

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420500

研究課題名(和文)河川堤防の豪雨時における間隙空気の噴発発生メカニズム

研究課題名(英文)A study on mechanism of the generation of pore-air pressure and its resulting the pore-air blow phenomena in the river dike during heavy rainfall

研究代表者

神谷 浩二(KAMIYA, Kohji)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：50252119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：河川堤防が豪雨時に浸水を受けたとき、間隙空気圧が増大し地表面から噴発する現象が指摘されている。本研究では、模型地盤に降雨と河川による浸水を想定した実験に基づき、浸水時の間隙空気圧の発生原因を検討するとともに、噴発現象に対処するため透気・防水シートの適用を検討した。その結果、飽和透水係数が10の-3乗cm/sオーダーの土質材料で間隙空気圧の発生が懸念され、間隙空気圧の増大に伴い地盤内部で亀裂等の破壊が観察され、間隙空気が河川堤防の安全性に影響することが示唆された。そして、透気・防水シートを地表面付近に敷設することによってその透気性が確保され、間隙空気圧発生や破壊現象を解消できることが検証された。

研究成果の概要(英文)：It has been pointed out that the pore-air blow off from the surface of river dike during heavy rainfall. It is therefore important to consider the influence of the pore-air blows on the slope stability of the dike. In this research, based on the laboratory water infiltration experiment in one-dimension, the pore-air behavior during the wetting process in unsaturated soil was considered and the adaptability of the geotextile on prevention of the pore-air blows was examined. As a result, it was found that the pore-air pressure in the soil with the hydraulic conductivity of 10⁻³cm/s was generated by the seepage of river water when the air permeability at near the surface was reduced by the rainfall. It was observed that the local crack in the soil occurred due to the larger pore-air pressure. And then, the pore-air blows was prevented in while keeping the air permeability at near the surface by laying the geotextile at the ground surface.

研究分野：地盤工学

キーワード：河川堤防 間隙空気 透気係数 透気・防水シート

1. 研究開始当初の背景

不飽和な河川堤防が豪雨時に浸水を受けたとき、堤防内部の間隙空気がその表面から噴発する現象が確認されている。特に、近年の多発するゲリラ豪雨とそれによる河川の急激な増水によってその現象が顕在化している。噴発現象は、浸水に伴って堤防内部の間隙空気が塊として封入され圧力が増大することに起因するとみられ、また、堤防に亀裂等の損傷を与えるためその弱体化の一因になることが指摘されている。しかしながら、浸水時の間隙空気の噴発現象の機構とそれによる堤防の安全性への影響は未解明のままであるため、その対処法を明確にできていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、河川堤防の安全性の向上に資するため、間隙空気の噴発現象の原因解明とその対策に主眼を置き、次の事項(1)と(2)について究明した。

(1) 間隙空気圧の噴発現象の発生機構

不飽和な模型地盤について、鉛直一次元方向で、上面から人工降雨を浸水させ下面から河川水を想定した浸水をさせる実験に基づき、浸水時の間隙水や間隙空気の挙動を調べ、間隙空気圧の発生原因や噴発現象の特徴について検討した。

(2) 噴発現象を抑制する対策工

従来の遮水シートによる表のり面被覆工法に対比して、間隙空気の噴発現象にも対処するため、降雨や河川水の浸水を抑制しつつ間隙空気の地表からの排出を確保する透気・防水シートの適用を検討した。

3. 研究の方法

(1) 間隙空気圧の噴発現象の発生機構

不飽和地盤の浸水時の間隙空気圧の発生原因等を検討するため、次の模型地盤の浸水実験を実施した。

図1は、降雨と河川水による地盤への浸透を想定した浸水実験の装置の概要を示したものである。装置は、試料を充填する試料管(内径 15cm、長さ 200cm のアクリル製の円筒管)、降雨浸水させるための散水装置、河川水を想定して試料層下部から浸水させるための貯水管(内径 10cm、長さ 200cm のアクリル製の円筒管)、試料層内の飽和度 S_r (%)、間隙水圧 u_w (kN/m²)、間隙空気圧 u_a (k/Nm²) のそれぞれを測定するための水分計、間隙水圧計、間隙空気圧計によって構成されている。

炉乾燥試料を図1の試料筒に所定の間隙比になるように充填して、試料層を作製する。次に、貯水管の水位を上昇させることによって試料層の下部より浸水させ、試料層上面に浸潤面が達した後、貯水管の水位を試料層下端の位置に低下させ維持させながら重力排水させ、24時間程度放置して試料層の飽和度の分布がほぼ平衡状態になったときのものを初期状態とした。そして、その地表面にお

いて降雨を先行して所定量 R (mm/hr) で降らせ、深さ $z = 15$ cm に降雨による浸水が達したときに、貯水管の水位(初期は試料層下端に位置)を速度 v_H (cm/hr) で上昇させることによって、試料層下部から浸水を開始する。このとき、浸水開始からの時間 t (min) における試料層内の飽和度、間隙水圧、間隙空気圧のそれぞれを測定した。そして、貯水管水位が試料層表面と同じ位置に達したときに実験を終了した。

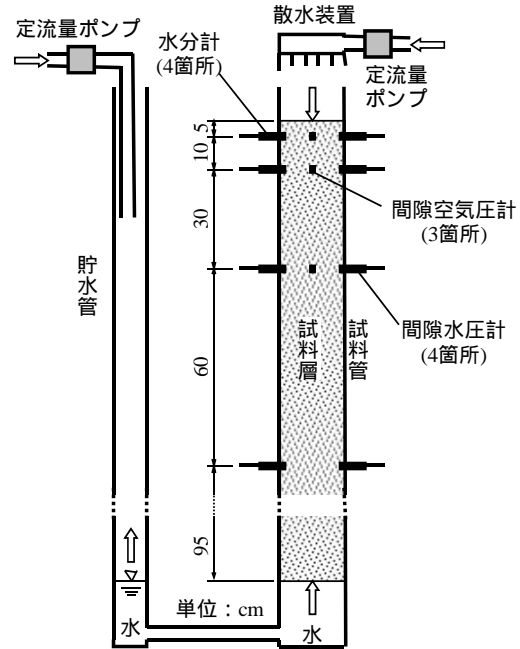


図1 模型地盤の浸水実験の装置概要図

試料には、珪砂8号と木曽川堤防砂の2種類を用いた。試料層の間隙比 e は、珪砂8号で $e = 0.904$ 、木曽川堤防砂で $e = 0.880$ にそれぞれ設定した。また、このときの飽和透水係数 k_{ws} (cm/s) の値は、珪砂8号では $k_{ws} = 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s、木曽川堤防砂では $k_{ws} = 1.8 \times 10^{-2}$ cm/s であった。そして、表1に示すように、試料の種類と降雨量、貯水管水位上昇速度による6ケースの実験を行った。

表1 浸水実験のケース

| ケース | 試料 | 降雨量 R (mm/hr) | 貯水管水位上昇速度 v_H (cm/hr) |
|-----|--------|-----------------|-------------------------|
| A | 珪砂8号 | 40 | 98.7 |
| B | | 58 | 99.4 |
| C | | 79 | 100.8 |
| D | 木曽川堤防砂 | 59 | 98.4 |
| E | | 80 | 101.0 |
| F | | 100 | 99.0 |

(2) 噴発現象を抑制する対策工

透気・防水シートの性能評価

透気・防水シートは、図2に示すように、透気性を有した不透水性のフィルムとその両側を保護するための不織布の三層からな

る．本研究では，そのシートに直径が $d = 0.32\text{mm}$ の細孔を開孔率 n^* (%) (シートの面積 1cm^2 あたりの細孔の面積の割合) で新たに設け，透気性を向上させたものを用いた．そして，次のように，透気・防水シートの透気試験と透水試験によって透気係数 k_a (cm/s) と飽和透水係数 k_w (cm/s) をそれぞれ調べた．

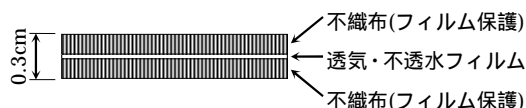


図2 透気・防水性シートの模式図

図3は，透気・防水シートの透気試験装置の概要図を示したものである．シートを設置する試料容器(内径100cm)，空気圧力調節器，空気流量計，空気圧力計，荷重機器，荷重計，変位計によって構成されている．空気コンプレッサーから供給される圧縮空気を空気圧力調節器によって所定の大きさの空気圧力に調節して試料容器に送気し，空気をシートに対して鉛直上向きに透過させる．そのとき，シート下面側に与えた空気圧力水頭 h_a (cm) を空気圧力計により，透過した空気の流量 Q_a (cm^3/s) を空気流量計によりそれぞれ測定する．また，荷重計によって荷重圧 p (kN/m^2) を測定し，変位計によって荷重したときのシートの変位量 δ (mm) を測定した．これら測定値を用いて，シートの透気係数 k_a (cm/s) はダルシー則に従って算出した．

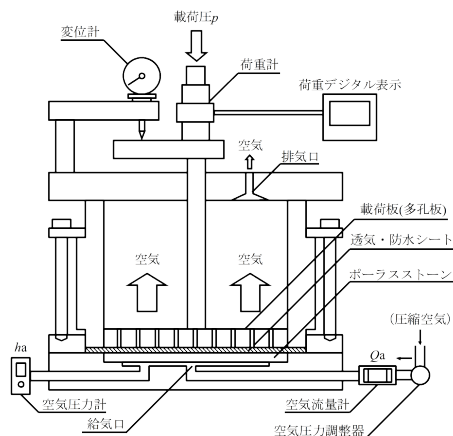


図3 シートの透気試験装置の概要図

次に，図4は，飽和状態の透気・防水シートを用いたときの透水試験装置の概要を示したものである．この装置は，図3の透気試験装置の排気口と空気流量計接続箇所をビューレットに置き換えたときのものである．試料容器に湿潤状態のシートを設置した後，容器内を全て水で満たし，給水側と排水側のビューレットに水位差を与えてシートに鉛直下向きに透水させる．そして，ビューレット内の水位の経時変化の測定に基づき，ダルシー則に従って飽和透水係数 k_w (cm/s) を算

出した．

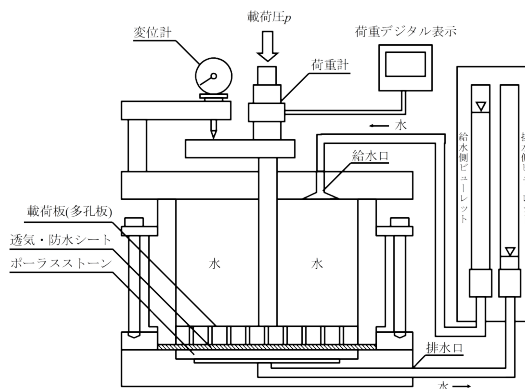


図4 シートの透水試験装置の概要図

シート敷設による噴発現象の抑制効果

不飽和な模型地盤について，その表面に透気・防水シートを敷設することによって，地盤が浸水を受けたときの間隙空気の噴発現象の抑制の可能性を検討した．

図1の模型地盤の浸水実験の装置において，先ず，砂8号を長さ150cmで充填したものを浸水飽和させ，重力排水を行ったものを初期状態とした．その後，砂8号による試料層の地表面に透気・防水シート(開孔率 $n^* = 0.1\%$) をシリコンで試料管に接着して敷設し，その上面に覆土を想定した砂6号を充填した．なお，水分計，間隙水圧計のそれぞれは，砂6号の試料層の底面から5cmの高さと，砂8号の試料層の表面からの深さ $z = 5, 45\text{cm}$ の3箇所，間隙空気圧計は砂8号の $z = 5, 15, 45\text{cm}$ の3箇所にそれぞれ設置した．そして，降雨量 R で散水し，砂6号の試料層内に設置した水分計に降雨浸水の浸潤面が到達したとき，貯水管の水位を水位上昇速度 v_{H1} で上昇させることで地盤下部から浸水を開始した．なお，浸水実験では，シート上面に降雨浸透水が達したとき，潜水を発生させないため試料管の一部に排水箇所を設置した．また，貯水管内の水位が砂8号の試料層の地表面と同じ高さになったときに実験を終了した．

4. 研究成果

(1) 間隙空気圧の噴発現象の発生機構

図5は，表1のケースCとケースFを例に，飽和度 S_r ，間隙空気圧 u_w ，間隙空気圧 u_a の経時変化をそれぞれ示したものである．ケースA, B やケースD, E, Fでは，図5(b)のように，浸水に伴って顕著な間隙空気圧の発生は認められず，降雨等による間隙水は間隙空気とスムーズに置換しながら浸透したと考えられる．一方，ケースCでは，図5(a)のように，試料層下部からの河川による浸水を開始した後に間隙空気圧が増加し始め，最大で $5\text{kN}/\text{m}^2$ 程度に達したとき，写真1に示したように地表面付近において亀裂による破壊現象が観察された．

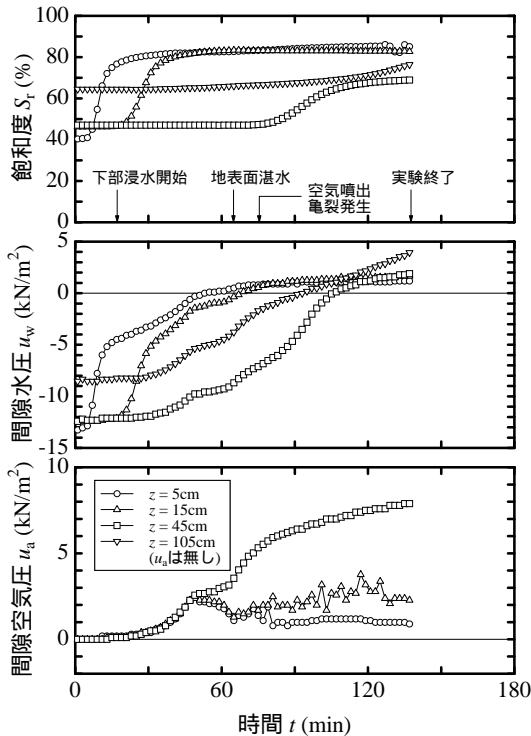


図 5(a) 飽和度，間隙水圧・空気圧(ケースC)

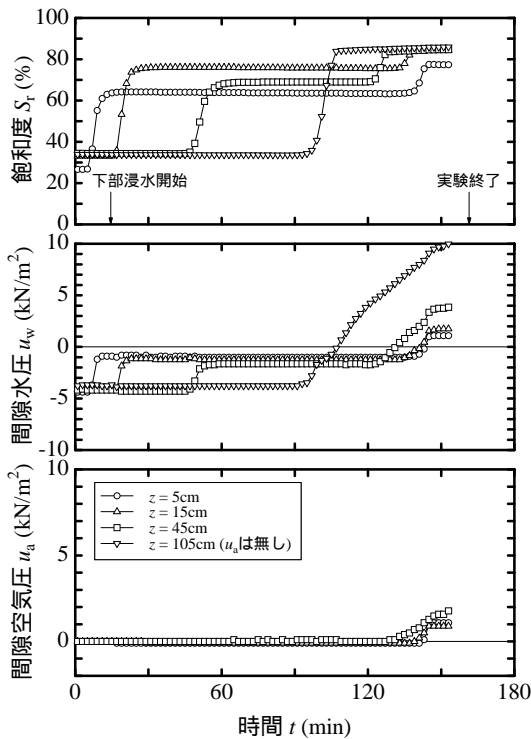


図 5(b) 飽和度，間隙水圧・空気圧(ケースF)

そして、この結果を分析したところ次述する事項が得られた。

- ・ 飽和透水係数が 10^{-3} cm/s のオーダーをもつ珪砂 8 号では、降雨量が 80mm/hr 程度を超える条件のとき顕著な間隙空気圧が発生した。透水係数が 10^{-2} cm/s のオーダーの木曽川堤防砂では、降雨量が 100mm/hr に達しても空気圧発生は認められなかった。
- ・ 降雨によって地表面付近の飽和度は高く

なり透気性が低下して、それが降雨や河川の浸水に伴う間隙空気の排出を阻害するため、間隙空気が圧縮を受け圧力が高まる原因であることが考えられた。

- ・ 間隙空気圧の増大に伴って、地表面から間隙空気が泡状に噴出するとともに、内部で亀裂が発達する特徴的な破壊形態が観察された。即ち、間隙空気が河川堤防の安全性等に影響する可能性が示唆された。

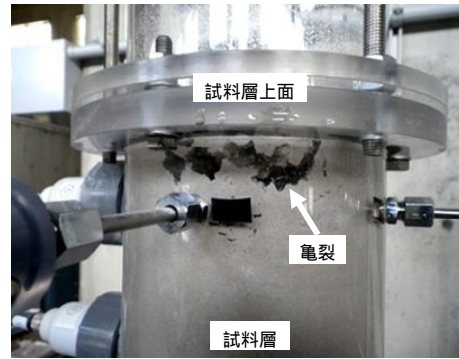


写真 1 間隙空気圧発生に伴う変状(ケースC)

(2) 噴発現象を抑制する対策工

透気・防水シートの性能評価

図 6 は、乾燥状態の透気・防水シートについて、透気係数 k_a の値を開孔率 n^* との関係で示したものである。開孔率が大きくなるほど透気係数の値は大きくなり、また、載荷圧の増加によって透気係数は小さくなる傾向にある。一方で、開孔率が大きくなるほど、透気係数の載荷圧による減少量は大きくなる傾向が認められる。図 7 は、湿潤状態のシートについて、透気係数 k_a の値を開孔率 n^* との関係で示したものである。開孔率が大きくなるほど透気係数の値が大きくなる傾向にあり、また、載荷圧を増加させると透気係数は小さくなる傾向である。図 6 の乾燥状態の場合と比較すると、湿潤シートの透気係数は、乾燥シートの $1/10$ 程度に低下した。これは、シートを保護する不織布の間隙が保水し、細孔の一部を塞いだことが原因だと考えられる。一方で、載荷圧が加わると不織布の繊維がより密になり間隙が狭くなって保水性が高まるため、空気流に対する抵抗が高まることによると考えられた。

図 8 は、開孔率 n^* と飽和透水係数 k_w の関係を示したものである。載荷圧を与えると飽和透水係数は若干低下するが、おおむね 10^{-3} cm/s 程度であり低透水性の値を示し、開孔率が大きくなるほど高めになる傾向にある。

透気・防水シートの透気性と透水性を調べた結果、次述する事項が明らかになった。

- ・ シートは、覆土によって載荷された場合でも乾燥時で 10^{-1} cm/s オーダー以上の透気係数を有し、湿潤時では 10^{-2} cm/s 以上の透気係数を確保できることが明らかになった。
- ・ シートの飽和透水係数は 10^{-3} cm/s 程度であった。

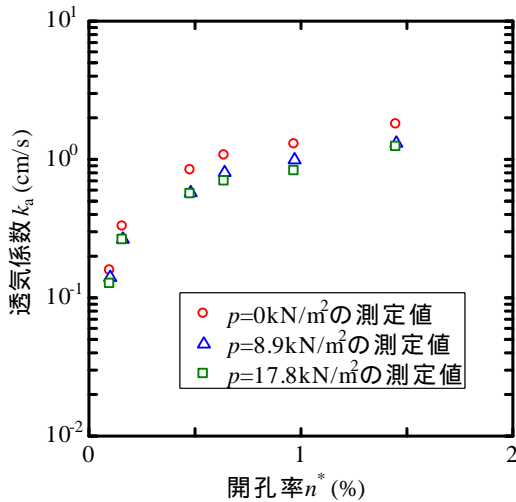


図6 開孔率と透気係数(乾燥シート)

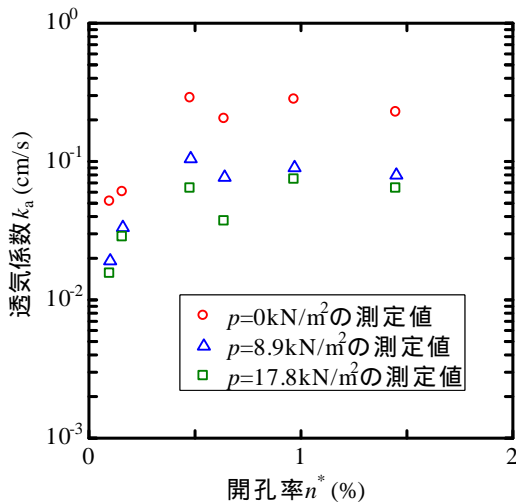


図7 開孔率と透気係数(湿潤シート)

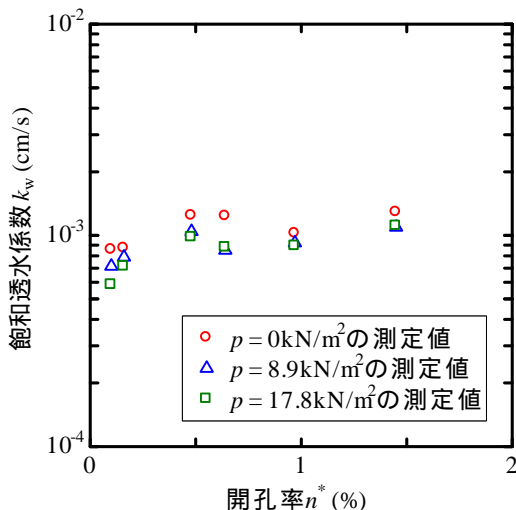


図8 開孔率と透水係数(湿潤シート)

シート敷設による噴発現象の抑制効果
 上述したように、不飽和な模型地盤の浸水実験では、飽和透水係数が 10^{-3} cm/s のオーダーをもつ土質材料では、降雨と河川水の急激な浸水を受ける条件のときに間隙空気の噴

発現象が生じることが得られた。この現象を抑制するには、降雨条件下での地表付近の透気性の確保によって浸水時のスムーズな間隙空気の排出が必要であり、 10^{-2} cm/s 以上の透気係数の維持が要求されると考えられた。上述のシートの性能評価に基づき、開孔率 $n^* = 0.1\%$ の透気・防水シートを用いて、噴発現象の抑制効果を検討した。なお、浸水実験では、上述 4.(1) で間隙空気噴発現象が発生したときの降雨量 $R = 80$ mm/hr、水位上昇速度 $v_H = 100$ cm/hr の条件を設定した。

図9は、シート敷設時における浸水に伴う試料層の飽和度 S_r 、間隙水圧 u_w 、間隙空気圧 u_a の経時変化をそれぞれ示したものである。降雨によって地表付近 ($z = 5$ cm) の飽和度は初期状態から変化しないため、シートが降雨の浸水を抑制したと考えられる。一方、下部からの浸水を開始して試料層内の間隙空気の排出過程に至っても、間隙空気圧計において圧力の増大は確認されなかった。即ち、透気・防水シートの敷設によって地表の透気性が確保され、間隙空気がスムーズに排出したと考えられ、間隙空気圧発生や破壊現象を解消できることが検証された。

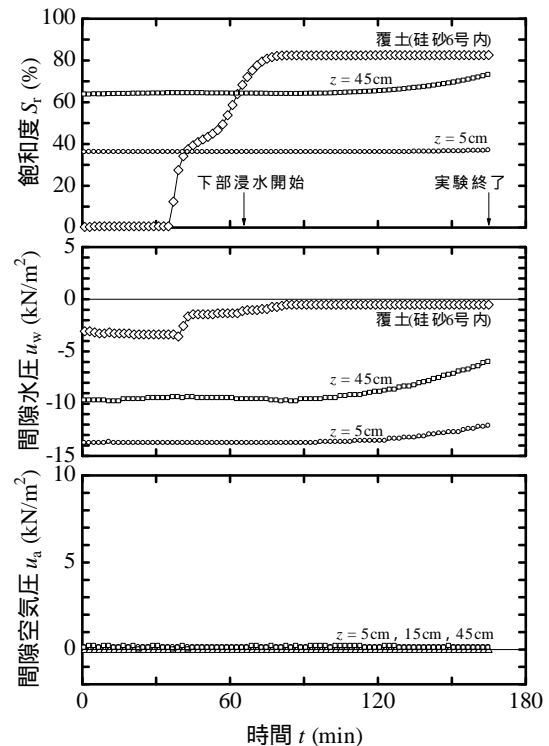


図9 飽和度、間隙水圧・空気圧(シート対策)

5. 主な発表論文等 [雑誌論文](計 4件)

神谷浩二, 大場敬士, 山田周作, 石田正利: 河川堤防の透気・防水性シート敷設による間隙空気噴発の抑制効果, 河川技術論文集, Vol.21, pp.383-388, 2015. 査読有
 Kamiya, K. and Yamada, S. : An

experimental study on pore-air behavior during water seepage process in unsaturated soil, Unsaturated Soils: Research & Applications (Edited by N. Khalili, A. R. Russell and A. Khoshghalb), Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, Sydney, Australia, Vol.2, pp.1131-1136, 2014. 査読有
DOI : 10.1201/b17034-165

神谷浩二, 大場敬士, 山田周作: 河川堤防の浸水に伴う間隙空気圧発生とそれによる破壊現象に関する実験的考察, 河川技術論文集, Vol.20, pp.473-478, 2014. 査読有

<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00906/2014/20-0473.pdf>

神谷浩二, 山田周作, 石田正利: 河川堤防の浸水時の間隙空気圧発生を抑制するシート対策工に関する実験的考察, ジオシンセティックスシンポジウム論文集, 第28巻, pp.17-22, 2013. 査読有
DOI : 10.5030/jcigsjournal.28.17

〔学会発表〕(計 5件)

神谷浩二, 大場敬士, 山田周作, 石田正利: 河川堤防の間隙空気噴発を抑制する透気・防水性シート工の基礎的検討, 第50回地盤工学研究発表会平成27年度発表講演集, pp.951-952, 2015年9月. 北海道札幌市

神谷浩二, 大場敬士, 山田周作: 河川堤防の浸水に伴う間隙空気圧の発生条件に関する実験的考察, 第49回地盤工学研究発表会平成26年度発表講演集, pp.873-874, 2014年7月. 福岡県北九州市

神谷浩二, 山田周作: 河川堤防の浸水時における噴発現象発生に関する実験的考察, 土木学会中部支部平成25年度研究発表会講演概要集, pp.171-172, 2014年3月. 岐阜県岐阜市

神谷浩二, 山田周作, 堀 裕貴, 石田正利: 河川堤防の浸水時のエアブロー現象とその対策工に関する実験的考察, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集(第 部門), pp.387-388, 2013年9月. 千葉県習志野市

神谷浩二, 山田周作, 堀 裕貴: 不飽和地盤の浸水時における間隙空気圧発生に関する実験的考察, 第48回地盤工学研究発表会平成25年度発表講演集, pp.1049-1050, 2013年7月. 富山県富山市

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神谷 浩二 (KAMIYA, Kohji)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号: 50252119

(2) 研究分担者

森口 周二 (MORIGUCHI, Shuji)
東北大学・災害国際研究所・准教授
研究者番号: 20447527

(3) 連携研究者