

スカート基礎の防衝工への適用

伊藤政人¹・増井直樹²・崎本純治³・長尾均⁴

¹正会員 (株) 大林組技術研究所土木基礎研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²正会員 工修 (株) 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 品川インターシティ B 棟)

³正会員 工修 (株) 大林組技術研究所土木基礎研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

⁴正会員 工修 (株) 大林組岬町工事事務所 (〒599-0312 大阪府泉南郡岬町多奈川東畑地内)

スカート基礎は、底版より下方に伸びたコンクリート壁（スカート）をサクシオンにより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 2000 年 9 月、大阪府岬町にて関西空港第 2 期埋立て用土砂積み出し栈橋の先端防衝工の基礎に適用した。本論文では、最初にスカート基礎の概要について述べ、次に防衝工の据付時および完成後の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。

キーワード：スカート基礎，サクシオン，防衝工，姿勢制御，貫入抵抗

1. はじめに

スカート基礎は、底版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。

このスカート基礎を大阪府岬町にて関西空港第 2 期埋立て用土砂積み出し栈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、まずスカート基礎の概要について述べ、次に防衝工据付時および完成後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。

に GBS（Gravity Base Structure）と呼ばれ、「主として重力によって安定を確保する基礎を有する大型の海洋コンクリート構造物」である（図-1）。スカートは、この GBS の最も重要な特徴の一つであり、底版より下方に伸びたコンクリートもしくは鋼の筒状の壁をスカートと呼ぶ。スカートの目的を表-1 に示す。表層地盤が軟弱な場合は、長いスカートを海底地盤中に貫入し安定性を確保する。この

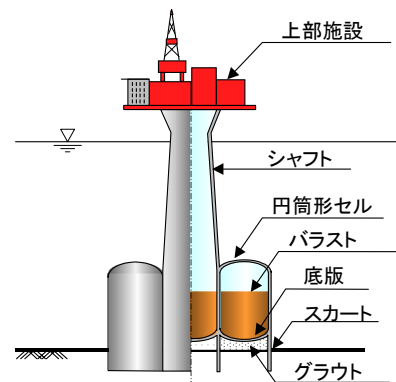


図-1 GBS の概念図

表-1 スカートの目的¹⁾

項 目	説 明
支持力の確保	表層地盤が軟弱な場合、所定の支持力が得られる土層までスカートを貫入させる。
サクシオンによる引抜き抵抗	地震力などの動的な水平もしくは引抜き荷重が作用したとき、スカート内にサクシオンを生じ、引抜き抵抗が得られる。
海底地盤の不陸の吸収	海底地盤の整地を行うことなく構造物を据え付けることから、地盤の凹凸が直接底版に接触しないようにする。
海底地盤と底版との間隙のグラウト用シール	底版と海底地盤に生じる隙間はモルタル等で充填する。
洗掘防護	波、流れにより海底地盤が洗掘されても支持地盤に影響を与えない。

2. スカート基礎の概要

(1) スカートの目的

1960 年代北海の海底油田が発見され、この油田開発用にコンクリート製プラットフォームの建設が行われ、今日までに約 30 基が建設されている。

¹⁾これらのコンクリート製プラットフォームは一般

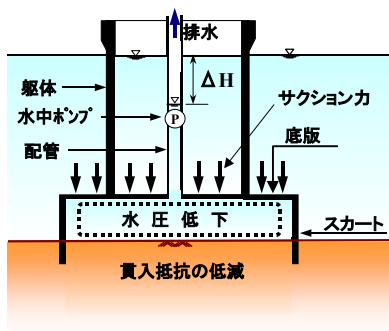


図-2 スカート基礎のサクシジョン効果

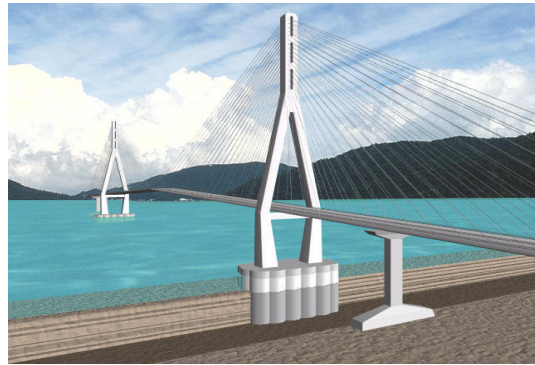


図-3 スカート基礎を用いた長大橋

基礎形式をスカート基礎と呼んでいる。

(2) スカーツの貫入とサクシジョン

スカートを海底地盤に貫入させるための荷重は、自重、GBSセル内のバラスト重量およびサクシジョン力である。ここでいうサクシジョンとは、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である（図-2）。

サクシジ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（サクシジョン力）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ジョン力が貫入力として働く。また、サクシジョ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力が発生し、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²⁾。このようにスカート基礎においてサクシジ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2つの効果が得られ、これをサクシジョン効果と呼んでいる。

(3) スカート基礎の展開

スカート基礎は、コンクリートプラットフォーム、テンションレグプラットフォームの基礎、また防波堤などの港湾構造物にも用いられてきている。このスカート基礎を海上橋梁の基礎（図-3）として展開させるべく、これまでこの基礎に関する研究を行っており³⁾、今回は、実海域における実証工事を行ったので以下に報告する。

3. 防衛工の工事概要

今回スカート基礎を適用した防衛工の構造図を図-4に示す。防衛工は、関西空港第2期埋立て用土砂の積み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。

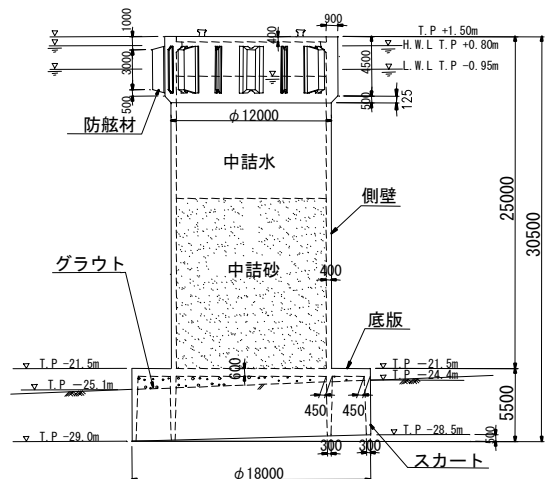


図-4 防衛工構造図



図-5 施工位置

防衛工は、すべて鉄筋コンクリート製（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、底版接合部で450mmとなっている。貫入時の姿勢制御のためにサクシジ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-8参照）。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

とした。

施工場所を図-5 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（写真-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図-6 に示す。F C 船により据付け位置まで吊曳航した後、位置決め・吊降し・据付作業を行った。その後サククションによる傾斜修正作業を行い、底版下のグラウト、中詰め砂の投入により完成に至った。



写真-1 スカート吊曳航状況

4. 計測結果

(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表-2 に、計測器配置図を図-7 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した。

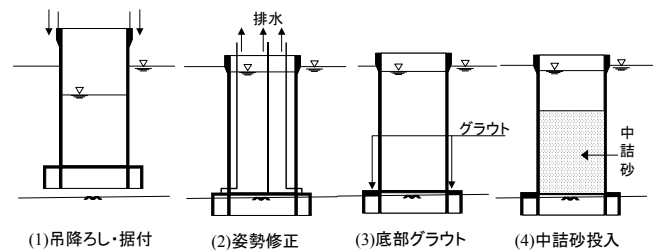


図-6 施工手順

表-2 計測項目および計器名

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

(2) 据付時および姿勢修正時

図-8 にスカート断面図を示し、図-9 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山方向にそれぞれ約 1° となった。そこで F C 船で防衛工の沖側を吊りながら、栈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、サククション力を栈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 F C 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。

図-10 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

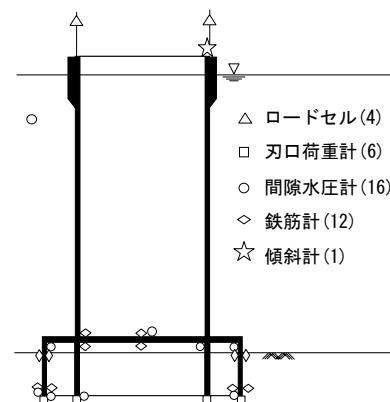


図-7 計測器配置図

いよう管理した。サクシオン力を栈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。

図-11 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+バラスト水重量-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。

図-12 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、沖側に比べ栈橋側は 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。

栈橋側の隔室には、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 ΔH 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、栈橋側の地盤反力度は支持層に貫入してから

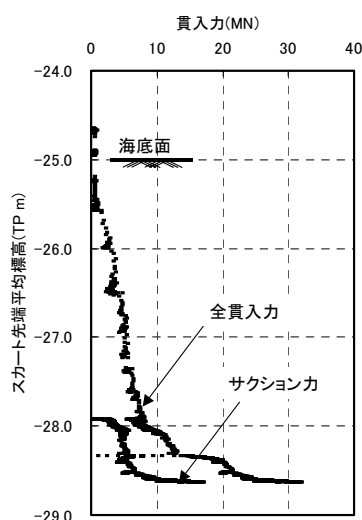


図-11 貫入力-スカート先端平均標高

急激に増加するものの、 ΔH が 4m ないし 5m となっ

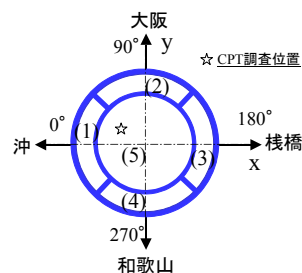


図-8 スカート断面図

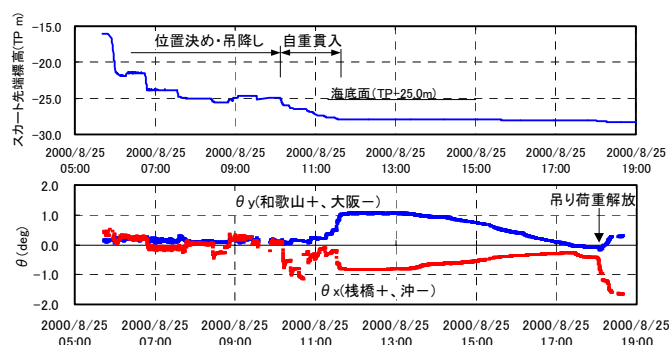


図-9 経時変化図 (FC 船による据付時)

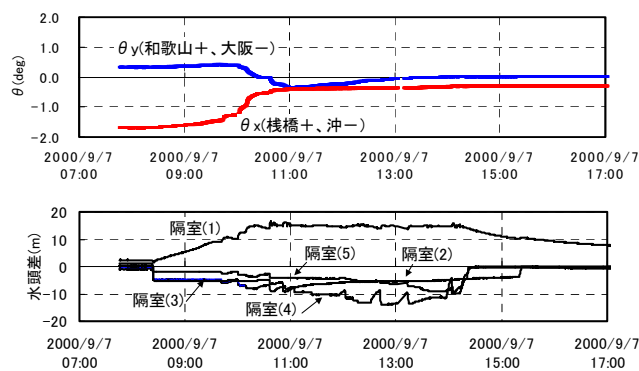


図-10 経時変化図 (サクシオンによる姿勢修正時)

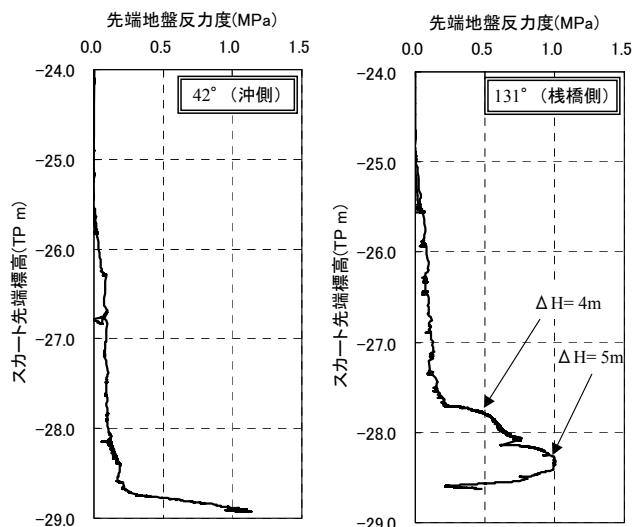


図-12 先端地盤反力-スカート先端標高

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。(図-14)

(3) 中詰め砂投入時

図-13に貫入時から砂投入時までの荷重-沈下曲線(図-11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。

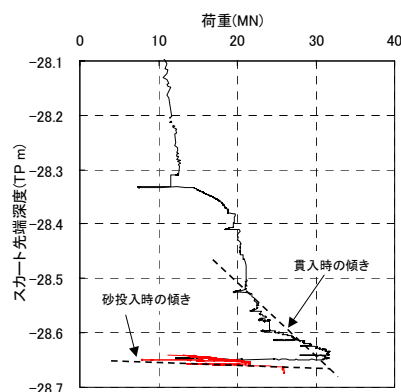


図-13 貫入時および砂投入時の荷重-沈下曲線

表-3 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
 $\sigma'_{vin}, \sigma'_{vout}$: 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

5. 貫入抵抗の実測値と予測値の比較

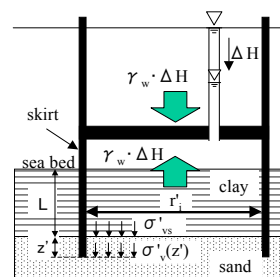
(1) 貫入抵抗予測式

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⁴⁾(以下 DNV 法)と支持力公式に基づく方法²⁾(以下支持力法)があり、それぞれの算定式を表-3に示す。

DNV 法は、コーン貫入抵抗値(q_c)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。

(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)と貫入力に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)を考慮することが文献²⁾に提案されている。今回



z' : 下部砂層上端からの深さ
 $\sigma'_{vs} = (\gamma'_s + 2\gamma_w/r_i) \cdot L - \gamma_w \Delta H$
 γ_w : 水の単位体積重量
 γ'_s : 下部砂層の水中心単位体積重量
 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-14 二層地盤におけるサクシオン効果

のような二層地盤(上部粘土層・下部砂層)においても、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-14)。スカート先端が下部砂層にあるとき、このサクシオン効果を考慮した σ'_v の算定式を文献²⁾の方法を用いて誘導すると以下ようになる。

$$\sigma'_v(z') = (B'/A) \{ \exp(A \cdot z') - 1 \} + \sigma'_{vs} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma'_v(z')$: 下部砂層における鉛直有効応力

$$A = 2\mu K_{in}/r_i, \quad B' = \gamma'_s + A \cdot \sigma'_{vs}$$

他の記号は図-14 参照

(3) 実測値と予測値の比較・考察

図-15にコーン支持力分布および各層の室内

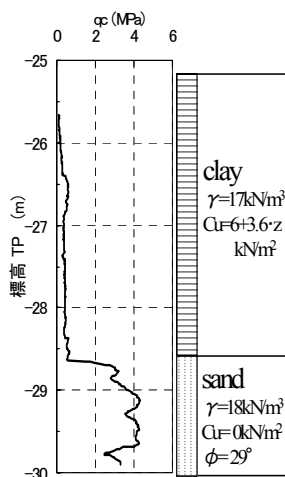


図-15 地盤調査結果

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-16（左）に示す。貫入抵抗の実測値とは、防衛工重量＋バラスト水重量－浮力－FC 船吊り荷重＋サクシオン力である。なお予測値は、貫入抵抗の実測値が急増する深さ（=TP-28.3m）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-16（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 $\Delta H=0m$ ，case-2：内周面摩擦効果あり $\Delta H=0m$ ，case-3：内周面摩擦効果あり $\Delta H=1.5m$ の3ケースを行った。ここで内周面摩擦効果なしとは、 $\sigma_v' = \gamma' z$ 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 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。このことより予測式にサクシオン効果を考慮することは妥当であると考えられる。

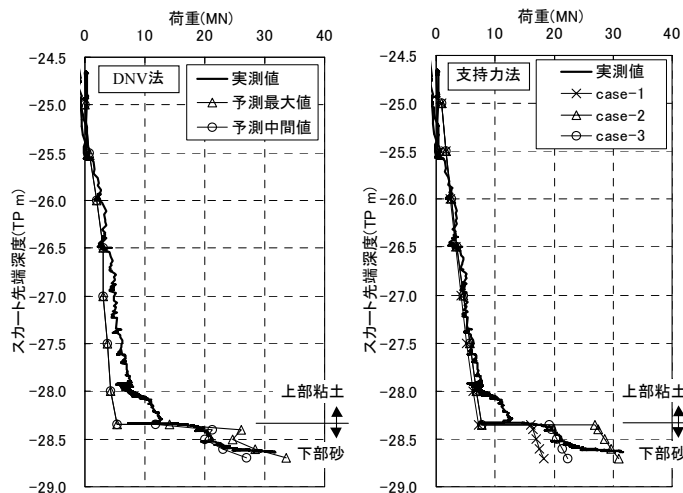


図-16 貫入抵抗の実測値と予測式による値の比較

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⁵⁾、全隔室平均で 1.5～3.0m であった。case-3 の $\Delta H=1.5m$ はこの値に比べやや小さいことから、式(1)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り、さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

6. まとめ

スカート基礎の概要を紹介するとともに、同基礎を栈橋先端防衛工基礎へ適用した際の据付時および完成後の計測結果を示した。結果をまとめ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ることにより精度良く据付ることができ、実海域におけるスカート基礎の施工性を実証することができた。
- 2) 設計法確立を目的にした種々の計測により、サクシオン効果を考慮した貫入抵抗予測式の妥当性を確認できた。

参考文献

- 1) 増井直樹：北海油田プラットフォーム基礎（GBS）の施工，基礎工，Vol.26, No.10，PP86-89，1998.10
- 2) 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.21-34，1998.9
- 3) 伊藤政人，崎本純治，上野孝之，後藤英夫，増井直樹，太田良晴：新形式海洋構造物基礎の開発，大林組技術研究所報，No.60，PP67-72，2000.1
- 4) DET NORSKE VERITAS：RULES FOR THE DESIGN CONSTRUCTION AND INSPECTION OF OFFSHORE STRUCTURES, 1977(REPRINT1981)
- 5) 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衛工の施工（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，2001.10.