

# サクシヨン基礎構造物の実証試験結果について

## ABOUT THE RESULT OF THE FIELD TEST FOR SUCTION FOUNDATION STRUCTURE

高橋良正<sup>1</sup>・古池清一<sup>2</sup>・白石哲也<sup>3</sup>・足立一美<sup>4</sup>

Yoshimasa TAKAHASHI, Sheiichi KOIKE, Tetsuya SHIRAISHI, Kazumi ADACHI

<sup>1</sup>正会員 工修 国土交通省 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟市入船4-3778)

<sup>2</sup>国土交通省 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟市入船4-3778)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟市入船4-3778)

<sup>4</sup>正会員 工修 国土交通省 新潟港湾空港工事事務所 (〒951-8011 新潟市入船4-3778)

Aiming at reducing construction costs of harbor and port facilities, we developed the suction foundation structure. The suction foundation structure is the structure which has cylinder-shaped foundation using water pressure gap between inside and outside of the foundation to sink the foundation.

This report shows the result of the field test and the examination of design method for the suction foundation structure.

*key words* : suction foundation, suction force, breakwater, drainage

### 1. はじめに

近年, 公共工事の建設コスト縮減が要請される一方で, 港湾構造物の建設においては外港展開や大型船舶への対応のため, 設置場所の大水深化, 施設の大型化が求められている. このような状況から, 国土交通省北陸地方整備局では, 新たな技術開発により大型港湾施設の建設費縮減を図るべく, サクシヨン基礎構造物の開発に取り組んできた.

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構造物に比べ, その構造特性, 施工性等により, コスト縮減を図るものである.

しかし, 我が国のサクシヨン基礎構造物の施工事例としては, 昭和35年の神戸港第5防波堤での適用例が1件あるのみで, 具体的な設計・施工法が確立されていない状況であった.

このため, 北陸地方整備局では, サクシヨン基礎構造物の設計・施工法の確立を目的として, 平成11年6月に, 新潟県直江津港の作業基地防波堤の一部として, サクシヨン基礎による実証試験堤を設置し, 現地計測を実施した.

本報告は, サクシヨン基礎構造物の開発に関する, 理論解析と現地実証試験による検証結果を報告するものである.

### 2. サクシヨン基礎構造物の特徴

サクシヨン基礎構造物とは, 筒状の構造物の開口部を下に設けた構造形式で, これを海底地盤上に設置し, ポンプにより基礎内部の水を強制排水することで, 基礎内外に発生する水圧差により生じる力(サクシヨン力)を基礎の押込力として利用し, 海底地盤中に根入れを行うものである.

従来の防波堤, 岸壁・護岸に一般的に採用されている重力式の構造物は, その重量により滑動・転倒に対して抵抗しているが, サクシヨン基礎構造物は基礎部を根入れすることにより以下の特徴を有する

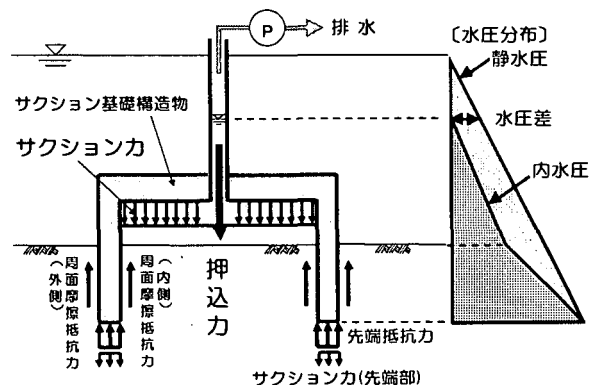


図-1 サクシヨン基礎の沈設原理

構造物である。

- ①基礎部を現地盤に根入することにより、底面の地盤の抵抗力に加え背面土圧も期待でき、滑動や転倒に対する安定性が高く断面の縮小化が図れる。
- ②海底地盤に直接基礎部を設けることにより、重力式の港湾構造物に必要な捨石基礎マウンドを必要しないことから工期短縮が図れ、また、マウンド表面の均しを行う潜水作業が不要となり施工の安全性も向上する。
- ③沈設はサクシオ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。

これらのことから、施工性を確保しつつも建設コスト縮減が期待できる。また、防波堤、岸壁・護岸以外にも、係留ブイアンカー、大型浮体構造物係留基礎、洗掘防止のための根固工等への適用も考えられる。

### 3. 現地実証試験の概要

サクシオ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のみでは、把握できない項目について、現地実証試験により解決する必要があった。

このため、平成11年度から新潟県直江津港のケーソン製作基地前面に築造する仮設の防波堤において、サクシオン基礎防波堤を設置し、現地実証試験を行い、サクシオン基礎の沈設時及び据付後の波浪時の各種データを取得し、事前の検討による理論解析との検証を行った。なお、構造タイプとしては、基礎部のみを根入れした後に堤体上部を据え付ける「分離型」と、基礎と堤体上部を一体構造として根

入れする「一体型」があげられるが、現地実証試験では、図-2、3に示す分離型を採用し、基礎部は材質の異なる「RC製」及び「鋼製」の2タイプを採用し各1函ずつ計2函設置した。

### 4. 検証結果

#### (1) 沈設時サクシオン力の検証

##### a) 沈設に必要な押込力（所要サクシオン力）

サクシオン基礎の沈設は基礎内外の水圧差を利用して行うものであり、押込力（ $F_D$ ）が根入れに対する貫入抵抗力（ $F_R$ ）を上回ることにより沈設される。図-4に沈設における鉛直方向の力のつり合いを模式的に示す。

基礎の押込力は基礎の重量とサクシオン圧の和であり、

$$F_D = p_s \cdot A_s + p_i \cdot A_i + W' + Q \quad (1)$$

となる。ここに、 $F_D$ ：基礎の押込力(kN)、 $p_s$ ：基礎床版部のサクシオン圧(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_i$ ：基礎先端部のサクシオン圧(kN/m<sup>2</sup>)、 $A_s$ ：基礎床版の内面積(m<sup>2</sup>)、 $A_i$ ：基礎の側壁先端部の断面積(m<sup>2</sup>)、 $W'$ ：基礎の有効重量(kN)、 $Q$ ：上載荷重(kN)であり、サクシオン圧 $p_s$ は、 $p_v$ を大気圧( $p_v=0$ )とした場合、

$$p_s = h_s \cdot \gamma_w \quad (2)$$

となる。ここに、 $h_s$ ：基礎内外の水位差(m)、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>、海水は10.1kN/m<sup>3</sup>)である。

また、貫入抵抗力は基礎内外の周面抵抗力と先端

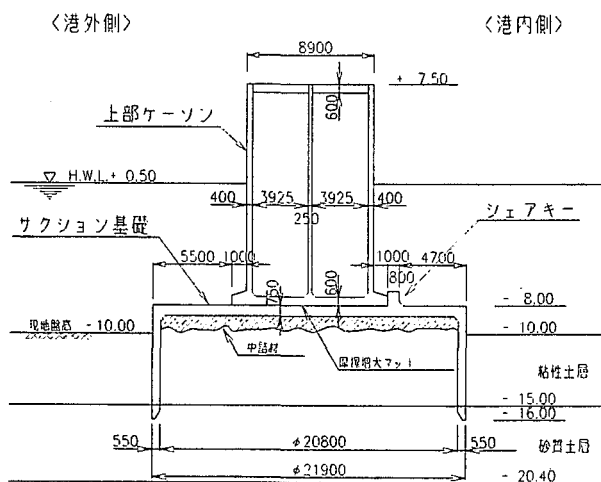


図-2 RC製基礎断面図

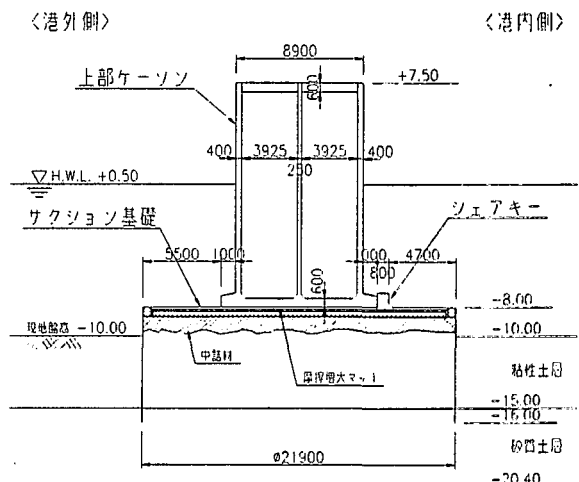
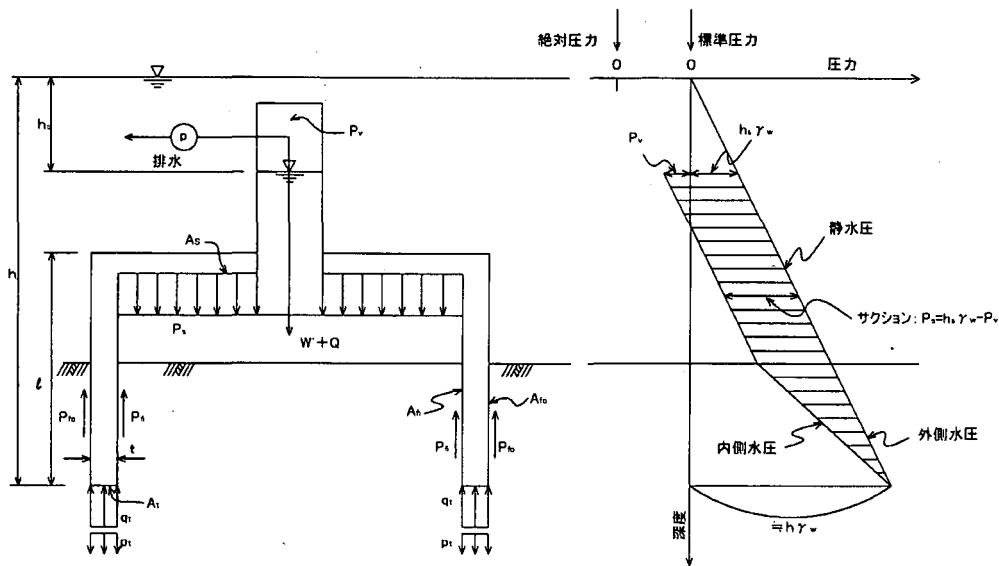


図-3 鋼製基礎断面図



- $P_s$ : サクション圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- $h_s$ : 基礎内外の水位差 (m)
- $\gamma_w$ : 水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $P_a$ : 負の大気圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- $P_{i1}, P_{i0}$ : 基礎内外の周面抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)
- $P_i$ : 側壁先端のサクション圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- $q_i$ : 側壁の先端抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)
- $W'$ : 基礎の有効重量 (kN)
- $Q$ : 上載荷重 (kN)

図-4 サクション基礎沈設時の作用力図

抵抗力の和であり、

$$F_R = P_{i1} \cdot A_{i1} + P_{i0} \cdot A_{i0} + q_i \cdot A_i \quad (3)$$

となる。ここに、 $F_R$ : 基礎の貫入抵抗力 (kN)、 $P_{i1}$ : 基礎内側の周面抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)、 $P_{i0}$ : 基礎外側の周面抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)、 $q_i$ : 基礎の先端抵抗 (kN/m<sup>2</sup>)、 $A_{i1}$ : 基礎側壁内側の周面積 (m<sup>2</sup>)、 $A_{i0}$ : 基礎側壁外側の周面積 (m<sup>2</sup>)、 $A_i$ : 基礎側壁の先端部の断面積 (m<sup>2</sup>) である。

基礎部の貫入抵抗の算定に用いる有効土被り圧には、基礎内を排水することにより発生する浸透流及び貫入による基礎内部の地盤の盛り上がり方を考慮している。また、先端抵抗力は、砂質地盤は側壁厚を基礎幅とした基礎と考えテルツァギの支持力公式 (全般せん断破壊)、粘性土地盤は港湾の施設の技術上の基準・同解説 (以下「港湾基準」と言う。) の粘性土地盤における基礎の支持力の実用式<sup>1)</sup> で算定した極限支持力度とした。

これらの理論により、押込力と貫入抵抗力の関係から沈設に必要な所要サクション力を求めた。

また、サクション力により基礎内部にボイリング等が発生し地盤破壊も考えられることから、基礎内の土が破壊しないよう、根入れ深度毎に上限サクション力を設定した。

#### b) 所要サクション力の検証

検証にあたっては、計測機器 (周面摩擦計・土圧計・間隙水圧計・RC製の側壁先端は刃口荷重計)

の値より、実測の押込力に整合する周面及び先端抵抗力に関する摩擦係数  $\mu$ 、土圧係数  $K_s$ 、付着力係数  $\alpha_s$  及びせん断抵抗角  $\phi'$  を次式により設定した。

$$\mu = \tan\left(\frac{2}{3}\phi\right) \quad (4)$$

$$K_s = 0.9 \quad (5)$$

$$\alpha_s = 0.45 \text{ (固い粘性土)} \sim 0.60 \text{ (軟らかい粘性土)} \quad (6)$$

$$\phi' = 0.9\phi \quad (7)$$

ここに、 $\phi$  は港湾基準のN値の解釈方法<sup>2)</sup> に準じて算定したせん断抵抗角である。

この設定により算定した解析サクション力と実測サクション力と比較した結果、RC製基礎は図-5に示すようにテルツァギの支持力公式で実測値とよく一致する結果となった。一方、鋼製基礎は側壁厚に対して根入れ深さの比が大きく、破壊面が地盤内で閉じてしまうと考えられることより、マイヤホフの支持力公式を適用することで図-6に示すように一致する結果となった。

設計法のとりまとめにあたっては、この破壊モードの違いを考慮して、地盤のせん断抵抗角と側壁厚に対する根入れ深さの比の関係により支持力公式を使い分けることとした。

また、実測されたサクション力は今回の実証試験で設定した上限サクション力を下回っていた。

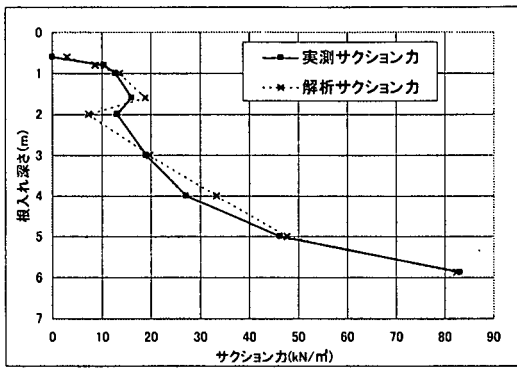


図-5 RC製基礎所要サクシオン力の検証

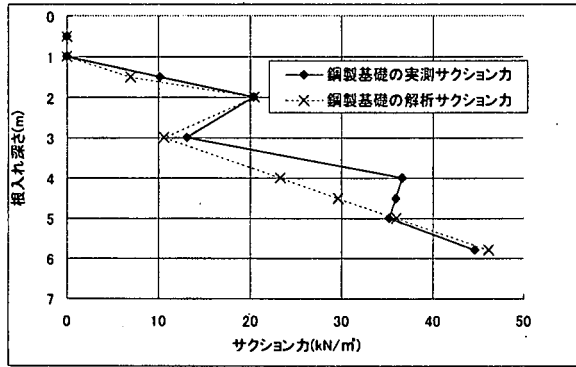


図-6 鋼製基礎所要サクシオン力の検証

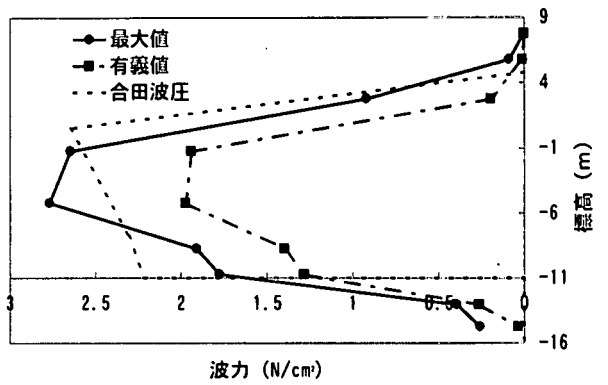


図-7 堤体前面波圧分布

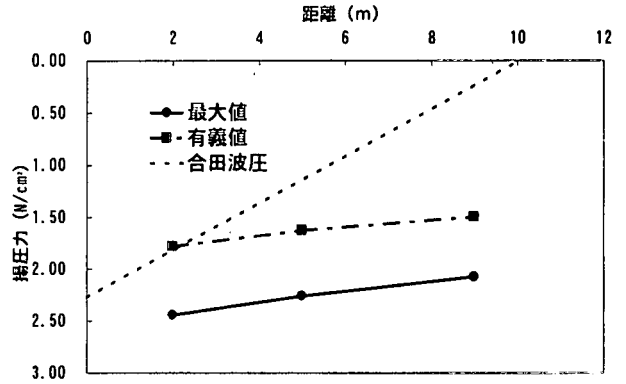


図-8 ケソン揚圧力分布(ケソンとサクシオン基礎間)

## (2) 波力作用時の安定

### a) 波力算定法の検証

堤体に作用する波力は、水中部は堤体前面に設置した波圧計、地中部は基礎前面に設置した間隙水圧計及びケーソン底面とサクシオン基礎間に設置した揚圧計により計測した。図-7に示すように海底面上は前面波高より算定した合田波圧と一致する結果となったが、分離型構造に生じるケーソン底面とサクシオン基礎床版面間の揚圧力は、図-8に示すように合田の揚圧力より大きく、三角形分布とならない。これは、ケーソン背後にあるシェアキーとケーソンの間をモルタルで充填したため、閉塞されたことに起因すると考えられる。設計上はこの大きな揚圧力が発生しないよう、密閉されない構造とすることにより合田の揚圧力の考え方を適用できると考えられる。

地中部における波圧については、図-7に示すとおり、実証試験堤では小さい値が計測された。また、水理模型実験でも確認を行ったが、図-9に示すように各種条件により大きく変化するため、実務的に設計上の地中部波圧は、

$$p_v = p_2 \times \exp(-2\pi Z/L) \quad (8)$$

で算定することとした。ここに、 $p_v$ :サクシオン

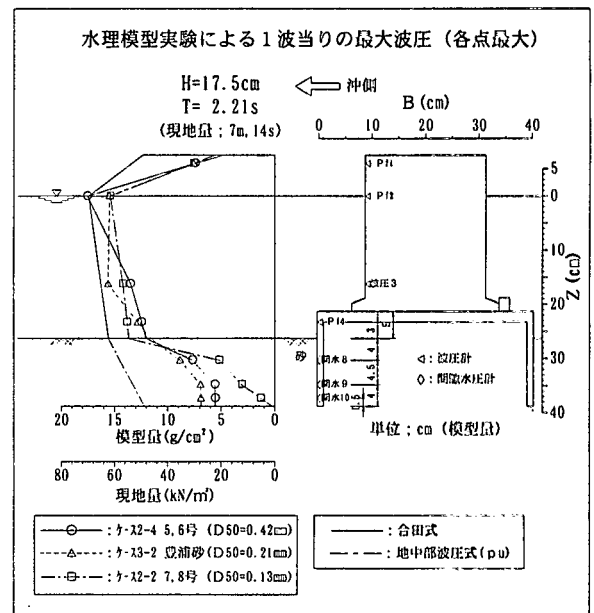


図-9 地中部波圧(水理模型実験結果)

基礎底面に作用する波圧強度 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $p_2$ : 海底面に作用する波圧強度 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $Z$ : 海底面からの深さ (m),  $L$ : 設計地点での波長 (m) である。

また、地中部の基礎下面に作用する揚圧力は基礎前面側壁下端の波圧  $p_v$  を前趾揚圧力とし、後趾揚圧力を0とする三角形分布が作用するものとした。ただし、基礎下端より上部に粘土地盤が存在する場合は、地中部揚圧力は考慮しないこととした。

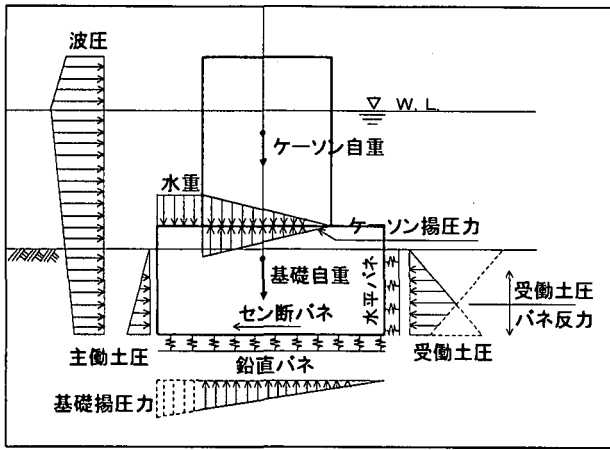


図-10 堤体安定解析モデル

### b) 安定計算法の検証

波力作用時の堤体の安定は基礎部が地盤に弾性支持される剛体として考え、図-10に示す地盤反力モデルを設定しサクシオン基礎に取り付けられた土圧計の値により検証した。地盤反力係数は港湾基準の根入れ式鋼板セル<sup>3)</sup>の考え方を準用した。

検証の結果、水平方向地盤反力の解析値が大きくなる傾向を示したが、鉛直方向地盤反力は床版内側で計測した土圧と解析値を比較するとほぼ一致し、設定した地盤反力モデルでの設計法の妥当性が確認できた。

また、構造断面の設定にあたって、壁体に作用する外力及び荷重に対し、受働土圧を地盤反力として荷重のつり合い式により鉛直方向及び水平方向の底面反力を求め、地盤の許容せん断抵抗力及び許容支持力との比較により、概略断面の設定を行うことも可能であることが確認できた。

### (3) 部材応力の検証

詳細設計のための部材応力計算方法の検証として、実証試験堤に取り付けられた鉄筋計(RC製)及びひずみ計(鋼製)からの実測値と3次元FEMによる解析値を比較した。

図-11, 12に示すようにサクシオン基礎の床版部の実測値と解析値が一致したことより、円筒型基礎の応力計算方法として3次元FEM解析の妥当性が確認できた。

## 5. まとめ

沈設時及び波力作用時の設計法については、RC製及び鋼製サクシオン基礎を用いた実証試験により概ね確立できた。主な結論として、以下のことが確認された。

- ・基礎沈設時の貫入抵抗力は、テルツァギ及びマイヤホフの支持力公式の適用が可能。ただし、側壁厚さと根入れ比により使い分けが必要。

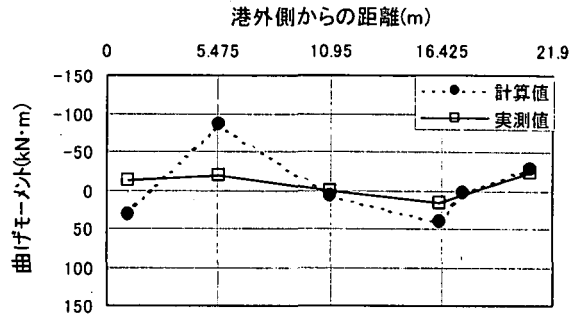


図-11 RC製基礎床版曲げモーメント

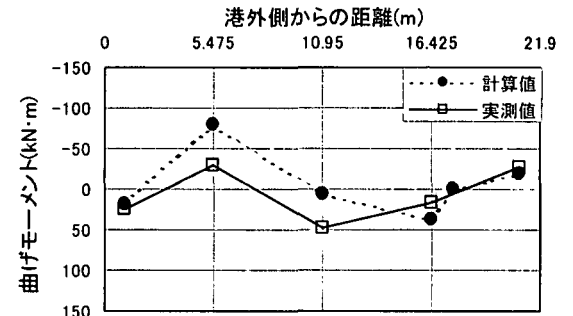


図-12 鋼製基礎床版曲げモーメント

- ・波力の算式は、合田波圧の適用が可能。基礎地中部の波圧及び揚圧力を確認。
- ・堤体安定計算モデルは、根入れ式鋼板セルの設定を準用することが可能。また、概略断面設定のための手法として、つり合い式の適用が可能。
- ・基礎部の部材発生応力の算定には、3次元シェルFEM解析の適用が可能。

また、本報告では割愛しているが、実証試験でのサクシオン基礎製作から据付までの施工段階毎における課題や対策についても知見を得ることができ、これらを設計・施工マニュアルとして取りまとめることができた。

**謝辞:** 最後に、本構造物の開発検討、「サクシオン基礎構造物設計・施工マニュアル(案)」のとりまとめにあたって、九州大学善教授を委員長とする「サクシオン基礎構造物開発検討調査委員会」の各委員、国土交通省港湾局関係者、(独)港湾空港技術研究所並びに多数の関係者の方に、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) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、p.425, 1999
- 2) 文献1), p.245
- 3) 文献1), p.710

- 4) 善 功企：サクシヨ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会 1日港研in下関 講演集，  
pp. 35-57, 1997
- 5) 善 功企，山崎浩之，前田健一：サクシヨンによるケ  
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Ⅲ No. 603/Ⅲ-44, 21-34, 1998.9
- 6) 山崎浩之：サクシヨン基礎の開発について 平成12年  
度港湾技術研究所講演会 講演集, pp. 17-38, 2000