

水平荷重を受けるサクシヨン基礎の安定性 に関する模型実験

MODEL TESTS OF SUCTION FOUNDATION ON STABILITY AGAINST HORIZONTAL LOADS

山崎浩之¹・森川嘉之²・小池二三勝³・矢沢岳⁴

Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA, Fumikatsu KOIKE and Gaku YAZAWA

¹正会員 工修 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 関西国際空港株式会社 建設事務所 (元港湾空港技術研究所)

³九州地方整備局 博多港湾空港整備事務所 (元港湾空港技術研究所)

⁴五洋建設株式会社 敦賀総括工事事務所 (元港湾空港技術研究所研修生)

This paper describes model test results of suction foundations on the stability and the applicability of a proposed design method.

The model tests are conducted by applying static horizontal loads to structures using suction foundation in a soil tank to investigate the performance of suction foundations subjected to horizontal loads. The model test results are also used to examine the design method of the suction foundation. The model tests show the horizontal displacements of the structures using the suction foundation against the horizontal loads become small with the increase of the penetration depth of the suction foundation. And the failure loads estimated by the design method conform to the model test results.

Key Words : Model test, suction foundation, horizontal load, design method

1. はじめに

サクシヨン基礎^{1),2)}は、図-1に示すように根入れを有する基礎である。基礎の根入れは、下面がオープンな函を海底面に据付け、その後函内の海水を吸出して函の内外に水頭差(サクシヨン)を生じさせ、これを押し込み力として行われる。また、函内外の水頭差は海底地盤中に上向き浸透圧を生じさせるので有効応力の低下により地盤の強度が低下し根入れが容易となる。根入れ後は、サクシヨンは開放されサクシヨン基礎は根入れ鋼板セルなどの根入れを有する基礎と同じような機能を持つ基礎となる。

サクシヨン基礎の長所は、①根入れは函内外に水頭差を与えるだけなのでコスト縮減が期待できる。②サクシヨンは大水深ほど函内外の水頭差を大きくでき、また函断面積が大きいほど同じ水頭差でも荷重としては大きくなるので、大水深で大規模な基礎が必要となる場合に有利である。③マウンドなどを用いる従来型基礎と比較すると、海底地盤が軟弱な場合に下部の堅固な層まで根入れができるので地盤改良などが不要である。④根入れがあるので水平荷重に対しては根入れ前面の受働抵抗が期待できる。

⑤基礎に対して引抜きのような外力が作用する場合には根入れ部で負圧(サクシヨン)が発生し抵抗が大きくなる。これは根入れ時に作用させるサクシヨンとは異なり、根入れ後に外力に応じて発生するので第2のサクシヨンといえるものである。サクシヨン基礎は、以上の5つの利点があり海洋構造物基礎として適用性の高いものである。

このようなサクシヨン基礎の設計法の根入れ後の基礎と構造物の安定性に関して模型実験を行い、その妥当性を確認したので報告する。

2. サクシヨン基礎の安定性に関する設計法

サクシヨン基礎の外力に対する設計法は、構造的には異なるが同じように根入れを有する根入れ鋼板セルとニューマチックケーソンの設計法を利用し、外力として波浪を想定した防波堤と、地震力を想定した岸壁に関するものが提案されている^{1),2)}。以下では防波堤について提案されている設計法を概説するが、岸壁との違いは外力の算定だけである。また、現在提案されている設計法では、1章で述べた⑤の

外力に対して発生するサクシオンを無視している。これは、現時点では外力に応じて発生するサクシオンの定量化が難しく、安全側を考慮したからである。したがって、後述の実験は提案設計法の確認を目的としてサクシオンの発生しない乾燥地盤で行った。

(1) 外力と反力算定の考え方

図-1にサクシオン基礎を防波堤の基礎として使用した場合の外力と抵抗力を示す。外力は波力(P_{w1} , P_{w2})、主働土圧(P_{ah} , P_{av})、揚圧力(P_u)、上部構造物の有効重量(W_1')、サクシオン基礎部(内部の土も含む)の有効重量(W_2')である。これに対して反力は、水平地盤反力(P_{ph} , P_{pv})、サクシオン基礎底面でのせん断力(Q)、鉛直地盤反力(q_1 , q_2)である。

有効重量を除く外力および反力は適切な算定式を用いて求める必要がある。外力のうち、海底地盤より上の波力については合田式³⁾が適用でき、地盤中の波力については合田式から算定された海底面での波力を指数関数で深さ方向に低減させ、揚圧力はサクシオン基礎先端の波力を三角形分布で港内側に低減させて求める。これらの外力が波浪時に作用することは水路実験で確認されている⁴⁾。主働土圧はクーロン土圧に基づく港湾基準³⁾の算定式を用いる。

上記外力に対して反力は、根入れ鋼板セルの設計法³⁾を利用して地盤を地盤バネで置き換えて、受働抵抗(水平地盤反力)、基礎底面でのせん断力と鉛直地盤反力を算出する。受働抵抗についてはクーロン土圧に基づく受働土圧を上限値とする。

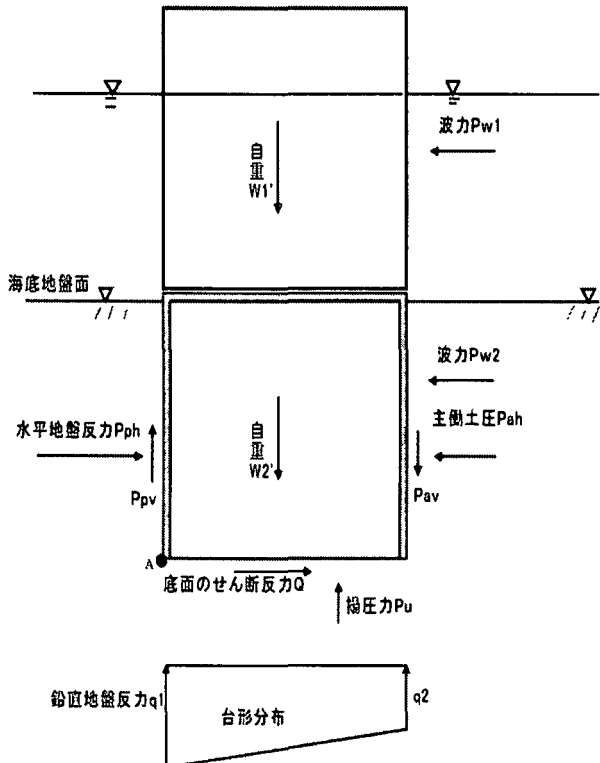


図-1 サクシオン基礎に作用する外力と反力

(2) 安定性の検討

安定性の検討は上記(1)で求めた外力と反力を用いて、a)滑動、b)転倒、c)支持力、d)偏心傾斜荷重、e)基礎中詰め抜け出し、f)地盤全体の安定、の6つについて以下のように安全率を算出して行う。

a) 滑動

滑動に関する安全率 F は下式で算定される。

$$F = R_f / Q \quad (1)$$

$$V = W_1' + W_2' + P_{av} - P_{pv} \quad (2)$$

$$R_f = \mu \cdot V \quad (3)$$

ここに、 μ は基礎底面での摩擦係数である。安全率 F が1.2以上を確保されれば安定であると判断する。

b) 転倒

転倒に関する安全率 F は下式で算定される。

$$F = M_r / M_d \quad (4)$$

ここに、 M_r は図-1で示される有効重量 W_1' 、 W_2' 、受働抵抗 P_{ph} 、主働土圧の鉛直成分 P_{av} によるサクシオン基礎端し(点A)に関する抵抗モーメントである。 M_d は、波力 P_{w1} 、 P_{w2} 、主働土圧の水平成分 P_{ah} および揚圧力 P_u によるサクシオン基礎端し(点A)に関する転倒モーメントである。転倒に対しては安全率 F が1.2以上を満足していれば安定であると判断する。

c) 支持力

支持力係数から算定した許容支持力 q_a が図-1の底面反力 q_1 より大きいことを確認する。許容支持力 q_a は砂質土、粘性土について下式で求める。

$$q_a = (\beta \cdot \gamma_1' \cdot B \cdot N_{\gamma} + \gamma_2' \cdot d \cdot N_q) / F_t \cdot \gamma_2' \cdot d : \text{砂質土} \quad (5)$$

$$q_a = N_{c0} \cdot (1.0 + n \cdot B/L) \cdot c_d / F_t \cdot \gamma_2' \cdot d : \text{粘性土} \quad (6)$$

ここに、 β と n は形状係数、 γ_1' と γ_2' はそれぞれ基礎底面下および上の土層の有効単位体積重量(kN/m^3)、 B 、 L および d はサクシオン基礎の最小幅(m)、長さ(m)および根入れ深さ(m)、 c_d は基礎底面における非排水せん断強さ(kN/m^2)、 N_{γ} 、 N_q および N_{c0} は支持力係数である。各係数は港湾基準に示されている。また、安全率は波浪時に $F=1.5$ を用いる。

d) 偏心傾斜荷重

偏心傾斜荷重に関する検討では、図-1の地盤反力分布(q_1 、 q_2)、せん断力(Q)に対して基礎底面下の地盤が安定であるかを港湾基準の簡易ビショップ法を用いた方法により検討し、安全率が1.0以上であることを確認する。この場合、基礎底面より上部の土の土被りは上載圧として考慮される。

e) 基礎中詰め抜け出し

サクシオン基礎は基礎底面が閉じていないため、基礎内部の土が抜け出す可能性があり、港湾基準のセルラブロックの設計法を参考に検討する。

f) 地盤全体の安定

地盤が軟弱な場合には地盤全体について港湾基準の修正フェレニウス法による円弧すべり解析を常時について行い、安全率1.3以上を確認する。

以上を検討するが、基礎中詰め抜け出しと、地盤全体の安定については、今回の実験では安全率が満足されていたので以降では省略する。なお、地盤バネを用いるので実設計では変形量が算出でき変形量の照査を行うが、本報告では検討しない。

3. 模型実験

模型実験はサクシオン基礎の基本特性と2章の検討法が妥当であるかを把握するための基本的実験として行った²⁾。模型実験は実大の対象構造物について相似則を考慮してなされることがあるが、ここでは相似則には注意を払わず、設計法の検証の観点から、模型を小さな実物として以下のように考えた。

2章で示された設計法は、サクシオン基礎部の根入れ長がゼロとなった場合には重力式構造物に関する既存設計法³⁾と同じものになる。重力式構造物に関する既存設計法は既に現場での実績が多くあり適用性が確認されたものである。そこで、模型実験ではサクシオン基礎の根入れが無い場合の実験も行っておき、滑動、転倒、支持力、偏心傾斜荷重に関する安全率などについて根入れのある実験結果と不整合がなければ、模型実験ではあるが設計法は妥当性があると判断できると考えた。

(1) 実験方法

a) 模型および模型地盤の作成

模型地盤は図-2に示された土槽(高さ60cm, 奥行き40cm, 長さ200cm)内に、乾燥状態の豊浦砂をホッパーからパイプの先端と地盤面が常に15cmを保つようにして落下させる空中落下法により作成されている。このような方法で相対密度が $D_r=40\%$ (単位体積重量 $\gamma_d=14.5\text{kN/m}^3$)の乾燥地盤となった。

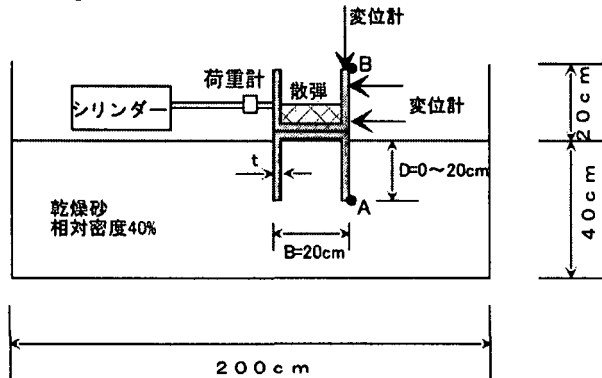


図-2 模型実験概要図

サクシオン基礎部の下端の高さまで地盤が作成されたところで模型サクシオン基礎を設置する。模型は幅 $B=20\text{cm}$ の矩形形状のものが3つ用意され、その内2つは計測対象とする中央の基礎の両脇にダミーとして設置される。ダミーは土槽の前面と背面の摩擦の影響を低減するためのものである。中央に設置される模型基礎は奥行き10cm, 両端のダミーは14.5cmである。基礎の高さ(根入れ長)は $D=0, 5, 10, 20\text{cm}$, 壁厚は $t=0.6, 1.9, 10\text{cm}$ のものが実験ケースに応じて用いられる。ここで、 $t=10\text{cm}$ のものは実際に基礎の壁厚が10cmあるのではなく、基礎底面が閉じた状態であることを意味する。

サクシオン基礎設置後、基礎外部に豊浦砂を基礎の上端まで投入する。基礎外部の地盤作成完了後、

ハンドスコップで基礎内部に基礎外部と密度が等しくなるように豊浦砂を充填する。なお、壁厚 $t=10\text{cm}$ の基礎底面を閉じたものには、豊浦砂は入っていない。基礎内土の充填完了後、上部構造物(堤体)を設置した。上部構造物には載荷用のジャッキを取り付け、また、各実験ケースでの必要重量になるように散弾(鉛玉)を入れて調整した。

b) 実験ケース

表-1に示される9ケースの実験を行った。サクシオン基礎部と上部構造物の総重量(ダミーの模型も含む)はケースS1~S7では $W=0.98\text{kN}$ で、ケースS8, S9では $W=0.52\text{kN}$ である。ここで、基礎底面が開いているケースS3, S4, S6, S7, S9は総重量に基礎内土の重量を含ませていない。水平荷重の載荷点はケースS7を除き地表面から $h=10\text{cm}$ の高さ、ケースS5では $h=20\text{cm}$ とした。またケースS7は、根入れ時に根入れ比1/1を目標としたが根入れ比1/2で高止まりした場合を想定したもので、そのため基礎内部の上半分(地盤面より上)は空洞となっている。

表-1 静的水平載荷試験ケース一覧

ケース	根入れ 比 D/B	肉厚比 t/B	総重量 W' (kN)	載荷高さ h (cm)
S1	0	1/2	0.98	10
S2	1/1	1/2	0.98	10
S3	1/1	1/10	0.98	10
S4	1/1	1/40	0.98	10
S5	1/4	1/2	0.98	10
S6	1/4	1/10	0.98	10
S7	1/2	1/10	0.98	20
S8	1/1	1/2	0.52	10
S9	1/1	1/40	0.52	10

c) 載荷・計測

荷重は図-2に示されるように荷重制御で水平に載荷し、ケースS1~S7では単位奥行き 0.1kN/m , ケースS8, S9では 0.05kN/m の荷重増分で荷重がピークになるまで静的に行った。ピーク荷重はケースS1~S7ではおおよそ 1.5kN/m , ケースS8, S9では 1kN/m で、ピークまでの載荷ステップ数は約20であった。

計測は図-2に示されるように、載荷点での水平荷重をロードセルで、上部構造物天端における載荷側および反対側の鉛直変位、地表面から3cmと20cmでの上部構造物の水平変位を変位計で測定した。

(2) 実験結果

a) 水平変位と鉛直変位の関係

図-3に構造物上部およびサクシオン基礎端し部での鉛直変位と水平変位の関係を示す。ここで、構造物上部とは構造物前面側で地盤面から20cmの位置(図-2中のB点)、サクシオン基礎端し部とは基礎前面側の下端(図-2中のA点)である。

図-3(a)から、構造物上部での変位は、水平変位の方が鉛直変位よりも卓越している。また、根入れ比 $D/B=1/2$ を除くと、根入れ比が大きなものほど同じ鉛直変位に対して水平変位は小さくなっている。

図-3(b)から、基礎端し部での変位も根入れ比が大きくなると水平変位の卓越度が小さくなり、その傾向は図-3(a)よりも顕著である。根入れ比が $D/B=1/1$ と $1/2$ においては鉛直変位の方が水平変位よりも大きくなっており、特に $D/B=1/1$ のケースでは水平変位が負の方向に発生している。

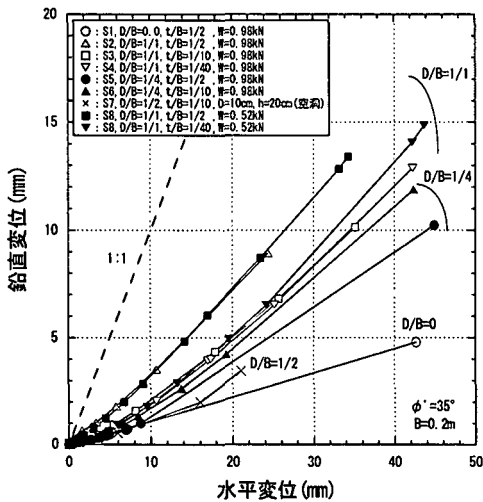


図-3(a) 水平変位と鉛直変位関係 (図-2のB点)

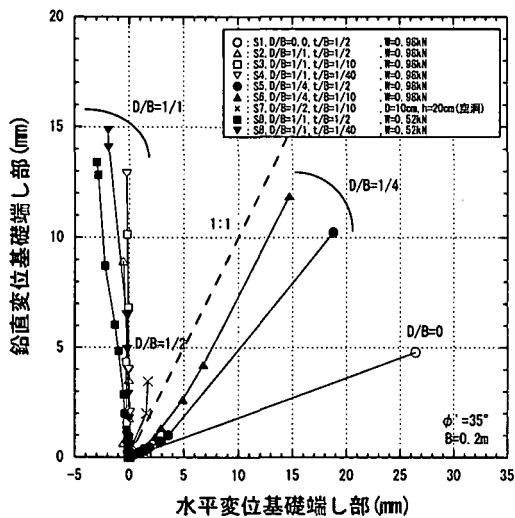


図-3(b) 水平変位と鉛直変位関係(図-2のA点)

以上から、上部構造物-サクシオン基礎の水平荷重に対する変位は、根入れ比が大きくなると水平変位が抑制され回転成分が大きくなり、滑動から転倒のモードに変わると思われる。

b) 水平荷重と合成変位の関係

図-4に水平荷重(単位奥行)と合成変位の関係を示す。合成変位は、構造物上部(図-2中のB点)での水平変位と鉛直変位のベクトル和の大きさで、次式で定義している。

$$w = ((u)^2 + (v)^2)^{0.5} \quad (7)$$

ここに、 w は合成変位、 u は水平変位、 v は鉛直変位である。合成変位には構造物上部での鉛直変位と水平変位の両方が反映されており、合成変位は構造物の変位を代表した量と位置づけることができる。

図-4から、水平荷重に対する合成変位はケースごとに異なっており、根入れ比、構造物重量、基礎内土の状態などの各要因により破壊荷重が異なっていることがわかる。全体の傾向としては、基礎の根入れが大きく構造物重量が大きなものほど大きな水平荷重に抵抗できることは明らかといえる。

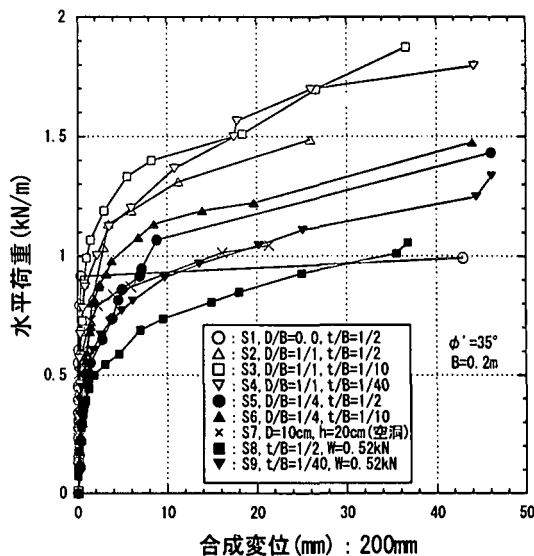


図-4 水平荷重と合成変位の関係

4. 考察

ここでは、模型を小さな実物とみなし、2章で示した安定性に関する設計法を3章の模型実験結果に適用し設計法の妥当性を検討する。

(1) パラメータ (地盤定数)

検討に必要なパラメータは模型地盤の単位体積重量 γ' 、せん断抵抗角 ϕ' 、地盤反力係数、基礎底面と地盤の摩擦係数 μ である。

地盤の単位体積重量は $\gamma' = 14.5 \text{ kN/m}^3$ を用いた。

地盤反力係数については、根入れ鋼板セルの設計法に準拠することになる。しかし、ここでは地盤反力係数の値を非常に小さなものに設定し、変位量の絶対値は議論しない。地盤反力係数の値は変位量の絶対値には大きく影響するが、ここで対象とする滑動などの安定性の検討にはほとんど影響しない。

実際の設計ではせん断抵抗角は、偏心傾斜荷重を検討するBishop法では M 値が10以下では $\phi' = 40^\circ$ 、10以上では $\phi' = 45^\circ$ が用いられる。許容支持力による検討では M 値と ϕ' の関係式から算出される。壁面に作用する主働土圧と受働土圧の算出では $\phi' = 30^\circ$ 、良好な裏込めがある場合には $\phi' = 40^\circ$ が用いられる。このように、検討項目ごとに用いられるせん断抵抗角 ϕ' の値は異なっている。せん断抵抗角は、本来は材料が定まれば検討項目ごとに異なるものではない。実設計で用いられるせん断抵抗角が検討項目により異なるのは、現場では各検討項目で用いられる算定式などに実際と異なる不確定要因があり、これ

らを調整するためと思われる。今回の模型実験の解析では、基本的に三軸試験から得られたせん断抵抗角を用いることにした。この理由は模型実験が管理された状況で行われており、現場での不確定要因などが少ないと判断したからである。そこで、三軸試験を行ったところ $\phi'=35^\circ$ が得られたが、ここで、支持力に関しては寸法効果が指摘されており、模型実験のように基礎幅が小さくなると支持力係数は実物のもより大きくなる。木村ら⁵⁾の報告を参考に、今回の模型実験での基礎幅 $B=20\text{cm}$ に対しては、支持力係数を2倍程度大きくすることにした。港湾基準で採用されている支持力係数とせん断抵抗角の関係図によると $\phi'=35^\circ$ に対する支持力係数は $N_s=25$ 、 $N_q=25$ であったが、2倍の値の $N_s=50$ 、 $N_q=50$ を解析で用いた。 $N_s=50$ 、 $N_q=50$ に対応するせん断抵抗角は $\phi'=38^\circ$ である。Bishop法を用いる偏心傾斜荷重の検討についても同じように寸法効果の影響を受けると考え、 $\phi'=38^\circ$ を用いることにした。

基礎底面と地盤の摩擦係数は、 $\mu=0.6$ (底面閉)、 $\mu=0.7=\tan 35^\circ$ (底面開)とした。

以上のようにパラメータを設定した。

(2) 変位と安全率の関係

滑動、転倒、許容支持力、偏心傾斜(Bishop法)に関する安全率と変位の間を調べる。各安全率と変位の間はそれぞれの安全率に関する破壊モードに対応するものを選択し、滑動については基礎端し部の水平変位、転倒については傾斜角、許容支持力については基礎端し部での鉛直変位、偏心傾斜荷重については合成変位との関係を図-5にそれぞれ示す。

図-5(a)は滑動安全率と水平変位の関係を示したものである。なお、図-5(a)にはケースS1, S5~S7以外のものはプロットされていないが、これは受働抵抗が大きくなり基礎下端で発揮される水平抵抗力(せん断力)が水平荷重と同じ方向に作用するという計算結果が得られ、滑動の検討に対し意味がなかったためである。破壊モードが滑動であれば、滑動安全率が1.0のところでは大きな水平変位が発生すべきであるが、図-5(a)ではいずれのケースもそのようにはなっていない。しかし、ケースS1, S5, S6は滑動安全率が1.5程度になったところで急激に大きな水平変位が発生しており、滑動安全率との関係はややありそうである。

図-5(b)は転倒安全率と傾斜角の関係を示したものである。なお、転倒安全率が1.0以下のプロットがないが、これは転倒安全率が1.0以下の外力については計算が不能になるからである。図-5(b)から転倒安全率が小さくなると傾斜角は大きくなっていくが、転倒安全率と傾斜角の関係は3つのグループに分かれていることがわかる。ケースS1は転倒安全率が2.6付近で急激に大きな傾斜角となり、ケースS5とS6は転倒安全率が2.0付近から傾斜角が大きくなり始め1.5付近で大きな傾斜角になっている。ケースS2~S4, S7~S9では転倒安全率が1.3付近で

傾斜角は大きくなり始め $F=1.0$ ではかなり大きな傾斜角になっている。したがって、ケースS2~S4, S7~S9は、転倒安全率で破壊が説明できるが、それ以外のケースについては説明できないといえる。

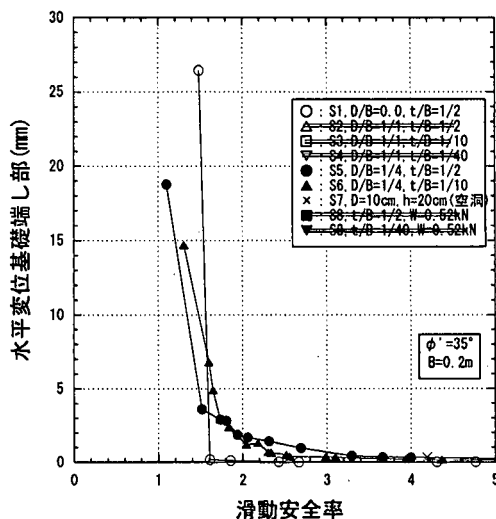


図-5(a) 滑動安全率と基礎端し部水平変位関係

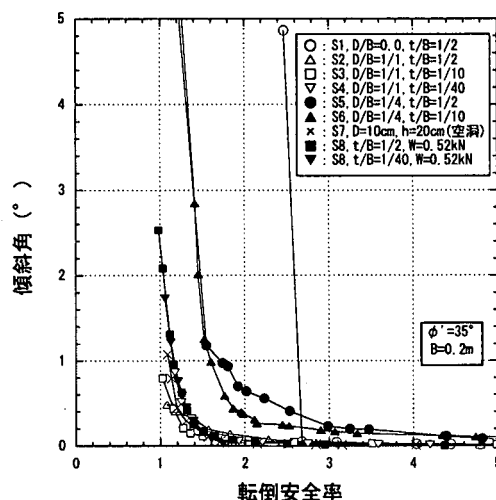


図-5(b) 転倒安全率と傾斜角の関係

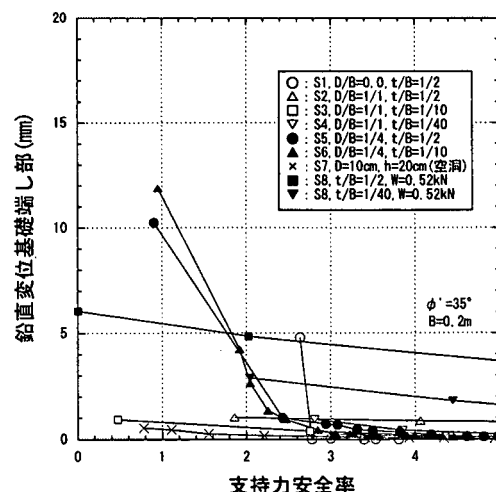


図-5(c) 支持力安全率と基礎端し部鉛直変位関係

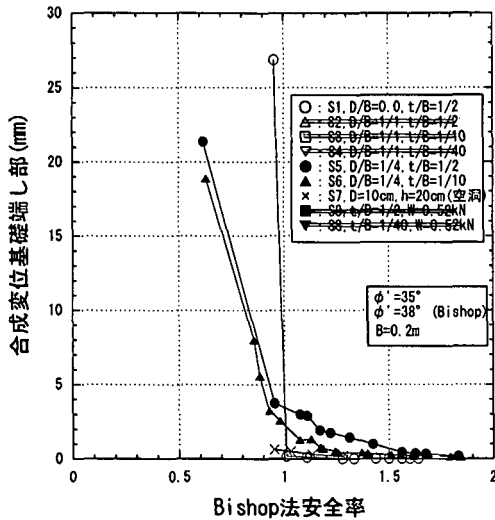


図-5(d) Bishop安全率と基礎端し合成変位関係

図-5(c)は支持力安全率と基礎端し部での鉛直変位の関係を示したもので、ケースS5, S6は支持力安全率の低下とともに変位が徐々に大きくなり支持力安全率と変位の間に有為な関係が見られるが、それ以外のものは有為な関係は見られない。また、ケースS5, S6においても変位が大きくなり始めるのは支持力安全率が1.0付近ではなく、変位の発生状況と安全率の関係は良いとはいえない。したがって、各ケースの破壊は許容支持力では説明できない。

図-5(d)はBishop法による偏心傾斜荷重に対する安全率と基礎下端での合成変位の関係を示したものである。なお、図-5(d)にはケースS1, S5, S6以外のもはプロットしていない。これは、Bishop法による検討は、荷重傾斜率が0.1以上に対して行われるものであり、荷重傾斜率が0.1以下のものはプロットしなかったためである。図-5(d)からケースS1, S5, S6はBishop法による安全率1.0あたりで大きな合成変位が発生している。このことから、ケースS1, S5, S6は偏心傾斜荷重による破壊としてBishop法で説明できるといえる。

以上からケースS1, S5, S6は偏心傾斜荷重による破壊で、ケースS2~S4, S7~S9は転倒で破壊したと考えられる。ケースS2~S4, S7~S9は根入れが大きいため、3章の(2)で述べた、根入れが大きくなると転倒モードになるという実験結果と整合する。

(3) 正規化荷重と合成変位の関係

図-6は正規化荷重と構造物上部の合成変位の関係を示したものである。正規化荷重は水平荷重を設計荷重で除したもので、設計荷重は前述(2)での滑動安全率、転倒安全率、Bishop法による偏心傾斜荷重に対する安全率のいずれかが1.0となった時の水平荷重で、荷重-変位関係から定めたものではない。ここで、実設計での滑動等の安全率は2章で示したとおりであるが、これらは不確定要因を考慮するためのもので、本実験は管理された状況で行われており、安全率を1.0に設定し設計荷重を算定した。ま

た、本実験では(2)で述べたように許容支持力による安全率は変位との関係が悪かったので無視した。その結果、転倒と偏心傾斜荷重で設計荷重は定まった。

図-6から設計荷重で水平荷重を正規化することにより水平荷重と合成変位の関係は、図-4よりもユニークな関係になり、正規化荷重が0.8~1.2の付近で合成変位は急増している。したがって、外力、地盤条件などが単純化された模型実験に対する検討ではあるが、提案設計法は妥当であるといえる。

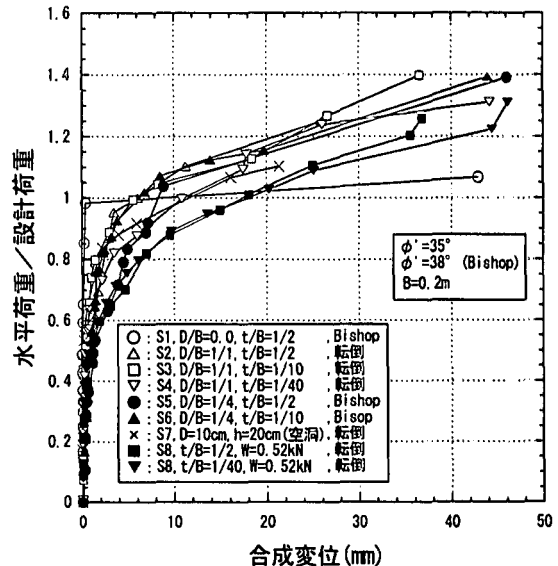


図-6 正規化荷重と合成変位(許容支持力無視)

5. 結論

- ①サクシオン基礎の根入れが大きくなると、破壊モードが滑動的なものから転倒的なものになる。
- ②根入れを大きくすることにより安定性が増す。
- ③提案設計法は模型実験結果を妥当に説明しており、大きな問題は無い。

謝辞：本報告の一部は、港空研、九州大学、沿岸開発技術研究センターおよび民間20社による共同研究の成果で、北陸地方整備局のご協力もいただいた。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：サクシオン基礎構造物設計・施工マニュアル(案)，国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所，2001。
- 2) 山崎浩之，森川嘉之，小池二三勝，出野 雅和，矢沢 岳：サクシオン基礎構造物の安定性に関する模型実験，港湾空港技術研究所報告，第24巻第1号，2003。
- 3) 運輸省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999。
- 4) 下迫健一郎，中川将秀，黒田豊和，藤原隆一：サクシオン基礎防波堤の耐波安定性に関する水理模型実験，港湾空港技術研究所資料，No.1027，2002。
- 5) 木村孟，藤井齊昭，齊藤邦夫，日下部治：砂中の浅基礎の支持力に関する研究，土木学会論文報告集，pp.97-104，1982。