

1. 研究背景と目的

森林における樹木の根系発達は、表層崩壊を抑制する効果がある。それは、土層と基岩層の境界面を横切って侵入した根がせん断抵抗力を補強するためであると認識されている。ただし、浅根性樹種や若い人工林では、樹木の根系が基岩まで到達せず、根による働きは浅い表層部に限られると考えられる。一方、Liang et al. (2007) は、降雨インプットの偏在が斜面水文過程に大いに影響を与え、特に樹幹流が土層内飽和帯の形成に寄与することを明らかにした。土層内飽和帯の形成は、表層崩壊発生の予測において極めて重要な要素である。既往研究で開発された水文モデルの多くは、樹幹流による雨水の集中を無視しており、それらを用いた表層崩壊発生の予測には、大きな誤差が含まれる可能性が高い。本研究は、Liang et al. (2009) が提案したモデルと従来型モデルを用いた数値実験により、浅根性樹木の存在が斜面安定に与える影響を解明することを目的とした。

2. 雨水浸透計算と斜面安定解析

数値シミュレーションは、有限要素法により二次元の Richards 式の数値解を求めた。計算領域は溪流を挟んだ水平長 10 m、勾配 50 度、土層厚 1 m の一次谷側方斜面に設定し、浅根性樹木が三本生育することを想定した（植栽密度：約 900 本/ha）。計算領域は、612 個節点と 1100 個の三角形要素で構成されている。境界条件については、溪流水位より上の地表面に自由排水条件、上端面と底面と下端面に水の出入りが無い条件を設定した。溪流水位を下端境界より 23.8 cm 上に固定した。土壌水分特性について風化花崗岩を母材とする森林土壌を想定し、既往研究で報告されたパラメータを採用した（梁ら, 2006）。初期条件については、予備計算によって圧力水頭分布が定常状態になるまで 20 mm/hr の降雨を与え、その後二日間に排水させた乾燥状態を設定した。入力降雨については、一定強度（30 mm/hr）の林外雨を与えた。降雨分配については、林内雨、樹幹流、樹冠遮断がそれぞれ林外雨の 50%、30%、20%になるように設定した。Model 1 では、樹幹流の浸透特性を考慮し、Liang et al. (2009) が提案した手法を用いた。すなわち、林内雨を地表面に入力し樹幹流を土層内の湧水として樹木周辺の湧水領域に与える手法である。斜面に生育する樹木の樹幹流が下流側に集中する傾向が報告されたため、既往研究を参照して上流側と下流側の樹幹流量比を 1 : 80 に設定した（Liang et al., 2007）。なお、これまで開発された多くの水文モデルでは、樹幹流による雨水の集中は無視され、正味林内雨量（net precipitation）の一部として扱われてきた。そこで、正味林内雨量を均質に地面に与える従来型のモデル（Model 2）でも計算を行い、Model 1 と比較した。

斜面安定解析では、二次元簡易 Bishop 法を用いて斜面安定率 F_s を計算した。底面以下の基岩層では土質強度が十分大きくてすべり面が発生せず、すべり面は基岩面と接触する円弧になると仮定した。すべり円弧の中心位置および円弧半径を変化させ、 F_s が最小となる円弧を探索した。土質特性について、飽和状態の粘着力は 20 gf cm⁻²、内部摩擦角は 35 度、土塊の比重は 2.65 (g cm⁻³)を用いた。本研究は樹木の根系が基岩まで発達していないことを想定したため、根によるせん断抵抗力の補強機能を無視した。

3. 結果

Model 1 による浸透計算は、樹幹の下流側に近い領域では集中する樹幹流が迅速に土壌に浸透したため、20–100 分には基岩面に局所的な飽和帯が計算された（図 1）。樹幹の上流側では浸透過程が林内雨による浸潤前線のゆっくりした下降に左右されたため、圧力水頭の不均一な空間分布が見られた。一方、樹幹流浸透特性を考慮していない Model 2 では、樹幹の上流側と下流側における圧力水頭の空間変動を再現でき

ず、基岩面に均一的な飽和帯しか計算されなかった。図1に各時刻に最小 F_s が計算された円弧を示した。Model 1 では、局所的な飽和帯の影響を受け、斜面上部 (20分) と中部 (75分) と下部 (70, 100, 140分) の円弧が計算された。しかし、均一的な飽和帯を示した Model 2 では斜面下端に隣接した円弧しか計算されなかった。また、最小 F_s の時間変化を見ると、Model 1 による最小 F_s が早く低下し、70分に最小 F_s が 1.0 を割ってすべりが発生する結果となった (図2)。一方、Model 2 による最小 F_s は低下が遅く、すべりの発生が Model 1 より 30分遅く計算された。

4. 考察

武蔵・水山 (2009) は 152 件のがけ崩れの事例を基に、崩壊場所を斜面上部と下部に分類し、斜面上部からの崩れが全体の 6 割を占めることを報告した。提案モデルでは、定常状態になるまでに基岩面に局所的な飽和帯が計算され、斜面全体の最小安全率がより早く低下した上に、斜面におけるあらゆる場所が崩れる可能性を示した。一方、樹幹流の浸透特性を考慮しない従来型モデルは、表層崩壊発生の時刻が遅く予測された上に、表層崩壊発生の場所が斜面下部に限定される結果となった。このことから、既往研究で開発された水文モデルの多くは、樹幹流による雨水の集中を無視しているが、土壌水分動態の再現や表層崩壊発生の予測には、樹幹流による降雨インプットの偏在に起因する不均質な飽和帯の形成を考慮する必要があることが示された。

5. 引用文献

- Liang, W.-L., Kosugi, K. and Mizuyama, T., 2007. Heterogeneous soil water dynamics around a tree growing on a steep hillslope. *Vadose Zone Journal*, 6(4): 879-889.
- Liang, W.-L., Kosugi, K. and Mizuyama, T., 2009. A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope. *Journal of Hydrology*, 366(1-4): 62-75.
- 梁偉立, 小杉賢一朗, 林祐妃, 水山高久 (2006) 雨水鉛直浸透に関わる土壌水分特性パラメータの特定手法に関する考察, 砂防学会誌, Vol.59, No.3, p. 3-12.
- 武蔵由育・水山高久 (2009) がけ崩れ災害における崩壊土砂の運動の実態, 砂防学会誌, Vol.61, No.5, p. 31-36.

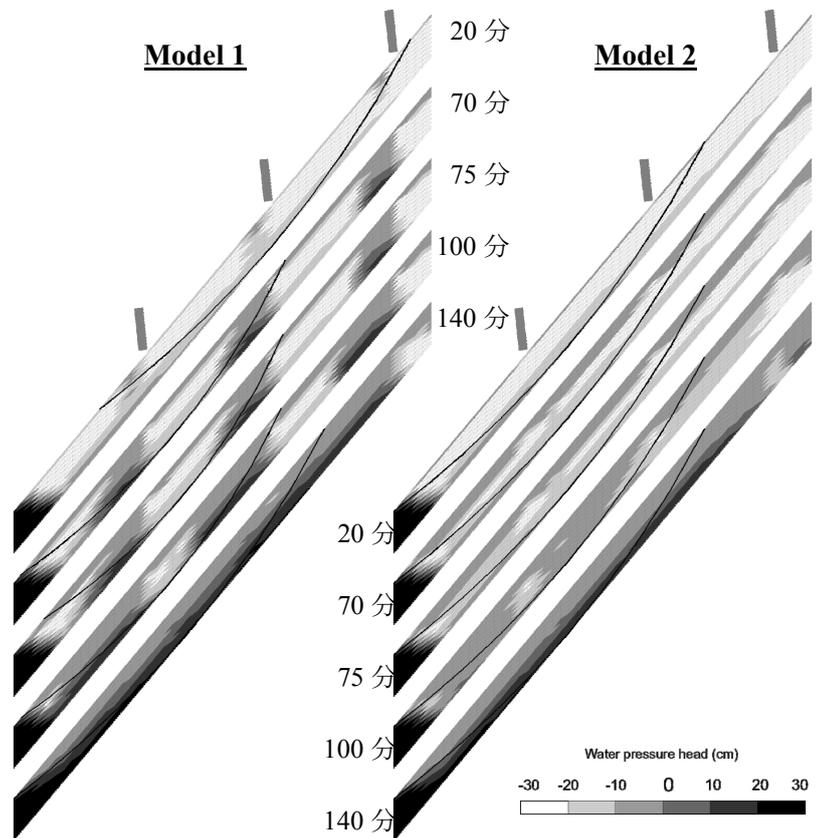


図1. Model 1 と Model 2 による計算結果 (上から 20, 70, 75, 100, 140 分における圧力水頭の空間分布)。

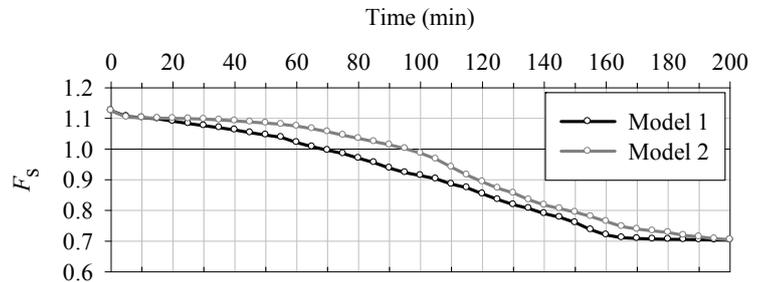


図2. Model 1 と Model 2 による最小 F_s の時間変化。