

平成 30 年 7 月の豪雨による斜面崩壊地における 原位置試験の材料係数を導入した有限要素解析

A FINITE ELEMENT ANALYSIS USING ACTUAL MATERIAL PARAMETERS BY
IN SITU TESTS AT SLOPE FAILURE SITE ON TORRENTIAL RAIN IN JULY 2018

平 瑞樹¹・山本健太郎²・宮原 仁³・東風平 宏⁴

Mizuki HIRA, Kentaro YAMAMOTO, Hitoshi MIYAHARA and Hiroshi KOCHIHIRA

¹鹿児島大学農学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

E-mail: hira@agri.kagoshima-u.ac.jp

²西日本工業大学工学部 (〒800-0344 福岡県京都郡苅田町新津 1-11)

E-mail: kyama@nishitech.ac.jp

³(株) セイコー技術部 (〒830-0052 福岡県久留米市上津町 1874)

E-mail: h.miyahara@corp-seiko.co.jp

⁴基礎地盤コンサルタンツ (株) 九州支社地質技術部 (〒814-0022 福岡市早良区原 2-16-7)

E-mail: kochihira.hiroshi@kiso.co.jp

Key Words: *torrential rain, slope failure, in situ test, material parameter, finite element method*

1. はじめに

近年、傾斜地では豪雨による比較的浅い表層崩壊が起り、大規模崩壊や土石流につながっている場所がある。斜面崩壊の生じやすい現場の地形、地質、降雨条件などを予め調査し、斜面の外力による変形やひずみ性状を予測しておくことが重要である。より正確な崩壊箇所の危険度予測が、斜面災害から市民の命と財産を守るための対策を講じることにもつながる。

本報では、平成 30 年 7 月豪雨による九州北部の災害現場を調査し、現場の地形・地質や地盤の状態と原位置で強度を評価する現場実験をおこない、有限要素解析に導入して数値シミュレーションを実施した。さらに、現場での災害を想定したモデル地盤を設定し、現地で得られた土質定数や透水係数を導入した数値解析から斜面の崩壊メカニズムについて検討するために、地盤内に浸透する水分移動を考慮した解析を実施することで、盛土斜面の防災・減災に寄与する知見を得ることを目的とする。

2. 平成 30 年の豪雨災害の概要

平成 30 年 6 月 28 日～7 月 8 日までに台風 7 号や梅雨前線などの影響による集中豪雨が西日本を中心に全国的に広いエリアで被害を及ぼした。7 月 9 日に気象庁が「平成 30 年 7 月豪雨」と命名した。6 月 29 日から発生した台風 7 号は太平洋高気圧の外側を回り込むように東シナ海を北上して、対馬海峡付近で進路を変えて日本海上に抜けた。太平洋高気圧の影響で 7 月 2 日～5 日に北海道に停滞し、7 月の降水量の平均値を超える記録的な豪雨となった。その後、梅雨前線が南下して、九州地方では台風の影響による雨が 7 月 3 日頃から降り続き、7 月 5 日～8 日にかけて西日本付近に停滞、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続的に発生した。西日本から東日本にかけて広範囲での記録的な大雨となった。

7 月 6 日 17 時 10 分に福岡、長崎、佐賀の 3 県に大雨特別警報が発表され、その後も広島、岡山、鳥取、京都、兵庫と岐阜、8 日に高知、愛媛と運用を開始して最多となる 11 府県で大雨特別警報が発表された。西日本の多くの地域での河川の氾濫や浸水被害、土砂災害が発生して 200 人を超える死者が出る

など甚大な被害で、平成に入って最悪の大水害となった。

九州から東海地方にかけての線状降水帯が 15 箇所発生したため、局地的な集中豪雨が発生したという気象庁の報道であった。北九州市門司区では崖崩れが発生し住宅が全壊、2 人が死亡した。筑紫野市の水路で避難中に土石流に巻き込まれた方が発見されている。6 日には、北九州市小倉北区の板櫃川などの複数の河川が氾濫し、久留米市では広範囲で浸水している。北九州市では9日までに土砂崩れなどにより約 680 棟が被害を受けた。佐賀県で 2 人、宮崎県 1 人、鹿児島県でも桜島の古里町で 2 棟が土砂に巻き込まれて 2 人が死亡している。写真-1 は盛土された道路斜面が豪雨により崩壊した地区で、盛り土は、シルト質砂で構成されている。また、基盤となる地山部分は、風化岩と判別される。

3. 原位置試験による地盤調査

地盤の原位置試験で強度を調べるためのサウンディングとは、ロッドの先端に取り付けた抵抗体を地中に挿入し、貫入、回転、引き抜きの抵抗値から、原位置の土層の状態や土の強さなどの力学的性質を推定する。ボーリング調査時に標準貫入試験機を利用する N 値の測定法が一般的であるが、急斜面や狭小な現場で簡易にできる原位置試験を実施した。

調査位置は、福岡県北九州市八幡東区田代町の道路斜面崩壊現場(図-1)で、露頭観察と以下に示すベーンコーンせん断試験と簡易動的コーン貫入試験、原位置透水試験を崩壊地の斜面上部と崩壊した斜面の下部を選定し、地盤調査を実施した。

(1) ベーンコーンせん断試験

簡易的な原位置での試験として、土層強度検査棒(土検棒)を実施した。斜面の崩壊範囲から上部の斜面と下部の斜面を選定して、地盤強度定数の内部摩擦角(ϕ)と粘着力(c)を算出する。図-2に示すように貫入コーンを目的の位置までロッドをつなぎながら押し込んでいき、バネ式荷重計で力を計測する。その後、先端アダプターをロッドに接続して、ダイヤル式トルクレンチでせん断抵抗値を測定する。利用した土層検査棒装置の一式を写真-2に示す。ベーンコーンせん断試験(写真-3)から土質定数としての粘着力と内部摩擦角を整理する方法として、経験式法と相関式法がある。経験式法は、横軸に鉛直応力、縦軸をせん断力とした図を作成して測定点毎に回帰式から粘着力 c_{dk} と内部摩擦角 ϕ_{dk} を求める。

相関式法とは、横軸をベーンコーンにかかる鉛直荷重(W_{vc})と縦軸をトルク(T_{vc})として土質ごとにその回帰式の切片を粘着力、傾きを内部摩擦角として求め、室内強度試験(一面せん断試験や三軸圧縮試験)を実施した c と ϕ 両者の相関式から c_{dk} と ϕ_{dk} を求める方法である。ここでは、経験式法と相関式法による結果を表-1に示した。



写真-1 道路斜面の崩壊 (北九州市)



図-1 調査位置図 (北九州市)

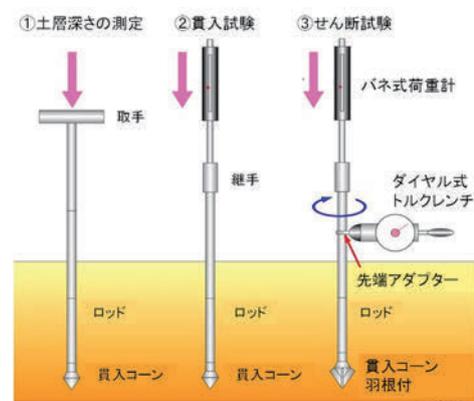


図-2 ベーンコーンせん断試験



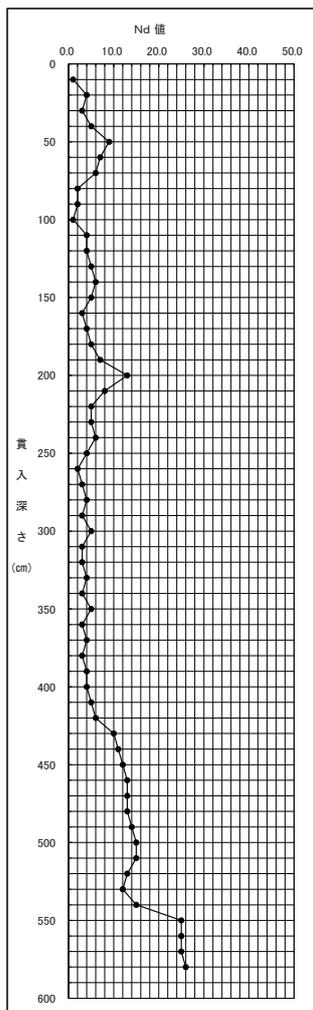
写真-2 土層強度検査棒一式



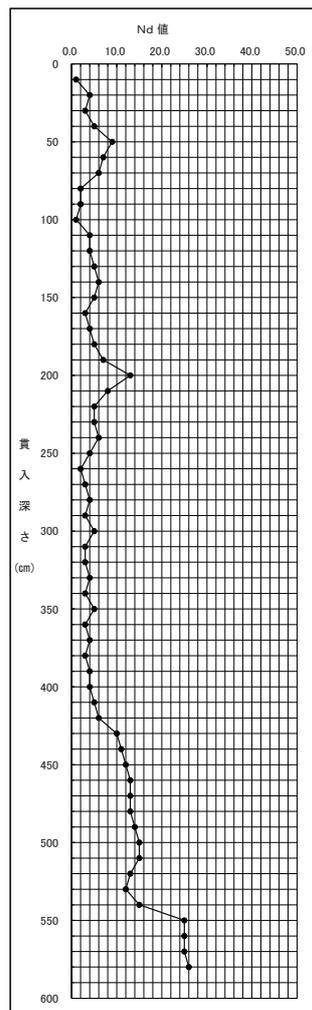
写真-3 ベーンコーン貫入試験

表-1 ベーンコーンせん断試験の結果（粘着力と内部摩擦角）

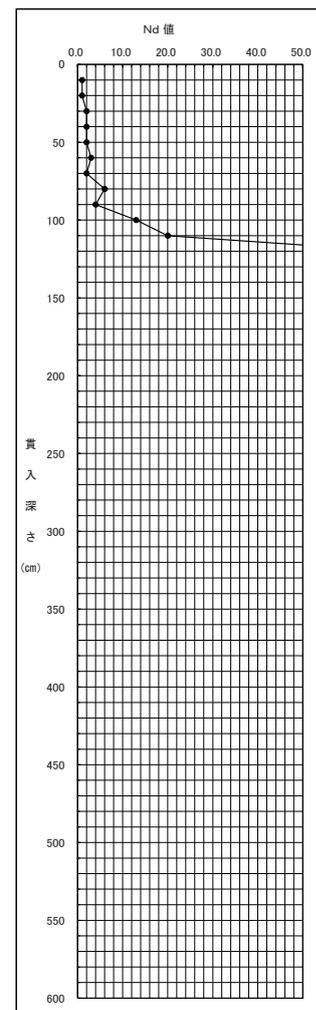
地点	深度 (m)	調査場所	地盤	経験式法		相関式法	
				粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
1	1.0	崩壊地左	崖錐堆積物	27.61	27.7	18.7	5.78
3	0.6	崩壊地右	崖錐堆積物	32.16	17.68	21.78	3.51
5	0.8	崩壊地内	盛土	39.99	28.97	27.08	6.12
まとめ		崩壊地外	崖錐堆積物	30.75	20.18	—	—
		—	全体	32.45	26.85	—	—



(a) 上部 (No. 1)



(b) 中部 (No. 3)



(c) 下部 (No. 5)

図-3 簡易動的コーン貫入試験結果（地盤への貫入深さと N_d 値の関係）

簡易な原位置試験として、簡易動的コーン貫入試験を斜面の崩壊範囲の上部と下部で実施した。簡易動的コーン貫入試験による N_d 値の算定式 (1) を以下に示す。

$$N_d = \frac{10N}{\Delta h} \quad (1)$$

ここに、 N : 打撃回数 (回)、 Δh : 貫入量 (cm) である。

簡易動的コーン貫入試験装置は、先端が 60° で直径 25mm の円錐型コーンを用いて、高さ 500mm からハンマーをノッキングヘッドまで自由落下させて、100mm ごとの打撃回数を測定する。

図-3 に簡易動的コーン貫入試験の実験結果を整理した一例を示した。貫入深さを縦軸に、横軸に計算による N_d 値をプロットしている。

道路付近の盛土上部は深さ約 6m まで小さな値をとりながら地山に達している。斜面の下部は約 1m で N_d 値が大きく変化しながら固い風化岩まで到達していることがわかる。値が大きく出ているところで、基盤岩との区別を推定することができる。

(3) 原位置透水試験

現地での透水試験用に北九州市消防局で開発された透水試験機で実施した。試験区内に注水をおこなう長さ 300mm のストレナーを打ち込み、上部に注水時の水頭差を観察できるアクリル製の測定用パイプとその上部に注水タンクを装備したものである。現場用に改良された透水試験装置であり、比較的軽量に設計されているが、急斜面に打ち込む際は場所の選定には注意を要する。写真-4 に現位置透水試験装置一式を示す。図-4 は斜面崩壊地の平面図と原位置試験の位置、表-2 に計算した透水係数を示す。

4. 現場斜面を想定した数値解析

外力による斜面の安定性を評価するために、局所的な変形挙動を 3 次元的に観察し、評価する数値解析の一つである有限要素法 (Finite Element Method) による数値解析を行った。今回は、Bentley 社 PLAXIS 3D を使用し、実際の斜面崩壊地の現場を想定したシミュレーションを実施して、現場で得られた変形係数を導入した幾つかのケーススタディをおこなうことで斜面の変形性状を考察した。このソフトウェアは地盤解析専用が開発された 3 次元有限要素法解析アプリケーションで、任意形状のモデル作成をし、複雑な地盤構造でも比較的簡単にモデル化すること



写真-4 原位置透水試験装置

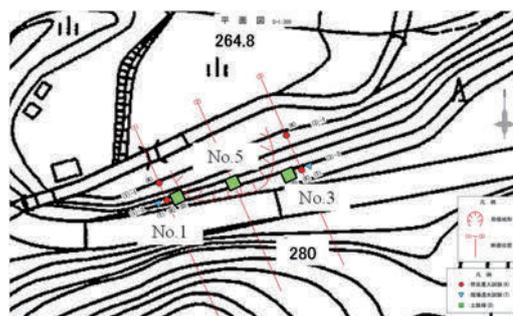


図-4 斜面崩壊地の平面図

ができ、施工プロセスを考慮した条件設定から変形状態を逐次計算できる機能が備わっている。

(1) 数値解析の方法

最初に解析対象地の外形を入力して、斜面の形状を設計する。次に、斜面を形成している地盤の材料データを入力し、設計した地盤モデルに適用する。そうして、変位や荷重などの条件を入力しメッシュの自動生成をおこなう。最後に、弾・塑性解析や安全率解析等の解析方法を決定し、計算を実行し出力された変形・強度の結果を評価する。

(2) 数値解析モデル

解析対象は福岡県北九州市八幡東区田代町の斜面崩壊現場をモデル地盤とした。ところが、本解析では植生の現況等を詳細に再現することは不可能であるため形状だけモデル化し、崩壊に至る外力による変位や各種条件を仮定した解析を行った。モデル斜面は、地山部分高さ 8.0m、斜面勾配 20° 、幅 114m の斜面としモデル中心部に盛土範囲 5.0m とし斜面下部を地山の基盤岩とした。図-5 にモデル斜面の要素分割図、図-6 に断面図を示す。節点数は 25,220、要素数は 16,509 である。表-2 に解析パラメータを示す。透水係数は先に示した現場透水試験、粘着力と

内部摩擦角はペーンコーンせん断試験の結果を経験式法により求めた値である。また、 N 値は簡易動的コーン貫入試験の結果を式(2)に代入することで決定し、その値を式(3)に代入することで弾性係数 E を求めた。

$$N = 0.75N_d \quad (2)$$

C_1, C_2 は係数であり種々の地盤により値が決められている。せん断弾性係数は、式(4)で求めた。ただし、ポアソン比 ν は 0.3 と仮定した。 C_1, C_2 については、盛土がシルト質砂の 12, 5.8, 地山が 24, 5.3 を用いた。

$$E = C_1 + C_2N \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

破壊もしくは降伏基準については、Mohr-Coulomb の式を用いた。本解析では、斜面上部に道路地盤を設置し、盛土の頂部に変位を与える条件に加えて、地下水面が時間とともに降下する排水条件を与えた。また、内部摩擦角や粘着力、必要な材料定数については、原位置試験から得られた結果(表-2)に基づいて算出した。

(3) FEM による数値解析の結果と考察

図-7 は盛土斜面上部に増分変位を与えた際の斜面の変形図である。初期の段階では、盛土部分よりも両端にある地山部分の方が徐々に変位している。盛土が一塊となって地山斜面とその周囲を押し出している現象が解析結果から捉えられた。図-8～図-11 は、モデル断面の経時的な変位分布と地下水面の位置である。また、図-12～図-15 には、モデル断面のひずみ分布と地下水面の位置を経時変化で示した。断面形状を示す変位図から、初期の段階では盛土部分の斜面上部で変位が大きく発生していた。盛土の下部や僅かではあるが斜面の法先付近にひずみが集中していることがわかる(図-13～図-15)。さらに、盛土と地山の境界部分を地下水面が回り込む箇所が見られることから、透水係数の違いがこのような現象を呈しているものと思われ、盛土の塊が地山を押し込んで法先に応力が集中して、すべり面の発生につながったものと考察される。矢印で示した地下水面が徐々に低下していることが図からもわかる。解析は十分ではないが、盛土部分が地山よりも変位する設定条件下での解析が最も盛土と地山の境界部での変位が大きかった。現場は豪雨による崩壊であったため降雨による斜面変形や地下水による間隙水圧の影響も考えられるが、本解析結果から地山と盛土

の内部摩擦角による弾性係数の違いや透水係数に起因する斜面自体の外力が斜面の安定性に影響を及ぼしているのではないかと推測される。

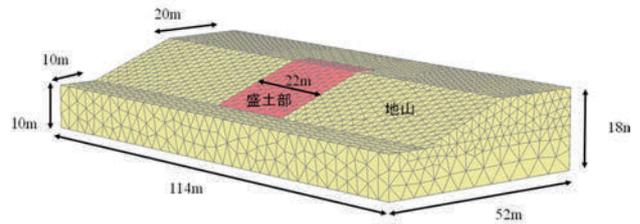


図-5 モデル斜面の要素分割図

(節点数 25,220, 要素数 16,509)

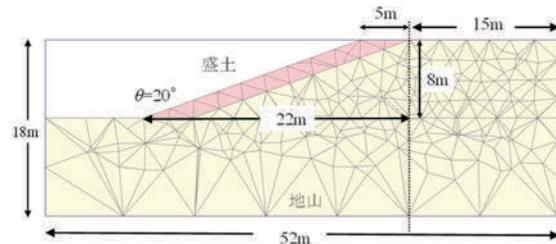


図-6 解析斜面の断面図

表-2 FEM 解析に使用した材料パラメータ

材料係数	地山	盛土
N_d 値	7	5
N 値	5	4
弾性係数 E (kN/m ²)	5,079	3,308
せん断弾性係数 G (kN/m ²)	1,953	1,272
ポアソン比 ν	0.3	0.3
透水係数 k (m/s)	2.41×10^{-6}	3.66×10^{-7}
粘着力 c (kN/m ²)	30.75	39.99
内部摩擦角($^\circ$)	20.18	28.97

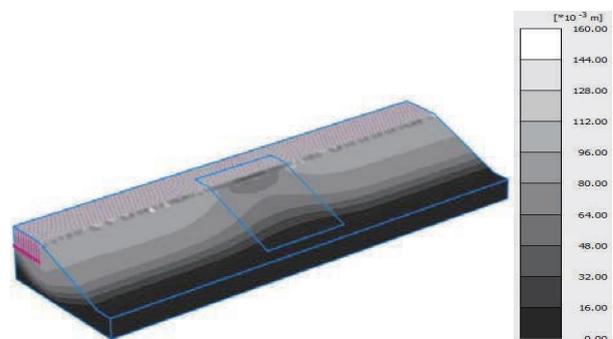


図-7 地盤の変位量を表す等値線図

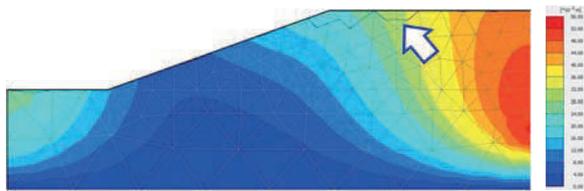


図-8 変位分布と地下水面 (1 時間後)

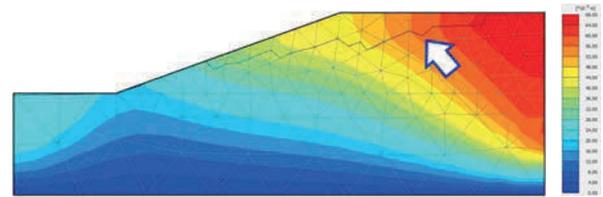


図-9 変位分布と地下水面 (3 時間後)

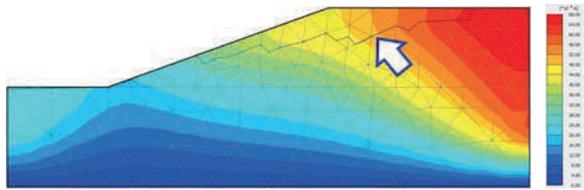


図-10 変位分布と地下水面 (12 時間後)

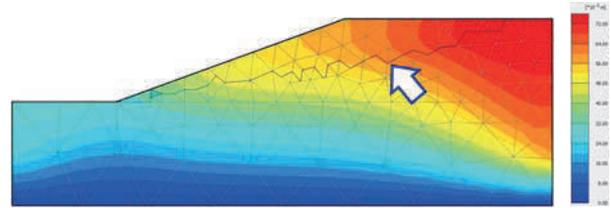


図-11 変位分布と地下水面 (24 時間後)

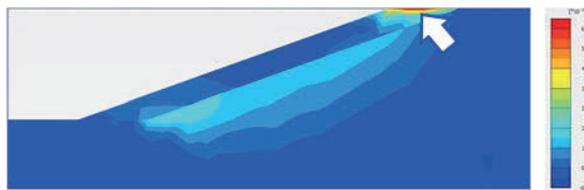


図-12 ひずみ分布と地下水面 (1 時間後)

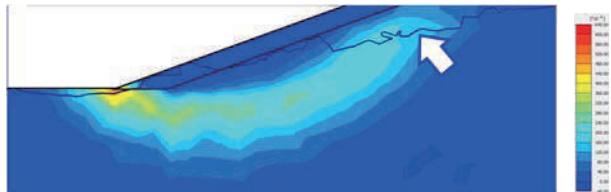


図-13 ひずみ分布と地下水面 (3 時間後)

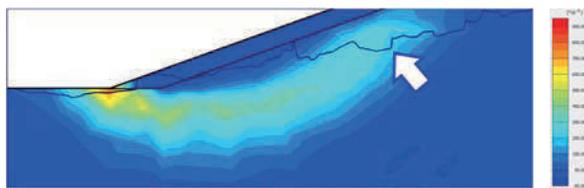


図-14 ひずみ分布と地下水面 (12 時間後)

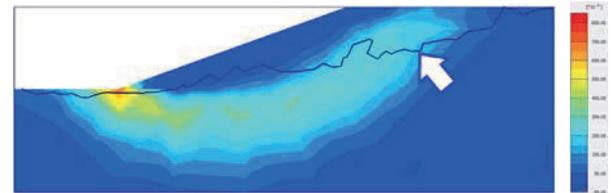


図-15 ひずみ分布と地下水面 (24 時間後)

5. おわりに

平成 30 年 7 月豪雨により斜面崩壊を起した現場を調査し、地形や地質との関係、地盤の状態と原位置での強度や透水性を調べる目的で、ベーンコーンせん断試験と簡易動的コーン貫入試験、原位置透水試験を行った。また、原位置試験から得られた推定 N 値から算定した粘着力や内部摩擦角などの材料パラメータを導入した有限要素解析を用いて、調査現場の斜面をモデル化した数値シミュレーションを試みた。

結果として、盛土上部から水位を与えた条件において、地山内部にせん断面が発生し、特に斜面法先部分にひずみが集中するような現象が起こることがわかった。このような二層地盤の解析においては、導入した盛土部と地山部の弾性係数や内部摩擦角の値の選定や透水係数の違いが計算結果に影響していると推測されるため、さらなる数値解析の検証が必要と考えられる。今後は、降雨による雨水が地盤中に浸透して、地下水位の挙動が斜面の変形に及ぼす

影響についてさらに詳細に解析することで、現地の地盤内のすべり破壊現象を追跡可能な崩壊発生メカニズムについて検討したい。

参考文献

- 1) 気象庁 2018 年 7 月 13 日発表資料：災害をもたらした気象事例、平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等）平成 30 年(2018 年)6 月 28 日～7 月 8 日、(https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/jyun_sokuji20180628-0708.pdf)
- 2) 平 瑞樹, 山本健太郎, 永川勝久：地震による津波危険地域における避難経路の現地調査と斜面崩壊危険箇所の抽出, 鹿児島大学地域防災教育研究センター平成 27 年度報告書, pp.161-166, 2017.
- 3) Bentley Co. Ltd., Software manuals on PLAXIS-3D, <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-3d-manuals/> (2020.6.20 参照閲覧)
- 4) 岡田勝也, 杉山友康, 野口達雄, 村石尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性, 土と基礎 40-4, pp.11-16, 1992.

(2020. 7. 1 受付)