

現地計測と室内実験の組合せによる自然丘陵斜面表土の透水性評価

Combining Field and Laboratory Measurements to Define the Hydraulic Properties
of Surface Soil in a Natural Hillslope

川 本 健 (かわもと けん)

埼玉大学助手 工学部

大 村 大 志 (おおむら たいし)

榊高協基礎工事技術部 主任

小 林 邦 宏 (こばやし くにひろ)

埼玉大学専門技術員 工学部

久 保 順 一 (くぼ じゅんいち)

榊高協基礎工事技術部 主任

1. はじめに

1998年の北関東・南東北¹⁾、1998年の広島県を中心とした西日本²⁾など、集中豪雨に伴う斜面崩壊が各地で発生している。降雨に伴う斜面崩壊は、地盤の不飽和浸透とその後の斜面安定の複合問題であり、降雨浸透に伴う間隙水圧の上昇・有効応力の低下、自重の増加が引き金となる。斜面崩壊の中でも、表層崩壊を考えると重要となるのが斜面表土における浸透特性である。特に、樹木や植生が存在する自然斜面では、有機物の供給と微生物作用による団粒構造の発達、土壌生物活動や植物根の枯死によって形成されるマクロポアの存在など、表層近傍における水移動形態は複雑なものとなる。

本研究では、降雨に伴う斜面崩壊メカニズム解明の第一歩として、自然丘陵斜面表土における透水性の評価を行った。具体的には、現地計測により表土の土壌水分量、サクション、降雨量などの年間変化を調べ、水分動態や排水挙動の把握を行った。そして、計測データより原位置不飽和透水係数を求め、不攪乱コア試料の室内不飽和透水係数との比較を行った。

2. サイトおよび試料

現地計測システムの設置および試料採取は、福島県内の丘陵斜面表土にて行った。このサイトでは1998年8月の集中豪雨により大規模な斜面崩壊が生じた³⁾。サイト勾配は山頂付近で約17度であった。サイト土壌は火山灰を母材とした黒ぼく土壌で、植生はアカマツを中心とした針葉樹林であった。地表から12 cm が有機物に富む黒色のA層、12 cm 以深が褐色のB層であった。A層ではマクロポアを多数含む団粒構造が発達し、深さ60～90 cmのB層ではマクロポアが点在する壁状構造であった。また、基盤となる凝灰岩は深さ約6 mに位置した。

3. 現場計測システムおよび室内実験

斜面崩壊時に形成された滑落崖から10 m 山頂に向かった地点に現地計測システムを設置した。計測は2001年12月より開始し、土壌水分量・サクション・地温・降雨量を10分間隔で測定した。データ回収はシステムに内蔵した携帯電話に接続することで行った⁴⁾。計測深さは、土壌水分量・地温が深さ3, 12, 24, 54, 84 cm, サ

表—1 サイトの土壌物理量

層	深さ (cm)	土粒子密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	飽和透水係数 (mm/h)	粒度(%)				有機物含有量 (%)
					礫	砂	シルト	粘土	
A	5	2.41	0.54	120	0.5	31.4	47.2	20.9	22.3
	10	2.46	0.53	80	0.5	36.1	52.9	10.5	11.0
B	(12)								
	15	2.50	0.54	113	0.3	37.9	51.0	10.8	6.9
	20	2.54	0.57	116	0.8	43.0	36.6	19.6	5.6
	25	2.57	0.57	99	1.2	41.7	44.0	13.1	1.9
	30	2.65	0.59	52	1.0	48.7	41.1	9.2	0.7
	40	2.71	0.54	64	0.4	58.7	31.5	9.4	0.5
	60	2.73	0.59	64	0.9	49.2	41.1	8.8	1.5
	90	2.69	0.60	70	0.6	34.5	52.6	12.3	1.5

論文

クシオンが深さ 3, 12, 54 cm で行った。サイトより不攪乱コア試料（直径 5 cm, 高さ 5 cm）を採取して吸引法・加圧法による水分特性曲線、定水位試験による飽和透水試験、圧力制御法⁵⁾による不飽和透水係数の測定を室内にて行った。また、攪乱試料を用いて土粒子密度試験、粒度分析、有機物含有量試験⁶⁾を行った（表—1）。

4. 結果および考察

4.1 土壌水分動態

図—1 に現地計測データの一例を示した。降雨に伴い、各種センサーは迅速に応答し、土壌体積含水率 θ の増加、サクシオン h の低下が見られる。図中の dH/dz は、深さ 3~12 cm 間および 12~54 cm 間で算出した動水勾配であり、鉛直下方を正とした。

2001年12月から2002年11月までの年間計測データより θ と h の関係を得て、図—2 に示した。同図には不攪乱コア試料より得られた水分特性曲線の結果も示した。年間を通してサクシオンは、A 層で 100~500 cm, B 層で 50~200 cm の範囲で変化した。これに対応する土壌水分量の変化は、両層とも 2.0~5.5% と非常に小さかった。また、A 層, B 層ともに計測データは不攪乱コア試料よりもやや下側に位置した。

4.2 降雨後の排水挙動

降雨 R が、表層流を生じずに土壌内を鉛直下方のみに浸透すると仮定した場合、水収支より排水強度 D は以下の関係式で求まる。

$$D = R - ET - \Delta S = R - ET - \int_{-z}^0 \theta(t_2) dz + \int_{-z}^0 \theta(t_1) dz \quad (1)$$

ここで、 ET は蒸発散、 ΔS は貯留で単位時間 ($t_2 - t_1$) あたりの θ の変化量（図—1）より求まる。降雨前後における D の変化を $z = 12, 54, 84$ cm の 3 深さで算出し、先行雨量 313 mm と 6 mm の場合について図—3 に示した。ここで、蒸発散量 ET は既往のデータ⁷⁾をもとに見積った。

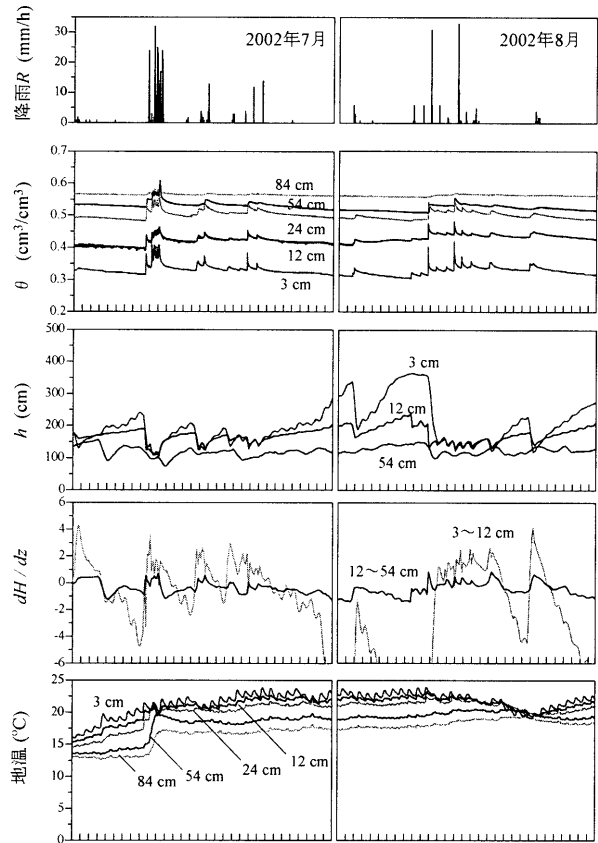
先行雨量 313 mm の場合を見ると、排水強度 D の時間変化の深さによる違いはほとんど見られなかった。このことから、降雨は深さ 84 cm までの土層を、貯留（水分量増加）することなく速やかに下方へ移動したと言える。また、先行雨量が 6 mm と小さい場合も、排水強度 D の時間変化の深さによる違いはほとんどなく、降雨は貯留することなく速やかに下方へ移動した。

4.3 原位置と室内実験による透水性の評価

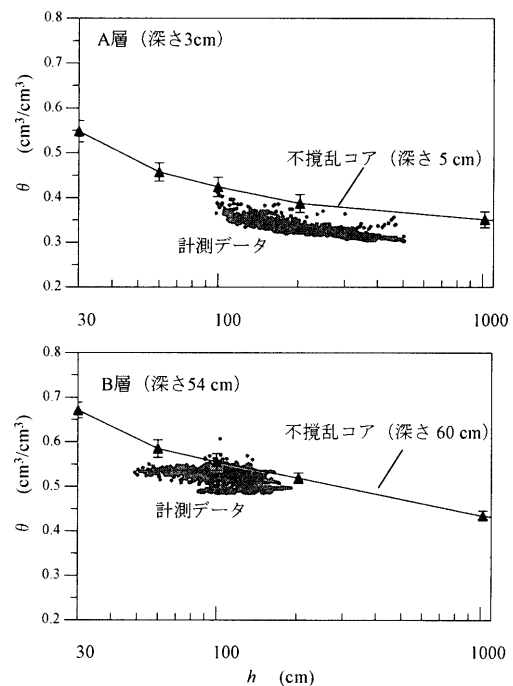
現地計測データにダルシー則を適用すると、排水強度 D と動水勾配 dH/dz より、原位置における不飽和透水係数 K_{fa} が以下の式により求まる。

$$K_{fa} = D / (dH/dz) \quad (2)$$

図—4 に K_{fa} と体積含水率 θ の関係を示した。図には、室内試験で求めた不攪乱コアの不飽和透水係数 K_c も示した。A 層, B 層ともに、 K_{fa} は θ のわずかな低下とともに急激に低下し、A 層では θ が 0.43 から 0.40 に低下する間に K_{fa} は 3 オーダー低下し（10 から 0.01 mm/h）、

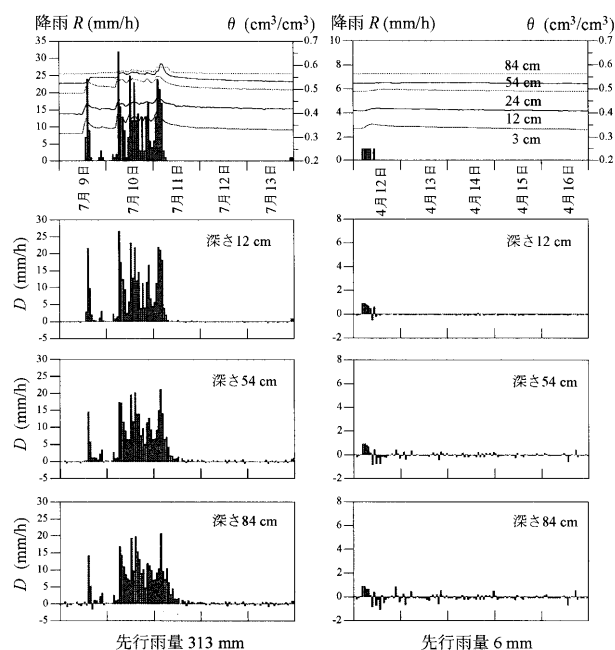


図—1 現地計測データ例（2002年7月～2002年8月）

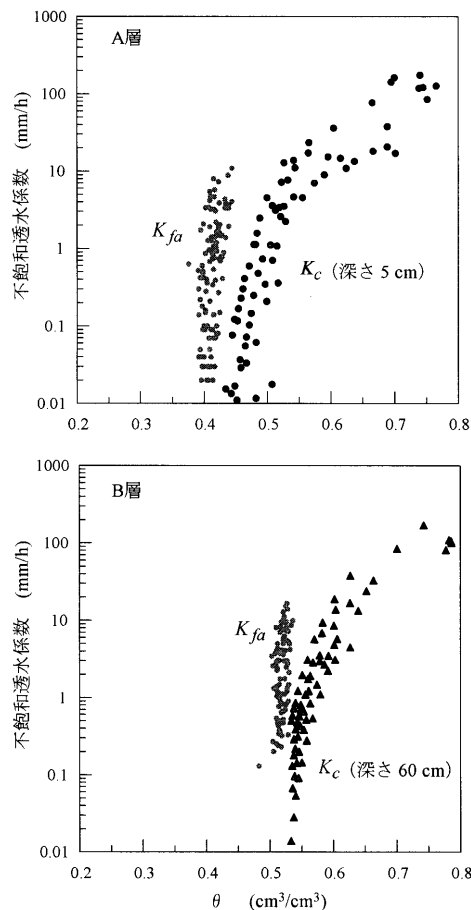


図—2 体積含水率 θ とサクシオン h の関係（不攪乱コアは 3 試料の平均と標準偏差のエラーバー表示）

B 層では θ が 0.54 から 0.50 に低下する間に K_{fa} は 2 オーダー低下した（10 から 0.1 mm/h）。このような不飽和透水係数の低下は土壌構造に起因し、A 層ではマクロポアを含む団粒外間隙から脱水が進行した水分状態で急激に透水性が小さくなったものと思われる。B 層でも同様



図—3 降雨前後の排水挙動の変化

図—4 不飽和透水係数と体積含水率 θ の関係
(不攪乱コアは5試料の測定データ)

にマクロポアを含む粗間隙の脱水が進んだ水分状態で透水性が小さくなったものと思われる。

K_c も K_{fa} と同様に θ のわずかな低下とともに急激な低下を示した。しかし、 K_c は K_{fa} よりも小さな値を示

した。両者の違いは測定スケールの違いにあり、原位置では連続したマクロポアを含む比較のマクロなスケール（センサー長約20 cm で鉛直方向に連続性が確保されている）で不飽和透水係数を算出しているのに対し、不攪乱コアは直径5 cm、高さ5 cm の小さなスケールで不飽和透水係数を算出している。このため、マクロスケールではマクロポアに沿った局所的な水みち、いわゆる選択流の寄与を含んだ透水係数を測定し、コアスケールではマクロポアの連続性が乏しいスケールで透水係数を測定した結果、 K_c が K_{fa} より小さな値を示したものと考えられる。

一般に、マクロポアが水みちとして機能するためには、マクロポア以外の領域（マトリックス）が十分に飽和している必要がある⁸⁾。本サイトでは、図—3に示したように先行雨量の大小にかかわらず排水強度のすばやい応答が得られた。このことから、計測期間中、マトリックスは十分飽和状態にあり、降雨浸透後すぐに選択流が発生し、下方への水移動に寄与したものと考えられる。

5. おわりに

降雨に伴う表層崩壊を考えると、浅層地盤における水分動態把握や透水性評価は重要な鍵を握る。本報では、現地計測データと室内試験から得られた不飽和透水係数を比較し、両者の差の要因として選択流の寄与が考えられることを示した。今後は、選択流の発生メカニズムや水分移動に及ぼす影響をより詳しく調べるとともに、マルチポイント計測や斜面安定解析などに展開する予定である。

参考文献

- 1) 地盤工学会北関東・南東北豪雨災害緊急調査団：速報1998年8月北関東・南東北豪雨災害調査報告—土砂災害の概要—，土と基礎，Vol. 47, No. 1, pp. 39~42, 1999.
- 2) 地盤工学会緊急調査団：平成11年6月29日豪雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査報告，土と基礎，Vol. 49, No. 10, pp. 40~45, 1999.
- 3) Kawamoto, K., Oda, M., Suzuki, K.: Hydro-Geological Study of Landslides Caused by Heavy Rainfall on August 1998 in Fukushima, Japan, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 22, No. 1, pp. 13~23, 2000.
- 4) 溝口 勝・三上正洋・石井 悟：携帯電話による土壌情報モニタリングシステム，土壌の物理性，No. 92, pp. 25~30, 2003.
- 5) 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓：土壌物理環境測定法，東京大学出版会，pp. 115~136, 1995.
- 6) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，1990.
- 7) 風間 聡・多田 毅・沢本正樹：衛星データを用いた東北地方の年水収支解析，水工学論文集，Vol. 40, pp. 81~86, 1996.
- 8) Tsuboyama, Y., Sidle, R. C., Noguchi, S., Hosoda, I.: Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment, Water Resour. Res. 30, pp. 879~890, 1994.

(原稿受理 2004.4.8)