

斜面内の降雨浸透流の実験

愛知工業大学 正会員 ○木村 勝行
愛知工業大学 正会員 大根 義男

1. はじめに

降雨時の斜面の安定性を評価するためには、降雨によって斜面内に生起する浸透流の性状の把握が必要となる。この浸透流のように、飽和および不飽和の両領域にわたる浸透流の研究は、これまでに実験あるいは数値計算によっていくつか行われている^{1)~4)}。しかし、これらの研究においては、雨水による斜面内の浸透に関して、実験あるいは計算方法とその結果が示されてはいるものの、結果の応用については言及されていない。したがって、その成果の利用は実験方法や計算手法に限られ、他の斜面の雨水浸透を知るためにはやはり実験あるいは数値計算を行わなければならないことになる。望むべくは、概略的であれ、斜面内の雨水浸透流の状態が簡便に把握できることであろう。ここでは、このような浸透流の基礎的研究として、ガラスビーズと潤滑油を使用した粗粒子モデルにより、水平不透水基盤面上の等方透水性の斜面内の雨水浸透流実験を行った。そして、この浸透流の基本的な浸透特性を、浸透流界面移動の kinematic wave 理論的な考察から得られる解によって調べた。また、理論解を基にした実験結果の整理から、降雨時の斜面内の湿潤部および飽和部を推定する実験式を得、この式の実斜面における雨水浸透流への適用性を検証した。

2. 実験装置と実験方法

実験は毛管上昇の影響を少なくするため、ガラス球(直径 2.0~2.8mm)を用いて斜面を作製し、降雨には潤滑油を使用して行った。図-1は実験装置を模式的に示したものであり、実験斜面の構築用の箱と降雨発生装置から成っている。箱は高さ 70cm、長さ105cm、幅10cmの透明アクリル樹脂板製であり、一端の側壁下部には実験時における斜面内の間隙空気の閉塞を防止するための排気孔が設けてある。実験斜面は図示のように底面長を一定(100cm)とし、勾配を変化させた。斜面上位の給油槽の底面には内径1.5~2.0mmのステンレスパイプを1.25cm間隔で正方形に配置してあり(計640本)、パイプの径や長さなどを変えることによって斜面への油の供給強度 r_0 (以後降雨強度という)が調節できるようになっている。実験は21°Cの恒温室において行った。このときの実験斜面内の透水係数、飽和体積含水率および初期体積含水率に相当する値は、それぞれ $k_0=1.36 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $\theta_s=0.36$ および $\theta_i=0.03$ であった。また、毛管上昇高は約6.0mmであった。なお、実験斜面内の油の流れは土中の浸透に相当するので、ここではこの流れについても土中の浸透と同様の用語(降雨強度、透水係数など)を用いることにした。斜面内の浸透状態の変化は写真撮影によって調べた。実験は降雨強度と斜面勾配の27通りの組み合わせについて行い、同一の降雨強度と斜面勾配の組み合わせに対して、降雨時間を変えて2回の実験を行った。表-1に27通りの実験の斜面勾配、 r_0/k_0 (降雨強度/透水

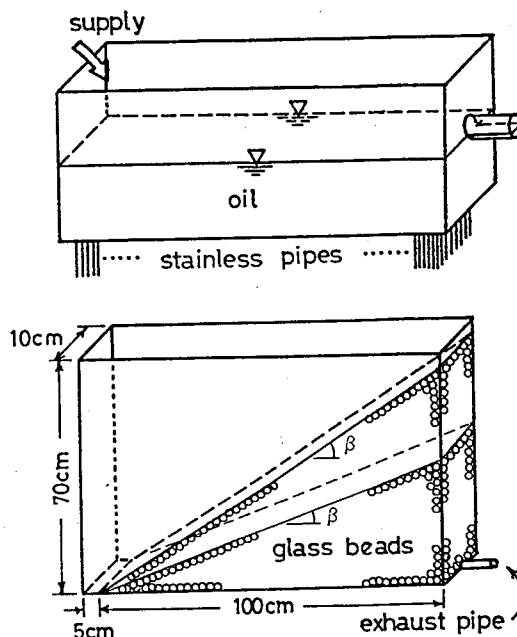


図-1 実験装置の概要

Experimental study on the seepage in the sloping foundation due to rainfall ;
Katsuyuki Kimura (Aichi Institute of Technology) , Yoshio Ohne (ditto)

係数)の値、1回目と2回目の給油時間(分'秒")および本文における以降の結果の整理や検討において実験No. と対応させて用いる記号を示した。

表-1 実験条件

No.	斜面勾配	r_o/k_o	給油時間(分'秒)		記号
			1回目	2回目	
1	1:2.5	0.130	23'18"	44'59"	○
2	"	0.270	15'11"	26'18"	①
3	"	0.351	12'53"	24'05"	⊖
4	"	0.459	10'52"	21'05"	⊕
5	"	0.546	10'10"	19'25"	●
6	"	0.611	9'31"	18'00"	●
7	"	0.760	8'11"	15'50"	●
8	"	1.082	7'29"	15'17"	●
9	"	1.151	7'21"	15'01"	●
10	1:2.0	0.127	27'03"	51'08"	□
11	"	0.271	17'38"	33'16"	□
12	"	0.352	15'22"	28'49"	□
13	"	0.461	12'52"	25'23"	□
14	"	0.546	11'45"	23'04"	□
15	"	0.610	11'09"	21'16"	□
16	"	0.760	9'40"	18'53"	□
17	"	1.150	9'07"	18'01"	■
18	"	1.313	9'53"	18'11"	■
19	1:1.5	0.126	34'19"	63'37"	◇
20	"	0.267	23'00"	44'37"	◇
21	"	0.353	18'46"	35'19"	◇
22	"	0.459	16'14"	31'21"	◇
23	"	0.545	14'44"	29'20"	◇
24	"	0.610	13'38"	27'30"	◇
25	"	0.759	12'43"	22'47"	◇
26	"	1.380	10'33"	20'40"	◇
27	"	1.513	10'30"	20'31"	◇

3. 結果および整理

(1) 斜面内の浸透状態

降雨中の斜面内の浸透状態は無次元量 r_o/k_o の値が $r_o/k_o < 1$ と $r_o/k_o > 1$ の場合とに大別することができる。まず、 $r_o/k_o < 1$ の場合は、図-2(a)と(b)に破線で示したように、降雨の浸入による湿潤部の前線は降雨開始とともに斜面表面からこれとほぼ平行に下方に進行していく。湿潤部は不飽和であり、この前線をここでは湿潤前線と呼び、飽和部の前線すなわち浸潤前線と区別することにした。この湿潤前線は斜面先から順次基盤面に到達し、飽和部を形成していく(図中実線)。浸潤前線の降下速度は、同図(a)と(b)の比較からわかるように、 r_o/k_o の値が大きくなるにつれて速くなる。したがって、斜面先から基盤上に形成されていく飽和部の内部への進行速度も r_o/k_o の値の大きい方が速くなる。また、浸潤面の傾きも r_o/k_o の値の大きい方が急となる。一方、 $r_o/k_o > 1$ の場合には、同図(c)に示したように、湿潤部は現れずに降雨開始とともに飽和の浸潤前線が斜面表面からこれとほぼ平行に降下していく。

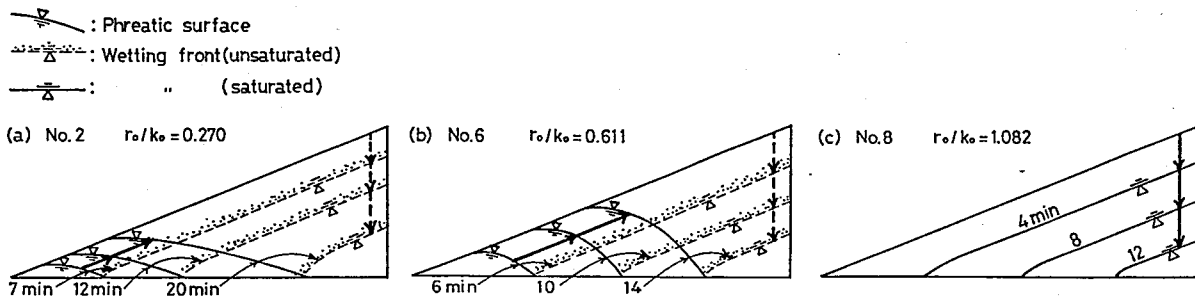


図-2 降雨浸透による斜面内の浸透流

(2) kinematic wave 理論的な考察による解に基づく整理

図-2に示したように、斜面表面から斜面内部に雨水が浸入した場合、この雨水はほぼ鉛直に降下し、基盤面に達して飽和域を形成する。そして雨水の供給がさらに継続すると、この飽和域は逐次増大、上昇し、斜面表面に達する。雨水浸透によるこのような斜面内の湿潤域と飽和域は、近似的に、図-3のように表すことができる。ここで、斜面勾配を $\tan\beta$ 、降雨強度を r 、降雨開始からの経過時間を t 、斜面内の初期体積含水率を θ_i 、雨水による湿潤域の体積含水率を θ 、

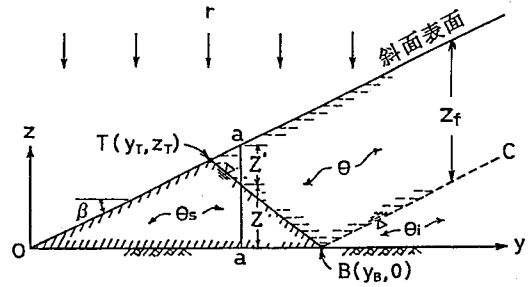


図-3 雨水による斜面内の浸透状態

飽和体積含水率を θ_s 、飽和域の透水係数を k_s 、湿潤域の降下距離を z_f 、浸潤面と斜面表面との交点を $T(y_T, z_T)$ および基盤面との交点を $B(y_B, 0)$ とすると、 z_f 、 y_T 、 z_T および y_B は $\tan\beta$ 、 r 、 θ_i 、 θ 、 θ_s 、 k_s および t などの関数と考えられる。ここでは、これらの諸量の基本的な関係を次のように得た。

いま、図-3のTB面(浸潤面)を通る鉛直な断面 $a-a$ とこれより dy だけ隔たった断面との間において連続式を立てると次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \{(\theta_s - \theta_i)Z + (\theta - \theta_i)Z'\} = r - \frac{dq_a}{dy} \quad (1)$$

ここに、 Z は浸潤面の高さ、 Z' は浸潤面から斜面表面までの湿潤域の高さ、 q_a は $a-a$ 断面を横切る流量である。湿潤域においては浸入した雨水はほぼ鉛直に降下していると考えられるので、この領域においては鉛直面を横切る流量は無視できよう。したがって、飽和域の $a-a$ 断面上の動水勾配の水平成分の平均を I_a とすると、式(1)の右辺は $r - dq_a/dy \approx r + k_s Z \cdot dI_a/dy$ と表すことができる。ここで、飽和域内部においては流体の加速度が浸透流に及ぼす影響は無視できることから、すなわち dy 間の I_a の変化は極めて小さいことから、 $1 \gg |Z \cdot dI_a/dy|$ であり、さらに、 r と k_s は同程度のオーダーの値であることを考慮すると、 $r \gg |k_s Z \cdot dI_a/dy| \approx |dq_a/dy|$ なる関係を得る。このように、式(1)の右辺第2項が第1項に比べて無視できる場合は同式から次式が得られる。

$$(\theta_s - \theta_i)Z + (\theta - \theta_i)Z' = r t \quad (2)$$

式(2)は、斜面内の浸透流に対する連続式のみから得られたものであり、したがって、斜面内の雨水浸透流の界面移動を kinematic wave として取り扱うことにより得られた式であるといってもよい。この場合、浸潤面(図-3のTB面)の移動は飽和域と湿潤域の境界を形成する波面の移動として、また湿潤前線(図-3のBC面)の移動は湿潤域と初期含水域の境界を形成する波面の移動としてとらえることができる。両波面の移動速度は、図-3における浸潤面と斜面表面の交点 $T(y_T, z_T)$ および基盤面との交点 $B(y_B, 0)$ の座標と時間 t との関係が知れば求められる。そこで、両点の座標と t との関係調べると、 z_T は、式(2)において、 $Z' = 0$ 、 $Z = z_T$ とおくことにより

$$z_T = \frac{r t}{\theta_s - \theta_i} \quad (3)$$

また、 $y_T \tan\beta = z_T$ であることから

$$y_T = \frac{r t}{(\theta_s - \theta_i) \tan\beta} \quad (4)$$

y_B については、式(2)において、 $Z = 0$ で $Z' = y_B \tan\beta$ であることから

$$y_B = \frac{r t}{(\theta - \theta_i) \tan\beta} \quad (5)$$

式(3)~(5)により、図-3の飽和域の面積 $A_s(\triangle OTB)$ 、雨水による湿潤域の鉛直高 z_f および基盤面と浸潤面とのなす角 δ はそれぞれ次のように表される。

$$A_s = \frac{1}{2} z_f y_B = \frac{(r t)^2}{2(\theta_s - \theta_i)(\theta - \theta_i) \tan \beta} \quad (6)$$

$$z_f = y_B \tan \beta = \frac{r t}{\theta - \theta_i} \quad (7)$$

$$\tan \delta = \frac{z_f}{y_B - y_T} = \frac{\tan \beta}{\left(\frac{\theta_s - \theta_i}{\theta - \theta_i}\right) - 1} \quad (8)$$

本文で後に示されるように、 θ は $\theta \leq \theta_s$ のときに r の関数として表すことができ、 r の値が減少すると θ の値も減少する。このことを考慮すると、式(6)と(7)からは、同一の降雨量($r t$ が等しいこと)に対して r が小さい場合ほど雨水による斜面内の飽和域および湿潤域は大きくなるのがわかる。また、式(8)は δ が時間経過によって変わらないことを表している。

(i) 湿潤前線

降雨が開始すると、斜面表面から湿潤前線($r_o/k_o > 1$ の場合は浸潤前線)が降下していく。この降下距離の平均を z_f とすると、実験斜面における z_f と経過時間 t との関係は図-4(a)のように示される。図から明らかなように、それぞれの実験において t と z_f とは概ね比例の関係にあるので、湿潤前線の降下速度 $v_f (=z_f/t)$ はほぼ一定であるといえる。 v_f と r_o/k_o や斜面勾配 $\tan \beta$ との関係を調べると、 $r_o/k_o < 1$ の場合の v_f は $\tan \beta$ による差はほとんどなく、主として r_o/k_o の大きさによって異なっている。 $r_o/k_o > 1$ の場合の v_f については、 $\tan \beta$ のみならず r_o/k_o による差もみられない。このような r_o/k_o と v_f の関係をより明確にするために、それぞれの実験における v_f の平均値により r_o/k_o と v_f/k_o の関係を整理して示したのが図-4(b)である。図にみられるように、 $r_o/k_o > 1$ の場合、 v_f/k_o の値はほぼ一定で約3.0となっているが、実験斜面の有効間隙率($\theta_s - \theta_i$)は0.33であることから、 $(\theta_s - \theta_i) v_f/k_o$ の値はほぼ1.0となる。つまり、本実験においては、斜面内に浸透する降雨の最大の強度が概ね k_o に等しかったことを意味する。

湿潤部の鉛直距離 z_f は、雨水の浸透による湿潤部の平均体積含水率を θ とすると

$$\theta = \frac{r_o t}{z_f} + \theta_i \quad (9)$$

であるので

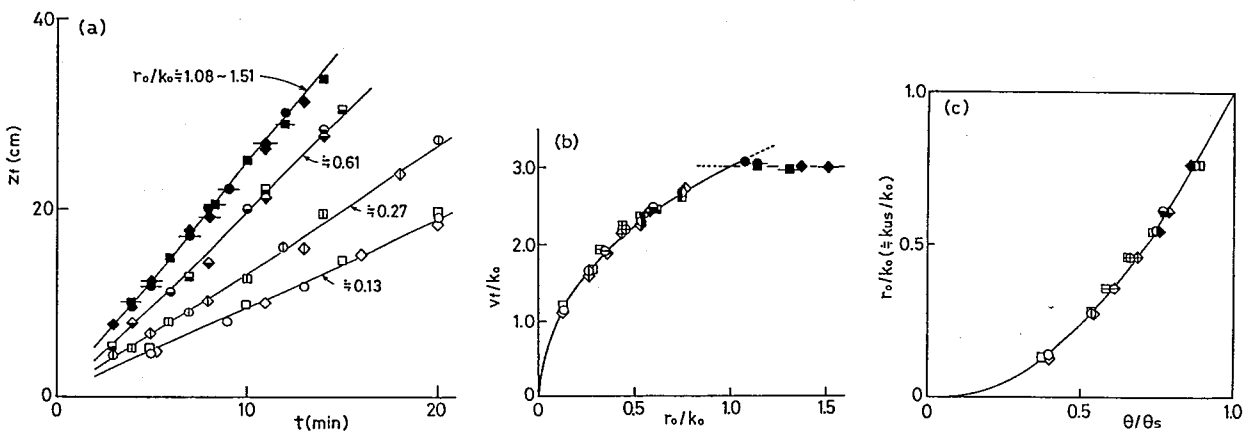


図-4 湿潤域の特性

$$z_f = \frac{r_o t}{\theta - \theta_i} \quad (10)$$

と表すことができる。式(10)は kinematic wave 理論による式(7)と同じである。一方、式(9)において、 $z_f = v_f t$ であることから同式は

$$\theta = (r_o/k_o)/(v_f/k_o) + \theta_i \quad (11)$$

と変形することができ、これに図-4(b)の r_o/k_o と v_f/k_o の関係を代入することによって θ と r_o の関係を得ることができる。これを θ/θ_s と r_o/k_o の関係として示したのが図-4(c)である。降雨強度 r_o に対応する実験斜面の湿潤前線の降下距離 z_f は、図-4(c)の r_o と θ の関係を式(10)に用いることによって求められることになる。ここで、不飽和部の透水係数を k_{us} とすると、 $r_o/k_o < 1$ のときには $r_o \doteq k_{us}$ であるので、同図は、通常の土中の浸透における不飽和部の透水特性を表す飽和度 $S_r (= \theta/\theta_s)$ と相対透水係数比 $k_r (= k_{us}/k_o)$ の関係に相当している。

(ii) 浸潤面

飽和域の浸潤面の形状は r_o 、 $\tan\beta$ 、 t などによって異なる。いま、図-3に示したように、浸潤面上の最大高となる点を $T(y_T, z_T)$ 、底面との交点を $B(y_B, 0)$ とし、斜面内の浸透流に kinematic wave 理論を適用して得られた式(3)~(5)による値を横軸に、実験による値を縦軸にとり、 y_T 、 z_T および y_B と t 、 r_o 、 θ_s 、 θ_i 、 θ および $\tan\beta$ などとの関係を整理すると、図-5(a)、(b)および(c)のようになる。これらの図中に示してあるそれぞれの直線から、上記の諸量の間関係は以下の式によって表すことができる。

$$y_T = \frac{0.95 r_o t}{(\theta_s - \theta_i) \tan\beta} \quad (12)$$

$$z_T = \frac{0.87 r_o t}{(\theta_s - \theta_i)} \quad (13)$$

$$y_B = \frac{1.20 r_o t}{(\theta - \theta_i) \tan\beta} \quad (14)$$

これから、実験による式(12)~(14)は、kinematic wave 理論による式(3)~(5)に補正係数を乗じた形で表されていることがわかる。式(13)は、 z_T が斜面勾配 ($\tan\beta$) にほとんど係わらないことを示している。また、式(12)と(13)からは

$$\frac{z_T}{y_T} = 0.92 \tan\beta \quad (15)$$

なる式を得ることができ、これは T 点が斜面表面から少し内部になることを意味している。さらに、式(12)~(14)からは式(6)および(8)に対応する以下の式が得られる。

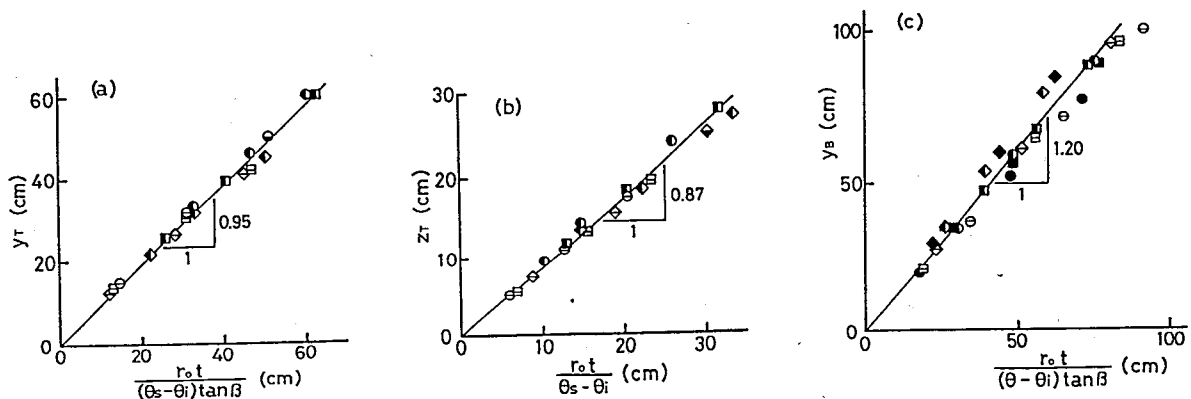


図-5 浸潤面の最高点および基盤面との交点

$$\frac{1}{2} z_T y_B = c_1 \cdot \frac{r_o^2 t^2}{\tan \beta (\theta_s - \theta_i) (\theta - \theta_i)} \quad (16)$$

$$\tan \delta = \frac{z_T}{y_B - y_T} = \frac{\tan \beta}{c_2 \left(\frac{\theta_s - \theta_i}{\theta - \theta_i} \right) - c_3} \quad (17)$$

ここに c_1 、 c_2 および c_3 はそれぞれ定数である。式(16)による値は斜面先から形成されていく飽和域の面積にほぼ等しく、図-4(c)にみられるように r_o/k_o が小さい程 θ/θ_s が小さくなることを考慮すると、降雨量($r_o t$)が同量の場合には r_o の値が小さいほど飽和域は大きくなるのがわかる。また、式(17)の $\tan \delta$ は浸潤面の平均的な傾きであるといえ、この δ は時間経過によってほとんど変わることなく、 $\tan \beta$ に比例し、 θ が大きくなるにつれて、つまり r_o が大きくなるにつれて傾きが急になっていくことを示している。これは当然のことながら図-2に示した実験結果と一致する。なお、これまでの検討により、 $r_o/k_o > 1$ の場合には式(14)と図-4(c)の r_o にかえて k_o を用いることになる。

さて、斜面の安定性を検討するためには斜面内の飽和度および間隙水圧の分布が知られていなければならないが、雨水浸透によって斜面内に形成される飽和域については、浸潤面の形状が求められればその内部の間隙水圧分布は比較的容易に知ることができる。以下では、これまでの成果を基に、降雨時における斜面内の浸潤面形状の推定方法を検討する。

図-3に示した座標により、実験のそれぞれの経過時刻における浸潤面形(y, z)を、式(12)~(14)によって求めた y_T 、 z_T および y_B を用い、T点より斜面先側は z/z_T と $(y_T - y)/y_T$ との関係、T点より斜面内部側については z/z_T と $(y - y_T)/(y_B - y_T)$ との関係によって整理すると図-6のようになる。図から明らかかなように、浸潤面の形状は放物線もしくはそれに類似する形状をしている。図中に2本の曲線を示しているが、それとの比較から、実験における浸潤面形は次の2式によって推定することができる。

$$\frac{z}{z_T} = 1 - \left(\frac{y_T - y}{y_T} \right)^{2.5}, \quad 0 \leq y < y_T \quad (18)$$

$$\frac{z}{z_T} = 1 - \left(\frac{y - y_T}{y_B - y_T} \right)^2, \quad y_T \leq y \leq y_B \quad (19)$$

ここで、 $0 \leq y < y_T$ の範囲に対しては式(18)が適用されるが、近似的には、この範囲に対しても式(19)の適用が可能である。なお、これまでの結果には実斜面のように地表面に繁茂する草木の影響は考慮されていない。

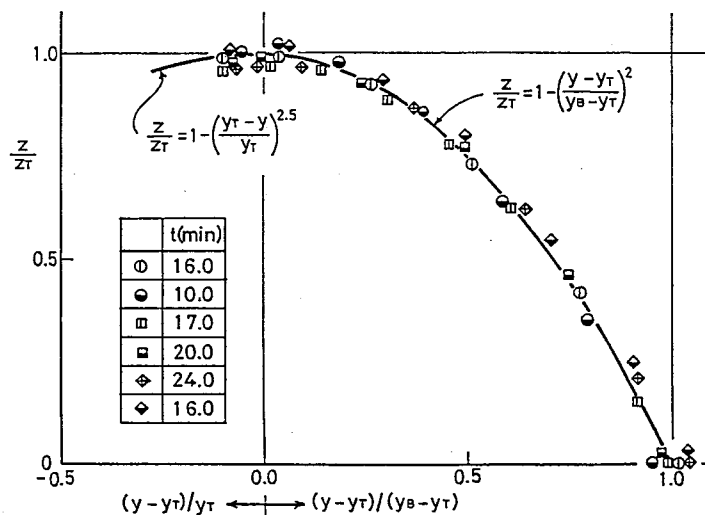


図-6 浸潤面形状

4. 実斜面の雨水浸透流への実験式の適用性

実斜面の雨水浸透流に対し、上述の実験式を適用するにあたっては、実土を用いた雨水浸透実験における実測値と対比してその信頼性を検証しておくことが必要である。そこで、湿潤前線の鉛直降下については松尾ら¹⁾が行った砂質ロームに対する鉛直降雨浸透実験結果との比較、浸潤面形については久楽ら²⁾が行った実大規模の関東ロームの盛土による雨水浸透実験結果との比較を行った。

(1) 松尾らの鉛直降雨浸透実験結果との比較

実験装置は高さ180cm、直径40cmの亚克力円筒であり、実験試料は間隙率 $n=0.489$ 、透水係数 $k_{sat}=8.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の砂質ロームである。実験は初期飽和度および降雨条件が異なる2ケースについて行われており、これらの実験結果はそれぞれ図-7(a)と(b)に示したようである。ただし、本研究で提案した実験式は一定の降雨強度の場合であるので、同図には降雨強度が変わるまでの結果のみを示してある。ケースIの場合は、 $r=10 \text{ mm/h}$ の降雨が開始してから6時間後には、同図(a)に示されているように、雨水浸透部の飽和度が初期の20% ($\theta_i=0.10$) から75% ($\theta=0.37$) に変化している。提案した式(10)によって湿潤前線の降下距離を求めると $z_f=22 \text{ cm}$ となり、実験結果とほぼ一致する。また、降雨開始10時間後における湿潤前線の降下距離は38cmとなっており、式(10)からは37cmが得られ、これもほとんど一致している。ケースIIの初期飽和度が40% ($\theta_i=0.20$) の場合は、 $r=15 \text{ mm/h}$ の降雨開始6時間後には、同図(b)に示したように、飽和度は地表から約40cmの深さまで75% ($\theta=0.37$) であり、以深65cmまで初期飽和度の40%に漸減している。式(10)からは $z_f=53 \text{ cm}$ が得られ、これはこの実験の前線部分の平均深さにほぼ等しい。式(10)ではこの実験の結果のように飽和度が漸変する前線部を表すことはできないが、先の比較から、式(10)によって、このような前線の平均的な深さを推定することができる。

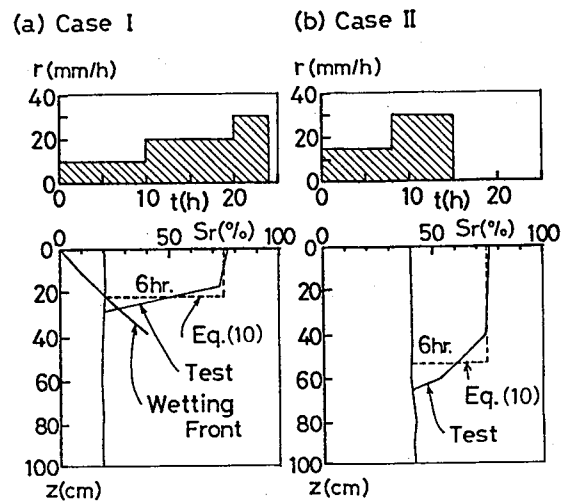


図-7 松尾らの実験と本実験式による湿潤前線の比較

(2) 久楽らの実大規模の盛土による雨水浸透実験結果との比較

盛土は高さ4m、天端幅2m、斜面勾配1:1.5、飽和体積含水率 $\theta_s=0.71$ 、初期体積含水率 $\theta_i=0.43$ 、飽和土の透水係数 $k=2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ の台形断面である。この斜面は総降雨量250mmに達した際、のり面およびのり肩付近にき裂が発生している。このため θ の平均値として盛土にき裂が発生する前の総降雨量約170mmの時点における盛土表面付近の5点の平均をとり $\theta=0.55$ とした。図-8に久楽らの実験と本研究において提案した実験式(18)および(19)による浸潤面を示してある。久楽らの実験においては、降雨量の調整や盛土内の水分量の測定のため、降雨を一時中断していることや斜面崩壊を生じた時点の浸潤面であることなどから、両者は完全な同一条件下の比較とはいえないが、浸潤面の形状は概ね一致している。

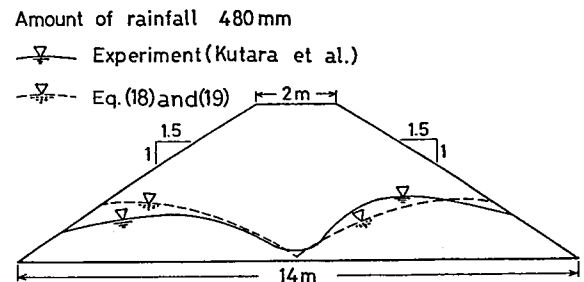


図-8 久楽らの実験と本実験式による浸潤面の比較

以上の比較から、提案した実験式は実斜面の降雨浸透による湿潤前線および浸潤面形状を推定する簡便式として実用上十分有用であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、降雨によって斜面内に生起する浸透流の基礎的研究として、ガラスビーズと潤滑油を使用した粗粒子モデルにより、水平不透水基盤面上の等方透水性の斜面内の雨水浸透流実験を行い、降雨による斜面内の浸透状態を明らかにした。また、このような浸透流の飽和域界面移動の kinematic wave 理論的な考察から得られる解により、この浸透流の基本的な浸透特性を明らかにした。さらに、これらの理論解を基に実験結果を整理し、前線の降下距離と飽和域形状を求める簡便的な実験式を示した。これらは降雨強度を r 、斜面の透水係数を k として以下のようにまとめられる。

- (1) 斜面内の雨水浸透流の飽和域界面移動を kinematic wave として扱うことによって、この浸透流の基本的な浸透特性を調べることができる。
- (2) 降雨時の斜面内の浸透状態は無次元量 r/k の値が $r/k < 1$ と $r/k > 1$ の場合とに大別できる。
 $r/k < 1$ の場合は、降雨の開始とともに斜面表面からこれと平行に不飽和の湿潤前線が降下していく。
 $r/k > 1$ の場合はこれが飽和の浸潤前線となる。これらの前線の降下速度は斜面勾配によらない。
- (3) $r/k < 1$ の場合、降雨浸透によって斜面内に生じる飽和域の浸潤面の最大高は降雨継続時間内の降雨量 ($r t$) に概ね比例し、斜面勾配による差はほとんどみられない。飽和域の形状は r/k の値によって異なり、 r/k の値が大きくなるにつれて浸潤面の平均的な傾きは急になる。
- (4) 提案した湿潤前線および浸潤面形を簡便的に求める実験式は、鉛直降雨浸透実験の湿潤前線や実大規模の盛土による雨水浸透実験の浸潤面を良く表し、実斜面の雨水浸透に対しても有用といえる。

今後の課題は、降雨強度が一定でない場合、透水性が等方でない場合、不透水基盤面が水平でない場合などの浸透特性を明らかにすることである。

【 参 考 文 献 】

- 1) 松尾稔・上野誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究，土木学会論文報告集，第281号，pp.65-74，1979.
- 2) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第330号，pp.107-114，1983.
- 3) 久楽勝行・石塚広史：雨水の浸透と盛土の安定性，土と基礎，Vol.30，No.9，pp.37-43，1983.
- 4) 木村勝行・大根義男：降雨による斜面内浸透流の模型実験，第23回土質工学研究発表会，pp.1835-1836，1988.