

令和 5 年 7 月九州北部豪雨で発生した 土砂災害の再現解析

NUMERICAL ANALYSIS OF THE DEBRIS FLOW CAUSED BY THE TORRENTIAL RAINFALL IN NORTHERN KYUSHU IN JULY 2023

村上 朱明¹・笠間 清伸²・石川 達也³

Toa MURAKAMI, Kiyonobu KASAMA and Tatsuya ISHIKAWA

¹九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: murakami.toa.250@s.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³北海道大学大学院 (〒060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

E-mail: t-ishika@eng.hokudai.ac.jp

Key Words: slope failure, surface flow, seepage flow,

1. はじめに

近年、気候変動に伴うゲリラ豪雨の増加により山間部での斜面崩壊が増加している。令和 5 年 7 月豪雨により福岡県久留米市田主丸地区で発生した土石流は土砂災害警戒区域の外に到達する想定を超えた斜面災害が発生した。

本文では、田主丸地区の崩壊斜面を対象に行った現地調査ならびに室内実験で得られた粘着力や内部摩擦角といった土質定数を用いて豪雨時に発生する斜面の地表流と地下浸透を考慮した斜面安定解析を行い、実現象との比較を通して斜面崩壊のメカニズムの分析を行った。

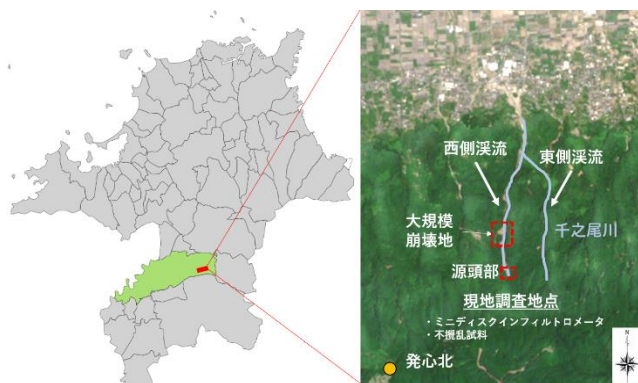


図-1 位置図と衛星写真

2. 令和 5 年 7 月九州北部豪雨による土砂災害

図-1 に土砂災害が発生した福岡県久留米市田主丸町竹野地区の位置図と災害発生後の衛星写真¹⁾を示す。土砂災害は竹野地区の千之尾川流域で発生した。土石流の発生源は図中に示す源頭部で、幅 30m、斜長 100m、崩壊深さ 3~5m の規模であった。源頭部における被害状況を図-2 に示す。特徴として斜面の勾配が 30° の急傾斜地であった。また、西側溪流の左岸側で全幅が 200m 以上、中央部での高低差が 80m の大規模な崩壊が生じた。



図-2 源頭部被害状況

令和5年7月10日前後の降雨状況を図-3に示す。

図-1に示す、源頭部の南西方向に位置する久留米県土整備事務所の所管に属する発心北の雨量観測情報によると7月8日18時から7月10日18時までの累積降雨量は622mmで、時間雨量は7月10日7時に観測された80mm/hが最大であった。また、同範囲での発心北のCLとスネーク曲線を図-4に示す。7月10日6時から土砂災害警戒情報が発令され、同日9時30分頃に土砂災害が発生した。このことから本災害は田主丸地域のCLを超えた領域の降雨条件で発生していることが分かる。

3. 現地調査と実験概要

本研究では図-1に示す田主丸町竹野地区で発生した土砂災害の発生源である千之尾川西側溪流の源頭部および左岸側崩壊箇所を対象に現地調査を行った。図-2の赤丸に示す場所でミニディスクインフィルトロメータを用いた浸透試験²⁾を行い、崩壊地源頭部における透水層の飽和透水係数を求めた。現地で採取した試料を用いて土粒子密度試験や粒度試験を実施、物理特性を明らかにし、図-2の黄丸に示す場所で採取した不攪乱試料を対象に不飽和状態での圧密排水一面せん断試験を実施して解析に用いる強度定数を求めた。以下に各実験手順と結果を示す。

(1) 物理特性

採取した試料を対象に土粒子密度試験(JGS 0111)³⁾および粒度試験(JGS 0131)⁴⁾を実施した。得られた田主丸試料の物理特性を表-1に示す。図-5に田主丸試料の粒径加積曲線を示す。各粒径区分の割合から砂分が多く存在していることが分かる。土壌の保水性に関するパラメータ推定のためにこの結果と国際土壌学会の土性区分⁵⁾の表と比較し、田主丸試料はSL(Sandy Loam)であると評価した。これは砂と壤土の中間の土性で、粘土含有量15%以下、砂含有量65~85%の土壌である。砂質であるが砂そのものではなく、やや乾きやすいという性質を有する。解析に用いる水分特性をCarsel and Parrish⁶⁾が求めた値をもとに残留体積含水率 θ_r を0.065、Van Genuchtenパラメータ(a, n)を(7.5, 1.89)とした。

(2) 圧密定圧一面せん断試験

現地で採取した不攪乱試料をモールドから脱型し、高さ20mm、直径60mmの円柱形に成形した。その際、供試体のせん断応力に影響を及ぼさないように粒径の大きな礫は取り除いた。平均含水比が21%の

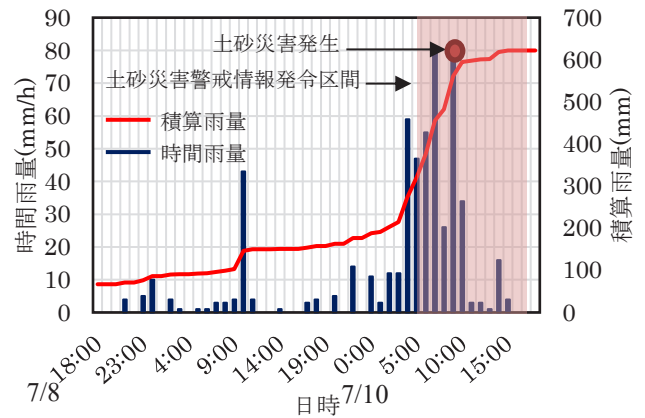


図-3 災害時の降雨状況

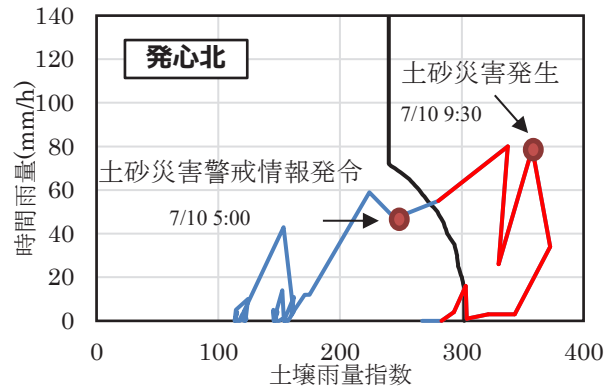


図-4 CLと災害時のスネーク曲線

表-1 田主丸試料の物理特性の一覧

湿潤単位体積重量 (kN/m^3)	18.46
乾燥単位体積重量 (kN/m^3)	15.26
湿潤密度 ρ_t (Mg/m^3)	1.883
乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	1.577
土粒子の比重 G_s	2.74
間隙比 e	0.76
飽和度 (%)	75.7
通常時の含水比 w (%)	21
飽和時の含水比 w_s (%)	28
飽和体積含水率 θ_s	0.43
礫分 (%)	9.72
砂分 (%)	72.83
シルト分 (%)	15.72
粘土分 (%)	1.73

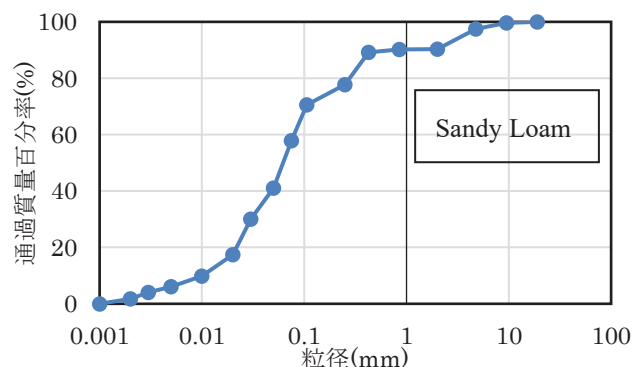


図-5 田主丸試料の粒径加積曲線

供試体を対象に、垂直応力を一般的に用いられる100kPa, 200kPa, 300kPaとし、10分間排水条件下で圧密した後、せん断速度0.2mm/minでせん断を実施した。

図-6に各垂直応力におけるせん断応力、せん断変位および鉛直変位の関係性を示す。垂直応力が増加するほど、供試体に発生するせん断応力も増加した。せん断応力、せん断変位および鉛直変位の関係は、せん断変位とともに単調増加するせん断応力と単調に圧縮する鉛直変位を示すいわゆるゆるい砂の挙動を示した。実験ではせん断変位が7mmにおけるせん断応力を最大せん断応力とした。図-7に田丸主試料の強度定数を求めた結果を示す。粘着力 c は22.2kPa、内部摩擦角 ϕ は20.8°となった。

4. 解析概要と解析条件

図-8⁷⁾に解析範囲と測定箇所を示す。解析範囲は赤線で囲まれた範囲であり、基盤地図情報からダウンロードした数値標高モデル(分解能5m)を基に、千之尾川の西側溪流と東側溪流が解析範囲の中央に来るように自然山地の3次元モデルを作成し、斜面安定解析を実施した。安全率の変化などを詳しく検討する地点として、源頭部から6地点と大規模崩壊地の斜面上部から下部にかけて6地点選定した。

本解析では豪雨時に発生する斜面の地表流と浸透流を連成できる有限要素法ソフトウェア COMSOL を用いて行った。降雨時の地表流の挙動を計算するために浅水方程式を近似した以下の式(1)⁸⁾を用いた。これは運動方程式の一部の重要でない項を無視し、計算効率を向上させることによって広大な山岳地帯での実用的な流出解析をさせるためである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \left(\frac{h^{5/3}}{n_m \sqrt{|S|}} \nabla(H) \right) = R - I \quad (1)$$

ここで、 h は水深m、 t は時間s、 n_m はマンニングの粗度係数、 S は斜面勾配、 H は水面高さm、 R は降雨強度m/s、 I は浸透速度m/sである。また、浸透流の挙動を計算するために以下の式(2)に示す、Richards 方程式⁹⁾を用いた。

$$\nabla \cdot [k_s k_r \cdot \nabla(H_p + z)] + Q_w = [C_m + S_e S_c] \frac{\partial H_p}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 k_s は飽和透水係数m/s、 k_r は比透水係数、 H_p は圧力水頭m、 z は標高m、 Q_w は水の流出入1/s、 C_m は比水分容量1/m、 S_e は有効飽和度、 S_c は比貯留係数1/m、 t は時間sである。また、降雨浸透の境界条件

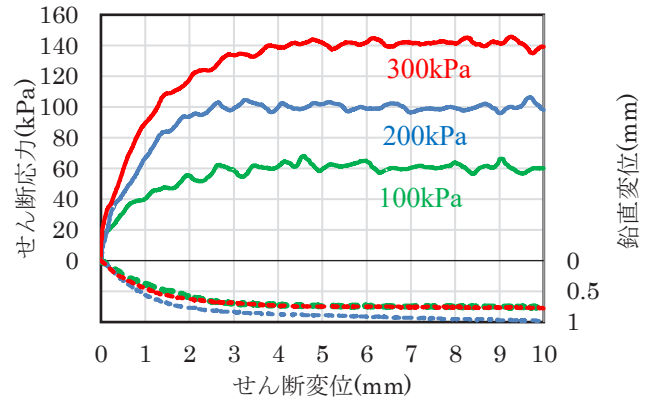


図-6 せん断応力および鉛直変位の変化

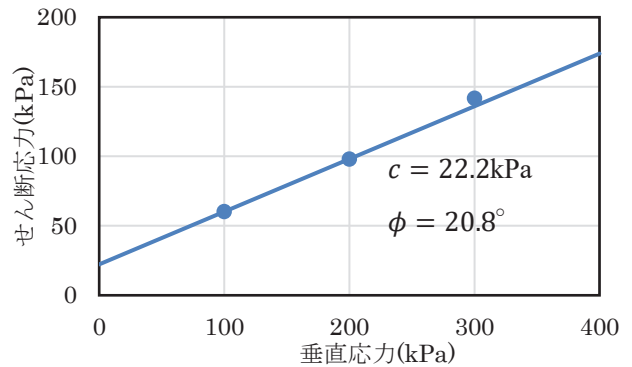


図-7 クーロンの破壊基準線

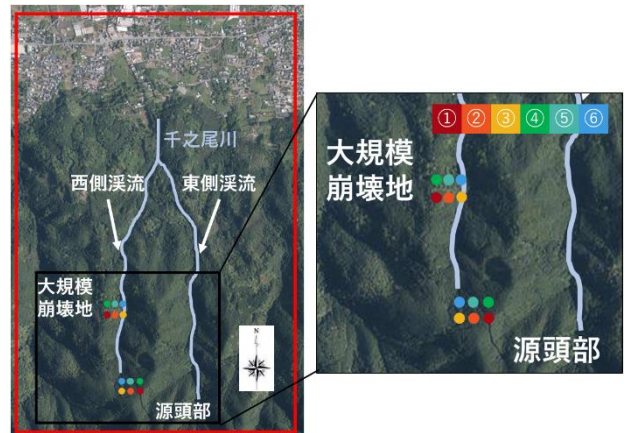


図-8 解析対象地域と測定箇所

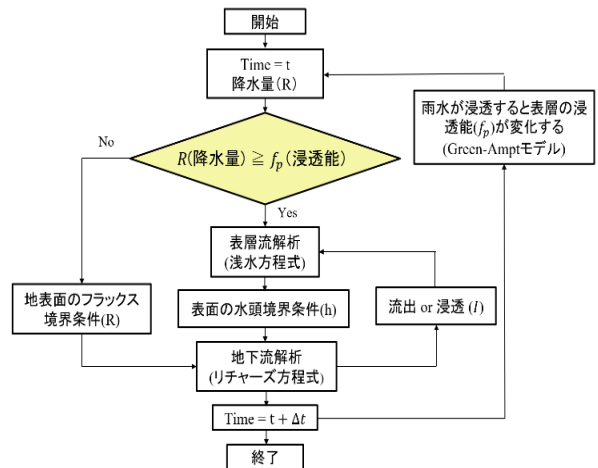


図-9 浸透流と地表流の連成解析フロー

には Green-Ampt モデル¹⁰⁾を採用した。降雨初期では浸透能 f_p が十分大きいため、降雨強度 R をそのまま Richards 方程式の境界条件とした。ただし、降雨強度 R が浸透能 f_p を超えた場合、降雨の一部は地表面に流出するとした。その関係を式(3)に示す。

$$f_p = k_s \left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F} \right)$$

ここで、 ψ は湿潤面までの平均サクシオン m 、 $\Delta \theta$ は初期体積含水率と飽和体積含水率の差、 F は累積浸透量 m である。以上の関係式を用いた、時間経過による地表流と浸透流の連成モデルのフローチャートを図-9に示す。

ここで、斜面の湿潤状態を示す指標として有効飽和度 S_e を式(4)として定義する。

$$S_e = (\theta - \theta_r / \theta_s - \theta_r) \quad (4)$$

ここで θ はある時間における地盤内の体積含水率である。斜面の安定性の計算には式(5)に示す、Lu et al.¹¹⁾が提案した局所安全率(F_{LFS})を採用した。

$$F_{LFS} = \frac{2 \cdot \cos \phi}{\sigma_1 - \sigma_3} \left[c + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \phi \right] \quad (5)$$

ここで、 F_{LFS} は局所安全率、 c は粘着力 kPa、 ϕ は有効内部摩擦角[°]、 σ_1 、 σ_3 は不飽和土の最大・最小主応力 kPa である。

現地調査と実験結果から解析に用いる地盤定数を表-2のように設定した。また、現地調査の際に地表から5m付近に白い岩盤層が見られたことから、モデルを地表から5mの透水層とその下の不透水層に分割し、不透水層に関しては文献¹²⁾を参考におおよその値を設定した。

降雨条件は、図-3に示す災害発生箇所にもっとも近い発心北観測所で計測された時間降雨を入力した。

表-2 解析条件

パラメータ	透水層	不透水層
乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	1.56	2.0
飽和透水係数 k_s (m/s)	1.79×10^{-5}	1.0×10^{-9}
粘着力 c (kPa)	22.2	200
内部摩擦角 ϕ (°)	20.8	37
飽和体積含水率 θ_s	0.43	0.48
残留体積含水率 θ_r	0.065	0.008
Van Genuchten a (1/m)	7.5	0.3
Van Genuchten n	1.89	1.08

5. 解析結果

図-10に降雨に伴う斜面の浸透能の時間変化を示す。降雨開始から7時間後には浸透能が100mm/hを下回り、飽和透水係数の値である66.44mm/hに収束していることが分かる。また、降雨開始35時間後から降雨強度が地盤の浸透能と非常に近い値を取り、38時間後の時間雨量が浸透能を初めて超えた。

図-11に降雨に伴う斜面表面からの地下水の流出状況を示す。本研究では地下水流出を以下の式(6)で判定し、式(6)が正であれば流出が発生しているとする。

$$R - f_p > 0 \quad (6)$$

ここで、 R は時間雨量 m/s であり、 f_p は浸透能 m/s である。図-11から、式(6)が正の値を取るのが降雨開始から37.5時間後であった。ここから、本解析では降雨開始37.5時間後より斜面からの流出が発生し始めることが分かる。その後7月10日9時30分ごろに斜面崩壊が発生しており、地表流が発生してから約2時間で崩壊に至っていることが分かる。

図-12(a)と図-12(b)に源頭部と大規模崩壊地の地表面における有効飽和度の時間変化と時間雨量の関

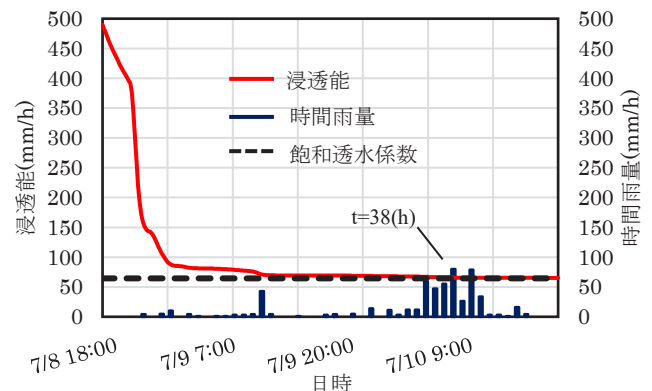


図-10 浸透能と降水量の時間推移

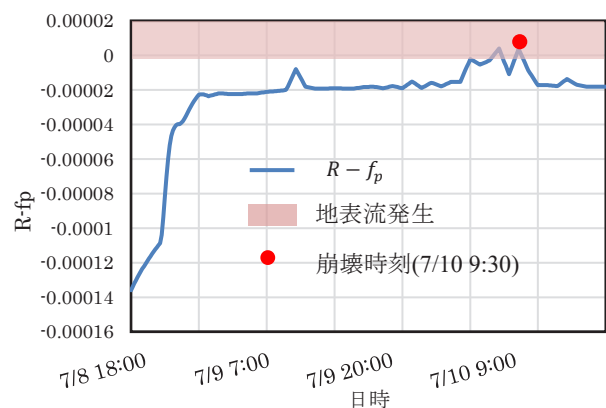


図-11 地表流の発生状況

係を示す。源頭部ではすべての観測点で降雨開始から 37.5 時間後に有効飽和度が急激に上昇し、飽和状態になった。これは地表流が発生し始める時間と一致しており、降水量が浸透能を超えることによって地盤が飽和状態になり、地表流が発生していると考えられる。しかし、大規模崩壊地では観測点ごとに有効飽和度の挙動に差異があり、ポイント③では降雨開始から 17 時間後に、ポイント②、⑤では 35 時間後に急降水量の増加に伴い有効飽和度が急激に上昇し、飽和状態になった。地形図をグラフ中に示す。ポイント③は大規模崩壊地斜面の下部であり、斜面上部に浸透した雨水が流れ込んでいると考えられる。同じく斜面下部であるポイント⑥では同時刻に飽和していないのはポイント③がポイント⑥に比べ、谷部にかけての斜面勾配が急であったことが考えられる。また、ポイント②、⑤は大規模崩壊地斜面の中部であり、59mm/h の浸透能に近い激しい雨が降ったことにより、斜面上部に浸透した雨水が斜面下部に到達する前に斜面中部の地表付近にまで流れ込んでいると考えられる。よってこれらの箇所が他の観測箇所より地下の浸透流が集積しやすく、地盤が飽和しやすい場所であった可能性がある。

図-13(a)と図-13(b)に源頭部と大規模崩壊地の地表における間隙水圧の時間変化と時間雨量の関係を示す。降水量と間隙水圧の増加のタイミングが一致しており、降雨開始から 37.5 時間後に大規模崩壊地のポイント③を除くすべての測定箇所の間隙水圧が正に転じた。これは有効飽和度が 1 となり、地表流が発生し始める時間と一致する。ここから、降雨が浸透能を超えることによって地盤が飽和し、間隙水圧の増大が発生した。また、他より早く間隙水圧が正に転じる大規模崩壊地のポイント③は、降雨開始から 17 時間後に飽和状態となった箇所であり、地下水の集積が原因だと考えられる。

図-14(a)と図-14(b)に源頭部と大規模崩壊地の地表における安全率の時間変化と時間雨量の関係を示す。今回は第 2 章に示すように斜面の水分特性曲線を粒度分布のみから決定しているため、無降雨時の安全率をかなり低めに計算している可能性があり、改善する必要があるものの、降雨開始から 17 時間後と 35~38 時間後における急激な降雨量の増加に伴って安全率も急激に減少している現象をうまく再現できている。また、安全率が急激に減少し始める降雨開始から 35~38 時間後は有効飽和度と間隙水圧も増大しており、安全率減少における傾きが最大となるのが降雨開始から 37.5 時間後である。ここから浸透した雨水は図-12(a)と図-12(b)から読み取れるよう

に有効飽和度の増加を引き起こしており、それが図-13(a)と図-13(b)が示すように地表の間隙水圧の増加を引き起こしている。それによって有効応力が減少し、安全率が急激に減少していると考えられる。

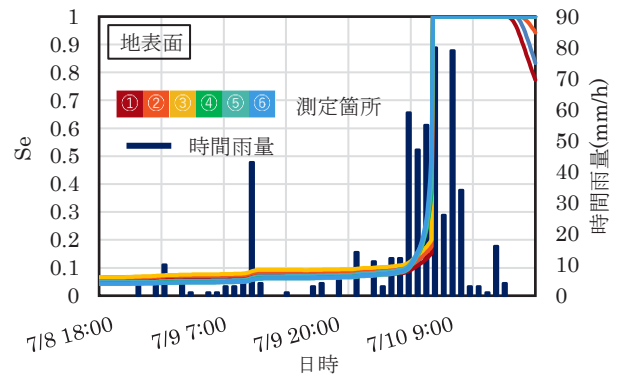


図-12(a) 有効飽和度と降水量の時間推移(源頭部)

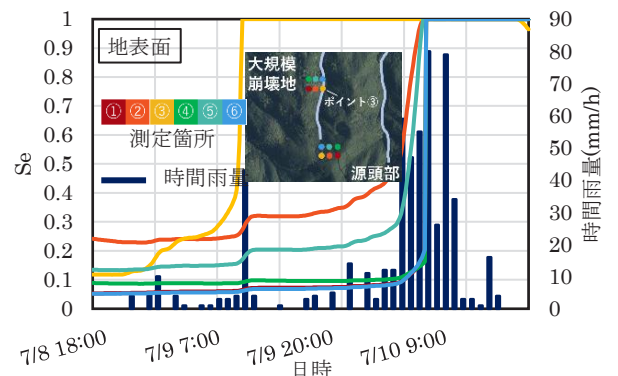


図-12(b) 有効飽和度と降水量の時間推移(大規模崩壊地)

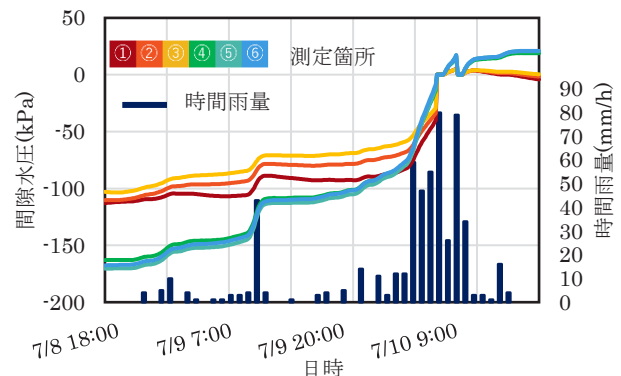


図-13(a) 間隙水圧と降水量の時間推移(源頭部)

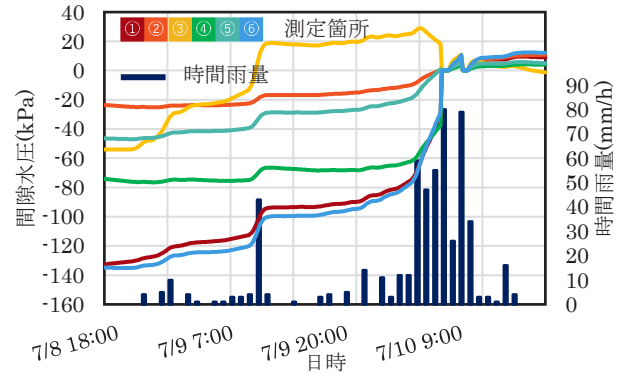


図-13(b) 間隙水圧と降水量の時間推移(大規模崩壊地)

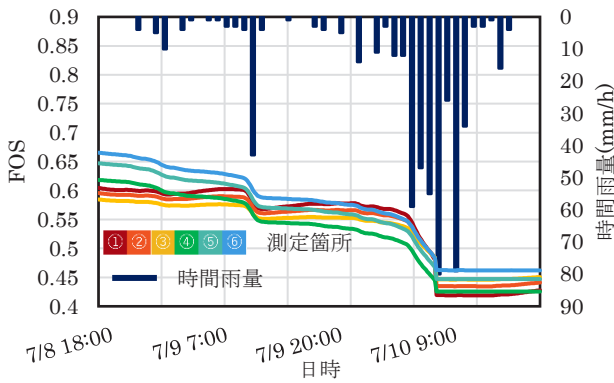


図-14(a) 安全率と降水量の時間推移(源頭部)

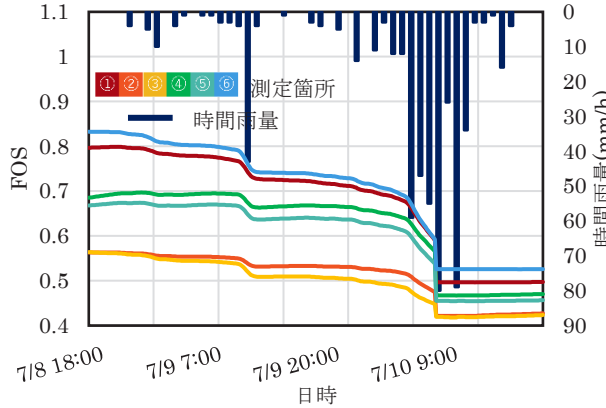


図-14(b) 安全率と降水量の時間推移(大規模崩壊地)

6. まとめ

福岡県久留米市田主丸町竹野地区の斜面崩壊地域を対象に、有限要素法ソフトウェアであるCOMSOLを用いて降雨時の地表流と地下浸透を連成した斜面安定解析を行い、土砂災害の発生メカニズムの分析を行った。

- 1) 田主丸での土砂災害は地盤の浸透能を超える強度の雨が降ったことにより、地盤の有効飽和度と間隙水圧が増加したため安全率の減少が起り発生した。また、実現象では7月10日9時30分に斜面崩壊に至っており、これは本解析の降雨開始から39.5時間後に相当し、地表流が発生してから約2時間後に斜面崩壊が発生したと推定される。
- 2) 大規模崩壊地においては、斜面勾配が急であるポイント③は地下水が集積しやすく、飽和しやすいため、最初に崩壊したと推定される。
- 3) 今回の解析では水分特性曲線の設定方法を改善する必要があるが、斜面の浸透能を大きく超えるような降雨が発生する場合においては、地表流と地下浸透流を連成させる斜面安定解析手法は実斜面のリアルタイム危険度評価として有効となる可能性がある。

参考文献

- 1) Sentinel-hub EO-Browser, <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>, 2024.
- 2) 小川 大輝, 酒匂 一成, 伊藤 真一: 携帯型ミニディスクインフィルトローマータによる現場透水係数の推定に関する考察, 第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.97-102, 2020.
- 3) 地盤工学会: 土粒子の密度試験方法(JGS 0111), 土質試験 基本と手引き 第二回改訂版, pp.19-21, 2010.
- 4) 地盤工学会: 土の粒度試験方法(JGS 0131), 土質試験 基本と手引き 第二回改訂版, pp.27-32, 2010.
- 5) 農林水産省: 土壌の基礎知識 I, pp.4, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/ntuti4.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/ntuti4.pdf), 2014.
- 6) Carsel, R. F. and Parrish, R. S.: Development Joint Probability Distribution of Soil Water Retention Characteristics, Water Resour. Res., Vol.30, pp.755-769, 1988.
- 7) 国土地理院撮影の空中写真, <https://maps.gsi.go.jp/#15/33.306878/130.665636/&base=ort&ls=ort&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r1s0m0f1>, 2021.
- 8) Murillo, J., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau P.: The influence of source terms on stability, accuracy and conservation in two-dimensional shallow flow simulation using triangular finite volumes. Int. J. Numer. Methods Fluids 54, pp.543-590, 2007.
- 9) Richards, L.A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics. 1 (5), pp.318-333, 1931.
- 10) Green, W.H., Ampt, G.A.: Studies on Soil Physics, part 1, the Flow of Air and Water through Soils. J. Agric. Sci. 4, 1), pp.1-24, 1911.
- 11) Lu, N., Şener-Kaya, B., Wayllace, A., Godt, J.W.: Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety. Water Resour. Res. 48, W09524, 2012.
- 12) 今井 久, 雨宮 清, 松井 裕哉, 佐藤 稔紀, 三枝 博光, 渡邊 邦夫: 地下空洞辺岩盤内の不飽和領域解析手法に関する提案—岩石の不飽和浸透パラメータと空洞壁面境界条件の設定方法—, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.3, pp.285-296, 2013.

(2024.5.31 受付)