: Application instructions for the standard 'Design of Offshore-Wind turbines', www.bsh.de, 2011.
- 6) Kirsch, F., Klingmüller, O.: Driving of Foundation Piles for Offshore Wind Turbines, Geotechnical Special Publication, ASCE Geoinstitute, 2011.
- 7) Kirsch, F.; Richter, T.: Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen, Bautechnik 88, Vol. 2, pp. 113~120 (in German), 2011.
- 8) Klingmüller O.; Schallert, M.: Resistance factors for high-strain dynamic testing regarding German application of Eurocode 7 and correlation of dynamic on static pile tests, proceedings of IS-Kanazawa, pp. 18~20 September 2012: The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa, Japan, 2012.
- 9) Rausche, F.; Klingmüller, O.: Rammbarkeitsuntersuchung für Offshore-Monopiles von Windenergieanlagen, Technical University of Braunschweig/Germany-Pfahl-Symposium, Heft Nr. 80 (in German), 2005.
- 10) Richter, T.; Kirsch, F.; Rücker, W.: Pile Foundations for Offshore Wind Turbines-Does Cyclic Soil Behaviour Matter? In: Proceedings of DEWEK, Bremen/Germany, 2010.
- 11) Schallert, M.; Klingmüller, O.; Riecke, R.; Galal, G.: Erfolgreicher Einsatz kabelloser Messtechnik bei der dynamischen Pfahlprüfung von Gründungspfählen von Offshore-Bauwerken, Pfahl-Symposium, 17th-18th of February 2011, Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical University of Braunschweig/Germany, Heft 94 (in German), 2011.