

降雨浸透が盛土の斜面崩壊に及ぼす影響

朱 偉¹・山村和也²・石田哲朗³

¹学生会員 修(工) 日本大学大学院生産工学研究科 博士後期課程 (〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

³正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井2100)

降雨による土構造物の崩壊は、浸透と安定との複合問題であるため、盛土への浸透現象を解明し安定性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。降雨浸透現象に影響する要素としては、土質材料の種類や締固め度、降雨強度や降雨パターンならびに構造物の形状などが考えられる。また、同じ降雨が作用しても土構造物の条件によっては、間隙水圧や飽和度の変化に差異が生じ、安定性に及ぼす影響も異なる。ここでは、大型降雨浸透実験をモデルに、各種の条件で浸透流解析を行い、降雨浸透の土構造物の安定性へ及ぼす影響を明らかにした。

Key Words : rain infiltration, embankment, unsaturated hydraulic soil properties, slope stability, saturated-unsaturated seepage flow

1. はじめに

河川堤防、道路盛土は、梅雨期の長雨や台風などの集中豪雨によってしばしば崩壊し、人命や財産に大きな被害をもたらす。本論文はこのような盛土を対象とし、浸透水の影響によって発生する盛土の崩壊を検討する。降雨による盛土の崩壊は、飽和度の増加に伴う土の質量の増加や土のせん断抵抗の低下により引き起こされる。特に、降雨時の盛土内部の浸潤線の上昇と間隙水圧の増加が、盛土の安定性に大きく影響¹⁾する。これまでにも、降雨時に生じる土の強度の低下や間隙水圧の変化などを取り入れた安定解析手法²⁾が研究されてきた。しかし、降雨時の斜面崩壊は浸透と安定の複合問題であるため、先ず、降雨浸透現象による盛土内部の水分移動の状態を把握することが必要である。例えば、八木ら³⁾は降雨による斜面崩壊の予知手法として、限界降雨量の考え方を提案し、土の強度特性よりも浸透特性の方が大きく影響することを明らかにしており、複雑な降雨浸透現象を十分に把握することが、盛土の安定性の評価の重要な鍵であるとも考えられる。

盛土における降雨浸透の検討項目としては、土の種類、締固めの度合いなど土質材料に関連する要素と、降雨の強度、降雨パターンのような降雨に関わる要素、および盛土の形状など(以下、諸要素と呼ぶ)が考えられる。例えば、初期の状態により、同じ降雨で

あっても間隙水圧、飽和度の変化に差異が生じ、安定性に及ぼす影響も異なると思われる。

現在、降雨時の盛土内の水位や飽和度の変化を把握するためには、飽和-不飽和浸透流解析が有力な手法として使われている。非定常降雨浸透現象に対してもこの有限要素法に基づく解析手法⁴⁾が適しているので、大型降雨浸透実験をモデルとし、様々な条件で浸透流解析を行い、前述した諸要素がどのように盛土の安定性に影響するかを検討する。

2. 浸透流解析への土質定数の代入

飽和-不飽和浸透流の支配方程式は Neuman⁵⁾によって、一つの独立変数の方程式にまとめられている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} + k(\Psi) \right) = (C(\Psi) + \omega S_s) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 Ψ : 負の圧力水頭、 $C(\Psi) = d\theta/d\Psi$: 比水分容量、 θ : 体積含水率、 $S_s = dn/d\Psi$: 比貯留係数、 n : 間隙率、 $\omega = 0$: 不飽和領域、 $\omega = 1$: 鮫領域とする。

降雨浸透に影響する不飽和土の性質としては、圧力水頭と体積含水率の変化を表す水分特性曲線 $\Psi(\theta)$

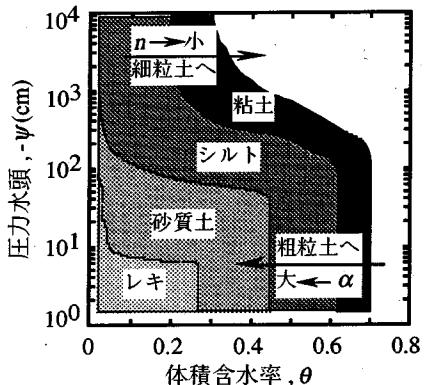


図-1 土の種類とその水分特性曲線

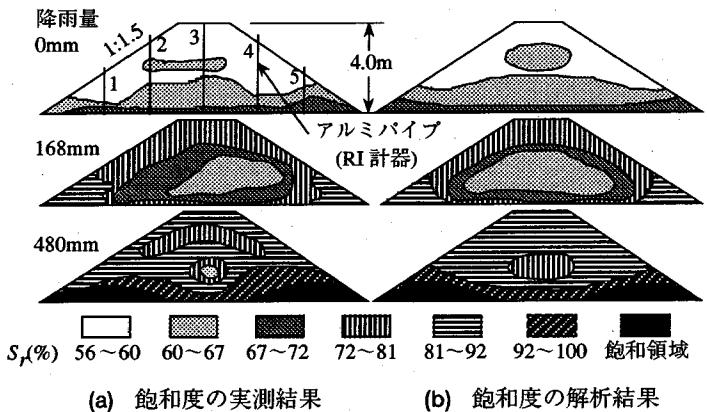


図-2 大型降雨浸透実験の実測と解析結果の比較

と、不飽和透水係数と体積含水率の変化を表す $k(\theta)$ 曲線の関係が用いられる。

しかし、 $k(\theta)$ を求める実験は複雑で、かつ長時間を要するので、実際には関数モデル^{9,10}から推定することが多い。その中で Mualem⁸ は比透水係数 $k_r = k(\theta)/\text{飽和透水係数 } k_s$ を次式で表している。

$$k_r = S_e^{1/2} \left[\int_0^{\theta_s} \frac{1}{\Psi(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{\Psi(x)} dx \right]^2 \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_f} \quad (3)$$

ここに、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 最小容水量、 S_e : 有効飽和度とする。van Genuchten⁹ は $\theta(\Psi)$ の一般式を次式のように考え、

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^m} \right]^m \quad (4)$$

この式(4)をMualemの式(2)に代入し、次式を導いた（以下、VGモデルと呼ぶ）。

$$k_r(S_e) = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$m=1-1/n$ 、 α 、 n は土の性質を反映するパラメータである。VGモデルは解析に優れた適応性を持つと考えられ、広く用いられている。西垣ら¹⁰は日本の土に対しても、このVGモデルが適用できることを確認した。最近の $\Psi(\theta)$ と $k(\theta)$ に対するデータの蓄積は、このモデルが中心となっているようである。

VGモデルのパラメータ ($\alpha, n, \theta_s, \theta_f$)において、 α は土の限界毛管水頭 Ψ_c の逆数にはほぼ等しく¹¹、粘土分が多いほどその値は小さくなる。 n は粒径分布に依存する値であり、水分特性曲線の勾配に影響する。細粒

土ほど保水性がよく、 n の値は小さくなる。 θ_s は理論上、土の間隙率と等しいが、実際にはエントラップト・エアの存在により、間隙率の 80~90% の値になる場合が多い。また、 $\theta_s - \theta_f$ は土の有効間隙率に相当する。なお、筆者らの実験データと既報のデータ¹⁰をまとめると、土の種類と水分特性曲線の関係は、図-1のように表される。

3. 大型降雨浸透実験とその浸透流解析結果

大型盛土の模型実験¹² は、降雨による浸透現象とそれによる盛土の崩壊機構を調べることを目的に行われた。盛土材料には含水比を低く調節した関東ロームを用いて、それを小型手動ローラで緩く締固めて構築した ($\rho_d=0.64 t/m^3, e=3.38$ 、締固め度 $C_d=75\%$)。盛土の形状寸法は、底面幅 14m、高さ 4m のり勾配 1:1.5 である。なお、実験土槽の床面は、アスファルト・ライニングしてある。盛土への降雨の浸透は、15mm/hr に調整した散水装置により実施した。盛土の水分量の変化は、図-2a 中に示した位置にアルミパイプを立て、RI計器により深さ方向に 0.5m 間隔で計測した。また、土槽底面には間隙水圧計が設置してある。のり面が崩壊したのは、散水を開始してから 32 時間後で、累積降雨量は 480mm となる。実測された飽和度の時間的変化は図-2a に示す。崩壊時には、のり尻付近で高さ 0.75m の水位が観察された。

浸透解析に用いた土の浸透特性の初期値は、文献 10) に示された関東ロームのパラメータ ($\alpha=0.0115 \text{ cm}^{-1}, n=1.478, \theta_s=0.76, \theta_f=0.21$) を用いて、解析値とほぼ一致するまで、計算を繰り返した。解析では、盛土の浸透能（透水性）を上回る降雨強度の場合には、浸透水以外は表面流と判断される。また、天端とのり尻付近の湛水は考慮していない。なお、実測値

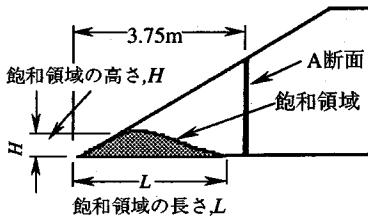


図-3 飽和領域

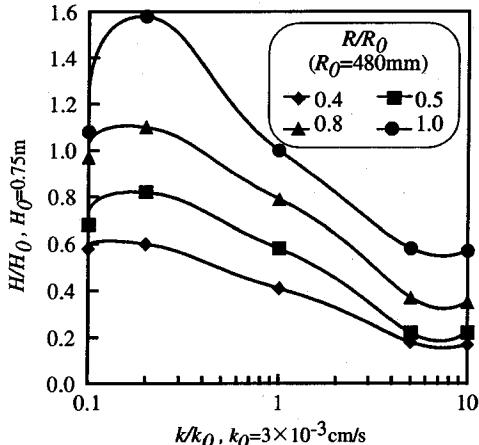


図-4 H/H_0 と k/k_0 の関係

と近づけるために盛土を異方透水性地盤として取り扱った($k_v=3.0 \times 10^{-3}$ cm/s, $k_h/k_v=5:1$)。この透水係数が一般に自然含水比で締固めた関東ロームよりかなり大きいのは、締固めが緩いことや、一度乾燥させて水分調整したことなどが原因と考えられる。図-2bに解析と実測がほぼ一致したと思われる最終結果を示す。その時のVGモデルのパラメータは $\alpha=0.012\text{cm}^{-1}$, $n=1.6$, $\theta_s=0.77$, $\theta_r=0.21$ となり、ルーズな土の透水特性を示している。

実験結果から、浸透水による盛土の崩壊機構を次のように考える。降雨の浸透水がまず、盛土表層の飽和度を高くなり、それから下方へと浸透する。垂直距離の短いのり尻では、早く浸潤前線が底部に達し、図-3のような飽和領域が形成される。累積降雨量の増加に従って、飽和領域が上昇し、次第に底部中心へのびていく。この時、盛土に溜まっている雨水の量(以下、貯留水量という)が多いほど飽和領域が大きくなり、盛土全体の飽和度も高くなる。

浸透によって土の単位体積重量が増加し、すべりを起こそうとする力も大きくなるが、飽和度の増加ならびに飽和領域の形成に伴う間隙水圧の上昇によるせん断抵抗の減少が、すべりを起こす主要な原因と考えられる。そこで、盛土の飽和度は貯留水量に、間隙水圧は飽和領域の高さに関連すると考え、飽和領域の高さ

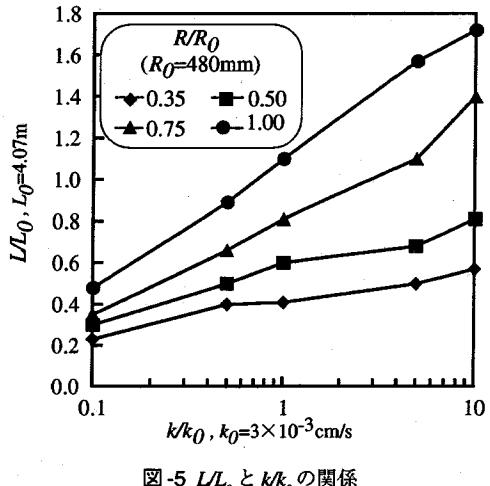


図-5 L/L_0 と k/k_0 の関係

と貯留水量を用いて、浸透水による盛土の安定性の低下を間接的に評価する。このため、実験盛土の斜面崩壊時の飽和領域の分布を臨界条件と考え、解析での飽和領域の分布をこの条件と比較することで、盛土斜面の安定性の低下の程度を推し量ることにした。また、飽和領域等の分布を表現するために、図-3に示すA断面の位置に対して解析結果を比較した。なお、図のように飽和領域の底面からの高さを H 、底面における長さを L とする。

4. 不飽和透水特性が降雨浸透へ及ぼす影響

VGモデルを構成するパラメータ($k, \alpha, n, \theta_s, \theta_r$)は、それぞれ透水特性として透水解析に取り入れられる。以下の項目に分けて、盛土における降雨浸透現象およびその安定性を検討する。

(1) 透水係数の影響

実験盛土の解析で用いた透水係数 $k_0 (= 3.0 \times 10^{-3}$ cm/s)を基準値とし、解析では $0.1 \sim 10 k_0$ の範囲から5点を選び、実験盛土の透水解析モデルに導入する。累積降雨量480mmを受けた時点の実験盛土に生じた飽和領域の高さ $H_0 (= 0.75\text{m})$ と長さ $L_0 (= 4.07\text{m})$ に対して、得られた解析結果と比較検討した。ここで、 R/R_0 は解析での降雨量 R と実験ですべりが生じたときの累積降雨量 $R_0=480\text{mm}$ との比を示す。結果から、透水係数 $0.2k_0$ で飽和領域の高さにピークが表れた(図-4)。 $0.2k_0$ の値が降雨強度に最も近い値であるため、降雨のほとんどが表面から浸透する。その上、のり尻からの雨水の流出も少なくなることから、盛土内の貯留水量が最も多くなっていることが分かる。

飽和領域の水平方向への伸びは、透水係数とほぼ比

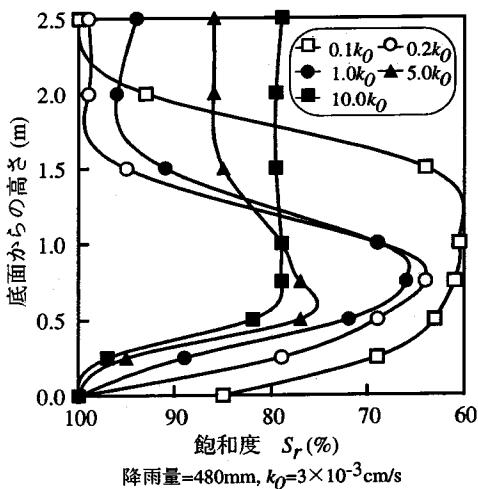


図-6 透水係数とA断面での飽和度分布

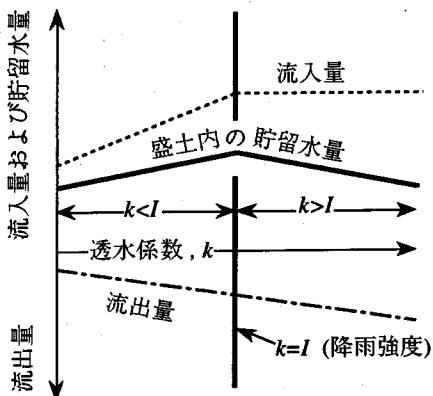


図-7 透水係数と降雨時の盛土における水収支

例する(図-5)。透水係数の大きな盛土ほど、飽和領域が早く中央部へ伸びる。透水係数の違いによる盛土の飽和度は、図-6に示すように変化する。大きな透水係数をもつ盛土ほど水は速く下方へ流れ、底部の飽和度がいち早く高くなる。また、小さい透水係数を持つ盛土は、表層の飽和度の上昇が著しい。

盛土への降雨浸透における透水係数と降雨強度の関係は、図-7にまとめてある。透水係数より降雨強度が大きい場合には、浸透する水量が制限され、逆に降雨強度が透水係数より小さければ、ほとんどの雨水が浸透し、流入量は一定となる。この時、透水係数が大きいほど、のり尻からの流出量が増加するので、盛土内に溜まる水分量(貯留水量)が減る。すなわち、盛土内に雨水が最も溜まりやすい条件は、盛土の表面浸透能と同程度の強度を持つ降雨が浸透する場合である。同じ降雨量を受けても、盛土内部の貯留水量が多いので、飽和領域の広がりが速く、盛土が不安定な状

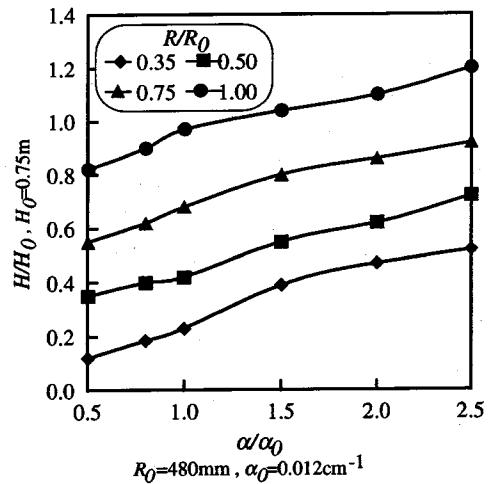


図-8 H/H_0 と α/α_0 の関係

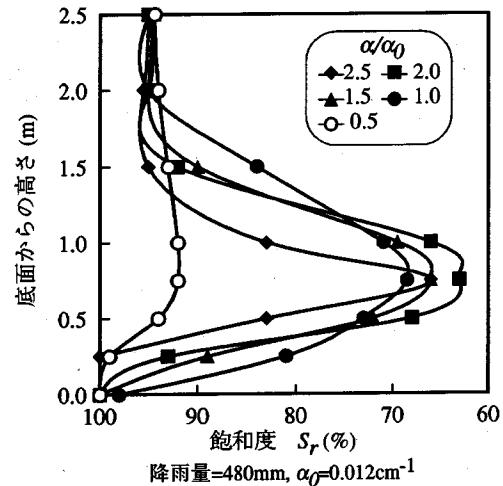


図-9 α 値とA断面での飽和度分布

態になることが、解析結果から確認できる。

(2) 水分特性曲線のパラメータによる影響

a) α による影響

実験盛土の解析結果で得た $\alpha_0 (= 0.012 \text{ cm}^{-1})$ に対して、 $0.5 \sim 2.5 \alpha_0$ の範囲内で浸透を比較した。図-8に示すように、 α が大きいほど飽和領域が高くなる傾向が見られる。これは α の値が大きいほど、限界毛管水頭が小さいので土が持っているサクションは低く、浸透水は底面に流下しやすい。その反面、 α の値が小さければ、土は高いサクションをもち、土が多量の水を保持するためである(図-9)。

b) n による影響

$0.75 \sim 1.25 n_0$ ($n_0 = 1.6$) の範囲で 6 点を取り解析を行ったところ、図-10に示す結果を得た。 n が大きいほど

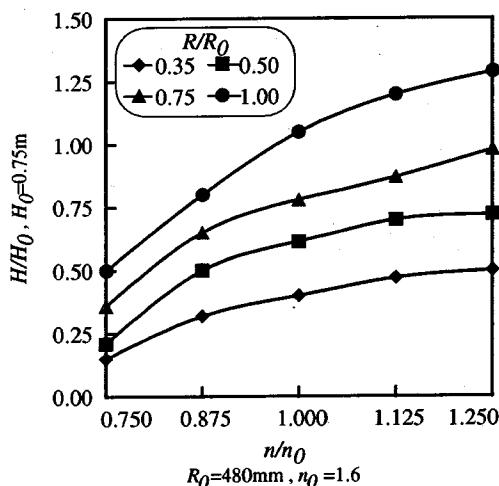


図-10 n/n_0 と H/H_0 の関係

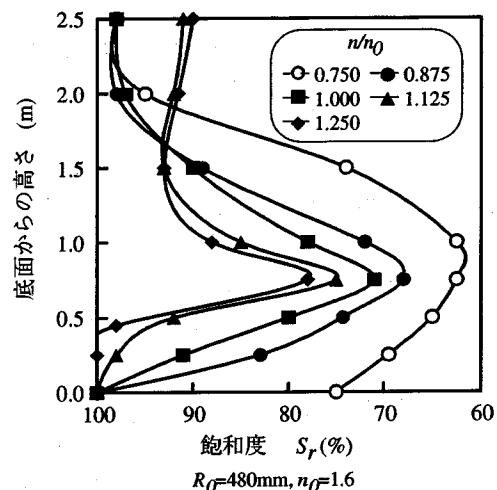


図-12 n 値と A 断面での飽和度分布

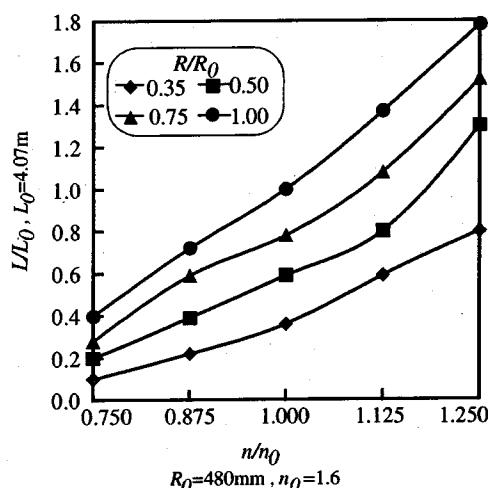


図-11 n/n_0 と L/L_0 の関係

飽和領域が高くなる傾向にある。また、図-11から分かるように水平方向への広がり方も速い。図-12に示す飽和度の分布からは、表層では大きな差が見られないものの、底部では n の大きいものほど飽和度が高くなる。

c) θ_s , θ_r による影響

間隙率にかかる θ_s や土の性質に左右される θ_r に対して、その値や $\theta_s - \theta_r$ の幅を変化させて検討してみた。結果から、 θ_s , θ_r を異なる値にしても、降雨浸透時の盛土内の飽和領域や飽和度の変化に大きな差異は見られなかった。しかし、 $\theta_s - \theta_r$ を変えると、その幅が大きいほど、飽和領域や飽和度の上昇が速くなる傾向にある。これは $\theta_s - \theta_r$ の値の影響というよりも、 $\theta_s - \theta_r$ の幅が大きくなると、水分特性曲線 $\Psi(\theta)$ の勾配が、緩やかになるためと思われる。

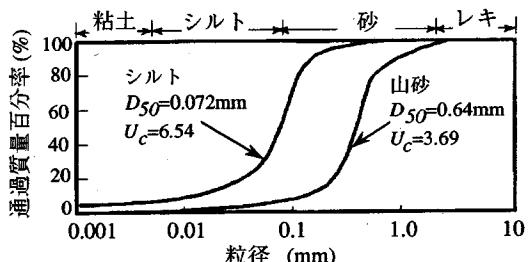


図-13 実験に用いた試料の粒径加積曲線

5. 締固め度の降雨浸透現象への影響

(1) 水分特性曲線の変化

盛土の締固めの程度が、降雨の浸透にどのような影響を及ぼすかを解明するには、まず、締固めによる土の水分特性曲線の変化を把握しなければならない。そこで、図-13に示す粒径分布の山砂とシルト試料を用いて、締固め度 C_d を変えて pF 試験を行った。試験には土柱法と遠心法を併用している。得られた水分特性曲線のデータを用いて、van Genuchten が提案した逆解析手法¹³⁾により、フィッティングを行った結果を表-1と図-14に示す。この結果の精度は、非線形最小二乗解析結果で 95% 以上の信頼度を持つ。これらの同定結果から、締固め度が高いほど、 $\theta_s - \theta_r$ の幅が小さくなり、限界毛管水頭が高くなることが分かる。また、 $\Psi(\theta)$ の勾配が幾分急になっている。なお、図-14には、このフィッティングの際に求められた $k(\theta)$ の関係を併記してある。

(2) 締固めによる α の変化

α は限界毛管水頭 Ψ_α の逆数にほぼ等しいと言われ

表-1 実験データより同定したVGモデルのパラメータ

試料	締固め度 C_d (%)	VGモデルのパラメータ			
		θ_r	θ_s	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n
シルト	80	0.162	0.541	0.019	2.100
	85	0.172	0.512	0.015	2.050
	90	0.184	0.483	0.013	2.000
山砂	80	0.099	0.470	0.056	4.550
	90	0.117	0.405	0.038	3.640

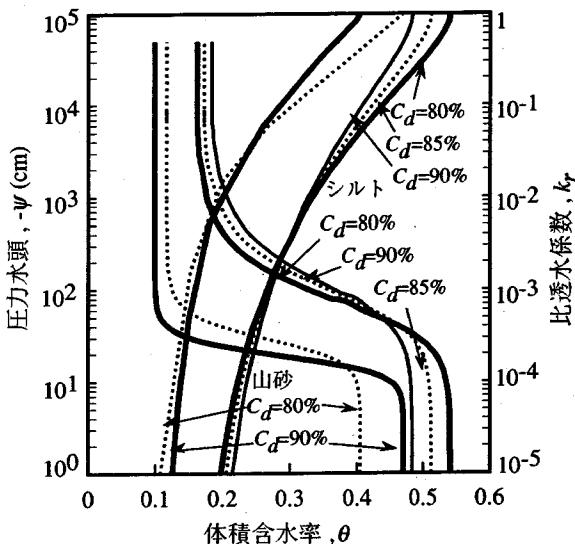


図-14 実験データに基づいた水分特性曲線

ている。そこで、 Ψ_{cr} を土の最大間隙径における毛管上昇高さと考えると、

$$\Psi_{cr} = \frac{4T \cos \beta}{d_{max} \gamma_w} \quad (6)$$

と表せる。ここに、 d_{max} : 最大間隙径、 T : 水の表面張力、 β : メニスカスと間隙壁との接触角、 γ_w : 水の単位体積重量とする。

ここで、土の粒子を球、間隙の形状を管¹⁴⁾と考えると、平均間隙径 r は、

$$r = \frac{2}{3} D_m \cdot e \quad (7)$$

となる。なお、 D_m : 平均粒径、 e : 間隙比である。

次に、土の最大間隙径 d_{max} と平均間隙径 r の関係を次式で表す、

$$d_{max} = \lambda \cdot r \quad (8)$$

ここで、 λ を間隙径の分布に関係する係数とすると、土の締固め度1での Ψ_{cr1} と締固め度2での Ψ_{cr2} の関係は、次の式(9)で表される。

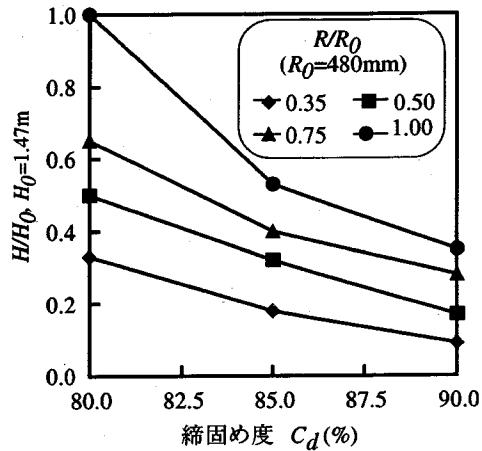


図-15 シルトの締固め度と飽和領域の高さ

$$\frac{\Psi_{cr1}}{\Psi_{cr2}} = \frac{d_{max2}}{d_{max1}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{e_2}{e_1} \quad (9)$$

ここに、 λ_1 、 λ_2 は締固め度1、2に対する λ である。締固めによる間隙構造変化 $\lambda_2/\lambda_1 = \Lambda$ とおく、また、 e_1 、 e_2 は、締固め度1と2における土の間隙比である。よって、締固めによるパラメータ α の変化は、

$$\alpha_1 = \Lambda \frac{e_1}{e_2} \cdot \alpha_2 \quad (10)$$

となる。 α_1 、 α_2 は、それぞれ締固め度1と2の α である。この関係を、実験に使用した山砂とシルト試料に対して試算したところ、山砂は $\Lambda=0.9$ 、シルトは $\Lambda=1.1 \sim 1.6$ となった。従って、シルト試料のような比較的粒径の細かなものほど、締固めによって限界毛管水頭の変化が大きくなることが示された。

(3) 締固めによる降雨浸透防止への効果

実験で求めた締固め度の異なるシルトと山砂の透水係数と水分特性曲線を用いて、それぞれの土で構築された盛土に対する飽和-不飽和浸透流解析結果を比較検討した。

a) シルトの盛土

シミュレーションを行う盛土の初期飽和度は浸潤面を底面の高さとし、要素分割した盛土内の全ての節点において、サクションに釣り合った水分が保持されているものと仮定する。降雨浸透の条件は、実験盛土の浸透モデルと同様である。なお、シルトの透水係数は、締固め度80, 85, 90%に対して、それぞれ $3.04 \times 10^4, 1.16 \times 10^4, 4.60 \times 10^5 (\text{cm/s})$ であった。

解析結果を図-15に示す。図の縦軸の $H_0=1.47\text{m}$ は、累積降雨量480mm、 $C_d=80\%$ 時の飽和領域の高さを指す。飽和領域の高さは、締固め度が低いほど高い。

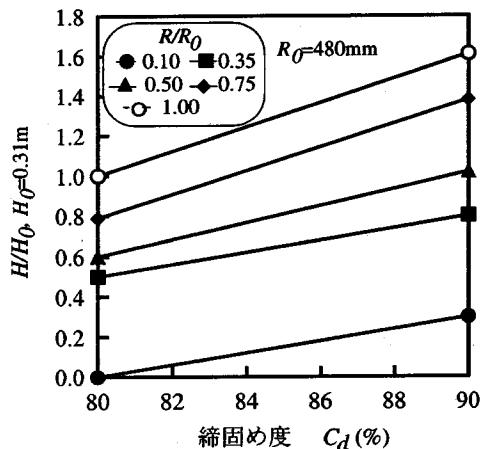


図-16 山砂の締固め度と飽和領域の高さ

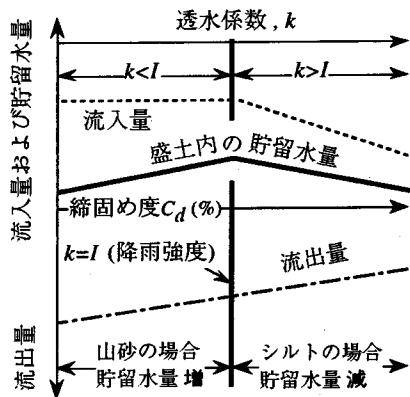


図-17 締固め度と降雨時の盛土における水収支

た、飽和領域の水平方向への伸びも、締固め度が低いほど、速くなるという結果が得られている。

b) 山砂の盛土

山砂の締固めによる透水係数の低下量はTaylor¹⁵の方法を用いて算出した。その結果、締固め度80, 90%の土の透水係数は、それぞれ $1.7 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となった。初期条件はシルトの場合と同様である。解析結果の比較では、累積降水量480mm, $C_d=80\%$ での飽和領域の高さを $H_0=0.31\text{m}$ とした。結果は図-16に示すように、シルトとは反対に、締固め度の大きい方が、飽和領域の立ち上がりが速い。水平方向の飽和領域の伸びは、シルトと同様に締固め度の低い方が速く浸透する。

降雨浸透に対する締固めの効果が、シルトと山砂で大きく異なる原因については、次のように分析する。締固めの目的は主として、盛土の透水係数を小さくし、いわゆる浸透能を低下させて、盛土内部への雨水の流入を減少させることにある。この効果は降雨強度と同じ、またはそれより小さい値の透水係数を持つ盛

表-2 解析に用いた降雨強度と盛土の透水係数

降雨強度の比 I/I_0	降雨強度 $I_0 (\text{mm/hr})$	透水係数の比 k/k_0
0.33	5	0.05
0.67	10	0.10
1.00	15	0.20
1.33	20	1.00
1.67	25	5.00
2.00	30	10.00

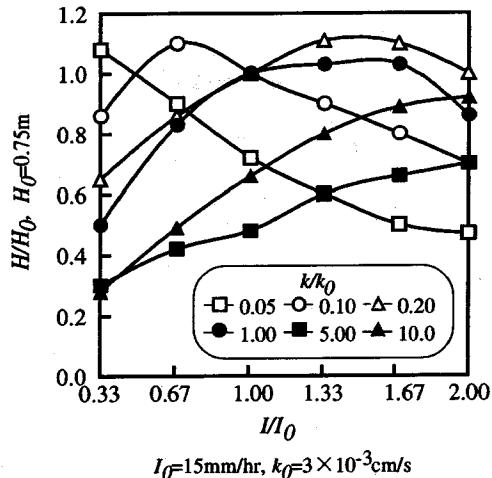


図-18 H/H_0 と I/I_0 の関係

上についてのみ表れる(図-17)。すなわちこの効果はシルトのケースに表れ、流入量の減少により盛土内の貯留水量が減り、その結果、飽和領域は低くなっている。山砂のような透水係数の大きな盛土に対しては、締固めによって、降雨強度より小さい透水係数を得ることは難しい。したがって、締固め度が高い場合でも、表層からの雨水流入量は減少しない。むしろ、のり尻などからの流出量が減るため、貯留水量が多くなり、高い飽和領域が形成される。もちろん、締固めを十分に行えば、盛土の強度増加は見込める。しかし、降雨浸透の影響だけに言及すれば、細粒土に対する効果は望めるが、透水係数の大きな土に対しては、その降雨浸透防止対策としての効果は期待できないと結論される。

6. 降雨浸透への降雨特性の影響

(1) 降雨強度の影響

実験盛土の降雨浸透実験での降雨強度 15mm/hr を I_0 とおき、実験盛土の透水係数 $3.0 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ を k_0 とする。これらの基準値に対して、表-2に示すケースについて解析した。なお、水分特性曲線のパラメータ

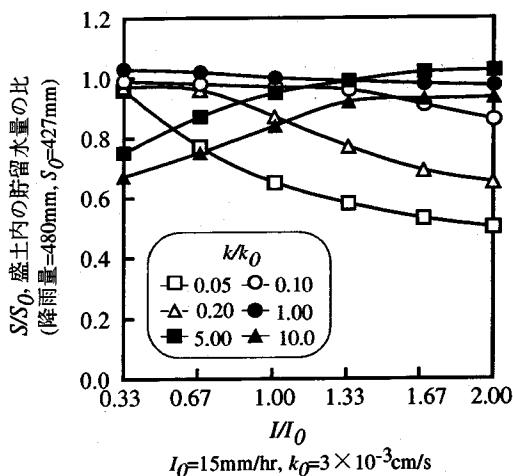


図-19 S/S_0 と I/I_0 の関係

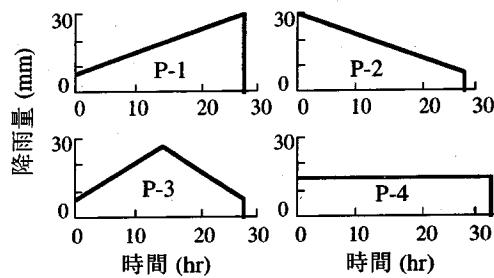


図-20 解析に用いた降雨パターン

は、先に示した関東ロームの値である。よって、実験盛土の解析で得た飽和領域の高さ $H_0 (=0.75 \text{ m})$ と、そのときの貯留水量(流入量と流出量との差)を S_0 として、累計降雨量 480mmまでの各降雨強度での降雨浸透状態を比較した。得られた結果を図-18、図-19に示す。透水係数の小さい盛土($k/k_0=0.05$)ほど、降雨強度が大きいと表面流出量が多くなる。飽和領域の高さと貯留水量のピークは、降雨強度の低いところに現れた。透水係数の大きな盛土($k/k_0=5, 10$)では、雨水のほとんどが盛土に流入するので、降雨強度が高いほど流入量が多く、貯留水量も増える。そのため、飽和領域も徐々に高くなる。ただし、中間の透水係数を持つ盛土では、透水係数の値と同程度の降雨強度で飽和領域の高さと貯留水量のピークが現れた。

(2) 降雨パターンの影響

図-20に示す累積降雨量 480mmとなる4つの降雨パターン(図中には、P-1~P-4と表示)に対して、その浸透現象への影響を検討する。盛土の透水係数は $k_1=1.5 \times 10^{-4}$, $k_2=6.0 \times 10^{-4}$, $k_3=3.0 \times 10^{-3} (\text{cm/s})$ と、比較的小さなものを用いた。これは大きな透水係数では、その浸透能が大きいために、降雨パターンによる違い

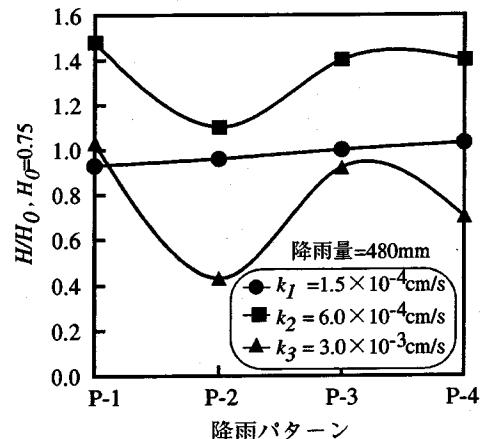


図-21 降雨パターンと飽和領域の高さ

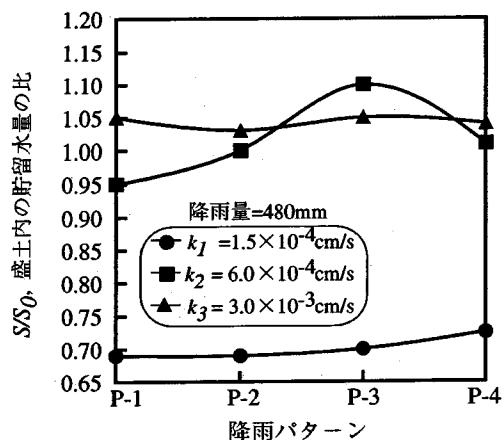


図-22 降雨パターンと盛土内の貯留雨水量

が比較し難いからである。ここでも飽和領域の高さ H_0 と貯留水量 S_0 の値は、実験盛土での解析結果による。結果は図-21、図-22にまとめてある。透水係数の大きい k_3 では、各パターンとも全降雨量が盛土内に浸透する。飽和領域の形成も降雨量の増減に従って変化する。しかし、盛土内の貯留量に大きな差はない、その貯留水量の分布は、パターン1,3がのり尻に比較的多く集中しているのに対して、パターン2, 4は全体に水分量が多くなるという結果を得た。一方、透水係数の小さい k_1 の場合に流入できる降雨強度の最大値は、5mm/hrであるので、降雨パターンが変化しても、雨水流入量は一定となり、飽和領域の高さと貯留水量に差異は見受けられない。ただし、パターン4は、所定の累積降雨量に達するまで、他の降雨パターンより継続降雨時間が5hrほど長くなるため、その分だけ貯留水量が大きく表れている。透水係数 k_2 の値は、降雨強度22mm/hrに相当する。貯留水量のピークはパターン3に表れ、飽和領域もパターン1, 3でやや高くな

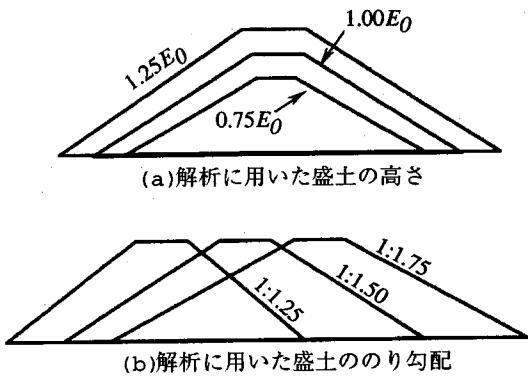


図-23 解析に用いた盛土の形状

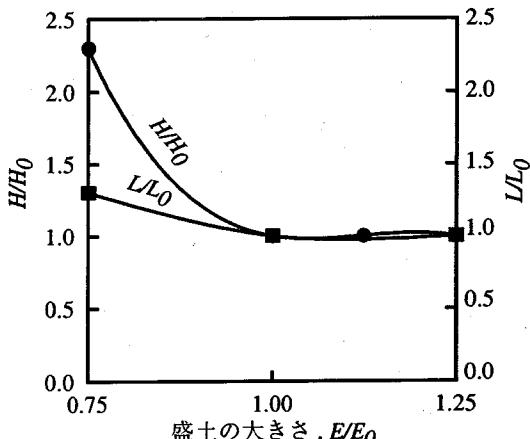


図-24 E/E_0 と H/H_0 , L/L_0

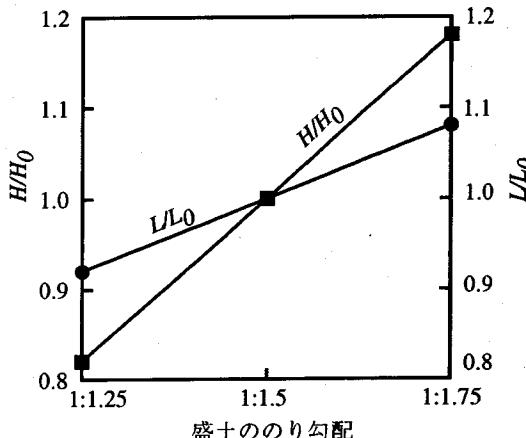


図-25 のり勾配と H/H_0 , L/L_0

る。この傾向は、 k_s の解析結果に近似している。

4の(1)の透水係数の影響でも述べたように、盛土内に最も雨水が溜まりやすいのは、表面浸透能と同様

度の降雨強度を受ける場合である。したがって、パターン1, 3のように次第に降雨強度が増すケースでは、表層の透水性が大きくなつたところへ浸透水が流入するために、高い飽和領域が形成されやすく、盛土の安定性に大きく影響することが明らかになった。

7. 降雨浸透現象への盛土の形状要素の影響

(1) 盛土の大きさの影響

実験盛土の高さ4mを E_0 として、1:1.5ののり勾配を一定とする、高さ0.75, 1.0, 1.25 E_0 の盛土に対して、降雨浸透の状況を比較する(図-23a)。基準となる飽和領域の高さ($H_0=0.75\text{m}$)と、長さ($L_0=4.07\text{m}$)に対する解析結果を図-24に示す。形状の小さな盛土ほど、飽和領域が速く形成され、その高さも、中央部への伸びも、大きな盛土より速い。これは雨水が、のり面あるいは天端から底部に流下するときの浸透経路や、要する時間が短いためである。なお、大きな盛土の飽和領域は、のり尻に形成されてから中央部に広がるが、小さい盛土は比較早い段階から中央部で高くなり、のり尻の方が低くなる傾向を示した。

(2) のり勾配による影響

図-23bに示した天端幅が等しい3つの異なるのり勾配の盛土に対して解析してみた。累積降雨量480mmでの飽和領域を図-25に示す。のり勾配が緩やかなほど飽和領域が高くなり、水平方向への伸びも速い。勾配が小さければ、のり面から底面への垂直距離が短いので水位上昇も速く、結果として高い浸潤面が形成されたと考えられる。

8. 結論

本論文では、大型降雨浸透実験結果を浸透解析のモデルとし、盛土に生じる様々な条件の影響に対して検討を行った。得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 盛土の安定性には、盛土内に溜まる水分量が大きく影響する。土の種類などによって浸透した雨水の分布状態は異なるが、盛土内の貯留水量が多ければ、高い飽和度の領域が形成されやすく、盛土の安定性が低下することを、解析結果からも確認した。

(2) 降雨時の盛土内の貯留水量は、降雨による流入水量と、のり尻や原地盤への流出量との差である。降雨流入量は、降雨強度と盛土の浸透能の関係に支配され、浸透能より降雨強度が小さければ、降雨量のほとんどが盛土内に流入する。その反面、降雨強度が大きければ表面流出が生じる。解析結果から、盛土が一定

強度の継続した降雨の作用を受けるとき盛土の浸透能(透水係数にはほぼ等しいと考える)の値が降雨強度に等しい場合に貯留水量が最も多くなり、高い浸潤面が形成されることが明らかになった。

(3) 盛土の崩壊を引き起こさせる豪雨は10~40mm/hrの継続降雨であることが多い。このような降雨によって最も浸透水が貯留され不安全になりやすい盛土の透水係数は 2.0×10^4 ~ 1.0×10^3 cm/sとなる。このような透水性を持つ土は、一般にシルトまたは砂質土であり、盛土の土質材料としてよく用いられている。

(4) 細粒土で構築されている盛土は、保水性が高く、平素のいわゆる乾いた状態でも比較的飽和度は高い。透水係数は普通小さめなので、降雨時には、のり尻で比較的高い飽和領域が形成されやすい。また、飽和度の増加も、のり尻と表層において著しい。一方、粒子の粗い砂質土は、降雨時には透水係数が大きいために、浸透水が早く底部まで流下し、盛土の中央部へも進行するが、のり尻からの流出量も多いため、浸潤面が高くなりにくい。

(5) 土を締固めることによって、土の透水係数や不飽和水分特性は変化する。締固めを十分に行えば、盛土の強度増加は見込める。しかし、降雨浸透の影響だけに言及すれば、細粒土に対しては効果があるが、透水係数の大きな土に対しては、降雨浸透防止対策としての効果は期待できない。

(6) 降雨の強度とそのパターンの検討結果から、盛土の浸透能に近い降雨強度を受けた盛土内には、貯留水量が多く、また、降雨強度が徐々に増加する降雨パターンが、盛土の安定性に最も影響する。

(7) 盛土の形状については、規模が小さく、のり勾配の緩やかな盛土では、一般に安定性は高いため、飽和領域が形成されやすいが、安定性への浸透作用の影響は小さい。

参考文献

- 1) 西田義親、八木則男、二木幹夫：雨水浸透による地盤内発生間隙圧と斜面安定、土木学会論文報告集、No. 262, pp.91-100, 1977.
- 2) 矢田部龍一、榎明潔、八木則男：降雨浸透を考慮した斜面安定解析法の検討、地すべり、Vol. 22, No. 4, pp.1-6, 1986.
- 3) 八木則男、矢田部龍一、榎明潔：降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量、土木学会論文集、第418号/III-13, pp.65-73, 1990.
- 4) 赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による飽和一不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集、No.264, pp.87-96, 1977.
- 5) Neuman,S.P.: Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE HY, Vol. 99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 6) Jackson, R. D., R. J. Reginato and C. H. M. van Bavel: Comparison of measured and calculated hydraulic conductivities of unsaturated soils, Water Resour. Res. 1, pp. 375-380, 1965.
- 7) Green, R. E. and J. C. Corey: Calculation of hydraulic conductivity, a further evaluation of some predictive methods, Soil Sci. soc. Am. Proc. 35, pp.3-8, 1971.
- 8) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. 12, pp.513-522, 1976.
- 9) Van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. soc. Am. J., Vol. 44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 10) 西垣誠、楠見和紀：不飽和土の浸透特性の評価に関する考察、不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.179-186, 1987.
- 11) 竹下祐二、西垣誠、河野伊一郎：不圧帶水層での揚水試験結果による不飽和浸透特性の算定方法、土質工学会論文報告集、Vol.30, No.2, pp.199-210, 1990.
- 12) 山村和也、久樂勝行：堤防への浸透と堤体の安定性、土木研究所報告、No.145, pp.41-72, 1974.
- 13) 竹下祐二、河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について、地盤と建設、Vol.11, No.1, pp.95-113, 1993.
- 14) 宇野尚雄、杉井俊夫、神谷浩二：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察、土木学会論文集、No.469/III-23, pp.25-34, 1993.
- 15) Taylor D. W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, p.115, 1948.

(1995.7.28 受付)

INFLUENCE OF RAIN INFILTRATION ON SLOPE FAILURE OF EMBANKMENT

Wei ZHU, Kazuya YAMAMURA and Tetsuro ISHIDA

It is necessary to clarify the phenomena of rain infiltration and the consequential effect of seepage upon slope stability, as slope failure of embankment due to rain is a compound problem of seepage and stability. The rain infiltration into embankment is influenced by soil factors such as type of soil and degree of compaction. It is also influenced by such factors as rainfall intensity or pattern and shape of embankment. These factors combine to create differences in pore water pressure, degree of saturation, even if the same amount of rain is infiltrated, and in influencing stability of embankment. Through the analyses of saturated-unsaturated seepage flow utilizing the full scale model test results, the influences of rain infiltration into embankment on slope stability under various conditions have been examined.