

豪雨時の斜面崩壊メカニズムに関する 遠心力場散水シミュレーション

CENTRIFUGAL SIMULATION ON FAILURE MECHANISM OF SLOPE SUBJECTED TO HEAVY RAIN

小林 睦¹・廣岡明彦²・松井みゆき³

Makoto KOBAYASHI, Akihiko HIRO-OKA and Miyuki MATSUI

¹豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1)

E-mail: makotok@toyota-ct.ac.jp

²九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

E-mail: ahirooka@civil.kyutech.ac.jp

³豊田工業高等専門学校専攻科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1)

Key Words: centrifuge model test, heavy rain, failure mechanism, embankment

1. はじめに

我が国では過去 10 年の年平均で 1000 件程度土砂災害が発生し、豪雨・台風災害に多く見舞われた平成 16 年には、2500 件を超えた¹⁾。一方、急傾斜地崩壊危険箇所は 29 万箇所(保全人家 1 戸以上)に及び、全てをハード面から整備することは昨今の国・自治体の財政状況を鑑みると困難を極める。

さらに、近年の年降水量のトレンドは減少傾向にあるものの、各年の雨量の変動幅は拡大傾向にある²⁾。その中でも、1 時間降水量 50mm および 100mm 以上の降水の発生回数は増加傾向にあり、局所的集中豪雨による土砂災害の危険性は増大しているといえる。

ところで、遠心模型実験は、小型模型に遠心加速度を付与することによって構造物の自重効果を適切に再現できるために、現象の発展過程の観察が容易であり、特に、実際に発生する機会が非常に少ない災害時の現象の観察には有効な手段であるといわれている³⁾。このように、視覚的に理解を助けるツールであることに着目すると、遠心模型実験において豪雨シミュレーションを適切に実施することができれば、豪雨時の斜面災害の発生過程を詳細に観察することができるとともに、これ

らの実験事例を一般市民レベルにおける災害に対する認識を向上させることに活用できよう。

そこで本論文では、降雨強度 40mm/Hr 程度の豪雨に加えて 70mm/Hr に設定した遠心力場散水実験の結果について報告するとともに、盛土締固め時の飽和度を変化させたところ、地盤の浸潤能力に違いが観察されたため、これが崩壊・変形挙動に及ぼす影響について報告する。また、これらの実験事例を土砂災害の軽減のための教育支援ツールとして活用するため⁴⁾の方向性について述べる。

2. 遠心力場散水実験

(1) 浸透現象に関する相似則

重力加速度の N 倍の遠心力場において、散水シミュレーションを実施する場合、散水強度を N 倍に調節して浸透現象を再現する手法^{5), 6)}に対して、地盤材料の粒径を調整するか間隙流体の粘性を調節して浸透速度をコントロールする手法もある⁴⁾。破壊現象を扱う場合、これらのうち前者については、粒径・形状に依存する強度・変形特性も満足させることは困難であるために、筆者らは後者による対応を試みてきた^{7), 8)}。すなわち、地

$$k = K(\rho_w g / \mu) \quad (1)$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \frac{K_p(\gamma_w)_p \mu_m}{K_m(\gamma_w)_m \mu_p} = \frac{\rho_w g \mu_m}{\rho_w (Ng) \mu_p} = \frac{\mu_m}{N \mu_p} \quad (2)$$

盤の透水係数は、土質材料の絶対透水係数を用いると(1)式で表され、Darcy 則により浸透現象が記述されるならば、模型地盤と実規模構造物との浸透速度の相似率は、(2)式のようになる。ここで、 k : 地盤の透水係数、 K : 材料の絶対透水係数、 ρ_w : 間隙流体の密度、 g : 重力加速度、 μ : 間隙流体の粘性係数を表し、添字 p, m はそれぞれ実規模構造物、小型模型に対応している。以上のことから、実規模構造物と同一の地盤材料を用いて遠心力場での浸透現象を扱うには、時間の整合を図るために、 $v_p = v_m$ を満足させなければならないので、間隙流体の粘性を水の N 倍に調節し、重力場における見掛けの透水係数を $1/N$ にする必要がある。本研究における一連の散水実験においては、小型模型に重力加速度の 50 倍の遠心加速度 ($50g$) を付与するために、豊浦珪砂を試料に用いた透水試験の結果より、

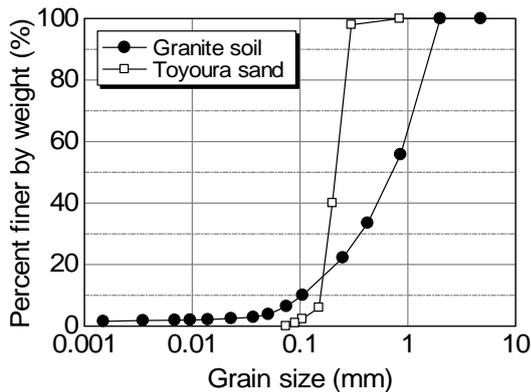


図-1 粒径加積曲線

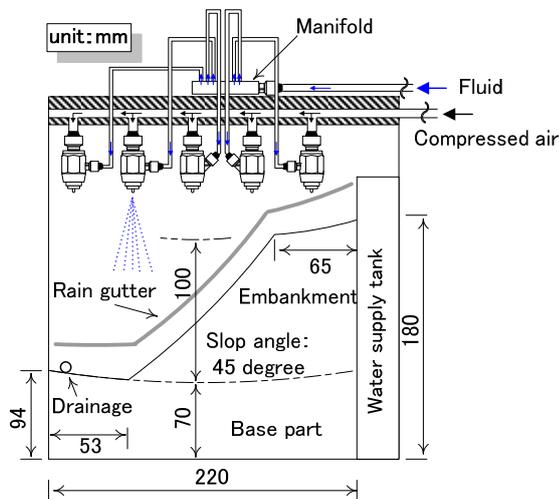


図-2 模型地盤概要

2.25%濃度のメチルセルローズ水溶液を間隙流体として使用することとした。

(2) 試料

本研究においては、愛知県豊田市内にて採取したまさ土の 2mm ふるい通過分を試料に用いた。図-1 に粒径加積曲線を示す(図中には豊浦珪砂も併せて示す)。これより地盤工学的に分類すると細粒分まじり砂(S-F)に分類される。

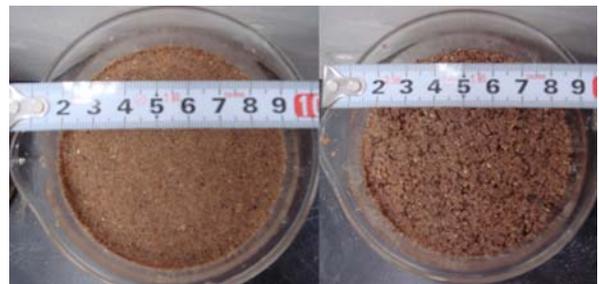
(3) 実験システム

a) 模型地盤作製方法

図-2 に模型地盤の概要を示す。模型縮尺は $1/50$ であり、実規模斜面高さは 5m に相当する。含水比 10% に調整した試料を土槽内に投入し、乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g}/\text{cm}^3$ になるように締め固める。各層の仕上り厚は 2cm とし、これを 18cm まで繰り返す。締め固め終了後、型枠を用いて法面勾配 45 度の模型斜面を成形する。この際、遠心加速度が作用する半径に併せて模型地盤表面は湾曲させている。

b) 模型地盤の間隙構造による雨水の浸透特性

盛土の初期飽和度を変化させたケースにおいては、含水比調整のために加水したところ、地盤材料が団粒化し、これを締め固めると、図-3 に示すように、飽和度 80% の方では、マクロ・ポロシティと呼ばれる間隙の大きな領域が随所に見られた。締め固め時の飽和度が異なれば、透水係数が大きく異なってくると指摘されている¹⁰⁾ ように、マクロ・ポロシティに起因して変化する地盤の透水能力を透水係数で評価しようと試みたところ、本研究における地盤材料においては、飽和度 45% の場合の飽和透水係数が $5.0 \times 10^{-4} (\text{cm}/\text{sec})$ に対して、飽和度 80% で締め固めた地盤の飽和透水係数は $2.0 \times 10^{-4} (\text{cm}/\text{sec})$ と小さくなった。予想に反して、透水能力が飽和度 80% で小さくなった理由は、透水試験用の供試体を作製し、浸水させて飽和させると間隙の大きな領域に細粒分が



右 : 飽和度 45% 左 : 飽和度 80%

図-3 マクロ・ポロシティ

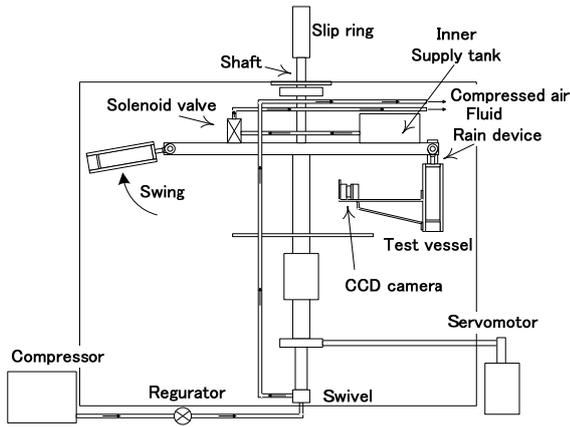


図-4 T.N.C.T. Centrifuge

表-1 実験条件

実験コード	初期飽和度 (%)	降雨強度 (mm/Hr)	散水時間※ (min)
Sr45R30	45	30	60
Sr45R70	45	70	60
Sr80R40	80	40	180

※ 散水時間を実規模換算するには 50 倍する。

溜まることが確認されており、このため大きな間隙で目詰まりが生じることに起因すると考えられる。一方、模型実験で用いる降雨散水ノズルにより、雨水の浸透状況に関する簡易散水実験(80mm/Hr 程度)を実施したところ、飽和度 80%で作製された供試体の方が、表層に湛水することなく雨水は浸透していく様子が観察された。一般に、地盤の飽和度が大きくなると透水係数は小さくなり、雨水の浸潤能力も小さくなることが知られている。しかしながら、本研究においては、飽和度 80%の地盤の方が、透水係数は小さいものの雨水の浸潤能力は大きいことが観察された。これは、締固め時の含水状態が異なるために形成された間隙の大きさの違いに起因するものであり、降雨浸透現象が、地盤の現在の飽和度だけでは説明できない場合もあることを示唆している。

c) 降雨散水装置

本研究では、散水実験中の盛土表面の異常な水食を防止するために、噴霧孔付近で流体に圧搾空気を当てる 2 流体ノズル⁹⁾を採用し、粘性流体を微粒化した。また、遠心力载荷装置(図-4 参照)は外部からの流体の供給系統(Swivel)が 1 系統であるため、内部に給水タンクを設け、圧搾空気を外部から供給するシステムとした。さらに、遠心力载荷中の流体の自由落下を防ぐた



5 分 (250 分) 経過 : 法先崩壊発生後



60 分 (50 時間) 経過

図-5 散水実験中の盛土の様子 (Sr45R30)

めに、内部給水タンクと降雨装置との間にソレノイドバルブを配し、開閉時間をタイマーで制御することで散水量をコントロールした。

d) 実験条件

表-1に実験条件を示す。降雨強度は、大雨警報が発令される程度(30-40mm/Hr)に加えて、現象の発現確率が低いような豪雨を想定した 70mm/Hr の 2 種類を設定した。

e) 散水実験

模型地盤を作製後、遠心力载荷装置に搭載し、50g の遠心加速度を付与する。散水実験は、外部タイマーによりソレノイドバルブの開閉時間を調節し、散水量を制御して行う。散水実験中にゲーターを伝って模型地盤下流側に貯留した水は、基盤部分に浸透させ、その水位は模型土槽背面に基盤部の高さに合わせて空けた孔により規定している。遠心力载荷中の模型地盤の挙動は、CCD カメラによりリアルタイムの映像を観察・記録する。これらの映像のスナップショットの模型地盤の形状および格子点の座標を読み取ることで、散水実験中の模型地盤の挙動を図化した。

図-5 に Sr45R30 における散水実験中の模型地盤の挙動を示す。なお、括弧内の数値は実規模換算値である。ここで、模型地盤が歪んで見えるのは、CCD カメラに広角レンズを取り付けているためである。

3. 実験結果および考察

(1) 降雨強度の影響

図-6 に Sr45R70 の最終形態を示す。これより、Sr45R30 と同様に表層の崩壊が確認でき、盛土内部の顕著な変形は見られない。また、図-7, 8 に両実験ケースにおける散水実験前後の斜面形状の変化を示す。これらより、両者ともに法肩から斜面下部にかけて法面の極めて表層部が崩壊していることと法先部にその崩壊土砂が堆積していることが分る。このように、与えた降雨条件に対して、極めて表層部の飽和度の上昇に伴うせん断抵抗力の低下と土塊重量の増加に起因して崩壊が発生し、その土砂が斜面下部に堆積したことが指摘できる。

一方、実験中に撮影した映像より、Sr45R30 においては、散水開始から 28 秒後(実規模換算:23 分後)に表層部が崩壊していくことが観察され、Sr45R70 においては、電波障害のため正確な崩壊状況は記録できていないが、22 秒後(実規模換算:18 分後)には崩壊が発生していた。このように、豪雨時の災害発生時期は、規模の小さな表層崩壊が、降雨開始から 20 分程度の間に発生したことになり、地盤条件によっては、災害発生までに避難勧告が間に合わない場合も考えられる。

(2) 地盤の初期状態の影響

Sr45R30 においては、降雨開始から早い時期に表層崩壊が発生したことは既に述べたとおりであり、図-9 に Sr80R40 における散水実験中の様子を示す。このケースにおいては、時間の経過とともに模型盛土背後の給水タンク内水位が上昇していることから、雨水が地盤内に浸透し、盛土内地下水位が上昇していく様子が確認された。図-10 に散水実験前および 60 分経過後の斜面形状の比較を示す。これより、斜面表層の形状は初期状態から大きな変化はなく全体的に沈下していることが指摘できる。これは、雨水の浸透に伴う盛土重量の増加に起因して、体積圧縮が生じたものと推察される。このケースでは、散水時間 60 分を経過したあたりより、ようやく盛土の表層崩壊が観察され始めた。このように、盛土造成時の飽和度の違いに拘わらず、豪雨時には表層崩壊が発生することが観察された。しかしながら、崩壊の発生時期および変形挙動は大きく異なってきた。地盤の初期飽和度が小さいと、降雨開始から表層崩壊ま



図-6 最終形態 (Sr45R70)
60 分 (50 時間) 経過

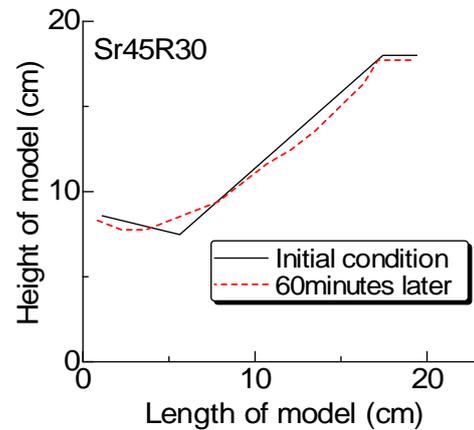


図-7 斜面形状の比較 (Sr45R30)

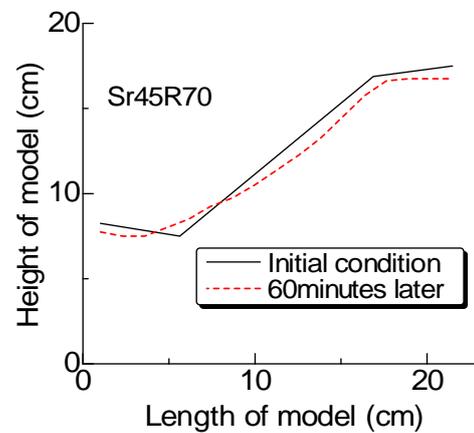


図-8 斜面形状の比較 (Sr45R70)

でに要する時間が短いことに対して、締固め時の飽和度に起因して地盤の透水能力が高くなると、豪雨時においても雨水が地盤内に浸透していくために、盛土内水位が上昇し、まずは、斜面全体が変形していく様子が確認された。Sr80R40 においては、散水から 60 分が経過した時点より、表層崩壊が発生し、これが順次繰り返されていく様子が観察された。最終的には、図-11 に



30分（25時間）経過：浸透流発生



60分（50時間）経過：表層崩壊開始



120分（100時間）経過



180分（150時間）経過：最終形態

図-9 散水実験中の盛土の様子（Sr80R40）

示す変位ベクトル図（図中の■は盛土の初期形状を表す）のように、盛土内の地下水位が上昇したこと起因

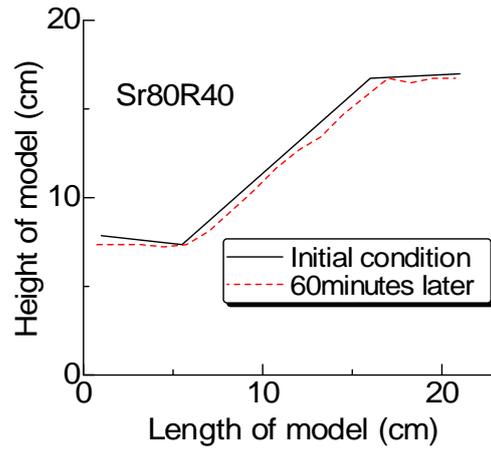


図-10 斜面形状の比較（Sr80R40）

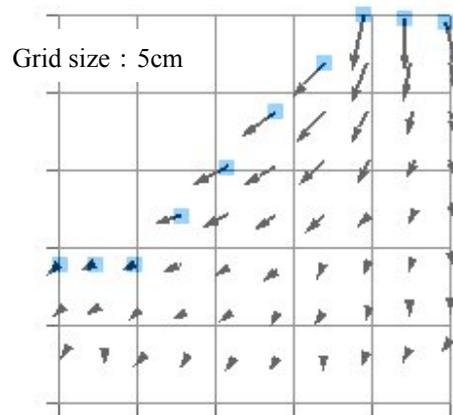


図-11 変位ベクトル図：180分経過（Sr80R40）

して、飽和領域の拡大によるせん断強度の低下と滑動モーメントの増加によるせん断変形が進行していった。これより、すべり面に沿った大きな崩壊には至らなかったものの、盛土斜面が不安定化していることが窺える。

このように、盛土の締め固め時の飽和度の違いに起因して間隙構造が異なってくると、雨水の浸透状況が異なってくるために、斜面の変形および崩壊挙動に影響を及ぼした。雨水が地盤内に浸透し、地下水位が上昇してくると、瞬時に大きなすべり円弧に沿って崩壊する場合は指摘されており¹¹⁾、豪雨時において、降雨浸透の状況が変わってくると、災害規模が大きくなる可能性もある。

4. 防災・減災支援への活用

土砂災害を防ぐ、あるいは減らすためには、地域住民のソフト対策は重要である。例えば、災害対策事業が未完了の地域の被害を軽減するためには、自らで避難行動をとれるように、予め周辺住民に対して崩壊形態お

よび発生時期を知らせる必要がある。そのための解決策のひとつとして、市民レベルでは容易に観察することのできない崩壊現象を紹介することで、斜面災害への意識を向上させることが重要である。本研究においては、遠心力場における浸透現象に関する相似則を考慮して、適切に散水シミュレーションを実施することができ、映像として記録される豪雨時の盛土斜面の変形挙動は、現象が進展していくプロセスの理解を助けるために有効であると考えられる。また、同一の地盤形状であっても、その築造過程での含水状態が異なれば、雨水の浸透状況が異なってくることから、これらの実験事例は、斜面災害のメカニズムが複雑であることを示すための支援ツールにもなるといえる。

5. おわりに

本研究においては、豪雨時の斜面崩壊機構を適切に再現するために、間隙流体の粘性を調節した遠心力場散水シミュレーションを実施した。その結果、以下のような結論を得た。

- 地盤の初期飽和度が小さい盛土斜面が豪雨を受けた場合、その程度の違いに拘わらず、降雨開始から早い段階で盛土表層部での崩壊が観察された。
- 同一地盤材料を用いた盛土においても、締固め時の飽和度により、マクロ・ポロシティが形成され、地盤の雨水浸透能力が高くなる場合もある。このとき雨水は地盤内へ浸透し、やがて盛土内の地下水を上昇させて斜面全体を大きく変形させた。
- 遠心力場散水シミュレーションにより、降雨条件や地盤条件によって、災害の発生時期・崩壊形態が異なってきたことを視覚的に示すことができたといえよう。

謝辞：本研究は、科研費(課題番号:19760332)の助成を受けて行ったものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省:自然災害対策, 国土交通白書, pp.178-194, 2007
- 2) 国土交通省:自然災害の頻発, 国土交通白書, pp.3-19, 2006
- 3) 岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利:講座 遠心模型実験—実験技術と実務への適用— 2. 遠心模型の相似則, 実験技術—利点と限界, 土と基礎, vol.52, No.10, pp.37-44, 2004
- 4) 中筋章人:なぜ「土砂災害ハザードマップ」はできないのか, 応用地質, 第46巻, 第5号, pp.250-255, 2005
- 5) T. Kimura, J. Takemura, N. Suemasa & A. Hiro-oka : Failure of fills due to rain fall, Centrifuge 91, Balkema, pp.509-516, 1991
- 6) 伊藤直幸, 手島昂一郎, 片田敏行, 末政直晃, 玉手聡:遠心場降雨実験による斜面表層崩壊シミュレーション, 第42回地盤工学研究発表会, pp.1977-1978, 2007
- 7) 小林睦, 廣岡明彦, 永瀬英生, 清水恵助, 片山亮, 織掛晴広:法先排水工とジオテキスタイル補強工が盛土の降雨時安定性に及ぼす影響について, 土木構造・材料論文集, 第17号, pp.97-104, 2001
- 8) 片山亮, 廣岡明彦, 清水恵助, 永瀬英生, 小林睦, 大原幹雄:豪雨時におけるジオテキスタイル補強盛土の安定性に関する遠心模型実験, 第37回地盤工学研究発表会, pp.2189-2190, 2002
- 9) 霧のいけうち:微霧発生ノズル BIM シリーズ/小噴量形, 二流体ノズル製品カタログ, pp.17-18
- 10) 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会:締固め土の解釈, 不飽和土の挙動と評価, pp.143-147, 2004
- 11) Centrifugal modeling of slope failures due to seepage flow : A. Hiro-oka, M. Kobayashi, H. Nagase & K. Shimizu, Recent Development of Theory and Practice in Geotechnology, pp.150-157, 1999

(2008. 5. 16 受付)