

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04669

研究課題名(和文) 地盤強度と降雨浸透特性に着目した大規模地震後の降雨による斜面崩壊発生機構の解明

研究課題名(英文) Shallow landslide mechanism due to the heavy rainfall after the large-scale earthquake based on the evaluation of foundation strength and permeability on a mountainous area

研究代表者

藤本 将光 (Fujimoto, Masamitsu)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：60511508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：大地震後に豪雨が発生した場合、山地斜面では新規の斜面崩壊の発生数の増加や既存の崩壊地の拡大が起きることが報告されている。この現象を解明するためには、地震によって発生する亀裂による内部構造の変化や強度低下とそれらに伴う降雨浸透特性の変化の把握が必要である。本課題では、室内斜面実験において加振、降雨を与えることで地震後の降雨による斜面崩壊現象を再現した。また、クラックの内部状態の影響評価のため、人工クラックを作成した場合の実験も行った。その結果、加振後の土壌の浸透性が変化し、地下水位の変動に差が生じること、また、土壌の強度低下が認められる場所が確認され、斜面の不安定化の要因となることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震後に豪雨が発生した場合、豪雨による土砂災害に比べて被害が大きくなることが報告されている。この現象を解明するためには、地震後の亀裂による内部構造の変化や強度低下とそれらに伴う降雨浸透特性の変化の把握が必要である。本課題では、室内斜面実験によって検証した結果、地震後には土壌の浸透性が変化し、地下水位の変動に差が生じること、また、土壌の強度が低下する場所が確認され、斜面の不安定化の原因が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：During the heavy rainfall after large-scale earthquakes, previous studies reported that the numbers of new shallow landslide increased, and the enlargement of past shallow landslide occurred. To understand such phenomena, there is a need to evaluate the change of foundation strength and structure by the crack, and permeability change with above foundation change. In this study, shallow landslides were reproduced by adding the vibration and artificial rainfall at the laboratory experiment. Also, to evaluate the inside condition of crack, the experiments with artificial crack condition were conducted. As a result, after the vibration the change of permeability of slope soil lead to changes of groundwater movement and also soil strength, suggesting that such changes are one of the factors of instability of slope.

研究分野：防災工学

キーワード：大規模地震 地盤強度 斜面崩壊 降雨浸透特性 豪雨

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模地震後の降雨による崩壊地の拡大や新規崩壊の発生はこれまでも数多く報告されており、大規模地震とその後の降雨による斜面崩壊の発生には何らかの因果関係があることは明白である。その要因の一つである地震による地盤の強度低下は、地震動によって土壌の構造骨格が破壊されることで生じる緩みや、亀裂の発生を伴う構造的な変化によって引き起こされることが明らかにされているが、大規模地震によってどの程度の地盤の強度低下が発生するのかは依然として不明である。

また、土壌強度の低下は雨水の浸透能と密接に関係しているため、地震で緩んだ土壌や亀裂の周辺部では通常より早く雨水が深部へ浸透することが予測される。そして、その素早い深部浸透が地下水帯を形成することに起因して、斜面崩壊の危険度が高くなることも考えられるが、地震後の雨水浸透特性の変化に関して検討された事例は皆無である。

さらに、こうした地震による土壌の強度低下やそれに伴う浸透特性の変化について、地震後、土塊の自重や降雨履歴を経ることで緩んだ地盤は次第に締まっていき長期的には安定化に向かうと想定される。しかし、降雨後の地盤の強度低下がどの位の期間維持されるのか、またその後安定するまでにどの位の時間を要するのかといった点は、未だ明らかにされておらず、解決すべき課題である。

2. 研究の目的

本課題では大規模地震が地盤の強度・および雨水浸透特性に及ぼす影響を定量的に評価し、大規模地震後の降雨による斜面崩壊発生機構を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 加振後の降雨浸透特性の変化

本研究では、振動台の上に設置した幅 60 cm、奥行き 100 cm、高さ 70 cm、の土槽を用いて模型斜面を作製することで、1G 場において模型斜面に対する振動実験および降雨実験を行った。加振条件、降雨条件は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験条件の設定

実験No.		①	②	③	④	
加振時間(sec)	総加振時間	0	90	70	70	
	加振履歴	レベル1(約250gal)	0	60	30	70
		レベル2(約500gal)	0	30	40	0
最大加速度(gal)		0	478	492	239	
降雨時間		11時間		7時間		

(2) 人工クラックを用いた地震後の降雨浸透特性の変化の評価

本研究では、振動台の上に設置した幅 60 cm、奥行き 100 cm、高さ 70 cm、の土槽を用いて人工クラックを作成し、降雨実験を行った。実験は 4 条件を設定した。実験 ①では人工クラックなし、実験 ②では天端に深さ 10cm の人工クラック(3 本)、実験 ③では天端に深さ 35cm の人工クラック(3 本)、実験 ④では法面に人工クラック(2 本)を作成した。人工クラックは先端を尖らせた厚さ 4.5mm の板をモデル斜面の上面から貫入することで作成した。降雨は降雨強度 50mm/hr の条件で 1 時間与えた。

(3) 加振実験による地震後の地盤強度の変化

本研究では、振動台の上に設置した幅 60 cm、奥行き 100 cm、高さ 70 cm、の土槽を用いて模型斜面を作製することで、1G 場において模型斜面に対する振動実験を行った。Case1 は加振を行わないケースである。Case 2 では、振動数 22Hz、加速度 0.5G の条件で模型斜面に振動を与えた。両ケースにおいて、模型斜面から不攪乱状態のサンプルを採取し、一面せん断試験を行い、試験結果の比較から振動が斜面強度に与える影響について検討した。なお、振動の影響のみを検討するため、降雨の影響は考慮していない。

4. 研究成果

(1) 加振後の降雨浸透特性の変化

降雨開始 35 分後における実験 ① ~ ④ の体積含水率分布図を図-1 に示す。なお、地表面に土壌水分センサーを設置していないため、表面 5cm 以浅での水分量は考慮していない。分布図を比較すると、実験 ①では下層部において体積含水率が上昇しているが、上層(土壌水分センサー I・J)・中層(土壌水分センサー E-H)のデータより、浸透過程での体積含水率の上昇が確認できなかった。このことから、モデル斜面に与えられた降雨は地表面流となって流出し、底面が非排水条件であるためモデル斜面下部へ溜まり、結果的に下層部での体積含水率の上昇の上昇を引き起こしていると考えられる。

実験 ②では天端部と法尻において体積含水率の局所的な上昇が認められた。これはクラックが表層付近のみに入っている場合、降雨が表層付近のみに浸透する影響であると考えられる。実

験 では他のパターンと違い、体積含水率の全体的な上昇が確認できた。このことから、大きなクラックの場合、クラックを伝ってモデル斜面全体への水分の浸透が起こっていると考えられる。実験 の下層部における体積含水率の上昇は、実験 と同様に、地表面流が斜面下部に浸透したと考えられるが、体積含水率の上昇は実験 の方が少なくなっていた。この理由としては加振による土粒子間の間隙の減少によって透水性が低くなっていることが考えられる。クラックがない場合には体積含水率上昇までの時間が遅くなり、クラックが入った場合に大きいクラックが入っている程、体積含水率の上昇が大きかった。また、クラックの大小により体積含水率の上昇箇所が異なっていた。以上の結果から、地震によってクラックが生じた斜面においては、土層内に降雨が浸透しやすくなっている傾向が示され、斜面の不安定化の一因になることが確認された。

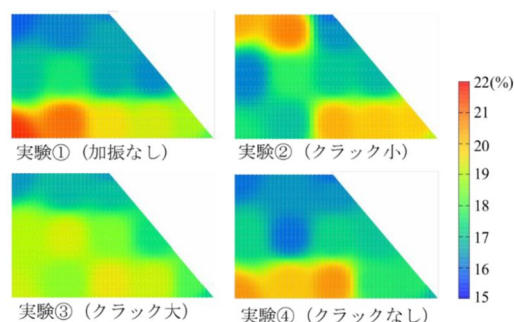
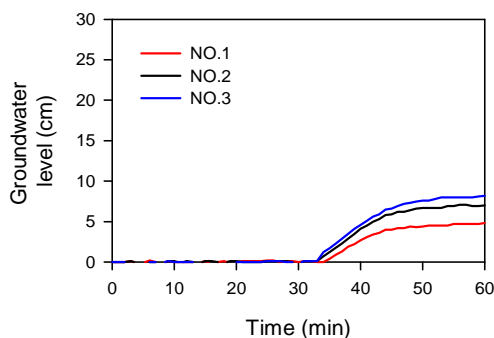


図1 降雨開始 35 分後の体積含水率の分布図

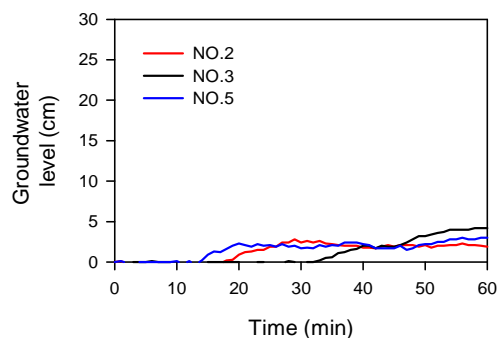
(2) 人工クラックを用いた地震後の降雨浸透特性の変化の評価

人工クラックを設定した実験条件では、土層下層の土壤水分の反応や地下水位の発生タイミングが人工クラックなしの実験 に比べて早い傾向を示した。人工クラックの深さが異なる実験 と実験 を比較した場合、実験 の方が土層深部への浸透が早いため、クラックの深さが土層深層への雨水の到達時間を短縮していると考えられる。一方で、地下水位の発生は、クラックが短い実験 が実験 に比べて早かった。この結果から、クラックが長い方が土層深部への雨水の浸透を促進させるものの、同時に浸透水を排水させる効果によって地下水位の形成を阻害している可能性が示唆された。

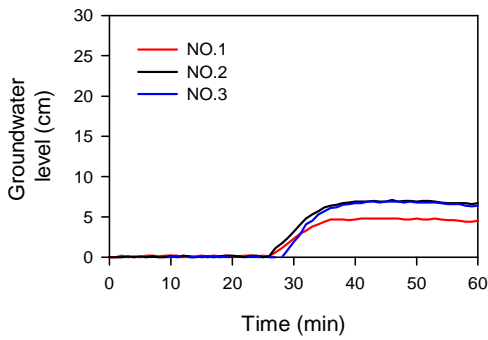
法面に作成したクラックでは他の条件に比べて一番早く地下水位が発生し、また、地下水位の上昇幅も大きかった。実験 では、法面のクラックは底部までの距離が短いため、すばやい雨水の深部浸透が起こり、地下水帯が形成されたと考えられる。また、法先で発生した地下水が斜面後方（壁面方向）へと流動、拡大し、地下水位を上昇させた可能性があることを示唆している。この地下水位の上昇は、実験 においてのみ斜面崩壊が発生した原因であると考えられ、クラックの位置が地下水帯の形成、発達過程に影響を及ぼしていることが示された。以上の結果から、自然斜面においても地震によって発生した亀裂、クラックの位置、深さを含む内部構造が降雨時の雨水の浸透や斜面の不安定化の重要な要因となることが示唆された。



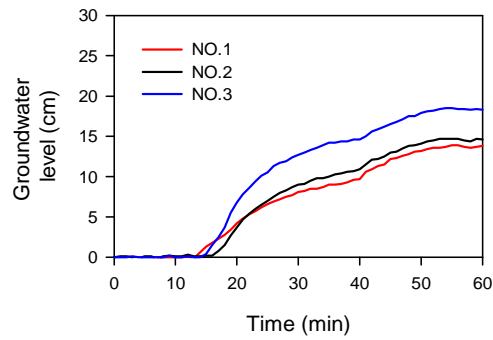
(a)実験 (人工クラックなし)



(b)実験 (人工クラック 10 cm)



(c)実験 (人工クラック 35 cm)



(d)実験 (法面人工クラック)

図-2 実験 ~ の降雨後の地下水位の変動

(3) 地震後の地盤強度の変化

Case1 と Case2 を比較した結果から、振動によって内部摩擦角が減少したことが示唆される。一方で、粘着力は増加している傾向が確認できた。図-3 に Case 1 と Case 2 との内部摩擦角の変化(Case2/Case1)をサンプル採取点ごとに比べたものを示す。また、図 4.1.3-55 に Case 2 の各点における粘着力の値を示す。模型斜面表層部は内部摩擦角が減少しているのに対し、模型斜面下層部では内部摩擦角の値が上昇していることがわかる。これは、斜面表層部は上載圧が小さいために振動によって地盤が緩み、斜面下層部は地盤模型斜面全体の沈下に伴う圧縮力が生じたことで締め固められたためであると考えられる。また、図-4 より、斜面表層部の粘着力は上昇しているのに対して、斜面下層部の粘着力にはそれほど変化が見られない。この結果は振動の影響が斜面表層部で大きく、下層部では小さいことを示していると考えられる。この結果から、斜面表層部は大きな土塊が生産されやすい状態となり、斜面下層部はせん断抵抗が小さく、すべり面が形成されやすい状態になっていると示唆される。地震時の斜面崩壊は、地震動に伴って斜面上部で大きなモーメントが働くことで、急勾配斜面の法肩部で崩壊が発生する傾向にあることが経験的に知られており、本実験において模型斜面の上部で内部摩擦角が低下していることは、経験的に知られていた現象を裏付ける結果であると考えられる。

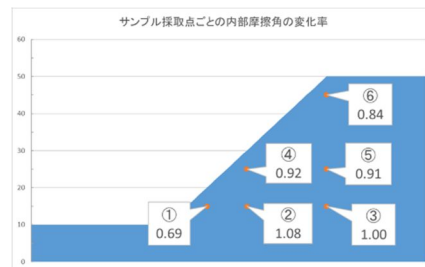


図-3 各点における加振前後での内部摩擦角の変化

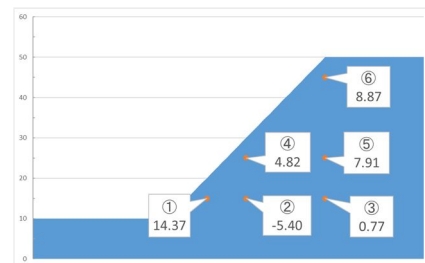


図-4 Case 2 の各点における粘着力 (c : kN/m²) の値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小泉圭吾・鈴木瑞生・古川貴一・小田和広・伊藤真一・藤本将光・矢野晴彦・鏡原聖史・笹原克夫	4. 巻 12
2. 論文標題 京都府綾部市安国寺測線 をモデル斜面とした動態観測手法の現状報告	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 2020論文集	6. 最初と最後の頁 6-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中森祐輔・小田和広・矢野晴彦・小泉圭吾・伊藤真一・藤本将光・鏡原聖史・笹原克夫	4. 巻 12
2. 論文標題 綾部市安国寺裏斜面における雨水浸透と地下水位の挙動に関するモニタリング結果の考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 2020論文集	6. 最初と最後の頁 6-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 DANJO Toru, SAKO Kazunari, FUJIMOTO Masamitsu, ISHIZAWA Tomohiro, ITO Shinichi, FUKAGAWA Ryoichi	4. 巻 77
2. 論文標題 IMPROVEMENT OF PREDICTION ACCURACY ON RAINFALL-INDUCED SLOPE FAILURES USING A RAINFALL INDEX CONSIDERING MEASUREMENT RESULTS WITH A TENSIO METER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)	6. 最初と最後の頁 87～102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejge.77.1_87	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 檀上徹・藤本将光・石澤友浩・深川良一・里深好文	4. 巻 14
2. 論文標題 重要文化財後背斜面での現地計測結果に基づく降雨量と斜面の変位量との関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 99 - 106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34382/00013611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 稲垣大基, 平岡伸隆, 伊良知慎太郎, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一	4. 巻 6
2. 論文標題 超音波導波管を用いた透水性の空間分布と水分状態の把握	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium2018論文集	6. 最初と最後の頁 6-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊良知慎太郎, 平岡伸隆, 稲垣大基, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一	4. 巻 6
2. 論文標題 室内降雨実験に基づくパイプ流周辺における地下水位変動に関する考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium2018論文集	6. 最初と最後の頁 P09
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤本将光, 野中慎介, 平岡伸隆, 深川良一	4. 巻 6
2. 論文標題 地震後に発生する亀裂を模した盛土斜面における降雨浸透特性に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium2018論文集	6. 最初と最後の頁 P07
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 高瀬蔵・藤本将光・原田紹臣・山本和輝・玉木健太・小西成治・疋田信晴・里深好文
2. 発表標題 急傾斜地における崩土の衝撃力と対策に関する実験的研究
3. 学会等名 第68回砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五井渉太・藤本将光・里深好文
2. 発表標題 清水寺後背斜面における豪雨時の降雨浸透特性に関する研究
3. 学会等名 第68回砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qinxin・里深好文・藤本将光
2. 発表標題 室内実験に基づく斜面形状が崩壊現象に及ぼす影響の検討
3. 学会等名 第68回砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣大基, 平岡伸隆, 伊良知慎太郎, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一
2. 発表標題 超音波導波管を用いた透水性の空間分布と水分状態の把握
3. 学会等名 Kansai Geo-Symposium2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊良知慎太郎, 平岡伸隆, 稲垣大基, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一
2. 発表標題 室内降雨実験に基づくパイプ流周辺における地下水位変動に関する考察
3. 学会等名 Kansai Geo-Symposium2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本将光, 野中慎介, 平岡伸隆, 深川良一
2. 発表標題 地震後に発生する亀裂を模した盛土斜面における降雨浸透特性に関する研究
3. 学会等名 Kansai Geo-Symposium2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本和輝, 藤本将光, 原田紹臣, 青木康真, 里深好文
2. 発表標題 急傾斜地における崩土の流動現象に関する実験
3. 学会等名 平成30年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲垣大基, 平岡伸隆, 伊良知慎太郎, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一
2. 発表標題 超音波現地透水試験法を用いた透水性の空間分布の把握
3. 学会等名 平成30年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊良知慎太郎, 平岡伸隆, 稲垣大基, 藤本将光, 田中克彦, 深川良一
2. 発表標題 斜面内のパイプ流周辺における地下水位変動に関する実験的考察
3. 学会等名 平成30年度砂防学会研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------