

底面揚水式基礎の開発 - 基本原理と適用性の検討 -

Development of Horizontally Skirted Foundation

- Basic Concept for Utilization of Artificially Induced Suction and Its Applicability -

岡本 道孝 笹倉 剛 小林 一三
吉田 輝 畔柳 幹雄¹⁾

要 約

全応力一定条件下で飽和地盤中に浸透流を生じさせた場合、間隙水圧の減少とそれに伴う有効応力の増加（サクシジョンの発生）が生ずる。例えば、水浸状態の直接基礎底面から地下水を揚水した場合、海底面から基礎底面に向かう浸透流を誘導することになり、基礎底面近傍地盤内にサクシジョンの作用域を形成できる。サクシジョンの発生に伴う有効応力の増加によって、結果として地盤のせん断強度が増加するが、底面揚水式基礎とはこのメカニズムによって基礎の安定性を自律的に向上させる新型基礎構造である。これによって増加した支持力を利用することで、例えば基礎寸法の低減などのコストダウンを図ることができる。本研究では、この基本原理の適用性を検証するため、遠心模型実験によって人工的に発生させたサクシジョンが直接基礎の支持力に及ぼす影響を調査した。その結果、底面揚水式基礎は通常形式の基礎よりも大きな極限鉛直支持力、滑動抵抗、並びに転倒抵抗を有していることが確認できた。また、底面揚水式基礎の挙動評価手法確立を目的として有限要素解析も併せて実施し、実験と同様の効果を確認することができた。

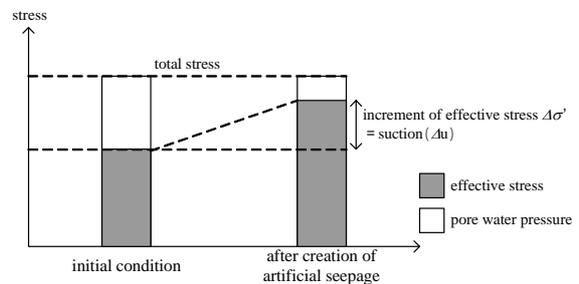
目 次

- ・はじめに
- ・底面揚水式基礎の概念
- ・遠心模型実験
- ・有限要素解析
- ・おわりに

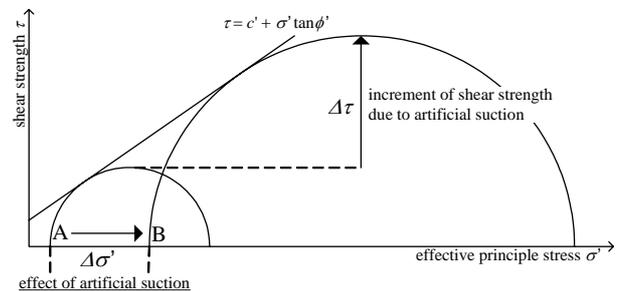
はじめに

水浸状態の地盤内に浸透流を発生させた場合、地盤中の間隙水圧の減少が生ずる。これに伴い、全応力一定の条件下では間隙水圧減少分相当の有効応力の増加が生じ、有効応力レベルの上昇による、せん断強度の増加が起こる。浸透流の存在下で全応力が一定に保たれる条件として、例えば、水深が一定で、なおかつ浸透水圧によって土粒子が移動せず、骨格変形に伴う地盤の体積変化（膨張）が生じない状況を考えることができる。ここでは、浸透流の形成によって新たに生じる有効応力増分をサクシジョンと定義する。Fig.1は、サクシジョンの発生によって有効応力が増加し、地盤のせん断強度が増加すること模式的に表した図である。この原理は、砂のように低拘束圧下での強度が小さな材料の三軸圧縮試験などで、供試体を自立させるために用いられる手法と同じであり、サクシジョンの誘導によって得られる地盤強度の増加は、地盤強度の拘束圧依存性が高い材料、すなわち有効内部摩擦角 ϕ が大きな材料ほど大きく期待できる。このように人工的に誘導したサクシジョンは、セメントや薬液などを用いることなく、地盤が本来有する強度を有効に利用しつつ、より大きな強度をこれに期待できるようにすることを可能とするも

ので、方法論として従来の固化系の地盤改良工法と一線を画する。本報では人工的に発生させたサクシジョンを用いて地盤強度を増加させ、直接基礎の安定性を向上させる技術について検討した結果について述べる。



(a) Stress Conditions



(b) Increment of Shear Strength due to Artificial Seepage

Fig. 1 General Concept for Soil Improvement Technique using Artificially Created Suction

1) 土木設計本部

キーワード: 直接基礎, 支持力, 浸透流, サクシジョン, 遠心模型実験, 弾塑性解析

・底面揚水式基礎の概念

底面揚水式基礎 (horizontally skirted foundation) の概念を Fig.2 に示す。基礎地盤からの揚水のため、基礎底盤の一部を透水材料 (例えば、ポーラスメタルやポーラスコンクリートなど) を用いて構築する。透水材料の選定に際しては、フィルター則、損失水頭、必要排水量、作用応力の観点から検討を行う必要がある。

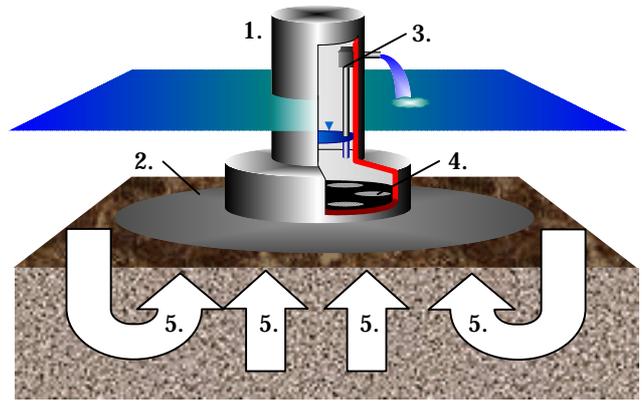
基礎内空側に揚水ポンプなどの排水機構を設け、基礎内に流入した地下水を基礎外部に排水することで、基礎内水位と基礎外水位に水位差を生じさせる。これによって、海底面から基礎底面に向かう浸透流を基礎地盤内に発生させることができる。また、同時に基礎近傍地盤表層を遮水性材料によって被覆することで、浸透流路長を増加させ、サクシジョンの作用域を拡大させるとともに、所定のサクシジョン力を得るために必要な水位差を低減させる措置をとることもランニングコストの低減に対して有効な手段となる。更に、基礎周辺地表面を被覆する遮水性材料には上述の機能の他、基礎地盤の洗掘防止効果も期待することができる。この概念は A.N.Schofield によって提唱された 'suction anchor¹⁾' と同様のものであるが、suction anchor が、人工浸透流によって遮水性材料表面に付加的上載圧を作用させ、基礎の引抜き抵抗を改善することに主眼を置いているのに対し、底面揚水式基礎は、基礎の引き抜き抵抗のほか、人工浸透流によって得られるサクシジョンを有効応力レベルの増加とこれに伴う地盤のせん断抵抗改善に用いることを主目的とする。この意味合いからすれば、底面揚水式基礎は、Schofield のアイデアの発展型と位置付けられる。

・遠心模型実験

1. 実験手法

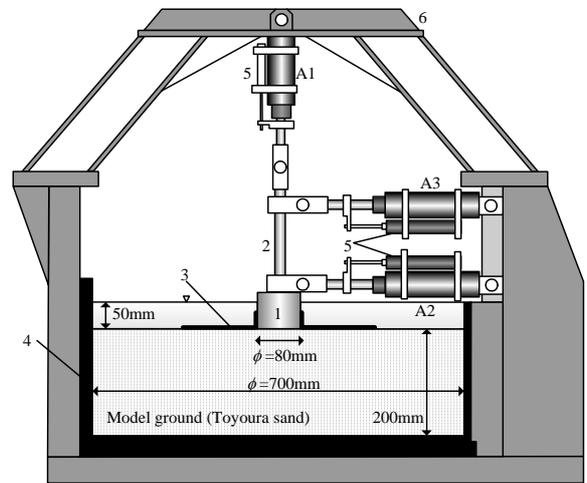
Fig.3 に実験装置の概要を示す。円筒形剛性土槽は、内径 700mm、深さ 300mm であり、この内部に豊浦砂を用いた空中落下法によって、厚さ 200mm、目標相対密度 85% として模型地盤を作成した。なお、別途実施した室内試験から模型地盤の透水係数は約 $4.0 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ と求められた。模型地盤作成後、地盤底面から緩やかに水道水を浸透させ、模型地盤表面から 50mm 上方まで水面が上昇するまで浸透を続けた。地盤中央に設置されている模型基礎は直径 80mm の円形で、載荷フレームを介して、3機の油圧アクチュエータとピン結合されている。これらのアクチュエータは、それぞれ模型基礎に鉛直、水平、転倒荷重を作用させるためのものである。Fig.4 に模型基礎の詳細を示す。模型基礎上部には基礎下面中央を作用点と定義する鉛直荷重 V 、水平荷重 H 、モーメント M を計測するための3成分ロードセルが搭載されている。模型基礎下部は圧力室となっており、地盤に付与するサクシジョンを計測するための水圧計が設置されている。圧力室下面をポーラスメタル (透水係数 $k=6.9 \times 10^{-6} \text{m/sec}$) で作成し、これを通して水が圧力室に流入できるようにした。圧力室に流入した水は、シンフレックスチューブを介して連結されている電動式揚水ポンプによって、外部タンクに排出される。なお、排水はポンプの定格排水能力に相当する 4.0L/min の一定速度で実施した。

Fig.5 に、遠心模型実験で地盤に付与した荷重履歴を模式的に示す。なお、全ての実験は 40G の遠心加速度場において実施した。所定の遠心加速度を付与した後、初めに変位制御方式 (1 mm/min) で鉛直載荷試験を実施し、サクシジョンが基礎の極限鉛直支持力に及ぼ



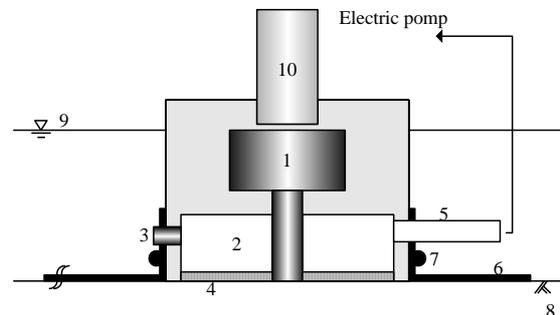
1: foundation, 2: horizontal skirt, 3: pumping apparatus, 4: porous materials, 5: artificial seepage,

Fig.2 Image of horizontally skirted foundation



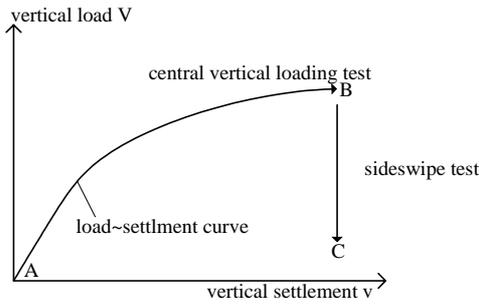
1: model foundation, 2: loading bar, 3: horizontal skirt, 4: container, 5: displacement transducer, 6: reaction frame
A1: vertical actuator, A2: lower horizontal actuator, A3: upper horizontal actuator

Fig.3 Sketch of Model Configuration

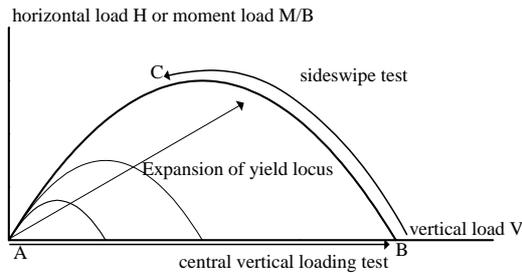


1: load cell, 2: scoop, 3: water pressure gauge, 4: porous metal, 5: drainage pipe, 6: horizontal skirt 7: o-ring, 8: model ground, 9: water surface, 10: loading bar

Fig.4 Sketch of Model Foundation



(a) Vertical Load-settlement Relationship



(b) Load Path in V-H or V-M/B Plane

Fig.5 Procedures of Loading tests

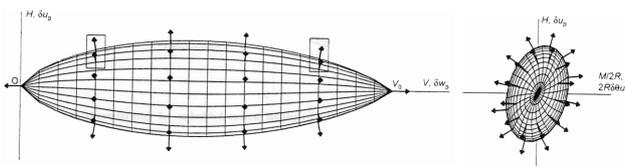


Fig.6 Numerical Model of Yield Loci.(Martin & Houlsby⁹⁾)

す影響について調査した。Murff ら²⁾が提案している 'Macroscopic plasticity theory' によれば、鉛直荷重 V 、滑動抵抗 H 、転倒抵抗 M/B (B : 基礎径) 空間に形成される紡錘型の基礎の支持力降伏曲面 (Fig.6³⁾) は、付加した鉛直荷重の増大に伴って外側に拡大すると考えられている。地盤に所定の沈下量を付与した後、荷重を停止し、sideswipe test を実施した。sideswipe test とは、鉛直沈下量を一定に保持したまま、基礎に対して強制的に滑動、転倒を生じさせるもので、試験開始とともに、先行付加した鉛直荷重の除荷と滑動抵抗、転倒抵抗の発現が生じ、Fig.5 に示すような荷重経路を示すことが知られている。この荷重経路は鉛直荷重を一定とした滑動抵抗試験、あるいは転倒抵抗試験から得られる降伏点分布をトレースすると考えられており、洋上プラットフォーム基礎 (spudcan footing) の研究⁴⁾に際し、Tan によって初めて導入された手法である。Martin ら⁵⁾は、sideswipe 中は地盤の弾性的挙動と塑性的挙動が均衡するため、地盤の塑性変形に伴う降伏曲面の拡大の影響を大きく受けず、荷重経路は初期の (最初に実施した鉛直荷重試験によって拡大させた) 降伏曲面に極めて近い位置をトレースすると考察している。本研究では sideswipe test によって得られる試験結果をもとに降伏曲面の直接比較を行うことで、人工的に付加したサクシオンが基礎の安定性に及ぼす影響を検討することとした。

2. 実験ケース

Table 1に実験ケースを示す。サクシオン発生領域の大きさが基

Table 1 Test programme

Test code	Applied suction	Diameter of horizontal skirt	Sideswipe test
Case1-S	0.0 kPa	-	Horizontal loading
Case1-M	0.0 kPa		Moment loading
Case2-S	-20.1 kPa	160mm	Horizontal loading
Case2-M	-18.9 kPa		Moment loading
Case3-S	-20.3 kPa	320mm	Horizontal loading
Case3-M	-35.3 kPa		Moment loading

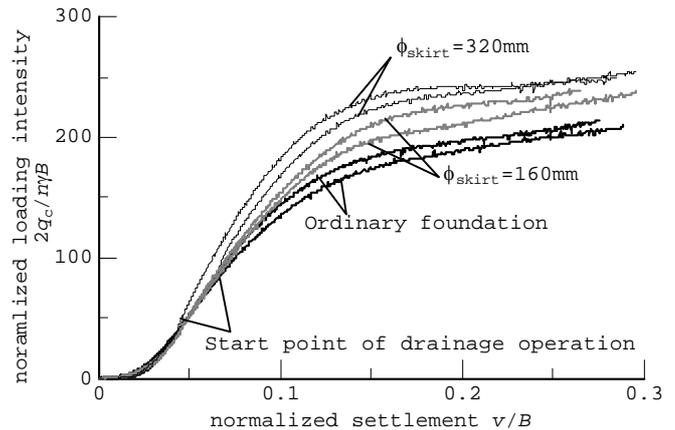


Fig.7 Vertical Load ~ Settlement Relationships (Result of Centrifuge modelling test)

礎の支持力降伏曲面に及ぼす影響を確認することを目的とし、2種類の遮水シートを用いて試験を実施した。また、比較のためにサクシオンを発生させず、遮水シートも有しない通常形式の基礎についても試験を行った。表中には試験中に付加したサクシオンの計測値 (試験中全平均値) を併記した。前述のように人工浸透流の形成は、揚水流速を一定として行ったため、試験結果ごとに付加したサクシオンが、ややばらつく結果となった。

3. 実験結果

(1) 鉛直支持力

Fig.7 に鉛直荷重試験から得られた荷重 ~ 沈下曲線を示す。ここで、 q_c は、鉛直支持力であり、遠心加速度比 n 、地盤密度 γ 、基礎径 B によって正規化を行った。同様に鉛直変位量 v も基礎径 B によって正規化した。荷重初期段階で、鉛直荷重は漸増的傾向を示すが、これは基礎と地盤の密着が累進的に形成されていることに起因するものである。その後、ほぼ一定の地盤反力係数のもとで荷重は増加し、 $v/D=0.15$ 程度の沈下量で降伏に至っている。図中には底面揚水式基礎を対象とした試験に関して、排水開始位置も併記したが、排水開始後に荷重 ~ 沈下曲線の勾配が上昇し、地盤反力係数が増加していることが分かる。一般に地盤の変形係数は、応力レベル依存性を有すると考えられているが、地盤反力係数の増加は、サクシオン付加による有効応力レベルの上昇を示唆する結果である。同様に極限鉛直支持力もサクシオンを付加することで増加しており、例えば、Case3 では、通常基礎と比較して 20%ほど大きな極限鉛直支持力を

確認できた。単純に考えるならば、増加した支持力を利用することで、基礎の平面積を20%減少させることが可能といえる。地下水の揚水によって、基礎底面直下部で局所的に上向き浸透流が卓越し、応力レベルがむしろ低下することが懸念されたが、人工浸透流の形成によって、基礎の鉛直支持力は増加する傾向にあり、総体として地盤強度が増加したと判断することができる。また Case 2 と Case 3 の試験結果を比較した場合、後者の鉛直支持力がより大きくなる傾向を示しており、遮水シートを大型化させることによって、より大きな支持力を得ることが可能であることも明らかとなった。

(2) 滑動抵抗, 転倒抵抗

Fig. 8, 9 に sideswipe test から得られた荷重経路を示す。横軸鉛直荷重 V に対して、縦軸は水平荷重 H 、及び基礎径で除したモーメント M/B となっている。sideswipe test で例えば、滑動抵抗試験の際には、モーメント M が 0 となるように、同様に転倒抵抗試験では、水平荷重 H が 0 となるようにアクチュエータを制御したため、ここに示した荷重経路は降伏曲面と $V-H$ 平面あるいは、 $V-M/B$ 平面の交線に位置する。図からも明らかのように、Case 1 から Case 3 に移るに従って、荷重経路は外側へ移動していることが分かる。これはサクシジョンの付加によって、極限鉛直支持力が増大し、地盤そのものが、より大きな水平荷重、モーメントに耐えるようになったことを示している。また滑動抵抗、転倒抵抗の最大値はいずれも先行付与した鉛直荷重が約 50% 除荷された際に発現していることが分かる。Fig. 10, 11 に試験で観測された最大鉛直荷重 V_{max} によって正規化した荷重経路を示す。荷重経路は一つの曲線に収斂する傾向を示している。これは降伏曲面が鉛直荷重の増加によって外側に拡大しても、形状自体は相似形を保つことを示唆する結果である。図中には、Meyerhof⁽⁶⁾⁷⁾によって提案された次式

$$\frac{H}{V_{max}} = \frac{V}{V_{max}} \cdot \tan \left[\left(1 - \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^{0.5} \right) \cdot \phi \right] \quad (1)$$

$$\frac{M}{B \cdot V_{max}} = \frac{1}{2} \frac{V}{V_{max}} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

によって得られる基礎の降伏曲面も併記した。ただし H : 滑動荷重,

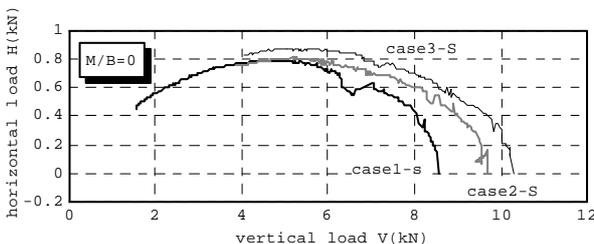


Fig.8 Load Paths (Shear Sideswipe Tests)

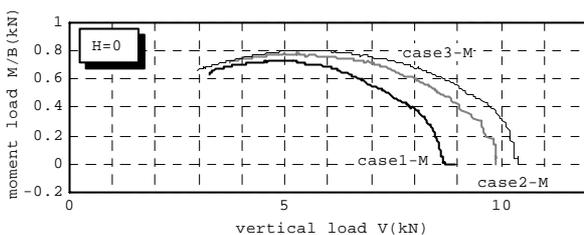


Fig.9 Load Paths (Moment Sideswipe tests)

M :モーメント, V : 鉛直荷重, V_{max} : 基礎の鉛直支持力(試験結果), B : 基礎径, ϕ : 地盤の内部摩擦角, である。転倒抵抗に関しては、試験結果と(2)式は良く整合していることが分かるが、滑動抵抗に関しては、地盤の内部摩擦角 ϕ を 30° とした計算結果と試験結果が比較的良い整合を示すという結果となった。以上から、サクシジョンが基礎地盤の滑動抵抗・転倒抵抗に及ぼす影響は、地盤の鉛直支持力の増加を適切に考慮し、鉛直支持力増加に伴う降伏曲面の拡大を考慮することで評価できると考えられる。ただし、通常基礎の場合、引抜き荷重に対して、基礎の自重相当の抵抗しか期待できないが、底面揚水式基礎の場合、遮水シート上面に作用する付加的上載圧や、基礎底面と地盤表面に作用するサクシジョン圧の影響による引抜き抵抗の向上も予想される。言い換えれば、降伏曲面が、鉛直支持力について原点から負値方向に拡大する可能性も考えることができる。ただし、現状ではこの効果を考慮されておらず、設計的に安全側の評価といえる。更なる設計の合理化を目指す場合、この点に関しては追加検討が必要である。

・有限要素解析

1. 解析手法

底面揚水式基礎の鉛直支持力の向上は、サクシジョン付加による地盤内応力レベルの上昇と遮水シート上面に創出される付加的上載圧の効果の二つを考慮することができる。これによって地盤内により複雑な応力分布が発生すると考えられるが、既往の設計手法でこの効果を評価しうる方法は、今のところ存在しない。よって、ここでは底面揚水式基礎の鉛直支持力向上効果を有限要素解析によって評価することとした。これは、有限要素解析では境界条件などを適切に設定することで、上述の地盤条件を比較的容易に表現しうるためである。

解析では、有限要素解析コード DACSAR[®]を用いることとし、基礎本体は弾性体として、地盤材料は Drucker-Prager の弾塑性体としてモデル化した。Drucker-Prager の降伏基準は、

$$f = -3\alpha p' + \frac{1}{\sqrt{3}} q - h = 0 \quad (3)$$

で表される。ここでパラメータ α と h は、次の式で与えられる。

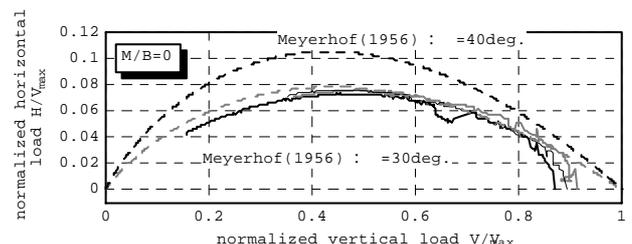


Fig.10 Normalized Load Paths (Shear Sideswipe Tests)

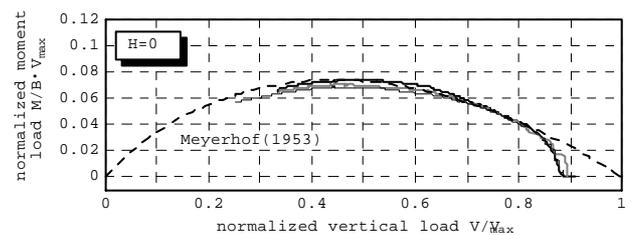


Fig.11 Normalized Load Paths (Moment Sideswipe Tests)

<軸対称条件>

$$\alpha = \frac{\tan \phi'}{\sqrt{9+12 \tan^2 \phi'}}, \quad h = \frac{3c'}{\sqrt{9+12 \tan^2 \phi'}} \quad (4)$$

<平面ひずみ条件>

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi'}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi')}, \quad h = \frac{6c' \cos \phi'}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi')} \quad (5)$$

ただし、 ϕ' : 内部摩擦角, c' : 粘着力

通常, Drucker-Prager モデルでは, α は材料固有の性質を表す量として, つまり内部摩擦角 ϕ' の関数として取り扱われるが, ここでは α を内部変数として取り扱うこととした。すなわち次式で与えられる consistency condition

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \dot{\alpha} + \frac{\partial f}{\partial h} \dot{h} = 0 \quad (6)$$

において, $\dot{\alpha}$ を残留強度に対する内部摩擦角 ϕ'_r の関数 α_r を用い,

$$\dot{\alpha} = m \dot{\epsilon}_v^p (\alpha - \alpha_r) \quad (7)$$

$$\alpha_r = \frac{\tan \phi'_r}{\sqrt{9+12 \tan^2 \phi'_r}} : \text{平面ひずみ条件} \quad (8)$$

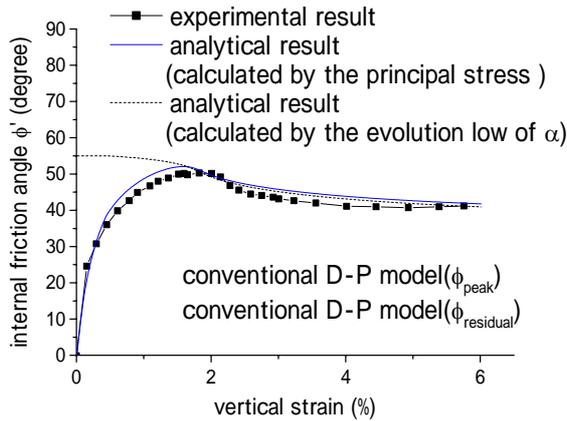


Fig. 12 Decrease of Internal Friction Angle

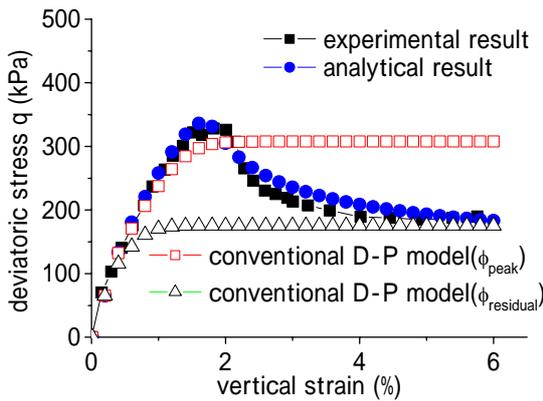


Fig. 13 Performance of Extended Drucker-Prager model

Table 2 Material Properties for Preliminary Analyses

c'	ϕ'_0	ϕ'_r	m
0.0kPa	55.0 °	39.0 °	1.3

とした。ここで m は材料固有の性質を表す定数である。このように Drucker-Prager モデルの解釈を一部拡張することで, 例えば, 密な砂のように, 三軸圧縮試験などでピーク強度を発揮した後に残留強度を示すような材料の挙動を, 軸ひずみの進展に伴う内部摩擦角の低下というかたちで便宜的に表すことが可能となる。Fig. 12, 13 に密な豊浦砂の三軸圧縮試験結果⁹⁾を上述のモデルを用いて, シミュレートした結果を示す。また Table 2 にこのシミュレート解析に用いたパラメータをまとめる。通常の Drucker-Prager モデルと比べ, 本検討で用いたモデルによる解析結果と実験結果は比較的良好な整合を示しており, 上述の解釈の有効性を確かめることができた。

Fig. 14 に解析メッシュを示す。解析メッシュは, 前述した遠心模型実験に用いたモデルにおける実物換算寸法をメッシュ寸法として設定した。解析では, 前述した遠心模型実験のうち, 通常基礎のケース (Case1-S) およびサクシオン圧が最大値を示したケース (Case3-M) の鉛直載荷過程をシミュレートすることとし, 軸対称条件で計算を行うこととした。また鉛直載荷過程は, 基礎底面に 0.04m/min の速度で強制鉛直変位を与えることで模擬した。Case3-M を対称とした解析では, 基礎底面を -30kPa の負圧を有する排水境界として, 遮水シートを非排水境界としてモデル化した。Table 3 に解析条件をまとめて示す。

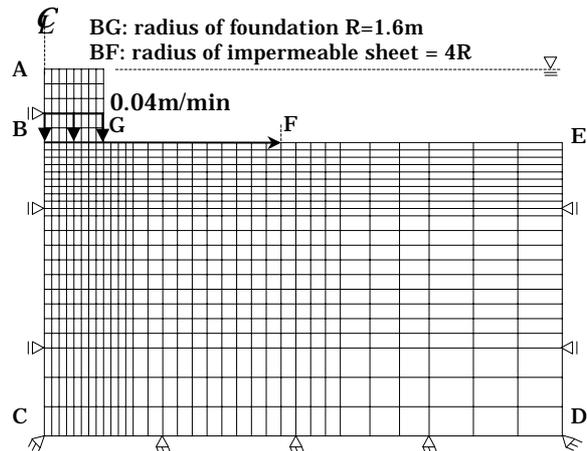


Fig. 14 F.E. Mesh and Boundary Conditions

Table 3 Summary of analytical conditions

Analysis condition	Axi-symmetric condition
Hydraulic conditions	Permeable: EF Given head: BG (-30kPa) Impermeable: AB, BC, CD, DE, FG
Geometric conditions	Fix in vertical direction: CD Fix in horizontal direction: AB, BC, CD, DE Given vertical displacement: BG (0.04m/min.)
Constitutive models	Foundation: elastic materials Sandy ground: Extended Drucker-Prager model

Table 4 Material Properties for Simulation Analyses

c'	ϕ_0'	ϕ_r'	m
0.0kPa	45.0°	20.0°	3.0

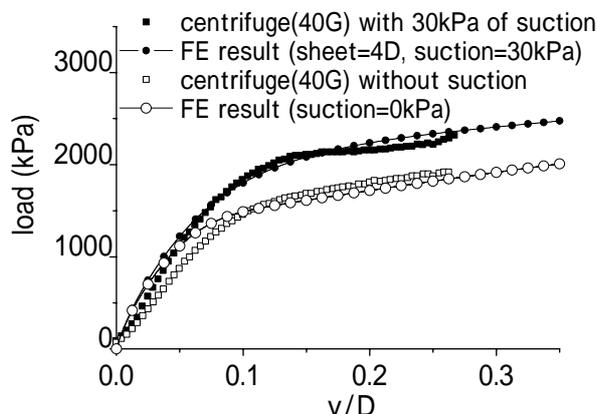


Fig.15 Comparison between Analytical Results and Experimental Results

2. 解析結果

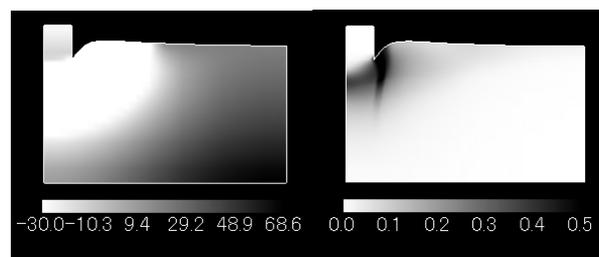
遠心模型実験のシミュレート解析に用いた材料パラメータは、通常形式基礎の試験 (Case1-S) 結果の同定から得られた値を用いた。これを Table 4 にまとめる。Fig. 16 に荷重～沈下関係を示す。底面揚水式基礎の結果 (Case3-M) について、解析結果と試験結果はよい整合を示しており、サクシジョンの付加による鉛直支持力の増加を解析によって適切に評価することができた。つまり、人工的浸透流の形成による、サクシジョン付加が基礎の安定性を向上させることを解析的にも確認することができた。

Fig. 17, 18 に、正規化した基礎の沈下量 v/B が 0.25 における、地盤内の軸差応力分布および間隙水圧分布の解析結果を示す。底面揚水式基礎の場合、基礎直下部に広い負圧作用領域が形成されているのに対し、通常基礎では基礎直下面の間隙水圧は正值となっている。このために、底面揚水式基礎の場合、地盤内に発生しているせん断ひずみが、通常基礎のそれと比べて小さなものとなり、より大きな支持力の発揮に繋がったものと考えられる。

．おわりに

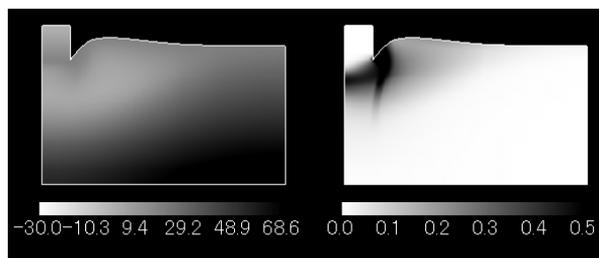
人工的に発生させたサクシジョンを直接基礎の安定性向上に用いる技術 (底面揚水式基礎) について、実験的、解析的に検討を行った。遠心模型実験を行った結果、底面からの揚水によって、基礎の降伏曲面が拡大し、基礎の安定性を向上させることが可能であることが確認できた。また適切な境界条件を設定し、既往の構成モデルを拡張することで、有限要素解析によって底面揚水式基礎の支持力増強効果を合理的に評価できることが分かった。

当技術は、基礎の安定性向上のために行う常時揚水コストが必要であり、このコストが基礎寸法低減によるコストダウン効果より小さい場合、有効な代替技術となりうる。現状では、供用期間が比較的短いために揚水コストが相対的に低価となる仮設構造への適用が現実的といえるが、例えば風力、波力などの自然エネルギーの利用によって、買電コストを低下させることで、本設基礎への適用も可



(a-1) Pore Water Pressure (a-2) Deviatoric Strain

Fig.16 Analytical Results on Horizontally Skirted Foundation



(b-1) Pore Water Pressure (b-2) Deviatoric Strain

Fig.17 Analytical Results on Ordinary Foundation

能になると考えられる。本報では底面揚水式基礎の基本原理と適用性の検証結果について述べたが、実用化に向けては、基礎底面の透水性材料、基礎周囲の遮水性材料などの開発が課題と考えている。

参考文献

- 1) A.N.Schofield; Suction anchors eliminate pile driving, Offshore services, (1974), pp.37-39.
- 2) J.D. Murff, M.D. Prins, E.T.R. Dean, R.G. James, A.N. Schofield; Jackup rig foundation modelling, Proc.24th offshore technology conf., (1992), OTC6807, Houston, pp.35-46.
- 3) C.M.Martin, G.T.Houlsby; Combined loading of spudcan foundations on clay, Geotechnique, Vol.51, No.8, (2001), pp.687-699.
- 4) F.S.C. Tan; Centrifuge and theoretical modelling of conical footings on sand, Ph.D. thesis of Cambridge Univ., (1990)
- 5) C.M. Martine, G.T. Houlsby; Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests, Geotechnique, Vol.50, No.4, (2000), pp.325-338.
- 6) G.G. Meyerhof; Discussion of ' Rupture surface in sand under oblique loads ' by A.R.Jumkins, J. Soil Mech., Fdn., Eng. Div., ASCE, SM3, (1956), pp.1028-15-19.
- 7) G.G. Meyerhof; The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, Proc. 3rd. ICSMFE., Vol.1, (1953), pp.440-445.
- 8) A.Iizuka, H.OHTA; A determinations procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and foundations, Vol.27, No.3, (1987), pp.71-87.
- 9) S.Nakamura; Strain distributions in the sandy specimen under plane strain compression tests, Master's thesis of Univ. of Tokyo, (1987).