

豪雨時の盛土斜面の崩壊機構に関する遠心力場散水シミュレーション

Centrifuge Model Tests on Failure Mechanism of Embankments due to Heavy Rain

小林 睦 (こばやし まこと)

豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科

廣岡 明彦 (ひろおか あきひこ)

九州工業大学大学院工学研究院准教授 建設社会工学研究系

西垣 見歩子 (にしがき みほこ)

豊田工業高等専門学校 環境都市工学科

1. はじめに

我が国では、梅雨や台風襲来期のような豪雨期にしばしば斜面災害が発生している。特に、昨今では、局所的な豪雨に見舞われる機会が多くなり、時間雨量100 mmを超えるような豪雨の10年間平均発生回数が30年前の約2倍に達し¹⁾、斜面災害の危険は増すばかりである。平成13年に施行された「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」を受けて、各自治体においては危険区域の選定等、土砂災害危険箇所マップの作成に取り組んでいるところであり、我々研究者においても、ハザードマップの有効活用に資する研究成果の社会還元が急務であると指摘されている²⁾。

ところで、降雨パターンは、盛土内に浸透流が発生するタイプ(継続型)と表層の飽和度が上昇するタイプ(衝撃型)に分類され³⁾、筆者らは、前者についてジオテキスタイル補強盛土の崩壊メカニズムを調べるための一連の遠心模型実験を実施してきた⁴⁾。

遠心模型実験では、小型模型においても土の自重効果を適切に再現でき、現象の発展過程の観察が容易であることから、災害発生メカニズムの解明に関しては有効なツールであるといわれている⁵⁾。この種の模型実験の結果の妥当性は、適切なモデリングにより実施されたか否かが指標となる。その中でも、透水に関する時間の相似則においては、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、浸透現象に関する時間の相似則を考慮して、降雨強度を対象とする実規模降雨強度の N 倍に設定する必要がある^{6),7)}。これに対して、筆者らは、これらの相似則を考慮するために、間隙流体の粘性を調節して^{8),9)}、豪雨時におけるジオテキスタイル補強盛土の安定性を調べてきた¹⁰⁾。

本研究では、降雨強度が盛土の崩壊現象に与える影響を調べるとともに、盛土の作製時の飽和度を变化させたところ、降雨浸透現象および変形挙動が異なってきたので以下に報告する。

2. 遠心模型実験

2.1 間隙流体の粘性

本研究では、縮尺1/50の小型模型に50 gの遠心加速度を付与して散水実験を実施する。そこで、間隙流体を

水の50倍に増粘するためにメチルセルロースを使用することとした。メチルセルロース濃度と透水係数の関係を求めたところ、水の1/50の透水係数を与えるメチルセルロース濃度が2.25%であることが分かり、一連の遠心模型実験にはこれを用いることとした。

2.2 遠心力場散水システム

散水実験中の盛土表面の異常な水食を防ぐために、散水ノズルには、噴霧孔付近で流体に圧搾空気を当てて流体を微粒化(平均粒子径50 μm 以下:メーカー公表値¹¹⁾)させることのできる2流体式ノズルを採用した。また、図-1に示すように、遠心力载荷装置配管において、遠心力载荷中(回転中)に、散水流体が自由落下することを防ぐために、内部給水タンクと降雨装置とを連結するチューブは、一旦シャフトの反対方向に配した。内部給水タンクには0.04 MPa程度の圧力をあらかじめ与えておき、降雨装置との間に設置したソレノイドバルブの開閉時間をタイマー制御にて調節することで、散水量をコントロールした。

2.3 実験システム

盛土材料には、豊田市内で採取したまさ土(細粒分混じり砂:S-F)を用いた。図-2に実験システムを示す。模型縮尺は1/50であり、実規模斜面高:5 m, 法面勾配:45度, 締固め度:80%である。本報告においては、地盤の初期飽和度および降雨強度を幾つか変化させて実施した降雨散水シミュレーションについて紹介する。

模型地盤を作製するにあたって、所定の含水比に調節

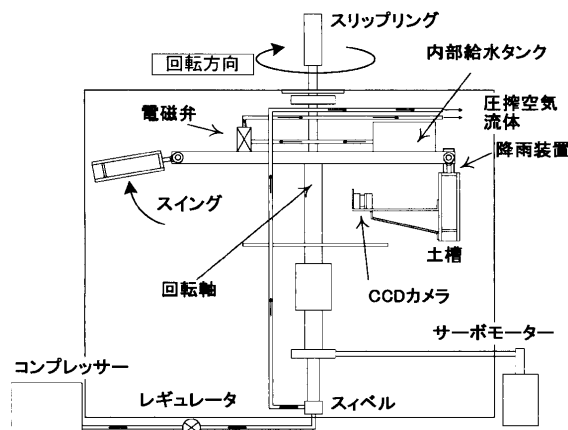


図-1 T.N.C.T Centrifuge

した試料を模型土槽に投入し、あらかじめ定めた乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ になるように締め固める。締め固め層厚は 2 cm とし、この作業を模型斜面高以上まで繰り返す。締め固め終了後、模型土槽の前背面を取り外し、型枠を取り付けて斜面模型を成型して作製する。斜面模型表面は、遠心加速度の作用する半径にあわせて湾曲させている。ここで、含水比 $w = 10.0\%$ で締め固めた土質試料の飽和透水係数は $5.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ であった。

2.4 遠心力場散水シミュレーション

表—1に実験条件を示す。ただし、カッコ内の散水時

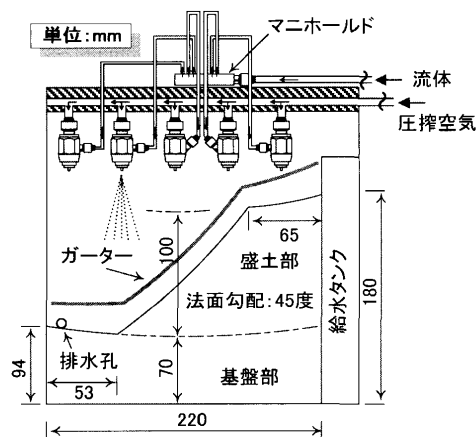
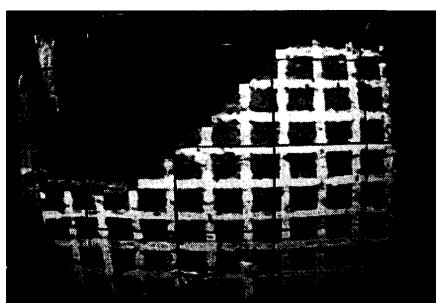


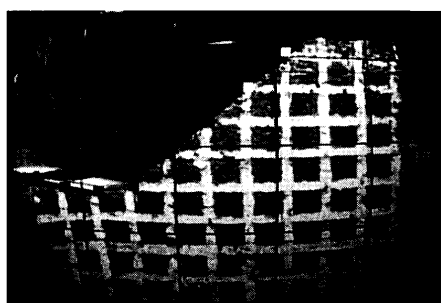
図-2 実験システム図

表—1 實驗條件

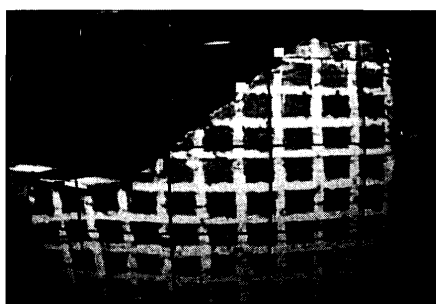
実験コード	飽和度 (%)	降雨強度 (mm/Hr)	散水時間 (min)
Sr45R30	45	30	60 (50Hr)
Sr45R70	45	70	60 (50Hr)
Sr80R40	80	40	180 (150Hr)



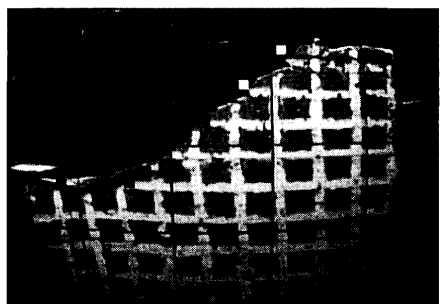
遠心加速度 (50G) 付与：散水実験前



25 時間 (30 分) 経過 (浸透流の発生)



50 時間 (60 分) 經過 (表層崩壞開始)



100 時間 (120 分) 経過 (盛土全体の変形)

写真一 1 散水実験中の盛土の状況 (Sr80R40)

間は実規模換算値を表す。飽和度80%の実験ケースにおいては、模型地盤作製時に含水比調整のために加水したところ、材料が団粒化し、これを締め固めると地盤の随所に局所的にマクロ・ポロシティと呼ばれる間隙の大きな領域が見られ、不均一な間隙構造が形成された。

作製した模型地盤に50 Gの遠心加速度を付与し、散水実験を実施する。遠心力载荷中は、模型土槽に搭載した CCD カメラによる映像を受信し、模型地盤の挙動を観察、記録している。

3. 実験結果および考察

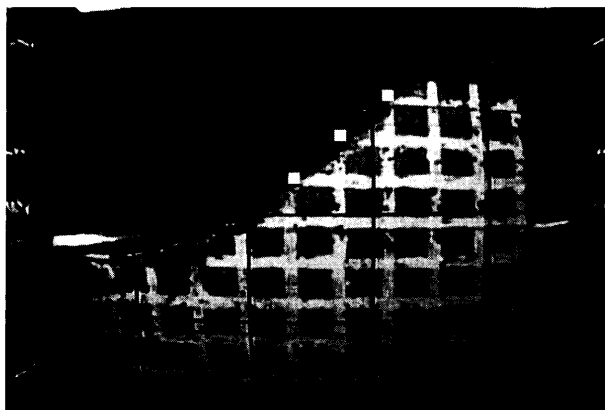
散水シミュレーションの結果、いずれのケースにおいても盛土表層の異常な水食は観察されなかった。このことは、遠心力場において、適切な雨滴サイズを表現できたことと示唆している。写真—1に代表的な実験ケースにおける散水実験中の写真を示す。ここで、模型斜面がゆがんでいるのは、CCDカメラに広角レンズを搭載していることによるものである。写真—2には、遠心力载荷後の崩壊状況（Sr40R70）を示す。図中の■は散水実験前の盛土形状であり、表層が崩壊した箇所は白塗で示している。

3.1 降雨強度の影響

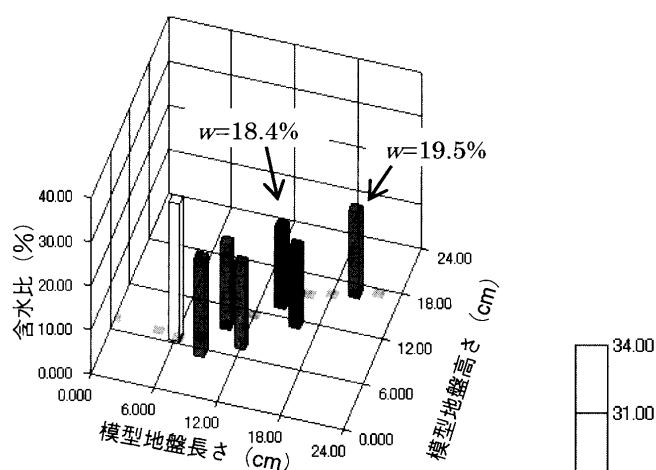
降雨強度の違いが盛土の崩壊挙動に及ぼす影響について、Sr45R30およびSr45R70における崩壊挙動を比較すると、両ケースともに降雨の進行に伴う表層崩壊が観察された(写真-2)。Sr45R30は、散水開始から、実規模換算で23分後(実験値:28秒後、以降、時間については実規模換算値を用いることとする)に盛土が表層崩壊を起こし始めたことが観察された。Sr45R70については受信映像が乱れたため正確な崩壊開始時期は記録できていないが、Sr45R30よりも若干早く、散水開始から

18分までには崩壊が発生していた。これらのケースにおいて、散水実験中に観察されたのは表層崩壊のみであり、盛土内部の顕著な変形は確認できなかった。このような表層崩壊の発生機構は、極めて表層部の飽和度が上昇することによるせん断抵抗力の低下と、土塊重量の増加に起因すると考えられる。

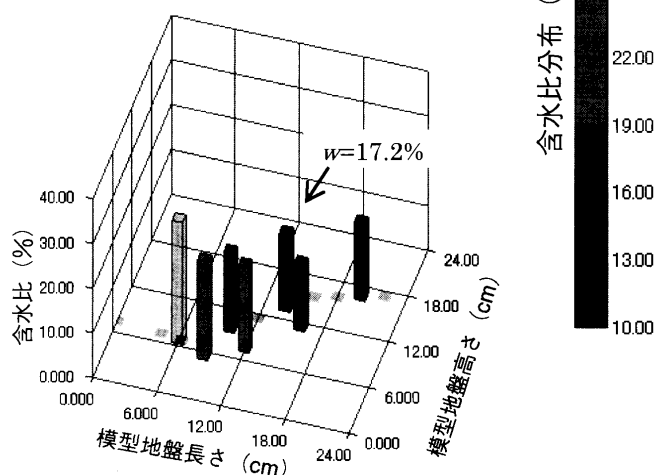
図—3, 4にそれぞれ Sr45R30 と Sr45R70における散水実験終了後の模型地盤内の含水比分布を示す。図中の■は斜面形状を表している。含水比測定箇所は、模型地盤の表層に加えて、表層から2 cm 程度深部である。ここで、初期間隙比が変化していなければ、飽和時含水比は $w_{\text{sat}} = 21.9\%$ である。図より盛土表層部においても完全に飽和していないことから、



写真—2 崩壊状況 (実験ケース: Sr40R70)



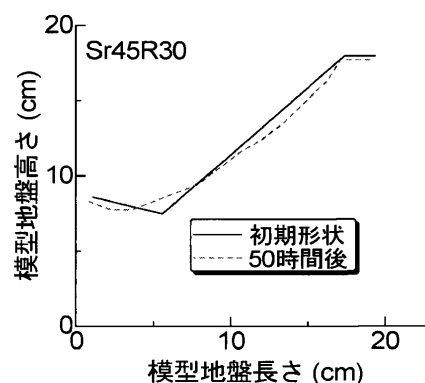
図—3 地盤内含水比分布 (Sr45R30)



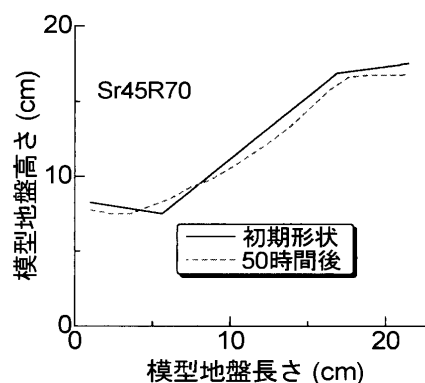
図—4 地盤内含水比分布 (Sr45R70)

雨水は盛土内へ浸透するよりも表層部の崩壊土塊とともに流下していったことが推察される。ここで、降雨強度が大きくなっているにもかかわらず、崩壊後の盛土表層部の含水比は必ずしも大きくないことも指摘できる。

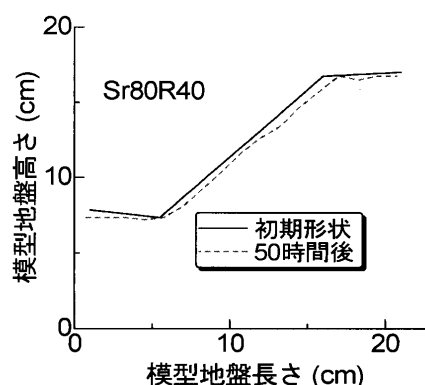
また、降雨強度が崩壊土量に与える影響を比較すると(図—5, 6 参照), 両者に大きな違いは見られない。一般に、同一の地盤材料においては、含水比が低いとマトリックポテンシャルが高く、浸透性能は高くなることが知られているが、降雨強度が、地盤へ雨水が浸潤する速



図—5 斜面形状の比較 (Sr45R30)



図—6 斜面形状の比較 (Sr45R70)

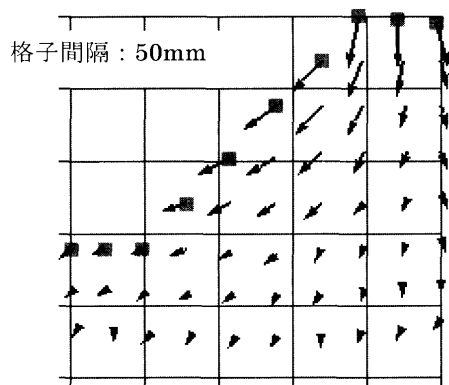


図—7 斜面形状の比較 (Sr80R40)

度、すなわち浸潤強度を上回るような豪雨であれば表層崩壊の危険性を考慮しなければならない。この種の崩壊現象は降雨直後に発生するために、災害対策事業が完了していない地域の被害を軽減するには、あらかじめ周辺住民に災害形態および時期を知らせておき、避難勧告を待たずに自らで避難行動をとるように心がけてもらうことが肝要であろう。

3.2 地盤の初期状態の影響

図—7にSr80R40における散水実験前および50時間後の盛土形状の比較を示す。これより、Sr45R30においては、盛土の表面の土砂が下流に流下していることに対して、地盤の飽和度が大きく、不均一な間隙を持つ盛土(実験ケース: Sr80R40)は、降雨の進行に伴って、盛土内部の飽和度が増加したために、盛土全体が沈下していることがうかがえる。このケースでは、散水時間50



図—8 変位ベクトル図 (Sr80R30)

時間あたりから、ようやく表層崩壊が観察され始めた。このように、盛土の初期飽和度の違いおよび間隙の不均一性によって崩壊挙動が異なってきたのは、降雨の浸透状況の違いに起因するものであると考えられる。すなわち、締固め時の飽和度が異なれば、透水係数は場合によって100倍も異なっていることが指摘されているように¹²⁾、Sr80R40においては、マクロ・ポロシティに起因して地盤の透水能力が高くなったことが考えられる。

散水時間150時間における盛土の変位ベクトル図 (Sr80R40) は図—8 のとおりである。図中の■は盛土の初期形状である。これより、盛土内部にせん断変形を起こしている領域を確認することができる。このケースにおいては、雨水浸透による飽和度の上昇に加えて、盛土内に浸透流が発生したために、このことによるせん断抵抗力の低下と土塊重量の増加によって盛土の安定性が低下したことが推察される。

このように、豪雨時においては、盛土築造時の飽和度の違いにかかわらず表層崩壊が発生するが、その発生時期や盛土の変形挙動に大きな違いが見られた。初期飽和度が小さい場合は、降雨開始から直ちに表層崩壊が発生することに対して、締固め時の飽和度によって地盤の透水能力が大きくなると、豪雨時においても雨水が地盤内へ浸透するために、やがて浸透流が発生し、斜面全体の安定性が低下することが分かった。このように同一の地盤材料においても締固め施工時の飽和度によっては豪雨時の盛土の変形・崩壊挙動は異なるために、土砂災害ハザードマップを作成する際には適切な地盤調査が求められる。

4. おわりに

本研究においては、豪雨時の斜面崩壊機構を調べることを目的として、浸透現象を適切に再現するために間隙流体に粘性流体を用いた遠心力場散水シミュレーションを実施した。その結果、透水能力が高いはずの乾燥地盤においても、豪雨時には斜面のごく表層部の飽和度が上昇し、降雨開始後の早い時期に盛土表層部での崩壊が観

察された。一方、同じ土質材料を用いた盛土においても締固め施工時の飽和度により、マクロ・ポロシティが形成される場合もあり、このとき雨水は表層から地盤内へ浸透し、やがて盛土内には浸透流が発生して、斜面全体の変形が観察された。

最後に、防災・減災のためには一般市民レベルの防災教育も重要であり、そのツールとして視覚的に災害の発生過程を知ることのできるこの種の模型実験は有用であるといえる。本報告における一連の模型実験では、災害発生メカニズムを完全に解明したとはいえない。しかしながら、一般市民に対する防災教育におけるツールとしての道筋が示されたことから、速報的に紹介させていただいた。

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：自然災害の頻発，国土交通白書，pp. 3～19, 2006.
- 2) 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.
- 3) 山本美博・大南正克・館山 勝・村石 尚：盛土のり面保護工の評価に関する研究，土質工学研究発表会，pp. 1811～1814, 1994.
- 4) 小林 睦・廣岡明彦・永瀬英生・清水恵助・藤原浩幸：浸透流を受ける補強盛土の崩壊機構について，応用力学論文集，Vol. 3, pp. 405～414, 2000.
- 5) 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.
- 6) T. Kimura, J. Takemura, N. Suemasa & A. Hiro-oka: Failure of fills due to rain fall, Centrifuge 91, Balkema, pp. 509～516, 1991.
- 7) 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.
- 8) R. Butterfield: Scale-modeling of fluid flow in geotechnical centrifuge, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp. 39～45, 2000.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

(原稿受理 2008.4.9)