

半円筒型スカート基礎の貫入時の浸透流による土粒子挙動に着目した小型模型実験 Model test regarding penetration behavior focused on soil particle behavior due to seepage of hollow semi-cylindrical skirt-foundation

村瀬颯生¹, 前田健一², 小山宏人³, 丹羽俊介⁴, 安部友規⁵

- 1 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻・E-mail address s.murase.496@stn.nitech.ac.jp
 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
 3 (株)大林組 生産技術本部設計第二部
 4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻
 5 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻

概要

洋上風力施設の基礎として期待されるスカートサクシヨン基礎の貫入制御には、浸透流による基礎貫入挙動のメカニズムを理解することが重要である。本研究では、基礎貫入時における基礎先端周りの地盤の変形を可視化するため、半円筒模型を用いた実験及び解析を実施した。結果、サクシヨン作用下において動水勾配の上昇とともに極限支持力は低下し、サクシヨン作用がない場合に比べ、小さい貫入力で沈下していることが明らかとなった。また、土粒子挙動については、基礎沈下時に基礎直下の地盤は圧縮されようとし、基礎に押しつけられた土粒子が主に基礎内部に移動する様子が観察された。加えて、すべり線のようなものが基礎内部の方向に発達している様子が見られた。これらは、上向き浸透流により、基礎内の地盤の有効応力が基礎外地盤よりも低下し、受働抵抗が減少したためと考えられ、サクシヨン基礎貫入における地盤の変形が明らかとなった。

キーワード：浸透流，SS 基礎，支持力

1. はじめに

再生可能エネルギー分野で洋上風力発電は特に成長が見込まれている。日本においては、広い海と安定した風が得られる地域があり、今後洋上風力発電の発展が期待されている。スカートサクシヨン基礎（以下、SS 基礎）は基礎頂版より下方に伸びた円筒形（スカート）を海底地盤に根入れさせて安定性を確保する新形式の海上基礎である。貫入の原理は、スカート内の水を排水することによって生じるスカート内外の水圧差（サクシヨン）を利用する（図1）。

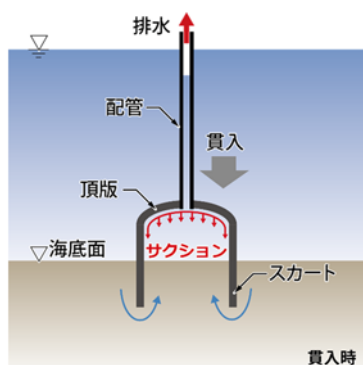


図1 貫入の原理

サクシヨンによる下向き荷重が生じるのに加え、スカート内側地盤に上向きの浸透流が発生することにより、スカート内の地盤の有効応力が低下し、貫入抵抗が低減するという特長を持つ。SS 基礎貫入の制御には、浸透に伴う支持力低下のメカニズムを解明することが重要である。既往の研究¹⁾では、SS 基礎を模擬した円筒模型を用い、基本的な貫入挙動について整理した。本研究では、基礎貫入時挙動のメカニズム解明に向け、土粒子挙動に着目し、半円筒模型を用いて実験と解析を行った。

2. 土粒子挙動の可視化

2.1 実験概要

実験で用いた装置の概略図を図2に示す。実験には高さ300mm、幅200mm、奥行200mmの土槽を用いた。水タンクは基礎模型とチューブで接続し、手で操作できる昇降機上に設置した。土槽には随時水を注入することで土槽内の水位を一定とした。地盤材料は豊浦砂（平均粒径 $D_{50}=0.173\text{mm}$ 、透水係数 $k=2.21 \times 10^{-4}\text{m/s}$ ）を用い、各ケースとも相対密度 D_r は40%とした。実験模型（図3）は半円筒型で基礎の先端から15cmは断面がC型になっている。また、基礎模型との境界からの水の流入を防ぎつつ、観察

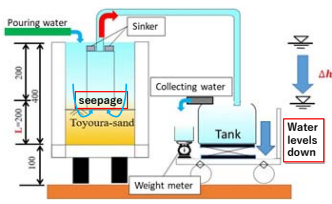


図 2 実験装置概略図

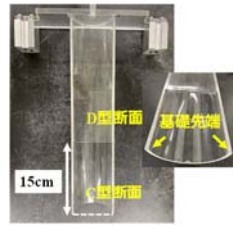


図 3 半円筒基礎模型

表 1 実験ケース一覧

実施ケース	可視化方法	Dr (%)	初期沈下量 (mm)	水位降下 (mm/min)
Case1	色砂	40	25	0
Case2	色砂	40	25	3
Case3	PIV 解析	40	25	0
Case4	PIV 解析	40	25	3

面との摩擦を軽減するために弾力性のあるテープとグリスを用いて実験模型を加工した。実験条件を表 1 に示す。実験はサクシオンありとなしの場合について色砂を用いた実験と PIV 解析を用いた実験により、基礎貫入時の地盤の変形の様子を観察した。色砂を用いる実験では、豊浦砂を墨汁に投入し、乾燥炉で乾燥させることで着色した豊浦砂を作成し、模型地盤は着色砂と無着色砂の互層地盤とした。また、サクシオンがない場合については重りを載荷することで基礎を沈下させている。

2.2 実験結果および考察

(1) 貫入力と沈下量の関係

Case1 と Case2 について、貫入力と沈下量の結果を図 4 に示す。ここで貫入力は以下の式(1)で表される。

$$I_p = Mg + F_{suc} - \rho gV - F \quad (1)$$

ここで、 I_p : 貫入力(N), M : 自重(kg), g : 重力加速度 (m/s^2), F_{suc} : サクシオン力(N), ρ : 水密度 (kg/m^3), V : 模型体積 (m^3), F : 摩擦力である。また、サクシオン力 F_{suc} は以下の式で表される。

$$F_{suc} = \gamma_w(h_0 - h) \times A \quad (2)$$

このとき、 γ_w : 水の単位体積重量 ($9.800N/m^3$), h_0 : 基礎外の水深(m), h : 基礎内の水深(m), A : 頂版面積 (m^2) で

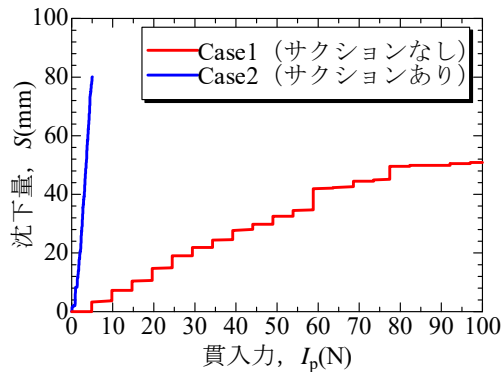


図 4 Case1 (サクシオンなし) と Case2 (サクシオンあり) の貫入力-沈下量の結果の比較

ある。図 4 よりサクシオンありの方が小さい貫入力で沈下していることが分かる。このことから、基礎の沈下においてサクシオンに起因する浸透流による基礎内側地盤の有効応力低下が沈下を大きく支配していると考えられる。

(2) 極限支持力公式との比較

動水勾配上昇に伴う基礎の沈下に関して、支持力の観点から考察する。砂地盤における基礎の支持力公式は、一般的に Terzaghi の支持力公式が用いられる。支持力の算定は Case4 の結果を用い、サクシオン基礎構造物技術マニュアル²⁾より、式(3)-(6)を用いて計算した。

$$q_t = \gamma_1'(t/2)N_\gamma + \sigma_{vm}'N_q \quad (3)$$

$$\sigma_{v' in} = B/A \{ \exp(Az) - 1 \} \quad (4)$$

$$A = 2\mu K_s / r_i \quad (5)$$

$$B = \gamma' - i_{in}\gamma_w \quad (6)$$

ここに、 q_t : 先端抵抗 (kN/m^2), γ_1' : 基礎底面下の土の水中単位体積重量 (kN/m^3), $\sigma_{v' in}$: 基礎内側で求めた先端の有効土被り圧 (kN/m^2), N_γ, N_q : 支持力係数, t : 基礎の側壁厚 (m), z : 地表面からの深さ (m), μ : 摩擦係数, K_s : 土圧係数, i_{in} : 基礎内側の動水勾配, γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3), γ' : 土の水中単位体積重量 (kN/m^3), r_i : 円筒形の内部半径 (m) である。

図 5 に深さ-極限支持力の関係を示す。横軸に地盤深さ、縦軸に極限支持力をとったグラフであり、動水勾配を変化させて計算した。グラフより、動水勾配の大きさに関わらず、地盤が深くなると極限支持力が大きくなっていることが分かる。これは、地盤が深くなると沈下しにくくなっていることを表している。動水勾配 $i=0.0$ の時、極限支持力は $8.5kN/m^2$ だが、動水勾配を $i=0.80$ に上昇させると、極限支持力は $1.5kN/m^2$ となり、動水勾配を上げていくと、極限支持力が小さくなっていく。これは、極限支持力式から考えると、式(6)より、動水勾配 $i=0.0$ の時、 $B=8.8kN/m^3$ だが、動水勾配 $i=0.80$ の時は、 $B=0.96kN/m^3$ となる。B はスカート内地盤の水中単位体積重量の透水による低減を表す項であり、動水勾配の上昇により、大きく低減されていることが分かる。すなわち、動水勾配上昇に伴う極限支持力の低下は上向き浸透流によりスカート内の地盤の有効応力が低減しているためであると考えられる。

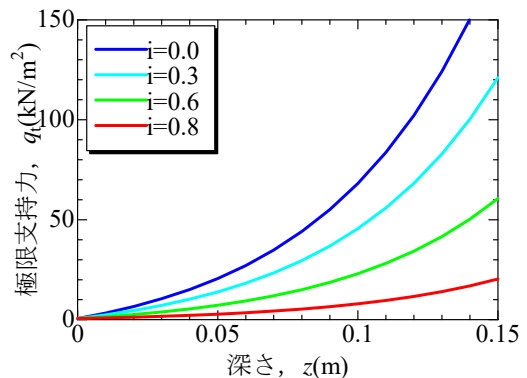


図 5 深さ-極限支持力の関係 (Case4 の結果を用いて計算)

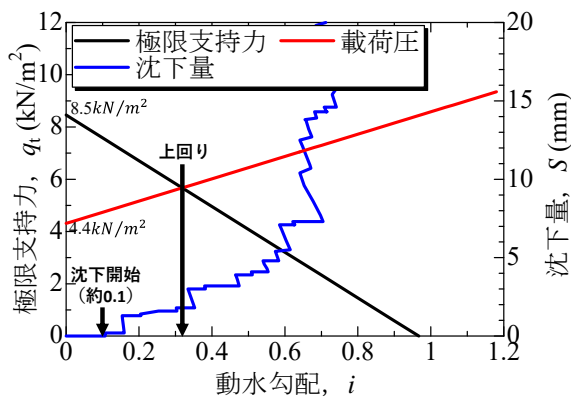


図 6 極限支持力と沈下量の結果 (Case4)

また、動水勾配 $i=0.0$ の場合は、深さに対して指数関数的に極限支持力が増加しているが、動水勾配 $i=0.80$ の時はほぼ直線的になっている。これは、動水勾配を上昇させていくと、極限支持力は深さ方向に大きく影響されなくなることを表している。実際に、図 4 の貫入力-沈下量の結果では、サクシオンがない場合はその傾きは次第に緩やかになっており、深いところでさらに沈下させるには貫入力を大きく増加させる必要があることが分かる。一方で、サクシオンがある場合はその傾きはほぼ直線的であり、深いところでも深さにあまり影響されずに動水勾配によって効率よく沈下していることが考えられる。

図 6 に Case4 の実験条件から算定した極限支持力と、Case4 の実験結果を比較したグラフを示す。動水勾配の上昇に伴い計算上の極限支持力が低下していることが分かる。図中の載荷圧とは、貫入力を基礎先端面積で除した値であり、式(1), (2)より動水勾配 $i=0$ (基礎内外で水位差が 0) の時には、 $F_{suc}=0$ となる。理論上、載荷圧が極限支持力を上回ると沈下が始まると考えられるが、Case2 は載荷圧が極限支持力を上回る前に沈下する結果となった。これは、基礎外側から内側に周りこむ浸透流により、支持力係数が小さくなっている可能性が考えられる。また、沈下に必要な理論上の載荷圧 (8.5 kN/m^2) の約半分の力 (4.4 kN/m^2) でも動水勾配を約 0.1 上昇させることで沈下が発生していることが分かる。

(3) 色砂実験による基礎先端周辺地盤の変形

浸透流による基礎周辺地盤の変形について、Case1 (サクシオンなし) と Case2 (サクシオンあり) の色砂の層の形から考察する。基礎先端の幅は 5mm で色砂の間隔は 10mm である。サクシオンの有無により色砂の層の形に共通点と相違点が見られた。

共通点として、図 7 に示すように基礎直下の色砂層が水平方向に連続したまま、貫入方向に変形しており、基礎の沈下前にすでに貫入方向に動いている様子が分かる。これは、基礎が沈下することによって、基礎直下の地盤が圧縮されたためであると考えられる。また、基礎内外の色砂の層が上に凸のような形に変形している様子が観察できる。これは、基礎先端付近の土粒子が基礎の沈下により押しつけられ、基礎内外に移動したためであると考えられる。

相違点としては、Case2 (サクシオンあり) の場合について、図 8 に示すように、基礎内の地盤が変形 (以下、盤ぶくれ) している様子が観察された。基礎中央部で低くなっており、その両側が盛り上がった、M 字形のようになっていることが分かる。また、基礎内で色砂層の間隔が大きくなっていることが分かる。これは、Case1 (サクシオンなし) の場合には観察されなかった。そのため、この M 字形の変形は浸透流の影響によるものであると考えられる。また、沈下量 90mm の時の盤ぶくれの様子について図 9 に示す。Case1 は沈下が進行するにつれて盤ぶくれの高さは初期の地盤よりも 2mm 高くなっているのに対し、Case2 は盤ぶくれの高さは初期の地盤よりも 31mm 高くなっている。このことから、盤ぶくれは基礎内外の水位差に起因する浸透流が大きく影響していることが明らかとなった。また、実験開始前の土の全体の体積を比較すると、盤ぶくれの分だけ体積が増加していることから基礎内の地盤は非常に緩い地盤になっていると考えられる。そのため、基礎内側の土圧が小さくなり、基礎に押された土粒子がスカート内に移動しやすく色砂層が基礎内外で異なる形状になったと考えられる。

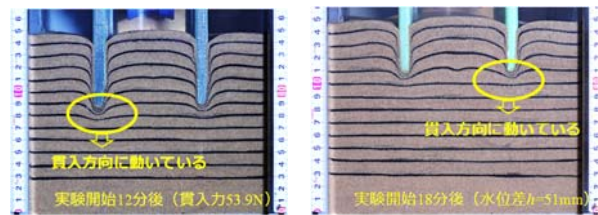


図 7 基礎内の色砂の層の様子 (共通点)

左図: Case1 (サクシオンなし, 沈下量 $S=58\text{mm}$)

右図: Case2 (サクシオンあり, 沈下量 $S=37\text{mm}$)

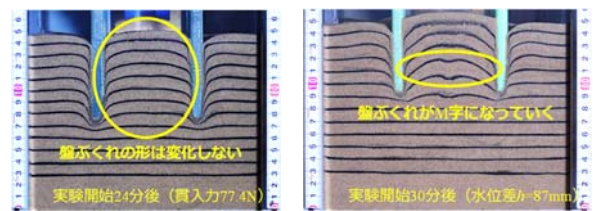


図 8 基礎内の色砂の層の様子 (相違点)

左図: Case1 (サクシオンなし, 沈下量 $S=70\text{mm}$)

右図: Case2 (サクシオンあり, 沈下量 $S=49\text{mm}$)

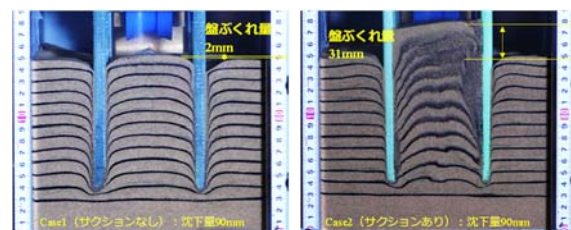


図 9 沈下量 $S=90\text{mm}$ の時の盤ぶくれの様子

左図: Case1 (サクシオンなし)

右図: Case2 (サクシオンあり)

(4) PIV 解析による土粒子挙動の可視化

Case3 (サクシオンなし) の場合の PIV 解析結果を示す (図 10)。鉛直方向の土粒子の動きについて、基礎直下の土粒子が貫入方向に動いている様子が分かる (図 10, 左)。水平方向の動きについては、基礎先端付近の土粒子が基礎内部と外部の両方向に動いている様子が分かる (図 10, 右)。地盤の支持力理論³⁾によると、貫入力が増加とともに基礎直下の地盤が圧縮されようとしていると考えられる。しかし、地盤は横に広がるようとするため、水平方向において基礎内外の方向に速度が出ていると考えられる。

Case4 (サクシオンあり) の場合の PIV 解析結果を示す (図 11)。鉛直方向の土粒子の動きについて、基礎直下の土粒子が貫入方向に動いている様子が分かる (図 11, 左)。水平方向の土粒子の動きについては、主に基礎内部の方向に動いている様子が分かる (図 11, 右)。

サクシオンがある場合とない場合の水平方向の土粒子の動きには相違点があった。サクシオンがない場合は基礎直下の土粒子が遠回りして基礎内部に動いている様子が観察された (図 10, 右)。対してサクシオンがある場合は直下の広い領域の土粒子が最短で基礎内部に動いていた (図 11, 右)。これは上向き浸透流により、基礎内側周辺の土圧が小さくなり、基礎先端に押された土粒子がスカート内に移動しやすくなっているためであると考えられる。

(5) ひずみ速度についての考察

PIV 解析から得られた速度勾配テンソルを計算し、ひずみ速度について考察する。基礎沈下時におけるせん断変形

の様子を最大せん断ひずみ速度を計算することにより検討する。最大せん断ひずみ速度を以下の式で定義する。

$$1/2\dot{\gamma}_{max} = \sqrt{\{1/2(\partial u/\partial x - \partial v/\partial y)\}^2 + \{1/2(\partial v/\partial x + \partial u/\partial y)\}^2} \quad (7)$$

ここで、 $1/2\dot{\gamma}_{max}$: 最大せん断ひずみ速度(1/s), u : 水平方向速度, v : 鉛直方向速度である。式(7)の平方根の中の第 1 項は、純粋せん断を表しており、鉛直方向に縮んで水平方向に広がる速度である。第 2 項は、単純せん断を表しており、ずり変形する速度である。Case3 (サクシオンなし) と Case4 (サクシオンあり) の実験データを用いて、せん断変形の様子を検討する。

Case3 (サクシオンなし) の実験で沈下量が 45mm に達した時の、最大せん断ひずみ速度を計算した。結果を図 12 (左) に示す。図中で白色の実線で囲まれた部分が基礎先端を表している。せん断変形している部分を赤色で表示している。せん断はスカート周面および先端で集中しており、変形の局所化が見られた。また、基礎先端で二等辺三角形をした主働くさびのような領域があり、その頂点からすべり線のようなものがスカート内外に向かって、ほぼ左右対称に伸びている様子が分かる。この分布から、基礎直下の地盤はある程度は基礎と一体となって剛体として、地盤の中に押し込まれていると考えられる。そして、このくさびが沈もうとすることで左右の土塊で抵抗が働き、破壊し、沈下すると考えられる。

図 12 (右) に沈下量が約 60mm に達した時の最大せん断ひずみ速度分布を示す。沈下量が 45mm の時と同様に、スカート周面および先端で変形の局所化が見られた。基礎先端付近で主働くさびのような領域が見られ、すべり線のようなものもほぼ左右対称に発達していることが観察できる。

Case4 (サクシオンあり) の実験で沈下量が 41mm に達した時の最大せん断ひずみ速度を計算した。結果を図 13 (左) に示す。Case3 と同様に、基礎直下で主働くさびのような領域が見られた。しかし、その形は不等辺三角形をしていることが分かる。また、すべり線のようなものはスカート内外に向かって発達しているのではなく、スカート内部に向かう方向に発達していることが分かる。これは、スカート内部の方が上向き浸透流により地盤の有効応力が低下し、受働抵抗が小さいため、内部に発達したものと考えられる。

図 13 (右) に沈下量が 70mm に達した時の最大せん断ひずみ速度分布を示す。沈下量が 41mm の時と同様に、基礎直下で不等辺三角形をした主働くさびのような領域が見られ、すべり線のようなものはスカート内部に発達していることが分かる。沈下量が 41mm の時と比較すると、より周面で変形が集中していることが分かり、沈下が進行すると周面抵抗が大きくなることが考えられる。

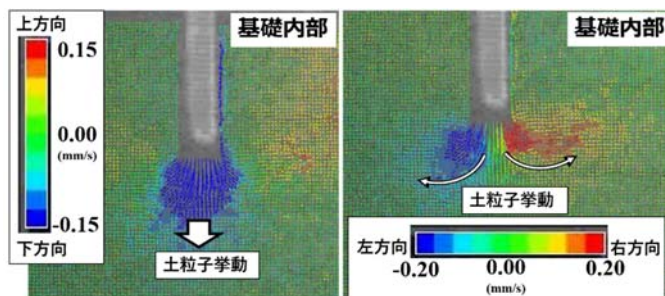


図 10 サクシオンなしの場合の土粒子の挙動
(Case1 : 貫入力 $I=34.3\text{N}$, 沈下量 $S=42\text{mm}$)
左図 : 鉛直方向, 右図 : 水平方向

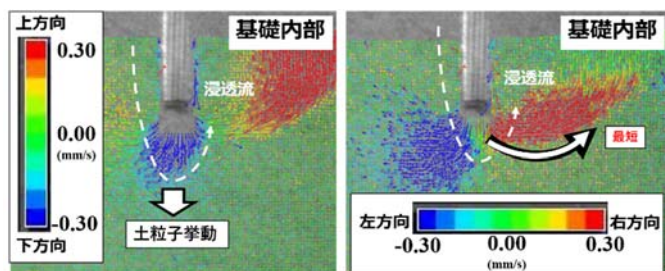


図 11 サクシオンありの場合の土粒子の挙動
(Case2 : 水位差 $h=45\text{mm}$, 沈下量 $S=35\text{mm}$)
左図 : 鉛直方向, 右図 : 水平方向

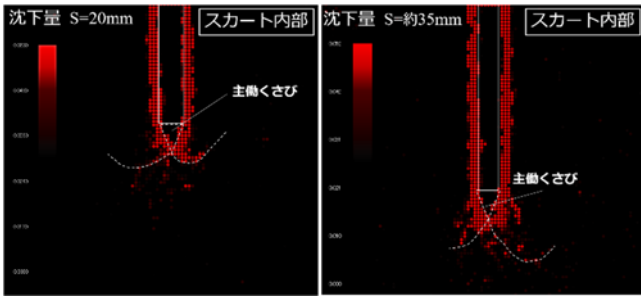


図 12 サクシヨンなしの場合の最大せん断ひずみ速度の分布
 左図：沈下量 $S=45\text{mm}$ のとき
 右図：沈下量 $S=60\text{mm}$ のとき

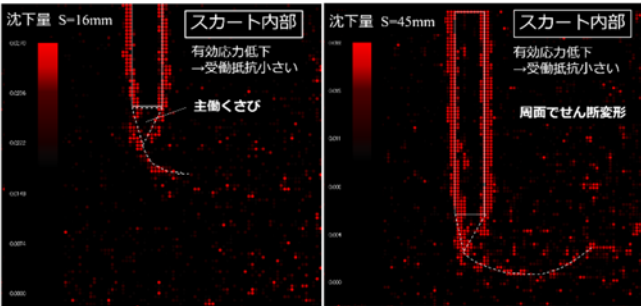


図 13 サクシヨンありの場合の最大せん断ひずみ速度の分布
 左図：沈下量 $S=41\text{mm}$ のとき
 右図：沈下量 $S=70\text{mm}$ のとき

3. 浸透流解析

3.1 解析概要

基礎貫入時挙動のメカニズムを理解するためには、サクシヨン載荷下における、土粒子挙動とは別に地盤内で発生している浸透流、間隙水圧の状態を把握することが重要である。しかしながら、地盤内の浸透流は目視観察が困難であるため、有限要素法 (FEM) を用いた定常解析により、飽和浸透流を求めた。解析では噴砂や盤ぶくれの発達過程、貫入による基礎先端付近の複雑な地盤の相対密度変化、過剰間隙水圧変化を再現することは不可能であるが、貫入時に地盤内で発生している浸透流の基礎的な知見を得ることを目的とした。解析計算には三次元飽和-不飽和浸透流解析ソフトである地層科学研究所 GEOSCIENCE の 3D-Flow を使用した。飽和/不飽和浸透問題、定常/非定常解析、不圧/被圧地下水問題、透水係数の異方性考慮に対応可能である。

3.2 解析条件

解析条件について、地盤材料である豊浦砂のパラメータは実験条件と同様の透水係数 $k=2.21 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、飽和体積含水率 0.453 は室内試験結果より設定し、比貯留係数 0.005 は仮定した。解析は、Case4 の実験結果を対象に行った。Case2 の沈下量 $S=35, 45, 55, 65\text{mm}$ となったときの、それぞれの水位差 $\Delta h=54, 69, 84, 99\text{mm}$ を入力値とした。境界条件は、基礎根入れ部分を非排水壁とし、基礎内外の水位差を表現するために、基礎内外に異なる静水圧を入力した。

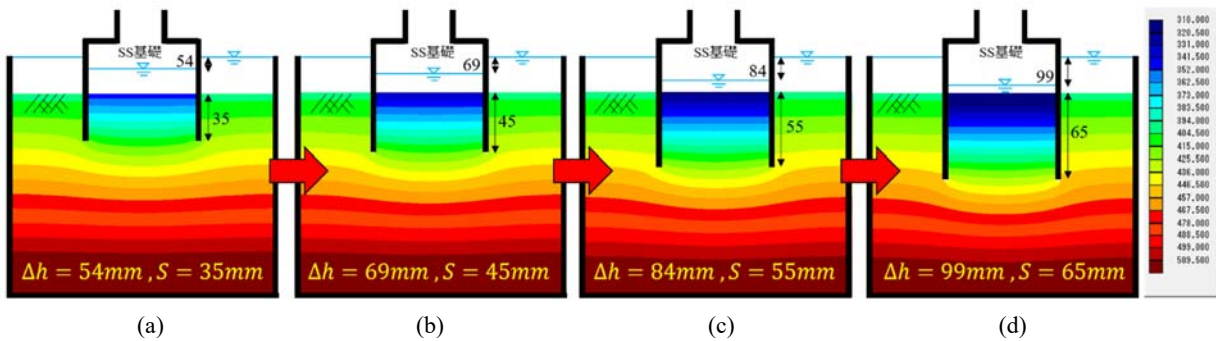


図 14 圧力水頭コンター図

(a) $\Delta h=54\text{mm}, S=35\text{mm}$ (b) $\Delta h=69\text{mm}, S=45\text{mm}$ (c) $\Delta h=84\text{mm}, S=55\text{mm}$ (d) $\Delta h=99\text{mm}, S=65\text{mm}$

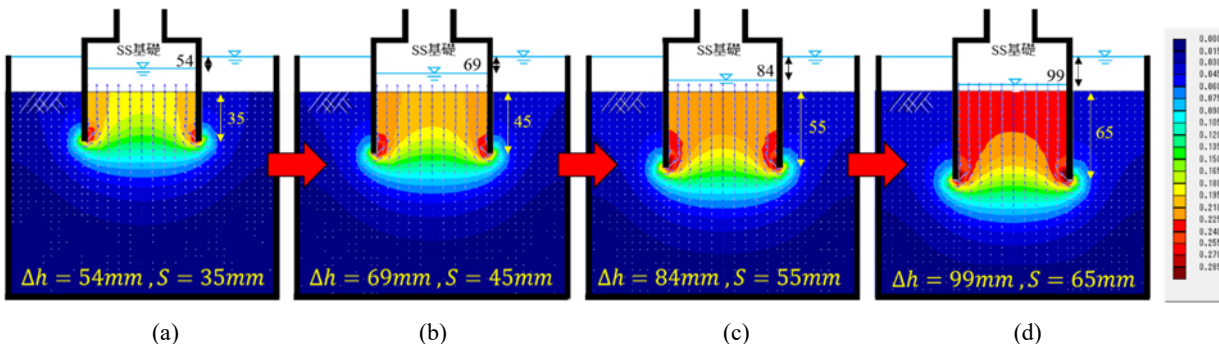


図 15 浸透流速コンター図

(a) $\Delta h=54\text{mm}, S=35\text{mm}$ (b) $\Delta h=69\text{mm}, S=45\text{mm}$ (c) $\Delta h=84\text{mm}, S=55\text{mm}$ (d) $\Delta h=99\text{mm}, S=65\text{mm}$

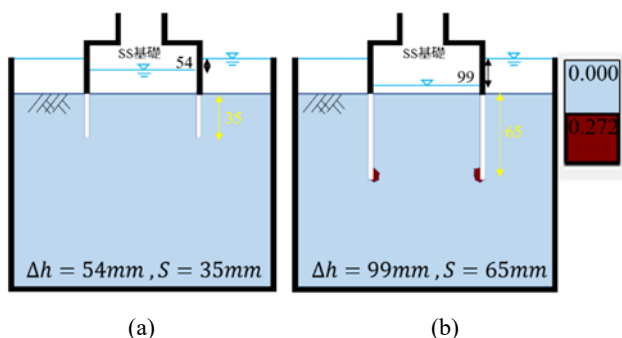


図 16 限界流速の二値化

(a) $\Delta h=54\text{mm}$, $S=35\text{mm}$ (b) $\Delta h=99\text{mm}$, $S=65\text{mm}$

3.3 実験・解析結果および考察

(1) 圧力水頭分布

図 14 に圧力水頭コンター図の結果を示す。定常解析では、十分時間が経過し、間隙水圧が平衡状態に至ったときの分布を示している。基礎内の水位低下に伴い、基礎内の圧力水頭が低下している。また、基礎内の水位低下（沈下の進行）に対して、基礎外の圧力変化は小さいことが分かる。しかし、基礎内では、コンターが密になっており、圧力変化、圧力勾配が大きくなっている。そのため、基礎内には大きな外力が働いていることが考えられる。

(2) 浸透流速分布

図 15 に浸透流速コンター図の結果を示す。沈下量 $S=35\text{mm}$ の時、浸透流速は基礎先端から内壁にかけて大きくなっている。沈下の進行に伴い、浸透流速が大きい範囲は次第に広がっていき、沈下量が $S=65\text{mm}$ の時には基礎内で均一に大きくなっている。これは、沈下が小さいときには最も浸透経路長の短い壁面付近のみに流入が集中するが、沈下が大きくなると、より広範囲から内側地盤に流入する浸透流同士が相互に押合う効果で均一に近い流速になったためだと考える。

浸透流を受ける土粒子の移動開始の指標となる限界流速を基準に二値化した分布を図 16 に示す（限界流速を赤色で示す）。限界流速については、杉井らにより提案された多粒子限界流速の式⁴⁾を用いて算出した。沈下量が $S=35\text{mm}$ の時には、限界流速は発生していないが、沈下量が $S=65\text{mm}$ の時には、基礎先端から内壁付近で限界流速が発生した。また、この結果は PIV 解析による土粒子の移動が先端付近で確認された事実と整合する。

4. まとめ

本研究では、スカートサクシオン基礎のサクシオンによる貫入時挙動のメカニズム解明に向け、実験及び解析を行った。半円筒模型を使用し、色砂を用いた実験や PIV 解析を行うことにより、基礎沈下時の土粒子の挙動について可視化することに成功し、サクシオンによる基礎沈下時の地盤の変形が明らかとなった。実験結果および解析結果から、以下の知見を得ることができた。

1) 貫入力と沈下量の関係について、サクシオンありの方がサクシオンなしの場合に比べ、小さい貫入力で沈下

しており、基礎の沈下においてサクシオンに起因する地盤の有効応力の低下が沈下を大きく支配していることが明らかとなった。

- 2) 動水勾配の上昇に伴い、極限支持力は低下する。本実験においては、沈下させるのに必要な理論上の貫入力 (8.5kN/m^2) の約半分 (4.4kN/m^2) の力でも動水勾配を 0.1 程度上昇させることで沈下が発生することが確認できた。
- 3) 色砂を用いた実験により、サクシオンありの場合については、基礎内の盤ぶくれの着色層の形が M 字形に変形する様子が観察された。これは、サクシオンなしの場合については観察されず、浸透による地盤の変形であることが明らかとなった。
- 4) PIV 解析により、水平方向の土粒子の挙動について、サクシオンなしの場合は基礎直下の土粒子が遠回りして基礎内部に入っていく様子が明らかとなった。サクシオンありの場合は、基礎直下の広い範囲の土粒子が浸透流により、上向きに最短で基礎内部に入っていく様子が明らかとなった。
- 5) ひずみ速度の計算により、サクシオンの有無に関わらず、せん断変形はスカート周面および先端に集中しており、変形の局所化が見られた。サクシオンがない場合にはすべり線は左右対称で基礎直下の地盤には二等辺三角形の主働くさびのような領域が見られた。サクシオンがある場合は、すべり線はスカート内部方向にのみ発達しており、基礎直下の地盤では不等辺三角形の主働くさびのような領域が見られた。これはスカート内部の方が上向き浸透流により、地盤の有効応力が低下し、受働抵抗が小さいためであると考えられる。
- 6) 浸透流解析により、基礎内部は基礎外部に比べ、圧力勾配が大きくなっており、基礎内には大きな外力が働いていると考えられる。沈下初期においては、浸透流速は基礎先端から内壁にかけて大きいですが、沈下が進行するにつれ、周辺地盤の広範囲から間隙水が集水されることで基礎内の浸透流速は一様に大きくなるのが明らかとなった。

本研究では、サクシオン基礎貫入時挙動のメカニズム解明に向け、基礎内部のゆるみを土粒子の挙動から定性的に評価した。今後は基礎内部のゆるみを間隙水圧の測定等により、定量的に評価することを試みる。

参考文献

- 1) 小山宏人ら, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, I_883-I_888, 2020.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター: サクシオン基礎構造物技術マニュアル, pp.42-69, 2003.
- 3) 河上房義・森芳信・柳沢栄司: 土質力学, 森北出版, 2012, pp.156
- 4) 杉井俊夫, 山田公夫, 中島賢: 多粒子限界流速を用いた地盤の浸透破壊メカニズムに関する研究, 地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム論文集, pp.123-128, 2002.