

浸透に起因する堤体のすべり破壊の早期検知に向けたシート状センサーの設置位置の検討

九州大学大学院 学 ○荒木亮太

九州大学大学院 正 石蔵良平 F 安福規之 正 アデル・アロウイシー

東洋アルミニウム株式会社 左近貴浩 上松正和

1.はじめに

近年、豪雨の増加に伴う河川堤防の被害が多発している。豪雨による河川堤防の被害の内、浸透に起因する堤体のすべり破壊は、降雨や河川水位の上昇に伴い堤体が飽和し、土のせん断強度が低下することで発生する。河川水位の上昇など浸透力が増加傾向にある中で、堤体内の含水比状態の変化やせん断変位を適切に計測、分析することは今後の浸透破壊による河川堤防の被害減少に努める上で重要となる。本研究では、このような背景から、堤防内の特性変化をリアルタイムに計測できるシステムを構築するため、深さ方向・横断方向に連続的に含水比変化及び、ひずみ・温度変化が計測可能なシート状センサーを開発した(図-1)¹⁾。本研究では、模型実験と同様の土質条件での数値解析より、堤体のすべり破壊の発生時刻と浸透過程における堤体内の含水比状態やせん断変位などの特性変化の比較から、適切なセンサーの設置位置の模索を行った。また、数値解析より得られた設置位置にシート状センサーの設置を行い、浸透過程における堤体内の含水比状態やせん断変位等の特性変化が計測可能かどうか模型実験より検証した。

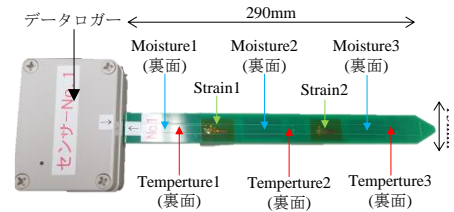


図-1 シート状センサーの概要

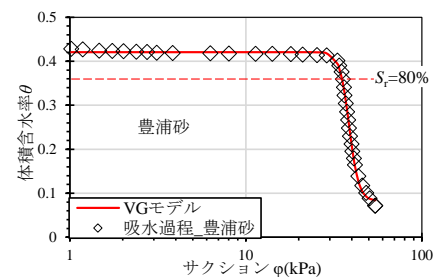


図-2 水分特性曲線(豊浦砂)

表-1 土質定数

	豊浦砂
$\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	16
$\gamma_{\text{sat}}(\text{kN/m}^3)$	18
$E(\text{kN/m}^2)$	16500
ν	0.2
$c(\text{kN/m}^2)$	0.05
$\phi(^{\circ})$	45

2.シート状センサーの設置位置の模索

模型スケールの河川堤防を対象とした Van Genuchten モデル(以下 VG モデル)を用いた飽和・不飽和浸透流解析と円弧すべり解析から設置位置の模索を行った。解析で使用した水分特性曲線は、連続加圧で得られた豊浦砂の SWCC を VG モデルにフィッティングさせたものを用いた(図-2)。解析では、表-1 に示す土質定数と VG モデルのパラメーター ($\theta_{\text{sat}}=0.42$, $\theta_{\text{res}}=0.082$, $\alpha=0.026$, $n=16.2$)を用いて実施した。ここで、 θ , θ_{sat} , θ_{res} はそれぞれ体積含水率, 飽和体積含水率, 残留体積含水率 (cm^3/cm^3)を意味する。 ϕ : サクション(cm), α , n : フィッティングパラメーターである。本研究で使用した解析モデルを図-3 に、外力を図-4 に示す。解析モデルは模型実験同様、矢部川河川堤防の 1/20 スケールとした²⁾。初期飽和度は堤体・基礎地盤共に $S_r=20\%$ とし、堤体底部に初期地下水位を設定した。外力は水位の上昇のみとし、これまでの模型実験より得た水位の経時変化を堤外側に与えた。数値解析より得た堤体の円弧すべり面と堤体内の浸透過程の比較から、シート状センサーの設置位置の模索を行った。

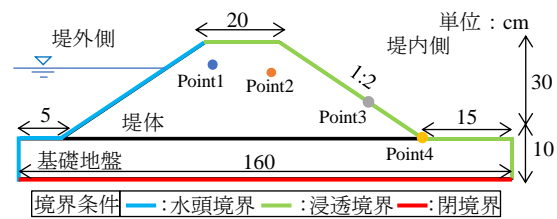


図-3 解析モデル

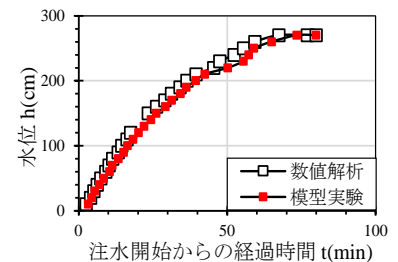


図-4 水位の経時変化

図-5 に示すのは、数値解析より得た各設置位置における堤体の浸透過程における飽和度と変位速度の変化である。右縦軸の変位量 v は、単位時間あたりの堤体の水平方向の変位量 u_x と定義して結果の整理を行った。また数値解析では、法尻付近におけるせん断ひずみが急激に上昇した時刻を堤体の崩壊と定義した。図より、堤体の浸透は堤外側から堤内側にかけて発生し、法尻が

飽和した直後に堤体が崩壊していることから、堤体崩壊時の堤体内の浸潤線上にシート状センサーを設置することで、飽和度の経時変化から堤防のすべり破壊の予兆を検知することが可能であることを把握した。また、設置位置によらず堤体崩壊する直前に変位速度が急激に上昇している。堤体の飽和に伴い、変位速度が急激に上昇することから、堤体内の変位速度の変化は堤体のすべり破壊の予兆を捉えるための重要な指標の一つであると考えられる。数値解析より、堤防斜面や法肩部にシート状センサーを設置することで、堤体の飽和度・ひずみの経時変化から、浸透に起因する堤体のすべり破壊の予兆を捉えることが可能であることが示唆出来た。

3. 模型実験による検証

数値解析より得た設置位置にセンサーを設置し、すべり破壊時の堤体内の飽和度・ひずみの経時変化を捉えることが可能であるか模型実験より検証した。図-6 に実験モデルの概要図と各センサーの設置位置を示す。シート状センサーは、堤体盛土完成後に挿し込んで設置した。外力は水位の上昇のみとし、実験時に得た水位の経時変化を図-4 に併記する。外力は水位の上昇のみとし、土層内に水が流入した時刻を試験開始時刻、堤体が法肩付近まですべり破壊したときを堤体崩壊と定義し、結果の整理を行った。

図-7 に模型実験より得た堤体のすべり破壊時の水分・ひずみセンサーの出力値の経時変化を示す。図より、堤内側の Strain2 と法面に設置した Strain3 は、注水開始から 64 分に急激に上昇していることから、堤体崩壊時の堤体内の変位を捉えていると考えられる。Orense らは、法尻の飽和度が 80~90%に達したとき、また法尻に微小な変位が生じるときは斜面崩壊が切迫した状態であることを示した³⁾。模型実験より、法肩・法面の飽和度についても同様の傾向が見られたといえる。飽和度が 80%超えると急激にサクションが消失し、それに伴い土の強度が低下することで、最終的に堤体の崩壊に至ると考えられる。模型実験より、法面に設置した Point3 と Point4 では飽和度が 80%到達後に堤体の崩壊が発生した。また、堤内側の法肩に設置した Point2 では、堤体崩壊の 15 分前に飽和度が 80%を超える結果となった。堤内側にシート状センサーを設置することで、堤体が崩壊する前の飽和度による異常を捉えることが可能であると考えられる。

5. まとめ

今回はシート状センサーによる水分・ひずみの経時変化の計測から、堤体のすべり破壊の予兆を捉えることを試みた。模型実験スケールの結果では、堤内側の法肩に設置した水分センサーの値が 80%に達した時から約 15 分後に法面が崩壊することを把握した。今後はシート状センサーの実用化に向けて、実スケールでの数値解析を行い、シート状センサーの実堤防への適用性の検討を行っていく。

【謝辞】本研究の一部は、科学研究費 (20H00266) の助成によって行われた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】1) 荒木亮太,石蔵先生,安福規之,アデル・アロウイシー,左近貴浩,上松正和 : 含水比変化計測可能な可撓性帯状センサーの開発とその機能を活かした模型盛土への適用を活かした模型盛土への適用,第 14 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp385-391, 2021 2) 矢部川調査委員会 : 矢部川堤防調査委員会報告書,pp46,2013. 3) Rolando P. Orense, Suguru Shimoma, Kengo Maeda, Ikuo Towhata., 2004. Instrumented Model Slope Failure due to Water Seepage. Jurnal of Natural Disaster Science, Vol.26, pp15-26.

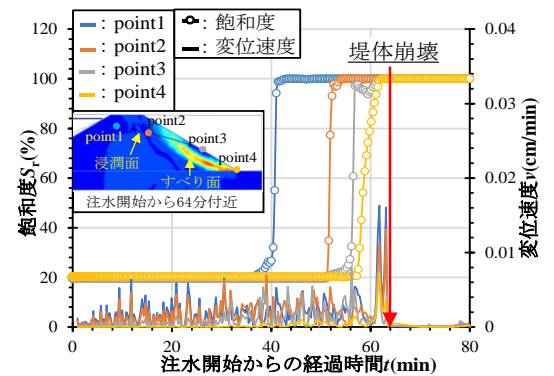


図-5 飽和度・ひずみの経時変化(数値解析)

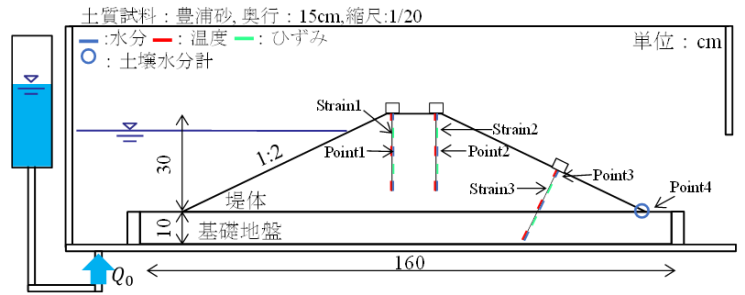


図-6 実験モデルの概要

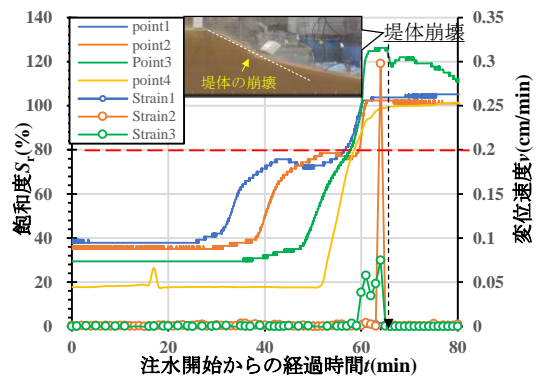


図-7 飽和度・ひずみの経時変化(模型実験)