

一次元土層実験による降雨浸透過程と排水パイプの有効性に関する研究

Study on Rainfall Seepage Process and Effect of Drainage Pipes by One-dimensional Model Test

中川翔太 Shouta NAKAGAWA (JR 西日本)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)
梅田賢也 Kenya UMEDA (島根県庁)
矢葺健太郎 Kentaro YABUKI (広島大学工学部)

斜面崩壊の要因として、長時間の降雨による基盤からの地下水位上昇が考えられている。一方、短時間に非常に強い降雨があった場合には、表層付近で飽和に近い高含水比帯が形成され、斜面に沿った流れが発生している可能性が現地観測結果から報告されている。本研究では、斜面表層に形成される高含水比帯に着目し、排水パイプの打設によって降雨による斜面の危険度を低下させることができるかどうか、模型土層での降雨浸透実験および浸透流解析により検討した。その結果、排水パイプ設置による高含水比帯の飽和度上昇および、サクシオン消失の抑制効果を確認した。

キーワード：地下水位，水分特性曲線

(IGC:C-8, C-0)

1. はじめに

近年の集中豪雨の増加により、土砂災害発生数が増加する傾向にある。豪雨時において土石流や崖崩れを引き起こす自然斜面の不安定の原因としては、降雨による飽和度の上昇による粘着力の減少、自重の増加とともに、斜面内に地下水位が発生することがあげられる。筆者らは自然斜面の継続的な観測により、豪雨時に斜面内においてサクシオンが消失し正圧が発生して地下水位が形成されていることを確認している¹⁾²⁾。

地下水位の発生による斜面崩壊リスクを減少させる対策として、斜面内に排水パイプを設置する工法があり、鉄道盛土や宅地などに採用されている³⁾⁴⁾⁵⁾。本研究は、自然斜面を対象として、降雨時の地下水形成過程を検討することにより表層に排水パイプを設置する効果に関する検討を行った。

地盤内に設置した排水パイプが有効に機能するためには、豪雨時に斜面内に地下水が発生する過程を考える必要がある。ここでは2つの降雨浸透過程を考える。一つは、一般に考えられている地下水が地盤下端から形成され、上端に向かって上昇する過程である¹⁾。この過程を地下水位形成過程 A と呼ぶことにする。不飽和地盤に降雨があると、降雨が地盤内に浸透し始め、上層から順にある値 θ_h まで体積含水率が上昇していく。その後、降雨強度が一定の場合は体積含水率 θ_h をほぼ一定に保った不飽和帯が下層に向かって浸透していく。ここではこの不飽和帯を高含水比帯と呼ぶことにするが、高含水比帯の含水比は透水係数が降雨強度につり合うときの含水比であるとされている²⁾。高含水比帯が基盤層に到達すると基盤層の上面から

地下水が形成され、下層から上層に向かって地下水位は徐々に上昇する。以上の過程では、地下水位が形成されるためには、降雨が浸透して高含水比帯が基盤層に達するまでの時間が必要となる。

もう一つ考えられる地下水形成過程は、高含水比帯の中で斜面平行方向に側方浸透流が発生する場合であり、ここでは地下水位形成過程 B と呼ぶことにする。これは豪雨により、極めて高い θ_h で高含水比帯が形成され、高含水比帯内の不飽和透水係数が上昇するとともに、高含水比帯内の含水比が飽和状態に近づき水分保持力が低下する。この結果、上部から形成された高含水比帯が基盤層に達する前に、高含水比帯中に地下水位が形成され斜面平行方向の浸透流が発生するものである。地下水形成過程 B による斜面平行方向の流れは、これまで室内実験では確認されていないが、斜面内のサクシオンの観測において高含水比帯内で正の水圧が観測される事例があり、斜面平行方向の流れの発生が示唆されている⁶⁾⁷⁾。また、2010年7月に発生した広島県庄原市の豪雨では集中豪雨が発生して2時間以内で200箇所以上の斜面崩壊が発生⁸⁾しており、短時間の強い降雨で斜面が崩壊する過程を考える上で地下水形成過程についても高含水比帯が基盤に達する前の発生について検討する必要があると考えられる。降雨浸透量が大きい場合に地下水位形成過程 B が起こる場合は、高含水比帯が基盤に達する以前に、地盤中に設置した排水パイプから排水が起こると考えられる。

本研究では、地下水位形成過程と排水パイプの有効性について検討を行うため、模型土層を用いた一次元の室内降雨浸透実験を行った。

2. 1次元模型実験

2.1 試料と実験装置

高含水比帯中の体積含水率 θ_h は、水分保持特性と降雨強度に影響するため²⁾、試料と降雨強度を変化させ、実験を行い、高含水比帯中に側方浸透流が流れる際の θ_h を調べた。

保水性(水分特性曲線)は土の種類や粒度分布に影響するため、事前に粒度試験と透水試験を行い、試料の透水性を確認し、透水係数が1オーダーずつ異なる試料を用いて実験を行った。実験ケースを表-1に示す。表-1に示すように試料としては豊浦砂と広島県に広く分布するまさ土を用いた。まさ土試料は、透水性が大きく二層で地盤が形成される場合の実験を行うため園芸用に市販されているまさ土Aと850 μ mのふるいの通過分によるまさ土Bを用いた。それぞれの試料について、定水位透水試験を行い、飽和透水係数を求めた。図-1に試料の粒度分布を示す。自然斜面のまさ土と比較するとまさ土Aの透水係数は非常に大きいですが、ここでは透水係数の違いの影響が明確に表れることを目的として試料を選定した。

アクリルパイプに所定の間隙比 e 、体積含水率 θ で試料を締め固め、径29cm、高さ60cmの土層を作成した。排水パイプは、土層下端から高さ30cmの位置に予め27.5cm埋め込んだ。パイプは6°の勾配を設け、側方浸透流が排水できるように設置した(図-2)。排水パイプは、直径4.8cmの塩化ビニルパイプであり、実施工のものと同一規格の5×2.5cmの千鳥状の孔10個を作成した。長さ10cmにおける開口率(総孔面積/パイプ表面積)は6.63%であり、実施工の5.26%の1.3倍程度となっている(図-3)。計測項目は、体積含水率とサクション、地下水位、排水量である。地下水位は、アクリルパイプの下端の排水コックとメスピペットをホースで連結し目視で読み計測した(写真-1参照)。排水パイプからの排水量は、電子天秤を用いて計測した(写真-2参照)。

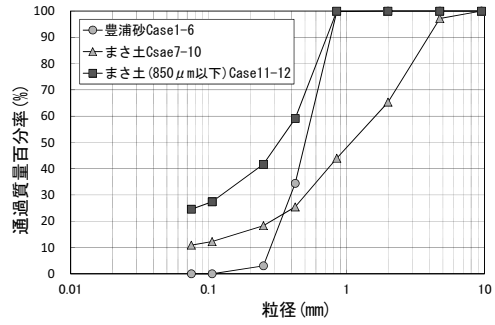


図-1 実験試料の粒度分布

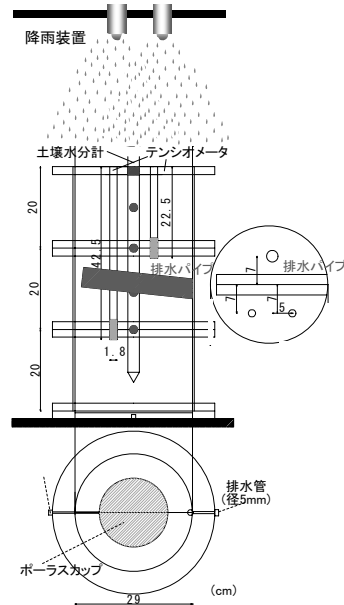


図-2 均一地盤における降雨浸透実験

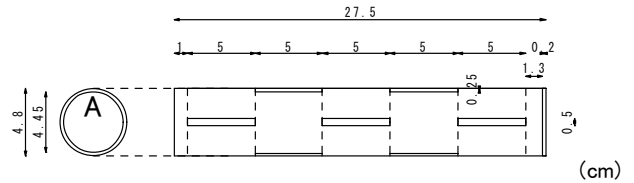


図-3 室内実験で用いた排水パイプ

表-1 実験条件と結果 (室温条件は20°C)

Case	試料	降雨強度 r(mm/hr)	排水 パイプ	間隙 比	間隙 率	初期体 積含水 比率 θ	飽和透水 係数 k(cm/s)の 測定値	土層底部に おける地下 水形成時間 (分)	パイプ からの 排水開 始時間 (分)		
1	均一 地盤	20.7	無	0.80	0.44	0.18	2.4×10^{-2}	167	—		
2			有					167	344		
3			73.2					無	58	—	
4								有	61	99	
5								122.8	無	32	—
6									有	37	62
7		まさ土 A	42.4	無	0.65		0.39	1.9×10^{-1}	61	—	
8				有					58	116	
9				無					24	—	
10			121.0	有					23	41	
11				まさ土 B (850 μ m通過 分)					無	198	—
12									有	204	223
13	二層 地盤	76.3	無	0.80	0.44	1.9×10^{-1}	61	—			
14			有	0.65	0.39		4.7×10^{-3}	176	16		



写真-1 地下水水位計測状況(上)



写真-2 排水量計測状況(下)

2.2 均一地盤における降雨浸透実験

表-1に均一地盤条件と二層地盤条件で実施した14ケースの降雨浸透実験の実験条件と結果の概要を示した。Case 1からCase 12までが均一地盤における実験である。表には、土槽底部に設置したピエゾメータで確認した底部における地下水形成時間、土層中のパイプからの排水開始時間を示している。

本実験では、地下水形成過程とパイプからの排水の関連を調べることを目的としたが、表-1の地下水形成時間とパイプからの排水開始時間が示すように、一様地盤の場合は、土の種類、降雨強度を変化させた6パターン全てで、排水が起こったのは底部に地下水が形成しパイプ位置まで地下水面が上昇した後であった。すなわち、地下水形成過程Bによる高含水比帯下降時のパイプからの排水はみられなかった。

代表的な実験条件として高含水比帯の形成と下降、基盤からの地下水面の形成がわかりやすく表れたCase 6(豊浦砂, 降雨強度 122.3mm/hr)と、Case 12(まさ土B, 降雨強度 38.4mm/hr)の結果について説明する。

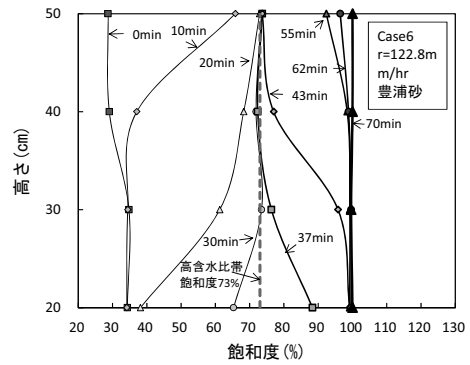


図-4 深度-飽和度の変化(Case 6)

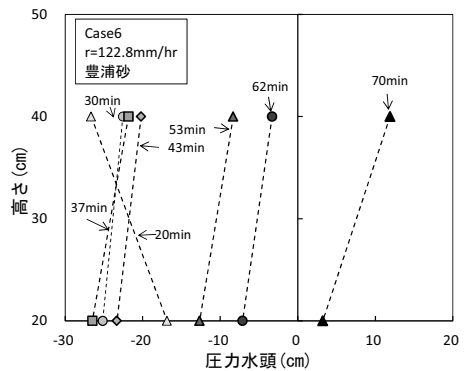


図-5 深度-圧力水頭の変化(Case 6)

図-4、図-5にCase 6、図-6、図-7にCase 12での降雨開始からの各時間における深度-飽和度、深度-圧力水頭の関係を示す。Case 6の降雨強度が122.8mm/hr、Case 12の降雨強度は38.4mm/hrである。まず、Case 6について見てみると、図-4から降雨が地盤に浸透すると、降雨開始20分後には、上層に飽和度73%程度の高含水比帯が形成され、下層に拡大していることがわかる。37分後には、高含水比帯が基盤に達し、43分後に飽和度が100%となって地下水が形成された。この時のパイプ位置(高さ30cm)の飽和度は95.8%であったが、図-5において高さ20cmと40cmにおいて測定した圧力水頭より線形近似で推定したパイプ位置(高さ30cm)での水頭は-24cmであり、排水は行われなかった。このことから高含水比帯においてパイプを通じた側方浸透流は発生していなかったといえる。その後、地下水位の上昇に伴い、パイプ位置の飽和度は上昇するが、55分後に飽和度が99.2%に達しても、排水はおこらず、負の圧力水頭(直線近似による推定値)も-10.5cm残留していた。排水がおこったのは降雨開始62分後であり、パイプ位置の飽和度は99.6%、推定圧力水頭は-5.2cmであった。以上のように高含水比帯降下時および地下水形成後においてもパイプを通じた浸透流が発生しなかった。理由は、地盤中に負の圧力水頭が残留し、土中水を保持しているためと考える。

次に、Case 12 について見てみると、図-6 から降雨が地盤に浸透すると降雨開始 32 分後には、上層に飽和度 99% 程度の高含水比帯が形成され、下層に拡大している。その後 129 分後に、高含水比帯が基盤に達し、地下水位が形成された。その時のパイプ位置(高さ 30cm)の飽和度は 80.6%であった。図-6 を見ると高さ 20cm, 40cm の飽和度がパイプのある高さ 30cm の値よりも高くなっており、図-7 で示した高さ 20cm, 40cm における圧力水頭から高さ 30cm 位置での圧力水頭を推定するのは難しいが、20cm と 40cm の計算値の平均は-29cm であり 30cm の位置でも大きな負圧が残っていたと推定される。高含水比帯形成時にはパイプからの排水はみられず、その後、地下水位の上昇に伴い、パイプ位置の飽和度は上昇するが、飽和度が 99%に達しても、排水はおこらなかった。高さ 20cm, 40cm での圧力水頭の平均は-13cm でありパイプ位置でも負圧が残留していたことが考えられる。このようにパイプからの浸透流が発生しなかった理由は、Case 6 と同様、地盤が飽和に近いにも関わらず負の圧力水頭が残留していたためと推定される。

今回の模型実験では、時間 120mm 以上の強い降雨強度を与えた場合でも、高含水比帯下降時においてパイプからの排水は無かった。また、パイプ位置で飽和に近い($S_r = 96\%$)程度の含水状態になっても、パイプからの排水は起きなかった。この原因は、高含水比帯下降時は-30cm~-60cm の負圧が、地下水形成後も-25cm~-13cm の負圧が残留していたためと考えられる。排水がおこったのは、高含水比帯が底面に達し、底面から形成された地下水位が排水パイプに到達し、負圧が消失したと推定されたとき排水が確認できた。つまり、今回の実験では、地下水位形成過程 A が現れたが、地下水位形成過程 B の条件である高含水比帯内の正圧の発生とパイプからの流れは認められなかった。

2.3 二層地盤における降雨浸透実験

自然斜面では地層ごとに地盤の特性が変化しているのが一般的である。

そこで、次に透水性が異なる二層地盤に関する降雨浸透実験を行った。表-1 に実験条件と結果、図-8 に模型概要図を示す。上層を Case 7~10 で使用したまさ土(飽和透水係数 $1.9 \times 10^{-1} \text{cm/s}$)、下層を Case 11~12 で使用したまさ土(飽和透水係数 $4.7 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)で構成した。層境界面は高さ 27.6cm の位置で排水パイプ下端の高さと一致させた。

図-9(a), (b)は、異なる飽和透水係数の二層成層のまさ土に対して、降雨強度 76.3mm/hr を与えた際の各高さにおける体積含水率の経時変化である。図-9(a)をみると、高さ 20cm 位置(下層)の体積含水率が飽和体積含水率($\theta_s = 0.301$)に達する前に、土層境界の位置 27.6cm よりも上層の高さ 30cm, 40cm, 50cm における体積含水率が順番に飽和に達している。その後、少し遅れて土層底面において地下水位の形成を確認し、高さ 20cm の体積含水率の値がほぼ一定値となった。このことより、層の透水係数

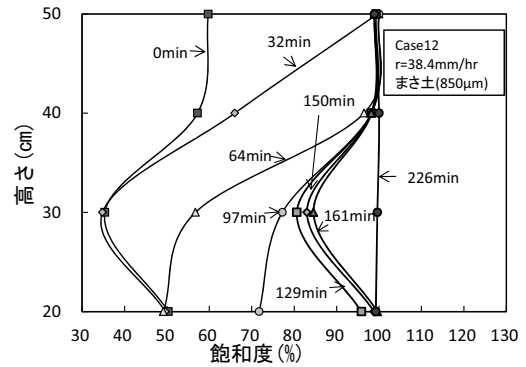


図-6 深度-飽和度の変化(Case 12)

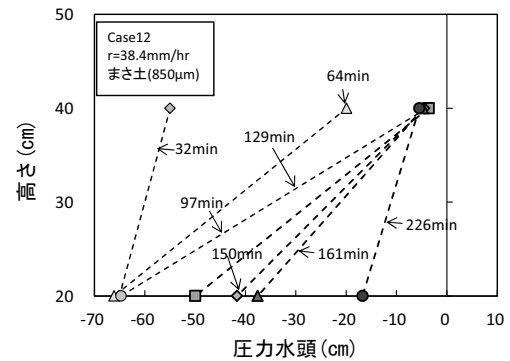


図-7 深度-圧力水頭の変化(Case 12)

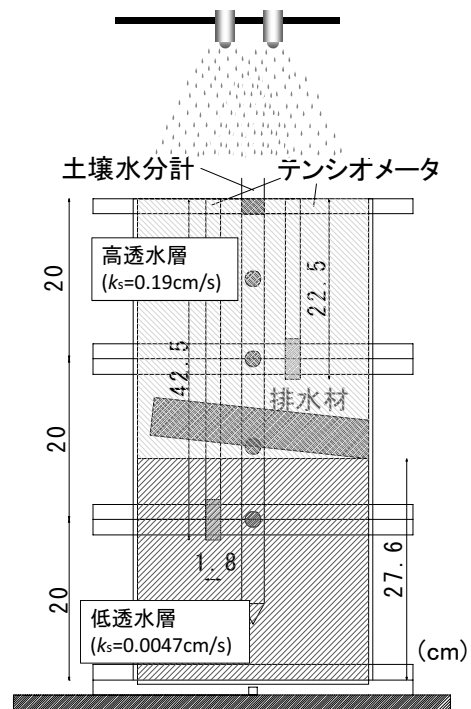


図-8 二層地盤における降雨浸透実験

の違いにより、土層底面に地下水が形成される前に、土層境界上部で地下水位ができたと推察される。図-9(b)の排水パイプ有のケースをみると、高さ 20cm(下層)の体積含水率が飽和時の含水率($\theta_s = 0.301$)に達する前にパイプからの排水が始まった(17分以降)。図-10(a)は排水パイプが

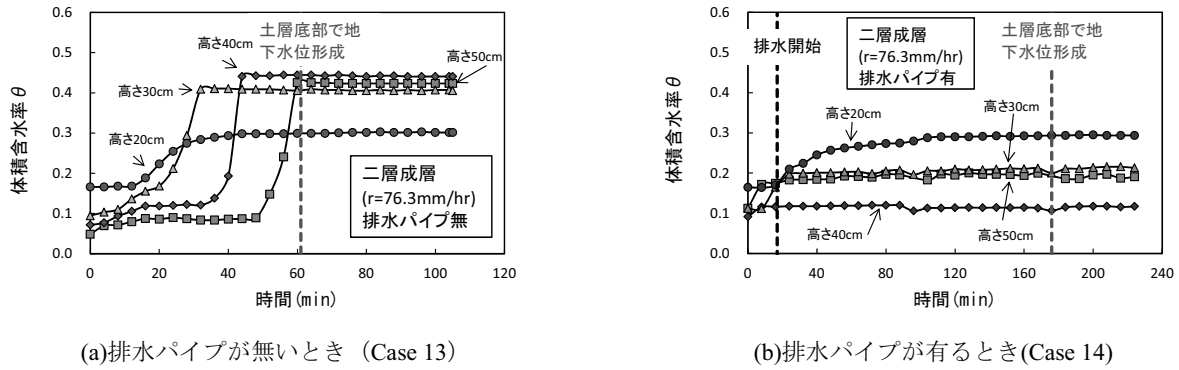


図-9 二層地盤の体積含水率の経時変化

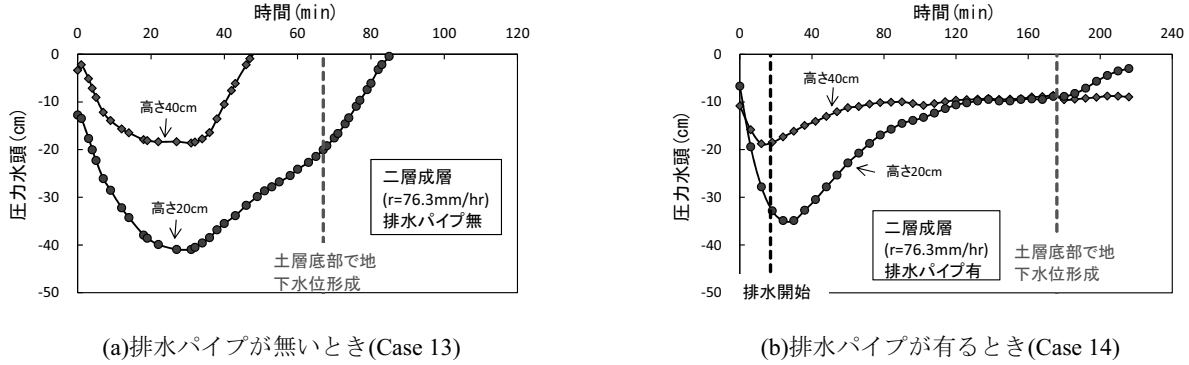


図-10 二層地盤の圧力水頭の経時変化

ないときの圧力水頭の変化である。図のように降雨開始後圧力水頭の値は徐々に低下し、その後上昇に転じている。降雨開始後に圧力水頭の値が低下する原因としては、テンシオメータの値が定常状態に十分達していなかったこと、降雨開始後の間隙空気圧の影響が考えられるが、明確にはできなかった。

本条件では、透水性が急減する土層境界付近で最も圧力水頭が上昇し、後々に上層と下層の圧力水頭が上昇すると予想される。図-10(a)をみると地下水水位形成よりも前に上層（高さ 40cm）で正圧が発生している。図-10(b)は排水パイプがあるときの高さ 20cm, 40cm における圧力水頭の変化である。排水は 16 分後におこったが、このときの圧力水頭は負圧であった。パイプの高さ 30cm 付近では圧力水頭は計測されていないが、土層境界付近に地下水水面が形成されたとすると高さ 20cm, 40cm よりも高いと考えられ、排水開始時は正圧であったと推測される。ただし、排水パイプがないときに、飽和するまでが 28 分であったのに対し、排水パイプありで 16 分に排水開始された原因はわからなかった。

以上のように透水性が小さい層の上に 40 倍の透水性をもつ層がある二層地盤の場合、高含水比帯が基盤層に達する前に上層で地下水水面が形成される地下水水位形成過程 B が出現することがわかった。現地観測結果から、地盤浅層と深層に別々の地下水水面が計測されることを確認したティハラは、地下水水位形成過程 B が起こるかどうかは地形や地質に依存すると報告している⁹⁾。さらに、地下水水位形成過程 B の発生要因として、強雨により、高含

水比帯中の θ_h の値が極めて高ければ、斜面平行方向の透水係数が深さ方向の透水係数に比べて高くなることも一因として考えられる。このように、地下水水位形成過程 B は、降雨、地盤の物性、層構造などさまざまな要因が関わりあって、発生することが考えられる。

3. 浸透流解析による検討

3.1 用いた試料の水分特性曲線のモデル化

水分特性曲線を表す代表的なモデルとして式(2)、(3)で示される van Genuchten モデルがある⁹⁾¹⁰⁾。式(1)の目的関数 ϕ が最小となるように実験値と式(2)、(3)の VG モデルとのフィッティングを行った。

$$\phi(p) = \sum_{j=1}^{J_0} [w_j \{\theta_j - \hat{\theta}(\psi_{mj}, p)\}]^2 + \sum_{j=J_0+1}^{J_0+J_k} [w_1 w_2 w_j \{\psi_j - \hat{\psi}(\psi_{mj}, p)\}]^2 \quad (1)$$

ここでパラメータは以下のとおりである。

p : 最適化すべきパラメータからなるベクトル

J_0 : 実験データの数

θ_j : $\psi_m = \psi_{mj}$ における体積含水率の実測値

$\hat{\theta}(\psi_{mj}, p)$: ψ_{mj} と p を用いて計算される体積含水率

w_j : j 番目のデータに対する重み

J_k : 不飽和透水係数の実測データ数

ψ_j と $\hat{\psi}(\psi_{mj}, p)$: k もしくは $\log k$ の実測値と計算値

W_1 : 不飽和透水係数曲線に関する重み係数
 W_2 : 体積含水率と不飽和透水係数のデータ数と単位の違いを補正する重み係数

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \quad (0 \leq S_e \leq 1, \alpha \geq 0) \quad (2)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 ψ : サクシオン、 α : 定数、 n : 定数、 $m=1-1/n$ ($0 < m < 1, n > 1$) である。

$$k_\theta / k_s = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

ここで、 k_θ : 体積含水率 θ のときの不飽和透水係数
 k_s : 飽和透水係数
 である。

今回の実験では、 $\theta=0.18$ 程度の一様な初期状態から降雨を与えているため、給水走査曲線による水分特性曲線

となる。Scott ら¹¹⁾が導入した仮定によると、走査曲線は排水・給水過程において α, n の値はそれぞれの主曲線と同じで、 θ_s, θ_r の値を適宜変えることで表現できる。そのため、今回のフィッティングで変化させるパラメータは、 α, n, θ_r (残留体積含水率)、 k_s (飽和透水係数)であり、 θ_{sat} (飽和体積含水率)は実験値を用いた。また、Ricchards and Weeks によって開発され¹²⁾、Watson が提唱した¹³⁾不飽和浸透特性の室内試験法を原位置へ適用したインスタテニナス・プロファイル法を用いて、式(4)から地表面からの深度 z における不飽和透水係数を求めた。

$$k_{wu} = \frac{\left(\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right)_{z,t} + r}{\left(\frac{\partial \psi_p}{\partial z} + 1 \right)_{z,t}} \quad (4)$$

ここで、 θ : 体積含水率、 ψ_p : 圧力水頭、 t : 時間、 r : 降雨強度、分母は全水頭、分子は比流量である。本来なら

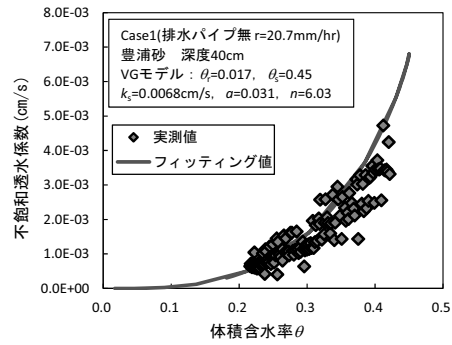
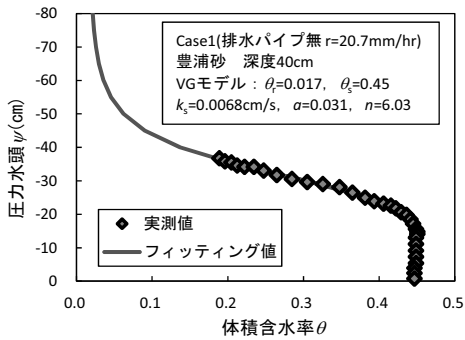


図-11 Case 1(豊浦砂)のフィッティング結果

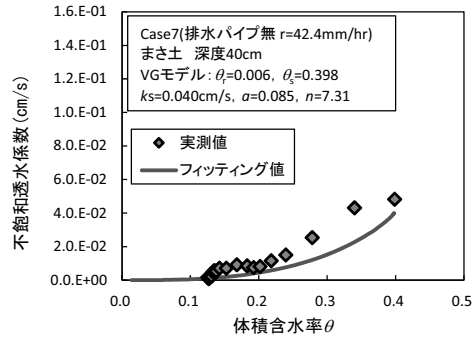
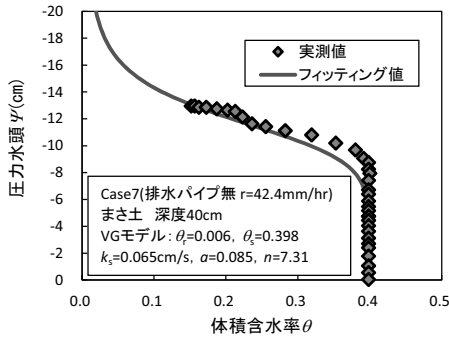


図-12 Case 7(まさ土 A)のフィッティング結果

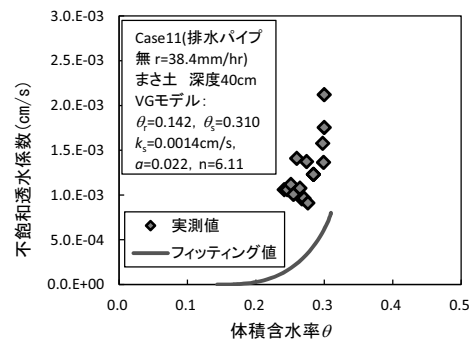
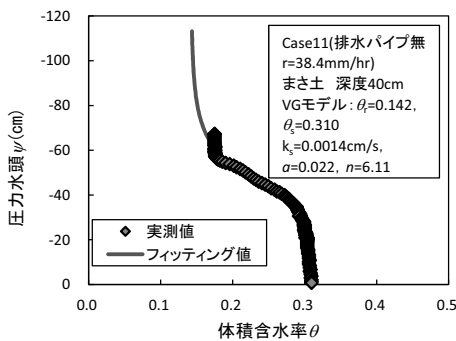


図-13 Case 11(まさ土 B)のフィッティング結果

ば、降雨浸透後の排水挙動を評価する際には排水・給水走査曲線について考える必要があるが、ここでは給水走査曲線のみについて考えている。これは、既往の研究で排水時と給水時の差が小さかったことから、給水走査曲線のみでフィッティングを行った²⁾。

図-11～図-13 に排水パイプ無の場合の Case 1(豊浦砂 $r=20.7\text{mm/hr}$), Case 7(まさ土 $r=42.4\text{mm/hr}$), Case 11(まさ土 $850\mu\text{m}$ 通過試料 $r=38.4\text{mm/hr}$)の高さ 20cm における水分特性曲線と高さ 30cm における不飽和透水係数のフィッティング結果を示す。フィッティングに用いたパラメータを表-2 にまとめて示した。各試料に関していずれも降雨強度が弱いケースでフィッティングを行った。これは降雨強度が強い場合には、地下水位が形成された後も、深い深度において負の圧力水頭が残留する傾向がみられたため、この原因を明らかにすることができなかった。降雨強度が弱いケースを用いた図-11～図-13 を見ると、各試料についておおむね良好にフィッティングできていると考えられる。

3.2 解析条件と解析結果

模型実験で得た体積含水率と圧力水頭の密なデータからフィッティングした水分特性曲線を用いて、模型実験の再現を行った。特に、降雨浸透、地下水位形成過程における高含水帯の形成やその挙動について検討を行った。

図-14 に浸透流解析を行った、直径 29cm、高さ 60cm の

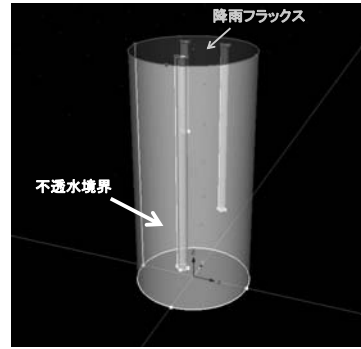


図-14 解析を行った円柱土層モデル

円柱の解析モデルを示す。境界条件として、側面、下端は不透水境界とし、所定の一定降雨フラックスを上端表面に与えた。模型実験では内部に土壌水分計とテンシオメータが挿入されているのでそれを円柱で表現し、そこには水が浸入しないように設定した。HYDRUS¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾では、土質条件を、VG モデルによって設定する。

図-15～図-17 に、解析 Case 1 における体積含水率、圧力水頭、地下水位の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較を示す。体積含水率、圧力水頭、地下水位の実験値と HYDRUS による解析値は、各深度においてほぼ同じような傾向である。高含水比帯の θ_0 の値も $\theta_0=0.21$ 程度と計算され、実験値と良好に整合しているといえる。また、圧力水頭、地下水位の値や変動の挙動も実験値と

表-2 各試料のフィッティング結果

	Case 1(豊浦砂)	Case 7(まさ土 A)	Case 11(まさ土 B)
θ_0 (残留体積含水率)	0.017	0.006	0.142
θ_s (飽和体積含水率)	0.45	0.398	0.310
k_s (飽和透水係数)	0.0068cm/s	0.040cm/s	0.0014cm/s
α (定数)	0.031	0.085	0.022
n (定数)	6.03	7.31	6.11
目的関数	0.016	0.027	0.006

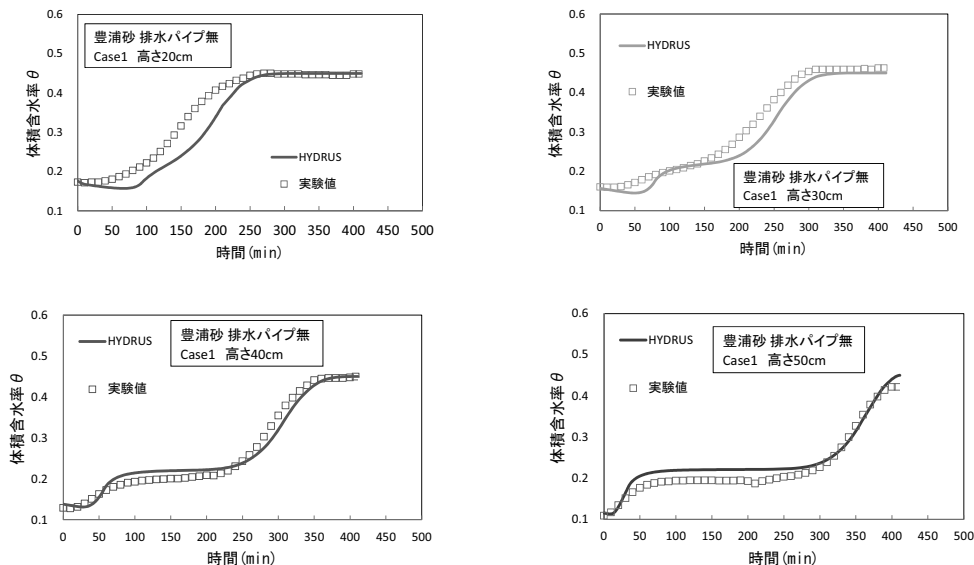


図-15 体積含水率 θ の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 1)

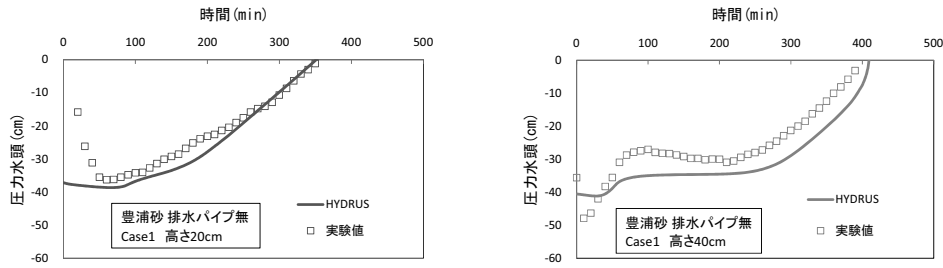


図-16 圧力水頭の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 1)

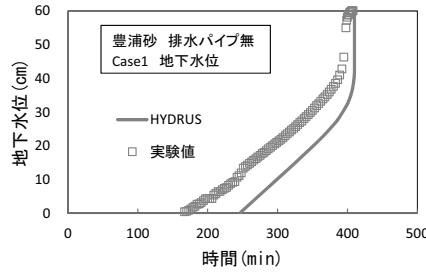


図-17 地下水位の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 1)

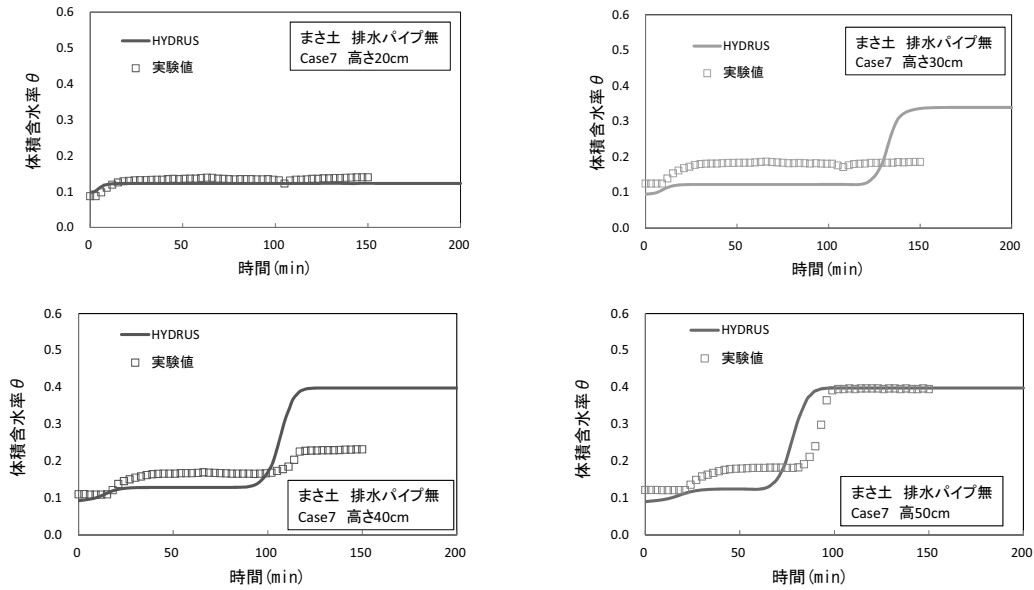


図-18 体積含水率 θ の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 7)

類似している。実験からフィッティングしたパラメータを使用することで降雨浸透過程をほぼ妥当に解析できたといえる。

図-18～図-20に、解析 Case 7における体積含水率、圧力水頭、地下水位の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較を示す。体積含水率、圧力水頭の実験値と HYDRUS による解析値は、各深度において、豊浦砂ほど(解析 Case 1)良好でないが、ほぼ同じような傾向である。高含水比帯の θ_h の値も $\theta_h=0.12$ 程度と計算され、実験値と良好に整合している。以上のように一様地盤に関しては、解析からも上部から高含水比帯が形成されて底部に達し、底部から地下水位が上昇して飽和(圧力水頭は0)に至る

という結果になった。高含水比帯内は不飽和であり、サクションが残留していることも実験結果と一致している。

図-21、図-22は上層をまさ土 A、下層をまさ土 Bとする二層地盤の解析結果である。実験結果である図-9(a)、図-10(a)と比較すると、実験においては高さ 30cm、40cm、50cm に順に飽和になっているが、図-21 では高さ 50cm、40cm、30cm の順に飽和に達している。また、圧力水頭をみると実験では高さ 40cm の圧力水頭が 240 分後も負圧になっているが、解析では 35 分後に正圧に達している。すなわち計算では上層では上から順に 60 分以内で飽和に達しているが、実測では内部に負圧が残ったまま土層境界付近から飽和に達し、順次上の層が飽和した。このよう

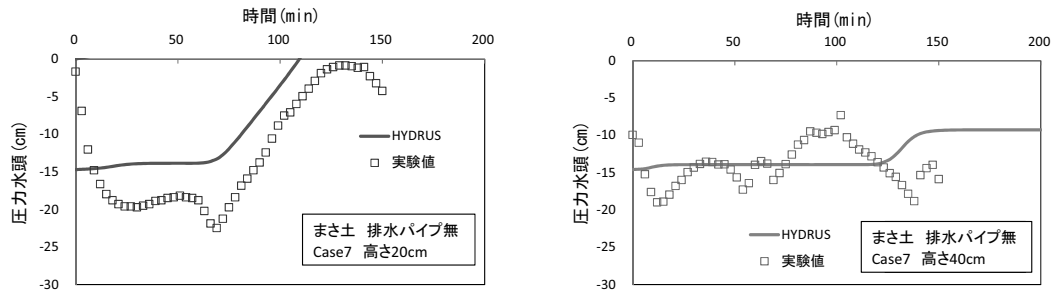


図-19 圧力水頭の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 7)

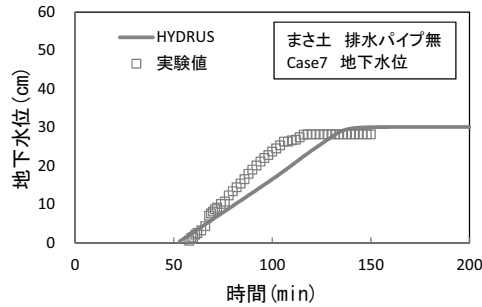


図-20 地下水位の経時変化の実験値と HYDRUS による解析値の比較 (Case 7)

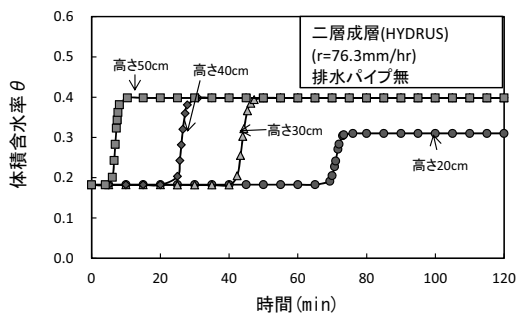


図-21 二層地盤(Case 13)の解析結果(体積含水率)

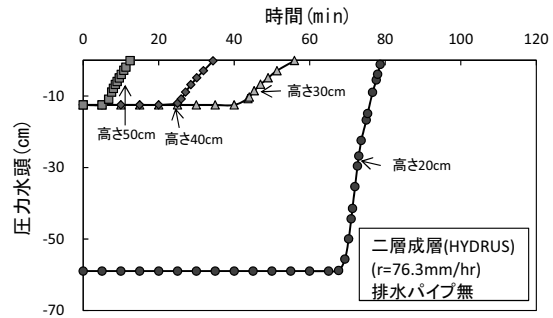


図-22 二層地盤(Case 13)の解析結果(圧力水頭)

に計算と実験で相違が生じたが、土層底部に地下水が形成される前に透水性の高い上層において正圧が生じたこと(パイプからの排水が起こる)は共通している。二層地盤における降雨浸透過程と、底部に高含水比帯が達する前に上層に地下水位が形成される条件についてさらに検討が必要である。

4. 結論

地下水位の発生による斜面崩壊リスクを減少させる対策として、斜面内に排水パイプを設置する工法があり、鉄道盛土や宅地などに採用されている。本研究は、自然斜面を対象として、内径 29cm、高さ 60cm 一次元土層を用いて降雨浸透実験を行い、土層中の地下水形成過程と表層から 30cm の位置に配置したパイプからの排水に関する検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 均一な地盤において 20.7~122.8mm/hr の降雨強度を与えた一次元降雨浸透実験では、すべての実験条件において表層から下降する高含水比帯内にサクションが残留し、高含水比帯内のパイプからの排水が起こらなかった。表層から 30cm に設置したパイプからの排水は、高含水比帯が土層底部に達し、地下水位が土層底部に形成されてパイプ位置まで上昇した後に起こった。また、地下水位上昇過程においてパイプ位置の土の飽和度が 96% に上昇しても、サクションが残留している場合は、パイプからの排水が起こらなかった。
- 2) 土層構成を二層とし、上層の透水性が下層の約 50 倍とした土層で降雨実験を行うと、高含水比帯が基盤に到達する以前に土層境界付近から地下水位が形成され、上層に設置したパイプから排水が生じた。このことから、上層が下層に比べて透水性が高くなっている地盤では高含水比帯が基盤に達する前に上層内に地下水位が形成され、上層内からのパイプによる排水が可能である。
- 3) 模型実験より得たデータを基に、VG モデルを用いて

水分特性曲線のフィッティングを行った。また、フィッティングした水分特性曲線を用いて解析を行い、実験値と整合する結果を得た。透水性の高い層(上層)と透水性の低い層(下層)による二層地盤の解析結果では、上層内に早い段階で正圧発生する結果となった。しかし、この間の上層内での飽和の進行過程において、土層境界から上向きと飽和が進行(実験)と、表層から下向きに飽和が進行(解析)という大きな相違があった。これについては今後さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) Thiha:降雨時の風化花崗岩斜面の不安定化機構に関する研究, 広島大学博士課程後期学位論文, pp.153-203, 2005.
- 2) 由利厚樹, 加納誠二, 土田孝:まさ土の土中水分変動に及ぼす降雨特性と地盤条件の影響, 第45回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.165-166, 2010.
- 3) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人:浸透流解析における盛土排水パイプのモデル化, 第44回地盤工学研究発表会, 発表講演集, pp.997-998, 2009.
- 4) 杉崎英司, 増田幸宏, 岡田勝也, 村石尚:新幹線盛土排水パイプの機能分析, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第IV部, Vol.44, pp.588-589, 1989.
- 5) 千代田器材株式会社ホームページ: <http://www.chiyoda-kizai.co.jp/PN/index.html> 恒久排水補強パイプ(PDR工法) 2012.10.5.
- 6) Thi Ha, 佐々木康, 土田孝, 柳田三徳:自然斜面における雨水浸透・流出の原位置観測の事例紹介, 地下水技術, Vol.49, No.4, pp.11-20, 2007.
- 7) Thi Ha・佐々木廉・森脇武夫・加納誠二:自然まさ土斜面における土中水分およびサクシヨンの現地観測, 土と基礎, 第51巻, 11号, pp.38-40, 2003.
- 8) 花岡尚, 川口将季, 土田孝, 中川翔太, 加納誠二:2010年7月に広島県庄原市で発生した土砂災害の調査と考察-平行斜面中腹の崩壊メカニズムに関する検討-, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.295-309, 2012.
- 9) 社団法人地盤工学会:不飽和地盤の挙動と評価, pp.11-84, 2004.
- 10) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, No.44, pp.892-898, 1980.
- 11) Scott, P.S., Farquhar, G.J.andKouwen, N.:Hysteric Effects on Net Infiltration, pp.163~170, In advances in Infiltration, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 1983.
- 12) Ricards,S.J.and Weeks,L.V.:Capillary Conductivity Values from Moisture Yield and Tension Mesurements on Soil Columns,Soil Sci.Soc.Am.Proc.,Vol.17,pp.206~209,1953.
- 13) Watson,K.K.:An Instantaneous Profile Method for Determining the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Prous Materials,Water Resources Res.,2,pp.709~715,1966.
- 14) J.Simunek, M.Th.vanGenuchten, M.Sejna: HYDRUS Technical Manual Version2.0, 2011.
- 15) M.Sejna, J.Simunek, M.Th.vanGenuchten: HYDRUS User Manual Version2.0, 2011.
- 16) D.Rassam, J.Simunek, and M.Th.van Genuchten 著 取出伸夫・井上光弘監訳:HYDRUS-2Dによる土中の不飽和流れの計算, 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ, 1.1~3.1, 2004.

(2012年6月26日 受付)