計算工学講演会論文集 Vol.30 (2025年6月) 日本計算工学会

粒子シミュレーションソフトDEPTHを用いた海底展開式アンカーの構造最適化に向けた検討

Study for Geometrical Optimization of Extendable Plate Anchor through the Particle Simulation Software DEPTH

西浦泰介1)，野村瞬2)

Daisuke Nishiura and Shun Nomura

1) 博(工) 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究開発センター グループリーダー代理
（〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25, E-mail: nishiura@jamstec.go.jp)
2) 博(工) 東京海洋大学 海洋資源エネルギー学部門 准教授
（〒108-8477 東京都港区港南4-5-7, E-mail: nomura.shun@kaiyodai.ac.jp）

We investigated the capability of the particle simulation software DEPTH for the geometric optimization of Expandable Plate Anchor (ExPLA) which is a novel anchoring system for floating wind turbines. ExPLA features a plate anchor with two folded plates connected by a hinge. It is vertically embedded into the seafloor in a folded state to minimize penetration resistance. By pulling up the hinge, the folded plates expand horizontally and mobilize high anchoring capacity. To validate this concept, model tests were conducted by using DEPTH. First, DEPTH well reproduced the deployment modes of ExPLA visualized by the experimental method utilizing transparent quarts and liquid with a help of refractive index matching method. The influences of a back slope angle and a dip angle on the increasing rate of deployment angle between anchor plates were investigated. Results demonstrated the anchor with appropriate geometry can effectively expand by pulling out and have large pull-out resistance. This study confirmed potentials of DEPTH to optimize anchoring efficiency for floating wind turbines.

Key Words : *DEM, DEPTH, Offshore Wind Energy, Visualization, Anchor*

1. はじめに

脱炭素社会への世界的な潮流を受け，海洋自然エネルギーの積極的な利用に期待が高まっている．その中で，膨大な風力ポテンシャルを活用した洋上風力発電は，わが国のエネルギー政策の要諦である．

しかしながら，現状の開発は海底から発電施設までを剛構造で連結した水深50 m以浅の着床式洋上風力発電に限定され，風力ポテンシャルの80%を占める水深50 m以深における浮体式洋上風力発電の技術は未開発である．特に，沿岸から急激に水深が深くなるわが国の沿岸域では浮体式施設の導入が有利とされているが，直径30 m，厚さ10 m，総重量20,000 tに及ぶ巨大な構造体を海洋に30年以上に渡って適切に保持するためのアンカリング技術は確立されていない．

この喫緊の課題に対して本研究では，2023年より**図-1**に示す海底展開式アンカー（ExPLA）の開発に着手し，国内特許（特願2023-108672）を出願した．ExPLAは，2枚の板材とそれらを連結する軸部材によって構成される．①施工時に折り畳んだ状態で海底の所定の深さに埋設された後に，②ヒンジ部を上方に引き上げることで展開する．③施工が容易でありながら，展開後の地盤の抵抗を受ける面積の増大により，供用時には引き抜きに対して高い抵抗力（把駐力）を発揮できる機構を有している[1].

本研究では，アンカー形状の最適化に向けて，アンカー構造物と地盤の相互作用が評価可能なDiscrete Element Method（DEM）[2]による粒子法シミュレーション解析の可能性を検討する．そして将来的には，実験とシミュレーションの両面から，引き抜き時に展開し，供用時に把駐力が発揮されるまでの一連のプロセスを明らかにすることで，実施工を見据えた具体的な技術提案を可能にする．

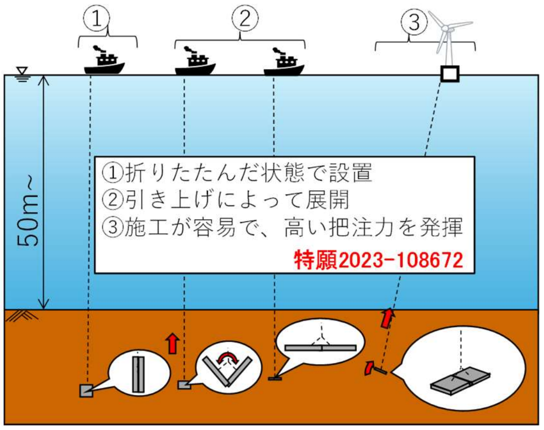


図-1 ExPLA の概念図

2. 実験方法

実験では地盤の透明化技術を活用し，地盤内部でのアンカーの展開挙動を観測する．**図-2**に試験装置図を示す．高さ200 mm，幅200 mm，奥行200 mmの土槽内にアンカー

模型を下端部が深さ140 mm になるように建て込んだ状態で，溶融石英粒子（平均粒径 1 mm）と粒子と同じ屈折率を持つ流体を混合して，高さ150 mmの模型地盤を作製した．その後レーザー変位計による引き抜き量の計測と土槽の側面からカメラによる動画の撮影を行いながらアクチュエーターによりアンカーを引き抜き速度0.2 mm/sで上方に100 mm引き上げた．撮影した動画からアンカーの先端部の座標を画像解析により計測し，アンカーの展開角度を算出した．また，ロードセルを使用して，引き抜き時のアンカーに加わる引き抜き抵抗力も測定した．なお，引き抜き抵抗力を測定する際には，測定値を明瞭にするために，アンカー埋め込み深さが1000 mm相当となるように鉛球を土層の上に配置した．使用したアンカー模型の形状は，**図-3**に示すようにアンカーの背面勾配角αと先端角度βをパラメータとして，(α, β) = (0°, 0°)，(20°, 0°)，(20°, 40°)の3ケースの模型について各3回ずつ計測を行った．

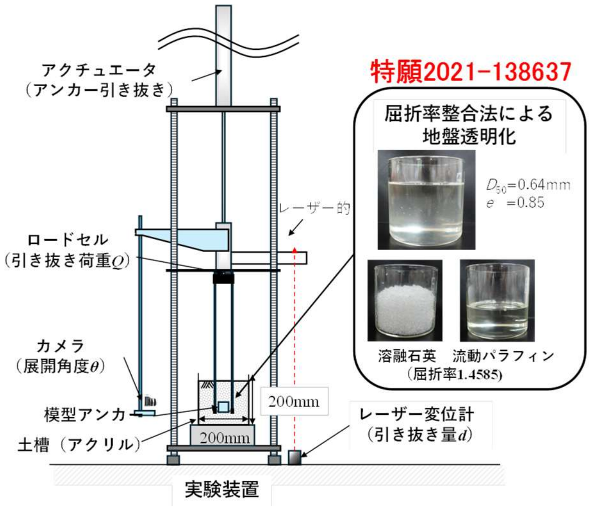


図-2 実験装置図

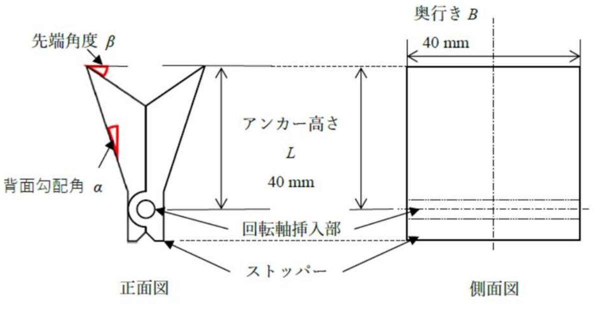


図-3 アンカー形状

3.　シミュレーション方法

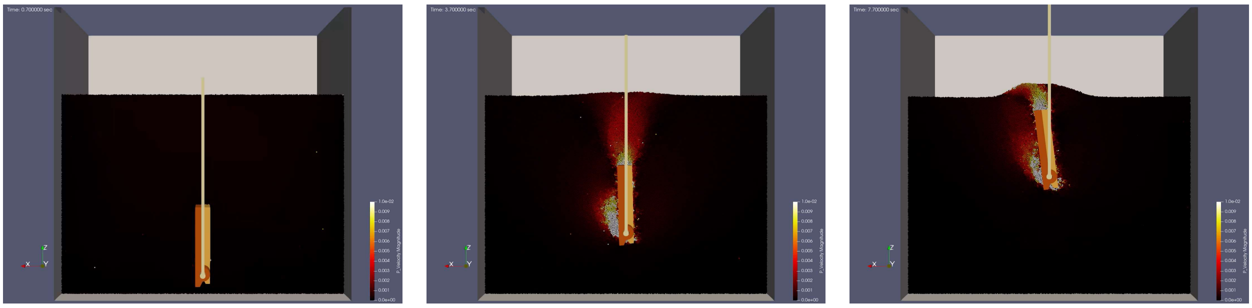
実験との整合性が保証されたシミュレーション（デジタルツイン）を実施することが可能になれば，実験コストの大幅な削減のみならず，より詳細な解析結果に基づいたアンカー形状の最適化が期待できる．そこで，本研究では粒子法のシミュレーションソフトであるDEPTHを使用し，DEMによるシミュレーションを実施した．DEPTHは（国研）海洋研究開発機構（JAMSTEC）で開発された市販ソフトウェアであり，DEM以外にもSmoothed Particle Hydrodynamics（SPH）やComputational Fluid Dynamics（CFD）による流体計算およびDEMとの連成による混相流計算が可能な大規模並列化シミュレーションソフトウェアである[3]．シミュレーションにDEMを用いることで，実験では計測が難しいアンカー及び周辺地盤の応力分布等の地盤内の状態把握だけでなく，メッシュ法では解析自体が困難な降伏状態以降の地盤の大変形破壊を含めた地盤とアンカー構造物の複雑な連成挙動を解析することができる[4]．本研究では，シミュレーション結果を模型実験で得られる知見と比較し，アンカーの展開機構や把駐力発揮メカニズムの解明に向けてDEPTHの可能性を検討した．

シミュレーション手法として，アンカーは剛体として扱い，DEMによる粒子との接触計算を行う．アンカーとの接触計算には符号付距離関数を用いて接触判定を行い，接触力を計算した．その他の粒子計算については一般的なDEMと同様であり，摩擦を考慮したVoigtモデルとHertz-Mindlinによる弾性接触理論に基づいている．なお，転がり摩擦モデルにはConstant Directional Torque (CDT) モデル[5]を使用した．

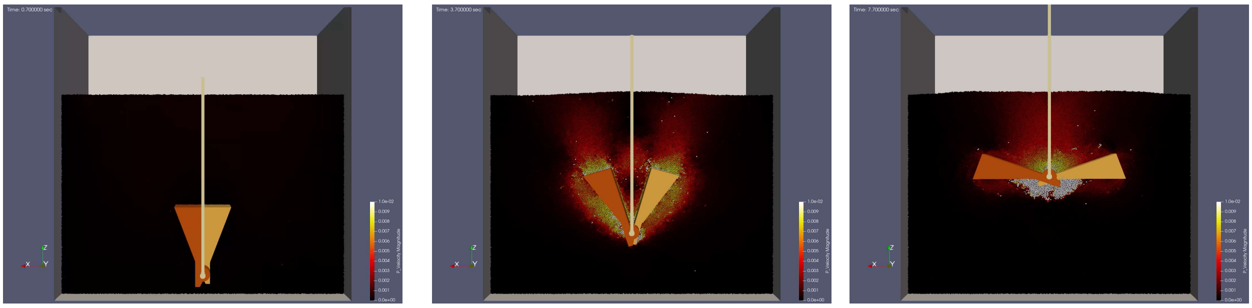
まず，実験で使用したアンカーのモデルをCADで作成し，実験と同様の地盤深さにアンカーを設置する．ここで，初期地盤は粒子を重力落下させて作成し，その後アンカーと接触する粒子を削除してアンカーを地盤に埋め込んだ．またアンカーの質量や慣性モーメントは実験で使用したアンカーと同等の値を設定した．粒子サイズは実験とほぼ同じ1.0 mmとし，粒子密度は液体を含む実験の材料質量と一致するように決めた．また摩擦係数や転がり摩擦係数は一般的な値を使用した．ヤング率および引き抜き速度等のパラメータについては計算負荷を考慮して決定した．主なシミュレーション条件は**表-1**に示した通りである．

表-1 シミュレーション条件

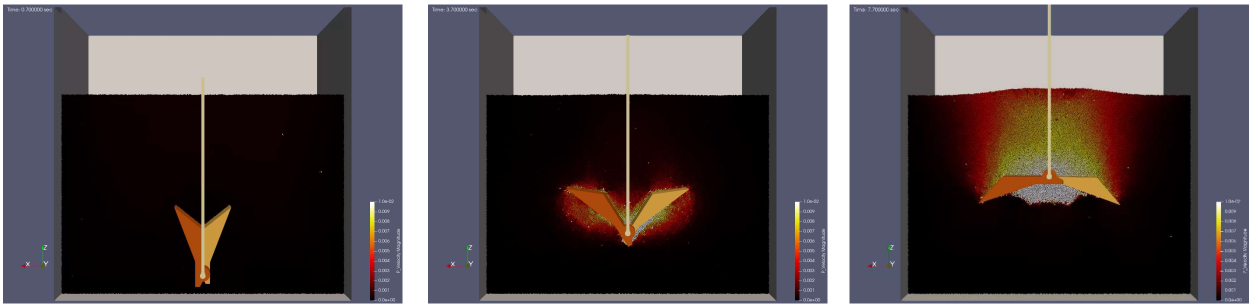
		単位
ヤング率	0.5	GPa
ポアソン比	0.2	–
密度	2927	kg/m^3
反発係数	0.1	–
摩擦係数	0.5	–
転がり摩擦係数	0.15	–
引き抜き速度	10.0	mm/s
離散時間	3.67	µs
粒子数	8,287,623	–



(a) $\alpha=0°$ 、$\beta=0°$



(b) $\alpha=20°$ 、$\beta=0°$



(c) $\alpha=20°$ 、$\beta=40°$

図-4 DEPTH によるアンカーの展開挙動可視化結果

4. 結果と考察

図-4にDEPTHによるシミュレーションによって得られたアンカーの展開挙動の可視化結果を示す．ここで，粒子の色は速度を表しており，左の図から引き抜き前，引き抜き後3 sおよび7 sの状態を示している．アンカーの背面勾配角αと先端角度βが共に0° の場合には，アンカーが全く展開せずに引き抜かれていくことが確認された．この結果は実験でも同様に観測された．つぎに，背面勾配角を大きくすると，先端角度が0° であってもアンカーが展開することが分かった．さらに，先端角度を大きくすると，より早くアンカーが展開する様子が伺えた．

(1) 展開角度

引き抜き量と展開角度の関係を**図-5**に示す．先端角度βの増加に伴い，アンカーが早く展開する傾向が実験とシミュレーションで定量的に良く一致していることが確認できた．これはアンカー上面の土圧によるモーメントがアンカー背面から受ける土圧によるモーメントに勝ることで発生したと考えられる．なお，実験では最終的な展開角度が180° に達していないが，これは左右のアンカーをつなぐヒンジ近傍で粒子が挟まってしまったためと考えられる．

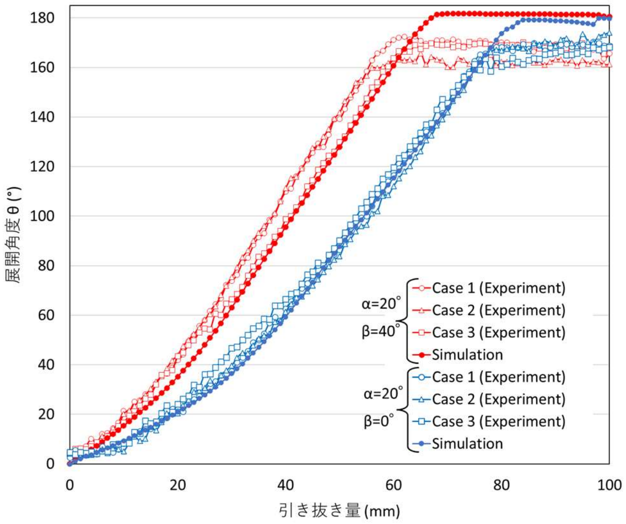


図-5 展開角度の比較

© 一般社団法人日本計算工学会

（2）引き抜き抵抗力

背面勾配角α＝20°，先端角度β＝40°の時の引き抜き量と引き抜き抵抗力の関係を**図-6**に示す．シミュレーションでは引き抜き開始と同時に抵抗力は増加し，その後しばらく緩やかに増加した後に，アンカーが展開しきる直前に急激な増加を示している．このことから，アンカーを展開する構造にすることで，想定していた様にアンカーの把駐性能が向上したと考えられる．この様な傾向は実験でも同様に確認されており，**図-6**からアンカー展開後の引き抜き抵抗力は定量的にも実験結果を良く再現していることが確認できた．しかし，アンカーが展開しきる前段階では，実験とシミュレーションで観測された抵抗力に大きな差が生じた．原因として，地盤強度やアンカーとヒンジの力学特性などが再現できていない可能性が考えられるため，今後さらに詳しく調べる必要が有る．

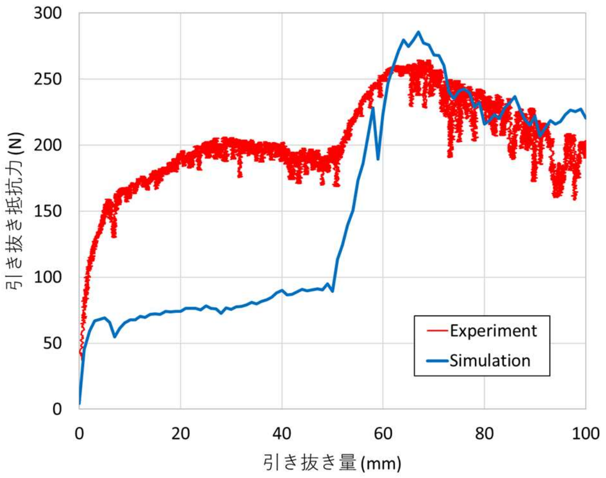


図-6 引き抜き抵抗力の比較

5.　まとめ

粒子シミュレーションソフトDEPTHを用いて地盤中のアンカー挙動をDEMでモデル化し，アンカーの引き抜き時における展開角度と引き抜き抵抗力について解析を行った．アンカーの背面勾配角および先端角度を大きくすることによってアンカーの展開が効率良く行えることがシミュレーションによっても示され，アンカー形状による展開角度への影響は実験結果を定量的に良く再現した．一方，引き抜き抵抗力は，展開後に発揮される抵抗力を良く再現したが，展開前の抵抗力には違いが見られた．今後，シミュレーションによる再現精度を高めるためには，地盤強度やアンカー形状の影響など，より詳細な検討が必要である．以上より，シミュレーションを活用したアンカー形状の最適化に向けたDEPTHの可能性を示すことができた．

謝辞: 本研究は，HPCIシステム利用研究課題(課題番号：hp240021)を通じて，理化学研究所が 提供するスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け，実施しました．また，本研究の一部は，JSPS科研費 JP23K22863およびJP24H00279の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 野村瞬，佐藤新，谷和夫: 展開式平板アンカーの背面勾配，先端角度が展開性に及ぼす影響の実験的検討，第59回地盤工学研究発表会, 2024.

[2] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65, 1979.

[3] DEPTH, https://www.jamstec.go.jp/namr/project06.html

[4] 清水舞雛，野村瞬，谷和夫，西浦泰介: 杭の貫入引抜の最適化を目的としたDEMによるシミュレーションの適用性，第59回地盤工学研究発表会, 2024.

[5] Ai, J., Chen, J.-F., Rotter, J. M., Ooi, J. Y.: Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, *Powder Technology*, Vol.206, pp.269-282 2011.
.

© 一般社団法人日本計算工学会