

サクシヨ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報告 —

THE DEVELOPMENT OF THE SUCTION FOUNDATION
(EXECUTION REPORT OF PENETRATION ON THE FIELD EXPERIMENT)

高橋邦夫¹・池田哲郎²・山根隆行³・前 健治⁴・北澤壮介⁵・柿沼政春⁶

Kunio TAKAHASHI, Tetsuro IKEDA, Takayuki YAMANE, Kenji MAE,
Sousuke KITAZAWA and Masaharu KAKINUMA

¹運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 (〒951-8131 新潟市白山浦1-332)

²運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 (〒951-8131 新潟市白山浦1-332)

³正会員 運輸省第一港湾建設局 新潟港湾空港工事事務所 (〒951-8011 新潟市入船町4-3378)

⁴運輸省第一港湾建設局 新潟港湾空港工事事務所直江津工場 (〒942-0013 上越市大字黒井2230-1)

⁵正会員 (財)沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 千代田区隼町3-16)

⁶ (財)沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 千代田区隼町3-16)

Harbor structures with suction foundations bring sharp cost reductions over conventional gravity harbor structures consisting of foundation mounds and caissons thanks to their superior structural properties and constructibility.

This report presents an outline of the suction foundation structure, a description of a corroborative field test, and a summary of the results of the primary analysis of measurement data obtained during suction foundation penetration.

Key Words : Suction foundation, suction force, breakwater, drainage

1. はじめに

近年, 港湾構造物の整備環境は, 外港展開に伴う大水深化, 構造物の大型化, 波浪・地盤条件の悪化等により厳しくなり, 建設コストも増大する傾向にある。このような状況から, 運輸省第一港湾建設局では, 新たな技術開発として「大型港湾施設の建設費の縮減」を図るべく, サクシヨン基礎構造物の開発に取り組んでいる。

サクシヨン基礎は, 基礎マウンド, ケーソンから構成される従来型の重力式港湾構造物と比べ, その構造特性, 施工性等により, 大きなコスト縮減を図れる。施工事例としては, 北海における石油掘削用プラットフォームの基礎等はあるが, 我が国において港湾構造物として施工した事例は, 1960年に神戸港で適用したわずか1件であり, 具体的な設計・施工法の確立がなされていないのが現状である。

サクシヨン基礎構造物の開発は, 運輸省港湾技術研究所における理論検討に基づき^{1) 2) 3)}, また, 「サクシヨン基礎構造物検討委員会」を組織して検討を進

めてきた。さらに, 設計法・施工法を検証するため, 平成11年6月, 直江津港作業基地防波堤の一部として実証試験堤を据付け, 現地計測を実施しているところである。

本報告は, サクシヨン基礎構造物の概要, 現地実証試験の内容およびサクシヨン基礎沈設時に取得した計測データの一次解析結果について取りまとめたものである。

2. サクシヨン基礎の概要

サクシヨン基礎とは, 筒状の構造物の開口部を下にして海底地盤上に設置し, ポンプにより内部水を強制排水することで, 構造物内外に発生する水圧差 (=サクシヨン力) を押込力として利用し, 海底地盤中に根入れを行う基礎構造物である。サクシヨン基礎の沈設モデルを図-1 に示す。

(1) 主な特徴

従来の防波堤, 岸壁等の港湾構造物では, ケーソ

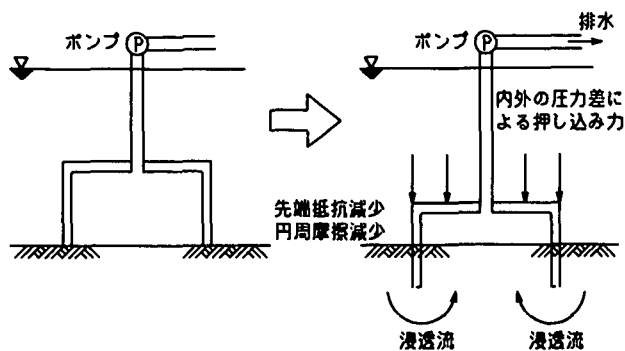


図-1 サクション基礎の沈設モデル

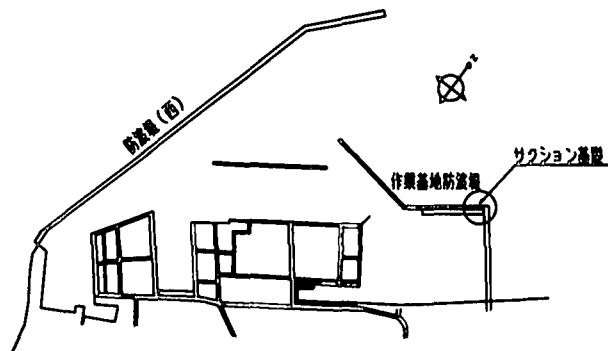


図-2 現地実証試験位置

ンを用いた重力式構造物が広く一般に用いられており、こうした構造物は基本的にその重量によって滑動抵抗、転倒抵抗等の安定性を確保するものである。

これに対し、サクション基礎は、基礎部分を海底地盤中に根入れすることにより、滑動、転倒、引き抜き等に対する抵抗力が著しく増大し、安定性が高まるものである。本基礎の主な特徴は、以下のとおりである。

a) 基礎マウンド、地盤改良が不要

海底地盤に基礎部を直接根入れするため、捨石基礎マウンドや地盤改良を必要としない。

b) 根入れによる安定性増大

重力式港湾構造物が基礎マウンドとケーソン底部の摩擦力のみで滑動に抵抗するのにに対し、サクション基礎は基礎部が根入れされていることから、基礎部底面の地盤の摩擦力に加え、根入れ部の前面土圧が抵抗力となり、安定性が高い。また、転倒に対しても、基礎の引き抜き抵抗力が寄与するため、安定性が高い。

c) 速い施工速度

基礎マウンドや地盤改良を要しないため、工期を短縮できる。また、基礎マウンド表面均し等の潜水作業が大幅に少なくなるため、施工の安全性が向上する。

d) 特別な施工機械、施工手順が不要

基本的に、サクション力を与える排水ポンプ、据付調整のための起重機船があればよく、基礎内部に人や機械が入り、海底地盤の掘削等の作業を行う必要がない。

このような特徴を有したサクション基礎は、従来の重力式構造物に比べ、地盤条件、海象条件により異なるものの、概ね10%以上のコスト縮減効果があるものと考えられる。

(2) 適用構造物

サクション基礎は、以上のようなメリットがあることから、防波堤、護岸および岸壁（耐震強化岸壁

を含む）等の港湾構造物の建設コストの縮減、工期短縮が可能と考えられる。具体的な適用構造物としては、次のようなものが考えられる。

- a) 防波堤 ; マウンドレス防波堤等
- b) 岸壁、護岸; 耐震強化岸壁等
- c) 係留ブイ ; 大型浮体構造物係留基礎等
- d) 根固め工 ; 洗掘防止工等

3. 現地実証試験の概要

サクション基礎に関する設計・施工上の各種課題については未だ解明されていないものもあり、数値解析や模型実験では把握できない項目について、現地実証試験により、課題を解決していく必要がある。

こうしたことから、運輸省第一港湾建設局管内の直江津港作業基地防波堤において、サクション基礎を用いた防波堤を試験施工し、各種計測データを取得・解析するとともに施工手順を確認し、これらにより設計・施工法の妥当性につき検討を行うこととした。現地実証試験位置を図-2 に示す。

(1) 試験堤の設計

本試験堤の構造形式としては、将来、上部ケーソンを近接する第3東防波堤に移設転用する計画となっているため、サクション基礎と上部ケーソンを各々個別に製作し、設置する分離型構造を採用した。また、サクション基礎の材質は、重量、剛性、側壁厚等の相違による施工性、安定性、経済性等について比較検討するため、RC製および鋼製とした。RC製基礎の諸元は、外寸直径21.9m（内寸20.8m）、側壁厚55cm、高さ8.0mの円筒形で、重量約13,500kNである。鋼製基礎の諸元は、外寸直径21.9m、側壁厚22mm、高さ8.0mで、重量約7,500kNである。

設計手法は、ケーソン式防波堤の設計に用いられる静的解析手法で構造物全体の基本断面を設定し、設定された断面について堤体の変形特性、安定性を弾性解析手法で照査した。基本断面設計に用いた設計条件を表-1 に、サクション基礎に働く外力モデル、

表-1 設計条件

項 目		
1. 潮 位	H.W.L	D.L. +0.50m
	L.W.L	D.L. ±0.00m
2. 水 深		D.L. -10.00m
3. 海底勾配		1/120
4. 波 浪 入 射 角		0°
	有義波高 $H_{1/3}$	5.7m
	最大波高 H_{max}	8.257m
	周 期 $T_{1/3}$	12.1sec
5. 天 端 高		7.5m
6. 土質条件	砂質土層	
	-10.0 ~ -10.6m	$\gamma' = 1.00 \text{tf/m}^3$ $\phi = 25^\circ$
	-10.6 ~ -15.0m	粘性土層 $\gamma' = 0.65 \text{tf/m}^3$ $C = 5.0 \text{tf/m}^2$
	砂質土層	
	-15.0 ~ -20.4m	$\gamma' = 1.00 \text{tf/m}^3$ $\phi = 35^\circ$

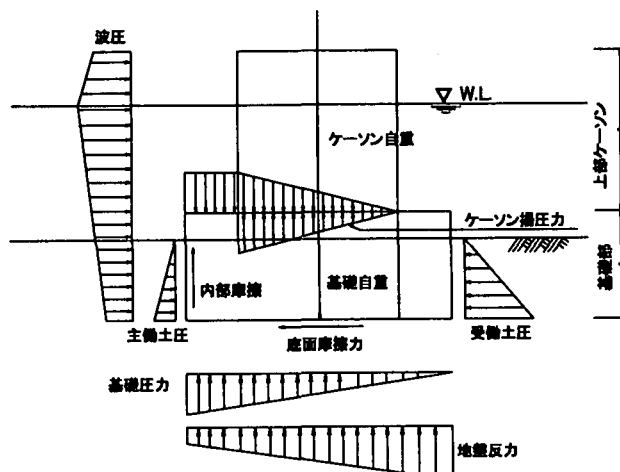


図-3 サクション基礎に働く外力

平面配置および構造図を図-3～6 に示す。

サクション基礎頂版部には、滑動抵抗の不足分を受け持つセン断キーを設けている。また、沈設時に基礎内外の水位差を測定するための施工管理用鋼管（3本）、エア抜きバルブ（4箇所）およびサンドポンプバルブ（3箇所）を取り付けている。なお、RC製基礎先端は、沈設時の先端抵抗を低減させるため、内側に勾配をつけた刃先形状としている。

(2) 沈設施工に関する検討

基礎を沈設するために必要なサクション力は、「押込力（＝サクション力＋基礎自重＋バラスト荷重）＞貫入抵抗（＝周面摩擦抵抗＋先端抵抗）」の関係により求められる。

過剰なサクション力が基礎内部に作用した場合には、ヒービング、ボイリング、パイピングが発生し、基礎の過大な傾斜を誘発する危険性がある。また、

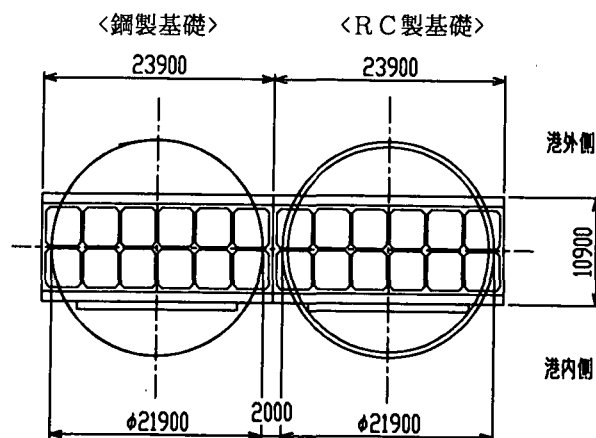


図-4 平面配置図

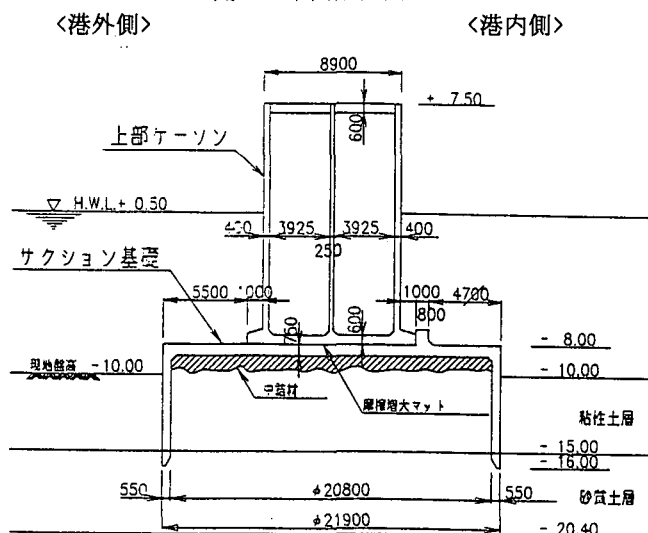


図-5 サクション基礎断面図（RC製）

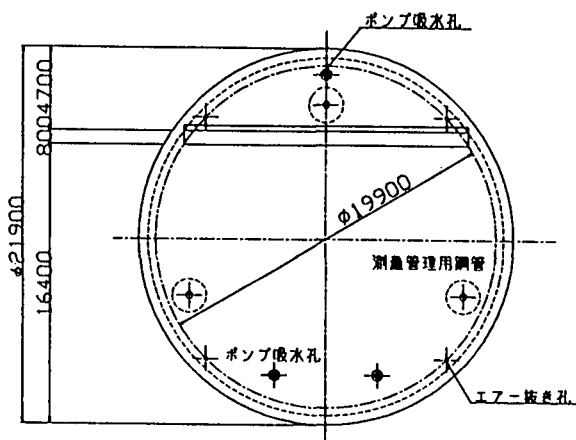


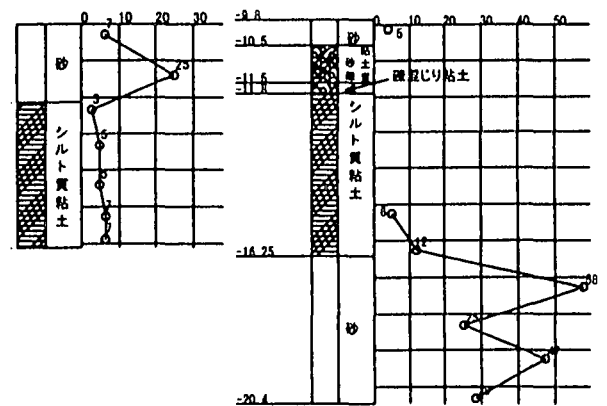
図-6 サクション基礎平面図（RC製）

基礎内部の土が体積膨張して閉塞し、基礎の高止まりや沈設が不可能になることも考えられる。こうしたことから、ヒービング等による基礎内部の地盤破壊に対する検討を行い、根入れ深度毎に上限となるサクション力を設定した。

なお、RC製基礎については、サクション力による沈設を確実に行うため、自沈貫入量が1.0m程度確保されるように、水中重量約4,000kNのコンクリート

計測位置	使用計器	数量	沈設	波浪
上部ケーソン	波圧計	4(1)		○
	揚圧力計	3(0)		○
	鉄筋計	2(1)		○
	長周期速度計	1		○
サクシヨン基礎	波圧計	2	○	○
	鉄筋計	32	○	○
	土圧計	15	○	○
	間隙水圧計	13	○	○
	周面摩擦計	2(0)	○	○
	刃口荷重計	2(0)	○	○
	傾斜計	2	○	○
	超音波式波高計	3	○	
	ポンプ流量計	3	○	
	長周期速度計	1	○	○
	サーボ式加速度計	2	○	○
起重機船	荷重計	4	○	
	ワイヤー速度	1	○	
	船体動揺	1	○	
周辺地盤	埋設多段式傾斜計	5	○	○
	間隙水圧計	1	○	○
	現地測量（洗掘）	—		○
海象	超音波式海象計	—	○	○

(鋼製基礎)



により、RC製基礎円周上に、600mm×350mm程度と思われる障害物（石）が認められたが、沈設への影響はないと判断し、これらについて特段の処置を行わないこととした。

```

graph TD
    A[サクション力作用時の土質パラメータの設定  
単位体積重量  $\gamma$ , 内部摩擦角  $\phi$ , 摩擦係数  $\mu$   
土圧係数  $K_{in}$   $K_{out}$ , 付着力係数  $\alpha c$ ] --> B[サクション力の設定  $P_s$ ]
    B --> C[押込力の計算  $F_d$ ]
    B --> D[動水勾配の計算  $i$ ]
    C --> E[" $F_d = P_s \cdot A_s + P_t \cdot A_t + W' + V'$   
 $P_s \cdot A_s$ : 床版のサクション荷重  
 $P_t \cdot A_t$ : 先端のサクション荷重  
 $W'$ : 基礎自重  
 $V'$ :  $\Lambda$ ラスト自重"]
    D --> F[有効上載圧の計算  $\sigma_v'$ ]
    F --> G[貫入抵抗力  $F_r$   
 $F_r = P_{fo} \cdot A_{fo} + P_{fi} \cdot A_{fi} + Q_t \cdot A_t$   
-----  
 $P_{fo} \cdot A_{fo}$ : 外周摩擦抵抗力  
 $P_{fi} \cdot A_{fi}$ : 内周摩擦抵抗力  
 $Q_t \cdot A_t$ : 壁面先端抵抗力  
( $P_f = \mu \cdot K \cdot \sigma_v' + \alpha c \cdot C$ )]
    E --> H{ $F_d > F_r$ }
    H -- NO --> I[必要サクション力の決定]
    H -- YES --> J[上限のサクション力の計算  $P_r$   
ポイリング・ヒーピングの検討]
    J --> K{ $P_t > P_s$ }
    K -- NO --> L[" $\Lambda$ ラスト荷重の変更  $V'$ "]
    L --> E
    K -- YES --> I

```

ブロックを頂版上に載荷した。検討フローを図-7に示す。

前述の設計・施工法の検証を行うため、各々の試験堤に各種計測装置を取り付け、沈設時と波浪時に所要のデータを取得することとした。

沈設時においては、サクシヨン力、貫入抵抗力、部材発生応力等を計測することにより沈設方法を検証し、貫入速度、傾斜等の挙動観測により施工精度を確認した。また、波浪時においては、波圧と堤体挙動、作用土圧、地盤反力等を計測して設計法の妥当性を検証するとともに、基礎周辺の洗掘状況、堤体の長期的挙動を観測し、安定性の確認を行うこととしている。

沈設時および波浪時の計測項目を表-2 に示す。

(1) 沈設方法

沈設試験に際し、沈設位置直近において4本の追加ボーリング調査を実施したところ、海底面表層に層厚2m、N値最大25といった比較的固い砂質土層が確認された(図-8)。また、潜水土による突き棒調査

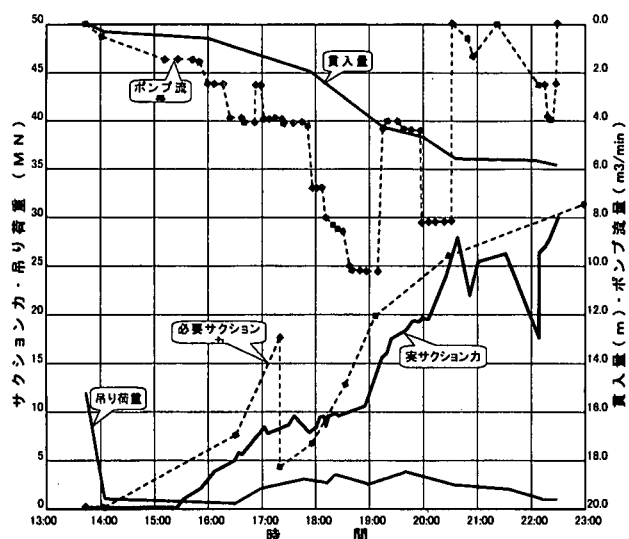


図-9 サクション基礎の沈設結果沈設管理図

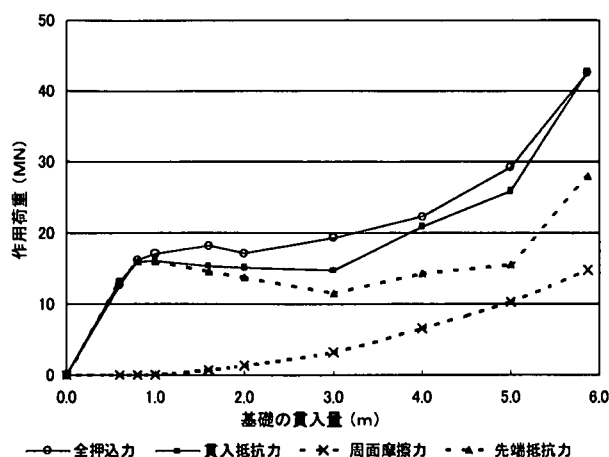


図-10 押込力と貫入抵抗の実測値

5,000kN程度の吊上げ力をかけて姿勢制御を行った。

(2) RC製サクション基礎沈設結果

自沈終了後（貫入量0.49m）、排水量0.8m³/minから徐々に増加させ沈設を行った。貫入量1.2m付近において40cm程度の傾斜が発生したため、起重機船により約3,000kNの吊上げ力をかけて調整したところ、傾斜は修正され、それ以降はほとんど傾斜は生じなかった。このことから、沈設初期の傾斜はわずかな吊上げ力によって修正調整することが可能であり、沈設がある程度進行した段階では、周辺地盤からの作用土圧により顕著な傾斜は発生しないものと考えられる。

粘性土層（貫入量2.0m）になると、貫入速度が大幅に増加し沈設がスムーズに行えたことから、3台のポンプにより排水量を10.4m³/minまで増加させた。その後、貫入量が5.50m付近になるとサクション力が増加しても貫入量が少なくなってきたため、基礎頂版の鉄筋応力とサクション力を管理しながら沈設を続けた。沈設結果を図-9に示す。

最終的に貫入量5.88mで沈設を終了したが、この時に作用した最大サクション力は29,500kN、貫入に要した時間は約10時間であった。沈設精度は、基礎中心の偏芯距離（許容値±20cm）が法線方向15cm、直角方向7cm、天端の傾斜（許容値±20cm、1/100）は最大12cmであり、ほぼ目標通りの沈設結果を得られた。また、沈設完了後の基礎内部の地盤の盛上がり高は、平均0.34mであり、これはRC製基礎の側壁（t=55cm）が貫入した部分の土量とほぼ等しく、ヒーピング等の発生は無かったものと考えられる。

(3) 鋼製サクション基礎沈設結果

鋼製基礎の自沈貫入量は1.03mと大きくなった。自沈後のサクション力による沈設では、貫入量1.30m付近において60cm程度の比較的大きな傾斜が発生した。これらの理由としては、鋼製基礎はRC製基礎に比べて先端抵抗が小さいため貫入しやすいものの、自重が軽く剛性が低いことから傾斜等変位が生

じやすいと考えられる。基礎の傾斜は、RC製基礎と同様に、起重機船による吊上げで修正を行った。

沈設終了時の最終貫入量は5.80mであり、この時に作用した最大サクション力は17,800kN、貫入に要した時間は約6時間であった。沈設精度は、基礎の偏芯距離が法線方向6cm、法線直角方向1cm、天端の傾斜は13cmであり、ほぼ目標通りの沈設結果を得られた。また、沈設完了後の基礎内部の地盤には、盛上がりは認められなかった。

なお、RC製、鋼製基礎ともに、沈設完了後に海底面と基礎内部との間隙にモルタルを充填した後、上部ケーソンを据え付けた。

5. 沈設時計測データの解析

(1) 計測データの整理

RC製基礎の押込力（サクション力＋基礎自重＋上載荷重－吊り荷重）と貫入抵抗（周面摩擦力＋先端抵抗力）の実測値を図-10に示す。

押込力は、基礎に取り付けた水位管理塔（測量管）の管内水位と基礎面積から算出し、起重機船の吊り荷重を考慮して修正した。また、抵抗力となる周面摩擦力は、周面摩擦計の実測値に基礎外側および内側面積を乗じて算出し、先端抵抗力は刃口荷重計の実測値に側壁断面積を乗じて算出した。

貫入抵抗力のうち、根入れの浅い部分ではほとんどが先端抵抗力で、最終深度においても約65%を先端抵抗力が占めている。また、周面摩擦力は、表層の砂層で非常に小さく、粘性土層で深で大きくなっており、地盤の土質条件とよく一致している。

(2) サクション力理論値の検証

RC製基礎の実測結果から得られたサクション力に基づき、沈設時のサクション理論に影響する各パラメータについて、比較・検証した。

実証試験の計画に用いていた理論値と実測値を比較検証した結果、貫入抵抗力のうち、粘性土層

の周面摩擦力の値に差異が大きく、実測値に対して解析値が約1.4倍と乖離した。乖離の原因は、粘性土地盤の粘着力と壁面摩擦力の比である付着力係数(α_c)の差であり、基礎側壁内側で0.17、側壁外側で0.33であり、平均で0.25となっていた。当初設定していた付着力係数 $\alpha_c=0.60$ は、既往事例(神戸港第5防波堤、 $t=150\text{mm}$)を基に設定したものであるが、基礎壁厚の違いや地盤強度により、付着力係数は変化するものと考えられる。

RC製基礎においては周面摩擦力の実測値は、基礎の内外で大きく異なったが、先端抵抗力軽減のために設けた基礎先端の刃口形状により、基礎外側よりも内側の土が乱されたものと考えられる。

(3) 今後の検討内容

今後の検討項目として、沈設時については次の内容を実施する。

- ・間隙水圧計の実測値を用いた浸透解析と沈設機構の検証
- ・RC製基礎と異なる側壁部材厚、材質が貫入抵抗力に及ぼす影響(鋼製基礎)
- ・沈設時に生じる部材応力

また、現在取得中の波浪時観測データにより、波圧と堤体挙動、部材応力等を確認し、サクシオン基礎を用いた防波堤について、設計法の妥当性を検証する。

6. まとめ

直江津港における現地実証試験の結果、次のこと

が確認された。

- ・自沈貫入量が少なくても、水位観測塔及びポンプ排水量を管理することで、顕著な水道は発生せず、N値25～30程度の比較的固い砂質土層でも沈設可能である。
- ・沈設初期に生じた基礎の傾斜は、起重機船の吊上げ力により容易に修正できる。
- ・基礎間の離隔を2mとしたが、先行して施工したRC基礎への影響は確認されなかった。
- ・基礎壁厚や刃口形状、地盤強度により、粘性土地盤の付着力係数は変化する。

謝辞：九州大学善教授を委員長とする「サクシオン基礎構造開発検討調査委員会」(財団法人 沿岸開発技術研究センター)の各委員、運輸省本局関係課、港湾技術研究所並びに多数の関係者の方々に、ご指導、ご協力頂きましたことを深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 善功企：サクシオン基礎の現状と開発，平成9年度港湾技術研究所特別講演 一日港研 in 下関 講演集，pp. 35-58，1997.
- 2) 山崎浩之，善功企，前田健一，佐藤篤志：防波堤基礎としてのサクシオン基礎の安定性に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(A)，Vol. 52，pp. 462-463，1997.
- 3) 善功企，山崎浩之，前田健一：サクシオンによる基礎の海底地盤への沈設に関する事例解析，土木学会論文集Ⅲ，No. 603/Ⅲ-44，pp. 21-34，1998.