

# 三次元斜面安定解析を用いた崩壊土砂量および 被害範囲推定に関する一考察

## THE LANDSLIDE RUNOUT ESTIMATION USING A THREE-DIMENSIONAL SLOPE STABILITY ANALYSIS

田中 大貴<sup>1</sup>・笠間 清伸<sup>2</sup>・古川 全太郎<sup>3</sup>

Hiroki TANAKA, Kiyonobu KASAMA and Zentaro FURUKAWA

<sup>1</sup>九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)  
Tanahiro.4721@gmail.com

<sup>2</sup>九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)  
kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)  
z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

*Key Words: landslide, stability analysis, estimation of damage area*

### 1. 研究の背景と目的

地盤の深層崩壊とは、山地及び丘陵地の斜面が豪雨や地震、融雪などを誘因として風化の進んだ層だけではなくその下の基盤岩まで崩壊する現象であり、近年増加傾向にあるため、深層崩壊対策の構築が急務になっている。深層崩壊は、表層崩壊と比べ従来のハード対策では対応が難しく、ひとたび発生すると広範囲に大きな影響を及ぼす可能性があるため、災害の前兆現象や発生位置及びその規模を事前に推定し避難誘導などのソフト対策を進めていくことが極めて重要になる。

深層崩壊の発生には、地盤の地質年代や流れ盤など地質構造などが強く関与すると考えられている。したがって、深層崩壊の崩壊形状は、対象となる斜面の地層構成や地質構造などに決定されるため、より複雑な形状を示すことが予想される。

深層崩壊を含めた斜面崩壊のシミュレーションに

は、数多くの数値解析手法が存在する。例えば、地盤や岩盤を連続体として解析する有限要素法は、安全率を計算する安定解析には適応可能であるが、崩壊後の大変形を伴う土砂の移動解析は難しい場合が多い。一方、地盤や岩盤を不連続体として解析する個別要素法や不連続変形法では、崩壊後の土砂移動を解析することが可能であるが、土砂の崩壊範囲をあらかじめ明らかにしておく必要があるなどの課題がある。

本論文では、深層崩壊の危険度および深層崩壊に伴う土砂移動を推定するための基礎的検討として、深層崩壊の崩壊形状が地すべりのように円弧すべり形状と仮定できる場合について、三次元斜面安定解析を行い崩壊土砂量を決定した後、崩壊後の土砂の到達範囲を固定座標系の連続体モデルを用いて数値解析的に検討した<sup>1)</sup>。

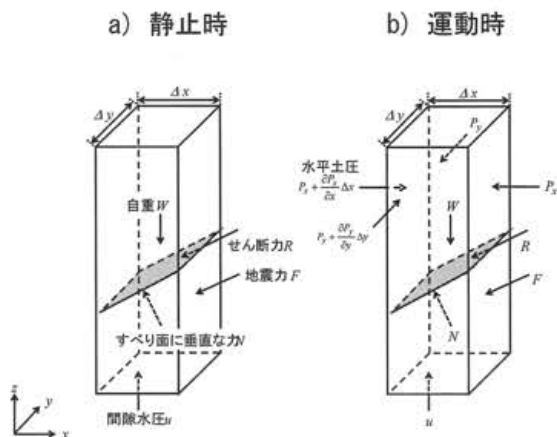


図-1 柱状要素に働く力

## 2. 解析概要

深層崩壊による土砂崩壊量を調べるために、斜面の安定性をビショップ法を基にした三次元斜面分割法により評価した。ビショップ法とは、回転モーメントのつり合いで斜面の安全率を導く手法である<sup>2)</sup>。ここで斜面中の柱状要素に働く力を考える。ここで柱状要素とは斜面をそれぞれ縦1m、横1mに区切った正方形の格子を表す。静止した柱状要素に働く力は図-1a) のようになる。柱状要素に働く力は、地震力  $F$ 、土塊の自重  $W$ 、土塊に働くせん断力  $R$ 、すべり面に働く垂直な力  $N$  および間隙水圧  $u$  である。この条件よりモーメントのつり合いから、すべり面を決定し、すべり面上に存在する崩壊土砂量を求めた。なお、深層崩壊は不透水層境界まで地下水が侵食し崩壊に至る。上部が透水層、下部が不透水層であるため透水層を均一な層と見なし、すべり

表-1 解析条件

名称	記号	設定値	単位
傾斜角(x成分)	$\theta$	45, 60, 75	°
傾斜角(y成分)	$\beta$	0	°
方位角	$\delta$	180	°
単位体積重量	$\gamma$	18.82	kN/m <sup>3</sup>
粘着力	$c$	4.8~83	kPa
内部摩擦力	$\phi$	5~35	°
間隙水圧	$u$	0	kN/m <sup>2</sup>
初速度(x成分)	$u_0$	0	m/s
初速度(y成分)	$v_0$	0	m/s
格子の幅(x成分)	$\Delta x$	1	m
格子の幅(y成分)	$\Delta y$	1	m
重力加速度	$g$	9.807	m/s <sup>2</sup>

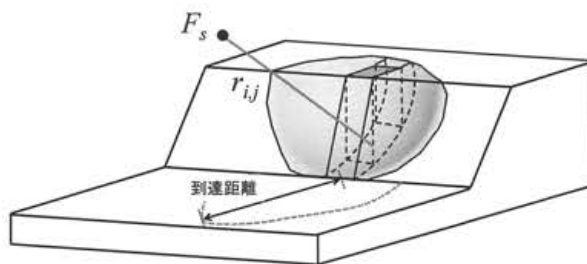


図-2 三次元斜面図

面を球面状すべり面にて仮定した

また、上記の斜面安定解析により最小の安全率となるすべり面を決定した後、すべり面上の土砂が崩壊・移動すると仮定し、図-1b) で示すように崩壊する柱状要素に働く力を求める。ここで、図-1a) と図-1b) の柱状要素は同一の柱状要素である。柱状要素に働く力は、地震力、自重、せん断力に加えて、柱状要素の側面に作用する水平土圧  $P$ 、間隙水圧  $u$  である。これらの力の合力に比例して柱状要素は加速度  $a$  で加速・減速するため、柱状要素の質量を  $m$  としたとき、次式で表される。

$$m \cdot \vec{a} = (\vec{W} + \vec{F}) + \left( \frac{\partial P_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P_y}{\partial y} \Delta y \right) + \vec{R} \quad (1)$$

(1) 式を差分化し、汎濫解析等で用いる連続の式・ナビエ・ストークスの式を利用することにより、土砂の流動範囲を推定した<sup>3)・5)</sup>。

図-2 に実際に解析対象とした斜面を示す。 $F_s$  は安全率、 $r_{ij}$  は斜面を円弧と見たときの球の半径を示す。三次元斜面安定解析を用いて、安全率が 1.0 となる斜面の粘着力と内部摩擦角を求めた。また、崩壊土砂量は斜面の崩壊前と崩壊後の標高の差により

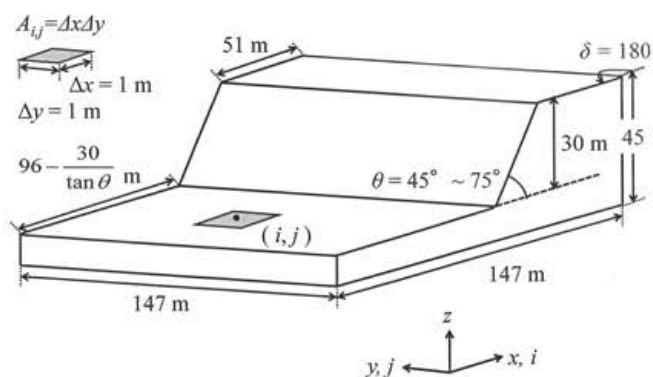


図-3 想定した仮想斜面

求めた。更に、土砂の到達範囲は、図-2 で示したように、斜面下端部からの最大到達距離とした。

解析対象とした仮想斜面を図-3 に示す。想定した仮想斜面は、縦横 147m であり、これを縦横 1m ずつに格子で分割した。この際、x 軸方向の格子番号を  $i$ 、y 軸方向の格子番号を  $j$  で記す。また、斜面は x 軸方向に傾斜していると仮定し、y 軸方向に傾斜はないものとした。また、斜面は x 軸と平行であるため、方位角  $\delta$  は  $180^\circ$  に設定した。ここで、深層崩壊は平均傾斜 30 度以上の急傾斜によって発生している。これより、斜面の傾斜は  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  と急斜面に設定し、高さは 30m に統一した。それぞれの入力定数を表-1 に示す。また、内部摩擦角を  $5^\circ$  から  $35^\circ$  に変化させ、安全率が 1 となる粘着力求めた。安全率を計算する格子間隔は、4m とし、x 方向と z 方向ともに安全率が小さくなるところでは 1m 間隔とした。

崩壊土砂範囲を推定する際にも同一の仮想斜面を用いた。斜面の傾斜等の入力定数は崩壊土砂量を推定した際と同一である。崩壊土砂量を推定する際に導いた安全率が 1 となる内部摩擦角と粘着力を用いて、解析をおこなった。また、崩壊開始から土砂が

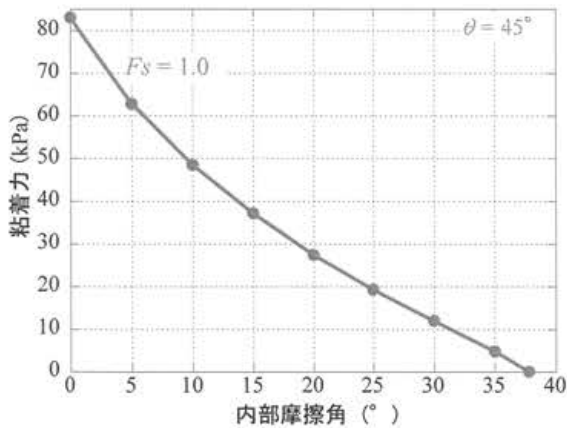


図-4 粘着力と内部摩擦角の関係

停止する 8 秒までを解析した。

### 3. 解析結果

#### (1) 崩壊土砂量

傾斜角  $45^\circ$  の仮想斜面において安全率が 1 となる内部摩擦角と粘着力の関係を図-4 に示す。なお、この直線は内部摩擦角を固定し、粘着力を変化させ、安全率が 1 となる点を結んだものである。また、図-4 より導かれる仮想斜面における傾斜角  $\theta$  と安定係数  $N_s$  の関係を図-5 に示した。図の横軸は傾斜角、縦軸は安定係数  $N_s$  を示す。安定係数  $N_s$  は(斜

面の単位体積重量×斜面の高さ  $H$  / 安全率が 1 と

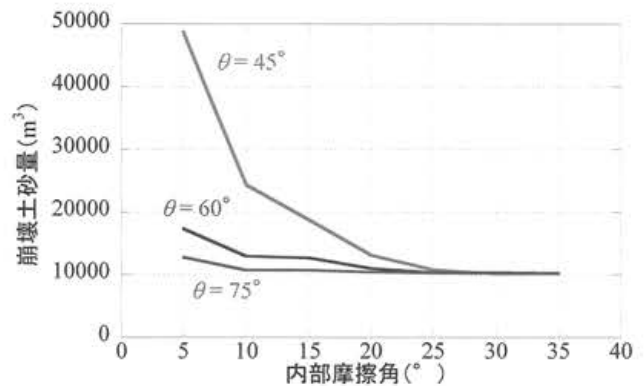


図-6 内部摩擦角と崩壊土砂の関係

なる斜面の粘着力) より求めた。図の実線は解析により得られた三次元斜面安定解析の安定係数であり、破線はテイラー法にて算出された安定係数である。図-5 より三次元斜面安定解析より得られた安定係数  $N_s$  の値は二次元斜面安定解析により得られる値と比較して全て大きくなった。このことは、三次元解析で得られる安全率が二次元解析の値より大きくなることを意味する<sup>6)</sup>。

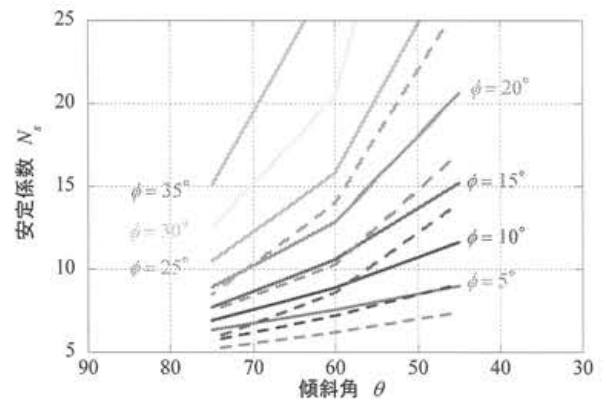


図-5 仮想斜面における土の安定性の関係

崩壊土砂量を調べるために内部摩擦角と崩壊土砂量の関係を図-6 に表した。図の直線は図-6 の安全係数と傾斜角の関係より導き出した。内部摩擦角が  $35^\circ$ 、傾斜角が  $45^\circ$  の崩壊土砂量は内部摩擦角が  $15^\circ$  の崩壊土砂量と比較すると半分に減少することが分かる。更に、内部摩擦角が  $5^\circ$  から  $35^\circ$  に変化する際に傾斜角が  $75^\circ$  において崩壊土砂量が 20% 減少したのに対し、傾斜角が  $45^\circ$  の場合は 79% 減少した。これより、傾斜角が大きくなると内部摩擦角の角度変化によらず、崩壊土砂量の変化は小さく

なることが推定される。また、内部摩擦角が  $25^\circ$  以上となると崩壊土砂量は  $10000 \text{ m}^3$  より減少せず、ほぼ変化しない。

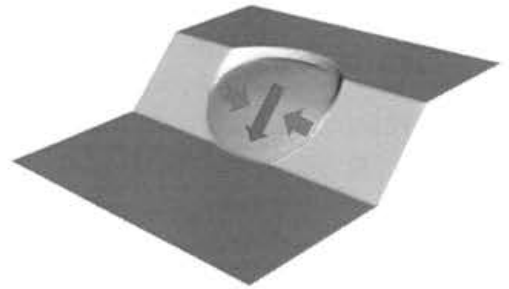
### (2) 解析結果の一例

図-7 に斜面の傾斜角が  $45^\circ$ 、内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合における土砂の 1 秒後、2 秒後、4 秒後、8 秒後の土砂の挙動の様子を表した。着色している部分が土砂の崩壊部分、矢印は土砂の移動方向を表す。

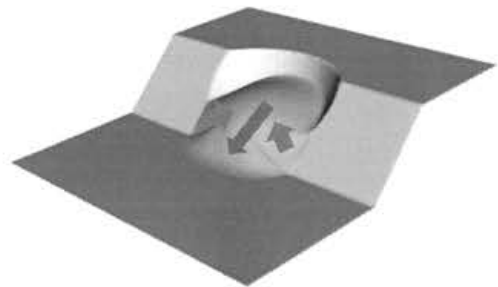
崩壊土砂は、すべり面の中央が最も深度が大きいため、斜面の中央部に土砂が集積するような形で移動した。この状態は土砂が斜面を流れ落ちるまで続き、土砂が斜面下部に至った時点で土砂の集積は最大となる。斜面下部に達した土砂は、障害物がない場合、同心円状に広がる。なお、斜面を流れ落ちる土砂の動きが速いため、斜面を回り込んで広がる土砂よりも斜面を真っすぐ流れる土砂の方が到達距離が長くなる。また、斜面に残った残留土砂は急速に速さを失い、斜面内に留まる。斜面を真っすぐ流れる土砂も流れるに従い摩擦により急激に速度を失い、ほぼ静止する。斜面を回りこむ土砂も斜面下部に達してほぼ静止して崩壊が終了する。

### (3) 崩壊土砂到達範囲の推定

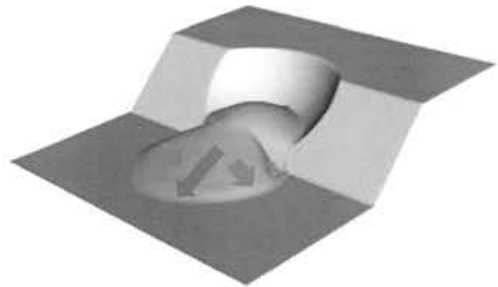
崩壊土砂が 8 秒後に到達した範囲を図-8 に示す。a) が傾斜角  $45^\circ$ 、b) が傾斜角  $60^\circ$ 、c) が傾斜角  $75^\circ$  の土砂の挙動の様子を示す。図の実線は崩壊後の移動土砂の堆積形状であり、破線はすべり面を示している。図の横軸は仮想斜面の  $x$  軸側からの断面図、縦軸は斜面の標高を表す。a) の場合、内部摩擦角が  $10^\circ$  において土砂到達距離は  $61 \text{ m}$  であった。一方、内部摩擦角が  $30^\circ$  において土砂到達距離は  $42 \text{ m}$  となり、到達距離は約  $31\%$  減少した。b) の場合は、内部摩擦角が  $10^\circ$  から  $30^\circ$  となるに従い土砂到達距離は  $16 \text{ m}$  から  $5 \text{ m}$  と約  $69\%$  減少した。c) の場合は、内部摩擦角が  $10^\circ$  から  $30^\circ$  となるに従い土砂到達距離は  $15 \text{ m}$  から  $7 \text{ m}$  と約  $53\%$  減少した。また、内部摩擦角を固定して考えると、内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合は傾斜角が  $45^\circ$  から  $75^\circ$  になるに従い、到達距離は約  $75\%$  減少し、 $20^\circ$  の場合は約  $83\%$  減少し、 $30^\circ$  の場合は約  $88\%$  減少した。以上のことより、傾斜角が大きくなると土砂の到達範囲は小さくなるが、傾斜角の大きい  $60^\circ$  以上であれば内部摩擦角が上昇すると、土砂の到達範囲の減少率が大きくなることが分かる。また、内部摩擦角が一定の場合は内部摩擦角が大きい程土砂の到達距離の減少率は傾斜を変化させると大きくなることが示唆され



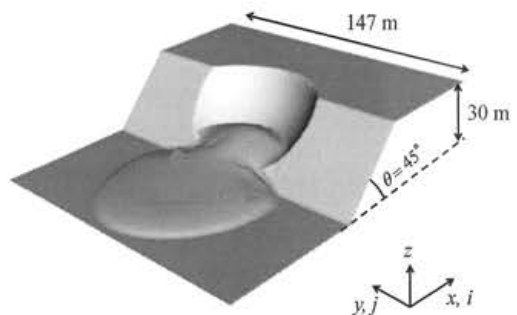
a) 1 秒後



b) 2 秒後



c) 4 秒後



d) 8 秒後

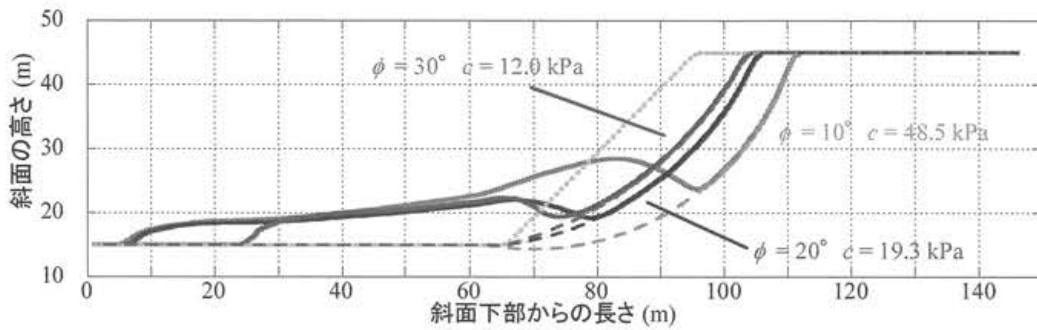
図-7 崩壊土砂の挙動

る。

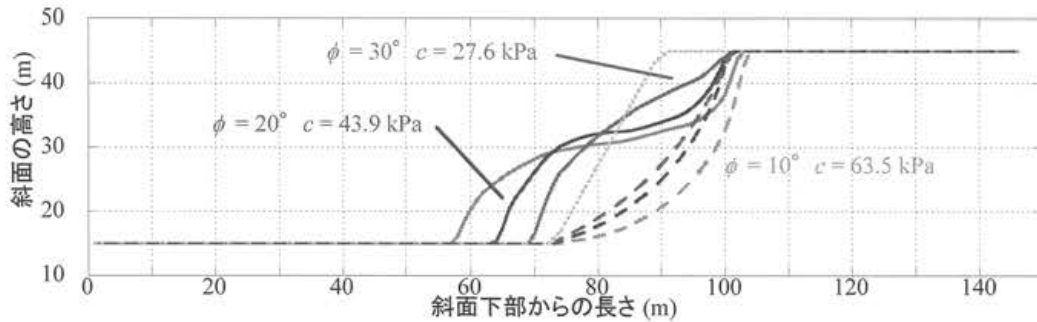
図-8 より得られた到達範囲と内部摩擦角および粘着力の関係図を図-9 に示した。グラフの横軸は内部摩擦角、縦軸は粘着力、到達距離についてそれぞれ 10 m おきに色を変化させてコンター図で示した。内部摩擦角が  $30^\circ$  の場合に粘着力が 12 kPa から 45.1 kPa に増加した場合に土砂到達距離は 42 m から 7 m に、内部摩擦角が  $20^\circ$  の場合は、粘着力は 19 kPa から 63.2 kPa に増加すると土砂到達距離は 60 m から 10 m に、内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合は、粘

着力が 48.5 kPa から 81.6 kPa に増加する場合に土砂到達距離は 61 m から 11 m に減少する。これらの結果より、内部摩擦角と粘着力が小さくなると土砂到達距離が大きくなることは自明であるが、土砂の到達範囲を最小限に抑えるために現実的なのは、粘着力が大きいことよりも内部摩擦角が大きいことであることが推定される。

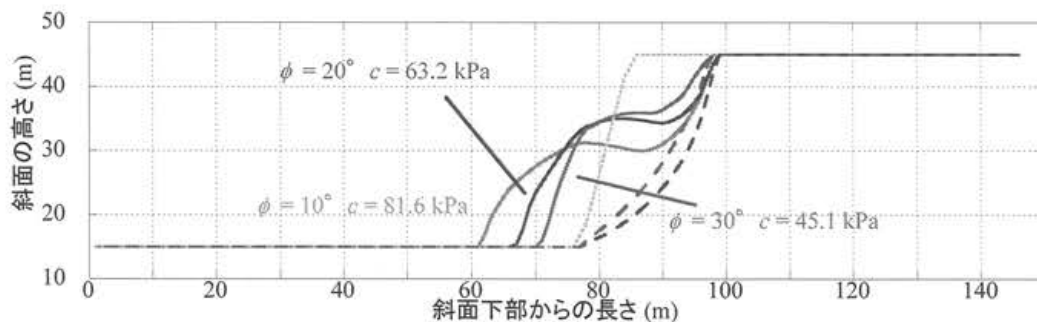
図-8 で得られた崩壊土砂量と土砂到達距離の関係を図-10 に示した。グラフの縦軸は崩壊土砂量、グラフの横軸は土砂の最大到達距離、グラフ中のブ



a)  $\theta = 45^\circ$  の土砂の挙動



b)  $\theta = 60^\circ$  の土砂の挙動



c)  $\theta = 75^\circ$  の土砂の挙動

図-8 崩壊土砂の高さと土砂到達距離



ロットした点は内部摩擦角が  $10 \sim 30^\circ$  の場合における到達距離と崩壊土砂量の関係を示す。内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合到達距離が 61 m から 15 m に減少すると崩壊土砂量は  $24296 \text{ m}^3$  から  $10737 \text{ m}^3$  とほぼ半減する。一方、内部摩擦角が  $20^\circ$  の場合は到達距離は 60 m から 10 m に減少すると崩壊土砂量は  $10133 \text{ m}^3$  から  $11018 \text{ m}^3$  とほぼ変化しない。同様に、内部摩擦角が  $30^\circ$  の場合も到達距離は 42 m から 5 m と減少するものの崩壊土砂量は  $10133 \text{ m}^3$  から  $10354 \text{ m}^3$  とほぼ変化しない。解析結果より内部摩擦角の小さな斜面の崩壊土砂量は到達距離に影響されるといえるが、内部摩擦角の大きな斜面については到達距離に関わらず崩壊土砂量はほぼ一定の値をとることが示唆される。

#### 4. まとめ

本文では、地盤の深層崩壊の被害範囲推定に向けた基礎的検討として、円弧すべり面を仮定した三次元斜面安定解析を行い崩壊土砂量を決定した後、崩壊後の土砂の到達範囲の基礎的検討を行った。これらより得られた結論を以下にまとめて記す。

(1) 崩壊土砂量は、内部摩擦角が大きく、かつ粘着力が小さくなるほど減少するが内部摩擦角が  $30^\circ$  以上となると崩壊土砂量が  $10000 \text{ m}^3$  に漸近した。これらより傾斜角によらず、仮想斜面における最小の崩壊土砂量が推定できることを示唆される。

(2) 崩壊土砂の最大到達距離は斜面の傾斜角が  $45^\circ$  で内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合に最大となり 61 m となった。また、内部摩擦角と粘着力と土砂到達距離の関係に着目すると内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合、到達距離を 10 m にするためには粘着力が 80 kPa 以上必要

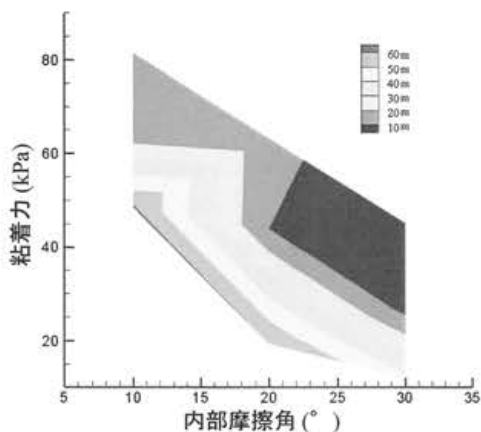


図-9 内部摩擦角と粘着力と土砂到達範囲の関係図

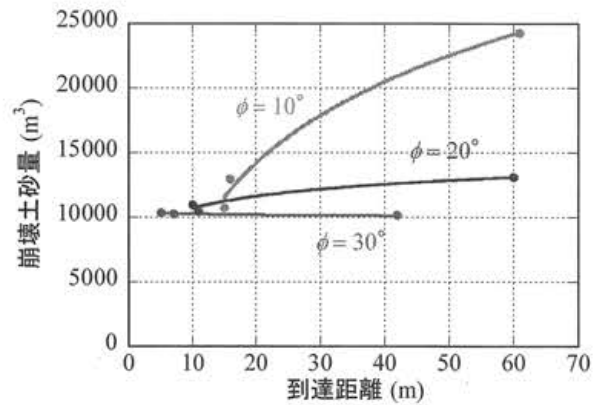


図-10 到達距離と内部摩擦角の関係

となるのに対して、内部摩擦角が  $30^\circ$  の場合は 27 kPa 程度で済む。また、崩壊土砂量と土砂到達距離の関係調べると、内部摩擦角が  $10^\circ$  の場合、到達距離が大きく減少したのに対し、内部摩擦角が  $30^\circ$  の土砂は土砂到達距離の増減に関わらずほとんど崩壊土砂量は変化していない。以上より、内部摩擦角の大きな土砂については土砂の到達距離も短く、崩壊土量も比較的少ないため土砂災害の被害を最小限に抑えることが可能であると考えられる。また、内部摩擦角の小さな土砂についても斜面が急勾配であれば崩壊土砂量を減少させることが可能で、土砂災害の被害を低減させることが可能であると推定された。

#### 参考文献

- 1) 地頭菌隆:深層崩壊に挑む, 土木學會誌, 第 100 卷, 第八号, pp.7-9, 2015
- 2) Reid, M. E. Christian, S. B, Brien, D. L, and Henderson, S. T. : Scoops3D-Software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape : U.S Geological Survey Techniques and Methods, Chapter-2. Basis of the Slope-Stability Analysis, pp.7-26, 2015
- 3) 佐々恭二 : 地すべり・斜面崩壊の運動予測-改良そりモデルとシュミレーションモデル-, 京都大学防災研究所年報第 30 号 B-1, pp.8-12, 1987.
- 4) 岩佐義郎・井上和也・水鳥雅文 : 氾濫水の水利の数値解析法, 京大防災研究所年報第 23 号 B-2, pp.3-6.
- 5) Dr.Fumihiko Imamura, Dr.Ahmet Cevdet Yalciner, Res.Assist Gulizar Ozyurt: TSUNAMI MODELLING MANUAL, April 2006
- 6) 川上房義 : 新編土質力学, 森北出版, pp.267, 1977.5.

(2016. 5. 31 受付)