

論文

雨水浸透を考慮した斜面安定性の評価手法について

調 修二* 久楽 勝行** 伊勢田哲也*** 棚橋 由彦***

Study on Slope Stability Analysis by Considering Rainwater Infiltration

Shuji SHIRABE*, Katsuyuki KUTARA**, Tetsuya ISEDA*** and
Yoshihiko TANABASHI***

Abstract

A field survey of rainwater infiltration and an observation of wetting front are carried out. A seepage flow analysis and a stability analysis of actual slope taking the seepage force in account, reveals that the wetting front reaches the depth of more than 3.0m from the surface when the total rainfall attains 285mm, that rainwater infiltration can be sufficiently simulated with the vertically one-dimensional equation, and that slope stability during heavy rainfall is much influenced by the seepage force.

キーワード：浸透，斜面安定，浸透力

Key words: infiltration, slope stability, seepage force.

1. はじめに

盛土や切土斜面などの土構造物および自然斜面は、豪雨時に雨水が浸透するとその安定性が著しく低下し、斜面崩壊を起こすことがしばしば経験されており、昭和57年の長崎大水害で299名の死者を出した災害事例¹⁾は豪雨による斜面崩壊の恐ろしさを伝えた一例である。このように、豪雨時の雨水浸透に伴う斜面崩壊は、豪雨災害のなかで

も多くの人命を消失させる可能性が高く、しかも社会資本の流失等の多大な被害を生じさせている。斜面が雨水浸透によって崩壊する原因としては、飽和度の上昇による自重の増加・サクシヨンの減少による見掛けの粘着力の低下および浸透力の作用等が考えられる。このうち、自重の増加については平時の飽和度分布から容易に推察することができ、サクシヨンの減少による地盤の強度低下については室内実験によって研究²⁾されつつある。ところが、豪雨時に斜面内へどのようにして雨水が浸透し、それに伴って斜面の安定性がどの程度低下するかといった斜面崩壊のメカニズムについては、室内での模型斜面に対する雨水浸透実験による研究^{3), 4)}はなされているものの現地斜面に対する研究は土層構成並びに後背地形等の斜面条件が多種多様であるうえに長期連続測定が必要であ

*基礎地盤コンサルタンツ(株)長崎事務所
Nagasaki Office, Kisojiban Consultants Co., Ltd.**建設省土木研究所土質研究室
Public Works Research Institute, Ministry of Construction***長崎大学工学部土木工学科
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nagasaki University

本論文に対する討議は平成3年12月末日まで受付ける。

ることなどから不十分である。

一方、斜面崩壊の予知には、斜面安定理論に雨水浸透解析結果を組み込んだものが一般的であり、雨水浸透解析としては Darcy の法則を不飽和領域へ拡張した赤井らの提案⁵⁾が主流をなしている。しかし、細粒分を含んだ土では、土粒子と水分子間の強い吸着力により浸透水と間隙空気との置換が自由に行われず間隙空気の閉塞効果が生じることから、地盤内への雨水浸透に対しては間隙空気の影響を考慮する必要があると考えられる。このように、斜面防災対策をより精度の高いものにするためには、斜面内への雨水浸透現象を的確に捉え、その結果に基づいた斜面の安定性の評価が極めて重要であると考えられる。

そこで、本報告では一つの試みとして実際の山岳道路沿いに試験斜面を選定し、斜面内への雨水浸透現象を調べる計器観測ならびに土質調査を実施して、その結果に基づいて豪雨時における斜面の安定性の低下について検討を加えたものである。

2. 現地斜面の状況⁶⁾

2.1 地形・地質

試験斜面は、図1に示すように相模湖北岸に位置する国道20号沿いの切土斜面である。相模湖周辺には第四紀洪積世に形成された相模川の河成段丘が広く発達しており、こうした高さ20~30mを越える段丘崖の直下をぬうようにして道路が通っている。このような地形・地質状況から過去に何

度か斜面崩壊を生じた例がある。今回選定したのり面付近でも斜面崩壊を生じた区間があり、災害発生の危険性が高いと判断される箇所である。地質状況は図2に示すとおりであり、基盤岩をなす小仏層群の上位に40mの厚さで第四紀洪積層が堆積している。この洪積層はさらに、表層2~3mのローム層と上・中・下の3層からなる凝灰質粘性土層とに区分される。

2.2 土質特性

B-5の位置で採取した不攪乱試料を用いて実施した土質試験結果を図3に示す。この中で、三

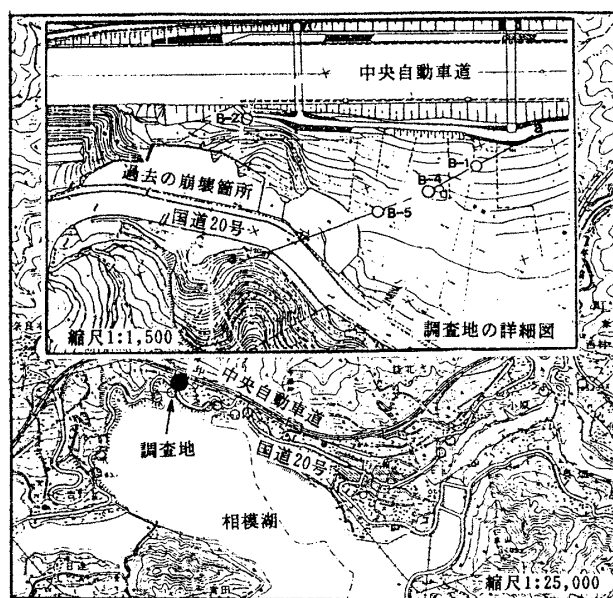


図1 試験のり面付近の地形状況

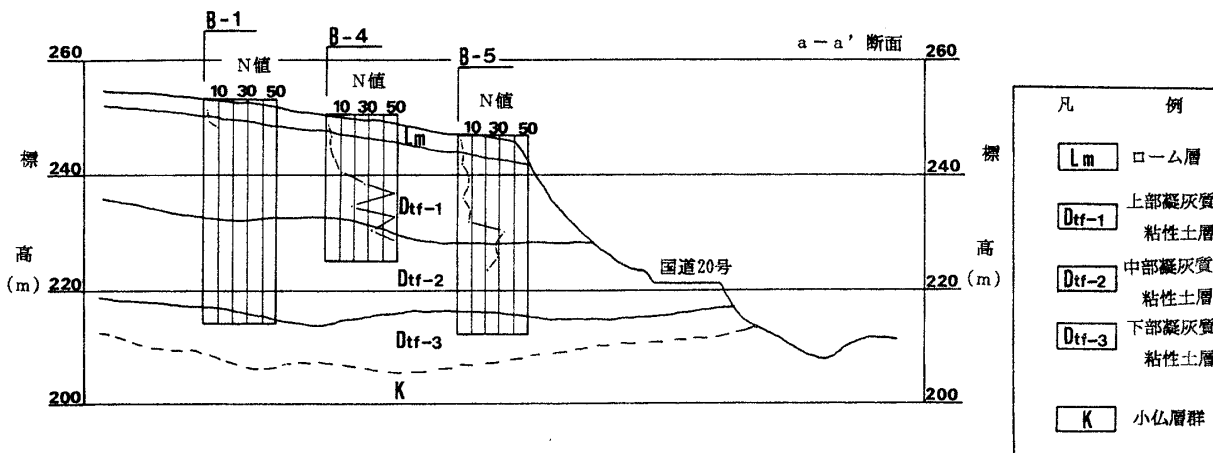


図2 試験のり面の地層分布

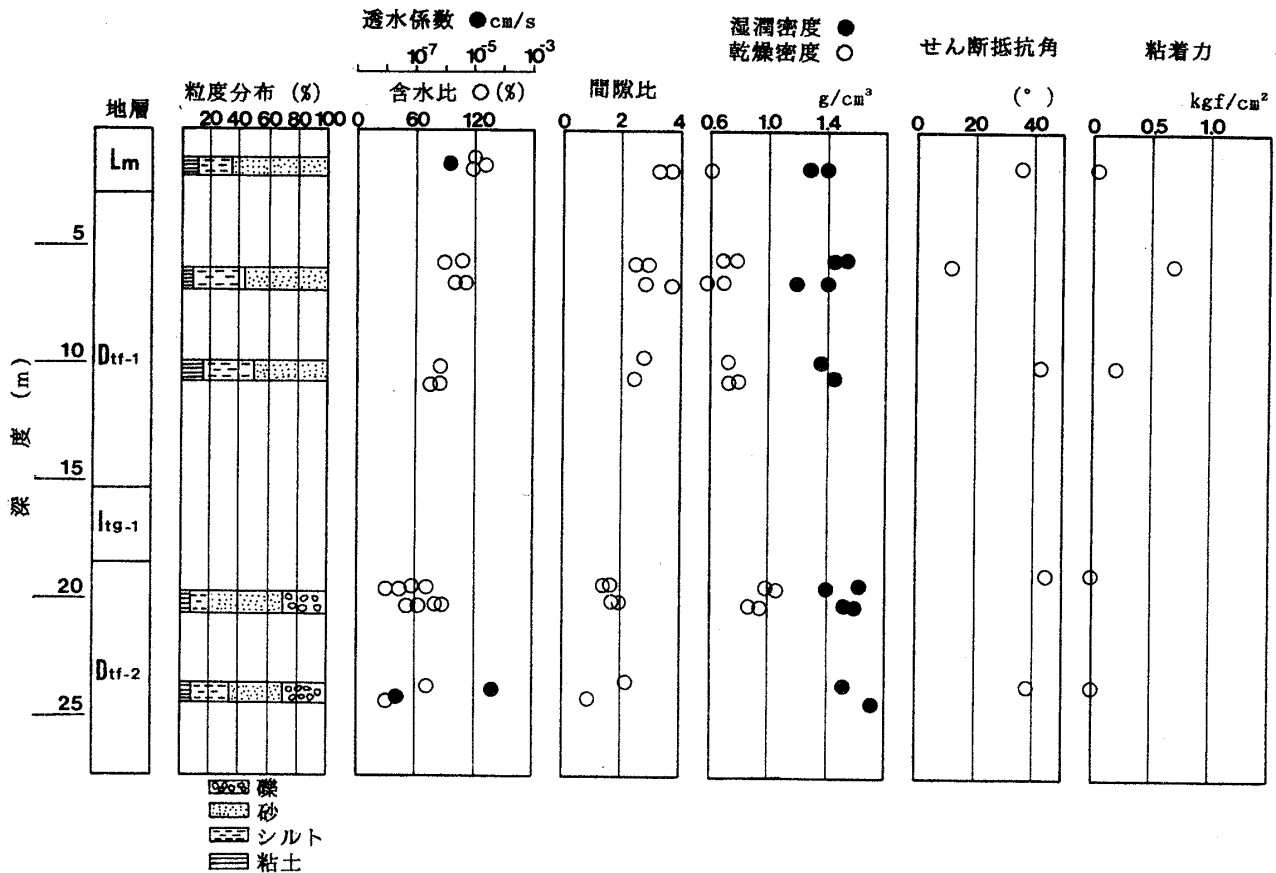


図3 土質特性値

軸圧縮試験 (CU試験) においては、降雨浸透による地山の強度低下を考慮した強度定数を得るために十分に時間をかけて供試体を飽和させている。飽和は側圧を 0.2 kgf/cm^2 にし、脱気水を供試体下部より水頭差約 1 m で供試体内部に通し、この過程を少なくとも24時間維持して上部より脱気させた。その後、所定の側圧で24時間等方圧密させた。さらに、間隙水圧計で圧密終了を確認した後、バックプレッシャーを 0.2 kg/cm^2 の増分で10分おきに増分させ、 1.0 kg/cm^2 に達してから24時間放置し、間隙水圧係数 B 値が 0.98 以上になるまでバックプレッシャーを増加させてこれを繰り返した。せん断は、ひずみ速度 $0.25\%/\text{min}$ で実施した。

試験に用いた試料がローム質および凝灰質粘性土であるため間隙比がかなり大きく、しかも飽和度は 90% 以上で保水性が良い性質を示している。また、透水係数は地表面付近のローム層で 10^{-5} ~

10^{-6} cm/sec 程度の値を示した。有効応力表示によるせん断定数は全体的にせん断抵抗角 ϕ' が優勢で $35\sim 45^\circ$ となった。ただし、上部凝灰質粘性土層上部層では ϕ' が 14° で、 C' が 0.7 kgf/cm^2 を示し、相対的に他の地層より有効応力表示のせん断抵抗角が小さいことが認められた。

3. 斜面内への降雨浸透現象の観測

3.1 観測計器および配置

観測項目は次の3種類であり、その位置関係は図1に示した。

- ①ボーリング孔 (B-1, B-2, B-4, B-5) を利用した地下水位の観測
- ②土中のサクション変化の測定, B-4 地点付近に設置
- ③自記雨量計による雨量観測, B-4 地点付近に設置

観測期間は約1年間であり、この期間内におけ

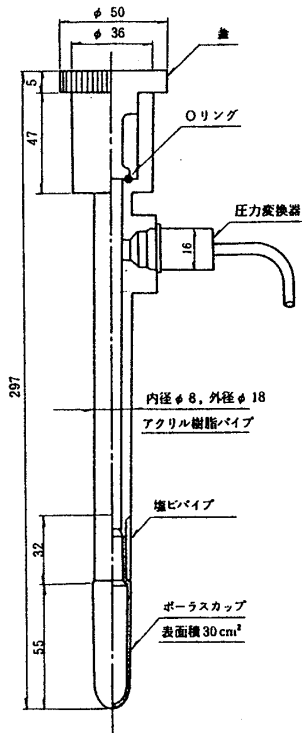


図4 テンシオメータの構造

る降雨量と地下水位ならびに雨水の浸透深さの関係などを観測した。

サクシオン変化測定のためのテンシオメータの構造を図4に示し、観測計器のシステムを図5に示す。

3.2 観測結果

図6に、昭和55年9月から昭和56年9月までの約1年間の観測期間中に測定された降雨量・地下水位および地表面から0.5m, 1.0m, 2.0m, 2.5m, 3.0mの各深度に埋設したテンシオメータによるサクシオンの変化の観測記録を示す。観測期間中に注目すべき降雨記録は計19回あったが、図6に示した観測記録は、このなかで代表的な降雨記録を示したものであり、特に、⑧番目の降雨は連続降雨量が285mmにも達する集中豪雨であり、このような異常時における地下水変動と土中のサクシオン変化に関する貴重な観測記録が得られている。

まず、土中のサクシオン変化に着目すると、①

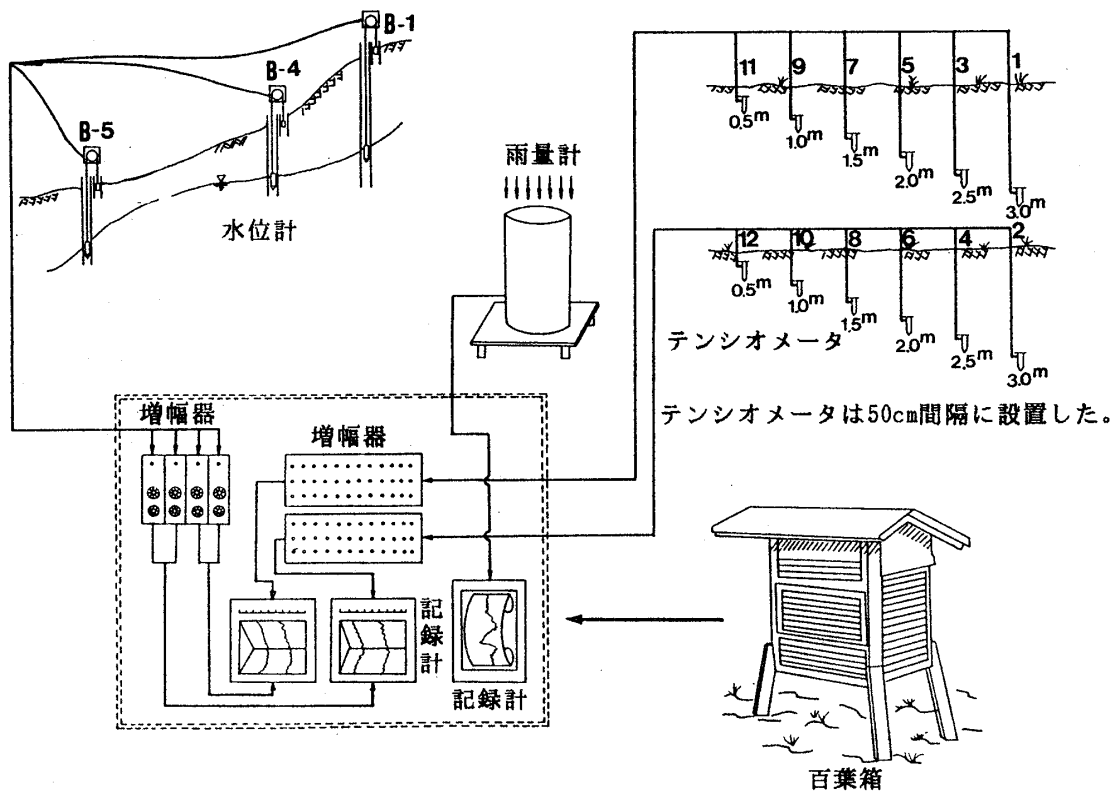


図5 計器システムの概要

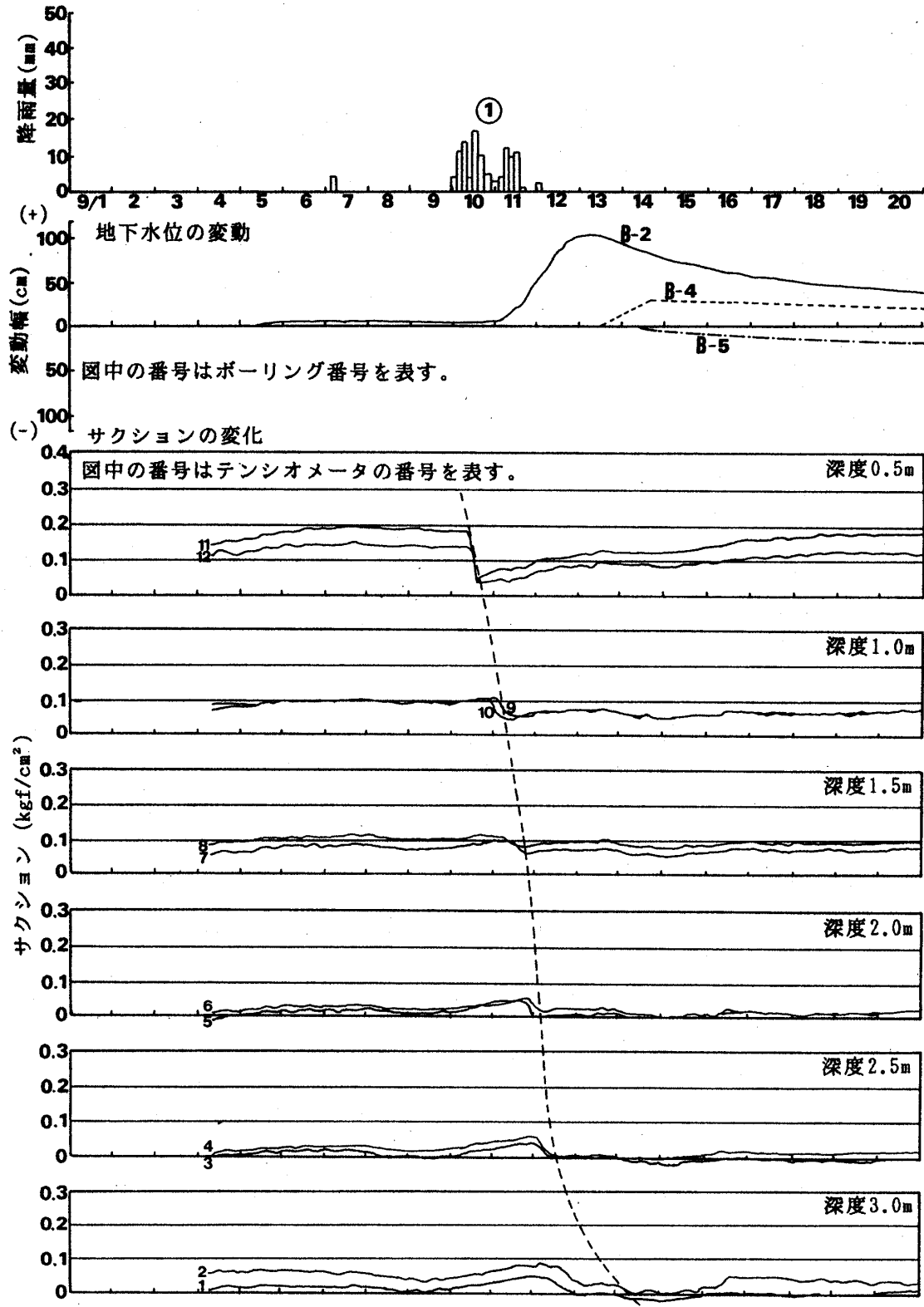


図6 サクシヨンの変化 (1)

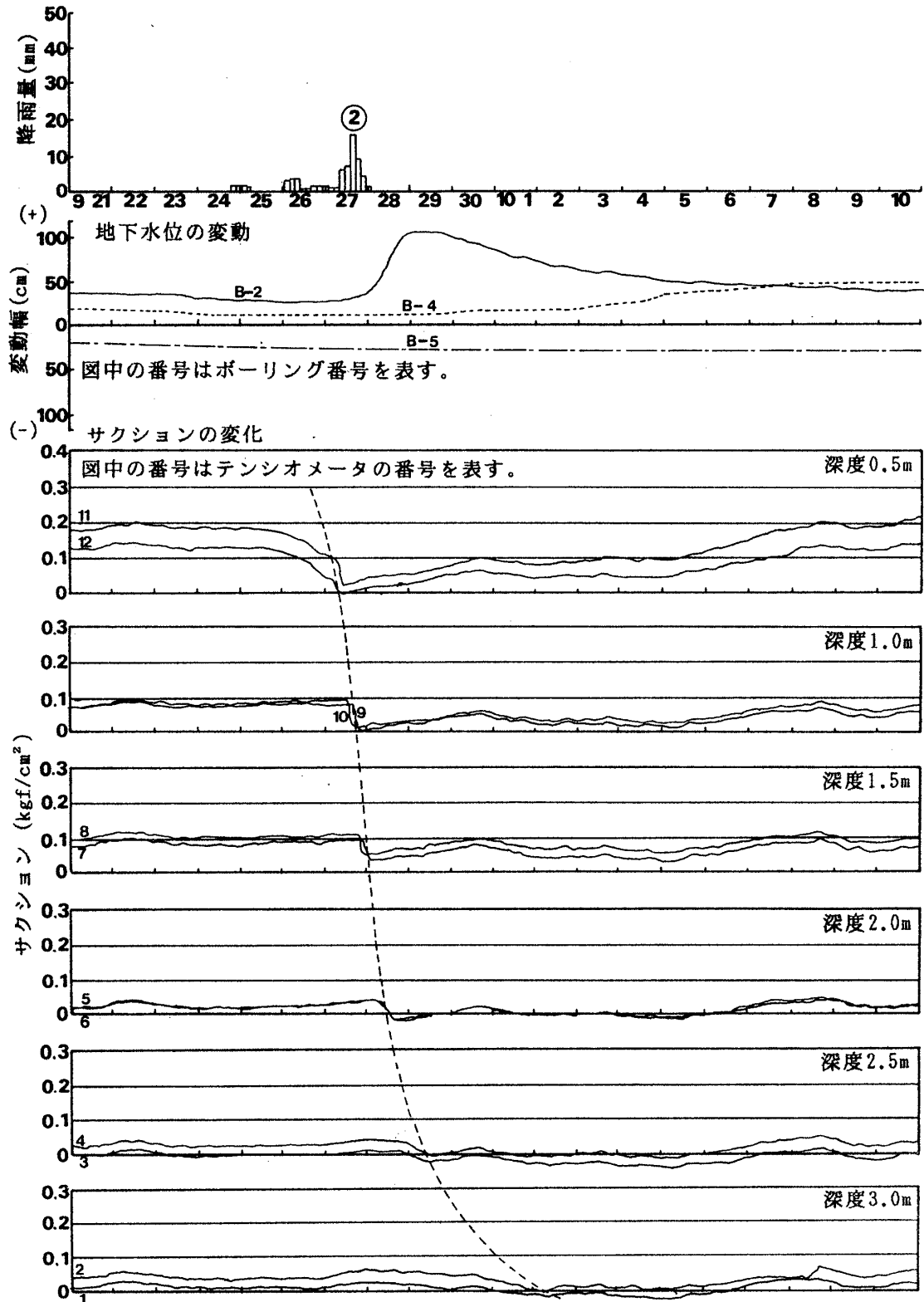


図6 サクシヨンの変化 (2)

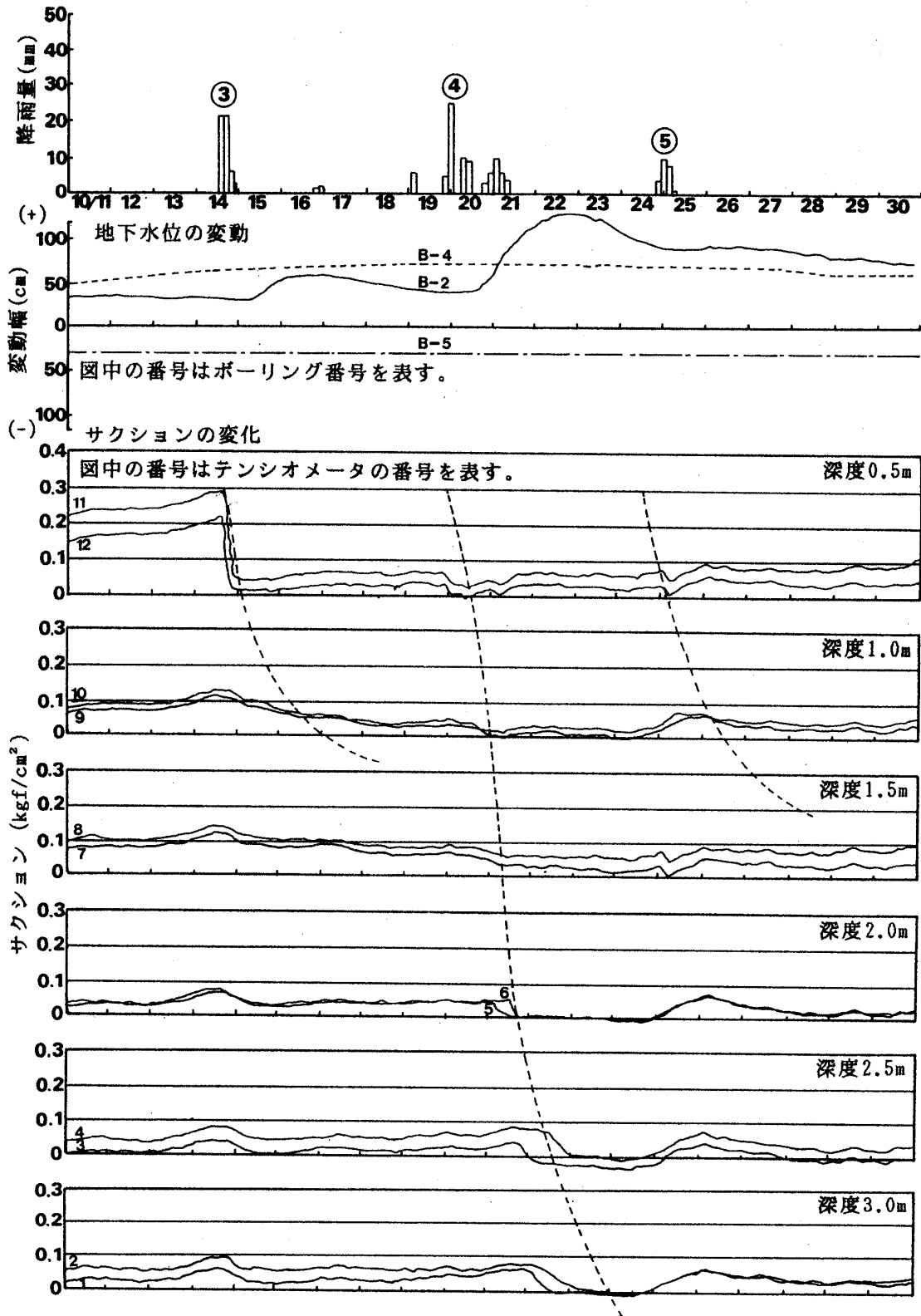


図6 サクシヨンの変化 (3)

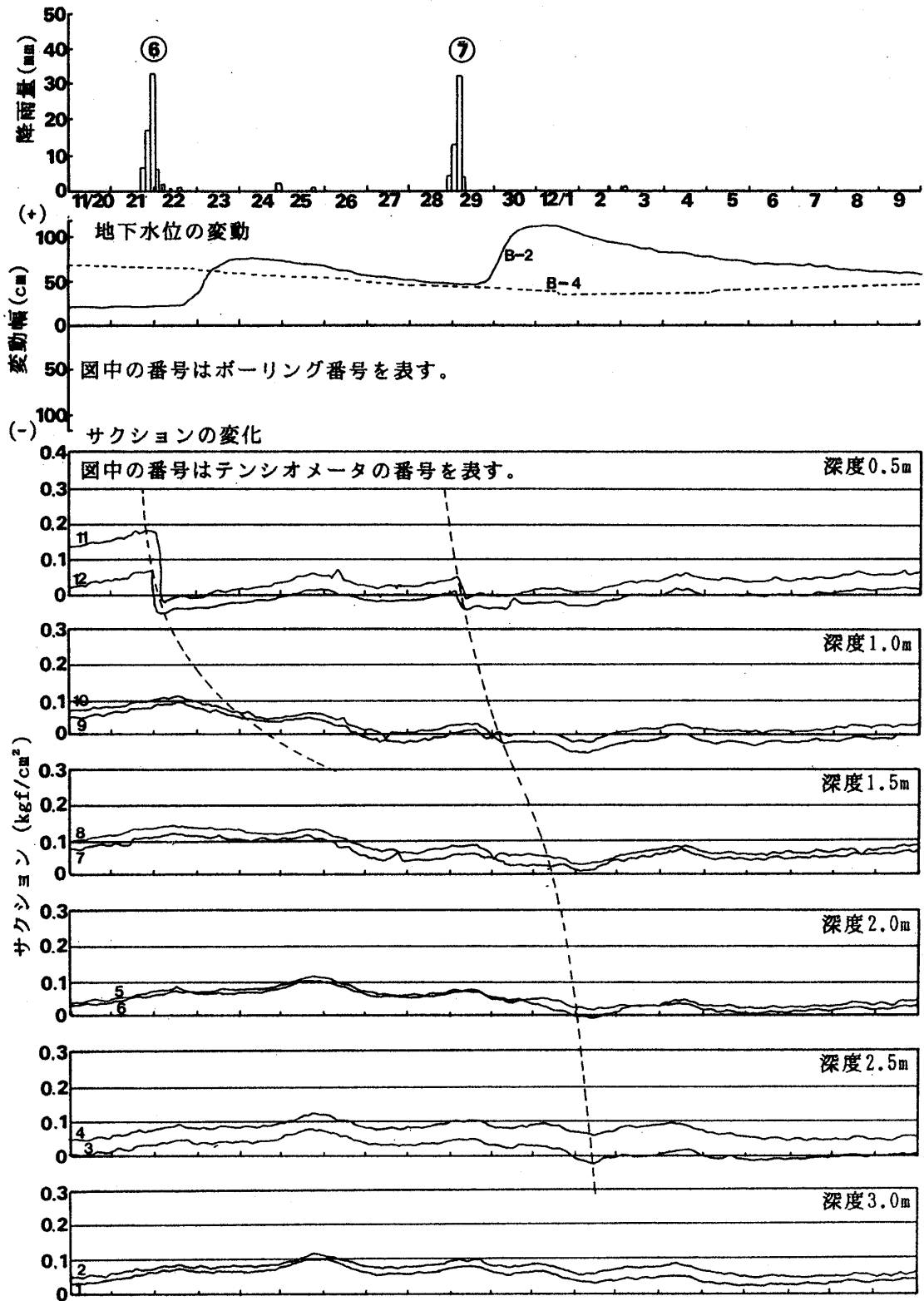


図6 サクシヨンの変化 (4)

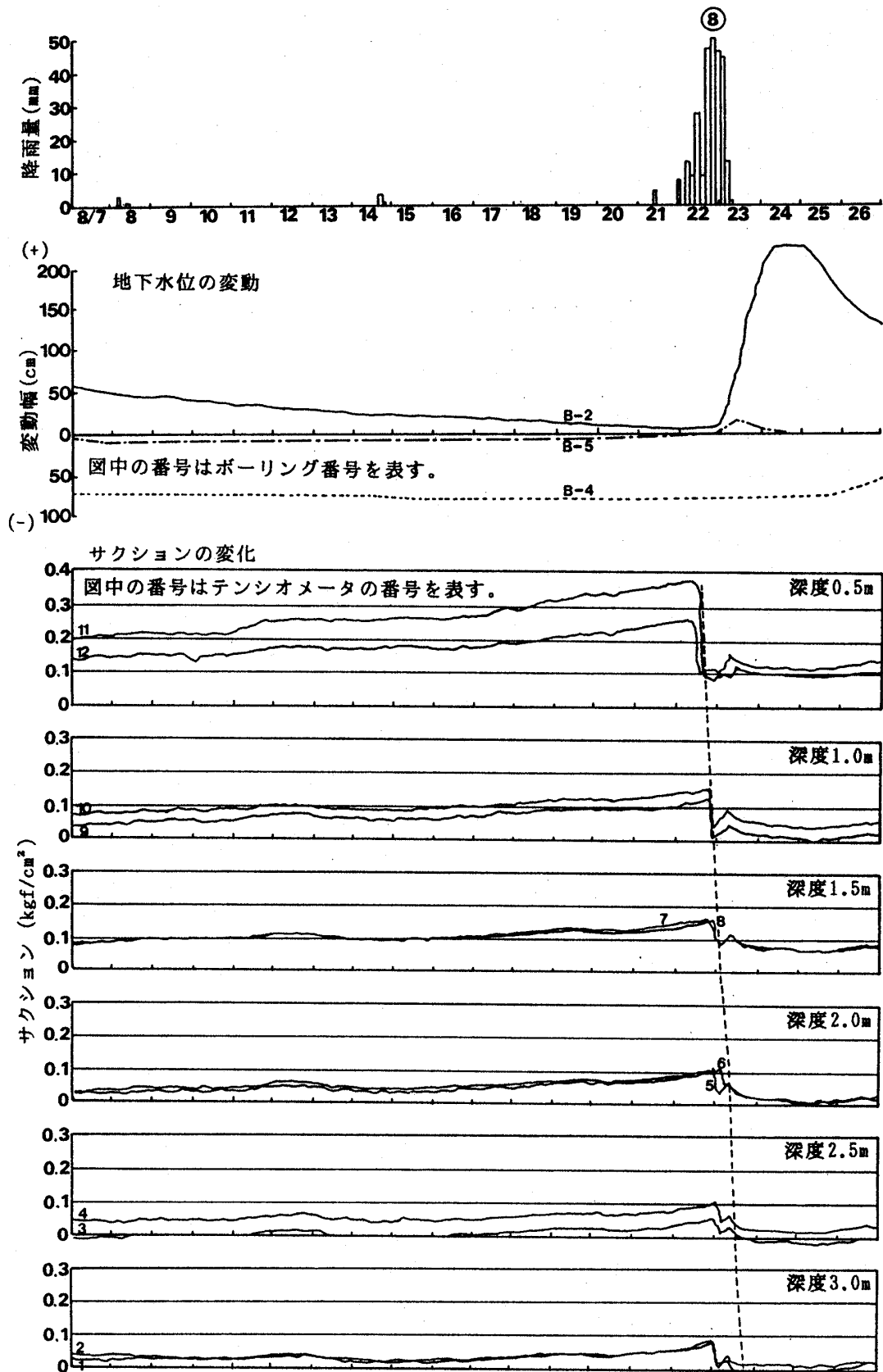


図6 サクシヨンの変化 (5)

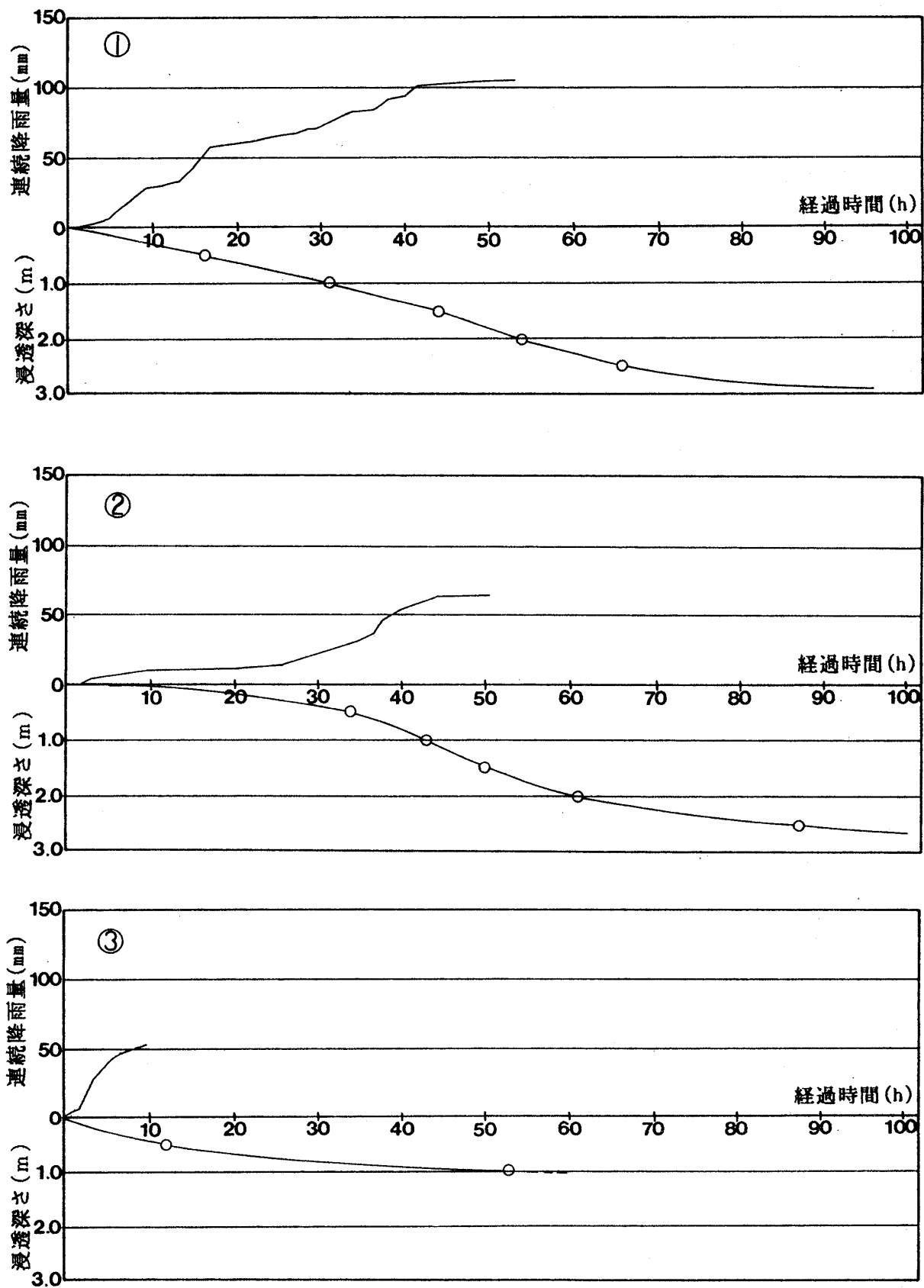


図7 浸透深さと降雨量の関係 (1)

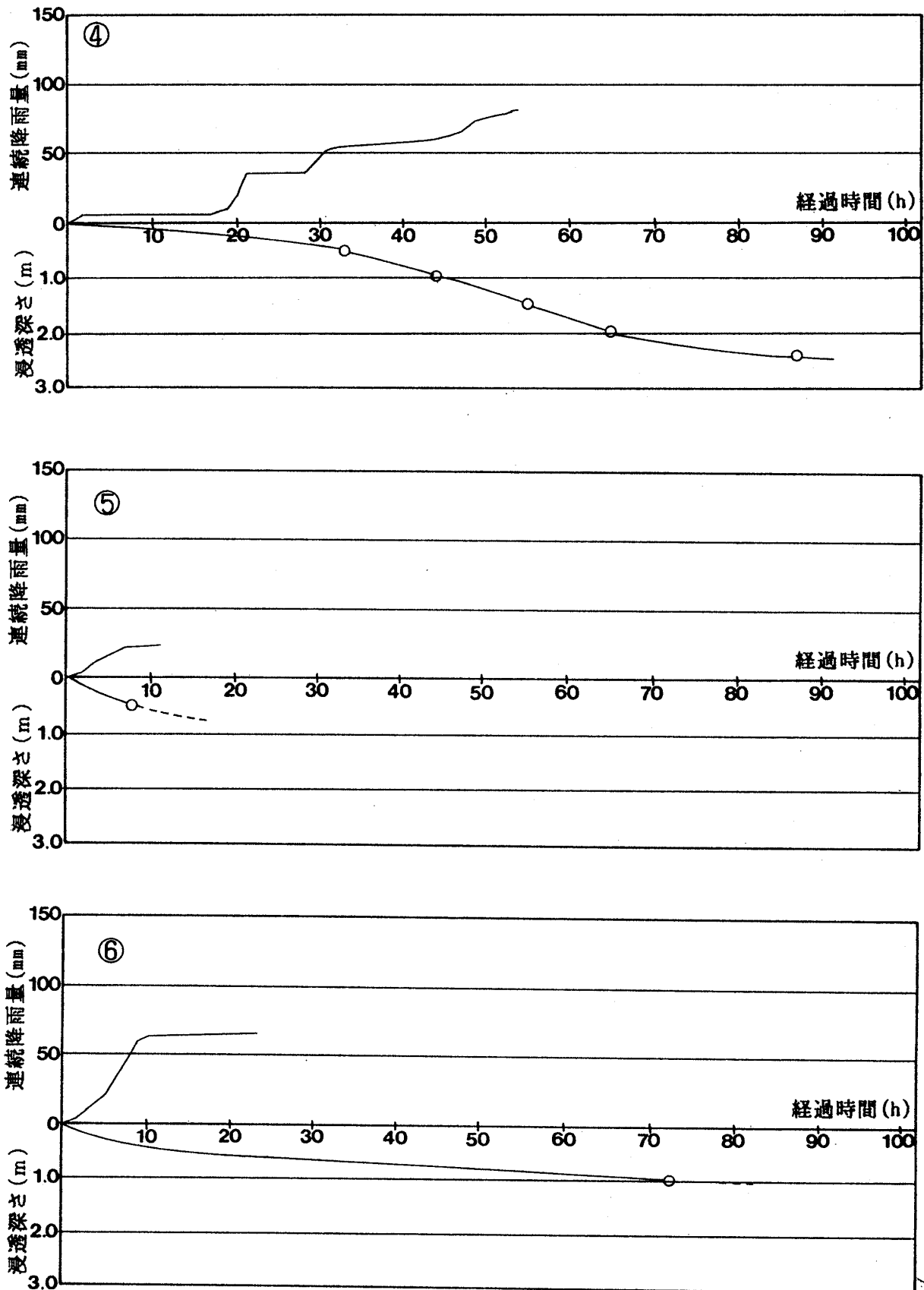


図7 浸透深さと降雨量の関係 (2)

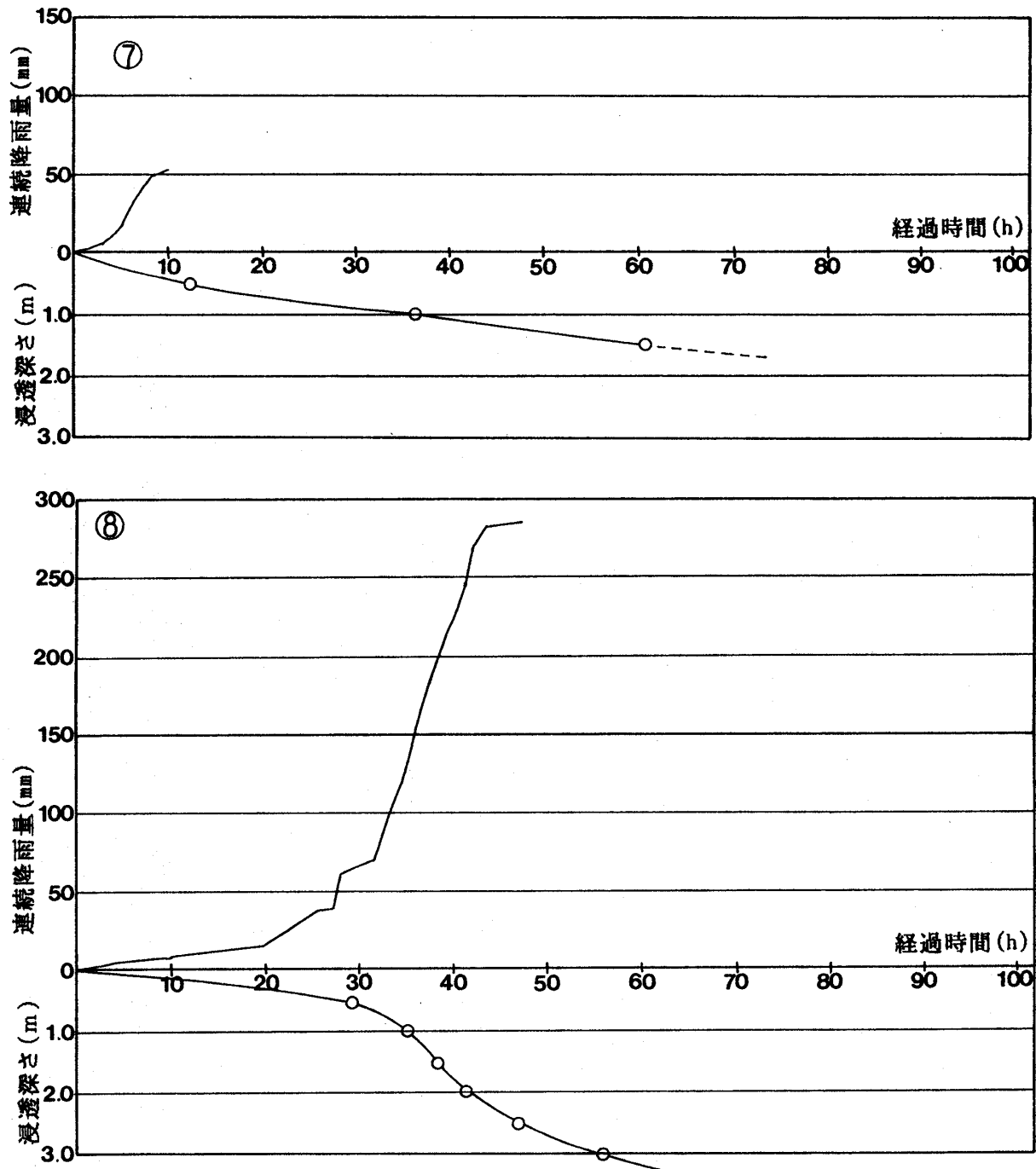


図7 浸透深さと降雨量の関係 (3)

～⑧の各降雨時において、地表に近いものから順次サクシヨンの値が低下していることが認められる。図6の土中のサクシオン変化の記録欄には土中のサクシオンが低下してほぼゼロになった時点を地表に近い深度のものから順次むすんだ一本の曲線が示してある。一般に、土中のサクシオンの値は、土の含水比が増加するにつれて低下し、土が水で飽和状態に達すると、サクシオンの値がほぼゼロになるという特性をもっている。従って、サクシオンの値がほぼゼロに低下した時点をむすんだ上記の曲線は、降雨時における雨水の浸透深さの時間的進行を示すものであると考えられる。たとえば、連続降雨量が104mmの①の降雨では深度が深くなればなるほど浸透速度が鈍る傾向を示しながらも、最終的には約3.0mの深度まで雨水が浸透していることがわかる。これに対して、③の降雨については連続降雨が52mmと少ないこともあって雨水の浸透は1.0mの深度までも達していない。このように、降雨の特性に応じて雨水の最大浸透深さは異なるが、以上のように土中のサクシオンの変化に着目すれば降雨時における雨水の浸透領域の広がりや把握をすることができる。そこで、降雨特性と雨水の浸透速度の関係を調べるために図6の降雨量と土中のサクシオン変化の記録を整理し直し、連続降雨量と雨水の浸透深さの関係を図7に示した。いずれの降雨においても降雨の継続とともに雨水の浸透深さが増大し、降雨終了後も雨水の浸透が徐々に進行していく様子がわかる。降雨終了後は雨水浸透速度は徐々に低下し、最終的には降雨終了から1日～2日後に雨水の浸透深さが最大に達する。雨水の最大浸透深さは、先行降雨量の大きさにも左右されるが、連続降雨量が50mm程度で約1.0m、連続降雨量が100mm程度で約2.0～2.5m、連続降雨量が285mmに達する降雨⑧では計器の最大埋設深度である3.0mを越えていることがよみとれ、豪雨時には雨水の浸透がかなり深くまで及ぶことが十分に予想される。

4. 観測結果の解析的検証

4.1 鉛直次元方程式

土中への雨水浸透に関する研究は、1907年のBuckinghamの研究に端を発し、1931年にRichards⁷⁾によってマトリックポテンシャルを導入した理論により不飽和土中の水の運動にポテンシャル方程式が導かれた。更に、1952年にKlute⁸⁾によりポテンシャル方程式が水分拡散方程式に変形され、1957年にPhilip⁹⁾によってこの拡散方程式の性格や解法・適用範囲が取りまとめられ、現在では、これが不飽和浸透流の理論解析の主流となっている。しかし、これらの理論の基本的概念は、水の粘性係数と密度が空気のそれに対して十分に大きいので浸透水は間隙空気と自由に交換されるとし、浸透水の挙動には間隙空気の運動は影響しないものとしている。

一方、細粒分を含む土では、水素結合力やファン・デル・ワールス力等により水分子と土粒子との間に強い相互作用を生じる場が存在する。また、土中の間隙の大小あるいは浸透以前の土中の水分状態によっては、浸透水と間隙空気とが自由に交換されないことは十分に考えられる。更に、粘土土では間隙空気の圧縮の影響を無視できないことも考えられ、伊勢田らの実験¹⁰⁾でも間隙空気の影響が確認されている。

従って、土中での浸透水の移動は、浸透水と間隙空気が徐々に置換されることによって生じると考えると、雨水の鉛直浸透に関与するものは、重力ポテンシャル・毛管ポテンシャル・土粒子と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャル・間隙空気と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャルに区分される。

一般に、雨水の浸透によって土中の単位面積当りの間隙に作用する力は、下向きには重力ポテンシャル ϕ_g と毛管ポテンシャル ϕ_s がある。また、上向きには土粒子と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャル ϕ_v と間隙空気と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャル ϕ_a に区分することができ、それらが釣合っていると考えることができる。

$$\phi_g + \phi_s - \phi_v - \phi_a = 0 \quad (1)$$

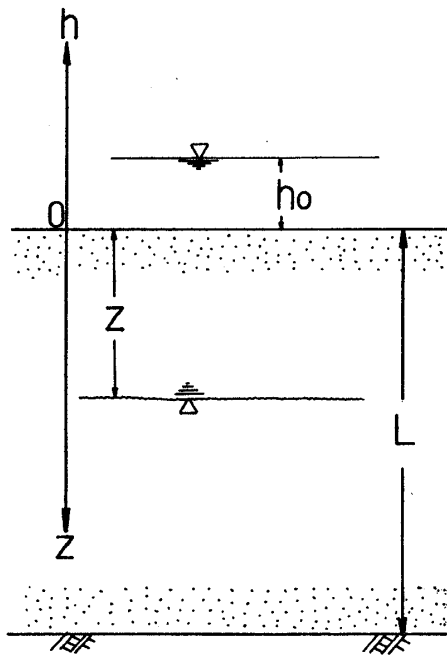


図8 鉛直一次元浸透モデル

図8に示すように湛水深さ h_0 のときに湿潤前線が深さ Z まで到達したとすると、式(1)の左辺の各項は、次のように表現できる。

①重力ポテンシャル

間隙水の単位体積重量を γ_w とし、湿潤前線より上方の土の飽和度を S_{rf} とすると、飽和度が高く間隙水は連続していると仮定すると、重力ポテンシャルは、

$$\phi_g = \gamma_w \cdot (h_0 + Z \cdot S_{rf}/100) \quad (2)$$

で表すことができる。

②毛管ポテンシャル

湿潤前線より下方の土のサクシオンを h_{co} とし、湿潤前線より上方の土のサクシオンを h_{cf} とすると毛管ポテンシャルは、

$$\phi_s = \gamma_w \cdot (h_{co} - h_{cf}) \quad (3)$$

で表される。ここで、 h_{co} 、 h_{cf} は体積含水率 θ との関数で表現される。

ただし、今回のサクシオン観測結果で明らかのように、湿潤前線より上方の土のサクシオンは実質的にゼロと置くことができ、式(3)は式(4)のようになる。

$$\phi_s = \gamma_w \cdot h_{co} \quad (4)$$

③土粒子と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャル

土中の間隙内を浸透水が移動しようとするとき、浸透水と土粒子表面との間に粘性抵抗が作用する。この粘性抵抗を浸透水の動水勾配 i で定義すると

$$\phi_v = \gamma_w \cdot i \cdot Z \quad (5)$$

で与えられる。

さて、浸透水の移動速度 u は、湿潤前線より上方の疑似飽和領域の透水係数を k_s とし、間隙内で実際に浸透水が移動できる領域は浸透によって間隙空気と浸透水とが置換される部分のみであると仮定すると、

$$u = k_s \cdot i / \theta_e \quad (6)$$

で表わせる。

ここで、 θ_e は浸透水の移動が可能な間隙体積率であり、初期体積含水率を θ_0 、浸透後の体積含水率を θ_f とすると

$$\theta_e = \theta_f - \theta_0 \quad (7)$$

で求まる。

したがって、土粒子と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャルは

$$\phi_v = \gamma_w \cdot Z \cdot \theta_e \cdot u / k_s \quad (8)$$

となる。

④間隙空気と浸透水との粘性抵抗によるポテンシャル

湿潤前線の進行にともなう浸透水量は、空気の放出量と空気の圧縮量の和である。

$$q_a + q_{ac} = q_w \quad (9)$$

浸透水量 q_w は、浸透水の移動が可能な体積間隙率 θ_e と湿潤前線の移動速度 u_s との積によって表現される。

$$q_w = \theta_e \cdot u_s \quad (10)$$

間隙空気の放出量 q_a は、空気に対してもDarcy

の法則が成立すると仮定すると

$$q_a = k_a \cdot h_a / Z \quad (11)$$

で表される。

ここで、 q_a : 間隙空気放出量, k_a : 透気係数,
 h_a : 間隙空気圧

間隙空気の圧縮量 q_{ac} は、非断熱的にボイル・シャルルの法則に従うものとする。

$$P \cdot V = R \cdot T = \text{Const.} \quad (12)$$

ここで、 P : 間隙内の空気圧力, V : 空気体積,
 R : 気体定数, T : 絶対温度

図8より、土層表面下 Z に湿潤前線が到達したときの空気体積 V は、湿潤前線より上方の疑似飽和領域での間隙空気体積 $(\theta - \theta_f) Z$ を考慮し入れると、

$$V = (\theta - \theta_o)(L - Z) + (\theta - \theta_f) Z \quad (13)$$

で表わせる。これを、式(12)へ代入し、 $Z=0$ で P_o は $r_w \cdot h_{co}$ とすれば、

$$P(\theta_e(L - Z) + (\theta - \theta_f) Z) = P_o(L - Z)(\theta - \theta_o) \quad (14)$$

あるいは

$$h_{ac} = h_a \left(\frac{(L - Z) \theta_e}{\theta_e(L - Z) + (\theta - \theta_f) Z} \right) \quad (14')$$

となる。

従って、間隙空気の圧縮量 q_{ac} は

$$q_{ac} = k_a \cdot h_a \left(\frac{\theta_e(L - Z)}{\theta_e(L - Z) + (\theta - \theta_f) Z} \right) \frac{1}{Z} \quad (15)$$

となる。

そこで、式(9)に式(10)、式(11)、式(15)の関係を代入し、

$$\phi_a = r_w \cdot h_a = r_w \cdot \theta_e \cdot u \cdot Z \times \frac{1}{k_a} \left(1 + \frac{\theta_e(L - Z) + (\theta - \theta_f) Z}{\theta_e(L - Z)} \right) \quad (16)$$

となる。

さらに、式(1)に式(2)、式(4)、式(8)、式(16)

を代入し、浸透水の移動速度 u は(6)式の仮定より湿潤前線の移動速度 u_s に等しいことから、 $u = u_s = dZ/dt$ とすると、次式が得られる。

$$\frac{dt}{dZ} = \frac{1}{u} = \frac{1}{k_s} \theta_e \frac{Z}{h_o + Z + h_{co}} + \frac{1}{k_a} \theta_e \frac{((\theta - \theta_o)(L - Z) - (\theta - \theta_f) Z) Z}{(\theta - \theta_o)(L - Z)(h_a + h_{co} + Z)} \quad (17)$$

ここで、間隙空気の圧縮の影響を無視すると

$$\frac{dt}{dZ} = \frac{1}{u} = \theta_e \frac{1}{k_s + k_a} \frac{Z}{h_o + Z + h_{co}} \quad (18)$$

となる。したがって、 $u = dZ/dt$ を積分すると間隙空気が閉塞される場合の浸透方程式は、(19)式のようになる。

$$t = \theta_e \frac{1}{k_s + k_a} (Z - (h_o + h_{co})) \cdot \ln \left(\frac{Z + h_o + h_{co}}{h_o + h_{co}} \right) \quad (19)$$

4.2 二次元解析に用いた基礎方程式¹¹⁾

間隙空気の閉塞を無視した飽和-不飽和領域の浸透を支配する基礎方程式は Richards によって導かれ、連続の式と Darcy の法則を不飽和領域まで拡張することにより次の非線形方程式で表現される。

$$\frac{\partial}{\partial Z} (K_s(\theta) \left(\frac{\partial P_w}{\partial Z} + r_w g \right)) = n \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (20)$$

ここで、 $K_s(\theta)$: 透水係数, P_w : 間隙水圧, S_w : 飽和度, n : 間隙率である。

一方、不飽和領域において空気の密度は水の密度に対して約 1/1000 程度であり、重力の影響を無視すると、間隙空気に対する方程式は

$$\frac{\partial}{\partial Z} (K_a(\theta) \frac{\partial P_a}{\partial Z}) = n \frac{\partial S_a}{\partial t} \quad (21)$$

となる。更に、飽和度の定義より

$$S_w + S_a = 1 \quad (22)$$

であり、

$$P_w - P_a = P_c \quad (23)$$

となる。ここで、 P_c はサクションである。

上記の結果から、式(20)、式(21)、式(22)、式(23)が間隙空気の閉塞を考慮した不飽和浸透の基礎方程式となる。

4.3 観測結果との比較

(1) 解析条件

実斜面の解析を行う前に解析方法の妥当性を検証するため観測結果との比較検討を行った。検討の対象とした降雨は、図6に示す観測結果の中から時間降雨量が比較的一定している①、②、③、⑥の降雨を対象とした。解析に用いた入力データは、透水係数・透気係数・サクション・浸透特性曲線で、透水係数は室内変水位透水試験から求めた。サクションは観測結果の値を用いるものとし、浸透特性曲線は関東ロームにおける久楽の実験結果¹²⁾を参考にして図9のように定めた。図中の①層は図3に示した L_m 層、②・③は D_{tf-1} 層、④は D_{tf-2} 層を表す。透気係数は透水係数の5倍と仮定

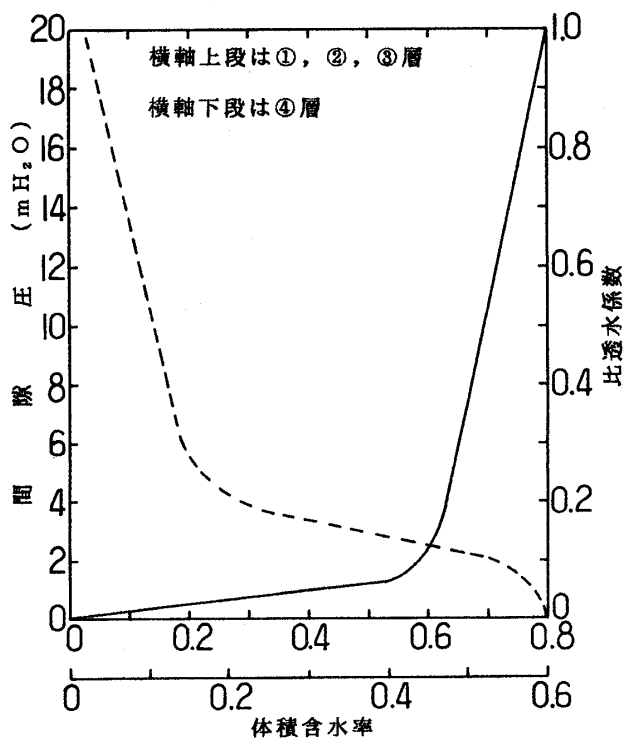


図9 水分保持特性

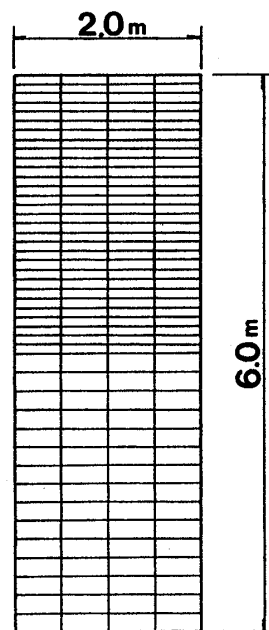


図10 モデルメッシュ

した。また、解析は一次元と二次元の不飽和浸透流解析とし、図10に示すモデルを設定した。

(2) 一次元解析による検証

図11に鉛直一次元解析によって得られた湿潤前線の移動状況と透水係数・サクションの関係を示す。なお、同図中には、①降雨における湿潤前線の移動状況と降雨量とを併記している。図11の結果から、室内試験結果の透水係数 $k_s = 2.0 \times 10^{-6}$ cm/sを用いたときには実測曲線に比較して湿潤前線の移動速度が著しく遅延する傾向にある。一方、透水係数を1オーダー大きくしたときには実測曲線と解析結果とは比較的よく一致する。これは、室内試験では供試体が均質で原地盤のように潜在的な弱線を含む可能性が少ないこと及び室内試験では供試体を完全飽和することは極めて難しく、しかも間隙空気が放出されにくい環境となっていることが挙げられる。従って、間隙内の残存空気の影響を受け易いことも透水係数が小さく求まる要素と考えられ、そのことは、関口ら¹³⁾・調ら¹⁴⁾の報告でも指摘されている。

サクションについては、 $h_c = 2.0$ mでは初期浸透速度が実測曲線より速くなるのに対して、 $h_c = 1.0$ mのときには浸透深さが1.0 mまでは実測曲

線とよく一致している。しかし、それ以降は実測曲線の方が速くなっている。このことは、鉛直一次元理論では降雨時間の経過とともに湿潤前線の移動速度が次第に低下していく特性を有しているのに対して、実測曲線では図1のように後背地形が斜面であることから、降雨時間が長くなると二次元あるいは三次元的な降雨浸透挙動が加味され、鉛直流のみでなく水平流の影響を受けるためであると考えられる。従って、現地斜面でのサクシオンは $h_c = 1.0$ m程度が妥当であるといえる。更に、図12は①、②、③、⑥の降雨による湿潤前線の移動状況を解析値とともに示しており、一点鎖線は実測値の範囲を示したものである。浸透深さが1.0 m程度までの地表面付近での浸透においては、解析結果は実測曲線の平均的な曲線を与えており、実際の挙動をよく反映している。従って、浸透深さが1.0 mよりも深くなると、後背地

形の影響を受けていることが推察される。また、図12には、 $k_a/k_s = 5$ のときの解析結果も合わせて示している。この結果からすると、表層付近の浸透現象に対しては、間隙空気の影響はほとんど受けていないといえる。

(3) 二次元解析による検証

図13は二次元解析による降雨量と浸透深さの関係を示す。ここで、湿潤前線の到達、すなわち浸透深さの判定は、浸透後の実測のサクシオンが0.2 m~0.5 m程度であることおよび図14のように間隙圧が0.2~0.3 m付近で変曲点を生じることから、ここではサクシオンの値が $h_c = 0.3$ mに低下したときを湿潤前線の到達と見なして整理した。解析結果についても同様な整理を行った。同図によれば、一次元解析と同じく二次元解析でも $k_s = 2.0 \times 10^{-5}$ cm/s, $h_c = 1.0$ mの条件のときに実測値とよく一致を示している。また、実測値とよく合致

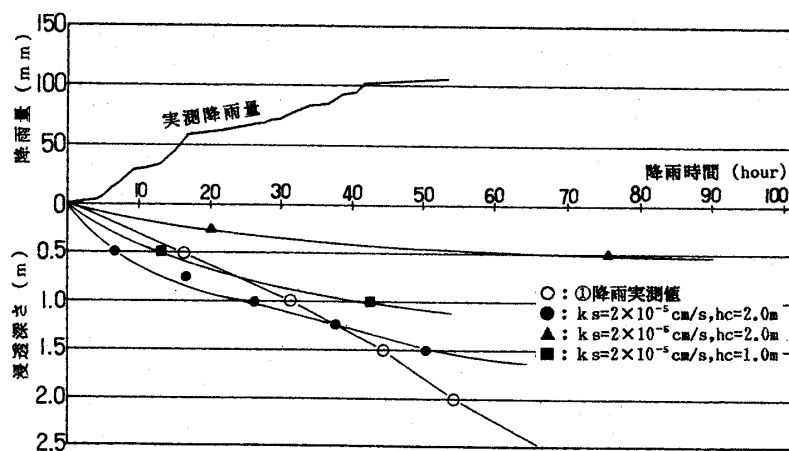


図11 浸透速度に及ぼす透水係数・間隙圧の影響

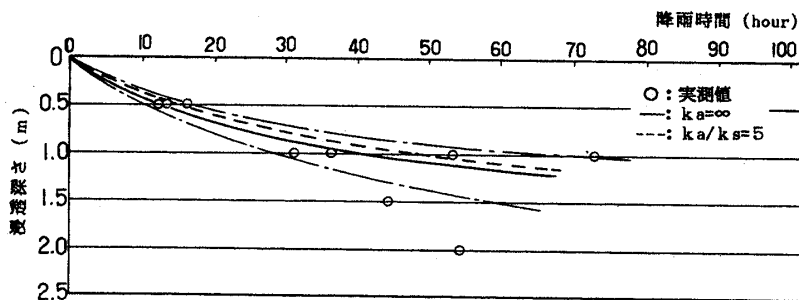


図12 浸透速度に及ぼす間隙空気の影響

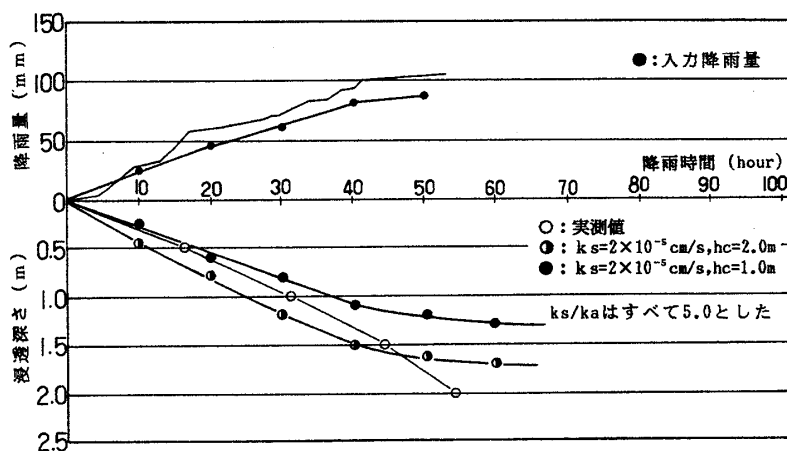


図13 二次元浸透流解析による検証

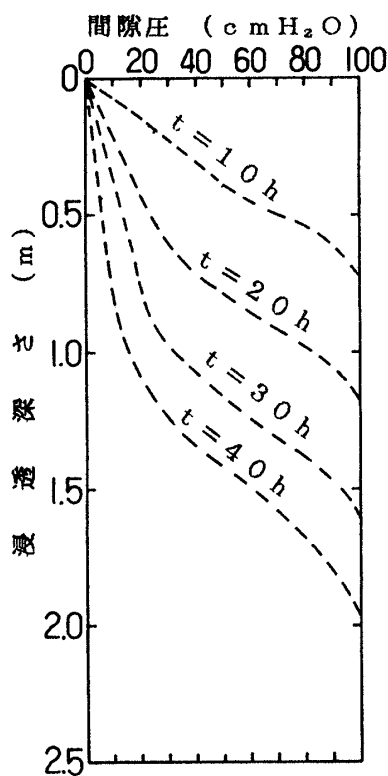


図14 間隙圧の経時変化

と、土中水分量の増加によるサクシヨンの低下によって土のせん断強さが減少すること、および地下水位の上昇・浸透力の作用が要因であると考えられる。一般に、斜面の安定解析は仮定した任意の円弧すべり面に沿って発生するせん断力の合力が、すべり面の土の抵抗力より大きいときに崩壊を起こすという考え方に基づいている。安定解析の方法としては、Fellenius法やBishop法などがある。このとき問題となるのが降雨浸透に伴う間隙水圧分布をどのように仮定するかにある。斜面内での間隙水圧の測定例²⁾によると間隙水圧分布は静水圧分布ではなく部分的に非静水圧分布であると報告されている。そこで、図15に示す評価手法のように降雨強度と降雨継続時間を考慮した浸透流解析による流速分布から浸透力とその作用方向を求めるとともに湿潤前線の深さから土塊重量の増加を求め、更に間隙水圧分布を加味してBishop法による安定解析によって、斜面の安定性を評価した。ここで、浸透力 J は、浸透流解析結果の流速 v と透水係数 k_s ・水の密度 γ_w を用いて下式のように求めた。

$$J = v / k_s \cdot \gamma_w \quad (24)$$

する範囲は一次元解析よりも深くなっている。

5. 斜面の安定性に及ぼす降雨浸透の影響

5.1 斜面安定性の評価手法

降雨時の斜面崩壊は、雨水の土中への浸透によって土塊重量が増加してすべり力が大きくなるこ

5.2 解析モデルおよび条件

解析は図1の崩壊前の a-a'断面を対象として図16のようにモデル化した。図17には浸透流解析のモデルメッシュを、図18には安定解析で仮定した

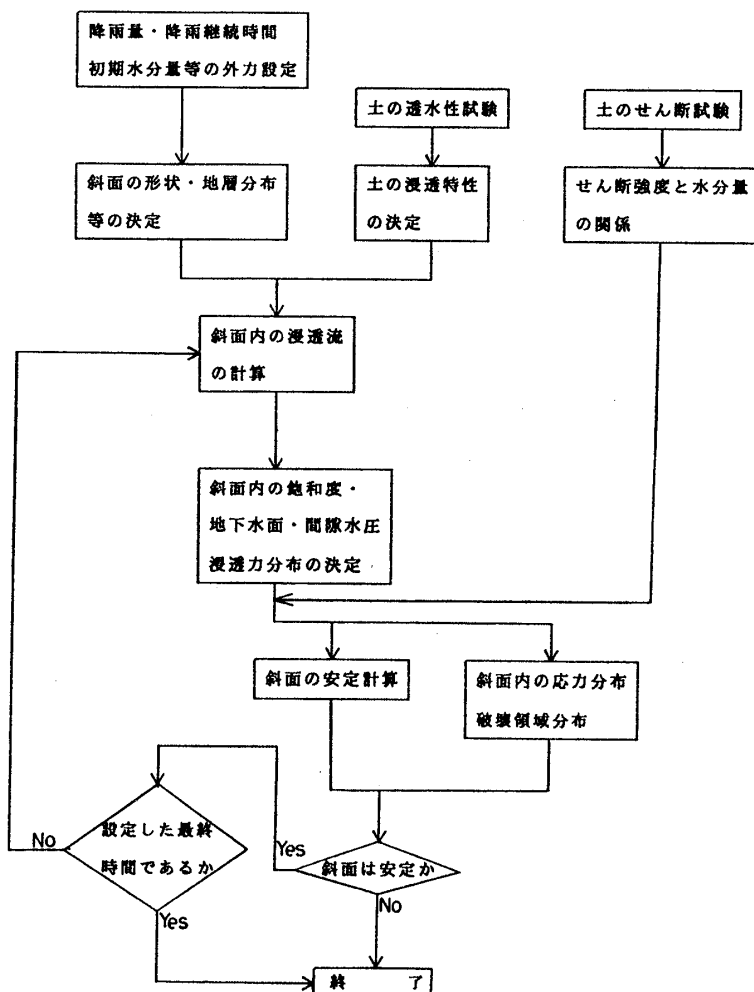


図15 のり面安定性評価手法

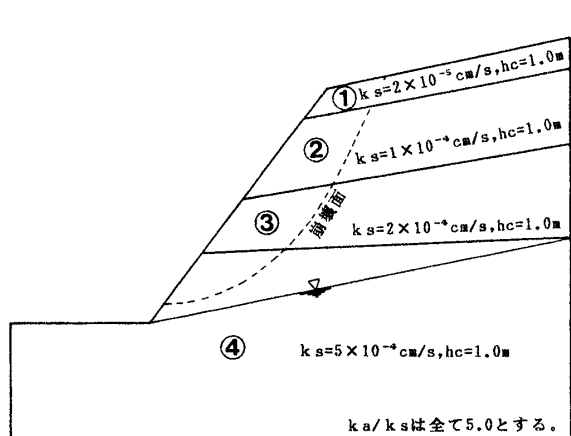


図16 浸透流解析の地盤条件

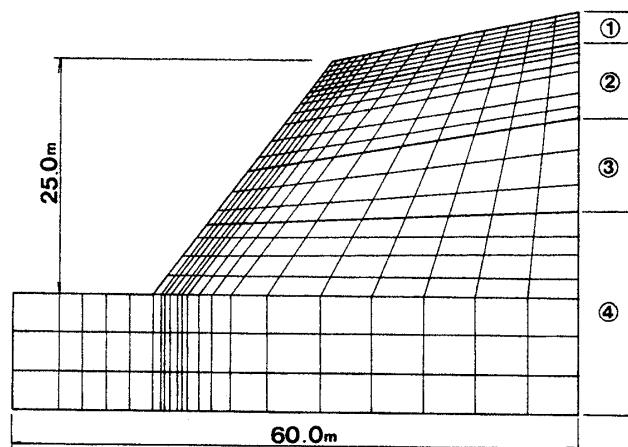


図17 浸透流解析モデルメッシュ

	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
①	1.369	0.606	0.5	35.0
②	1.398	0.692	7.0	14.0
③	1.416	0.774	2.0	41.5
④	1.610	0.978	0.0	39.0

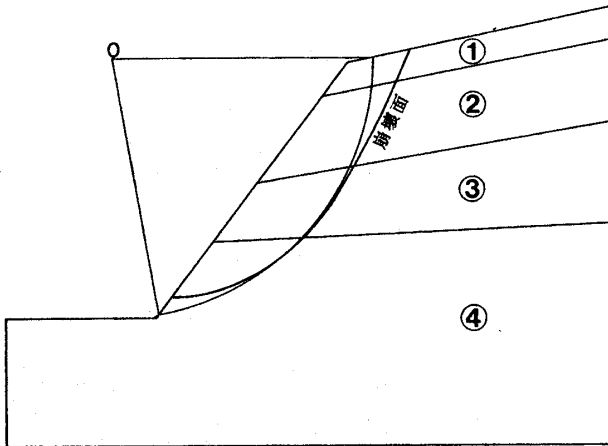


図18 円弧すべり解析モデル

すべり円弧の形状を示した。解析地盤はすべて細粒分を30~50%含んだ土であることから、斜面内部への浸透に対しては間隙空気と浸透水とは自由に交換されないものと仮定して間隙空気の影響を解析に取入れた。地盤の物性値は、図16及び図18に併記した。浸透流解析に用いた降雨は、今回観測降雨の中でも最も降雨強度が大きい⑧降雨を参考にして、降雨強度20mm/hを20時間連続的に与えることとした。また、降雨前の地下水位は現地調査結果から図16のように定めた。

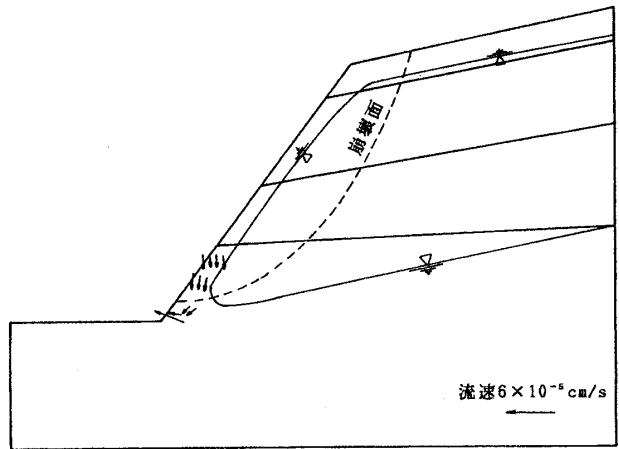


図19 湿潤前線の進行状況 (降雨量200mm)

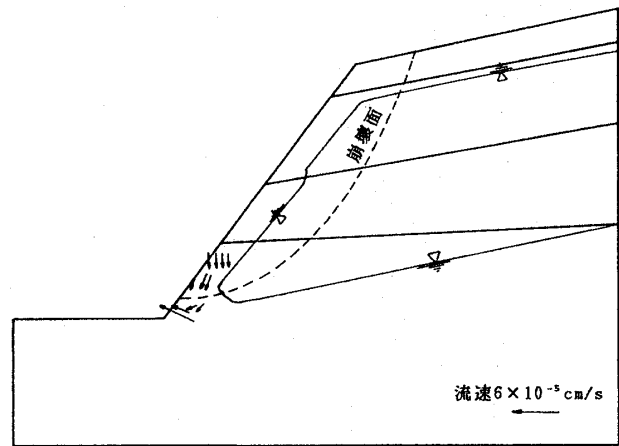


図19 湿潤前線の進行状況 (降雨量300mm)

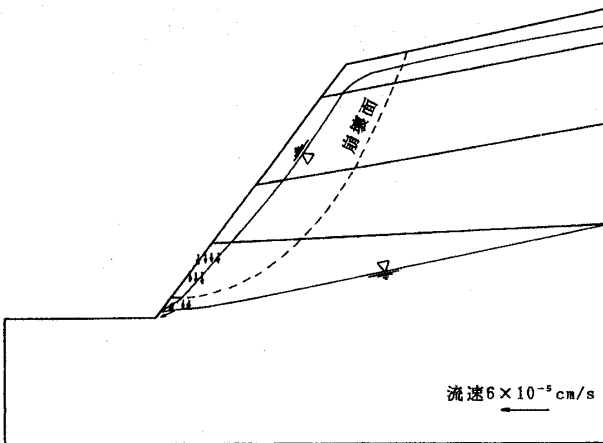


図19 湿潤前線の進行状況 (降雨量100mm)

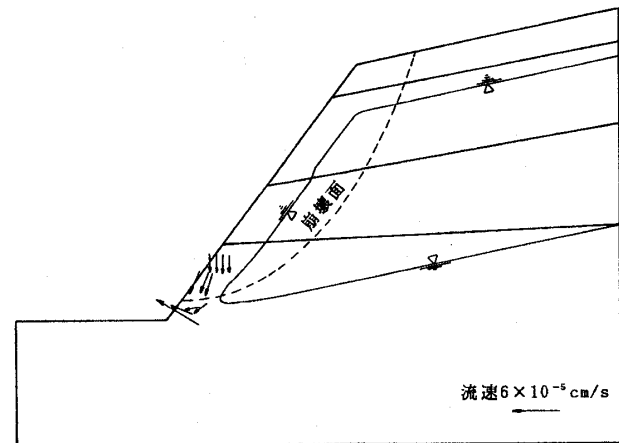


図19 湿潤前線の進行状況 (降雨量400mm)

5.3 降雨量と斜面の安定性

(1) 降雨浸透状況

図19に総降雨量100mm, 200mm, 300mm, 400mmに対する湿潤前線の分布を示す。同図中にはのり尻部付近の発生流速を示している。湿潤前線は降雨量の増大とともに斜面内へ浸透しているが、地下水位を上昇させるまでには至っていない。これは、斜面に一度浸透した雨水がのり尻部から流出することが影響していると考えられる。すなわち、降雨量200mmを越えて湿潤前線と地下水面が完全につながった時点より斜面内からのり尻部に向かって大きな流速が発生していることから推察できる。この結果は、浸透水が流出するような斜面においては、のり尻部に発生する過大な流速のために、斜面内の土砂が流出する可能性を示唆しているといえる。

(2) 斜面の安定性

図20に総降雨量と安全率の関係を示す。対象とした斜面の安全率は降雨以前では $F_s = 1.4$ とかなりの安定性を有しているものの降雨浸透によって次第に安全率は低下し、総降雨量が200mmを越えると切土斜面の基準安全率 $F_s = 1.2$ を下回るようになる。更に、総降雨量が400mmに達すると安全率は1.0を下回り斜面は不安定となる。このように、斜面内への雨水浸透による自重の増加に加えてのり尻部へ向かう浸透力の作用によって安全率は低下することとなる。安全率の低下割合は

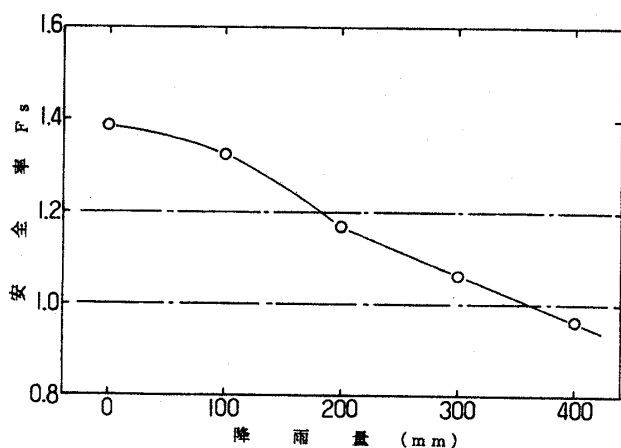


図20 降雨量と安全率の関係

総降雨量100mmと200mmを境に変化しており、これは、図19で示した湿潤前線と地下水面が完全につながった時点、すなわち浸透力の作用方向が鉛直下方からのり尻部に向かう時点と一致していることから説明できる。これより、斜面の安定性には、降雨浸透に伴う湿潤前線の進行と地下水位が大きく関係していると考えられる。

6. まとめ

豪雨時における斜面の安定性を評価するための一つの試みとして現地斜面で降雨浸透特性を捉え、その結果に基づいた浸透流解析と安定解析によって斜面の安定性と降雨の関係について検討を加えた。これより明らかとなった事項を以下にまとめる。

- (1) 雨水の最大浸透深さは、連続降雨量が100mmで2.0～2.5m、連続降雨量が285mmに達すると3.0mを越えており、豪雨時には雨水の浸透がかなり深くまで及ぶと考えられる。
- (2) 斜面表層付近の雨水浸透は、鉛直一次元方程式でよく表現できる。
- (3) 現地での透水係数は室内試験結果より1オーダー大きく見込む必要がある。
- (4) 斜面の安定性には、浸透力とその作用方向が大きく影響することから、これを取り入れた解析が必要である。

参考文献

- 1) 伊勢田哲也ほか：昭和57年長崎豪雨災害の解析及び防災対策に関する研究，長崎大学，pp. 3-8, 1985.
- 2) 川上浩：不飽和土の取り扱いの現状と問題点，土と基礎，Vol. 29, No. 6, pp. 7-11, 1981.
- 3) 西田義親・八木則男・二木幹夫：雨水浸透による地盤発生間隙圧と斜面安定，土木学会論文報告集，第262号，pp. 91-100, 1977.
- 4) Iseda, T., Y. Tanabashi: Mechanism of slope failure during heavy rainfall in Nagasaki, July 1982, Natural Disaster Science, Vol. 8, No. 1, pp. 55-84, 1986.
- 5) 赤井浩一・大西有三・西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp. 87-96, 1982.
- 6) 久楽勝行・三木博史・関一雄：切土のり面内への降雨の浸透と安定性，土研資料，第1805号，pp. 19

- 23, 1982.
- 7) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous media, *Physics*, Vol. 1, pp. 318-333, 1931.
 - 8) Klute, A.: Numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials, *Soil Sci.*, Vol. 73, pp. 105-116, 1952.
 - 9) Philip, J. R.: Theory of infiltration, part 1-7, *Soil Sci.*, Vol. 83-85, 1957.
 - 10) 伊勢田哲也・調修二：不飽和土の間隙圧挙動に関する研究，第24回土質工学研究発表会講演集，pp. 315-316, 1989.
 - 11) Green, D. W., Dabiri, H., Weinaug, C. F., and Prill, R.: Numerical modeling of unsaturated groundwater flow and comparison of the model to a field experiment, *Water Resour. Res.*, pp. 862-874, 1971.
 - 12) 久楽勝行：盛土構造物の崩壊と対策に関する研究，九州大学学位論文，pp. 43-47, 1983.
 - 13) 関口秀雄・柴田徹：盛土基礎地盤の側方流動解析上の問題点，*土と基礎*，Vol. 30, No. 5, pp. 47-54, 1982.
 - 14) 調修二・松雪清人・江崎三郎・山根史郎：地山しらすの透水性について，第5回日本応用地質学会九州支部研究発表会，pp. 13-18, 1988.

(原稿受理 平成2年7月23日
訂正稿受理 平成2年12月25日)