

# ～土の毛管圧によるサイフォン効果を利用したソイルポンプの開発～

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災では、河川堤防において不透水層地盤上の堤防が崩壊する箇所がいくつか見つかった。軟らかい堤防基礎地盤のめり込み部に溜まった雨水等による飽和層が液状化する堤体内液状化である。これまで、泥炭を基礎とする堤体内液状化が既に確認されてきたが、東日本大震災では泥炭以外での基礎地盤上での堤防で数多く発見された。堤体内液状化の原因となるのが堤体基礎部のめり込み部に形成される飽和層である。堤体内部からの排水工としてドレーン工があるが、これらはいずれも高低差を利用した排水設備であり、堤体内部における滞留水の排水は、ドレーン工を滞留水の水位以下に設置する必要がある。このことから本研究では、動力源なしに堤体内の低い箇所から高いところへの排水ができる土の毛管現象を利用したソイルポンプの開発を考えた。

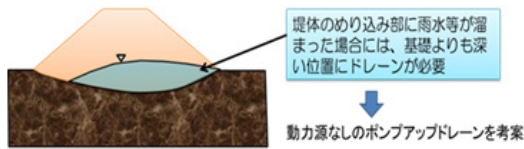


図1 堤体内の閉封飽和域と内部液状化

## 2. 研究の目的

東日本大震災で多くみられた堤体の内部液状化を防止するため、堤体内から水を汲み上げるポンプの必要性が望まれるが、その電源確保や電源ポンプの設置場所からも効率的ではない。そこで、土の持つ毛管圧を利用したサイフォン原理を利用し、動力源なしのソイルポンプシステムを構築することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1)毛管上昇高の計測

#### ①単粒構造と団粒構造

毛管上昇高と透水性が排水速度に影響することを勘案して、珪砂8号及び同じ珪砂8号に高分子ポリマーを加えて団粒化させた改良土の毛管上昇高を計測した。

改良土は団粒化剤3%濃度とし、珪砂8号1500gに対し溶液150mlを混ぜる。その際、ワーカビリティや混ぜ込みの均質性を配慮し、3回に分けて溶液を混入して、試料全体の色が同一になるまで10分程度練り混ぜる。乾燥試料の状態サクシオンポンプを作成する必要があるが、乾燥炉で急激に乾燥させると団粒構造が壊れる恐れがある。そのため数日間にかけて自然乾燥で改良土の乾燥試料を作成した。

全長101(cm)、管径2.7(cm)の亚克力パイプ内に珪砂8号と改良土を乾燥密度 $\rho_d = 1.45 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ になるよう4層に分けて詰め込む。亚克力パイプの片端には、サイフォ

ン実験と同じ水のみ通すことができるフィルターを貼りつける。次に、スタンドとクランプで亚克力パイプと蒸留水を入れた水位を一定させるための2(ℓ)ペッドボトルを固定させる。蒸留水はバットに流し込むようにし毛管上昇高 $h_c$ を実測するとともに、含水比 $w$ (%)、飽和度 $S_r$ (%)、流速 $v$ (cm/s)を計測した。

#### ②ポンプの傾斜による影響

また、堤体内に設置することを想定してポンプを傾斜した場合についても、鉛直設置の場合と比較を行った。管径(内径)1.5cmの亚克力パイプに珪砂6号をつめ、間隙比、土粒子の密度を揃え、両端に網目フィルターをつけたものを2本用意する。片方を垂直に立て、片方を45度傾斜させ、パイプ下部から水を吸水させた。その時の毛管上昇の具合、高さを検証した。定水位にするためにスタンドとクランプで亚克力パイプと、水位を一定にするため水の入ったペッドボトルを使ってマリョット瓶とする。

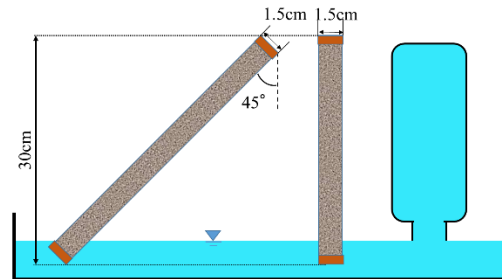


図2 形状による毛管上昇の検討

### (2)毛管上昇高を利用したサイフォン実験

#### ①試料と排水口高低差に影響

土の不飽和特性である毛管上昇と水分量増加による重力排水の確認を行った。亚克力パイプを用いて実験装置を作成した。ペッドボトルで給水側を定水位とし排水口を水位面より±40mmの位置としている。珪砂6号( $D_{10}=0.12 \text{ (mm)}$ 、 $\rho_d=1.70 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ )と珪砂8号( $D_{10}=0.06 \text{ (mm)}$ 、 $\rho_d=1.60 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ )での粒度の違いや高低差から時系列的にみた排水量を計測しその特性を検討した。また実験終了後6時間あけて再度実験することで

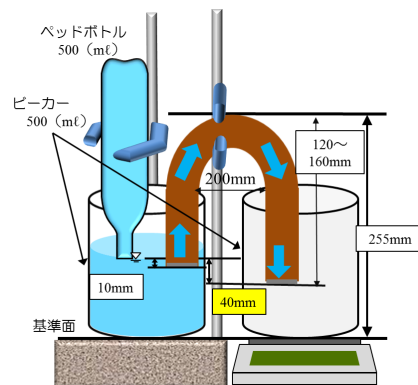


図3 サイフォン実験

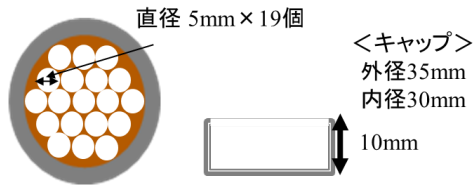


図4 アクリルパイプ断面

再現性も検討した。

②毛管上昇高と透水係数

毛管上昇高が高い試料は透水係数が低い  
ため、適切な両者の組み合わせが算定できな  
いか、毛管上昇高推定式、透水係数の推定式  
を用いて算出を行った。

(3)サクシヨンポンプの形状影響

毛管上昇を利用したサクシヨンポンプの、  
形状による排水性の向上を目指すため、いく  
つかの条件を変えたポンプを用意し(図5)、  
その排水性を比較することで適切な形状を  
調べた。排水性を比較するために用いたポン  
プは、排水部を45°傾斜させたポンプと垂直  
にしたポンプ、排水口を斜めにしたポンプと  
普通のポンプである。これらのポンプを排水  
口と吸水口の高低差、毛管上昇高、間隙比な  
どの条件を揃え、同じ環境下で同時に排水量  
を測定し、その排水性の違いを検証した。ポ  
ンプ内の試料は珪砂6号を用いるものとする。

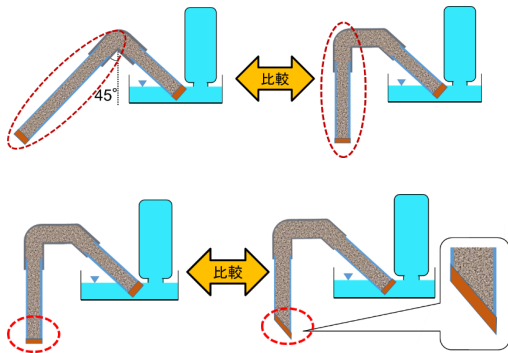


図5 各形状のサクシヨンポンプ

(4) 堤内の水位低下の3次元解析シミュレーション

サクシヨンパイプはある点からの排水であり、3次元的に水を集める形となる。どの程度の材料を使うべきか、規模や形状などを考案する上で必要となることからHYDRUS 3Dを用いて3次元解析シミュレーションを行った。解析モデルは、小段無し(天端高2m、天端幅1m、のり勾配(1割5分=33.7度)、堤防敷幅7mの堤防で、天端直下の沈下が0.25m生じているものである。サクシヨンポンプは直径20cmのものとし、天端直下の-0.125mまで貫入したものを使用している。また、浸透

パラメーターは van Genuchten-Mualem モデルのパラメーターを用いた(表1)。初期条件は、全水頭平衡を行い、沈下箇所(地下水面が生じるように、天端の圧力水頭を-2m、沈下部の底部を0.125m水頭として与えることとした。境界条件は図6、図7に初期条件を示す。

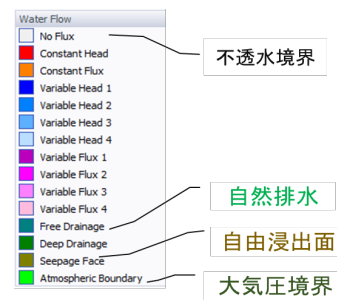
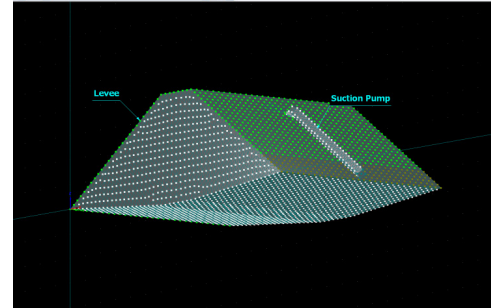


図6 境界条件

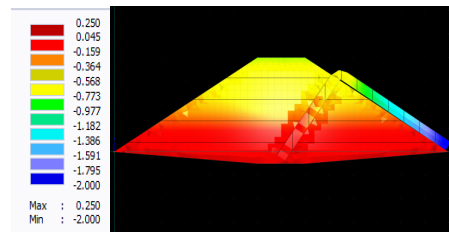


図7 初期条件(ポンプ断面)

表1 解析に使用したパラメーター

|            | $\theta_r$ | $\theta_s$ | $\alpha$ [1/m] | $n$ [-] | $k_{ws}$ [m/day] |
|------------|------------|------------|----------------|---------|------------------|
| サクシヨンポンプ材料 | 0.045      | 0.43       | 50             | 2.68    | 70.0             |
| 堤体         | 0.045      | 0.43       | 0.1            | 18.35   | 70.0             |

4. 研究成果

(1) 毛管上昇高について

珪砂8号と改良土の毛管上昇高  $h_c$  は計4回計測を行った。結果は表4.1の通りである。平均毛管高  $h_c$  は珪砂8号が79.5(cm)、改良土が73.0(cm)と珪砂8号の方が高くなった。各回数で比較すると、珪砂8号は4回ともおおむね80(cm)前後と安定した値が実測で求められたが、改良土では1回目が59.7(cm)になった一方で、4回目は81.7(cm)と珪砂8号とほぼ同じとなった。

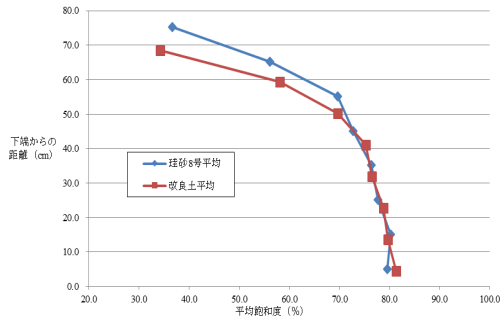


図8 平均飽和度の比較  
(各4回の平均値)

毛管上昇高の試験結果から、団粒化させない場合、飽和度70%が55cmほど、団粒化させた場合には50cmほどであることがわかり、団粒化させることによって大きな間隙作成され、毛管上昇高が低くなるのがこの結果からわかる。団粒化していない珪砂8号は $C=0.4$ 程度で近似値内であったが、改良土では理論値よりも実測値よりも高くなった。この要因としては、団粒化された場合には定数 $C$ が一般の $0.1\sim 0.5$ と異なることが考えられる。  
(2)ポンプ珪砂による毛管上昇と排水率

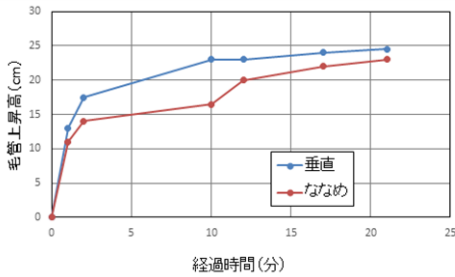


図9 ポンプの傾斜による違い

開始から両方の毛管上昇速度が著しく遅くなるまで(約21分)計測したところ、縦を毛管上昇高(cm)、横を経過時間(分)としたグラフが次のようになる。初めは垂直に立てた方が毛管上昇高は高くなるが最終的にはほぼ変わらない数値になる。これは管内を進む速度はほぼ変わらないが、管を斜めにすることで湿潤距離が伸びたため上昇高に差が出た。しかし毛管上昇高が高くなるにつれ上昇速度は落ちていくため最終的にほぼ変わらない結果になったと言える。

(3) 試料と排水口高低差の差

①繰り返し排水量の推移(水位面より排水口が低い場合)

繰り返し排水量の推移からサクシオンポンプの水位が低下した場合の再現性や実用性を検討した。給水側を定水位としこの水位よりも排水口を30mm低い位置で経過観察したところ、珪砂6号と珪砂8号ともに4回目が最も排水量が多いことが分かる。これは、回数を重ねる度にサクシオンポンプの後半部分において飽和域が拡大していき吸引圧が弱くなるにつれて重力排水をする力が強く

なってきたのではないかと考えられる。吸引圧が弱くなるにつれて重力排水をする力が強くなってきたのではないかと考えられる

表2 実験ケース

|        | 試料   | $D_{10}$<br>(mm) | $\rho_d$<br>( $g/cm^3$ ) | 水位面と排水口の高さ |
|--------|------|------------------|--------------------------|------------|
| Case 1 | 珪砂6号 | 0.12             | 1.70                     | -40mm      |
| Case 2 | 珪砂8号 | 0.06             | 1.60                     |            |
| Case 3 | 珪砂6号 | 0.12             | 1.70                     | +40mm      |
| Case 4 | 珪砂8号 | 0.06             | 1.60                     |            |

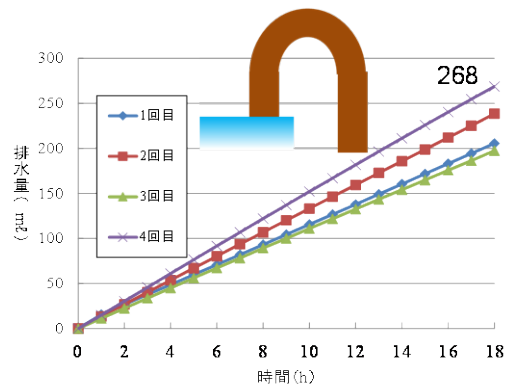


図10 繰り返し排水量の推移 (Case1)

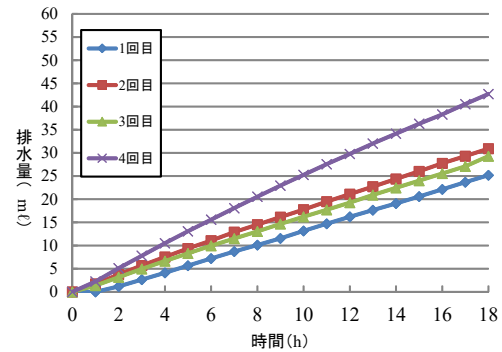


図11 繰り返し排水量の推移 (Case2)

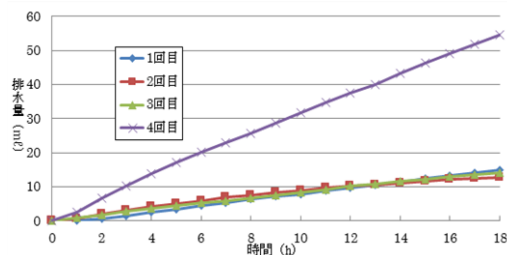


図12 繰り返し排水量の推移 (Case3)

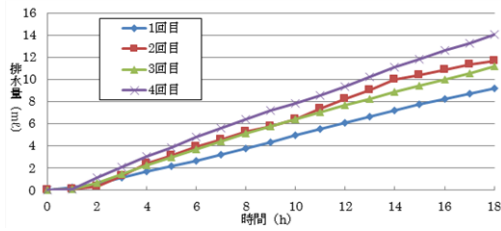


図 13 繰り返し排水量の推移 (Case4)

(4) 毛管上昇高と透水係数

珪砂 6 号と珪砂 8 号で排水量に差が出た要因としては、透水係数の違いもあると考えられる。一般に粒径・間隙比などから算出する方法として Taylor 式が知られおり透水係数を推定した。

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} D_s^2 \frac{e^3}{(1+e)} C_k \times \frac{1}{10^4}$$

$\gamma_w$  : 水の単位体積重量 ( $\frac{kN}{m^3}$ )  $\eta$  : 粘性係数 (Pa·S)

$C_k$  : 形状係数  $D_s$  : 土粒子の直径 (cm)、 $e$  : 間隙比  
 これまでに得られた実測値と珪砂 4 号から 8 号までの  $\rho d=1.45 \sim 1.75$  (g/cm<sup>3</sup>) における毛管上昇高と透水係数の理論値から検討を行った。このことから毛管上昇高が小さいほど、また透水係数が大きいほど、時間排水量が大きく効率がよいことが言える。また、時間排水量は毛管上昇と透水係数の反比例の関係に依存することから、適切な組み合わせの試料があるとも言える。これらから赤で囲った範囲が最適な土質材料であると推測できる。一方、毛管上昇高が高いとキャピラリーバリア現象が発生して排水を抑制することから、ポンプの形状を変えることでキャピラリーバリアを壊すことができ、効率を上げることができると考えられる。

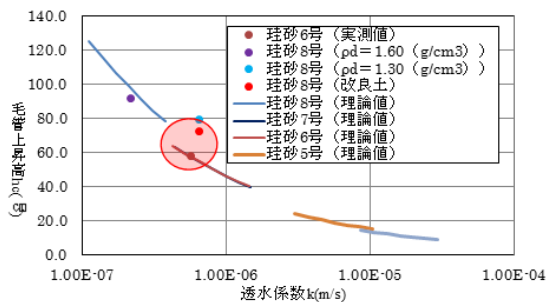


図 14 毛管上昇高と透水係数の関係

(5) サクションポンプの形状影響

排水部の形状を変え比較し、その時の排水量を単位時間 (分) あたりに表したグラフが図 15 のようになる。結果は排水量が多い時で約 0.160ml/min 前後、少ない時で約 0.148 ml/min 前後であり、2 つの差は何れも 3% 以内に収まっている。よって排水部を傾斜させたことで、排水口から空気が入り込むことは

ないといえる。排水部を傾斜させるかは、施工場所の地形に合わせ、臨機応変にするのが望ましい。

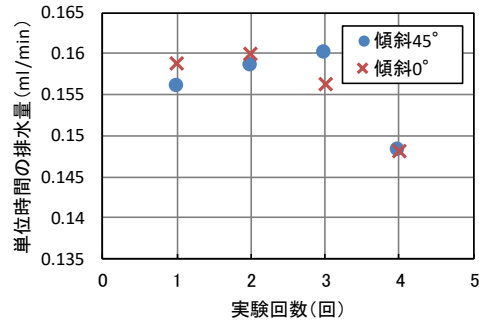


図 15 排水部形状・単位時間当たりの排水量

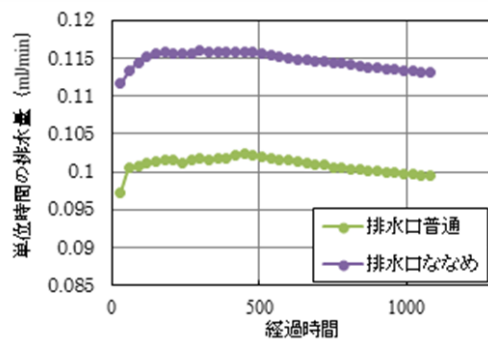


図 16 排水口形状・単位時間当たりの排水量

排水口の形状を変え比較し、その時の単位時間当たりの水排水を表したグラフが図 16 のようになる。結果は排水口が普通のポンプでの単位時間当たりの排水量は平均で 0.100ml/min になる。排水口がななめのポンプでの単位時間当たりの排水量は平均で 0.114ml/min、になり、排水口が普通のポンプより約 14% 上昇している。これは、排水口下部での砂の体積が小さくなることにより、空気と置換が促進されキャピラリーバリアが抑制されたものと考察できる。よって排水口を斜めにすることで排水量は増えるといえる。排水部の比較に対して排水口の比較の時の排水性が全体的に低いが、これは使用した砂が別のもので粒径等が変わり排水性に影響したものとされる。

(6) 堤内の水位低下の 3 次元解析シミュレーション結果

サクシオンポンプは、堤体構造の 1 点から組み上げるため、通常の井戸のような軸対象解析ではシミュレーションできないため、先に示した解析条件のもと、Hydrus-3D により 3 次元飽和不飽和浸透流解析を行った。

図 17 に解析初期の水分量、図 18 に 4 日後の水分量を表している。初期の水分量と 4 日後の水分量では堤体下部の沈下部分の水分量が低下していることがわかる。このことから 3 日目後半にかけて体積含水率が減少していることから堤体内の閉封飽和域が減少し



たと推察される。本サクシオンポンプは、通常の汲み上げポンプのように水位低下は期待できないが、地震が生じる通常時に水位をゆっくりと下げておくことを狙っており、目的を達成しているものと判断される。なお、対象となる堤防の浸透特性（毛管上昇）との差が結果に影響するが、堤体内部液状化が起るような砂質土を対象としていることから吸引圧は高い土を対象にしていけない点から、排水の可能性が推察される。

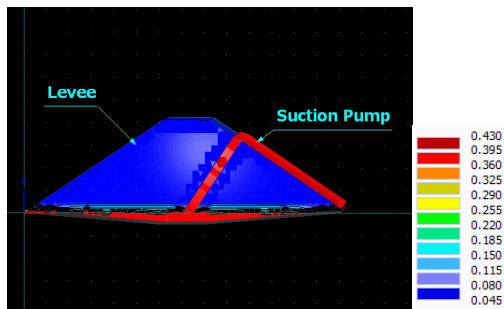


図 17 1 時間後の水分量（体積含水率）

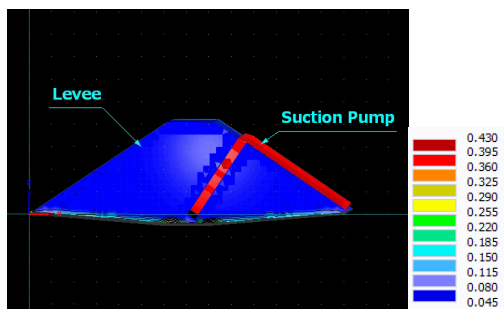


図 18 4 日後の水分量（体積含水率）

(7)まとめ

毛管上昇高の計測や毛管上昇を利用したサイフォン実験から、①初期飽和度が高くなるほど、ポンプの排水（時間排水量）が速く発揮されるが、長時間経過した平衡後にはほぼ同じになることを再確認した。②毛管上昇高が大きく、また透水係数が大きいほど、時間排水量が大きく効率がよいことから、両者を併せ持つ材料が適していることがいえた。③本ポンプの排水機能は毛管上昇による吸引と重力排水を期待するものであるが、排水口においては大気中に開放される形となり、どんな試料土を使用しても排水口でのキャピラリーバリアが発生する。そこで排水口を傾斜させることでキャピラリーバリアの発生を抑止することに成功した。④実際の堤防に設置する場合を想定したポンプ形状について検討を行った結果、堤体裏のり面に沿って傾斜することで浸透距離が長くなり排水に時間はかかるものの、最終的には排水量の差はないことを確認した。⑤天端 2m、のり勾配 1 : 5 の砂質堤防を想定した 3 次元解析シ

ミュレーションでは、4 時間ほどで堤体の水位が低下し始めることが確認できた。最終的には 100 時間以上の時間が必要とすることが得られたが、本ポンプは地震発生までの長時間の間に低下させることを考慮しているため、排水時間の影響は少ないものと考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- 1) Sugii, T., Yamada, K., Yokawa, H. and Asano: Ground destabilization due to soil particle effluxes, Proc.of The 15th Regional Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering., JPN-039, pp. 1732-1735, 2015 (査読有) .
- 2) 杉井俊夫: 堤体基礎のパイピングに対する一考察, 地盤工学会誌, Vol. 63, No. 9, pp. 10-13, 2015 (査読無) .
- 3) 余川 弘至・杉井俊夫・八嶋 厚: 液状化後の剛性回復に着目した河川堤防の変形解析, 中部大学工学部紀要 50 巻, pp. 2-11, 2015 (査読有) .
- 4) 杉井俊夫: 河川堤防の弱部断面の特定と浸透対策, 河川、日本河川協会、p. 40-44, 2013 (査読無) .

〔学会発表〕（計 4 件）

- 1) 松本直也・杉井俊夫・余川弘至・梅基哲矢: サクシオンポンプの効率への影響, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集、pp. 945-946, 2015. 9. 3「北海道科学大学 (北海道札幌市)」
- 2) 梅基哲矢・杉井俊夫・伴幸樹: サクシオン型ソイルポンプの基礎的研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集、pp. 315-316, 2014. 9. 1「大阪大学 (大阪府茨木市)」
- 3) 梅基哲矢・杉井俊夫・伴幸樹: サイフォン型パイプドレーンの基礎的研究, 土木学会中部支部研究発表会、Ⅲ-5, 2014. 3. 8.「岐阜大学 (岐阜県岐阜市)」
- 4) 梅基哲矢・杉井俊夫・山田公夫: 地盤材料を用いたサイフォン型ドレーンの検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会、Ⅲ-195、pp. 388-389, 2013. 9. 3「日本大学 (千葉県習志野市)」