

花崗岩地帯の山崩れと崩壊予知

神戸大学工学部 正員 田 中 茂

1 緒 言

一般に山崩れや山腹崩壊に大きく影響を及ぼす諸要素として考えられるものは、田中が之を報告したように、i) 境界条件、ii) 土質および地質の条件、iii) 先行条件、iv) 降雨条件または融雪条件などである。ここに、境界条件とは山腹などの表面および性質の異なる地層の境界面などの三次元的な条件をさす。地表面の条件のなかには勿論地被植物などの条件もふくまれる。各層の厚さをふくむ三次元的形態は勿論明らかにこの境界条件に包含されている。土質および地質の条件というのは斜面を構成している各土層または地層の工学的ならびに水理学的条件をいう。上述の先行条件というのはこのような土質および地質などの先行条件である。すなわち、本格的豪雨または融雪の直前にあける土または岩盤内の含水状態を主としてさす。降雨条件または融雪条件とは降雨の時間的变化または融雪の度合いの時間変化の特性または条件をいう。ここでは特に花崗岩地帯を対象として、この地帯の崩れまたは山腹斜面が豪雨時または融雪時に崩壊する場合をとりあげ、その崩壊の予知と予報ならびに予防法についてここに論ずることとする。この場合は特に花崗岩を基岩としその上を蔽うている「マサ土」よりなる表層を対象として、上述の四条件中の始りの三条件を明確に把握して後に、降雨条件または融雪条件を与えて斜面の表流水並びに浸透水の状況を明らかにし、このような対象斜面の崩壊の機構に照して、斜面崩壊の予知と予報を行う方法について論じ、さらに斜面崩壊の予防法についても各崩壊の機構別に明らかにする。

2 花崗岩地帯の斜面崩壊の原因または機構

普通、斜面崩壊の原因または機構として考えられるものを列举すればつぎの通りである。

- (1) 表流水の作用により甚しく雨裂状浸食を受けることに起因するもの
- (2) 雨水の浸透により含水量が増加して土の内部摩擦角および粘着力が減少することにより、自由水面の存在とは無関係に斜面構成土の内部に滑り面が発生することに起因するもの
- (3) 雨水の浸透により含水量が増加して土と岩盤の表面、または硬い土や土丹などの層の表面とそれの上に集っている比較的ルーズな土塊がそれらの境界面の摩擦係数および附着力が減少することにより上の土塊が滑動を生ずるもの
- (4) 雨水の浸透により、浸透能が小さい層の上にそれが大きい層が横たわっている場合、両層の境界面より上の層内に強雨の浸透したものが降雨中に貯留せられ、その貯留水の自由水面が斜面の表面に浸出し、いわゆる浸出線を生ずることにより、その線附近に「パイピング現象」が発生して、その部分の土の組織がルーズになると、この局部を通る滑り面に沿うて土塊が滑り落ちると、さうに落ち残った斜面の表面とその時の自由水面との交線附近に「パイピング現象」が発生して自由水面と表面との間の土塊が崩落することが連鎖及応的に生ずることに起因するもの。この時、自由水面から下の土は不動領域となっている。
- (5) (4) の場合のようにして透水性良好な上層中に自由水面が生じ、浸出面が発生すると、こ

- の面に局部沈掘および「押し出し現象」が発生して、この附近がゆるむことに起因するもの
- (6) さきの場合と同様に自由水面が斜面に浸透することにより、「パイピング現象」が発生し、浸出線附近の土の組織がゆるむことにより、このゆるんだ部分を通り自由水面以下の土のなかを通る滑り面が生ずることによるもの
- (7) 透水性良好な地層が水が比較的よくない地層の間にはさまれて介在している場合に、雨水がその良好な層内に浸透して被圧地下水となり、透水性不良な表層に水压を斜め下から作用して表層を押すとき、表層がすべりを起すことに起因するもの
- (8) 成層をしている傾斜した地層があり、雨水が透水性の中位の表層を徐々に浸透しながら鉛直に降下し、その層のすぐ下に介在している透水性の良好な層に到すると相前後して、その透水性良好な層には別の経路によりすみやかに浸透が行われ、この層に水が充分に入り、その層の先端が斜面に露出していると、その露出部に「パイピング現象」が発生して崩壊のきっかけを生じ、やがて上層も支持を失うことに起因するもの
- (9) 不透水性の地層の上に比較的うすい透水層があり、その上に粘性土がのつていて、これらの層が全体として傾斜して斜面をなしている場合、降雨が長時間継続すると、透水層中へは奥の方から水が浸透してこの層内に水が充満して被圧水に近い状態となり、上層中にも自由水面が生ずるが、この時に斜面全体の安定的変形が徐々に生じ、この変形がある限度に達すると、大きい土塊が一挙に滑動を開始する。その途中で局部的浸食により浸透水が地表へ流出すると、水压低下により斜面全体には安定化の傾向をとるもの
- (10) 断層破砕帯、亀裂、節理、などの発達した基岩中へ浸透した雨水のために水压を受けて崩壊するもの。特に岩盤にもともと生じている割れ目の状態、就中割れ目の面の方向と傾斜などと斜面の表面のそれとの相対的關係により、基岩そのものが、積水の集合体や玉ねぎの皮状になっているときは、法面に近いまゝとなつている岩塊が水压でとれるとか、玉ねぎ状の岩片と斜面の表面とが平行になつていて、岩片がはがれるようにつぎつぎに剝離することによるもの
- (11) 50度を超える急勾配の斜面では、表面から雨水の浸透によつてある厚さの水で飽和に近い状態となると同時に剪断抵抗力を失うと同時に液性化することにより、表層の雨水の浸透した部分が崩落することに起因するもの
- (12) 斜面の裾に溪流などが流れている場合、豪雨によりその流量と流速が増大したとき、水流の衝突する溪岸が軟弱な地質や地層であると、水流による側方浸食を受けやすく、斜面下部が洗掘されるとその上部に続く斜面は安定を失つて崩落するもの
- 以上の諸項目のうち、特に花崗岩地帯の斜面崩壊に関しては、(1)～(6)、および(7)、(11)、(12)などが関係している。これらの諸項目はこのような斜面崩壊に対して単独に作用するのではなく、多くの項目が同時に作用するのであり、それらのうちで最もすみやかにしかも強力に作用するものが結果的には目立つのである。
- これらの諸項目をよくみると、斜面条件が大きく崩壊に關係があることが分る。ここに斜面条件というのはいづ述べた最初の三条件を包括したものをさす。

3 花崗岩地帯の斜面条件と崩壊との関連

(1) 斜面の表土層の場合

花崗岩が基岩をなしているものの表層が「マサ土」で蔽われているが、この表土層が豪雨の際に崩壊する場合を考える。降雨が斜面の表面から表土層内へ鉛直浸透が行われると同時に表面流出が行われるのが普通である。この場合、降雨強度と表土層の浸透能の大小が支配的になっている。この両者を同じ mm/hr などと表すと、その差が表面流出 (overland flow) の流量を支配する降雨余剰である。なお、この流量は斜面の集水面積が大きいほど、降雨余剰が大きいほど、大きくなるのである。従って、斜面の表面条件としてはその等高線が低い方へ向って凹状を呈していて、しかもその表面が大きくてしかもその斜面の裾近くが狭くなっているような時ほど、強い雨が降ると、斜面の裾に近付くにつれて流量が急増し、水深もまたかなり増大する。このようになると、鉛直浸透水量も裾に近付くにつれて大きくなる。表面が平面の場合でも程度の差こそあれ、同様な傾向がある。斜面表面からの雨水の鉛直浸透の湿潤前線 (wetting front) が表土層を通過してその下の花崗岩の表面に達すると基岩に割れ目や破砕帯の著しいものが存在しない限りにおいては、一般に基岩の浸透能は表層の透水に比して小さいので、これらの差に相当する流量が両者の境界面上の表層内に貯留されることになるのである。この際には境界面の境界条件が貯留せられた浸透水流を支配することになるが故に、上述した表面の境界条件が示す傾向と同じような傾向が浸透水深に対しても成立する。また、地被植物の種類によっては表層もさらに浸透能の比較的大きく上層と透水が比較的小さい下層とに分かれることもあり、このような時にはこれらの境界および下層と基岩との境界に透水を阻害する貯留が行われる。

鉛直浸透が終了するまでに要する時間は表層の透水係数や浸透のポテンシャル勾配、降雨特性、表土層厚によって決まる。これらの要素のうち前者二者が大きいほど、降雨強度が大きい雨が長時間継続するほど、土層厚が小さいほど、上記時間は短い。この場合、表土層の土の剪断抵抗力の減少、重量の増加、基岩と表土層の境界面の摩擦抵抗力の減少などが起ることは勿論である。ところが2で述べた「パイピング現象」が花崗岩地帯の山腹では上述の貯留せられた浸透水の自由水面が表面に浸出する所で発生しやすいのである。浸出線で浸出する流速が大きいほど、マサ土の組成がルーズで骨かくがしつかりしていないものほど上記の現象が発生しやすい。従って、普通の山腹の場合、浸出線が生ずるに至らぬ間に山腹が崩壊を生ずることは、雨水の表流により斜面が浸食崩壊を生じぬ限りは、ほとんどなく、浸出線が生じて「パイピング現象」が発生して崩壊するものが圧倒的に多い。もつとも、斜面勾配が50度を超える急勾配、表土層の厚さが小さいものでは2、(3)、(6)などの機構で崩落することが多いが2(4)の機構による崩壊が普通は最も多い。

表流水による法面浸食はげしく起ることは裸地斜面の時であつて、植生で蔽われている限りはつぎのような場合の外は少い。天然斜面では表面が表流水の流線が集りやすい地形条件をなしている場所、浸透水により崩落して裸になった斜面、斜面の途中に道路、小径、ゴルフコースやホール、宅地、などの平地を設け、かなり広い集水面積に降った雨水を平地で受け、この水がその平地の一局部から集中的にその下方の斜面上を流下する場合、などである。この場合は大きな流量が斜面上を集中流下するが故に、普通の植生では浸食防上に役立たなくなる。「マサ土」はこのような場合は比較的耐食性が少く、すみやかに浸食、特に雨裂状浸食が発生しやすい。砂質のものほどこの傾向が大きい。

花崗岩といっても、領家型、粗粒といったものの風化した土は比較的耐食性に乏しい。中粒から細粒に進むにつれて耐食性は増す傾向がある。特に笹、竹などが繁茂している山腹斜面は表流水の浸食作用に対して非常に強くて全然浸食は生じない。しかる一方、このようなものがあると地下茎および根が縦横に発達するため土壌自身が非常に多孔性の透水性の大きいものとなるが故に雨水の透水性が著しく増大し、地下茎や根の及ばない範囲の土の透水性に比してこの部分の水が著しく大きくなる。

従つて強雨の際には、このような表層を浸透した雨水が根茎の及ぶ領域とその下層領域との境界に一時貯留せられることになり、その水の自由水面が上昇して斜面の表面へ浸出することにより上記の植物の生えている表土層の上層が前記のような機構で時間的にはよく崩落し、つづいて表土層の下層とその下の花崗岩の境界面上に浸透した雨水が貯留されて、それが上記と同様の機構で崩落する。

(2) 斜面を構成している基岩の場合

山を構成している基岩である花崗岩自体が造山運動などのために断層、節理、破砕、亀裂などがよく発達している地域とあまりこれらが発達していない地域がある。六甲山系の花崗岩には他の地域に比して非常に上記のものが発達している。断層はしばしば粘土化していて透水性の悪い壁状を呈していて遮水壁の役目をするところがあるが、また岩塊が破砕していて非常に透水性のよい場合がある。断層が斜面と交叉したり、斜面の表面に斜面と平行して走つていたりするが、いずれにしても斜面にこのようなものが出現した部分は豪雨時に崩壊しやすい。節理や亀裂が縦横に発達していて、そのために基岩が小さい岩塊の集合体や厚さの薄い薄片状のものの集合体となつていることがある。また、数米程度の大きさの岩塊の集合体の場合もある。このような場合に、斜面の表面と節理や亀裂の面がお互に平行でしかも斜面の方へ傾つて倒れかかっているようなときには豪雨時にこのような隙間に水が多く浸入して水が貯留されて水圧が岩塊に作用し、また岩塊の下部が局部的に粘土化していて下方へ水がぬけないと、斜面の裾の岩塊がひとりでぬけ出しやすく、これがきっかけとなって大きく岩塊が多く崩落しやすい。また、切取りなどを行つて、その時に生ずる切取面と節理や亀裂の面との相対的な走向や傾斜などの関係が、上記のように崩壊が生じやすい条件のときも、もともとばらばらの岩塊は崩壊の可能性が大きい。岩塊が崩壊したときの岩塊の形成する mound の安定角は水平と約40度である。このように基岩が崩壊すると、その表土層も勿論崩壊する。上記のような基岩の状態は地表面にあらわされている岩塊などの状況からおおよその見当はつくのである。

このように基岩がわれ目に富んでいると、基岩中への透水が容易でその量も大きい。われ目の状態と斜面の相対的關係などにより、われ目が存在していても基岩が崩壊しない場合も多い。このような時には表土層の浸透能と基岩の透水とがほとんど変わらなくなり、これらの境界面上に強雨時に雨水が貯留せられることもほとんど生じ難くなるが故に、表土層の崩壊も生じ難いのである。

4. 花崗岩地帯の斜面崩壊の予想と予防

3で述べたように斜面条件が斜面崩壊に重大な關係を有しているが、これに加うるに、降雨条件もまた極めて密接な關係を有しているのである。降雨の hyetograph を描いて、そのグラフに表土層ならびに基岩の両者の浸透能を同一の単位を用いて記入して、いま描いた二本の浸透能一時向曲線の間にはさまれた hyetograph を一降雨について累計した値を、表土の間隙率と雨水浸透後と浸透前の飽和度の差を乗じたもので除した値が、雨水が基岩と表層との境界面上に貯留される鉛直水深である。

この水深は斜面の上手と裾とにより表土層の浸透能が異り、裾に近い所ほど浸透能が大きいため水深も裾に近づくにつれて大きくなる。また等高線が低い方へ向つて凹状を呈している斜面ではこの傾向が強いのである。また、表土層の浸透能—時間曲線より下方の *hyetograph* の面積を一降雨について累計したものは、先の降雨で表土層中へ鉛直浸透した雨であるが、この雨量がどれだけの表土層の鉛直厚さを水で満たすかは、この値を前記の値で割れば求められる。この値が表土層全体の鉛直厚さよりも小さい時には *wetting front* が基岩に達しないうちに降雨がやむことになり、前記のような計算法では基岩上の貯留水深は求められなくなり、このような方法で求めた値よりも貯留水深は小さくなる。表流する雨水の流量はやはり降雨余剰と斜面の集水面積および流速時間などから計算しうる。表土層中への雨水の鉛直浸透時の *wetting front* の進行距離と時間、降雨停止後の浸透水の鉛直下方への運動、一時休止後再降雨時の表層内の水の運動などは筆者がさきに発表²⁾しておいたが、このような計算法を用いて *hyetograph* が与えられ、さらに表土層などの浸透能が分ると、特に *wetting front* や *air front* などをよく把握しうる。このようにして降雨強度とその継続時間とから *front* の位置が判明し、表土層の鉛直厚さにより、表土層を貫いて *front* が基岩に達するか達しないか、達した後に貯留が行われるか行われないか、行われるとすればどの位の水深までどの位の時間に達するかなどを、基岩の浸透能などの資料が分れば求めうる。このようにして、もし貯留水面が表面に出現するか否かを、水面曲線と斜面の表面曲線とより求める。実際には三次元であるから表面と水面とかどのような線と交わるかを求めることになる。この両面交線の形状と交線附近の土のしまり具合および耐食性、さらに水面勾配と形状および自由水面状態などから、「パイピング現象」が発生するか否か、発生した時にはどのような形状ならぬに否かの表層崩壊が生ずるかを求めるのである³⁾。この場合に崩壊する土塊は水面と表面との間にはさまれ、基岩と水面との交線より水平と45度の傾きをなす平面を引き先の間にはさまれたものをとる。崩壊土塊の最上端は基岩上の浸透水の水深が小さくなり数に幾度になるところとする。このようにして、崩壊の位置は勿論、形状、広さ、土量の予想が可能となる。表流水による斜面の崩壊の予想は表流水が極めど多く集中しやすい場所、地被植物が密生していない場所をさがし、降雨余剰とその継続時間、斜面勾配と土質とから、行いうる。土の耐食性に因してはたとえ筆者が発表した噴流を斜面にあて洗掘深を測定する方法⁴⁾などがよい。基岩の崩壊の予想は斜面の表面にあらわれた岩石の露頭の有様やその割れ方、断層の状況などを調査しておけば可能である。

予防法は崩壊の機構が把握できれば、自ら樹立しうるものである。表層が崩壊するものの対策としては、浸透水の貯留さされたものの水面が地表面に斜面のどこからも浸出しないように斜面に帯状に基岩に達する溝を掘り、石礫をつめて上部は埋戻し、浸透水を集めて、要所からすみやかに表面へ排水し、さらに人工的に土被りを増加するため、上記石礫層をまたいで擁壁を設けて盛土を入念に行うことは効果的である。また斜面の表面を緑化する場合に、種子をまいた上をテトロンなどの繊維積層体で蔽い、その端を斜面に埋めこんでおく方法も、この積層体が表流水に対して土壌を保護するばかりでなく、浸透水や雨水の排除にかなり効果的であることから、このような工法も法面の安定の一工法として特に表流水の集中しやすい場所には推奨しうるもののひとつである。その他の予防法については講演時の中づる。

参 考 文 献

- 1) 田中 茂：山地斜面の崩壊箇所予想について，建設工学研究所報告 No.4, p.p.147~162, 1963
- 2) 田中茂ほか：浸透ならびに土砂輸送に関する研究，全 上 No.3, p.p.249~270, 1961
" : Researches on Infiltration of Rainwater " No.9 p.p.103~114, 1966
" : 土壌間隙空気の圧縮を伴う水の浸透速度に関する研究，オ10回水理講演会講演集
p.p.15~20, 1966
- 3) 田中 茂：芦屋川流域崩壊予想土砂量の調査について，芦屋市，1963
- 4) 田中 茂：山腹斜面の安定に関する研究，オ2回災害科学総合シンポジウム論文集，p.p.117~118,
1965