

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23580327

研究課題名(和文) 豪雨に対する斜面安全度指標の構築

研究課題名(英文) Development of a warning index to stability of slopes due to rainfalls

研究代表者

向後 雄二 (KOHGO, YUJI)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30414452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、豪雨による土構造物や自然斜面の安全度を判定する指標を地盤情報も加味して構築することを目的とした。そのためにはまず次の二点を明らかにした。降雨模型実験を通して斜面の崩壊メカニズムを明らかにすること、および豪雨による斜面の安全性を検討できる解析法(崩壊解析システム)を構築することである。実験結果から、斜面法先から飽和化し、その部分から崩壊が開始することがわかった。また、崩壊解析システムはこの現象を良く再現できた。指標としては、斜面法先での土中水圧の値を用いることが有効であることがわかったが、その測定には多くの労力が必要である。この研究から、斜面法先の保護が極めて重要である点が分かった。

研究成果の概要(英文)：The object of this research project is to develop a warning index to stability of slopes with the mechanical data of soils. In order to conduct it, we at first conducted following two points. The first one is to conduct 1g failure model tests due to rainfalls, and the second one is to develop slope stability analysis methods based on saturated and unsaturated consolidation analysis methods. It was found from the experimental tests that the saturated zones appear from the toes of the slopes and the failures start from the parts. The analysis method could simulate well the experimental results. It was found that the pore water pressure values measured at the toes of slopes are efficient as a warning index. However it takes much times and costs to measure them. It was found that it is very important to protect the toe parts of slopes.

研究分野：地盤工学

キーワード：降雨 斜面崩壊 不飽和土 弾塑性モデル 飽和不飽和圧密解析 斜面模型実験

1. 研究開始当初の背景

豪雨による自然災害は、地球温暖化と相まって年々その度合いを増している。毎年のように繰り返される斜面崩壊を検討できる安全度指標はない。現在用いられている指標は、降雨データに基づくもので、地盤情報を的確に考慮した指標は存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、豪雨による土構造物や自然斜面の安全度を判定する指標を地盤情報も加味して構築することを目的とした。そのためには次の点を明らかにする必要があった。一つ目は、降雨模型実験を通して斜面の崩壊メカニズムを明らかにすること、および二つ目として、豪雨による斜面の安全性を検討できる解析法(崩壊解析システム)を構築することである。

3. 研究の方法

目的で記述したように、一つ目として、斜面の崩壊メカニズムを明らかにするための、降雨模型実験を行った。二つ目として、飽和不飽和圧密解析に基づく崩壊解析システムを構築し、それを用いて模型実験のシミュレーションを行い、解析方法の検証とより詳細に崩壊メカニズムを検討した。それらの結果に基づいて安全度指標の構築を試みた。

(1) 重力場での降雨模型実験 : Fig. 1 に示した DL クレーで作製した基盤の上に、霞ヶ浦砂の薄い層が載った斜面模型を用いて実験を行った。模型の大きさは、斜面高さ 92cm, 斜面の頂部幅 42cm, 傾斜角 45 度である。詳細な寸法は Fig. 1 に示す通りである。模型は次の手順で所定の大きさの鉄製の土槽内に作製した。土槽は前面がガラス張りになっている。まず、DL クレーを含水比=16.6%に調整し、水平にまきだし、締め後の密度が最大乾燥密度でかつその層厚が 5cm になるように締め付けた。完成した基礎地盤の上に含水比=10%に調整された霞ヶ浦砂を水平にまきだし、Table 1 に示した各 Case に対する締め後の相対密度 $D_r = 0\%, 25\%, 50\%$ で、層厚が 4cm になるように締め付けた。降雨は土槽上部約 4m の高さに設置された降雨装置を用いた。ノズルの数、噴射幅、位置等はなるべく均一な雨が模型に作用するように、本試験に先立つ何回かの降雨実験によって決定した。採用した降雨強度は $I = 25\text{ mm/hr}, 50\text{ mm/hr}, 100\text{ mm/hr}$ である。実験中は土中水圧(間隙水圧)および変位を測定した。間隙水圧は Fig. 1 に示した所定の場所に埋設された P1 から P18 までの 18 個の水圧計を用いて計測した。変形は土槽前面のガラス面を通しての写真撮影によった。撮影された写真から画像解析法(PIV: Particle Image Velocity)を用いて変位を測定した。

(2) 崩壊解析システム : 解析は筆者らが開

発している有限要素法飽和・不飽和圧密解析コード(GEOCUP)を用いた。場の方程式としては、土全体に対する力の釣り合い式と間隙水に対する質量保存式を用いている。構成式としては、①不飽和土を対象とした弾塑性モデル、②水分特性曲線のモデルとして Tangential Model, ③透水係数は Mualem モデルを用いている。未知数は変位と間隙水圧である。

(3) 安全度指標の構築 : 上記(1)と(2)の研究成果を用いて安全度指標を検討した。

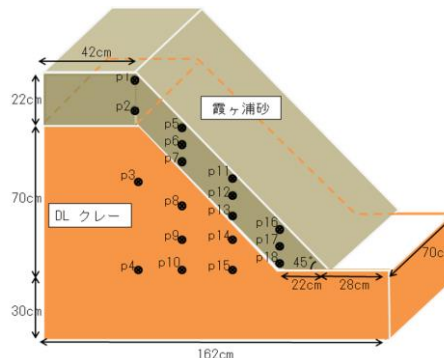


Fig. 1 実験に用いた模型斜面

Table 1 実験ケースと砂層の試験条件

Case	Rainfall Intensity (mm/hr)	Relative density (%)	Water content (%)	Dry density (g/cm ³)	Degree of saturation (%)
1	25	0	10.6	1.350	28.7
2		25	10	1.423	30.2
3		50	9.8	1.495	32.9
4	50	0	11	1.350	29.8
5		25	10	1.423	30.2
6		50	10	1.495	33.6
7	100	0	12.9	1.350	34.9
8		25	10	1.423	30.2
9		50	9.8	1.495	32.9

4. 研究成果

(1) 重力場での降雨模型実験結果 : 全ての Case における崩壊時の変位ベクトルを Fig. 2 に示す。この図より、変位は砂層に集中し、DL クレー層ではほとんど変位しないことがわかる。降雨強度の強い Case ほど大きな変位が観測された。相対密度 $D_r=0\%$ の斜面 (Case 1, 4, 7) では、変位は全ての Case で斜面にほぼ平行に生じ、大きな変位が観測された範囲は崩壊した範囲と一致した。相対密度 $D_r=50\%$ の斜面 (Case 3, 6, 9) では、降雨強度の違いによって崩壊のパターンが変化した。すなわち、降雨強度が大きくなるほど大規模な表層崩壊が生じた。降雨強度が小さな場合には、法先部の崩壊が生じた後、崩壊は上部へと進行する進行性破壊が生じた。そのため、降雨強度が小さい場合には、ベクトルの向きは水平方向が卓越した。一方、降雨強度が大きな場合には、そのベクトルの向きは斜面に平行となった。相対密度 $D_r=25\%$ の斜面 (Case 2, 5, 8) では、挙動は相対密度 $D_r=0\%$ と 50% の中間の挙動が見られた。

Fig. 3は最初のすべりが生じた時刻で計測された間隙水圧分布を示している。どのCaseでも、法先部で正の間隙水圧が観測されている。降雨強度が強いほど、浸潤面上昇して、正の間隙水圧が観測される領域が増加している。浸潤面が斜面表面部に現れるとその部分で急速に斜面の安定性は損なわれる。このことが、降雨強度が強いほど崩壊は大規模化する原因と考えられる。砂層の密度の違いによる浸潤面の形成の違いは小さく、むしろ降雨強度の違いの方が大きい。

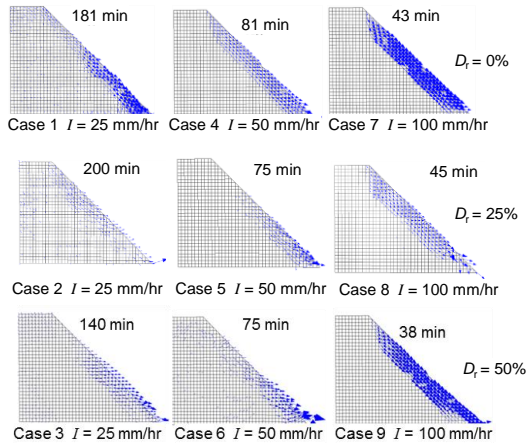


Fig. 2 崩壊時の変位ベクトル図

Fig. 3に示された時間は降雨開始からの時間で、最初にすべりが生じた時間である。Case 1から9の崩壊開始までにかかった時間は、それぞれ182, 81, 43, 165, 73, 39, 120, 60, 30分で、降雨強度および密度の増加とともに減少している。特に、降雨強度の増加による時間の減少は密度のそれよりもはるかに大きい。このことは、この実験のシリーズでは、崩壊は法先部分の水分量が支配的であったことを示している。すなわち、法先部分で水分量がほぼ飽和に達した時点で崩壊が開始する。密度が高いほど初期飽和度も高く、間隙比も小さいから、同じ降雨強度であれば、早く飽和する。さらに、降雨強度が高いほどこの部分の飽和は速くなる。

崩壊の形態は降雨強度が小さいほどおよび密度が大きいほど進行性破壊が生じた。Case 7, 8, 9を比較すると、密度が高い模型ほど最初のすべりが生じてから、全体的な崩壊が生じるまでの時間が長い (Fig. 2と3の時間差を参照)。また、Case 4, 5, 6を比較すると、密度が小さな模型では、全体表層崩壊が、大きな模型では、進行性破壊が生じている。これは、はじめ小さなすべりが法先で生じるが、その後、密度の大きな模型ほどこの状態を保持し、浸潤面が上昇しながら、崩壊が上へ移動した。低い密度では、初期すべりが生じた後、斜面全体がこの状態を保持できなくなり、早い時間に全体すべりが生じた。

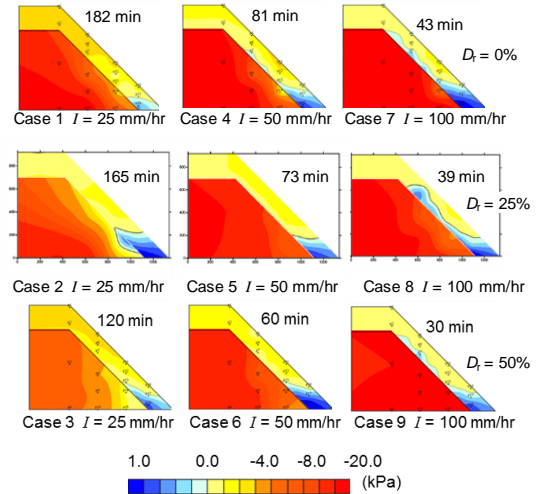


Fig. 3 最初のすべりが計測された時刻での間隙水圧分布

(2) 崩壊解析システムを用いた模型実験のシミュレーション結果：模型実験の解析は、まず模型の作製過程を模した築堤解析を行い、初期応力状態を計算した。次に、降雨時の解析を実施した。平面ひずみ状態を仮定した二次元解析を行った。境界条件と有限要素メッシュは Fig. 4 に示す通りである。変位に対する境界条件は、左右端で鉛直方向自由、水平方向固定、基礎底面では両方向とも固定とした。水理的境界条件は、端面は全て非排水条件とし、斜面、天端および基礎地盤表面は築堤過程では浸出条件を満足し、降雨時には降雨強度に相当する流量を作用させた。有限要素メッシュは変位に対しては、アイソパラメトリック要素を、間隙水圧に対してはスーパーパラメトリック要素を用いた。

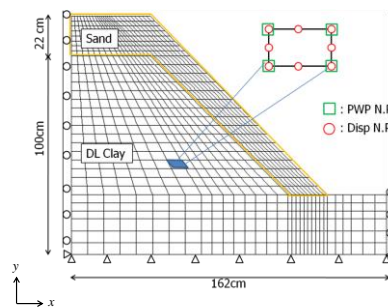


Fig. 4 解析に用いた有限要素メッシュ

実験から次のような点が明らかとなった。
 ①全てのケースで破壊が生じた。破壊には2つのパターンがあり、それらは進行性の破壊と大きなスケールの全体表層破壊である。どちらも最初盛土法先から小さな崩壊が開始し、その後上部へ徐々に破壊が進行する進行性の破壊と、法先の破壊から一気により大きな破壊が生じる破壊である。降雨強度が小さいほどおよび密度が大きいほど進行性破壊が生じた。
 ②変位の方向は上記の二つの破壊

パターンで異なった。すなわち、進行性の破壊では変形は斜面に平行に生じ、時間と共に法先で蓄積された。一方、全体表層破壊では水平変位の成分が支配的であった。③ 間隙水圧は、どのケースにおいても斜面の法先から負圧が解消され、斜面は飽和し、徐々に斜面上部に飽和が進行した。

シミュレーション結果を Fig. 5 から 7 に示す。Fig. 5 は初期のスベリが法先で発生した時の変位ベクトルで、Case 1 を除いて変位は法先のごく限られた部分に集中している。このことは、崩壊は法先の小さなスベリから始まるという実験結果①と合致している。Fig. 6 は初期スベリが発生したと推定した時刻での間隙水圧分布である。降雨強度が $I = 25 \text{ mm/hr}$ では、法先とその基礎地盤でほぼ飽和状態にある。降雨強度が大きくなると法先部分でのみ正の間隙水圧が計算されている。この部分は Fig. 5 の変位の集中領域とほぼ合致する。Fig. 7 は同一密度 ($D_r = 25\%$) で降雨強度の異なるケースの最大せん断ひずみ分布の経時変化を示している。降雨強度の小さなケースの方がひずみの進行が遅い。このことは、降雨強度が小さいほど進行性破壊が生じることを示唆している。最も降雨強度の大きな Case 8 では、短時間の内にひずみが進行する。このため全体表層崩壊が起こり易い。このことは、実験結果②と合致している。

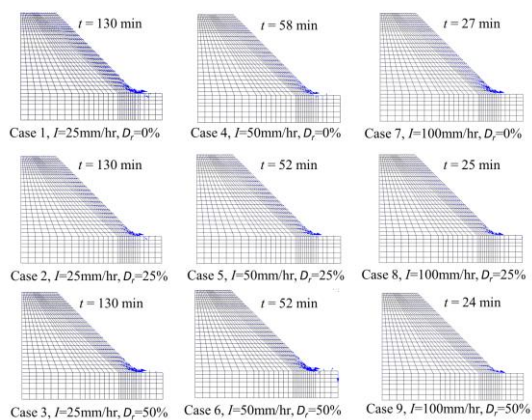


Fig. 5 法先での変位が顕著になった時の変位ベクトル (シミュレーション結果)

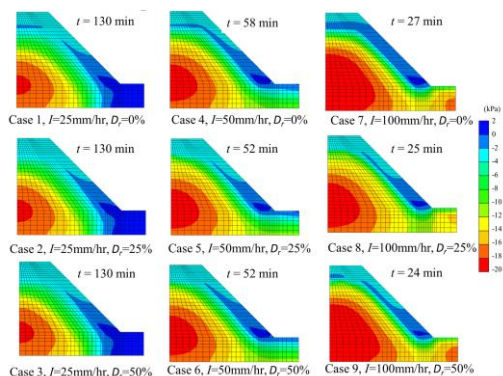


Fig. 6 法先での変位が顕著になった時の間隙水圧分布 (シミュレーション結果)

このように、降雨による斜面崩壊のメカニズムをある程度明らかにすることができた。

(3) 安全度指標の構築結果：上記 (1) と (2) の研究成果を用いて安全度指標を検討した。その結果、安全度指標としては、斜面法先での間隙水圧の値を用いることが有効であることがわかった。しかし、測定には多くの労力が必要である。そのため重要箇所を選定し、安価な斜面崩壊防止策を施すことが肝要である。その際、斜面法先の保護が極めて重要であることが分かった。

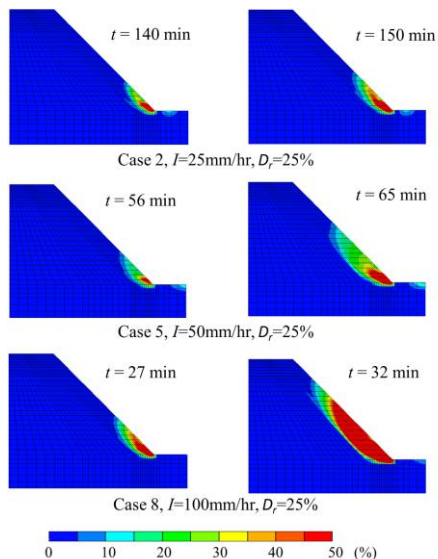


Fig. 7 最大せん断ひずみの経時変化 (シミュレーション結果)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 向後雄二, 盛土材料の水理学的および力学的繰り返し特性の把握とそのモデル化に関する研究, 農業農村工学会ダム研究委員会シンポジウム論文集, 123-146, 2013.11. (査読なし)
- ② Kohgo, Y., Chueasamat, A., Hori, K. and Saito, H., Simulations of 1G Slope Failure Model Tests due to Rainfalls, Proc. 3rd Korea-Japan Workshop on Unsaturated Soils, 123-132, 2013.11. (査読なし)
- ③ Tokoro, N., Tanikawa, K., Saito, H., Kohgo, Y. and Hori, T., On 1G slope failure model tests due to rainfalls: Difference of failure patterns due to difference of densities of a subsurface sand layer -, Proc. 2nd Advances in Transportation Geotechnics, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62135-9, 755-760, 2012.9. (査読有)

研究者番号：30414452

〔学会発表〕（計 9 件）

- ① Kohgo, Y., Slope stability analysis methods and application to 1g failure model tests, 6th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Guilin, China, 2015.10.
- ② 向後雄二, Chueasamat Anusron, 新出友宏, 齊藤広隆, 堀俊和, 模型実験による降雨に伴う斜面の安全性, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集 富山国際会議場, 1981-1982, 2013.7.25.
- ③ Tokoro, N., Tanikawa, K., Saito, H., Kohgo, Y. and Hori, T., On 1G slope failure model tests due to rainfalls: Difference of failure patterns due to difference of densities of a subsurface sand layer -, 2nd Advances in Transportation Geotechnics, Sapporo, Hokkaido University, 2012.9.12.
- ④ 所伸彦, 向後雄二, 齊藤広隆, 堀俊和, 飽和・不飽和圧密解析による重力場における降雨模型実験の解析, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集 八戸工業大学, 2012.7.14

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~kohgo>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向後 雄二 (KOHGO, YUJI)

東京農工大学・大学院農学研究院・教授

(2) 研究分担者

齊藤 広隆 (SAITO, HIROTAKA)

東京農工大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：70447514

(3) 連携研究者

堀 俊和 (HORI, TOSHIKAZU)

農研機構・農村工学研究所・研究室長

研究者番号：20414451

林田 洋一 (HAYASHIDA, YOICHI)

農研機構・農村工学研究所・主任研究員

研究者番号：50414454