

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

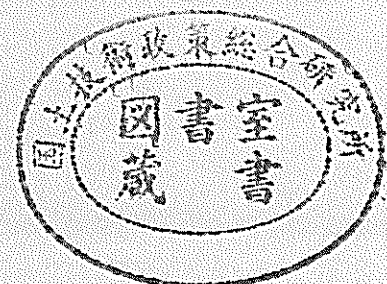
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.37

NO.4

Dec. 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 37 卷 第 4 号 (Vol.37, No.4) , 1998年12月 (Dec. 1998)

目 次 (CONTENTS)

1. Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator
..... Tetsuya HIRAISHI, Katsuya HIRAYAMA, Haruhiro MARUYAMA..... 3
(デュアル・フェース・サーペント型造波装置の適用性
..... 平石 哲也・平山 克也・丸山 晴広)
2. Low-Frequency Ship Motions Due to Long-Period Waves in Harbors, and
Modifications to Mooring Systems That Inhibit Such Motions
..... Satoru SHIRAISHI..... 37
(長周期波による係留船舶の長周期動揺と係留システムによる動揺低減対策
..... 白石 悟)
3. Performance of the Quay Walls with High Seismic Resistance
..... Koji ICHII, Susumu IAI, Toshikazu MORITA..... 79
(耐震強化岸壁の耐震性能に関する有効応力解析
..... 一井 康二・井合 進・森田 年一)
4. 内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究
..... 中川 康之..... 113
(A Study on Sedimentation of Mud in a Bay
..... Yasuyuki NAKAGAWA)
5. サクション基礎沈設時の必要排水量に関する考察
..... 善 功企・山崎浩之・森川嘉之・小池二三勝..... 135
(Study on Drainage Volume Necessary for Penetration of Suction Foundation
..... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA, Fumikatsu KOIKE)
6. 海洋環境下における再生コンクリートの適用性に関する研究
..... 伊藤正憲・福手 勤・田中 順・山路 徹..... 149
(A Study on Applicability of Recycled Concrete to Marine Structures
..... Masanori ITO, Tsutomu FUKUTE, Jun TANAKA, Toru YAMAJI)

サクシヨン基礎沈設時の必要排水量に関する考察

善 功企*・山崎浩之**・森川嘉之***・小池二三勝****

要 旨

本研究の目的は、強制排水によるサクシヨン基礎沈設時に、所要のサクシヨンを負荷するために必要な排水流量の算定手法を明らかにすることにある。円筒座標系を用いて沈設時における三次元浸透流に関する数値解析を実施し、基礎内外の間隙水圧分布について、理論値と実測値を比較するとともに、数値解析法および図解法により求められる排水流量を比較して解析手法の妥当性を検証した。岸壁の基礎への適用を想定した解析モデルに本解析を適用して、所要のサクシヨンが与えられれば合理的に排水流量が算定できることを示した。また、基礎周囲の海底地盤表層に浸透抑制工（有限長の不透水膜）を設けた場合の排水流量の抑制効果を調べた。

キーワード：ケーソン，排水，基礎，海底地盤，間隙水圧，浸透

*九州大学 教授 大学院工学研究科 建設システム工学専攻 防災地盤工学講座（前土質部長）

**土質部動土質研究室長

***土質部動土質研究室研究官

****土質部動土質研究室研究員

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

Tel.:(0468)44-5022 Fax.:(0468)44-0618 e-mail:yamazaki@cc.phri.go.jp

Study on Drainage Volume Necessary for Penetration of Suction Foundation

Kouki ZEN *
Hiroyuki YAMAZAKI **
Yoshiyuki MORIKAWA ***
Fumikatsu KOIKE ****

Synopsis

The purpose of this paper is to make clear of the characteristics of seepage flow around the suction foundation. Three dimensional numerical analysis of seepage flow in/around the foundation is made as well as the analysis by use of two dimensional diagrammatic chart of flow net. The applicability of the analyses is verified by comparing the computed pore water pressures with the measured ones. An estimation method of water volume to be drained from inside the foundation to generate the required suction force for the penetration of foundation is presented. The effect of a thin impermeable layered sheet, installed surrounding the foundation, on the reduction of the water volume of drainage is also investigated.

Keywords : Caisson, Drainage, Foundation, Ocean soil, Pore pressure, Seepage

*Professor, Department of Civil and Structural Engineering, Kyusyu University(Ex-director, Geotechnical Engineering Division)

**Chief, Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

***Research Engineer, ditto

****Member, ditto

Port & Harbour Research Institute, Ministry of Transport

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa, Japan

Tel. (0468)-44-5022 Fax. (0468)-44-0618 E-mail. yamazaki@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	135
1. まえがき	139
2. 浸透流解析理論	139
2.1 基礎方程式	139
2.2 基礎方程式の離散化	141
2.3 地盤と基礎の境界部の処理	141
2.4 流速および排水流量	142
3. 解析概要	142
3.1 解析モデル	142
3.2 解析および入力条件	144
3.3 解析方法	144
4. 結果および考察	144
4.1 定常状態への移行時間	144
4.2 間隙水圧の理論値と実測値の比較	145
4.3 数値解析法と図解法による排水流量の比較	145
4.4 サクションと排水流量の関係	146
4.5 浸透抑制工の効果	147
5. 結論	148
6. あとがき	148
参考文献	148

1. まえがき

近年、北海における石油掘削リグの建設などで、サクシオン基礎 (suction foundation) と呼ばれる比較的新しい基礎が用いられている¹⁾。旧くは、我が国においても、防波堤としての実績がある²⁾。この基礎は、茶筒状のケーソン基礎を逆さまにして海底地盤上に設置し、内部の水を強制排水することによって発生する筒内外の水圧差 (サクシオン) を押込力として利用するものである。基礎の沈設に必要なサクシオンの算定方法については既に報告されており³⁾、基礎や地盤の条件が与えられれば所用のサクシオンが求められるようになっている。しかし、所用のサクシオンを発生させるための排水流量は、基礎の寸法、貫入深さ、地盤の層構成や透水性などいくつかの要因に影響されるものと考えられ、その算定方法については未解明な点も多い。

排水流量の予測は、使用する排水ポンプ容量の決定に不可欠であり、容量不足により沈設時に所用のサクシオンが発生しないという事態は避けられなければならない。また、基礎の傾斜を極力抑制するためには、基礎内部の地盤のボイリングもしくはヒービングなどの発生を防止する必要がある。そのため、基礎内外の浸透流の状況を十分把握するとともに、基礎の沈設施工過程において過大な排水を行わないよう適切に排水流量を制御することが重要である。

これまで、著者らは、サクシオン基礎の現地沈設実験¹⁾、引抜き抵抗に関する模型実験⁴⁾、基礎の適用に関する模型実験⁵⁾、サクシオン基礎の試設計例⁶⁾などについて報告してきたが、上記のような背景から、本論文では、サクシオン基礎の沈設時における浸透流特性を解明し、所要のサクシオンを負荷するために必要な排水流量の算定法を提案することを目的として、円筒座標系による三次元浸透流解析を実施した。

理論解析では、全水頭に関する基礎方程式を誘導し差分法による数値解析を行った。解析結果を現地実験で測定された間隙水圧と比較し、解析方法の妥当性について検証した。また、排水流量について、図解法による二次元定常浸透流解析を実施し数値解析結果と比較した。さらに、岸壁の基礎に適用される場合を想定した解析モデルに、本解析を適用して、所用のサクシオンを負荷するための排水流量の合理的な算定法を事例的に示した。また、海底地盤表層に浸透抑制工を設けた場合の排水流量抑制効果を調べた。

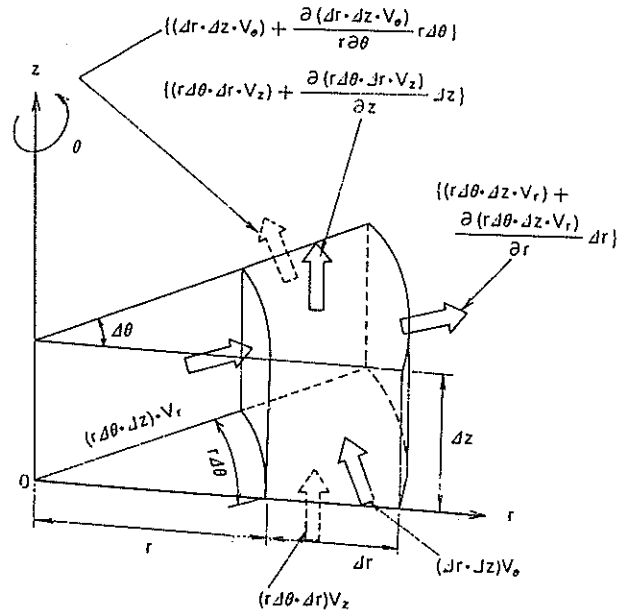


図-1 円筒座標系の土要素内の水の流出入

2. 浸透流解析理論

2.1 基礎方程式

本論文では、円筒形のケーソン基礎を対象とした。この場合、基礎内外の浸透流は三次元的であることから、図-1に示す円筒座標系による浸透流解析を行った。円筒座標系 (r, z, theta) における浸透流に関する基礎方程式は、流量に関する連続の式により、基礎円周方向の流速 $v_\theta = 0$ を考慮して次式で表される。

$$S_r \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、h; 全水頭, r; 基礎中心軸から半径方向の座標, z; 海底地盤表面から鉛直上向き方向の座標, theta; 基礎中心軸廻りの円周方向角度 (ラジアン), t; 時間, S_r ; 比貯留係数, k_r, k_z ; それぞれ r, z 方向の透水係数, 図-1 中の v_r, v_z ; それぞれ, r, z 方向の流速である。

初期条件は以下のように設定した。すなわち、ここでは、沈設中における連続的な排水ではなく、ある貫入深さごとに一旦排水を停止した状態から再度排水ポンプを稼働させる状態を想定し、基礎内部に瞬時に一定のサク

クションが負荷されるとした。このとき、基礎先端以深を含む外部の地盤中では、すべて同じ大きさの全水頭を与えた。一方、基礎内部の地盤表面では、サクシオンに相当する分だけ小さい全水頭を与え、基礎先端部では基礎外部の地盤の全水頭に等しいとした。その間の全水頭は直線的に変化するとして初期条件を与えた。

解析は各貫入深さごとに実施し、それぞれ非定常状態から定常状態に達したときの結果を採用した。

境界条件としては、図-2に示すように、地盤の境界に関して、

i) 基礎内部地盤面 ($0 \leq r \leq r_{in}$, $z=0$) で、

$$h = H_{in} \quad (2)$$

ii) 基礎外部地盤面 ($r_{out} \leq r \leq r_b$, $z=0$) および半径方向の鉛直境界面 ($r=r_b$) で、

$$h = H_{out} \quad (3)$$

iii) 基礎中心軸上 ($r=0$) で、

$$\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

iv) 不透水層境界面 ($z=-z_b$) で、

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

となる。

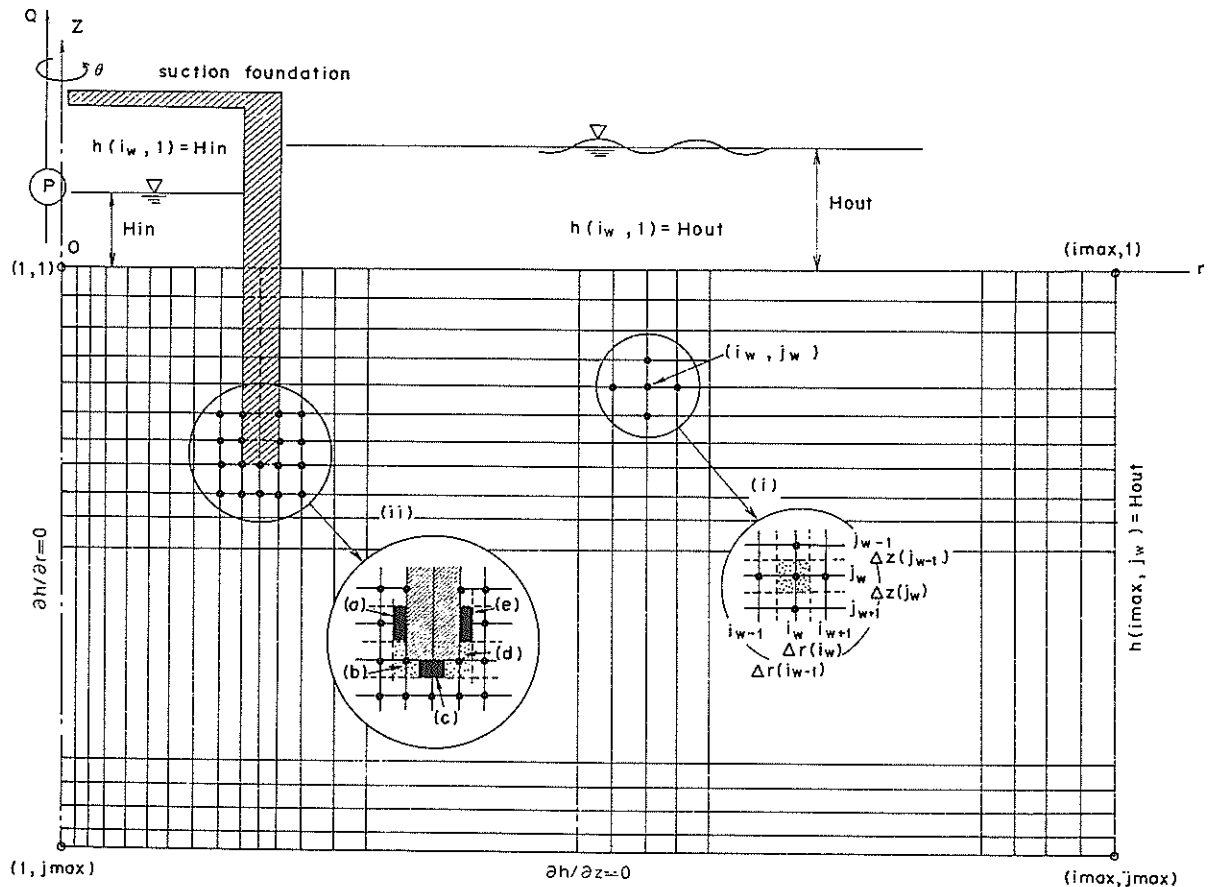


図-2 境界条件と離散メッシュ

また、基礎と地盤の境界では、

i) 基礎内壁面 ($r = r_{in}$, $-d \leq z \leq 0$) および基礎外壁面 ($r = r_{out}$, $-d \leq z \leq 0$) で、

$$\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

ii) 基礎先端面 ($r_{in} \leq r \leq r_{out}$, $z = -d$) で、

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

となる。ここに、 H_{out} : 基礎外部の海底表面における全水頭、 H_{in} : 基礎内部の海底表面における全水頭、 r_{in} : 基礎の内径、 r_{out} : 基礎の外径、 r_b : 基礎半径方向の遠方境界までの距離、 z_b : 地盤の不透水層までの距離、 d : 基礎の貫入深さである。全水頭 h と圧力水頭および位置水頭の間には、 p を間隙水圧、海水の単位体積重量を γ_w とすると、一般に、

$$h = p / \gamma_w + z \quad (8)$$

の関係があるから、海底地盤表面 ($z = 0$) では、

$$H_{in} = p_{in} / \gamma_w \quad (9)$$

$$H_{out} = p_{out} / \gamma_w \quad (10)$$

となる。ここに、 p_{in} 、 p_{out} は、それぞれ基礎内外の海底地盤表面の水圧である。 p_{out} は静水圧に等しく、 p_{in} は、サクシヨンによる p_s とすると、

$$p_{in} = p_{out} - p_s \quad (11)$$

で求められる。

2.2 基礎方程式の離散化

基礎方程式(1)の差分式は、図-2中の(i)に示す離散メッシュを考え、時刻 $(t + \Delta t)$ における格子点 (i_w, j_w) の全水頭 $h^{t+\Delta t}(i_w, j_w)$ について整理すると、

$$h^{t+\Delta t}(i_w, j_w) = \frac{A + B + C}{D + E + F} \quad (12)$$

となる。ここに、

$$A = \frac{Ss(i_w, j_w)}{\Delta t} h^t(i_w, j_w) \quad (13)$$

$$B = \frac{1}{r(i_w)} \frac{2}{\Delta r(i_w - 1) + \Delta r(i_w)}$$

$$\times \left\{ \left[r(i_w) + \frac{\Delta r(i_w)}{2} \right] \frac{k_r(i_w + 1/2, j_w)}{\Delta r(i_w)} \right. \\ \left. \times h^{t+\Delta t}(i_w + 1, j_w) \right.$$

$$\left. + \left[r(i_w) - \frac{\Delta r(i_w - 1)}{2} \right] \frac{k_r(i_w - 1/2, j_w)}{\Delta r(i_w - 1)} \right. \\ \left. \times h^{t+\Delta t}(i_w - 1, j_w) \right\} \quad (14)$$

$$C = \frac{2}{\Delta z(j_w - 1) + \Delta z(j_w)}$$

$$\times \left\{ \frac{k_z(i_w, j_w - 1/2)}{\Delta z(j_w - 1)} h^{t+\Delta t}(i_w, j_w - 1) \right. \\ \left. + \frac{k_z(i_w, j_w + 1/2)}{\Delta z(j_w)} h^{t+\Delta t}(i_w, j_w + 1) \right\} \quad (15)$$

で表される。 D 、 E 、 F については、それぞれ、 A 、 B 、 C における $h^t(i_w, j_w)$ 、 $h^{t+\Delta t}(i_w + 1, j_w)$ 、 $h^{t+\Delta t}(i_w - 1, j_w)$ 、 $h^{t+\Delta t}(i_w, j_w - 1)$ 、 $h^{t+\Delta t}(i_w, j_w + 1)$ を表記上 1 とおくと得られる。また、透水係数 k_r 、 k_z は次式のように土要素内の平均値を用いている。

$$k_r(i_w - 1/2, j_w) = 1/2 \{ k_r(i_w - 1, j_w) + k_r(i_w, j_w) \} \\ k_r(i_w + 1/2, j_w) = 1/2 \{ k_r(i_w, j_w) + k_r(i_w + 1, j_w) \} \\ k_z(i_w, j_w - 1/2) = 1/2 \{ k_z(i_w, j_w - 1) + k_z(i_w, j_w) \} \\ k_z(i_w, j_w + 1/2) = 1/2 \{ k_z(i_w, j_w) + k_z(i_w, j_w + 1) \} \quad (16)$$

式(12)~(16)より、時刻 $(t + \Delta t)$ での格子点 (i_w, j_w) の全水頭値 $h^{t+\Delta t}(i_w, j_w)$ が計算される。

2.3 地盤と基礎の境界部の処理

図-2中の(ii)に示すように、地盤と基礎の境界部の要

素を破線で示すセグメントに分割し、(a)～(e)の各要素ごとに境界条件式を誘導した。すなわち、各要素におけるセグメントからの流出入量を用いて、式(1)の誘導と同様にして要素内の水収支式を作り境界条件式とした。

2.4 流速および排水流量

Darcy の法則によると、流速は透水係数と動水勾配の積で表される。したがって、格子点 (i_w, j_w) におけるそれぞれ r, z 方向の流速 $v_r(i_w, j_w), v_z(i_w, j_w)$ は、

$$v_r(i_w, j_w) = -k_r(i_w, j_w) \times \frac{h^{t+\Delta t}(i_r+1, j_r) - h^{t+\Delta t}(i_r-1, j_r)}{\Delta r(i_r-1) + \Delta r(i_r)} \quad (17)$$

$$v_z(i_w, j_w) = -k_z(i_w, j_w) \times \frac{h^{t+\Delta t}(i_w, j_r+1) - h^{t+\Delta t}(i_w, j_r-1)}{\Delta z(j_r-1) + \Delta z(j_r)} \quad (18)$$

であるから、流速ベクトルの大きさ v および方向 ω は、次式で表される。

$$v(i_w, j_w) = \{v_r^2(i_w, j_w) + v_z^2(i_w, j_w)\}^{0.5} \quad (19)$$

$$\omega(i_w, j_w) = \tan^{-1}(v_z/v_r) \quad (20)$$

ここに、 $\Delta r(i_w), \Delta z(j_w)$ は、それぞれ r, z 方向の節点 $(i_w \sim i_w+1)$ もしくは $(j_w \sim j_w+1)$ 間の長さである。

基礎内部からの排水流量 Q は、基礎内部水平断面における格子点 (i_w, j_w) の z 方向の流速成分 $v_z(i_w, j_w)$ にそれぞれの影響断面積（ドーナツ状断面） A_{i_w} を乗じて得られる値を加算することにより求めた。

$$Q = \sum_{i_w=1}^{IWin} v_z(i_w, j_w) A_{i_w} \quad (21)$$

ここに、 $i_w=1$ は基礎中心軸上の格子点番号、 $i_w=IWin$ は基礎内壁面上の格子点番号、 j_w は水平断面上の格子点番号である。解析では基礎内部の地盤表面から1つ下の水平断面（層番号 $j_w=2$ ）を横切る流量を排水流量とした。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

解析は以下に示すように、目的別に2ケースの解析モデルについて実施した。

(1) モデルケース1（現地実験の事例）

現地沈設実験¹⁾の概要は以下のとおりである。基礎として用いられたのは、鋼製の円筒形基礎（外径 818mm 内径 800mm, 肉厚 9mm, 高さ 2.0m; suction block と呼ばれている）である。基礎の先端部だけが開端となっており、排水は基礎上端部の排水孔から行われる。基礎内外壁面には間隙水圧計が取り付けられている。また、超音波流量計による排水流量の測定が試みられている。現地実験地点の地盤は均質な砂からなり、室内試験による透水係数は $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-4} \text{m/s}$ である。

図-3は、基礎内外の間隙水圧の実測値である。実線は、海水の単位体積重量を 10.1kN/m^3 として計算した静水圧である。貫入が始まる直前の図-3(a)によると、明らかに基礎内外の水圧の差（サクション）が現れており、高さ 1500mm の位置におけるサクションは 24.5kPa となっている。サクションは、先端に向かうにつれて小さくなっており、基礎先端部では内外の水圧はほぼ等しくなっている。ただし、静水圧よりも小さいのは排水による影響が基礎先端部まで及んだためと考えられる。また、基礎先端から 75cm, 100cm における基礎外部の測定値が静水圧よりも大きくなっている。この原因は、図-3(b)を参照して次のように考えることができる。すなわち、図-3(b)は、図-3(a)に示した測定から3分後、排水を停止したときの測定結果であるが、特に、基礎先端から 75cm, 100cm における基礎内外の実測値は静水圧分布から大きくずれている。各プロットは、理論上、実線で示される静水圧と等しくなければならないので、この差は計測誤差によると考えられる。

数値解析手法の妥当性を検証するために、図-3(a)に示した事例を解析し、基礎内外の間隙水圧を計算して実測値と比較した。直接、排水流量を比較するのが理想的であるが、実測値の信頼性から、本論文では間隙水圧を取り上げて比較した。排水流量については、数値解析結果と図解法による二次元定常浸透流解析結果との比較を行った。図-4にモデル断面を示す。

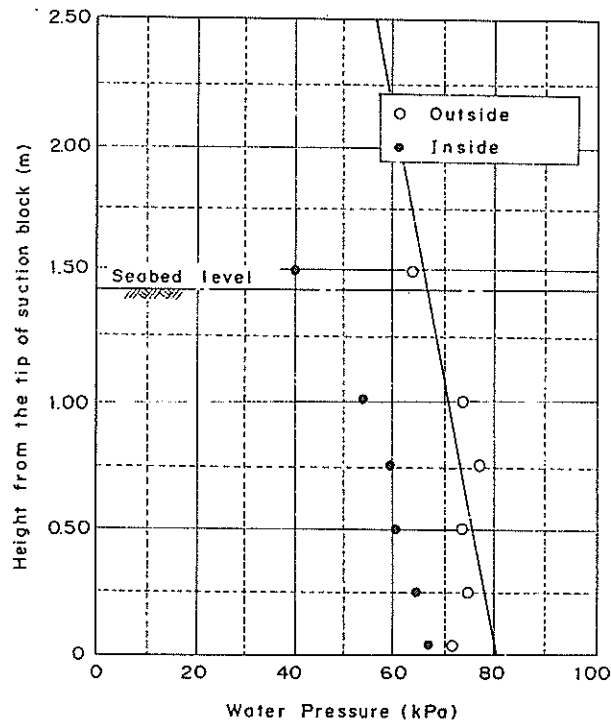


図-3(a) 基礎内外の実測水圧 (サクシヨン負荷時)

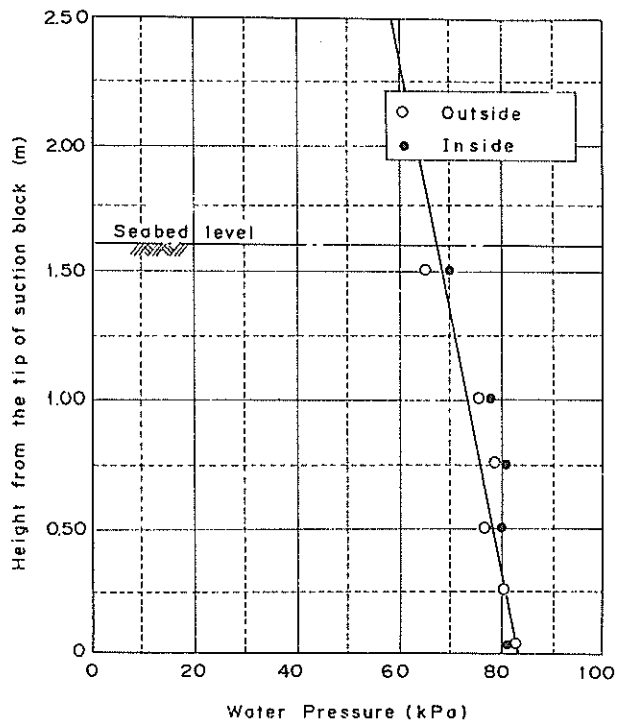


図-3(b) 基礎内外の実測水圧 (サクシヨン除荷時)

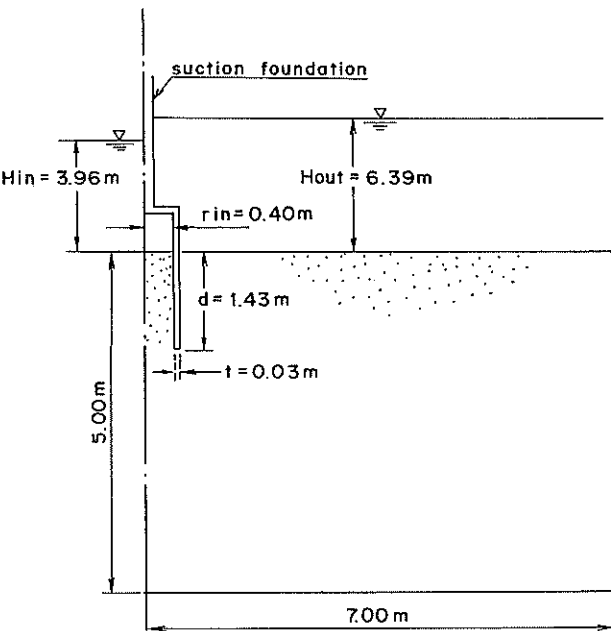


図-4 解析モデル断面 (ケース1)

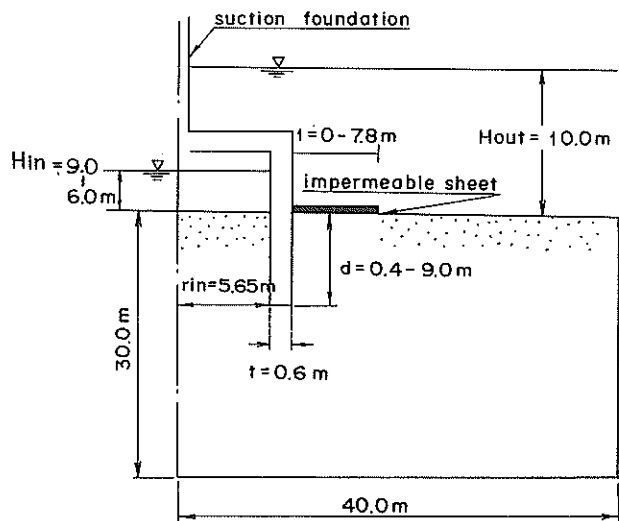


図-5 解析モデル断面 (ケース2)

(2) モデルケース2 (岸壁の基礎)

岸壁の基礎に適用される場合を想定して、現地規模のモデル断面を設定した。基礎の半径、肉厚、貫入深さ、地盤の層構成、透水係数等のパラメータを仮定して解析を行い、所用のサクシヨンと排水流量の関係について調

べた。また、基礎を取りまく海底地盤表面に浸透抑制工(有限長の不透水膜)を設置した場合を取り上げ、所用について調べた。浸透抑制工の長さは、0m ~ 7.8m とした。図-5にモデル断面を示す。

表-1 解析および入力条件

ケース	基礎の寸法 (m)			解析地盤 (m)		貫入深さ (m)	水深 (m)	基礎内外の海底面水圧 (kPa)			メッシュ間隔 (m)		時間間隔 (s)
	外半径	内半径	肉厚	層厚	幅			外	内	サクション	Δr	Δz	
1	0.43	0.40	0.03	5	7	1.43	6.39	64.5	40.0	24.5	0.01	0.01	0.001
2	6.25	5.65	0.60	30	40	0.4-0.9	10	101	61-91	10-40	0.2	0.2	1.0

*透水係数：(ケース1) $k_r = k_z = 10^{-4}$ m/s, (ケース2) $k_r = k_z = 10^{-5}$ m/s, 貯留係数： $S_s = 10^{-5}$ /m, 海水の単位体積重量： $\gamma_w = 10.1$ kN/m³

3.2 解析および入力条件

上記2ケースにおける解析および入力条件を表-1に示す。解析地盤の層厚は海底面から不透水層までの厚さで、幅は基礎中心から地盤の仮想鉛直境界面までの半径である。ケース2では、貫入深さを0.4m～9.0mまで段階的にいくつか変化させている。基礎内外の全水頭は時間的に一定、すなわちサクションは一定としたが、ケース2ではサクションを10～40kPaまで段階的に変化させた場合について、それぞれ解析を実施した。2つのケースとも海底地盤は均質とし、透水係数は、ケース1では室内試験結果をもとに $k_r = k_z = 1.0 \times 10^{-4}$ m/sとした。現地地盤のN値20前後から判断してやや密な地盤と思われたので、ここでは、透水係数として 1.0×10^{-4} m/sを採用した。ケース2では $k_r = k_z = 1.0 \times 10^{-5}$ m/sと仮定した。比貯留係数は、既往のデータ⁷⁾を参照して、 $S_s = 1.0 \times 10^{-5}$ /mとした。

3.3 解析方法

差分方程式(12)の解法には、加速リープマン法⁹⁾(または、S.O.R.法(Successive Over Relaxation Method)とも呼ばれる)を用いた。この方法では緩和パラメータ α を設定することが必要であるが、本解析では $\alpha = 1$ とした。また、繰り返し計算における全水頭に対する許容誤差は 10^{-5} (m)とした。離散メッシュの間隔 Δr 、 Δz および時間間隔 Δt は、次式で示す解の安定性を考慮して決定した。

$$\frac{k \Delta t}{S_s} = \frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (22)$$

Δr 、 Δz 、 Δt の具体的な数値は表-1に示されている。本解析では、解析当初は非定常浸透流となるが、排水流量が一定の定常状態になるまで計算を継続した。

4. 結果および考察

4.1 定常状態への移行時間

図-6は、計算開始時から定常状態に至るまでの排水流量、最大流速(円筒基礎先端内側角部で発生)と計算時間の関係の一例である。この例では、表-1に示したケース2を対象として、外水位 $H_{out} = 10$ m (外水圧101kPa)、内水位 $H_{in} = 9$ m (内水圧91kPa)を一対として与えた。透水係数は 1.0×10^{-5} m/sとした。この例によると、経過時間と共に最大流速は増加し、排水流量は減少するが、これは、前者が局所的な量を、後者が平均的な量を表すことによる。しかし、両者とも計算時間が50秒程度経過するとほぼ一定の値を示しており、流れは定常状態に達したものとみなされる。ちなみに、計算時間50秒における排水流量は、計算開始時に比べて約15%程度少なくなっている。また、計算時間25秒と500秒における排水流量は、それぞれ 81.3×10^{-6} m³/s、 80.8×10^{-6} m³/sでその差は0.6%と小さい。これ以外の解析例でも同様な傾向を示しており、本解析では計算時間500秒を標準とした。なお、定常浸透流のみを取り扱う場合には、式(1)の左辺を0とおけばよい。

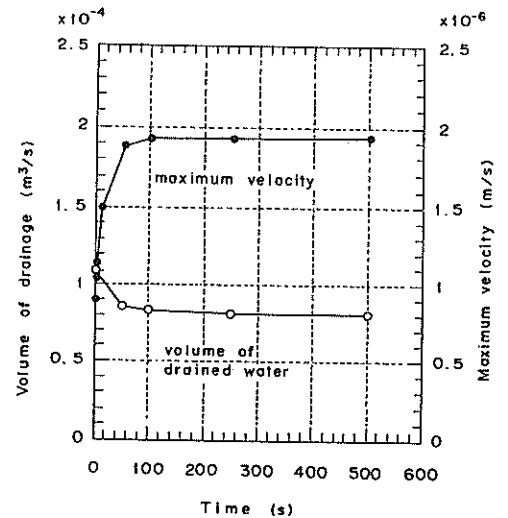


図-6 定常状態に至る時間

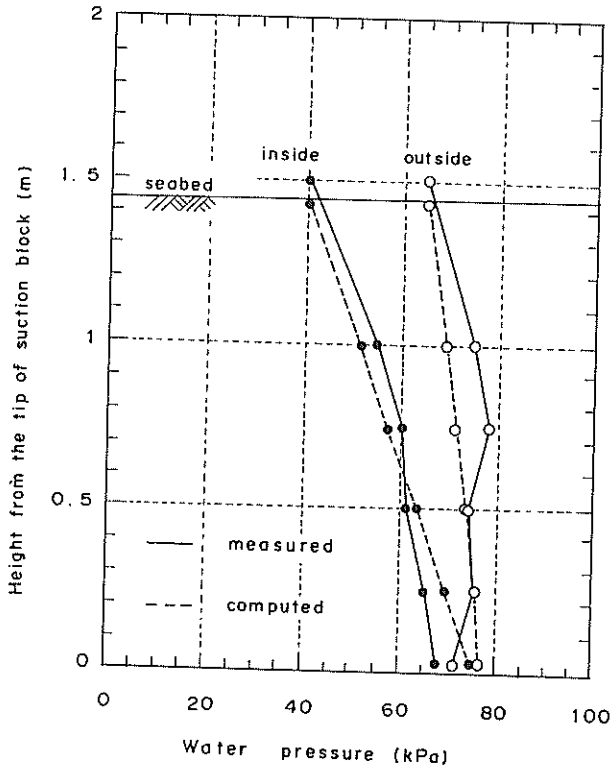


図-7 基礎周辺地盤の水圧分布の比較

4.2 間隙水圧の理論値と実測値の比較

本解析の妥当性を確かめるために、解析値と実測値の比較検証を行った。前項の検討で比較的短時間で定常状態に達することが明らかとなったので、ここでは定常浸透として取り扱った。図-7は、図-3(a)に示された基礎内外の間隙水圧の実測値と解析結果を比較したものである。解析では、表-1に示したモデルケース1の条件を用いた。ただし、解析プログラム上の制約から、基礎の肉厚は実際の基礎の肉厚 0.009m よりも大きく 0.03m としている。この例では、貫入深さが 1.43m と肉厚に比較して格段に大きいので、肉厚の違いが間隙水圧（動水勾配）に及ぼす影響は無視できるとした。すなわち、実際の肉厚 $t_0 = 0.009\text{m}$ 、計算の肉厚 $t_c = 0.03\text{m}$ 、貫入深さ $d = 1.43\text{m}$ として、壁面に沿った流路についてそれぞれ動水勾配 i_0 、 i_c を求め比をとると、 $i_c/i_0 = \{1 + (t_c/2d)\} / \{1 + (t_0/2d)\} = 0.993$ となり、影響は小さい。図-7によると、実測値と解析値は一部の点を除き比較的良く一致しており、本解析方法の妥当性が裏付けられたものと思われる。なお、一部の点で解析値と実測値で若干の相違が見られる。この理由は、3.1節(1)で述べたように、間隙水圧の測定誤差に起因するものと考えられる。

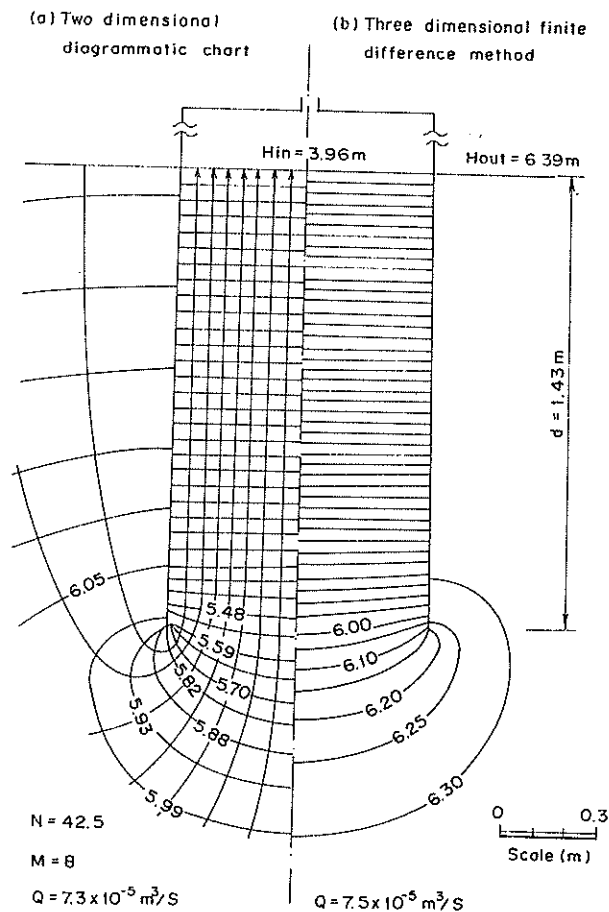


図-8 流線網

4.3 数値解析法と図解法による排水流量の比較

図-8の(a)、(b)は、それぞれ、図解法および数値解析により求めた基礎周辺地盤中の定常浸透流に関する流線網を比較したものである。図-8の(b)は、前節で示した三次元数値解析から得られた流線網で、ポテンシャル線のみを描いている。両者には、二次元と三次元の相違があり、流線網の形状は類似しているものの、基礎先端付近の同一地点における全水頭値は、図解法の方がやや小さくなっている。

図解法では、要素内の水圧 p は、

$$p = (n/N) \gamma_w (H_{out} - H_{in}) = (n/N) p_0 \quad (23)$$

で表される。ここに、 N は、等ポテンシャル線で分割される浸透領域部分の全体数、 n は、等ポテンシャル線で分割される浸透領域部分の基礎内側海底地盤面から対象要素までの数である。サクシヨン p_0 は既知としているので、図-8の(a)の各要素の n 、 N を読みとれば p が計算される。図-9は、このようにして図解法(2D DG

CHART)から得られた水圧および三次元の数値解析(3D FDM)から得られた水圧を実測値と比較した結果である。解析条件は、表-1に示したモデルケース1を対象としている。図-9によると、計算結果は実測値とほぼ一致しているが、図解法の結果は実測値よりもやや小さな傾向にある。図-10は、基礎の同一深度における内外水圧差を計算値と実測値について比較したものである。両者

が数値解析結果よりもやや大きくなっている。

図解法による排水流量は次式で求められる。

$$Q = \beta(M/N) k_z (H_{out} - H_{in}) \quad (24)$$

ここに、 M は、隣接する代表流線が作る流路の数、 N は、二次元から三次元への補正係数である。井上⁹⁾は補正係数として 0.76 を提案している。本研究では、この補正係数を四捨五入して 0.8 を適用して排水流量の比較を行った。図-8の(a)によると、 $M=8$ (ただし、断面 $8 \times 2 = 16$)、 $N=42.5$ であるから、 $\beta=0.8$ 、 $k_z=10^{-4}$ m/s、 $H_{out}=6.39$ m、 $H_{in}=3.96$ m を上式に代入すると、排水流量は 7.3×10^{-5} m³/s となる。数値解析による排水流量は 7.5×10^{-5} m³/s であるから、両者良く一致している。

4.4 サクシオンと排水流量の関係

基礎の沈設に必要なサクシオンを発生させるために、基礎内部から適量の排水を行う必要がある。排水流量は排水ポンプの選定に不可欠であるが、これは基礎の形や貫入深さ、地盤特性などに依存すると考えられる。図-11は、無次元パラメータを用いてサクシオンと排水流量の関係を描いたものである。具体的には、横軸にサクシオンに相当する水頭差 h_s と貫入深さ d の比 (h_s/d)、縦軸に排水流量 Q と透水係数 k_z と基礎内径 r_{in} の 2 乗の積 ($Q/(k_z r_{in}^2)$) をとり、貫入深さ d をパラメータとした曲線を描いている。数値解析の条件は、表-1のモデルケース2を対象とした。図-11によると基礎の沈設時における各貫入深さごとのサクシオンに対する排水流量が求められる。すなわち、サクシオンの大きさは、沈設に必要な押込力を確保するための下限値と基礎内部の地盤のボイリングを発生させないようにするための上限値の範囲内で与えられるが、この条件を満たす排水流量が決定される。例えば、文献 3)の方法で図-12に示すようなサクシオンと貫入深さの関係が得られた場合(解析モデルケース2、地盤のせん断抵抗角 $\phi = 30^\circ$ 、摩擦係数 $\mu = 0.36$ 、土圧係数 $K = 0.5$ とした)、貫入深さが 4m のときのサクシオンは 53.9kPa ~ 80.0kPa となる。このときの $(h_s/d) = 1.33 \sim 1.98$ となり、透水係数 $k_z = 1 \times 10^{-5}$ m/s、基礎の内径 $r_{in} = 5.65$ m であるから、排水流量は、 83×10^{-5} m³/s $\leq Q < 109 \times 10^{-5}$ m³/s となる。比較的透水性の低い砂地盤では所用の排水流量は小さい。このように、図-11に示したようなチャートを作成し、各貫入深さごとに上記の検討を行うことによってポンプの選定と沈設時の排

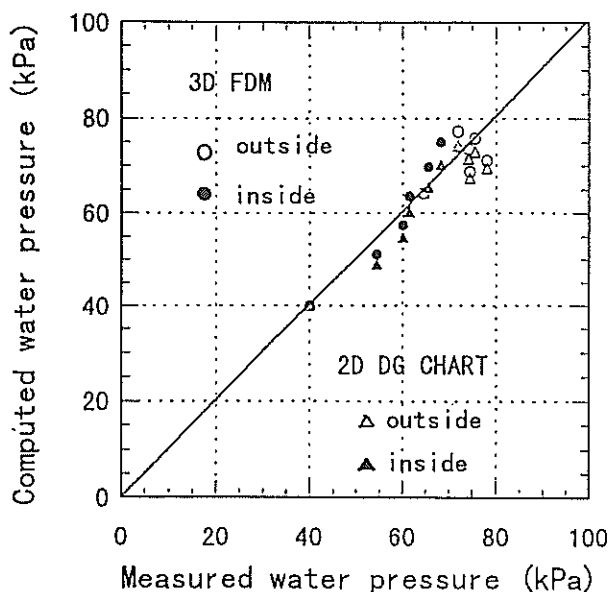


図-9 水圧の実測値と理論値の比較

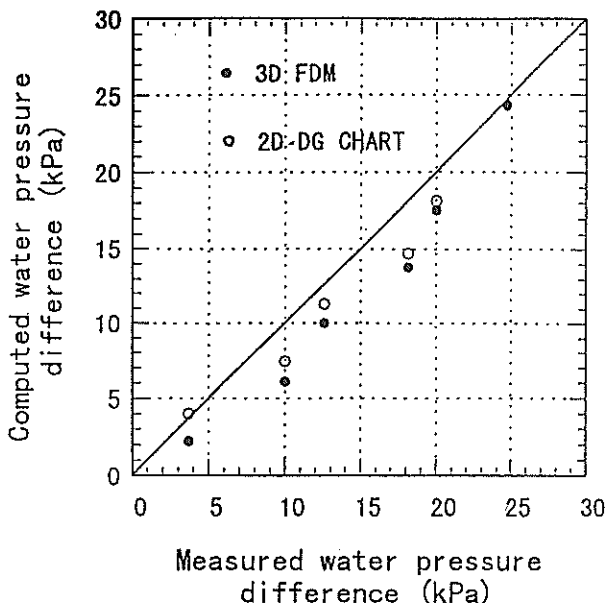


図-10 基礎内外の同一深度の水圧差の比較

とも実測値とほぼ一致しているようであるが、同一深度における基礎内外の水圧差でみると、図解法による結果

流量の制御をより合理的に行うことができるものと思われる。なお、図-6に示したような排水初期の非定常状態における流量の検討も別途行っておく必要がある。

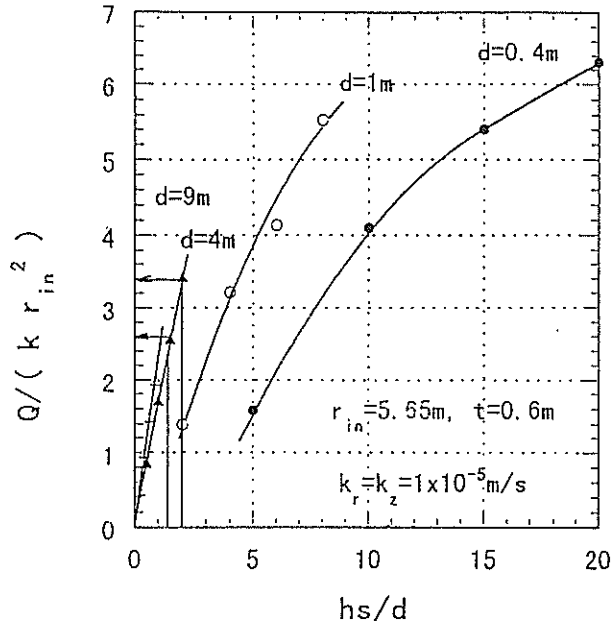


図-11 排水流量と水頭差の関係

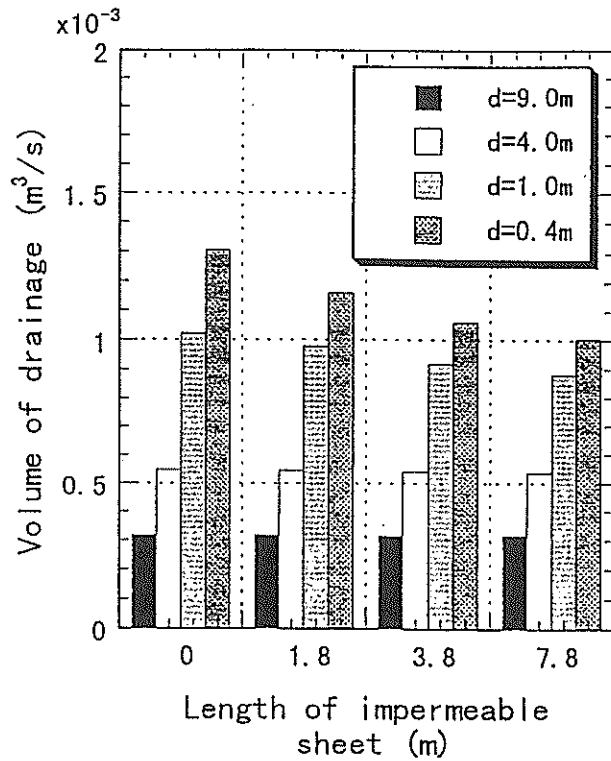


図-13 浸透抑制工の効果

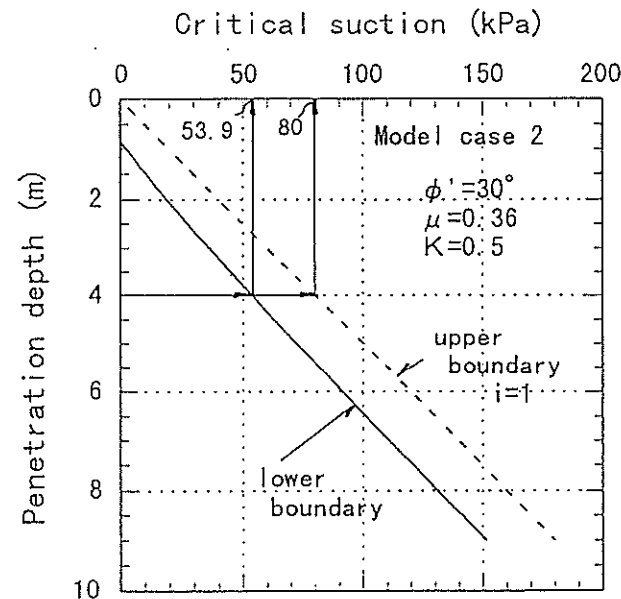


図-12 貫入深さとサクシヨンの関係

4.5 浸透抑制工の効果

実際の沈設施工では、貫入深さが浅く基礎先端部が海底地盤表面付近にあるとき、場合によってはいくら排水を行っても局所的な水筋の発生などで所用のサクシヨンが負荷できなくなる可能性もありうる。このような場合、基礎周辺部からの浸透流を抑止することによって、所用のサクシヨンを発生させることも考えられる。図-13は、海底地盤面に基礎外周を取り巻くドーナツ状の浸透抑制工（不透水膜）を設置した場合の排水流量の低下、すなわち、浸透流量抑止効果について調べた結果である。本解析では、サクシヨンに相当する水頭差 $h_s = 4\text{m}$ として、貫入深さ $d = 0.4\text{m}, 1\text{m}, 4\text{m}, 9\text{m}$ における浸透抑制工の効果調べた。浸透抑制工の長さ（半径方向の幅）は、それぞれの貫入深さに対して、 $0\text{m}, 1.8\text{m}, 3.8\text{m}, 7.8\text{m}$ とした。その他の解析条件は、表-1に示したモデルケース2を対象としている。図-13によると、基礎の貫入深さが深い場合（ $d = 4\text{m}$ および 9m ）、海底面上に浸透抑制工を設けても、所要の排水流量の変化はほとんどない。すなわち、浸透抑制工の効果はほとんど見られない。一方、基礎の貫入深さが浅いとき（ $d = 0.4\text{m}$ および 1m ）には、海底面上に有限長の不透水膜を設けると、不透水膜がない場合に比較して、排水流量は小さくなっており、明らかに浸透抑制効果が現れている。

また、この効果は抑止工長が長いほど大きくなっている。本解析例では、抑止工長が 7.8m の場合、ない場合に比較して排水流量が 77%に低減している。

5. 結 論

本研究では、2 つの解析モデルを設定して、解析手法の検証と 2～3 の事例的な解析を行った。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 沈設時の基礎内部の間隙水圧分布について、円筒座標系を用いた三次元定常浸透流解析から求めた理論値と沈設実験で測定された実測値を比較したところ、両者は良く一致した。

(2) 本解析例では、三次元定常浸透流解析から得られる円筒形基礎の排水流量は、図解法による二次元定常浸透流解析から求められる排水流量に、補正係数として 0.8 をかけた値にほぼ等しくなった。

(3) 本文で示したような排水流量の算定チャートを作成することにより、所要のサクシオンを発生させるために必要なポンプの選定と沈設時の排水流量の制御をより合理的に行うことができる。

(4) 本解析例では、海底面上に浸透抑制工を設けても、基礎の根入れが深い場合、と排水流量はほとんど変化せず抑制効果はみられなかった。しかし、基礎の根入れが浅い場合には、排水流量が小さくなり浸透抑制工の効果がみられた。

6. あとがき

本研究では、サクシオン基礎沈設時に必要となる、強制排水流量に関する解析法およびその検証を行い、また、同解析手法を用いていくつかの知見も得た。今後は、ここで示した解析手法等を、今後得られる施工事例によりさらに精度向上させていく必要があると考えている。

(1998年9月30日受付)

参考文献

- 1) 善功企, 山崎浩之, 館下徹, 佐渡篤史, Per Sparrevik : サクシオン基礎の海底地盤中への沈設実験, 第 39 回土質工学シンポジウム, 平成 6 年度発表論文集, pp.65-72, 1994.
- 2) 大島実 : 真空沈設工法による PC 管式防波堤, 土木施工, 第 3 巻, 第 5 号, pp.13-19, 1962.
- 3) 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.

- 4) 山崎浩之, 善功企, 館下徹 : サクシオン基礎の引抜き抵抗のメカニズムに関する研究, 第 39 回土質工学シンポジウム, 平成 6 年度発表論文集, pp.73-80, 1994.
- 5) 善功企, 山崎浩之, 館下徹, 佐渡篤史 : 波浪による液状化対策に関する二次元模型実験, 第 39 回土質工学シンポジウム, 平成 6 年度発表論文集, pp.81-86, 1994.
- 6) 山崎浩之, 善功企, 前田健一, 小池二三勝 : サクシオン基礎を利用した岸壁の地震時安定性, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 第 2 分冊 pp.905-908, 1997.
- 7) 地下水ハンドブック : 建設産業調査会, 1979.
- 8) 赤坂隆 : 応用数学講座第 7 巻, 数値計算, コロナ社, 1993.
- 9) 井上令作, 岩井勝美 : 砂地盤の海底から筒状基礎を引き抜く際に生じる吸引力, 土木学会論文報告集, 第 253 号, pp.85-93, 1976.