

小型半導体チップ型センサによる地盤の間隙変化の計測方法に関する基礎的実験

A Basic Experiment on Estimating Porosity using a Network of Wireless Microchip Sensor

小松満	Mitsuru KOMATSU	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
竹下祐二	Yuji TAKESHITA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
二川雅登	Masato FUTAGAWA	(静岡大学大学院工学研究科)
不破泰	Yasushi FUWA	(信州大学総合情報センター)
鈴木彦文	Hikofumi SUZUKI	(信州大学総合情報センター)
熊倉信行	Nobuyuki KUMAKURA	((株)東芝コミュニティ・ソリューション事業部)
吉野晃	Akira YOSHINO	((株)東芝新規事業開発部)

河川堤防での維持管理において、浸透破壊であるパイピング現象による破堤被害に対する危険箇所での常時モニタリングシステムの確立を目的とし、地盤の間隙率変化に対するチップ型センサの適用性を検討した。具体的には、鉛直一次元浸透破壊実験及び断面二次元土槽実験を実施し、浸透破壊発生時のセンサ挙動について確認した。一次元実験では、センサ間での測定において浸透破壊発生時に急激に値が上昇する挙動を示した。一方、二次元実験で法尻付近の計測を試みた結果、センサの設置状況によって異なる結果が得られたことから、実際の地盤ではセンサの計測影響配置を考慮した上で、複数のセンサを効果的に配置する必要があることが判明した。

キーワード：間隙率，チップ型センサ，浸透破壊，パイピング (IGC : D-4)

1. はじめに

近年、降雨強度がこれまでの観測史上を上回る“ゲリラ豪雨”が各地で記録され、甚大な被害をもたらす地盤災害を誘発させている。2013年7月の山口・島根豪雨では堤防の越流水が住宅地を巻き込んで多大な被害をもたらした¹⁾。また、2012年7月には九州北部一帯の豪雨により広範囲で洪水被害が発生したが、矢部川では堤防基盤の漏水から浸透破壊へ進展したことを主因とする破堤が生じた²⁾。これは、堤体内のパイピング現象により破堤に至ったことが指摘されており、洪水後の河川沿いの堤内地では、噴砂痕(ガマが噴いた跡)が確認されている。その後の調査で、基礎地盤の土質構造から漏水に対する対策が必要な箇所であったことが確認されており、洪水時の事象を見逃さず調査・検証することが重要であるとの教訓に至っている³⁾。

上述のような現状を鑑み、本研究では、河川堤防での維持管理⁴⁾において、特に浸透破壊に着目し、パイピング現象による破堤被害に対する危険箇所での常時モニタリングシステムの確立を目的とし、地盤の間隙率変化に対する適用性を検討した。既存の研究では、誘電率による土中水分計の適用が試みられている⁵⁾⁶⁾が、本研究では、誘電率センサより低い周波数帯で計測するセンサを採用した、その利点として、現在の市販センサよりも消費電力が少なく長期間安定した計測が実現できるとともに、価格の改善が期待できるだけでなく、センサチップを自由にレイアウトできる点が挙げられる。また、セ

ンサネットワークによる無線通信を利用したリアルタイム通信網により、被災の危険性がある現場で瞬時に観測システムが確立できる可能性を有している。

本研究で用いた小型半導体チップ型センサを写真-1に示す。電力消費量の少ないSI集積回路技術を使った静電容量型のセンサであり、既に農業分野への適応が進められている⁷⁾。このセンサは、電極に2つの白金(Pt)を用い、電極間に一定の電圧を印加した場合の電流を出力値とする方法である。なお、直流電圧を印加するとPt電極に発生する電気二重層の影響を受けるため、直流ではなく10kHzの正弦波を与えている。計測する物理量は電極間の電気抵抗成分と静電容量成分であり、水分量に応じてそれらの割合が異なるが、周波数10kHzのレンジでは、電気抵抗成分が支配的になる。さらに、このセンサは2つのセンサチップ間でのセンシングが可能であり、既に農業用では実績を上げている⁸⁾。つまり、センサ近傍のみの計測ではなく、より広範な計測が可能となる。また、本研究で用いた小型チップ型センサを備えたセンサ端末を複数個設置し、各センサが計測したデータ無線ネットワークによりサーバまで送信し処理するセンサネットワークが既に構築されている⁸⁾。これらのセンサ端末は、設置を容易にするために電力工事が不要な乾電池稼働を実現するための低消費電力が特徴である。現在、別途、本研究で用いた小型半導体チップ型センサを用いたセンサ端末からなるセンサネットワークの実証実験が別途進んでおり、自然斜面への適用が進められている¹⁰⁾。

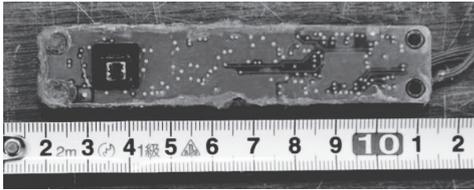


写真-1 小型半導体チップ型センサ

河川堤防破壊の原因となる浸透流に関して、その抵抗力の指標として、限界流速と限界動水勾配がある。この指標は土の性質や状態によって変化するため、二つの異なる視点からの基準が、種々の浸透破壊現象を評価する上で現場への適応を困難にしている¹¹⁾。この問題に対して、梅村らは限界動水勾配式と限界流速式の関係や適用性を明らかにするために、流速制御下での浸透破壊実験装置の製作を行った¹²⁾。従来多く使用されている動水勾配制御型装置とほぼ同じ値を得ることができるとともに、限界動水勾配に加えて限界流速も検討ができることを提案している。一方、杉井らは浸透破壊メカニズムの究明を目的に、誘電率式土壌水分計(ADR)を用いて間隙率の変化を測定する鉛直一次浸透破壊モデル実験を行った。その結果、Terzaghiの限界動水勾配に達する以前に土試料内での粒子の移動による間隙率の変化が生じ、その後全体破壊へ達する経緯を明らかにしている⁵⁾。さらに粒子移動のレベルから説明するために多粒子限界流速式を用いて考察を行っている¹³⁾。限界動水勾配に達する以前に砂層内部において間隙率が変化した後、上層の動水勾配が限界動水勾配にほぼ達したところで全体破壊が生じたことから、浸透破壊発生以前に起こる砂層内部における間隙率の変化は限界流速に達した粒子の一部が動くことと目詰まりにより起こる可能性が高いと推察した。また、内部侵食のメカニズムについて検討するために、ADRを用いた浸透破壊時の間隙率の変化と局所動水勾配の関係を計測しており⁶⁾、水平流れ場では動水勾配が0.4以下で浸透破壊が生じることと、局所動水勾配が上昇すると間隙率が大きくなるもののすぐに低下することが観測され、土粒子の移動が進展していることを裏付ける結果を得ている。また、ADRでの間隙率の測定に対する有効性を確認している。

鈴木らは浸透破壊現象に対するより信頼性の高い判定基準を確立するために、浸透破壊の現象の理解およびデータの蓄積が不可欠であることを指摘し、ガラスビーズを試料として粒子形状や細粒分等の影響を除外し、平面ひずみ状態に近い立方体容器を用いた上向き鉛直浸透流による基本的な浸透破壊実験を行っている¹⁴⁾。画像により浸透破壊の進展状況を明らかにするとともに、浸透破壊を生じる前の動水勾配で、前兆として供試体表面での小さい粒子の飛び跳ねが観察されたことから、供試体の構造の変化に起因した局所的パイピングであることを解明した。一方、Wangらはパイピング破壊の進展に対する解析技術を提案しており、パイピング発生領域の透水係数の変化を従来の解析手法よりも上手

く表現できることを示している¹⁵⁾。

このように基盤層の間隙率の変化をADRを用いて捉えようとする試みがなされているが、現象がセンサの計測影響範囲内で発生することが前提であるため、実地盤へ適用する際には、より広範囲での多点計測を行う必要がある。そこで、本研究では小型半導体チップ型センサに着目し、その基礎的な研究として室内実験により間隙率の変化を捉える可能性について検討した。なお、本研究ではチップ型センサを1個と2個用いた手法でそれぞれ検討しており、1個での計測範囲はセンサ近傍の2～3mm程度、2個での計測範囲はセンサ間の中心で直角方向にその距離の半分程度の影響範囲となっている。

2. 鉛直一次元浸透破壊実験

直径10cm、高さ10cmの亚克力製のカラムを用い、事前に十分に洗浄した豊浦砂（土粒子密度 $\rho_s=2.60$ (g/cm³)を高さ6cmになるように水中落下法により飽和供試体を作成した。試験ケースを表-1に示す。Case1は既存センサとの比較実験、Case2は小型チップ型センサ間による実験として場合分けをした。ここで、Case1-1の備考に記載している「給水」とは途中で浸透を止めてタンクに給水した後、再度浸透をさせたもの、「壁処理」は、亚克力容器内部に厚さ2mmのウレタンテープを貼り、壁面の浸透を制御したものである。

表-1 鉛直一次元試験ケース

	Case1-1	Case1-2	Case2-1	Case2-2
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.67	1.67	1.58	1.61
間隙比 e	0.59	0.59	0.68	0.65
間隙率 n	0.37	0.37	0.40	0.39
相対密度 D_r (%)	100		73	82
計算限界動水勾配 i_c	1.01	1.01	0.99	1.01
破壊時水頭差 ΔH (cm)	9	7	9	9
チップ型センサ個数	1		2	
静電容量センサ個数	1		0	
間隙水圧計個数	1		2	
備考	給水	—	—	壁処理

2.1 既存センサとの比較 (Case1)

ボーリング発生時の間隙率の変化をチップ型センサの計測により把握する可能性について市販の土中水分センサと比較する形で検討した。具体的には、小型半導体チップ型センサ、市販の静電容量センサ（形状：長さ55mm・幅15mm、計測範囲：鉛直方向に20mm、水平方向10mm）、間隙水圧計をそれぞれカラムの中心高さ（50mm）に設置し、段階的に水頭差を上げた際のセンサの経時変化を記録した。図-1に実験装置の概略図を示す。段階的に水頭差を上げた際の静電容量センサによる体積含水率、圧力水頭及びチップ型センサの出力値の経時変化を図-2および図-3にそれぞれ示す。なお、Case1-1は限界動水勾配に達した後もさらに水位を上昇

させて挙動を確認したものであり、限界動水勾配に達する時間は Case1-2 と同じである。図-2(a)において間隙水圧計の値が 0 になっている部分は給水のために一旦浸透を停止した時間を示している。また、目視でボイリングの発生を確認した経過時間をそれぞれの図において赤色の▽印で併記した。それぞれの結果について、チップ型センサではボイリング発生時の出力値の変化を示す結果は得られなかった。その一方、静電容量センサの値が急激に上昇する挙動を確認した。目視で確認した状況では、ボイリングはカラム内の一部で発生していたことから、静電容量センサは計測範囲がチップ型センサよりも広い領域に及んでいるために現象を捉えることができたが、その一方、単体のチップ型センサではセンサ近傍の範囲に限定されているため、反応が得られなかったものと判断した。

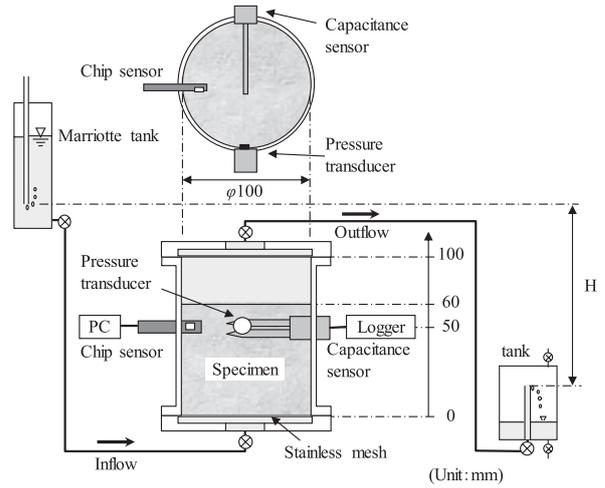
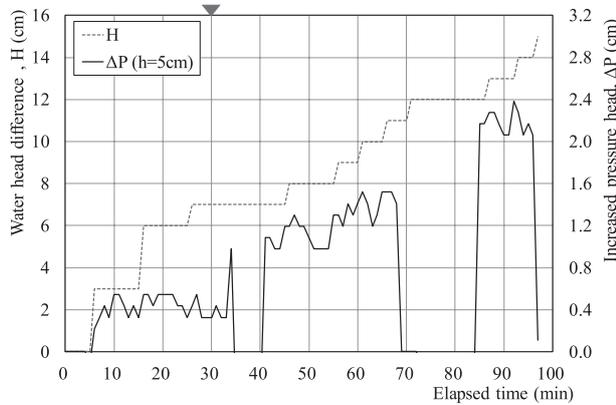
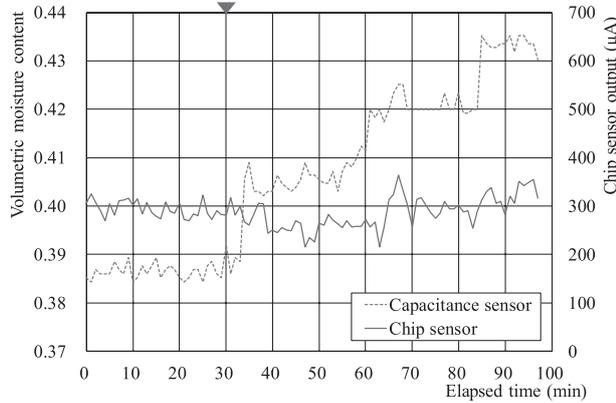


図-1 鉛直一次元浸透破壊実験装置概略図 (Case1)

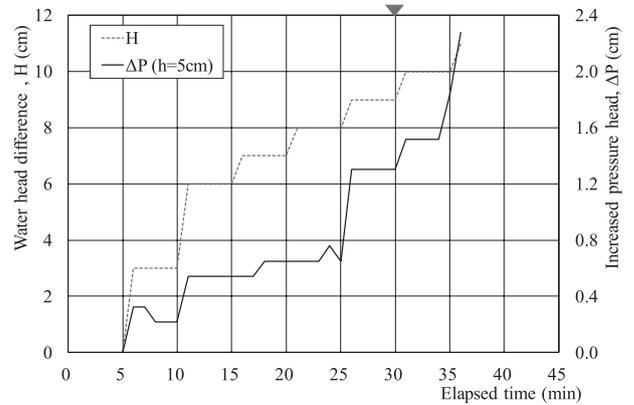


(a) 水頭差と動水勾配の経時変化

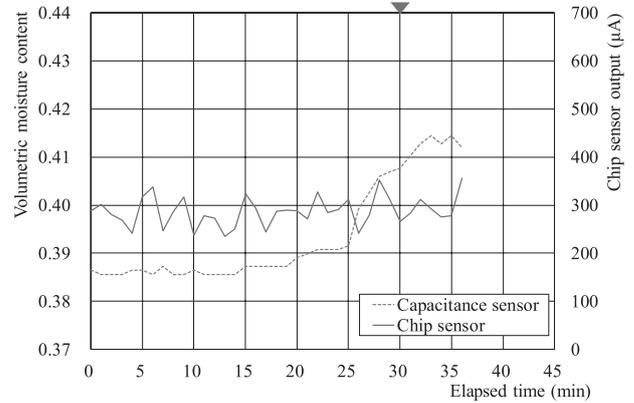


(b) 各センサの出力値の経時変化

図-2 鉛直一次元浸透破壊実験結果：Case1-1



(a) 水頭差と動水勾配の経時変化



(b) 各センサの出力値の経時変化

図-3 鉛直一次元浸透破壊実験結果：Case1-2

2.2 チップ型センサ間による計測 (Case2)

次に、小型半導体チップ型センサを 2 個設置して、センサ間での測定が可能となるように変更し、計測範囲を拡大して同様の実験を実施した。図-4 に実験装置の概略図を示す。同じ直径 10cm、高さ 10cm のアクリル製のカラムに、小型半導体チップ型センサを 2 個設置した。また、上下タンクの水頭差だけでは、計算上で得られるボイリングが発生する動水勾配が流入出におけるエネルギーロスの影響で実際と大きく異なったことから、差

圧計をカラムの上下に設置することで、供試体にかかる動水勾配 i を計測した。図-5 に Case2-1、図-6 に Case2-2 の結果を示す。なお、凡例表記にある i_c は土粒子密度と間隙比から計算した限界動水勾配であり、Chip Sensor1-2 がセンサ間での出力値を示したものである。Case2-1 では一方のセンサが反応していない場合が見られたが、その場合でもセンサ間では出力値が上昇することを確認した。Case2-2 では、センサ単体およびセンサ間とも出力値の急激な上昇を確認した。なお、ボイリン

グ後に出力値が急上昇した後、再度減少しているのは、目視で観察した状況も踏まえ、ボイリングの発生は供試体の全体ではなく部分的に生じた可能性が高く、また動水勾配の増加に伴って発生箇所が移動しているものと考えられる。そのため、センサの計測影響範囲内で起こる急激な間隙変化に反応して出力値が急上昇した後、その部分のボイリングが停止して別の部分に移ったことで、再び粒子の再配列が生じて間隙が小さくなるため、センサの出力値が低下したものと推察される。

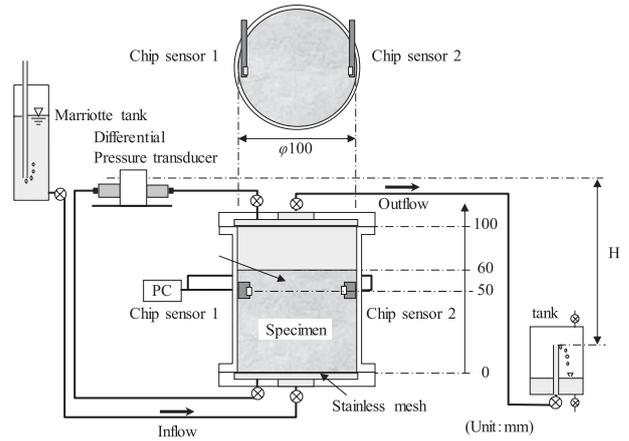
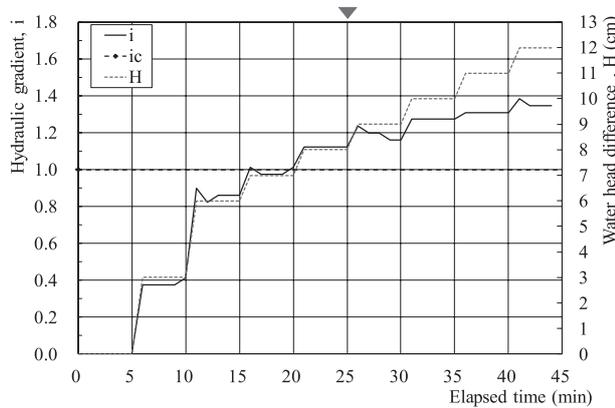
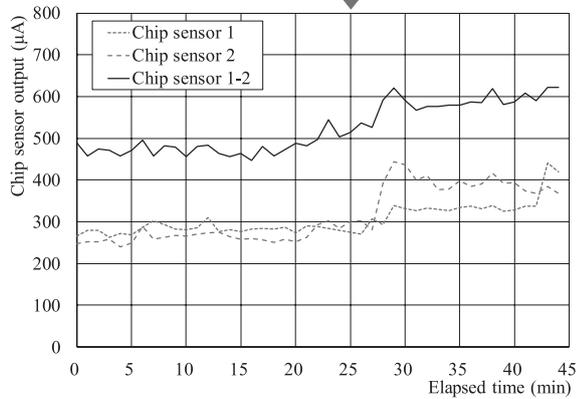


図-4 鉛直一次元浸透破壊実験装置概略図 (Case2)

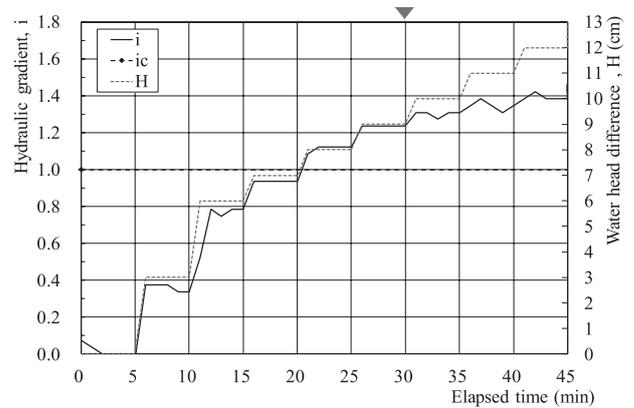


(a) 水頭差と動水勾配の経時変化

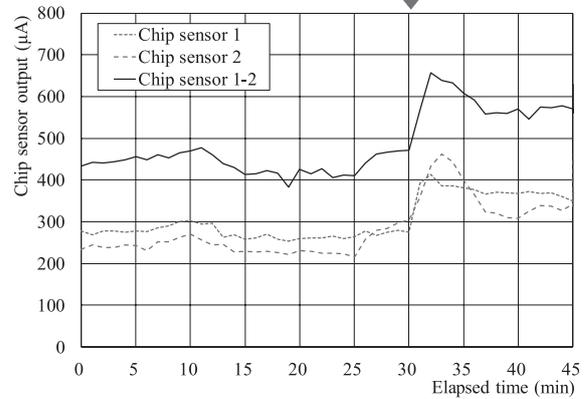


(b) チップ型センサの出力値の経時変化

図-5 鉛直一次元浸透破壊実験結果：Case2-1



(a) 水頭差と動水勾配の経時変化



(b) チップ型センサの出力値の経時変化

図-6 鉛直一次元浸透破壊実験結果：Case2-2

3. 断面二次元浸透破壊実験

3.1 実験装置及び方法

前述の結果を踏まえ、河川堤防を模擬した図-7 に示す二次元土槽を製作した。幅 93cm×高さ 90cm×奥行 12cm のアクリル製で、定水位タンクから碎石層により一定水頭で通水させる構造となっている。堤防の法肩から法尻までをモデル化した構造とし、表面を不透水境界とした。チップ型センサは表面の不透水境界の外側の基盤層に該当する部分に土槽の外側からセンサチップよ

りも若干大きい孔を設け、内部の水が漏れないように、アクリル表面にエポキシ製の接着剤を用いて貼りつけた。また、流出側は一定水位で排水できる構造とした。堤防部分の試料には先の一次元実験と同じ豊浦砂を用い、一旦乾燥させた試料でモデルの形状に整えた後、表面に不透水境界となる塩ビ製の板を設置した。定水位タンクを下流の排水位置にセットした状態を初期水位とし、定常浸透に至る時間を確保するため 30 分毎に水位を 5cm ずつ上昇させた際のセンサの経時変化を測定した。なお、写真-2 に各ケースでのセンサ位置を示す。

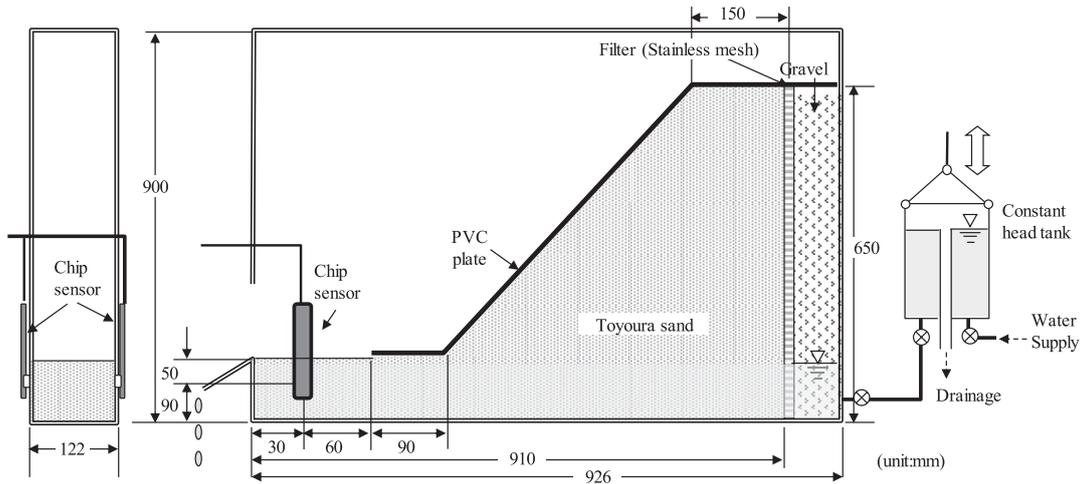


図-7 断面二次元浸透破壊実験装置概略図 (Case1)

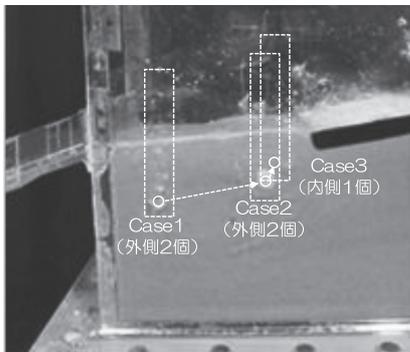


写真-2 各ケースでのセンサ位置

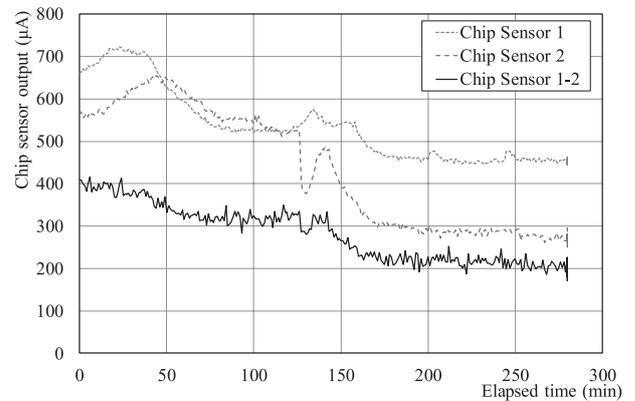


図-8 センサ出力値の経時変化 (Case1)

3.2 実験結果

(1) Case1

図-8 にチップ型センサの出力値と水頭差（初期水位との差）の関係を示す。浸透現象は水位が15cm程度で法尻付近の不透水プレート境界付近で発生し始めたが、センサ出力値は徐々に低下する傾向を示し、センサ間の出力値も先の一次元カラム実験で得られたような値の上昇は示さなかった。これは、基盤層として設置した豊浦砂を緩く堆積させた状態で設置したため、浸透による間隙率の低下を示した可能性が考えられる。また、土槽の外側にセンサを設置した上にセンサチップとほぼ同じ大きさの孔の影響により、センサ間の影響範囲が直線的になり、ポイリングは発生したセンサ上部の領域を捉えることが出来なかったものと推測した。

(2) Case2

次に、センサをより法尻近くに移動し、センサの出力値の変化の有無を確認した。先のCase1では、乾燥した砂試料を用いてモデルを製作したために、基盤層に当たる部分の一部に空気が残留し、浸透状況が均一とならなかったことから、下流の排水位置まで水を注水してから、水中落下により砂試料を充填した。図-9 にチップ型センサの出力値と水頭差の関係を示す。結果として、Case1のような出力値の低下は見られなかったが、浸透破壊発生時における出力値の上昇は見られなかった。

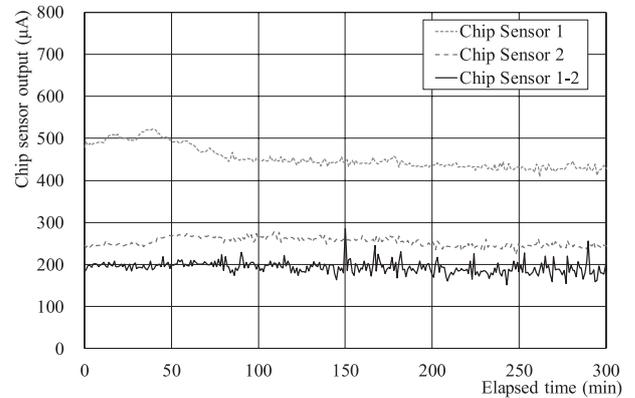


図-9 センサ出力値の経時変化 (Case2)

(3) Case3

先の実験結果で目視によりポイリングが生じた堤体の法尻付近に単体のセンサを設置した。実験結果を図-10に示す。今度はポイリングの発生を目視で確認した経過時間とほぼ同時にセンサの出力値が急激に上昇する挙動が確認できた。Case1~Case3のいずれにおいても堤体法尻付近でポイリングの発生を目視で確認したが、センサの設置状況によって異なる結果を示したことから、センサの計測範囲内で現象を捉えることができるセンサの配置が重要であることが判明した。

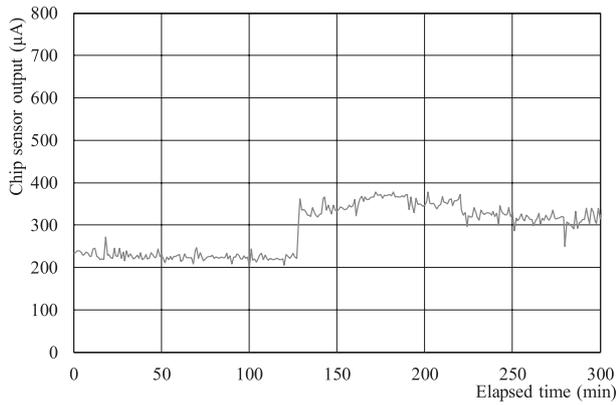


図-10 センサ出力値の経時変化 (Case3)

4. まとめ

本研究では、小型半導体チップ型センサ間による地盤の間隙変化及び水分量の計測方法に着目し、河川堤防における浸透問題への適用について検討した。具体的には、鉛直一次元浸透破壊実験及び断面二次元土槽実験においてボイリング発生時のセンサ挙動を確認した。

以下に本研究の内容をまとめる。

- (1) 鉛直一次元浸透破壊実験によるボイリング発生時のセンサ挙動について、単体のチップ型センサと静電容量センサを用い、段階的に動水勾配を上げた際のセンサの経時変化を記録した結果、静電容量センサの値が急激に上昇する挙動が確認できた。これは、地盤の間隙率の上昇による変化であると判断できるが、供試体の一部でのみボイリングが起きたため計測範囲の狭いセンサでは測定できなかった。
- (2) 複数のチップ型センサを用い、センサ間での測定を試みた結果、目視でのボイリング発生の確認後に急激に値が上昇する挙動を示したことから、その有用性を確認することができた。
- (3) 断面二次元土槽実験によって法尻付近の基盤層における間隙率の変化を捉えることを試みた結果、センサの設置位置によって計測値が上昇する場合と変化しない場合が見られた。これは、土槽へのセンサ設置の影響によるものであるが、浸透破壊の発生を効果的に計測するにはセンサの計測範囲内で現象を捉えることができるセンサの配置が重要であることを示唆している。

謝辞

本研究の実施にあたり、(一社)中国建設弘済会の「平成25年度支援制度」および(公財)ウエスコ学術振興財団の「平成26年度学術研究費助成」の助成を受けた。また、室内実験の実施にあたっては、阿河峻平氏(平成27年3月岡山大学卒業、現神戸市)に多大なご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会地盤工学委員会・地盤工学会中国支部：平成2年7月山口・島根豪雨災害現地調査結果報告書，44p.，2013.
- 2) 土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，103p.，2013.
- 3) 独立行政法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント，66p.，2013.
- 4) 鳥居謙一，森啓年：講座 河川堤防，7.河川堤防の維持管理，地盤工学会誌，Vol.62，No.3，pp.68-75，2014.
- 5) 杉井俊夫，山田公夫，浅野憲雄，余川弘至，堀伸彰，稲吉隆太：浸透破壊時の土中間隙の変化と動水勾配，土木学会第69回年次学術講演会，III-162，pp.323-324，2014.
- 6) 杉井俊夫，山田公夫，名倉晋：浸透破壊時の間隙率の変化と多粒子限界流速の関係，土木学会第58回年次学術講演会，III-412，pp.823-824，2004.
- 7) Futagawa, M., T. Iwasaki, T. Noda, H. Takao, M. Ishida, and K. Sawada: Miniaturization of Electrical Conductivity Sensors for a Multimodal Smart Microchip, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, No.04C184, pp.1-4, 2009.
- 8) 川嶋和子，二川雅登，番喜宏，浅野義行，澤田和明：挿入型農業用センサを利用したトマト培地のEC測定，電気学会論文誌E(センサ・マイクロマシン部門誌)，Vol.131，No.6，pp.211-217，2011.
- 9) 不破泰：大規模災害時にも稼働する高耐障害性通信インフラとこのインフラを用いた地域見守りシステム，日本信頼性学会誌，Vol.34，No.8，pp.506-512，2012.
- 10) 二川雅登，小松満，鈴木彦文，竹下祐二，不破泰，澤田和明：小型 EC センサを用いた斜面崩壊予測センサの開発，電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌)，Vol.133，No.9，pp.278-283，2013.
- 11) 宇野尚雄：浸透破壊現象の展望，地盤工学会誌，Vol.57，No.9，pp.6-9，2009.
- 12) 梅村順：流速制御型浸透破壊実験装置の製作とそれを用いた限界流速・限界動水勾配の実験的検討，地盤工学会誌，Vol.57，No.9，pp.22-25，2009.
- 13) 杉井俊夫，山田公夫，名倉晋：限界流速からみた浸透破壊の発生と進行，地盤工学会誌，Vol.57，No.9，pp.26-29，2009.
- 14) 鈴木輝一，元吉浩之，小田匡寛：鉛直浸透破壊実験における局所的パイピングに関する考察，土木学会論文集 C，Vol.63，No.2，pp.602-611，2007.
- 15) Wang, D., X. Fu, Y. Jie, W. Dong, and D. Hu : Simulation of pipe progression in a levee foundation with coupled seepage an pipe flow domains, *Soils and Foundations*, Vol.54, No.5, pp.974-984, 2014.

(2015年6月22日 受付)