

新形式海洋構造物基礎の開発 (その2)

栈橋先端防衝工基礎への適用

伊藤 政人
平井 正哉
(本社土木事業本部
プロジェクト2部)

崎本 純治
増井 直樹
(本社土木技術本部
設計第1部)

上野 孝之
長尾 均
(本店岬町工事事務所)

Development of New Type of Foundation for Offshore Structures (Part2)

Application of Skirt Foundation to Vessel Buffer Structure

Masato Ito
Masaya Hirai

Junji Sakimoto
Naoki Masui

Takayuki Ueno
Hitoshi Nagao

Abstract

A skirt foundation consists of thin concrete walls projecting into the seabed. The skirt is sunk to the required depth by applying suction inside the skirt compartment. Installation of a vessel buffer structure with a skirt foundation was completed at Misaki-cho in the south of Osaka prefecture in September 2000. This paper describes the monitoring results and compares the observed and predicted penetration resistance. The results are as follows: (1) The inclination of the structure was well controlled by providing different suctions for each skirt compartment. (2) Settlement of the structure after penetration was much smaller than during penetration because preload was applied during penetration stage by the suction. (3) Suction reduces penetration resistance, and the measured penetration resistance is close to that of the estimation method based on bearing capacity theory.

概要

当社は、新形式の海洋構造物基礎として、Norwegian Constructors社(現 Aker Maritime)との技術提携により、スカート基礎の技術開発を進めている。今回このスカート基礎が、関西空港第2期埋立て用土砂積み出し栈橋の先端防衝工の基礎として採用された。スカート基礎を実構造物の基礎として採用した例はこれまで国内でも2例しかなく、当社としては初めてのスカート基礎の実構造物適用工事となった。本論文では、まず防衝工基礎の据付における挙動計測結果を示し、次に二層地盤におけるスカート基礎の貫入抵抗予測式を誘導したのち、予測値と実測値の比較を行い予測式の妥当性について述べる。

1. はじめに

新形式海洋構造物基礎であるスカート基礎は、底板より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。当社では、この基礎を橋梁基礎等の海洋構造物に適用するため、設計・施工技術に関する研究開発を行っており、今回実海域における同基礎の施工を行ったので、計測結果とそれに基づく貫入抵抗予測式の妥当性について報告する。

2. スカート基礎におけるサクシオン効果

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がサクシオンと呼ぶ。

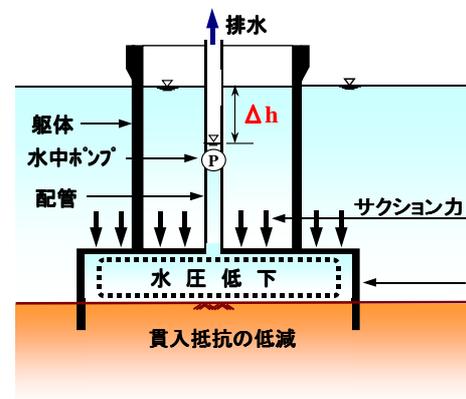


Fig. 1 スカート基礎のサクシオン効果
Suction Effect of Skirt Foundation

サクシオンを作用させることにより、貫入時には以下に示す効果がある（Fig. 1）

サクシオンによってスカート内外に水頭差 h が生じると、スカート内揚圧力の減少分が、下向きの荷重（サクシオン力）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オン力が貫入力として働く。また、サクシオンを作用させることによりスカート内の海底地盤には上向きの浸透流が発生し、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オンを作用させると、貫入力の増加と貫入抵抗の減少という2つの効果が得られる。

3. 工事概要

今回スカート基礎を適用した防衛工の構造図を Fig. 2 に示す。防衛工は、土砂積み出し栈橋の先端に据付けられ、土運船の栈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。

防衛工は、すべて鉄筋コンクリート製で（平均全高 30.5m、コンクリート 805m³、鉄筋 230t）である。スカートは、直径 18m と 12m の二重になっており、壁厚は先端で 300mm、底板接合部で 450mm となっている。貫入時の姿勢制御のためにサクシオ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（Fig. 6 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 5.0～5.5m の範囲で変化させた。

施工場所を Fig. 3 に示す。製作は兵庫県淡路島の津名町にて行い、3600t 吊起重機船（以下 F C 船）により大阪府岬町まで吊曳航して据付けた（photo 1）。津名町での製作時に、防舷材等本体構造物の他、計測計器、排水およびグラウト用の配管、曳航・設置用艀装設備などの取付を行った。

防衛工の施工手順を Fig. 4 に示す。F C 船による吊降し・据付作業を行ったのち、その 13 日後にサクシオンによる傾斜修正作業を行った。その後底板下のグラウト、中詰め砂の投入を行い完成に至った。

4. 計測結果

4.1 計測概要

据付から完成に至るまでの計測項目および使用計器を Table 1 に、計測器配置図を Fig. 5 に示す。据付時の防衛工の三次元的な位置は、栈橋上に設置した自動追尾式トータルステーション 3 台によって測量した。また据付時の各計測データは、防衛工上に設置したデータロガーから携帯電話を用いて、栈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。据付後は、防衛工の沈下をアンカー式沈下計によって計測し、すべての計測データは有線で計測室内に転送

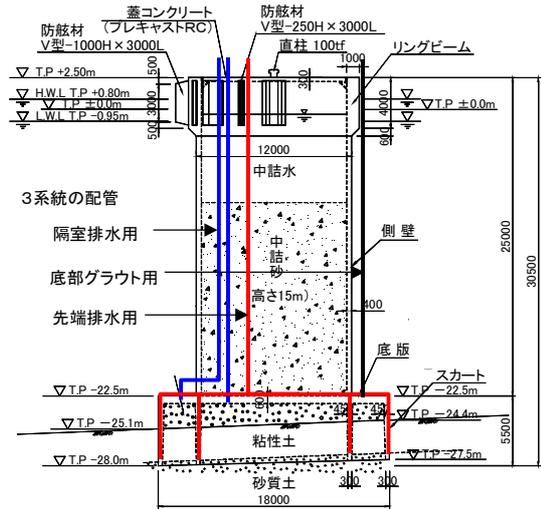


Fig. 2 防衛工構造図
Section of the Vessel Buffer Structure



Fig. 3 施工位置
Location

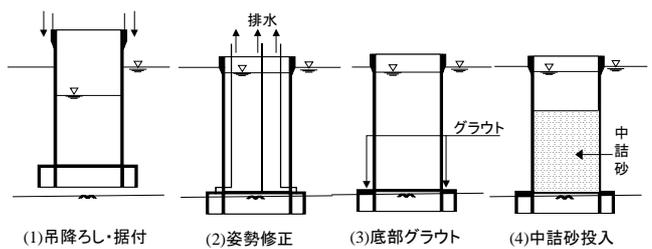


Fig. 4 施工手順
Installation procedure

した。

4.2 据付時および姿勢修正時

Fig. 6 にスカート断面図を示し、Fig. 7 に据付時の経時変化図（スカート先端平均標高、スカート隔室と外水位との水頭差および傾斜角）を示す。

F C 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 TP-28m 付近まで達し、その時の防衛工の傾斜は沖側および和歌



Photo 1 スカート基礎据付状況
Installation of Skirt Foundation

table 1 計測項目および計器名
Monitoring and Sensor List

計測項目	計器名	個数
クレーン吊り荷重	ロードセル	4
据付時スカート先端座標(x,y,z)	自動追尾型トータルステーション	3
スカート先端傾斜角	固定式傾斜計	1
バラスト水位	水位計	1
スカート内間隙水圧	間隙水圧計	11
地盤内間隙水圧	間隙水圧計	4
潮位	水位計	1
先端地盤反力	刃口荷重計	6
躯体応力	鉄筋計	12
据付後沈下量	アンカー式変位計	2
揚水量	超音波式変位計	1

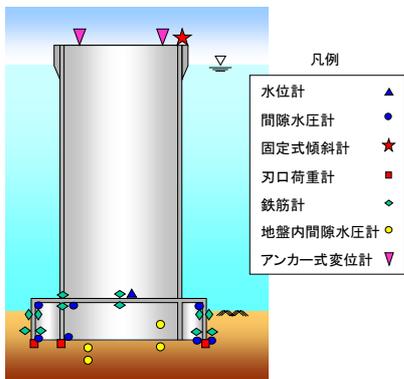


Fig. 5 計測器配置図
Location of Sensors

山方向にそれぞれ約1°となった。そこでFC船で防衛工の沖側を吊りながら、棧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、サクシオン力を棧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船の吊り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。

Fig. 8に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

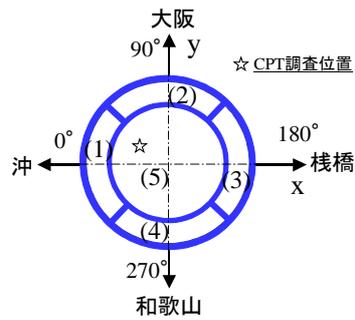


Fig. 6 スカート断面図
Horizontal Cross Section of Skirt

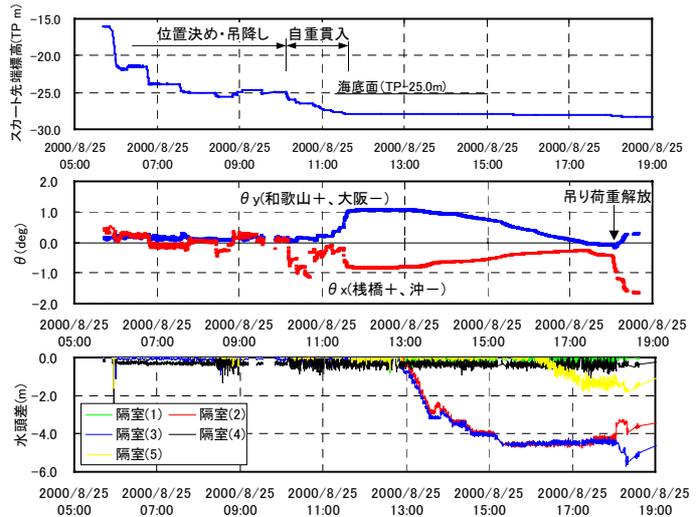


Fig. 7 スカート先端標高、傾斜角および水頭差(据付時)
Depth of Skirt Tip, Inclination and Suction (at Installation)

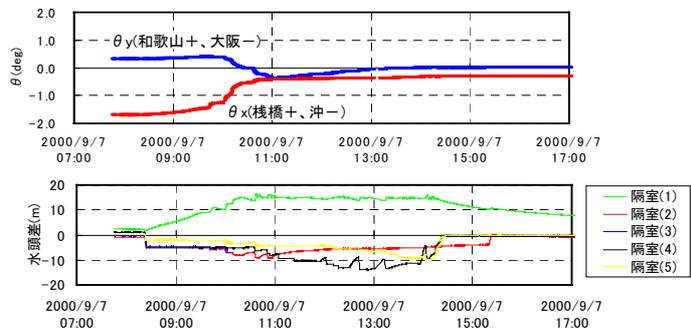


Fig. 8 傾斜角、水頭差(姿勢修正時)
Inclination and Suction (at Modification)

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150kPa(水頭差15m)以上とならないよう管理した。サクシオン力を棧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オンを用いて修正することにより、許容値

($\approx 0.57^\circ$) 以内とすることができた。

Fig. 9 に貫入力とスカート先端平均標高の関係を示す。図には作用させたサクシオン力と全貫入力 (= 防衛工重量 + パラスト水重量 - 浮力 - クレーン荷重 + サクシオン力) を示してある。スカート先端が TP-28.3m に達した時点で貫入力が増加しており、この時点でスカート先端のほとんどが支持層である砂層に貫入しはじめたことがわかる。最終的に作用させた貫入力は、約 32MN であり、そのうちサクシオン力は約 16MN であった。

Fig. 10 にスカート先端に取り付けた刃口荷重計による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、沖側に比べ棧橋側は 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る（後の詳細なボーリング結果から約 6~8%と判明）ことがわかる。事前の調査結果から予想していた支持層の傾きは 3%程度であり、貫入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と考えられる。

棧橋側の隔室には、貫入時にサクシオンを作用させており、図には水頭低下量 H を示してある。サクシオンを作用させていない 42° 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、棧橋側の地盤反力度は支持層に貫入してから急激に増加するものの、 H が 4m ないし 5m となったときに増加量が鈍くなっている。これはスカート内にサクシオンを作用させると、スカート底版に下向きの力が作用すると同時に、同じ大きさの力がスカート内地盤に上向きに作用し、支持層である下部砂層の有効応力が減少したためであると考えられる。(Fig. 13)

4.3 中詰め砂投入時

Fig. 11 に貫入時から砂投入時までの荷重 - 沈下曲線 (Fig. 9 に砂投入時のデータを加えて拡大したもの) を示す。砂投入時は貫入時に比べ沈下曲線の傾きが非常に緩く（同じ荷重増分で沈下が少なく）なっている。これは貫入時に作用させた荷重のうち、サクシオン荷重（約 16MN）は貫入終了後水位を回復させることにより除荷されており、投入した砂荷重以上の荷重履歴をあらかじめ貫入時に作用させていたためである。このことにより、完成後荷重よりも大きな荷重を貫入時にサクシオンを用いて作用させることによって、完成後の沈下を抑制できることがあきらかになった。

5. 貫入抵抗の実測値と予測値の比較

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 Table 2 に示す。

DNV 法は、コーン貫入抵抗値 (q_c) にある係数を乗ず

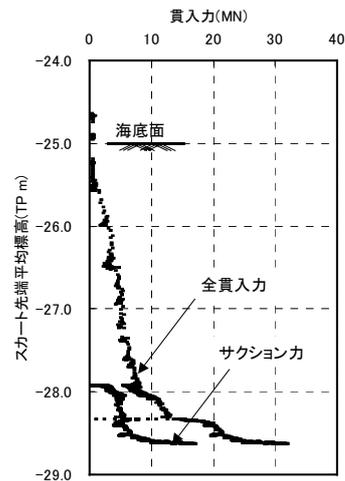


Fig. 9 貫入力 - スカート先端平均標高
Penetration Force - Average Depth of Skirt Tip

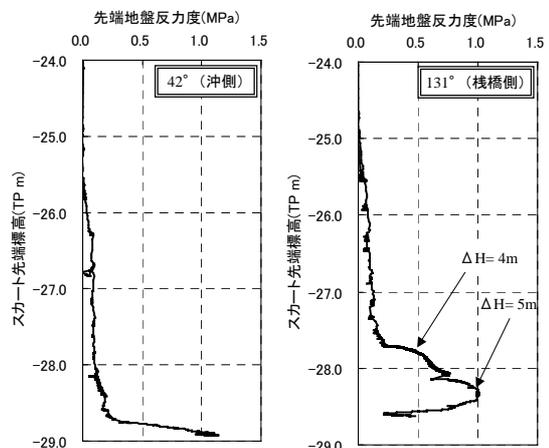


Fig. 10 先端地盤反力 - スカート先端標高
Subgrade Reaction - Depth of Skirt Tip

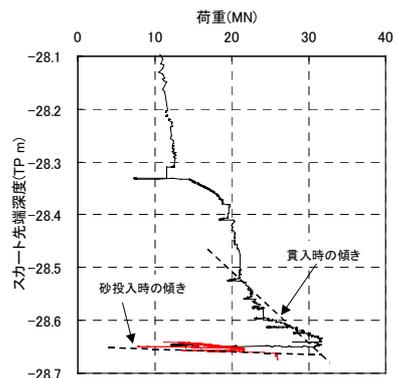


Fig. 11 貫入時および砂投入時の荷重 - 沈下曲線
Load - Settlement Curve of the Penetration and the Sand Filling

ることにより貫入抵抗を簡便に求められるものであり、海外における多くの実績をもとに定められた経験式である。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していくこと、貫入による先端地盤の締め固めを表現できないこと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、サクシオ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

スカート先端における鉛直有効応力の算定には、サクシオンによって有効応力が減少する効果（サクシオン効果）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）を考慮する必要がある。一様な砂地盤に貫入するときの内周面摩擦効果を考慮した式は、文献¹⁾に示されているが、ここでは今回のような二層地盤（上部粘土層下部砂層）における σ'_v 算定式を誘導する。

Fig. 12 に示すスカート基礎内部の力のつり合いは、次式ようになる。

$$(\sigma'_v + d\sigma'_v)A_i = \sigma'_v A_i + 2r_i(\mu K_{in} \sigma'_v + c_h) + \gamma' A_i dz \dots (1)$$

- ここに、 σ'_v ：鉛直有効応力
- A_i ：スカート内面積
- r_i ：スカート内径
- γ' ：地盤の水中単位体積重量
- K_{in} ：スカート内面の土圧係数
- μ ：スカートと地盤の摩擦係数（ $=\tan(2\phi/3)$ ）
- c_h ：スカートと地盤の付着力
- ϕ ：内部摩擦角

5.2.1 上部粘土層 サクシオンを作用させても粘土層内の有効応力は変化しない。また、 $\mu=0$ と見なすことができるので、(1)式の解は以下ようになる。

$$\sigma'_v(z) = (\sigma'_c + 2c_h / r_i) \cdot z \dots (2)$$

- ここに、 $\sigma'_v(z)$ ：深さ z における鉛直有効応力
- z ：海底面からの深さ
- σ'_c ：粘土の水中単位体積重量

5.2.2 下部砂層 4.2 で述べたように、サクシオンにより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 $\sigma'_w H$ 減少する (Fig. 13)。境界条件を下部砂層天端で $\sigma'_v = \sigma'_s$ (σ'_s ：砂層上面に作用する鉛直有効応力) として、(1)式を解くと以下ようになる。

$$\sigma'_v(z') = (B'/A) \{ \exp(A \cdot z') - 1 \} + \sigma'_s \dots (3)$$

- ここに、 $A = 2\mu K_{in} / r_i$
- $B' = 2c_{hs} / r_i + \sigma'_s + A \cdot z'$

Table 2 スカート貫入抵抗予測式
Calculation Method of Penetration Resistance of Skirt

		(単位面積当たり)	
		先端抵抗	周面抵抗
DNV法	粘性土	$0.17 \cdot q_c$	$0.01 \cdot q_c$
	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
 $\sigma'_{vin}, \sigma'_{vout}$ ：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

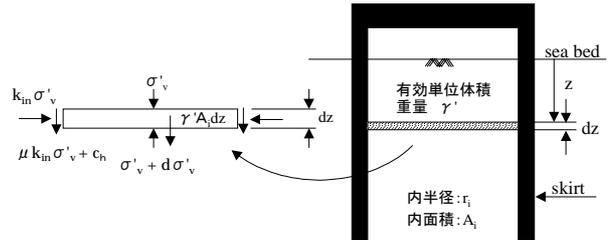


Fig. 12 スカート内部土要素の力のつり合い
Stress of Soil Element inside the Skirt

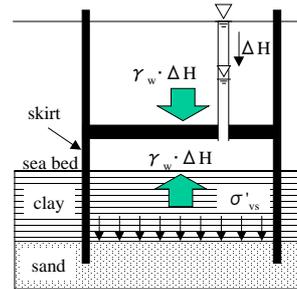


Fig. 13 下部砂層におけるサクシオン効果
Suction Effect at the Lower Sand Layer

- z' ：下部砂層上端からの深さ
- $\sigma'_{vs} = (\sigma'_c + 2c_{hc} / r_i) \cdot L - \sigma'_w H$
- σ'_w ：水の単位体積重量
- σ'_s ：下部砂層の水中単位体積重量
- c_{hc} ：上部粘土層のスカートと地盤の付着力
- c_{hs} ：下部砂層のスカートと地盤の付着力
- L ：上部粘土層の厚さ

5.3 実測値と予測値の比較・考察

Fig. 14 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す。コーン支持力が急激に増加する深さは、TP-28.7m 付近で貫入抵抗が急激に増加する深さ TP-28.3m よりもやや深い。これは調査地点がスカート中心よりもやや沖側であったため (Fig. 6 参照) であり、実測値と予測式の比較にあたっては、砂層天端を TP-28.3m として算出する。

DNV 法による貫入抵抗値と実測値の比較を Fig. 15 に示す。DNV 法では、 q_c に乗ずる係数に巾をもたせており、小さい係数による値を中間値、大きい係数による値

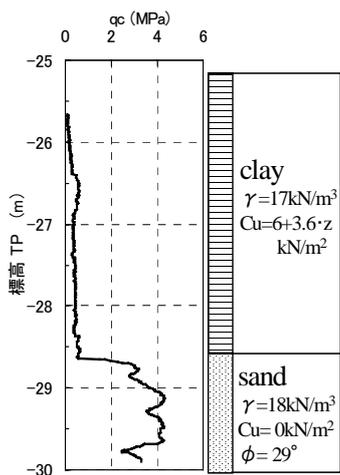


Fig. 14 地盤調査結果
Soil Profile

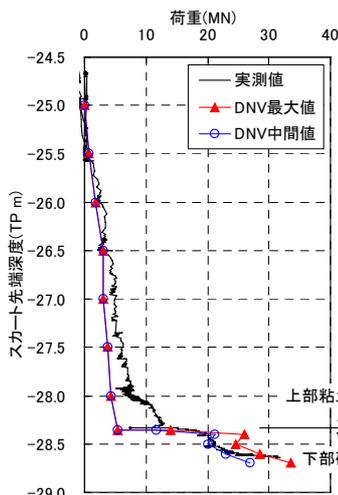


Fig. 15 実測値と DNV 法の比較
Penetration Resistance
by DNV Method

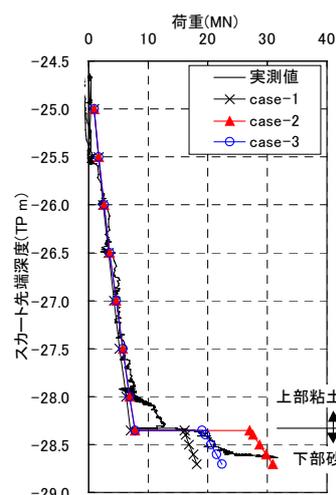


Fig. 16 実測値と支持力法の比較
Penetration Resistance
by Bearing Capacity Method

を最大値と呼んでいる。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おり、DNV法はサクシオンによる貫入低減効果も加味された経験式と考えられる。

支持力法による貫入抵抗値と実測値の比較を Fig. 16 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、以下の3ケースを行った。

- case-1・・・内周面摩擦効果なし， $H=0m$
- case-2・・・内周面摩擦効果あり， $H=0m$
- case-3・・・内周面摩擦効果あり， $H=1.5m$

ここで内周面効果ありとは、 σ_v' を(2)、(3)式で計算したケースであり、内周面効果なしとは、 $\sigma_v' = \gamma z$ としたケースである。

case-1は、下部砂層において実測値よりも小さくなり、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、内周面摩擦効果が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である。

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 TP-28.6m 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。このことよりサクシオン効果を考慮した予測式はほぼ妥当であると考えられる。

下部砂層貫入中の水頭低下量 H 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 1.5～3.0m であった。case-3の $H=1.5m$ はこの値に比べやや小さめであることから、(4)式による貫入抵抗予測式はサクシオ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

スカート基礎を栈橋先端防衝工基礎へ適用した際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通りである。

- 1) 当該支持層の傾斜は事前の予想よりも大きかったが、サクシオン力を用いた姿勢制御により精度良く据付ることができた。
- 2) 据付時の貫入荷重を完成後荷重よりも大きくすることで、完成後の沈下を抑制できることが明らかになった。
- 3) サクシオンを作用させることで、二層地盤における下部砂層の貫入抵抗が低減することが明らかになった。
- 4) 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。
- 5) 内周面摩擦効果およびサクシオン効果を考慮した支持力法による予測値は、実測値とほぼ対応するものの、サクシオン効果を過大に評価する可能性がある。

参考文献

- 1) 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/ -44, pp.21-34, 1998.9
- 2) DET NORSKE VERITAS: RULES FOR THE DESIGN CONSTRUCTION AND INSPECTION OF OFFSHORE STRUCTURES, 1977 (REPRINT 1981)
- 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), 第56回土木学会第56回年次学術講演会, 2001.10.