

新形式海洋構造物基礎の開発

— スカート基礎の貫入および支持力特性 —

伊藤 政人
後藤 英夫
(本社土木事業本部
プロジェクト2部)

崎本 純治
増井 直樹
(本社土木技術本部
設計第4部)

上野 孝之
太田 良晴
(本社土木技術本部
設計第4部)

Development of a New Type of Foundation for Offshore Structures

— Penetration and Bearing Capacity Characteristics of Skirt Foundations —

Masato Ito Junji Sakimoto Takayuki Ueno
Hideo Goto Naoki Masui Yoshiharu Ota

Abstract

Skirt foundations are used for oil development platforms in the North Sea, but very few are used in Japan. We have been researching applications for a new type of foundation for large offshore structures, such as the main towers of strait-crossing bridges. We carried out penetration tests, vertical loading tests, and cyclic pulling tests using a pit (W8.0m×D5.0m×H8.0m) and a large scale model (ϕ 1.5m×L9.4m). We thus clarified the penetration resistance of the skirt and the characteristics of deformation and bearing capacity after completion of the skirt foundation. The following describes the experimental results. (1) Suction can reduce the penetration resistance of the skirt foundation, and the measured penetration resistance was close to that of the estimating system based on the bearing capacity formula. (2) Injection of grout into the bottom of the skirt significantly improved settlement performance. (3) When a dynamic load is applied, suction occurs inside the skirt and the pulling resistance becomes larger than the static load.

概 要

スカート基礎は北海の油田開発プラットフォームの基礎に実績のある海洋構造物基礎形式であるが、国内における施工例はほとんどない。我々はこのスカート基礎を海峡横断橋梁の主塔など大型海洋構造物に新形式の基礎として適用させるため研究を進めてきた。今回はスカート基礎の貫入抵抗と完成後の変形・支持力特性を明らかにするために、屋外の実験ピット（平面8.0m×5.0m深さ8.0m）において、径1.5m長さ9.4mの大型模型を用いて貫入試験、鉛直載荷試験および繰返し引抜き試験などを行った。その結果以下のことが明らかになった。(1) スカート基礎の貫入抵抗は、サクシオンを用いることで低減させることができ、その貫入抵抗は、支持力公式を用いた予測式とよく一致する。(2) 底部にグラウトを注入することで、内部地盤が拘束され、貫入時よりも沈下性能は飛躍的に向上する。(3) 動的な荷重が作用した場合は、スカート内に負の間隙水圧が発生し、静的な荷重に対するよりも引抜き抵抗は増加する。

1. はじめに

スカート基礎は、GBS (Gravity Base Structures) と呼ばれる主として重力によって安定を確保する大型の海洋コンクリート構造物の基礎に用いられる (Fig.1)。スカート基礎を有するGBSは北海の油田開発プラットフォームの基礎に多くの実績があるが、国内における施工例はほぼ皆無に等しい。スカートとはコンクリートあるいは鋼製の壁であり、スカートを海底地盤に貫入させることによって、軟弱な表層土を拘束し硬質な下層地盤に鉛直荷重を支持させるとともに、水平荷重に対しても滑動に対する安定性を増すという効果を期待できる¹⁾。

また、従来の海洋構造物基礎である設置ケーソンや捨て石マウンドのように現地の海底地盤を掘削・整地する必要がないため、経済面・環境面で優れていると考えられる。

このスカート基礎を、海峡横断橋梁の主塔基礎あるいは護岸や防波堤などの港湾構造物基礎に適用するために、室内実験によりこの基礎に関する研究を行ってきており²⁾、さらに今回は屋外において大型模型を用いた実験を行った。本論文は今回行った一連の実験のうち、径1.5mの鋼製セルを試験体とした貫入試験、鉛直載荷試験および繰返し引抜き試験の結果を示し、スカートの貫入抵抗とスカート基礎完成後の支持力および変形特性について

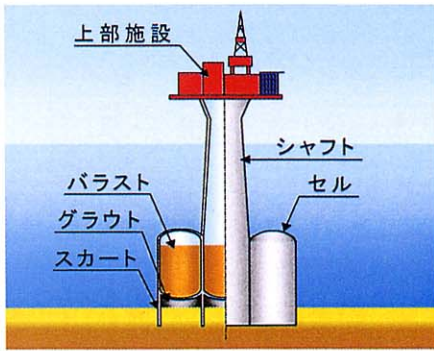


Fig. 1 GBSの概念図
Gravity Base Structures

Table 1 試験全体内容
Contents of Experiment

試験内容	試験目的	単体モデル (φ1500×1)	壁体モデル (W1300×T200)	二連モデル (φ1500×2)
貫入試験	スカートの貫入抵抗	○	○	○
	貫入時の傾斜制御	○		○
鉛直載荷試験	グラウト後の沈下特性	○		
繰返し引抜き試験	受働サクシオン効果	○	○	
繰返し水平載荷試験	水平支持特性			○

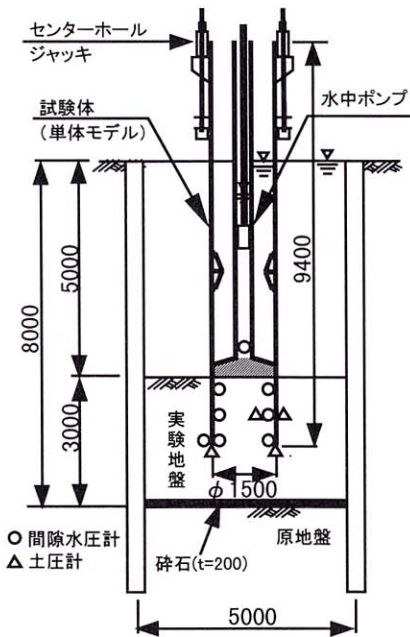


Fig.2 実験装置
Experimental Apparatus



Photo 1 実験用ピット
Pit for Experiment



Photo 2 試験体全景
Model of Skirt Foundation

報告する。

2. 試験概要

Table 1に今回行った屋外大型実験の全体の試験内容と試験目的を示す。今回の試験では、RC壁体の貫入抵抗に着目した壁体モデル(W1300×T200)、貫入時の傾斜制御と完成後の水平支持力に着目した二連モデル(φ1500×2)を用いた試験も行っているが、本論文では主要な試験項目を行った単体モデル(φ1500×1)についてのみ報告する。

Fig. 2に実験装置を示す。実験用ピットは平面8.0m×5.0m深さ8.0mで、底部に厚さ3mの実験地盤を作成した。単体モデル試験体は長さ9.4m径1.5m肉厚30mmの鋼製セル(質量9.2t)でスカート内部から排水できる構造になっている。Photo 1に実験用ピット、Photo 2に試験体を示す。計測項目は各試験とも、载荷重、鉛直変位量、傾斜角、スカート先端土圧およびスカート内外の水平方向土圧および間隙水圧である(Fig. 2参照)。

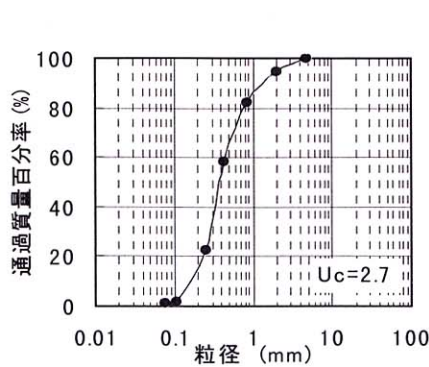


Fig. 3 粒径分布
Grain Size Distribution

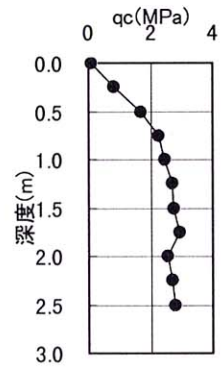


Fig. 4 qc分布
qc Proportion

Table 2 地盤定数
Soil Properties

$\gamma_{sat}(t/m^3)$	Dr(%)	$\phi(^{\circ})$
1.88	53	35

Table 3 実験条件および実験結果
Condition and Result of Penetration Test

	実験条件	実験結果(1.5m貫入時)(kN)		
		水位低下開始貫入量	ジャッキ荷重	水圧差荷重
case-1	水位低下なし	243	0	335
case-2	50cm	88	20	200
case-3	80cm	45	18	155
case-4	100cm	102	20	214

Table 4 貫入抵抗計算式

Calculation Formula of Penetration Resistance

(単位面積当たり)

	先端抵抗	周面抵抗
DNV式	0.3·qc(中央値) 0.6·qc(最大値)	0.001·qc(中央値) 0.003·qc(最大値)
支持力公式	$c \cdot N_c + P_o \cdot N_q + \gamma' \cdot B / 2 \cdot N_\gamma$	$K_o \cdot \gamma' \cdot z \cdot \tan \delta$

qc:コーン支持力, N_c, N_q, N_γ :Meyerhofの支持力係数, c:粘着力
 P_o :Meyerhof式における等価自由表面の垂直応力, γ' :単位体積質量
 B:スカート厚, K_o :静止土圧係数, z:着目点深さ, $\delta=2/3 \cdot \phi$

Table 5 水圧低下時の貫入抵抗計算式

Calculation Formula of Penetration Resistance under the Draining

(単位面積当たり)

先端抵抗	周面抵抗
$c \cdot N_c + P_o \cdot N_q + \gamma' \cdot B / 2 \cdot N_\gamma$	内側: $K_o \cdot (\gamma' - i \cdot \gamma_w) z \cdot \tan \delta$ 外側: $K_o \cdot (\gamma' + i_o \cdot \gamma_w) z \cdot \tan \delta$

i, i_o :スカート内側,外側の動水勾配, γ_w :水の単位体積質量
 K_o :等価自由表面における土圧係数, D_f :スカート根入れ深さ

実験地盤はFig. 3に示す粒径分布の砂を用いて、まき出し厚20cmで締め固めた後、下から注水して飽和させた。地盤作成後のコーン貫入試験結果をFig. 4に、サンプリング試料の室内試験結果をTable 2に示す。

3. 貫入試験

3.1 試験方法

貫入試験は、まず自重(92kN)により試験体を貫入させた後、試験体上部に取り付けたセンターホールジャッキにより所定の貫入量まで貫入させた。その後、ジャッキによる载荷重を一定に保持しながら、スカート内部から排水し水圧差により貫入量が1.5mになるまで貫入させた。この際、スカート内の水位はポイリングに対する安全率が常に1.2以上となるように管理し、その水位で貫入が不可能となった場合は再びジャッキによる貫入を行い、貫入量が増加してポイリングに対して安全になった時点で再び水位を下げて水圧差による貫入を行った。実験ケースをTable 3に示す。

3.2 試験結果と計算値の比較

Fig. 5に貫入量と貫入力(自重+ジャッキ荷重+水圧差荷重)の関係を示す。Table 3に最終貫入量(1.5m貫入時)における貫入力の内訳を示す。水位低下をさせずに貫入させたcase-1に比べ、スカート内部の水位を低下さ

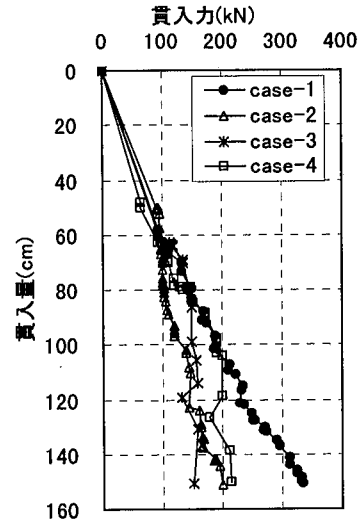


Fig. 5 貫入量-貫入力
Settlement-Penetration Force

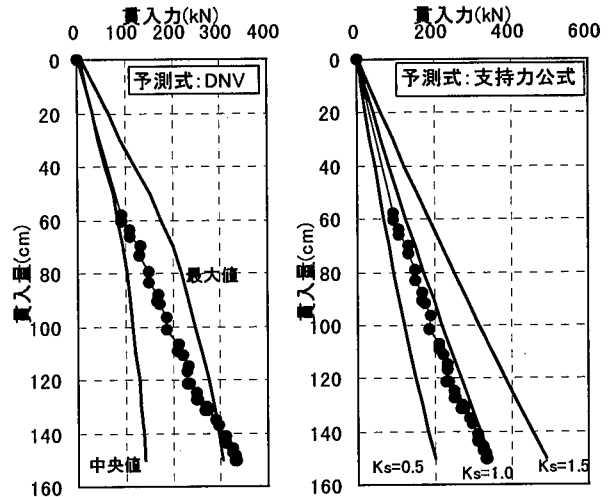


Fig. 6 計算値との比較(case-1)
Settlement-Penetration Force in case-1

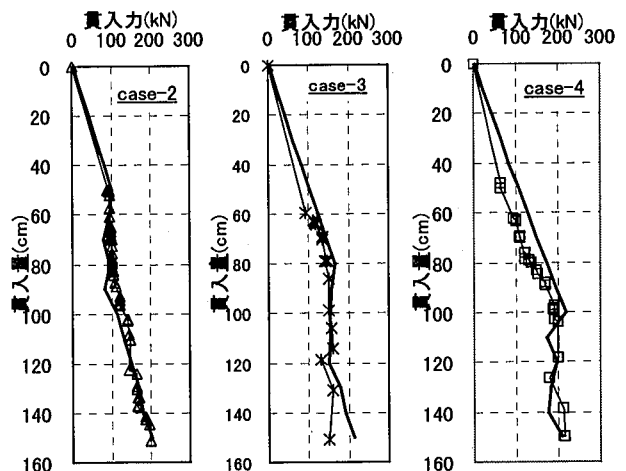


Fig. 7 計算値との比較(case-2~4)
Settlement-Penetration Force in case-2~4

せたcase-2~4は、ジャッキ荷重が大幅に減少しており、水圧差を用いることは貫入に非常に有効であることがわかる。また全貫入力も水圧差を与えることで約4~6割に減少している。これは、排水によりスカート内に上向きの浸透流が発生し、有効応力が減少することで先端および内周面の抵抗が減少したためである。

Fig. 6にcase-1の実験結果と予測計算値との比較を示し、Table 3に貫入抵抗の計算式を示す。DNV（ノルウェー船級協会）による計算式は、コーン支持力度に経験的に定めたある係数を乗じて求めるものであり、今回の実験値もほぼ中央値と最大値の間にある。先端抵抗を支持力公式によって推定した式³⁾では、深い基礎に用いられるMeyerhofの支持力係数を用い、局所せん断破壊を考慮して $\phi = \tan^{-1}(0.85 \cdot \tan \phi)$ としている。Meyerhofの支持力は、等価自由表面に作用する垂直応力 P_0 に依存する。いまスカートの根入れはスカート厚に比して十分大きいので $P_0 = K_s \cdot \gamma' \cdot D_f$ となり、土圧係数 K_s の評価によって大きく変わる。そこで、 $K_s = 0.5 \sim 1.5$ と変えた計算を行ったところ、1.0とした場合が実験値とよく一致した。

Fig. 7にcase-2~4の実験結果と計算値の比較を示す。水位低下させた際の貫入抵抗の計算には、支持力公式を用いた式に、先端抵抗および内側の周面抵抗には上向きの浸透流による有効応力の減少を、外側の周面抵抗には下向きの浸透流による有効応力の増加を考慮した。計算式をTable 5に示す。スカート先端での水頭低下量は先端に取り付けた間隙水圧計の計測値から求めた。また各ケースとも $K_s = 1.0$ としており、計算値は実験結果とよく一致している。

4. 鉛直載荷試験

4.1 試験方法

鉛直載荷試験は貫入試験終了後、スカート内上部と地盤との空隙にグラウトを打設し、約12時間養生を行った後、試験体上部に設置したジャッキにより載荷を行った。

4.2 試験結果

Fig. 8にcase-1（水圧低下なしで貫入、Table 3参照）の貫入時および鉛直載荷試験の沈下曲線を示す。曲線のうち、①は貫入およびジャッキ荷重の除荷（自重のみ残留）時の経路、②はグラウト後の鉛直載荷時の経路を示している。グラウト後はグラウト前（貫入時）に比べ、沈下量は極端に少なくなり、沈下性能が飛躍的に向上しているのがわかる。これはグラウトを注入することによって、スカート基礎面積全体（グラウト面全体）が載荷重に抵抗するようになったためと考えられる。

Fig. 9に載荷中の有効土圧（土圧計の値から間隙水圧計の値を差し引いたもの）の変化を示す。グラウト後のスカート先端の有効土圧は、一度貫入時の有効土圧まで達した後、沈下が進むにつれ減少する。反対にスカート

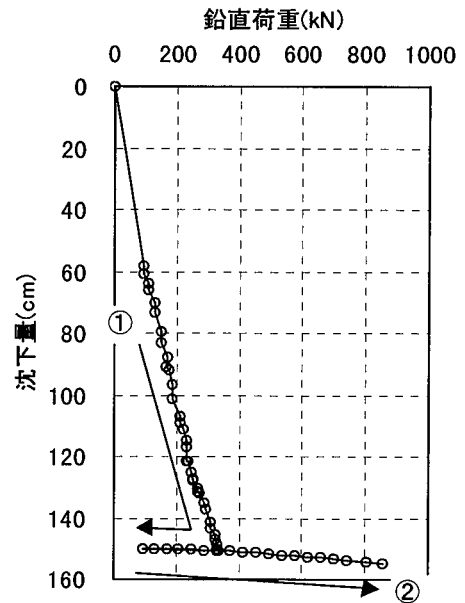


Fig. 8 グラウト前後の沈下曲線
Settlement Curve Before and After Grouting

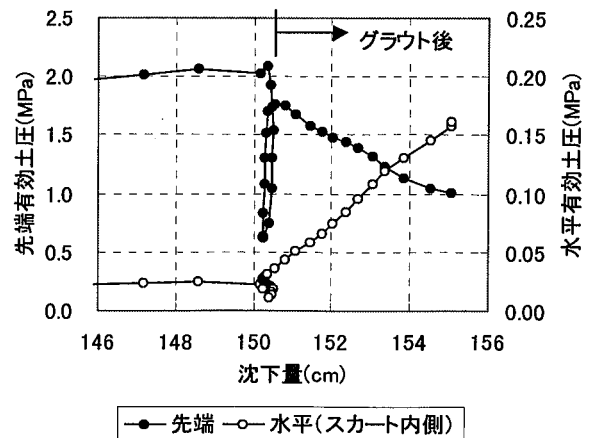
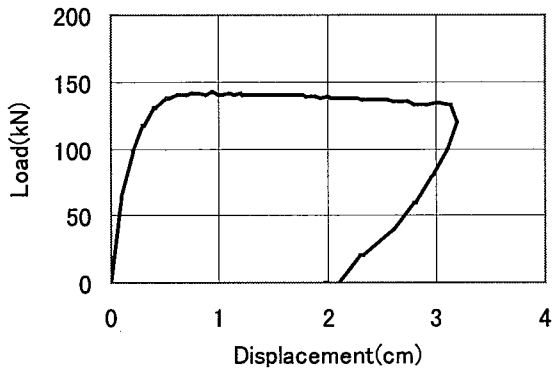


Fig. 9 有効土圧の変化
Change of Effective Earth Pressure

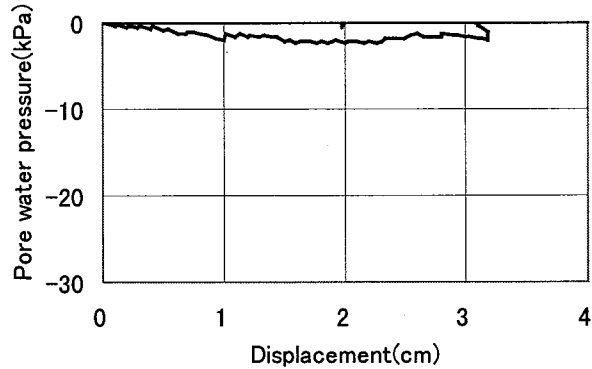
Table 6 繰返し引抜き試験条件
Condition of Cyclic Pulling Test

試験ケース	周波数	オフセット荷重	荷重振幅
case-A	0.5Hz	110kN	110kN
case-B	0.25Hz	110kN	110kN

内側の水平方向有効土圧は増加している。これは、グラウト後の支持分担が、スカート先端支持からスカート基礎面積全体での支持へ移行していることを示すものである。



荷重-変位曲線



スカート内の間隙水圧-変位

Fig.10 静的引き抜き試験結果
Result of Static Pulling Test

5. 繰返し引抜き試験

5.1 試験方法

繰返し引抜き試験は、鉛直荷重試験終了後、試験体上部のセンターホールジャッキを取り外し、引抜き用アクチュエーターを2台セットして行った。試験手順は、まず一定荷重（オフセット荷重）を静的上向きに載荷し、次に設定した荷重振幅と周波数で繰り返し荷重を与えた。試験体に与えられる最大引抜き荷重はオフセット荷重+荷重振幅となる。この最大引抜き荷重は、設定周波数に応じて載荷装置の油の吐出性能から決まる引抜き荷重の限界がある。そこで試験は、周波数一定としてオフセット荷重+荷重振幅を徐々に上げていき、引抜き荷重が限界に達した段階で次段階の周波数を設定し、オフセット荷重+荷重振幅を上げていく方法とした。

Table 6に代表的なケースとして、それぞれの周波数で最大の引抜き荷重を与えられた試験ケースを示す。

5.2 試験結果

繰返し引抜き試験に先立って行った静的引抜き試験における荷重-変位曲線とスカート内間隙水圧-変位関係をFig.10に示す。試験は変位制御で行い、変位速度は0.3 mm/minとした。引抜き最大荷重は約140kNであり、この時スカート内部に発生した負の間隙水圧は2kPa程度であった。

Fig.11に繰返し引抜き試験結果を示す。試験結果は上から、時間-引抜き荷重、時間-変位、時間-スカート内間隙水圧、荷重-変位履歴曲線である。設定した最大引抜き荷重は110kN+110kN=220kNであったが、どちらのcaseとも計測された最大荷重は設定荷重よりも小さかった。これは、設定した載荷速度が早く、載荷装置の油の吐出速度が変形に追従できなくなったためと考えられる。

計測された最大引抜き荷重はcase-Aで155kN、case-Bで165kNと静的引抜き試験結果よりも上回った。これは、早い引抜き荷重を与えることによってスカート底面と地

盤との間に急激に生じた間隙に、間隙水が回り込むのに時間がかかるために、スカート内には負の間隙水圧が生じたためである。実験結果では、負の間隙水圧はスカート上部ほど大きく発生しており、この現象を裏付けている。発生した負の間隙水圧はcase-Aで約12kPa、case-Bで約18kPaであり、これにスカート面積1.5m²を乗じるとそれぞれ静的引抜き荷重の差と一致し、負圧の発生により引抜き抵抗が増加すること（受働的サクシオン効果）を確認できた。

しかし、引抜き速度の遅いcase-Bの方がcase-Aよりも発生した負の間隙水圧は大きくなり、最大引抜き荷重も大きくなっている。これは引抜き速度が遅くなったことによる負の間隙水圧の発生にくさよりも、載荷装置の油吐出速度に余裕ができてより設定荷重に近い荷重を載荷させることができたことの影響が上回ったためと考えられる。

6. まとめ

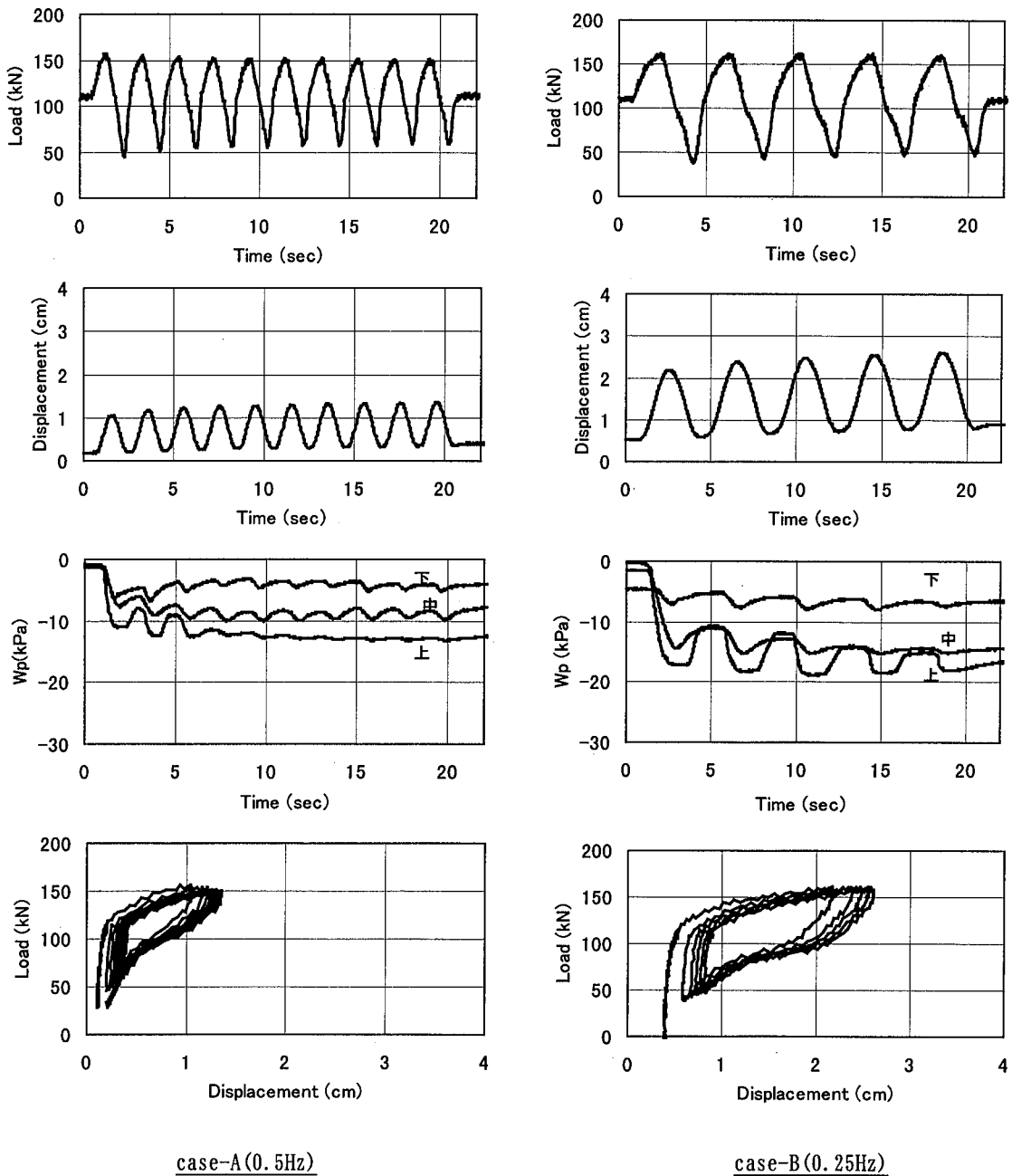
スカート基礎の大規模模型実験を行い、貫入抵抗、鉛直支持力、および引抜き抵抗についての調査を行った。行った試験毎に得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 貫入試験

- ・スカート基礎の貫入抵抗はDNVによる予測式の間中値と最大値の間となった。また、先端抵抗に支持力公式を用いた予測値では、先端抵抗にMeyerhof式を用いた値がよく一致した。
- ・貫入時にサクシオンを用いることで貫入抵抗を低減できることが明らかになった。またサクシオン作用時の貫入抵抗は、浸透流による先端有効応力の低減を考慮することによって支持力式を用いた予測式とよく一致した。

(2) 鉛直荷重試験

- ・底面にグラウトを注入することにより、貫入時に比べ、



case-A(0.5Hz)

case-B(0.25Hz)

Fig.11 繰返し引抜き試験結果
Result of Cyclic Pulling Test

沈下性能は飛躍的に向上した。これは、グラウトの内部地盤拘束効果により載荷面積がスカート基礎面積全体に拡大するためと考えられる。

(3) 繰返し引抜き試験

・動的な繰返し引抜き荷重による最大引抜け荷重は、静的引抜け荷重よりも大きくなり、その差はスカート内に発生した負の間隙水圧分に相当した。これは、スカート底面と地盤との間に急激に生じた間隙に間隙水が回り込むのに時間がかかるためであり、動的荷重時の受働的サクシオン効果を確認できた。

参考文献

- 1) 谷, W.H.CRAIG: シェイクダウン (SHAKE DOWN), 第39回土質工学シンポジウム, pp203-210, (1994)
- 2) 伊藤, 崎本, 上野: スカート基礎の水圧低下効果 (その1: 貫入抵抗におよぼす影響), 第33回地盤工学研究発表会, pp1571-1572, (1998)
- 3) 善, 山崎, 前田: 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, 21-34, (1998)