

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.2 June 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 2 号 (Vol. 49, No. 2), 2010年6月 (June 2010)

目 次 (CONTENTS)

固結特性を有する粒状材を用いた SCP改良地盤の安定性に関する実験的検討 高橋英紀・森川嘉之 3	
(Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular MaterialHidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA)	
高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討 菊池喜昭・岡祥司・水谷崇亮 21	
(Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace SlagYoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI)	
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf ZoneYoshiaki KURIYAMA..... 47	
(戻り流れ速度・沿岸流速に関する数値モデル)栗山善昭	
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar MigrationYoshiaki KURIYAMA..... 67	
(沿岸砂州の繰り返し沖向き移動に関する数値計算)栗山善昭	
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone Yoshiaki KURIYAMA..... 91	
(砕波帯内外における沿岸漂砂量の岸沖分布の推定)栗山善昭	
台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象 中川康之・有路隆一.....107	
(Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo BayYasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI)	
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN - Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA.....123	
(沿岸水温を推定するヒステリシスループモデルの開発 ー三河湾ブイモニタリングデータを活用してー) 趙烘輦(チヨホンヨン)・鈴木高二朗・中村由行	

固結特性を有する粒状材を用いた SCP 改良地盤の安定性に関する実験的検討

高橋 英紀*・森川 嘉之*

要 旨

軟弱粘土地盤上に重力式岸壁を整備する場合、安定性の向上ために締固め砂杭工法（サンドコンパクションパイル工法）が多く利用されている。本研究では、改良材として砂質土の代わりに固結特性を有する粒状材（具体的には、鉄鋼スラグ）を用いた場合の地盤安定性について遠心模型実験によって検討した。実験では、改良材として砂質土、鉄鋼スラグ、セメント固化処理土を選び、埋立載荷実験を実施した。その結果、砂質土および鉄鋼スラグによる改良地盤の変形モードは一致した。また、杭式あるいは壁式改良工法にかかわらず、砂質土よりも鉄鋼スラグで改良を施した地盤の方が載荷に伴う変形量が小さく、安定性も高かった。

キーワード：SCP 工法，鉄鋼スラグ，埋立載荷実験，遠心模型実験

* 地盤・構造部 地盤研究領域 地盤改良研究チーム
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 電話：046-844-5055 Fax：046-841-8098 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular Material

Hidenori TAKAHASHI*
Yoshiyuki MORIKAWA*

Synopsis

Sand compaction pile method (SCP method) has been employed for soft clay layer beneath gravity-type quay walls in order to improve the ground stability. In this study, a series of centrifuge model tests were conducted to investigate the stability of ground improved by solidified granular material (e.g., iron-and-steel slag). Sand, iron-and-steel slag, and cement-treated soil were chosen as the improvement materials for the backfill loading model tests. The model grounds using sand and iron-and-steel slag showed the same ground deformation mode. In addition, the ground displacement in the iron-and-steel slag case could be found to be smaller than that of sand case in both pile-type and wall-type improved ground.

Key Words: SCP method, iron-and-steel slag, backfill loading test, centrifuge model test

* Soil Stabilization Group, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445055 Fax : +81-46-8418098 e-mail:takahashi-h@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 埋立载荷実験条件	7
2.1 模型実験の概要	7
2.2 模型地盤の作製方法	8
2.3 载荷実験方法	10
3. 模型実験結果	10
3.1 地盤の変形特性	10
3.2 改良材の破壊状態の確認	13
3.3 埋立圧力と地盤変位の関係	14
3.4 改良材間の粘土層での排水および応力分担比	15
4. 改良地盤の破壊メカニズムの考察	16
4.1 破壊形態および杭間粘土層の影響	16
4.2 改良杭の破壊メカニズム	16
5. まとめ	18
6. あとがき	18
謝辞	18
参考文献	19

1. まえがき

我が国の港湾地域では軟弱な粘性土が堆積していることが多く、このような地盤上に重力式の岸壁や護岸を整備する場合、ケーソンの重量や埋立土からの荷重荷重に対して安定性を向上する必要がある。安定性を向上させるための地盤改良工法として代表的なものに、締固め砂杭工法（サンドコンパクションパイル工法、SCP工法）¹⁾がある。この工法は1960年代から多くの現場で使われてきたものであり、地中に締固めた砂杭を打設し、杭間粘土層について杭と鉛直方向の圧密も促進する方法である。この工法の施工実績は多く、現在でも最もよく利用される地盤改良工法の一つである。

SCP工法に用いる改良材には砂質土を用いるのが一般的であったが、近年は良質な砂質土が枯渇していることや、リサイクル材の有効利用が模索されていることから、改良材として砂質土の代替材の利用が検討されている²⁾。その一つに鉄鋼スラグが挙げられる。鉄鋼スラグは、鉄鋼を生産する際に発生する副産物であり、廃棄処分の難しさから有効利用方法が多く検討されている。鉄鋼スラグを水中で放置すると、内部摩擦角を失わずに固結する特性を有するものがあり、さらに鉄鋼スラグの種類（高炉あるいは製鋼）や粒度を調整することで固結強度や速度を変化させることができるものもある³⁾。鉄鋼スラグは大きなせん断強度を発揮できる材料であり、大きな安定性を実現するSCP工法の改良材として有用であると予測できる。ただし、固結特性を有することで脆性破壊を生じる危険性もあり、せん断強度の増加量だけ安定性が増すとは限らない。鉄鋼スラグを改良材として用いたSCP改良地盤の圧密特性や変形挙動について検討した事例^{4),5),6),7),8)}はあるが、その改良地盤の埋立荷重荷重に対する安定性を検討した例はない。

そこで本研究では、固結特性を有した鉄鋼スラグを改良材として用いた地盤の埋立荷重に対する安定性を検討した。具体的には、異なる土木材料である砂質土(ϕ 材)、鉄鋼スラグ(c, ϕ 材)、セメント固化処理土(c 材)を改良材とした模型地盤を作製し、遠心力場で埋立荷重実験を実施して、地盤の変形特性や破壊挙動について観察を行った。改良形式としては杭式および壁式（接円式を想定）を採用し、改良形式の違いが変形モードに与える影響についても検討を行った。これらの検討に基づき、鉄鋼スラグのSCP工法における改良材としての適用性について考察した。なお、本論文で述べる遠心模型実験は当研究所と広島大学、新日本製鐵、不動テトラとの共同研究の一環で実施されたものである。

2. 埋立荷重実験条件

2.1 模型実験の概要

本研究では、剛性と強度が大きく異なる改良材と粘土層の複合地盤に対して埋立荷重実験を行い、その複合地盤の変形特性および破壊へ至る過程を調べる。実験では、遠心力を利用して正規圧密粘土層を作製し、粘土層にくり貫いた穴に別に作製しておいた改良杭あるいは改良壁を打設することによってSCP改良地盤を模した複合地盤とした。この作製方法を採用した理由は、改良材の物性を管理できるだけでなく、粘土層を乱さないために粘土層の物性を正確に把握できるためである。このように改良材および杭間粘土層の物性を把握することは、数値計算などを行う上で必要不可欠である。

現場でのSCP改良の手順を図-2.1に示す。現場では、ケーシングパイプを振動あるいは回転圧入させながら原地盤に改良杭を打設する。この打設に伴って粘土層は繰り返しせん断や大変形を受けて大きく攪乱される。また、改良杭径が広がるために、粘土層は改良杭から水平荷重を受けて圧密する。この影響については、八木ら^{9),10)}、一本¹¹⁾、松尾ら¹²⁾、松田ら¹³⁾、庄野ら¹⁴⁾、近井ら¹⁵⁾が詳しく調べている。これらの研究によると、施工中に攪乱を受ける粘土層は堆積過程で形成された微視的骨格構造が破壊し、改良杭の拡径によって圧密される。この結果、杭間粘土層は過圧密状態となり、せん断強度は増すことが指摘されている。しかしながら、過圧密比がそれほど大きくないことから、せん断変形に伴ってピーク強度後に強度が若干低下する軽い歪み軟化挙動を示すことがあっても、ピーク強度を発揮した後に強度が著しく低下する軟化挙動は示さない^{9)~15)}。これらの過去の研究を

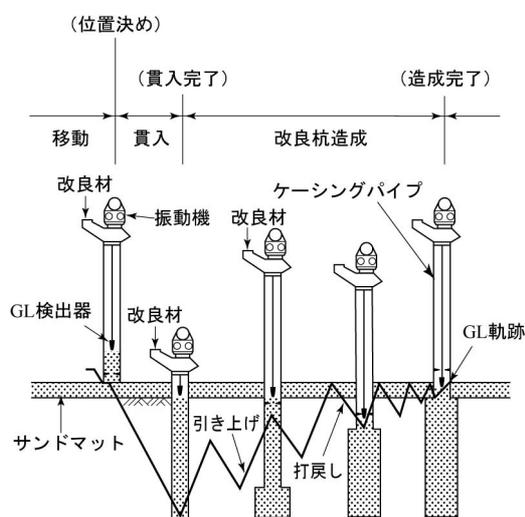


図-2.1 現場でのSCP工法の打設手順

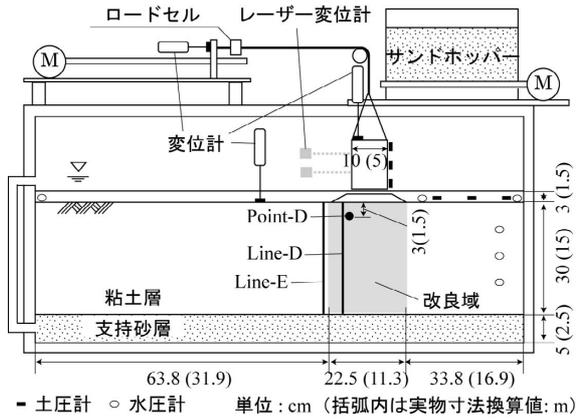


図-2.2 模型地盤の概略図

参考にすると、せん断変形時の応力～歪み関係が正規圧密粘土のように軽い歪み硬化あるいは軟化挙動を示す粘土を用いても、杭間粘土層として基本的なせん断特性をモデル化できる。本研究は剛性と強度が大きくことなる改良材と粘性土の複合地盤としての地盤挙動を調べるものであるため、基本的なせん断特性をモデル化できれば、必ずしも現場の施工過程を模型実験で忠実に模擬する必要はないと考えた。これらのことから、前述のような粘土層を乱さない改良地盤の作製方法を採用した。

作製した改良地盤を遠心力場で自重圧密させた後に、そのまま遠心力場で模型ケーソンを設置し、さらにケーソン背後の粘土層表面上に砂を堆積させて改良地盤を埋立載荷した。自重圧密後に遠心力場でケーソンを設置したのは、粘土層の圧密が終了してからケーソンを設置するためであり、現場での条件に合わせている。

2.2 模型地盤の作製方法

(1) 支持層および粘土地盤

図-2.2 に模型地盤の概略図を示している。支持層には豊浦珪砂（物性は表-2.1(a)を参照）を用いており、その相対密度は86～91%であった。粘土地盤にはカオリン粘土（物性は表-2.1(b)を参照）を用いており、含水比120%のスラリー状の粘土を10 kN/m²の載荷圧で1次元圧密させた後に、50Gの遠心力場で自重圧密を行った。自重圧密後に遠心力場で作動するベーンせん断試験機（図-2.3参照）で非排水せん断強さを計測した。ベーンせん断試験から得られた非排水せん断強さの深度分布を図-2.4に示す。図中のケース名の説明は後述する。データが深部で多少ばらついているが、深いほど非排水せん断強さが大きくなる地盤が作製されたことが分かる。実験データに対して回帰直線をあてはめ、その勾配を求めると実物寸法換算で2.27 kN/m²/m（模型スケールで1.14

表-2.1 模型実験に用いた地盤材料の物性

(a) 豊浦珪砂				
ρ_s g/cm ³	ρ_t (e=0.70) g/cm ³	D_{50} mm	U_c	
2.66	1.98	0.18	1.49	
e_{max}		e_{min}		ϕ_d (度) (e=0.70)
0.990		0.607		37
(b) カオリン粘土				
ρ_s g/cm ³	最大粒径 Mm	w_L %	w_P %	I_P %
2.72	0.106	59.3	26.3	33.0
砂分 % (75 ~ 2000 μ m)		シルト分 % (5 ~ 75 μ m)		粘土分 % (5 μ m 未満)
0		21		79
C_C		C_S		c_u/p
0.47		0.09		0.47
(c) 鉄鋼スラグ				
ρ_s g/cm ³	ρ_t g/cm ³	D_{50} mm	U_c	
3.05	2.23	0.93	12.7	
q_u kN/m ²		c_d kN/m ²		ϕ_d (度)
225		69		45
(d) セメント固化処理土				
ρ_s g/cm ³	ρ_t g/cm ³	q_u (有芯) kN/m ²	q_u (無芯) kN/m ²	
2.77	1.49	1179	937	

kN/m²/cm)であった。なお、圧密非排水三軸試験によって得られた c_u/p は0.47であったが、この値と自重圧密後の粘土層における $K_0 = 0.48$ ($K_0 = 1 - \sin \phi' = 1 - \sin 31^\circ$ より算出)、 $\gamma = 6.4$ kN/m³ (実験値)を用いると、深さ方向のせん断強度の増加勾配は1.97 kN/m²/mとなる。この増加勾配は、ベーンせん断試験結果と比較的近かった。

(2) 改良材

表-2.2 に示すように、改良条件を変化させて全5ケースの実験を実施した。改良材には砂質土、鉄鋼スラグ、セメント固化処理土を用いて、改良形状としては杭式か壁式とした。壁式は複数の打設杭が接した状態を想定したものであるが、実際の施工では杭間をオーバーラップさせることはできないために、壁式は極端に理想的な状態である。改良率は58%と統一した。なお、改良率とは、改良対象の体積に占める改良材の体積の比率である。改良材としての砂質土には豊浦珪砂を用いた。小型の振動機によって水浸下で2分間振動させて締固め、杭型あるいは箱型のプラスチックモールドに詰めた状態で凍結させ、凍結後に脱型して粘土地盤へ打設した（図-2.5参照）。改良材としての砂質土の相対密度は約75%であった。ま

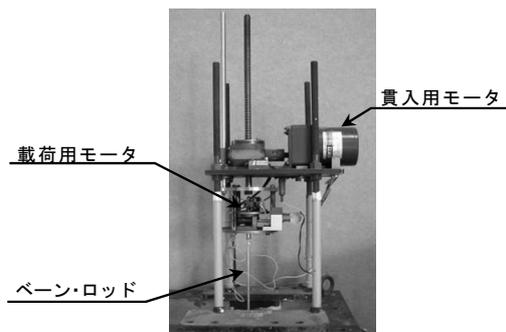


図-2.3 遠心力場用ベーンせん断試験機

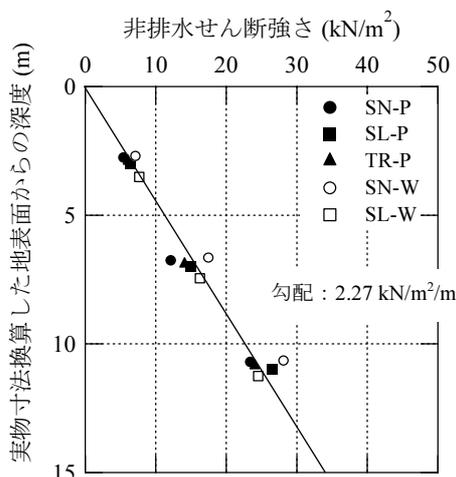


図-2.4 粘土地盤の非排水せん断強さの深度分布

た、凍結前と解凍後において、相対密度はほぼ変化しないことを確かめている。なお、改良材の変状を観察しやすいように、着色した砂を等間隔で介在させた。

改良材としての鉄鋼スラグには、質量比 8:2 の製鋼と高炉スラグを混合して 5 mm 以上の粒径のものを取り除いたスラグを用いており、杭型あるいは箱型のモールド内で突固めて作製した。使用した鉄鋼スラグの物性を表-2.1(c)に示す。養生は、水浸状態で1週間とし、1週間経過した後に凍結させた。これは、スラグの特性として凍結によって固結作用が停止するためであり、強度増加を止めた。その後、模型地盤に打設して空中で放置して融解し、再び強度を増加させた。模型地盤に打設してから1週間後に埋立載荷実験を実施するため、合計で2週間の養生期間となる。なお、凍結と融解の作業を行うとスラグの強度は低下するため、模型実験と同じ条件で養生した供試体に対して三軸圧縮試験 (CD 試験) を実施し、その強度を調べた。また、杭形状の改良材を用いた実験ケースについては、載荷実験後に破損しなかった部分の改良杭を切り出し、一軸圧縮試験に供した。これらの試験で得られた結果も表-2.1(c)に併せて示す。

脆性を有する改良材での地盤挙動を調べることを目的

表-2.2 模型実験ケース

ケース名	改良材	改良形式	改良率
SN-P	砂	杭式	58 %
SL-P	スラグ	杭式	58 %
TR-P	固化処理土	杭式	58 %
SN-W	砂	壁式	58 %
SL-W	スラグ	壁式	58 %



図-2.5 粘土地盤への改良杭の打設風景

に、セメント固化処理土も改良材の一つとして採用した。この固化処理土は、川崎粘土 (川崎港で採取した海成粘土, $w_L = 48.6\%$) の含水比を 130 % に調整した後に、普通ポルトランドセメントを乾燥重量比 30 % で混合して作製した。杭型モールドに詰めて水浸下で 4 週間以上養生した。これは予備試験で川崎粘土のセメント固化処理土の強度増加率は 4 週間で小さくなるためである。セメント固化処理土の物性と力学特性は表-2.1(d)に示している。なお、載荷中に改良杭が折れたことを判別するための通電用の棒 (炭素棒) を芯として入れている。この芯が有る場合と無い場合の一軸圧縮試験結果を表に示している。実験では全ての改良杭に有芯のものを用いた。

(3) 改良方法

改良材の形状として杭式の場合、その直径は 4 cm (遠心加速度が 50G なので実物寸法換算で 2 m に相当) である。壁式の場合のその厚さは 2.8 cm (実物寸法換算で 1.4 m) で、幅が 22.5 cm (実物寸法換算で 11.25 m) である。粘土地盤への打設は以下のように行った。粘土地盤に肉厚の薄いアルミパイプ (杭式の場合) あるいはアルミの型枠 (壁式の場合) を挿入してパイプ・型枠内の粘土を抜き出し、パイプ・型枠を抜いた後の穴に凍結試料を挿入した。杭式のケースでは矩形配置、壁式のケースでは奥行き方向に平行配置とした。全ケースにおける配置の概略図と打設後に撮影した写真を図-2.6 に示している。

(4) その他の模型作製作業

改良材の打設後、試料容器側面のガラス窓を取り外し画像解析用のターゲットを粘土地盤側面に設置した。20 mm 間隔で粘土地盤に付けたターゲットは直径 5 mm のプラスチック製ビーズである。改良材を埋め込んだ位置

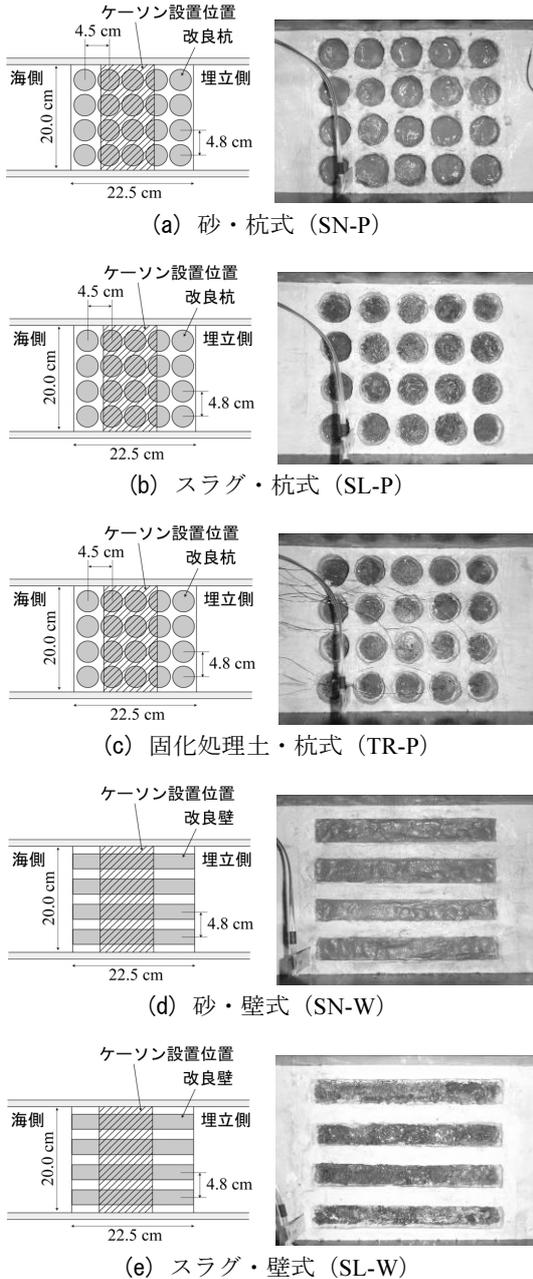


図-2.6 改良材の配置図および改良状況の写真

には着色した乾麺を貼り付けたので、画像解析から載荷実験中の地盤変位を求めることができる。また、土試料投入前に試料容器の全側面にはシリコングリースとシリコンオイルを質量比 1:1 で混合したものを塗布しており、摩擦力を取り除いた。ターゲットの設置後、計測センサー類や砂ホッパー、ケーソン吊降ろし機を設置し、改良域表面に豊浦珪砂で高さ 2 cm（実物寸法換算で 1 m）のマウンドを作製した。マウンドの設置後、マウンドの天端高さに水面高さを合わせた。なお、サンドホッパーにも豊浦珪砂を充填しており、埋立部も豊浦珪砂で作製されることになる。

2.3 載荷実験方法

当研究所が所有する遠心模型実験装置 Mark II を用いて実験を行った。装置の最大有効回転半径は 3.8 m であり、最大搭載容量は 312 G・ton である。主要な諸元は文献¹⁶⁾を参照されたい。載荷実験は 50G 場で実施した。

重力場で改良材を打設した模型地盤を再び遠心力場で自重圧密させた後、マウンド上に浮かして吊るした模型ケーソンをモータージャッキで降ろして設置し、ケーソン背後をサンドホッパーで埋め立てた。模型ケーソンはアクリル製の容器に砂と鉛玉を詰めたものであり、その質量は 4.0 kg である。模型ケーソンを設置してから埋め立てを開始するまでの時間を 60 sec とした。埋め立ては 5 sec 間の砂降ろし期間と 25 sec 間の放置期間を 1 サイクルとし、17~22 サイクルとした。この載荷速度は実物寸法換算で 6.1 kN/m²/day に相当し、現場に比べると急速な載荷と言える。埋立中には、センサーによって土圧や水圧、変位を測定し、画像解析用の写真を試料容器側面のガラス窓から撮影した。埋め立てが終了した後に、直ちに遠心模型実験装置を停止させ、模型地盤を重力場へ戻した。

載荷実験後、模型地盤の埋立土の形状や質量、地表面変位等を計測した。その後、傾斜台上に試料容器を載せて試料容器側面のガラス窓を取り外し、改良杭や改良壁を乱さないように改良杭あるいは改良壁の半面および改良材の間の粘土を削り取り、改良材の変状を撮影した。

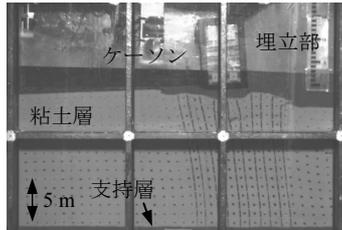
3. 模型実験結果

3.1 地盤の変形特性

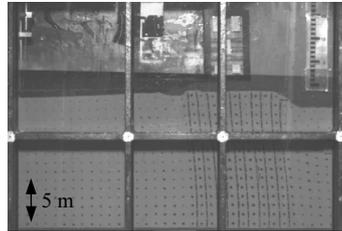
(1) 地盤全体の変形状況

遠心力場での撮影写真から埋立載荷を行った際の改良地盤の変状を観察した。図-3.1 に、全実験ケースでの写真を示す。杭式改良のケースには改良域上端での水平変位が 1.0 m 程度となった時点の写真を、壁式改良のケースには埋立圧力（埋立部下部の粘土層表面に作用する有効上載圧）が最大となった時点の写真を示している。それぞれの時点での埋立圧力 p_b も併せて記載している。白色の粘土地盤に見える黒点は画像解析用のターゲットである。また、縦方向の破線状のターゲットは改良材が挿入されている位置に貼り付けてあり、これから改良材の動きを推定できる。

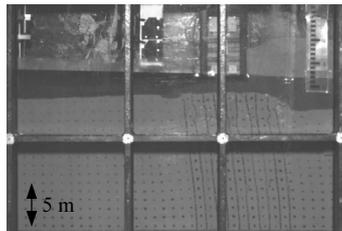
図を見ると、ケーソン背後をサンドホッパーで埋め立てると、ケーソンおよび改良域内の地盤が海側へ変位している。杭式の改良を施した 3 種類の実験ケース SN-P、SL-P、TR-P では、改良杭が海側へ曲がりながら地盤が変



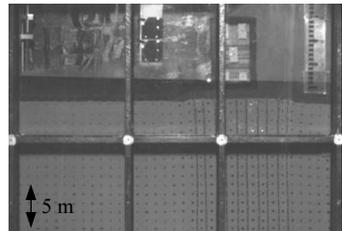
(a) 砂・杭式 (SN-P) $p_b=110 \text{ kN/m}^2$



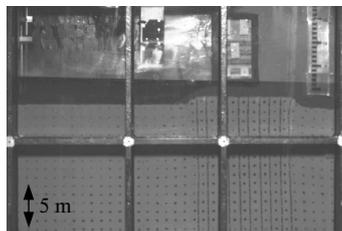
(b) スラグ・杭式 (SL-P) $p_b=127 \text{ kN/m}^2$



(c) 固化処理土・杭式 (TR-P) $p_b=69 \text{ kN/m}^2$



(d) 砂・壁式 (SN-W) $p_b=106 \text{ kN/m}^2$

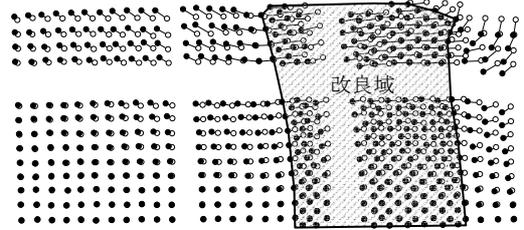


(e) スラグ・壁式 (SL-W) $p_b=117 \text{ kN/m}^2$

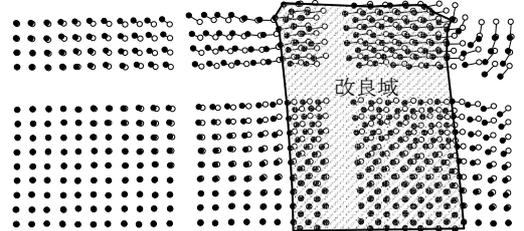
図-3.1 遠心力場での埋立载荷後の地盤変形状況

位する。一方、壁式の改良を施した2種類の実験ケース SN-W, SL-W では変位量が小さく、改良域の変形も小さかった。

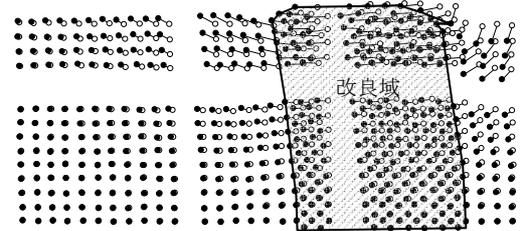
図-3.1 のような遠心力場での撮影写真から粘土層のターゲットに対して画像解析を行い、载荷中の地盤変位を求めた。図-3.2 に粘土層での変位図を示している。図には埋立载荷前後のターゲットの位置を示しており、埋立载荷前を白丸で、载荷後を黒丸で示している。図



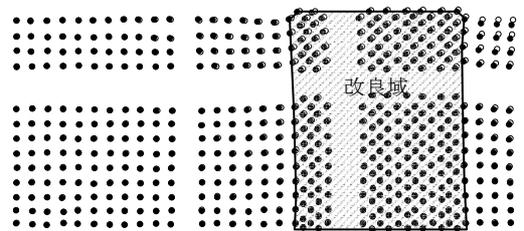
(a) 砂・杭式 (SN-P) $p_b=110 \text{ kN/m}^2$



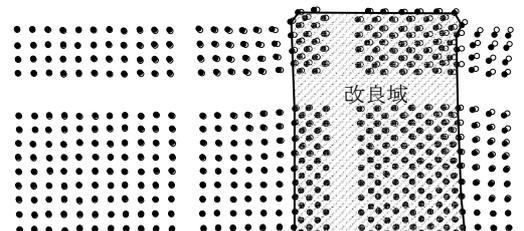
(b) スラグ・杭式 (SL-P) $p_b=127 \text{ kN/m}^2$



(c) 固化処理土・杭式 (TR-P) $p_b=69 \text{ kN/m}^2$



(d) 砂・壁式 (SN-W) $p_b=106 \text{ kN/m}^2$



(e) スラグ・壁式 (SL-W) $p_b=117 \text{ kN/m}^2$

図-3.2 埋め立てに伴う地盤変位

-3.2(a)に示した実験ケース SN-P での地盤変位を見ると、地盤の下端付近ではほぼ変位しないが、埋立土やケーソンに近いほど変位量大きい。改良域内においても上部ほど変位量大きく、改良域の変形に注目すると途中で曲がる様子が分かる。なお、改良域を通過するような滑り面は観察されなかった。他の杭式改良の実験ケース SL-P, TR-P (それぞれ図-3.2(b), (c)に図示) においても、埋立土やケーソンに近いほど変位量大きい点や改良域

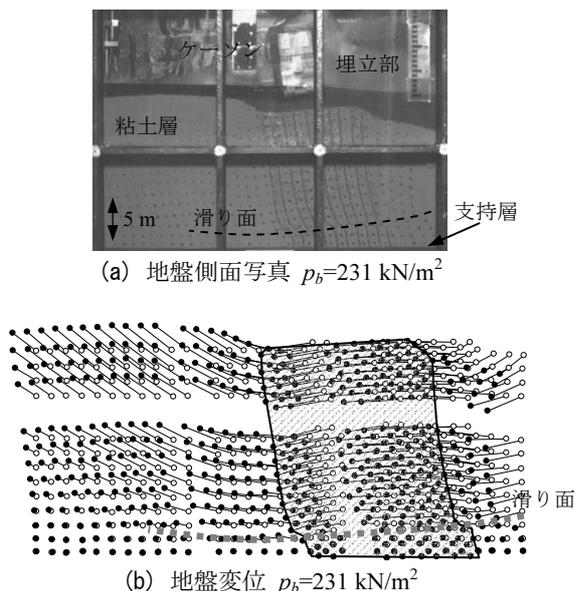


図-3.3 遠心加速度増加に伴う载荷実験

が曲がる点などの変状が一致しており、定性的な変形挙動が等しかった。

図-3.2(d) に示した壁式改良の実験ケース SN-W を見ると、改良域はほぼ変位しないことが分かる。改良域より埋立側の粘土地盤は下部へ沈下しているが、その量は小さい。このケースについても改良域を通過するような滑り面は観察されなかった。他の壁式改良の実験ケース SL-W (図-3.2(e) に図示) においても変位量は小さかった。このように、壁式改良のケースについてはケーソンや改良域の変位量が小さく、地盤が破壊状態に至らなかった。このため、実験ケース SN-W については、より大きな埋立圧力を加えるために、埋立土の上層を比重が大きい鉛玉に置き換えて、模型に加える遠心加速度を増して大きな埋立圧力を加えた。この結果、遠心加速度を 35G から 40G に増加させる際に改良域内の下部にせん断滑り面が生じた。この地盤側面写真および地盤変位図を図-3.3 に示す。改良域埋立側の粘土地盤には埋立部から続く滑り面が生じており、滑り面が生じる変形モードで地盤が破壊に至ることが分かった。このように、杭式と壁式のように改良形式が違えば、破壊に至る変形モードが異なることが分かった。

(2) 粘土地盤の水平変位分布

改良域内の海側 (図-2.2 に示した Line-D (杭式改良) および Line-E (壁式改良)) での水平変位の深度分布を図-3.4 に示す。水平変位量は埋立载荷直前からの増分であり、変位分布計測センサー (両面に歪みゲージを貼り付けたリン青銅板) によって計測したものである。ひずみゲージで計測した値から得られた曲げモーメントを積

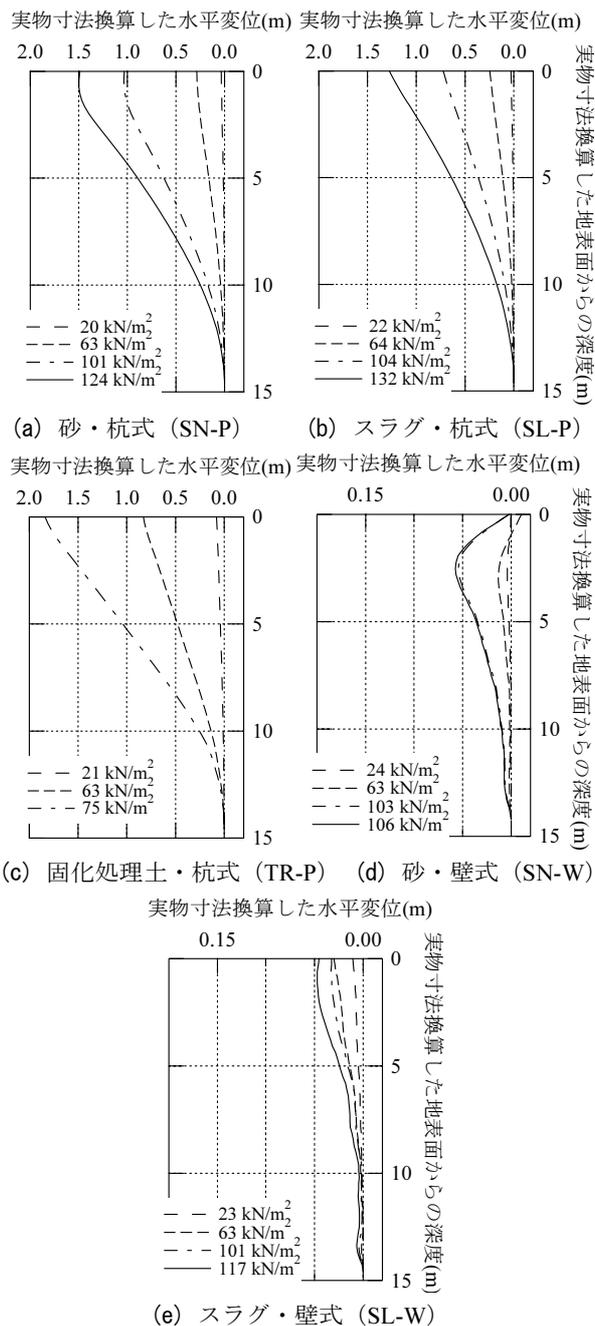


図-3.4 改良域の水平変位分布

分することによって変位を求めており、この変位量はターゲットの画像解析から求めた変位量とほぼ等しくなることを確かめている。また、縦軸は埋立载荷直前における粘土層表面からの深度である。

図-3.4(a) に示した実験ケース SN-P での水平変位分布を見ると、埋立圧力が 20 kN/m² では改良域はほとんど変位しないが、63 kN/m² になると改良域の 12 m 付近の深度より浅で、浅いほど大きな変位が生じていた。さらに埋立圧力を大きくすると水平変位量は大きくなり、埋

立圧力が 124 kN/m^2 になると $6\sim 13 \text{ m}$ の深度で水平変位分布が湾曲していた。図-3.4(b) に示した実験ケース SL-P においても、SN-P と同様の水平変位特性が表れている。つまり、埋め立てに伴って浅いほど大きな水平変位が生じ、 $6\sim 13 \text{ m}$ の深度で変位分布が湾曲していた。

図-3.4(c) に示した実験ケース TR-P では、埋め立てに伴って浅いほど大きな水平変位が生じる点は共通するが、 12 m の深度で変位分布が局部的に屈曲していた。なお、杭式改良での変位分布の違いは、次節に示す改良杭の変形状況に起因するものである。

図-3.4(d) に示した壁式改良の実験ケース SN-W での水平変位分布に注目すると、上部ほど変位量が大きくなる傾向にあるが、埋立圧力を 106 kN/m^2 と大きくしても水平変位量は小さかった。実験ケース SL-W (図-3.4(e) に図示) においても、変位量が小さいことが確認できた。なお、これらのケースにおける水平変位分布から判断しても滑り面は確認できなかった。

3.2 改良材の破壊状態の確認

地盤の変形状況で示したように、改良材の種類にかかわらず、杭式改良地盤では改良域の上部ほど水平変位が大きく、埋立载荷によって大きな変位が生じた。壁式に改良した場合、埋立载荷では大きな変位は生じなかったが、埋立部を鉛玉で置き換えた砂質土の壁式の実験ケースでは滑り面が発生した。载荷実験後に模型地盤を側面から解体し、改良材の変形と破壊状況を観察した。これを図-3.5 に示す。なお、改良材を砂質土とした杭式と壁式改良のケースでは、変形状況を見やすくするために、色砂層を等間隔に介在させている。

実験ケース SN-P の結果を示した図-3.5(a) を見ると、改良杭は海側へ緩やかに湾曲している様子が分かる。湾曲する度合いは海側の改良杭ほど顕著である。図-3.5(b) に示した実験ケース SL-P では、変位量自体が小さいものの、海側へ緩やかに湾曲する変形状況は砂質土の場合と共通していた。一方、図-3.5(c) に示した実験ケース TR-P では、改良杭の下部付近でクラックが発生し、この箇所でも局部的に屈曲していることが確認できる。砂質土および鉄鋼スラグを改良材とした場合には目視で確認できる範囲ではクラックは発生しておらず、改良杭が曲がるメカニズムは異なるようである。ただし、杭式改良の実験ケースでは、改良杭が曲がることによって大きな地盤変形が生じるという点で、変形モードは共通していた。

壁式改良の実験ケース SN-W の結果を図-3.5(d) に示している。これは埋立部を鉛玉に置き換えて大きな埋立圧力で地盤を破壊させた後の状況であり、改良壁下部に

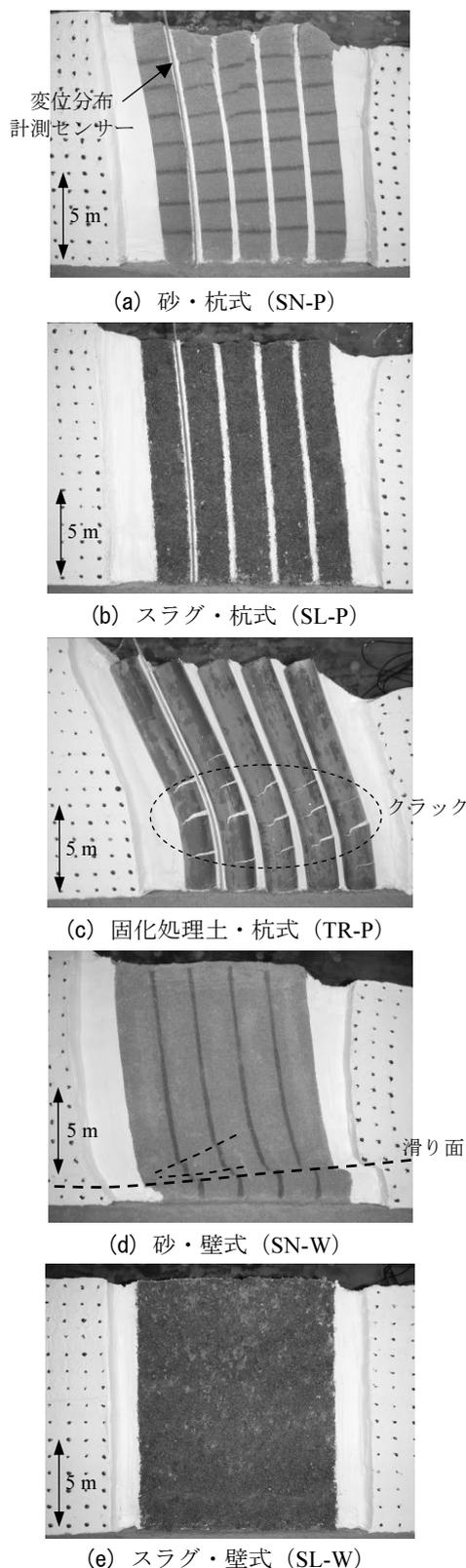


図-3.5 解体時に撮影した改良域の断面

滑り面を確認できる。図-3.5(e) に示した改良材を鉄鋼スラグとした実験ケース SL-W では、改良壁自体が多少傾斜しているが、改良壁内に大きな破壊は見られなかった。

なお、この実験ケースでは鉛玉に置き換えた载荷を行わなかったため、破壊の形態を確認できなかった。

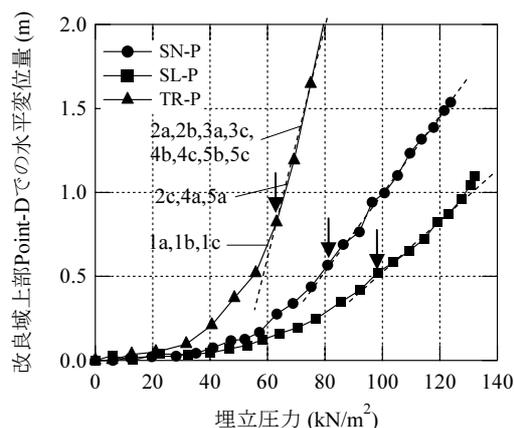
3.3 埋立圧力と地盤変位の関係

前述のように、いずれの実験ケースにおいても埋立载荷に伴って改良域上部が海側へ水平変位していた。これから、地盤の変位が増大して破壊に至る現象を考える上で、改良域上部の Point-D (図-2.2 参照, 粘土層表面から 3 cm の深度) での水平変位量を地盤変形量の代表値とした。埋立圧力と Point-D の水平変位量の関係を図-3.6 に実物寸法換算で示した。図 (a) と (b) は、それぞれ杭式と壁式の実験ケースでの圧力～変位関係であり、水平変位量はターゲットの動きを画像解析したものである。なお、セメント固化処理土で作製した改良杭には、引張破壊によるクラックが生じた時点が分かるように改良杭中心に通電状態にある炭素棒を入れた¹⁷⁾。改良杭にクラックが生じると炭素棒も折れて通電しなくなるため、クラックが生じたことが判別できる。炭素棒によって調べた引張破壊の発生時点を図に英数字で示している。英数字は改良杭の位置を表しており、奥行き方向に a, b, c と付し、海側から埋立側の方向に数えた改良杭の本数を数字で付している。

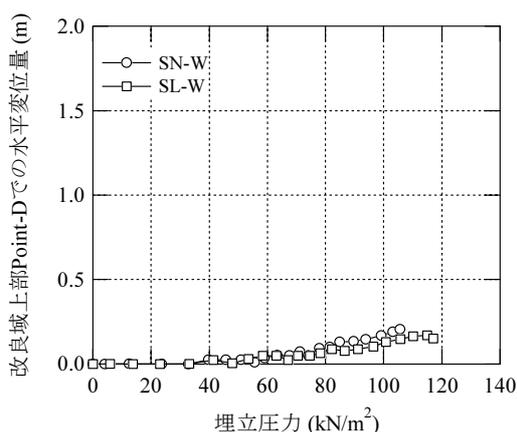
図-3.6 (a) を見ると、いずれの実験ケースにおいても埋立圧力が小さい初期段階では圧力～変位勾配は緩く、埋立圧力を増加するほど勾配が急になる。埋立圧力が十分大きくなると、圧力～変位勾配はほぼ一定となる。一定勾配となった時点で、改良杭と杭間粘土層の応力は極限状態にあると考え、この一定勾配となる始点での埋立圧力を比較することで便宜的に地盤の安定性について比較した。始点での埋立圧力は、砂質土: 81 kN/m², 鉄鋼スラグ: 98 kN/m², セメント固化処理土: 63 kN/m² であり、鉄鋼スラグの改良地盤での安定性が最も高くなり、セメント固化処理土の安定性が最も低かった。また、変位量についてはいずれの埋立圧力下でも鉄鋼スラグのケースで最も小さく収まっていた。

改良材をセメント固化処理土としたケースでの圧力～変位関係に注目すると、埋立圧力が 40～50 kN/m² 程度となると水平変位量が急増し始め、他の実験ケースよりも小さな埋立圧力で地盤が大きく変位している。水平変位が急増し始めると改良杭に引張破壊(クラック)が発生し、曲げに対する抵抗力を失って地盤が大きく変位したと考えられる。引張破壊が生じる杭の順序としては、最も海側の改良杭が初めであり、埋立側の改良杭が続いていた。

壁式改良の実験ケースでの圧力～変位関係を示した図



(a) 杭式改良のケース



(b) 壁式改良のケース

図-3.6 埋立圧力と改良域上部での水平変位量の関係

図-3.6 (b) を見ると、いずれのケースにおいても、埋立圧力を大きくすると水平変位量が徐々に増加する。ただし、杭式改良の実験ケースと比較してその水平変位量は小さく、杭式改良のように変位の急増もない。このことから、杭式に比べて壁式による改良地盤の強度は大きいことが分かった。同じ改良材と等しい改良率の地盤であっても改良形式の違いで安定性が異なる結果となったが、これは変形モードの違いに起因すると考えられる。壁式改良の地盤では改良材の曲げによる破壊が生じにくく、地盤の安定性が高かったと言える。このことは、改良杭の本数を減らして低改良率化を行う場合、埋立荷重がかかる方向に改良杭を接した状態で改良杭の本数を減らすことが地盤の安定上有利であることを示唆している。

壁式改良の実験ケース SN-W において、埋立载荷によって地盤が破壊しなかったために、埋立土の上層を鉛玉に置き換えて遠心力载荷によって地盤を破壊させた。遠心加速度の増加に伴って発生した埋立圧力と Point-D での水平変位量の関係を図-3.7 に示す。水平変位量には埋立载荷実験での残留変位を考慮せず、遠心力を加える直

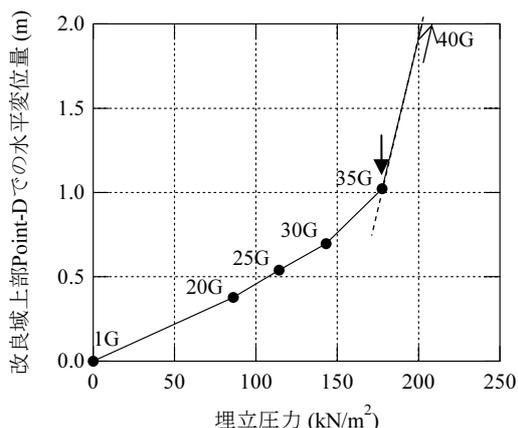


図-3.7 遠心力増加時の埋立圧力と水平変位量の関係

前からの増分で示している。また、遠心加速度の大きさによらず、模型寸法に 50 倍した変位量で示す。図を見ると、遠心加速度を 35G から 40G に増加する過程で水平変位が急増しており、埋立圧力が 178 kN/m² (遠心加速度 35G) を超えると地盤が大きく変位し、破壊状態に至っている。なお、模型地盤を重力場に戻して粘土層を一度応力開放している点やケーソンによる上載荷重が 50G 場でのものより小さい点など、遠心力载荷による破壊実験では 50G 場での埋立载荷実験よりも地盤のせん断強度が多少小さい。このため、50G 場での埋立载荷実験でより大きな埋立圧力を加えられるならば、破壊に至る埋立圧力が 178 kN/m² よりも多少大きくなる可能性もある。

3.4 改良材間の粘土層での排水および応力分担比

(1) 改良材間の粘土層での排水状況

改良域が载荷されると、改良材間の粘土層には過剰間隙水圧が発生するが、ここでは間隙水圧の上昇程度を確認する。図-3.8 にケーソン直下の深度 3.75 m での粘土層で計測した過剰間隙水圧の時系列を示す。時間はケーソンの設置時を 0 day として、载荷前の静水圧からの増分を実物寸法換算値で示している。なお、実験ではケーソン設置時から 1.74 day 後に埋め立てを開始している。

図-3.8 に示すように、いくつかの実験ケースにおいてケーソンを設置することによって過剰間隙水圧が多少発生しているが、その値はそれほど大きくなかった。ケーソンによる平均有効上載圧は 100.5 kN/m² であった。ケーソンによる上載荷重作用時において過剰間隙水圧の発生量が小さい理由としては、改良材への応力集中のため粘土層への上載圧の小さいことが挙げられる。また、改良材と粘土層には摩擦力があり、粘土層表面を载荷した荷重が粘土層内部に伝わっていない可能性もある。さらに、透水係数が大きい改良材の場合、過剰間隙水圧の消

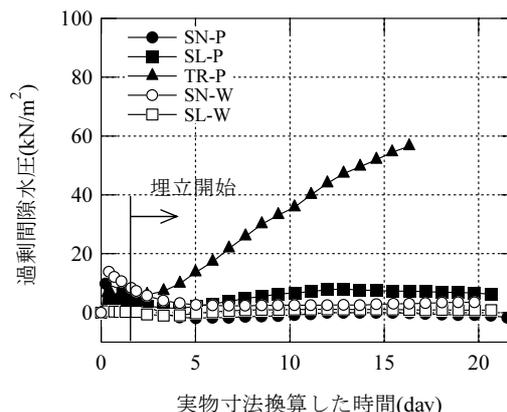


図-3.8 改良材間の粘土層での過剰間隙水圧

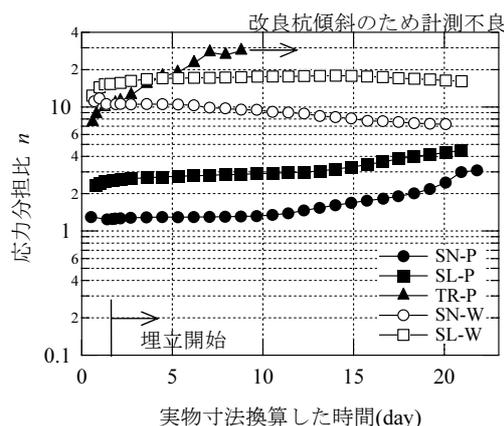


図-3.9 载荷中の応力分担比

散が進んでいることも要因として考えられる。

埋め立てを開始した後の過剰間隙水圧を見ると、改良材をセメント固化処理土とした実験ケース TR-P では、埋立载荷に伴って過剰間隙水圧が増加している。鉄鋼スラグを用いた実験ケース SL-P においても、多少の増加傾向が見られる。その他の実験ケースにおいてはほぼ過剰間隙水圧は発生していない。これらの比較から、特に杭式改良でのセメント固化処理土のケースでは過剰間隙水圧が上昇し易いことが分かった。

(2) 応力分担比

改良域は軟弱な粘土層と剛性・強度が大きい改良材で形成されており、改良域が受けた荷重は改良材に集中する。改良材にかかる鉛直応力を粘土層にかかる鉛直応力で除した値は応力分担比と称される。改良材と粘土層の表面で計測した応力分担比を図-3.9 に示す。横軸は、ケーソン設置時を 0 day とした経過時間であり、実物寸法換算したものである。また、応力分担比が大きくなるほど、応力分担比による鉛直応力の変化率は小さくなるので、縦軸は対数軸で表している。なお、実験ではケーソン設置時から 1.74 day 後に埋め立てを開始している。

図に示すように、改良材を砂質土の杭とした実験ケース SN-P では、ケーソン設置時および埋立初期には応力分担比は 1.3 程度であった。改良材を鉄鋼スラグの杭とした実験ケース SL-P での応力分担比は、ケーソン設置時に 2.3、埋立初期に 2.7 程度であった。他の実験ケースにおいては、ケーソン設置時において 7.6~12.3 と大きく、埋立開始直後においても 10.5~16.2 と大きかった。応力分担比がばらついている原因は以下のように類推される。応力分担比が大きく改良材へ鉛直荷重が集中する場合、改良材の剛性と強度はかなり大きいと考えられ、改良材上端面から圧力感知部分が飛び出している土圧計に過大な集中荷重がかかっている可能性がある。また、相対的に粘土層にかかる土圧は小さいために、粘土層での土圧に関しては計測誤差の影響が大きい。これらのことから、実験ケース TR-P, SN-W, SL-W においては、応力分担比が大きいことは確かであるが、その計測値はばらついたと考えられる。

これらのことから、改良材を砂質土や鉄鋼スラグとした杭式改良では 1.3~2.7 程度の応力分担比であったが、改良材をセメント固化処理土としたり、壁式改良にすることによって応力分担比は 7.6 以上と大幅に大きくなることが分かった。

4. 改良地盤の破壊メカニズムの考察

4.1 破壊形態および杭間粘土層の影響

前章で述べたように、埋立载荷実験において壁式改良では改良域に滑り面が生じて地盤が破壊した。この破壊に至る地盤の変形モードは破壊形態としてよく観察されるものであり、埋立荷重によって生じたせん断力がせん断強度を超えることによって生じ、破壊メカニズムとして明確である。地盤の安定性はせん断強度に大きく影響を受けるために、改良材やその間の粘土層のせん断強度が大きいほど地盤の安定性は向上する。

壁式改良地盤とは異なり杭式に改良された地盤では、埋立部からの傾斜荷重に耐えられずに改良杭が曲がり、杭間粘土層はせん断破壊する。この変形モードは杭式改良特有の現象であり、そのメカニズムは複雑である。本研究の第一著者ら^{18), 19)}は過去に改良杭を砂杭とした場合の埋立载荷実験および FEM 解析を実施している。この論文で、実験および解析に基づいて示した杭式改良地盤の破壊概念図を図-4.1 に示す。図に示すように、軟弱な杭間粘土層はせん断破壊状態にあり、単純せん断変形を示す。論文では、埋立载荷に伴って杭間粘土層で発生

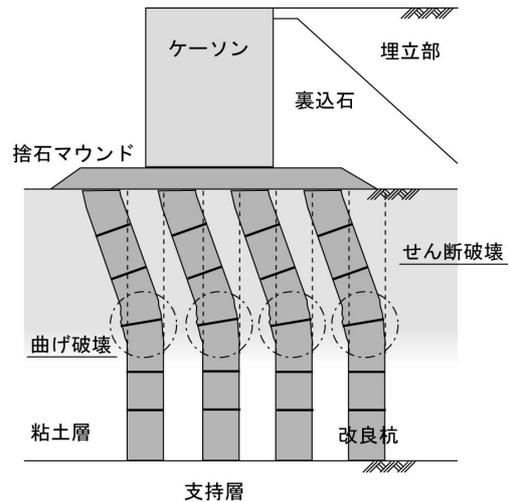
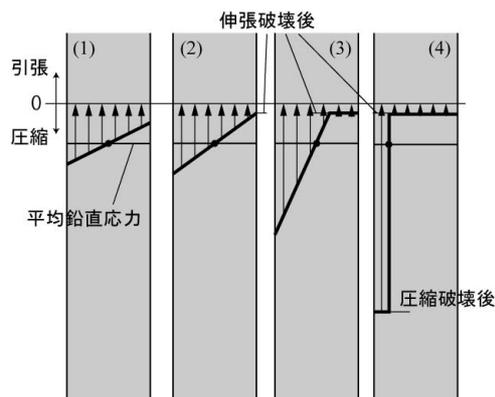


図-4.1 杭式改良地盤の破壊状態

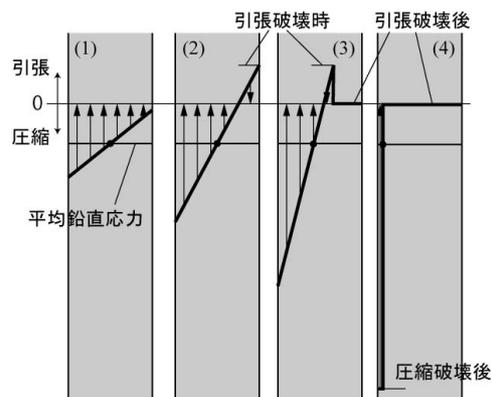
した過剰間隙水圧が埋立中に消散することで粘土層のせん断強度が増加し、地盤に作用する応力がつり合い状態となっても急激な地盤変形が生じないことを示した。この排水効果によって、埋立荷重の増分に対する地盤変位量の増分が小さくなることが分かっている。杭間粘土層の排水速度は改良杭の透水係数に大きく影響を受けるため、改良杭の透水係数は地盤の安定性に影響を与えと言える。例えば、セメント固化処理土で改良した実験ケースでは埋立中の杭間粘土層の排水が十分に進んでいなかったが、この排水の遅さがこのケースでの安定性の低さの一要因になったと考えられる。この改良杭の曲げ破壊のメカニズムについては次節で述べる。

4.2 改良杭の破壊メカニズム

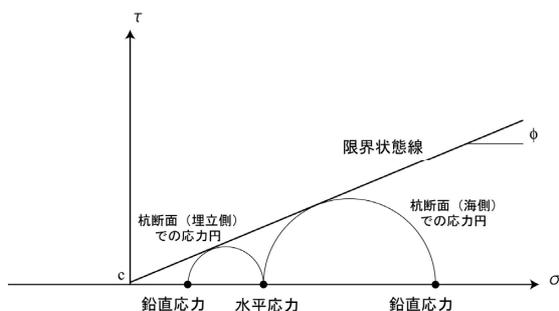
改良杭の曲げに対する破壊メカニズムを塑性論によって考察してみる。改良杭を砂質土のように ϕ 材とした場合に改良杭が途中で曲げ破壊に至る過程を図-4.2(a)に示す。図には、破壊に至る深度での断面で発生している鉛直応力を模式的に示す。埋め立てによって改良杭には鉛直荷重の他に水平荷重が加わり、改良杭に曲げが発生する。この場合、(1)のように杭断面の海側で鉛直応力が増加して圧縮状態となり、埋立側で鉛直応力が減少して伸張状態となる。埋め立てが進むと鉛直応力の不均衡が大きくなり、(2), (3)のように杭断面の埋立側で伸張によるせん断破壊が生じる。さらに埋め立てを進めると、海側でも圧縮によるせん断破壊が生じ、最終的には(4)のように杭断面の全域でせん断破壊状態となる。これは杭で言う塑性ヒンジの状態である。この伸張破壊と圧縮破壊に至った際の応力図を図-4.2(b)に示しておく。杭断面の埋立側では、鉛直応力が減少することで応力円が限界状



(a) 改良杭断面に作用する鉛直応力

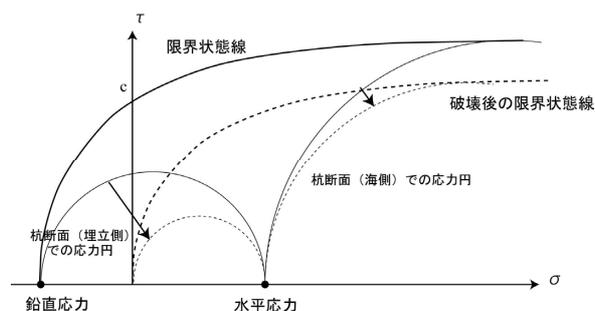


(a) 改良杭断面に作用する鉛直応力



(b) 応力状態

図-4.2 ϕ 材による改良杭の曲げ破壊の概念図



(b) 応力状態

図-4.3 c材による改良杭の曲げ破壊の概念図

態線に至っている。

改良杭を砂杭とした場合、砂杭の透水係数が大きいために埋立中の杭間粘土層の排水が進む。このため、前述のように埋立中に杭間粘土層のせん断強度が増し、急激な地盤変形が生じない。このため、改良杭内で破壊状態に達する深度は一箇所に留まらずにその範囲は広がり、改良杭が緩やかに湾曲したと考えられる (図-3.5(a)参照)。また、杭間粘土層のせん断破壊および改良杭の曲げ破壊という改良地盤の変形モードは、過去に埋立載荷実験を実施した改良率の範囲 11~58%で共通しており、改良率に関係なく杭式改良で生じる特有の破壊形態である。

改良杭をセメント固化処理土のように c 材とした場合に改良杭が曲げ破壊に至る過程を図-4.3(a)に示す。砂杭の場合と同様に、埋め立てを開始すると改良杭には曲げが生じ、(1)のように杭断面の海側で鉛直応力が増加して圧縮状態となり、埋立側で鉛直応力が減少して伸張状態となる。埋め立てが進むと鉛直応力の不均衡が大きくなるが、砂杭とは異なって固化処理土は引張強度があるために(2)のように杭断面の埋立側で引張応力が発生する。ただし、引張応力が大きくなり引張強度に達すると引張破壊(クラック)が生じる。この引張破壊に至った際の応力図を図-4.3(b)に示しておく。杭断面の埋立側では、

鉛直応力が減少して応力円が引張によって限界状態線に達している。引張破壊が生じると引張力を失うために、杭断面に働く鉛直応力は(3)のようになる。さらに埋め立てを進めて水平荷重が増すと、海側で圧縮によるせん断破壊が生じ、最終的には改良杭の鉛直応力の状態は(4)のようになる。ただし、固化処理土のように圧縮に対して大きなせん断強度を有する場合、必ずしも圧縮によるせん断破壊状態に至らず、一点で鉛直荷重に耐える可能性も高い。

図-4.2(a)の(4)と図-4.3(a)の(4)に示したような終局状態について考えてみる。最終的に改良杭が発揮できる曲げ抵抗力は、この断面で発揮できる曲げモーメント量によって決まる。回転の中心(図中の鉛直応力の不連続点)からの鉛直応力の距離を考えると、図-4.3(a)の(4)のように圧縮破壊後の鉛直応力が大きい場合、中心から鉛直応力の作用点までの距離が極端に短い。このため、圧縮破壊後も大きな鉛直応力を発揮できる場合、断面が発揮できる曲げモーメントは小さくなり、曲げ抵抗力も小さくなる。結果的に地盤の安定性も低下することになる。この現象についても、セメント固化処理土の実験ケースが他のケースよりも安定性が低かった一要因と考えられる。

砂質土のような ϕ 材とセメント固化処理土のような c 材の改良杭の破壊メカニズムについて検討してきた。鉄鋼スラグのような c 、 ϕ 材については、粘着力が比較的小さい場合には砂質土と同様の破壊メカニズムとなり、粘着力が大きくなるとセメント固化処理土と同様の破壊メカニズムとなる。すなわち、粘着力の大きさが破壊メカニズムおよび安定性に影響を与える。

以上のように、杭式改良地盤では、改良材および杭間粘土層のせん断強度だけでなく、改良材の透水性（杭間粘土層の排水性）や引張強度と破壊後に発揮できる引張力、圧縮によるせん断破壊後に発揮できる鉛直応力などの種々のパラメータが地盤の安定性を決めている。すなわち、これらのパラメータを総合的に加味して地盤の安定性を評価することが重要である。

5. まとめ

固結特性を有した鉄鋼スラグを改良材として用いた地盤の埋立荷重に対する安定性を検討した。以下に、得られた主要な結果をまとめる。

- 1) 改良材を砂質土、鉄鋼スラグ、セメント固化処理土とした杭式改良地盤、改良材を砂質土、鉄鋼スラグとした壁式改良地盤に対して、遠心力場で埋立荷重実験を実施した。その結果、杭式改良地盤では、改良域の水平変位分布が曲がりながら地盤の変位が増大し、壁式改良地盤では地盤の変位はほとんど生じなかった。ただし、砂質土で作製した壁式改良地盤では、鉛玉を利用して大きな埋立圧力をかけると、改良域下部に滑り面が発現し、地盤の変位が急増した。
- 2) 砂質土あるいは鉄鋼スラグによる杭式改良地盤では、改良杭が緩やかに曲がることで、地盤変位が卓越した。また、セメント固化処理土による杭式改良地盤では、改良杭に引張破壊（クラック）が生じて改良杭が局所的に屈曲し、比較的大きな地盤変位が発生した。
- 3) 埋立圧力と地盤変位の関係から判断すると、同じ改良材と等しい改良率であっても、杭式よりも壁式の改良地盤での安定性が高かった。これは変形モードの違いによるものと考えられる。また、砂質土と鉄鋼スラグの杭式改良のケースでは荷重に伴う変位の急増は見られないが、セメント固化処理土の杭式改良のケースでは改良杭に引張破壊が生じて変位が急増した。今回の模型実験の範囲内では、杭式改良について鉄鋼スラグ、砂質土、セメント固化処理土の順で地盤の安定性が高いことが、荷重～変位関係から分かった。

- 4) セメント固化処理土の杭式改良の実験ケースでは、埋立荷重に伴って改良杭間の粘土層で過剰間隙水圧が発生した。また、砂質土および鉄鋼スラグによる杭式改良の実験ケースでの応力分担比は1.3～2.7程度と比較的小さかったが、セメント固化処理土や壁式改良での応力分担比は7.6以上と大きかった。
- 5) 埋立荷重に伴う改良地盤での破壊現象およびメカニズムについて考察した。壁式改良では滑り破壊が卓越するために、改良材およびその間の粘土層の複合地盤としてのせん断強度で安定性を評価できると考えられる。杭式改良では改良杭の曲げ破壊が卓越するために、改良杭の曲げ抵抗力および杭間粘土層のせん断強度から地盤の安定性を評価できる。なお、圧縮によるせん断破壊後も大きな鉛直応力を発揮できる改良杭では、曲げ抵抗力は逆に小さくなると考えられる。また、改良杭の透水係数が杭間粘土層の排水速度を決めるために、地盤の安定性を評価する上で改良杭の透水係数も重要なパラメータである。

6. あとがき

本研究では、改良材を ϕ 材である砂質土、 c 材であるセメント固化処理土、 c 、 ϕ 材である鉄鋼スラグとして、埋立荷重実験を行い、見かけ上の粘着力を有する鉄鋼スラグによる改良地盤の安定性について検討した。この結果、地盤の変形挙動や破壊形態などが明らかとなり、固結特性を有する鉄鋼スラグを改良材として用いる場合、改良材が砂の場合よりも安定性が向上することが荷重～変位関係から明らかとなった。ただし、本文中にも記載したとおり、種々のパラメータで地盤の安定性が決まっており、実際には現場での地盤パラメータを用いた安定性評価を行うことが必要である。また、本研究は限られた実験ケースおよび実験条件で得られた結果であるため、得られた知見の一般性を高めるためには今後もより詳細な検討が必要である。

(平成22年1月26日受付)

謝辞

本論文で説明した遠心模型実験は、当研究所と広島大学、新日本製鐵、不動テトラとの共同研究（課題名：鉄鋼スラグによるSCP地盤改良設計に関する共同研究）の一環で実施したものである。研究を遂行するにあたり、関係各者に多大なご協力およびご助言をいただいた。また、

遠心模型実験はジオデザインの丸山憲治氏によるところが大きい。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kitazume, M.: The Sand Compaction Pile Method, Balkema, 232 p., 2005.
- 2) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，港湾・空港等リサイクル推進協議会，pp. 3/99-3/102, 2004.
- 3) 沿岸技術研究センター：エコガイアストーン「鉄鋼スラグを原料として固結制御可能なサンドコンパクションパイル工法中詰材料」，港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書，沿岸技術研究センター，D-5-2 p., 2006.
- 4) 富永真生，橋本正治，水野恭男：鉱さいを利用した軟弱地盤改良工法（スラグコンパクション工法），第9回土質工学研究発表会，pp. 901-904, 1974.
- 5) 伊藤林平，亀井敏雄：高炉水さいの地盤改良工事への適用性について，土と基礎，No. 767, pp. 37-43, 1973.
- 6) 松田博，来山尚義，高宮晃一，村上剛敏，中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 764 / III-67, pp. 85-99, 2004.
- 7) 篠崎晴彦，松田博，坂井悦郎，小野幸一郎，鈴木操，中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用，土木学会論文集C, Vol. 62, No. 4, pp. 858-869, 2006.
- 8) 水野健太，土田孝：高炉水砕スラグを用いた低置換率 SCP改良地盤の強度・変形特性，地盤工学ジャーナル，Vol. 3, No. 3, pp. 187-202, 2008.
- 9) 八木則男，矢田部龍一，松村真一郎：繰り返し時含水比の異なる再圧密土の力学特性，土木学会論文集，No. 330, pp. 99-106, 1983.
- 10) 八木則男，一本英三郎，榎明潔：一軸圧縮強度と非排水三軸圧縮強度の比較検討，第44回土木学会年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 454-455, 1989.
- 11) 一本英三郎：複合地盤の安定解析法に関する研究，京都大学学位論文，pp. 32-59, 1991.
- 12) 松尾稔，木村稔，西尾良治，安藤裕：建設発生土を利用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 547 / III-36, pp. 199-210, 1996.
- 13) 松田博，高橋総一，藤原克久，来山尚義：サンドコンパクションパイルの打設が地盤改良域外の粘土地盤の強度に及ぼす影響，土木学会論文集，No. 596 / III-43, pp. 101-110, 1998.
- 14) 庄野博文，山上拓男，坪井英夫，野田洋：静的締固め砂杭工法を粘性土地盤に適用した場合の強度増加，地盤工学ジャーナル，Vol. 1, No. 2, pp. 9-17, 2006.
- 15) 近井玲子，水野健太，土田孝，大釜達夫：SCP改良地盤における杭間粘土の強度・変形特性に関する研究，第42回地盤工学研究発表会講演集，pp. 881-882, 2007.
- 16) 北詰昌樹：新遠心模型実験装置の開発と研究への適用，港湾技術研究所資料，No. 812, 35 p., 1995.
- 17) Kitazume, M. and Maruyama, K.: Internal Stability of Group Column Type Deep Mixing Improved Ground under Embankment Loading, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 3, pp. 437-456, 2007.
- 18) 高橋英紀，北詰昌樹，中村健，丸山憲治：SCP改良地盤の極限状態に着目した埋立載荷模型実験，土木学会論文集C，Vol. 64, No. 2, pp. 267-281, 2008.
- 19) 高橋英紀：砂杭・粘性土複合地盤の破壊過程に関する基礎的研究，港湾空港技術研究所資料，No. 1181, 155 p., 2008.

港湾空港技術研究所報告 第49巻第2号

2010.6

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 株式会社 大 應

Copyright © (2010) 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。

CONTENTS

Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular Material	Hidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA 3
Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace Slag	Yoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI 21
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 47
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar Migration	Yoshiaki KURIYAMA 67
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 91
Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo Bay	Yasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI 107
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN -	Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA 123