

浮体式洋上風車に用いるスカートサクシオンアンカーの 引抜き抵抗力に関する研究

粕谷 悠紀 伊藤 政人 林 秀郎
(本社土木本部) (本社生産技術本部)

山田 祐樹 高橋 真一

Study on Pullout Resistance of Skirt Suction Anchor for Floating Offshore Windmill

Yuki Kasuya Masato Ito Hidero Hayashi
Yuki Yamada Shinichi Takahashi

Abstract

Under the above circumstances, the floating technology is one of the key solutions to utilize wind power offshore. Among the type of floating structures, tight mooring system “tension leg platform (TLP)” has been chosen, because it can minimize the motion response during operation. Particular emphasis is placed on the development of the tendon anchoring system “skirt suction anchor,” which is widely applied in floating platforms. This study presents the effect of the rate of applied loads on the pullout resistance, and generated suction pressure of this anchor in terms of the experimental model and field tests in case of sandy soils. The results of both the tests have been compared with the finite element analysis considering soil–fluid interaction.

概 要

代表的な浮体式洋上風車形式であるTLP型のレグ方式は、動揺が小さく、海上での占有面積が小さい等のメリットがあるものの、アンカーが大型化し、設置コストが増大するというデメリットがあった。そこで、TLP型の浮体式洋上風車に適用するアンカーを従来に比べて高性能かつ低コストで実現する「スカートサクシオンアンカー」を開発した。本論文では、引抜き速度の違いによるスカートサクシオンアンカーの引抜き抵抗力とサクシオン効果を把握するため、引抜き模型実験結果と実海域において実施した実物大模型を用いた貫入実験および引抜き実験結果について述べる。また、各引抜き実験における土/水連成FEMによるシミュレーション解析を行った結果について述べる。実験および解析の結果、暴風時に生じる風や波浪によってアンカーに急激な引抜き荷重が作用した場合でも、サクシオン効果によりアンカーの合理的な設計が可能であると考えられる。

1. はじめに

洋上風車の構造形式には、風車の支柱が海底まで到達している「着床式」と風車自体が海洋に浮いている「浮体式」がある。浮体式は水深が深い場合に適しており、セミサブ型、スパー型、TLP(テンション・レグ・プラットフォーム)型などさまざまな型式がある(Fig. 1)。浮体式のうち、セミサブ型およびスパー型は、係留索を弛緩した「カテナリー方式」に分類される。一方、TLP型は、緊張係留により浮体を下方に引込むことによって係留する「レグ方式」に分類される。

カテナリー方式は実績が豊富であり、弛緩係留のため動揺を許容することから係留アンカー等に作用する荷重は小さい。一方で、①洋上風車の動揺が大きいので発電効率が低下する、②海上での占有領域が大きいので船舶や海底生物に与える影響が大きい、③係留索が長く絡まりやすい等の課題がある。

レグ方式は実績が少ないものの、①洋上風車の動揺が

小さいので発電効率が高い、②海上での占有領域が小さいので船舶や海底生物に与える影響を抑制できる、③係留索が短くなるというメリットがあるが、浮体、係留アンカーに作用する荷重が大きく、一般にアンカーが大型化し、設置コストが増大するというデメリットがあるとされていた。

そこで、水中橋梁基礎として開発済みのスカートサクシオン基礎¹⁾をTLP型の浮体式アンカーに応用した「スカートサクシオンアンカー」を開発した。Fig. 2に5MWの洋上風車の適用事例を示す。スカートサクシオンアンカーは、頂版および頂版から下方に伸びた円筒形の鉛直壁(スカート)で構成されており、スカートを海底地盤に貫入させることで、従来のアンカーと異なり、地盤および水圧により洋上風車を強固に固定する。

浮体式における洋上風車設置後(供用時)は、スカートの自重と周面摩擦力の和がアンカーの引抜き抵抗力として作用する。また、暴風時などに生じる波浪によってアンカーに急激な引抜き荷重が作用する場合、スカートの

内側に負の過剰間隙水圧(受働サクシオン)が発生し、引抜き抵抗が増加する。そのため、暴風時には、スカートの自重と周面摩擦力に加えてサクシオン力も引抜き抵抗力として期待することができるため、アンカーの合理的な設計が可能となる。しかし、アンカーに急激な引抜き荷重が作用した場合にどの程度サクシオンが発生するか、あるいは速度依存性におけるサクシオン効果がどの程度期待できるかは不明であった。また、引抜き速度が大きいと引抜き抵抗が増大する現象は、透水性の低い粘性土地盤では“Reverse bearing capacity”として従来から知られているが²⁾、比較的透水性の高い砂地盤においてもこの効果が期待できるかどうかは不明であった。

そこで、本論文では、引抜き速度の違いによるスカートサクシオンアンカーの引抜き抵抗とサクシオン効果を把握するため、砂地盤を対象とした引抜き模型実験結果と実海域において実施した実物大模型を用いた貫入実験および引抜き実験結果について述べる。また、スカートサクシオンアンカーにおける引抜き挙動の再現、および土/水連成解析適用における妥当性の検証を目的として行った各引抜き実験の土/水連成FEMによるシミュレーション解析結果についても述べる。

2. 概要

2.1 スカートサクシオンアンカーの特徴

- 1) スカートの海底地盤への貫入はスカート内外の水圧差を利用して行うため、大型の機械が不要となり、従来に比べコストを低減できる。
- 2) スカートサクシオンアンカーは、鋼製またはフルプレキャストコンクリート製であるため、海上作業は貫入のみであり、工期短縮が図れる。
- 3) スカートサクシオンアンカーは、設置箇所付近の岸壁等の現地で製作できる。
- 4) スカート内のサクシオン効果を利用するため、アンカーの規模を小さくできる。

2.2 貫入の原理

スカートの海底地盤への貫入は、スカートの自重およびスカート内の排水による「サクシオン」によって行う(Fig. 3)。「サクシオン」とは、スカート内の水位を外周囲の静水圧よりも低減した時の水圧差である。スカート内の水位を Δh 低下させた場合、スカート内外の水圧差 $\Delta h \times \gamma_w$ (γ_w : 水の単位体積重量)が生じる。

粘性土の場合、下向きの圧力によりスカートの下向き荷重(貫入力)が増加する。砂質土の場合、上向きの圧力によりスカート内側に上向きの浸透流が発生し、有効応力が低減することにより、スカート先端の貫入抵抗が減少する。サクシオン貫入は、この①下向き荷重による貫入力の増加と、②上向き浸透流による貫入抵抗の低減の2つのメカニズムによって成立している。

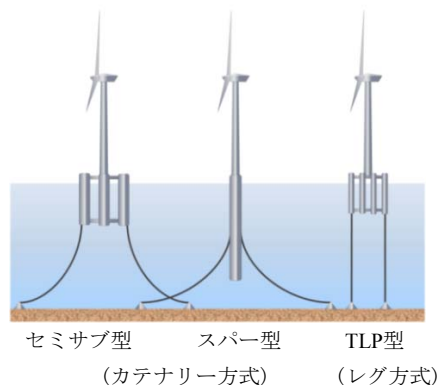


Fig. 1 浮体式洋上風力発電の種類
Types of Floating Offshore Wind Turbines

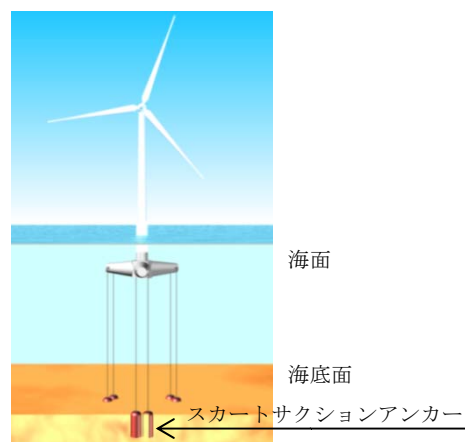


Fig. 2 浮体式洋上風車(TLP型)の構造図
“Tension Leg Platform” for
Floating Offshore Wind Towers

2.3 引抜き抵抗の原理

浮体式洋上風車のアンカーには、暴風時などに生じる風や波浪によって大きな引抜き荷重が作用するため、海底地盤から十分な引抜き抵抗を得る必要がある。スカートサクシオンアンカーは、急速な引抜き荷重が作用するとスカートの頂版が引き上げられて、スカートの頂版と海底面との隙間が広がろうとするが、スカート内側に負の過剰間隙水圧(受働サクシオン)が発生するため、引抜き抵抗が増加する(Fig. 4)。

受働サクシオンとは、スカート内への水の流入が遅いためスカート内が静水圧以下(内外水圧差を生じる)となる現象であり、この受働サクシオンによって大きな引抜き抵抗が生み出される³⁾。ただし、スカートサクシオンが引抜き荷重を受けた際の内外水圧差は、荷重載荷速度、透水係数、スカートの径・根入れ長等に依存する⁴⁾。

3. 引抜き模型実験

3.1 引抜き模型実験の概要

3.1.1 実験概要 引抜き速度の違いによるスカートサクシオンアンカーの引抜き抵抗とサクシオン効果を把

握するため、引抜き模型実験を実施した。対象地盤は砂質土地盤である。実験は、土槽底部からのボーリングによって均一な砂地盤(相対密度 $D_r=40\%$ 程度)の作製が可能な水締め土槽(幅 $2.25\text{m}\times 2.25\text{m}$, 高さ 2.0m)で実施した(Fig. 5)。

地盤材料は珪砂6号($D_{50}=0.28\text{mm}$)を使用した。 $D_r=40\%$ での室内試験結果より、透水係数 $k=3.2\times 10^{-2}\text{cm/sec}$, 粘着力 $c=0.0\text{kN/m}^2$, 内部摩擦角 $\phi=31.9^\circ$ である。なお、実験にあたってはコーン貫入試験を4か所実施し、各深度のコーン指数のばらつきが小さいことを確認している。スカートサクシヨンアンカーの模型(以下、スカート模型)は、塩ビ製で実物の約1/19とし、外径 267mm , 長さ 800mm , 厚さ 12.7mm である。

貫入方法は、自重によりスカート模型を 5cm 貫入させ、真空ポンプを用いてスカート内の水を排水して 60cm 貫入させた。貫入時のサクシヨンによるスカート内部における土の盛り上がりは、平均で約 10cm であった。その後、 $15\sim 30$ 分程度放置した後に引抜き実験を実施した。引抜き実験は、単調連続載荷の荷重制御で行った。主な計測項目は、スカート内の間隙水圧(P_{s3} , P_{s5} , P_{s7}), 地盤の間隙水圧(P_{s1} , P_{s2} , P_{s4} , P_{s6}), スカート先端の土圧, スカート模型の鉛直変位および引抜き荷重である。

3.1.2 実験ケース Table 1に実験ケースを示す。実験のパラメータは、頂版排水条件および引抜き速度とした。Case0は、スカート模型の頂版に設置したゴム栓を全て開放した状態(排水条件下)で実施した。

3.2 引抜き模型実験の結果

3.2.1 引抜き荷重 Fig. 6に各ケースにおける引抜き荷重 P と鉛直変位 z の関係を示す。図中には降伏荷重と最大荷重も併記した。降伏荷重は、 $\log P-\log z$ 曲線の折れ点から求めた。Case1~4の引抜き荷重は 1mm 以内の鉛直変位で急増し、その後スカート模型が引抜かれ始めても漸増する傾向がみられる。一方、Case0では、降伏荷重到達直後に荷重が低下しており、軟化現象がみられる。

Fig. 7に各ケースにおける引抜き荷重 P と引抜き速度 v の関係を示す。引抜き速度の増大に伴い降伏荷重および最大荷重は増加する傾向がみられる。

3.2.2 頂版下のサクシヨン Fig. 8に各ケースにおける頂版下(P_{s7})のサクシヨン P_s と鉛直変位 z の関係を示す。サクシヨンは引抜き荷重と同様に極わずかな鉛直変位で急増し、その後スカート模型が引抜かれ始めても漸増する傾向がみられる。なお、Case0では、サクシヨンがほぼ発生しないことを確認している。

Fig. 9に各ケースにおける頂版下(P_{s7})のサクシヨン P_s と引抜き速度 v の関係を示す。引抜き速度の増大に伴い降伏荷重時および最大荷重時のサクシヨンは概ね線形的に増加した。鉛直変位の進行に伴うサクシヨンと引抜き荷重の変化は相関性が高いことから、サクシヨンの増大が引抜き荷重の増大に大きく寄与すると考えられる。

3.2.3 サクシヨンの深度分布 Fig. 10に各ケースに

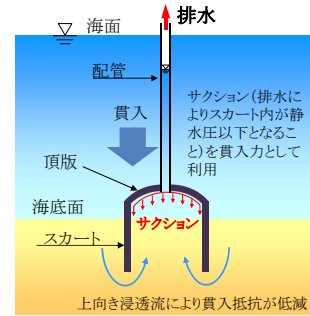


Fig. 3 スカートサクシヨンの貫入の原理
Penetration Mechanism of Skirt Suction

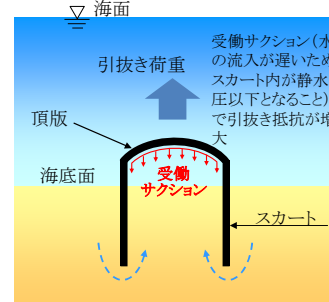


Fig. 4 スカートサクシヨンの引抜き抵抗の原理
Pullout Resistance Mechanism of Skirt Suction

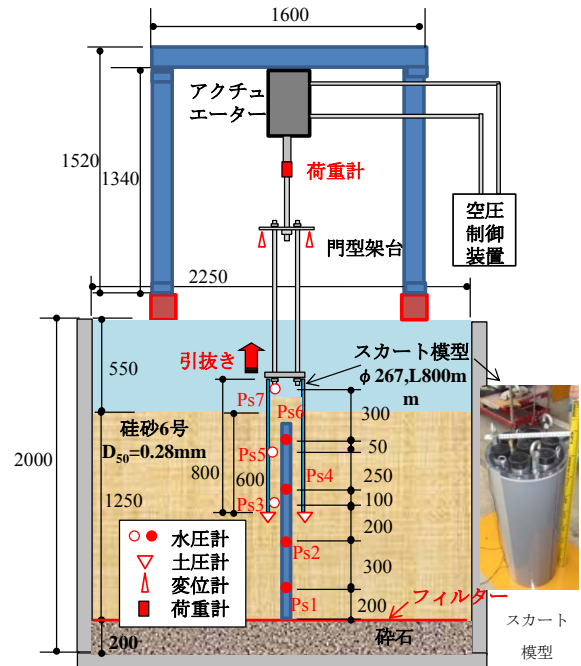


Fig. 5 引抜き模型実験の概要図
Loading Apparatus Test Model

Table 1 引抜き模型実験ケース
Cases of Pullout Load Test

実験ケース	スカート模型	頂版排水条件	引抜き速度
Case0	塩ビ製 φ 267mm L800mm t12.7mm	排水	1.5 N/sec
Case1		非排水	1.5 N/sec
Case2		非排水	15 N/sec
Case3		非排水	160 N/sec
Case4		非排水	3700 N/sec

おけるサクシオンの深度分布を示す。いずれの深度においても、降伏荷重時と比べて最大荷重時のほうがサクシオンは大きい。これは、引抜き速度の進行に伴い模型の下方までサクシオンが伝達されたためと考えられる。

3.2.4 引抜き抵抗力の構成比 Case0の最大荷重時における引抜き抵抗力の構成比率は、自重が41%、周面摩擦力が59%であった。引抜き速度が変化しても周面摩擦力は一定と仮定すると、引抜き速度が大きいCase4の最大荷重時における引抜き抵抗力の構成比率は、自重が17%、周面摩擦力が25%、サクシオン抵抗力が約58%であった。

4. 引抜き模型実験結果のFEM解析による検証

4.1 FEM解析の概要

4.1.1 解析条件 Fig. 11に解析に用いたメッシュ図を示す。解析は軸対称モデルとし、モデル半径Rは、実験土槽平面積と等価な円の半径とした。水理境界条件は、モデル下端および外周端を非排水境界、スカート外側の海底面を定水頭境界とした。解析プログラムは、土/水連成FEM解析が可能なDAC x SAR⁵⁾とし、地盤の構成モデルは、地盤の非線形性を考慮できるようなDrucker-Pragerモデルを用いた。入力定数は、実験に使用した珪砂6号(D_r=40%)の三軸圧縮試験結果および透水試験結果から定めた。試験模型(頂版、スカート)および頂版下の水の要素は線形弾性材料とし、試験模型には塩ビの剛性を設定した。Table 2に入力定数一覧表を示す。

地盤の初期鉛直応力度は、 $\gamma \times d$ (d:地表面からの深さ)

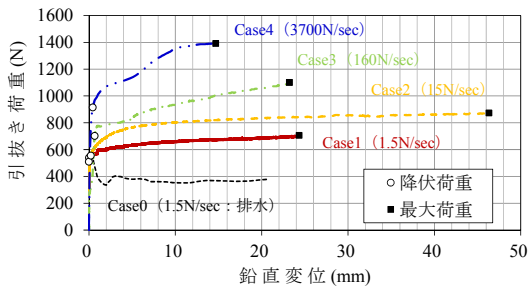


Fig. 6 引抜き荷重—鉛直変位
Pullout Load with Vertical Displacement

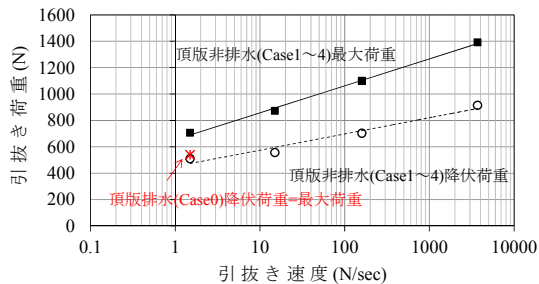


Fig. 7 引抜き荷重—引抜き速度
Effect of Rate of Applied Load on Pullout Resistance

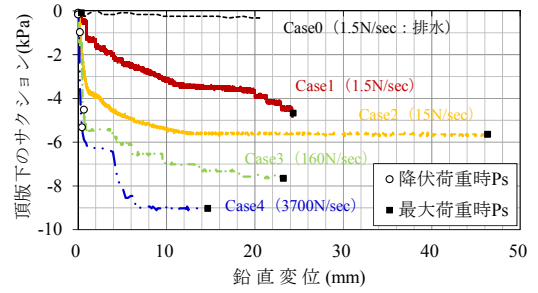


Fig. 8 頂版下のサクシオン(P_{s7})—鉛直変位
Suction Pressure Generation underneath Top Plate with Vertical Displacement

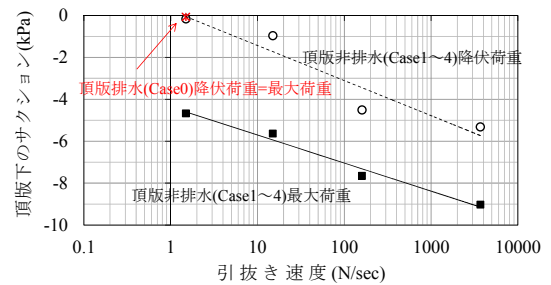


Fig. 9 頂版下のサクシオン(P_{s7})—引抜き速度
Effect of Rate of Applied Load on Suction Pressure Generation underneath Top Plate

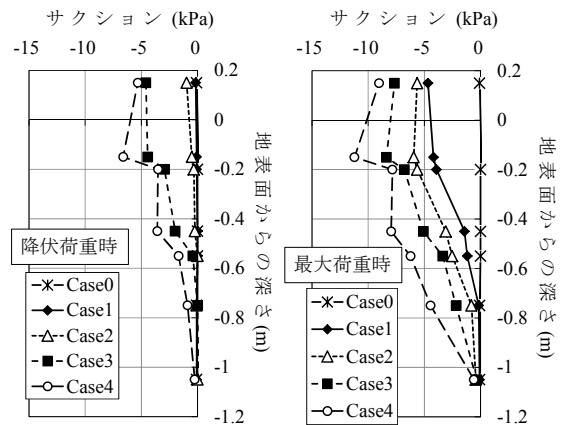


Fig. 10 サクシオンの深度分布
Distribution of Suction Pressure with Depth

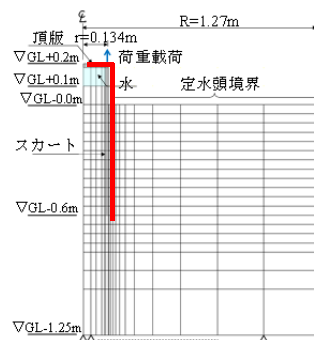


Fig. 11 解析メッシュ図
Axisymmetric Model of Skirt Suction Anchor

Table 2 入力定数
Material Properties of Sand, Model and Water

種別	記号	単位	値
地盤 (珪砂6号, D _r =40%)	E	kN/m ²	2.17×10 ⁵
	v	-	0.3
	c	kN/m ²	0.0
	φ	°	31.9°
	γ	kN/m ³	5.1
	k	cm/sec	3.2×10 ⁻³
試験模型 (頂版, スカート)	E	kN/m ²	3.4×10 ⁶
	v	-	0.4
	k	cm/sec	1.0×10 ⁻⁸
水 (頂版下)	E	kN/m ²	1.0×10 ⁻¹
	v	-	0.49
	k	cm/sec	3.2×10 ⁻²

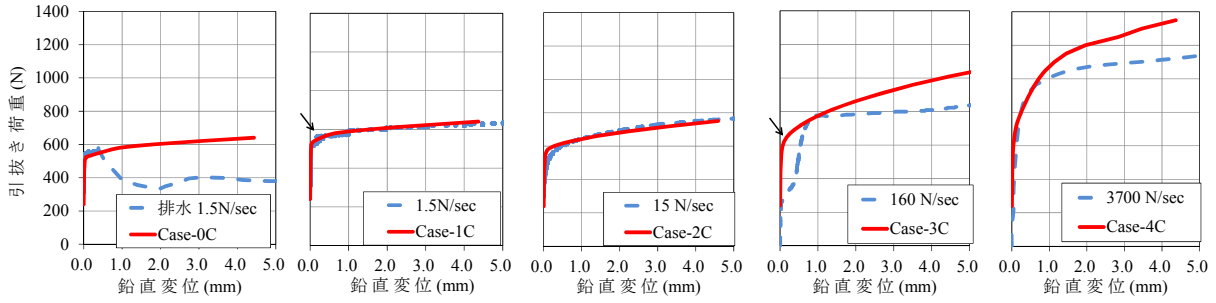


Fig. 12 引抜き荷重—鉛直変位(実験結果+解析結果)

Comparison of Pullout Resistance of FEM and Model Test

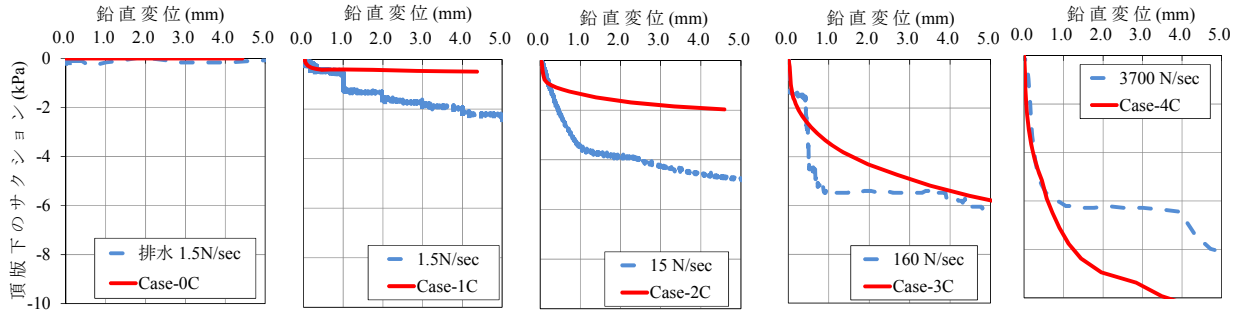


Fig. 13 頂版下のサクシオン(P_{s7})—鉛直変位(実験結果+解析結果)

Comparison of Suction Pressure Generation underneath Top Plate of FEM and Model Test

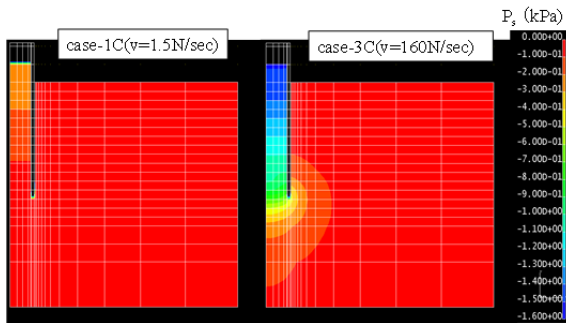


Fig. 14 サクシオン分布
Distribution of Suction Pressure

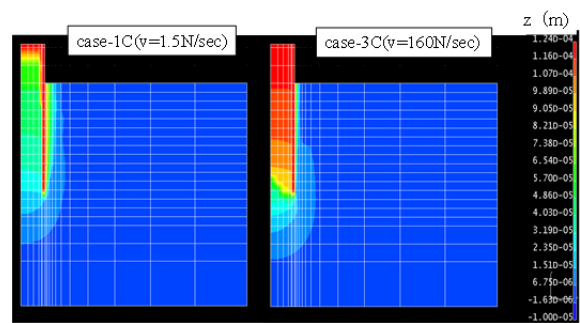


Fig. 15 鉛直変位分布
Distribution of Vertical Displacement

で与え、貫入による応力状態の変化(スカート周囲の応力増加やスカート内部の貫入時サクシオンによる応力低下など)は考慮していない。ただし、貫入時のサクシオンによるスカート内部における土の盛り上がり(平均10cm)は初期状態としてモデル化している。

4.1.2 解析ケース 解析ケースはTable 1と同様である。解析におけるケースの名称は、各実験ケースの番号の後に“C”を付けた。解析パラメータは実験同様、頂版の排水条件と引抜き速度である。頂版からの排水を許容したケース(Case-0C)では、頂版要素を設置せずスカート内部の地表面を定水頭境界とした。

4.2 FEM解析の結果

4.2.1 引抜き荷重 Fig. 12に引抜き荷重 P と鉛直変位 z の関係を実験結果とともに示す(解析:赤実線, 実験:青破線)。解析における荷重—変位関係は、すべてのケースにおいて実験結果と同様な傾向を示しており、解析においても引抜き速度が大きくなるにつれ引抜き抵抗が増

加する結果が得られた。

4.2.2 頂版下のサクシオン Fig. 13に頂版下におけるサクシオン P_s と鉛直変位 z の関係を示す。頂版下のサクシオンと変位の関係においては実験結果(P_s)と一部一致していない部分もみられるが、頂版が非排水条件の場合にはサクシオンが発生し、引抜き速度の増加に伴い増加するという傾向は一致している。

4.2.3 サクシオン分布 Fig. 14に鉛直変位 $z=0.12\text{mm}$ (降伏変位:Fig. 12に図示)時のCase-1C($v=1.5\text{N/sec}$)とCase-3C($v=160\text{N/sec}$)のサクシオン分布を示す。引抜き速度が小さいケース(Case-1C)では、サクシオンの発生範囲は小さいが、引抜き速度が大きいケース(Case-3C)では、スカート内全体に大きなサクシオンが発生した。

4.2.4 鉛直変位分布 Fig. 15に同じ変位時の鉛直変位分布を示す。引抜き速度が小さいケース(Case-1C)では、変位が大きい部分は頂版およびスカート部分に限定されているのに対し、引抜き速度が大きいケース(Case-3C)では、スカート内全体に変位が大きい範囲が広がって

る。このことは、引抜き速度が大きくなると、発生したサクシオンによりスカート内部土が頂版およびスカートと一緒に持ち上げられ、引抜き抵抗が増大することを示していると考えられる。

5. 実海域実験

5.1 実海域実験の概要

5.1.1 実験概要 試験体は、Fig. 16に示すようなスカート径D/スカート長H(貫入深さL=H-1.0)の異なる2体(スカート1: D1.8m, H4.6m, L3.6m, t19mm, スカート2: D2.3m, H3.0m, L2.0m, t19mm)を用いており、材質は鋼製とした(Photo 1)。当該海域の水深は約12m、海底地盤はN値10~30程度の砂地盤である(Fig. 17: 国土地盤情報検索サイトによる近傍柱状図から抜粋したN値)。海底面付近の砂をサンプリングし、室内土質試験を行った結果、砂の粒度特性は、砂分:シルト分・粘土分=70%:30%程度で、強度特性は、粘着力 $c=4.6\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=36.6^\circ$ 、透水係数 $k=1.60\times 10^{-2}\text{cm/sec}$ であった。

実験は、台船上のクレーンにより試験体を海中に吊りおろし、自重貫入後サクシオンポンプによりスカート内から排水し、スカート内の水圧を下げることによって所定の深度まで貫入させた。その後、30分~1時間程度放置した後に引抜き実験を行った(Fig. 18)。

主な計測項目は、スカート内外の間隙水圧、スカート内およびスカート先端の土圧、スカートの周面摩擦力、試験体の傾斜角および鉛直変位、試験体ひずみ、クレーン引抜き荷重である。Photo 2に引抜き実験時の全景を、Photo 3に実験で使用した荷重計を示す。

5.1.2 実験ケース Table 3に実験ケースを示す。実験パラメータは、頂版の排水条件および引抜き速度とした。なお、各ケースにおける貫入位置は、中心間隔で2.5D以上離れた位置とした。

緩速および中速の引抜きは油圧ジャッキ(Photo 4)を用いて行い、急速および最急速の引抜きは台船上のクレーンで行った。また、頂版から排水を許容した実験ケースも実施した。試験体の吊りおろし~貫入~引抜きの一連の座標(x, y, z)は、防波堤に設置したトータルステーションと360°プリズム(Photo 5)を用いて計測した。

5.2 貫入実験結果

5.2.1 貫入時間 Fig. 19に貫入深度h-時間T関係を示す。貫入に要した時間はおおむねスカート1で20min、スカート2では15min程度であり、平均貫入速度は0.09m/minであった。貫入深度は、Case2-3のみ予定深度より0.6m深くなった。Case1-2は途中で貫入が困難になったため、一度クレーンにより引抜き再貫入を繰り返すことで所定の深さまで貫入させることができた。

5.2.2 貫入抵抗 Fig. 20に貫入深度h-貫入抵抗(R_m, R_p)関係を示す。貫入抵抗の実測値 R_m は、貫入力と等しいものとして(1)式により求めた。また図中には(2)式で

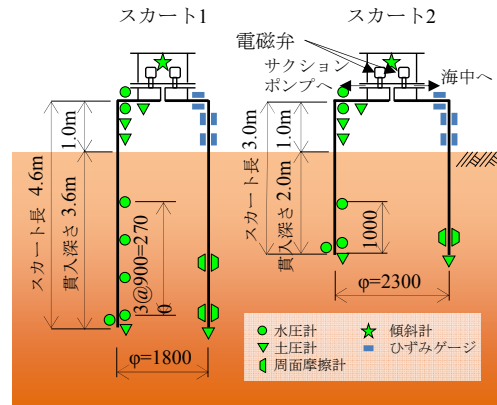


Fig. 16 試験体および計器配置図
Scaled Model and Location Sensors

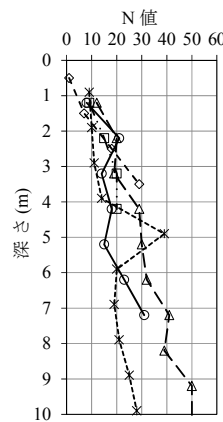


Fig. 17 N値分布
N-Value at Installation site

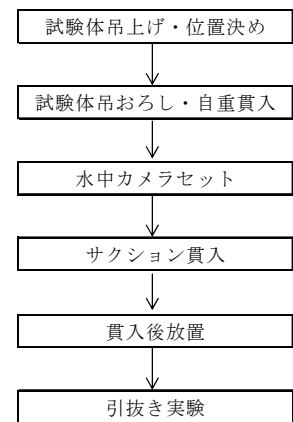


Fig. 18 実験フロー
Procedure of Field Tests

Table 3 実海域実験ケース
Cases of Field Tests

実験ケース	スカート	頂版排水条件	引抜き速度	変位速度 (mm/sec)	荷重方法
Case1-0	スカート1 (D1.8×L3.6)	排水	緩速	0.35	ジャッキ
Case1-1		非排水	緩速	0.3	ジャッキ
Case1-2			中速	2.5	ジャッキ
Case1-3			急速	9.0	クレーン
Case1-4			最急速	25	クレーン
Case2-0	スカート2 (D2.3×L2.0)	排水	緩速	0.25	ジャッキ
Case2-1		非排水	緩速	0.45	ジャッキ
Case2-2			中速	2.5	ジャッキ
Case2-3			急速	7.0	クレーン



Photo 1 貫入実験状況
Field Penetration Tests

示される既往の貫入抵抗予測式⁶⁾による値 R_p も示してある。

$$R_m = W + P_s \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1)$$

$$R_p = \left(\gamma' + \frac{aP_s}{h} \right) Z_o^2 \left(\exp\left(\frac{h}{Z_o}\right) - 1 - \left(\frac{h}{Z_o}\right) \right) (K \tan \delta)_o (\pi D_o) + \left(\gamma' - \frac{(1-a)P_s}{h} \right) Z_i^2 \left(\exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 - \left(\frac{h}{Z_i}\right) \right) (K \tan \delta)_i (\pi D_i) + \left(\left(\gamma' - \frac{(1-a)P_s}{h} \right) Z_i \left(\exp\left(\frac{h}{Z_i}\right) - 1 \right) N_q + \gamma' t N_\gamma \right) (\pi D t) \quad (2)$$

$$Z_o = D_o(1 - m^2) / 4 / (K \tan \delta)_o \quad (3)$$

$$Z_i = D_i / 4 / (K \tan \delta)_i \quad (4)$$

W : スカート水中重量

P_s : サクシオン (= スカート内外水圧差)

D_i, D_o, D : スカート内径, 外径, 平均径

γ' : 水中単位体積重量

a : 動水勾配係数

h : 貫入深度

K : 静止土圧係数

δ : 壁面摩擦角 ($K \tan \delta = 0.5$)

N_q, N_γ : 支持力係数

t : スカート厚

m : 影響係数

予測式の第1項, 第2項, 第3項は, スカート外側の周面抵抗, スカート内側の周面抵抗, 支持力公式から定まるスカートの先端抵抗を表す。予測計算に用いたサクシオン P_s は, スカートの内部土の理論上の浸透破壊から定まる限界サクシオンとした。予測値には, 貫入中にスカート内部地盤が緩くなることによってスカート内外の透水係数比 $k_f (= k_i/k_o, k_i > k_o)$ が変化した場合の値を示す。Creagerによる20%粒径 D_{20} からkを推定する方法が用いられるが, ばらつきも認められる。実測値は, $k_f = 1 \sim 5$ によりばらつきを表す予測値とおおむね対応したことから, 既往の予測式によって貫入抵抗が予測可能であると想定される。スカート1の貫入抵抗の実測値150kNにおける最大サクシオンは約50kPa, スカート2の貫入抵抗の実測値100kNにおける最大サクシオンは約20kPaであった。

5.2.3 揚水量 Fig. 21にスカート2(Case2-0)での貫入中の揚水量を示す。貫入中の揚水量の実測値は, 0.4~0.7 m^3/min であり, 浸透流解析で予測した地盤からの流入量とスカート内の海水を排水する流量との合計0.58 m^3/min とほぼ一致した。

5.2.4 貫入時の傾斜角 Fig. 22にスカート1(Case1-4)での貫入中の傾斜角を示す。貫入中の傾斜角は約x方向 0.5° , y方向 1° とサクシオン貫入中にはほぼ変化せず, 修正・制御はできていない。多室型のスカートサクシオンの傾斜制御は, 各室内のサクシオン量を変えることによって可能であり実績もあるが⁷⁾, 今回のような単室型の場合の傾斜制御には課題が残されている。

5.3 引抜き実験結果

5.3.1 引抜き荷重 Fig. 23に引抜き荷重P-鉛直変位zの関係を示す。図中には降伏荷重も併記した。降伏荷重は, $\log P - \log z$ 曲線の折れ点から求めた。変位制御によ

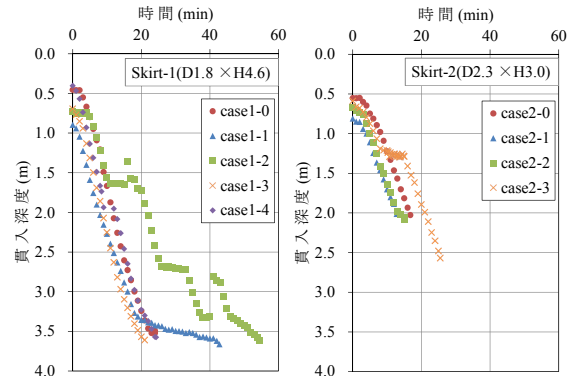


Fig. 19 貫入深度-時間
Skirt Penetration with Time at Field Test

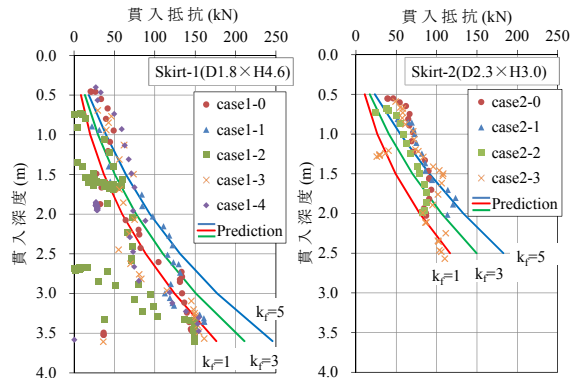


Fig. 20 貫入深度-貫入抵抗
Measured Penetration Resistance at Field Test

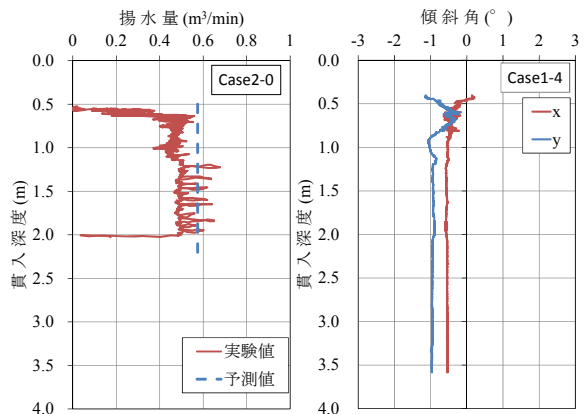
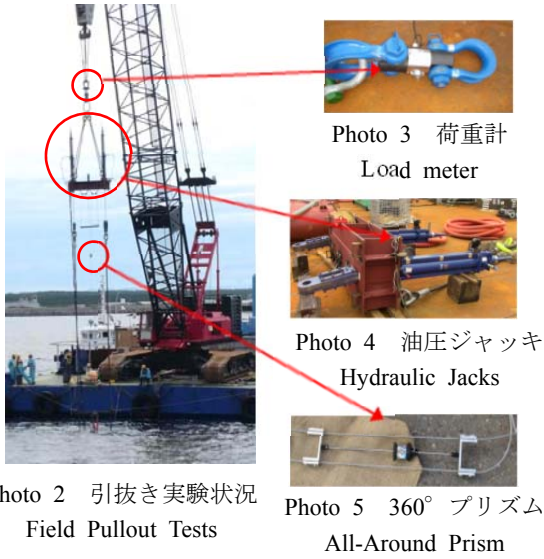


Fig. 21 貫入深度-揚水量 Fig. 22 貫入深度-傾斜角
Pumped Water during Penetration Inclination during Penetration

る引抜き速度の増大に伴い引抜き抵抗が大きくなることが実海域規模でも確認できた。暴風時を想定した引抜き速度(2.5~25mm/sec)では, 自重+周面摩擦抵抗(80~100kN)の2~5倍の引抜き抵抗(220~475kN)が確認された。スカート形状で比較すると, スカート1よりスカート2のほうがスカート内断面積は大きく, サクシオン効果の影響を受けやすいため, 同一引抜き速度における引抜き抵抗は大きくなる結果となった。

Fig. 24に引抜き荷重-引抜き速度の関係を示す。引抜



き速度の増大に伴い、降伏荷重および最大荷重はおおむね対数速度に比例して増加することが確認できた。

5.3.2 頂版下のサクシオン Fig. 25に頂版下のサクシオン P_s —鉛直変位 z の関係を示す。サクシオンは微小な鉛直変位で急増し、その後スカート模型が引抜かれ始めても漸増する傾向がみられた。

Fig. 26に頂版下のサクシオン P_s —引抜き速度 v の関係を示す。引抜き速度の増大に伴い降伏荷重時および最大荷重時のサクシオンはおおむね対数速度に比例して増加する傾向がみられた。以上の結果より、引抜き模型実験で確認できた引抜き速度の増大に伴い微小な変位でもサクシオンが大きく発生し、引抜き抵抗も大きく増大することが実海域での引抜き実験で追認できた。

5.3.3 サクシオンの深度分布 Fig. 27に降伏荷重時におけるサクシオン P_s の深度分布を示す。いずれのスカートおよびケースにおいても、先端付近のサクシオンは頂版付近のそれに比べてやや小さいもののサクシオンが発生した。この結果より、サクシオンによって内部土全体が持ち上げられているものと推定される。

5.3.4 引抜き抵抗力の構成比 各スカート頂版排水条件の最大荷重時における引抜き抵抗力の構成比率は、自重が30~40%、周面摩擦力が60~70%であった。引抜き速度が変化しても周面摩擦力は一定と仮定すると、引抜き速度が大きいCase1-3とCase2-3の最大荷重時における引抜き抵抗力の構成比率は、自重が8~10%、周面摩擦力が12~23%、サクシオン抵抗力が約67~80%であった。

6. 実海域引抜き実験結果のFEM解析による検証

6.1 FEM解析の概要

6.1.1 解析条件 Fig. 28に解析に用いたメッシュ図(スカート1)を示す。基本的な解析条件、解析プログラムは4.1.1と同様とした。地盤の入力定数のうち、内部摩擦角 ϕ と透水係数 k は、現地採取試料を再構成して実施した

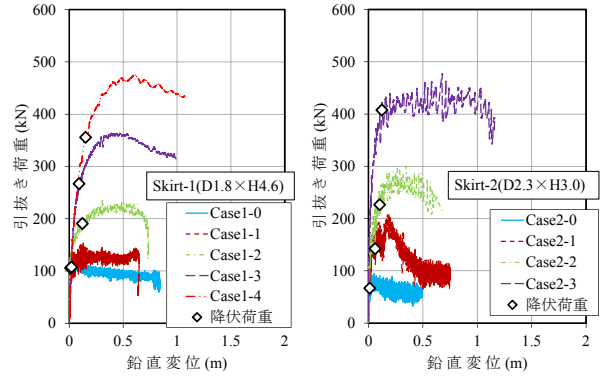


Fig. 23 引抜き荷重—鉛直変位
Pullout Load with Vertical Displacement

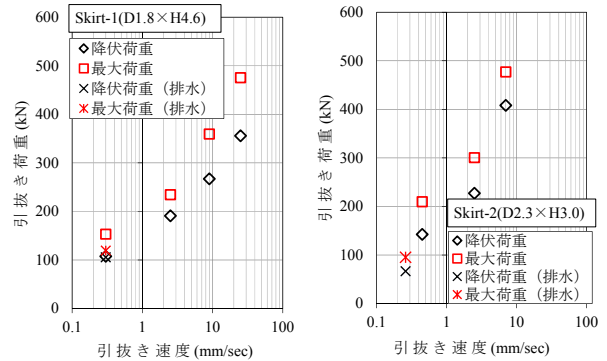


Fig. 24 引抜き荷重—引抜き速度
Effect of Rate of Applied Load on Pullout Resistance

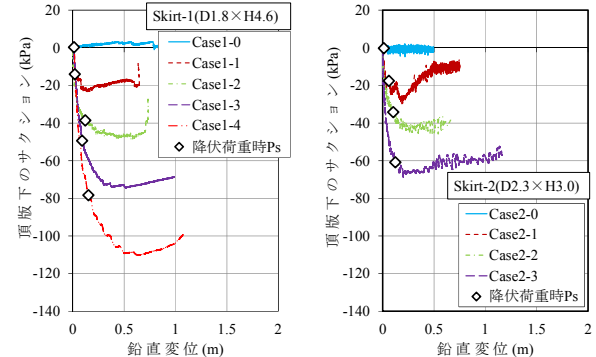


Fig. 25 頂版下のサクシオン—鉛直変位
Suction Pressure Generation underneath Top Plate with Vertical Displacement

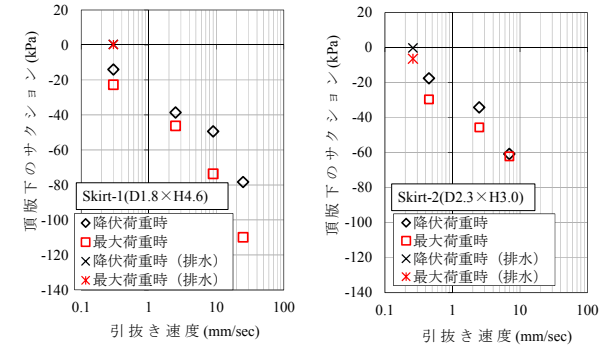


Fig. 26 頂版下のサクシオン—引抜き速度
Effect of Rate of Applied Load on Suction Pressure Generation underneath Top Plate

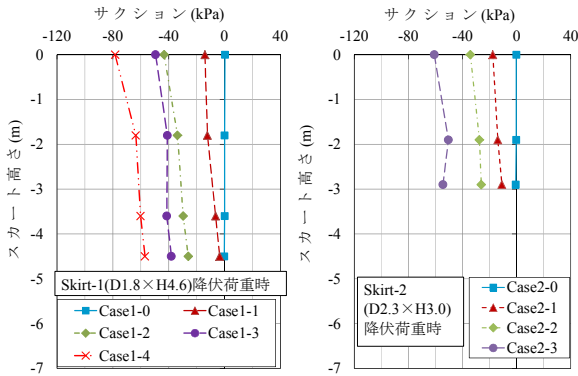


Fig. 27 サクシオンの深度分布

Distribution of Suction Pressure with Depth

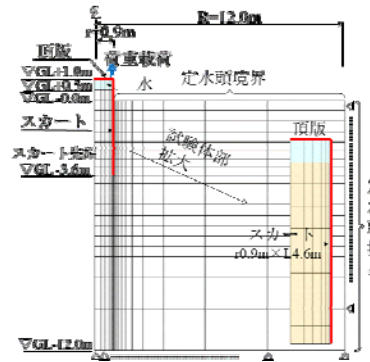


Fig. 28 解析メッシュ図

Axisymmetric Model of Skirt Suction

Table 4 入力定数
Material Properties of Sand,
Model and Water

種別	記号	単位	値
地盤	E	kN/m ²	2.16~4.48×10 ³
	v	-	0.3
	c	kN/m ²	0.0
	φ	°	36.6°
	γ'	kN/m ³	8
試験模型 (頂版, スカート)	k	cm/sec	1.6×10 ⁻⁴
	E	kN/m ²	2.0×10 ⁸
	v	-	0.4
水 (頂版下)	E	kN/m ²	1.0×10 ¹⁰
	v	-	0.49
	k	cm/sec	1.6×10 ⁻⁴

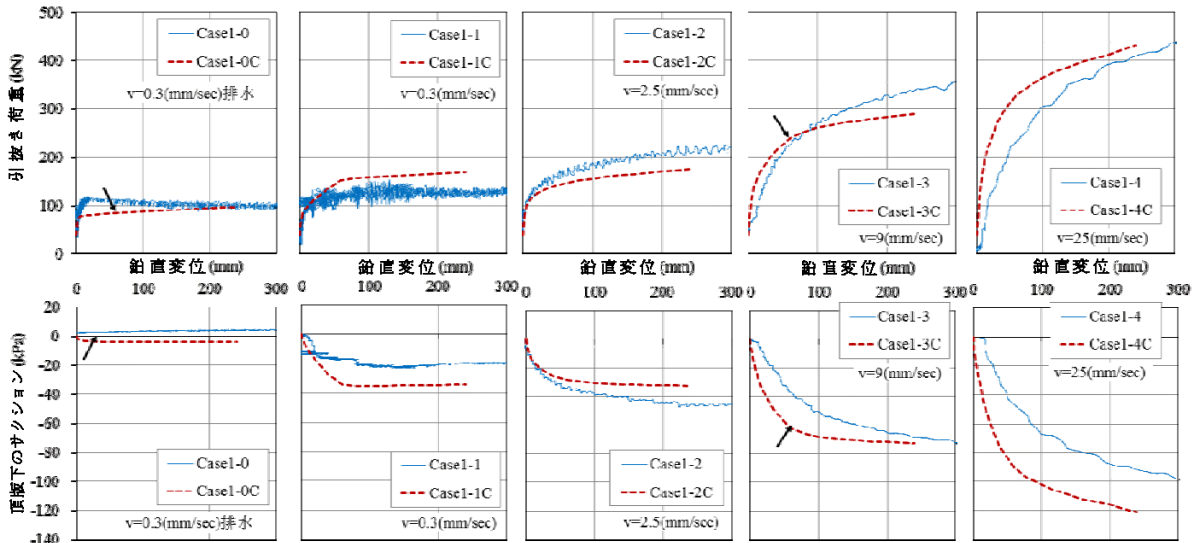


Fig. 29 スカート1の解析結果(上段:引抜き荷重, 下段:頂版下のサクシオン)

Comparison of Measured and Calculated Results of Skirt-1(Upper Stand:Pullout Load, Lower Stand:Suction Pressure)

三軸圧縮試験(CD)結果および透水試験結果から定めた。剛性EはN値から V_s を介して推定した $G_0 (V_s=80N^{0.333}, G_0=\rho V_s^2/g)$ を, $G/G_0 \sim \gamma$ 関係においてせん断ひずみ γ を1% (スカート近傍では大きなせん断ひずみが発生しているため)として低減させた値から求めた。Table 4に入力定数一覧表を示す。貫入時のサクシオンによるスカート内部における土の盛り上がり量は0.5m(一定値)とした。

6.1.2 解析ケース 解析ケースはTable 3と同様とする。ケースの名称は, 各ケースの番号の後に“C”を付けた。解析パラメータは実験同様, 頂版の排水条件と引抜き速度である。頂版排水条件では, 頂版要素を設置せずスカート内部土の上部を定水頭境界とした。

6.2 FEM解析の結果

6.2.1 引抜き荷重と頂版下サクシオン Fig. 29にスカート1(D1.8m×L3.6m)の解析結果(上段:引抜き荷重Pー鉛直変位z, 下段:頂版下水要素のサクシオン P_s ー鉛直変位z)を実験結果とともに示し(解析:赤線, 実験:青線), Fig. 30にスカート2(D2.3m×L2.0m)の解析結果を同様に示す。解析における引抜き荷重ー鉛直変位関係は, すべ

でのケースにおいて実験結果と同様な傾向を示しており, 解析でも引抜き速度が大きくなるにつれ引抜き抵抗が増加する結果が得られた。頂版下のサクシオンー鉛直変位関係では, 大きい引抜き速度では解析結果の頂版下のサクシオンは実験結果よりもやや大きくなる傾向があるが, 引抜き速度の増加とともに発生する頂版下のサクシオンの値が増加するという傾向はよく一致した。

6.2.2 サクシオン分布 Fig. 31に鉛直変位 $z=56mm$ (Fig.29 矢印)時の Case1-0C($v=0.3mm/sec$)と Case1-3C($v=9mm/sec$)のサクシオン分布を示す。引抜き速度が小さいケース(Case1-0C)では, サクシオンはほとんど発生していないが, 速度が大きいケース(Case1-3C)では, スカート内にサクシオンが大きく発生した。

6.2.3 鉛直変位分布 Fig. 32に同じ変位時のz分布を示す。引抜き速度が小さいケース(Case1-0C)では, 変位が大きい部分は頂版およびスカート部分に限定されているのに対し, 速度が大きいケース(Case1-3C)では, スカート内部全体に変位が大きい範囲が広がった。これは, 引抜き速度が大きくなると, 発生したサクシオンによりスカート内部土一緒に持ち上げられ, 引抜き抵抗が増大

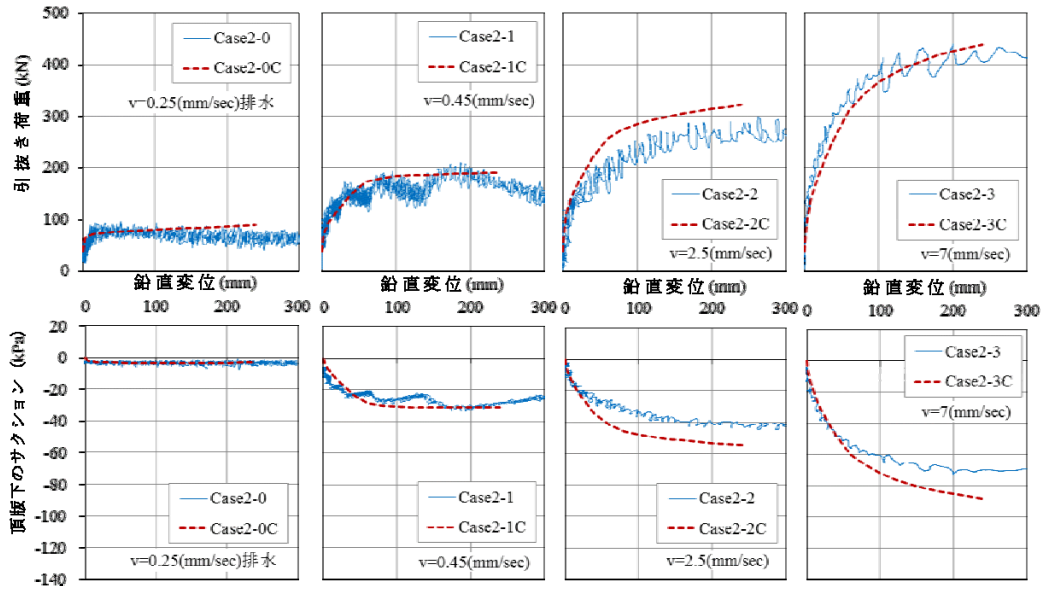


Fig. 30 スカート2の解析結果(上段：引抜き荷重，下段：頂版下のサクシオン)

Comparison of Measured and Calculated Results of Skirt-2(Upper Stand:Pullout Load, Lower Stand:Suction Pressure)

することを示す。

7. おわりに

TLP型の浮体式洋上風車に適用するアンカーとしてスカートサクシオンアンカーの引抜き抵抗を検証した。以下に得られた所見を示す。引抜き速度の増大に伴い微小変位でサクシオンが大きく発生し、降伏時の引抜き荷重が大きくなることが確認できた。また、模型実験で確認できたことが実海域引抜き実験でも追認できた。

- 1) 各引抜き実験のFEM解析結果より、引抜き速度と引抜き荷重およびサクシオンの関係において、解析結果は実験結果と概ね一致したことから、土／水連成FEMを用いることで、スカートサクシオンの引抜き挙動をシミュレーションできる。
- 2) 引抜き速度が大きいケースの最大荷重時では、自重や周面摩擦力に比べてサクシオン抵抗が占める割合は大きく、約6～8割程度であった。
- 3) 実海域の貫入実験結果より、貫入抵抗および揚水量の実測値は、事前の予測結果とよい対応を示しており、既往の予測手法の妥当性が検証できた。

参考文献

- 1) 伊藤，他：新形式海洋構造物基礎の開発(その2)－栈橋先端防衛港基礎への適用－，大林組技術研究所報，No. 64，pp.25-30，2002.1.
- 2) ISO19901-4 Petroleum and natural gas Industries-Offshore Structures-Part4 Geotechnical and foundation design considerations, pp1～pp.204, 2016.3.
- 3) 海洋架橋・橋梁調査委員会：スカート・サクシオン基礎の設計・施工マニュアル, pp.19-23, 2005.6.

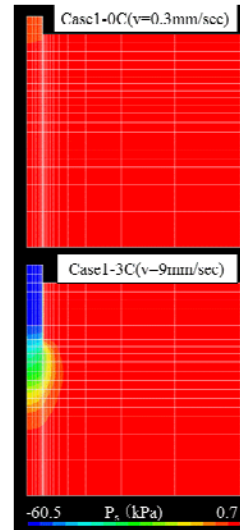


Fig. 31 サクシオン分布
Distribution of Suction Pressure

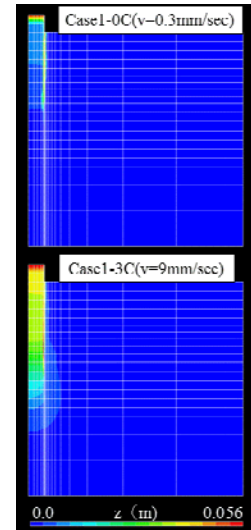


Fig. 32 鉛直変位分布
Distribution of Vertical Displacement

- 4) Martin Achmus, E. T.: Numerical Simulation of the Tensile Resistance of Suction Buckets in Sand, Journal of Ocean and Wind Energy, Vol. 1, No. 4, pp. 231-239, 2014.11.
- 5) Iizuka, A and Ohta, H: A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundation, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.9.
- 6) G.T. Houlsby, E. T.: Design procedures for installation of suction caissons in sand, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering 158, pp135-144, 2005.7.
- 7) 廣長，他：スカート基礎を有する防衛工の施工(その2：姿勢制御)，第57回土木学会全国大会年次学術講演会，2001.9.