

令和元年6月25日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14723

研究課題名(和文)土嚢受圧体を用いた内圧管屈曲部のスラスト力防護工の開発

研究課題名(英文)Development of thrust protection method for buried pipe using gabion

研究代表者

荒木 裕行 (ARAKI, Hiroyuki)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：30780837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：上水道管等の内圧管屈曲部にはスラスト力と呼ばれる力が発生するため、周囲の地盤が液状化した際には内圧管の不安定化が懸念される。本研究では、スラスト力の新たな防護対策手法として土嚢受圧体を地盤の受働領域に埋設する手法を提案し、その対策効果について模型実験を実施することで検討を行った。模型実験では有効応力を低下させた模型地盤内で埋設管に一定荷重の載荷を行い、土嚢受圧体の寸法等を変化させた場合の対策効果について、埋設管の変位抑制効果として整理した。その結果、液状化に近づけた地盤条件下でも、土嚢受圧体の設置により変位抑制効果が得られること、効果の程度は設置位置や寸法の影響を受けることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重要なライフラインである上水道等の維持管理や更新に当たっては、技術的・経済的に合理的な手法が求められる。本研究で提案した土嚢受圧体を用いたスラスト力防護対策は、特殊な施工を必要としないため経済的であると考えられるが、その対策効果は不明であった。本研究で得られた知見は、土嚢受圧体の設置により埋設管の変位抑制効果が得られることを示しており、実務に向けた基礎データとすることが可能である。また、模型実験を通じて地盤の有効応力の低下と地下埋設物の挙動を多角的に評価できたことから、得られた成果は地盤工学的にも重要なデータになり得る。

研究成果の概要(英文)：On the bend of a buried water supply pipeline, the thrust force is applied to the ground. In this study, thrust protection using a gabion composed of a geogrid basket and gravel as a pressure-receiving structure to protect against thrust force is proposed. Further, the effects of this method are evaluated by conducting model experiments. In the model experiments, a constant load simulated thrust force was applied laterally to a buried pipe model in the model ground where the internal effective stress was decreased by increasing hydraulic gradient stepwise. Gabion models of several widths and heights were placed on the ground in the direction of the thrust force. Results revealed that the gabion stabilizes the pipe even when the effective pressure of the surrounding ground decreases significantly.

研究分野：地盤工学

キーワード：埋設管 スラスト力 蛇籠 液状化 高分子補強材

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の上水道は、他の社会基盤構造物と同様に耐用年数を迎えるものも多いが、地震等の非常時においても上水道の機能が保持されていることに対する社会的要求は高く、想定される諸現象に対して技術的・経済的に合理的な対策が求められている。上水道管には送水のために被圧した水が流れているため、その屈曲部にはスラスト力（水圧等による不均力、図-1a）が作用する特徴がある。通常は地盤の受働抵抗や管と地盤の摩擦抵抗を抵抗力として考慮した設計が行われ、抵抗力が不足すると判断される場合にはスラスト力防護工として防護コンクリートを施すのが一般的である。しかしながら、地震外力を受けた地盤が液状化すると、防護コンクリートで見込んでいた地盤の受働抵抗や埋設管との摩擦抵抗が失われて埋設管が不安定化する可能性がある。また、防護コンクリートにより屈曲部の重量が増加すると地震時に屈曲部に作用する慣性力も増大し、結果として管路の損傷につながったとみられる事例も報告されている。上水道等の内圧管路の耐震化をさらに高度なものとするためには、地震時安定性等に課題のある防護コンクリートに代わる新たなスラスト力防護工を開発する必要がある。

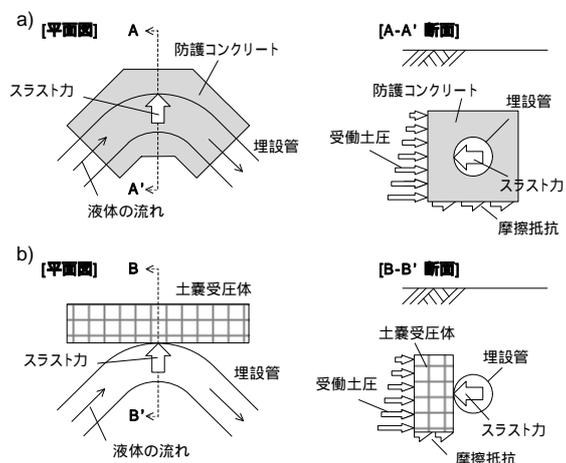


図-1 スラスト力防護工の平面模式図；a)防護コンクリート、b)土嚢受圧体

### 2. 研究の目的

新たなスラスト力防護工には、埋設管屈曲部の重量増大によらないこと、常時のみならず周囲の地盤が液状化して抵抗力が低下した状況でもスラスト力に抵抗できること、複雑な施工を必要とせず省力性が確保できることが求められる。

このような背景を受けて、スラスト力防護工としてスラスト力の作用側地盤中に土嚢受圧体を設置する手法を提案した（図-1b）。土嚢受圧体は長期にわたって供用可能なこと考慮し、高分子補強材（ジオグリッド）で作製した籠により、路盤材として用いられる火成岩の礫材を包んだ構造とした。籠によって礫材の動きが拘束されることで土嚢受圧体自体の極端な変形が抑制され、さらに中詰め材に礫材を用いることで圧縮力に対して抵抗できる。また、籠をジオグリッド製とすることで化学的劣化の影響を最小化でき、高い拘束効果の長期的な保持が期待される。この土嚢受圧体を埋設管の受働領域に設置することで当該領域の地盤の変形を抑制することが期待できる。さらに、土嚢受圧体の高さを埋設管の管径よりも大きくすることで土嚢受圧体に作用する受働土圧の受圧面積が拡大され、スラスト力に対する抵抗力を発揮可能と考えられる。このような構造であれば土嚢受圧体の密度を地盤密度に近づけることも可能であり、地震時における埋設管への過度な水平慣性力の発生や液状化地盤中での自重沈下が生じる可能性も小さい。

土嚢受圧体を設置する手法をスラスト力防護対策として用いるためには、対策手法としての性能を明らかにする必要がある。本研究では室内模型実験を実施することで、土嚢受圧体の寸法・設置位置～地盤の抵抗力の程度～埋設管の水平変位の関係を取得し、変位抑制効果の観点から土嚢受圧体を用いたスラスト力防護対策の対策効果について検討を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、土嚢受圧体の寸法（高さ、幅）や設置位置が埋設管の水平変位抑制効果に及ぼす影響について、埋設管の水平載荷試験を実施することで検討を行った。スラスト力を受けた埋設管屈曲部の水平変位が最も生じやすいのは、周囲の地盤が液状化して有効応力が低下した状況である。そこで、本研究では先行研究を参考に動水勾配を与えることによって模型地盤の有効応力を低下させ、静的に液状化に近づけることとした。このような実験条件としたのは、慣性力等の影響を排除した上でスラスト力に対する安定性の程度を明確化するねらいもある。

埋設管の水平載荷試験に使用した試験装置の概要図を図-2に示す。実験では、埋設管屈曲部の2次元断面（図-1b）を想定して埋設管と受圧体をモデル化した。埋設管模型は直径  $D = 50$  mmの直管であり、管中心が地表面から深さ  $100$  mmとなるように設置した。埋設管模型には地盤内に設けたステンレス棒を介して模擬スラスト力  $125$  N(単位奥行き当たり  $312.5$  N/m)を与えた。模型地盤には砂質土(土粒子密度  $\rho_s = 2.680$  g/cm<sup>3</sup>, 平均粒径  $D_{50} = 0.22$  mm)を用い、最適含水比 ( $w_{opt} = 17\%$ )において乾燥密度  $\rho_d = 1.374$  g/cm<sup>3</sup>(締固め度  $D_c = 85\%$ )となるように締固めて作製した。

模型地盤へ与える動水勾配は、土槽底部に接続した水タンクの高さ  $H$  を変えることで制御した。地盤内の動水勾配はステップ状に増加させ、各ステップにおいて模擬スラスト力を載荷した時に生じた埋設管の水平変位  $d_p$  を計測するとともに、地盤内の間隙水圧計 P1, P2 の計測結

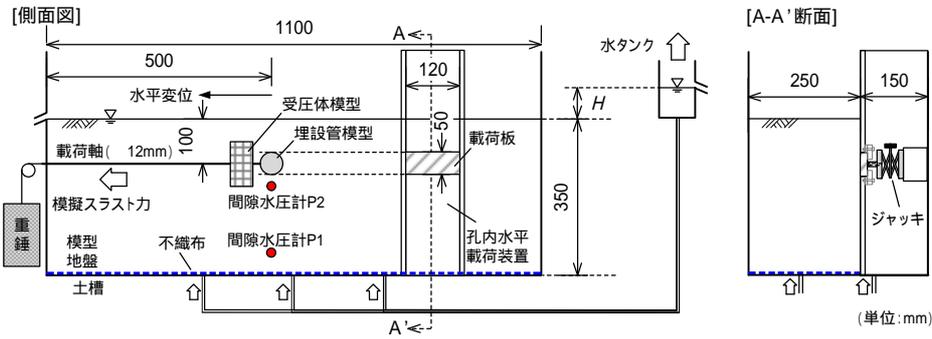


図-2 埋設管の水平荷重試験装置および孔内水平荷重装置の概要図

果から実測動水勾配  $i_m$  を求めた。なお、本報では  $i_m$  は地盤材料の限界動水勾配  $i_{cr}$  ( $= 0.864$ ) で正規化し、過剰間隙水圧比  $i_m / i_{cr}$  として示す。また、動水勾配の増加に伴う模型地盤性状の変化については、孔内水平荷重試験を実施することで地盤の変形係数の変化としても評価した。孔内水平荷重試験装置は図-2 に示す土槽の内部に設置してあり、埋設管の水平荷重試験の各ステップにおいて孔内水平荷重試験をあわせて実施した。孔内水平荷重試験の荷重板は埋設管模型と同深度に位置しており、孔内に内蔵したジャッキによって単調に強制変位を与えた時に荷重板に加わる水平地盤反力度と水平変位を計測し、その勾配から地盤の変形係数を評価した。以上の計測に基づき、地盤の動水勾配、地盤の変形係数、スラスト力の荷重により生じる管の水平変位を取得し、土嚢受圧体の寸法・設置位置と対策効果の関係に関する知見とした。

また、土槽側部には強化ガラス製の観察窓が設けてあり、これを通じて模型地盤の変形状況を確認することができる。この観察窓を利用して、側面から模型地盤の断面写真を撮影し、画像解析により変位を数値化することで、受圧体と地盤の変形状況を視覚的にも明らかにした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 土嚢受圧体の設置位置に関する検討

設置位置に関する検討を行うため、無対策ケースの Case N0 および土嚢受圧体の設置位置が異なる 2 つの対策ケースを設定した (表-1)。対策ケースでは、いずれも幅 50 mm、高さ 100 mm の土嚢受圧体を用い、Case B2 は埋設管と受圧体の底面の鉛直位置を揃えたケース、Case B3 は埋設管と受圧体の中心位置を一致させて埋設管よりも下部に 25 mm の根入れを行ったケースである。Case B2 では埋設管の設置深さと同じ深さまで掘削することで受圧体を設置できるのに対し、Case B3 では埋設管の設置深さよりもさらに掘り込む必要がある。

実験の結果、いずれのケースにおいても Step 1, Step 2 では埋設管の水平変位はほとんど発生しなかったが、Step 3 においてケース毎の明確な違いが生じた。Step 2 を基準とした Step 3 における埋設管の水平変位  $d_p$  を比較すると、Case N0 では 30.9 mm、Case B2 では 7.3 mm、Case B3 では 0.8 mm であった。土嚢受圧体を設置することで埋設管の水平変位を抑制でき、さらに根入れを行うと埋設管の変位をさらに抑制できるといえる。

Step 3 のスラスト力載荷終了後における地盤の変形状況を明らかにするため、観察窓から写真を撮影し、画像解析により受働領域地盤の標点変位を数値化した。さらに、地盤中の標点座標に基づいて 4 節点要素を作成し、模型作製時を初期状態として各要素の最大せん断ひずみ  $\max$  を算出した。最大せん断ひずみ分布を図-3 に示す。Case N0 では埋設管前面から地表面にかけて  $\max$  が帯状に増加しており、地表面では隆起が確認できる。これに対して Case B2 では、Case N0 でせん断変形が特に顕著であった埋設管近傍領域が土嚢受圧体で置き換えられたことで、土嚢受圧体自体に顕著な変形は生じなかったものの土嚢受圧体の受働側地盤において変形が生じた。土嚢受圧体は Step 3 の時点で上端を支点に回転するように移動しており、受圧体下端付近から地表面にかけて  $\max$  が帯状に増大した。模擬スラスト力の作用位置は土嚢受圧体の重心位置よりも深い位置であることから、土嚢受圧体には右回りの回転モーメントが作用し、その結果として回転挙動が生じたと考えられる。一方、Case B3 では他のケースと比較してひずみ値は全体的に小さい。土嚢受圧体の下端が根入れとして機能した点、模擬スラスト力の作用位置が土嚢受圧体の重心高さと同程度一致して土嚢受圧体に回転モーメントが生じ難かった点が土嚢受圧体の安定性向上に寄与し、結果として埋設管の水平変位の抑制効果を高めたと考えられる。また、受圧体近傍では埋設管と同じ深度でやや  $\max$  が高まっているが、これはスラスト力を受けた土嚢受圧体がわずかに曲げ変形を呈した結果と考えられ、土嚢受圧体にはある程度の曲げ剛性が必要であるといえる。

以上の結果より、埋設管の設置深さと同じ深さまで掘削して土嚢受圧体を設置した Case B2 よりも、埋設管の設置深さからさらに根入れ分を掘り込んで受圧体を設置した Case B3 の方が埋設管の変位抑制効果が高まることが明らかとなった。以降の検討では、Case B3 の結果を反映し、根入れを行った条件下において受圧体の寸法を変えた場合の変位抑制効果について検討を行った。

表-1 土嚢受圧体の設置位置に関する実験ケースの一覧

	受圧体模型			地盤条件	最終ステップ
	$W_g$ [mm] ( $W_g/D$ )	$H_g$ [mm] ( $H_g/D$ )	根入れ		
Case N0	なし	なし	なし	Step1:不飽和状態 Step2: $H=0$ mm Step3: $H=140$ mm Step4: $H=210$ mm Step5: $H=280$ mm Step6: $H=350$ mm Step7: $H=420$ mm	Step6
Case B2	50 (1.0D)	100 (2.0D)	なし		Step6
Case B3	50 (1.0D)	100 (2.0D)	25 (0.5D)		Step7

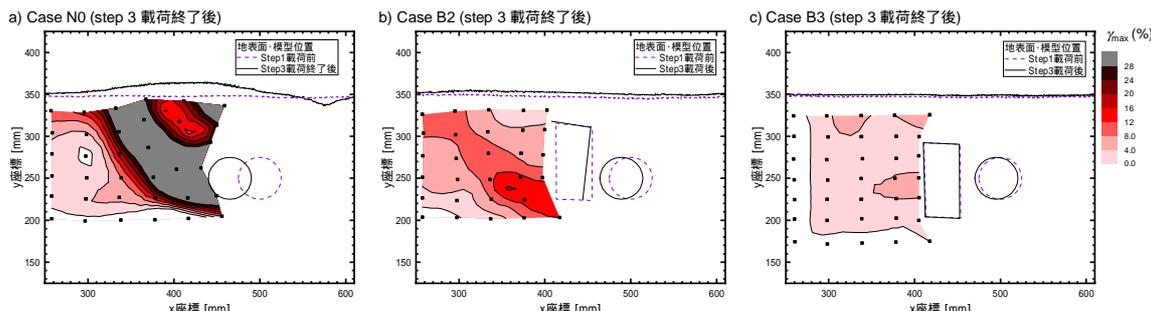


図-3 受働領域地盤における最大せん断ひずみ分布

### (2)土嚢受圧体の寸法に関する検討

実験ケースの一覧を表-2に示す。いずれも受圧体模型の高さと幅をパラメータとして設定したものであり、受圧体模型はその中心高さを埋設管模型と一致させるように設置した。

はじめに、動水勾配が異なる各ステップで実施した孔内水平載荷試験の結果について検討する。孔内水平載荷試験で得られた水平変位と水平地盤反力度の関係を図-4に示す。動水勾配の増加に伴って載荷過程における勾配は徐々に小さくなり、Step9では載荷途中から変位が急増する挙動が確認できる。ここで、載荷過程において水平地盤反力度が模擬スラスト力を埋設管の投影面積で除した値(= 6.25 kN/m<sup>2</sup>)に達した時の割線剛性を変形係数  $E_h$  として求めた。こうして得られた各ステップにおける  $E_h$  と、模型地盤内で計測した間隙水圧から得られた  $i_m/i_{cr}$  の関係を図-5に示す。 $i_m/i_{cr}$ が増加するにつれて  $E_h$ は緩やかに減少し、 $i_m/i_{cr}$ がおよそ0.8以上になると  $E_h$ は急減することがわかる。すなわち、 $i_m/i_{cr}$ がおよそ0.8以上となると本実験で作製した模型地盤は不安定になるといえる。これらの計測結果に基づき、図-5に示すように  $i_m/i_{cr}$  と  $E_h$  の関係を定式化した。

次に、受圧体模型の高さと幅をパラメータとした埋設管の水平載荷試験の結果について、 $i_m/i_{cr}$  と  $d_b$  の関係を図-6に示す。まず、受圧体の高さを100 mmとし、幅を25 mm, 50 mm および 75 mm とした Case A3, B5 および C1 を比較すると、受圧体の幅を拡大するにつれて  $d_b$ が増加し始める  $i_m/i_{cr}$  が大きくなるのがわかる。幅の違いによる対策効果の違いは、受圧体の上下端の面積拡大による摩擦抵抗の増大のみならず、幅の拡大に伴う受圧体自体の曲げ剛性の増大も影響したとみられる。また、受圧体の幅を50 mmとし、高さを50 mm, 75 mm および 100 mm とした Case B5, D5 および E6 を比較すると、受圧体の高さの拡大につれて  $d_b$ が増加し始める  $i_m/i_{cr}$  が大きくなるのが認められた。高さの拡大は受働土圧の受圧面積を拡大することになり、これに応じてスラスト力に対する抵抗力が増したと考えられる。

図-5に示した  $i_m/i_{cr}$  と  $E_h$  の近似曲線を用いて、図-6に示した  $i_m/i_{cr}$  と  $d_b$  の関係を  $E_h$  と  $d_b$  の関係として再整理した結果を図-7に示す。 $E_h$  および  $d_b$  は飽和地盤の変形係数  $E_{h0}$  および管径  $D$  (= 50 mm) でそれぞれ正規化して示した。なお、 $E_{h0}$  は図-5に示した  $i_m/i_{cr}$  と  $E_h$  の近似曲線において  $i_m/i_{cr} = 0.0$  を代入することで得た。前述のとおり、本実験条件下では  $i_m/i_{cr}$  がおよそ0.8以上となると模型地盤が不安定になるが、このような  $E_h/E_{h0}$  が低下した条件下でも明確な埋設管の水平変位抑制効果が得られたのは Case B5 および Case C1 であるといえる。その他対策ケースでも埋設管の変位抑制効果はあるものの、地盤の剛性が低下した条件下でも対策効果を得るには受圧体の幅は1.0D以上、高さは2.0D以上とすることが求められる。

### (3)まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ・地盤がスラスト力を受けた場合、埋設管の受働領域地盤では埋設管側面から地表面にかけて帯状にせん断ひずみが高まる。この領域に土嚢受圧体を設置することで、スラスト力に伴う埋設管の水平変位を抑制できた。

表-2 土嚢受圧体の寸法に関する実験ケースの一覧

	受圧体模型			地盤条件	最終ステップ
	$W_g$ [mm] ( $W_g/D$ )	$H_g$ [mm] ( $H_g/D$ )	模式図		
Case N1	なし	なし		Step1:不飽和状態	Step3
Case A3	25 (0.5D)	100 (2.0D)		Step2: $H=0$ mm	Step7
Case B5	50 (1.0D)	100 (2.0D)		Step3: $H=70$ mm	Step7
Case C1	75 (1.5D)	100 (2.0D)		Step4: $H=140$ mm	Step9
Case D5	50 (1.0D)	50 (1.0D)		Step5: $H=210$ mm	Step7
Case E6	50 (1.0D)	75 (1.5D)		Step6: $H=280$ mm	Step8
				Step7: $H=350$ mm	
				Step8: $H=420$ mm	
				Step9: $H=455$ mm	

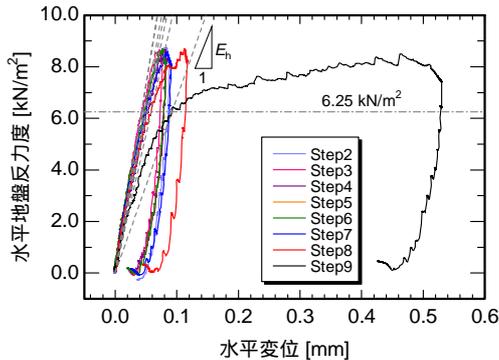


図-4 孔内水平載荷試験結果の例

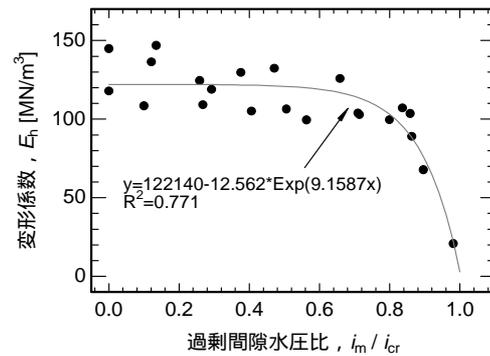


図-5 孔内水平載荷試験による  $i_m/i_{cr}$  と  $E_h$  の関係

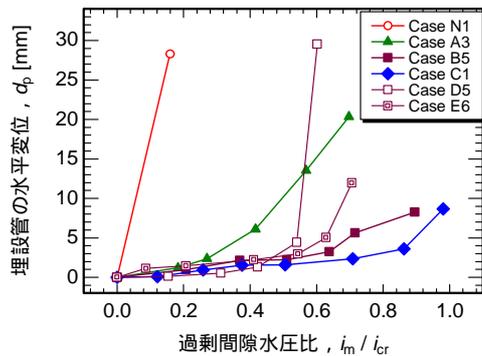


図-6  $i_m/i_{cr}$  と  $d_p$  の関係

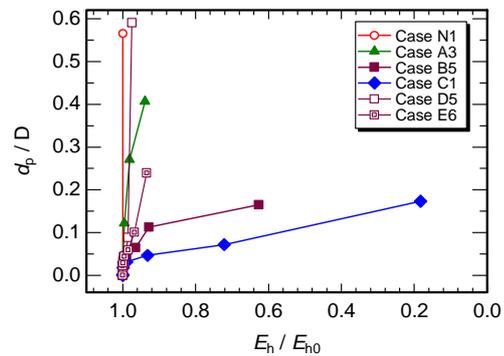


図-7  $E_h/E_{h0}$  と  $d_p/D$  の関係

- ・土嚢受圧体を設置する際に埋設管以深まで掘り込んで設置すると、根入れの効果により埋設管の変位抑制効果の向上が図れる。
- ・土嚢受圧体を設置することで得られる対策効果は、埋設管近傍地盤の局所的なせん断変形の抑制、受圧面積の拡大による受働土圧の増大、幅の拡大による上下面での摩擦抵抗の増加と受圧体の剛性増加によるものと考えられる。
- ・本実験条件において、剛性が低下した地盤中でも明確な変位抑制効果を得るために必要な土嚢受圧体の条件は、受圧体の幅が埋設管直径と同等以上、高さが埋設管直径の2倍以上であった。

以上のとおり、慣性力等の影響を排除した静的な模型実験を通じて、土嚢受圧体を用いたスラスト力防護対策の効果を明らかにすることができた。しかしながら、地盤中の土嚢受圧体と埋設管の地震時の動的挙動については不明な点が多く、今後さらなる検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Araki H. and Hirakawa D., Effects of thrust protecting method for buried pipe using geogrid gabion of different sizes, International Journal of GEOMATE, 査読有, Vol. 16, No. 58, pp. 62-68, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.21660/2019.58.8152>

荒木裕行, 平川大貴, 蛇籠型受圧体を用いた埋設管屈曲部のスラスト力防護工法の提案,

[学会発表](計3件)

荒木裕行, 平川大貴, 泰祐輔, 地盤の剛性低下を考慮した蛇籠型受圧体による埋設管のスラスト力防護対策効果の検討, 第54回地盤工学研究発表会, 2019.

荒木裕行, 平川大貴, 松尾秀昭, 埋設管のスラスト力防護対策に用いる蛇籠型受圧体の寸法に関する模型実験, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.

荒木裕行, 平川大貴, 志村拓哉, 蛇籠型受圧体を用いた埋設管のスラスト力防護対策に関する模型実験, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。