

引抜きに対するサクシヨン基礎の 支持力特性に関する研究

THE RESERCH ON CHARACTERISTIC OF BEARING CAPACITY OF THE SUCTION FOUNDATION OVER DRAWING-OUT

伊藤達也¹・善功企²・陳光齊³

笠間清伸⁴・平松浩三⁵

Tatsuya ITO, Kouki ZEN, Guangqi CHEN
Kiyonobu KASAMA, Kouzou HIRAMATSU

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

²フェロー会員 九州大学大学院工学研究院 教授

³正会員 九州大学大学院工学研究院 助教授

⁴正会員 九州大学大学院工学研究院 助手

⁵正会員 九州大学大学院工学研究院 助手

(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1工学研究院共同研究棟2階防災地盤工学研究室)

Suction foundation is a new type of foundation for offshore structures. It forms like a tea caddy. It is built by installing hollow cylindrical caisson upside-down, into sea bottom, and carrying out forcible drainage of the internal water using a pump after the inner side of foundation is sealed by the submarine side. The difference of water pressure (suction) between inner and outer side of caisson and it will use this suction force as pushing power into the ground. Using suction foundation is useful for working term and constructing cost.

This study pays attention to the characteristics of bearing capacity of the suction foundation over drawing-out, and bearing capacity formula.

Key Words : Suction, Foundation, Model test, drawing-out, bearing capacity

1. はじめに

サクシヨン基礎¹⁾とは、中空円筒状のケーソンを逆さまにして海底地盤上に設置し、基礎内部が海底面によって密閉されたところで、ポンプを使って内部の水を強制排水することによって発生する、基礎内外の水圧力差(サクシヨン)を押込力として利用し、ケーソン等を海底地盤中へ根入れするものである。サクシヨン基礎の特徴として、施工時には、サクシヨン力を利用することにより押込力が増加すること、強制排水によって発生する浸透流により基礎の先端抵抗が減少すること、大水深への適応性が容易であること、などが挙げられます。さらに、沈設後においては、根入れを有することによって滑動抵抗に対して安定性を示すこと、引抜き荷重に対してサク

シヨンを引抜き抵抗として利用できるということ、などが挙げられ、既存の基礎と比較して優れた点が多い。

しかし、現在まで実際に施工されたサクシヨン基礎の事例は少なく、その支持力特性については解明されていない点が多いのが現状である。

我々の研究グループでは、これまでサクシヨン基礎の鉛直支持力に関する実験的な研究を行い、基礎に鉛直荷重が作用する場合の支持力算定方法については解明されてきている。²⁾

本研究では、粘土地盤に設置されたサクシヨン基礎の引抜き抵抗に着目し、粘土地盤の条件、基礎の開口率($(r_{in}/r_{out})^2$)、根入れ幅比(D/B)および引抜き速度(mm/s)を変化させた引抜き試験を行った。得られた結果をもとに、粘土地盤の粘着力、サクシヨン基礎の形状や引抜き速

度が、支持力特性に与える影響を評価し、引抜き時の地盤の破壊モードとの関連性を考察した。そして、支持力公式を導出し理論値と実験値との比較を行った。

2. 実験概要

(1) 模型地盤

模型粘土層は、高さ400mm、直径270mmとし、試料には宇部港粘土を用いて実験を行った。

粘土地盤の作成方法は、過圧密地盤の場合、含水比130%に調整し、十分に攪拌した粘土を、エアシリンダーを用いて、含水比100%になるまで圧密させた。また、未圧密地盤の場合、粘土地盤を含水比100%および130%に調整し、攪拌器において一様になるまで十分に攪拌し、その後1時間放置した。

表-1 粘土地盤の物性値

	含水比(%)	粘着力(kN/m ²)
未圧密地盤	100	1.57
	130	1.14
過圧密地盤	100	3.49

(2) 模型基礎

本実験で用いた模型基礎は、新潟県直江津港の実証実験で用いられたプロトタイプの外径の1/200モデルとした。そのため、模型基礎の基礎幅(B)は100mmとした。基礎の内径を外径で除した内外径比(r_{in}/r_{out})を二乗した、開口率(r_{in}/r_{out})²と根入れ長(D)を基礎幅で除した根入れ幅比(D/B)の影響を調べるため、開口率0の中実基礎と開口率0.25,0.64,0.99のサクション基礎で、各々の根入れ幅比0.37の浅い基礎と、1.1の深い基礎である計8体を用いた。

(3) 実験方法

本実験では、地盤の作成後、粘土層の上に100mmの水を張り、模型基礎をゆっくりと設置した。基礎設置30分後、引抜き試験を行った。試験時は、模型基礎を定速度で引き上げ、引抜き抵抗力、引抜き量および間隙水圧を測定した。引抜き後、模型基礎に付着した試料状況を観察し地盤の破壊モードを調べた。

(4) 実験ケース

粘土地盤については、未圧密地盤および過圧密地盤について行った。未圧密地盤についてはさらに、含水比100%、130%について行った。模型基礎は、開口率0（中実）、0.25、0.64、0.99と根入れ幅比0.37、1.1の模型基礎を用いて行った。また、引抜き速度は25、50、200(mm/s)に変えて行った。

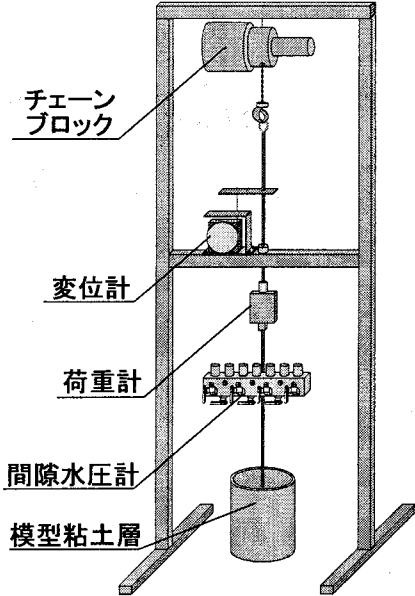


図-1 実験装置概略図

3. 実験結果および考察

(1) 引抜き抵抗力の推移

未圧密地盤、含水比130%、根入れ幅比1.1、開口率0.64、引抜き速度50mm/sのケースの引抜き抵抗力の推移を図-2に示した。ここで、横軸には引抜き時の変位を基礎幅で割って、正規化した値を用いた。

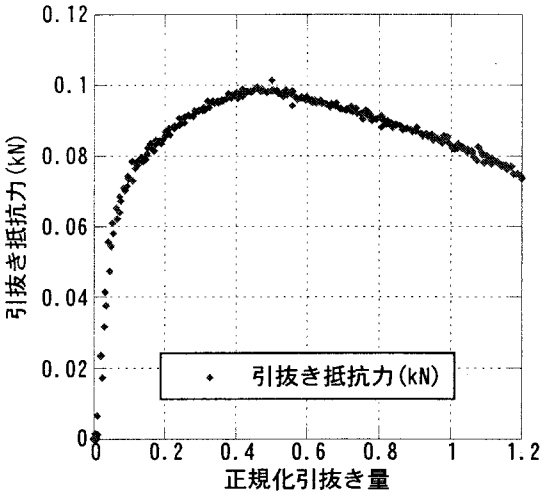


図-2 引抜き抵抗力の推移

引抜き直後、引抜き抵抗力は急激に増加している。そして、正規化引抜き量0.5付近でピークに達した。以下では、このピーク時における最大値を、基礎の断面積で割り応力とした値を、引抜き強度として用いる。今回の実験において、基礎の断面積はすべて一定で、外直径100mmである。

次に、粘土地盤の圧密の有無が及ぼす影響を調べるために、含水比100%、根入れ幅比1.1、開口率0.994、引抜き速度50mm/sのケースにおける引抜き抵抗力の推移を、過圧密地盤、未圧密地盤ともに、図-3に示した。

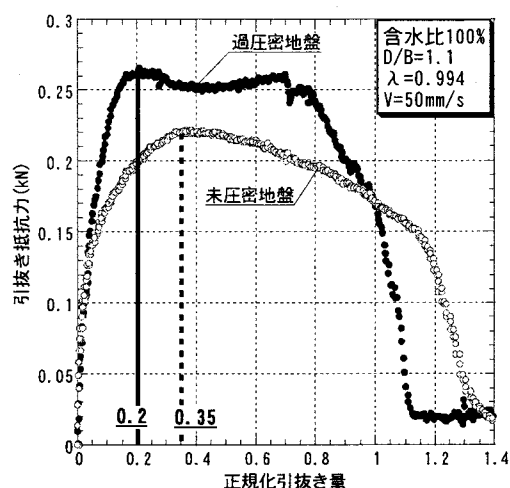


図-3 引抜き抵抗力の推移の比較

引抜き抵抗力は、未圧密地盤に比べ、過圧密地盤の方が全体的に大きく発生していた。さらに、引抜き抵抗力の最大値は、過圧密地盤より1.2倍大きく発生していた。また、推移については、引抜き直後、両結果とも引抜き抵抗力は急激に発生している。過圧密地盤の場合、正規化引抜き量が約0.2でピークに達した。しかし、未圧密地盤の場合、引抜き抵抗力は約0.35でピークに達した。これは、サクシオン基礎の引抜き時の破壊モードが、粘土地盤の圧密の有無で変化することを示唆している。

(2) サクシオンの推移

未圧密地盤、含水比130%、根入れ幅比1.1、開口率0.64、引抜き速度50mm/sのケースの引抜き抵抗力の推移を図-4に示した。ここで、図中のグラフに示されている数値は、設置状態における地表面からの深度を表している。

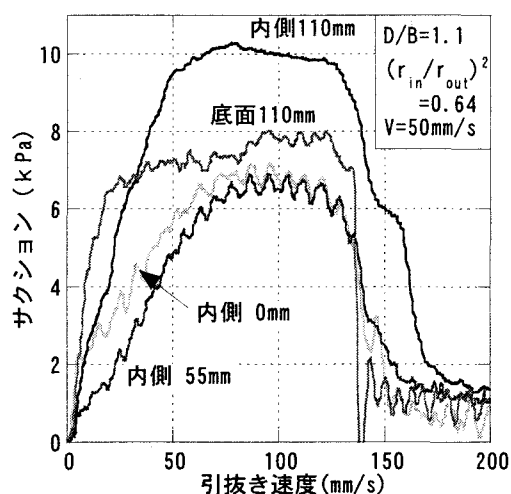


図-4 サクシオンの推移

引抜き直後、サクシオンは急激に増加している。しかし、間隙水圧計の設置位置によって、ピークに達する正規化引抜き量は異なった。

(3) サクシオンの発生分布

図-5に、未圧密地盤、含水比130%、根入れ幅比1.1、開口率0.64、引抜き速度50mm/sのケースの、サクシオンの発生分布を示した。

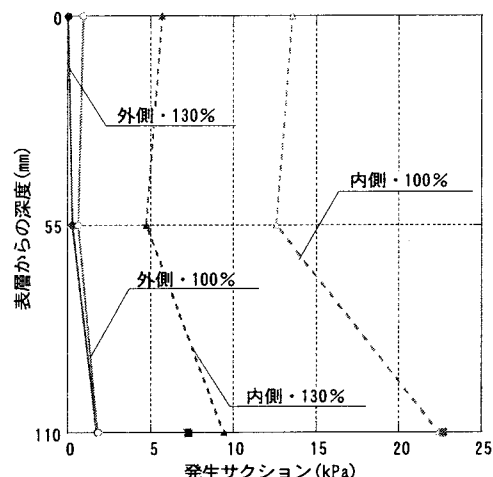


図-5 サクシオンの発生分布

含水比100%、130%ともに、基礎の外側に比べ内側において、大きくサクシオンが発生した。また、基礎の下部においてより大きなサクシオンが発生した。含水比130%と100%を比較すると、外側ではほぼ等しくなり、内側では含水比100%のほうが大幅に大きくなった。これより、含水比が変わると内側のサクシオンが大きく変化し、基礎の引抜き強度に影響を与えていると考えられる。

(4) 粘土地盤の含水比と引抜き強度の関係

図-6に、未圧密地盤、根入れ幅比1.1、引抜き速度50mm/sにおける、粘土地盤の含水比と引抜き強度の関係を示した。

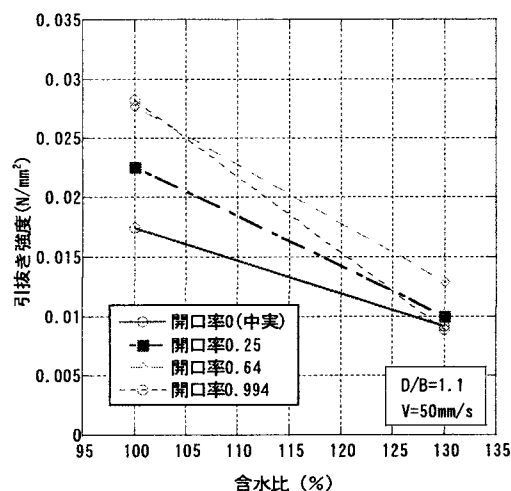


図-6 含水比と引抜き強度の関係

含水比が上がると、引抜き強度は全体的に大きくなる。このとき、開口率0.994の場合の減少の程度が、最も大きくなった。

(5) 引抜き速度と引抜き強度の関係

図-7に、含水比100%、開口率0.994のケースにおける、引抜き速度と引抜き強度の関係を示した。

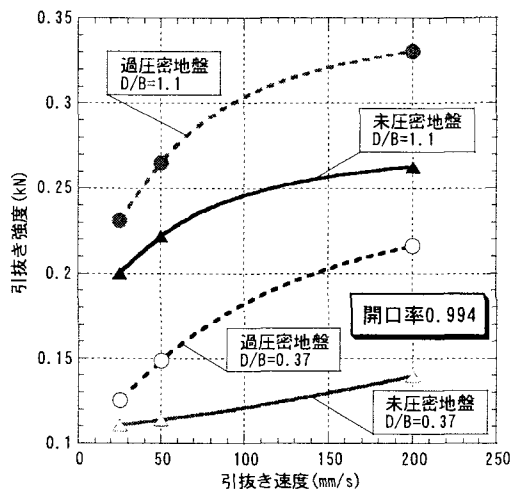


図-7 引抜き速度と引抜き強度の関係

引抜き速度が大きくなるにしたがい、引抜き強度が大きくなる。これは、引抜き速度が大きくなると、排水時間が短くなりサクシヨン基礎内外に発生するサクシヨンの消散が小さくなり、大きなサクシヨンが発現するためと考えられる。また、未圧密地盤の結果と過圧密地盤の結果とを比較すると、引抜き強度は、過圧密地盤の方がかなり大きくなる傾向にある。さらに、引抜き強度の増加率は、未圧密地盤の結果に比べ、過圧密地盤の結果の方が大きくなる傾向にあった。

(6) 開口率と引抜き強度の関係

図-8に、未圧密地盤、引抜き速度50mm/sにおける、開口率と引抜き強度の関係を、引抜き強度を中実基礎の値で正規化して示した。

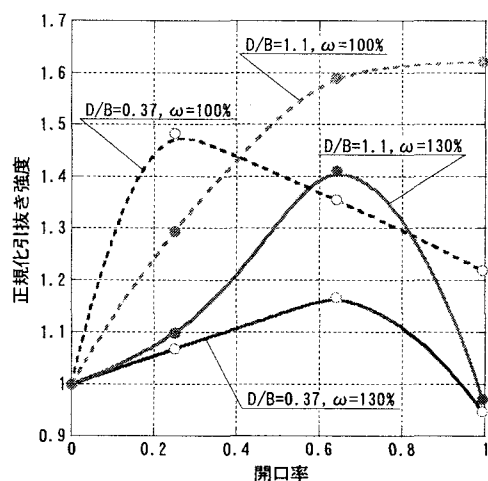


図-8 開口率と引抜き強度の関係

含水比130%のときは、根入れ幅比0.37, 1.1ともに、開口率0.64付近でピークが現れた。しかし、中実基礎に対する増加率は、根入れ幅比1.1のほうが大きくなった。含水比100%のときは、根入れ幅比の違いにより傾向が異なり、

根入れ幅比0.37は開口率0.3付近でピークが現れたが、根入れ幅比1.1ではピークは現れなかった。これより、サクシヨン基礎には、引抜き強度が最も大きくなる開口率が存在することがわかる。

(7) 引抜き時の地盤の破壊モード

図-9に示すように、破壊モードとして、基礎本体のみが地盤から抜け上がる場合(モードA)と、基礎内の粘土も同時に抜け上がる場合(モードB)、基礎先端にくさび状の粘土が形成される場合(モードC)の3つの破壊モードが考えられる。ただし、実験では、モードBで引抜き抵抗力がピークとなり、ピーク後に粘土が脱落した可能性も考えられる。

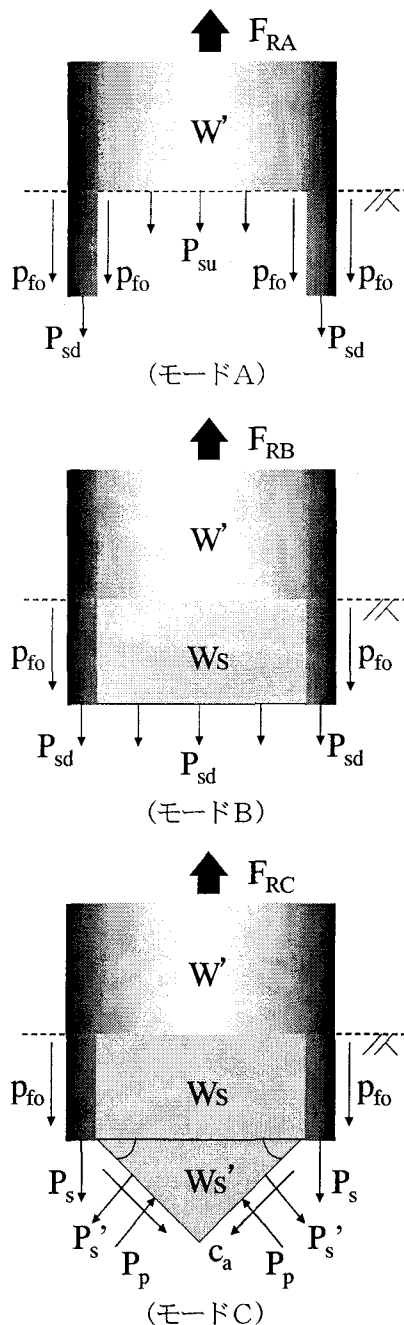


図-9 破壊モード概念図

ここに、 F_{RA} , F_{RB} , F_{RC} : モードA,B,Cの引抜き強度
 p_s , p_d : 各面に作用するサクシオン, p_{fo} , p_{fi} : 基礎外面
 および内面の周面摩擦, W' : 基礎の有効重量, W_s : 基礎
 内部の試料の有効重量, c : 粘着力である。

表-2 破壊モードの結果

(未圧密, 含水比100%, 根入れ幅比0.37)				(未圧密, 含水比100%, 根入れ幅比1.1)			
開口率 V	25	50	200	開口率 V	25	50	200
0.25	A	A	B	0.25	B	B	B
0.64	A	B	B	0.64	B	B	B
0.99	B	B	B	0.99	B	B	B

(未圧密, 含水比130%, 根入れ幅比0.37)				(未圧密, 含水比130%, 根入れ幅比1.1)			
開口率 V	25	50	200	開口率 V	25	50	200
0.25	A	A	A	0.25	B	B	B
0.64	A	B	B	0.64	B	B	B
0.99	B	B	B	0.99	B	B	B

(過圧密, 含水比100%, 根入れ幅比0.37)				(過圧密, 含水比100%, 根入れ幅比1.1)			
開口率 V	25	50	200	開口率 V	25	50	200
0.99	C	C	C	0.99	B	C	C

破壊モードと引抜き強度の関連性を検討すると、モードAと判断されたときの引抜き強度は、比較的小さく発生している。また、モードAと判断されたケースの引抜き強度は含水比100%と130%とでは違いが生じており、含水比が破壊モードに影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

(8) 引抜き抵抗力の支持力公式

サクシオン基礎の引抜き強度の支持力公式を、以下の(1), (2), (3)式のように導出した。ここで、既往の研究で行われている砂地盤におけるサクシオン基礎の引抜き抵抗力の支持力公式³⁾をもとにした。また、図-9の破壊モード概念図をもとに、粘土地盤におけるサクシオン基礎の引抜き強度の支持力公式を導出した。

$$F_{RA} = p_{su} \cdot A_u + p_{sd} \cdot A_i + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + c \cdot 2\pi \cdot r_{in} \cdot D + W' \quad (1)$$

$$F_{RB} = p_{sd} \cdot A_b + p_{sd} \cdot A_i + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + W' + W_s' \quad (2)$$

$$F_{RC} = p_{sd} \cdot A_b + p_{sd} \cdot A_i + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + W' + W_s' + B(2c \cdot \tan \omega - 5.71 \cdot c - \gamma D) \quad (3)$$

ここに、 r_{out} : 基礎の外直径, r_{in} : 基礎の内直径, D : 基礎の根入れ長, r_{in} : 円筒の内直径, p_{su} , p_{sd} : 基礎内部上面および基礎の底面に作用するサクシオン, A_u , A_i : 基礎内部上面および基礎下部先端部の面積, A_o , A_i : 基礎外周面および内周面の面積である。

ここで、破壊モードCについては、Tergaghiの支持力論をもとに、支持力公式を導出した。ここで、Tergaghiの支持力係数は、 $\phi=0^\circ$ のときを参照し、 $N_c=5.71$, $N_q=1.0$, $N_\gamma=0.0$ とした。サクシオンの値は、解析的に求めるのは困難であるため、模型実験における計測結果を用いた。実際には、引抜き抵抗力がピークを示した時点におけるサクシオンの値を用いた。そして、計算の結果、 F_{RA} , F_{RB} , および F_{RC} を比較して、最も小さい値を、サクシオン基礎の引抜き強度の理論値とした。

(9) 実験値と理論値の比較

図-10に、実験値と、支持力公式を用い、計算した結果より得られた理論値の比較の結果を示した。全体的に多少ばらつきが見られたが、ほぼ1:1となった。よって、上記の支持力公式によって、実験結果をよく説明できるものと考えられる。

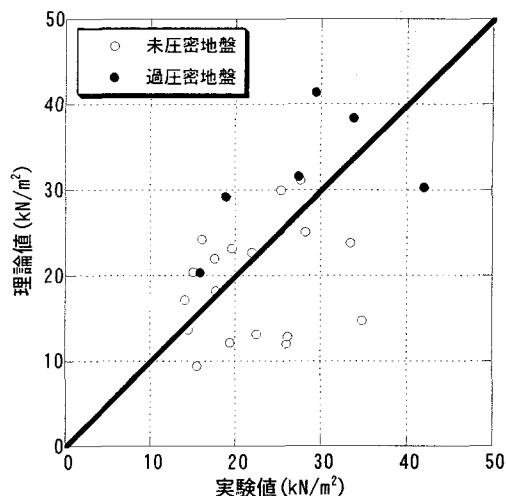


図-10 実験値と理論値の比較

4. 結論

本文では、サクシオン基礎と中実基礎の引抜き試験を行い、粘土地盤の粘着力、サクシオン基礎の形状や引抜き速度が、支持力特性に与える影響について検討を行った。さらに、支持力公式を導出し理論値と実験値との比較を行った。以下に結果をまとめる。

(1) 引抜き抵抗力の推移

引抜き直後、引抜き抵抗力は急激に増加し、ピークに達した。また、未圧密地盤のほうが過圧密地盤に比べ、遅れてピークに達した。

(2) サクシヨンの推移

引抜き直後、サクシヨンは急激に増加し、ピークに達した。しかし、間隙水圧の位置によって、ピークに達する正規化引抜き量は異なった。

(3) サクシヨンの発生分布

基礎の外側に比べ内側において、大きくサクシヨンが発生した。また、基礎の下部においてより大きなサクシヨンが発生した。

(4) 粘土地盤の含水比と引抜き強度の関係

含水比が下がると、引抜き強度は全体的に大きくなった。

(5) 引抜き速度と引抜き強度の関係

引抜き速度が大きくなるにしたがい、引抜き強度が大きくなった。

(6) 開口率と引抜き強度の関係

サクシヨン基礎には、引抜き強度が最も大きくなる開口率が存在する。

(7) 引抜き時の地盤の破壊モード

引抜き時の地盤の破壊モードとして、3つの破壊モードに分類した。そして、モードAと判断されたときの引抜き

強度は、比較的小さく発生した。

(8) 引抜き抵抗力の支持力公式

サクシヨン基礎の引抜き強度の支持力公式を、以下の(1)、(2)、(3)のように、導出した。

$$F_{RA} = p_{su} \cdot A_u + p_{sd} \cdot A_t + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + c \cdot 2\pi \cdot r_{in} \cdot D + W' \quad (1)$$

$$F_{RB} = p_{sd} \cdot A_b + p_{sd} \cdot A_t + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + W' + W_s' \quad (2)$$

$$F_{RC} = p_{sd} \cdot A_b + p_{sd} \cdot A_t + c \cdot 2\pi \cdot r_{out} \cdot D + W' + W_s' + B(2c \cdot \tan \omega - 5.71 \cdot c - \gamma D) \quad (3)$$

(9) 実験値と理論値の比較

サクシヨンを考慮した支持力公式により、引抜き抵抗力を定量的に評価することができた。

参考文献

- 1) 善功企：サクシヨン基礎構造物，環境の新しい海岸工学，pp. 1162-1169，
- 2) 善功企：棄却された新形海洋基礎—サクシヨン基礎—の復活に関する研究，科研成果報告書，pp. 1-41，2002，
- 3) 山崎浩之，善功企，館下徹：サクシヨ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発表論文集，pp. 73-80，1994。