

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

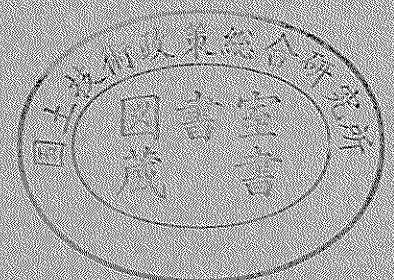
No.1058 September 2003

アーケ形の矢板とトラスを有する二重矢板式護岸模型の遠心実験

北	詰	昌	樹
石	橋	伸	司
菊	池	喜	昭
寺	田	昌	弘
脇	屋	泰	士
勝	谷	雅	彦

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 実験概要	4
2.1 遠心模型実験装置	4
2.2 試料容器	5
2.3 模型地盤	5
2.4 アークトラス模型	5
2.5 計測項目	6
2.6 実験方法	7
2.7 実験ケース	7
3. 実験結果と考察	7
3.1 実験の再現性について	7
3.2 壁体幅の及ぼす影響	10
4. 結論	15
5. あとがき	15
参考文献	17

Centrifuge Model tests on Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure

Masaki KITAZUME ¹⁾
Shinji ISHIBASHI ²⁾
Yoshiaki KIKUCHI ³⁾
Masahiro TERADA ⁴⁾
Yasushi WAKIYA ⁵⁾
Masahiko KATSUYA ⁶⁾

Synopsis

Recently a new type of double sheet wall was developed where the arc shaped sheet walls were connected by the truss structure. This is expected to be more economical than the ordinary type of sheet pile wall. However, the effect of the embedded depth of the arc shaped sheet wall and the width of the truss structure on the behavior of the sheet wall has not been investigated thoroughly.

In this study, a series of centrifuge model tests was carried out to investigate these effects on the sheet wall behavior subjected to earth pressure of back fill. In the tests, three double sheet wall structures having different width were subjected to the back fill pressure under the 50 g centrifugal acceleration field to investigate the horizontal and vertical displacements, bending moment and axial stress distributions of the wall. In this paper, the model ground preparation and test results were described in detail.

Key Words: Arc shaped structure, truss structure, centrifuge model test, displacement, bending moment, axial stress

1) Head of Soil Stabilization Division, Geotechnical and Structural Department

2) Research Engineer of Soil Stabilization Division

3) Head of Foundation Division, Geotechnical and Structural Department

4) Steel Structure R&D Center, Nippon Steel Corporation

5) Construction Engineering Services Dept., Construction Materials & Services Center, JFE STEEL CORPORATION

6) Construction Engineering Services Dept., Construction Materials & Services Center, JFE STEEL CORPORATION

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5055 Fax : +81-46-841-8307 e-mail:kitazume@pari.go.jp

アーク形の矢板とトラスを有する 二重矢板式護岸模型の遠心実験

北詰 昌樹¹⁾
石橋 伸司²⁾
菊池 喜昭³⁾
寺田 昌弘⁴⁾
脇屋 泰士⁵⁾
勝谷 雅彦⁶⁾

要 旨

港湾護岸の構造形式において二重矢板構造形式は、矢板や鋼管等を二列に打ち込み、前面側矢板と後面側矢板をタイロッド等で連結して前面の矢板に作用する水圧や土圧などを後面側矢板と根入れ部前面の受動土圧によって支える構造である。構造物に作用する水圧・土圧に対して、構造物自身の重量と底面での摩擦によって抵抗している重力式に比べ、一般に比較的軽量で、大規模な地盤改良を必要とせず、その結果、工費が安くなるという利点がある。近年、更なる経済性を追求するために、アークトラスと呼ばれる新しい二重矢板式護岸が考えられている。従来の二重矢板式構造物の鋼板にアーク（円弧）形の矢板を用い、隔壁としてトラスを用いた構造である。この構造を用いると従来の二重矢板式構造に比べて、二重矢板壁体の曲げ剛性が大きくなり、壁体幅を小さくすることが期待できる。その結果、従来の矢板式構造物に比べて必要な地盤改良範囲を縮小することが可能となり低コスト化が期待できるものである。

これまでの研究では、従来の二重矢板形式に比べ構造物のせん断変形を抑制できることが明らかになってきている。しかし、アークトラス構造は新しい構造形式であるため、前後の矢板壁の間隔やアーク形矢板の根入れ深さなどがアークトラスの挙動に及ぼす影響は十分に解明されているとは言いがたい。そこで、本研究では、前後の矢板壁の間隔が異なる3種類のアークトラス模型を作製して遠心模型実験を行い、矢板壁の間隔が、構造物の変位、各部に発生する曲げモーメントや軸力に及ぼす影響を検討した。

キーワード：アーク，トラス，遠心模型実験，変位，曲げモーメント，軸力

1) 地盤・構造部地盤改良研究室長

2) 地盤・構造部地盤改良研究室

3) 地盤・構造部基礎工研究室長

4) 新日本製鐵株式会社 鋼構造研究開発センター

5) JFEスチール株式会社 建材センター 建材技術部（旧川崎製鐵株式会社）

6) JFEスチール株式会社 建材センター 建材技術部（旧日本鋼管株式会社）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5055 Fax：046-841-8307 e-mail:kitazume@pari.go.jp

1. まえがき

二重矢板式構造物は締切り工としての利用の他に、護岸としても利用されてきている。二重矢板式構造物は地盤の横抵抗を利用した一種の根入れ式構造物である。しかし、中詰を完了するまでは不安定な構造であり、施工中の変位に注意を要する構造形式である。

近年、更なる経済性を追求するため、アークトラスと呼ばれる新しい鋼矢板式護岸が考えられている（図-1参照）。従来の矢板式構造形式では矢板を直線状に打ち込んでいたが、数枚の直線形鋼板をアーク（円弧）状に連結して打ち込み、矢板壁と控壁の連結にトラスを用いた構造である。従来の二重矢板式は、矢板を地盤に深く打ち込み地盤から支持力を得ており、構造物の安定は中詰の土圧によるものである。しかし、深い部分の矢板は横抵抗にあまり寄与していないと考えられる。そこで、今回研究の対象としているアークトラスは、杭を地盤に打ち込むことで、矢板の長さを短くするとともに、矢板をアーク形にすることで、中詰の土圧による矢板の引張力を緩和する構造とした。アークトラスでは、前後の矢板壁間の隔壁としてトラスを用いることにより、構造物全体の剛性が大きくなり、壁体幅を小さくすることを期待している。その結果、従来の二重矢板式構造物に比べて必要な地盤改良範囲を縮小することが可能となる。以上のような特徴から二重矢板式護岸の低コスト化が期待できる。

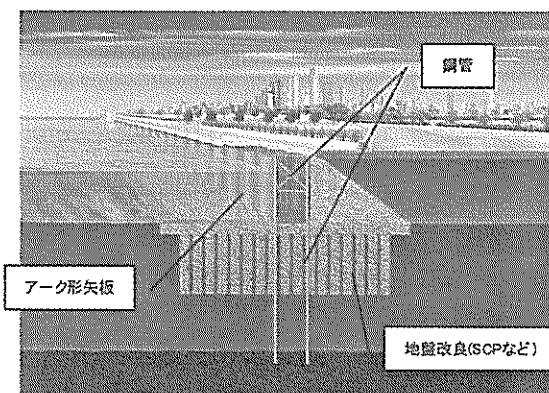


図-1 アークトラス護岸のイメージ図

これまでの研究¹⁾では、矢板にアーク形鋼板の隔壁としてトラスを用いることで、従来の矢板式に比べ構造物のせん断変形を抑制できることが明らかになってきている。しかし、アークトラス構造は新しい構造形式であるため、前後の矢板壁の間隔やアーク形矢板の根入れ深さ

などがアークトラスの挙動に及ぼす影響は十分に解明されているとは言い難い。そこで、筆者らは、アークトラス構造の挙動の解明と新しい設計法の開発を目的に、地盤改良研究室、基礎工研究室と新日本製鐵(株)、川崎製鐵(株)ならびに日本鋼管(株)との共同研究を開始した。共同研究では、遠心模型実験ならびにFEM解析を行い、両者を比較検討して、解析手法の妥当性も検討する。本研究では、前後の矢板壁の間隔が構造物の変形や各部の曲げモーメントや軸力に及ぼす影響を遠心模型実験により検討した。共同研究では、今後FEM解析を行い本実験結果の評価とアークトラス構造の挙動に関する詳細な検討が行われ、アークトラス構造の検討が行われる予定である。

2. 実験概要

2.1 遠心模型実験装置

本実験は、図-2に示す港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置を用いて行った。遠心模型実験手法の原理は、1/Nに縮尺された模型地盤にその縮尺に応じた遠心加速度(N-g)を作用させることで、実物レベルの応力状態を再現し、実物規模の変位挙動を再現するものである。本装置の主要な諸元を表-1に示す。装置の詳細については、文献²⁾を参照されたい。

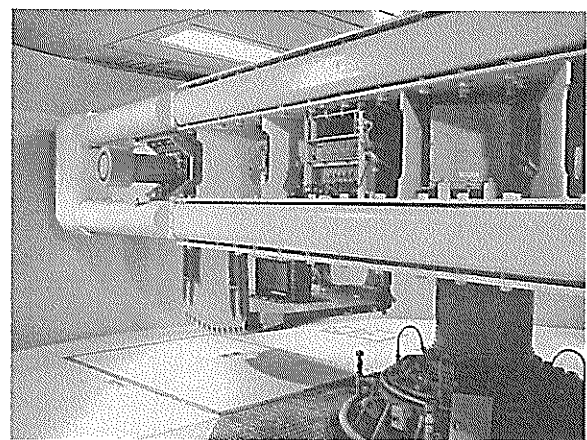


図-2 遠心模型実験装置

表-1 遠心模型実験装置の主要な諸元

項目	諸元
最大遠心加速度	113g
最大搭載質量	2760kg
有効回転半径	3.8m
最大回転数	163rpm
最大容量	312g-ton
主動機容量	DC450kw

2.2 試料容器

実験で使用した試料容器を図-3に示す。容器は、内寸が巾1200mm×深さ600mm×奥行き200mmで、剛性の高いものである。本研究では、50gの遠心加速度の下で実験を行ったために、再現された現地規模は幅60m×高さ30mとなる。容器の前面には厚さ30mmの強化ガラスが設けられており、模型地盤の状況が観察できるようになっている。また、容器の内側には容器と模型地盤との摩擦を軽減させるために、レキサンシートと呼ばれるポリカーボネートシートを貼っている。

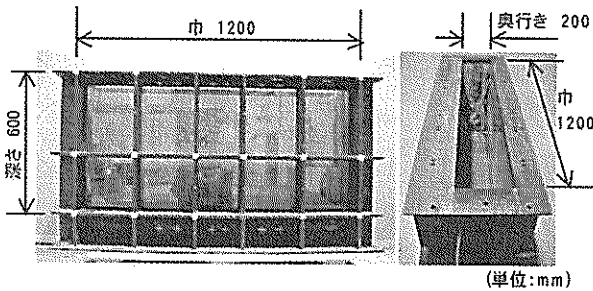


図-3 試料容器

2.3 模型地盤

図-4に模型地盤の概要図を示す。紙面に向かって右側を陸側（埋立側）、左側を海側とし、アークトラス模型は容器右端より400mmの箇所に設置した。また、地盤の厚さは実験装置の関係から380mmに設定した。アークトラスが建設される現地の地盤は粘土地盤が多いと考えられる。しかし、模型実験で粘土地盤を再現すると、模型地盤の作製や遠心模型実験に長期間要すること、まえがきに述べたように、本実験結果は後に、FEMで解析され、計算方法の妥当性を検討される予定であることなどの理由から、比較的短期間に作製が可能で、地盤条件も明確になっている地盤であれば、粘土地盤を再現する必要性も高くないと考えた。そこで、再現性にもすぐれた密な砂地盤を模型地盤とした。

模型地盤および護岸の中詰として、物性値が詳細に調査されている豊浦硅砂を用いた。豊浦硅砂は山口県豊浦町黒井産の天然硅砂を精製し粒度分布を調整したもので、その主な特性を表-2に示す。なお、砂降らし法⁴⁾により模型地盤及び中詰を作製する過程で砂が飛散し、砂の量が減少する可能性があった。そのため、当プロジェクトの実験で一貫して同じ砂を使用できるように、十分な量を用意し、それらを繰り返し使用した。

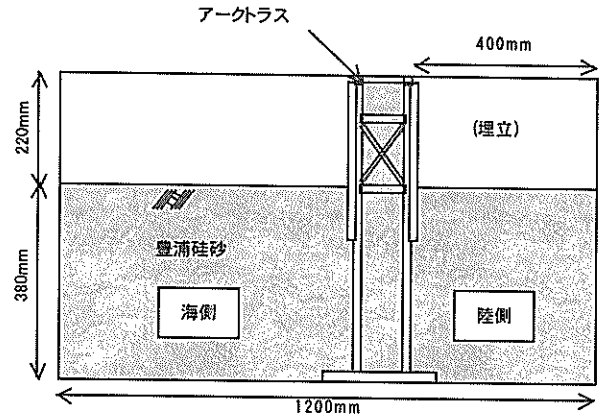


図-4 模型地盤（概要図）

表-2 豊浦硅砂の特性³⁾

比重, G_s	2.64
最大間隙率, e_{max}	0.979
最小間隙率, e_{min}	0.623
粒径加積曲線で60%に相当する粒径, D_{60}	0.16
粒径加積曲線で30%に相当する粒径, D_{30}	0.13
粒径加積曲線で10%に相当する粒径, D_{10}	0.12
均等係数, D_{60}/D_{10}	1.5

2.4 アークトラス模型

50gの遠心加速度場において実物の挙動を再現するためには、縮尺が1/50の模型を用いることが必要である。しかし、想定している現実のアークトラスの1/50の縮尺の模型では試料容器に収まらないことが分かった。そこで試料容器内に作製可能で、できる限り大きなものとして現実の50/70に縮尺された現地を考え、その1/50の模型を対象に実験を行った。そのため、実験で得られるデータは当初想定していた現実のアークトラスとは実験データが異なる。しかし、新しい構造体であるアークトラスの挙動の傾向を把握することはこれらの実験データから可能であるため、これらのアークトラス模型を用いて実験を行った。

想定している現実のアークトラスは、杭とトラス部材に鋼管を用いたものである。この実験で想定している杭とトラスの鋼管の直径は1300mmと1000mmであり、鋼管の厚さは19mmと12mmである。アーク形矢板は厚さ9.5mmを想定している。模型の縮尺を1/50にした時、模型の鋼管は直径26mmで厚さ0.38mm、アーク形矢板の厚さは0.19mmとなり、市販の材料で作製することが困難であった。そこで、実物との相似則を考慮し、材料が入手しやすく作製が比較的容易なアルミ合金の角パイプ材を鋼管として、厚さ0.3mmのアルミ板をアーク形矢板とし

て用い、アークトラス模型を作製した。図-5にアークトラス模型を示した。用いたアルミ合金の角パイプ材の断面は杭とトラスがそれぞれ10×15mmと10×10mm、厚さは1.2mmと1.0mmである。なお、トラスと杭の結合は、結合箇所をアルミ塊を心材として挿入し、その上から角パイプをかぶせ外側からボルトで締め固めた。

海側からアークトラス模型を正面に見ると(正面図)、試料容器の奥行き200mmに収まるように模型幅を194mmとし、そこに2組のアークトラスを再現している。アークトラスの施工延長方向の断面は(断面図)、垂直杭の間隔が、50mm、100mmおよび150mmの3種類の模型を準備した。なお、今回の模型に使用した杭は、想定する実物のアークトラスの杭に対して断面剛性(EA)は $1/50^2$ であり、断面曲げ剛性(EI)は $10/50^4$ となった。

用する遠心模型荷重装置の最大計測箇所数50箇所に対して、今回の実験の全計測箇所数は92箇所となったため、計測箇所を変えた荷重実験を2回行った。

表-3 計測項目と計測個数

計測器	計測項目	個数
変位計	水平(G.L.+10,200mm)変位	2
	鉛直変位	2
間隙水圧計	載荷圧	2
土圧計	海側 G.L.-50,100,200mm の土圧	3
	陸側 G.L.-10,50,90mm の土圧	3
ひずみゲージ	杭(15個×4列)のひずみ	60
	トラスのひずみ	12
	セルのひずみ	8
合計		92

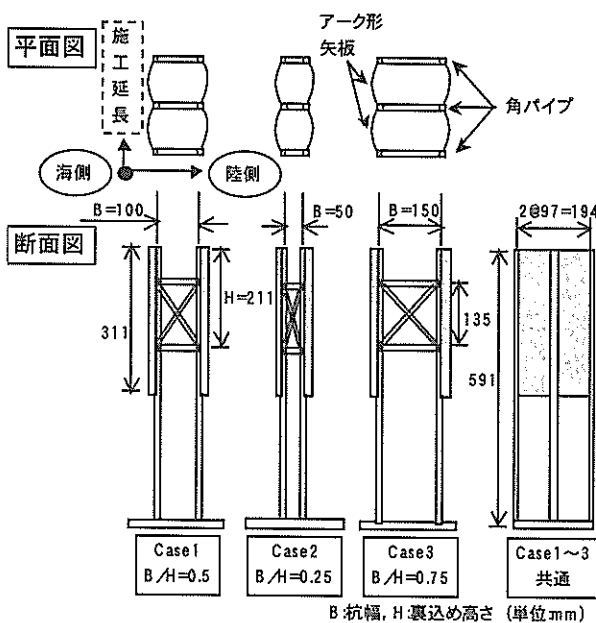


図-5 アークトラス模型

2.5 計測項目

本実験で使用した計測器は、ひずみゲージ、変位計及び土圧計であり、また載荷圧を計測するために間隙水圧計を準備した。

計測項目は、部材のひずみ、模型の水平・鉛直変位、杭に作用する土圧、裏込め部の水圧である。表-3に計測項目と個数を示す。図-6に計測器設置概要図を、図-7にひずみゲージ位置図を示す。ひずみゲージは、杭及びトラス部材の表裏に貼付しており、同一深度の計測値を差分すれば曲げひずみ成分、平均すれば軸ひずみ成分が算出できるようにした。なお、2.7で後述するが、実験で使

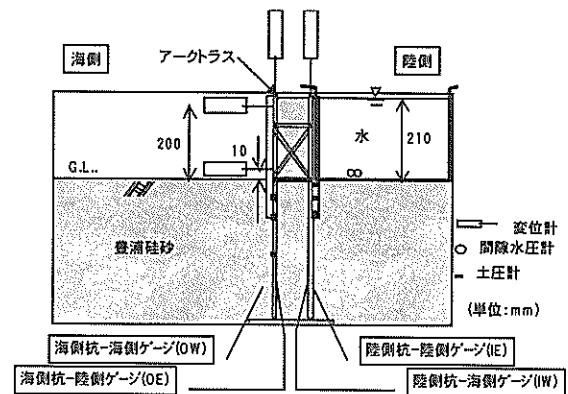


図-6 計測器設置概要図

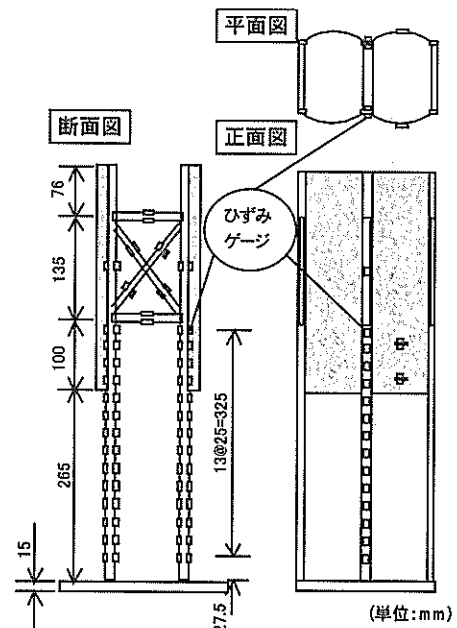


図-7 ひずみゲージ位置図

2.6 実験方法

模型地盤および中詰の作製は、再現性が高く、均一で密度コントロールができる多重フルイを用いた砂降らし法によって行った。この実験では、模型地盤の相対密度が90%程度の密な地盤にした。実験では、試料容器にアークトラス模型を設置した後、砂降らし法により試料容器の底から約380mmまで砂を落下させた。その後、バキュームを用いて、地盤表面を整形し、層厚が380mmの砂地盤を作製した。また、アークトラス模型内の中詰砂は、中詰範囲外の地盤に砂が入らないように蓋をして、砂降らし法と同様に作製した。なお、トラス部材上に載る中詰砂の重量が、遠心加速度の増加によりトラス部材に大きなひずみを発生させることが予備実験で分かったため、トラス部材で囲まれた部分には発泡スチロールとアクリルシートで養生し、トラス部材に砂が載らないように工夫した。その後、アークトラス各部に変位計などを設置した。今回の実験では、載荷条件を明確にするため、アークトラス背後には砂ではなく水を満たして載荷することとした。そのため、水を満たすためのビニールシートをアークトラス背後に準備した。準備の完了した模型地盤を遠心模型実験装置に搭載し、50gまで遠心加速度を増加した。その後、アークトラス背後に注水し、載荷した。なお、注水は30秒間に約20mm程度注水した後30秒間放置の計60秒を1ステップとし、水位が210mmとなるまで段階的に行った。載荷実験中の水位は、試料容器上に設置したCCDカメラとビニールシート内に設置した間隙水圧計で行った。また、載荷中は2.5に記述した変位、圧力ならびにアークトラス模型に発生するひずみを計測した。最終の水位に達した後、模型天端の水平変位が落ち着くまでしばらく放置し、その後、1gに戻して遠心模型実験装置の運転を終了する。

2.7 実験ケース

実験は、壁体幅（前面の矢板壁と控壁の間隔）が異なる3種類のアークトラス模型を対象に3回の実験を実施した。表-4にアークトラス模型の条件、模型地盤の単位体積重量および相対密度を示す。2.5に述べたように、全計測箇所数は全部で92箇所ある。一方、遠心模型載荷装置の最大計測箇所数は50箇所であるため、1回の実験で全ての計測箇所を計測することは不可能であった。そのため、同じ模型地盤に対して計測箇所を変えた載荷実験を2回行い、全てのデータを取得することにした。

表-4 実験ケース一覧

B:杭幅 H:裏込め高さ(210mm) L:矢板の根入れ深さ

実験ケース	アークトラス模型		模型地盤	
	B/H	L/H	単位体積重量(kN/m ³)	相対密度Dr(%)
Case1-1-1	0.5	0.5	15.72	92
Case1-1-2			15.89	96
Case2-1	0.25	0.5	15.57	87
Case2-2			15.70	91
Case3-1-1	0.75	0.5	15.66	90
Case3-1-2			15.67	91

3. 実験結果と考察

3.1 実験の再現性について

2.7に述べたように、載荷実験は同じ模型地盤に対して計測箇所を変え2回行った。表-5に示すように、1回目の載荷実験では杭に貼付しているひずみゲージを重点的に計測し、2回目の実験ではトラスとセルに貼付しているひずみゲージを多く計測することとした。一方で、表-5に示すように水平変位などの主要な項目に関しては重複箇所を設け、2回の実験とも測定し、2回の載荷実験の再現性を検討した。

図-8に、載荷圧（アークトラス背後に注入した水の地

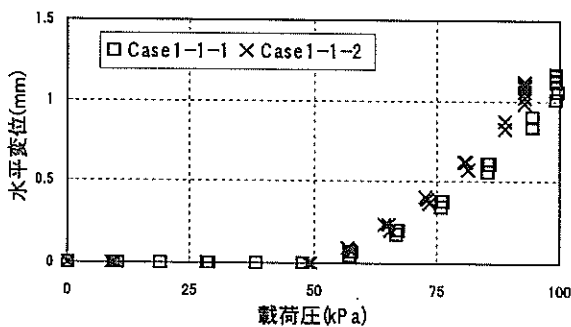
表-5 計測項目と計測箇所数

計測機器	計測項目	個数	(1回目)	(2回目)	<重複箇所>
変位計	水平変位	2	(2)	(2)	<2>
	鉛直変位	2	(0)	(2)	<0>
間隙水圧計	載荷圧	2	(2)	(2)	<2>
土圧計	海側 G.L.-50,100,200mm の土圧	3	(0)	(3)	<0>
	陸側 G.L.-10,50,90mm の土圧	3	(2)	(3)	<2>
ひずみゲージ	杭（15個×4列）のひずみ	60	(40)	(18)	<4>
	トラスのひずみ	12	(4)	(12)	<0>
	セルのひずみ	8	(0)	(8)	<0>
合計		92	(50)	(50)	<10>

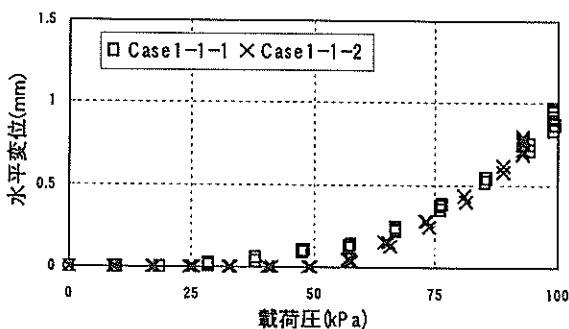
表面位置での水圧)とアークトラス上部 (G.L.+200mm) ならびに地表面付近 (G.L.+10mm) での水平変位の関係を示した. なお, 50gまで遠心加速度を増加する際に, アークトラスに多少水平変位が生じたが, ここでは載荷時の挙動に着目するために, 載荷直前の値からの変位量を示した. 図中の凡例にある末尾の1と2の数字は, 1回目と2回目の実験をそれぞれ示している. まず, Case1-1での載荷圧とアークトラス上部の水平変位の関係について見ると (図-8(a)), 載荷圧が50kPa程度まではアークトラスにはほとんど水平変位が生じていないことが分かる. しかし, 載荷圧が50kPa程度以上になると水平変位が徐々に増加する傾向が見られる. このような傾向は2回の載荷実験で見られ, ほぼ一致していることが分かる.

次に載荷圧とアークトラス地表付近の水平変位の関係について見ると (図-8(b)), ここでも2回の実験結果はほぼ一致していることが分かる. 載荷圧が60kPa程度までは, 水平変位は殆ど生じていないが, 載荷圧が60kPa程度を越えるとアークトラス上部での傾向と同様にほぼ直線的に変位が増加する傾向が見られる. このように, 1回目と2回目の実験はほぼ一致しており, 2回の実験は載荷圧と水平変位の関係では再現性があったと言える.

次にCase2, Case3-1についても, 図-9(a), (b)および図-10(a), (b)に示したように, 2回の実験結果はほぼ一致しており, ここでも再現性が高いことが確認できる.

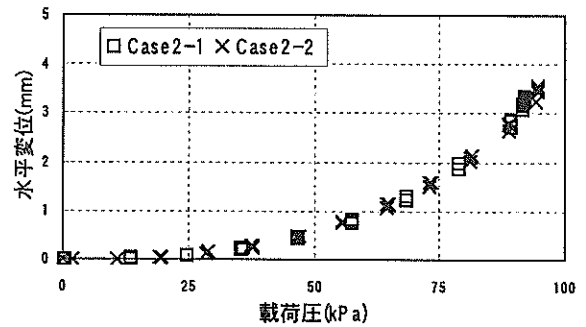


(a) アークトラス上部の水平変位

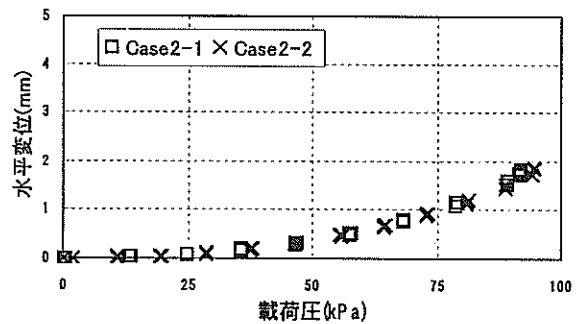


(b) アークトラス地表付近の水平変位

図-8 載荷圧と水平変位の関係(Case1-1)

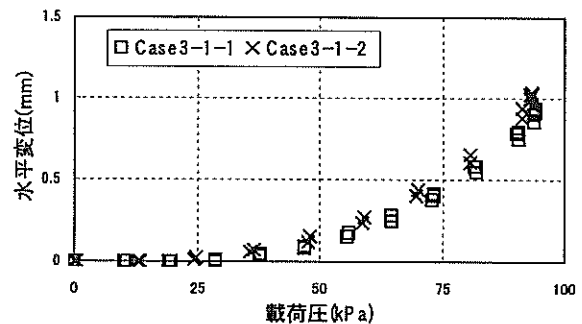


(a) アークトラス上部の水平変位

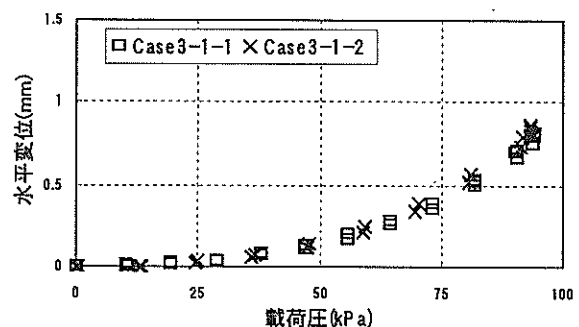


(b) アークトラス地表付近の水平変位

図-9 載荷圧と水平変位の関係(Case2)



(a) アークトラス上部の水平変位



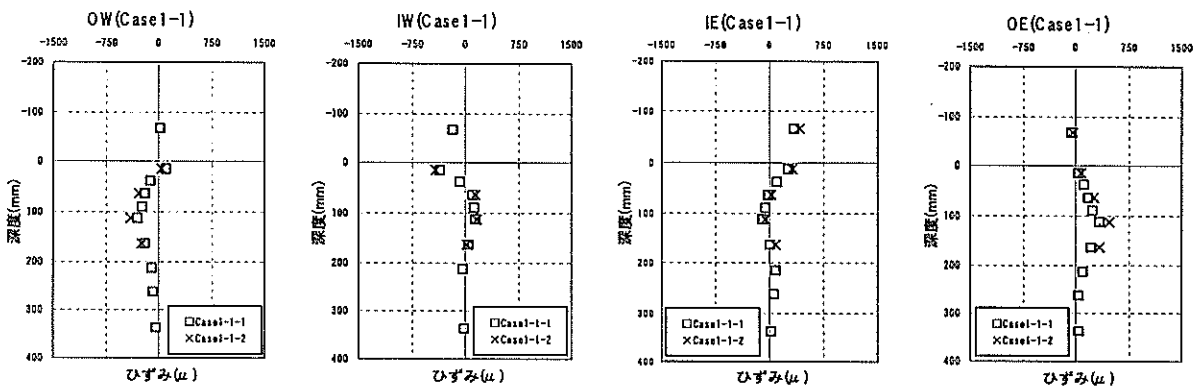
(b) アークトラス地表付近の水平変位

図-10 載荷圧と水平変位の関係(Case3-1)

次に、アークトラスの杭に貼付したひずみゲージの計測値について再現性を確認することとする。載荷実験中のひずみゲージの計測値には、曲げひずみ成分と軸ひずみ成分が含まれており、杭の表裏に貼付した1組のひずみゲージの計測値から曲げモーメントと軸力を算出する。しかし、ここでは実験の再現性を確認することが目的であるので、個々のひずみゲージの計測値に着目して考察を進めることとする。

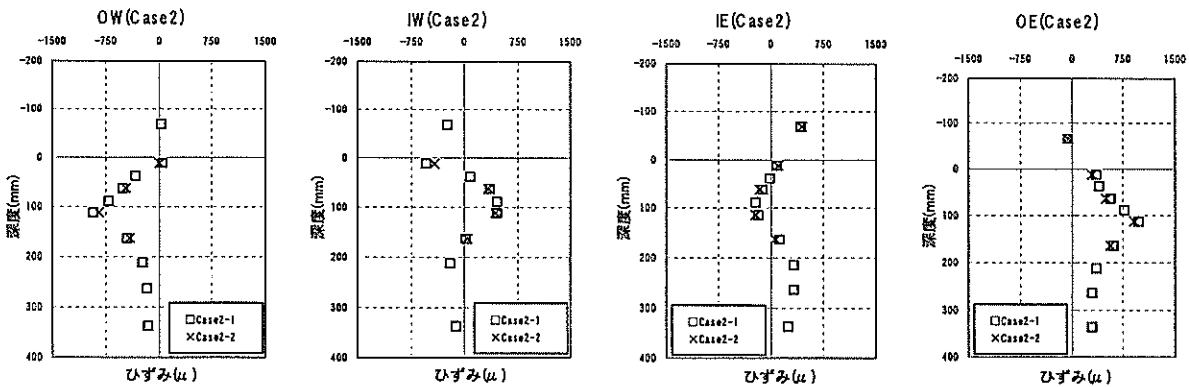
図-11には、実験ケースCase1-1について、載荷圧が約90kpaの時点での杭のひずみ分布を示した。海側杭の海側（図中、OW）（図-6参照）に貼付したひずみゲージによる分布図を見る（図-11(a)）。深度が110mm付近でひずみは負の最大値となり、上部と下部ではひずみがほとんど発生しない傾向がある。これらの傾向は1回目と2回目の実験値とも表れており、OWのひずみ分布には再現性があったと言える。同様に海側杭の陸側（図中、IW）（図-6参照）に貼付したひずみゲージによる分布図を見る（図-11(b)）。

深度が110mm付近でひずみは正の最大値となっており、地表面付近では負の最大値となる傾向がある。そして下部ではひずみがほとんど発生していないことが分かる。次に陸側杭の海側（図中、IE）（図-6参照）に貼付したひずみゲージによる分布図を見ると（図-11(c)）、深度が110mm付近でひずみは負の最大値となっており、上部では正のひずみが発生する傾向がある。次に陸側杭の陸側（図中、OE）（図-6参照）に貼付したひずみゲージによる分布図を見ると（図-11(d)）、深度が110mm付近でひずみは最大となり、上部と下部ではひずみがほとんど発生しない傾向がある。以上のように、2本の杭の4側面（OW, IW, IE, OE）に貼付したひずみゲージのいずれも、2回の実験値はほぼ一致していることが分かり、2回の載荷実験の再現性が高いことが確認される。Case2およびCase3-1についても、図-12と図-13にひずみゲージの計測値を示した。各図を見ると2回の実験結果はほぼ一致しており、両実験ケースでも再現性の高いことが確認された。



(a) 海側杭-海側ゲージ (b) 海側杭-陸側ゲージ (c) 陸側杭-海側ゲージ (d) 陸側杭-陸側ゲージ

図-11 ひずみ分布図(Case1-1)[載荷圧 90kPa]



(a) 海側杭-海側ゲージ (b) 海側杭-陸側ゲージ (c) 陸側杭-海側ゲージ (d) 陸側杭-陸側ゲージ

図-12 ひずみ分布図(Case2)[載荷圧 90kPa]

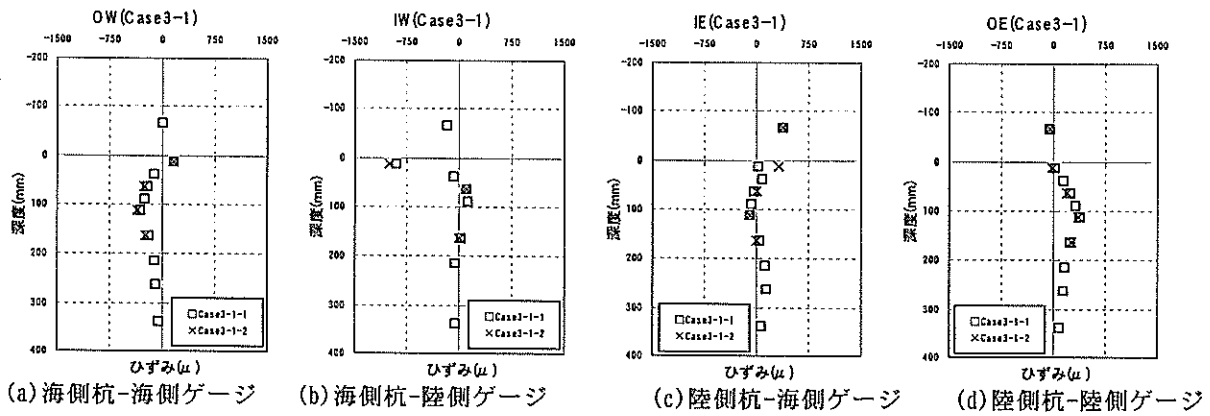


図-13 ひずみ分布図(Case3-1)[載荷圧 90kPa]

3.2 壁体幅の及ぼす影響

2.4で述べたように、本研究では、壁体幅（前面の矢板壁と控壁の間隔）が異なる3種類の模型を用いて実験を実施した(表-4参照)。ここでは、埋立時の載荷によるアークトラスの水平変位、曲げモーメント、軸力について、壁体幅の影響を考察することとする。

(1) 水平変位

図-14はアークトラス上部での水平変位と載荷圧の関係をグラフにしたものである。図には、各ケースでの実験結果を直接比較できるように3種類の実験結果をあわせて示している。まず、B/Hの比率が0.75 (Case3-1)と0.5 (Case1-1) について見ると、載荷圧が40~50kPa程度までは水平変位はほとんど生じておらず、それ以上の載荷圧になると徐々に水平変位が生じていることが分かる。一方、B/Hが0.25と最も小さいCase2では、載荷圧が10kPa程度から水平変位が生じ始め、その後も載荷圧の増加にともない大きな水平変位が生じていることが分かる。載荷の終了時（載荷圧が90kPa程度）では、約3.5mmの水平

変位が生じており、Case3-1とCase1-1と比較すると約3.5倍の変位を生じていることが分かる。

次に、アークトラス地表付近での水平変位と載荷圧の関係を図-15に示した。ここでも、B/Hの比率が0.75 (Case3-1)と0.5 (Case1-1)については載荷圧が40~50kPa程度までは水平変位はほとんど生じておらず、それ以上の載荷圧になると徐々に水平変位が生じていることが分かる。一方、B/Hが0.25と最も小さいCase2では、載荷圧が10kPa程度から水平変位が生じ始め、その後も載荷圧の増加にともない大きな水平変位が生じていることが分かる。しかし、載荷の終了時（載荷圧が90kPa程度）の水平変位は1.8mm程度と、Case3-1とCase1-1の場合と比較すると約2.5倍程度であり、アークトラス上部での水平変位の比率よりも小さいことが分かる。このことより、アークトラスの壁体幅が小さくなると、水平変位は大きくなり、地表面付近よりもアークトラス上部で生じる変位の方がより大きく生じていることが分かる。

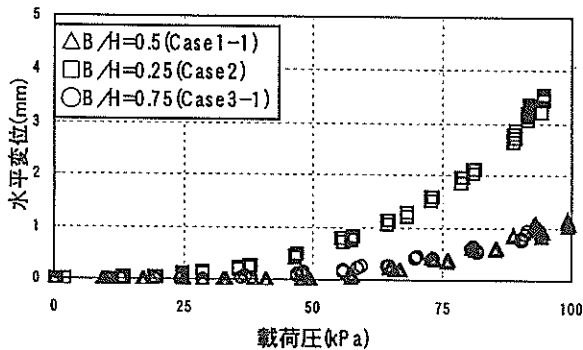


図-14 水平変位と載荷圧(アークトラス上部)

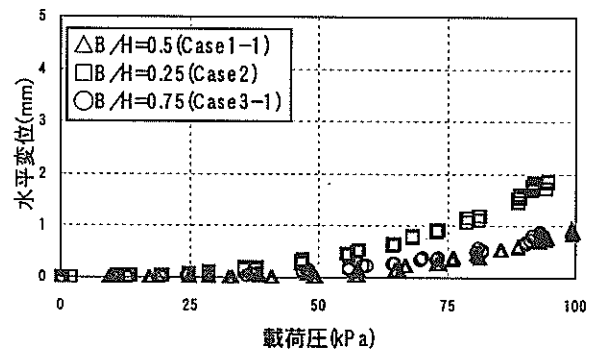
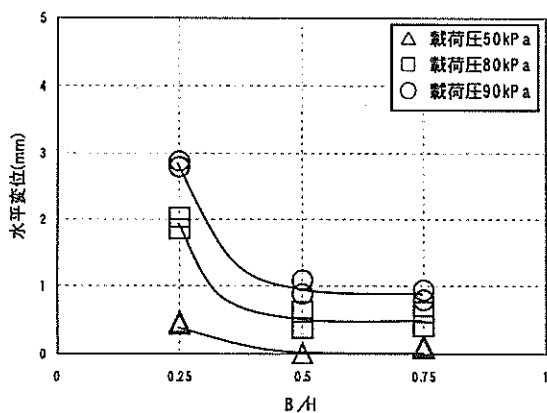
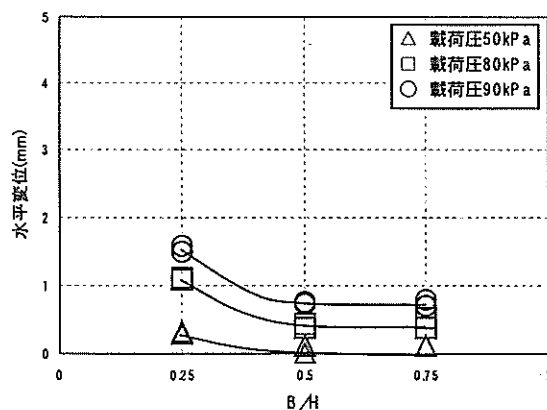


図-15 水平変位と載荷圧(アークトラス地表付近)

次に、アークトラス壁体幅が水平変位に及ぼす影響を詳細に検討するために、図-16に載荷圧が約50kPa、約80kPaおよび約90kPaの時点での水平変位と壁体幅の関係を示した。図中の縦軸は水平変位を、横軸はB/Hをそれぞれ示している。なお、各ケースとも2回の載荷実験で得られた水平変位をあわせてプロットしている。まず、アークトラス上部での水平変位と壁体幅の関係を示した図-16(a)を見る。載荷圧が約50kPaでの変位に着目すると、B/Hが0.25の場合に0.4mm程度の水平変位が生じている。一方、B/Hが0.5と0.75の場合には水平変位はほとんど0であることが分かる。次に、載荷圧が約80kPaになると、B/Hが0.25の場合には1.9mm程度の水平変位を示している。B/Hが0.5と0.75の場合には、いずれも0.5mm程度の水平変位が生じているが、B/Hが0.25の場合よりもかなり小さい。また、B/Hが0.5と0.75とで、ほとんど水平変位量は同じであることが分かる。載荷圧が約90kPaの時点でも、ほぼ同様の傾向が見られている。



(a) アークトラス上部の水平変位



(b) アークトラス地表付近の水平変位

図-16 水平変位と壁体幅の関係

次に、アークトラス地表付近での水平変位と壁体幅について示した図-16(b)を見る。載荷圧が約50kPaの時点では、B/Hが0.25の変位が多少大きく、B/Hが0.5と0.75の場合にはほとんど0であることが分かる。載荷圧が大きくなると、B/Hが0.25の場合には大きな水平変位が生じているが、B/Hが0.5と0.75の場合には水平変位量も比較的小さいことが分かる。

ここまで見てきたように、B/Hが0.25と小さい場合には埋立によって比較的大きな水平変位が生じるが、B/Hが0.5になると水平変位は1/2~1/3程度まで低下する傾向が得られた。しかし、B/Hが0.75と更に大きくなっても、水平変位量の大きさにはほとんど変化が見られなかった。頭部をタイロッド連結した二重矢板壁の模型で壁体幅と変位について実験した研究⁵⁾では、壁体幅が広くなれば変位が小さくなる結果が明確に得られているが、今回の実験のように控工にトラスを用いることで壁体幅を広げても変位が変わらない場合があることが分かった。

(2) 杭の曲げモーメント

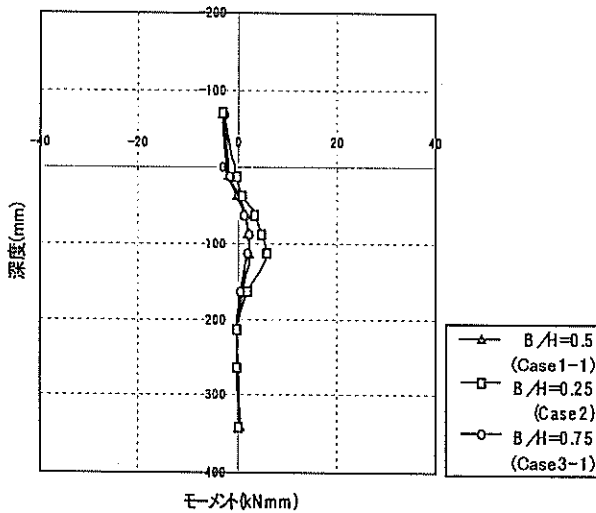
曲げモーメントは部材内に働く力を把握するために重要なパラメータのひとつであり、設計の際にも評価項目として用いられている。アークトラス各部に発生する曲げモーメントは、部材の表裏に貼付したひずみゲージの計測値の差分によって算出した。まず、陸側の杭について、載荷圧が約50kPaおよび約90kPaの時点での曲げモーメント分布を図-17に示した。また、図では3ケースの実験結果をあわせてプロットしている。まず、載荷圧が約50kPaの時点を見ると(図-17(a))、いずれの実験ケースも深度110mm程度の位置で最大の曲げモーメントが発生しているが、いずれも小さな値である。次に載荷圧が約90kPaの時点を見る(図-17(b))。載荷圧が大きくなると、いずれのケースも曲げモーメントが大きくなることが分かる。B/Hが0.5のCase1-1およびB/Hが0.75のCase3-1について見ると、深度110mm程度の位置で最大のモーメントが発生しており、深度が小さくなるにつれ負のモーメントへほぼ直線的に減少する傾向が見られる。最大曲げモーメントが発生している位置は、杭のみで構成されている範囲と矢板と杭によって剛性を高めた範囲の境界部に相当する。一方、B/Hが0.25のCase2について見ると、モーメント分布の形状は他の2ケースとほぼ同様であるが、発生するモーメントの絶対量は大きいことが分かる。このように、B/Hが0.25のCase2の場合には、比較的大きな曲げモーメントが発生しているが、深度が110mm程度の位置で最大曲げモーメントが発生し、深度が小さくなるにつれ負のモーメントへ減少する分布形状は載荷圧によ

らず見られる。また、他の2ケースの場合にも載荷圧が増加してもその分布形状はほぼ一定であった。

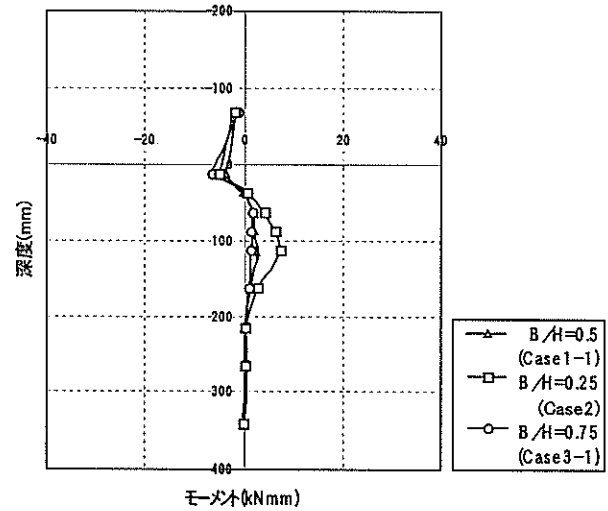
次に、海側の杭について図-18に2段階の載荷圧での曲げモーメント分布を示した。ここでも、3ケースの実験結果をあわせて示している。まず、載荷圧が約50kPaでの曲げモーメントを見ると(図-18(a))、いずれのケースも深度が110mm程度の位置で最大のモーメントが発生し、深度が小さくなるに連れ曲げモーメントが徐々に減少する傾向が見られる。次に載荷圧が約90kPaの時点を見る(図-18(b))。載荷圧が大きくなると、いずれのケースも曲げモーメントが大きくなる事が分かる。B/Hが0.5のCase1-1およびB/Hが0.75のCase3-1について見ると、深度110mm程度の位置で最大のモーメントが発生しており、深度が小さくなるにつれ負のモーメントへ減少する傾向

が見られる。一方、B/Hが0.25のCase2について見ると、深度が110mm程度の位置で非常に大きな曲げモーメントが発生していることが分かる。

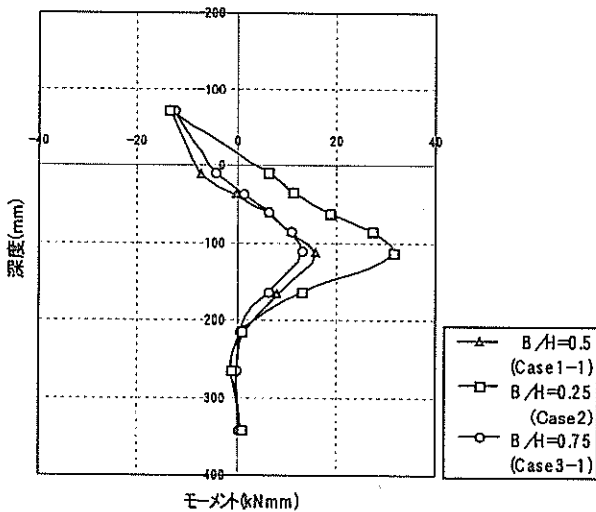
これまで見てきたように、陸側杭と海側杭のいずれでも、最大曲げモーメントの発生する位置は深度が110mm付近であり、杭のみで構成されている範囲と矢板と杭によって剛性を高めた範囲の境界であることが分かった。一方、地表面より上では、発生する曲げモーメントが比較的小さくなっている。地表面から上のアークトラスの構造は地盤中の杭と矢板という構造にトラスが加わり、トラスによって曲げが抑制されていると考えられる。なお、海側杭については、地表面付近で非常に大きな負の曲げモーメントが発生する傾向が見られる。この位置はトラスと杭の結合点の直下である。ここで海側の杭が受



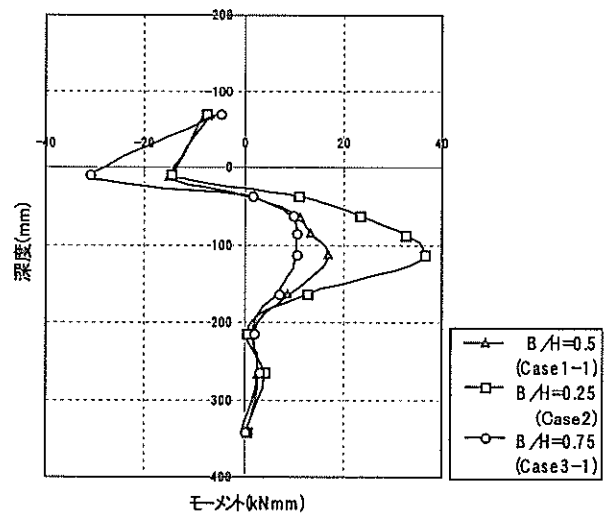
(a) 載荷圧 50kPa



(a) 載荷圧 50kPa



(b) 載荷圧 90kPa



(b) 載荷圧 90kPa

図-17 曲げモーメント分布図(陸側杭)

図-18 曲げモーメント分布図(海側杭)

ける荷重を考えると、陸側の杭が受ける荷重のほとんどはトラスを通じて海側の杭に伝わる。3.2(4)で後述するが、海側に傾斜しているトラス斜材には圧縮力が作用しているため、海側杭のトラス斜材と杭の結合点が受ける荷重は大きくなる事が分かる。また、トラスと杭の結合点付近はトラスと杭の結合によって剛性が大きくなっている。このように、海側杭の地表面付近では大きな曲げモーメントが発生していると考えられる。

次に、載荷圧の変化による最大曲げモーメントの変化について考察する。図-19に、陸側の杭について発生する最大曲げモーメントと載荷圧の関係を示した。B/Hが0.5のCase1-1とB/Hが0.75のCase3-1について見ると、載荷圧が30kPa程度までは最大曲げモーメントはほとんど0であるが、載荷圧が30kPa程度以上になると、徐々に最大曲げモーメントの大きさが大きくなる傾向が見られる。しかし、両ケースとも発生している最大曲げモーメントの大きさはほぼ同じであり、壁体幅の違いによる影響は見られなかった。B/Hが0.25のCase2についても、載荷圧の増加にともない徐々に曲げモーメントが増加する傾向が見られる。発生する曲げモーメントの大きさは、他の2ケースよりも大きく、載荷終了時（載荷圧が90kPa程度）には、2.4倍程度も大きい。

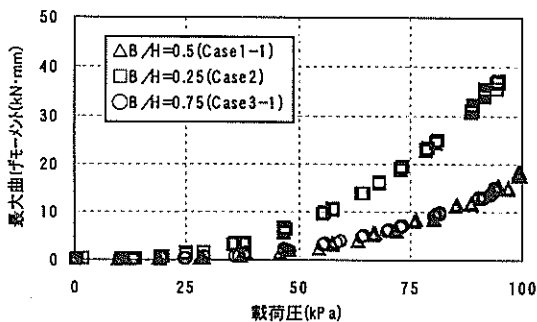


図-19 最大曲げモーメント(陸側杭)と載荷圧

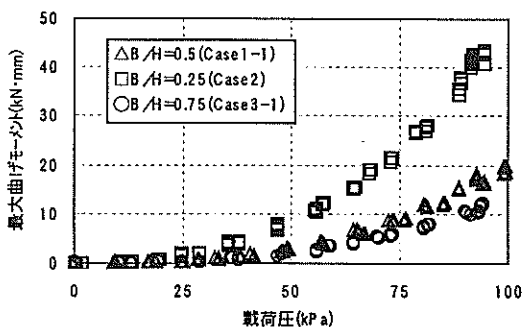
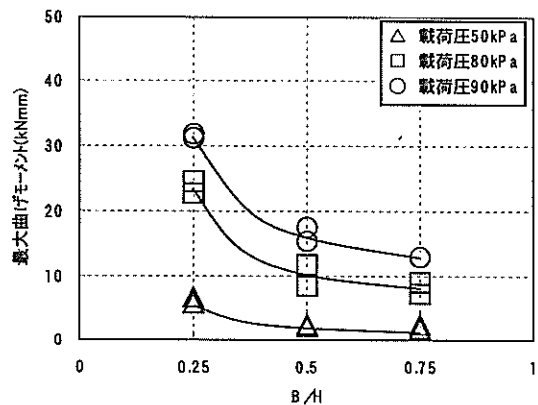


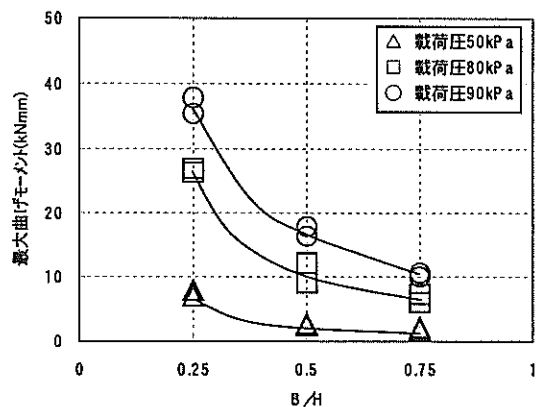
図-20 最大曲げモーメント(海側杭)と載荷圧

次に、海側の杭の最大曲げモーメントと載荷圧の関係を見ると(図-20)、ここでも陸側の杭で見られた傾向とほぼ同様の傾向が見られる。いずれのケースも、陸側の杭よりも発生する曲げモーメントは多少大きいことが分かる。

最大曲げモーメントに及ぼす壁体幅の影響を詳細に検討するために、載荷圧が50kPa、80kPaおよび90kPa程度の時点での杭に発生する最大曲げモーメントと壁体幅の関係を図-21に示した。グラフの縦軸には最大曲げモーメントを、横軸にはB/Hをそれぞれプロットしている。なお、各ケース2回の実験データがあるのでグラフ上にはそれぞれの最大曲げモーメントをプロットしている。まず、陸側杭の最大曲げモーメントと壁体幅の関係を示した図-21(a)を見る。載荷圧が50kPaの場合に着目すると、最大曲げモーメントは壁体幅の増加にともなって徐々に減少する傾向が見られる。載荷圧が大きくなって、同様の傾向が見られる。しかし、載荷圧が大きい場合には、B/Hが0.25から0.5に増加する時の最大曲げモーメントの減



(a) 陸側杭



(b) 海側杭

図-21 最大曲げモーメントと壁体幅の関係

少傾向が著しい。一方、 B/H が0.5から0.75と増加した時のモーメントの減少傾向は比較的小さいことが分かる。

次に海側の杭について、最大曲げモーメントと壁体幅の関係について考察する(図-21(b))。ここでも、いずれの載荷圧でも壁体幅の増加にともない最大曲げモーメントが減少する傾向が見られる。さらに、載荷圧が大きい場合には、 B/H が0.25から0.5に増加する時のモーメントの減少傾向が著しく、陸側の杭で見られた傾向とほぼ同じ傾向が見られている。

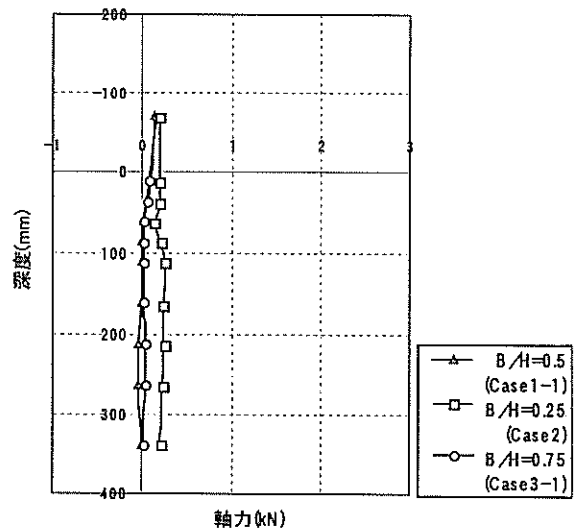
(3) 杭の軸力

ここでは、杭の軸力について考察を加える。アークトラス各部材に発生する軸力は、部材の表裏に貼付したひずみゲージの計測値の平均値によって算出することができる。まず、陸側の杭について、載荷圧が約50kPaおよび約90kPaの時点での軸力分布を図-22に示した。また、図では3ケースの実験結果をあわせてプロットしている。まず、載荷圧が約50kPaの時点を見ると(図-22(a))、 B/H が0.5のCase1-1と B/H が0.75のCase3-1の場合には、地表面付近で多少軸力が発生しているものの、地中部では軸力があまり発生していないことが分かる。一方、 B/H が0.25と小さいCase2では、地表面付近の軸力よりも地中部で比較的大きな軸力(引張力)が発生していることが分かる。次に、載荷圧が90kPaの場合について見る(図-22(b))。いずれの実験ケースでも正の軸力が表れており、引張力が作用していることが分かる。 B/H が0.5のCase1-1と B/H が0.75のCase3-1では地表面より上部で比較的大きな軸力が発生しているが、深度が60mm付近では比較的小さく、深度110mm程度以上になると徐々に減少する傾向が見られる。一方、 B/H が0.25のCase2は地中部で大きな軸力が発生していることが分かる。特に深度が110mm程度で最大の軸力が発生しており、深度が60mm程度付近では局所的に軸力が小さい現象が見られる。

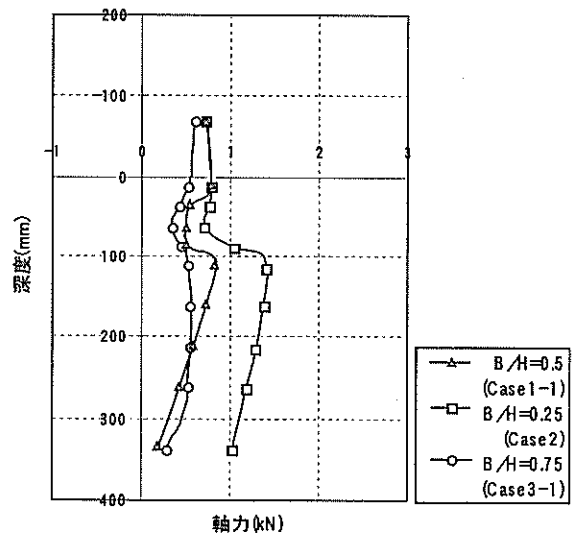
次に海側の杭について考察する。図-23には各載荷段階での軸力の分布を示した。まず、載荷圧が50kPa程度では、いずれの実験ケースも比較的小さい圧縮方向の軸力が発生していることがわかる。載荷圧が90kPaの場合には、圧縮方向の軸力が更に大きくなる傾向が見られる。特に B/H が0.25と最も小さいCase2での軸力が大きいことが分かる。いずれのケースでも深度が60mm付近で軸力が局所的に小さくなっている。この位置は、陸側の杭で見られた位置と同じ位置である。

以上のように軸力分布図から、載荷圧が大きくなると陸側の杭では引張力、海側の杭では圧縮力の作用が顕著になることが分かった。軸力は部材の断面積によって異

なるため、陸側・海側の杭に係わらず軸力が増減する変化点はほぼ同じ位置であることが分かった。また、いずれの実験ケースでもこの傾向は変わらなかった。深度が60mm付近に軸力の変化点があるが、この位置の付近に断面積の変化はなく、軸力の変化点を表れた原因は不明である。しかし、深度が110mm付近における軸力の変化点では、深度が110mm付近より小さくなると、アークトラス模型は杭と矢板の構造になり杭のみの構造と比べて断面積が大きくなる。つまり、杭と矢板で軸力を分担して受け持つようになり、杭自体に作用する軸力は減少する傾向が分かった。また、深度が110mm付近以深では、深度が大きくなるにつれて軸力が小さくなる傾向が見られ、砂と杭の摩擦が発揮されたものと考えられる。

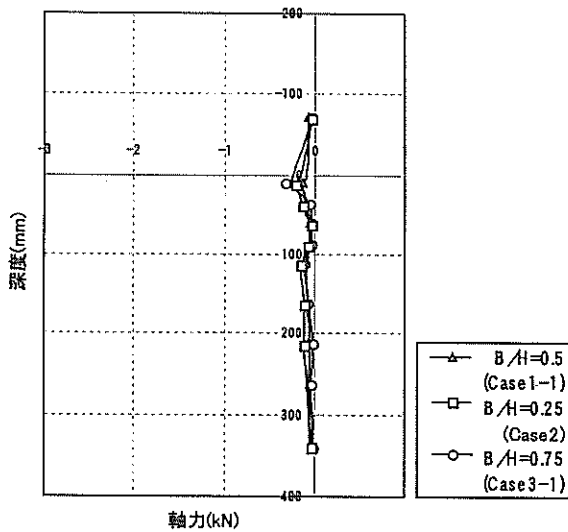


(a) 載荷圧 50kPa

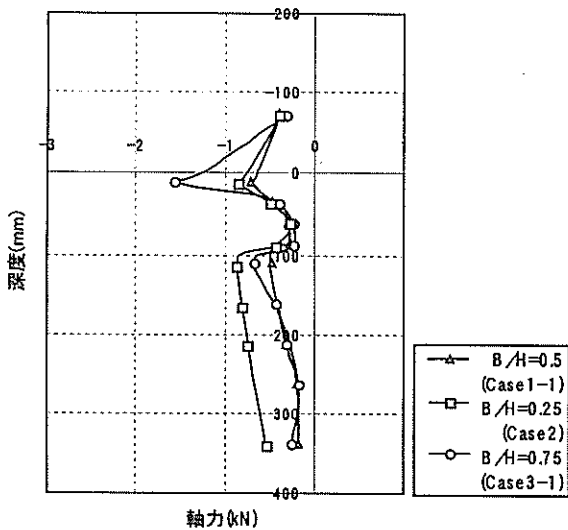


(b) 載荷圧 90kPa

図-22 軸力分布図(陸側杭)



(a) 載荷圧 50kPa



(b) 載荷圧 90kPa

図-23 軸力分布図(海側杭)

(4) トラスの軸力

従来の二重矢板式護岸では前面の矢板と控壁をつなぐ力はタイロッドによる引張力のみであった。本研究で対象としたアークトラスは、前面の矢板と控壁をトラスで剛結しているため、トラス部全体が剛体として挙動し、埋立圧力を支持するようになる。ここでは、トラス部材に発生する軸力と載荷圧の関係を考察する(次頁)。まず、陸側杭のトラス中程の軸力について見ると(図-24(a))、いずれの実験ケースも載荷圧の増加にともない徐々に引張力は発生している。一方、対称的な位置にある海側の杭の軸力では(図-24(b))、圧縮力が発生していることが

分かる。次に、トラスの斜材に発生する軸力と載荷圧の関係について見ると(図-24(c)~(f))、海側に傾斜している斜材(BE-aとBW-b)では圧縮力が、陸側に傾斜している斜材(BE-bとBW-a)では引張力が発生し、その大きさもほとんど同程度であることが分かる。トラスの上下に位置する水平の部材(HUとHD)について見ると(図-24(g)と(h))、いずれの実験ケースも載荷圧が増加しても圧縮力がほとんど発生しないことが分かる。ここでのデータは載荷直前を初期値とした増分値で示したものであるが、遠心加速度増加過程における上下の水平部材の軸力は引張力を示していた。これは壁体内の中詰が広がる現象を抑制するために発生したものであり、トラスの水平部材は埋立圧力の支持よりも中詰の拘束に寄与していると考えられる。

以上のようにトラスに作用する軸力と載荷圧について考察した。発生している軸力に関して、定性的には妥当なものであった。また、いずれの実験ケースもほぼ同じ値であり、壁体幅の影響はあまり見られなかった。

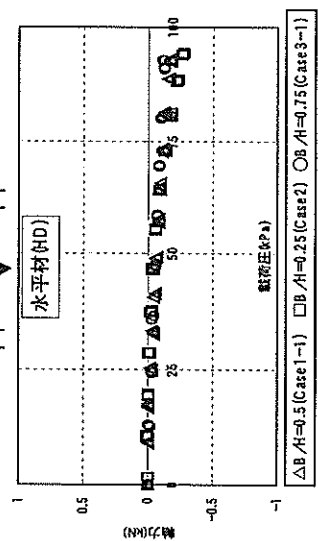
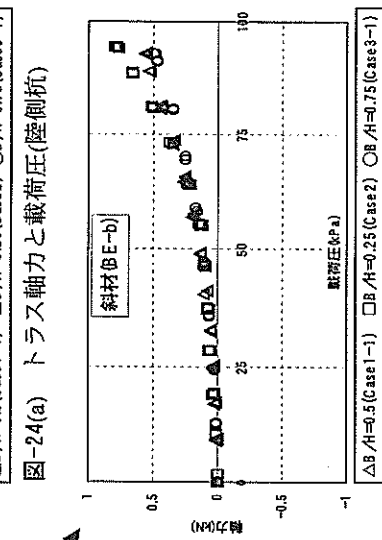
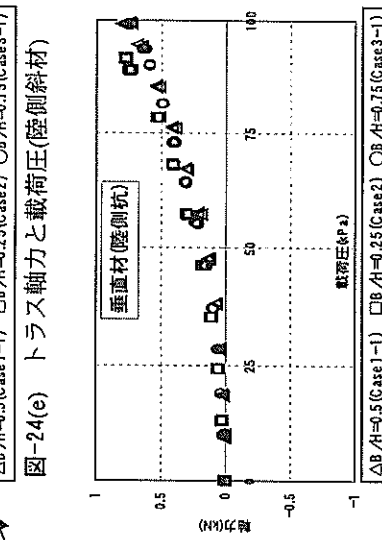
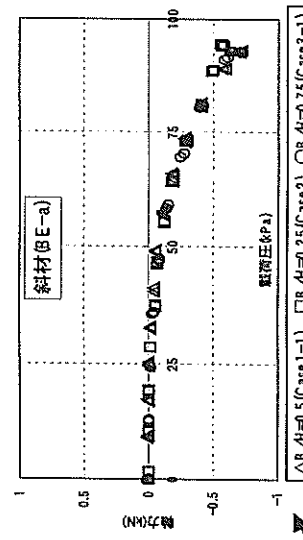
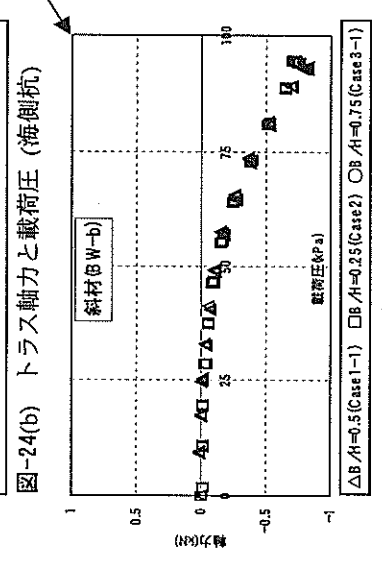
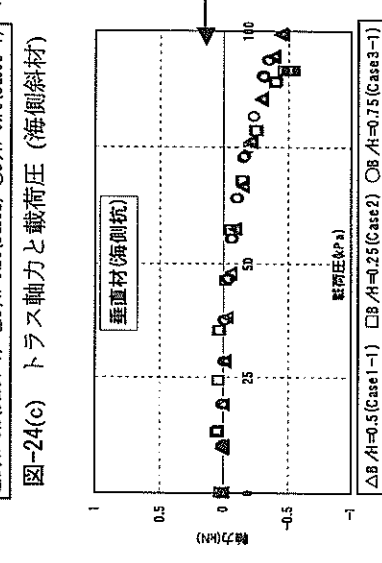
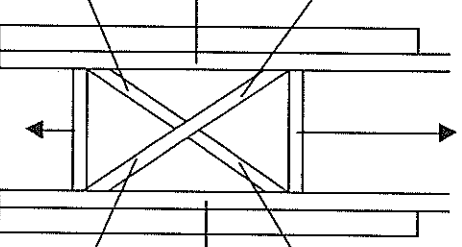
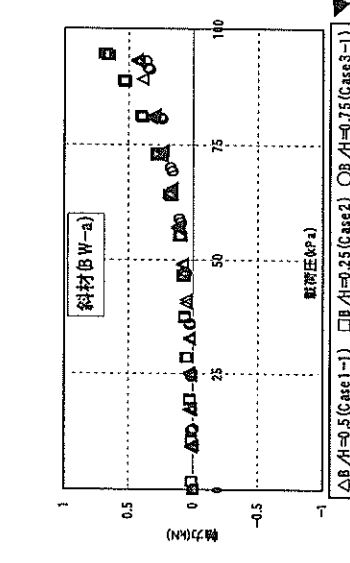
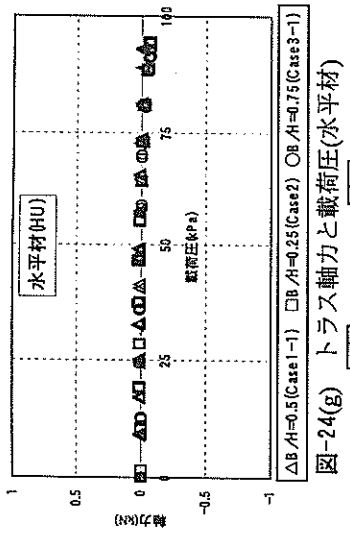
4. 結論

本論文では、新しい二重矢板式護岸を想定したモデルを用いた遠心実験結果を報告したものである。この実験は、埋立土による構造物への土圧の増加状況を模擬したものである。ここでは、壁体幅の違いが、水平変位・杭に生じる曲げモーメント・軸力に及ぼす影響について検討した。この実験では、実験装置の都合から実験の再現性が高いことが要求されたが、模型作製や載荷実験を十分に管理・注意して実験を行うことで再現性の高い模型実験を行うことができた。

実験の結果、壁体幅が増加すると、変位・曲げモーメント・軸力が減少する傾向が見られたが、壁体幅が裏込め高さの0.5倍以上になると、減少する傾向が非常に小さく、壁体幅の影響が小さいことが分かった。一方、トラス部の部材に発生する軸力は壁体幅の影響をほとんど受けずほぼ一定であった。

5. あとがき

本研究は、アークトラスの挙動に関する共同研究の一部として実施した遠心模型実験結果を取りまとめたものである。実験では、単純化された模型地盤を対象に限られた数の実験を実施したが、矢板壁と控壁との間隔がアークトラスの挙動に及ぼす影響を定性的に評価することができた。共同研究では、今後、模型実験の条件を再現



したFEM解析を実施し、模型実験結果の評価と、現地で一般的に見られる粘土地盤中（改良地盤）での挙動の検討を行う予定である。

（2003年5月12日受付）

参考文献

- 1) 峰岸竜太, 日下部治, 高橋章浩, 川端規之, 沖 健: SCP改良地盤上の高剛性セル構造護岸の安定性に関する研究, 第37回地盤工学研究発表会（大阪）2002年7月, pp.1565-1566.
- 2) 北詰昌樹: 新遠心模型実験装置の開発と研究への適用, 港湾技研資料, No.812, 1995.
- 3) Masaki Kitazume, Shogo Miyajima, Yoshitada Nishida: "STABILITY OF REVETMENT CLAY IMPROVED BY SCP": PROCEEDINGS OF SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFT SOIL ENGINEERING, VOLUME 1, pp.455-460,1996.
- 4) 寺師昌明, 遠藤敏雄, 北詰昌樹: 遠心模型実験の計画と結果の信頼性—支持力に関する国際比較実験例—, 港湾技術研究所報告, 第28巻第3号, 1989, pp59～79.
- 5) 水谷太作, 脇屋泰士, 芥川博昭, 高橋邦夫, 菊池喜昭: 高剛性二重矢板壁の挙動特性の実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.42A, pp.1203-1211, 1996.

港湾空港技術研究所資料 No. 1058

2003.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 野崎印刷紙器株式会社

Copyright © (2003) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。