

降雨による斜面崩壊に及ぼす降雨履歴の影響

地盤工学研究室 HENG VUTHA

指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

日本では、毎年、梅雨時や台風シーズンになると地すべりや山崩れが起こり、家や道路、農地、林地が被害を受け人命が失うこともある。近年でも、局地的な集中豪雨による地盤災害や土木構造物への被害が相次ぎ発生している。このような災害を予防するため、斜面崩壊に対する対策が重要である。

降雨時の斜面崩壊は、斜面内の水分量と関係が深いと考えられる。水分量が増加することにより、自重増加によるせん断応力の増大とサクシオン消失によるせん断強度の減少が起こる。このように、斜面の安定性を定量的に評価するためには、斜面内の水分分布を把握する必要がある。また、過去の降雨が斜面崩壊にどのような影響を及ぼすかを検討するために、降雨履歴を受けていない斜面崩壊との違いを比較する必要がある。

本研究では、降雨履歴の影響を調べるため、降雨による斜面崩壊模型試験を行った。崩壊に至るまでの各パラメータの変動と崩壊メカニズムを検討するために降雨浸透による、1)地盤の含水率、2)地下水位、3)地表面変位を計測し、斜面崩壊までの降雨浸透挙動と変形過程の関係を検討した。また、実際に斜面崩壊模型試験で用いた土を使って、含水状態を考慮した一面せん断試験を行い、模型地盤の強度定数を把握した。

2. 地盤作製と試験方法

2.1 地盤作製

模型実験と地盤作製の概要図はFig.2.1に示す。(a)と(b)はそれぞれ表面図と断面図である。模型実験は、斜面長6m、幅1.5m、地盤深0.5m、傾斜30°、すべり面の下は滑らかな層を考慮するため鋼製

となっている。地下水や地盤の変動を観測するため、側面は硬質ガラス製である。斜面先端には仕切り板を設置し、変位を固定している。なお、仕切り板と土槽底板は非排水となっている。

地盤作製方法は次の手順で行う。まず、地下水位を測定するため、間隙水圧計を6ヶ所(P1, P2, P3, P4, P5, P6)設置する。次に、地盤内の変位を観測をするため、ガラス側面に50cmの間隔で2つプラスチックパイプを取り付けて色砂を入れる。その後、プラスチックパイプは取り除く。地盤を垂直に20cmごと作製し、土壌水分計を地表面から10cmに(Vw1 Vw4 Vw7)、25cmに(Vw2 Vw5 Vw8)、40cmに(Vw3 w6 Vw9)を設置する。模型地盤の作製が終了後、地表面変位計として、斜面方向の変位計(D1H, D2H, D3H)と斜面直角方向の変位計(D2V)を取り付ける。続いて、サクシオンを測定するため、テンシオメータ(T1, T2, T3)を横に並べそれぞれ10cm, 25cm, 40cmの深さに埋めた。地中内部変位計を深さ40cm, 25cm, 10cmの位置で地盤中央に設置する。最後に、実験を開始する直前にターゲットと全体のビデオ撮影を開始する。

2.2 試験方法

本研究では過去の降雨履歴の影響を調べるため2つの比較実験を行った。降雨履歴に関する斜面崩壊試験と、降雨履歴無しの斜面崩壊試験である。それぞれの実験による降雨分布をFig.2.2に示す。実験方法として、地盤作製が完成してから1日後、実験を開始した。

(1) 降雨履歴に関する斜面崩壊試験:

降雨履歴に関する斜面崩壊試験については、初めに降雨履歴として15mm/hの雨を降らす。降雨打ち切り時間は斜面が崩壊しないように、地盤内の変動を監視して、終了時間を判断した。地盤の

変動や地下水位が安定するまで待ち、翌日、斜面が崩壊するまで、50mm/hの雨を降らす。

(2)降雨履歴無しの斜面崩壊試験：

降雨履歴無しの斜面崩壊試験については、履歴降雨を与えず、斜面が崩壊するまではじめより50mm/hの雨を降らす。

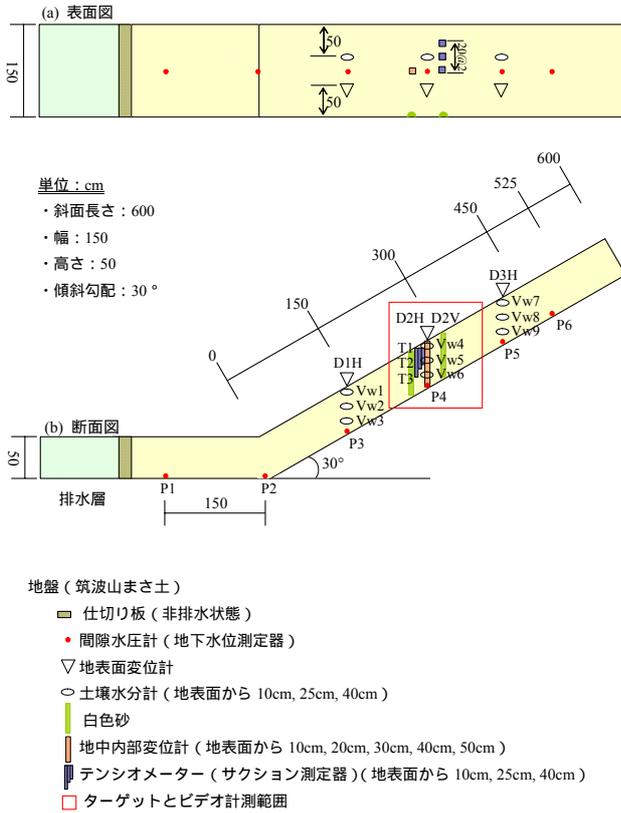


Fig.2.1 模型実験と地盤作製の概要図

(a) 平面図 (b) 断面図

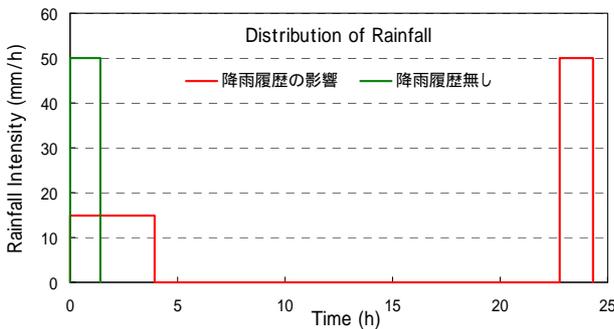


Fig.2.2 降雨分布

3. 土質試験

本研究では筑波山まさ土を使用し、物理試験お

よびせん断試験を行う。せん断試験として、土試料のせん断試験と鉄板と土試料の摩擦試験を行った。

3.1 筑波山まさ土の物性値

Fig.3.1に筑波山まさ土と豊浦砂の粒径加積曲線を示す。筑波山まさ土は豊浦砂と比較して、粒径の分布範囲が広い。最大粒径は10mmであり、細粒分は10%未満である。このように、筑波山まさ土は砂や細かい砂利を多く含んだ砂質試料であることがわかる。また、Table.3.1には筑波山まさ土の物性値を示す。Fig.3.2に筑波山まさ土の水分特性曲線を示す。土の保水性試験より供試体の脱水過程から得られた結果である。筑波山まさ土の空気侵入値 AEV は、サクシオン 3kPa 程度となっている。サクシオン 50kPa の値で豊浦砂と比較してみると、豊浦砂は $S_r=12\%$ に対して筑波山まさ土は $S_r=26\%$ 程度となっており、細粒分が含まれているため、筑波山まさ土は豊浦砂より保水性が高くなっている。

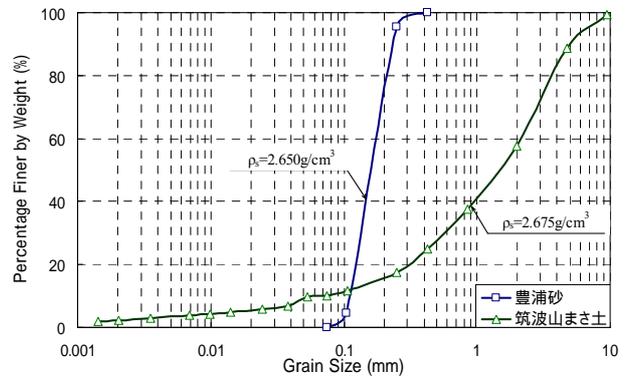


Fig.3.1 筑波山まさ土の粒径加積曲線

Table.3.1 筑波山まさ土の物性値

| | | |
|------|---|----------------------|
| 現場測定 | 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 1.720 |
| | 乾燥密度 ρ_d (g/cm ³) | 1.595 |
| | 含水比 w (%) | 7.3 |
| 室内測定 | 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.675 |
| | 最大密度 $\rho_{d(max)}$ (g/cm ³) | 1.727 |
| | 最小密度 $\rho_{d(min)}$ (g/cm ³) | 1.274 |
| | 透水係数 k (cm/s) | 9.5×10^{-3} |
| | 均等係数 U_c | 22.23 |
| | 曲率係数 U'_c | 2.68 |

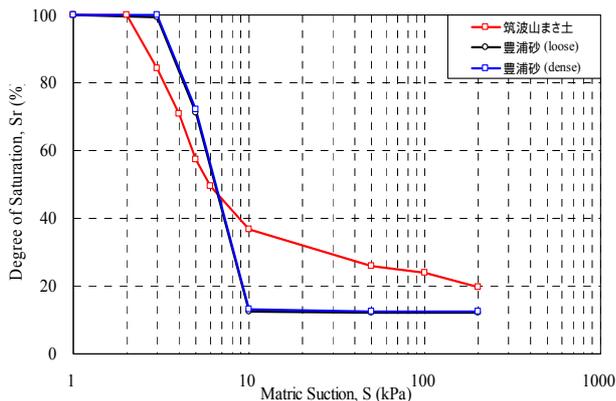


Fig.3.2 筑波山まさ土の水分特性曲線

3.2 せん断試験

本研究では、定圧一面せん断試験を行い、地盤の強度定数を求めることにした。降雨による影響を考慮するため、筑波山まさ土の含水比を変化させた実験を行った。さらに土槽底板の摩擦を把握するため一面せん断試験装置で鉄板と土試料の摩擦試験を行い、強度定数を求めた。

Fig.3.3 は土試料のせん断試験によるせん断強度、Fig.3.4 は鉄板と土試料のせん断試験によるせん断強度である。土試料のせん断試験 Fig.3.3 を見ると含水比が大きいほど粘着力が小さくなるが、鉄板と土試料のせん断試験 Fig.3.4 では含水比の変化による粘着力の違いは小さいことが分かった。また、鉄板と土試料の摩擦試験による粘着力と内部摩擦角は土試料のせん断試験による粘着力と内部摩擦角より小さくなっている。

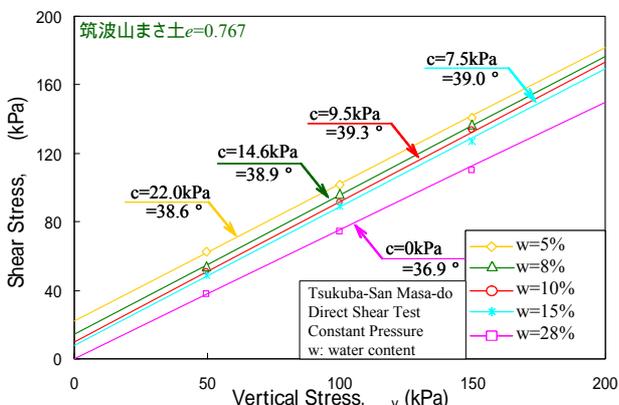


Fig.3.3 土試料のせん断試験によるせん断強度

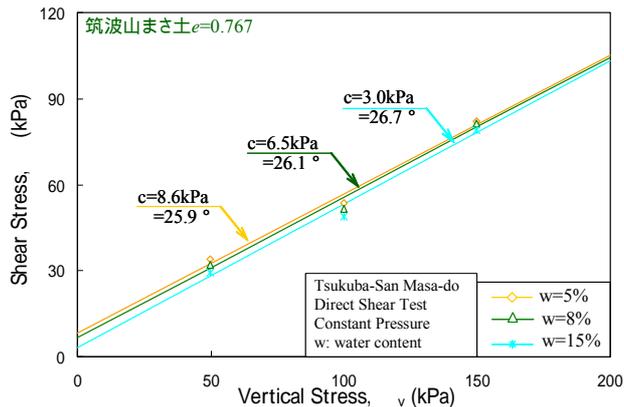
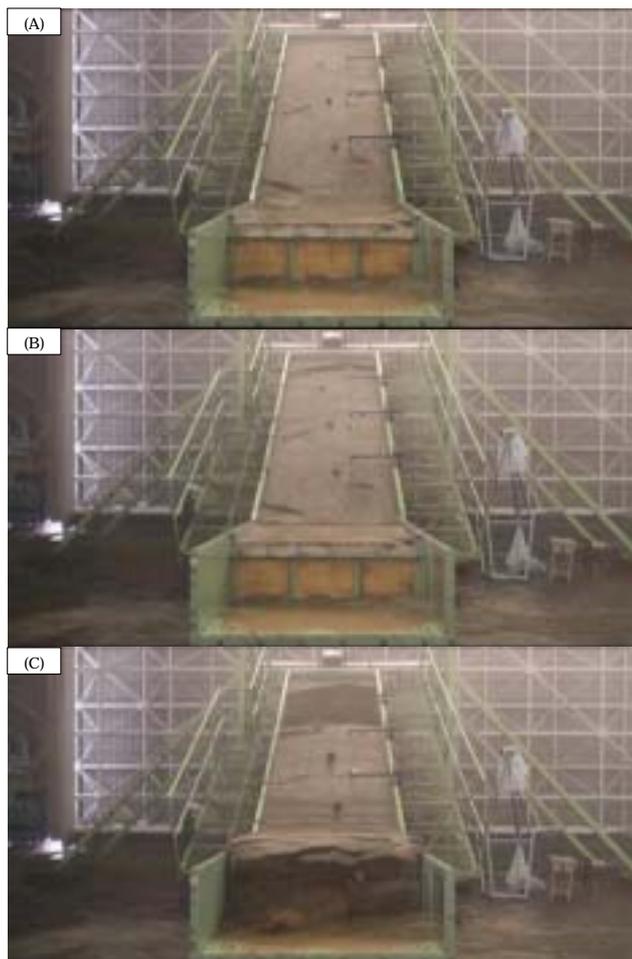


Fig.3.4 鉄板と土試料の摩擦試験によるせん断強度

4. 降雨による斜面崩壊模型試験の結果

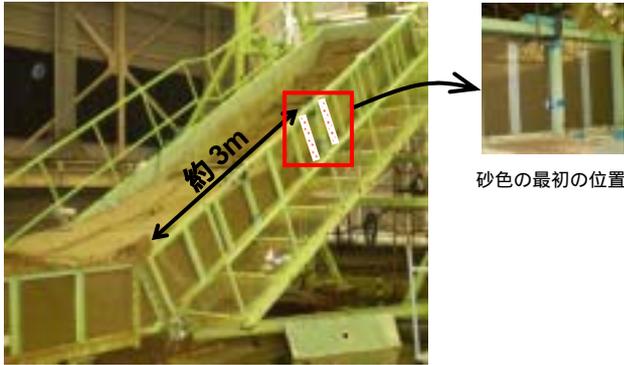
4.1 斜面の崩壊状況

本降雨 50mm/h を降らした時の崩壊状況について Picture4.1 に示す。Picture4.1(A)は崩壊前であり、斜面下が浸食によって一部崩れた。Picture4.1(B)のように崩壊前約数分頃に斜面上



Picture.4.1 斜面崩壊の進行

端部でクラックが発生した。Picture4.1(C)は崩壊時で、斜面の土砂が下方へ移動して平坦部に堆積した。また、崩壊時の白砂色 Picture.4.2 を見てみると、中央部の斜面が約 3m 下方へ移動したのが分かった。その変動量は地表面の付近で最も大きかった。



Picture.4.2 白砂色の変動状況

4.2 降雨履歴による斜面崩壊試験

履歴降雨 15mm/h を 3.5h 降らし、約 19 時間後、地盤の変動と地下水位が安定したのを確認し、本降雨 50mm/h を降らし、92 分後、斜面が崩壊した。

4.2.1 時間と地下水位関係

降雨履歴有りの時間と地下水位関係を Fig.4.1 に示す。降雨を開始してから約 2 時間 30 分後、斜面下付近の P2 と P3 の地下水位が徐々に上昇した。降雨履歴停止後、P1, P4, P5, P6 も上昇した。全体の地下水位について、最も大きく上昇したのは平坦部にある P1 と P2 である。地下水は上端部から下方へ流れており、斜面の地下水位は低く、平坦部では高くなっている。履歴降雨を停止してから数時間後、P3, P4, P5 と P6 の斜面地下水位はすべて下に流れてゼロに戻った。一方、平坦部の P1 と P2 の地下水位は多少減ったが、その後ほぼ一定になった。仕切り板からの水の漏水などが考えられる。

本降雨を開始後、平坦部の P1 と P2 は斜面部より早い時間に上昇する傾向が見られる。P3, P4, P5, P6 を見てみると、本降雨 50mm/h 開始直後、変化はなかったが、本降雨を降らしてから約 68 分後

に上昇した。また、崩壊直前の斜面部の地下水位は 10cm 程度である。

4.2.2 時間と地表面変位関係

履歴降雨有りの時間と地表面変位関係を Fig.4.2 に示す。降雨を開始してから約 3 時間後、

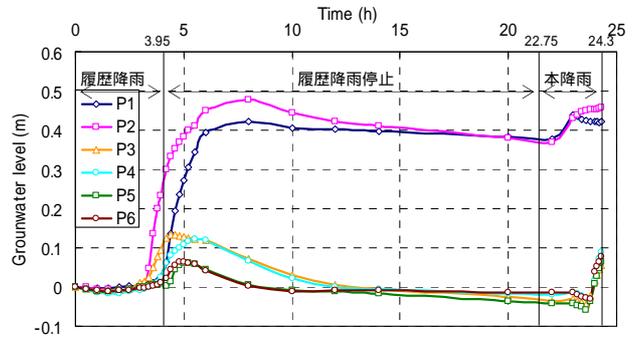


Fig.4.1 降雨履歴有りの時間と地下水位関係

地表面変位が見られた。そこで、D1H, D2H, D3H を見てみると、変位が上昇しており、斜面が徐々に下方へ移動したことがわかる。一方、D2V の場合、変位が低下しており、これは地表面が降雨により沈下したことを示している。降雨停止後約 1 時間（降雨の開始から約 5 時間後）で地表面変位がピークになるが、その後、ほぼ一定値に落ち着いている。

本降雨を開始してから、約 15 分後、D2H で変位が出ており、その後、D3H も徐々に下方へ変位を起こした。D2V の鉛直変位測定では、多少沈下した。斜面が崩壊した直前、D1H, D2H, D3H は激しく上昇しており、下方へ崩れて行ったことがわかる。

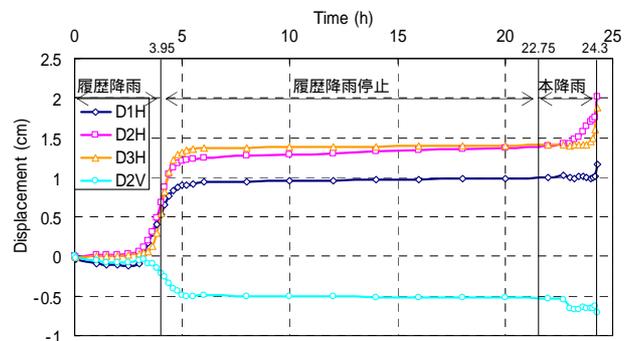


Fig.4.2 降雨履歴有りの時間と地表面変位関係

4.2.3 時間と含水率関係

履歴降雨有りの時間と含水率関係を Fig.4.3 に示す。履歴降雨を開始してから含水率が上昇し、降雨履歴を停止後、地表面から 40cm の Vw6 は含水率の上昇が続いていたが、その他は減少傾向が見られる。含水率が上昇しはじめる時間は、地表面から 10cm に設置した Vw4 が最も早い。

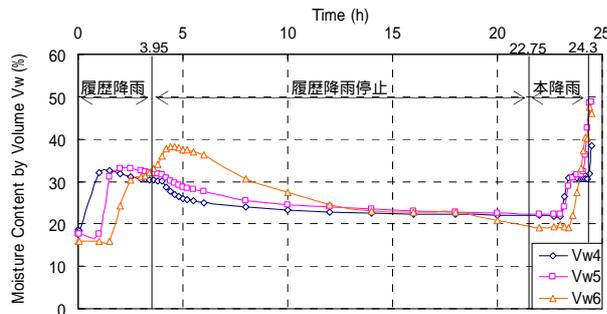


Fig.4.3 履歴降雨有りの時間と含水率関係

本降雨を開始して約 40 分後、含水率が激しく上昇した。また、履歴降雨停止時の含水率と崩壊直前の含水率を比較してみると崩壊直前の含水率のほうが大きい。また崩壊直前には、地中の深い箇所の含水率が大きくなっていることがわかる。

4.3 降雨履歴無しの場合の斜面崩壊試験

4.3.1 時間と地下水位関係

降雨履歴無しの場合の時間と地下水位関係を Fig.4.4 に示す。降雨を開始してからしばらく一定であるが、約 57 分後、平坦部に設置した P1 と P2 の地下水位が徐々に上昇した。そして、降雨を開始してから約 68 分後、斜面に設置した P4、その後、

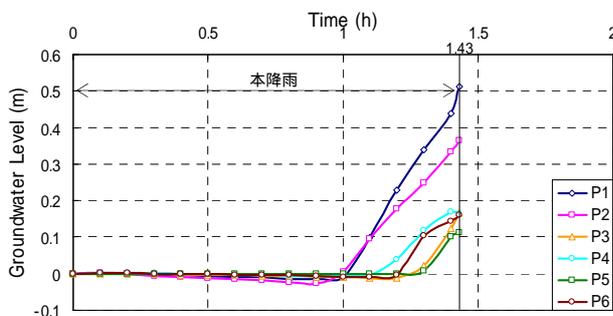


Fig.4.4 降雨履歴無しの場合の時間と地下水位関係

P3, P5, P6 も上昇した。最も大きく上昇したのが平坦部にある P1 と P2 である。地下水は上端部から下方へ流れており、雨水が平坦部に溜まっていたことがわかる。P1 の水位はほぼ 0.5m であり、地下水位は地表面と一致している。また、崩壊直前の斜面の地下水位は 12cm 程度である。

4.3.2 時間と地表面変位関係

時間と地表面変位関係を Fig.4.5 に示す。降雨を開始してから約 1 時間後、中央部にある D2H の変位が始まった。さらに約 5 分後、D1H と D3H の変化も見られる。全体の水平方向変位を見てみると、斜面が徐々に下方へ崩れて行く。一方、鉛直方向の D2V は低下していたため、地表面は徐々に沈下したことがわかる。崩壊直前の地表面変位を見てみると、崩壊の直前に、上端部に設置した D3H の変位量が最も大きく、下端部にある D1H の変位量が最も小さい。

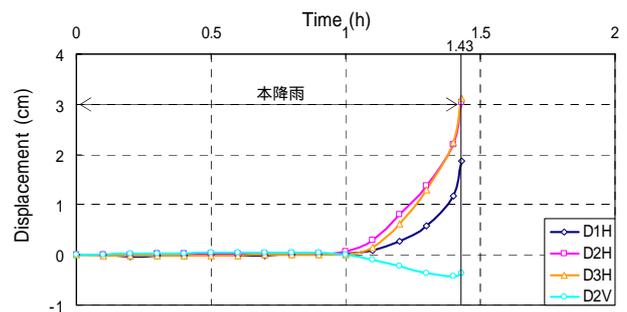


Fig.4.5 降雨履歴無しの場合の時間と地表面変位関係

4.4 経過時間による含水率変化の比較

経過時間による含水率変化の比較を Fig.4.6 に示す。このグラフは斜面中央部に設置した土壌水分計 Vw4, Vw5, Vw6 から算定した結果である。本降雨開始直前の含水比の比較を見てみると、履歴降雨有りの方が履歴降雨無しより含水比が若干大きい。これは、履歴降雨により、本降雨を降らす前に斜面は水分を蓄えた状態であったと考えられる。含水率の変化を見てみると、本降雨を開始してから含水率はしばらく変化しないが、その後、地表面に近い水分計から上昇を始める。これは雨水が浸透してきたためである。含水率が 30%程度

になるとその上昇は止まり，斜面が崩壊する直前には，最も深い位置（地表面より 40cm）に設置されている Vw6 の含水率が上昇している．これは地下水位がそこまで到達したことを示している．斜面が崩壊する直前には，地表面から深いほど含水率が大きくなっているようである．

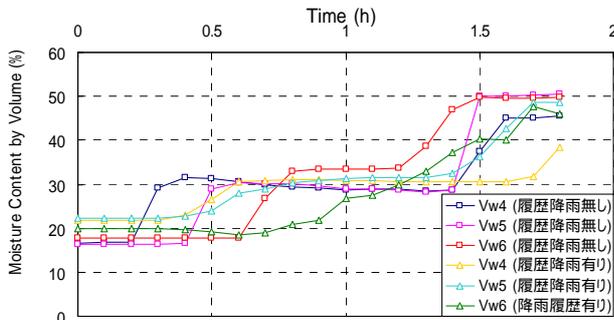


Fig.4.6 降雨履歴無しの場合の時間と含水率関係

4.5 経過時間による地下水位変化の比較

次に，経過時間による地下水位変動の比較を Fig.4.7 に示す．このグラフは P5 の間隙水圧計から算定した結果である．降雨履歴有りの履歴降雨時の地下水位変化，降雨履歴有りで本降雨時の地下水位変化，降雨履歴無しの場合の地下水位変化を示してある．履歴降雨では，開始してから停止するまで地下水はほとんど変化しなかった．降雨履歴有りの本降雨と降雨履歴無しでは，降雨を開始してからしばらく変化がなかったが，その後急激に増加した．降雨履歴有りと降雨履歴無しを比較してみると，降雨履歴有りのほうが地下水位上昇の時間が若干早い．また，崩壊直前の地下水位はほと

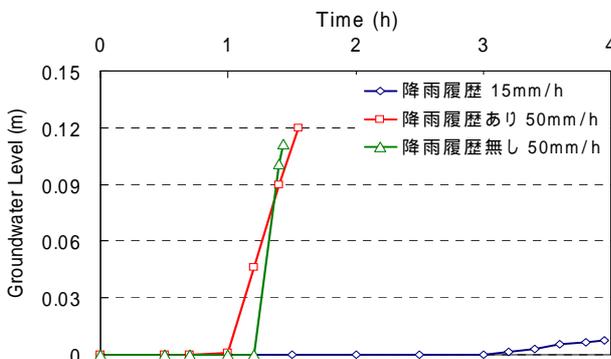


Fig.4.7 経過時間による地下水位変動の比較

んど同じであった．

5. おわりに

本研究では，降雨による斜面崩壊模型試験を行った．また崩壊した斜面の試料（筑波山まさ土）を用いて含水状態を考慮したせん断試験を行い，不飽和斜面の強度特性を調べた．

本研究で得られた知見を以下に示す．

- 1) 降雨により地盤の含水比が増加することにより引き起こされる強度低下のみでは斜面崩壊は起こらず，斜面内の地下水位が 10cm 程度上昇して崩壊が起こった．
- 2) 降雨により，斜面内の地下水位が上昇し，斜面の変位が加速され，崩壊に至った．また，降雨強度が大きいほど地下水位の上昇が早くなるため，早い時間で崩壊した．
- 3) 履歴降雨により地盤の含水比が若干大きくなり，平坦部には地下水位が残った．
- 4) 今回作成した斜面においては，崩壊時間に及ばず履歴降雨の影響はみられなかったが，履歴降雨の方が斜面内の地下水位の上昇が早いいため，早い時間で崩壊危険性が高くなっている．その理由の1つとして，平坦部の地下水位が関係していると考えられる．
- 5) 一面せん断試験より，使用した筑波山まさ土は，含水比が大きいほど粘着力が小さくなるが，内部摩擦角はほぼ一定であった．また，鉄板と土試料の摩擦試験による粘着力と内部摩擦角は，土試料のそれらより小さい．

以上の結果より，地下水位が斜面崩壊に大きな影響を与えることが明らかとなった．降雨により斜面内の地下水位が上昇したとき，斜面崩壊の危険性が高くなる．今後，斜面崩壊を防止するため，斜面下の排水条件の影響について実験を行い，斜面安定化工法の提案を行う予定である．