

河川堤防の法面における遠隔水分量モニタリングに向けた実証研究

An Empirical Study for the Remote Monitoring of Water Content in the Slope of the Levee

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)

豪雨時の河川堤防の安定性を評価する上で、堤防内への河川水の浸透のみならず、降雨の浸透挙動を把握する必要がある。特に、これらの挙動を評価する浸透流解析では堤防内の地下水位や水分量の分布の初期条件に加えて河川水位や降雨浸透量の境界条件を適切に設定する必要がある。本報では、実際に岡山市内の河川堤防において、表層から挿入した多点土中水分センサを用いて降雨時の体積含水率を計測し、その深度分布の変化量から浸透量を試算した結果について述べる。また、センサネットワークを利用した遠隔水分量モニタリングシステム構築に向けた現状での取り組みと課題についてまとめる。

キーワード：水分量，現地計測，降雨浸透量，センサネットワーク (IGC : D-4)

1. はじめに

河川堤防の被災形態は越水によるものが約半数を占めており、その次は浸食および浸透の順となっているが、河川堤防の整備が進んだ近年でも、これら破堤に対する減災対策は重要視されている状況にある¹⁾。一方、河川堤防の維持管理の面では、これまでは統計的、工学的な手法を適用することが困難なため、管理者の経験に委ねている場合が多い²⁾。しかし、最近では通常の目視点検に加えて、堤防の質的評価が進められてきており、特にその中でも浸透に対する安全性検討が着目されている³⁾。ここで、浸透に着目すると河川水・雨水の浸透による堤防のパイピング破壊や法面のすべり破壊が挙げられ、豪雨時の河川堤防の安定性を評価する上で、堤防内への河川水の浸透のみならず、降雨の浸透挙動を把握する必要がある。つまり、これらの挙動を評価する飽和・不飽和浸透流解析では堤防内の地下水位や水分量の分布の初期条件に加えて河川水位や降雨浸透量の境界条件を適切に設定する必要がある。

降雨浸透量の設定について、通常、降雨量から表面流出量、蒸発散量、土中貯留量を差し引く水収支法⁴⁾で求められているが、特に蒸発散量についての観測方法は確立されているとは言い難く、いくつかの推定方法に基づいて行う必要がある。一方、堤防表面付近の地盤の透水係数を原位置試験⁵⁾により求め、この透水係数の値を降雨浸透量の最大値とする手法もあるが、実際に適用するには地盤の水分量の状態に合わせた透水係数の設定や

植生の影響、法面での試験実施が困難であることなど、考慮すべき点が多い。

そこで、本研究では、降雨浸透量を現地水分量の計測結果に基づいた算定方法を提案するとともに⁶⁾、センサネットワークを利用した土中水分のモニタリングシステムの開発を目的とした。ここでは実証研究として実際に、岡山市内の河川堤防において降雨の浸透挙動を計測し、原位置における土中水分量の変化から降雨浸透量を試算した結果と遠隔水分量モニタリングシステム構築に向けた取り組みについてまとめる。

2. 河川堤防における水分量のモニタリング

2.1 対象現場の概要

岡山市内の二級河川において、堤内地側の法面中腹を計測地点に設定し、2014年11月23日より計測を開始した。現地の状況を写真-1、断面の概略図を図-1にそれぞれ示す。将来的には堤防内の数カ所に観測地点を増やす予定であるが、現段階では法面の中腹1点のみで計測深度は表層から鉛直距離で1mまでとした。

2.2 計測センサ

現地計測に用いたセンサは、写真-2に示すような市販の多点水分センサである。あらかじめ偏心しないように治具に取り付けたオーガードリルでセンサパイプよりも若干小さな孔を設け、打設により設置した。



写真-1 現地観測現場 (岡山市内)

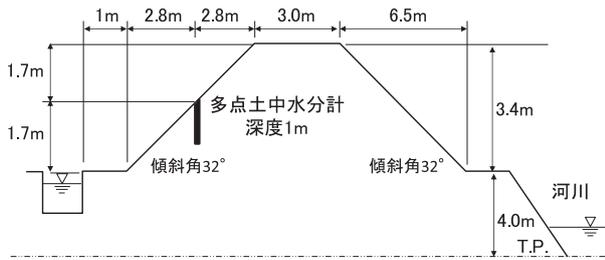


図-1 現地観測現場の断面概略図

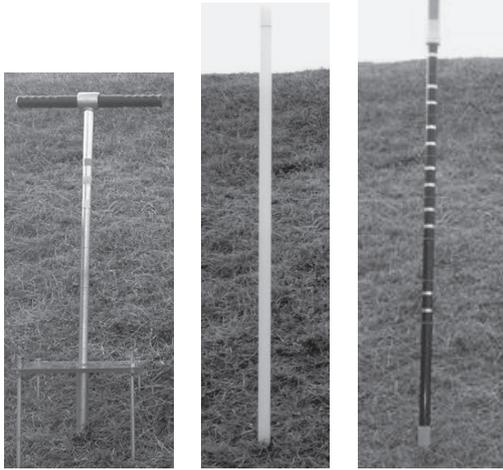


写真-2 削孔用具および計測センサ (左からオーガドリル, ケーシングパイプ, 水分センサ)



写真-3 削孔時採取試料

削孔時における採取試料の状況を写真-3 に示す。堤体断面の全体的な土質構成は未知であるが、削孔した深度の土質は全体的にまさ土であった。

土中水分計の計測点は、図-2 に示すように、1 地点で 6 深度 (中心深度=7, 17, 27, 37, 57, 97cm) であり、各計測深度における円筒領域 (中心深度の上下に各 5cm, 直径 12cm 程度) の平均的な誘電率が計測される。本研究では、以下の校正式を用いて体積含水率 θ に換算した。

$$\theta = \frac{b_0 + b_1V + b_2V^2 + b_3V^3 + b_4V^4 + b_5V^5 + b_6V^6}{a_1} - a_0 \quad (1)$$

ここで、 V は出力電圧 (0~1V), a_0, a_1 は土質に応じたパラメータであり、まさ土のような一般的な土質では、 $a_0=1.6, a_1=8.4$ が提案されている。また、 $b_0=1.125, b_1=-5.53, b_2=67.17, b_3=234.42, b_4=413.56, b_5=-356.68, b_6=121.53$ である。なお、計測は 30 分間隔とし、乾電池で約半年間稼働するデータロガーを用いている。

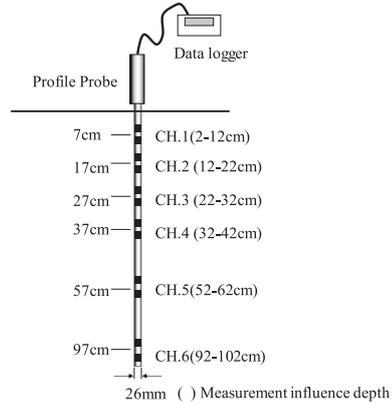


図-2 多点水分センサの計測点

2.3 降雨量及び河川水位

降雨量は計測現場から約 2km 程度離れた測候所、河川水位は現場付近の水門施設で観測されたデータをそれぞれ入手した。図-3 に 30 分間の降水量と累加雨量 (ここでは、24 時間無降雨を区切りとした) と図-4 に累加雨量と河川水位の変化をそれぞれ示す。ここで、計測期間中の最大の 30 分間降雨は 8mm, 累加雨量は 42mm である。また、河川の状況として、出水期のデータが得られていないために、計測地点よりも低い標高で推移している。この河川は平野で縦断勾配はほとんどないが、下流に水位が管理されている利水用の湖が位置している関係で、観測の水位データに水門調整の影響が現れる場合がある。つまり、無降雨であっても水位が低下しているのはこの影響である。なお、2011 年 8 月の台風 12 号により、天端付近まで河川水位が上昇し、下流では洪水被害が生じている。

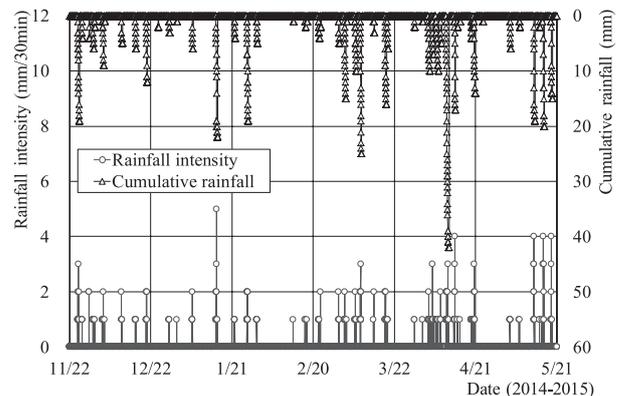


図-3 降水量と累加雨量

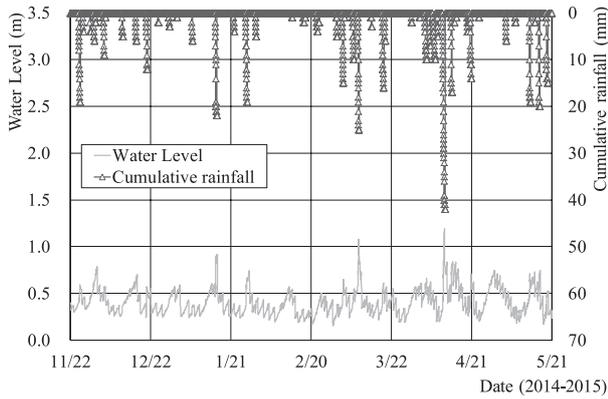


図-4 累加雨量と河川水位の変化

2.4 土中水分量計測結果

図-5 に多点水分センサにより計測した深度毎の体積含水率の経時変化を示す。降雨に対する水分量の増加挙動が顕著に見られるとともに、累積降雨量が多い期間では全体的に高く推移している。なお、データが途切れているのは、ロガーの不具合による欠損である。また、図-6 にセンサ設置時にサンプリングした試料から含水比と体積含水率を測定した結果と多点水分センサの深度毎の測定値を比較した結果を示す。浅い深度においてセンサ設置直後の値がサンプリング結果よりも低く現れた。これは孔の乱れによりセンサパイプと地盤との密着が不十分であったことが要因として挙げられる。ただし、図-5 より設置直後の降雨の影響で値が上昇し、その後、急激に下降してないことから、降雨の浸透により地盤との密着性が得られたものと推察される。

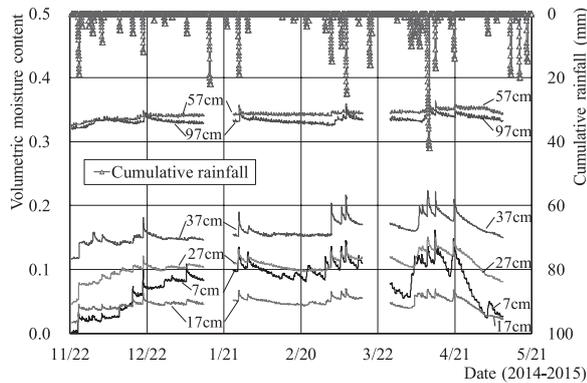


図-5 体積含水率の経時変化

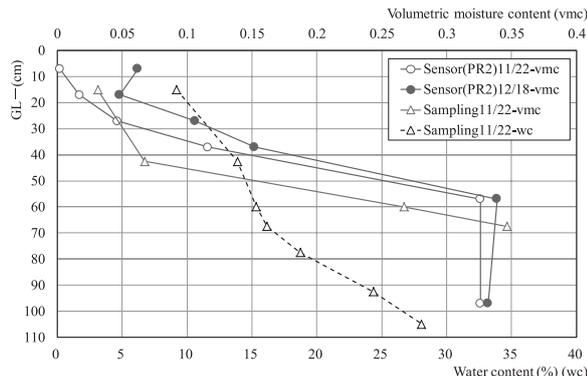


図-6 体積含水率と降雨量の変化

3. 降雨浸透量の算定

3.1 算定方法

上述の水分計測結果から、降雨後に体積含水率は一時的に増加し、その後時間を追って減少している状況が見受けられる。そして、次の降雨により再度増加して、再び減少するという挙動を繰り返す。そこで、水分の深度分布の結果を用いて、その増加分を降雨浸透量と仮定して試算した。具体的には、例えば図-7 に示す体積含水率の深度分布における変化量(斜線部分の面積)であり、これを 30 分毎のデータに対して算出した上でその最大値を採用した。つまり、降雨開始直前の堤防内の土中水分量の分布からの増加量を面積で求め、その最大値を浸透量として算出した。なお、各計測区間は直線分布していると仮定し、深度 7cm 以浅の水分量は深度 7cm の変化量と同じ分布とみなした。また、今回の計算では用いていないが、現場飽和状態にまで上昇した場合は、その継続期間に対して透水係数から算定することとなる。

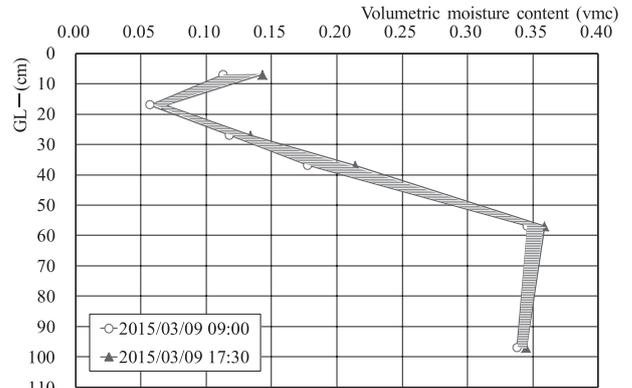


図-7 体積含水率の深度分布の経時変化

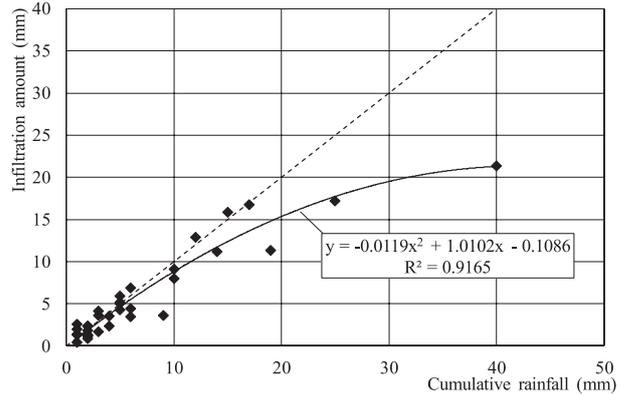


図-8 累加降雨と浸透量の関係

3.2 算定結果

上述の方法により、堤防内への浸透量を計算した結果を累加降雨量に対してプロットしたものを図-8 に示す。累加降雨量が増加するに伴って、降雨浸透量も増加しており、ある程度の相関性が見られた。浸透量は累加降雨が小さいほどほぼ全量が堤防内に浸透する結果となった。対象現場は植生が管理されており、観測期間が冬季～春

季であるため、蒸発量は少ないものと推察されるが、水収支法等を用いた算定結果の妥当性の検証は現時点では行っていない。一方、降雨浸透量が最大になるまでの時間との関係を図-9 に示すがこの関係については相関性が認められなかった。

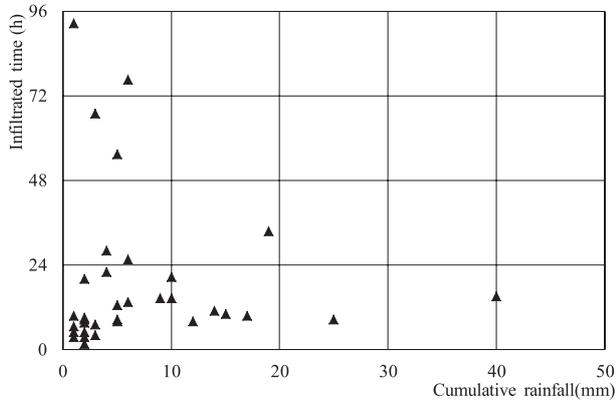


図-9 累加降雨と経過時間の関係

4. 遠隔水分量モニタリングシステムの構築

4.1 小型チップ型センサとデータ転送システム

現地計測に用いたセンサは、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、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⁷⁾。図-10 に示すような市販の多点水分センサと同じ径で長さ 40cm のパイプに先端から 10cm の位置に取り付けた単体のチップ型センサである。あらかじめ偏心しないように治具に取り付けたオーガードリルでセンサパイプよりも若干小さな所定の深度の孔を設け、打設によりセンサを設置した。なお、チップ型センサの計測深度は多点水分センサの CH3 と同深度の 27cm である。また、図-11 にデータ転送システムの概略図を示す^{8), 9)}。今回、乾電池で駆動するセンサ端末を新たに開発したが、30 分間隔の計測で 4 ヶ月連続稼働しており、2014 年 12 月～2015 年 2 月のデータ送信における到達率は、ほぼ 100% (損失したデータは 1 のみ) であることを確認した。

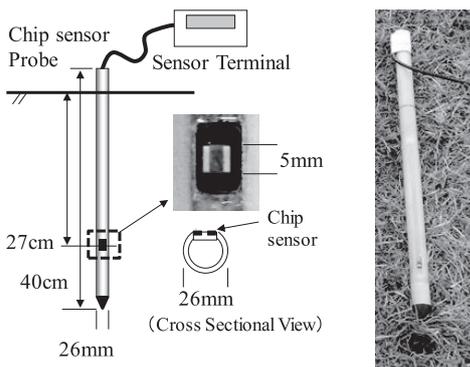


図-10 チップ型センサプローブ

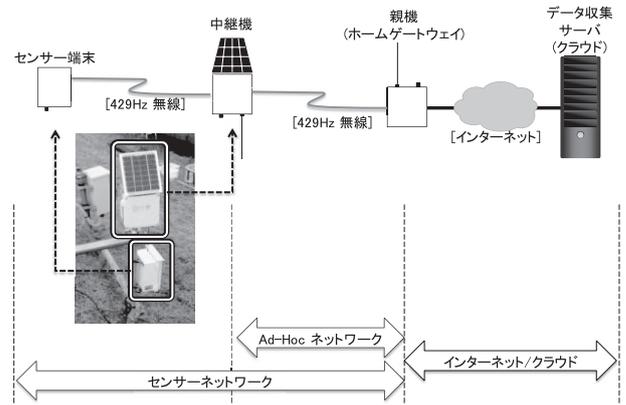
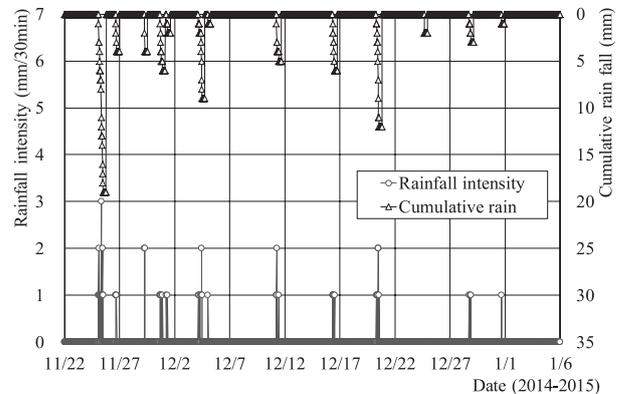


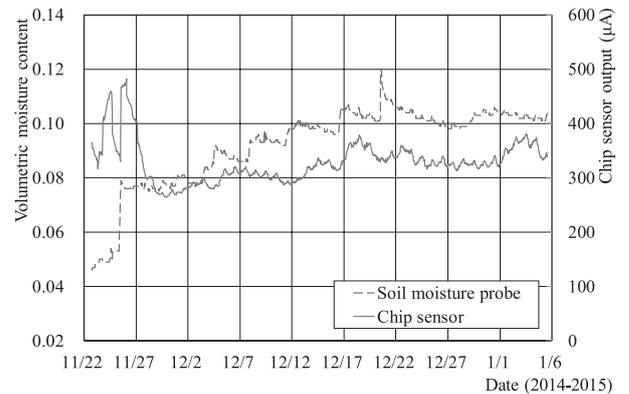
図-11 データ転送システム概略図

4.2 観測結果

図-12 にチップ型センサの堤防設置後約 1 ヶ月半の出力値の経時変化を多点水分センサによる測定結果とともに示す。計測開始直後にチップ型センサの値が上昇している部分は、水分センサでは認められないが、11/25 の急激な値の上昇は同様な傾向を示している。水分センサは最初の降雨により密着度が向上し、チップ型センサも隙間に一時的に水が含まれたことで急激な値の上昇が生じたものと推察されるが、最初の上昇は無降雨時であるため、現時点ではその原因は不明である。また、11/28 以降では、計測値が上昇するタイミングが同様な部分が確認できるものの、一部で差異が認められる。



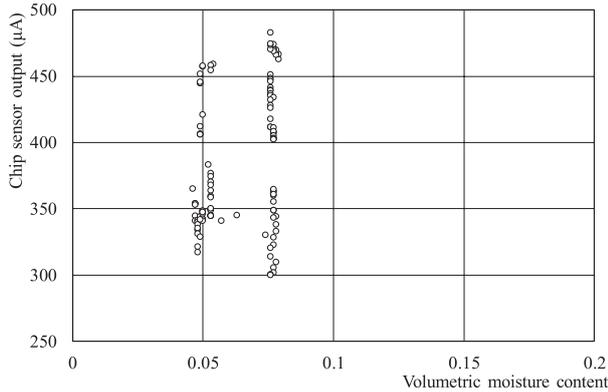
(a) 降水量と累加雨量



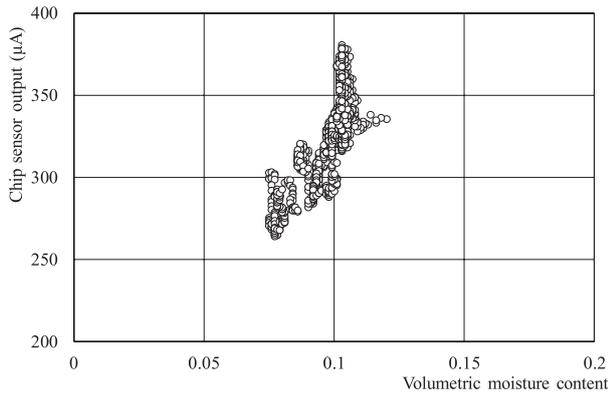
(b) センサ計測値

図-12 降雨量と各センサ計測値の経時変化 (深度 27cm)

次に、図-13 に図-12 を基に整理した体積含水率とチップ型センサ出力値の関係を示す。11/22~11/27 の期間はセンサの値が安定していなかったために相関性はほとんど認められなかった。その一方、11/28~1/5 の期間については相関が認められた。また、11/25 と12/4 の降雨時の両センサの変化挙動を整理した結果を図-14 に示す。これらの結果から、チップ型センサの降雨に対する反応は確認できたものの、市販の土中水分量計と比較すると一部で挙動が異なる部分が見られる。



(a) 11/22~11/27

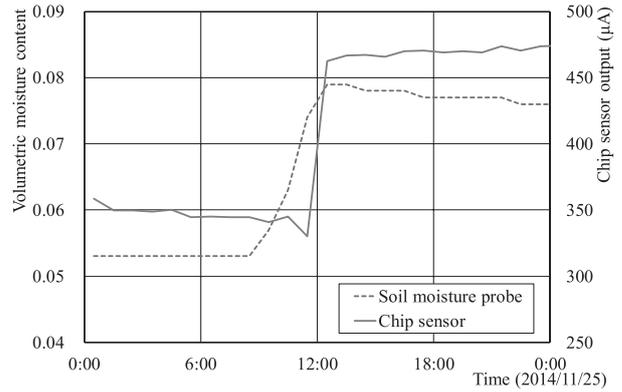


(b) 11/28~1/5

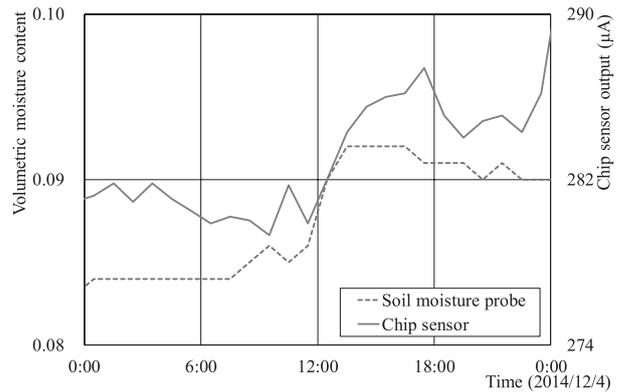
図-13 体積含水率とチップ型センサの出力値の関係

4.3 チップ型センサの校正と体積含水率の評価

次に、チップ型センサの出力値から体積含水率を評価するために、現場採取試料を種々の水分量に調整して再構成した供試体に対して、測定した出力値の結果を図-15 に示す。なお、間隙率は図-6 に示した深度 27cm における体積含水率及び含水比と別途測定した土粒子密度から算出した。この結果を基に 12/4 のデータに適用した結果を図-16 に示す。多点水分センサの測定値と降雨に対する変化量に差異が現れた。チップ型センサは、多点水分センサより絶対値として 0.01 程度低く、降雨直後に値はわずかに増加傾向を示すものの、変化量が少ない。これらの原因としては、供試体にセンサを挿入する際に、試料の乱れとセンサチップと土粒子の密着が不完全となったことが挙げられ、あらかじめセンサを固定した状態で締固めを行うなどの工夫が必要である。



(a) 11/25



(b) 12/4

図-14 体積含水率と小型半導体チップ型センサの出力値の関係

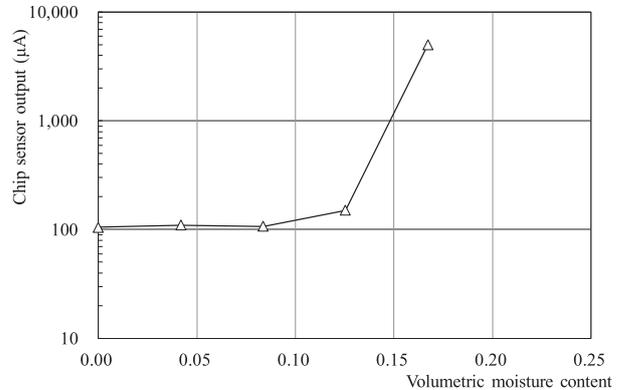


図-15 体積含水率とチップ型センサの出力値の関係

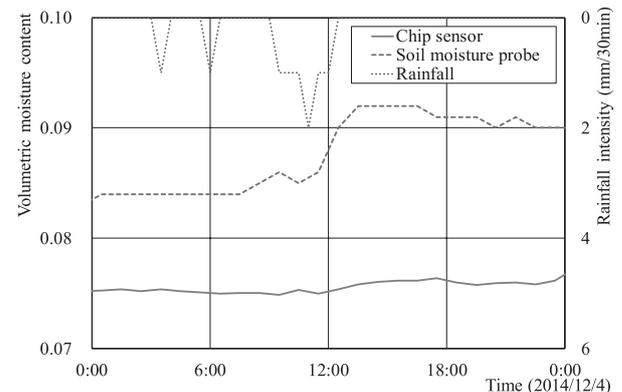


図-16 多点水分センサとチップ型センサの比較

5. まとめ

本研究では、河川堤防の安定性を評価する浸透流解析手法の境界条件に相当する降雨浸透量に着目し、現地水分量の計測結果に基づいた算定方法を提案するとともに、センサネットワークを利用した土中水分のモニタリングシステムの開発を行った。具体的には、岡山市内の河川堤防において降雨の浸透挙動を計測し、原位置における土中水分量の変化から降雨浸透量を試算した結果と遠隔水分量モニタリングシステム構築に向けた取り組みについて述べた。

以下に本研究で実施した内容についてまとめる。

- (1) 岡山市内の河川堤防の法面中腹において、深度 1m までの水分量の分布を市販の多点土中水分計により計測した。計測結果の妥当性を計器を設置する際の削孔土から求めたところ、ほぼ整合する体積含水率の分布となったが、計測値の絶対値に対する精度を議論する上では詳細なサンプリングの実施が必要であり、現時点では評価が難しい。
- (2) 降雨浸透量を現地計測結果に基づく体積含水率の深度分布の経時変化について試算した。その結果、累加雨量が 20mm 程度までは降雨量とほぼ等しくなったが、累加雨量の値が大きくなればなるほど降雨浸透量の割合が低下する傾向を示した。
- (3) チップ型センサの出力結果では、降雨に対する反応を比較したところ、土中水分計との相関がみられる部分と一部で同様の変化をしていない期間もあった。また、現地採取した試料を基にセンサの校正を行ったが、出力値を体積含水率に変換するだけの十分な測定結果を得ることは出来なかった。つまり、絶対値としての水分量の精度に問題がある事が明らかになったが、現時点では、校正精度の向上と複数のチップ間による計測範囲の拡大、また、センサチップを地盤に密着させるためのセンサ構造の改良により改善が可能であると考えている。

謝辞

本研究の一部は、(一社)中国建設弘済会の「平成 25 年度支援制度」(研究代表者:小松満)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」(研究代表者:小松満)の助成を受けて実施した。また、小型チップ型センサは文部科学省科学研究費助成事業若手研究(B)(H24~H26)(研究代表者:二川雅登)、データ転送システムは、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度「地域全体の安全・安心を確保する防災・減災および鳥獣センシングを実現するセンサーネットワーク

システムの研究開発(112304003)」(H23~H24)(研究代表者:不破泰)、災害状況を遠隔地から把握するセンサネットワークのための災害に柔軟に対応する通信インフラシステムの研究開発(142304006)(H26)(研究代表者:不破泰)の成果をそれぞれ活用した。さらに、岡山県備前県民局には河川堤防の現場の貸借、岡山県土木部河川課には河川水位と降雨データをご提供頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 福島雅紀, 石原雅規: 講座 河川堤防, 2.河川堤防の整備の歴史と被災形態, 地盤工学会誌, Vol.62, No.3, pp.68-75, 2013.
- 2) 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.
- 3) 李圭太, 小山倫史, 大西有三, 古川秀明, 小林猛嗣: 越流を考慮した河川堤防の浸透破壊に対する応力-浸透連成解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.1-9, 2009.
- 4) 日本地下水学会編: 雨水浸透・地下水涵養, 理工図書, pp.1-64, 2001.
- 5) 森井俊広, 竹下祐二, 小林薫, 松元和伸: 不飽和地盤における原位置透水試験, 地盤工学会誌, Vol.62, No.5, pp.18-21, 2014.
- 6) 小松満, 西垣誠, 瀬尾昭治, 戸井田克, 田岸宏孝, 竹延千良, 山本陽一: 原位置土中水分計測による浅地層における降雨浸透量の評価方法, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2011-水環境の保全と育水-発表論文集, pp.17-26, 2011.
- 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) 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.
- 9) 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.

(2015年6月22日 受付)