

高知県繁藤地区の大規模崩壊について（その2）

——崩壊に対する地下水の効果——

奥 西 一 夫・中 川 鮮

A LARGE-SCALE LANDSLIDE AT SHIGETO, KOCHI PREFECTURE

—Part 2. EFFECT OF GROUNDWATER ON THE LANDSLIDE—

By Kazuo OKUNISHI and Akira NAKAGAWA

Synopsis

Hydrological properties of the groundwater system which might have affected the occurrence of the large scale landslide near the Shigeto Station on the Dosan Line of the Japanese National Railways on July 5, 1972 was investigated through the continuous observation of the groundwater level and the discharge of a spring. The observation was started in November 1973 and continued until December 1976 although some interruption was involved. On this basis, it is revealed that unconfined groundwater occurs in fractured rock at the gentle ridge-type slope behind the landslide area. It stands to reason that a part of this groundwater was led to the spring in the landslide area through a permeable channel formed by the fracturing of rocks in the fault plane which crosses the area in question.

Simulation of the groundwater system is carried out using a tank model based on this interpretation and is verified by comparing the result with the observed values. It then yields the estimation of the hydrograph of the spring at the time of the occurrence of the landslide. It is concluded that the rainfall on July 5, 1972 whose duration was of the same order of magnitude with the time constant of the recharge of the groundwater system was, unfortunately, effective as a trigger for landslide though the total amount of rainfall was not so great as to be called "record-breaking".

1. は じ め に

昭和47年7月5日に高知県の国鉄土讃線繁藤駅付近で発生したこの大規模崩壊では、崩壊斜面のあちこちにかなりの量の湧水が認められた。それらのうち、ほとんどのものは2、3ヶ月のうちに消滅したが、流量が最大であった1箇所だけは渇水期になっても引き続き湧出を続けた。この斜面には崩壊前から湧水があり、崩壊直前には湧水量の不自然な増減が認められた。崩壊後におこなわれた崩壊地およびその周辺の地盤調査^{1), 2), 3)}によって、この湧水が崩壊斜面を斜めに横切る断層線にあること、断層面内に形成された、岩石が破碎されて透水性が高くなったチャンネル状の部分を通じて、地下水が湧水点まで導びかれていること、および崩壊地の背後の尾根型の緩斜面には不圧地下水の貯留があり、湧水点への地下水供給源であり得ることが明らかになった。崩壊が781mmという大量降雨に際して発生したことから、平均約10mの深さにすべり面を持つ地すべり性の崩壊であったことから、地下水の増加が崩壊の直接的な原因であったのではないかという疑いがただちに生じる。しかしながら、この地域内の、降雨量が崩壊地と同じであったと考えられる場所では、ごく小規模のがけ崩れを除けば、他には崩壊が全く発生していないことと、高知県内でも特別に

雨の多いこの地域では 781mm という降雨は未曾有の豪雨というほどではないことから、崩壊地斜面だけに存在するような他の誘因が同時に働いたという可能性もまた考えられる。そのような誘因としては、数年前の伐採による浸透能の増大、崩壊地を横切る里道とそれに沿う水道管によって域外からもたらされた水、かなり以前におこなわれたと思われる斜面下部の切り取り、自然的な風化の進行などを挙げることができる。しかしながら、すべり面が岩盤を横切っているため、土質力学的な斜面安定評価が困難なこと、考えられる誘因の多くは力学的効果を評価し難いことなどのために、これらが崩壊に対して与えた影響を定量的にあらわすことは今の所不可能である。そこで以下では崩壊地内の湧水とそれにつながる地下水系の水文学的な特性を解明することによって、この崩壊に対する地下水の効果を考察することにする。

2. 崩壊斜面とその周辺の地形

崩壊地とその周辺の地形(崩壊前)の概要は Fig. 1 に示されている。この図に示されている地域は吉野

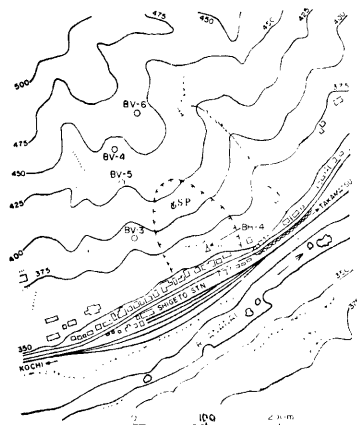


Fig. 1. The landslide area and its environs. BV: Borehole at which the groundwater level was observed, SP: The spring in the landslide area, BH: Horizontal borehole at which discharge was observed.

川支流、穴内川の河岸急斜面が主体である。穴内川の河床付近は基岩より成っているので、穴内川の水の地下への漏出は考え難く、したがって穴内川の水面がこの地域の中で最も低い水頭面になっていると考えてよい。穴内川の左岸斜面には長さ 400m 程度の谷が3つあるが、そのうち表流水が常時認められるのは崩壊地の東側に接する谷だけである。この谷は高度 430m 付近にある湧水帯でかん養されているが、それよりも上流では浅い谷型斜面であり、それより下流では急傾斜のV字形をした横断面を持つ。崩壊地の西側に接する谷は、この谷とほぼ同じ高度に湧水帯を持っているが、湧水はすぐに伏流し、降雨時でも表流水は存在しない。横断面はV字形であるが、崩壊地の東側の谷ほど急傾斜ではない。さらに西側の谷では湧水帯は明りようではないが、他の谷の湧水帯とほぼ同じ高度に、それらの谷と同様に水田跡があり、地下水面がきわめて浅いことを推測させる。穴内川に近い部分では谷は浅いなべ底状の形を呈し、くり返しランプを起したような地形が認められる。このように雨水が主として表流水として排出されている部分では急斜面が卓越し、地下水流または伏流水として排出されている部分では緩斜面となっていることは、前者では表面侵食が、後者では深いマスマーブメントが主要な侵食営力であること

を示唆している。崩壊斜面は尾根型斜面の下部に位置するが、平面的な急斜面で、穴内川の開折作用によってできた河岸斜面の中で特に侵食の進行がおくれた部分と言えよう。

3. 水文観測

崩壊後、高知県によって崩壊地の周辺に多くのボーリング孔が掘られ、対策工事に関連して各種の調査がおこなわれた^{2),3),4)}。それらのデータと地盤構造に関するわれわれの調査結果¹⁾を参考にして、Fig. 1 に示す位置で水文観測をおこなった。すなわち、地下水位の測定は BV-4, BV-5 および BV-6 の3つの鉛直ボーリング孔でおこなった。崩壊地内の湧水点(SP)と、崩壊地の下部で掘きくされた地下水排除のための水平ボーリングのうち、最も流量の多いグループに属する BH-4 と呼ばれるものの流量を、ボックス型の三角

ぜきとフロート式水位計で測定した。

水文観測は昭和48年11月から昭和50年12月までと、昭和51年の9月から12月までにわたって実施した。昭和48年から昭和50年までの観測結果の概要を Fig. 2 に示す（昭和51年分についてはその主要部分を Fig. 7 に示す）。Fig. 2 において、雨量としては日雨量が、その他の量については自記記録にもとづく毎日12時の値がプロットされている。ただし、記録計の不調その他の原因で自記記録がなく、週に1回の測定値だけがある場合は、時刻に無関係に測定をおこなった日の値としてプロットした。

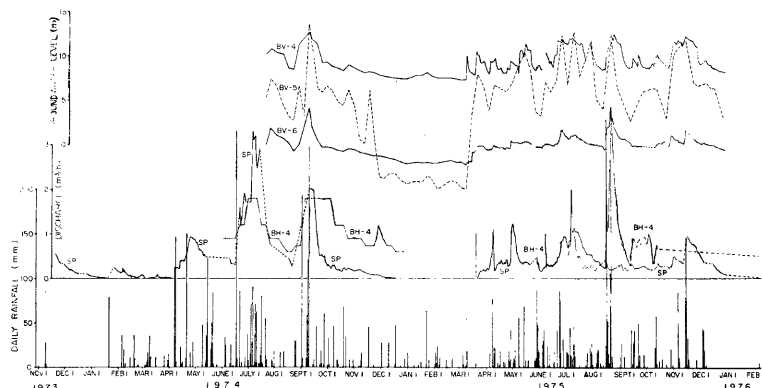


Fig. 2. Daily variation in the groundwater level and the discharge during the main part of the observation period (1973-1975).

雨量は当初は崩壊地の下端近くの作業用の小屋に転倒ます型の週巻き雨量計を設置して測定したが、昭和49年8月以降は国鉄繁藤駅で降雨警報装置のチェックのために取られている上記と同じ様式の雨量記録を利用した。

SP における湧水は、斜面の安定化のために階段状に切り取りがなされてできた急崖の基部にあり、限られた場所から湧出しているので、モルタル張りの簡単な水路を作ることによって、漏れによる損失なしに三角ぜきのボックスに導入することが容易であった。三角ぜきとしては90°ノッチを用い、越流水深を倍率2/3の週巻フロート式水位計で記録した。BH-4 から排出される水は塩化ビニール管で三角ぜきのボックスに導きSPと同じ方法で流量を観測した。連続観測は昭和50年6月から始めたが、導水パイプのつぎ目から漏れがあったため、昭和50年の観測値のほとんどは正しくない。昭和49年分については高知県によってバケツ法で測定されたデータ²⁾をプロットした。Fig. 2 からわかるように、これは測定精度はあまりよくない。したがって BH-4 の流量の満足な記録が得られたのは昭和51年のみである (Fig. 7 参照)。

ボーリング孔の水位は昭和49年7月から自記記録を開始した。それ以前に、昭和48年12月から自記記録は取っているが、水位の絶対値のチェックがないため、その結果は図示しなかった。Fig. 2 に示されている地下水位はボーリング孔ごとに異なる適当な基準レベルからの高さである。BV-4 では豊原式フロート水位計を倍率1/20、1週間巻きで使用した。しかし、カウンターウェイトの行程が1mしか取れなかったのに対し、水位変化はしばしば3m以上となったので、スケールアウトすることが多かった。そのために Fig. 2 では最高水位がクリップされた形になっていると思われる。BV-5 では試作した触針型水位計（倍率1/20、週巻き）を使用した。この水位計はカウンターウェイトを必要とし、その行程がやはり1mしか取れなかったのと、電気回路の不調や、いたずらによる故障も多く、自記記録は短期間づつ断続的に取れたに過ぎない。昭和51年度にはカウンターウェイト用の滑車をフロート用の滑車の1/10の径にした地下水用の自記水位

計(週巻き, 倍率1/5)に代えた。しかしこの時もワイヤー切断事故のため, 観測期間の初期を除いて自記記録は取れなかった。BV-6 ではワイヤーを滑車に巻き取り, カタンターウェイトを使わない週巻きの触針水位計(倍率約1/37)を使用した。ここではスケールアウトと電気的な絶縁不良による誤動作がそれぞれ数回あったが, 地下水位記録計の中では最も安定した記録が得られた。地下水面の地表面からの深さは BV-4 で最も小さく, 8m 以上になることはなかった。BV-6 では水位は地下 17~18m であることが多い。BV-5 では地面付近から地下 20m ぐらまで, 広範囲にわたって変動している。

4. 降雨に対する応答

観測期間中には日雨量が 200mm を越える場合が 6 回もあるなど, かなりの大雨もあり, また SP における流量が測定限界以下(わずかににじみ出る程度)になることもあるなど, いろいろな水文条件が観測された。Fig. 2 において, 全体的には雨量の年変化に対応した水文学的年変化が顕著に認められるが, 単位雨量に対する応答量は多雨期に大きく, 少雨期に小さい傾向がある。特に昭和50年1月および2月には 50 mm 以上の雨があっても, ほとんど反応が見られない。これは少雨期には不飽和帯の水分不足が大きく, それが浸透水によって補われるまでは地下水位の上昇や湧水量の増加が起らないためであると考えられる。

降雨に対する地下水系の応答をよりくわしく調べるためには, 降雨時の時間的変化を細かく吟味する必要がある。降雨時の地下水位と湧水量の時間的変化には, その時の降雨強度の他に前駆雨量の影響が認められる。Fig. 3~Fig. 6 にはそのような記録の例を示す。

Fig. 3 は少雨期で前駆降雨がない所へ, 短時間のあまり強くない降雨があった時の例である。SP の流

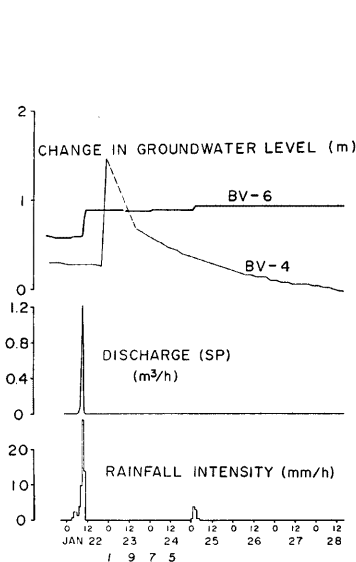


Fig. 3. Response of the groundwater level and the discharge at SP (An example for a light rainfall after several dry days).

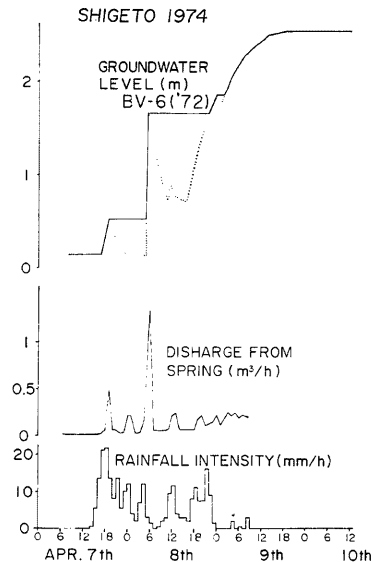


Fig. 4. Response of the groundwater level and the discharge at SP (An example for a rainfall of longer duration after several dry days).

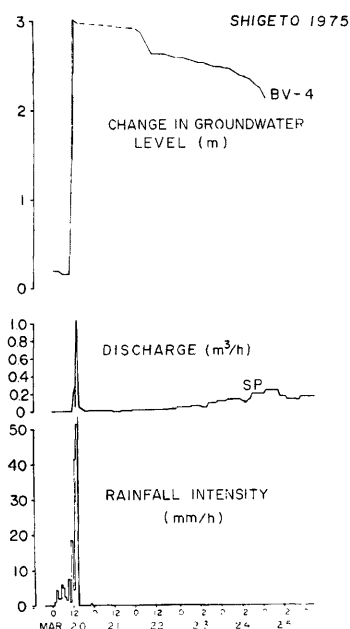


Fig. 5. Response of the groundwater level and the discharge at SP (An example for a heavy rainfall of shorter duration after several dry days)

ているような電気的狀態になり、電極を吊すワイヤーがくり出されず、水位変化が起っていないような記録になったものと推定される。この記録以降は電極に付着した水あかをひんぱんに除去したので、このような現象はほとんど起らなくなった。そういうわけで、実際のボーリング孔水位は点線のような変化をしたものと推定される。すなわち、降雨ピークにすばやく応答する鋭いピークと、降雨から2日ほどおくれたゆるやかなピークの2種類の応答が含まれている。

Fig. 5 は少雨期に短時間のかかなり強い雨が合った場合の例である。ここでは SP の流量におくれた応答成分がかなり明瞭に認められる。しかしそれは降雨から5日ほどおけている。BV-4 の水位はスケールアウトしているが、3m 以上の上昇があったと考えられる。BV-6 では欠測している。Fig. 6 は量的には少ないが、ほとんど毎日雨が降り続いた後に、強度はあまり大きくないが、はっきりしたピークを持つ降雨があった場合の例を示す。ここでは SP の流量の応答のうち、おくれた出現するピークが顕著である。その時間おくれは Fig. 5 に見られるものよりもはるかに小さい。BV-6 の水位の応答も SP のそれときわめて似通っている。ただし速い応答のピークがきわめて小さい。BV-4 の水位は上昇量がきわめて大きく、スケールアウトのため、最も重要な部分が欠測になっている。

Fig. 7 は昭和51年の17号台風による降雨のデータを示す。この時は6日間にわたって1228mmもの降雨があり、崩壊時の781mmをはるかに上まわっている。降雨には多くのピークが含まれているので、個々の降雨ピークに対する応答は明らかではないが、地下水位の上昇も湧水量の増加もかなり大きい。BH-4 の

量は降雨のピーク時にピーク状の増加を示すが、すぐに元のゼロに近い値に戻る。BV-6 の水位は階段状に上昇しているが、これは次に迫るように、水位計の誤動作であって、SP の流量に似た短時間のピークだけである疑いが強い。いずれにしても水位上昇量は小さい。BV-4 の水位は降雨ピークから数時間おけて上昇しているが、これは時間軸の誤差（タイムマークのミス？）によるものと思われる。スケールアウト前の水位上昇量は記録紙上では1mほどであるが、降雨後すぐに水位が元よりも下がるのは不自然であるから、スケールアウト時に水位計の滑車ガスリップしてゼロレベルの位置が変わってしまっているものと思われる。そうすると実際の水位上昇は2m程度であったと考えるべきである。Fig. 4 は Fig. 3 と同様の条件であるが、降雨の継続時間が長い場合の例である。ここでは BV-4 は欠測であった。SP の流量はそれぞれの降雨ピークに対応してピークを示している。途中から欠測となったためにくわしいことはわからないが、全体的に時間の経過と共に単位降雨当りの応答量が次第に増加しているようである。また4月9日になると降雨の休止時にも流量は元のレベル（ゼロに近い）には戻っておらず、おそい流出成分が含まれていることを示唆している。BV-6 の水位は階段状に増加しているが、これは水位計の誤動作によると思われる。すなわち、地面から20mほどの深さにあるボーリング孔の水位が降雨後ただちに上昇するためには、地表面近くからボーリング孔への水の流入がなければならない。その際にボーリング孔内に吊されている電極がしぶきでぬれて絶縁不良を起し、水位が下降しても、電極が水面に接し

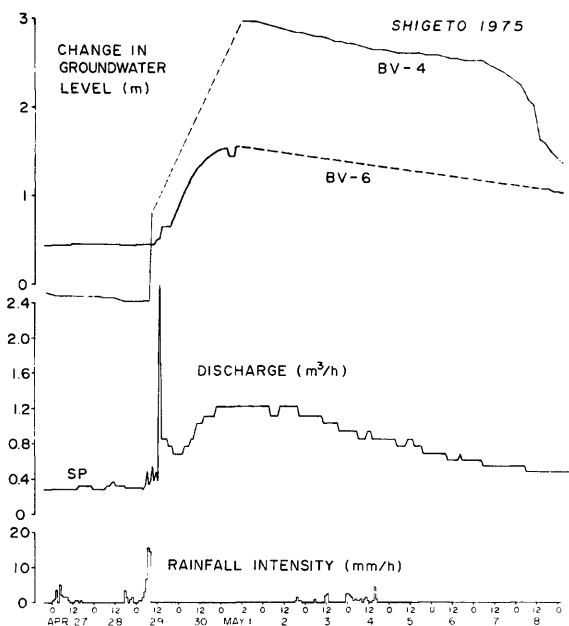


Fig. 6. Response of the groundwater level and the discharge at SP (An example for a light rainfall after wet days).

流量の降雨に対する応答に関しては、この図に示されたものが信頼できる唯一のデータである。時間雨量のピークに対応する速い応答成分はあることはあるが、きわめて小さい。おくれた成分についてはSPのそれとよく似ているが応答量は小さく、そのかわりに基底流出的な成分が大きい。BV-5の水位は降雨の開始と共に急上昇し、そこで記録計の故障のために欠測になっている。この時は大量降雨と地下水量の大幅な上昇にもかかわらず、崩壊斜面およびその周辺には格別の異常は認められなかった。

5. 地下水水系の推定

観測された地下水位および湧水量は、いずれも多少とも降雨に対する速い応答を含んでいる。BV-4の水位についてはおくれた応答が認められず、速い立ち上がり後は大むね指数関数的に減少している。BV-5の水位については信頼できるデータが少ないが、これとほぼ同様である。これらのボーリング孔は崩壊地の西側に接する谷の底にあるので、その水位は表流水が伏流して生じた地下水を代表しているものと考えられる。降雨に対する応答特性の決定的な違いから、この地下水は崩壊地内の湧水(SP)とは直接的な関係はないということができる。なお崩壊後の調査の初期段階では、この谷を斜めに横切って、崩壊地の上部に達する低比抵抗帯があることから、この谷から崩壊地へ地下水が流入していると考えられたが、この低比抵抗帯は前述の断層が地表面を横切る所では岩石が破砕されているために生じたもので、地下水脈ではない。

BV-6の水位における速い応答は、前述のように、地表面付近の浸透水が孔内に流入することによるものと考えられる。降雨中は流入が続くので孔内水位は周囲の地下水位よりも高いが、降雨が止むと、水位差に比例した流出があるであろうから、ただちに周囲の水位まで低下する。したがって、真の地下水位変化は観測された水位から速い応答成分を除去したものと云える。SPおよびBH-4の流量に見られる速い応答に

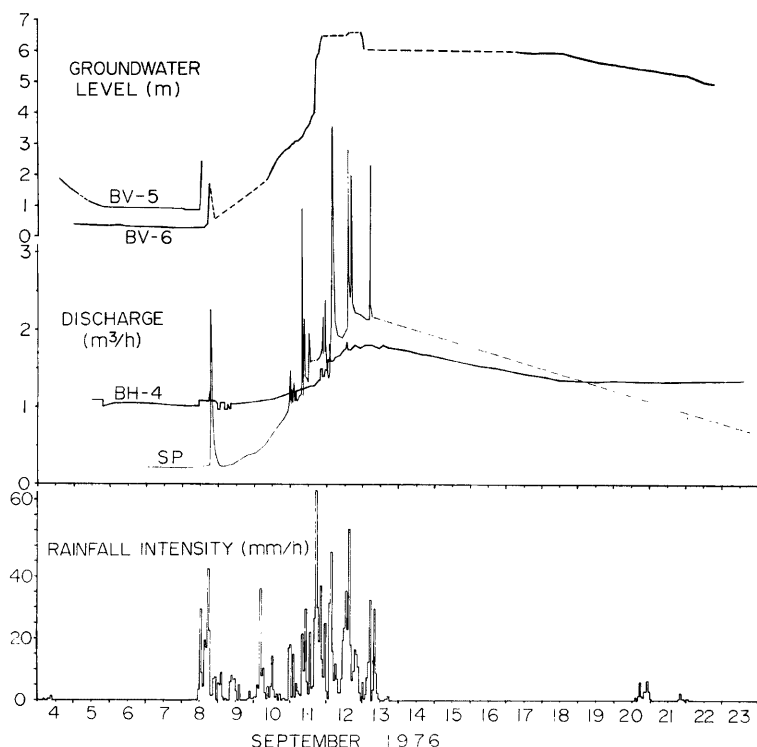


Fig. 7. Response of the groundwater level and the discharge at SP and BH-4
(Effect of extraordinary rainfall of the depth of 1,228mm).

については、雨水および表流水の流入がまず考えられる。しかし、SP については、岩盤が露出している場所なので、降雨がすべて表面流出となると考えても、集水面積が考え得る値 ($3\text{m} \times 10\text{m}$) よりも大きくなる場合があるし、BH-4 については表流水の混入は考え難いので、浅層の一時的な地下水の混入も考えられる。いずれにしても、このような成分の深さ 10m 程度の斜面安定に対する影響は小さいであろうし、考えている地下水系との関係も直接的ではないので、以下の議論ではこれを無視してもさしつかえがないと考えられる。

おくれた応答成分については、応答量を別にすれば、BV-6 の水位と SP および BH-4 の流量の間できわめて似通っていることが注目される。さらにくわしく見ると、応答曲線の形が BV-6→SP→BH-4 の順に拡散的になっていることが多いが、これは地下水流の経路がそのような順になっていることを示唆している。しかし、地盤構造を考慮すると、次のように考えるのが妥当である。すなわち、BV-6 付近の尾根型緩斜面に貯留されている不圧地下水は、前述の推定¹⁾ のように断層面内にあるチャンネル状の水を通しやすい部分を通じて湧水 SP に導びかれている。しかしこの不圧地下水は同時に崩壊地の両側の谷の上流部の湧水帯をもかん養していると考えべきである。これは別報¹⁾ の Fig. 9 に見られるように、帯水層の基盤も地下水面も上に凸になっているため、地下水流は発散的であることから、まず疑いのないことである。BH-4 およびその他の排水ボーリングからの水については、それが破碎された基盤岩のかなり深部から排出されている

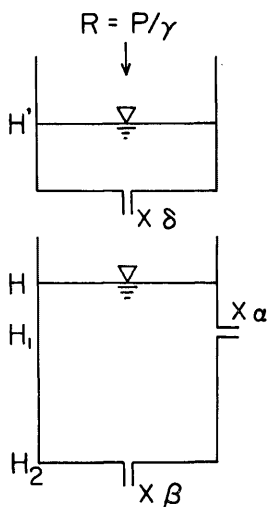


Fig. 8. Tank model for the simulation of the groundwater system.

ことを考えると、BV-6 付近の不圧地下水やその他の地下水が基盤岩中へ漏出し、崩壊地斜面の下を通過して穴内川の河床へ落下している地下水を、穴内川よりも少し高い高度で捕捉し、地表に導びいたものと解釈される。

6. タンクモデルによる地下水系のシミュレーション

上述の地下水系の解釈は地盤構造と降雨に対する地下水の応答の定性的な側面に対して調和的であるが、定量的な側面についても調和的である必要がある。そこで上述の地下水系の解釈をタンクモデルで表現し、それによって計算される水位や流量が観測値と一致するように定めたパラメーターが合理的な値を持っているかどうかをチェックした。このようなあまり厳密でない手続きを取ったのは、地下水を空間的に分布する量として取り扱うには、媒質の物性の分布や境界条件に関する情報が不足しており、またしたがって集中定数モデルを使うにしてもパラメーターの値を、測定データにもとづいて定めることができないためである。このような場合はパラメーターを試行錯誤的に変えられるタンクモデルが適している。

タンクモデルとしては上述の解釈をさらに単純化して、Fig. 8 のようにまとめた。ここで下のタンクは通常のタンクモデルとは

異なり、全く仮想的なものではなく、BV-6 付近の地下水貯留をあらわす。タンク内の水位はそのまま BV-6 付近の地下水位に対応する。係数 α を持つ流出口は崩壊地の両側の湧水帯と湧水 SP への流出をあらわす。この流出口からの流量のうちの一定割合の部分が SP の流量に対応するものとする。係数 β を持つ流出口は基盤岩中への漏出をあらわし、やはりその流量の一定割合の部分が BH-4 の流量に対応するものとする。SP や BH-4 へ向かう地下水流は時間おくれや貯留効果を生じ得るが、これらは無視した。上のタンクは雨水浸透から地下水位上昇までの間のかん養機構による時間おくれをあらわすために設けたものである。観測値との一致だけを目的にする場合は、さらに複雑なモデルを使うことが有効であろうが、今の場合はその値の妥当性をチェックできないようなパラメーターの導入は避けなければならないので、このような、できるだけ単純化されたモデルを採用した。

数値計算に際しては、タンクモデル法の一般的なアルゴリズム⁵⁾にしたがった。すなわち、2つのタンクの水位変化は、

$$H'(t+dt) = (1-\delta)H'(t) + P(t;dt)/\gamma \quad (1)$$

$$H(t+dt) = H(t) + \delta H'(t) - q_\alpha(t) - q_\beta(t) \quad (2)$$

で与えられる。ただし

$$q_\alpha(t) = \alpha\{H(t) - H_1\} \quad (3)$$

$$q_\beta(t) = \beta\{H(t) - H_2\} \quad (4)$$

である。ここに H' と H はそれぞれ上下のタンクの水位、 t は時刻、 dt は時間ステップ、 $P(t;dt)$ は時刻 t から $t+dt$ までの間の雨量、 γ は BV-6 付近の帯水層の有効空隙率、 α 、 β および δ はそれぞれ Fig. 8 に示した流出口の係数（無次元数）である。SP と BH-4 の流量は、かん養源の面積 A と適当な比例係数 C_α 、 C_β を導入して、それぞれ、

$$Q_{SP}(t) = \gamma A C_\alpha q_\alpha(t) / dt \quad (5)$$

$$Q_{BH}(t) = \delta AC_\beta q_\beta(t) / \Delta t \quad \dots\dots\dots (6)$$

と書かれる。 C_α と C_β の値は Q_{SP} と Q_{BH} の計算値と実測値が一致するように、計算の都度定めることとした。

計算は昭和50年8月と昭和51年9月について、 $\Delta t=1\text{hr}$ として、また昭和50年3月から12月までと、昭和51年9月および10月については $\Delta t=1\text{day}$ としておこなった。 $\Delta t=1\text{ day}$ の時は Fig. 8. の上部タンクの時定数が Δt よりも小さくなるため、このタンクを省略し、(2)式を

$$H(t+\Delta t) = H(t) + P(t; \Delta t) / \gamma - q_\alpha(t) - q_\beta(t) \quad \dots\dots\dots (2)'$$

と書き直して計算をおこなった。試行錯誤の結果定めたパラメーターの値は **Table 1** の通りである。またそれぞれの計算の中で定められた AC_α と AC_β の値を **Table 2** に示す。このようなパラメーターの値を用

Table. 1. Values of the parameters for tank model in Fig. 8.

Δt	α	β	δ	γ	H_1^*	H_2^*
1 hr	0.006	0.00004	0.2	0.1	-18m	-27.5m
1 day	0.1	0.001	—	0.1	-18m	-27.5m

* Height from the ground surface.

Table. 2. Values of AC_α and AC_β in Fqs. (5) and (6) for each calculation.

	Δt	The figure which illustrates the result	AC_α	AC_β
(1)	1 hr	Fig. 9	688	—
(2)	1 hr	Fig. 10	737	26,691
(3)	1 day	Fig. 11	1,347	—
(4)	1 day	Fig. 12	888	27,077
Mean value			915	26,884

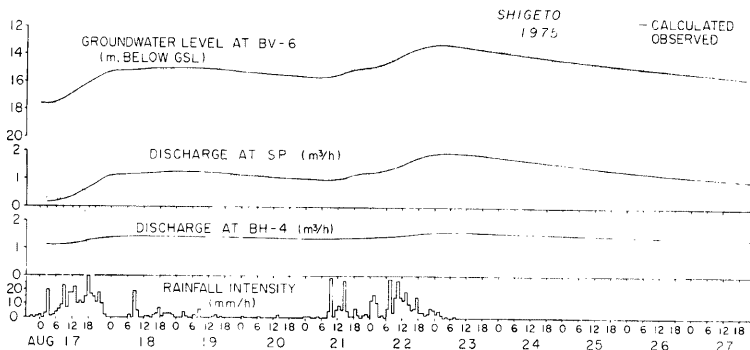


Fig. 9. The result of the simulation of the response of the groundwater system to a heavy rainfall of 705mm in August 1975 according to the tank model.

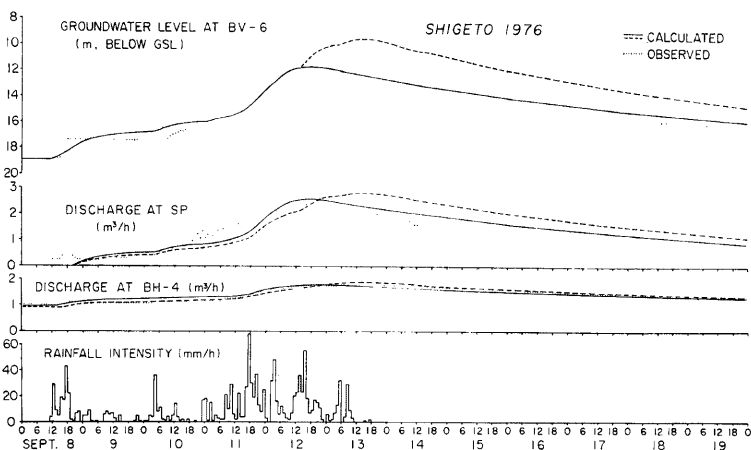


Fig. 10. The result of the simulation of the response of the groundwater system to an extraordinary rainfall of 1,228mm in September 1976 according to the tank model.

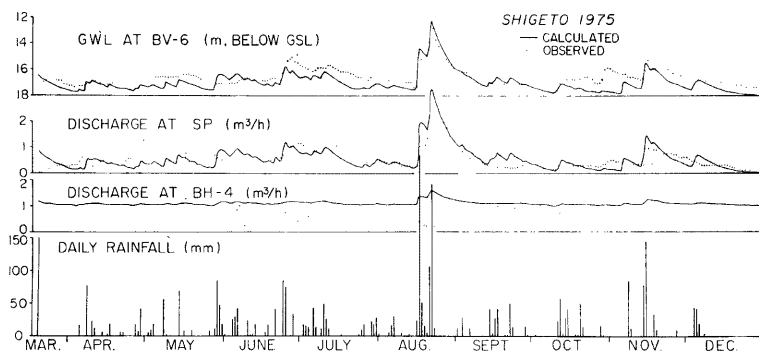


Fig. 11. The result of the simulation of daily ground water level and daily discharge rate in 1975 according to the tank model.

いた場合の BV-6 における地下水位と SP および BH-4 における流量の計算値を実測値と比較したものを、Fig. 9～Fig. 12 に示す。ここで Fig. 10 と Fig. 12 の破線は、ある時刻（12日の14時）以降は地下水のかん養が起らないと仮定した時の計算値を示す。これは直接的には計算値と実測値を一致させるために必要となった仮定であるが、実態としては、6日間にわたる大量降雨のために、かん養域の浸透能が次第に低下し、ついに降雨強度以下となって、降雨の一部が直接流出として流出したと考えれば説明がつく。ただし実際にそのような現象が起きたかどうかはわからない。Fig. 11 には何回もの降雨による多くのピークが示されているが、それぞれについて見ると、計算値と実測値がよく一致している場合もあるし、一致していない場合もある。一致しない場合については大むね次の3つの場合のいずれかが該当する。ひとつは実測値がピ

ークを示しているのに、計算値が全くピークを示さない場合で、これについては証拠はないが、雨量計の不調による疑いが濃い。次にこれと逆に計算値がピークを示しているのに実測値に全くピークが見られない場合は記録計が不調である場合が多い。最後に雨量が少ない期間の後は計算値と実測値の一致が悪い。特に最初の3月下旬の部分については、3月20日の151mmの降雨に対する応答が、計算値と実測値とでトレンドが逆方向であるなど、不一致がはなはだしい。これは第4節で述べたように、前駆雨量が少ない場合は降雨に対する応答がなくなるのに対し、計算ではパラメーターの値を一定としているためである。このように不一致の部分については、一応の説明がつくため、計算値と実測値は本質的な部分では一致していると見てよい。特に大きいピークについては一致が良好である。他の図については、データの信頼度が比較的高い部分が選ばれていることと、雨量が多く、前駆雨量の効果が相対的に小さいため、大むね一致は良好である。降雨に対する速い応答については、タンクモデルでは除外されているので、降雨中は一致が悪いのはやむを得ない。Table 1に見られるように、 $\Delta t=1$ hr の時は $\Delta t=1$ day の時にくらべて、係数 α の流出口の時定数 $\Delta t/\alpha$ の値が5割ほど小さくなっている。これはおそらく地下水系の非線型性のために、BV-6 付近の地下水位が高くなるほど排水の時定数が小さくなることによるものであろう。

以上のように、タンクモデルによる計算値は細部については問題があるが、多雨期に対するものとしては基本

的に実測値と一致していると見なし得る。そこで次にパラメーターの値の妥当性が問題になる。 α と δ については、それから導かれる時定数は常識的な範囲内にあり、かつ実測値をよく説明できているので問題はない。 β は地下水位が H_1 よりも下に下がった時の地下水系の時定数に關係する。この時定数は $\Delta t/\beta=1000$ day となる。これについては妥当性を判断するための材料が乏しいが、透水性の小さい岩盤への漏れに關する時定数であるから、このような大きい値でも不合理と言えない。 γ の値についてはよく破碎された岩石の値としては妥当であろう⁶⁾。 H_1 と H_2 は流出口の位置をあらわすが、実際にはタンクモデルで仮定するような単純な流出口があるわけではないので、等価的な位置をあらわすものと考えるべきである。 H_1 は崩壊地の両側の谷の湧水帯の高さにほぼ一致するが、SP の位置よりも 30m ほど高い。これは SP に地下水を導びく地盤構造が暗きよ的なもので、その上流端からの地下水面の高さが流量を決定すると考えれば不合理なことではない。 H_2 は別報¹⁾の Fig. 9 から、BV-6 付近の帯水層の下面に近い位置となる。そうすると、ここから浸漏して崩壊斜面の下部の排水ボーリングや穴内川の河床へ流出する流れは不飽和浸透流であると考えなければならぬ。しかし、BH-4 などの排水ボーリングから排除され得るためには、このあたりでは飽和流で、ある程度の水圧を有していなければならない。このような流れの存在が合理的であるか否かの判断の材料がないが、このような流れの流線は 20° 以上の急勾配を持っていることを考えると、サイフォン効果によって上流側の部分の水圧が減少し、ある高さ以上では大気圧以下となって不飽和となり、大気圧が地中の空隙を通じて入り込むということは考えられないことではない。

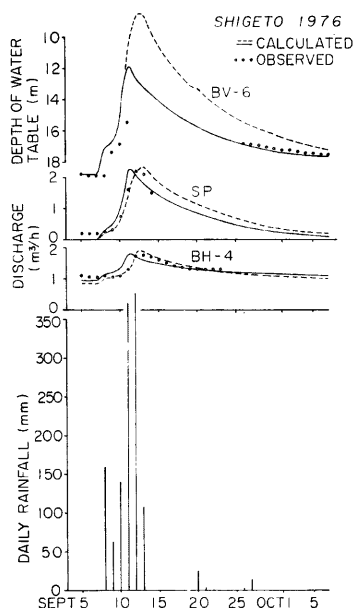


Fig. 12. The result of the simulation of daily groundwater level and daily discharge rate affected by Typhoon No. 17 in 1976 according to the tank model.

Table 2 には AC_α と AC_β の値が示されている。ここで、かん養域の面積 A の値を確定することが困難であるが、地形図から、 $4 \times 10^4 \text{m}^2$ のオーダーであることは推定できる。そうすると C_α と C_β はそれぞれ 2% および 60% のオーダーだということになる。 C_α については係数 α の流出口から流出する水の大部分は崩壊地の両側の谷であろうから、このような小さい値でも不自然ではない。 C_β については、BH-4 からの流量が、ある時点の測定で、水平排水ボーリングからの全流量の約 20% でしかないことと、他にも直接穴内川に流入する部分もあることを考えると明らかに大き過ぎる。これについては、水平ボーリングによって排出された深い岩盤からの地下水は、BV-6 付近の不圧地下水だけでなく、さらに背後の地域に浸透した雨水にも依存していると考えれば、一応の説明はつく。

以上のように、パラメーターの値の妥当性については、かなりのあいまいさがあるが、一見して明らかな不合理は見出せなかったもので、前述の地下水流系の解釈については、定量的にも正しいと考えてよいであろう。

7. 崩壊時の地下水の状態の推定

次におこなうべきことは、前述のようにモデル化された地下水流系が、崩壊時にどのような挙動を示したかを推定することである。一般には崩壊が発生すると、崩壊に関係する地下水の流動の場は破壊されてしまうので、崩壊後の地下水の状態から崩壊前の状態を知ることが不可能に近い。しかしながら、今の場合は、**Fig. 8** に示したようなタンクは、主に崩壊地の外の状態をあらわしているもので、崩壊が地下水系のパラメーターに及ぼした影響は小さいと考えられる。SP に通じる地下水の流路は崩壊によって短縮されたと考えられるが、前述のように、その流量は流路の上端から測った地下水位に比例し、流路の状態にはほとんど影響されないと考えられるので、崩壊によって SP の流量が受けた影響は、もしあってもわずかであると考えられる。崩壊後におこなわれた水平排水ボーリングは、崩壊地の基盤中を穴内川に向かって流れる地下水流の流路を短縮したと考えられるが、全流路長に対する割合は小さいので、排水ボーリングが地下水流系に与えた影響は無視し得る。

そこで、**Fig. 8** のタンクモデルに崩壊時の雨量を与えて前述と同じ計算をおこなった。ただし、 AC_α と AC_β の値としては **Table 2** に示されている平均値を用いた。初期条件は不明であるが、崩壊時の降雨の前には、多雨期であるが無降雨に近い日が数日間続いたので、そのような条件下での観測値を参考にして、BV-6 の水位の初期値を -17.5m と定めた。崩壊時には BH-4 は存在しなかったもので、その流量を計算することは無意味であるが、それにつながる地下水流は存在したはずなので、念のため計算した。このように

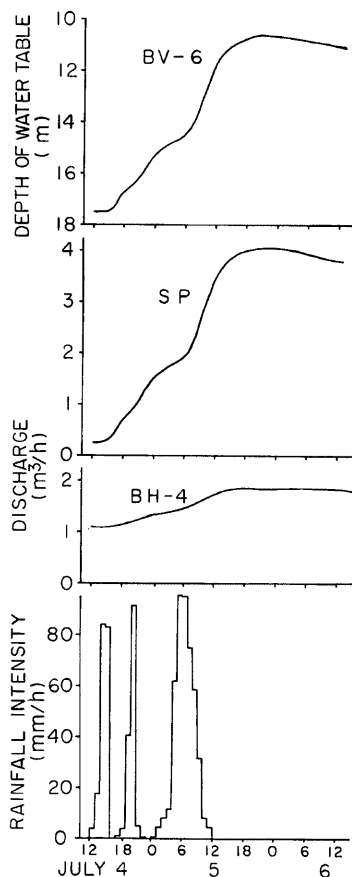


Fig. 13. Groundwater level and discharge at the time of the landslide as simulated by the tank model.

して計算された崩壊時の地下水の状況を Fig. 13 に示す。この図から、崩壊時（7月5日10時55分）には湧水量はまだ最大値よりもかなり低かったが、時間的な増加率はきわめて大きかったことがわかる。推定の誤差があることを考慮すれば、崩壊時の湧水量は、崩壊後に観測された値（降雨に対する速い応答成分は除外する）の最大値、すなわち、昭和51年9月12日の値とほぼ等しい。後者の場合は、累積雨量は崩壊時よりも多かったが、降雨が6日間にわたって分散していたために、湧水量のピークは累積雨量の割には小さかったということができる。

8. 考察とまとめ

前述の解析によって、崩壊に関連した地下水系の特性と、崩壊時の地下水の状況を明らかにすることができた。しかし、明らかにし得たのは地下水の水文学的な状況であって、そのような地下水が斜面安定に対して与えた効果については明らかではない。これを考察するためには、崩壊の様式が明らかにされなければならないが、知られていることは、破砕の進んで岩盤まで達する深いすべり面を持った地すべり性の崩壊であることと、前駆的な小崩壊があったことである。ここで、その小崩壊が進行性破壊の第1段階であったのか、あるいは昭和51年に兵庫県一宮町で発生した大規模崩壊^{7),8)}のように、大規模なスランプ運動の中の末端的な現象であるかが問題であるが、詳細な観察記録がないのでこの点は不明である。仮に前者のケースであれば、最初の小崩壊は斜面の下部に位置しており、湧水点からかなり離れているので、湧水の流量がその小崩壊に与えた影響は直接的なものであるとは言い難い。もし後者のケースであれば、湧水が斜面全体の力学的平衡に与えた影響が問題になるであろうから、土壌重量の増加、流動圧によるすべり力の増加などのように、湧水の流量そのものに比例した力学的効果が斜面に加わったと考えるのも不合理ではない。

昭和50年8月には、5号台風による豪雨のため、この崩壊地と同じく秩父古生層地域に属する仁淀川中部で多数の山崩れが発生したが、その中でこの崩壊地と同様の規模の崩壊が同じ地形条件（尾根型の急斜面）の下で発生した例もかなりある⁹⁾。このような山崩れのうち、われわれが現地調査をおこなった伊野町勝賀瀬の去山地区、越知町谷屋敷地区および吾川村のわらび谷と寺村の各地区で発生したものについては、崩壊後の斜面に湧水が認められた。これらの湧水については継続的な調査を実施しなければ、その水文学的な特性を明らかにすることはできないが、尾根型斜面であることを考慮すると、地質・地盤構造の何らかの特殊性のために地下水が特定の部分に集中するような条件になっていたのではないかと考えられる。またこれらの地区でも昭和51年の17号台風に際しては昭和50年をやや上まわる豪雨があったが、繁藤地区の崩壊と同じタイプの崩壊は発生しなかった。

以上の考察から、繁藤地区の崩壊と同じタイプの崩壊については、崩壊の発生条件または予測に関してかなり一般的な議論が可能ではないかと考えられる。すなわち、表面侵食から取り残された尾根型斜面で、地下水の異常な集中が認められるものについては、このタイプの崩壊が発生する要因があると見なし得る。このような斜面については、地下水系の詳細な解析がなされることはもちろん望ましいが、すべてについてこれを実施することは困難であろう。しかし、地下水の集中と排水の定数、または地下水の増加と相関のよい降雨の継続時間を求めることは比較的容易であろう。一般には時間雨量や日雨量など、格別の根拠もなく定められた時間内の雨量が警戒対象にされているが、上記のように定めた時間内の雨量が、既往の最大値に近づいたり、それを越えた場合に警報を発するようにすれば、個々の斜面の特性に即した有効な対策を取り得るのではないかと考えられる。

この研究を遂行するに当っては、高知県森林土木課、高知県中央林業事務所、土佐山田町繁藤支所、国鉄繁藤駅、ならびに地元の方々から多大の協力を得た。自記記録の取り替えと機器の保守には下村三千歳、中西重雄の各氏をわずらわした。研究費は主として文部省科学研究費補助金（自然災害特別研究）による。数値計算に際しては防災科学資料センターの電子計算機を利用した。

参 考 文 献

- 1) 中川 鮮・奥西一夫：高知県繁藤地区の大規模崩壊について（その1）、京大防災研年報，第20号B-1、

- 1977, p. 209-222.
- 2) 高知県農林部：繁藤地区測量試験事業報告書（昭和47年度，昭和48年度，昭和49年度），1973，1974，1975.
 - 3) 島 通保・中川 鮮・奥西一夫・竹内篤雄：繁藤地区の地すべり性崩壊について，昭和47年7月豪雨災害の調査と防災研究，1973，pp. 167—173.
 - 4) 栃木省二他6名：昭和47年7月4日，5日の豪雨により高知県繁藤地区に発生した地すべり性崩壊について，同上，pp. 178—182.
 - 5) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972；pp. 121—140.
 - 6) D. K. Todd：Ground Water Hydrology, Wiley 1957, pp. 23—26.
 - 7) 田中茂他5名：西播地区豪雨災害，昭和51年9月台風17号による災害の調査研究総合報告書，1977，pp. 89—97.
 - 8) 奥西一夫・奥田節夫・横山康二：兵庫県一宮町の大規模崩壊について，同上，pp. 98—104.
 - 9) 奥西一夫：5号台風による高知県中西部の山崩れの形態と発生位置，昭和50年8月風水害に関する調査研究報告書，1976，pp. 123—125.