

(社)日本地すべり学会中部支部シンポジウム「テーマ：地すべり地の地下水」講演要旨

— 講演 —

土木地質学的立場からの地下水開発の事例と考察

宮本 昇 (みやもと のぼる)

理学博士, 技術士 (応用理学)

元日本工営 (株) 取締役, 中央研究所長

1) 地すべり等防止法

地すべり等防止法が成立したのは昭和 33 年 (1958 年) です。戦中戦後の乱伐や治山の後退で山地が荒れ、特に昭和 28~30 年頃西日本を主に大きな山地災害が発生しました。従来から砂防法、森林法などで対策工事が行われてきましたが、地すべりの周辺地域の対策工事が適用されない区域にも地すべり防止事業に関する計画と実施を効率的に実施し、有害な行為の規制と住宅の移転や農地の整備など、対策に万全を期すため、新たに制定されたものです。なお、この法律は当時の社会現象を反映して「ぼた山」の崩壊の防止も同時に含めています。この法律の所管は建設省、農林省構造改善局、林野庁となっています。地すべり防止区域の指定にはこれら省庁間で調整してから、それぞれの管轄省庁で決裁し、官報に告示されます。

この法律の中で「地すべりとは、土地の一部が地下水等に起因してすべる現象又はこれにともなって移動する現象」と定義されています。つまり、地すべり運動の一因として地下水の存在が規定されているのです。それぞれの地すべり防止の目的対象によって所管が異なりますし、対策工事の手法も異なるでしょう。例えば、構造改善局所管では生産のある棚田の維持は大きな目標ですから、排水工事を行うにも水田を干あげる事の無いように注意を払います。

2) 地すべりと構造運動

地すべりはマクロな視点で見れば地質の構造運動の反映です。日本のような造山帯では大きな断層運動を伴う地域で片理の発達した岩盤地帯に多く見られます。いわゆる「破碎帯地すべり」と呼ばれるものです。たとえば、日本の中央構造線に沿った山地に分布する地すべりですが、外国でもネパールヒマラヤ前縁の主境界断層 (MBF) 北側のマハバラータ山地にもよく見かけ、土壌がよいため、「耕して天に至る」という景観を呈しています。また、日本の第三紀層とくに活褶曲を伴うような中新世の地層の構造帯には「第三紀層地すべり」とよばれる地すべりが広く分布しています。これらの構造運動は山塊を不安定にするとともに、岩盤に亀裂の発達を促し、さらに風化を促進させます。斜面が不安定になり崩れて滑ったこれらの地すべり地には、ほどよい土壌が形成されて地下水位が高く、小規模ながら永続性のある湧水に恵まれるので、棚田がよく作られます。水田だけではありません。新潟県の山古志村のように、鯉の養殖にも使われます。地すべり地は山間部としては農業生産性が高いのです。このほか、火山活動による熱水変質を素因とする「温泉地す

べり」といわれるものもあります。

3 地下水利用の社会性

地下水は非常に広い分野で扱われています。古くは清潔な水資源として井戸からくみあげられて飲雑用水に利用されました。今日でも全市民の水道を地下水でまかなっている熊本市の例を見るまでもなく、地下水は上水道水源として大きな比重を占め、少し古い資料ですが上水道用水の中に占める地下水の割合は 30.4%です。農業では灌漑用水のうち地下水の占める割合は、日本では 6.4%ですが、世界的には 20%以上を地下水に依存しています。日本の工業用水も 39.6%を地下水に依存していましたが、最近では比率が下がっているでしょう。そのほか地下水は道路融雪や都市のビル管理用水にも使われます。

もっとも、日本の平野部では地盤沈下の影響が大きくなり、地下水利用はむしろ公害問題となって、東京都など低平地をもつ行政組織は揚水制限を行っています。また、環境問題においても、植生や湧水の景観に関係してきます。昭和 36 年頃三島市でおきた工業用水の地下水汲み上げによる名園の湧水池が涸れて大きな景観問題になったのが古い記録でしょう。一方、土木の分野では地下水は基礎やトンネルの掘削にあたって処理しなければならない対象であり、また、構造物においては揚圧力として常に考慮しなければならない対象でしょう。このように地下水の賦存と運動は実に広い分野にわたって研究調査がされてきた事は皆さんもご存知のことでしょう。地すべり対策にしても地下水は常に考慮しなければならぬ対象です。

地下水は自然の状態、ある範囲をかぎってみれば、流入流出のバランスをとった状態にあります。地下水を汲み上げれば、地下水位が低下することはだれでも知っています。また、地下水の流れの下流側では湧水が減少する事も知られていて、地下水を揚水利用すればその周辺に何らかの影響を与えます。地下水を利用するには、この影響が社会的に許容されなければなりません。許容されなければ、それは公害と言う事になります。簡単に述べましたが、自然物である地下水を利用するにあたって、常に考慮しなければならぬことです。実際に地下水を開発利用するには現在の技術で可能な限り現地調査をし、社会的な利用のニーズから計画される揚水量と揚水による影響を予測して評価します。地すべり防止工事でも防止効果を評価するでしょう。

4 水収支の中の地下水

事例をご紹介する前に、少し基礎的な概念を話しておきます。

一般的に地下は水の不飽和な通気帯があり、その下に地下水で飽和された地層があります。地下水面は大気圧と平衡していますので、ここの地下水は自由水あるいは不圧地下水と呼ばれます。そして地下水で飽和した透水性の地層を帯水層と呼びます。不圧地下水はその底を不透水層で限られています。不透水層の更に下には地下水で飽和した透水層がある場合があり、その地下水は上部の不透水層下面より高い圧力面を持つ場合、被圧地下水と呼

ばれます。ここで透水層、不透水層といたしましたが、実際には相対的な地下水の透過能力を言うもので、不透水層というよりも難透水層というべき地層がおおいのです。したがって、せまい領域が短い時間の地下水の流れを扱う場合には不透水層で区切られた範囲の流れを計算して差し支えないのですが、広域で長い時間の計算では難透水層を通過する量も計算の対象にいれなければなりません。代表的な透水層には未固結の砂礫層があり、間に挟まる粘土層は難透水層といえます。関東ロームに代表される風成の火山灰層も空隙が大きく、浸透能力の大きい透水層です。降雨のほとんどが浸透し、表面流出が起こらないので浸食される事が少なく、平坦な台地が残っているのです。

いま、帯水層のモデルを考え、一番上位の帯水層の不圧地下水を考えてみましょう。

不圧地下水の収支は

$$\Delta S = P - R - E - \Delta D - \Delta F + s$$

ここに ΔS : 不圧帯層の地下水量の変化

P : 降水量

R : 表面流出

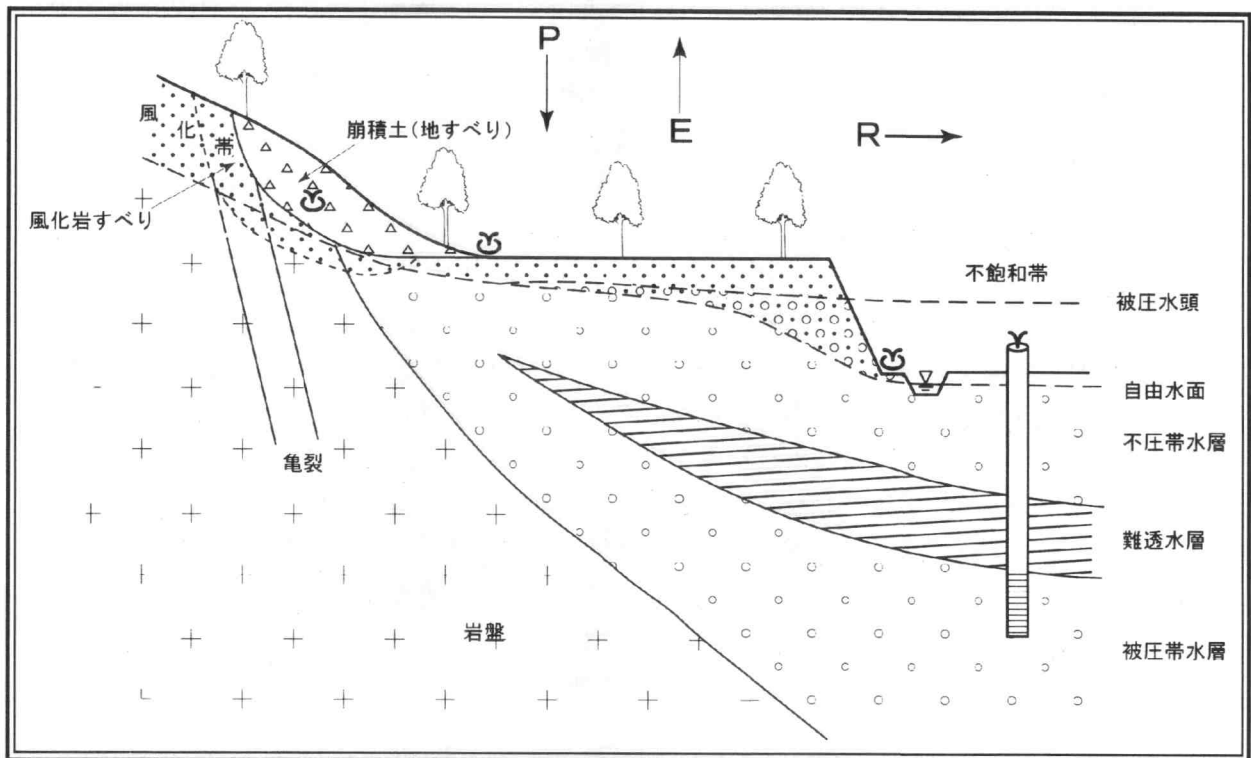
E : 蒸発散量

ΔD : 不飽和帯の水量変化

ΔF : 地下水の流入と流出の差

s : 地表貯留水の浸透量

しかし、これらの量を実測するのはなかなか難しいのです。容易に計れるのは地下水位の変化 Δh でしょう。 ΔS と Δh の関係は帯水層の有効空隙率が分れば計算できます。



地下水賦存概念図

5) 比流量と岩盤の透水性

降雨があっても土壌が乾燥していれば初期の降水は土壌に吸着されて、やがて蒸発散により失われ、降水は地下水面には達しません。とくに不飽和帯の内で土壌の ΔD の役割は非常に大きいのです。地下水になるには連続した降雨あるいは湛水が必要です。また、降雨強度が大きければ、降水の多くが地表流出となりますが、一部が土壌の保水能力をこえて地下水になるでしょう。今までにかなりの研究があるようですが、総じて日本では降水量のおよそ 1/3 が蒸発散、1/3 が地表流出、1/3 が地下水に補給されると推定されています。勿論、この比率は地表での条件によって大きく異なります。

自然の山地では岩盤が地表付近で風化されて亀裂が生じます。亀裂の成因には岩石の化学変化ばかりでなく応力解放といった作用もあります。これらの作用の著しい地表部では深部に比べて透水性が大きくなります。この場合、風化帯から新鮮な岩盤へは漸移するため、透水層と不透水層の区別を明確には出来ません。しかし、地下に浸透した水は亀裂を飽和させてから斜面を流下し、やがて集まって地表に流出します。河川という湧水量あるいは低水量は、降雨が地下に浸透して徐々に流出する地下水で涵養されていると考えられます。日本の河川では流域面積 100km² 当たりの流量（比流量）で表すと湧水量は 1~1.5m³/sec です。通常の河川では数 km² 程度のかかなり小さい流域でも、湧水期にこの比率に近い流量が見られます。つまり、このような湧水量を持つ山地流域の風化帯の下には透水性のごく小さい新鮮な岩盤があるといえます。

河川の流出は流域の岩盤の透水性に大きく支配されます。透水性が大きい岩盤の流域で地下水位が地下にあれば、浸透した水は地下水面まで降下し、地表水として流出する率は小さくなります。富士西麓で農地防災ダム計画の際に降水の流出率を流域別に計測した例では、第三紀層の流域では比較的大きな表面流出がみられる反面、透水性の大きい溶岩の流域の表面流出は小さいのです。溶岩は亀裂が多く透水性が大きいいうえ、計測地点の地下水位が低いのです。このような現象は石灰岩地帯でもよく見られます。

このため、富士北麓の溶岩地帯では地表に表流水はほとんど見られません。ここでは、地下に古富士泥流が山体のいわば心を形成していて、その上に溶岩が噴出して堆積しています。溶岩は亀裂がおおく、透水性が大きいのです。地下水は古富士泥流を不透水性基盤とし、その上の溶岩や間にはさまれる透水性の大きい帯水層を流下しています。地下水は山麓で湧水となって流出しており、この湧水は永年東京電力で測定され山梨県に報告されています。古い調査ですがこの地域の地下水調査は農林省はじめ幾つかの機関で実施され、不透水性基盤の形体が分ってきており、忍草地点の流量（湧水量）と地下水の流域面積の比をみると 4 m³/sec · 100km² となります。これは日本の河川の平水量にほぼ当たります。つまり、表面流出の分までもが地下に浸透して地下水になったと見てよいでしょう。

6 岩盤の亀裂と空隙に関する問題

(応力解放)

岩盤の亀裂の例として溶岩の冷却による引張亀裂を挙げましたが、岩盤の亀裂は浸食による応力解放によっても生じます。経験的に、花崗岩や石灰岩さらには第三紀層のグリーンタフ（凝灰岩）のように、マッシブな（均質で一様な）岩盤に長く連続した亀裂が発生しやすい傾向にあります。亀裂は地表近くに多いのですが、頻度は減るものの、山体のかなり深部にまで発生します。そして亀裂に沿って風化が進みますが、浸透する地下水の流出があると粘土質が流されて開口亀裂となる傾向があります。このような山地の裾にはある高さから下で急に流量が増える処があるか、湧水が見られます。特に、石灰岩は化学的溶解が加わって鍾乳洞が出来ます。

人為的にも、花崗岩のような固い岩盤にトンネルを空けたときの「山跳ね現象」やダム
の岩盤掘削の際でも掘削面に平行な「浮上がり」が見られます。新鮮な花崗岩のマッシブな岩体では掘削後数日で掘削面に平行なシート状の「浮き上がり」が生じ、亀裂が開口することがあります。中国南部の名勝にある石灰岩の屹立した山塊は、周辺を浸食されて石灰岩に生じた垂直な亀裂から風化が進んで崩落した景観です。一方、石灰岩に挟まれる粘板岩は細かい亀裂が緩むため、大きなアームチェア形の地すべりがよく発達します。

(ダムの貯水池)

透水性岩盤地域で比流量を見ることは、ダムサイトを探す時に、貯水池敷から漏水、特に鉛直方向への漏水の可能性を探るヒントになります。河川を遡ると流量の多い地点から湧水箇所をさらに昇ると河谷には急に流れがなくなる現象があれば、その岩盤の透水性は大きいのです。石灰岩地帯や溶岩、溶結凝灰岩などの亀裂のある地域で、河川に流量を見ないところでは、ダム貯水池を作る事は困難で、このようなところにダムを計画する事は避けられるべきでしょう。貯水池から鉛直方向の漏水への対策は大変困難だからです。そのほか、固い岩盤が応力解放で亀裂が山体に入り、鉛直浸透を起こさせる場合があります。山地の新鮮なグリーンタフの固い岩盤でも垂直に深い開口亀裂がいくつもあった事例もあります。岩盤の性質によっては地表近くの地下ばかりでなく、山体のかなり深部まで垂直な亀裂が及ぶことに留意してください。固い岩盤からなる山地でもこのような応力解放による亀裂がかなり深部に及ぶ事があるので、揚水発電用の上ダムを山頂に作る場合には特に注意を要します。

ダム貯水池には試験湛水のとき漏水の見つかることがあります。それでも不透水性基盤があつて流出する場合はまだ止水処理がしやすいのです。日本では石灰岩地域ではまずダムは作られませんが、海外では地形の関係で石灰岩地域でも作られ、湛水試験後に漏水対策工事が行われます。日本のダムでは第四紀の溶岩や溶結凝灰岩を通じる漏水問題が多いのです。

広域の地下水の流れは一般的によく知られるダルシーの層流法則に従うと考えます。しかし、岩盤の亀裂や空洞をながれる地下水にはこの法則は当てはまりません。この種の流れは乱流となり、自然の岩盤のなかで適切な計算方法が確立していません。かつてはボーリング孔を利用して水を圧入して得られるルジオン値から、米国開拓局で層流を仮定して導かれた公式で透水係数への換算することもありましたが、ダム漏水やトンネルの湧水の計算では実用にならないことが分っています。したがって、漏水や出水の生じる可能性は予測できても、岩盤の地下水の流れを定量的に計算することは現在非常に困難です。亀裂岩体の流れに対しては現場対応をせざるをえません。

(揚圧力)

応力解放による亀裂の発達には浸食あるいは掘削の方向や岩石の性質によって方向性があります。亀裂の発達に異方性があるところでは構造物への揚圧力に注意を要する事があります。ダムの例を挙げますと下流下方に向かう亀裂が発達し、下流上方に向かう亀裂の発達が少ないと、ダム下流岩盤からの流出が詰まり、ダム底に大きな揚圧力が発生します。この場合には、下流側にドレーンホールを作り、岩盤から排水するようにして揚圧力を下げます。ダムでは大量の水を抜く事は出来ませんから、あくまでも小さい透水性の岩盤の中にできる亀裂の相対的な発達の異方性の場合に適応できる例であるご理解下さい。

(斜面の安定)

浸食された斜面の表面に近い部分では、応力解放に伴う亀裂は斜面に近い勾配を示します。岩盤の掘削で斜面の下部を切り取る時は、何時でもその上の岩塊の安定には留意するでしょう。自然の斜面はギリギリで安定しているところが多いからです。しかし、安定を保つ要素は斜面下部だけではありません。斜面の上部の土壌を剥ぎ取れば、亀裂に流入する表流水の量が増えて、斜面を不安定にするのです。その意味で斜面上部の表土の水収支についても、土壌水分保持の役割を無視してはならないのです。

(地下水位)

岩盤から離れた地すべり土塊についても、対策工事で上載荷重を減じる工事を行う際に、すべり土塊中への浸透を助長しないようにする配慮が必要です。また、地すべり土塊の地下水は荷重として作用すると共に、土塊への揚圧力となって作用する場合があるとおもわれます。大きな地すべり土塊では何回もの崩落やすべりによって、土塊内部に相対的に粘土質で透水性の小さいところと亀裂や空隙が大きい透水性の比較的大きいところが層状になっていることがあります。著しい場合には地すべり土塊と基盤の岩盤との境界にすべり粘土が形成されて難透水層を形成している事もあります。地下水位の低下を目的として水抜き工事をする際、どの部位から地下水を排除するかを見極める事が必要です。ボーリング孔で観察される地下水位は帯水層の圧力水頭によって複数あることも考えておかなければなりません。地下水位を測定してコンターを描くにしても、違う圧力の層あるいは部位の地下水位を繋いでコンターを描いてもそれは意味がありません。地下水の帯水層の違う

場合には、例えば地下水位の段差、あるいは水温や水質に差異の見られることもありますので、現場でよく検討される必要があります。

7) 平野の地下水と開発

山地から平野に出てきますと、そこには未固結の岩石、すなはち、砂礫や粘土などの互層が分布しています。一般的な構造では上流側から、山地から出た砂礫が堆積する扇状地、砂やシルトが互層して堆積する氾濫原、シルト粘土が静かに堆積するデルタ、となります。扇状地では砂礫の透水性が大きいので伏流し、氾濫原では互層のため、粘土質層の下の地下水は被圧状態になっていることがおおいのです。デルタは厚い粘土に覆われていますが、下部には被圧地下水を持つ砂層もあります。このようなところで地下水を汲み上げれば、上部の粘土層から水が搾り出されて地盤沈下を生じます。

だが、平野は人間社会の生産の場であるため、水の需要がおおいのです。特に、日本では水利権が古くから確立されているため、地表水を新規に利用する事は難しいので、上水道や工業用水の多くは地下水に水源を求めて集中したために地下水位が大きく低下し、地盤沈下や酸欠空気の発生といった公害が生じた事はよく知られたところです。この経験もあって、地下水の開発には水収支の検討をしつつ、その土地の生産性を挙げるとい事が行われているのです。

8) プロジェクトの実施例

インドネシアでの例をご紹介します。場所はブンガワンソロ川中流の東部ジャワのマディウン盆地です。面積は善光寺平程度と見てください。盆地の中央は灌漑の水路があって、水田二毛作やさとうきびで豊に実ります。しかし、周辺は天水田で乾季には全く水源が期待できません。そのため、地下水で灌漑をする計画が1972年に世界銀行資金で取り上げられました。当時のインドネシアはまだ食料輸入国だったのです。

まず、需要側から天水田の位置、面積、計画作付から水需要が計画されます。それから、計画基準年における地表水の供給能力と水需要の差を期間ごとに産出します。一方、供給側としては、帯水層の水平的、垂直的な分布を調べ、地下水を採取する地層の透水係数など物理的性質から、揚水できる賦存量を見極めます。そして、水質が適正である事を確かめ、揚水を継続した時に、枯渇せず継続して灌漑が行えるか、その場合の地下水位の低下が社会的に影響を与えるか否かを判断し、最後に増加生産量と投入する資金、維持管理費を比較して、プロジェクトの採択を決めるのです。

地下水調査には、地表地質調査、試験井戸の掘削、揚水試験、電子計算機を使った地下水収支解析が行われます。試験井戸はここでは16本実施されましたが、そのうちの良好な揚水井は水道水源や灌漑用にそのまま転用できます。結論として、自噴現象を最小限にする程度まで地下水を利用すると、36,000haの灌漑がこの地域で可能になります。開発を促進

し、解析結果を実証あるいは補正するために、世界銀行は引続き 2,800ha について、パイロット地域を指定し、開発の資金をつけました。パイロット事業を実施した時の最大の地下水低下は地域の東北部で 15m が予測されました。また、約 3 年間で地下水収支が新しい平衡状態になります。つまり、揚水量と帯水層への補給量が地下水位の一定の低下した状態でバランスするのです。事業は逐次実施されて、今日では、第一号の試験井戸はンガウイ町の水道水源として利用されており、灌漑用の井戸は 540 本完成して利用され、不安なく二期の米作と乾季の畑作が行われています。

9 地下水資源と環境問題

このように地下水利用をみてきますと、地下の帯水層は天然のダムとしての役割をすることが分ります。地すべり地も同様で、それゆえ棚田も発達したのです。今国内では大規模に地下水の利用を促進する状況にはありません。しかし、地下水循環の機能は失われたわけではありませんから、上手に利用することは天の恵みを受けるようなものです。

だが、地下水に限らず水資源の利用には、環境を大事にしなければ失われるものもあるのです。東京都においては過去の地下水の大規模な利用の結果、地盤沈下が大きな問題になりました。その後の地下水揚水の規制で地下水位は回復の傾向にあり、逆に上野駅の地下構内など地下駅では地下水の上昇に伴い、構造物の浮力対策が必要になりました。地盤沈下の対策と維持管理には膨大な費用がかかっています。地下水の汚染も人為的な環境公害です。ひとたび地下水が汚染されると、除去するには大変な時間と手間がかかります。

地下水は循環する水資源であり、地域の大事な資源です。これからも、私達の住む国土をよい環境、高い生産の場として保全するとともに、地下水はそれを構成する一部として、大切に利用したいと思います。そして、地すべり対策により生じた地下水資源も有効に利用されることを望みます。

以上