

# スカート・サクシヨン基礎の実証工事に基づく 貫入抵抗予測式の評価

伊藤政人<sup>1</sup>・三田地利之<sup>2</sup>・増井直樹<sup>3</sup>・崎本純治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 大林組 技術研究所土木構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

ito.masato@obayashi.co.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628札幌市北区北13西8)

mitachi@eng.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 工修 大林組 土木技術本部設計第1部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

masui.naoki@obayashi.co.jp

<sup>4</sup>正会員 工修 大林組 土木技術本部技術第1部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

sakimoto.junji@obayashi.co.jp

スカート・サクシヨン基礎とは、下部が開口した中空円筒形（スカート）の基礎を、サクシヨン（静水圧からの水圧低下）を利用することによって海底地盤に貫入し、安定性を確保する基礎構造物である。本論文では、スカート・サクシヨン基礎が貫入される地盤ごとに、サクシヨン効果を考慮した貫入抵抗予測式を提案した。さらに、実海域で行われたスカート・サクシヨン基礎の実証工事における貫入抵抗実測値と提案した予測式による計算値を比較することにより、提案した上部粘土層・下部砂層の二層地盤における貫入抵抗予測式の評価を行い、その適用性を検証した。

*Key Words : foundation, offshore structure, penetration resistance, skirt, suction*

## 1. はじめに

近年、海洋構造物の建設においては、構造物の大型化、建設地点の大水深化、構造物の高耐震化など、これまで以上の苛酷な条件下でのインフラ整備を余儀なくされている。その一方で、建設コストの縮減や自然生態系への配慮などの社会的要求は従来にも増して高まっており、これらの要請に応えるため各機関では、海洋構造物基礎の技術開発が盛んに行われている。その一つとして現在注目されているのが、サクシヨンを用いた新しい基礎形式「スカート・サクシヨン基礎」である。

スカート・サクシヨン基礎は、下部が開口した中空円筒筒構造で、この円筒筒（スカートと呼ぶ）を海底面に貫入させることにより安定を保つ基礎構造である。スカート・サクシヨン基礎の最大の特徴は、振動や打撃などの押込み力を用いずに、スカート内部の圧力を静水圧以下に低下させ、これによって発生する基礎内外の水圧差（ここでは静水圧からの水圧低下量をサクシヨンと呼ぶ）

を利用して海底地盤にスカートを貫入させることである。このタイプの基礎は、サクシヨンをを用いることからサクシヨン基礎あるいはサクシヨンケーソンともいい、構造的な特徴から単にスカート基礎とも呼ばれる。

この基礎は、スカートを海底地盤に貫入させることにより、鉛直荷重を軟弱な表層地盤より硬質な地盤に伝達させて過大な沈下を防ぐとともに、水平荷重による滑動に対する安全性を増加させる。したがって、スカート・サクシヨン基礎は、重力式ケーソンなどの海洋構造物基礎に必要な基礎マウンドや地盤改良が不要となるという利点を持ち、海上作業が低減することにより、工期の短縮、コストの縮減に寄与できるとともに、海洋環境に与える影響も最小限にすることができる。

このスカート・サクシヨン基礎は、北海などにおいて石油掘削用重力式プラットフォームあるいはテンションレグプラットフォームの基礎として、1970～1990年代にかけて10基以上の実績（文献<sup>1)</sup>など）がある。国内においては、1960年に神戸港

の第五防波堤<sup>2)</sup>において適用されただけであったが、1990年代に入り、基本的な沈設メカニズムの解明を目的とした野外実験<sup>3)</sup>が行われ、沈設に必要なサクシジョンの予測式の提案と事例解析<sup>4)</sup>が報告された。さらに1999年には、直江津港防波堤において実構造物における実証沈設試験<sup>5)</sup>が行われるに至っている。一方、筆者らもこの基礎の有利性に着目し、この基礎を防波堤や護岸などの海岸・港湾構造物の基礎にとどまらず、大型橋梁構造物の基礎へ適用するため、これまで設計および施工法に関する一連の研究開発<sup>6),7)</sup>を行ってきた。

スカート・サクシジョン基礎の設計上の検討課題は、基礎沈設時のスカート貫入抵抗に関するものと基礎完成後の作用荷重に対する安定性に関するものの大きく2つに分けられ、特に前者の課題は、当該構造物の基礎にスカート・サクシジョン基礎を適用できるかどうかを判断する上で重要な検討課題となる。なぜならば、前述したようにスカートの貫入力としては、基礎の自重やパラスト重量の他、サクシジョンによる水圧差だけであるため、スカートを所定の支持地盤まで貫入できるかを事前に判断するためには、正確に貫入抵抗を予測しなければならないからである。

善ら<sup>4)</sup>は、サクシジョンによって砂地盤には浸透流が発生し、それによって貫入抵抗が低減することを考慮した貫入抵抗予測式を提案している。しかしスカートを貫入させる海底地盤は、必ずしも一様な砂地盤であるとは限らず、砂層や粘土層からなる互層である場合が多い。サクシジョンによって生ずる貫入抵抗の低減は、地盤内の有効応力の減少によってもたらされるものであり、地盤の透水性や層序の違いによってそのメカニズムは当然異なってくる。そのため、砂層や粘土層からなる互層にスカートを貫入させる際には、多様な地盤構成に適應したスカートの貫入抵抗予測式が必要となる。

そこで筆者らは、上部粘土層・下部砂層の二層地盤における貫入中の地盤内応力と限界サクシジョン（地盤の破壊条件から定まるサクシジョンの上限値）の関係を明らかにし、これまで明らかにされていなかった二層地盤におけるサクシジョンの影響を考慮した貫入抵抗予測式の提案を行った。また、サクシジョンによってスカート先端の有効応力がアンバランスとなった際の貫入抵抗に関して、支持力係数を補正して算定する新たな方法を提案した。さらに、上部粘土層・下部砂層の二層地盤である実海域において、沈設された実大規模のスカ-

ト・サクシジョン基礎の計測結果により、二層地盤においてもサクシジョンによって貫入抵抗が低減することを示すとともに、貫入抵抗の実測値と提案した貫入抵抗予測式による計算値を比較することにより、予測式の評価を行った。

本論文は、これらの結果について報告するものである。

## 2. サクシジョン効果

本章では、スカート・サクシジョン基礎のスカート内にサクシジョンを作用させた際の基本的な力とそれによって生ずる地盤内応力の変化について記述する。

スカート・サクシジョン基礎は、開口したスカート部と底版および底版に連結された排水配管より成り、排水配管から水中ポンプなどで排水することで、スカート内の水圧を静水圧以下に下げることができる。スカート内の水圧を $\Delta p$ 低下させたとき、スカート内に作用していた浮力は $\Delta p \times A_j$  ( $A_j$ : スカート内面断面積) 減少し、その分が下向きの荷重（サクシジョン力と呼ぶ）として基礎に作用することとなる。すなわち、基礎には、基礎自身の有効重量に加えてサクシジョン力が貫入力として働く。

サクシジョン力は、地盤も含めた全体系でみれば内力であり、基礎に対し下向きに作用した力と同じ大きさの力が海底地盤に上向きに作用する。この上向きの力は、スカート内側の海底地盤に全応力の減少をもたらす。この海底地盤の全応力の減少は、スカートを貫入させる地盤の有効応力の減少を引き起こすが、そのメカニズムは、透水性や

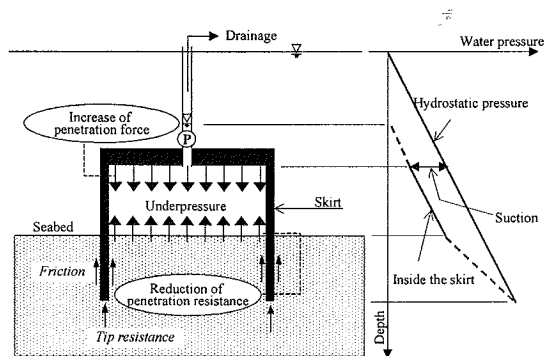


図-1 サクシジョン効果

層序により異なってくる。

砂地盤にスカートを買入させる際にサクシオンを作用させると、スカート外側からスカート先端を通して内側へ向かう浸透流が発生し、スカート内側では上向きの浸透力により有効応力が減少する。この有効応力減少による地盤の破壊メカニズムは、地下水位の高い砂地盤を掘削する際に起こるボウリング現象と同じである。

一方、粘土地盤にスカートを買入させる際には、一般にサクシオンの作用時間は、粘土地盤内の間隙水の移動時間に比べて十分に短いと考えられるので、浸透流は発生しない。つまり、粘土地盤においては非排水条件下での挙動となるため、サクシオンによって全応力が低下しても、粘土地盤内には負の過剰間隙水圧が発生し、有効応力は変化しない。

上部粘土層・下部砂層の二層地盤では、上部粘土層内では上記理由により有効応力は変化しないが、下部砂層においては、サクシオン作用中にも間隙水圧は一定に保たれると考えられるので、サクシオンによる全応力の減少によって、有効応力は減少する。この場合も有効応力が失われることによって地盤は破壊に至ることになり、この破壊メカニズムは、不透水層の下部に被圧された砂層がある箇所を掘削する際に起こる被圧地下水による盤ぶくれ現象と同じである。

このように、サクシオンによる有効応力の変化は、地盤の透水性および層序によってそのメカニズムが異なり、砂地盤では、一様であるか互層となっているかに関わらず、有効応力は減少する。有効応力の減少により、地盤のせん断強度は低下し、それによりスカートの貫入抵抗は低減する。つまり、スカート・サクシオン基礎の貫入においてサクシオンを作用させると、貫入力が増加に加え砂地盤では貫入抵抗の低減という効果が得られることとなり、これをサクシオン効果と呼んでいる(図-1)。

### 3. 貫入抵抗予測式

本章では、スカートの貫入抵抗予測式の概要について述べるとともに、地盤内の有効応力の変化を反映させた貫入抵抗予測式を示す。

#### (1) 貫入抵抗予測式の種類と特徴

これまで提案されているスカートの貫入抵抗予

測式には、ノルウェー船級協会(DNV)の海洋構造物設計・施工・検査基準<sup>8)</sup>に示されているコーン貫入抵抗に基づく方法(以下コーン貫入抵抗法)とスカート先端抵抗を支持力公式に基いて算定する方法<sup>4),9)</sup>(以下支持力法)がある。

コーン貫入抵抗法は、コーン貫入試験の先端貫入抵抗 $q_c$ にある係数を乗ずることにより、スカートの貫入抵抗を求めるものである。この方法は、海外における多くのスカートの貫入抵抗の実測値をもとに経験的に定められたものであり、コーン貫入試験が貫入抵抗そのものを連続的に求める試験であることから、スカートの貫入抵抗を比較的精度よく求めることができると考えられる。しかし、国内においては地盤のサウンディング方法として標準貫入試験ほどには普及しておらず、実施されにくいという現状がある。またこの方法は、スカート貫入時の地盤内有効応力の変化を定量的に反映させた式にはならず、その適用範囲は限られている。

支持力法は、スカートの先端抵抗の算定に地盤を剛塑性体と見なした帯状基礎の支持力を求める式を準用するものである。スカートの先端抵抗の算定に支持力公式を適用することには、スカート貫入中にすべり破壊面の形状が変化していくこと、貫入によって先端地盤が締め固められる影響を表現できないことなどの問題点はあると考えられる。しかし、支持力法はコーン貫入抵抗法と異なり、支持力公式を準用するため、貫入抵抗と地盤の有効応力とが定量的に関連づけられた式となる。

前章で述べたように、サクシオンによってスカート内の有効応力は減少する(サクシオン効果)。また、スカートが貫入する際に貫入力がかかるとスカート内周面の摩擦を介して地盤に伝達されることによって有効応力は増加する<sup>4)</sup>(以下これを内周面摩擦効果と呼ぶ)。このようなスカート貫入中における地盤の複雑な有効応力の変化を、支持力法ではスカートの貫入抵抗に定量的に反映させることができる。このため、スカートの貫入抵抗予測式としての有用性は高いものと考えられる。

そこで以下に、支持力法によるスカートの貫入抵抗予測式を示す。

#### (2) 支持力法による貫入抵抗予測式

スカートの貫入抵抗は、先端抵抗と周面抵抗に分けられ、式(1)により求められる。

$$Q_{total} = A_{up} \times q_{up} + A_{wi} \times p_{fi} + A_{wo} \times p_{fo} \quad (1)$$

ここに、 $Q_{total}$ ：スカート貫入抵抗、 $A_{up}$ ：スカート先端面積、 $q_{up}$ ：スカート先端の単位面積あたりの貫入抵抗、 $A_{wi}$ ：地盤中にあるスカート内面の周面積、 $p_{fi}$ ：スカート内面の単位面積あたりの周面抵抗、 $A_{wo}$ ：地盤中にあるスカート外面の周面積、 $p_{fo}$ ：スカート外面の単位面積あたりの周面抵抗、である。

スカート先端の単位面積あたりの貫入抵抗は、式(2)に示す帯状基礎の支持力公式を用いて算出される。これは、通常スカート径は、スカート先端幅の30~100倍程度と非常に大きいため、スカート先端は二次元的な帯状基礎と見なしうからである。

$$q_{up} = c \cdot N_c + \sigma'_{vi} \cdot N_q + \gamma'_i \cdot (B/2) \cdot N_\gamma \quad (2)$$

ここに、 $N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_\gamma$ ：支持力係数、 $c$ ：粘着力、 $\sigma'_{vi}$ ：スカート先端の鉛直有効応力、 $\gamma'_i$ ：スカート先端下の地盤の水中単位体積重量、 $B$ ：スカート先端幅、である。

地盤中にあるスカートの単位面積あたりの周面抵抗は、摩擦成分と付着力成分の和として以下のように表される。

$$p_{fi} = \mu K_{in} \sigma'_{vi} + c_h \quad (3)$$

$$p_{fo} = \mu K_{out} \sigma'_{vo} + c_h \quad (4)$$

ここに、 $\sigma'_{vi}$ ：スカート内の鉛直有効応力、 $\sigma'_{vo}$ ：スカート外の鉛直有効応力、 $K_{in}$ ：スカート内の土圧係数、 $K_{out}$ ：スカート外の土圧係数、 $\mu$ ：スカートと地盤の摩擦係数、 $c_h$ ：スカートと地盤の付着力、である。

以上のように支持力法の貫入抵抗予測式は、先端抵抗および周面抵抗ともスカート内外の鉛直有効応力と関連づけられた式となっている。そこで以下に、サクシオン効果および内周面摩擦効果によるスカート内外の鉛直有効応力の算定式を誘導する。

### (3) 鉛直有効応力算定式

前述したように、貫入中のスカート内外の鉛直有効応力の変化は、スカートが貫入する地盤の透水性によって異なる。そこで、スカートが貫入す

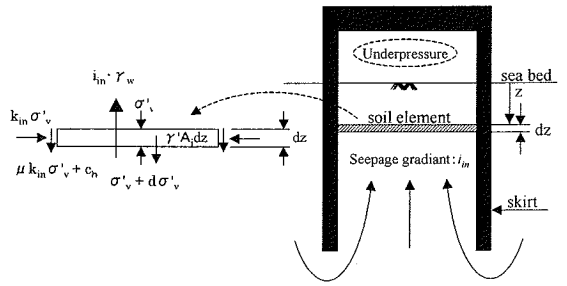


図-2 スカート内部の土要素に作用する力<sup>4)</sup>

る地盤をa)砂地盤、b)粘土地盤、c)二層地盤（上部粘土層・下部砂層）の3種類に分け、スカート内外の鉛直有効応力の算定式を以下に示す。

#### a) 砂地盤

スカートが貫入する地盤が一律な砂地盤の場合には、スカート内にサクシオンを作用させることにより、スカート内には上向き浸透流、スカート外には下向き浸透流が発生する。これにより、スカート内の鉛直有効応力は減少し、スカート外の鉛直有効応力は増加する。この場合のスカート内外の有効応力を求める式は、文献<sup>4)</sup>において誘導されており、式(5)~(9)および式(11)にその誘導過程と算定式を示す。

スカート内の鉛直有効応力は、図-2に示すスカート内部の土要素に作用する力のつり合いから求められ、そのつりあい式は、

$$(\sigma'_{vi} + d\sigma'_{vi})A_i = \sigma'_{vi}A_i + 2\pi r_i (\mu K_{in} \sigma'_{vi} + c_h) dz + \gamma'_i A_i dz - i_m \gamma_w A_i dz \quad (5)$$

となる。ここに、 $\sigma'_{vi}$ ：スカート内の鉛直有効応力、 $A_i$ ：スカート内面積、 $r_i$ ：スカート内半径、 $\gamma'_i$ ：地盤の水中単位体積重量、 $i_m$ ：サクシオンによるスカート内側の動水勾配、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、 $z$ ：海底面からの深さ、である。

式(5)を整理すると、

$$dz = \frac{d\sigma'_{vi} A_i}{2\pi r_i (\mu K_{in} \sigma'_{vi} + c_h) + \gamma'_i A_i - i_m \gamma_w A_i} \quad (6)$$

となり、両辺を積分し境界条件  $z=0$  で  $\sigma'_{vi}=0$  より、深さ  $z$  におけるスカート内の鉛直有効応力  $\sigma'_{vi}(z)$  は、

$$\sigma'_{vi}(z) = \frac{B}{A} \{ \exp(Az) - 1 \} \quad (7)$$

となる。ここに、

$$A = \frac{2}{r_i} \mu K_n \quad (8)$$

$$B = \frac{2}{r_i} c_h + \gamma' - i_{in} \gamma_w \quad (9)$$

である。

式(7)において、 $z \neq 0$  で  $\sigma'_{w}(z) = 0$  となった際には、スカート内の地盤にボイリングが発生することとなる。その条件は、式(9)における  $B = 0$  となる条件から求められ、一般に砂地盤では  $c_h = 0$  と見なせるので、

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (10)$$

となる。ここに、 $i_{cr}$ ：ボイリングが発生するスカート内側の動水勾配、である。

式(10)は、掘削時のボイリング検討式と同じであり、当然のことながら、砂地盤への貫入時には、スカート内の地盤にボイリングが発生しないように、サクシオンを管理しなければならない。

一方、スカート外の鉛直有効応力は、スカート外に発生する下向き浸透流により、

$$\sigma'_{vo}(z) = (\gamma' + i_{out} \gamma_w) z \quad (11)$$

となる。ここに  $\sigma'_{vo}(z)$ ：深さ  $z$  におけるスカート外の鉛直有効応力、 $i_{out}$ ：サクシオンによるスカート外側の動水勾配、である。

#### b) 粘土地盤

粘土地盤では、スカート内にサクシオンを作用させても、サクシオン作用時間は粘土地盤内の間隙水の移動時間に比べ十分に短いため、浸透流は発生しない。つまり、スカート内の水圧の低下分（全応力の低下分）は粘土内の負の過剰間隙水圧となるため、有効応力は変化しないということである。同様に、貫入力が入力されるスカート内周面の摩擦を介して伝わる地盤内の応力増加によっても、粘土地盤内の間隙水の移動時間は十分でない（圧密現象とならない）ため、鉛直有効応力は増加しないと考えられる。よって、粘土地盤内の鉛直有効応力は、

$$\sigma'_{wi}(z) = \sigma'_{vo}(z) = \gamma' z \quad (12)$$

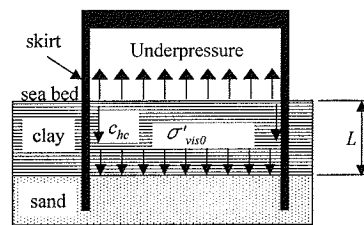


図-3 二層地盤における下部砂層の天端に作用する鉛直応力

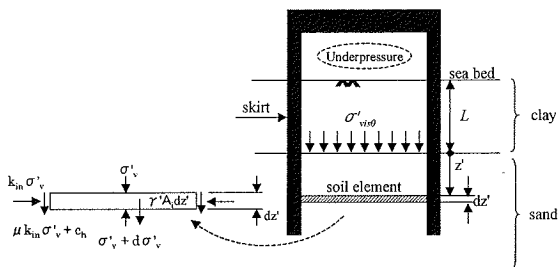


図-4 二層地盤における下部砂層のスカート内部土要素に作用する力

となる。

#### c) 二層地盤（上部粘土層・下部砂層）の下部砂層

上部粘土層・下部砂層の二層地盤では、スカート内にサクシオンを作用させても、上部に粘土層があるため浸透流は発生しない。しかし、下部砂層においては、サクシオン作用中にも間隙水圧は一定に保たれるので、水圧低下（全応力の低下）により、スカート内の鉛直有効応力は低下する。同様に、下部砂層においては、内周面摩擦効果によるスカート内の鉛直有効応力増加も考慮する必要がある。

二層地盤の下部砂層の天端に作用する鉛直有効応力は、図-3 に示すスカート内部の粘土層に働く力のつり合いより、以下のように求められる。

$$\sigma'_{vis0} = \gamma' c' L + \frac{2\pi r_i}{A_i} L \cdot c_{hc} - \Delta p \quad (13)$$

ここに、 $\sigma'_{vis0}$ ：下部砂層天端に作用する鉛直有効応力、 $\gamma' c'$ ：上部粘土層の水中単位体積重量、 $L$ ：上部粘土層厚、 $c_{hc}$ ：上部粘土層におけるスカートと地盤の付着力、 $\Delta p$ ：低下水圧、である。式

(13)では、第一項は自重、第二項は内周面摩擦効果、第三項はサクシオン効果を表している。

式(13)において、低下水圧 $\Delta p$ が、粘土層の自重とスカート内面の付着力の合計と等しくなると、 $\sigma'_{vis0}=0$ となる。このことは、上部粘土層と下部砂層の間に剥離が生ずることを意味しており、いわゆる盤ぶくれの状態となる。従って、上部粘土層・下部砂層の二層地盤にスカートを貫入させる際には、盤ぶくれが生じないように、作用サクシオンは以下に示す限界サクシオン以下となるよう管理しなければならない。

$$\Delta p_{cr} = (\gamma' c' + \frac{2}{r_i} c_h) \cdot L \quad (14)$$

ここに、 $\Delta p_{cr}$ ：盤ぶくれから定まる限界サクシオン、である。

なお、貫入する地盤が二層以上の多層となっている場合には、層毎に自重とスカート内面の付着力を合計し、それ以下となるようにサクシオンを管理することとなる。

つぎに、下部砂層中のスカート内の鉛直有効応力算定式を誘導する。図-4に示すスカート内部土要素の力のつり合いから、つり合い式は以下のようなになる。

$$(\sigma'_{wi} + d \sigma'_{wi}) A_i = \sigma'_{wi} A_i + 2\pi r_i (\mu K_m \sigma'_{wi} + c_h) dz' + \gamma'_s A_i dz' \quad (15)$$

ここに、 $\gamma'_s$ ：下部砂層の水中単位体積重量、 $z'$ ：下部砂層天端面からの深さ、である。

式(15)を式(6)と同様に整理すると、

$$dz' = \frac{d \sigma'_{wi} A_i}{2\pi r_i (\mu K_m \sigma'_{wi} + c_h) + \gamma'_s A_i} \quad (16)$$

となる。両辺を積分し、境界条件  $z'=0$  で  $\sigma'_{wi} = \sigma'_{vis0}$  より、深さ  $z'$  におけるスカート内の鉛直有効応力  $\sigma'_{wi}(z')$  は、

$$\sigma'_{wi}(z') = \frac{B'}{A} \{ \exp(Az') - 1 \} + \sigma'_{vis0} \quad (17)$$

$$A = \frac{2}{r_i} \mu K_m \quad (8)$$

$$B' = A \sigma'_{vis0} + \frac{2}{r_i} c_h + \gamma'_s \quad (18)$$

となる。

一方、スカート外の鉛直有効応力は、スカート外にも浸透流は発生しないことから、以下のようなになる。

$$\sigma'_{vo}(z') = \gamma' c' L + \gamma'_s z' \quad (19)$$

#### 4. スカート内外で鉛直有効応力が異なる際の先端抵抗の算定方法

##### (1) スカート先端抵抗算定における問題点

前章において、スカート貫入中の鉛直有効応力の算定式をスカートが貫入される地盤ごとに誘導した。スカートの貫入抵抗は、深度ごとに算定されたスカート内外の鉛直有効応力を式(2)および式(3)、(4)に代入して、先端抵抗および周面抵抗を求めることとなる。

この際、先端抵抗の算定におけるスカート先端の鉛直有効応力  $\sigma'_{wi}$  は、砂層においては、サクシオン効果あるいは内周面摩擦効果によってスカート内側と外側で異なる値となる。こうした場合の鉛直有効応力の取り扱いについては、これまで必ずしも明確にはされておらず、便宜的に小さい方の鉛直有効応力をもとに、スカート先端の貫入抵抗を算出することが多かった。しかしこの方法では、一般に大きくなるスカート外側の鉛直有効応力の影響を無視していることになり、サクシオン効果による貫入抵抗の低減を過大に評価する可能性があった。

そこで本章では、スカート内外の鉛直有効応力が異なる際には、すべり面が変化することに着目し、こうした場合の先端抵抗を求める際の支持力係数を補正する方法を提案し、その検証を行う。

##### (2) 支持力係数の補正方法の提案

スカート先端の内外の鉛直有効応力が等しい場合には、内外に発生するすべり面は左右対称となる(図-5(a))が、内外の鉛直有効応力が  $\sigma'_{wi}$ 、 $\sigma'_{vo}$  ( $\sigma'_{wi} < \sigma'_{vo}$ ) である場合、内外に発生するすべり面は非対称となる(図-5(b))。砂質土の場合のこのような主働くさび三角形が不等辺三角形となるすべり面を持つ支持力係数  $N_q$  は、傾斜荷重を受ける基礎の支持力問題として、Yanbu, N.<sup>9)</sup>により以下のように求められている。

$$N_q(\omega) = \frac{1}{2} \{ (N+1) + (N-1) \cos(2\omega) \} \exp\{(\pi - 2\omega) \tan \phi\} \quad (20)$$

$$N = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (21)$$

ここに、 $N_q(\omega)$ ：主働くさび三角形のずれ角  $\omega$  での支持力係数（図-5(b) 右側すべり線における支持力係数）， $\phi$ ：せん断抵抗角， $\omega$ ：主働くさび三角形のずれ角（図-5参照），である。

内外の鉛直有効応力が異なる状態でスカートが貫入していくとき，地盤内に生ずる主働くさび三角形の頂角（ $=90^\circ - \phi$ ）は一定であるため，ずれ角  $\omega$  は，内外のすべり面において符号が反対の同じ値となる。また，スカートの貫入に際しては，傾斜荷重を受けているわけではないので，内外の異なるすべり面にそう支持力は，同時に発揮されかつその値は等しいものと仮定できる。この仮定より， $\omega$  と鉛直有効応力  $\sigma'_{vi}$ ， $\sigma'_{vo}$  との関係は，式(22)のようになる。なお式(22)においては，一般にスカート先端幅  $B$  は，スカート貫入深さに比べて小さいので，スカート先端以深の土の自重が貫入抵抗に与える影響（式(2)における右辺第3項の影響）は小さいものとして無視している。

$$\sigma'_{vo} \times N_q(+\omega) = \sigma'_{vi} \times N_q(-\omega) \quad (22)$$

ここに， $N_q(+\omega)$ ：くさび三角形のずれ角が  $\omega$  ( $>0$ ) の時の支持力係数， $N_q(-\omega)$ ：くさび三角形のずれ角が  $-\omega$  ( $<0$ ) の時の支持力係数，である。

式(20)および式(22)より，スカート内外の鉛直有効応力の比  $\sigma'_{vi}/\sigma'_{vo}$  ( $<1$ ) と  $N_q(+\omega)$  および  $N_q(-\omega)$  を内外の鉛直有効応力が等しいときの支持力係数  $N_q(\omega=0)$  で正規化したものの関係を求めると図-6 のようになる。

$\sigma'_{vi}/\sigma'_{vo} < 1$  つまりスカート内側の鉛直有効応力が小さい時には， $\sigma'_{vi}/\sigma'_{vo}$  の減少とともに， $N_q(-\omega)$  は  $N_q(\omega=0)$  より大きな値（図-6(a)）となり，反対に  $N_q(+\omega)$  は小さな値（図-6(b)）となることがわかる。したがって，式(2)に示すスカート先端の貫入抵抗を求める際に，スカート先端の鉛直有効応力  $\sigma'_{vi}$  を，サクシオンにより低減された  $\sigma'_{vi}$  ( $< \sigma'_{vo}$ ) とする場合には，支持力係数  $N_q$  は  $N_q(-\omega)$  とする（通常的支持力係数  $N_q(\omega=0)$  に図-

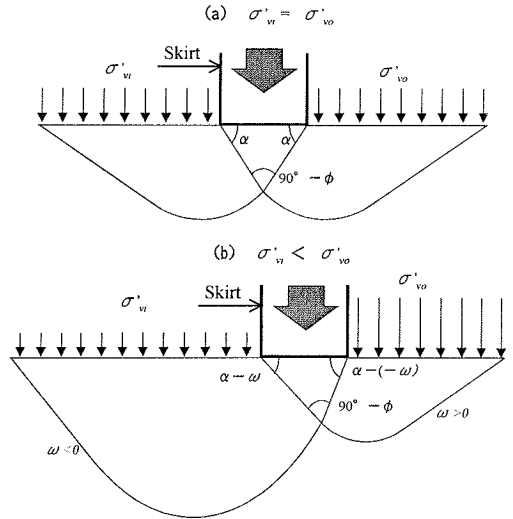


図-5 内外の鉛直有効応力が異なる際のすべり面

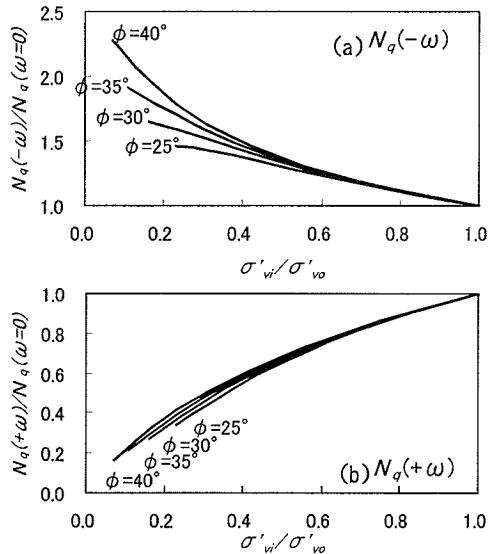


図-6  $\sigma'_{vi}/\sigma'_{vo}$  と正規化された支持力係数

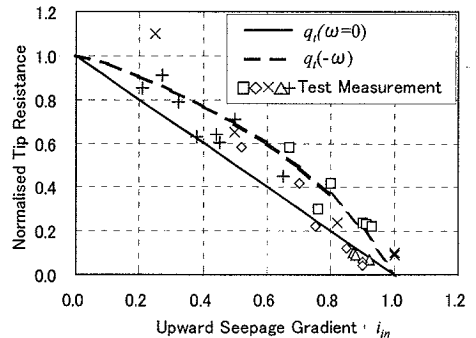


図-7 サクシオン作用下のスカート先端抵抗<sup>(10)</sup>

6(a)に示す縦軸の値を補正係数として乗ずる) 必要がある。

### (3) 既往実験結果による検証

前節で示した、スカート内外で鉛直応力が異なる際の支持力係数を補正する方法を、既往のスカート貫入実験結果と計算値を比較することにより検証する。

図-7は文献<sup>10)</sup>に示されているスカート・サクシオン基礎の貫入実験におけるスカート先端抵抗(サクシオンを作用させない場合の先端抵抗で正規化した値)とスカート内の上向き動水勾配の関係である。実験では、径550mm、先端幅8mmのスカート模型を用い、一様砂地盤( $D_r=80\%$ ,  $\phi=38^\circ$ )においてサクシオンを作用させながら貫入させている。すべての実験結果においてスカート内の上向き動水勾配が大きくなるに従い、先端抵抗が減少する傾向を示している。

同図には、支持力係数  $N_q$  を前節に示した方法で補正した先端抵抗  $q_t(-\omega)$ , 補正しなかった場合の先端抵抗  $q_t(\omega=0)$  の2つの計算結果を加筆してある。

スカート先端抵抗は以下の式により求めた。

$$q_t = \sigma'_{vi} \times N_q = (\gamma' - i_m \cdot \gamma_w) \cdot z \times N_q \quad (23)$$

ここに、 $\gamma'$ : 実験砂の有効単位体積重量(実験結果より  $10\text{kN/m}^3$ )、 $z$ : スカート貫入量(実験結果より  $320\text{mm}$ )、である。

支持力係数を補正しなかった計算結果は、支持力係数が  $\sigma'_{vi}$  に関わらず一定であるため、 $i_m$  の増加により  $\sigma'_{vi}$  は減少し、それに比例して先端抵抗は直線的に減少する。一方、支持力係数を補正した計算結果は、 $i_m$  の増加により  $\sigma'_{vi}$  が減少すると、 $\sigma'_{vi} / \sigma'_{vo}$  の減少に応じて支持力係数は増加するため(図-6(a))、先端抵抗の減少はやや鈍くなる。実験結果と比較すると、支持力係数を補正しないと、計算値は実験結果よりも先端抵抗を過少評価(サクシオン効果を過大評価)するが、支持力係数を補正することで、計算値は実験結果と対応してくる。これにより、今回提案したすべり面の変化を考慮した支持力係数の補正方法は、スカート内外の鉛直有効応力が異なる際の先端抵抗の算定に適用可能であると考えられる。

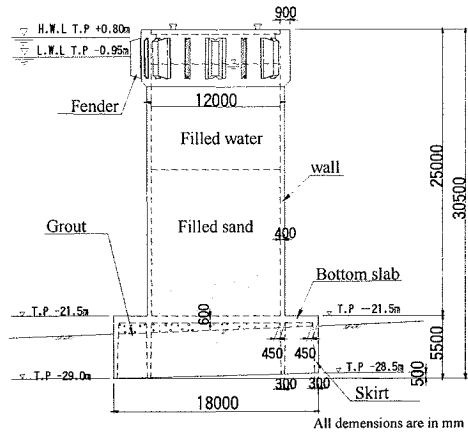
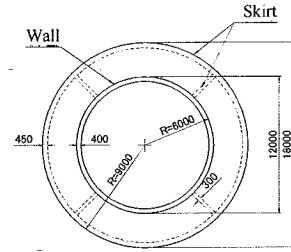


図-8 スカート・サクシオン基礎を用いた防衛工構造図

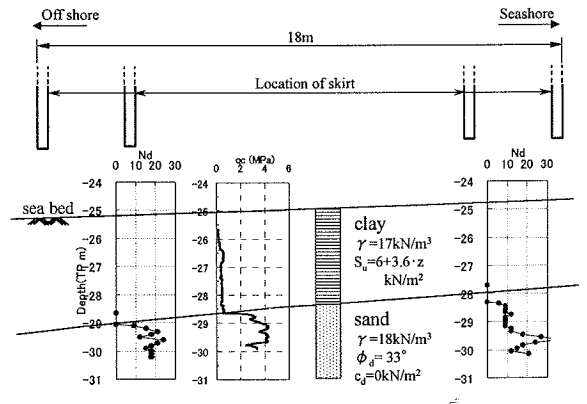


図-9 沈設地点の土層断面図

## 5. スカート・サクシオン基礎の実証工事における貫入抵抗実測値と予測値の比較

本章においては、実海域で行われたスカート・サクシオン基礎の実証工事の概要と、主な計測結果を示す。さらに、本論文で提案した貫入抵抗予測式による計算結果と、貫入抵抗の実測値を上部粘土層および下部砂層に分けて比較した結果を示し、予測式の評価を行う。



(1) 実証工事の概要

a) 構造概要

スカート・サクシヨン基礎を適用した防衛工<sup>11),12)</sup>の構造図を図-8に示す。この防衛工は、大阪府岬町の土砂積み出し棧橋の先端に据付けられたものであり、土運船の棧橋への衝突防護および土運船出城時の回頭を主目的とするものである。

防衛工は、すべて鉄筋コンクリート製であり、全高30.5mのうちスカート部は5.5mで、直径18mおよび12mの二重スカートとなっている。スカート内は、貫入時の姿勢制御のためにサクシヨン力を偏心して作用させることができるように5つの隔壁に分割されている。スカート先端は、海底面が傾斜していることが予想されていたため、沖側のスカート長が0.5m長くなっている。

据え付けに際しては、起重機船により製作地である兵庫県津名町から大阪府岬町の現地まで吊曳航し、所定の位置に吊降ろし沈設させた。

b) 地盤概要

図-9に沈設地点の土層断面図および鉄研式動的貫入試験による $N_d$ 値および静的コーン貫入試験によるコーン支持力 $q_c$ を示す。当該地点の水深は約25mであり、上部に厚さ約4mの軟弱な粘性土層、その下部に $N_d$ 値10~20の砂質土層がある。スカート先端はこの砂質土層に根入れされるように計画された。海底面および砂質土層末端は、図に示すように陸から沖に向かって傾斜している。

上部粘土層の単位体積重量は $17\text{kN/m}^3$ であり、非排水せん断強度 $s_u$ は、一軸圧縮試験結果および $q_c$ からの換算( $s_u=q_c/30$ )により、 $s_u=6+3.6z\text{ kN/m}^2$ ( $z$ :深度m)と推定された。下部砂層の単位体積重量は $18\text{kN/m}^3$ 、強度定数は三軸圧縮試験(CD)より $\phi_d=33^\circ$ 、 $c_d=0\text{kN/m}^2$ であった。

c) 計測概要および主な計測結果

図-10に防衛工に取り付けられた計測器の配置を示す。各隔壁のサクシヨン把握するため、水圧計を各隔壁ごと、底板とスカート先端に取り付け、貫入抵抗を先端抵抗と周面抵抗に分離して把握するため、刃口荷重計をスカート先端(外側2箇所、内側2箇所)に取り付けた。図に示した以外に、沈設時のクレーン吊り荷重をロードセルにて、防衛工の座標(x,y,z)を光学式測距機にて計測した。

図-11に、貫入抵抗(全体抵抗およびスカート先端抵抗)とスカート貫入深度の関係を示す。全体抵抗は、バラスト水を含む防衛工重量から起重機船の吊り荷重と浮力(サクシヨンによる浮力低下

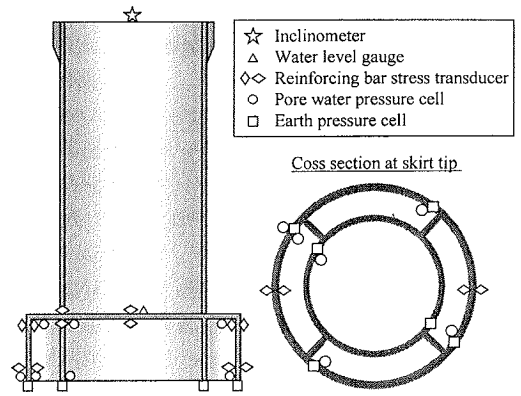


図-10 計測器配置図

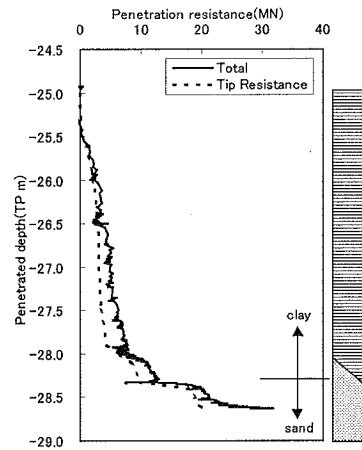


図-11 貫入抵抗とスカート貫入深度の関係

分も含む)を差し引くことにより求め、先端抵抗は、スカート先端に設置された刃口荷重計の計測値の平均に先端断面積を乗じて求めた。また、スカート貫入深度も平面的に平均した値としている。

全体抵抗は、陸側のスカートが下部砂層に貫入しはじめるTP-28m付近から増加しはじめ、ほぼすべてのスカート先端が砂層に貫入したTP-28.3m付近でさらに急増する。先端抵抗もほぼこれと同様な傾向を示しており、砂層貫入時の貫入抵抗増大は先端抵抗の寄与度が大きいことがわかる。貫入終了付近のTP-28.7mで、全体抵抗がさらに急激に増加しているにもかかわらず、先端抵抗はさほどのびていない。この部分で周面抵抗だけが急増したとは考えにくいので、この原因は、高くなって

いる陸側の海底面に底版下面が接触し、反力が生じたためと考えられる。

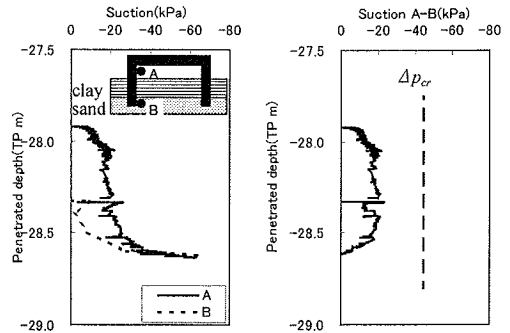
図-12(a)にサクシオンとスカート貫入深度の関係を示す。図中Aの値は、底版と海底面の間における水圧低下量、Bの値はスカート先端における水圧低下量であり、どちらも平面的に平均した値である。

サクシオンは、貫入力の増加(=浮力の低減)および姿勢制御のために、底版と海底面の間(A点)に作用させており、スカート先端が砂層へ貫入しはじめるTP-28m付近から徐々に増加させ、最終的には-60kPa程度にまで達した。一方、スカート先端からは積極的な水圧低下を行っていないにもかかわらず、B点ではTP-28.3m付近からA点に連動するように水圧が低下しており、最終貫入深度ではA点の値とほぼ一致している。これは、TP-28.3mにおいて貫入作業をいったん中断して、ボーリング調査作業を行ったために、A点とB点の間にみず道ができたためと推察される。

図-12(b)にはA点とB点のサクシオンの差とスカート貫入深度の関係を示す。今回の貫入においては、粘土層の上部のみならず下部においても水圧が低下しているので、A点とB点のサクシオンの差が上部粘土層に上向きに作用する圧力となる。同図には、式(14)より定まる限界サクシオン $\Delta p_{cr}$ も示しており、作用させたサクシオンによる上向きの圧力は、粘土層の自重とスカート内面の摩擦から定まる限界サクシオン以下であったことがわかる。

図-13に、陸側および沖側のスカート先端の刃口荷重計によって計測された地盤反力度とそれぞれの位置でのスカート先端深度の関係を示す。地盤反力度が急激に増加し始める深度は、沖側に比べ陸側は1m程度浅くなっており、当該地盤の支持層の傾斜が非常に急であったことがわかる。

陸側の支持層が浅かったため、陸側のスカートの支持層への貫入量が多くなり、貫入力を陸側に偏心させて作用させる必要があった。そのため、陸側の隔室にはサクシオンを作用させ、沖側の隔室にはサクシオンを作用させなかった。サクシオンを作用させていない沖側の地盤反力度は、支持層に貫入した後は単調に増加し続けているが、サクシオンを作用させた陸側の地盤反力度は、支持層に貫入してから増加量は明らかに鈍い。この計測結果は、上部粘土層・下部砂層の二層地盤において、サクシオンを作用させると、スカート先端の貫入抵抗が低減することを示すものである。



(a)サクシオン (b)粘土層上下のサクシオン差

図-12 サクシオンとスカート貫入深度の関係

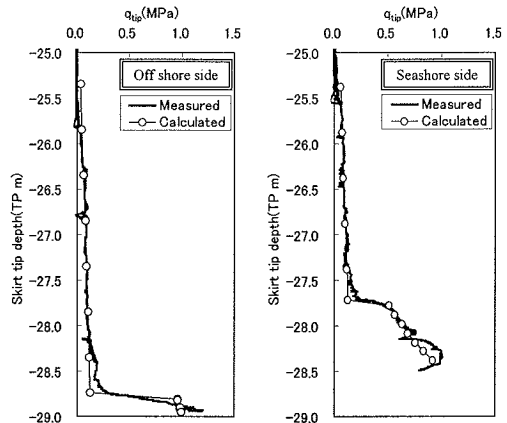


図-13 先端地盤反力度とスカート先端深度の関係

## (2) 上部粘土層における予測式の評価

### a) 予測式の計算条件

先端抵抗の予測式である式(2)は、粘性土では $\phi_u=0$ と見なせるので $N_q=1$ ,  $N_\gamma=0$ ,  $c=s_u$ となり、以下のようなになる。

$$q_{tp} = s_u \cdot N_c + \sigma'_{vt} \quad (24)$$

今回の比較に当たって、支持力係数 $N_c$ は、Terzaghiの底面粗とした値5.71およびMeyerhofの底面粗とした値8.85を用い、実測値との比較を行った。

周面抵抗の予測式である式(3)(4)は、 $\mu=0$ より、以下のようなになる。

$$p_{\bar{n}} = p_{f_0} = c_h \quad (25)$$

スカートと地盤の付着力 $c_h$ は、地盤の非排水せん断強度 $s_u$ に係数を乗ずることによって求められる。

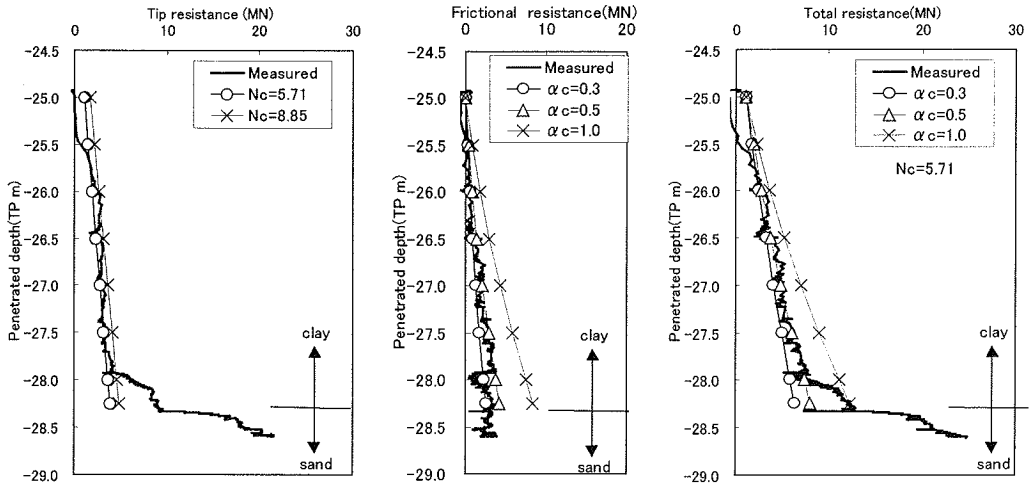


図-14 実測値と予測式による計算値との比較（上部粘土層）

$$c_h = \alpha_c \cdot S_u \quad (26)$$

ここに、 $\alpha_c$ ：付着力係数，である。付着力係数 $\alpha_c$ は、スカート貫入によって地盤に乱れが生ずることを考慮した低減係数であり、今回の比較にあたっては、 $\alpha_c=0.3, 0.5, 1.0$ とした計算を行った。

#### b) 予測計算結果と実測値との比較・考察

図-14に貫入抵抗と貫入深度の関係における実測値と予測式による計算結果を比較して示す。図は左から、先端抵抗，周面抵抗および全体抵抗である。周面抵抗の実測値は、図-11に示す実測された全体抵抗から先端抵抗を差し引いて求めた。なおスカートの貫入抵抗の比較を行うため、底版下面に反力が生じたと考えられるTP-28.6m以深の実測値は示していない。

先端抵抗の実測値と計算値を比較すると（TP-28m以深ではスカートの一部が砂地盤に達しているため比較対象外とする），実測値はほぼ $N_c=5.71$ と $N_c=8.85$ の2つの計算値の間に位置している。今回貫入した粘土層は非排水せん断強度が小さいため、どちらの支持力係数がより有用であるかについては言及できないが、いずれにしろ粘性土の先端抵抗の算定には支持力理論を用いた予測式が十分適用可能であることが確認できた。

周面抵抗の比較では、 $\alpha_c=0.3\sim 0.5$ とした計算結果が実測値との対応がよく、 $\alpha_c=1.0$ の計算値は明らかに過大評価となる。全体抵抗の比較（先端抵抗を $N_c=5.71$ として計算）においても $\alpha_c=1.0$ とし

た計算値は過大であり、 $\alpha_c=0.3\sim 0.5$ とした計算結果が実測値との対応がよい。 $\alpha_c$ は、スカート貫入時の粘土の乱れを評価していることから、鋭敏比の逆数を用いることが提案されている<sup>13)</sup>。現場付近の沖積粘性土の鋭敏比は2~2.5程度<sup>14)</sup>であると考えられ、その逆数は0.4~0.5となる。このことから、周面抵抗の算定にあたっては、 $\alpha_c=1/S_r$ （ $S_r$ ：鋭敏比）とすることで精度の高い予測が可能となると考えられる。

### (3) 下部砂層における予測式の評価

#### a) 予測式の計算条件

下部砂層の天端は、すべてのスカートが砂層に貫入したTP-28.3mとして計算を行った。先端抵抗の計算における支持力係数は、下部砂層への貫入が約30cmとスカート厚に比して比較的浅いことから、浅い基礎に適用されるTerzaghiの支持力係数を用いた。周面抵抗の計算においては、上部粘性土においては、 $N_c=5.71$ 、 $\alpha_c=0.4$ とし、下部砂層における付着力 $c_h$ は0とした。また、スカートと地盤の壁面摩擦角は $\mu=\tan(2\phi/3)$ 、静止土圧係数は $K_{out}=K_{in}=1-\sin\phi$ によりそれぞれ $\phi$ から求めた。

スカート内側の有効応力の計算においては、図-12(b)に示す粘土層上下のサクシオン差が砂層天端における有効応力低下分と考え、この値を式(13)の $\Delta p$ に入力して、スカート先端の鉛直有効応力を求めた。また、スカート内外で鉛直有効応力が異なる値となるため、図-6を用いて支持力係数 $N_q$ の補正を行った。

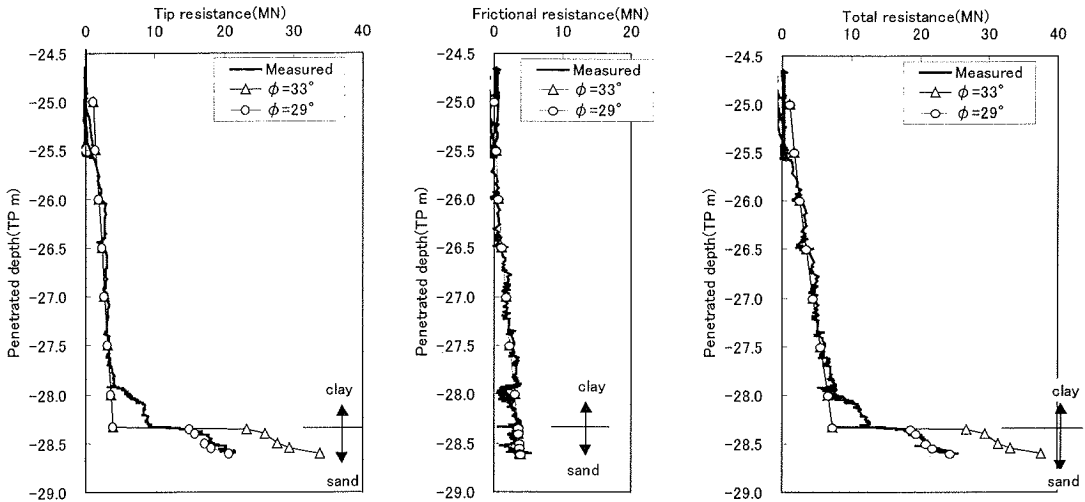


図-15 実測値と予測式による計算値との比較（下部砂層）

実測値と計算値の比較にあたっては、まず最初に、 $\phi$ を $\phi_a=33^\circ$ とした場合と局所せん断破壊を考慮して $\phi_r=\tan^{-1}(0.85 \cdot \tan \phi_a)=29^\circ$ に低減させた場合の比較を行った。つぎに、予測式においてサクシオンを考慮した場合としない場合の比較を行った。

b) 予測計算結果と実測値との比較・考察

図-15に実測値と $\phi=33^\circ$ および $29^\circ$ とした計算値を比較して示す。図は左から、先端抵抗、周面抵抗および全体抵抗である。

周面抵抗の計算値は、 $\phi$ による違いは小さくどちらも実測値とほぼ対応している。これは、砂層への貫入量が少ないため、周面摩擦抵抗は粘土層によるものが支配的であったためである。

一方、先端抵抗および全体抵抗は、砂層に貫入するとどちらの計算値も急激に大きな値となる。これは、先端抵抗の計算値は、予測式である式(2)の第2項の寄与度が大きく、第2項の支持力係数 $N_q$ が $\phi$ の増大とともに急激に大きくなるためである。 $\phi=33^\circ$ と $\phi=29^\circ$ を比べると、 $\phi$ が $4^\circ$ 大きくなるだけで先端抵抗は倍近く大きくなっている。このように、支持方法をういた予測値は $\phi$ に対し敏感となるため、予測値の計算には $\phi$ の設定が非常に重要であることがわかる。今回の実測値との比較では、 $\phi=29^\circ$ とした場合に実測値との対応がよく、砂層における貫入抵抗の予測に際しては、 $\phi$ を局所せん断破壊を考慮して低減させることが望ましいと考えられる。

図-13に示したスカートの先端地盤反力度と深度

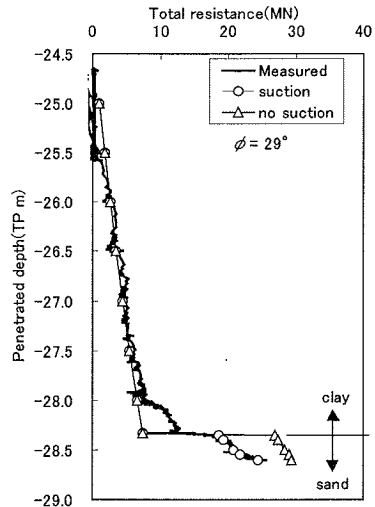


図-16 予測式におけるサクシオン考慮の有無

の関係に、 $\phi=29^\circ$ として計算した予測式による計算値を同時に示してある。沖側の計算値にはサクシオンを考慮せず、陸側の計算値にはサクシオン（粘土層上下のサクシオン差）を考慮してある。どちらの計算値もほぼ実測値と対応しており、提案した予測式によって、サクシオンによるスカート先端抵抗の低減を表現できることが明らかになった。

図-16には、 $\phi=29^\circ$ としてサクシオンを考慮した場合と考慮しなかった場合の全体抵抗の計算値を実測値と比較して示してある。サクシオンを考

慮しない計算値は、 $\phi=29^\circ$  であっても砂層に貫入してからの貫入抵抗が実測値に比べ過大となっているが、サクシオンを考慮し、スカート先端の有効応力低減を正確に評価した計算値は、実測値とよい整合性を示している。

以上のことから、本論文で誘導した二層地盤におけるサクシオン効果を考慮したスカート貫入抵抗予測式は、 $\phi$  を適切に設定すること、および作用させたサクシオンを正確に評価することにより、十分に適用可能であるものと考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、スカートが貫入される地盤ごとにスカート内外鉛直有効応力の算定式を誘導し、サクシオン効果を考慮した貫入抵抗予測式を提案するとともに、スカート先端で内外の鉛直有効応力が異なる際の支持力係数の補正方法を明らかにした。さらに、上部粘土層・下部砂層の二層地盤において行われたスカート・サクシオン基礎の実証工事での貫入抵抗の実測値と予測式による計算値を比較し、予測式の評価を行った。

本論文の内容をまとめると以下のようになる。

- (1) スカートの貫入抵抗は、先端抵抗と周面抵抗に分けられ、先端抵抗は、地盤を剛塑性体と見なした帯状基礎の支持力公式を準用して算定することができる。
- (2) 貫入中のスカート内外の有効応力は、サクシオンの作用により変化し、その変化はスカートが貫入される地盤により異なる。
- (3) 砂地盤にスカートを貫入させる際には、一様であるか互層となっているかに関わらず、サクシオンにより有効応力の減少が引き起こされ、スカートの貫入抵抗は低減する。
- (4) サクシオンによってスカート先端での内外の鉛直有効応力は異なる値となり、この場合発生するすべり面は内外で非対称となるため、先端抵抗の算定には支持力係数の補正が必要となる。
- (5) すべり面の変化を考慮した支持力係数の補正を行うことにより、先端抵抗の算定をより精度よく行うことができる。
- (6) 粘土層の先端抵抗の予測においては、支持力法の適用が十分可能である。また、粘土層の周面摩擦の低減を表す付着力係数 $\alpha_s$ は、鋭敏比の逆数とすることで精度の高い予測が可能となる。
- (7) 砂層の予測値は、支持力係数が $\phi$ によって敏

感な値であるため、 $\phi$  の設定が重要となる。今回の実測値との比較では、局所せん断破壊を考慮した低減を行うことで実測値とよい整合性が得られた。

- (8) 下部砂層における貫入抵抗は、サクシオンによって低減されることが実測値より明らかとなった。また、スカート先端の有効応力低減を正確に評価することで、計算値は実測値とよい整合性を示した。
- (9) 以上より、本論文で誘導した二層地盤におけるサクシオン効果を考慮したスカート貫入抵抗予測式は、十分に適用可能である。

## 参考文献

- 1) Andenaes, E., Skomedal, E. and Lindseth, S. : Installation of the Troll Phase I Gravity Base Platform, Offshore Technology Conference, OTC 8122, pp.57-70, 1996.
- 2) 大島実：真空沈設工法によるPC管式防波堤, 土木施工, 第3巻, 第5号, pp.13-19, 1962.
- 3) 善功企, 山崎浩之, 館下徹, 佐渡篤史, Sparrevik, P. : サクシオン基礎の海底地盤中への沈設実験, 第39回土質工学シンポジウム, 平成6年度発表論文集, pp.65-72, 1994.
- 4) 善功企, 山崎浩之, 前田健一：サクシオンによるケーソン基礎の海底地盤中への沈設に関する事例解析, 土木学会論文集 No.603/III-44, pp.21-34, 1998
- 5) 池田哲朗：サクシオン基礎構造物の技術開発—現地実証試験における沈設結果—, 第16回港湾技術報告会報告概要集, pp.167-181, 1999.
- 6) 伊藤政人, 崎本純治, 上野孝之：スカート基礎の水圧低下効果（その1：貫入抵抗におよぼす影響）, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.1571-1572, 1998.
- 7) 伊藤政人, 崎本純治, 上野孝之, 太田良晴：スカート基礎の大型模型実験（その1：貫入試験）, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp.1411-1412, 1999.
- 8) DET NORSKE VERITAS : RULES FOR THE DESIGN CONSTRUCTION AND INSPECTION OF OFFSHORE STRUCTURES, 1977. (REPRINT1981.)
- 9) Janbu, N. : Soil models in offshore engineering, Rankine lecture. Geotechnique 35, No.3(241), pp.239-281, 1985.
- 10) Erbrich, C.T. and Tjelta, T.I. : Installation of Bucket Foundations and Suction Caissons in Sand - Geotechnical Performance, Offshore Technology

Conference, OTC 10990, pp.1-11, 1999.5.

- 11) 浅井隆一, 善田好信, 米田博: スカート基礎を有する防衝工の施工(その1: 製作・設置), 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, pp.600-601, 2001.
- 12) 廣長周治, 上原康之, 米田博: スカート基礎を有する防衝工の施工(その2: 姿勢制御), 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, pp.602-603, 2001.
- 13) Andersen, K.H. and Jostad, H.P.: Foundation

Design of Skirted Foundations and Anchors in Clay, Offshore Technology Conference, OTC 10824, pp.383-392, 1999.

- 14) 社団法人地盤工学会関西支部: 「海底地盤—大阪湾を例として—」, 1995.

(2003.1.10 受付)

## NEW METHOD OF PREDICTING PENETRATION RESISTANCE OF SKIRT-SUCTION FOUNDATIONS AND ITS VERIFICATION THROUGH FIELD OBSERVATION

Masato ITO, Toshiyuki MITACHI, Naoki MASUI and Junji SAKIMOTO

Skirt-suction foundation consists of the cylindrical thin walls, which are sunk into the seabed by applying suction inside the skirt compartment. In this paper, a new method of predicting penetration resistance of skirts under various ground conditions is proposed by taking account of effective stress change of the inside and outside of the foundation ground. Appropriateness of the method is verified by comparing the calculation with the field observation of an actual skirt-suction foundation. Consequently, it is clarified that the proposed method can be successfully applied to predict the penetration resistance of skirt-suction foundations.