

気候変動に伴う流域内の斜面崩壊危険度の変化

藤田正治・大塩清太郎*・堤大三

* 西日本旅客鉄道株式会社

要 旨

斜面崩壊の予測は一般的に降雨データに基づいて行われる。ある地域内で斜面崩壊の発生を判定する手法として、たとえば時間降雨量と積算雨量の平面上に崩壊発生限界線を決め、降雨量はその線を越えるか否かで判定する方法が使われるが、先行降雨量によって限界雨量は異なるし、その地域内に崩壊が発生するか否かだけの情報しか得られない。気候変動に伴い継続時間が長く、積算雨量の大きな豪雨の発生が増加すると、限界雨量を超えた後の連続する斜面崩壊のプロセスの情報が警戒避難システムに重要である。本研究では、実斜面を対象にして、様々な地形条件、降雨条件のもとに斜面崩壊シミュレーションを行い、個々の斜面の土層内水分量がその斜面の崩壊発生を判定する指標として適切であることや崩壊規模と降雨特性の関係を示したうえで、この指標や解析結果を重要な情報とした斜面崩壊プロセスについて、気候変動による将来の降雨条件を想定して検討する。

キーワード：斜面崩壊、気候変動、避難警報、崩壊危険度

1. はじめに

2009年8月7日から9日にかけて、台湾では台風MORAKOTによる異常豪雨により甚大な土砂災害が発生した(Chjeng-Lun Shieh, et al., 2009)。降雨継続時間は約90時間、その間の平均降雨強度は30mm/hrであり、強い雨域は台湾の南半分を覆うほど広範囲であった。総雨量は3,000mmにも達し、3日間降雨量は世界記録に匹敵するものであった。高雄県甲仙郷小林村では、降雨開始後、土石流による橋梁の破壊、土石流の氾濫堆積に起因する浸水により、村外への避難が困難な状況下で裏山に深層崩壊が発生し、崩壊土砂が集落を直撃しただけでなく、その土砂が河道を閉塞し天然ダムを形成した。その約40分後、この天然ダムが決壊したため洪水が発生し、結果的に170軒近くあった集落を2軒だけ残して跡形も無く壊滅した。このような複合土砂災害により一つの村が壊滅した。

気候変動により降雨の極端現象が増加することが危惧されており、とりわけ上述のような積算雨量の極めて大きい豪雨による複合土砂災害に対する警戒避難体制を整備することが重要となっている。これまで、土砂災害の予測は降雨量の基準値に基づく場

合が多い。たとえば、斜面崩壊の予測方法には、物理モデルによるもの(例えば、道上, 小島, 1981; Yagi, Yatabe, Yamamoto, 1983; 高橋, 中川, 1986; 道上, 藤田, 1990)や統計モデルによる方法(例えば、高橋, 松岡, 瀬尾, 荒木, 古川, 水山, 2000)などがあり、どの方法もある程度斜面崩壊を予測することができ、それをもとに基準雨量が決定できる。しかし、避難する側にとってみれば、基準値を超えてから地域の中で、いつ、どのような形態の土砂移動現象がどのような規模で発生するのを知りたい。そのためには、個々の斜面の崩壊危険度を表す指標と崩壊に対する限界値の提示およびそのモニタリング手法の開発が重要である。

本研究は、土砂災害を引き起こす現象のうち斜面崩壊に着目し、まず、斜面崩壊の危険度を表す指標に関して数値シミュレーションに基づいて検討する。手法には、前述したような降雨浸透解析と斜面安定解析から崩壊予測するモデルがあるが、堤, 藤田, 林(2007)も飽和不飽和浸透解析と斜面安定計算からなるモデルを提示しており、地盤情報を適切に評価することでより精度のいい解析が可能となっている。そこで、本論文では、妥当性が検証されている堤らの解析手法を使う。つぎに、気候変動の結果想定さ

れるような豪雨に対して、この指標や解析結果を使った流域内の連続する斜面崩壊プロセスや崩壊特性について述べる。

2. 斜面崩壊の危険度を表す指標

2.1 現在の指標

降雨時の斜面崩壊の発生は斜面内の地下水位に大きく支配されるので、通常、その危険度は地下水位の変動と関連の深い降雨量に基づいて行われる。降雨特性値には色々な時間スケールの雨量や実効雨量などが使われるが、特性値として積算雨量と時間降雨量を選んだ場合、両者の平面上に斜面崩壊限界線（CL）を引き、実績降雨量を使って描かれるスネーク曲線がこの限界線を越えるか否かで斜面崩壊の発生の判定が行われる。Fig. 1はその概念図を示したものである。同じ地質の地域に対して、地域内の斜面崩壊の実績から一つのCLが設定され、降雨の状態が R_C になりこの線を越えると、この地域のどこかで斜面崩壊が発生すると予想される。しかし、より効果的な避難システムを構築するためには、降雨イベントが終了する(R_E)までに、その地域全体でどのような規模の崩壊がいつ起こるのかを予測することが重要である。気候変動によって気象の極端現象として積算雨量の大きな豪雨が発生するようになれば、 R_C から R_E までの間が長くなり、ますますその間で何が起こるのかを把握しておく必要がある。地域内の各斜面の斜面崩壊に対する危険度の予測が可能になれば、時々刻々変化する土砂移動の状況、斜面崩壊の発生順番、崩壊規模などの重要な情報発信と連動したより高度な避難システムの構築が可能になる。本研究では、個々の斜面の崩壊に対する危険性を表す指標について、数値シミュレーションにより検討する。

2.2 シミュレーション方法

本研究では、斜面方向と鉛直方向の2次元平面に対して斜面崩壊のシミュレーションを行う。シミュレーションには、Richards式に基づく降雨浸透解析法および簡易Janbu法からなる斜面安定解析法を用いる。すべり面は動的計画法（DP法）を用いて探索する。すなわち、斜面内の想定されるすべり面の中から、DP法を用いて最少安全率の面を探索し、もしその安全率が1以下になる面が探索されたときそれをすべり面とする。解析では、斜面上流端、土層底面では不透水条件、斜面下流端では大気開放とし浸透水が排出されるものとした。計算に必要なデータは、基岩勾配、斜面勾配、斜面長、土壌水分特性曲線、飽和透水係数、内部安息角、粘着力である。このシミ

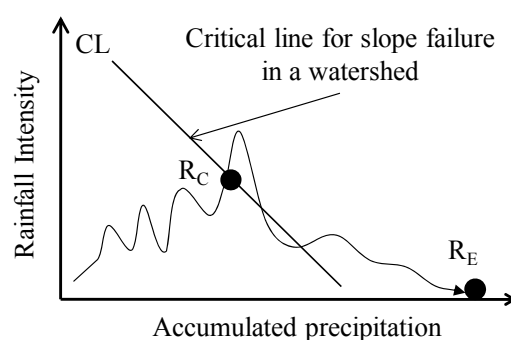


Fig. 1 Occurrence of slope failures during a rainfall event



Photo 1 Collapsed slope in Senoguchi, Taketa city, Ohita prefecture

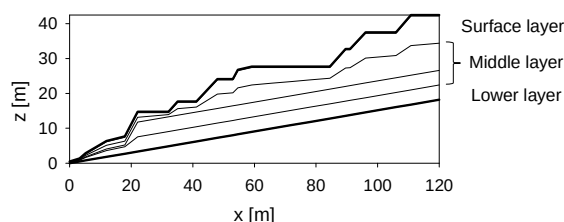


Fig. 2 Longitudinal slope surface profile and the layer structure in Senoguchi, Taketa

Table 1 Hydraulic characteristics of the soil of the slope in Senoguchi, Taketa city

	Surface	Middle	Lower
θ_s [m ³ /m ³]	0.646	0.595	0.682
θ_r [m ³ /m ³]	0.477	0.441	0.577
ψ_m [cm]	-792	-595	-797
σ [-]	0.875	1.36	1.02
K_s [cm/s]	2.42×10^{-2}	3.32×10^{-3}	5.69×10^{-4}

ュレーション手法については、堤、藤田、林(2007)に詳細に述べられている。また、この手法の妥当性についてもこの論文で検証されている。

2.3 対象斜面

地質の異なる2つの実斜面を対象として斜面崩壊シミュレーションを行い、斜面崩壊危険度の指標について検討する。一つの斜面は大部分県竹田市瀬ノ口

の火山堆積物からなる比較的厚い土層の斜面で、もう一つは山口県防府市真尾の花崗岩からなる比較的浅い土層の斜面である。

竹田市瀬ノ口の斜面は、2005年の台風14号による既往最大総雨量の豪雨のとき深さ15mで崩壊した。Photo 1は竹田市瀬ノ口の対象斜面の崩壊後の様子を示したものである。この斜面の崩壊前の斜面縦断形状と基岩形状はFig. 2のようである。地層は火山噴出物の堆積年代によって3層に分かれており、Fig. 2には表層、中層、下層の境界の位置も示されている。表層は新規ローム層、中層はAso-4火砕流堆積物、下層はAso-3火砕流堆積物で形成される硬質粘土である。Table 1は各層内の土の水利特性値を示したものである。ここに、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 ψ_m は有効飽和度が50%のときの圧力水頭、 σ は孔隙径分布の標準偏差、 k_s は飽和透水係数である。また、各層で土質強度定数は異なると考えられるが、通常値の範囲で土質強度定数を変化させて崩壊シミュレーションを行った結果、すべての層で内部摩擦角 $\phi = 0.30\text{rad}$ (17deg)、粘着力 $c = 1.96 \times 10^4 \text{N/m}^2$ ($2.0 \times 10^3 \text{kgf/m}^2$)と仮定しても崩壊現象がよく説明できた(堤・藤田・林, 2007)。本来は異なる値を用いるべきであるが、結果的に崩壊現象が説明できたので、本研究でもこの値を全層に対して用いる。

Table 1の各土層の飽和体積含水率および残留体積含水率を見ると、それらが非常に大きいことが分かる。これは、空隙率の大きな土層であると同時に、圧力水頭が低下しても高い含水率を維持することを示している。また、一般的な不攪乱森林土壌の ψ_m が $\psi_m > -200\text{cm}$ であるのに対して、瀬ノ口の値は非常に小さく、土層内に含まれる空隙径は小さい。一方、表層、中層、下層の透水係数を降雨強度に換算すると871mm/hr、120mm/hr、21mm/hrであり、とくに表層と中層は空隙径が小さいにもかかわらず飽和透水係数は大きい。以上のことから、下層を除いて、この斜面の土層は高い保水性と透水性を有する土質である。

防府市真尾の斜面は2009年の梅雨性の豪雨により表層崩壊した。Photo 2は防府市の対象斜面の崩壊の様子を示したものである。この斜面の崩壊前の斜面縦断形状と基岩形状はFig. 3のようである。土層の厚さは約2.5m程度である。Table 2は各層の水利特性を示したものである。また、内部摩擦角および粘着力はマサ土斜面における値を参考に、 $\phi = 0.58\text{rad}$ (33.5deg)、 $c = 0.49 \times 10^4 \text{N/m}^2$ ($0.5 \times 10^3 \text{kgf/m}^2$)と仮定する。Table 2より、竹田市瀬ノ口の斜面と比べると、飽和体積含水率、残留体積含水率ともに小さいが、両者の差は竹田市瀬ノ口の斜面より大きく、単位体積当たりの水の貯留量は竹田市瀬ノ口の斜面より多い。



Photo 2 Collapsed slope in Manao, Hohfu city, Yamaguchi prefecture

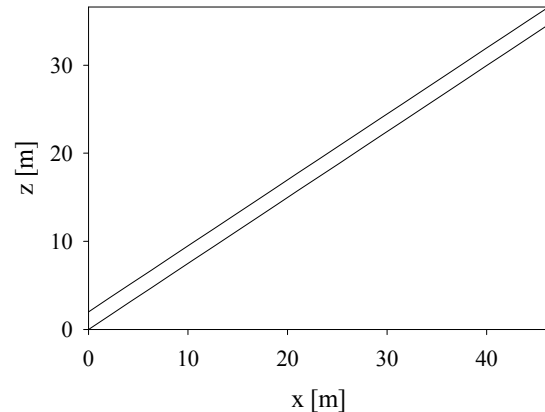


Fig. 3 Longitudinal slope surface profile and the layer structure in Manao, Hohfu city

Table 2 Hydraulic characteristics of the soil of the slope in Manao, Hohfu city

	Soil layer
$\theta_s [\text{m}^3/\text{m}^3]$	0.387
$\theta_r [\text{m}^3/\text{m}^3]$	0.128
$\psi_m [\text{cm}]$	-91
$\sigma [-]$	2.27
$K_s [\text{cm/s}]$	6.71×10^{-3}

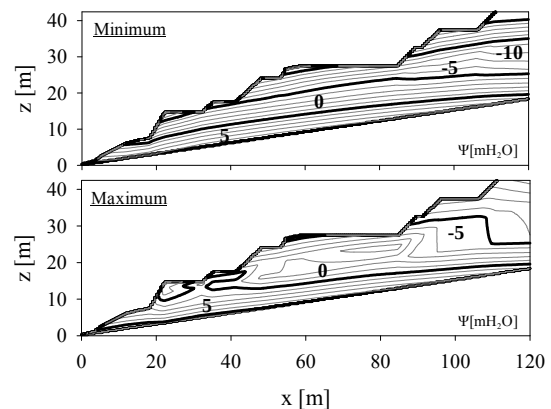


Fig. 4 Initial pressure distributions for minimum water content and maximum water content

2.4 斜面崩壊危険度の指標と限界値

同じ斜面であっても先行降雨条件の違い、すなわち初期水分状態の違いによって崩壊発生のための降雨条件は異なることは当然である。言い換えると崩壊に必要な積算雨量は先行降雨条件によって異なる。そこで、2.3で述べた2つの斜面に対して、異なる初期水分状態を仮定して、一定降雨強度の降雨を与えたときの斜面崩壊のシミュレーションを行い、積算雨量に代わる適切な指標がないか検討する。降雨強度は10mm/hrから100mm/hrまで10mm/hr刻みで増加させた。

解析開始時の土層内の初期水分状態は、以下のようにして設定する。まず、計算の安定のため土層に微量の降雨を与えた後5日間無降雨状態にし、その後、竹田市瀬ノ口の斜面では2004年9月1日から2005年9月1日までの実測降雨を与え、2005年の春期から梅雨期（降雨期）の間で斜面土層内水分量が最小になるときと最大になるときを探し、それらを初期条件にした。ここに、斜面土層内水分量とは斜面土層内に貯留されている水の体積を表す。Fig. 4は斜面内の初期圧力水頭分布を示したもので、上図は初期水分量が少ない場合、下図は多い場合に対応する。防府市真尾の斜面でも同様に、2008年7月19日から2009年7月19日までの実測降雨を与え、2009年の春期から梅雨期（降雨期）の間で水分量が最小になるときと最大になるときを探し、それらを初期条件にした。

まず、降雨強度一定の条件で崩壊発生に必要な積算雨量について考察する。Fig. 5は竹田市瀬ノ口の斜面に対して、2つの異なる初期水分状態から崩壊発生に必要な積算雨量を求めた結果を示したものである。当然のことながら初期状態でより湿潤状態の方が少ない積算雨量で崩壊が発生している。また、降雨強度が約40mm/hrより大きいとき、ほぼ一定の積算雨量のとき崩壊しているのに対し、20mm/hrより小さい時はより多量の降雨量が必要であることがわかる。Fig. 6は降雨強度に対する崩壊時の斜面土層内水分量を示したものである。斜面土層内の水分量分布は降雨強度に支配されるので、崩壊発生時の斜面土層内水分量は降雨強度により若干異なる。しかし、Fig. 5と比べると、初期水分状態と関係なく斜面土層内水分量が31,750m³～31,900m³程度のとき崩壊が発生している。換言すれば、この斜面は31,750m³～31,900m³程度の地下水をためるだけの耐力を持っていると評価できる。

Fig. 5から降雨強度が大きい時、積算雨量がある一定の限界値を超えると崩壊が発生しているが、初期水分状態によってその限界値は異なることがわかる。また、降雨強度が小さい時、限界値は大きくなっている。降雨強度がおよそ20mm/hrより小さい時、とく

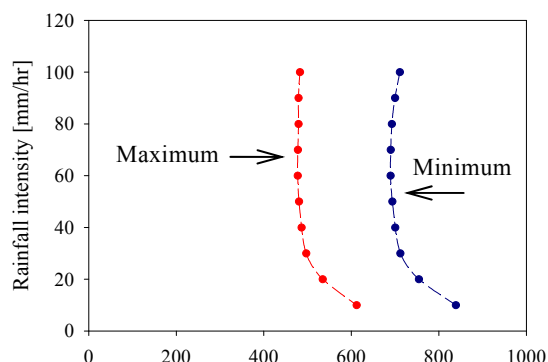


Fig. 5 Critical cumulative rainfalls for slope failure under constant rainfall intensity (Senoguchi)

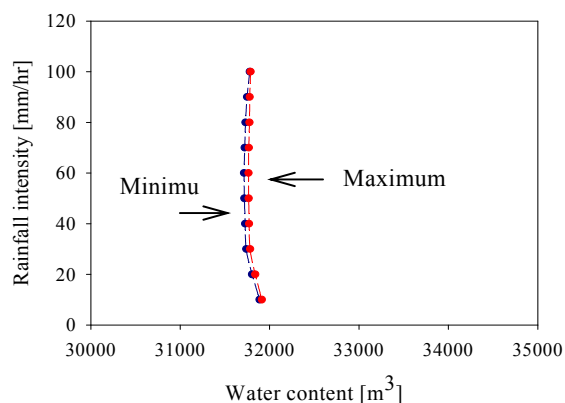


Fig. 6 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Senoguchi)

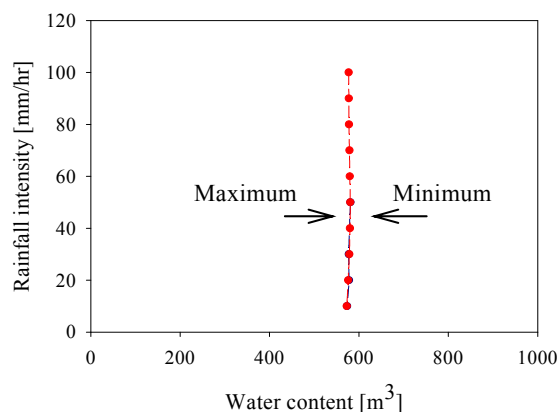


Fig. 7 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Manao)

に斜面崩壊発生のために多量の降雨量が必要になるのは、土層の透水性と関係している。すなわち、前述したように下層の透水係数は21mm/hrと小さいが、降雨強度が20mm/hrより小さいと降雨の多くは下層に浸透することができる。したがって、積算雨量が同じでも下層部に貯留される水の割合は大きい。そ

のため、崩壊発生までにより長い時間を要し、斜面からの流出流量も多くなるからである。これに比べて、斜面土層内水分量の崩壊発生時の値はほぼ一定であり、崩壊発生の便利な指標になりえる。

Fig. 7は防府市の場合の崩壊時の斜面土層内水分量を示したもので、この図においても斜面土層内水分量がほぼ一定のとき崩壊が発生している。この図によると、この斜面は 580mm^3 程度の水を貯える耐力があると評価できる。崩壊発生時の飽和度は97%~98%であり、ほぼ土層が飽和した状態で崩壊しているので、水分量がほぼ一定で崩壊している。

以上のことから、各斜面は崩壊に対してほぼ一定の水分量を貯留する耐力があることが示唆され、斜面土層内水分量が崩壊予測の有望な指標となることが分かる。土層の飽和度や含水率も同様に指標として用いることができるが、住民にとって水量で表した方が分かりやすいと考え、ここでは斜面土層内水分量を崩壊発生の指標として用いる。

3. 指標限界値に及ぼす地形条件の影響

内田、森ら(2009)は、地形データや土層データの収集が崩壊予測精度に与える影響について検討しているが、地形・地盤条件のデータの量と質が崩壊シミュレーションの結果を左右することは言うまでもない。これらのパラメータが崩壊発生にどのように影響するかは重要な研究課題であるが、ここでは、それについて深く研究するものではない。ここで考えている避難システムの構築においては、異なる斜面勾配、基岩勾配、斜面長、土層厚、土質特性などに対する崩壊発生の限界斜面土層内水分量を知ることが基本となる。実際にこれを行うことは容易ではないので、ここでは、避難システムへの情報として具体的にイメージするために、限定的ではあるが、基岩勾配、斜面勾配、斜面長をパラメータにして崩壊シミュレーションを行い、限界斜面土層内水分量や崩壊規模、発生時刻がどのように異なるのかを例示的に示す。

3.1 基岩勾配の影響

竹田市瀬ノ口の斜面の表面形状は階段状になっているが、Fig. 8のように、これを直線化した斜面に対して斜面崩壊シミュレーションを行う。基岩面勾配の影響をみるために、Fig. 8に示すように、斜面勾配は同じにして、基岩勾配を 16.9° 、 14.2° 、 11.4° 、 8.6° 、 6.5° 、 4.3° 、 2.2° に変化させる。なお、元の基岩面勾配は 8.6° である。基岩から地表面までの層厚は増減するが、各層の土層厚もそれと同じ比率で増減させた。降雨は、2.4で説明した無降雨状態か

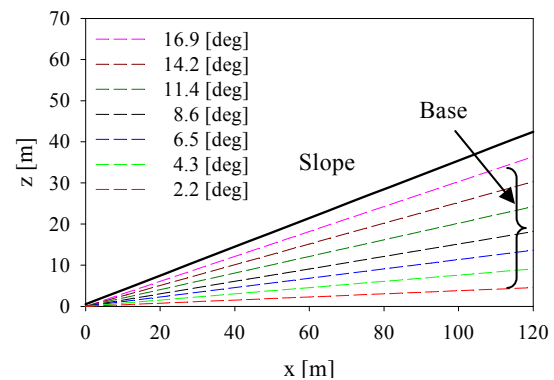


Fig. 8 A linearly approximation of the surface profile and the bed rock locations (dotted lines are bed rock) (Senoguchi)

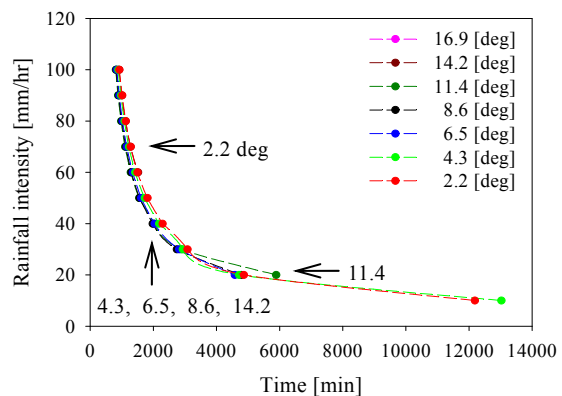


Fig. 9 Time necessary for slope failure under Constant rainfall intensity (Senoguchi)

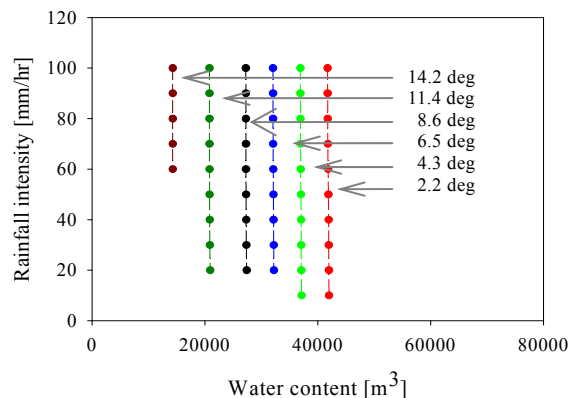


Fig. 10 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Senoguchi)

ら、降雨強度を 10mm/hr から 100mm/hr まで 10mm/hr 刻みで増加させて与えた。ここでは、基岩面勾配の変化が斜面崩壊に及ぼす影響として、崩壊発生に必要な継続時間と崩壊発生時の斜面土層内水分量に着目する。

まず、基岩面勾配が 16.9° の場合には崩壊が発生しなかった。これは、土層厚が薄く、自重が軽いためであると考えられる。崩壊が発生しうる危険斜面は基岩勾配の限界値は 14.2° から 16.9° の間にある

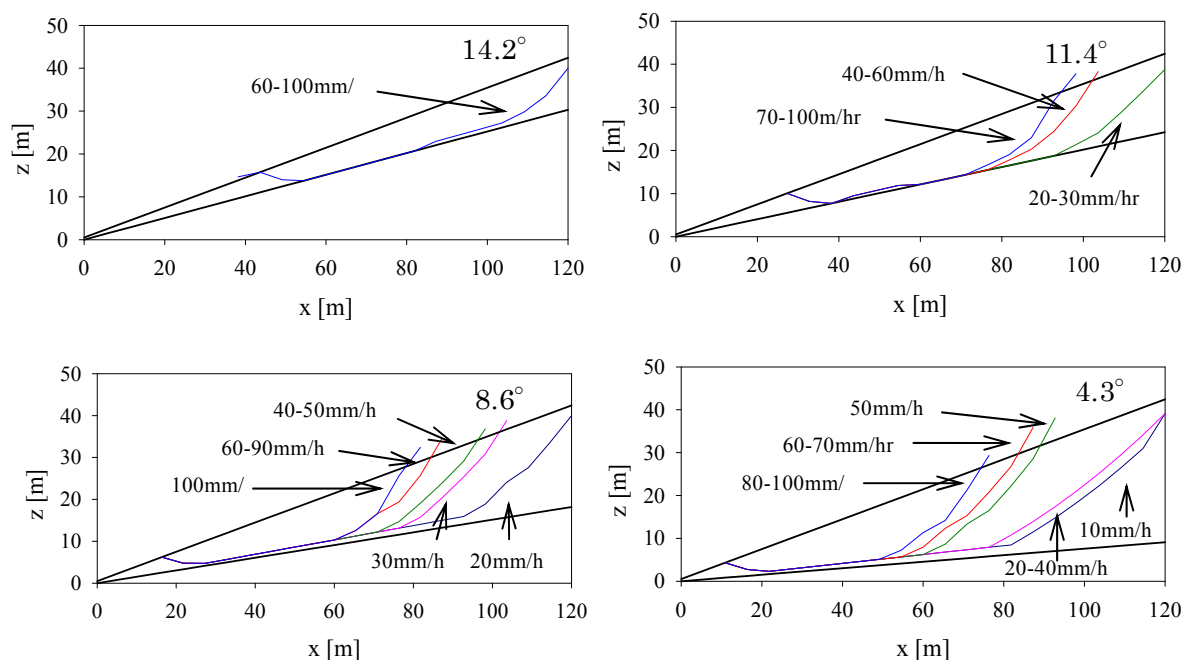


Fig. 11 Sliding surface profiles (Senoguchi)

ことが推測される。Fig. 9は、基岩面勾配を変化させた場合の崩壊発生に必要な継続時間を示したものである。この図から、降雨強度が高い降雨の方が崩壊発生までの時間が短いことが分かる。しかし、基岩面勾配が変化しても崩壊発生に必要な継続時間は変化していない。すなわち、斜面の基岩勾配が異なっても、ほぼ同時に崩壊が発生することになる。このこと自体はこの斜面の地盤特性の結果によるもので、一般的な傾向ではないと思われる。Fig. 10は、基岩面勾配ごとの崩壊発生時の斜面土層内水分量を示したものである。基岩勾配が一定であれば、降雨強度にかかわらず、水分量が一定のとき斜面崩壊が発生している。もちろん、この地盤条件では、基岩面勾配が急なほど土層厚さが薄くなるので、限界水分量は小さくなる。崩壊発生時の飽和度は、基岩面勾配が $2.2^{\circ} \sim 14.2^{\circ}$ に増加するに従って、約60.5%～62.8%に増加する。したがって、基岩面勾配が急なほど崩壊時の水分状態はより湿潤である。Fig. 11は基岩面勾配ごとの崩壊形状を示したものである。この図からわかるように、基岩面勾配が 14.2° の場合を除いて、降雨強度により複数の崩壊形状が現れている。傾向としては、降雨強度が大きい場合には崩壊規模が比較的小さく、降雨強度が小さい場合には崩壊規模が大きく、ほぼ斜面全体で崩壊が発生している。崩壊形状が降雨強度に影響される理由は、3層構造の土層の透水性の違いにある。前述したように、表層の透水係数は降雨強度に換算すると871mm/hrと非常に高く、中層では120mm/hr、下層で

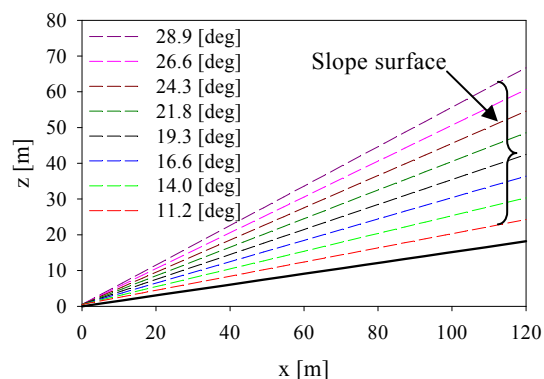


Fig. 12 A linearly approximation of the surface profile and the slope surface locations (dotted lines are slope surface) (Senoguchi)

は21mm/hrである。したがって、降雨強度が20mm/hr以上の場合、供給した雨のうち、下層にしみ込まずに中層または表層の透水性の良い層を流れるものが多くなる。したがって、斜面土層内の水分分布は全体的に斜面下方偏る。一方、降雨強度が20mm/hrより小さい時、供給された降雨は下層にまで十分浸透し、斜面上下方で水分状態はより一様になる。このことから降雨強度が大きい時は斜面下方がより不安定になり小さい崩壊が生じ、降雨強度が小さい時は反対に大きな崩壊が発生する。

3.2 斜面勾配の影響

3.1と同様の斜面崩壊シミュレーションを行うが、

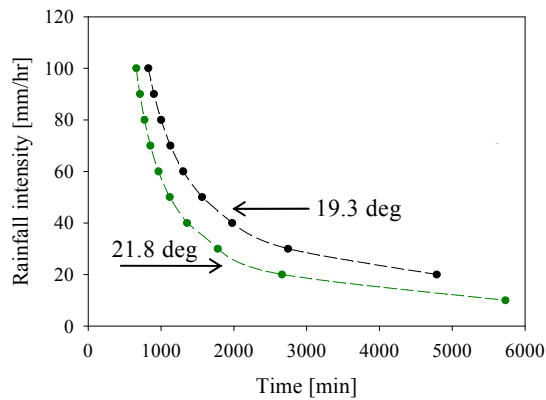


Fig. 13 Time necessary for slope failure for constant rainfall intensity (Senoguchi)

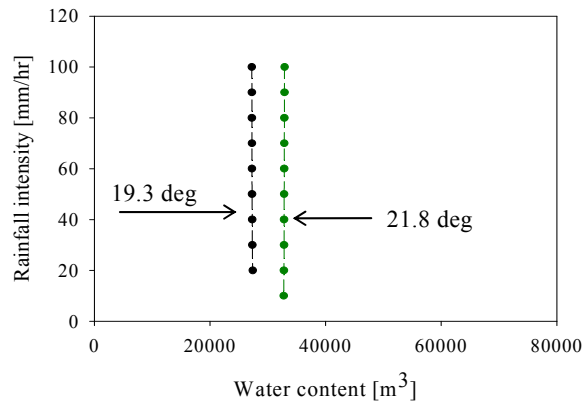


Fig. 14 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Senoguchi)

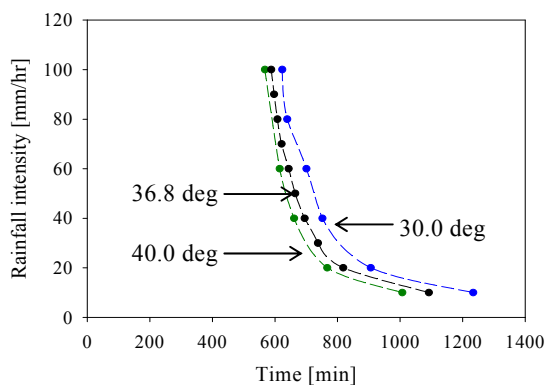


Fig. 15 Time necessary for slope failure for constant rainfall intensity (Manao)

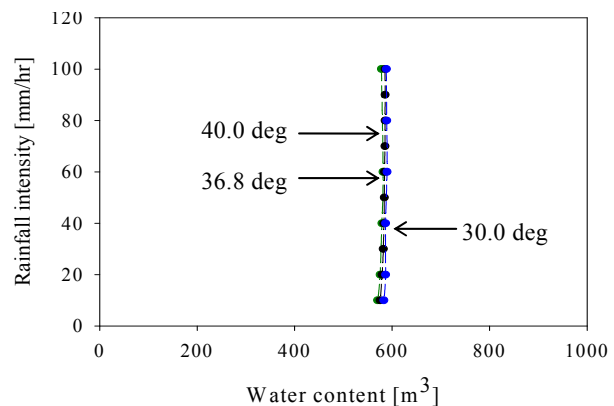


Fig. 16 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall (Manao)

ここでは、斜面勾配の影響をみるために基岩面は実斜面と同じにして、斜面の表層面勾配を 28.9° 、 26.6° 、 24.3° 、 21.8° 、 19.3° 、 16.6° 、 14.0° 、 11.2° に変化させる。Fig. 12に解析に用いた斜面形状を示す。なお、実斜面の表層面勾配は 19.3° である。各層の厚さおよび降雨の与え方は3.1と同様である。

まず、表層面勾配が 28.9° 、 26.6° 、 24.3° の場合には解析開始の段階で安全率が1.0を切っており、自立できない斜面であることがわかった。また、表層面勾配が 14.0° 、 11.2° の場合には崩壊が発生しなかった。これは、土層厚が薄すぎるためと考えられる。

Fig. 13は、表層面勾配を変化させた場合の崩壊発生に必要な継続時間を示したものである。この図に示すように、降雨強度が同じとき、斜面勾配が急なほど崩壊発生までの時間が短い。すなわち、降雨強度が等しいとき、急勾配の斜面のほうが早く崩壊することになる。Fig. 14は、基岩面勾配ごとの崩壊発生時の斜面土層内水分量を示したものである。表層勾配が一定であれば、降雨強度にかかわらず、水分量が一定のとき斜面崩壊が発生している。また、表

層面勾配が緩いほど土層厚さが薄くなるので、限界水分量は小さくなる。

つぎに、山口県防府市真尾地区の実斜面の斜面勾配を 45° 、 40° 、 36.8° 、 30° 、 25° 、 20° 、 15° 、 10° 、 5° に変化させた。なお、実斜面の斜面勾配は 36.8° である。入力降雨は3.1と同じである。

まず、斜面勾配が 45° の場合には解析開始の段階で安全率が1.0を切っており、自立できない斜面であることがわかった。一方、斜面勾配が 25° 以下の場合には崩壊が発生しなかった。Fig. 15は、斜面勾配を変化させた場合の降雨強度と崩壊発生時刻の関係を示したものである。この図から、斜面勾配が急になれば崩壊が早期に発生することがわかる。Fig. 16は、斜面勾配を変化させた場合の斜面崩壊発生時の土層内水分量を示したものである。それぞれの斜面では、降雨強度に関わらずほぼ一定の土層内水分量で崩壊が発生している。このように、斜面勾配が急になるほど早期にかつ少ない降雨量で崩壊が発生することがわかる。

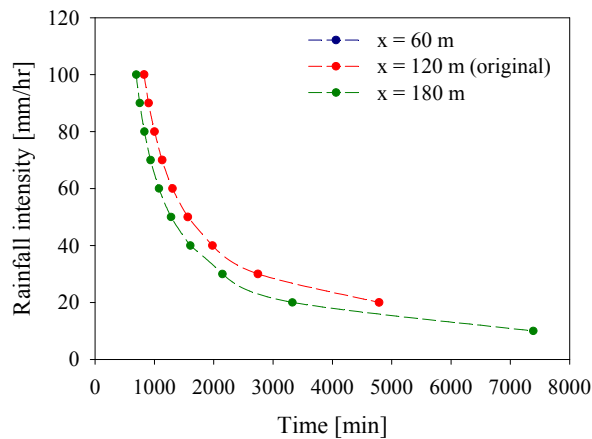


Fig. 17 Time necessary for slope failure for constant rainfall intensity (Senoguchi)

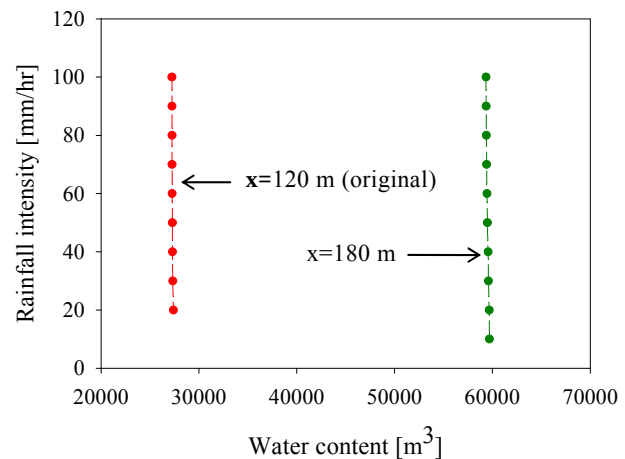


Fig. 18 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Senoguchi)

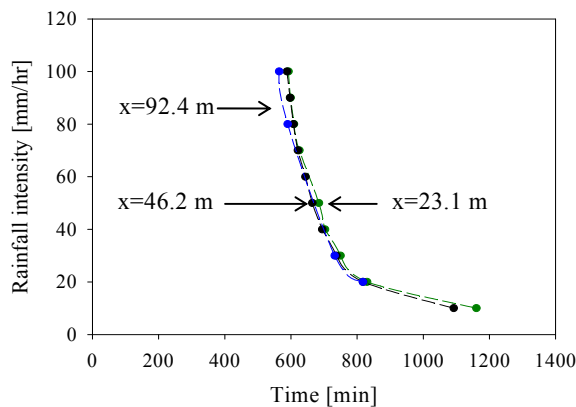


Fig. 19 Time necessary for slope failure for constant rainfall intensity (Manao)

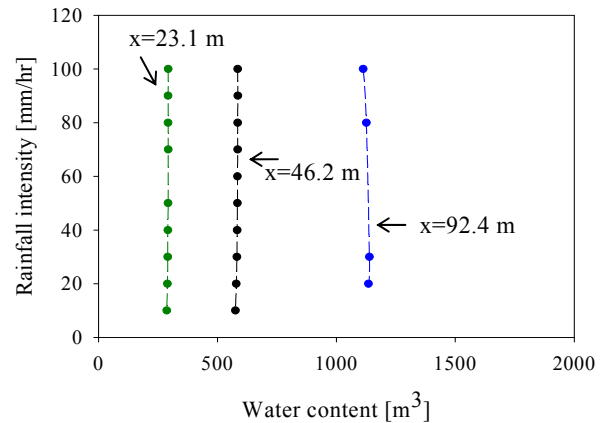


Fig. 20 Critical water contents in the slope layer for slope failure under constant rainfall intensity (Manao)

3.3 斜面長の影響

大分県竹田市瀬ノ口地区の地表面形状を直線にモデル化した斜面の斜面長を下端は固定して、同じ勾配で伸縮させることにより、60m, 120m, 180m, 240mの斜面長を作成した。なお、元の斜面の斜面長は120mである。このような斜面に対して、3.1と同様の斜面崩壊シミュレーションを行う。

まず、斜面長が60mの場合には崩壊が発生しなかった。これは、斜面長が短い場合には土層の体積が小さくなり、自重が減少するためだと考えられる。一方、斜面長が240mの場合には解析開始の段階で安全率が1.0を切っており、自立できない斜面であることが分かった。Fig. 17は斜面長を変化させた場合の崩壊発生に必要な継続時間を示したものである。斜面長が長くなると崩壊発生までの時間が短くなっている。とくに、降雨強度が低い降雨に対してはその差が顕著に現れている。Fig. 18は、斜面長を変化さ

せた場合の崩壊発生時の斜面土層内水分量を示したものである。それぞれの斜面では降雨強度に関わらずほぼ一定の土層内水分量で崩壊が発生している。

ついで、山口県防府市真尾地区の斜面の斜面長を0.5倍、1.0倍、2.0倍に変化させ、23.1m, 46.2m, 92.4mとする。Fig. 19は、斜面長を変化させた場合の崩壊発生に必要な時間を示す。斜面長が変化しても崩壊発生時刻あまり変化していない。Fig. 20は、斜面長を変化させた場合の崩壊発生時の土層内水分量を示す。それぞれの斜面で、降雨強度に関わらずほぼ一定の土層内水分量で崩壊が発生している。また、斜面長と崩壊発生時の土層内水分量の間には、斜面長が長い斜面ほど崩壊発生時の土層内水分量が多くなるという関係性が見られる。

3.4 結果

以上のことから、崩壊発生時の積算雨量と時間降

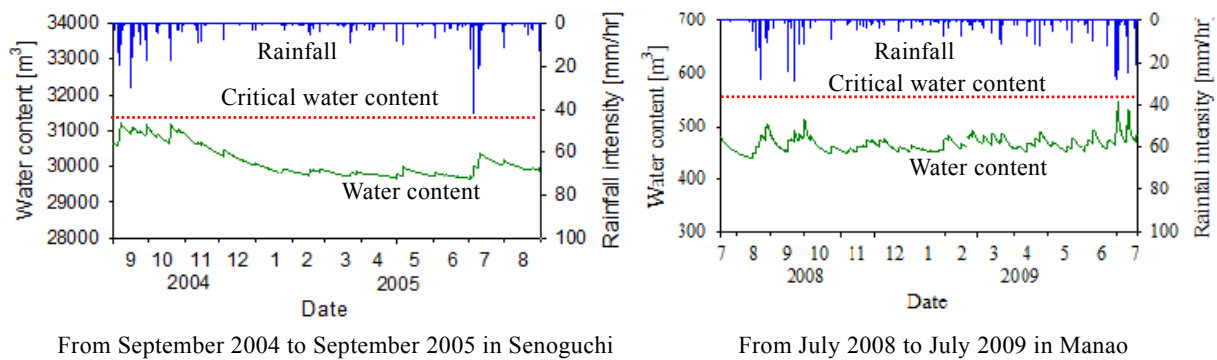


Fig. 21 Precipitation and the change of water content in the slope layer

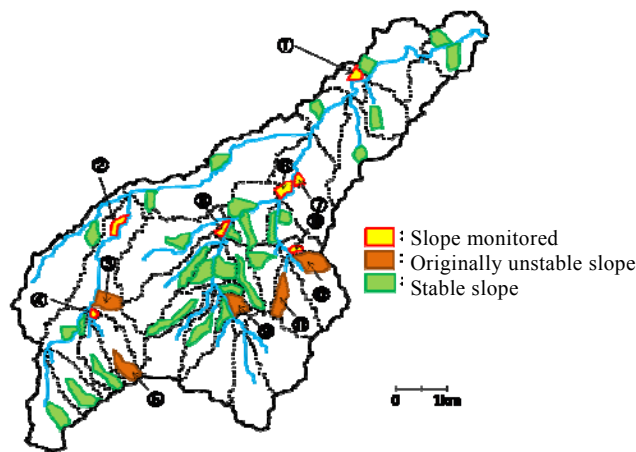


Fig. 22 A model basin for application

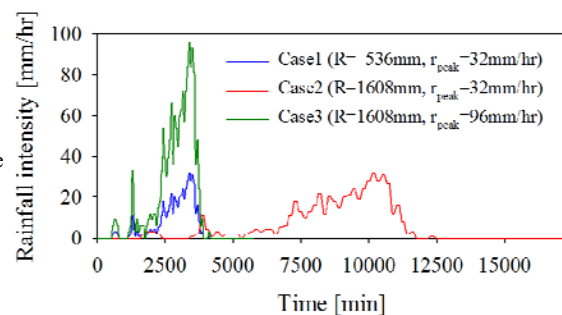


Fig. 23 Precipitation conditions

Table 3 Occurrence time, collapsed sediment volume of slope failures

Case2			Case3		
Slope No.	Time of occurrence [min]	Sediment volume [m^3]	Slope No.	Time of occurrence [min]	Sediment volume [m^3]
6	9711	16.0×10^6	6	3147	3.72×10^6
2	9974	23.5×10^6	4	3185	2.27×10^6
4	10050	4.71×10^6	2	3208	8.03×10^6
10	10400	2.19×10^6	10	3296	1.49×10^6
			1	3454	6.92×10^6
			7	3494	4.17×10^6

雨量の関係は、初期水分状態によって大きく影響されるのに対し、崩壊発生限界に対する斜面土層内水分量にはその影響が少ない。また、土層内水分量がほぼ一定値に達すると斜面崩壊が発生している。したがって、斜面土層内水分量は崩壊発生を予測する便利な指標となりえる。しかし、崩壊限界水分量は各斜面で異なるので、あらかじめそれぞれの斜面に対して求めておかなければならないし、崩壊規模と降雨特性の関係もあらかじめシミュレーションで調べておく必要がある。

4. 流域の斜面崩壊の危険度評価

4.1 斜面土層内水分量の変化と危険度評価

Fig. 21は、竹田市瀬ノ口の 斜面および防府市真尾の斜面に対して、それぞれ2004年9月および2008年7月から1年間の降雨を与えたときの斜面土層内水分量の時間変化の計算値を示したものである。瀬ノ口の斜面の下層、中層、表層の飽和含水率と残留含水率の差は0.11, 0.15, 0.17であり、この数値で表される空隙に水分が貯留されることになる。この斜面は透水性が高いため、降雨が少なくなる秋から春にか

けて水分量が徐々に小さくなるが、保水性も高いため29,800m³程度の水分量を保持している。防府市真尾の斜面の飽和含水率と残留含水率の差は0.26であり、瀬ノ口の斜面より大きな貯水容量を持っている。瀬ノ口の斜面と同様秋から水分量が減少するが、斜面層厚が薄いため急激に減少している。このような水分量の時系列は初期値と降雨データから計算され、観測をしなくても常時モニタリングすることができる。

3章の結果より、ある流域内の斜面ごとに崩壊に対する限界斜面土層内水分量が決定され、瀬ノ口の斜面の崩壊限界水分量は31,300m³、真尾の斜面の崩壊限界水分量は570m³であった。Fig. 21の左図は瀬ノ口の斜面の2004年9月の崩壊直前から、崩壊がなかったとして計算した水分量の変化である。この水分量変化と崩壊限界水分量から、2005年の梅雨時（雨期）はこの斜面は極めて安全であると判断できる。一方崩壊が発生した2004年9月には水分量が崩壊限界水分量に達している。右図は真尾の崩壊直前の2009年7月19日までの一年間の水分量の変化であるが、2008年の8月から9月にかけて少し危険な状態に近づいているが、崩壊に至るような状態にはなっていない。2009年には6月と7月上旬の雨で水分量が増加し、7月最初には一度かなり危険な状態になっている。その後水分量が下がりきらないうちに7月21日の豪雨に見舞われて、Fig. 21には示されていないが、水分量が限界値を超えて崩壊が発生した。先行降雨が崩壊に影響していたと考えられる。

4.2 気候変動による豪雨を想定した流域内の連続した崩壊プロセス

Fig. 22は瀬ノ口の斜面を含む流域である。この流域に対して、気候変動によって積算雨量が増大することを想定して、各斜面の崩壊危険度評価と連続する崩壊プロセスについて検討する。

この流域において、崩壊危険斜面の地盤条件を調査し、崩壊限界水分量をシミュレーションにより求め、常時水分量を数値計算によりモニタリングしておけば、各斜面の崩壊危険度が時々刻々評価できる。しかし、地域内の斜面の地盤条件は様々であり、それによって崩壊発生時刻や規模は異なる。ここでは、この流域の斜面条件を調べることは困難なので、次の様な仮定のもとに例示的に検討を進める。

- ① 基岩勾配は瀬ノ口の斜面と同じにする。
- ② 土層構造は瀬ノ口の斜面と同じ3層構造とし、厚さの比も瀬ノ口の斜面と同様にする。
- ③ 土質強度、浸透特性も瀬ノ口の斜面と同じにする。

このような仮定により、各斜面の危険度の変化、

崩壊規模は斜面長と斜面勾配に依存する。また、Fig. 22に示すように、降雨を与える前の先行計算で崩壊する斜面や飽和状態でも崩壊しない斜面もある。そこで、ここで崩壊危険度を検討したのはFig. 22の黄色い斜面である。それぞれの斜面の崩壊限界斜面土層内水分量は、斜面長と斜面勾配に関して3章の結果を内挿または外挿することで求めた。

Fig. 23は与えたハイトグラフである。Case 1は2005年の台風14号による既往最大総雨量の豪雨のデータ、Case 2, 3は総降雨量をCase 1の3倍としたものである。Case 2では時間雨量が最大32mm/hrとそれほど大きくない長雨タイプ、Case 3は最大時間雨量が96mm/hrと大きいタイプである。

Case 1の降雨ではこの流域で崩壊が発生しなかった。瀬ノ口の斜面はこの降雨で崩壊し、堤・藤田・林 (2007) の研究ではそれが再現されている。ここで再現できなかった理由は、内挿、外挿による崩壊限界斜面土層内水分量のずれによるものと思われる。

Table 3はCase2およびCase3の降雨で崩壊した斜面番号、発生時刻、発生規模（土砂量）を示したものである。Case 2のような総降雨量の大きい長雨タイプの降雨では、斜面番号6, 2, 4, 10の順に、降雨開始から162時間後から11時間にわたって崩壊が発生している。また、斜面6や2では10⁷m³のオーダーで大規模に崩壊している。

次にCase3のような降雨強度も大きい降雨では、斜面番号6, 4, 2, 10, 1, 7の順に、降雨開始から52時間後から6時間にわたって、崩壊が発生している。また、崩壊規模は10⁶m³のオーダーであり、Case 2に比べて小規模の崩壊が、短時間にたくさん発生している。

降雨予測データをもとに各斜面の土層内水分量の予測を行えば、上記のような流域内での崩壊の発生場所の順番、タイミング、規模の情報が得られる。これはより高度な避難情報の発信に有用であると考えられる。水分量のモニタリングは、地形データ、土質データ、地盤構造データ、降雨データなどを入力データとして、浸透解析モデルを用いて行うことができるが、現地での土中水分量観測により、その結果を補正するのが好ましいと思われる。

5. おわりに

大分県竹田市瀬ノ口および山口県防府市真尾の斜面を対象に、降雨特性や先行降雨、地形条件が斜面崩壊に及ぼす影響について検討を行った。これらの検討より、個々の斜面には固有の崩壊限界土層内水分量が存在し、土層内の水分量がその限界値を上回ると崩壊が発生することが明らかとなった。このことより、斜面土層内水分量は崩壊発生予測の便利な

指標になりえる。この限界値は地形・地質などの地盤条件のよって決まるので、これらの条件の探査が重要な問題になる。これについては、レーダーや電探などの機器の使用も考えられるが、革新的な技術の発展が必要である。

台湾の小林村での土砂災害のように、総降雨量が極めて大きな降雨イベントが起こると、その間で、様々な規模や形態の斜面崩壊が発生することが考えられ、そのプロセスを考慮した避難システムの構築が望まれる。本研究で提示した方法により、ある地域内で規模の異なる斜面崩壊が順番に起こるプロセスを簡便に予測することができる。実用化には、その予測精度の向上や地盤条件の収集法の開発など多くの問題が残されているが、本研究の成果はこのような土砂災害に対する避難システムの構築に有用であると考えられる。

参考文献

- 内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二 (2009) : 場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, pp.23-31.
- 三森利昭・坪山良夫 (1990) : 浸透現象を考慮した斜面安定解析法に関する研究, 新砂防, Vol.43, No.4, pp.14-21.
- 高橋保・中川一 (1986) : 豪雨性表層崩壊の発生とその生産土砂量の予測, 第30回水理講演会論文集, pp.199-204.
- 高橋透・松岡充宏・瀬尾克美・荒木義則・古川浩平・水山高久 (2000) : 地形特性を考慮した土石流警戒避難基準雨量の設定, 砂防学会誌, Vol.53, No.1, pp.35-46.
- 堤大三・藤田正治・林雄二郎 (2007) : 2005年台風14号により大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, Vol.51, pp.931-936.
- 道上正規・小島英司 (1981) : 豪雨によるがけ崩れ発生 of 予知について, 第17回自然災害科学総合シンポジウム論文集, pp.131-134.
- Chjeng-Lun Shieh, Chun-Ming Wang, Wen-Chi Lai, Yun-Chung Tsang, Shin-Ping Lee (2009): The composite hazard resulted from Typhoon Marakot in Taiwan, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol.62, No.4, pp.61-65.
- Michiue, M. and Fujita, M. (1990): Method for Predicting Slope Failure, Journal of Natural Disaster Science, Vol.12, No.1, pp.49-62.
- Yagi, N., Yatabe, R. and Yamamoto, K. (1983): Slope Failure Mechanism due to Rain Water, Proc.7th, ARCSMEE, Vol.1.

Effect of Climate Change on Slope Failure Risk Degree in River Basin

Masaharu FUJITA, Seitaro OHSHIO* and Daizo TSUTSUMI

*West Japan Railway Company

Synopsis

Slope failure is predicted based on rainfall data. For example, a critical line for slope failure in an area is drawn on coordinates of hourly and cumulative precipitations, and we can predict that slope failure occur somewhere in the area when rainfall condition crosses the critical line. However, it is important to provide information on successive slope failure process if an extreme rainfall event occurs frequently with climate change. In this paper slope failure was simulated under different geographical and rainfall conditions and the simulation results indicate that water content in an individual slope-soil layer is an adequate index for predicting slope failure. The characteristics of sediment disaster such as the relationship between slope failure magnitude and rainfall condition is discussed and an idea for an evaluation system for successively occurrence of slope failure is presented considering a prospective rainfall event due to climate change.

Keywords: slope failure, climate change, warning and evacuation system, slope failure risk