

2021年度共同利用研究報告書

2022年04月18日

所属・職名 九州大学大学院 工学研究院・教授

ハザリカ ヘマンタ

		整理番号	20210016	
1.研究計画題目	斜面崩壊発生メカニズムの追求と環境負荷低減型斜面災害対策			
2.新規・継続	新規			
3.種別	プロジェクト研究			
4.種目	短期共同研究			
5.研究代表者	氏名	ハザリカ ヘマンタ		
	所属 部局名	九州大学大学院 工学研究院	職 名	教授
6.研究実施期間	2021年09月11日(土曜日)～2021年09月11日(土曜日)			
	2021年12月04日(土曜日)～2021年12月04日(土曜日)			
	2022年01月21日(金曜日)～2022年01月21日(金曜日)			
7.キーワード	斜面崩壊、Richards方程式、防災対策、早期警戒避難情報システム			
8.参加者人数	234人			

9.本研究で得られた成果の概要

本プロジェクト研究では豪雨により発生する斜面災害の持続可能な防止対策を追求することを目的とし、(1)斜面崩壊メカニズムの追求と(2)短期的斜面災害対策について、計3回の公開講演会において議論した。

講演会では、それぞれがもつ斜面崩壊にかかわる最新の研究成果を披露し、チームが全体としてもつノウハウを俯瞰しながら、可能な短期・長期の斜面崩壊防止対策を議論し、防災対策として実現するための課題を抽出した。

これらの議論を通じて、豪雨により発生する斜面崩壊の前兆現象を早期に捉え、有用な早期警戒避難システム(EWS)を現場で実装するための方策を練り、社会実装のための課題を抽出し、行動計画を策定した。なお、この行動計画については、2022年度以降、引続き進めていく予定である。

(1) 「斜面崩壊メカニズムの追求」に関する講演

・ Modelling downslope soil-water flow under rainfall. Its role in slope instability (降雨時に斜面内の水流とこれらが斜面安定に及ぼす影響)

フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)

・ Smoothed particle hydrodynamics mesh-free numerical modelling of a landslide (メッシュフリーSPH法による地すべりの数値解析)

フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)

・ 粒状体中の巨視的空洞を過ぎる粘性流とその崩壊機構

佐野 理(東京農工大学・名誉教授)

・ 平成30年7月九州北部豪雨による地盤災害の調査・対策事例報告

村井政徳(清水建設株式会社・主査)

・ 土石流の発生に斜面内間隙水圧が及ぼす影響とその将来的な展望

河内義文(株式会社ケイズラブ・代表取締役)、徳久晶(多機能フィルター株式会社・課長)

・ 昔からくり返す土砂災害～時間防災学の視点から～

鈴木素之(山口大学大学院創成科学研究科・教授)

(2) 「短期的斜面災害対策」に関する講演

・ 無給電センシングプラットフォームを用いた豪雨による斜面崩壊における前兆現象の指標およびリスクの評価に関する研究

金谷晴一(九州大学システム情報科学研究所・教授)、劉炎(九州大学工学府・博士課程学生)

・ 傾斜地盤上の盛土の崩壊例と対策

奥園誠之(株式会社高速道路総合技術研究所・研究アドバイザー)

・ 豪雨災害の事例と人々の対応、そして災害の回避

東畑郁生(関東学院大学・客員教授、東京大学・名誉教授)

2021 年度九州大学マス・フォア・インダストリ研究所短期共同研究
斜面崩壊発生メカニズムの追求と環境負荷低減型斜面災害対策

成果報告書

2022 年 4 月

プロジェクト代表者

ハザリカ・ヘマンタ(九州大学大学院工学研究院・教授)

1. 研究メンバー

ハザリカ ヘマンタ(九州大学大学院工学研究院・教授)※

Liu Fengnan(大連理工大学・教授)

Zhao Xiaopeng(ノースイースタン大学・教授)

Broadbridge Philip(ラ・トローブ大学・名誉教授)

金谷 晴一(九州大学大学院システム情報科学研究院・教授)

福本 康秀(九州大学マス・フォア・インダストリ研究所・教授)

村井 政徳(清水建設株式会社・主査)

田中 剛(東京都市大学建築都市デザイン学部・技士)

河内 義文(株式会社ケイズラブ・代表取締役)

渡邊 直人(株式会社ケー・エフ・シー・名古屋室長)

石澤 友浩(防災科学技術研究所・主任研究員)

磯部 有作(株式会社 IMAGEiConsultant・代表取締役)

藤白 隆司(株式会社地盤防災研究所・代表取締役)

松本 大輔(日本基礎技術株式会社・副部長)

石橋 慎一郎(日本地研株式会社・副長)

※研究代表者

2. 目的と期待される成果

頻発化・激甚化する豪雨災害により、毎年多くの生命と財産が失われている。内閣府が策定した国土強靱化年次計画 2020 の中でも、土砂災害対策は最重要課題として取り上げられている。本研究の目的は、豪雨により発生する斜面災害の持続可能な防止対策を追求することである。

(1) 「斜面崩壊メカニズムの追求」

地盤中の間隙水圧の増加は斜面崩壊の直接的原因である。Richards 方程式を規範として、雨水の地中への浸透のダイナミクスを偏微分方程式によってモデル化し、計算効率が高い数値計算スキームを構築する。数値計算ソフトウェアを開発し、予測の手立てとする。さらに、斜面崩壊の様々な前兆現象の中から、斜面崩壊発生の有効な評価指標を検討する。

(2) 「短期的斜面災害対策」

間隙水圧の増加に伴う、地盤中の間隙水圧、変位、含水量の変化を捉えるセンサを開発する。また、その性能を評価するため室内模型実験を実施し、その結果に基づき指標を、統計的手法とともに考案する。低コストで持続可能なセンサプラットフォームの開発とそれら通信システムの構築により、斜面崩壊の前兆現象を早期に捉え、有用な早期警戒避難情報システムを国・地方公共団体に提供することを目標とする。

3. 本研究で得られた成果の概要

本プロジェクト研究では豪雨により発生する斜面災害の持続可能な防止対策を追求することを目的とし、(1)斜面崩壊メカニズムの追求と(2)短期的斜面災害対策について、計3回の公開講演会において議論した。

講演会では、それぞれがもつ斜面崩壊にかかわる最新の研究成果を披露し、チームが全体としてもつノウハウを俯瞰しながら、可能な短期・長期の斜面崩壊防止対策を議論し、防災対策として実現するための課題を抽出した。

これらの議論を踏まえて、第1回、第3回の公開講演会の前後の時間帯に非公開の共同研究の機会を設け、豪雨により発生する斜面崩壊の前兆現象を早期に捉え、有用な早期警戒避難システム(EWS)を現場で実装するための方策を練り、社会実装のための課題を抽出し、行動計画を策定した。なお、この行動計画については、2022年度以降、引続き進めていく予定である。

(1)「斜面崩壊メカニズムの追求」に関する講演

- Modelling downslope soil-water flow under rainfall. Its role in slope instability(降雨時に斜面内の水流とこれらが斜面安定に及ぼす影響)
フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)
- Smoothed particle hydrodynamics mesh-free numerical modelling of a landslide
(メッシュフリーSPH法による地すべりの数値解析)
フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)
- 粒状体中の巨視的空洞を過ぎる粘性流とその崩壊機構 I および II
佐野 理(東京農工大学・名誉教授)
- 平成30年7月九州北部豪雨による地盤災害の調査・対策事例報告
村井政徳(清水建設株式会社・主査)
- 土石流の発生に斜面内間隙水圧が及ぼす影響とその将来的な展望
河内義文(株式会社ケイズラブ・代表取締役)、徳久晶(多機能フィルター株式会社・課長)
- 昔からくり返す土砂災害～時間防災学の視点から～
鈴木素之(山口大学大学院創成科学研究科・教授)

(2)「短期的斜面災害対策」に関する講演

- 無給電センシングプラットフォームを用いた豪雨による斜面崩壊における前兆現象の指標およびリスクの評価に関する研究
金谷晴一(九州大学システム情報科学研究所・教授)、劉炎(九州大学工学府・博士課程学生)
- 傾斜地盤上の盛土の崩壊例と対策
奥園誠之(株式会社高速道路総合技術研究所・研究アドバイザー)
- 豪雨災害の事例と人々の対応、そして災害の回避
東畑郁生(関東学院大学・客員教授、東京大学・名誉教授)

(3) 非公開部分の活動内容

IMI プロジェクト採択を受けて、H. Hazarika と村井政徳を中心に、集中豪雨や長雨時における斜面災害発生の早期警戒避難システム(EWS)の改善のためにより数学を取り込むよう研究計画を練り直し、各種センシングに反映させるための研究課題を検討し、斜面災害危険地域への EWS 実装に向けた行動計画を策定した。

非公開プログラム

日時: 9月11日(土) 14:00-17:00

参加者: H. Hazarika, 村井 政徳, 福本 康秀, 河内 義文, 松本 大輔

議論・検討の内容: 土砂災害被害の防止に資するために必要な EWS の仕様、特に EWS に搭載すべきセンサー群の検討を行った。Broadbridge 教授や佐野理教授の講演も踏まえながら、盛土斜面における土砂災害のリスクの因子をリストアップし、そのうちから直接的に関係する因子を抜き出し、リスク評価の指標を「安全率(F_s)」という形に統合する。これを検証するための室内実験の計画、実験結果を安全因子にフィードバックするアルゴリズムを考案し、EWS が重要関係因子を適切に測定するよう設計されていることを確認した。

EWS は広大な地中に有限個しか設置できない。そこで、補間解析の実施により、種々の土質条件や降雨条件に対して潜在的なリスクレベルを的確に予測できるモデルを提案し、具体的な補間法について検討した。

日時: 2022年1月21日(金) 10:00-12:00

参加者: H. Hazarika, 村井 政徳, 福本 康秀, 河内 義文, Nguyen Thi Hoai Linh (PD, 九州大学 IMI), Yan LIU (D3, 九州大学大学院工学府)

議論・検討の内容: 降雨条件下における斜面崩壊には表層崩壊および深層崩壊の 2 種類があり、それぞれに適したモデルによる安定解析手法を紹介し、異なる土質パラメータおよび降水の浸透条件下における斜面の安全率(F_s)を算出した。これを九州大学工学研究院における盛土斜面の模型実験によって検証した結果を確認した。

幅広い降雨強度下で、斜面内の水分量と間隙水圧の変化等の補間解析を行い、限られた模型実験のデータに基づいて、開発した EWS がより広い土質条件や降雨条件に対して潜在的なリスクレベルを的確に予測できることを確認した。

福岡県田川郡添田町で実証実験を行う計画について検討した。

公表方法: Yan LIU の学位論文(2022年9月 九州大学)を原著論文として公表する。

2nd International Conference on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technology(第2回 CREST: 議長 H. Hazarika, 福岡、2023.11.20-11.22)の中で広く発表し、査読付き Proceeding 論文として出版する。

4. 講演内容の概要

■ 第1回講演会(2021年9月11日)

○ Modelling downslope soil-water flow under rainfall. Its role in slope instability

(降雨時に斜面内の水流とこれらが斜面安定に及ぼす影響)

フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)

Devastating landslides follow prolonged heavy rainfall on sloping grounds that have buildings above, on or below the slope. Slope instability is exacerbated by the higher frequency of droughts that kill the binding plant roots. This lecture shows how to construct and interpret exact solutions for water infiltration at dangerous levels into soil domains.

Darcy's law leads to Laplace's equation for the hydraulic pressure head in saturated soil and a nonlinear diffusion-convection equation, known as the Richards equation, in unsaturated soil. The most difficult part of the modelling is to determine the phreatic surface which is the free surface between saturated and unsaturated zones. For steady state flow through a two-dimensional cross section, there is a particularly useful model, the Gardner soil. Although hydraulic conductivity $K(\theta)$ increases with water content θ , in the unsaturated zone $K(\theta(x; t))$ satisfies a linear Kirchhoff equation.

Contrary to common usage, even in domains of irregular shape with sloping surface, linear boundary value problems may be solved exactly as series by separation of variables. Then in principle the series coefficients may be determined from the boundary conditions. In practice we selected the optimal free surface shape from a restricted class of functions that are cubic splines with three nodes. This approximation sometimes leads to a small error as the stream function is not exactly continuous at the phreatic surface but all other boundary conditions are satisfied. The water enters the top surface at constant rainfall rate and exits through the seepage face at the downslope end of the saturated zone. By solving this problem with a range of soil types, surface slopes and rainfall rates, we identified a single condition among the model parameters that will determine the high rainfall rate that will cause the rising phreatic surface to break through the top surface. This will signal a dangerous situation of inadequate drainage.

For time-dependent solutions of the Richards equation, there is no such useful integrable model in two dimensions. However for one-dimensional infiltration there is a well known realistic integrable model. It shows

- (i) that under rainfall rates $R < K_s$ where K_s is hydraulic conductivity at saturation, the bottom barrier boundary will saturate first,
- (ii) when $R > K_s$, the top surface will eventually saturate, usually before the bottom surface, allowing surface run-off,
- (iii) when $R > 2K_s$, the top surface will saturate first, no matter how thin is the layer.

The time to ponding is calculated exactly, showing that the cumulative infiltration at ponding is a decreasing function of rainfall rate. Post-ponding runoff may remove water before it fully fills the subsoil. This explains why moderately heavy rainfall rates $1 < R=Ks < 2$, applied over extended periods, are most dangerous.

○ **Smoothed particle hydrodynamics mesh-free numerical modelling of a landslide**

(メッシュフリーSPH 法による地すべりの数値解析)

フィリップ・ブロードブリッジ教授(ラ・トローブ大学・名誉教授)

After prolonged rainfall, a sloping bed may lose stability. Then one is faced with the very difficult task to model a mass flow that is seemingly chaotic, highly dependent on initial conditions and on uncertain system parameter values that vary in a complicated way throughout the medium. The hope is to run a simulation that gives a typical outcome among an ensemble of possibilities, perhaps estimating the spread of outcomes in the future.

Fixed-grid numerical algorithms would need a very fine grid that would lead to an intractably large system of equations. Under such complicated dynamics, adaptive non-uniform grids would suffer from mesh entanglement. However mesh-free methods have recently been used with some success on a variety of mass transport problems. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) was introduced in 1977 by Gingold and Monaghan and independently by Lucy, to study stellar gas dynamics. It is a compromise between the fundamental particulate view of matter and the continuum view. It distributes the mass of the system among N particles, much smaller than the number of molecules and much smaller than the number of grains of sand in the system. Then the particle centres follow trajectories from the Lagrangian formulation of continuum mechanics. Each particle labelled by index 'a' is smoothed by a kernel function $W(|x - x_a|)$, chosen to be a cubic spline with compact support of width $2h = 4d$ where d is the mean particle separation. When the density is summed over particles, field derivatives act on the kernel W . This initially leads to the problem of not being able to represent a state for which the density gradient is zero. Under the SPH philosophy, equations of motion rely only on positions $x_a; x_b; \dots$ of particles. Then the SPH gradient operator is indeed zero when particles of equal density are regularly spaced.

SPH solutions were verified to high accuracy against exact unsaturated porous medium flows. For the over-riding continuum we chose an elastic-plastic material with cohesion coefficient c and friction angle ϕ decreasing at high water content. The Drucker-Prager yield criterion, a linear approximation of the Mohr criterion for shearing yield, was assumed. The 2D geometry mimicked the sand-tray cross section of 22 metres at the base under a rainfall simulator at the Japanese National Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED).

In a simulation with 15000 SPH particles ($h \sim 10\text{cm}$), flow speeds, location of plastic deformation and size of plastic deformation agreed reasonably well with the large scale experiment at NIED. Simulations of stressed layered soil under buildings near a cliff also agreed with common engineering experience.

This leaves open many questions. Would there be practical improvement in a more detailed model with a better plastic flow model with a more accurate dependence of coefficients on water content? How do the results of SPH relate to those of radial basis function expansions which uses such kernel functions as basis functions with a more traditional field theory philosophy?

○ 粒状体中の巨視的空洞を過ぎる粘性流とその崩壊機構

佐野 理(東京農工大学・名誉教授)

地下水流の測定では、観測点に掘ったボーリング孔に食塩やアイソトープなどのトレーサーを投入し、観測点の周囲に掘った複数の観測孔でその到達状況を調べて流れの向きや速さを評価するのが伝統的な方法である。しかし、地下水流速はきわめて遅いので (i) 観測に時間がかかる、(ii) 媒質中でのトレーサーの吸着や拡散の評価が難しい、(iii) 測定精度を上げるためにトレーサー濃度を増すと環境負荷が大きい、(iv) 観測孔を複数掘るので経費がかさむ、などの課題があった。これを解決するために1本のボーリング孔の中で流速を測定する方法(単孔法)が開発されたが、孔をあけたことにより自然状態での流れが受ける影響の評価の問題が残されていた。

一般に、均質な粒状媒質中の流れ v はダルシーの法則($v = -k/\mu \nabla p$: k は透水係数、 μ は粘性率、 p は圧力)で表わされる。粒子間隙が広ければ透水係数は大きいので、ボーリング孔があればその部分では流速が増すことになる。そこでボーリング孔(以下では平均の粒子間隙より十分大きな空間を「空洞」とよぶ)の内部をストークス流、外部を一般化したダルシー流で表し、境界で速度と応力の連続性を課した解析を行った。結果は、空洞の大きさと粒子間隙(透水係数の平方根に比例)の比に依存するが、それが大きいと空洞に流れ込む流量 Q は自然状態で同じ領域を過ぎる流量の2倍に、また空洞中心での速度 V_c は遠方流速の3倍になる(1,4)。観測孔にパッカーを配置し、観測点で上下方向の流れを抑えた場合には3次元的な空洞となるが、これを球形空洞で近似した解析では、 Q は3倍に、 V_c は6倍になる(3)。これらの理論予測はその後の実験で確認された(2,12)。空洞が複数あると、それらの相互作用によりそれぞれの空洞に流れ込む流量が影響を受ける。たとえば、近接した2つの空洞が流れに対して小さな迎え角で配置されたとき、下流側の空洞に流れ込む流量は単独に存在したときの2割程度増加する(5,8)。これは、前方の空洞で集められた流体が下流側空洞にも流れ込むからである。他方、迎え角が 90° に近い場合には2割程度減少する。これは2空洞に流れ込む流体領域の共通した部分が折半されることによる。これらの結果は数値計算(9)や相互作用を漸近的に取り込んだ解析計算(13)でも検証されている。

粒状媒質中の空洞領域に流れが収束すると、局所的に応力が増加し、ある限界を超えると空洞境界での力学的な釣り合いが破られる。一般に、媒質を構成する粒は有限の体積を持つために、流体との界面で媒質内部に向かって押されても強固であるが(排除体積効果)、逆の向きに対しては脆い。このため空洞の上流側境界の粒は剥ぎ取られて下流側境界まで運ばれ、これによる流れの変化がさらに上流側の空洞崩壊を増長する(6-9)。他方、遊離した粒子群は浮遊状態にとどまるために流動化した領域は上流側に伸びていく。空洞の崩壊する臨界値は媒質の凝集力や透水係数、流体の速度などが大きいほど高いが、流体の粘性率や空洞が大きいほど低下する(10)。このため、たとえば、2つの空洞が主流方向に並んで置かれた場合には、単独の空洞が崩壊する臨界流速より遅い流れでも崩壊が起こる(6-8)。これは上流側の空洞で収束された速い流れが下流側の空洞に当たるためであり、まず下流側空洞が崩壊する(流れの中に置かれた固体の背後に、流れの遅い領域ができるのと対照的である)。さらに崩壊した領域が上流側に伸びて前方の空洞に達すると、より大きな空洞となり崩壊限界流速を下げる。これらは、造成されて間もない盛り土など多くの空洞を含んだ土壌では、どんなに弱い雨でも崩壊が起こり得ることを示している。これらの相互作用は主として可視化実験やLDV測定で(部分的には数値計算でも)確認されたが、崩壊の発生に関しては、応力分布などの力学的観点から2つの空洞がもっとも崩壊しやすい配置を理論的に初めて予測し、過去の実験結果を説明することに成功している(13)。空洞がある程度の密度で複数個分布しているとこれらが連結して長距離に渡る水脈が形成され(11)、またさらにそれらがネットワークを作ると粒状媒質が流体の層によって分断されることになる。傾斜地に多量の雨水が浸透してそのような流体層を作れば土砂崩れや崖崩れの誘因となり、また水平方向に伸びればダムや堤防の決壊に至る可能性がある。

参考文献

- 1) O. Sano: "多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流---単孔法による地下水流測定への応用---" *ながれ* 2 (1983) 252-259.
- 2) K. Momii, K. Jinno and F. Hirano: "Laboratory studies on a new laser Doppler velocimeter system for horizontal groundwater velocity measurements in a borehole." *Water Resour. Res.* 29 (1993) 283-291.
- 3) G. P. Raja Sekhar and O. Sano: "Viscous Flow past a Circular/Spherical Void in Porous Media --- An Application to Measurement of the Velocity of Groundwater by the Single Boring Method." *J. Phys. Soc. Jpn.* 69 (2000) 2479-2484. (doi:10.1143/JPSJ.69.2479)
- 4) G. P. Raja Sekhar and O. Sano: "Two-dimensional viscous flow in a granular material with a void of arbitrary shape." *Phys. Fluids* 15 (2003) 554-567. (doi:10.1063/1.1536165)
- 5) Y. Kaneko and O. Sano: "Experimental study on the interaction of two two-dimensional circular holes placed in a uniform viscous flow in a porous medium." *Fluid Dyn. Res.* 32 (2003) 15-27.

- 6) Y. Kaneko and O. Sano: "Collapse and merging of cavity regions in a granular material due to viscous flow." *Phys. Fluids* 17 (2005) 033102. (doi:10.1063/1.1850148)
- 7) O. Sano and Y. Kaneko (2005). "Onset of collapse and growth of cavity region in a granular material due to viscous flow". *Powders and Grains*, eds. Garcia-Rojo, Herrmann and McNamara, Taylor & Francis Group, London, pp. 1043-1047. [ISBN 0-415-38348-X]
- 8) O. Sano and Y. Nagata (2006). "Micro and macroscopic processes on the collapse and growth of cavity regions in a granular material due to viscous flow". *Geomech. Geotech. Particulate Media*, eds. Hyodo, Murata & Nakata, Taylor & Francis Group, London, pp. 429-435.[ISBN 0-415-41097-5]
- 9) O. Sano and Y. Nagata: "Collapse and growth of cavity regions in granular media due to viscous flow." *Phys. Fluids* 18 (2006) 121507. (doi:10.1063/1.2396931)
- 10) S. Koizumi, Y. Shirahashi and O. Sano: "Critical Velocity for the Collapse of a Cavity Region in a Granular Material and Its Size Dependence." *J. Phys. Soc. Jpn.* 78 (2009) 084404. (doi:10.1143/JPSJ.78.084404)
- 11) O. Sano: "Flow-induced waterway in a heterogeneous granular material." *Comp. Phys. Comm.* 182 (2011) 1870-1874. (doi:10.1016/j.cpc.2010.12.001)
- 12) O. Sano, N. Sano, Y. Takagi, and Y. Yamada: "Onset of Landslides due to the Flow-Induced Waterway Formation in Three-Dimension in a Granular Material." *Proc. 14th Asian Congress of Fluid Mech.* (Hanoi and Halong, Vietnam, 2013) 1254-1260. [ISBN:987-604-913-146-2]
- 13) Osamu Sano: "Viscous flow and collapse of macroscopic cavities in a granular material in terms of a Darcylet. " *Phil. Trans. Roy. Soc. A378* (2020) 20190527_1-11. [<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0527>]

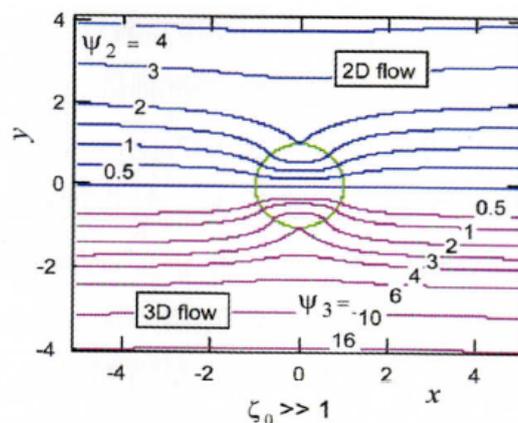


図1 空洞を過ぎる流れ; 2次元(上半面) vs. 3次元(下半面)

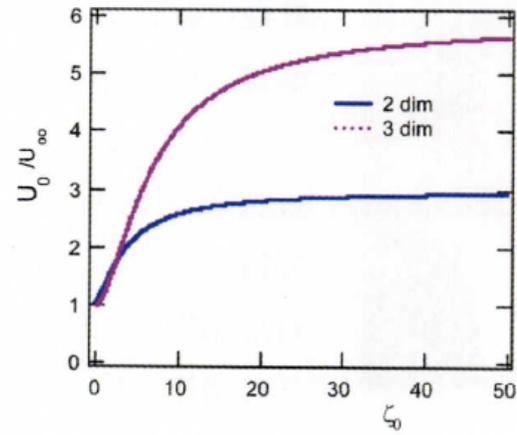


図2 空洞中心の速度;2次元(円柱状空洞) vs. 3次元(球形空洞)

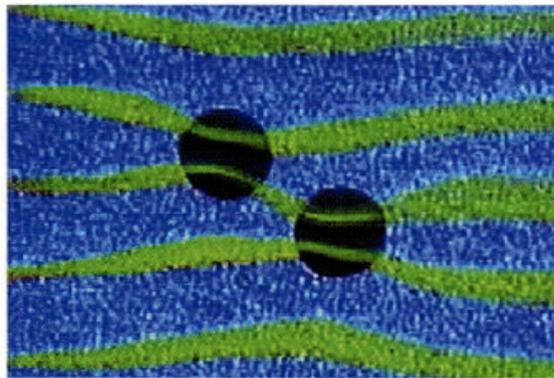


図3 粒状体中の2空洞の相互作用。流れは右方向。

(粒子間距離 $2.5R_0$, 流れに対する迎え角は 30° , R_0 は空洞半径)

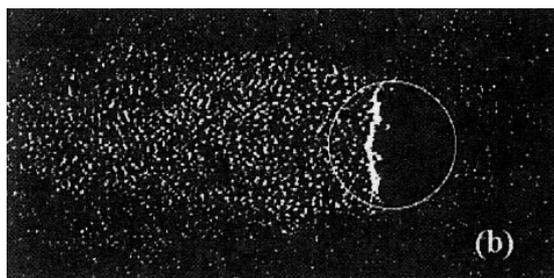


図4 1空洞の崩壊過程。画像差し引きにより粒子の変位した部分が白くなっている。

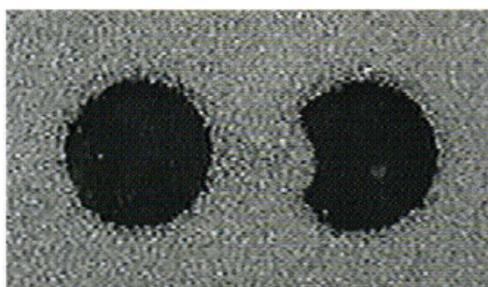


図5 2つの空洞の相互作用。流れは右方向。流速は1空洞が崩壊する臨界値より小さい場合（上流側空洞の影響で流速が加速された結果、下流側空洞の崩壊が起こる。）

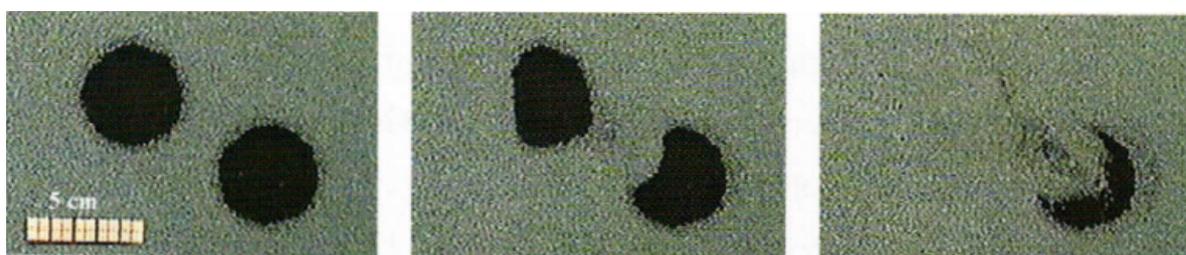


図6 2空洞の崩壊過程。流れは左から右へ。(粒子間距離 $3R_0$, 流れに対する迎え角は 30° , R_0 は空洞半径)

○ 平成30年7月九州北部豪雨による地盤災害の調査・対策事例報告 村井政徳(清水建設株式会社・主査)

平成30年6月29日に発生した台風7号は、太平洋高気圧の外側を回り込むように7月4日にかけて東シナ海を北上し、九州地方では台風の影響による雨が7月3日ごろから降り続いた。台風は対馬海峡付近で進路を北東に変えて日本海上に抜けたが、太平洋高気圧が張り出した影響で梅雨前線が7月2日から4日頃に北海道に停滞し、北海道の広範囲で雨量が7月の月降水量の平年値を超えた。その後、太平洋高気圧が南東に移動したことで梅雨前線が南下。7月5日から8日にかけて梅雨前線が西日本付近に停滞し、そこに大量の湿った空気が流れ込んだため、西日本から東海にかけて大雨が連日続いた。梅雨前線は9日に北上して活動を弱めるまで日本上空に停滞。西日本から東日本にかけて広い範囲で記録的な大雨となった。

この豪雨により、西日本を中心に多くの地域で河川の氾濫や浸水害、土砂災害が発生し、死者数が200人を超える甚大な災害となった。また、全国で上水道や通信といったライフラインに被害が及んだほか、交通障害が広域的に発生した。平成に入ってからのもっとも甚大な豪雨災害としては初めて死者数が100人を超え、「平成最悪の水害」と報道された。さらに、昭和にさかのぼっても昭和57年に300人近い死者・行方不明者を出した長崎大水害(昭和57年7月豪雨)以降、最悪の被害となった。福岡県においては、7月6日17時10分に大雨特別警報が発表され、多くの箇所でも斜面災害が

発生し、甚大な被害を被った。福岡県朝倉市江川下戸河内にある下戸河内川砂防堰堤施設に至る工事用(管理用)道路では、7月7日に地すべりの発生が確認された。地すべり変状として、工事用道路への崩積土堆積、頭部滑落崖、法面の押出し等が確認された。当地すべりについては、現在、福岡県朝倉県土整備事務所において地質調査・地すべり動態観測が行われ、砂防施設地すべり災の採択準備段階である。

本発表では、福岡県内における平成30年7月豪雨に起因した地すべり災害の一事例として、下戸河内川砂防堰堤管理用道路地すべり災害においてこれまで実施してきた地質調査・地すべり動態観測結果について事例報告を行う。

○ 土石流の発生に斜面内間隙水圧が及ぼす影響とその将来的な展望

河内義文(株式会社ケイズラブ・代表取締役)、徳久晶(多機能フィルター株式会社・課長)

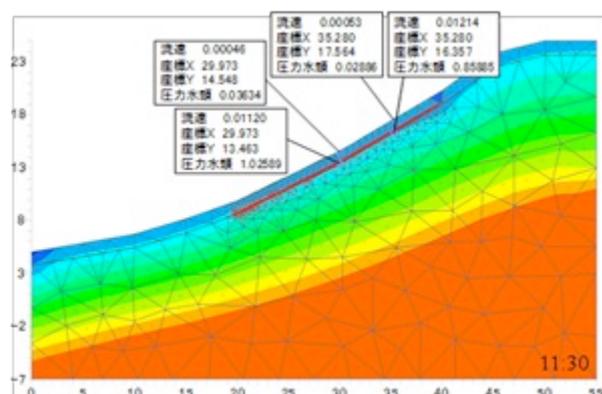
1. はじめに

2009年7月21日に山口県中央部を襲った豪雨では、日降雨量は防府市で観測史上最大の275mm、山口市で第2位の277mmを記録し、山口市と防府市の境界付近を中心に土石流が多発し防府市で14名の死者、23戸の全壊家屋を出すなど大きな被害が発生した。山口大学鈴木教授らは、土石流が発生したいくつかの溪流において過去の土石流堆積物を見出し、それらに含まれる有機物試料を用いた年代測定を実施している。その結果を溪流横断的に同定した結果、土石流は200~400年間隔で発生することを示している。また、土石流発生時の降雨強度は、多くの場合200年以上のリターンピリオドを有しているとされている。したがって、過去の土石流発生後、200~400年を経過して土石流の源となる量・厚さの風化残積土あるいは崖錐堆積物が溪流内に分布し、なおかつ200年確率を超える雨量によって、土石流が同じ溪流において繰り返し発生するものと考えられる。

2. 解析

2.1 解析の起因となった発生原因に対する力学的矛盾

土石流源頭部の土を用いて、水中での安息角と土石流発生斜面の勾配を比較し、水中安息角以下の斜面でも土石流が発生していることから崩壊発生に対して力学的に矛盾することが指摘し、その原因として浸透圧によって有効応力が低下して崩壊に至ったことを示唆しており、地下水の流れが土石流発生原因であるとする考えもある。



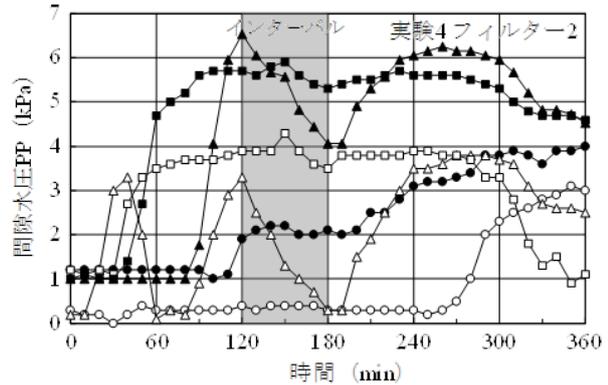
2.2 解析結果

難透水の岩盤と土砂の間に粗粒の高透水ゾーン挟むケースで土層内間隙水圧が上載土砂重量を超えることが判明した。

3. 土石流源頭部での崩壊発生実物大実験

3.1 実験方法および条件

2009年7月21日の山口・防府豪雨災害で土石流が多発生した区域内の現地発生のまま土を用いて、幅10m、長さ20mの斜面を前述した土石流源頭部の特徴を参考に平均勾配30°傾斜の難透水岩盤(モデルでは鉄筋入り張りコンクリート $t=13\text{cm}$)上に層厚1.3mの盛土することにより作成した。また、盛土は、締固め度 $D_c=85\%$ で締固め、現場透水係数(JGS1316)は平均



5×10⁻³cm/sとなった。実験斜面の末端に100m³規模の調整池を設置し、高分子凝集剤を使用した沈殿ろ過装置を通して用水として循環利用した。1m²当たり1時間100Lの水をスプリンクラーで散水して、時間降雨強度100mm/hの降雨とし、斜面に最長5時間与え、土石流の源頭部崩壊を再現させる実験を行った。

3.2 実験結果

(1) ボイリング崩壊

降雨が連続し地盤内の間隙水圧が高まり、上位の土塊重量を超えたとき、すなわち有効重量がゼロになったときに深い溝状の崩壊が発生した。これをボイリング崩壊と呼ぶ。ボイリング崩壊は概ね間隙水圧が4kpaを超える場合に発生することが判明した。ボイリング崩壊跡から排出する湧水は、崩壊後10分程度の経過に伴って流砂を伴わない清水になるが、下流に土石流を発生させるほどの水量・水圧にはならなかった。

(2) 降雨停止時間(インターバル)の設定

2009年7月山口・防府豪雨災害では降り始めから2~4時間目の豪雨では土石流が発生せず、一旦降雨停止時間(インターバル)を挟んで2回目の豪雨中で7時間目に土石流が発生した。本実験では降雨の中断が土石流の発生にどのような影響を及ぼすかを検討するために実験2および実験4では120分の降雨の後にインターバル60分を設置した。このインターバル中の間隙水圧の消散観測結果は、土壤雨量指数などの更生に利用可能であると考えられる。

○ 無給電センシングプラットフォームを用いた豪雨による斜面崩壊における前兆現象の指標およびリスクの評価に関する研究

金谷晴一(九州大学システム情報科学研究所・教授)、劉炎(九州大学工学府・博士課程学生)

1. はじめに

斜面崩壊における前兆現象を明らかにするためにセンシング技術を用いたシステムを構築し、実験室レベルでの観測を行った。本報告では、前半で無給電センシングプラットフォームの概要と、それを用いた一般的な応用について説明する。センサシステムの電池交換をなくすために、エネルギーハーベスティングによる給電を検討した。また後半では、実験室内において、雨滴による斜面崩壊における前兆現象の様子をリアルタイム計測した結果について報告する。

2. 無給電センシングプラットフォーム

太陽光発電や風力発電など、身の回りにある微弱なエネルギーを収集し電力に変換する技術をエネルギーハーベスティング (Energy Harvesting、環境発電)という。エネルギーハーベスティングでは、周辺環境にエネルギーが存在する限り、システムを駆動させることが可能である。この利点は、発電方法がクリーンである点で将来のエネルギー問題の解決の一助となることは間違いのないといえる。しかしながら得られる電力が微弱であるため、受電システム(発電レイヤ、電気エネルギー貯蔵レイヤ及び電源・データ制御レイヤ)の低消費電力化の実現がカギとなる。

2.1 太陽光パネルを用いた小型センシングシステムとその応用

家畜のバイタル情報をリアルタイムで計測することは、畜産農家の人手不足解消等の観点から非常に重要である。特に、牛の受胎期間における体温の変化を迅速かつ正確に捉えることができれば、受胎率の向上による出産間隔の短縮が期待でき、生産性の向上につながる。一方、測定時の牛への負担を軽減するためには非侵襲のデバイスが必要である。本研究では、温度センサ、小型太陽光パネル、BLE (Bluetooth low energy) モジュールを一体化し、さらに耳標サイズに小型化することで、リアルタイムで耳表面の温度を計測する無給電センサシステムを構築した。これまで屋外では体表面温度は外気に影響されると言われてきたが、本システムを用いることで、家畜の体表面温度を安定的に取得できることを初めて見出した[1]。図 1 は耳標型センシングシステムの写真である。豚や羊などの小型家畜にも装着可能な大きさとした。

2.2 無線通信用電磁波を用いた小型センシングシステムとその応用

ここでは UHF 帯 RFID システムから放射される電磁波に着目し、RF-DC 変換効率が高く、出力電圧を昇圧する整流回路の開発を行った。RFID システムは無人レジヤ、倉庫の在庫管理として幅広く用いられており、これらの環境においては、その電磁波を電気エネルギーに変換することが可能となるシステムを構築した。また得られたシステムにより、人の体表面温度、及び体表面の湿度をリアルタイム計測し、スマートフォンに転送することが可能となった。図2はカード型にしたエネルギー

ーハーベストシステムの写真である。

2.3 小型センシングシステムによる斜面崩壊における前兆現象の計測

斜面崩壊の前兆現象に関するデータを得るためには、多数のセンサを配置する必要がある。したがって小型、低コスト、低消費電力のセンサ・通信システムが必要である。バッテリー交換の人的費用を考えると、上記 2.2、2.3 節で提案する無給電システムは非常に都合が良い。今回は実験室内において、土壌水分量センサと加速度センサを用いた測定系と、合わせて動画による画像計測により双方から斜面崩壊の前兆現象に関する実験を行った。

3. まとめ

無給電センシングプラットフォームの実現と、その応用例について説明した。また、得られたシステムを用いて斜面崩壊における前兆現象を明らかにするためのシステムを構築した。本研究の一部は、大分県農林水産研究指導センター畜産研究部、NEDO SIP(JPNP18014)、及び科研費(21K04177)の支援によって行われた。

[1] 滝口収、高橋秀之、金谷晴一：“センサデバイス及び家畜管理システム”、特願 2018-152145、2018.



Fig. 1 Photograph of the proposed ear tag

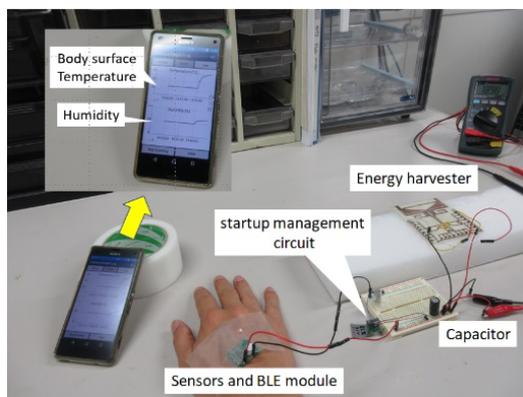


Fig. 2 Photograph of the sensing system

■第2回講演会(2021年12月4日)

○昔からくり返す土砂災害～時間防災学の視点から～

鈴木素之(山口大学大学院創成科学研究科・教授)

各地で土砂災害が相次いで発生し、多くの被害が生じている。時に大きな被害をもたらすがけ崩れや土石流は、100～1000年の時間スケールでみると、同じ場所あるいは隣接する場所で過去に何度も起こっていることが多い。地盤中の土石流の痕跡を詳しく調べたり、地域に残る歴史資料を調べたりすることで、土石流の発生サイクルや影響範囲が分かってきた。この研究分野を「時間防災学」と称して研究を進めており、本講演では山口県、広島県で発生した土砂災害に対する調査研究成果を紹介する。

山口県防府市は2009年7月、長野県木曾郡南木曾町は2014年7月、広島市は同年8月に大規模な土石流をもたらした集中豪雨に見舞われ、多くの犠牲者が出た。これらの地域の風化花崗岩は豪雨時に侵食されやすく、過去に類似した土砂災害が起こっている。将来の災害を防ぐには過去の災害の発生頻度と影響範囲を解明することが重要である。本研究では、これら3地域の被災溪流の新旧土石流堆積物を調べ、それに含まれる炭化物の年代測定等を実施した。その結果、土石流の発生間隔は防府では100～200年間、広島では150～400年間であり、同じ花崗岩でも土石流の発生頻度は岩石の風化程度などによって異なること等を突き止めた。

本研究結果の学術的意義としては、風化花崗岩が分布する地域では豪雨時に土石流が過去に何度も発生していることが地盤に残る土石流の痕跡と地域に残存する歴史資料の両面から実証されたことである。本研究結果の社会的意義としては、調査結果により谷の出口は土石流が繰り返し発生する箇所であると改めて確認されたことである。過去の災害の発生状況や影響範囲は将来の土砂災害を減らすための方策に一層活用することが大切である。

○傾斜地盤上の盛土の崩壊例と対策

奥園誠之(株式会社高速道路総合技術研究所・研究アドバイザー)

表面水による盛土崩壊事例、地山からの浸透水による盛土崩壊事例、レベルバンクにおける盛土崩壊事例の紹介があり、それらを踏まえた盛土法面の点検のポイントが示された。本講演の総括として『盛土法面防災十訓』が示された。

- ① 斜面上方の盛土路面は水路と思え。溪流途中の盛土崩壊は土石流の出発点。
- ② 土石流は時間雨量に影響されるが、盛土の崩壊は連続雨量に支配されることが多い。
- ③ 盛土法面、雨がやんでも安心するな。
- ④ 長々と、持って回るな排水工(溝、管)。
- ⑤ 一か所に集中させるな排水工。
- ⑥ レベルバンクは地下ダムと思え。

- ⑦ 前科(前歴)のある法面の隣の法面は要注意。
- ⑧ 盛土法面崩壊原因の過半数は表面排水の不備から。
- ⑨ 法面点検、切土は法肩上部まで上がれ、盛土は法尻下方の点検から始めよ。谷中盛土、傾斜地盛土の点検は法尻下方斜面の排水状態から。
- ⑩ 盛土法面改良工、ベスト3は 砕石置き換え、布団籠、鉄筋補強土工。

■第3回講演会(2022年1月19日)

○豪雨災害の事例と人々の対応、そして災害の回避

東畑郁生(関東学院大学・客員教授、東京大学・名誉教授)

安全は大事であると誰もが云い、反対する者はいない。災害の実態については報道も多く、周知されている。しかし、安全確保には費用を要する。その費用を個人で支払う者は少なく、安全には多額の費用が必要であることを認識すべきである。

ハザードマップは世間に広く普及している。しかし、その作成、データ収集の予算は十分であるとは言い難い。斜面の地盤調査に至っては稀れである。

斜面災害ハザードマップについては false negative が関係者の責任問題となる。それを回避するために安全率を設定していて、危険を過大評価している。住民にとっては、危険だといわれ過ぎると生活が成り立たなくなるという問題がある。この問題に対し、斜面観測と早期警報の推進が重要であると考ええる。

斜面観測については、中央開発株式会社が開発した「感太郎」が有用である。廉価なセンサーを現場に多数配置し、傾斜角度の観測値をネットで転送し、解釈して斜面崩壊の危険を予知、現地へ通知するシステムである。気候変動、集中豪雨の危険が増している時代にあって、ニーズに適合している。感太郎の特徴は、斜面崩壊の危険を判断する閾値を明言している点にある。

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究 公開プログラム

斜面崩壊発生メカニズムの追求と環境負荷低減型斜面災害対策
Pursuit of mechanism of slope failures and slope disaster
countermeasures with reduced environmental load

日 時： 2021年9月11日（土）9：30 ～ 12：30
場 所： Zoomミーティングによるオンライン
研究代表者： Hemanta Hazarika（九州大学 工学研究院）



午前の部（公開）9月11日（土）09：30 ～ 12：30

9：30～ 9：35

代表挨拶 Hemanta Hazarika（九州大学 工学研究院）

9：35～10：05

Philip Broadbridge（La Trobe 大学・名誉教授）

Modelling downslope soil-water flow under rainfall- Its role in slope Instability -
（雨時に斜面内の水流とこれらが斜面安定に及ぼす影響）

10：05～10：10 休憩

10：10～10：40

Philip Broadbridge（La Trobe 大学・名誉教授）

Smoothed particle hydrodynamics mesh-free numerical modelling of a landslide
（メッシュフリー-SPH法による地すべりの数値解析）

10：40～10：50 休憩

10：50～11：35

佐野 理（東京農工大学・名誉教授）

粒状体中の巨視的空洞を過ぎる粘性流とその崩壊機構 I

11：35～11：40 休憩

11：40～12：25

佐野 理（東京農工大学・名誉教授）

粒状体中の巨視的空洞を過ぎる粘性流とその崩壊機構 II

12：25～12：30

講評 福本康秀（九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所）

斜面崩壊発生メカニズムの追求と環境負荷低減型斜面災害対策

Pursuit of mechanism of slope failures and slope disaster countermeasures with reduced environmental load

日 時： 2021年12月4日(土) 13:30 ～ 17:00
場 所： 九州大学 西新プラザ 大会議室
(対面+オンラインのハイブリッド形式)
共 催： 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
一般社団法人 GLOSS研究会
研究代表者： ハザリカ・ヘマンタ/九州大学大学院工学研究院



※プログラムは都合により変更になる場合がありますので予めご了承ください。
最新情報はホームページをご覧ください。

<プログラム>

司会:村井政徳(清水建設株式会社/GLOSS 研究会・理事)

13:30～13:40 開会挨拶 ハザリカ ヘマンタ 研究代表
(九州大学・教授/GLOSS 研究会・理事長)

13:40～15:10

すずき もとゆき
鈴木 素之先生(山口大学・教授)

昔からくり返す土砂災害～時間防災学の視点から～

15:10～15:20 休憩

15:20～16:50

おくぞの せいし
奥園 誠之先生(株式会社高速道路総合技術研究所・顧問)

傾斜地盤の盛土の崩壊と対策

16:50～16:55 講評 福本 康秀(九州大学・教授/GLOSS 研究会・理事)

16:55～17:00 閉会挨拶 河内 義文(GLOSS 研究会・副理事長)

九州大学 IMI 共同利用・短期共同研究 第3回公開プログラム

斜面崩壊発生メカニズムの追求と環境負荷低減型斜面災害対策

Pursuit of mechanism of slope failures and slope disaster countermeasures
with reduced environmental load

日 時： 2022年1月21日(金) 14:40 ~ 17:00
場 所： 九州大学 JR博多シティ会議室
(対面+オンラインのハイブリッド形式)
共 催： 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
一般社団法人 GLOSS研究会
研究代表者： ハザリカ・ヘマンタ/九州大学大学院工学研究院



※プログラムは都合により変更になる場合がありますので予めご了承ください。
最新情報はホームページをご覧ください。

<プログラム>

司会:村井政徳(清水建設株式会社/GLOSS 研究会・理事)

14:40~14:50

開会挨拶 ハザリカ ヘマンタ 研究代表(九州大学・教授/GLOSS 研究会・理事長)

14:50~15:45

講演 1

東畑郁生先生(東京大学名誉教授<元国際地盤工学会副会長>)

豪雨災害の事例と人々の対応、そして災害の回避(1)

15:45~15:55 休憩

15:55~16:50

講演 2

東畑郁生先生(東京大学名誉教授<元国際地盤工学会副会長>)

豪雨災害の事例と人々の対応、そして災害の回避(2)

16:50~16:55

講評 福本 康秀(九州大学・教授/GLOSS 研究会・理事)

16:55~17:00

閉会挨拶 河内 義文(GLOSS 研究会・副理事長)