# 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

NUMERICAL SIMULATION ON A LANDSLIDE DUE TO TYPHOON 0514 IN TAKETA CITY, OITA PREFECTURE

# 堤大三<sup>1</sup>・藤田正治<sup>2</sup>・林雄二郎<sup>3</sup> Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA, and Yujiro HAYASHI

<sup>1</sup>正会員 農博 京都大学助手 防災研究所流域災害研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄) <sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄) <sup>3</sup>京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

A deep-seated landslide occurred in Taketa City, Oita Prefecture, triggered by the Typhoon 0514. According to the field investigation, bedrock at the scar of the landslide has a U-shape geomorphology, which is one of the causes for the landslide. Laboratory tests for hydraulic properties of soil sample indicate that the soil has a peculiar characteristic; the soil keeps high water retentiveness and water conductivity even in the low soil water pressure range. Numerical simulation indicates that a long term rainfall event triggered the deep-seated landslide, even though the rainfall intensity was not so high (maximum is 32 mm/hr). In case of shorter duration and higher intensity of rainfall with same total amount of rainfall, a smaller size of landslide occurrence with no delay from the rainfall peak was simulated.

Key Words : Landslide, Rainfall type, Geology, Hydraulic properties, Bedrock geomorphology

## 1.はじめに

2005年台風14号に伴い,九州・中国・四国地方に わたる広範囲では9月4から7日にかけて豪雨にみま われ,土砂災害が多数発生した.特に,宮崎県を中 心とした九州太平洋岸の地域では,総雨量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程度とさほど高くないが,継続時間が48 時間に及ぶという特徴が見られる.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<sup>1)</sup>.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,多数の斜面崩壊が発生,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月に現地に赴き,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.その結果, 瀬口地区において発生した斜面崩壊は,最大崩壊深 が15 mに達し,降雨のピークから3時間程度遅れて 発生する典型的な深層崩壊であることが判った.-般に,降雨強度が高く,短時間に集中して降る雨で は,表層崩壊が発生しやすく,逆に降雨強度はそれ ほど高くなくても,長時間にわたって降り,結果と

して総降雨量が多い雨では,深層崩壊が発生する危険が高まることが知られている.瀬口地区において 発生した斜面崩壊は,上記降雨パターンの内,後者 によって発生したと考えられる.このような降雨特 性が,斜面崩壊の規模や発生時刻に与える影響につ いて検証することを目的に,現地調査により得られ た崩壊斜面の地形・地質特性を考慮して降雨浸透解 析と斜面安定解析を行った.本稿では,その数値解 析について現地調査の結果と共に報告する.

#### 2.大分県竹田市で発生した斜面崩壊

#### (1) 崩壊発生時までの降雨条件

大分地方気象台竹田観測所において,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<sup>2)</sup>.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 翌々日の6日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.期 間中,瀬口地区での斜面崩壊の発生時刻は,9月6 日14:00頃であり,降雨ピークを3時間ほど過ぎた時







図 - 2 瀬山地区の崩壊科面周辺の地形図:美線(水 色)は崩壊斜面を含む集水域,斜線(赤色) は崩壊地

刻である.また,崩壊発生時刻における総降雨量は, 500 mmを超えている.2005年9月6日の日降雨量329 mmは竹田観測所において1977年の観測開始以来, 過去30年間における1位の記録である.第2位の記録 は,1993年09月03日の261 mmなので,72 mmも更 新したことになり,当該降雨が非常に規模の大きい ものであったことがわかる.

(2) 瀬口地区で発生した斜面崩壊の状況

瀬口地区周辺の地形図を図 - 2に示す.図中の実 線(水色)および点線で囲んだ領域(赤斜線)は, それぞれ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 km<sup>2</sup>程度である.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が,斜面全体として は25°程度の勾配である、9月6日14:00頃,斜面崩壊 が発生し,流下した土砂により人家数棟が被災した が,人的な被害は無かったようである.写真-1は 崩壊跡地を斜面下方から上方に向って撮影したもの である.崩壊形状は,長さ55 m,幅30 m,最大深 さ15 mである.崩壊跡地には,岩盤が露出している 部分が見られ,崩壊跡地全体としてはU字型の基岩 面形状をしており、基岩の谷部に土層からの浸透水 が集中する岩盤地形であったといえる.住民証言に よると,斜面は3~4回に分けて下部から崩壊し,全



写真-1 瀬口地区の斜面崩壊跡地(2005.10.26撮影)



写真 - 2 斜面崩壊跡において,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)

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 - 2は,崩壊跡地における崩土塊を掌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,高含水率かつ一旦変形すると容易に液状化する土の性質も,崩壊発生の要因のひとつと考えることができる.

(3) 土層の地質特性

瀬口地区における斜面土層の地質については,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<sup>2)</sup>を引用する.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,さらにそれぞれが細分されており,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, Aso-4, Aso-3a, Aso-3bの3種のみが出 現している.当該地区においては, Aso-3aが侵食さ れてできた旧地形が基盤面を形成し,その上を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-3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 上に地質分布を重ねて表示する.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,U字型の基岩層を形成しており,集水地形と なっている.その上に, Aso-4, 新期ロームが重 なっている.

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100 cm<sup>3</sup>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,土の水理特性を求める室 内実験を行った.土の水理特性としては,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,飽和透水係数を変水位法により測定した.



写真-3 崩壊斜面の地質区分(2006.10.26撮影)

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,通常の土と同じ試験が可能 であった.測定したθ ψ関係を図-3aに示す.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, θ ψ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

$$S_{e} = \frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}} = Q \left[ \frac{\ln(\psi/\psi_{m})}{\sigma} \right]$$
(1)

ここで, $S_e$ : 飽和度, $\theta$ : 体積含水率, $\theta_s$ : 飽和体 積含水率, $\theta_r$ : 残留体積含水率, $\psi_m$ : メディアン孔 隙径に対応する $\psi$ , $\sigma$ : 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.

よって近似した.LNモデルの式を以下に示す<sup>3)</sup>.

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

 $\theta - \psi$ 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.

$$K(\psi) = K_{s} \left[ Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_{m})}{\sigma}\right) \right]^{1/2} \left[ Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_{m})}{\sigma} + \sigma\right) \right]^{2}$$
(3)

実測値に合うように式(1)のパラメータ $\theta_r$ ,  $\psi_m$ ,  $\sigma$ を最適化した結果を,  $\theta_s$ 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



図 - 3 崩壊斜面土層の水理特性 a) ψ - *θ*関係, b) ψ - K関係

表 - 1 土の水理特性を表すLNモデルのパラメータ

	Surface	Middle	Lower
$\theta_s  [\mathrm{m}^3/\mathrm{m}^3]$	0.646	0.595	0.682
$\theta_r  [\mathrm{m}^3/\mathrm{m}^3]$	0.477	0.441	0.577
$\psi_m$ [cm]	-792	-595	-797
$\sigma$ [-]	0.875	1.36	1.02
$K_s$ [cm/s]	2.42×10 <sup>-2</sup>	3.32×10 <sup>-3</sup>	5.69×10 <sup>-4</sup>

されるθ-ψ曲線を図 - 3aの実測値に重ねて表示した. 図 - 3a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適切に最適化され ているといえる.表-1において特筆すべき点は, 各土層の飽和および残留体積含水率*θ*, *θ*,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-3aに示した曲線に よっても明らかである.また, ψ<sub>m</sub>の値は, 土層内 に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含まれる孔隙径も小さ い.一般的な不撹乱森林土壌の場合, ym > -200で あるのに対し, 瀬口の $\psi_m$ 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. 飽和透水係数は, 10<sup>-2</sup>~10<sup>-4</sup> 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, 孔隙径は小さいが孔隙の総量が多く, 間隙水の 連続性が保持される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(w)を推定し,図-3bに 示した.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,特に中層と下層は,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-3a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.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.

3.数値シミュレーションによる検討

(1) 数値シミュレーションの方法



### 図 - 4 土層の水分状態の初期条件設定のために行っ た浸透解析において与えた8月1日から9月4日 までの降雨(1時間雨量の実測値)

a)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以下に示すRichards式である.

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

ここで, C(w)は比水分容量であり,式(1)から得 られる.また, K(w)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<sup>2)</sup>と現地調査で得られた表面地形と基盤形 状から想定し,斜面縦断方向の長さを,表面地形の 集水域よりも短い120mと設定した.前章(3)節に示 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.斜面上端,底面は不透水条件 とし,斜面下端は大気開放とし土層浸透水が排出さ れる条件とした.計算は,2005年9月4日0:00から降 雨終了の期間を対象として行った.ただし,9月4日 0:00時点の初期水分条件としては, 土層全体が比較 的湿潤な状態を仮定した土層に,図-4に示す2005 年8月1日0:00から9月4日0:00までの間の降雨の実測 値を与え,浸透解析を行った結果を用いた.

降雨特性が斜面崩壊特性に及ぼす影響について検 討するため,計算対象期間の実測降雨パターン (Case 1,図-1)の総降雨量を一定とし,降雨強 度と継続時間をそれぞれ2倍,1/2倍としたものを Case 2,4倍,1/4倍としたものをCase 3とし,逆に 降雨強度と継続時間をそれぞれ1/2倍,2倍としたも のをCase 4とし,シミュレーションを行った.Case 1,2,3,4の降雨パターンを重ねて図-5に示す. b)斜面安定解析

浸透解析に続き斜面安定解析を行った.安定解析 の方法としては,任意のすべり面形状に適用できる 簡易Janbu法を採用した.さらに,既往の研究を参 考とし<sup>4)</sup>,動的計画法を用いて各時刻に安全率が最 小となるすべり面を探査し,すべり面形状を決定で きる解析を行った.解析において,降雨浸透解析か



図 - 5 シミュレーションにおいて与えた降雨, Case 1:実測された降雨, Case 2:降雨強度2倍,継 続時間1/2倍, Case 3:降雨強度4倍,継続時 間1/4倍, Case 4:降雨強度1/2倍,継続時間2 倍



図 - 6 実際の降雨を与えた場合(Case 1),浸透解 析により得られた9月4日から崩壊発生時刻ま での土層断面内の圧力水頭分布

ら得られた斜面土層内の圧力水頭分布を入力値として用いた.土層の強度を表すパラメータである内部 摩擦角 $\phi$ と粘着力cは,実測していないため,崩壊時 刻と崩壊形状が実際の現象と一致するような値とな るよう, $\phi$ = 0.30 rad (17°),c = 1.96×10<sup>4</sup> N/m<sup>2</sup> (2.0 ×10<sup>3</sup> kgf/m<sup>2</sup>)を仮定値として与えた.ここで,前述 の土の性質を考慮し, $\phi$ は一般的な砂質土より小さ く,cは大きめの値とした.

#### (2) 結果と考察

実測された降雨パターン(Case 1)を与えた場合 の9月4日から崩壊発生時刻までの浸透解析の結果を 図 - 6に示す.台風14号の降雨が始まる前の9月4日 0:00において既に地下水位が高い位置に現れており,



図 - 7 Case 1の安全率変化(上図)と土層内圧力水 頭分布(下図)の計算結果(破線は,崩壊発生 時の滑り面形状の計算結果と実測形状との比 較)

2章で示した土層の保水性の高さが顕著に表れてい る.降雨が始まった9月5日0:00において,斜面上部 の地表面近くの土層の圧力水頭が若干上昇している が,地下水位にほとんど変化は見られない.降雨中 盤の9月6日0:00になると, x < 40 mの斜面下部にお いて地表面に飽和帯が到達し,表面流の浸出範囲が 拡大している.これ以降に示す斜面安定解析におい て崩壊発生と判定された時刻の9月6日13:55には, 斜面下半分ではほぼ全層が飽和に近い状態となって いる上, 20 < x < 50 mの範囲の斜面底部における圧 力水頭の上昇が顕著に見られる.このような土層内 の圧力水頭の状況が原因となって深層に達する斜面 崩壊が発生したといえる.15mの深さまで降雨が浸 透するには、一般的に考えて当該降雨継続時間より も長い時間が必要でるように思えるが,図-6に示 したように降雨前から土層底部に比較的高い地下水 位が維持されていたため,実際には降雨が浸透した 深さは15mよりも大幅に浅かったと考えられる.ま た,2章で示したように,圧力水頭が小さい場合で も,比較的大きな浸透能を維持する土層の性質も, すばやい降雨浸透に寄与した原因であるといえる

浸透解析により得られた土層内圧力水頭分布を入 力値として行った斜面安定解析の結果を図 - 7に示 す.上図は,実測の降雨パターンに伴う斜面安全率  $F_s$ の変化を,下図は, $F_s = 1.0$ となった時刻の土層 断面の圧力水頭分布とそのときの崩壊形状を示して いる. $F_s = 1.0$ となり崩壊発生と判定された時刻は9 月6日13:55であり,降雨のピークから3時間ほど遅 れた時刻であり,実際に崩壊が発生したといわれる 時刻14:00頃と,ほぼ同じである.そのときの崩壊 形状としては,斜面底部の圧力水頭が高い領域を切 り取る形の滑り面が計算されている.計算された崩 壊形状と実際に計測された形状を比較すると,長さ, 深さ共にほぼ同じであり,実際の崩壊現象と同様の 計算結果となっている.ただし,ここで行った解析 は,x-z断面における2次元解析であり,崩壊跡地に



図 - 8 Case 1, 2, 3,4に対するシミュレーション結 果:安全率変化(上図)と崩壊発生時の滑り 面形状の比較(下図)

見られた基盤のU字形状や,崩壊滑り面の3次元的 形状を考慮しておらず,複数回の崩壊も表現されて いないため,実際の現象を完全に再現したものとは 言えず,むしろ定性的な傾向を捉えるための基準と して扱うべき結果である.

図 - 6,7に示したものと同様のシミュレーション をCase 2, 3, 4に対しても行い, それらの結果をCase 1の結果も含めて図 - 8に示す.図 - 8において,上 図は,与えた降雨パターンに伴う斜面安全率 $F_s$ の変 化を,下図は, $F_s = 1.0$ となった時刻において計算 された崩壊形状を示している.どのCaseにおいても, 降雨と共に安全率が減少するが,その減少の度合い はそれぞれ異なり,降雨強度が低く,継続時間が長 い降雨ほど安全率の減少が緩やかである.そのため, 実際に観測された降雨パターン (Case 1) に比べ, Case 2,3の降雨では,安全率の低下が急激に起こり, 崩壊発生と判定される時刻の降雨ピークからの遅れ 時間が短くなっていく傾向が見られる.実際その遅 れ時間は, Case 1, 2, 3でそれぞれ192, 32, 10 minと短 くなっている.そのとき計算された崩壊形状を比較 すると(図-8下図),降雨強度が高く,継続時間 が短い降雨パターンほど,崩壊規模が小さくなる傾 向が見られる.一方,実際に観測された降雨パター ン(Case 1)より降雨強度が低く,継続時間が長い 降雨 (Case 4) では,斜面安全率が $F_s > 1.0$ のままで あり,崩壊発生とは判定されなかった.

2005年台風14号により発生した,大分県竹田市に

おける斜面崩壊について,現地調査および数値シ ミュレーションにより検討を行った.これらの検討

- により明らかとなった事項を以下に挙げる.
- 1 )現地調査の結果,崩壊跡地の基盤はU字型の形状を呈しており,この基盤の集水地形も崩壊発生に影響を及ぼした要因のひとつと考えられる.
- 2)崩壊跡地から採取した土層試料の水理特性試験の結果,非常に高い保水性と圧力水頭が減少しても,比較的高い透水性を維持する特徴的な土質であることが明らかとなった.このため,雨水が迅速に浸透して土層深部に到達・保持され,深層に及ぶ斜面崩壊が発生したと考えられる.
- 3)数値シミュレーションの結果,総降雨量が同じでも,降雨パターンが異なる場合,斜面崩壊特性が異なることが示された.つまり,短期集中型の降雨の場合,降雨ピークとほぼ同時に比較的浅い崩壊が発生するのに対し,長期にわたる降雨の場合,降雨ピークから遅れて,深層崩壊が発生する.これは,従来から言われている降雨パターンと崩壊特性の関係と一致する.また,降雨期間が,ある時間より長くなると,斜面崩壊は発生しないということも示された.

数値シミュレーションに関しては,2次元断面に 対する計算であるため,基盤の集水地形や,すべり 面の3次元形状の影響を考慮していない.また,斜 面が複数回に分けて崩壊する現象も表現できていない.さらに,土層強度のパラメータには仮定値を用 いている.このため,得られた結果から定量的な評 価を行うまでは至っておらず,今後,これらの点を 改善し,定量的検討につなげる必要がある.

参考文献

- 谷口義信,内田太郎,大村寛,落合博貴,海堀正博, 久保田哲也,笹原克夫,地頭薗隆,清水收,下川悦郎, 寺田秀樹,寺元行芳,日浦啓全,吉田真也:2005 年 9 月台風 14 号による土砂災害,砂防学会誌,58(4), pp.46-53,2005.
- 2) 大分県砂防課: H17 発生災害関係資料, 2005.
- Kosugi, K.: Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resources Research, 32, pp. 2697-2703, 1996.
- 4) 久保田哲也・中村浩之:臨界すべり面解析と信頼性解 析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法,地すべ り,27(4),pp. 18-25, 1991.

(2006.9.30受付)

4.おわりに