

盛土への降雨浸透挙動を再現する遠心模型実験と浸透流解析

高田 祐希 佐々木 智大
伊藤 浩二

Centrifuge Model Experiment and Seepage Analysis to Reproduce Rainfall Infiltration into Embankment

Yuki Takada Tomohiro Sasaki
Koji Ito

Abstract

In recent years, heavy rainfall disasters have become more severe and frequent, and many soil structures have collapsed. Countermeasures for heavy rainfall must be evaluated to clarify the infiltration behavior of soil structures. Therefore, we first developed a centrifuge rainfall simulator that enables rainfall sprinkling in a 30 G gravitational field. Next, a centrifuge experiment was conducted in which rainfall was applied to an embankment in 30 G. Finally, a seepage flow analysis using FINAL-GEO[®] was conducted to reproduce the centrifuge experiment. The rainfall infiltration behavior into the embankment observed in the centrifuge experiment was accurately reproduced using the seepage flow analysis.

概要

近年、豪雨災害が激甚化・頻発化しており、それに伴って全国各地で盛土や切土等の土構造物に被害が生じる事例が相次いでいる。このような事例への対策を検討するに当たっては、降雨による土構造物への浸透挙動を適切に評価できるようにすることが重要である。そこで、遠心力を作用させ実物と同等の応力状態を再現した状態で降雨散水を可能とする「遠心場降雨発生システム」を開発し、勾配1:1.5を有する片盛土に対して、遠心加速度30G場で降雨を作用させる遠心模型実験を実施した。その結果、降雨浸透による盛土内の水位上昇や法尻からの排水を確認することができた。また、不飽和浸透機能まで拡張した大規模高速化非線形FEM解析プログラム「FINAL-GEO[®]」を用いた浸透流解析により、遠心模型実験の再現解析を実施し、実験により得られた盛土内の水圧変化を概ね再現できることが確認された。

1. はじめに

近年、豪雨災害が激甚化・頻発化しており、それに伴って全国各地で盛土や切土等の土構造物に被害が生じる事例が相次いでいる。2005年には台風14号がもたらした降雨により山陽自動車道の盛土が崩壊し、約8,000m³の土砂が流出したり。2018年の西日本豪雨（平成30年7月豪雨）では、西日本高速道路管轄内で49か所の被害が発生し、2,299kmが通行止めとなった。このうち、中国自動車道の北房IC～新見IC間において約4,000m³の、広島呉道路の坂南IC～天応西IC間では約13,000m³の大規模盛土崩壊が発生し、特に復旧に時間を要した²⁾。2019年以降も毎年のように観測記録を更新する規模の豪雨が発生し、盛土や切土等に被害が生じている。

降雨に伴う崩壊のメカニズムに関しては、降雨浸透によって生じる、1)土塊重量増加に伴う滑動力の増加、2)サクシオン消失による見かけの粘着力の低下、3)間隙水圧上昇による地盤のせん断強度低下等、が指摘されている。これらは、地下水位および不飽和領域内の水の動きが大きく影響することから、降雨に対する土構造物の応答を把握するためには、土構造物への降雨の浸透挙動を適切に評価することが重要である。

そこで大林組では、遠心模型装置により土構造物の降雨浸透現象を評価できる遠心場降雨発生システムを開発するとともに、大規模高速化非線形FEM解析プログラム「FINAL-GEO[®]」を用いて不飽和浸透現象を解析できるよう、機能拡張³⁾を行っている。本報では最初に、実験的手法として遠心場降雨発生システムの概要とそれを用いた盛土を対象とした降雨遠心実験の結果を報告する。次に、解析的手法として不飽和浸透機能まで拡張した「FINAL-GEO[®]」を用いた浸透流解析結果を報告する。

2. 遠心場降雨実験

2.1 遠心場降雨発生システムの概要

遠心場降雨発生システムとは、遠心力を作用させて実物と同じ応力状態を再現させた状態⁴⁾で降雨を発生させる装置である。降雨発生部はFig. 1の概要図の通り、高圧水を供給するアキュムレータ（水タンク）と、降雨用ノズル、配管、電磁弁、レギュレータ等から構成される。

遠心場で降雨を発生させる場合、遠心場における相似則を満足させるため、雨滴径を実物より小さくする必要⁵⁾がある。具体的には、遠心加速度 NG 場では、雨滴径を実物の $1/N$ 倍にする必要がある。雨滴径は、一般的に

は1mm~5mm程度とされている⁹⁾ため、遠心場で降雨を発生させる場合、遠心加速度100~150G程度に対応する平均粒子径が30 μ m程度の噴霧が可能な2流体ノズル(空圧と水圧を調整して微霧を発生させることができるノズル)を使用する事例が多い。今回開発したシステムでは、遠心場における降雨実験において、後述する1流体ノズルに水圧を安定的に供給できるようにアキュムレータによる蓄圧方式とした。また、ノズルは加圧した水を用いて霧を発生させる1流体ノズル方式(いけうち製)を採用した。使用したノズルはJ008Nであるため、平均粒子径は140 μ m程度となるが、遠心加速度を30Gに設定して実験することで、相似則を満足させることとした。

2.2 試験体概要

試験体概要図および計測器配置図をFig. 2に示す。使用した土槽は、内寸が800mm \times 200mm \times 500mm(幅 \times 奥行 \times 高さ)である。正面はアクリル面とすることで、盛土の断面を確認できるようにした。土槽内には75mmの基盤層(目標一軸圧縮強度は2MPa)を設けた後に、盛土層を構築した。基盤層の左端は切り欠きを設け排水層とすることで、盛土内に浸透した降雨が法尻付近に溜まらないようにした。盛土は高さを200mm、勾配を1:1.5の片盛土とし、その目標締固め度を $D_c=90\%$ に設定した。

計測器に関しては、降雨に伴う盛土内の水位分布を把握することができるよう、間隙水圧計を盛土底部(基盤層上端)に7台、排水層に1台設置した。

盛土材料は、岐阜珪砂7号と粘性土(大竹工業株式会社製トククレ)を乾燥質量比7:3で混合した材料とした。この配合は、既往の被災事例における盛土材料の粒度分布を踏まえて設定した⁷⁾。その材料特性をTable 1に示す。細粒分含有率が約30%と多いことや飽和透水係数が 10^{-7} m/s程度と低いことが特徴である。

なお、遠心加速度は30Gとしていることから、盛土高さは実物換算で6mに相当する。以降では、特別な断りが無い限り、実物換算したスケールで結果を整理する。

2.3 降雨作用荷重

降雨作用箇所はFig. 2に示した通り盛土天端のみとした。これは、斜面部に降雨を作用させると浸食作用が優勢になることや解析条件との比較が困難になる点⁸⁾を踏まえたためである。降雨中の盛土の様子をFig. 3に示す。

降雨荷重に関しては、1流体ノズル(いけうち製J010N)を4台使用し、設定圧力を0.3MPaに設定することで、降雨強度10mm/hrに相当する雨を継続時間2.5hrで計5回与えた(総降雨量=125mm)。また、5回の降雨の発生間隔は約100hrを目標とし、降雨を作用させた。ここで降雨強度は、流量計で計測した配管通過流量を降雨作用面積(ここでは、盛土天端の面積に相当)で除すことにより算出している。

2.4 実験結果

降雨散水時の盛土底部における間隙水圧応答の時刻歴をFig. 4に示す。図中には降雨を作用させた時刻を青矢

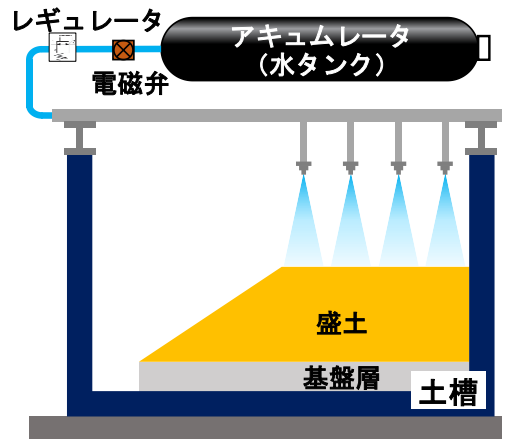


Fig. 1 降雨発生システムの概要
Overview of Centrifuge Rainfall Simulator

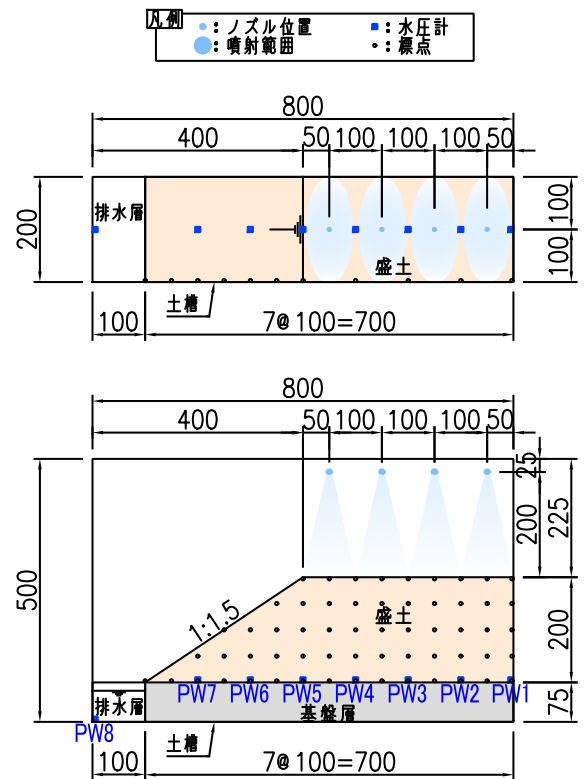


Fig. 2 試験体概要図および計測器配置図
Overview of Specimen and Sensor Layout

Table 1 材料特性
Material Property

土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.674
細粒分含有率, F_c (%)	29.7
均等係数, U_c (%)	59.9
最大乾燥密度, ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.854
最適含水比, w_{opt} (%)	13.0
初期含水比, w (%)	11.4
目標締固め度, D_c (%)	90.0
間隙率, n	0.376
飽和透水係数, k_w (m/s)	4.75×10^{-7}
粘着力, c' (kN/m ²)	5.3
内部摩擦角, ϕ' (°)	33.8

印で併記した。2回目の降雨を作用させた t=100hr 付近から間隙水圧が上昇する様子が確認できる。また、法尻から遠い箇所から先に水圧が上昇し始めていることがわかる。4回目の降雨を作用させた t=320hr 付近からは、間隙水圧の上昇速度が低下してきており、5回目の降雨を作用させた t=460hr 以降は降雨に伴う間隙水圧の上昇は見られず、むしろ低下する傾向が確認できた。これは降雨浸透量よりも法尻からの排水量が上回ったためである。

3. 浸透流解析

3.1 浸透流解析の概要

FINAL-GEO に用いられている有効応力解析の基礎式（つり合い式と連続式）は、伊藤ら³⁾にならひ、有限要素法の定式化は間隙水の変位で絶対変位を用いる $u-U$ 形式とし、不飽和土の特性は間隙水と間隙空気を混合流体として扱う手法を用いた。今回は盛土の変形は無視するため、土粒子骨格の自由度は消去した。間隙水の基礎式は式(1)~(5)のようになる。

$$\left(\frac{n^2 S_r^2 \rho_f g}{k_w}\right) \dot{U}_i + n S_r p_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{p} = -Q^* n \varepsilon_{ii}^U \quad (2)$$

$$Q^* = \frac{1}{\left(\frac{n S_r}{K_f} + \frac{C_s}{\gamma_w}\right)} \quad (3)$$

$$C_s(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (4)$$

$$\psi = h_w - h + \frac{p}{\gamma_w} \quad (5)$$

ここに、 U_i 、 \dot{U}_i 、 ε_{ii}^U は間隙水の変位ベクトル、速度ベクトル、体積ひずみ、 ρ_f と K_f は間隙水の質量密度と体積弾性係数、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 k_w は飽和度 S_r での不飽和土の見かけの透水係数、 g は重力加速度、 p は間隙水圧である。 Q^* は不飽和土の間隙を満たす混合流体の見かけの体積弾性係数に相当し、 C_s は比水分容量、 θ は体積含水率、 ψ は圧力水頭、 γ_w は間隙水の単位体積重量である。

不飽和浸透特性は、van Genuchtenによる圧力水頭と飽和度の関係（水分特性曲線）⁹⁾および比透水係数（飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比）と飽和度の関係¹⁰⁾を用いた。Fig. 5, 6にそれぞれ、本解析における飽和度に対する圧力水頭と比透水係数の関係を示す。赤線は本解析で設定した値を、黒プロットは保水性試験（加圧法）により得られた点を表す。

3.2 解析モデルと解析条件

本解析で用いた解析モデルと境界条件を Fig. 7 に示す。解析対象は2章に示した遠心模型実験とし、相似則に基づいて実物換算した高さ6m、勾配1:1.5を有する片盛土を2次元平面ひずみ要素でモデル化した。節点数は961個、要素数は900個である。前述した通り、盛土の変形は無視することから、土骨格の自由度は全て固定とし、底面と右側側面は非排水条件、盛土天端は降雨浸透境界、

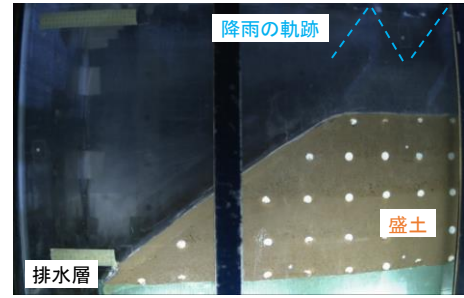


Fig. 3 降雨中の盛土の様子
Overview of Embankment During Rainfall

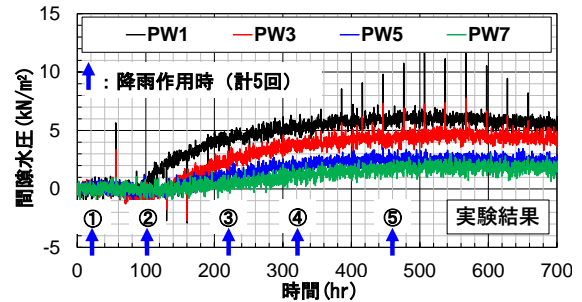


Fig. 4 盛土底面における間隙水圧応答時刻歴
Time Histories of Pore Water Pressure

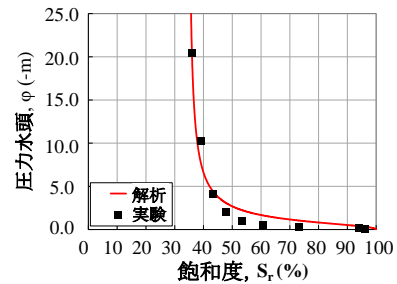


Fig. 5 圧力水頭と飽和度の関係（水分特性曲線）
Relationship between Pressure Head and Degree of Saturation (Soil Water Characteristic Curve)

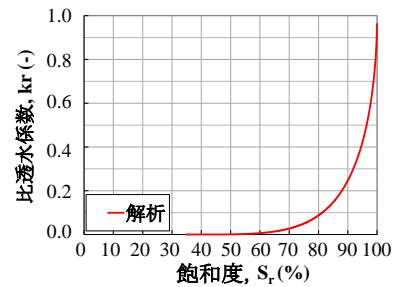


Fig. 6 比透水係数と飽和度の関係
Relationship between Relative Permeability and Degree of Saturation

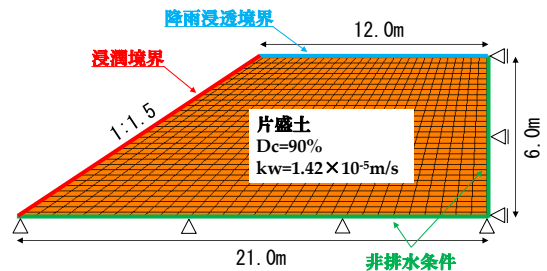


Fig. 7 解析モデルと境界条件
Analytical Model and Boundary Condition

盛土法面側は浸潤境界を与えた。降雨浸透境界は、流量既知境界として降雨強度相当の流入量を考慮しており、飽和状態（間隙水圧=0kN/m²）に至ると水頭既知境界となり、盛土内からの排水を考慮できる。また、降雨開始前の地下水位は盛土底面に設定した。

設定した解析パラメータを Table 2 に示す。これらは、室内試験結果を基に設定しているが、透水係数 k_w に関しては間隙流体に水を使用したことから、Table 1 に示した飽和透水係数を 30 倍した値を用いて解析した⁵⁾。

3.3 解析結果

Fig. 8 に降雨開始前(t=0hr)と降雨終了後(t=600hr)の飽和度分布を示す。降雨に伴い地表付近の飽和度が上昇する傾向、および飽和度 100%の領域（地下水位以下の領域に相当）が拡大している様子を解析的に再現できている。

Fig. 9 に盛土底部における間隙水圧応答の時刻歴を示す。解析により得られた間隙水圧は、法尻から遠い箇所から先に上昇しており、最大値は 5kN/m²程度であったことから、実験結果 (Fig. 4) を概ね再現できているといえる。なお、実験結果よりも降雨時の間隙水圧上昇速度が遅い点については、降雨開始前の初期水位や飽和度分布の設定精度が影響していると考えられる。

4. まとめ

片盛土に対する降雨浸透実験および FEM による再現解析を実施した。本報の結果を以下に示す。

- 1) 遠心加速度 30G 場で降雨散水可能な遠心場降雨発生システムを開発した。
- 2) 片盛土への遠心場降雨散水実験を通じて計測した盛土底面における間隙水圧計の応答値より、盛土内への降雨浸透挙動および法尻からの排水挙動が確認できた。
- 3) 上記遠心模型実験に対する浸透流解析を実施した。解析で得られた地下水位以下の間隙水圧は、実験結果と整合する結果となった。

参考文献

- 1) 島重章：岩国・宮島の被災について（速報），土木学会誌，Vol. 90, No. 11, pp. 48-50, 2005
- 2) NEXCO 西日本：平成 30 年 7 月豪雨に伴う NEXCO 西日本管内の高速道路の被災状況と復旧概要，道路行政セミナー，2019.1
- 3) 伊藤浩二，佐々木智大，樋口俊一：不飽和・飽和地盤の有効応力解析手法と地中構造物への適用，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 78, No. 4（地震工学論文集第 41 巻），pp. I_1-I_9, 2022
- 4) 高田祐希，加藤一紀，梅原由貴，高橋真一：遠心模型実験装置の活用事例（その 2），大林組技術研究所報，No. 87, 2023.12

Table 2 解析パラメータ
Analysis Parameter

間隙率, n	0.376
飽和透水係数, k_w (m/s)	1.42×10^{-5}
飽和体積含水率, θ_s	0.376
残留体積水分率, θ_r	0.113
スケールパラメータ, α'	1.8
水分特性曲線の形状パラメータ, n'	4
水分特性曲線の形状パラメータ, m	0.75

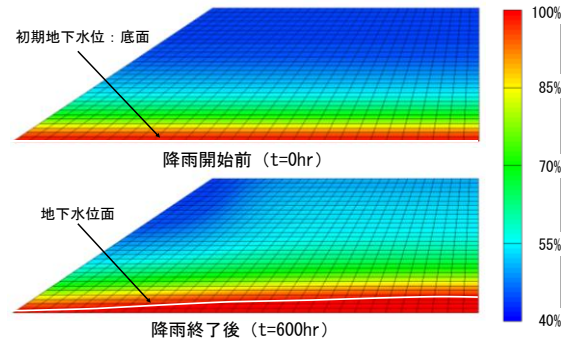


Fig. 8 降雨開始前と降雨終了後の飽和度分布
Distribution of Degree of Saturation

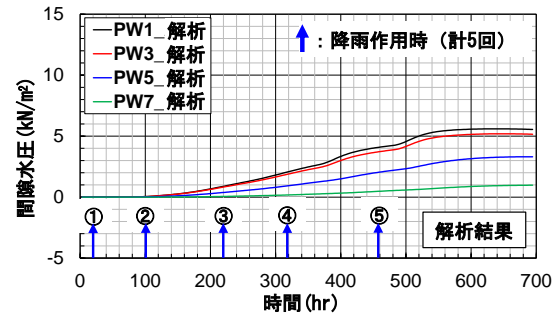


Fig. 9 盛土底部における間隙水圧の解析結果
Analytical Results of Pore Water Pressure Response

- 5) 玉手聡，伊藤直幸，遠藤明：地盤の透水性と降雨強度の関係に着目した斜面の崩壊に関する実験的考察，労働安全衛生総合研究所特別研究報告，JNIOH-SRR-NO.35, pp. 33-58, 2007
- 6) 小倉義光：一般気象学，東京大学出版会，pp. 81-92, 1984
- 7) 藤岡一頼，安田進，白鳥翔太郎：道路盛土材料の動的強度特性，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 65, No. 1, pp. 875-880, 2009
- 8) Xu, J., Ueda, K. and Uzuoka, R.: Numerical modeling of seepage and deformation of unsaturated slope subjected to post-earthquake rainfall, Computers and Geotechnics, Vol. 148, pp. 1-17, 2022
- 9) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980
- 10) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol. 12, pp. 513-522, 1976