

2005年台風14号により発生した 大分県竹田市における斜面崩壊

LANDSLIDES IN TAKETA, OITA PREFECTURE CAUSED BY TYPHOON 0514

堤大三¹・藤田正治²・中川一³・林雄二郎⁴

Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA, Hajime NAKAGAWA and Yujiro HAYASHI

¹京都大学 防災研究所(〒611 0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: tsutsumi@sabom.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学 防災研究所(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: fujita@sabom.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学 防災研究所(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: nakagawa@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴京都大学大学院 工学研究科(〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

Key Words: landslide, geology, hydraulic properties, bedrock geomorphology

1. はじめに

2005年台風14号に伴い9月4日から7日にかけて、九州・中国・四国地方にわたる広範囲が豪雨にみまわれ、6から7日にかけて土砂災害が多数発生し、各地に大きな被害をもたらした。特に、宮崎県を中心とした九州太平洋岸の地域では、1000 mmを超える記録的な降雨が観測され、大規模な山腹崩壊が多数発生した。今回の台風14号に伴う降雨は、多少の地域差はあるものの概して最大降雨強度が30~40 mm/hr程度とさほど大きくないが、継続時間が48時間に及ぶという特長が見られる。そのため総降雨量が多くなり、500 mmを超えるような地点で土砂災害が発生している¹⁾。大分県竹田市においても、総降雨量が500mmを超える長時間の降雨が観測されており、比較的大規模な斜面崩壊が2つの緩斜面で発生し、2名の行方不明者を出している。著者らは、災害発生後の2005年10月と12月に現地を赴き、崩壊跡地の地形・地質調査および現地での聞き取り調査を実施した。降雨の特性に加え、当該地点の地質は火山灰由来の高含水率で非常に軟弱な地質であり、このような性質も崩壊発生に影響を及ぼしたものである。本研究では、これらの降雨・地形・地質特性に関する情報を基に、崩壊発生過程および発生機構について検討を行ったので、現地調査の結果とともに報告する。

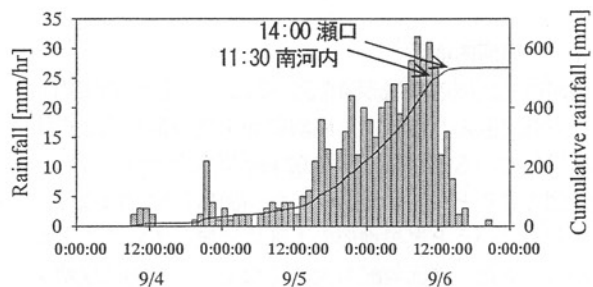


図-1 大分県竹田市で記録された時間降水量の変化
(大分県アメダス降水量データ)

2. 災害発生時の気象条件

竹田市において、9月4~6日の3日間に観測された1時間降雨と降り始めからの積算降雨量を図-1に示す²⁾。9月4日に降り始めた雨は、翌5日の午後から徐々に雨足を強め、さらに翌日の6日の正午前にピークに達し、その後夕方に降り止んでいる。この一連の降雨の継続時間は48時間以上に及び、時間雨量が最大でも30 mm/hr程度とそれほど大きくないにもかかわらず、トータルで536 mmという比較的大きな降雨をもたらした。この期間中、南河内、瀬口両地区での崩壊発生時刻は、それぞれ9月6日の11:30と14:00であり、どちらも降雨ピークを過ぎた時刻に発生している。また、崩壊発生時刻における総降雨量は、どちらも500 mmを超えている。風速に関して



図-2 大分県竹田市における土砂災害発生位置

は、全期間を通してあまり変動しておらず、絶対値も5m/s前後とそれほど大きくはない。ただし、南河内地区における崩壊発生直前の11:00頃最大風速7m/sを記録していることから、強風によって樹木が揺さぶられ、地盤の強度に何らかの悪影響を及ぼした可能性も否定はできない。

3. 現地調査による斜面崩壊状況

図-2に、対象とする斜面崩壊が発生した2地点、南河内地区と瀬口地区の位置を示す。以下に、それぞれの地点における斜面崩壊の状況について述べる。

(1) 南河内地区

南河内地区周辺の地形図を図-3に示す。図中の実線および点線で囲んだ領域は、崩壊斜面を含む集水域と崩壊地を示している。集水面積は0.02 km²程度と大きくない。地形図で見ると、崩壊が発生した斜面は谷部ではなく、どちらかという尾根地形の下部に位置していることがわかる。また、斜面勾配も大きくなく、一般的に崩壊が起りやすい急斜面ではない。このような特徴が見られる斜面において、9月6日11:30頃に発生した崩壊により、斜面下流端部にあった人家2棟が破壊され、住民2名が行方不明となった。写真-1は崩壊跡地を斜面下方から上方に向かって撮影したものである。崩壊形状は、長さ120m、幅30m、最大深さ10m、斜面勾配は18°である。崩壊跡地には所々、V字型をした岩盤が露出しており土層の浸透水が基岩の谷部に集中しやすい形状を示している。緩勾配であるにもかかわらず、斜面崩壊が発生したのは、このような基岩の集水地形と長期にわたる降雨に起因するものと思われる。これらのことは同時に、比較的深い形状の崩壊を発生させる原因になったものと考えられる。

住民談によると、この地区の住民は災害発生前に全員一旦避難したが、災害発生前の1時間程前に当該斜面において小規模な崩壊が発生し、被災者らはその土砂処理について対応するために被災地の人家に戻っており、被災したようである。これらの情報から、まず斜面下流端部の

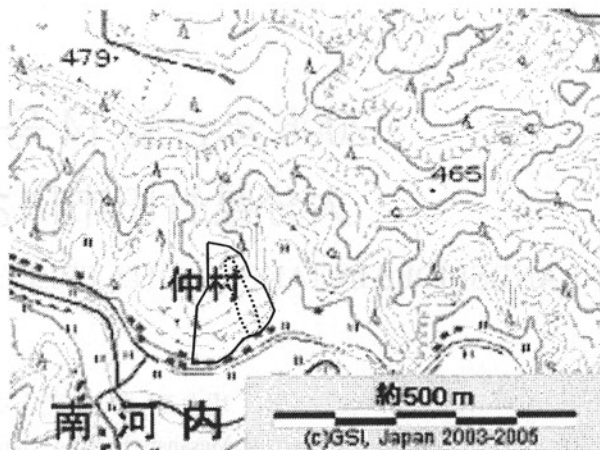


図-3 南河内地区における崩壊斜面周辺の地形図
(実線は崩壊斜面を含む集水域、点線は崩壊地)

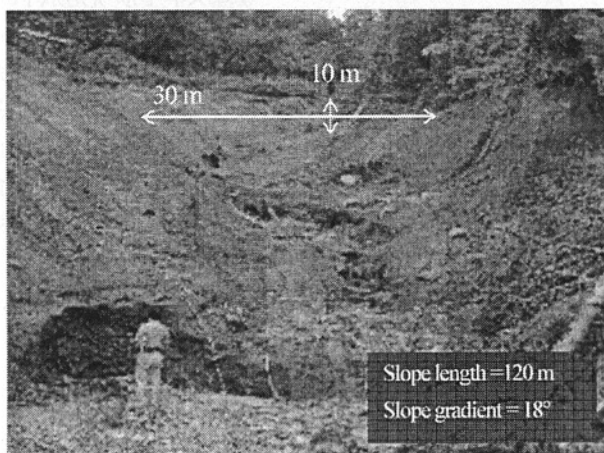


写真-1 南河内地区の斜面崩壊跡地 (2005. 10. 26 撮影)

比較的安定していた土塊がはじめに崩壊し、支えを失ったことで、飽和度の高い上部の土塊が崩壊し、一気に流下したのではないかと想像される。また、崩壊発生直前に、通常は透明な湧水が白濁していたとのことである。現地調査においても、崩壊の下端部(写真-1の左下)に土中パイプと見られる構造の開口部(直径1m程度)が見られ、このような土中パイプを通した選択流路が崩壊発生に何らかの影響を及ぼした可能性も考えられる。

(2) 瀬口地区

瀬の内地区周辺の地形図を図-4に示す。図中の実線および点線で囲んだ領域は、崩壊斜面を含む集水域と崩壊地を示している。集水面積は0.05 km²程度である。南河内地区と同様に斜面勾配は大きくない。9月6日14:00頃、斜面崩壊が発生し、流下土砂により人家数棟が被災した。人的な被害は無かったようである。写真-2は崩壊跡地を斜面下方から上方に向かって撮影したものである。崩壊形状は、長さ55m、幅30m、最大深さ15mである。災害発生前の斜面は、田畑や杉林から成り、階段形状であったため、部分的な勾配変化が大きい、斜面全体としては25°程度の勾配である。崩壊跡地には、岩盤が露出し



図-4 瀬の口地区における崩壊斜面周辺の地形図
(実線は崩壊斜面を含む集水域、点線は崩壊地)

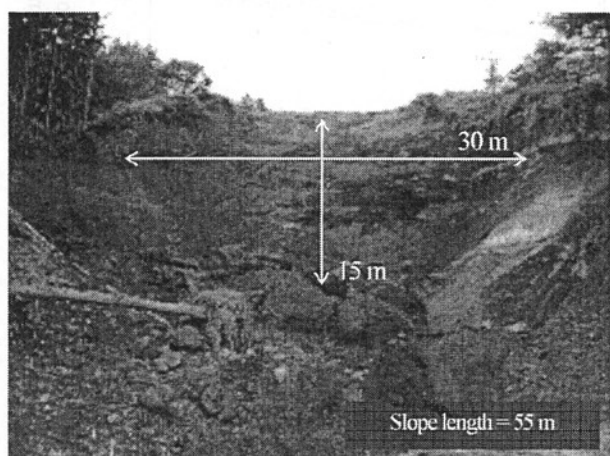


写真-2 瀬口地区の斜面崩壊跡地 (2005. 10. 26 撮影)

ている部分が見られ、崩壊跡地全体としてはVもしくはU字型の基岩形状をしており、やはり基岩谷部に浸透水が集中する岩盤地形であったといえる。住民の目撃証言によると、斜面は一度に崩壊したのではなく、3~4回に分けて下部から段階的に崩壊し、全体の崩壊に要した時間はおよそ30秒程度であったとのことである。崩土は、土塊としてではなく、きわめて流動性の高い土砂流として流下し、広範囲に広がった。

写真-3は、崩壊跡地において崩れ残っていた土塊を掌の上に載せている様子であるが、5,6回握り締めると、たちまち液状化し非常に流動性の高い泥に変化した。このように、貯水能が高く、一旦変形すると容易に液状化する土壌の性質が、当該斜面崩壊を発生させた要因のひとつと考えることができる。

4. 崩壊斜面における地質および土壌水理特性

崩壊斜面、特に瀬口地区における地質については、大分県砂防課によって詳細な調査が行われており、ここではその結果²⁾を引用する。まず、竹田市周辺に分布する地質は、基本的に阿蘇カルデラ起源の火砕流堆積物のみで

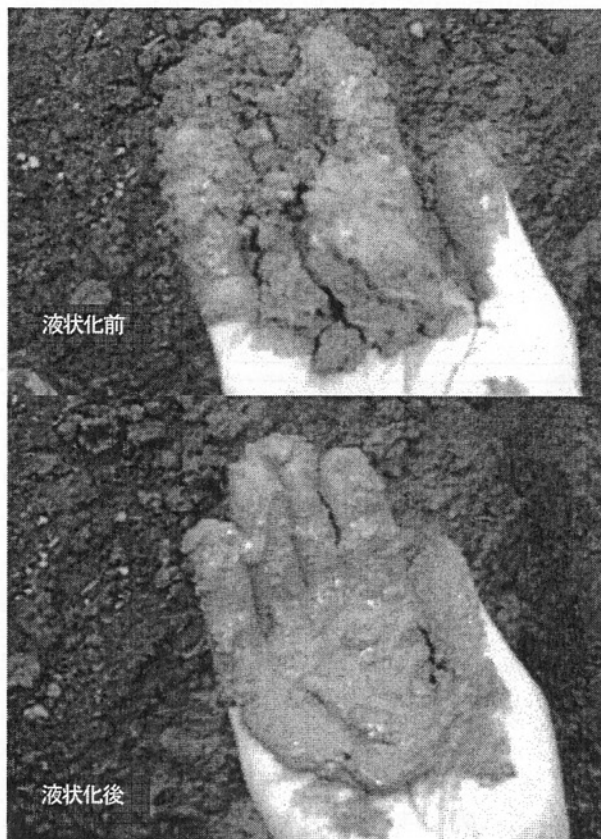


写真-3 瀬口地区の斜面崩壊跡地において、崩れ残った土塊(上)と、それを変形したときに、液状化した様子(下) (2006. 12. 26 撮影)



写真-4 瀬口地区、崩壊斜面の地質区分 (2006. 10. 26 撮影)

ある。阿蘇カルデラからの火砕流は大きく4区分され、さらにそれぞれが2~3の火砕流に細分されている。したがって、最大で10数種の火砕流堆積物が出現するが、瀬口地区においては、①Aso-4、②Aso-3a、③Aso-3bの3種のみが出現している。Aso-3aは黄褐色の非溶結堆積物で、表面が粘土化して硬くなっており、基岩として広域に分布している。Aso-3bは黒色~灰色の溶結凝灰岩で、Aso-3aの上をAso-3bが覆っている。Aso-4は、白い軽石を多く含む白っぽい火山灰質の堆積物で、土質区分では

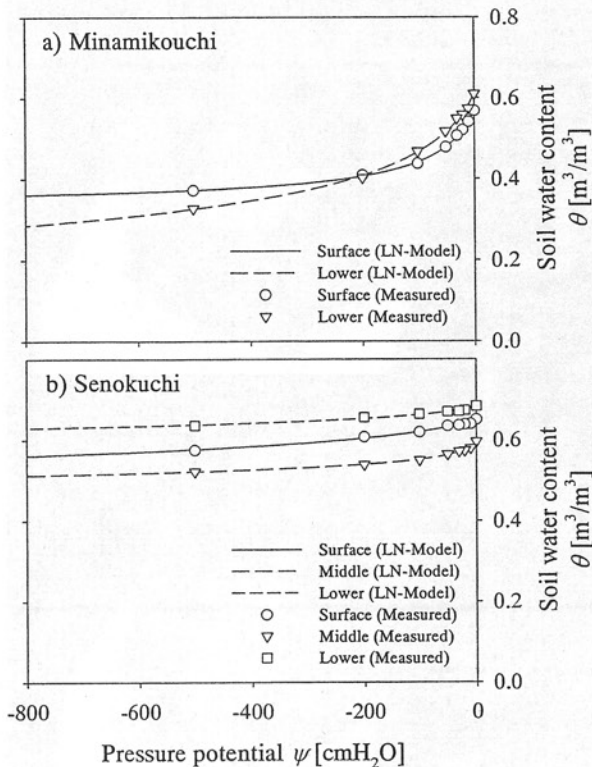


図-5 $\theta - \psi$ 関係の実測値とLN-Modelによるフィッティング曲線 (a: 南河内, b: 瀬の口)

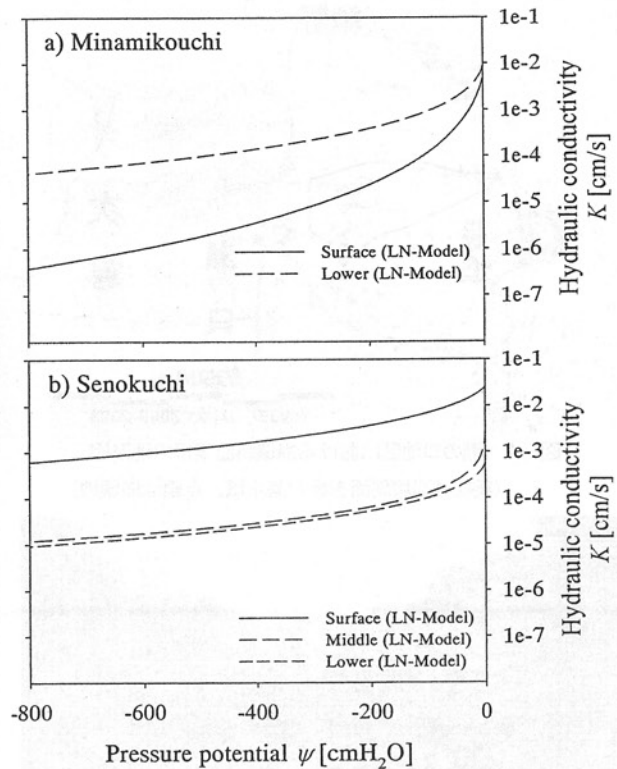


図-6 LN-Modelによる透水系数 K の推定値 (a: 南河内, b: 瀬の口)

粘土質シルトあるいはシルトに分類され、高含水率で極めて軟質である。写真-3に示した、容易に液状化する土塊は、Aso-4であると考えられる。当該地区においては、Aso-3aが侵食されてきた旧地形面上をAso-4が埋めて平坦地形を成し、さらにその上を新期ロームが覆っている。写真-4は瀬口地区の崩壊跡地を斜面下側から撮影したものであるが、この写真上に地質分布を示す。Aso-3aの層は、向って右側しか見えていないが、崩壊跡地全体としては、V字型もしくはU字型の基岩層を形成しており、地下基盤の集水地形となっている。また、地質図によると、南河内地区の地質は瀬口地区と同様、Aso-3とAso-4の火砕流堆積物で構成されている。

瀬口地区において地質分類を参考にして、最表層部、中層部(新期ローム層)、下層部(Aso-4層)から100cm³円筒形サンプラーを用いて土層サンプルを採取して持ち帰り、土壌水理特性を求める室内実験を行った。一方、南河内地区においては、土層に明瞭な地質分布が見られなかったことから、表層部と下層部からサンプルを採取した。土壌水理特性としては、体積含水率 θ と圧力水頭 ψ の関係(pF曲線)を加圧板法により測定し、飽和透水系数を変水位法により測定した。これら一連の作業においては、大きな衝撃や振動を与えないよう注意したため、試料が液状化して流れ出すようなことはなく、通常の土壌と同じ試験が可能であった。測定した $\theta - \psi$ 関係を南河内、瀬口に分けて図-5に示す。南河内の表層、下層それ

ぞれは比較的近似した $\theta - \psi$ 関係を示しており、両層間で水理特性に大きな違いがないように見受けられる。一方、瀬口の表層、中層、下層それぞれは、絶対値こそ多少の差があるものの、 $\theta - \psi$ 関係は非常に似通った傾向を示し、水理特性に共通性が見られる。特に、圧力水頭が小さな領域でも、体積含水率が高い状態を維持しているという特徴がみられ、非常に保水性の高い土層である点で共通している。また、飽和体積含水率も非常に大きく、下層土(Aso-4)では0.7近い値を示している。これは、先に示したAso-4の高含水率であるという性質を裏付けるものである。次に、 $\theta - \psi$ 関係の全体的な傾向をより詳細に検討するため、また、後に示す浸透解析に使用するため、実測した $\theta - \psi$ 関係をLognormalモデル(以下LNモデル)によって近似した。LNモデルの式を以下に示す³⁾。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q \left[\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right] \quad (1)$$

ここで、 S_e : 飽和度、 θ : 体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 ψ_m : メディアン孔隙径に対応する圧力水頭、 σ : 孔隙径分布(対数正規分布)の標準偏差である。また、余正規分布関数 $Q(x)$ は、次式で表される。

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (2)$$

表-1 土壌水理特性を表すLNモデルのパラメータ

	Minamikochi		Senokuchi		
	Surface	Lower	Surface	Middle	Lower
θ_s [m ³ /m ³]	0.568	0.610	0.646	0.595	0.682
θ_r [m ³ /m ³]	0.343	0.109	0.477	0.441	0.577
ψ_m [cm]	-76.7	-344	-792	-595	-797
σ [-]	0.729	0.960	0.875	1.36	1.02
K_s [cm/s]	4.78×10^{-3}	8.92×10^{-3}	2.42×10^{-2}	3.32×10^{-3}	5.69×10^{-4}

$\theta-\psi$ 関係から、推定される透水係数 $K(\psi)$ は、以下の式で表される。

$$K(\psi) = K_s \left[\theta \left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \left[\theta \left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} + \sigma \right) \right]^2 \quad (3)$$

実測値に合うように式(1)の3パラメータ θ_s , ψ_m , σ を最適化した結果を、 θ_s と飽和透水係数 K_s の実測値と共に表-1に、また、そのとき式(1)により表される $\theta-\psi$ 曲線を図-5の実測値に重ねて表示した。図-5から、実測値とLNモデルはよく一致しており、表-1に示したパラメータが有効であることがわかる。南河内の土層については、実測値のみの比較においては似通った性質を示している様に見受けられたが、LNモデルの表示により、圧力水頭の小さな領域では差が大きくなり、表層と下層とは異なる性質を有していることが確認された。表-1について特筆すべき点は、やはり瀬口の各土層の飽和および残留体積含水率 θ_s , θ_r が非常に大きい値を示していることである。その傾向は特に下層で大きく、飽和時の含水率が0.7に近く非常に大きい上に、圧力水頭が低下しても高い含水率を維持したまた非常に湿潤な状態を保つ土層であることが示されている。これは、図-5に示した曲線によっても明らかである。また、 ψ_m の値は、含まれる孔隙のメディアン径に対応した圧力水頭であり、この値が小さいほど孔隙径も小さい。一般的な森林土壌の ψ_m が南河内の表層程度の値であるのに対し、瀬口の ψ_m は非常に小さく、これらの土層には非常に小さい孔隙が含まれていることを示している。含まれる孔隙が小さい上、その全体量が多いという性質は、これらの土層が軽石のような火山灰由来の特徴的な土質であることが原因であると考えられる。また、飽和透水係数については、南河内では 10^3 cm/s オーダーの標準的な値である。また、瀬口では $10^2 \sim 10^4$ cm/s のオーダーに分布している。しかし、非常に孔隙径が小さい土層であるにもかかわらず思った以上に透水係数が大きく、最も小さな値を示す下層でさえ、20 mm/hr 程度の降雨を浸透させる能力を有している。このこともやはり、火山灰由来の土質の特性であると考えられる。表層から下層に移るに従って浸透能が低下しているのは、風化の度合いが各層で異なることが原因で

あると考えられる。表-1のパラメータを用いて、LNモデルで $K(\psi)$ を推定し、図-6に示した。南河内の表層と下層は、飽和状態では大差はないが、圧力水頭が下がるとにたがって差が大きくなり、浸透能の圧力水頭への依存傾向に違いが現れている。一方、瀬口の各層は、表層から下層に移るに従って、浸透能が低下しているが、圧力水頭に対する依存性は類似しており、特に中層下層は、ほとんど一致している。また、圧力水頭が小さい領域でも透水係数は比較的大きく、浸透能が大きく低下しない性質を示している。これは、図-5に示したように、低圧力水頭領域でも、高い含水率を維持する性質が影響しているためである。よって、このような浸透能に関する性質も、火山灰由来の特性であると考えられる。

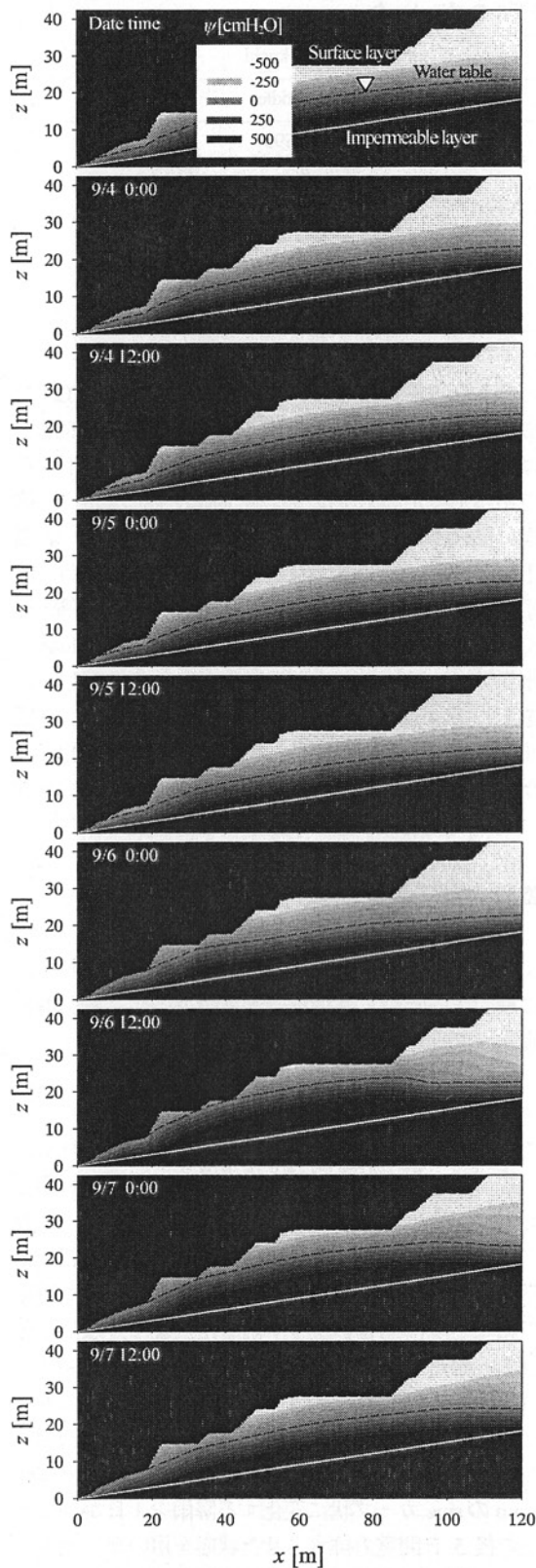
5. 降雨浸透解析

斜面崩壊現象に対する、降雨・地形・地質の影響を総合的に検討するため、降雨浸透解析を行った。浸透解析の基礎式はRichards式であり、以下に示す。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot \{K(\psi)[\nabla(\psi + z)]\} \quad (4)$$

ここで、 $C(\psi)$ は比水分容量であり、式(1)から得られる。また、 $K(\psi)$ には、式(3)を用いた。簡単のため、斜面を $x-z$ 断面の2次元とし、有限要素法を用いて式(4)を解いた。斜面形状は、大分県砂防課の資料²⁾と現地調査の結果から決定し、縦断方向に120mの斜面を設定した。現地調査の結果を基に土層を表層、中層、下層に分類し、それぞれに実測した水理特性パラメータ(表-1)を与えた。斜面上流端、底面は不透水条件とし、斜面下流端は大気開放とし土壌水が排出される条件とした。土層の初期条件としては、全層が飽和に近い状態の土層に、さらに総量76mmのsineカーブ状に変化する降雨を1日かけて与え、その後5日間重力排水させた状態を用いた。土層の表面には、図-1に示した降雨の実測値を与えた。

計算結果を図-7に示す。5日間重力排水させた後の9月4日0:00においても高い地下水位が見られ、土層の保水性の高さが顕著に表れている。また、下流端部において地下水位が地表面に達しており、表面流として排水さ



図一七 瀬の口地区の斜面に対する浸透解析の結果
(最上段は説明図、2段目以下が計算結果)

れている。小規模な降雨が始まった9月4日の12:00では、地下水位にほとんど変化は見られないが、その後、降雨

強度が増すにつれて徐々に地下水位が上昇している。降雨強度のピークを迎えた9月6日12:00においては、地下水位が最高位に達し、斜面下半分ではほぼ全層が飽和に近い状態となっており、斜面が不安定な状態にあると考えられる。実際に、簡易 Janbu 法を用いて安定解析を行ったところ、安全率が1.0以下となり、崩壊発生と判定された。すべり面の位置は、土層の内部摩擦角 ϕ と粘着力 c の仮定値に依存して異なるが、実際の崩壊形状よりも斜面下側に現れ、一度の崩壊で最終崩壊形状となったのではなく、複数の崩壊が段階的に発生して最終崩壊形状に到達したことを示唆している。ただし、そのような段階的な崩壊を実際に再現するためにはさらに詳細なモデル計算を実施する必要がある。また、ここで示した2次元断面を対象とした数値シミュレーションでは、斜面横断方向の勾配がないとしているが、現地で見られたV字形の基盤形状を想定した場合は、谷部への浸透水の集中が予想され、さらに地下水位が上昇するものと考えられる。

6. おわりに

本研究において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 対象とした、2つの比較的大きな斜面崩壊は、降雨強度は大きくないが、長期間にわたる降雨によって発生した。
- (2) 瀬口地区の土質は特徴的であり、この非常に保水性の高い性質が降雨浸透に影響を及ぼし、崩壊発生の一因となったことが示唆された。
- (3) 基岩に見られた、V字もしくはU字型の集水地形が、崩壊発生に影響を及ぼしたと考えられる。
- (4) 段階的な斜面崩壊は特殊な現象ではなく、頻繁に起こりえる現象であるといえる。

崩壊発生に対する基岩形状の影響や、段階的崩壊プロセスに関しては、今後さらに詳細な検討が必要である。特に、南河内において発生した2次的な災害を防止する観点からも、段階的崩壊現象を解明していく必要がある。

謝辞：災害調査の一部は、河川整備基金の助成により行われた。また、本研究を遂行するにあたり、大分県砂防課、竹田市の皆様には、多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷口義信他：2005年9月台風14号による土砂災害，砂防学会誌，58(4)，46-53，2005
- 2) 大分県砂防課：H17発生災害関係資料，2005
- 3) Kosugi, K.: Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resources Research, 32, 2697-2703, 1996

(2006. 5. 19 受付)