深層崩壊発生機構に関する数値解析的考察

日本工営（株）○碇屋智之、太田敬一、徳永博、倉岡千郎

１．はじめに

2011 年 9 月の台風 12 号により紀伊半島において多数の深層崩壊が発生し、発生地域では崩壊による被害を受けた。また、崩壊に伴う河道閉塞箇所において、越流・決壊による土石流災害の恐れが高まった。これらの災害を受け、国や地方自治体等にて深層崩壊に関する調査 [1)]や警戒避難体制の強化が進められている。深層崩壊による被害の防止・軽減に向けた、ハード・ソフト対策を検討する上での課題の一つとして、事前に崩壊土砂量を想定しておくことが考えられる。そのためには、面的な大きさに加えて崩壊深を推定する必要がある。崩壊深は、過去の崩壊事例や地形・地質構造及び水理構造を調査して推定するものであるが、崩壊長(比高差と斜面勾配)、崩壊幅との関係から、崩壊深の大きさの範囲を推定することも考えられる。

そこで、本検討では既往の事例を調べて崩壊長と崩壊深の関係の有無を確認し、数値解析により崩壊長と崩壊深の関係を力学的な視点から分析した。なお、今回の数値解析では斜面の比高差と勾配の影響に着目するため、地形・地質的な要因は取り扱わないものとし、均一な物性値からなる単純な形状のモデルを作成することとした。

数値解析の具体的な検討項目は、以下の２点とする。①斜面での応力分布を抽出し、材料強度や崩壊メカニズムについて考察する。②地形量と崩壊によって生じる移動土塊の平均崩壊深との関係を確認する。

２．過去の崩壊事例の斜面長と崩壊規模の整理

崩壊斜面長と崩壊深の関係を示した事例(上野 2001)のグラフを図-1 に示す。また、限られた例ではあるが、台風 12 号(2011)の例(長殿地区：比高差 400m、斜面勾配 35°、崩壊深 80m)を加えた。図-1 より、斜面長とすべり面との間には、バラツキはあるものの崩壊長が大きいほどすべり面が深い傾向があることがわかる。また斜面長は、比高差と斜面勾配によって表現できるので、図-1 を図-2、図-3 へそれぞれ分割して示す。比高差が大きいほど崩壊深が大きくなる関係が見られるが、斜面勾配と崩壊深の関係はバラついている。本検討ではこれらを踏まえ、比高差と斜面勾配に対して、崩壊深はどのような関係にあるか、数値解析を用いて確認することとした。

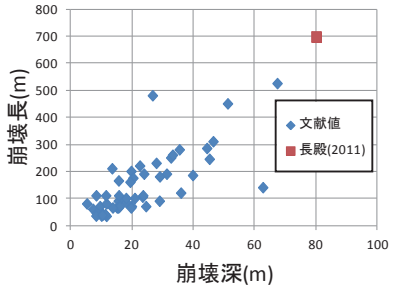

図-1 崩壊斜面長と崩壊深の関係
（参考文献 [2)] を基に加工）

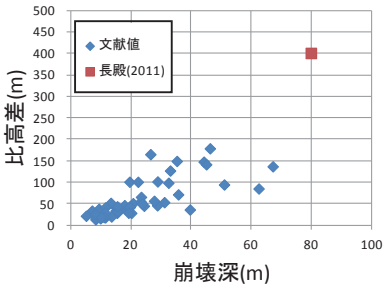

図-2 比高差と崩壊深の関係
（参考文献 [2)] を基に加工）

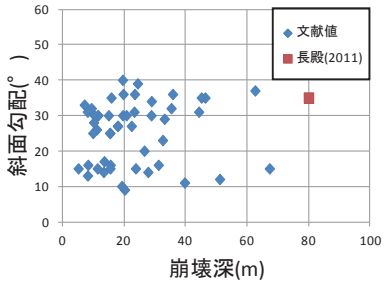

図-3 斜面勾配と崩壊深の関係
（参考文献 [2)] を基に加工）

３．数値解析による検討条件

本検討では、応力集中機構を示すことを主眼とし、複雑な地形や地質構造の要因を取り除き、均質な材料で作られた単純な形状のモデル斜面での基本的な考察を行うこととした(図-4)。

斜面勾配と比高差を変えたケースごとに応力状態の分布や崩壊形態等について検討した。検討ケースは、これまでの深層崩壊の事例を踏まえ、勾配を 25°～40°、比高を 100m～300m の中でメッシュを作成し(図-4、表-1)、①初期(弾性体)の自重による応力状態等を抽出した上で、②徐々に強度定数を低減させ、最終的な崩壊形状を確認した。なお、本検討のためのツールとして、有限差分法コード「FLAC3D」を用いた。

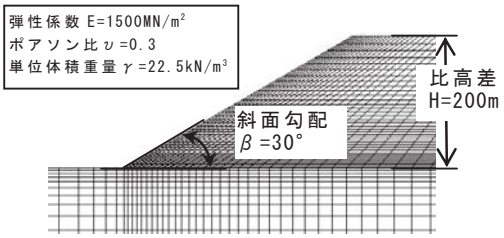

図-4 解析モデルの一例（ケース 10）

表-1 検討ケースとケース番号

		比高差 H(m)				
		100	150	200	250	300
斜面勾配 β(°)	25	ケース 1	ケース 5	ケース 9	ケース 13	ケース 17
	30	ケース 2	ケース 6	ケース 10	ケース 14	ケース 18
	35	ケース 3	ケース 7	ケース 11	ケース 15	ケース 19
	40	ケース 4	ケース 8	ケース 12	ケース 16	ケース 20

４．検討結果

4.1 崩壊前の斜面での応力状態

弾性状態で自重による応力状態(主応力図)を図-5 に示す。図中の十字は最小主応力 σ_{min} と最大主応力 σ_{max} の大きさと方向を組み合わせて各点での応力状態を示す。また、ケース 10 における斜面先付近の特定点(図-5 赤丸、斜面先より 20m 山側)の応力円を図-5 に示す。図-5 より、拘束圧の小さい地表面は地表面に沿って最大主応力が分布していること、斜面末端で主応力が大きくなることがわかる。ここで、主応力図中の赤丸の位置での鉛直方向の応力 σ_y について、深度見合で考えると、赤丸の深度 11m×単位体積重量 22.5kN/m³＝247.5kN/m² と計算されるが、モール円で確認すると σ_y=830kN/m² ほどである。つまり、斜面末端では、簡便法などで用いるように「深度×単位体積重量」から計算される応力よりも大きな応力が生じることを確認できる。

ここで、各ケースごとに上記の特定点での応力状態から、最大主応力 σ_{max}、最小主応力 σ_{min} を用いて、平均主応力 $p=(\sigma_{max}+\sigma_{min})/2$、最大せん断応力 $q=(\sigma_{max}-\sigma_{min})/2$ の比 q/p を、図-6 にまとめる。なお、q/p はモール円の中心とモール円の半径の比に相当し、均一な強度を持つ範囲であれば q/p が大きい程、相対的に破壊状態に近いことを示す。図-6 より、バラツキを含むが概ね比高差と斜面勾配が大きい程 q/p が大きく、斜面先付近は破壊状態に近づくことがわかる。斜面先の応力状態が破壊状態に至ると、応力分配されて破壊が斜面全体へ進行すると考えられることから、斜面先の応力状態は斜面全体の安定性を代表すると考えられる。この結果より、末端の応力は、「深度×単位体積重量」では表現できないものであり、斜面長と傾斜が大きい程大きくなる可能性が示された。よって、崩壊深や機構を検討する上では末端の応力状態を推定することも有益と考えられる。

4.2 崩壊形態と平均崩壊深

基準となる強度定数として、CM 級岩盤の一般値の下限値である粘着力 c=1000kN/m²,内部摩擦角 ϕ=30° を仮定し、c と tanϕ を同じ割合で徐々に強度定数を低減させ、最終的な崩壊形状を確認した。図-7 はケース 10 の場合の最大せん断ひずみの分布を示す。最大せん断ひずみの卓越している領域をすべり面とし、地表面とすべり面とに囲まれた領域を移動土塊と考え、斜面先と崩壊頭部を結ぶ直線(=崩壊長)ℓで割ることで平均崩壊深を算出した。図-8 により、斜面勾配が小さい程、崩壊した場合の移動土塊の厚みは大きくなり、比高差に応じて各勾配での移動土塊の厚みは大きくなることがわかる。

しかし、実際の斜面での崩壊深は、斜面内の相対的な弱部に沿って崩壊が生じるために、崩壊深には上限があるものと考えられる。今後の展望として、斜面に対する相対的な弱部の存在による崩壊形態や崩壊土砂量の違いを検討をする必要があると考えている。

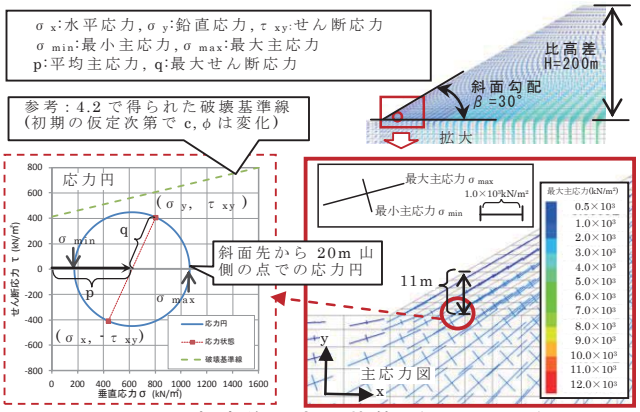

図-5 崩壊前の応力状態 （ケース 10）

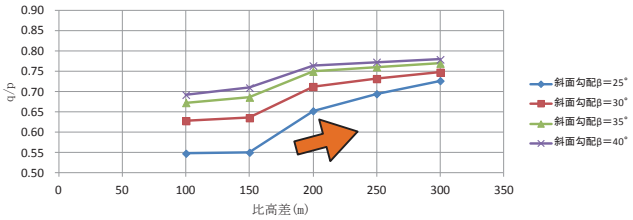

図-6 斜面先付近での崩壊前の応力状態(q/p を表示)

５．おわりに

本検討では、斜面の特徴(斜面勾配と比高差)と深層崩壊発生機構(斜面先への応力集中と平均崩壊深)との関係に力学的な視点から根拠付けを行い、その成果をまとめた。今後は、今回の基礎的な検討で得られた知見を実斜面へ結び付けて検討を進める予定である。

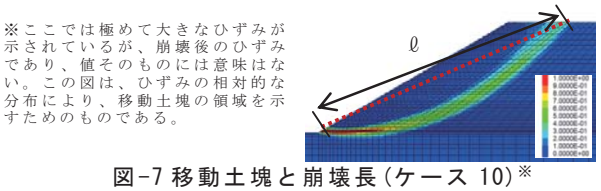

図-7 移動土塊と崩壊長（ケース 10）※

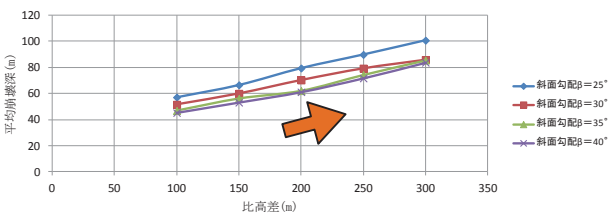

図-8 比高差と斜面勾配と平均崩壊深

参考文献

1)深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル（案）,(独)土木研究所，土木研究所資料 第4115号

2)地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討,上野将司,日本地すべり学会誌 vol.38No.2(2001)