The Japanese Geotechnical Society

スカート基礎の桟橋先端防衝工への適用

Application of a Skirt Foundation for the Vessel Buffer Structure

伊藤政人（いとう　まさと）
㈱大林組技術研究所土木基礎研究室　副主任研究員

増井直樹（ますい　なおき）
㈱大林組土木技術本部設計第1部　副部長

米田博（よねだ　ひろし）
㈱大林組岬町工事事務所　所長

秋山敬（あきやま　たかし）
大阪府土地開発公社岬事務所事業グループ　副参事

1. はじめに

スカート基礎は，底版から下方に伸びたコンクリートもしくは鋼の筒状の壁（スカート）を海底地盤中に貫入して安定性を確保する基礎構造物である。このスカート基礎は，(1)基礎マウンドや地盤改良が不要，(2)スカートの貫入による安定性の増大，(3)海上作業の低減による工期短縮等，海洋構造物の基礎として優れた性能を有しており，これまで海外では海底油田開発のコンクリートプラットフォームや防波堤などの基礎として実績がある。

このスカート基礎を大阪府岬町にて関西空港第2期埋立て用土砂積出し桟橋の先端防衝工の基礎に適用した。今回スカート基礎を適用した目的は，施工性を実証すること，据付け時から完成後までの種々の計測を行って設計法へ反映させることであった。本論文では，防衝工据付け時における計測結果を示すとともにスカート貫入抵抗の実測値と予測式による値の比較について報告する。

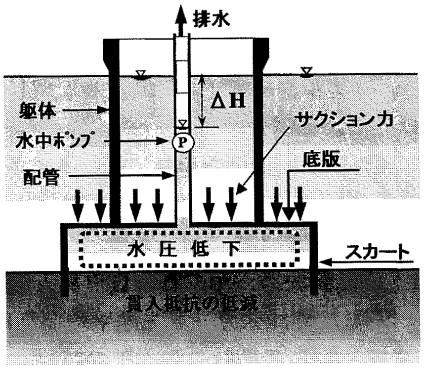
2. スカート基礎におけるサクション効果

スカート内の水を水中ポンプにより排水し，スカート内水位を外水位以下に下げることをサクションと呼ぶ。サクションを作用させることにより，スカート貫入時には図—1に示す効果がある。サクションによってスカート内外に水頭差ΔHが生じると，スカート内揚圧力の減少分が，下向きの荷重（サクション力）として構造物に作用する。すなわち，スカート基礎には，基礎自身の有効重量に加えてサクション力が貫入力として働く。また，サクションを作用させることによりスカート内の海底地盤の有効応力が減少することによりスカートの貫入抵抗が減少することが知られている[1]。このようにスカート基礎においてサクションを作用させると，貫入力の増加と貫入抵抗の減少という二つの効果が得られる。

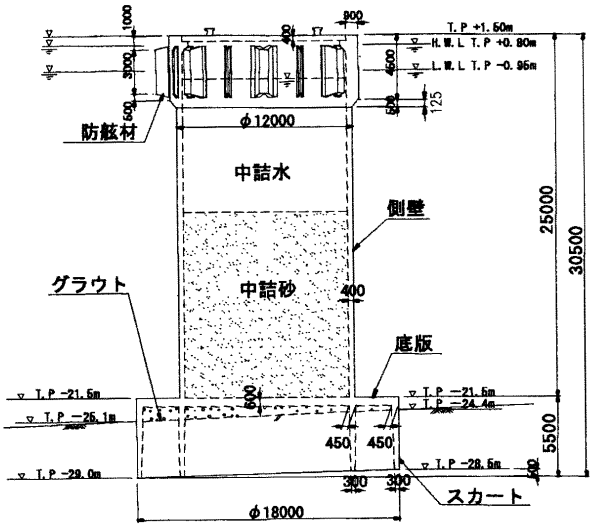
3. 防衝工の概要

今回スカート基礎を適用した防衝工の構造図を図—2に示す。防衝工は，土砂積出し桟橋の先端に据付けられ，土運船の桟橋への衝突防護および土運船出域時の回頭を主目的とするものである。

防衝工は，すべて鉄筋コンクリートで製作した。スカートは，直径18 m と12 m の二重になっており，貫入



図—1　スカート基礎のサクション効果



図—2　防衝工構造図

時の姿勢制御のためにサクション力を偏心して作用させることができるように，スカート内を5室の隔室に分割した（図—4参照）。スカート先端は，支持層である砂質土層に貫入させるものとし，砂質土層の傾斜にあわせスカート長を5.0～5.5 m の範囲で変化させた。

防衝工の製作は兵庫県淡路島の津名町にて行い，3 600 t 吊起重機船（以下FC船）により大阪府岬町まで吊曳航して据付けた（口絵写真—9～11）。

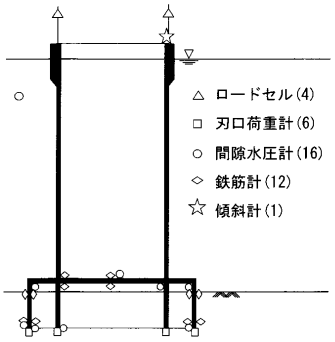
4. 据付け時の計測結果

4.1 計測概要

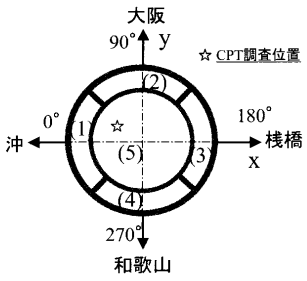
据付け時の計測器の配置図を図—3に示す。防衝工の三次元的な位置は，桟橋上に設置した自動追尾式トータ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図―3　計測器配置図



図―4　スカート断面図

ルステーション3台によって測量した。また各計測データは，防衝工上に設置したデータロガーから携帯電話を用いて，桟橋上の計測室内のパソコンに15秒毎に無線伝送し，リアルタイムで施工状況を管理した。

4.2　FC船による据付け

図―4にスカート断面図を示し，**図―5**にFC船による据付け時の経時変化図（スカート先端平均標高，スカート隔室と外水位の水頭差）を示す。

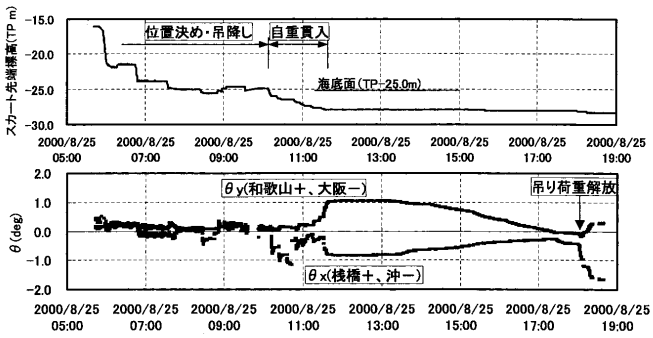
FC船による位置決め，吊降し，自重貫入を終了した時点（11：30頃）で，スカート先端平均標高はT.P.－28 m付近まで達し，その時の防衝工の傾斜は沖側および和歌山方向にそれぞれ約1°となった。そこでFC船で防衝工の沖側を吊りながら，桟橋側および大阪側の隔室および中央隔室（(1)(2)および(5)）から排水し，サクション力を桟橋側に偏心して作用させた。その結果，18：00頃には沖側・和歌山側共に傾斜は0°近くまで修正することができた。しかしFC船の吊荷重を解放したところ，再び沖側に1.7°，和歌山側に0.3°傾斜して静止した。

4.3　サクションによる姿勢修正

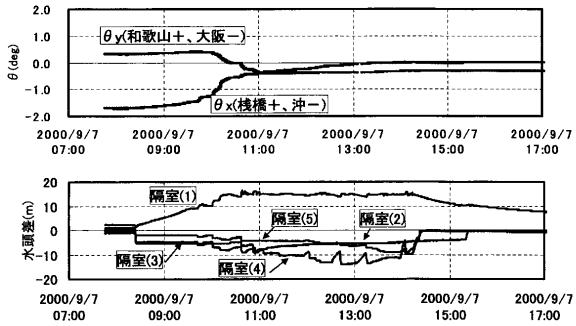
FC船による据付け後，15箇所にわたる詳細なボーリング調査を行った結果，支持層の傾斜は約6～8%であることが判明した。事前の調査結果から予想された支持層の傾きは3%程度であり，据付けに際して常に沖側への傾きが先行した理由はこの差異によるものであった。そこでサクションによる姿勢修正を行った。

図―6にサクションによる姿勢修正時の経時変化図（スカート隔室と外水位との水頭差，傾斜角）を示す。

沖側への傾斜を修正するため，バラスト注水を行って貫入力を増加させるとともに，傾斜して低くなっている沖側隔室(1)のバルブを閉塞し，残りの隔室すべての水頭を低下させた。隔室(1)の水圧は底版の安全性から150 kPa（水頭差15 m）以上とならないよう管理した。サクション力を桟橋側に偏心載荷することにより，沖方向への傾斜は徐々に小さくなり，最終的には約0.3°まで修正することができた。和歌山–大阪方向の傾斜は，隔室(2)と(4)の水頭差を調節することで修正し，最終的な傾斜は0°となった。このようにどちらの方向の傾斜角もサクションを用いて修正することにより，許容値（＝0.57°）以内とすることができた。



図―5　経時変化図（FC船による据付時）



図―6　経時変化図（サクションによる姿勢修正時）

5.　貫入抵抗の実測値と予測式による値の比較

5.1　貫入抵抗予測式

これまで提案されているスカート基礎の貫入抵抗予測式には，ノルウェー船級協会（DNV）に示されている方法[2]（以下DNV法）と支持力公式に基づく方法[1]（以下支持力法）があり，それぞれの算定式を**表―1**に示す。

DNV法は，コーン貫入抵抗値（qc）にある係数を乗じて貫入抵抗を求める経験式である。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。支持力公式をスカート先端抵抗の算定に適用することには，スカート貫入中にすべり破壊面の形状が変化すること，貫入による先端地盤の締固めを表現できないなどの問題点がある。しかし支持力公式の第2項において，スカート先端の鉛直有効応力と先端抵抗が関連づけられており，サクションによる有効応力低減に伴う貫入抵抗低減効果を定量的に評価することができる。

5.2　スカート先端における鉛直有効応力の算定式

支持力式におけるスカート先端における鉛直有効応力の算定には，サクションによって上向きの浸透流が発生し，有効応力が減少する効果（サクション効果）と貫入力がスカート内周面の摩擦を介して伝わり有効応力が増加する効果（内周面摩擦効果）を考慮することが善らの文献1)に提案されている。今回のような二層地盤（上部粘土層・下部砂層）においては，上向きの浸透流は発生しないが，水頭をΔH低下させると上部粘土層には上向きの力が作用するため，下部砂層の有効応力は$\gamma w \Delta H$減少する（**図―7**）。スカート先端が下部砂層にあるとき，このサクション効果を考慮したσ_v'の算定式を

NII-Electronic Library Service

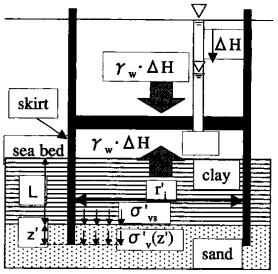
The Japanese Geotechnical Society

表―1　スカート貫入抵抗予測式

（単位面積当たり）

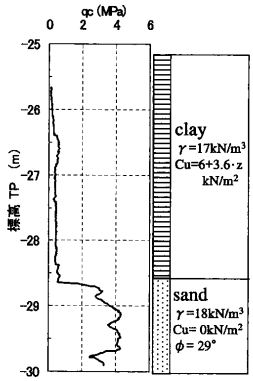
		先端抵抗	周面抵抗
DNV法	粘性土	$0.17 \cdot q_c$	$0.01 \cdot q_c$
中間値～最大値	砂質土	$0.20 \sim 0.25 \cdot q_c$	$0.001 \sim 0.003 \cdot q_c$
支持力法		$c \cdot N_C + \sigma'_v \cdot N_q + \gamma' \cdot B/2 \cdot N_\gamma$	$\mu \cdot K_{in} \cdot \sigma'_{vin}(z) + c_h$（内側） $\mu \cdot K_{out} \cdot \sigma'_{vout}(z) + c_h$（外側）

q_c：コーン支持力，N_C, N_q, N_γ：支持力係数
σ'_v：スカート先端における鉛直有効応力
B：スカート厚，c, γ'：スカート下端以深の粘着力，単位体積重量
σ'_{vin}，σ'_{vout}：スカート内側，外側の鉛直有効応力
K_{in}，K_{out}：スカート内側，外側の土圧係数，z：着目点深さ



z'：下部砂層上端からの深さ
$\sigma'_{vs} = (\gamma'_c + 2c_h/r_i) \cdot L - \gamma_w \Delta H$
γ_w：水の単位体積重量
γ'_s：下部砂層の水中単位体積重量
c_h：上部粘土層のスカートと地盤の付着力
L：上部粘土層の厚さ
r_i：スカート内径，μ：下部砂層の摩擦係数

図―7　二層地盤におけるサクション効果



図―8　地盤調査結果

文献1)の方法を用いて誘導すると以下のようになる。

$$\sigma_v'(z') = (B'/A)\{\exp(A \cdot z') - 1\}^+ \sigma_{vs}' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに，$\sigma_v'(z')$：下部砂層における鉛直有効応力

$$A = 2\mu K_{in}/r_i,\ B' = \gamma_s' + A \cdot \sigma_{vs}'$$

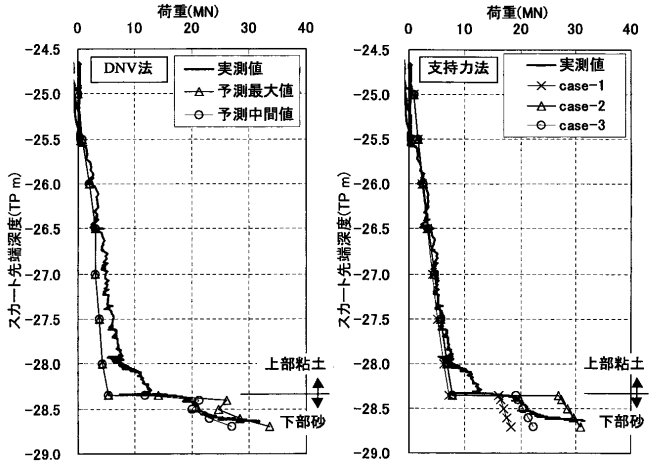
他の記号は図―7参照

5.3　実測値と予測値の比較・考察

図―8にコーン支持力分布および各層の室内試験による地盤定数を示し，DNV法による貫入抵抗の予測値と実測値の比較を図―9（左）に示す。貫入抵抗の実測値とは，防衝工重量＋バラスト水重量－浮力－FC船吊り荷重＋サクション力である。なお予測値は，貫入抵抗の実測値が急増する深さ（＝T.P.－28.3 m）を砂層天端として算出した。DNV法は，上部粘土層では予測値が実測値を下回っているが，砂層における実測値は予測中間値と非常によく対応している。

支持力法による貫入抵抗の予測値と実測値の比較を図―9（右）に示す。スカート先端の有効応力σ_v'を計算する方法として，case-1：内周面摩擦効果なし$\Delta H = 0$ m，case-2：内周面摩擦効果あり$\Delta H = 0$ m，case-3：内周面摩擦効果あり$\Delta H = 1.5$ mの3ケース行った。ここで内周面摩擦効果なしとは，$\sigma_v' = \gamma' \cdot z$としたケースである。

case-1，つまり内周面摩擦効果を考慮しないと，下部砂層において，予測値は実測値よりも小さくなる。このことから支持力法において内周面摩擦効果を考慮することは妥当であると考えられる。これは，内周面摩擦効果は直接的ではないにしろ，貫入による先端地盤の締固めを表現しているためと考えられる。case-2は，最終貫入深度において実測値と一致しているが，下部砂層のほとんどにおいて実測値よりも大きくなっている。一方case-3は，最終貫入深度において実測値よりも小さいが，それ以外は実測値に近い。実測値がT.P.－28.6 m以深で増加しているのは，貫入によって盛上った海底面に底版が接触した可能性が高いことを考えると，case-3の方が実測値と対応しているといえる。このことより予測式にサクション効果を考慮することは妥当であると考えられる。



図―9　貫入抵抗の実測値と予測式による値の比較

下部砂層貫入中の水頭低下量ΔHは，下部砂層における間隙水圧の低下の影響もあり[3]，全隔室平均で1.5～3.0 mであった。case-3の$\Delta H = 1.5$ mはこの値に比べやや小さいことから，(1)式による貫入抵抗予測式はサクションによる抵抗低減効果を過大に評価する可能性があると考えられる。

6.　ま　と　め

スカート基礎を桟橋先端防衝工基礎へ適用した際の据付け時の計測結果を示すとともに，貫入抵抗の実測値と予測式による値を比較し，予測式の評価を行った。その結果を要約すると以下のとおりである。

1)　当該支持層の傾斜は事前の予想よりも大きかったが，サクション力を用いることにより精度良く据付けることができた。

2)　DNV法による予測値は実測値とよく対応し，予測式としての有用性は高い。一方支持力法は，内周面摩擦効果およびサクション効果を考慮することで，実測値とほぼ対応する。

参　考　文　献

1)　善　功企・山崎浩之・前田健一：サクショ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.
2)　Det Norske Veritas : Rules for the Design Construction and Inspection of Offshorestructures, 1977 (Reprint1981).
3)　伊藤政人・崎本純治・米田　博・渡辺　朗：スカート基礎を有する防衝工の施工（その3：貫入抵抗と予測式の比較），土木学会第56回年次学術講演会，2001.

（原稿受理日　2001.12.12）

NII-Electronic Library Service