

丘陵地の崩壊地形とその水文環境

丸井 敦尚 (立正大学)
Atsunao MARUI

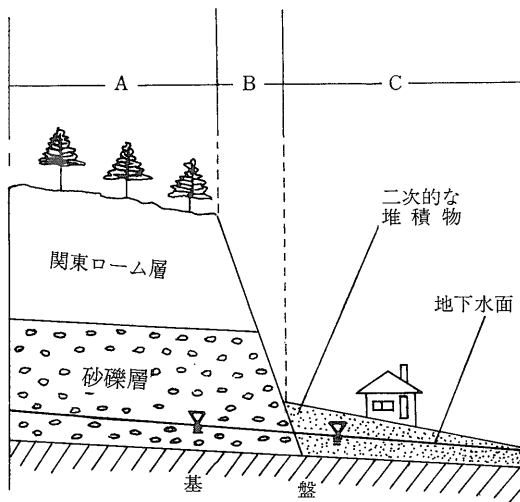


図1 多摩丘陵の模式図。 A: 上位平坦面 B: 急斜面
C: 下位平坦面

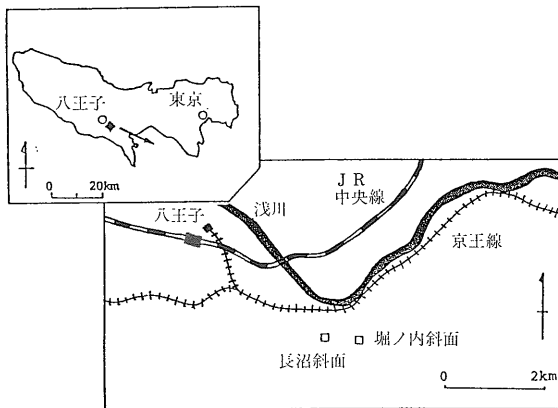


図2 研究斜面の位置図

1. はじめに

多摩丘陵を始めとする関東地方のほとんどの丘陵地や台地は頂部が関東ローム層が覆われ、同層の直下には一般に粗粒な砂礫層が分布する(増田 1971)。これを模式的に示すと図1の様になる。本報では傾斜の大小に

かかわらず(急崖やなだらかな斜面を全て含み) 図1のBの部分に単に斜面と呼ぶことにする。多摩丘陵や大宮台地など関東ローム層の堆積する丘陵地や台地のこのような斜面においては、同層の直下の砂礫層の中に地下水体が存在する(田村 1984)。また、関東ローム層だけが露出している場合よりも、同層とその下位の砂礫層の両方が露出し、いわゆる“二重構造”を呈する斜面のほうが崖崩れが起こり易い(岡ほか 1969)。このことは急斜面の部分にまで宅地造成が進み、二重構造が多くの斜面において見られる関東地方のほとんどの丘陵地や台地における今日の状況を考えれば、防災上極めて重要な問題であると言えよう。

二重構造を有する斜面において、関東ローム層にもたらされた降水がどのようにして砂礫層に浸透してゆくか換言するならば、斜面における水文現象に及ぼす関東ローム層の役割を評価することは防災上不可欠なものと考えられる。本報では多摩丘陵内において、自然のままに残され、かつ地質が異なる二つの斜面を選定し、両斜面の水文学的・微地形学的な比較研究を通じて、斜面の内部での地中水(注1)の挙動を明らかにし、崖崩れに対する関東ローム層の果たす役割を評価した結果について報告する。

2. 斜面の概要

崖崩れに果たす関東ローム層の役割を評価するために、最上位に同層が堆積した斜面と同層の存在しない斜面の二つを選定し(図2) 地形および地質に関する比較対照を行った。そのひとつ、関東ローム層を有する前者(以後、堀ノ内斜面と呼ぶ)は、東京農工大学波丘地利用実験実習施設内にあり(図10参照) これまでに多くの水文地質調査が行われている(Marui 1984, 1986 など)。寿円(1958)によると、堀ノ内斜面付近の地質は下位より連光寺互層、御殿峠礫層の順で堆積しており、最上位に

注1 地下水とは、地下水面よりも下(位置エネルギーが小さい所)に存在する土壌中の水をさす。これに対し土壌水とは、地表と地下水面の間に存在する水をさす。また、地下水と土壌水を合わせて地中水と呼ぶ。



図3 崩壊地の様子 斜めになった樹木からもその様子がうかがえる。

は最大厚8mの関東ローム層が存在する。御殿峠礫層の最大厚は17mであり 無降雨時でも厚さ5m程度の地下水体が観測されている (Marui 1986)。連光寺互層の透水性は後述する様にきわめて悪いため 本流域の水文学的基盤として取り扱った。すなわち 本斜面は多摩丘陵内ではしばしばみうけられる前述の二重構造を呈する (御殿峠礫層と関東ローム層で構成される) 斜面である。また堀ノ内斜面付近における崖崩れは、砂礫層と同標高に集中する場合が多い。図3には 典型的な多摩丘陵谷頭部における崖崩れの様子を示した。

これに対し後者 (以後 長沼斜面と呼ぶ) の地質は 御殿峠礫層以下の部分が堀ノ内斜面と同様であるが 最上位に 関東ローム層が存在しない点が大きく異なっている。すなわち 長沼斜面は砂礫層のみから形成される “均質な斜面” である (図11参照)。本斜面は関東ローム層堆積後の侵食の結果 関東ローム層が欠如したものと考えられる。この様に 二つの斜面の地質は大きく異なる。

3. 研究方法

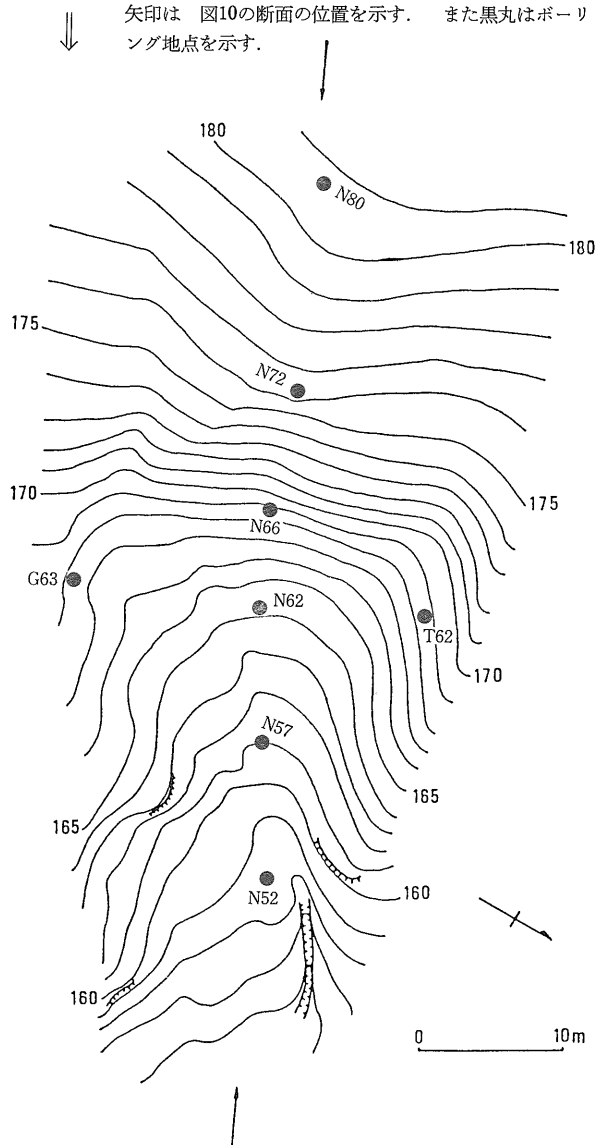
堀ノ内斜面および長沼斜面において 地形および地質調査を行った。地形調査は 斜面全体の形態や崖崩れの位置を確定することを目的とした一般的な地形調査と降雨時の地表流発生時の形跡の確認を目的とした微地形調査に分かれる。地質調査は 地形との関連に重点をおいて実施した。これらの調査の結果をもとに 斜面の要所から土壌サンプルを採取し その物理的な特性を測定した。以下に 各調査項目とその方法を記す。

地形測量

地形を正確に把握するために トランシット・スタジア測量およびレベル測量を実施した。両斜面に 測量

図4 堀ノ内斜面の地形図 数字は標高 (m) を示す。

矢印は 図10の断面の位置を示す。また黒丸はボーリング地点を示す。



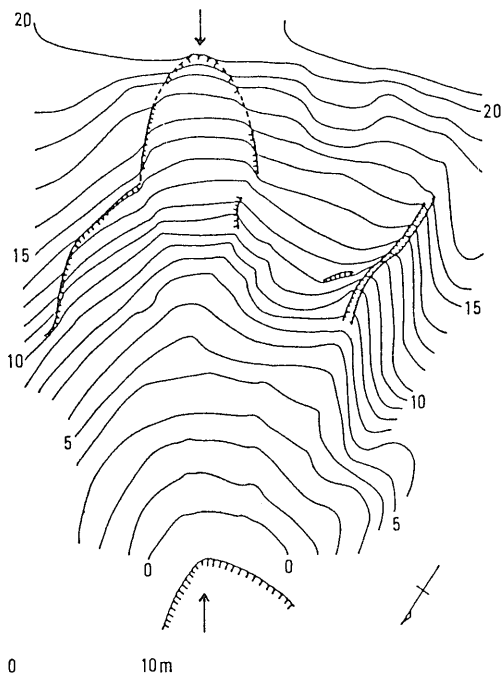


図5 長沼斜面の地形図。 数字 矢印はそれぞれ基準点からの高度 (m) 及び 図11の断面の位置を示す。

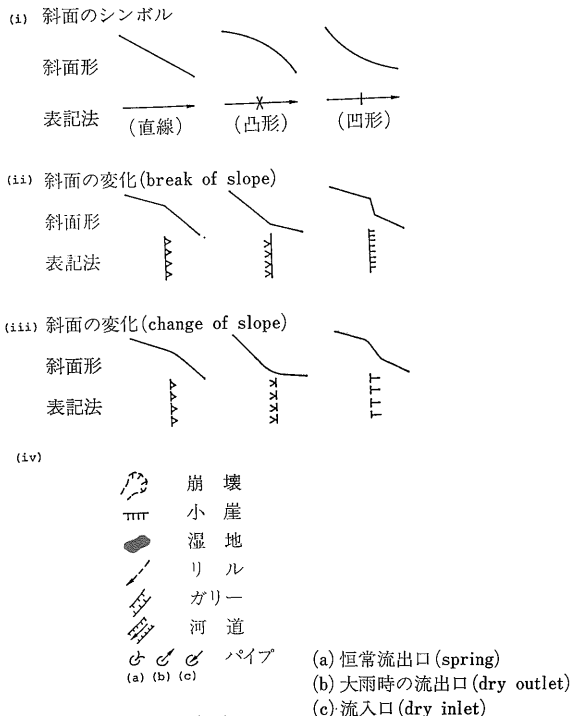


図6 微地形図の記号

用のくい (ペンキを塗り 数字を記した 40cm 程度の長さの角材; 以下 指標ぐいと呼ぶ) を 2 m ないし 4 m ごとに埋設し これを基準に測量を実施した。この測量に基づいて作成した地形図を図4 5 に示す。指標ぐいは後に示す斜面傾斜の測定地点 (図7 8) に埋設した。

斜面傾斜

指標ぐいの埋設地点において 傾斜測定器を用いて斜面の最大傾斜角度とその方向を測定した。これらの計測は 地形図の作成時にその精度を上げるのに役立つほか 地表流が発生したときの流下方向を決定するのにも有効である。

微地形調査

斜面上のガリーや小崖等の微地形を綿密に調査することは 崖崩れの前兆となることが多いと考えられている地表流発生履歴を知る上で重要である。微地形のマッピングに際し 各微地形要素の分類や表記法などは Savigear (1965) Tamura (1969) 田村 (1974) Brunson et al. (1975) Gardiner and Dackombe (1983) に基づいて行った。本研究で用いたマッピングの記号を図6 に示す。また 斜面傾斜の測定結果及び微地形調査の結果を 図7 8 に示す。

ボーリング調査及びサンプリング

両斜面において ボーリングによる地質調査及び 100 cc の土壌コアサンプルの採取を実施した。各調査地点において 先ずハンドオーガーによって任意の深度までボーリングを行い 同時に地質を観察した。続けてボーリング孔内に土壌サンプラーを挿入して土壌のサンプルを採取した。採取したサンプルは実験室に持ち帰り透水性 粒径を測定した。堀ノ内斜面における本調査の結果を図9 および表1 に示す。コアサンプルを採取出来なかった御殿峠礫層および連光寺互層の透水性はそれぞれ注入試験法および Yasuhara et al. (1985) の方法により測定した。注入試験は図4 に示すN80地点において実施し またブロックサンプルはN52地点の東側の斜面において採取した。この結果 御殿峠礫層および連光寺互層の透水係数はそれぞれ 1.56×10^{-8} cm/s および 2.24×10^{-6} cm/s であり 後者の透水性が著しく悪いことが判明した。

貫入試験

ボーリング調査実施地点において簡易貫入試験を行ったところ 両斜面を構成する地層 (関東ローム層 御殿峠礫層 連光寺互層) はそれぞれ固有のN値 (打撃回数) を有することが判明した。そこで 両斜面において貫入試

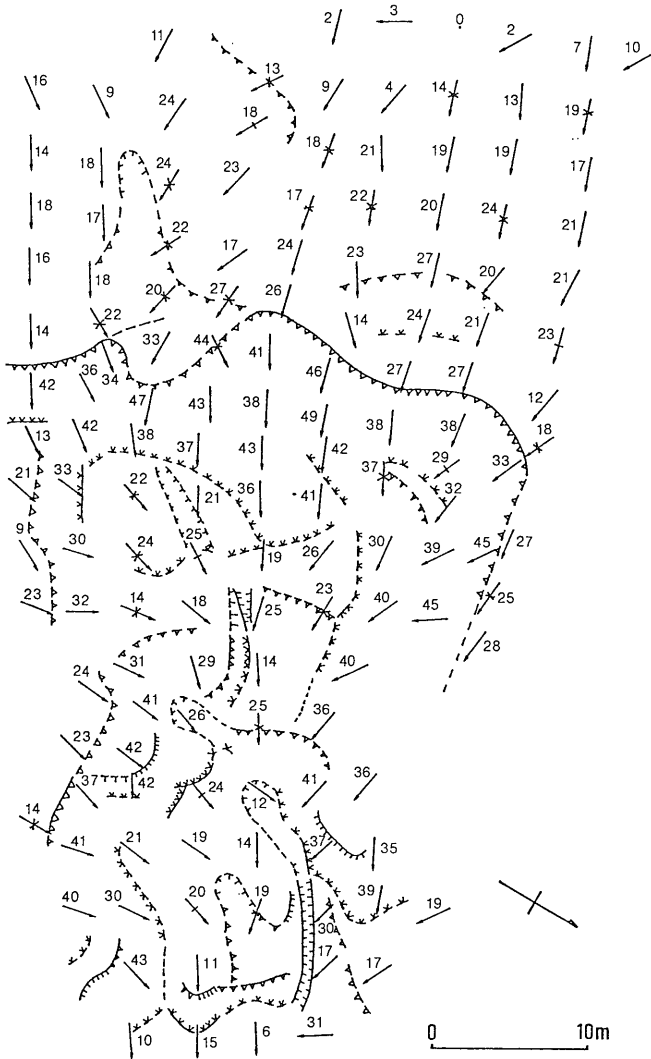


図7 堀ノ内斜面における微地形調査の結果。数字は斜面の（傾斜）度を表す。

表1 堀ノ内斜面における透水試験の結果。サンプリング地点及び深度は図4、9に示した。

単位 ; cm/s

| サンプリング地点 サンプル番号 | N80 | N72 | N66 | N62 | N52 | G63 | T62 |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2.04×10^{-4} | 8.81×10^{-5} | 3.27×10^{-5} | 9.50×10^{-4} | 6.93×10^{-4} | 5.64×10^{-3} | 3.44×10^{-3} |
| 2 | 2.05×10^{-3} | 5.45×10^{-4} | 1.71×10^{-7} | 2.71×10^{-4} | 3.25×10^{-5} | 2.04×10^{-3} | 3.14×10^{-3} |
| 3 | 8.07×10^{-6} | 2.02×10^{-4} | 2.39×10^{-3} | 4.42×10^{-3} | 8.69×10^{-5} | 2.95×10^{-7} | |
| 4 | 5.09×10^{-4} | 1.87×10^{-4} | | 1.82×10^{-4} | 7.11×10^{-7} | | |
| 5 | 5.99×10^{-5} | 2.61×10^{-3} | | 1.96×10^{-3} | | | |
| 6 | 6.12×10^{-4} | 5.29×10^{-3} | | 1.39×10^{-3} | | | |
| 7 | | | | 3.38×10^{-3} | | | |
| 8 | | | | 1.25×10^{-3} | | | |
| 9 | | | | 6.31×10^{-3} | | | |

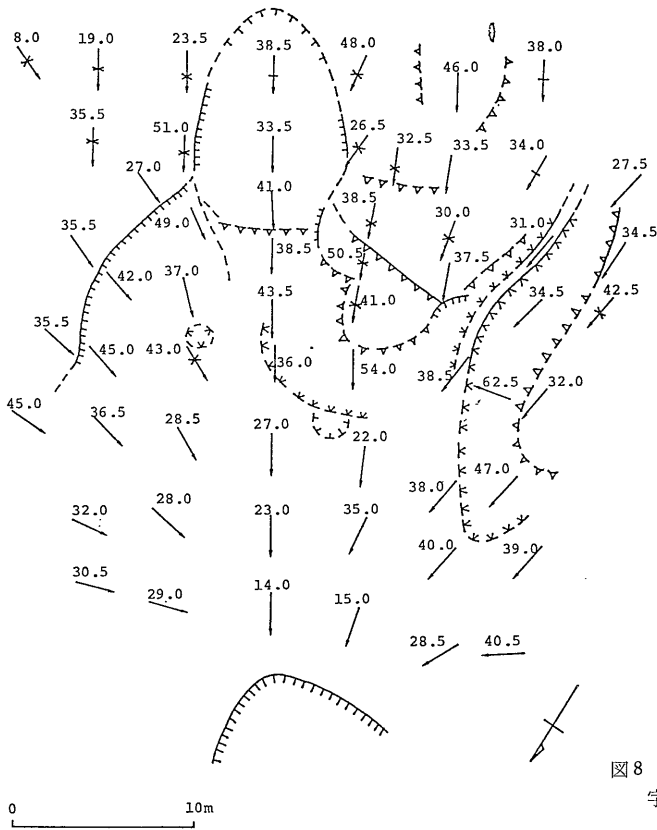


図8 長沼斜面における微地形調査の結果. 数字は斜面の傾斜(度)を表わす.

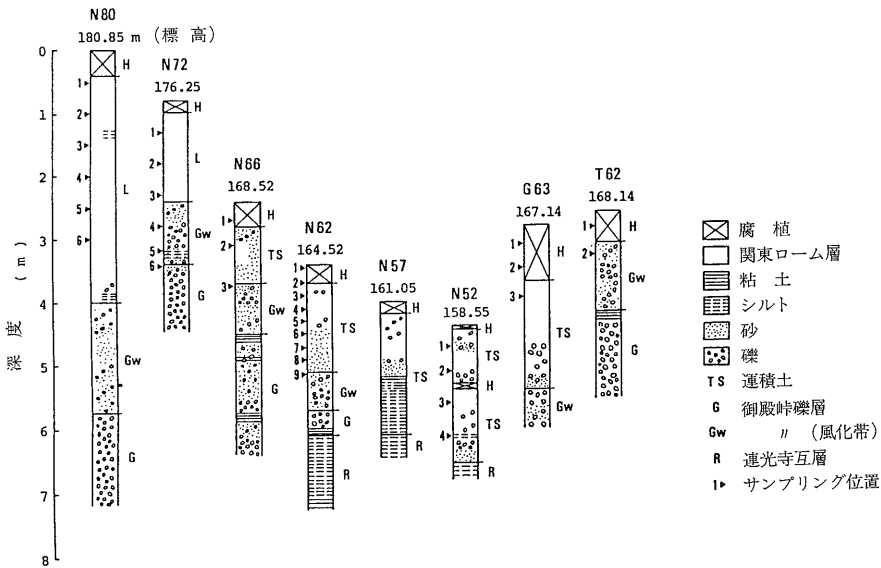


図9 堀ノ内斜面におけるボーリング試験の結果. 各地点の各深度から採取したサンプルによる透水試験の結果は表1に示す. 尚ボーリングの地点は図4に示した.

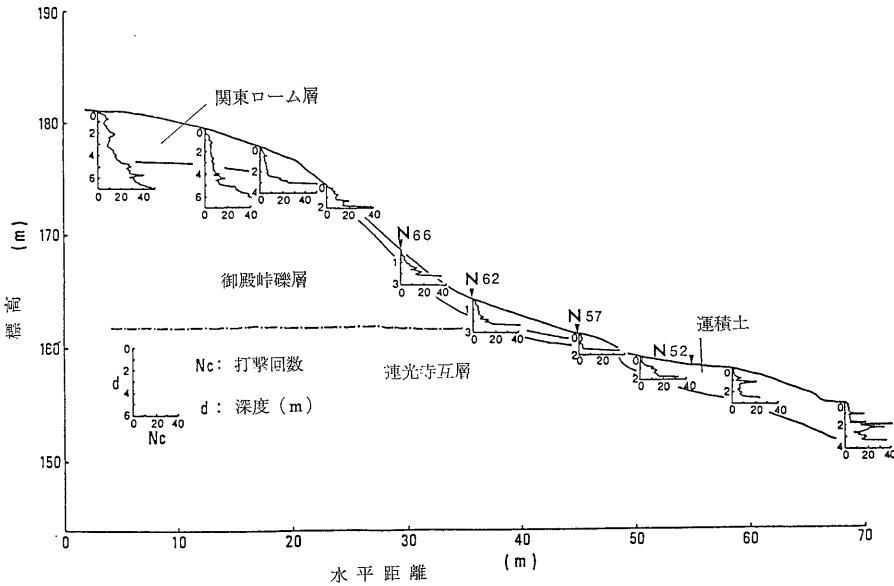


図10 堀ノ内斜面の地質断面図。位置は図4に示した。

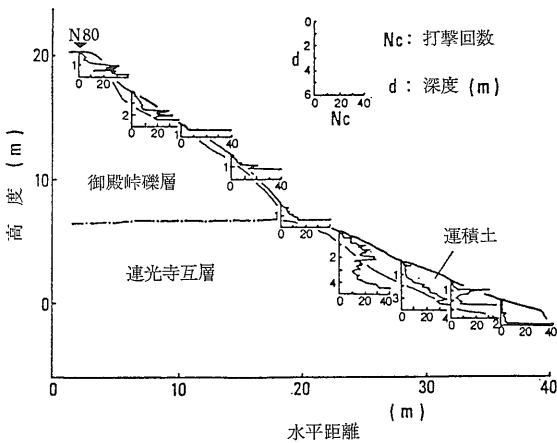


図11 長沼斜面の地質断面図。位置は図5に示した。

験を実施し 表層部の地質の把握を試みた。

この結果明らかになった両斜面の地質断面を図10 11に示す。なお 断面の位置は 図4 5に矢印で示した。また 斜面深部の地質については 寿円(1958)に基づいて推定した。

以上の調査結果から 両斜面における微地形と地質並びに水文環境との関係は以下の様に明らかとなった。

(i) 急斜面の部分は 標高的にみて 粗粒な御殿峠礫層の堆積しているゾーンに相当する。また緩斜面の部分は関東ローム層や連光寺互層の様な比較的細粒な物質で構成されている。両斜面とも透水性の極めて悪い連光

寺互層が水文学的な基盤として存在している。さらに谷底部には斜面の上流側より供給されたと考えられる運積土が二次的に堆積している。

(ii) 地表流の流路については 急斜面の部分では河岸の高さが 20 cm 以下の比較的浅い複数の河道(リル)が存在していたのに対し 下流側の緩斜面部分になると河道(ガリー)は一つにまとまり しかもその河岸の高さが 70—80 cm と大きくなる。また 堀ノ内斜面においては大雨時の観測から 地表流はパイプ流として発生する(注2)ことが確認されている。

(iii) 急斜面の部分では崖崩れ(崩壊)が発生している。両斜面とも崖崩れの上限と下限がそれぞれ御殿峠礫層の上限および下限と一致していることが特記すべき点である。崖崩れの規模は両斜面ともほぼ等しいが 図7 8を比較すると 関東ローム層の存在する堀ノ内斜面の方が崖崩れが頻発し より複雑な地形を呈している。両斜面を調査した結果 関東ローム層が存在すると崖崩れが起こり易くなると考えられる。

4. 斜面内部での水の挙動について

はじめに 関東ローム層の欠如している長沼流域を例に挙げ 崖崩れと深い関係を有する地中水および地表水

注2 大雨時に地表流が発生する際 地表面にできた小穴から地下水が流出する現象をさす。パイプの大きさは地域によって異なるが 堀ノ内斜面の場合 直径 2-3cm 程度のものが数多く観察できた。

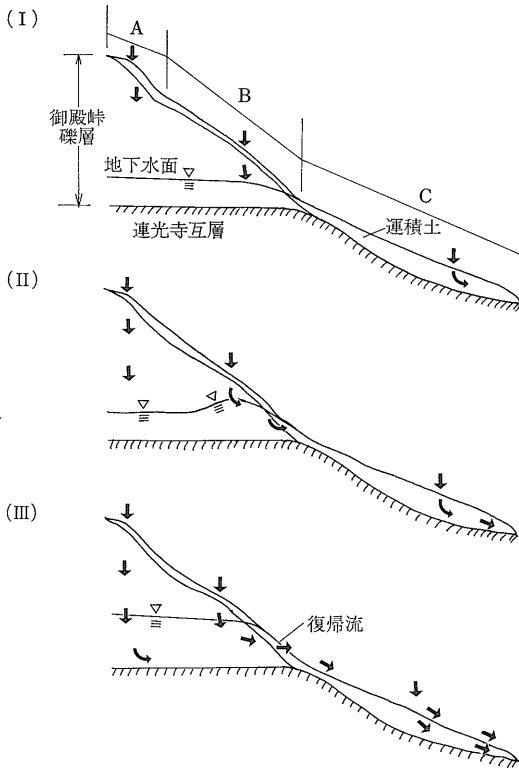


図12 長沼斜面における降雨中の地下水の挙動。 矢印は地中水の流動の方向を示す。

の挙動について考える。

図12は長沼斜面における 降雨中の水の挙動を示した模式図である。 この模式図における三つの段階は 水文現象の変化に対応しており (I)降雨初期 (II)地下水位変動期 (III)流出期を表している。 ここでは斜面を最上流部(A) 急斜面部(B) 谷底部(C)に分割し 各部位における地中水の挙動について述べる。

最上流部(A)にもたらされた降水は御殿峠礫層の中へ浸透してゆく。 この部分では 鉛直下方への浸透が卓越している。 しかも台風程度の大雨では 浸透能(水を吸い込むことのできる限界)を上回る降水に伴うホートン流(Hortonian overland flow)といわれる地表流は発生せず 降水は全て地中へ浸透してゆく(注3)。 御殿峠礫層の中に浸透した降水は土壌水となり 不飽和帯の中を鉛直下方に降下してゆく。 これがいずれ地下水面に達すると 斜面下流側へ向かう地下水流となる。

地表面から地下水面までの土層の厚さが小さく 地下水への水分供給が比較的起り易い部分(地下水面の変動が比較的起り易い急斜面部; B)においては 土壌水が地下水面に達すると 局部的に地下水面が上昇するため 地下水面の勾配(動水勾配)が大きくなる(地下水位変動期)。

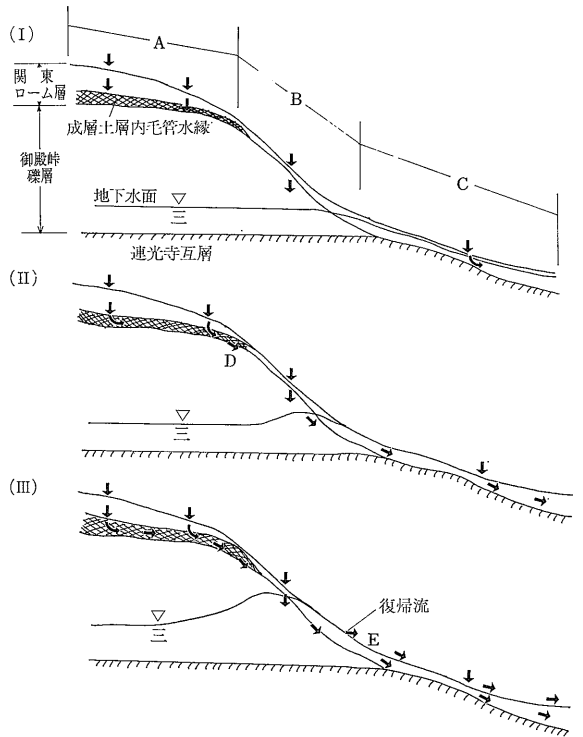


図13 堀ノ内斜面における降雨中の地下水の挙動。 矢印は地中水の流動の方向を示す。

したがって 地下水の流動量も大きくなる。 この部分では 不飽和体中の土壌水が鉛直下方に移動していたのに対し 地下水および地下水面直上の飽和体(飽和毛管水縁)中の土壌水は 斜面下流方向に斜面に沿って流下するものと考えられる(Marui (1984))。 またその流速もAの部分のそれよりはるかに大きい。

ところが御殿峠礫層の下位には 連光寺互層が存在するため 地下水は容易に連光寺互層の中へ浸透してゆることが出来ない。 したがって 下流側(谷底部)に向かった地下水は表層の二次堆積物(運積土)中を流下するものと考えられる(Cの部分)。 しかしこの薄い二次堆積物の中を流下できる地下水の量にも限界があるため 土層中を流下できない余分の地下水は復帰流(Return flow)として地表に出現する(流出期)。 このため 大雨時には御殿峠礫層と連光寺互層の境界面から大量に地下水が流出することになり 斜面基部には降雨中に一時

注3 1980-85年の間堀ノ内斜面において水文観測を行った丸井(1982) Marui(1984 1986)によれば 観測期間中ホートン流を確認したのはたった一度(雷雨)だけであり しかもその発生域は斜面基部とその周辺に限られていた。

的な河道が形成される。この結果 斜面において最も崖崩れが発生し易いのは 御殿峠礫層の部分 (Bの部分) と考えられる。以上のように 現在の斜面の地形 (御殿峠礫層に相当する部分が急傾斜になり 連光寺互層に相当する部分が緩傾斜になる) は 透水性に富みかつ保水性に欠けるルーズな御殿峠礫層の物理性を大いに反映しているといえる。

一方 堀ノ内斜面は最上流部(A)に関東ローム層が堆積しているために地中水の流動が異なる (図13)。図中の三つの段階は図12と同様である。降雨初期において降水は関東ローム層の中に貯留される。関東ローム層の平均的な間隙の大きさは 御殿峠礫層のそれよりもはるかに小さいため 毛管力により 関東ローム層の下部に飽和帯が形成される (網の付いている部分)。これを Rode (1969) は成層土層内毛管水縁 (Capillary Supported Suspended Water) と呼んだ。この水は毛管力によって保持されているため 力のバランスを崩し易い。降水が加わることにより水の力学的な平衡が崩れ この地中水は容易に移動を開始する。通常 関東ローム層は若干の傾斜をもって堆積しているため 横方向に流動を開始した成層土層内毛管水縁の中の地中水は斜面下流側に集中する。したがって ある程度降雨が継続すると 関東ローム層堆積域(A)にもたらされた降水は急斜面の上部 (図中Dの地点) に集中し 御殿峠礫層に供給されることになる (Marui 1986)。このため 等しい量の降雨がもたらされても崖崩れの頻発域 (急斜面の表層部) を通過する水の量は堀ノ内斜面の方が圧倒的に大きい。

したがって 大雨の場合には 関東ローム層がその雨が降る以前に貯留していた土壌水分 (pre-event water) を下位層へ流出させるため より速やかに大量の地表流が発生する (図中Eの地点)。ただし 成層土層内毛管水縁内の地中水を移動させるのに十分な降水がもたらされない場合には 関東ローム層はこの降水を貯留してしまう。このため 大雨時のみ崖崩れの発生が容易になると考えられる。崖崩れが発生した部分の上限が御殿峠礫層の上限 (関東ローム層の下限) と一致していることはこのことから説明でき 関東ローム層の存在が大雨時の崖崩れには好条件となることが理解できる。

5. まとめ

多摩丘陵においては二つの細粒物質層 (関東ローム層 連光寺互層) に挟まれたルーズな 御殿峠礫層が急斜面を呈する。力学的にみて この急斜面は最も不安定である。水文学的にみて 御殿峠礫層は透水性に優れるが保水性に欠ける (つつぬけの) 層である。さらに 関東ローム層も大雨時には御殿峠礫層への差別的な水分供

給を行う。このため 丘陵地の斜面では 御殿峠礫層のレベルに崖崩れが集中すると考えられる。すなわち 関東ローム層の存在は崖崩れには好条件と言える。

本研究で対象とした堀ノ内斜面では 関東ローム層を欠く長沼斜面に比べ 地形・地質・水文環境のすべてが御殿峠礫層の堆積している部分において崖崩れを起こし易くするように作用し合っている。崖崩れの頻発した複雑な地形を堀ノ内斜面が呈しているのはこのためである。

上下に位置する地層の物理性の相違によっては 同じ地層でもその内部で発生する水文現象が大きく異なる可能性が高い。今後は 各層固有の物理性を評価するだけでなく 地層の堆積状況に基づいた各地層間の水文学的な相互作用を評価することも重要になる。

参考文献

- 岡 重文 桂島 茂 清水道也 (1969): ローム台地の崖くずれ 一川崎市の場合一。地質ニュース 176 19-26。
- 寿円晋吾 (1958): 多摩丘陵の地形と地質。東京農工大学農学部波丘地農業研究所報 1 27-45。
- 田村順子 (1984): 洪積台地の侵食谷地形 一南関東下末吉面を中心として一。お茶の水地理 25 39-44。
- 田村俊和 (1974): 谷頭部の微地形構成。東北地理 26-4 189-199。
- 増田富士雄 (1971): 多摩丘陵の地質について。地質学雑誌 77-3 153-164。
- 丸井教尚 (1982): 森林小流域における降雨時の地下水流出。筑波大学卒業論文 64 p。
- Brunsdon, D., Doornkamp, J. C., Fookes, P. G., Jones, D. K. C. and Kelly, J. M. H. (1975): Geomorphological mapping in highway engineering. Jour. Inst. Highway Engineers, 22-12, 35-41。
- Gardiner, V. and Dackombe, R. (1983): Geomorphological field manual. George Allen and Unwin, London, 254 p。
- Marui, A. (1984): Study on soil erosion in a small forested basin. Master of Science Thesis, Univ. Tsukuba, 65 p。
- Marui, A. (1986): Subsurface water storage and runoff processes in a layered hillslope. Doctor of Science Thesis, Univ. Tsukuba, 81 p。
- Savigear, R. A. G. (1965): A technique of morphological mapping. Assoc. Amer., 55。
- Yasuhara, M. Suzuki, Y. Yasuie, S Marui, A. and Takayama, S. (1985): Determination of hydraulic conductivity of undisturbed soil samples. Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, 11, 19-23。