

斜面内の応力分布が深層崩壊深さに及ぼす影響

日本工営(株) 徳永 博
日本工営(株) ○ 保谷智之
日本工営(株) 加藤暁之

論文要旨

平成23年9月の紀伊半島大水害では、深層崩壊と河道閉塞が同時多発的に発生した。深層崩壊の発生機構は数多く研究され、微地形や地形量等に基づいて発生の恐れのある箇所を抽出する方法等が知られている。本稿では、弊社の自主研究の一環として、地形量と深層崩壊崩壊の深さに着目し、地形・地質要因が斜面内の応力分布へどのように影響して崩壊に至るのか、基礎的なモデルによる数値解析を用いて力学的観点から考察した。

キーワード：深層崩壊, 数値解析, 応力変形解析, 弾塑性体, ユビキタスジョイントモデル

まえがき

深層崩壊の発生機構は数多く研究されているが、平成23年9月の紀伊半島大水害における台風12号による深層崩壊の発生機構として代表的な説明は下記のものである。

台風12号によって引き起こされた深層崩壊は事前に重力変形していた斜面に発生し、その変形は地質的長期間にわたる隆起と浸食に伴って進んでいたと考えられる。

(文献¹⁾より抜粋)

本稿では、上記の地形・地質の観点からまとめられた発生機構について、弊社の自主研究の一環として、数値解析(応力変形解析)を行い、力学的観点から考察する。数値解析の実施に当たって現場特性を詳細に考慮することは当然であるが、ここでは、現象を理解するために敢えて簡略化し、上記の抽象化された発生機構について力学モデルを使って説明することを試みる。

1. モデル化の着目点

深層崩壊の素因は、層理、節理、断層等の流れ盤地質構造が支配的と考えられる。また、地盤・岩盤に作用している応力に着目すると、比高差が大きいほど末端の応力は高くなっていると推定される(図-1)。この応力状態を素因として深層崩壊が発生するとの認識の下、本検討では、比高差などの地形量の影響に着目するため、材料特性が均一で単純な形状のモデル斜面を用いた(図-2)。共通するパラメータは表-1のとおりとする。

ここでは、斜面勾配(25~40°)と比高差(100~300m)を変えて全20ケース(表-2)の計算を行い、ケースごとに、①初期(弾性体)の自重による斜面末端部での応力状態等を

抽出し、②徐々に強度定数を低減させ、最終的な崩壊形状(=崩壊深)を確認した。なお、有限差分法による応力変形解析コードであるFLAC3D(Itasca社)(文献²⁾)を使用した。



図-1 深層崩壊を生じる岩盤斜面の例

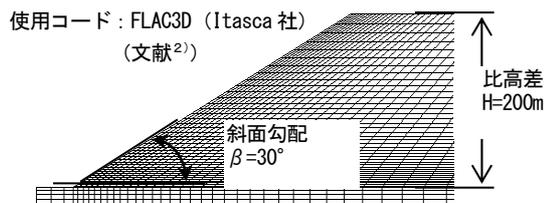


図-2 解析モデルの例(ケース10)

表-1 共通するパラメータ

弾性係数 E	1500MN/m ²
ポアソン比 ν	0.3
単位体積重量 γ	22.5kN/m ³

表-2 ケース表

β (°)	H (m)				
	100	150	200	250	300
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

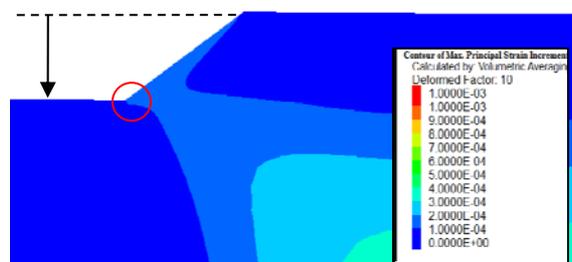
2. 崩壊前の斜面の比高差とひずみと応力状態

岩盤斜面脚部が河川等により浸食される(下削作用を受ける)と、斜面の比高差は大きくなる。崩壊前の斜面内部の変形や応力状態について考察するため、弾性体と仮定した比高差の異なるモデル斜面での自重を作用させた場合の応力変形解析結果を比較整理した。

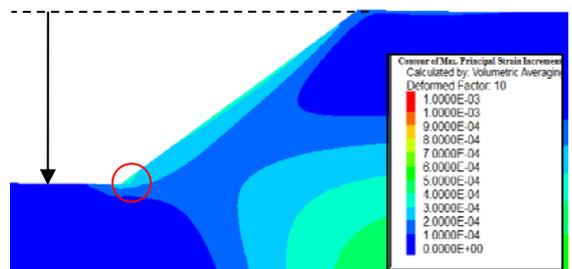
まず、崩壊前の斜面の変形について検討するため、斜面勾配の同一で比高差の異なるモデルへ自重を与えた場合の最大せん断ひずみの分布の例を図-3に示す。

図-3によると、比高差が大きくなるほど斜面の最大せん断ひずみは大きくなる傾向が確認できる。また斜面末端により大きなひずみが生じることが確認できる。

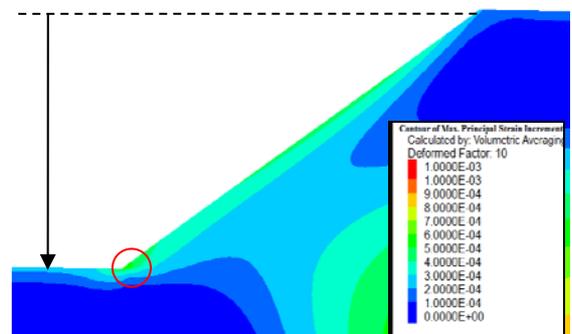
		H (m)				
		100	150	200	250	300
$\beta (^{\circ})$	25	ケース1	ケース5	ケース9	ケース13	ケース17
	30	ケース2	ケース6	ケース10	ケース14	ケース18
	35	ケース3	ケース7	ケース11	ケース15	ケース19
	40	ケース4	ケース8	ケース12	ケース16	ケース20



(a) 比高差 100m の場合



(b) 比高差 200m の場合



(c) 比高差 300m の場合

図-3 比高差ごとの最大せん断ひずみ分布

次に、斜面末端の応力状態を図-4の考え方に沿って、斜面先付近の特定地点(図-4中の赤丸、斜面先より20m山側の)の応力状態を抽出し、比高差と末端部の応力集中につい

て検討する。ここでは斜面勾配は30度とし、比高差100m、150m、200m、250m、300mの5つのケースのモデル斜面末端部での応力状態を抽出し、図-5にて比較して示す。

図-5によると、各ケース水平応力はあまり変わらず、比高差が大きくなるに従って鉛直応力が大きくなる傾向がある。また、比高差が大きくなるとともに、せん断応力も増加している。この結果、比高差が大きいほどモールの半径も大きくなることを確認できる。

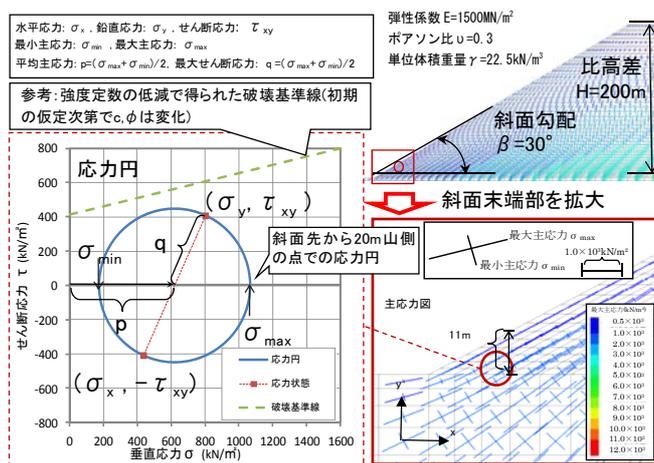


図-4 崩壊前の応力状態の抽出例(ケース10)

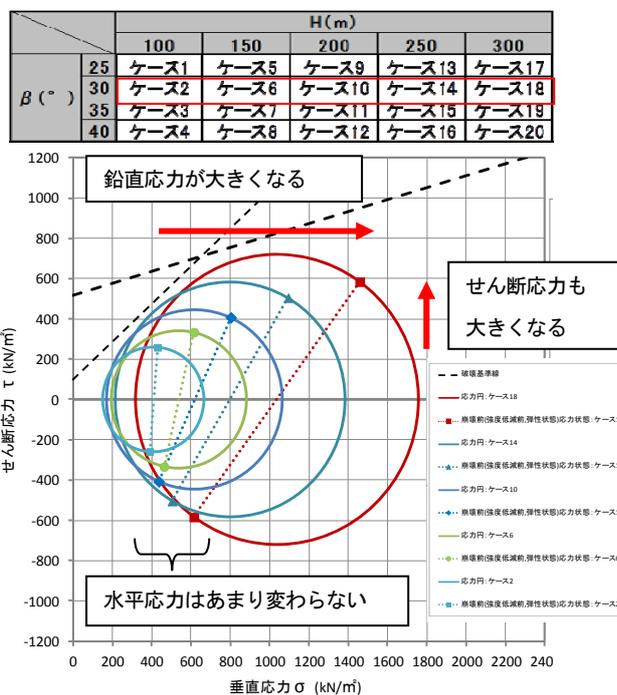


図-5 比高差ごとの斜面末端の応力状態の抽出

最後に、斜面勾配を25°、30°、35°、40°の場合についても同様の応力変形解析を行い、結果を取りまとめた(表-2全20ケース)。その際、ケースごとに上記の特定地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 $q=(\sigma$

$\max(\sigma_{mm})/2$ の比 q/p を算出して比較を行うこととした。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、均一な強度の領域であれば 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 に各ケースの q/p を示す。

図-6 より、パラツキを含むが概ね比高差と斜面勾配が大きい程 q/p が大きくなる傾向であることがわかる。また、斜面勾配に関係なく比高差が大きいほど q/p が大きくなる傾向であることがわかる。

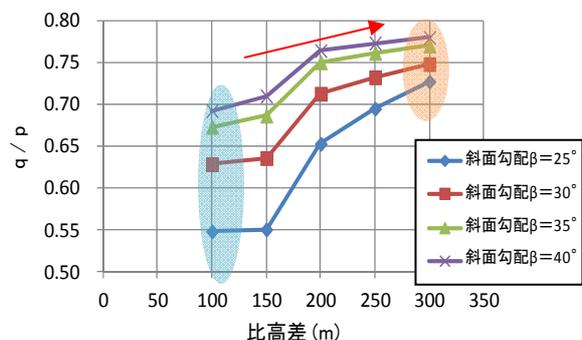


図-6 斜面末端での q/p

図-4 の主応力図中の赤丸の位置での鉛直方向の応力 σ_y について考察する。深度見合で考えると、鉛直方向の応力 $\sigma_y = \text{深度} 11\text{m} \times \text{単位体積重量} 22.5\text{kN/m}^3 = 247.5\text{kN/m}^2$ とである。しかし、解析モデルから抽出した応力円を確認すると $\sigma_y = 830\text{kN/m}^2$ ほどである。このような差が生じる理由について図-7 に概念図を示す。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だけでなく、斜面上方の土塊の自重にが斜面末端へ載荷されると考えられる。そのため、斜面の比高差が大きい程、斜面末端へ作用する斜面上方の重量も大きいことがわかる。

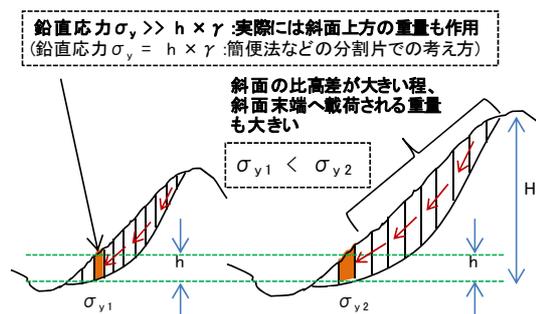


図-7 斜面末端での応力集中の模式図

次に、図-5 の応力円群と強度定数との関係について考察する。例えば、勾配 30° 比高差 300m の均一な物性を持つ崩壊前の斜面のモール・クーロンの破壊基準に基づく強度定数を推定する場合、図-5 に示す応力円群に触れない範囲内に破壊基準線を設定する必要があることがわかる。

従来通り、すべり面を決定し、簡便法などで用いるよう

に逆算で強度を求める場合よりも遥かに大きな応力が斜面末端に作用している可能性があり、その状態で長期間斜面形状が安定していたことを強度推定時には考慮する必要があると考えられる。

最後に、図-6 について考察する。図-6 の通り、比高差が大きい大規模な斜面ほど、斜面末端における平均主応力 p に対してモール円の半径に相当する偏差応力 q が大きくなる傾向にあり、せん断応力が発生しやすいことを意味する。つまり、斜面末端はせん断変形を受けて破壊により近い状態になりやすいことを示している。この傾向は、応力状態から変形へ変換して考えれば、図-3 の最大せん断ひずみ分布と同じものである。これらの傾向は、既往の地形・地質的な知見と整合する結果と言える。

3. 崩壊発生へと至る応力状態と崩壊深さ

ここでは、前述までの解析モデル(全 20 ケース)を弾塑性体へと変更し、材料強度定数を徐々に低減させる方法(せん断強度低減法)によって、変形の集中する深さを調べた。

せん断強度低減法は、図-8 に示す通り、斜面の強度定数を徐々に低減し、斜面全体が破壊したと認定できる時点で全体安全率 F を定義する方法である。計算技法上、斜面全体で応力のバランスが取れるまで、繰返し計算が行われ、一定回数の中で収束状態とならなければ、その斜面全体が崩壊に至ったと判定された状態(便宜的に、以下「崩壊状態」とする)と判定される。

ここで、図-9 に表-2 のケース 10 について、崩壊前(強度低減前,弾性状態)と崩壊状態での最大せん断応力の変化量を示す。図-9 によると、崩壊状態では、崩壊前に比べて、斜面頭部において最大せん断応力は減少傾向にあり、斜面末端では増加傾向にある。また、斜面末端の一点の応力状態を抽出してモール円を描くと、崩壊前に比べてせん断応力の増加とともに特に水平応力が大きく増えており、応力円の半径も大きくなっている。

図-10 に、ケース 10 について強度低減によって崩壊状態と判定されたときの最大せん断ひずみ分布を示す。ひずみが大きい領域と地表面に囲まれた面積 A を移動土塊量とし、斜面先と崩壊頭部を結ぶ直線(=崩壊長) l で割ることで崩壊深 t を算出した。

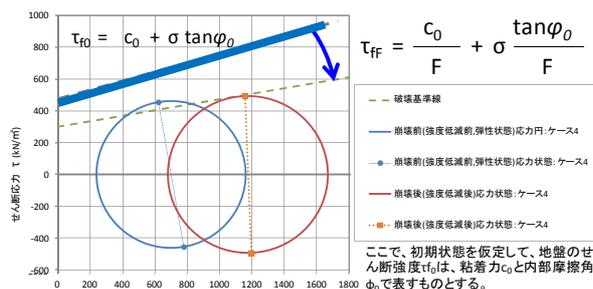


図-8 せん断強度低減法のイメージ

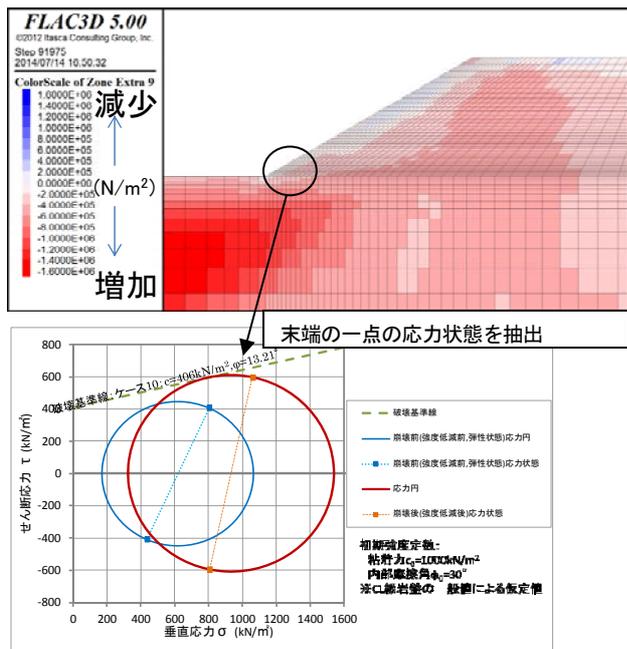


図-9 強度低減時の最大せん断応力分布の変化

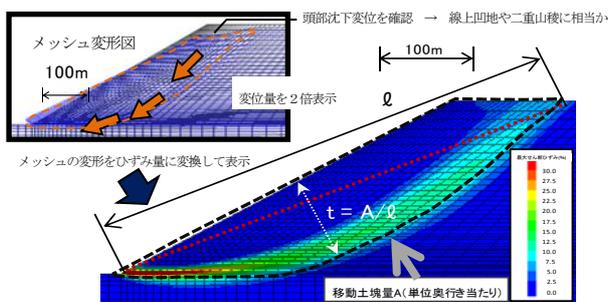


図-10 最大せん断ひずみ分布(ケース10)

4. 地質構造などを考慮した場合の解析例

実斜面での崩壊深および崩壊面の形状は様々な地形・地質構造や力学的要因に規制されると考えられる。平成23年に奈良県で発生した幾つかの深層崩壊の崩壊面形状に「くさび形状」が見受けられた。また長殿での深層崩壊では崩壊の北東を限る断層(文献¹⁾)の存在が指摘されている。さらに、流れ盤中の層理面などの特定方向に存在する相対的な弱部の影響なども考えられる。

一例として、弱部の位置を特定せず、特定方向の力に対して強度が小さくなるように設定されたユビキタスジョイントモデル(文献²⁾)をケース10のメッシュへ設定して解析を行った。図-12によると、図-10の円弧的な分布に対し、末端と頭部を除いて、設定した弱部の傾斜に沿う形の最大せん断ひずみ分布となっている(くさび形状)である。これは、材料特性によって、ひずみ、もしくは、応力の特定箇所への集中が助長された結果と考えられる。

図-11の通り、比高差と崩壊深さの大まかな関係は簡易なモデルで説明できるものの、数値解析を実際の斜面の検討に用いるためには、このような現場特性を考慮する必要がある。

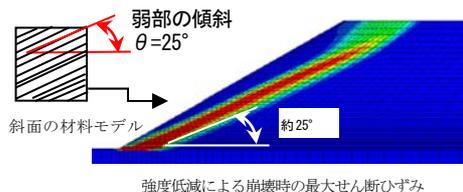


図-11 地質構造をモデルに考慮した解析例

図-11(左)に、同様の手法によって得られた表-2の全20ケースの崩壊深さを整理する。斜面勾配と比高差が大きい程、崩壊深は大きくなる事がわかる。

ここで、崩壊斜面長と崩壊深の関係を示した事例(文献³⁾)から読み取り図-11(右)に示す。また、限られた例ではあるが、台風12号(2011)の例(長殿:比高差400m、斜面勾配35°、崩壊深80m)を加えた。図-11(右)より、比高差と崩壊深との間には、バラツキはあるものの、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。

数値解析結果と実際の事例を比較すると、比高差に応じて崩壊深が大きくなる傾向は一致している。

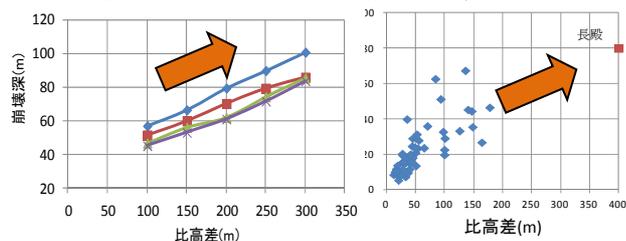


図-11 斜面形状と崩壊深の関係(左:解析結果 右:実斜面の比高差と崩壊深,文献³⁾を加工)

あとがき

深層崩壊の発生機構を考える上で、岩盤クリープ速度のオーダーを考慮すると、変状には数万年オーダーの時間を要しており、その間、100年確率規模相当の降雨を100回経験していることになり、降雨条件とそれに伴う地下水圧のみで説明することは困難と言える。そのため、既往の種々の研究で為されてきた通り、地形地質的な観点からの説明が必要である。本研究では、これらの知見を力学の観点から確認した。現象の理解を深め、各現場での機構検討の際の一助となれば幸いである。

参考文献(または引用文献)

- 1) 千木良雅弘: 深層崩壊—どこが崩れるのか—, 近未来社, 2013.10.15. pp.98. (引用頁), pp.58~59.
- 2) FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 5.0, User's Manual (User's Guide and Constitutive Models), Itasca Consulting Group, Inc., 2012
- 3) 上野将司: 地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討, 日本地すべり学会誌 vol.38No.2, 2001