

孔内水位シミュレーションからみた山腹崩壊発生について

Mountain Slope Failures studied by Simulating Water Level in Boring Hole

神戸大学工学部 正会員 沖 村 孝

1. はじめに

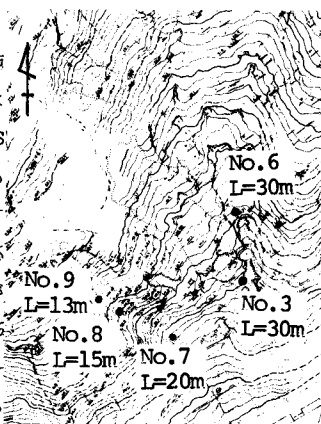
山腹崩壊は地震時を除いてそのほとんどが豪雨時に発生している。このため雨水によるせん断強度パラメータの低下により崩壊原因を考察する研究¹⁾他に、降雨量そのものと崩壊発生との関係を求める考察も行なわれている。これらの成果のうち主なものは、田中の降雨特性、打萩の日雨量と総降雨量の関係、瀬尾らの⁴⁾10分間雨量、奥田の降雨パルス、池谷の降雨強度比などの考察があるが、これらはいずれも雨の降り方の変化に着目していることは興味深い。しかしながらこれらの研究は崩壊の直接の原因となった降雨のみを対象とすることが多く、崩壊発生原因にとっては重要な先行条件にあまり注意が払われず、また雨の降り方の変化による土中水の挙動も不明である。この原因は自然斜面での調査・観測資料の不足にあると考えられ、このため研究者らは⁷⁾山地地下水の降雨に対する挙動を明らかにするため孔内水位の観測を開始し、長期のデータを得た。このデータを使用してシミュレーションモデルを作成し良好な結果を得ることができたため、このモデルが本試験地の地下水条件を表わすものと仮定して、過去本試験地で発生した崩壊と降雨との関係を孔内水位をパラメータとして考察した。

2. 調査地の概要

観測地は神戸市灘区青谷地区である。本試験地は六甲山系の南斜面に位置し奥行約200m、幅約90mのはぼ矩形の流域で集水面積は約2ha強、比高は約150mである。試験地南縁には諏訪山断層が、北側には布引断層が存在し、試験地はこれら北東-南西方向の走向をもつ2本のほぼ平行な大断層の間に位置する小谷である。本試験地の概要についてはすでに別の機会で発表済⁷⁾であるのでここでは省略する。

3. 観測結果および水位変動特性

本試験地内には科学研究費自然災害特別研究(1)(代表田中茂)により実施された鉛直ボーリング7本、傾斜ボーリング2本が存在しており、図-1は孔内水位観測を行っているボーリングの位置を示している。観測は中浅式TS-72型自記地下水位計を用い、昭和49年より開始し、現在も継続中である。昭和50年5月より昭和53年4月までの水位観測結果を図-2に示す。この図より本試験地における孔内水位変動の特徴としては、(1)降雨との対応がよいこと、(2)水位の上昇は急速でしかもその上昇量のかなり大きなものが認められる、ことなどであろう。この傾向は特にNo.3において著るしい。No.6もやはりこれらの特徴がみられる。ただし、ピーク値付近ではNo.6のピークはNo.3に比して幾分なめらかになっている。No.7は前2孔に比較してさらに上昇速度および上昇量とも小さくなっている。No.8は雨の多い梅雨期のみ図-1 水位観測位置図



に水位が出現している。No.9は豪雨時のみに水位が現われている。以下においては測定期間の長い(昭和48年より開始)No.3孔の孔内水位記録についてのみ考察を進める。本孔の上昇特性、下降特性については、やはり別の機会で考察を行っている⁸⁾ため重複を避けるが、これらの特性からみた本孔の地下水は岩の「ワレ」を通る水みちから供給され、水位はいくつかの水みちの合成された水頭を示しているようである。元来、六甲山系における地下水は「裂か水」の形で存在している⁹⁾と言われているが、本孔の特徴はそれを裏づけているようである。

4. モデルの作成

本研究では、図-2に示したNo.3孔の水位を再現させるモデルとしてタンクモデルを使用した。タンクモ

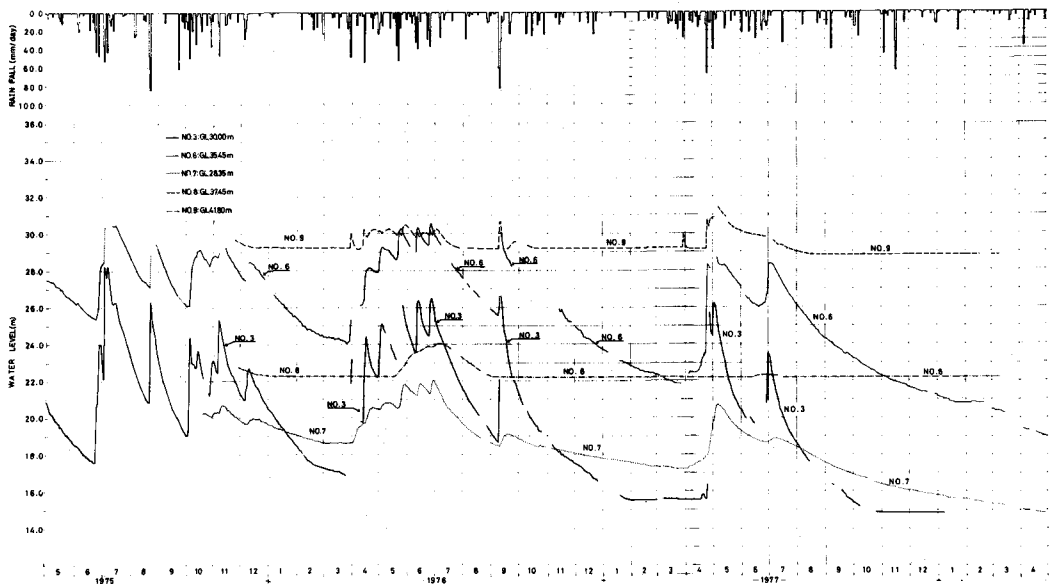


図-2 孔内水位観測結果

10) デルは菅原により提案されたモデルで、河川の流出解析によく用いられているモデルである。

A 10	0.5	A 31	0.4
A 20	0.01	A 40	0.005
A 21	0.485	A 41	0.35
H 2	34.0	H 4	200.0
A 61	0.0012	A 50	0.005
A 62	0.0015	A 51	0.3
H 62	400.0	H 5	50.0
H 71	710.0	H 72	730.0

	5/1 10/15	10/16 4/30
A 10	0.01	0.0025
A 30	0.01	0.0025
A 70	0.004	0.0031
A 60	0.0009	0.0007
H 61	650.0	750.0

孔内水位の変化をタンクモデルで再現させるため、本研究では最下段の容器内の水位がボーリング孔内水位に対応しているものと仮定した。降雨は最上段の容器に投入するが、本システムでは側壁の孔からの流出はボーリング孔に流入する浸透とみなし、底面の孔からの流出は降雨損失量とみなした。また、最下

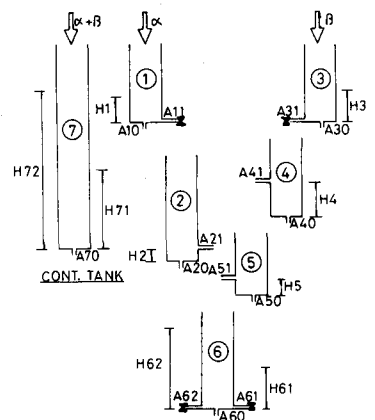


図-3 タンクモデル構造図

段の容器の流出孔（側面、底面）も全て損失量とみなした。この基本仮定にしたがって作成したモデルを図-3に、係数を表-1に示す。以下には降雨に対する孔内水位の変動特性をどのようにしてとり入れこのモデルを完成させたかについて簡単に述べる。

4-1 全体構造（タンク配置）の決定

タンクの配置、構成は孔内水位の上昇特性より決定した。

本孔の水位上昇特性は二種類の異った特性がみられることである。特に2段階の上昇過程を経てピークに至る上昇では第二段階目の水位上昇時には降雨のないことが大きな特徴である。この特徴はモデルの構成上最も重要な事象であり、この特徴を再現させるため、降雨が投入される最上段のタンクは並列配置とし、図-3の①タンクを第一段階の上昇、③タンクには第二段階の上昇を分担させることとした。各々のタンクにつけた係数 α 、 β は流出解析の場合は流域面積に相当するものであるが、地下水の場合は集水域が不明であるため次のようにして決定した。まず第一段階と第二段階の上昇量の比を実測結果より求め $h_1/h_2 \div 1/2$ を得たのち、 $\alpha/\beta \div 1/2$ を保ち、かつ実測ピーク値に一致するよう α 、 β を決定した。一方、水位上昇速度は第一段階の方が第二段階より速いため①タンクの方の直列構造は二段直列とし、かつA11とA21の係数を大

きくとり、③タンクの方は時間遅れおよび遅い上昇量を再現するため三段直列構造とし、貯留水深 H_4 、 H_5 を大きく設定するとともに A_{31} 、 A_{41} 、 A_{51} は A_{11} 、 A_{21} に比して小さく設定した。孔内水位は⑥タンク内の水位で表わされるものとし、このタンクは A_{21} 、 A_{51} からの流入を受けるものとした。

4-2 先行条件の導入 以上の構造で降雨量を入力として⑥タンクの水位を求めると降雨量にはとんど比例した上昇量が再現される。ところが、観測記録によれば同じ降雨量があってもある時には水位上昇がみられるが、別の時には全く水位上昇が発生しないことが明らかになった。このような事例を詳しく観察・検討した結果、両者の違いは当該降雨以前の降雨量の大小すなわち当該降雨発生前の土の湿度条件が異なることに由来することが明らかになった。したがって土の湿度条件を表わす何らかのシステムを導入しない限り水位の正確な再現は不可能となるため、本研究では①タンクから⑥タンクまでのシステムとは独立した⑦タンクを設置し、このタンクで土の湿度条件を表現させることとした。このタンクには $(\alpha + \beta)$ の降雨量を投入し、土中内への浸透および地表面からの蒸発は底面の孔 A_{70} で表わし、このタンク内の水位が土の湿度条件を表わすものと仮定した。先行条件の評価方法としては、この⑦タンクシステムに先行期間を設定し、その期間内で⑦タンクの水位 X_7 がある水位以下になっておれば、当該降雨直前の X_7 の値いかんにかかわらず水位操作条件（後述）は乾燥条件として水位上昇を発生させないようにした。この X_7 の水位条件が影響を及ぼす孔は A_{11} 、 A_{31} 、 A_{61} 、 A_{62} とした（後述）。なお、降雨強度の大きい場合には降雨の一部が浸透せずに地表流となる現象が考えられるが、本試験地では観測継続中は一度も地表流が観察されなかったため、降雨はすべて浸透するものとみなした。

4-3 コントロールバルブの採用 3、で述べたように本孔の孔内水位は急速でしかも大きな上昇を示すことである。このような水位挙動は通常のタンクモデルでは再現が不可能であるため本研究ではコントロールバルブの機構を①、③、⑥タンクの側面の孔に採用した。種々の試行の結果、このコントロールバルブの開閉操作は⑦タンクの水位によって行なうこととし、 H_{71} 、 H_{72} の開閉のための基準水位を設定した。 $H_{72} < X_7$ では A_{31} のバルブが開くものとし、逆の場合は閉じるものとした。しかしながら先行期間内（250時間）である値以下の水位になっていた場合では前述したように H_{71} 、 H_{72} の条件にかかわらずこれらのバルブは開かないものとした。バルブが開くまでは投入された降雨量は浸透、蒸発による A_{10} 、 A_{30} からの損失以外はそれぞれのタンク内で貯留されるものとした。これにより急激な水位の上昇の再現が可能になった。一方、図-2からも明らかなように水位の下降速度は同じ水位でもピーク値の違いにより異なった値を示している。これはこの水位が裂か水の水頭を表わしているためと考えられるが、タンクモデルではこの影響を表わすことができない。したがって水位下降時に現われる下降速度の違いを表現することは不可能となる。このため本研究では⑥の水位および先行期間内の条件により側面のバルブの開閉の操作をさせ水位下降速度の違いを再現させた。

4-4 半年周期の導入 以上の考察を経て得られた結果の一部を図-4に示す。この図から前半（9～10月）までは観測値と計算値はほとんど一致し、良好な結果を示したにもかかわらず、それ以後の後半では計算値が観測値を下まわることが明らかになった。この結果は後半では少ない降雨量でも水位上昇が発生することを意味している。このような現象は図-2の春期（3～4月）頃にもみられ、少ない降雨量で急激でしかも大きな上昇量がみられる。したがって図-4に現われた期間に限らず他の時期にも同様の現象が現われていることが予測される。図-5は便宜的に一年を4月下旬～11月中旬までと11月中旬～翌年4月下旬までの二期に分け、30cm以上の水位上昇を示した現象についてその全水位上昇量と先行期間内（この場合は135日）の総降雨量と当該総降雨量を加えた降雨量との関係のみたものである。

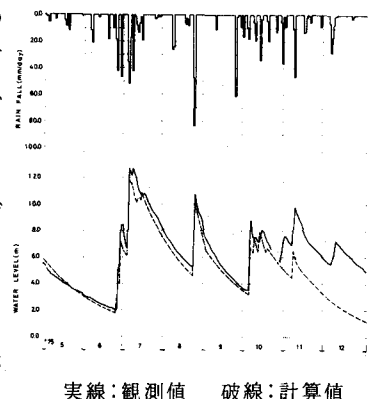


図-4 夏期と冬期の違い

この図より両方の期間では上昇量と降雨量の関係は各々異なっていることがうかがえる。両方の時期とも降雨量が増大すれば上昇量も大きくなっているが、興味ある結果は11月中旬～4月下旬までの方が同じ降雨量でも大きな上昇量を示していることである。この時期は図-2の降雨量記録からも明らかなように降雨量は少なく乾期に相当しており、土壌は乾燥状態にあると考えられる。したがってこの時期に降雨があってもかなりの量の降雨損失を生じることが予想されるにもかかわらず、図-5の結果はこの推定とは逆の現象が発生していることを示している。この現象の原因としては、

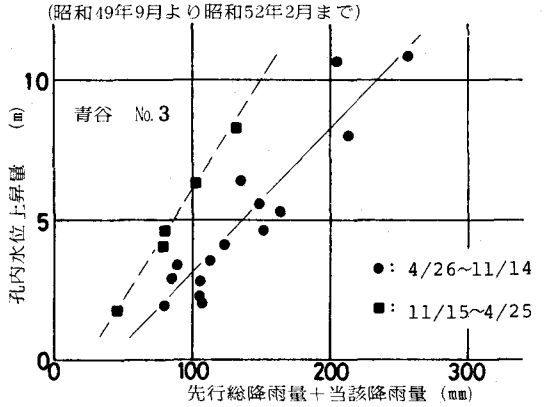


図-5 降雨量と孔内水位上昇量の関係

植生の葉面蒸発効果を推定している。すなわち、山地のように地被が植生である場所では4月下旬～11月中旬では植生の葉が繁茂し、植生活動が活発な時期に相当する(当試験地では樹令20年前後のニセアカシヤで優占されている)。したがってこの時期には葉面蒸発作用が盛んであり、図-5のような結果になったと推定される。この現象をタンクモデルに反映させるためには11月中旬～4月下旬に相当する時期では降雨損失量をそれ以外の時期より少なくしてやる必要がある。数回の試行の結果、シミュレーション計算ではこの時期の区分を5/1～10/15までと10/16～4/30までにした(以後、前者を夏期、後者を冬期と呼ぶ)。降雨損失は①, ③, ⑥の底面の孔の係数を夏期と冬期で変化させ、冬期の損失を小さくするため夏期に比して係数を小さくするとともに、水位下降条件の基準であるH61も変化させた(表-1参照)。

5. シミュレーション結果

以上の考察を経て得られたシミュレーション結果を図-6に示す。これは1975年5月より1977年6月までの約2年2ヶ月間のシミュレーション結果である。多少相異のみられる部分もあるが全体的にみればほとんど観測結果を再現しているようである。以下では、

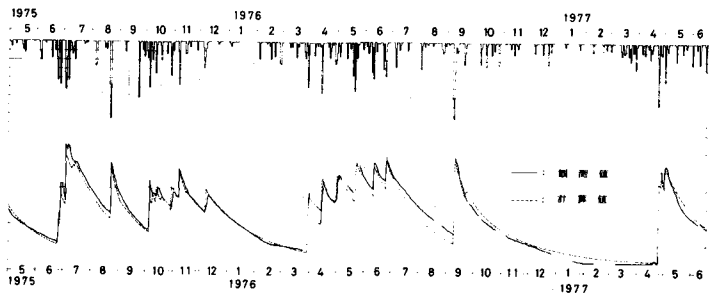


図-6 シミュレーション結果

このモデルより得られる計算値を使って豪雨時に発生する山腹崩壊の発生時刻について考察する。

6. 地下水挙動と崩壊発生時刻との関係

六甲山系においては過去1938年, 1961年, 1967年と三回の大きな山腹崩壊が発生しているが、本試験地でも空中写真より1961年, 1967年に崩壊が発生していることを確認⁷⁾した。また現地調査により1961年の復旧以前に施工されたと思われる古い石積よう壁も見られ、また地元の人から1938年にも山腹崩壊が発生したとの話を聞いたため、1938年にも本試験地では山腹崩壊が発生したものとす。これらの崩壊については、災害記録より崩壊多発時刻が判明しているが本試験地での崩壊発生時刻は不明であるため、いずれもこれらの多発時刻に発生したものと仮定する。

図-7(a)はタンクモデルを使って1938年, 1961年, 1967年の孔内水位の推定値を示したものである。降雨は本試験地の西南約4kmに位置する神戸海洋気象台での観測記録を使用した。なお、この図には累加雨量曲線もあわせて示している。これより累加雨量曲線と水位図とは時間的にはずれて位置し、崩壊発生時刻は累加雨量曲線では一連の降雨の終期に、水位図では上昇初期に位置することがみられる。山地地下水が崩壊の発生に寄与するなら一番危険な状態、すなわち水位が高い時に崩壊の発生がみられる筈であるが、図ではそ

のような状態に達する前に崩壊が発生していることを示しており、孔内水位のデータのみでは崩壊発生の理由は不明である。

図-7(b)にはこのような水位上昇をもたらした降雨強度のパターンを示した。崩壊は最大降雨強度発生時付近で発生していることがうかがえる。また、図-7(c)には従来より指摘されている結果、すなわち雨の降り方の変化と崩壊発生との有無を示すために降雨強度の時間変化(降雨加速度)を示した。雨の降り方は全体に激しい変化を示しており、崩壊は最大降雨加速度付近で発生していることがうかがえるが、ピーク値とは一致してはいない。したがって図-7の(b),(c)より言えることは、崩壊の発生は雨の降り方の変化に関係しているようであるが、どのような変化の時に発生するのかを厳密には定義できないようである。

図-7(d),(e)は(a)に示した水位の上昇、下降速度およびその変化(水位加速度)の経時変化を示したものである。これらは(b),(c)に比していずれも滑らかな曲線となっている。

これらの曲線は前述したように先行条件をシステムに組み込んだモデルにより算出されたものであり、先行条件に左右されない降雨のみのデータよりも崩壊発生と関係があるものと推察される。図からは崩壊発生時刻は速度分布図より加速度分布図のピーク出現時刻と関係がありそうである。

一方、この水位加速度のピークが崩壊発生のトリガーとなると仮定しても、この加速度の大きさのみで崩壊が発生するとは考えられず、当然その時の水位条件も考慮する必要がある。図-8は崩壊多発時刻の水位加速度と水位との関係を黒丸印で、1969年以降、当試験地では崩壊が発生していないためピーク水位加速度とその時の水位を白丸印で示したものである。この図より崩壊発生は右上に位置し、高い水位時に大きなピーク加速度が生じた時に崩壊が発生したことがわかる。しかもその境界は図中の破線を境にして区別されるようである。ここではこの曲線を仮に崩壊の「地下水限界曲線」と名付ける。この曲線より上方に位置すれば崩壊が発生し、下方に位置すれば崩壊は発生しないものとみなす。本来、このような曲線設定には、過去の豪雨記録を集めその時の崩壊発生との関係を見るべきであるが、当試験地での崩壊発生の有無および崩

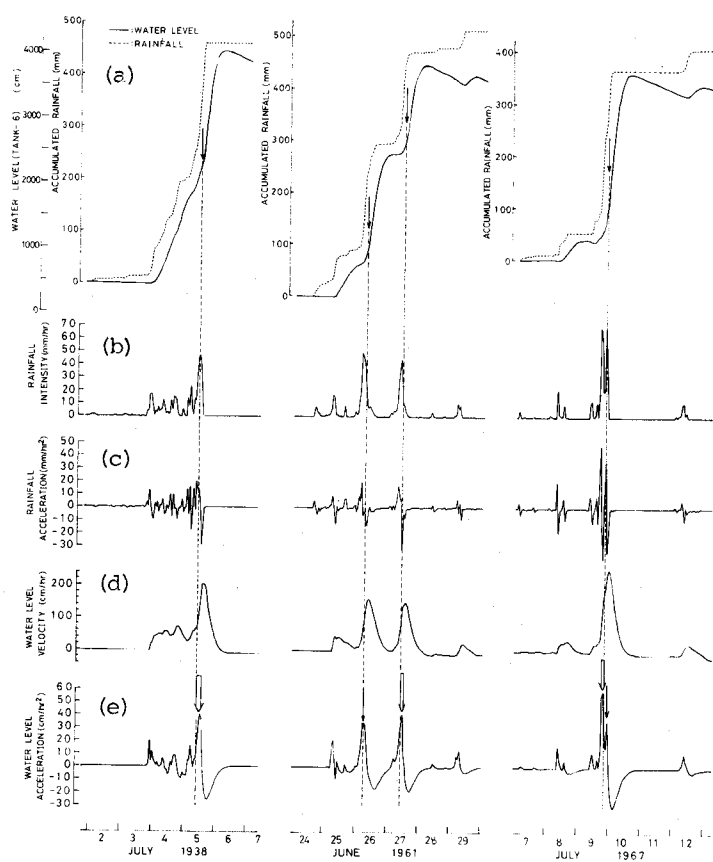


図-7 降雨、推定水位と崩壊多発時刻との関係

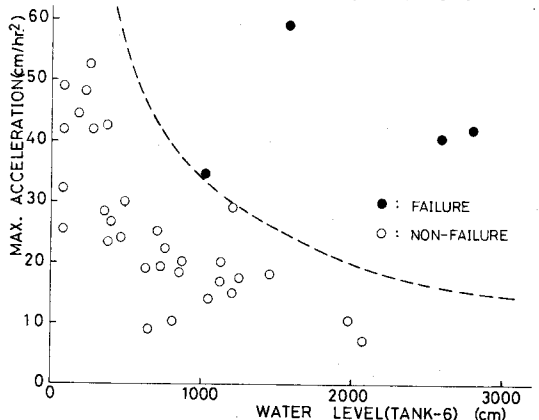


図-8 「地下水限界曲線」の設定

壊発生時刻が不明であるため、崩壊記録の明確な降雨のみから決定した。

図-9は図-8と同じ座標系に「地下水限界曲線」を描いたのち、1938年、1961年、1967年の水位-加速度関係を時刻毎にプロットしたものである。これは、図-8に示した時刻は崩壊多発時刻であり、崩壊が発生し出したり、あるいは異なる場所で崩壊が発生する時刻がどの程度バラツクかを「地下水限界曲線」より推測するためである。本来は図-8から得られた結果は、本試験地の $\#6$ 3孔のみに該当する結果であり、別の場所では不明で、また仮に同じ場所でも一度崩壊が発生すれば、それに関係した降雨ではその後の条件は異なることが予想されるが、ここではシミュレーションで求められた地下水挙動が別の場所ひいては六甲山系全体でも起っているものと仮定している。この図より、崩壊多発時刻以外にも崩壊が発生し得ることが推察される。しかも、これらの時刻は図-7(e)の水位加速度ピーク値付近(矢印)に位置することがわかり、「地下水限界曲線」および当試験地以外の地下水条件が図-3に示されるモデルで表現できると仮定するならば、このモデルより得られる水位および水位加速度は崩壊発生をコントロールすると考えられる。

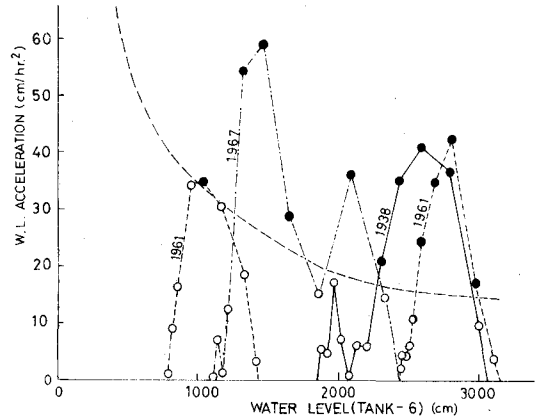


図-9 豪雨時の水位挙動と崩壊発生

7. あとがき

ここで述べた議論は地下水により崩壊が発生するものと仮定したものであり、現実にはこの他に雨水の浸透に起因する崩壊もあることを忘れてはならない。また、誘因のみでは崩壊は発生し得ず、これに素因、境界条件を設定した安定解析を実施しなければ真の崩壊発生の有無を論じることとはできない。今後はここで得られた知見をもとに豪雨時の斜面安定解析を行う予定である。

7. あとがき

本研究を遂行するにあたり数多くの御教示を賜った神戸大学田中茂名誉教授、川谷健教授に厚く感謝の意を表します。なお、本研究の前半は昭和53年度科学研究費一般研究(D)「山地小流域における地盤条件と地下水水位特性の関係に関する研究」の成果であることを申し添えます。

本研究を遂行するにあたり数多くの御教示を賜った神戸大学田中茂名誉教授、川谷健教授に厚く感謝の意を表します。なお、本研究の前半は昭和53年度科学研究費一般研究(D)「山地小流域における地盤条件と地下水水位特性の関係に関する研究」の成果であることを申し添えます。

参 考 文 献

- 1) 福田護はか：浸水に伴うせん断抵抗の低下と斜面安定解析へのアプローチ，第12回土質発表会，1977
- 2) 田中茂：山地斜面の崩壊箇所の予想について，建設工学研究所報告，4，1963
- 3) 打萩珠男：ひと雨による山腹崩壊について，新砂防，79，1971
- 4) 瀬尾克美はか：土砂害と降雨量について，新砂防，88，1974
- 5) 奥田稔：集中豪雨とはどんなものか，施工技术，5-11，1972
- 6) 池谷浩：降雨強度比による土砂害からの避難基準に関する一私案，新砂防，94，1974
- 7) 田中茂はか：山くずれと地質・地形構造の関連性に関する研究，文部省科研報告， $\#51-A-4$ ，1977
- 8) 田中茂はか：山地地下水の降雨による変動特性，建設工学研究所報告，19，1977
- 9) 笠間太郎はか：六甲山地周縁の断層破碎帯と地下水，神戸市水道局，1969
- 10) 菅原正己：水資源の循環機構に関する調査報告，科技厅資源調査会報告，47，1969
- 11) 沖村孝はか：山地孔内水位のシミュレーション解析，土木学会第34回年講，II-359，1979
- 12) 神戸市：神戸市水害誌，1939
- 13) 神戸市建設局土木部緑地砂防課：36.6豪雨による背山(市有地)の山崩れ調査報告，1961
- 14) 神戸市企画局調査部：昭和42年7月豪雨に関連するスクラップ集，1967