

JSECE Publication No. 65

深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会

報告・提言

平成24年3月
社団法人 砂防学会

目 次

まえがき	1
1. 深層崩壊の実態	2
1.1 深層崩壊による災害の特徴	2
1.2 深層崩壊による災害形態	3
1.3 深層崩壊に起因する土石流の災害	4
1.4 天然ダムに起因する災害	4
2. 調査・研究・技術開発の現状	6
2.1 深層崩壊の発生機構に関する調査・研究・技術開発の現状	6
2.2 深層崩壊の発生場所に関する調査・研究・技術開発の現状	7
2.3 深層崩壊の影響範囲に関する調査・研究・技術開発の現状	9
2.4 深層崩壊の発生時刻・誘因に関する調査・研究・技術開発の現状	9
3. 深層崩壊の特徴と定義	12
3.1 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の特徴	12
3.2 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の分類方法	13
3.3 深層崩壊の区分	13
3.4 深層崩壊の定義の提案	15
4. 提言に向けて	16
4.1 今後必要な対策の方向性	16
4.2 今後取り組む必要性が高い事項	18
(1) 深層崩壊の発生・移動機構の解明	18
(2) 深層崩壊の発生予測手法の確立と精度向上	19
(3) 深層崩壊対策の考え方（一次的被害に対する対策）	21
(4) 深層崩壊が発生した際の緊急的な対応の高度化	23
(5) 関係機関による対策促進に向けた連携	24
5. おわりに	26
委員名簿と委員会・シンポジウムの開催経過	27

まえがき

平成 9 年の針原川土石流、平成 15 年の水俣市における土石流、平成 17 年の鰯塚山山系における土石流災害などのように、近年、深層崩壊により大規模な土石流が発生して下流に甚大な被害が発生している。また、平成 17 年の宮崎県耳川では豪雨による深層崩壊により大規模な天然ダムが形成されて、その後決壊した。さらに、台湾では平成 21 年（2009 年）8 月 9 日に高雄県の小林村で大規模な深層崩壊が発生して、500 名以上の住民が犠牲となった。この小林村における深層崩壊を中心とした災害を取り上げた NHK のテレビ番組「深層崩壊が日本を襲う」が平成 22 年（2010 年）6 月 27 日に放送されたこともあり、深層崩壊に関する一般国民の関心が急速に高まっている。

深層崩壊が発生すると、「①深層崩壊斜面または直下の集落が壊滅的被害を受ける」、「②天然ダムを形成し、上流では湛水被害、さらにこれが決壊することにより、下流地域に土石流・洪水被害を発生させる」、「③さらに、深層崩壊による崩壊土砂が土石流化して下流の人命・家屋・施設に大きな被害を与える」、という災害形態が考えられる。

深層崩壊の発生数は表層崩壊よりも少ないものの広域にわたり甚大な被害を与えるため、深層崩壊による災害を防止するための対応を早急に講じる必要がある。しかしながら、深層崩壊の現象や対策については未解明な部分も多い。

（社）砂防学会ではこうした状況を踏まえ、国民の生命・財産を守り、安全・安心な生活基盤の整備に寄与するために、平成 22 年 10 月に「深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会」を設置して次の事項について検討し、提案した。

- 1) 斜面運動現象の分類法の整理と「深層崩壊」の定義。
- 2) 「深層崩壊」への対応に関するあり方。
- 3) 「深層崩壊」に関する今後の調査・研究の方向。

また、平成 23 年 1 月 18 日には特別シンポジウム「深層崩壊を考える」を開催した。

この間、平成 23 年 9 月には台風 12 号に伴う豪雨により紀伊半島を中心として多数の深層崩壊が発生して崩壊土砂の流下により多くの人命が失われ、人家等にも多大な被害が発生した。また大きな天然ダムが 17 個形成され、そのうちの 5 個は決壊により下流の人家等に被害を与える危険性が特に高く、緊急調査とそれに基づく警戒避難および排水路の設置等の緊急対策が実施された。

本検討委員会では平成 22 年度に 3 回、平成 23 年度に 3 回、計 6 回の委員会を開催し紀伊半島における土砂災害の実態も考慮して、ここに本報告・提言をまとめた。本報告・提言が、広く国民全体、特に研究者、技術者、行政担当者の深層崩壊による災害に対する認識や知識を深めて、今後の深層崩壊による災害の軽減に役立てていただけることを願うものである。

平成 24 年 3 月 31 日

（社）砂防学会 会長

深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会
委員長 鈴木 雅一

1. 深層崩壊の実態

「深層崩壊」という用語は、我が国では羽田野（1974）や山口（1979）により使われ始めた（西本、2010）と言われている。太田（1993）はいわゆる斜面における土砂移動現象を表層崩壊、深層崩壊、地すべりに分類している。（社）砂防学会の「気候変化が土砂災害に及ぼす影響に関する研究小委員会」（委員長：藤田正治、京都大学防災研究所教授）は近年の記録的な豪雨により発生した深層崩壊の事例を整理し、深層崩壊の発生と降雨の関係について検討している（（社）砂防学会、2011）。本報告は本来ならば深層崩壊の定義から述べるべきであるが表層崩壊や地すべりとの違いについて明確な定義が存在していないため、ここでは、先ず、深層崩壊の実態と調査・研究・技術開発に関する現状を述べ、それらを踏まえて、深層崩壊の定義を提案する。

1.1 深層崩壊による災害の特徴

深層崩壊（写真-1～4）による土砂災害は、一般的に言われている土石流・がけ崩れ災害と比べると、発生頻度は低い。しかし、崩壊規模が大きいいため、一度発生すると被害が甚大化する恐れがある。また、深層崩壊は降雨のピークより遅れて発生することがあり（牛山ら、1997）、雨がやんだからといっても災害の危険性が直ちに低くなるとは限らない。なお、深層崩壊は豪雨だけでなく、地震・融雪等によっても発生する。



写真-1 鹿児島県出水市針原川における深層崩壊と土石流
（1997年7月発生）
土砂量約 20 万 m^3
死者 21 名、負傷者 13 名、
全壊家屋 23 棟
提供：国土交通省



写真-2 宮崎県臼杵郡美郷町野々尾、
耳川における深層崩壊と
天然ダム（2005年9月発生）
土砂量約 1000 万 m^3
人的被害なし
提供：国土交通省

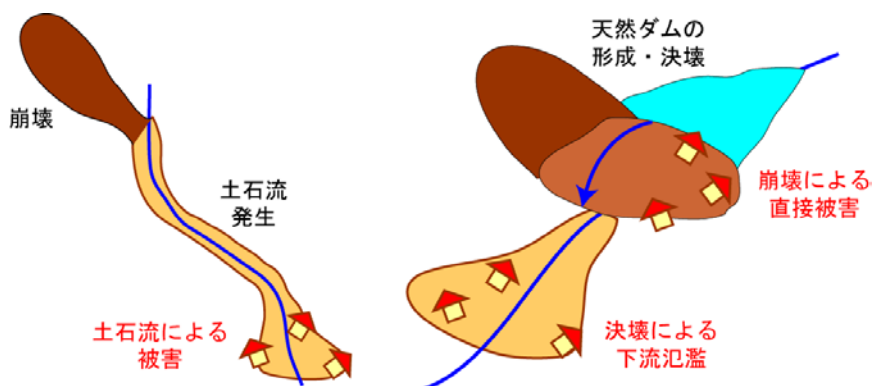


写真-3 奈良県十津川村宇宮原地区で発生した深層崩壊と土石流
(2011年9月発生)
人的被害なし(長殿発電所が被災)
提供:(独)土木研究所

写真-4 奈良県五條市赤谷地区における深層崩壊と天然ダム
(2011年9月発生)
土砂量約900万m³
人的被害なし
提供:(独)土木研究所

1.2 深層崩壊による災害形態

深層崩壊の災害形態は、崩壊土砂がそのまま河道に流入し、土石流化する場合と、崩壊土砂が河道を閉塞し、天然ダムを形成する場合の2つに大別される(図-1)。前者は崩壊土砂が流動化して(“流動”型)溪流等を流下し、下流の集落で氾濫することによって被害が生じる。後者については、被害の形態はさらに2つに大別され、崩壊土砂は攪乱が少ない状態で滑動して河道内に堆積し(“滑動”型)、河道の閉塞によって天然ダム上流に生じる湛水に起因した浸水被害と、天然ダムが決壊することによって生じる土石流・洪水に起因した氾濫被害に分類される。



a. 崩壊土砂が土石流化 b. 崩壊土砂が天然ダムを形成

図-1 深層崩壊による災害形態

1.3 深層崩壊に起因する土石流の災害

深層崩壊に起因する土石流災害の主な事例として、平成 9 年 7 月に鹿児島県出水市針原川で 21 名(牛山ら,1997)、平成 15 年 7 月に熊本県水俣市集川では 15 名(水野ら,2003)の犠牲者を出したものがある。また、地震による深層崩壊では、平成 20 年 6 月の岩手・宮城内陸地震において、ドゾウ沢で発生した土石流が下流にある駒の湯温泉で 7 名の犠牲者を出した(井良沢ら,2008)。融雪等による深層崩壊では、昭和 53 年 5 月に新潟県妙高市の南地獄谷白滝上流で発生した土石流が、関川を流下し、13 名の犠牲者を出した(正木ら,1979)。針原川・集川の災害では、土石流の流下区間にあった砂防施設が損傷し治山施設が破壊されていた(牛山ら,1997; 水野ら,2003)。過去の深層崩壊に起因する土石流の流速や流量は、一般的に言われている土石流のそれと比べて大きいことが指摘されており(武澤ら,2009)、深層崩壊に起因する土石流の外力は非常に大きいと考えられる。

1.4 天然ダムに起因する災害

天然ダムの湛水による災害事例として、明治 44 年 8 月に長野県白馬村の姫川上流の稗田山の崩壊土砂が姫川合流地点を閉塞し、上流に位置する下里瀬集落の大半を水没させ、死者 23 名を出した(田畑ら,2002)。なお、既往の研究成果では、崩壊によって生じた天然ダム湛水地の堰き上げは、家屋を流出させる力を有していることが示されている(高橋,1989)。

天然ダム決壊による土石流・洪水被害事例としては、明治 22 年の十津川災害では奈良県・和歌山県において、多数の天然ダムが形成され、その決壊により 1000 人以上の犠牲者が出たほか、人家や田畑に甚大な損害が生じた。この災害により、元の場所に住むことが出来なくなった十津川村の多くの住民が北海道に移住した(田畑ら,2002; 森ら,2011)。なお、同地域では、平成 23 年 9 月において、台風 12 号による豪雨により、多数の天然ダムが形成された(社団法人全国治水砂防協会,2011)。昭和 28 年 7 月に和歌山県北部で発生した有田川災害では、19 箇所の天然ダムが形成された。このうち大部分のものは同年 7 月中に決壊したが、いくつかは災害後残存し 2 ヶ月後の台風 13 号の豪雨により決壊した。そのうち花園村の金剛寺で発生した天然ダム決壊では下流に水害を起こしている(武居,1987)。

平成 16 年新潟県中越地震、平成 20 年岩手・宮城内陸地震では多数の天然ダムが発生し、集落や温泉旅館が湛水により水没したが、国土交通省・都道府県による応急復旧工事等が行われた(森ら,2011)ことにより、被害の甚大化にはいたらなかった。

海外の事例としては、2009 年 8 月に台湾に上陸した Morakot 台風は、3 日雨量約 2,800mm を越える異常な雨をもたらし、高尾県小林村で発生した大規模な深層崩壊をはじめとして、深層崩壊や天然ダムの決壊による洪水等により 700 名以上が犠牲となった((社)砂防学会、2011)。

参考文献

- 羽田野誠一(1974)：崩壊地形（その2）、土と基礎、Vol22, No. 11, p. 50-58
- 井良沢道也・牛山素行・川邊 洋・藤田正治・里深好文・檜垣大助・内田太郎・池田暁彦（2008）：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害について、砂防学会誌、Vol. 61、No. 3、p. 37-46.
- 正木和明、飯田汲事（1979）：1978年5月18日妙高土石流の被害調査、愛知工業大学研究報告、p. 235-242.
- 水野秀明、杉浦信男、寺田秀樹、内田太郎、原楨利幸、曾我部匡敏、桜井亘、西本晴男、小山内信智、武澤永純、土井康弘（2003）：2003年7月の梅雨前線豪雨によって発生した九州地方の土石流災害(速報)、砂防学会誌、Vol. 56、No. 3、p. 36-43.
- 森俊勇、坂口哲夫、井上公夫(2011)：日本の天然ダムと対応策、古今書院、p. 14-29、p. 78-84
- 西本晴男(2010)：土砂移動現象及び土石流の呼称に関する変遷の研究、東京大学学位論文、p19
- 太田猛彦：森林と浸食(1993)：砂防学講座第2巻土砂の生成・水の流出と森林の影響、(社)砂防学会、山海堂、p. 256-257
- 社団法人砂防学会(2011)：気候変化が土砂災害に及ぼす影響に関する研究小委員会最終報告書；極端現象分科会、流域の土砂生産・流出と自然環境変化の相互作用に関する研究報告書、p. 66-79
- 社団法人全国治水砂防協会(2011)：速報 平成23年9月台風12号による土砂災害の状況、砂防と治水、Vol. 44、No. 4、p. 78-84.
- 田畑茂清、水山高久、井上公夫(2002)：天然ダムと災害、古今書院、p. 29. p. 86-100.
- 高橋保(1989)：昭和40年奥越豪雨-真名川の河道埋塞-、二次災害の予知と対策、社団法人全国防災協会、No. 3、p. 7-23.
- 武居有恒(1987)：昭和28年有田川災害、二次災害の予知と対策 No.2、p. 47-71.
- 武澤永純、内田太郎、鈴木隆司、田村圭司(2009)：鹿児島県船石川で発生した深層崩壊に起因する土石流の推定、砂防学会誌、Vol. 62、No. 2、p. 21-28.
- 牛山素行、北澤秋司、三上岳彦(1997)：1997年鹿児島県出水市針原川土石流時の豪雨の特徴、砂防学会誌、Vol. 50、No. 4、p. 25-29.
- 山口伊佐夫(1979)：治山設計、農林出版、p. 11, p. 90-91

2. 調査・研究・技術開発の現状

深層崩壊については、古くから研究事例があり、少なくとも、50年近く様々な研究が行われてきた。一方で、発生頻度は表層崩壊や土石流に比べて大きくはなく、研究の事例数は少ないのが現状である。

2.1 深層崩壊の発生機構に関する調査・研究・技術開発の現状

深層崩壊の発生誘因には豪雨、地震、融雪、火山活動、人為等があり、発生機構には共通する部分と異なる部分があると考えられる。深層崩壊の発生数（発生頻度）は豪雨と地震によるものが圧倒的に多いので、これらについて述べる。

(1) 豪雨による深層崩壊の発生機構

豪雨による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルとしては基本的には表層崩壊と同じく、雨水の地中深部への浸透による地盤・岩盤内の間隙水圧の上昇（地下水水位の上昇）によるすべり面付近での地盤・岩盤の有効応力の減少が引き金になると考えられている。地中水の地盤・岩盤内部での移動を解析する手法としては、地盤の場合には飽和・不飽和浸透流解析が用いられ、岩盤の場合には実際には不連続体である場合が多いが一般的には連続体としての解析が行われている場合が多い。このような解析を行う場合には表層から深部に至る地盤・岩盤の透水係数、密度、すべり面となる可能性がある地盤・岩盤の位置と強度（ c 、 ϕ など）、ならびに深層崩壊の特徴と言われる地質構造（活断層、リニアメント等）などを調査して解析に用いる必要がある。斜面の深層部でのこれらの地盤・岩盤の性質を測定することは困難である場合が多いため、豪雨による深層崩壊の発生を浸透流解析等により検討した例は少ない。恩田ら（1999）は降雨流出ピークの遅れ時間の違いから表層崩壊、深層崩壊に寄与する地下水の移動経路の比較を行っている。雨水の浸透に関しては、崩壊土量と崩壊発生の遅れ時間との関係について既往の深層崩壊事例が調査されている（八反地、2003）。斜面深部の地下水の移動状況を反映しているものとして、深部からの湧水の量および水質の変化が観測されており、降雨量および降雨水の水質との比較がなされている（宮田ら、2003）。斜面深部からの湧水量を推定するためにタンクモデル等も用いられている（地頭菌ら、2004）。深層崩壊跡地の斜面における湧水は深層浸透水によるものと推定され、流域界では説明できない流出経路が認められ（地頭菌ら、1998）、地中水の集水地形や地下構造が大きな影響を与えていると考えられる。湧水流量のピークは降雨のピークから4～9時間遅れがみられた（地頭菌ら、2004）という報告もある。さらに風化物の存在、崩壊跡地やすべり面の位置、地質（地層の走向・傾斜、難透水層）、地質構造（断層、リニアメント）、湧水の量と水質が深層崩壊発生と強く関連していることが報告されている（地頭菌ら、2004および2006）。

(2) 地震による深層崩壊の発生機構

地震による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルのうち簡便なものとして地震動による加速度（水平、鉛直方向）あるいは震度（水平、鉛直方向）が斜面の地盤・岩盤に作用することにより地盤・岩盤に慣性力が発生し、このため滑動力が増大して地盤・岩盤のせん断抵抗力を超えると崩壊が発生すると考えて斜面安

定解析手法を用いて検討されている（中村ら、1988）。しかしながら、斜面の安定に影響するのは加速度の大きさだけではなく、周期（周波数）特性、および継続時間も重要である。また、地盤内の地震動の特性は地盤・岩盤の密度、層厚、せん断弾性係数、減衰定数などにより変化する。また、斜面のような地形的に複雑な地盤では地形効果による地震動の増幅が見られることから、一般的には2次元ないし、3次元の応答解析により斜面地盤・岩盤内の地震動特性の解析が行われる（川邊, 2000）。地盤・岩盤の強度の測定には振動三軸試験などが用いられている。地震による土塊・岩塊の移動量に関して限界加速度を超えた時間の積分値で評価するニューマーク法が提案されている（Wilson & Keefer, 1985）。一方、地震による他の崩壊機構としては土塊あるいはすべり層の液状化あるいは流動化によるものが報告（中村, 2000）されている。液状化あるいは流動化を起こし易い地質条件としては飽和した砂、シルトや鋭敏比の高い粘土等が指摘されている（中村, 2000）。

(3) クリープ現象による深層崩壊の発生機構

深層崩壊の発生機構をクリープ現象の面から捉える方法もある。豪雨と地震に共通する深層崩壊の発生機構としては、堆積岩地帯（非火山地域）における主として重力に起因する長期間にわたるクリープ現象による斜面の変形（下川・岩松, 1985; 千木良, 2007; 鈴木ら 2008; 横山ら, 2011; Akther ら, 2011）が報告されている。斜面のクリープ現象に関する数値解析手法としては FEM（有限要素法）、FDM（差分法）を用いた弾粘塑性解析法などが用いられる。長期間にわたる斜面のクリープに伴い、斜面上部の尾根付近では多重山稜や線状凹地、階段状の波状の地形、滑落崖、円弧状クラック等が形成されるとともに、斜面中腹部では斜面のはらみだしが生じ、斜面下部では小崩壊が発生すると報告されている。またクリープ現象により岩盤は片状岩なる場合が多いという報告がある。また、このようなクリープによる崩壊は同一地域で部分的な崩壊を繰り返す場合がある。鈴木ら（2008）、横山ら（2011）は長期間のクリープ現象によって形成された微地形要素（円弧状クラック、岩盤クリープ斜面、線状凹地、山頂緩斜面、地すべり地形）、地質構造（活断層、明瞭なリニアメント、キャップロック構造）、地形量（斜面傾斜度と集水面積）および周辺の深層崩壊跡地と深層崩壊発生との関係を分析している。これとは別に比較的短期間のクリープ現象に伴い斜面が急速に不安定化して深層崩壊が発生する場合があり、このような場合には移動土塊の移動量の時間変化を基に崩壊発生時刻を予測することが試みられている（斉藤ら, 1966; 山田ら, 1971）。

2.2 深層崩壊の発生場所に関する調査・研究・技術開発の現状

まず、深層崩壊の発生場所に関する研究としては、深層崩壊地周辺の地形、地質、水文環境に関する詳細な調査・研究が挙げられる。これらの研究では、

- ① 深層崩壊発生斜面およびその周辺では、古い深層崩壊の跡地がしばしば確認される（例えば、下川・岩松, 1985）。
- ② 深層崩壊発生斜面には特徴的な微地形（例えば、2重山稜など）が確認できる（例えば、町田, 1967; 羽田野, 1974）。

- ③ 深層崩壊発生斜面では、岩盤のクリープなど、斜面の変形が確認され、深層崩壊発生前に岩盤の変形が生じていた可能性が高い場合が多い（例えば、Wang et al., 2003 ;Nishii and Matsuoka, 2010）。
- ④ 深層崩壊発生斜面では、地質的または水文・水理的に不連続な構造を有していることが多い（例えば、地頭藪ら、2006；千木良、2006）。

などが明らかになってきた。

さらに、GISやDEMの普及により、空中写真やDEMを用いた面的にかつ比較的広域に深層崩壊地及びその周辺の地形的特徴など各種要因との関連性の分析が可能となり、様々な研究が進められてきている。その結果として、

- ⑤ 深層崩壊は過去の深層崩壊跡地が集中している地域で発生頻度が高い。
- ⑥ 深層崩壊は隆起量の大きい所で発生頻度が高い。
- ⑦ 深層崩壊は比較的緩勾配の山頂緩斜面の縁の急斜面や深く切れ込んだ谷の側岸の急斜面で起こることが多い。

などが報告されてきた（例えば、Korup et al., 2007；横山ら、2011）。

一方で、表層崩壊の発生場所の予測に関する既往研究は、(1)各種の要因と表層崩壊発生との関係を統計的に分析し、表層崩壊発生に及ぼす影響因子抽出およびその重み付けを行い、経験的に表層崩壊の発生危険度を予想する手法、(2)地下の水移動に関する数値モデルと斜面安定解析に関する数値モデルを組み合わせた物理的な斜面崩壊予測モデルを用いて、表層崩壊の発生危険度の空間分布を評価する物理モデルの2つが主流である。しかし、深層崩壊については、先にも述べたように発生事例数が少なく、(1)のような統計処理が困難であった。一方、岩盤中も含めた水移動のモデル化が困難であること、深層崩壊をコントロールする岩盤の物性値に関する情報を定量的に得ることが困難であることなどのため、深層崩壊の発生場所を予測する研究は近年まで極めて限られていた。

これに対して、近年、(独)土木研究所において、日本全国の深層崩壊と地質、第四紀の隆起量との関係を分析した（内田ら、2007）上で、推定される深層崩壊の発生頻度を4段階に分類した日本全国の地図が作成された。さらに、前述の①～⑦を参考に、過去の深層崩壊の発生状況、深層崩壊と関連性の高い微地形・地質構造の分布状況、勾配および集水面積から、深層崩壊の発生危険度を評価する「深層崩壊のおそれのある溪流抽出マニュアル(案)」が提案された。このように、地域スケール、流域スケールでは深層崩壊の発生危険度が徐々に評価できるようになってきたものの、現時点でも、表層崩壊で研究が進められているような、斜面単位で深層崩壊の危険度を評価する手法の開発はほとんどされていないのが現状である。

一方、近年、レーザープロファイラや空中電磁探査、人工衛星リモートセンシングなど新たな技術を用いて、従来得るのが困難であった詳細な表面地形、面的な地下構造、微少な地表面の変位などの情報が得られるようになってきている（例えば、鈴木ら、2009；Roreing et al., 2009；内田ら、2010）。深層崩壊の発生場所の予測に関しても、これらの新たな技術を活用した研究も進められ始めている。

2.3 深層崩壊の影響範囲に関する調査・研究・技術開発の現状

深層崩壊の影響範囲を明らかにするためには、2.2 で概観した深層崩壊の発生場所に関する調査・研究・技術開発のみならず、深層崩壊の発生規模および流下範囲に関する調査・研究・技術開発が必要となる。これまで、深層崩壊の規模について、代表的な深層崩壊では詳細な調査が行われ、崩壊土砂量や崩壊幅といった規模に係わる調査が行われてきた。近年、過去の調査結果を踏まえて、深層崩壊の規模に関するデータが集約され、実態については徐々に把握されてきてはいる（例えば、田村ら、2010）。しかし、規模が特定されている深層崩壊は必ずしも多くはなく、規模を規定する要因に関する検討は十分に行われてきたとは言い難い。

また、流下範囲については、深層崩壊で生じた崩壊土砂が流動化・土石流化することなく直撃し被害が生じる現象、深層崩壊で生じた崩壊土砂が土石流化して流下する現象、深層崩壊による土砂が天然ダムを形成し、その天然ダムが決壊することにより生じた土砂・水が流下する現象など幅広い現象についての調査・研究が必要となる。これまで、流下現象ごとに、事例研究、数値計算手法に関する研究・技術開発が行われてきた（例えば、中川ら、1998；水野ら、2003；里深ら、2007；吉野ら、2011；西口ら、2011）。その結果、今後、実用化に向けてさらなる研究・技術開発が必要なものの、流下現象が特定された場合、影響範囲はある程度の精度で予測できるようになりつつある。しかしながら、どのような流下現象となるかを予測する技術（土石流化するか、天然ダムを形成するかなどを予測する技術）や流下現象の詳細に関する研究（土石流が何波に分かれていたかなど）については、十分な知見が得られておらず、さらなる研究が必要であるといえよう。

2.4 深層崩壊の発生時刻・誘因に関する調査・研究・技術開発の現状

深層崩壊発生の主な誘因としては、豪雨、地震、および長期的な重力性の変形が挙げられる。このうち、豪雨については、降雨量と深層崩壊発生の関係の検討が重要であると考えられる。しかし、通常の表層崩壊や土石流の発生に関しては、統計的に崩壊・土石流の発生と降雨量の関係が検討されてきてはいるものの、深層崩壊については、前述の通り、統計的な処理を行うに十分な事例が集まりにくいことなどから、そのような研究例はこれまで少なかったのが現状である（例えば、八反地、2002）。しかしながら、2011年台風12号における災害では、多数の深層崩壊が発生し、発生時間の特定も進められつつあることから、今後この面での研究の進展が待たれる。また、地震による深層崩壊も同様で、地震動と深層崩壊の関係について十分な検討が行われていない。一方、重力性の変形による深層崩壊の発生に関しては、地すべり末端の崩落現象などを対象に、変位（変形）速度の時間変化から崩落発生時刻を予測する研究が進められている。

参考文献

- Akther, H., Shimokawa, E., Teramoto, Y., Jitousono, T. (2011): Geomorphological features and prediction of potential sites for deep-seated landslides on Wanitsuka Mountain, Miyazaki Prefecture, Japan、砂防学会誌、63(5), p14-21
- 千木良雅弘 (2006): 地すべり・崩壊の発生場所予測—地質と地形からみた技術の現状と今後の展開—。土木学会論文集 C, Vol. 62、No. 4、p. 722-735.
- 千木良雅弘 (2007): 崩壊の場所—大規模崩壊の発生場所予測—、近未来社、256pp.
- 羽田野誠一 (1974): 最近の地形学 8. 崩壊性地形 (その 2)、土と基礎、Vol. 22, No. 11, p. 85~93
- 八反地 剛 (2003): 降雨を起因とする深層崩壊の特徴—崩壊土量と遅れ時間の関係—。砂防学会誌、Vol. 55、No. 6, p. 74~77.
- 地頭菌隆、下川悦郎 (1998): 1997 年鹿児島県出水市針原川流域で発生した深層崩壊の水文地形学的検討、砂防学会誌、51(4), p. 21-26
- 地頭菌隆、下川悦郎、迫正敏、寺元行芳 (2004): 鹿児島県出水市針原川流域の水文地形的特性と深層崩壊、砂防学会誌、56(5), p. 15-26
- 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳 (2006): 深層崩壊発生場予測法の提案、砂防学会誌、Vol. 59, No. 2, p. 5-12
- 川邊洋 (2000): 地震砂防 (第 1 章 地震の発生と地震動) p1-13
- Korup, O., Clague, J. J., Hermanns, R. L., Hewitt, K., Strom, A. L., and Weidinger, J. T. (2007): Giant landslides, topography, and erosion, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 261, p. 578~589.
- 町田 洋 (1967): 荒廃山地における崩壊の規模と反復性についての一考察、水利科学、Vol. 11, No. 2, p. 165~182
- 宮田秀介、内田太郎、浅野友子、安藤宏幸、水山高久 (2003): 花崗岩山地一次谷流域の流出現象に及ぼす岩盤地下水の影響、砂防学会誌、56(1), p. 13-19
- 水野秀明・杉浦信男・寺田秀樹・内田太郎・原禎利幸・曾我部匡敏・桜井 亘・西本晴男・小山内信智・武澤永純・土井康弘 (2003): 2003 年 7 月の梅雨前線豪雨によって発生した九州地方の土石流災害(速報)、砂防学会誌、Vol. 56, No. 3, p. 36~43
- 中川 一・高橋 保・里深好文・立川康人・市川 温・吉田義則・中村行雄 (1998): 平成 9 年鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害について、京都大学防災研究所年報、Vol. 41, B-2, p. 287-298
- 中村浩之 (1988): 地震に伴う大規模斜面崩壊に関する研究、第 5 章土質工学的特徴、土木研究所資料第 2544 号、p. 85-94
- 中村浩之 (2000): 地震砂防 (第 2 章 地震による崩壊発生) p. 14-26
- 西口幸希、内田太郎、石塚忠範、里深好文、中谷加奈 (2011): 細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション—深層崩壊に起因する土石流への適用、砂防学会誌、Vol. 64、No. 3、p. 11~20
- Nishii R., and Matsuoka, N. (2010): Monitoring rapid head scarp movement in

- an alpine rockslide, *Eng. Geol.*, Vol. 115, pp. 49-57.
- 恩田裕一、小松陽介、辻村真貴、藤原淳一(1999)：降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性、*砂防学会誌*、51(5), p. 48-52
- Roering, J. J., Stimely, L. L., Mackey, B.H., and Schmidt, D.A. (2009): Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L19402, DOI:10.1029/2009GL 040374.
- 斉藤迪孝、上沢弘(1966)：斜面崩壊時期の予告、*地すべり (地すべり学会誌)*, Vol. 2, No. 2, p. 7-12
- 里深好文・吉野弘祐・小川紀一郎・水山高久 (2007)：天然ダムの決壊時のピーク流量推定に関する一考察、*砂防学会誌*, Vol. 59, No. 6, 55～59,
- 下川悦郎・岩松 暉 (1985)：九州山地におけるクリープ性崩壊について、*昭和60年度砂防学会研究発表会概要集*, p. 194-197
- 鈴木隆司、内田太郎、田村圭司、寺田秀樹、堤宏泰、下西浩治、井上亨郁、相馬竜司(2008)：深層崩壊発生危険度評価に有効な地形指標の提案、*平成20年度砂防学会研究発表会概要集*、p10-11
- 鈴木隆司・内田太郎・田村圭司 (2009)：深層崩壊発生斜面の特定に向けた地盤構造調査法、*土木技術資料*、Vol. 51, No. 7, p. 8～13.
- 田村圭司・内田太郎・武澤永純 (2010)：歴史的な大規模崩壊の実態、*土木研究所資料 No. 4169*
- 内田太郎・鈴木隆司・田村圭司 (2007)：地質及び隆起量に基づく深層崩壊発生危険地域の抽出、*土木技術資料*、Vol. 49, No. 9, p. 32～37.
- 内田太郎・中野陽子・秋山浩一・田村圭司・笠井美青・鈴木隆司 (2010)：レーザー測量データが表層崩壊発生斜面予測及び岩盤クリープ斜面抽出に及ぼす効果に関する検討、*地形*、Vol. 31, p. 385～401.
- Wang W-N., Furuya T., and Chigira, M. (2003): Geological and geomorphological precursors of the Chiu-fen-erh-shan Landslide triggered by the Chi-chi Earthquake in Central Taiwan, *Eng. Geol.*, Vol. 69, p. 1-13.
- Wilson, R. C., & Keefer, D. K. (1985) : Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, *U. S. G. S. Professional Paper 1360*, p. 317-346
- 山田剛二、小橋澄治、草野国重(1971)：高場山トンネルの地すべりによる崩壊、*地すべり (地すべり学会誌)*、Vol. 8. No. 1, p11-24
- 横山 修・内田太郎・田村圭司・鈴木隆司・井上亨郁 (2011)：宮崎県鱒塚山地における深層崩壊と微地形・地質的特徴の関係、*砂防学会誌*、Vol. 63、No. 5 p. 3～13
- 吉野弘祐・高濱淳一郎・水山高久・内田太郎・小川紀一郎 (2011)：側岸崩落を考慮した天然ダム越流侵食過程における二次元シミュレーション、*砂防学会誌*、Vol. 63、No. 6 p. 52～58

3. 深層崩壊の特徴と定義

3.1 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の特徴

1) 地すべりと崩壊（表層・深層）の特徴

山地や丘陵地の斜面を構成する地盤・岩盤内の一部がすべり面に沿って移動する現象は大きくは地すべりと崩壊に区分される。地すべりと崩壊の特徴を比較したものを表-1 に示す。一般に地すべりではその移動土塊・岩塊の動きは継続的あるいは断続的で移動速度は小さく、土塊・岩塊は移動中にあまり攪乱を受けない。このため地すべり地は図-2 に示すような特有の地すべり地形を示す場合が多い。一般的な地すべりの特徴としては、①地形図上では等高線が乱れ、等高線は地すべり上部で狭く、中部で広く、末端部で狭くなる。②上部に馬蹄形、四角等の滑落崖がある。③上部に凹地、陥没地、亀裂等が存在する。また、池、沼、湿地の規則的な配列が見られる。④地すべりの側面は沢状になっていたり、亀裂が存在する。末端部（舌端部）は急傾斜となり、隆起や押し出しがある。⑤地すべり背後（上方）の尾根は陥没地形となっていることが多い。これに対して崩壊では土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい攪乱を受けて原形を保たない場合が多い。

2) 表層崩壊と深層崩壊の特徴

崩壊はさらに主としてすべり面の深さにより表層崩壊と深層崩壊に分けられる。表層崩壊ではすべり面の深さは約 2m 以内であるのに対して深層崩壊ではそれよりも深い位置にある。表層崩壊と深層崩壊の特徴を比較したものを表-2 に示す。表層崩壊では移動土塊は表層の風化土層である場合が多く、どのような地質でも発生する。これに対して深層崩壊では移動土塊・岩塊は基盤を含んで移動する場合が多く、特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体*での発生頻度が高い。すべり面の深さが異なるため、表層崩壊では樹木の根系による緊縛力がある程度崩壊抑止効果を発揮する場合があるが、深層崩壊ではすべり面まで樹木の根系が達することはないので根系の緊縛力の効果は期待できない。すべり面の深さの大小は、崩壊土砂量の大きさにも影響するため、表層崩壊に比較して、深層崩壊の土砂量は大きい。このため、深層崩壊の中でも崩壊土砂量の大きなものは大規模崩壊とよばれ、さらに土砂量が大きいものは巨大崩壊とも呼ばれる。

表-1 地すべりと崩壊の区分

	地すべり	崩壊
①地形	緩勾配。 地すべり地形	急勾配。 非火山地域では斜面の変形等の特徴がみられる場合がある。
②活動状況	継続的、断続的に動いている。再発性。	突発性
③移動速度	小さい	大きい
④土塊	乱れない（原形をほぼ保つ）。斜面上に留まる。	乱れる（原形が崩れる）。大部分が斜面から抜け落ちる。

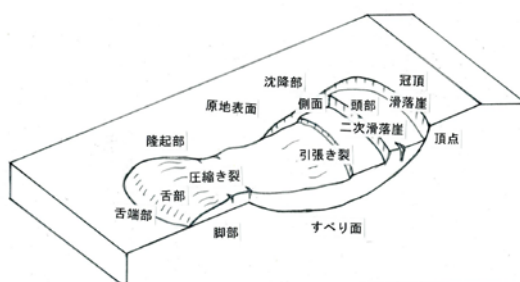


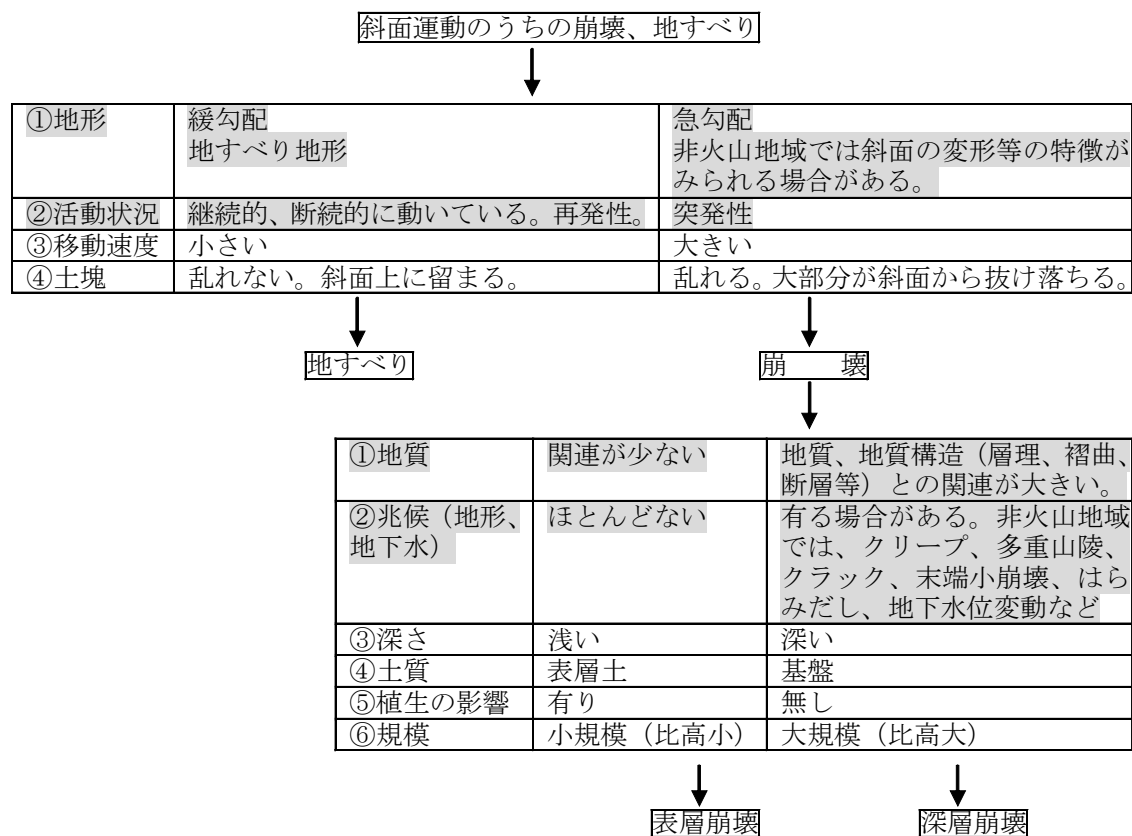
図-2 地すべり地形の名称

表-2 表層崩壊と深層崩壊の比較

	表層崩壊	深層崩壊
①地質	関連が少ない	地質、地質構造(層理、褶曲、断層等)との関連が大きい。
②兆候(地形、地下水)	ほとんどない	有る場合がある。非火山地域では、クリープ、多重山陵、クラック、末端小崩壊、はらみだし、地下水位変動など
③深さ	浅い	深い
④土質	表層土	基盤
⑤植生の影響	有り	無し
⑥規模	小規模(比高小)	大規模(比高大)

3.2 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の分類方法

地すべり、表層崩壊、深層崩壊の区分のフローを図-3に示す。



注) 網掛け部は発生前の予測段階で調査が比較的容易な項目。

図-3 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の区分のフロー

3.3 深層崩壊の区分

1) 土砂量による区分

深層崩壊は土砂量から見ると、土砂量約1万 m³～数億 m³まで、非常に範囲が広く(表-3)、土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離も大きくなり(図-4)、また、土砂量が大きいほど発生頻度は小さくなる(図-5)。このような性質は深層崩壊の発生・流下機構の違いを反映していると考えられる。さらにこのような性質はハード対策やソフト対策を検討する上でも重要である。すなわち対策の面から見ると、大規模な深層崩壊についてはハード対策は困難であり、下流における対策あるいはソフト対策が主となる。また、規模によりハード対策の種類も異なると考えられる。このような理由から、深層崩壊を土砂量によりさらに区分することが必要となるが、土砂量に応じた区分の名称については今後さらに議論を行う必要がある。

表-3 深層崩壊の規模による特徴

土砂量 (m ³)	小 ← 10 ² ↔ 10 ⁴ ↔ 10 ⁶ ↔ 10 ⁸ → 大
	(表層崩壊) (深層崩壊)
対策種類	ハード対策+ソフト対策 ↔ ソフト対策が主
ハード対策	発生源対策 ↔ 下流における対策
等価摩擦係数	大 ← → 小
到達距離(影響範囲)	小 ← → 大
発生頻度	多 ← → 少
兆候	少ない ← → 多い
地形・地質	風化土層 ↔ クリープ地形
深い地下水の影響	小さい ← → 大きい

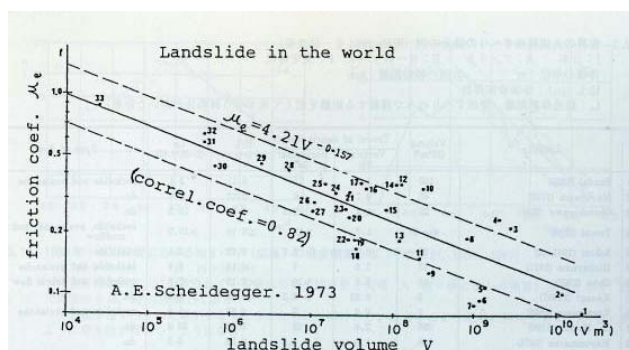


図-4 世界の大規模崩壊の土砂量(横軸)と等価摩擦係数(縦軸)
(Shiedegger, 1973による)

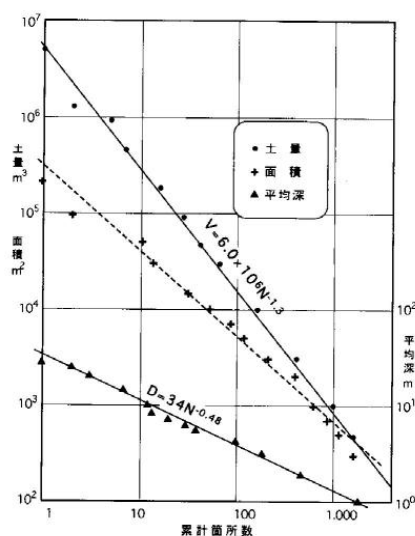


図-5 1953年7月豪雨による和歌山県有田川上流域における地すべり(広義)の規模(土量・面積)と箇所数(羽田野、1968の原図を書き直す)

2) 発生誘因による区分

深層崩壊の発生誘因には、降雨、地震、融雪、火山噴火等があるが、発生件数からは、降雨と地震によるものが多いので、この2種の誘因について比較したものを表-4に示す。

表-4 深層崩壊の発生誘因による違い

発生誘因	降雨	地震
発生原因	地下水位の上昇（間隙水圧の上昇）	地震動（加速度、周期、継続時間）
地形	集水地形（谷地形）	尾根地形、凸部
土質	透水係数	振動特性（弾性係数、減衰定数等）

3.4 深層崩壊の定義の提案

山地および丘陵地の斜面の一部が表土層（風化の進んだ層）のみならずその下の基盤を含んで崩壊する現象を指す。その特徴を述べれば移動土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい攪乱を受けて原形を保たない場合が多い。特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体*における発生頻度が高い。すべり面の位置が深いために樹木の根系による崩壊抑止効果は期待できない。表層崩壊に比べて土砂量は大きく、土砂量の範囲は極めて広い。土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離は大きくなる傾向を持つ。土砂量が大きいほど発生頻度は小さくなる。発生誘因には、降雨、地震、融雪、火山噴火等があるが、発生件数からは、降雨と地震によるものが多い。

*付加体：プレートの沈み込みに伴い、陸側のプレートに付加された海底堆積物等からなる地質体

参考文献

- 羽田野誠一(1968)：地すべり性大規模崩壊と地形条件—和歌山県有田川上流の事例—、第5回災害科学総合シンポジウム論文集、p. 209-210
- Sheidegger, A.E.(1973)：On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, Rock Mech.,Vol.5,pp.231-236


4. 提言に向けて

4.1 今後必要な対策の方向性

深層崩壊は、前章までに述べてきたように、表層崩壊や小規模な土石流と言った毎年のように発生する通常の土砂災害と異なり、発生頻度は高くないものの、その被害は甚大なものとなる。一方、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、これまでの想定をはるかに上回る規模の津波などにより、死者・行方不明者が約2万人に達する未曾有の大災害となった。この災害を受けた津波対策に関する議論では、今後は計画を上回る現象であっても、避難を基本としつつ、ハード・ソフトのとりうる手段を尽くした、総合的な防災対策を確立することとされている。したがって、発生頻度が比較的低いと考えられる深層崩壊についても、少なくとも人命被害は防ぐとの共通認識を社会全体で共有し、地域が有する人的資源なども最大限に活用しつつ、ハード・ソフト対策の実施に全力を挙げて取り組むべきである。

また、崩壊の発生は基盤岩内部の構造などにも影響され、そのメカニズムは複雑で多様であると考えられることから、現状で十分な知見が得られているとは言い難い。発生メカニズム等に関する調査成果をデータベースとして整理・集約し、継続的に活用できる体制を整えることを考える必要がある。深層崩壊対策を進めていく上で必要となる科学的知見は、多岐にわたっている。今後、対策の実施と調査研究は表裏の関係で進められていく必要があり、それらの成果を速やかに還元し、より合理的な対策手法へとつなげていくことが重要である。

対策を進めていく上では、大規模な現象を対象とすることから、リスクマネジメント手法の観点を取り入れたものとする必要がある。発生規模と、発生頻度をもとにリスク区分を行い、ハード・ソフト対策を適切に組み合わせ、最大限の効果が得られるように対策を講じる必要がある。ただし、その根拠となる発生規模や発生頻度に関する予測は、現時点では必ずしも十分なものではないため、リスク区分についても、調査研究の進展と合わせて段階的に精度を向上させていく必要がある。

リスク区分の考え方として、-6のような考え方が上げられる。比較的発生頻度が高く中規模の崩壊以外では、減災を目的としたハード対策とソフト対策を組み合わせた対策、もしくはソフト対策のみでの対応が考えられる。被害のすべてを防止することは困難であり、「減災」の考え方に立った人命被害の回避を最優先とする対策に、地域を上げて取り組む必要がある。

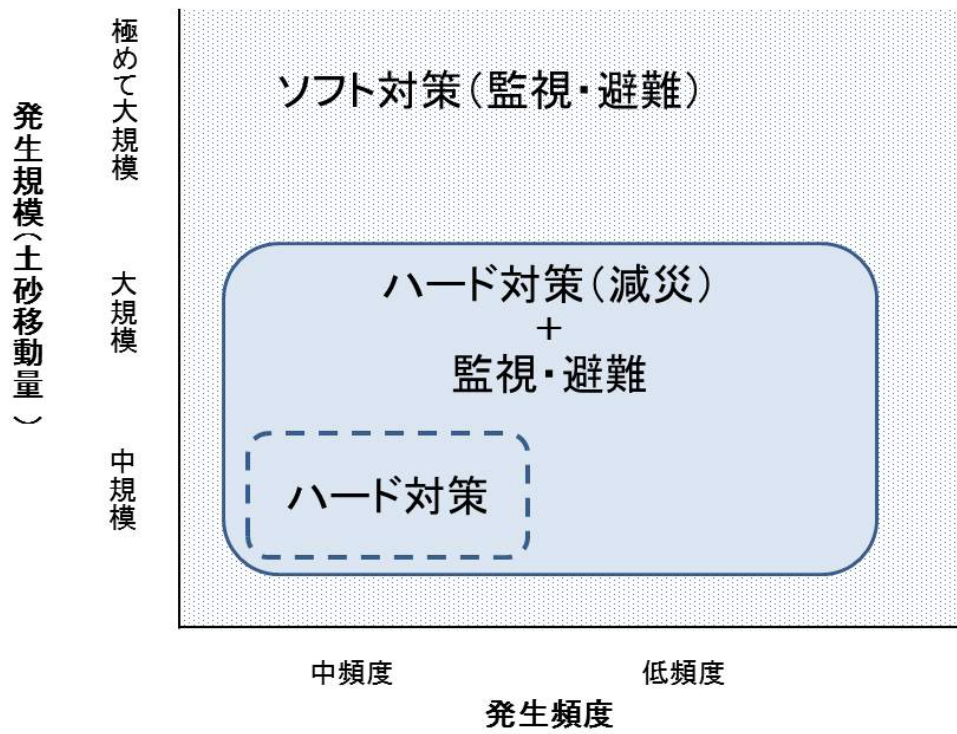


図-6 深層崩壊対策におけるリスク区分 (イメージ図)

4.2 今後取り組む必要性が高い事項

(1) 深層崩壊の発生・移動機構の解明

1) 深層崩壊の発生機構の解明

深層崩壊の発生機構の解明は場所、規模、時刻に関する発生予測手法の開発や対策手法の検討の基礎となるものであり極めて重要な課題である。深層崩壊の発生誘因には豪雨、地震、融雪、火山活動、人為等があり、発生機構には共通する部分と異なる部分があると考えられる。深層崩壊の発生数（発生頻度）からは豪雨と地震によるものが圧倒的に多く、まずこれらについてその発生機構を解明することが重要である。

① 豪雨による発生機構

豪雨による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルとしては雨水の地中深部への浸透による間隙水圧の上昇（地下水位の上昇）によるすべり面付近での地盤・岩盤の有効応力の減少が引き金になると考えられている。このため地表流の流下、雨水の浸透、地中水の地下深部までの移動過程を明らかにする必要がある。これまで、表層土については飽和不飽和浸透流解析等の手法が用いられてきているが、深部の岩盤内の地中水についてどこまで適用可能かの検討も必要である。雨水の浸透過程が明らかになることにより、深層崩壊の発生時刻の予測も可能になると考えられる。さらに安定解析のためには深層崩壊を特徴づけると考えられる地質構造（断層、層理、リニアメント等）をどのように岩盤内の浸透流解析や斜面安定解析に組みこむかについての検討も必要である。

② 地震による発生機構

地震による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルとしては地震動による加速度が斜面の土塊・岩塊に作用することにより土塊・岩塊に慣性力が発生し、このため滑動力が増大して抵抗力を超えると崩壊が発生すると考えられている。加速度の大きさのみならず加速度の作用時間や周期が斜面崩壊に影響すると考えられている。また、地震動が地盤内を伝わる時の伝わり方は地盤の振動特性により異なるため地震応答解析手法を用いて斜面における地震動の伝播特性を明らかにする必要がある。さらに土塊の液状化、流動化機構についても解明する必要がある。

③ 地震後の降雨による影響

地震動により斜面内に亀裂が発生すると雨水が浸透し易くなり、また亀裂等により地下水脈が変化することにより、地震後の降雨で崩壊が発生する場合も報告されており、このような二次災害の発生機構の検討も必要である。

④ 岩盤クリープに伴う発生機構

豪雨と地震に共通する深層崩壊の発生機構としては、堆積岩地帯（非火山地域）における主として重力に起因する長期にわたる岩盤クリープ現象による斜面の変形が報告されている。これとは別に比較的短期間のクリープ現象による深層崩壊も報告されている。このようなクリープ現象について、レオロジー的手法による検討が必要である。これに関連して、一般に火山地域では長期にわたるクリープ現象による斜面の変形が認められ難いことから、火山地域ではなぜ長期にわたる

クリープ現象が起き難いのかについての検討も必要である。

2) 深層崩壊土砂の移動機構の解明

深層崩壊土砂の移動（流下）機構の解明は深層崩壊による危険区域の予測手法の開発や対策施設の配置計画、警戒避難手法の検討等の基礎となるものであり重要な課題である。

① “滑動”型と“流動”型の起こる原因

移動中の土塊・岩塊の運動形態は、大きくは“滑動”型と“流動”型に区分される。移動中の土塊・岩塊の攪乱程度が低く、等価摩擦係数が大きいものは“滑動”型であり、攪乱程度が高く、等価摩擦係数が小さいものは“流動”型と分類される。“滑動”型と“流動”型の起こる原因を明らかにすることは移動機構の解明を行うために必要である。

② “滑動”型と“流動”型の運動モデルの開発

“滑動”型と“流動”型では移動の形態が著しく異なると考えられるので、それぞれ別の運動機構によると考えられる。このためそれぞれに適した運動モデルを開発する必要がある。

③ 大規模崩壊、巨大崩壊の移動機構の解明

深層崩壊の内、大規模崩壊、巨大崩壊では土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなる傾向が認められ、崩壊土砂は遠方まで到達する。このような土砂量の大きな深層崩壊の流動化機構を解明することも必要である。

(2) 深層崩壊の発生予測手法の確立と精度向上

後述する深層崩壊による被害を回避、軽減するための対策を行う上で、深層崩壊の発生を予測する手法は不可欠である。しかし、前述のとおり、現象の発生が稀であることもあり、研究の事例数は少ないのが現状である。それでも、具体的な対策に結びつけるためには、危険箇所の予測、発生規模の予測、発生時刻の予測、発生頻度の評価、そして、被害範囲、外力の推定が可能な手法が必要となる。

1) 危険個所の予測

深層崩壊の危険個所を把握することは、ハード、ソフトの深層崩壊対策を実施する際の施設やセンサー等監視機器類の設置箇所を検討する上で不可欠である。

近年、航空レーザー測量や空中電磁探査、人工衛星リモートセンシングなど新たな技術を用いて従来得るのが困難であった詳細な表面地形、面的な地下構造、微小な地表面の変位などの情報が得られるようになってきている。深層崩壊の発生場所の予測に関する研究においても、これらの新たな調査、計測技術によって得られる情報を積極的に活用して研究を進めるべきである。

また、深層崩壊が発生する斜面、流域は、斜面に多量の湧水が見られる等、特異な水文特性を呈する場合があることが知られている。このような斜面、流域に対して、斜面水文学的なアプローチから深層崩壊の発生する恐れのある場所を絞り込む手法も検討を進めるべきである。

2) 発生規模の予測

深層崩壊の規模を把握することは、深層崩壊対策を実施する際の施設の規模や深層崩壊により被害の及ぶ範囲を把握するために必要不可欠である。

今後は、航空レーザー測量等で得られた詳細な地表面形状データ等に基づき、崩壊面積や崩壊深を地形解析から推定したり、各種物理探査によって得られる地下情報等を活用することにより、深層崩壊が発生した場合の崩壊深を推定する手法の開発も検討を進めるべきである。

3) 発生時刻の予測

前述のとおり深層崩壊発生の主な誘因としては、豪雨、地震、および長期的な重力性の変形が挙げられる。このうち、地震に伴う深層崩壊についてその発生時刻を予測することは、地震の発生時刻を予測することとほぼ同義であることからここでは除外するが、豪雨および長期的な重力性の変形に伴う深層崩壊について、その発生時刻をいかなる精度にせよ予測することは、ハード対策では完全には防ぐことが困難な深層崩壊による、人的被害を少しでも減少する上で極めて重要である。

今後は、豪雨および長期的な重力性の変形の進行に伴う深層崩壊について、その発生時刻を推定する技術を開発するため、現在の技術で監視可能な現象の時間的な推移と深層崩壊発生時刻の関係についてさらに研究を進める必要がある。すなわち、雨量、地下水位、斜面変位速度やその他前兆的な現象等と深層崩壊発生のタイミングとの関係の検討が必要である。特に、深層崩壊の発生時刻に関する情報は少ないため、それを特定し、蓄積することにより、深層崩壊発生時の雨量データを正確に把握することが重要である。

4) 発生頻度の評価

流域スケールで深層崩壊の発生頻度を評価することができれば、費用対効果の算出など、対策計画立案・検討のための最も基本的な情報を得ることができるようになる。

しかし、流域スケールで見ても、深層崩壊の発生する間隔は長いと考えられることから、今後は、より長い時間スケールで崩壊の発生時期を明らかにし、崩壊の規模毎にその頻度を定量化することが必要とされている。そのためには、C14年代測定法、年輪年代法、火山灰編年法、原位置宇宙線生成核種年代測定法等の様々な年代測定手法によって、過去の深層崩壊の発生年代を推定する手法の確立が望まれる。

5) 被害範囲・外力の推定

深層崩壊による被害範囲・外力の推定は、費用対効果の算出、施設の設計、施設効果評価など、対策計画の立案・検討のための最も基本的な情報の一つとして重要である。

今後は、既存の被害範囲・外力推定手法をより高度に実用化する研究の進展が期待される。また、どのような流下現象となるかを予測する技術（土石流化するか、天然ダムを形成するかなどを予測する技術）や流下現象の詳細に関する研究（土石流が何波に分かれていたかなど）については、十分な知見が得られておらず、さらなる研究が必要である。

（３） 深層崩壊対策の考え方（一次的被害に対する対策）

深層崩壊対策を考えていく上では、通常の土砂災害と同様、ソフト対策とハード対策を効果的に組み合わせて実施することが不可欠である。深層崩壊の場合、崩壊土量が大規模なものとなるため、ハード対策により被害のすべてを防止することは困難であり、ソフト対策を主体に考える必要がある。ハード対策では、崩壊発生に伴う移動土砂量を構造物により低減させることで、被災範囲の縮小や発生する外力の低下を図り、被害を軽減することが適当である。このようなハード対策による効果も考慮した上で、ソフト対策による避難を確実なものとすることで、人命被害の回避につなげることを目標とする。また、深層崩壊による被災の危険度が高い箇所に立地する人家・施設等を、安全な箇所へ移転することも、地域全体の安全度向上を図る観点から、視野に入れておく必要がある。

深層崩壊に対するソフト対策、ハード対策をより確実なものとしていくための具体的方策として、つぎのような取り組みが必要である。

1) ハード対策

① 作用外力に応じた柔軟な設計と被害軽減効果の評価

対策工設計の前提となる作用外力を適切に想定するとともに、深層崩壊による移動土砂が大規模なものとなることを踏まえて、従来手法にとらわれない柔軟な考え方による設計を行うことも検討する必要がある。想定規模にもよるものの、例えば砂防堰堤の袖部など局部的な損傷等についてはそれを許容した上で、減勢効果を最大限に発揮させ、保全対象への影響を出来るだけ低減させることなどである。このような対策を合理的に行うためには、構造物の挙動も考慮に入れた対策工の効果評価を行えるようにすることが必要である。

② より効果の高い対策手法の検討

深層崩壊に起因する土石流については、その流動機構も考慮した上で、砂防堰堤の最適な配置や、より効果の高い構造、形式を選定するための手法を確立する必要がある。①構造形式（捕捉容量の恒常的な確保）、②配置計画（湾曲部等のより捕捉効果の高い箇所の選定、複数の砂防施設による多重防御を考えた施設配置等）③既設砂防堰堤の機能向上（除石工、補強対策等）など多様な観点から最も合理的な施設計画を考えることが必要である。④さらに、津波まちづくり法で述べられているように、土砂災害対策を目的としない施設をも構造を強化して、多重防御施設とする考えもある。例えば、道路を高盛土したり発電ダムの活用などである。一方、人家近傍斜面では、現時点で危険箇所の特定を正確にはできな

いことから、対策を行うこと困難であるが、今後に向けては、耐久性、耐候性に優れた素材を用いた、維持管理、更新を要しない対策工の開発などを検討しておく必要がある。

2) ソフト対策

① 深層崩壊の特性を踏まえた警報の運用

深層崩壊に対する警戒・避難は、過去に深層崩壊で被災した経験のある地域では一部に、通常の表層崩壊や土石流についても、その発生が高まっている状況の中で実施されると考えられる。しかし、現在の土砂災害警戒情報は深層崩壊を対象としていない。そのため土砂災害警戒情報の基準となる雨量を上回り、さらに深層崩壊の発生が懸念されるような降雨となった場合には、それを補完するより高次の警報を出すことなどが考えられる。また、深層崩壊は一連の降雨の降り終わりやその直後に発生する例も多い。このような深層崩壊の特性を踏まえた警報の運用が必要である。

② 安全な避難場所の確保

深層崩壊は、通常の土砂災害と比較して被害範囲が大きく、安全な避難場所を確保することが困難である。発生規模、到達範囲と作用外力を正確に予測する技術が開発できれば、鉄筋構造物の上位階を一次避難場所とし、二次避難を広域的に行うなどの対応が検討できるようになる。これも含めて、深層崩壊に対して安全と考えられる既存施設の利用を考える必要がある。例えば道路トンネル等を、雨量規制後に、避難所と同等の居住環境を確保した上で、緊急使用することなどが考えられる。一方で、このような取り組みを経ても、地域内に必要な避難場所を確保することが困難な場合も多いと想定され、一次避難の段階で広域的な避難を行うことも必要と考えられる。この場合、その必要性を合理的に説明した上で、地域の合意形成を図ることが求められる。

③ 前兆的現象の監視と避難への活用

土砂災害に対する警戒避難を考える際に、前兆現象を情報として活用することの有効性が言われている。深層崩壊が進行的に生じる場合で、予め斜面の変動が現れているような時には、監視により事前の対応をとることが出来る。また、深層崩壊の発生が懸念される斜面やその周辺で、前兆となる地下水位の変化、湧水の変状、溪流流量の変化、そして小崩落の発生などを、崩壊前に十分なリードタイムをもって把握できれば、避難開始を判断するための有益な情報となる。こうした現象を監視するための機器の開発や、それらの情報を集約し地域で共有するための仕組みを構築することは、警戒避難の実効性を向上させていく上で有益と考えられる。

④ 災害時の避難行動等の分析と地域防災計画へのフィードバック

深層崩壊は、安全な避難場所の確保が困難であることや、発生が降雨のピークではなく一連の雨の降り終わり後になる例もあるなど、警戒避難を実施する上で難しい判断を伴うのが実情である。崩壊の発生が切迫している場面等において、地域の住民や防災関係機関の担当者がどのように状況を判断し、どのような行動をとったのかを把握することは、地域防災計画を現象の特性を踏まえたものとしてブラッシュアップする上で有益な情報となる。深層崩壊の場合には、段階的避難や広域的避難など、時間的、空間的に、より複雑な判断と対応が求められるため、過去の災害におけるこれらの知見を最大限に活用することが有効であり、分析のための仕組みづくりが必要である。

(4) 深層崩壊が発生した際の緊急的な対応の高度化

深層崩壊による被害を回避、軽減するためには、前述のような被害軽減等に向けた取り組みを進めて行くことが重要であるが、深層崩壊が実際に発生する気象状況下において、迅速に現地の状況の把握及び関係機関との情報共有を図ることにより、円滑な住民の避難行動を促すことが可能となる。またこうした仕組みは、実際に深層崩壊が発生した場合における二次的な土砂移動の防止にも効果が発揮されると考えられる。

具体的には、初動対応を開始することができる深層崩壊発生の検知システムを構築するとともに、天然ダムの形成や二次崩壊等への対応について高度化を図る必要がある。

1) 深層崩壊発生検知手法の開発

深層崩壊は、大雨等の荒天時や夜間、また交通網が寸断されているような状況下で発生している事例も多く見られる。また現地アクセス道がない山間地で発生し深層崩壊起因の天然ダムが生じた場合には、ヘリ調査による監視発見によらざるを得ないが、広域エリアでの調査には多くの時間を要するとともに、調査はヘリ運行が可能な気象条件下に限られる等の制約が存在する。

そのため、発生位置と規模を大まかに把握できる検知手法及び伝達システムを開発し、深層崩壊が発生した場合に早急に状況を把握することにより、災害救助や緊急対策、周辺地域への避難を促すことが可能となる。

具体的には、震動センサーによる崩壊検知を行うことで、おおよその発生位置の推定を行うとともに、衛星合成開口レーダー等による発生位置周辺の衛星画像判読を行うことにより、発生の有無、位置及び規模等の確認を短時間で行うことが可能となる。震動センサーを国内の山地エリアに設置しリアルタイム観測するシステムを構築するとともに、検知伝達されたデータに基づき衛星画像データの撮影及び判読を行うための関係機関による体制の整備を進めて行くことが有効である。

今後は、このようなシステムの全国整備を進めるとともに、崩壊前兆等の把握から崩壊検知に向けた手法開発と連携し、警戒避難を促すシステムの高度化に向けた研究開発を行っていく必要がある。

2) 深層崩壊起因の天然ダム等による二次災害防止のための対策手法の高度化

1) での検知手法により天然ダムの形成が把握された場合、天然ダム下流域への被害軽減を迅速に行うためには、形成された天然ダムの形状や性状、ダム湖の水位変化観測や上流からの流入状況を迅速に把握し、越流浸食による決壊の可能性のある時期の推定を迅速に行う必要がある。

そこで、現在土砂災害防止法に基づく緊急調査で取り組んでいる手法の高度化を図ることにより、より短時間かつ精度の高い危険な時期とエリアの推定を行うことが可能となる。

具体的には、大規模な天然ダムに対応できるより大深度を測定できるヘリコプターで設置可能な水位計の開発、上流域からダム湖への流入量を簡易に観測できるヘリコプターで設置可能な流量流速計の開発、短時間でより詳細なメッシュでの天然ダムの越流浸食決壊氾濫シミュレーションが可能な手法の開発、現地観測からシミュレーション結果を短時間に得られることができるシステム及び体制の整備を進めることが必要である。

深層崩壊が発生した際の緊急的な対応の高度化には、上記の手法の高度化のみならず、高度化した手法を的確に運用し結果を情報共有できる情報伝達システムの構築を合わせて行うことも必要である。そのため、現地観測及びシステム運用の習熟を図る研修の仕組みを整備し、人材育成を図っていくことも併せて行っていくことが重要である。

(5) 関係機関による対策促進に向けた連携

深層崩壊による被害の軽減のためには、

- ①防災関係機関の連携
- ②発災時の現地緊急対応
- ③発生メカニズムの解明や被害軽減に向けた手法の開発及び高度化

の観点から、関係機関が連携協力し体制づくりや調査研究、現地対策手法の高度化を進めていくことが必要である。

①については、国及び地方公共団体の防災関係機関のみならず、災害情報の周知を担うメディアを含めた情報共有体制づくりを進めて行くことが必要である。

②については、二次災害防止の観点からも安全かつ迅速な緊急対策や現地観測を行えるようにすることが必要である。そのためには大学や研究機関における手法検討のみならず、実際に現地でオペレーションを行う建設業者や建設コンサルタントの意見をふまえた検討、現地での対応結果を反映した手法の改良等を進める等、今まで以上に共同研究開発を行う環境整備を進める等を図っていくことが必要である。

③については、①及び②での連携強化に基づき研究開発を進めていくことが重要であるが、メカニズム等を含め未解明の部分も多い。また崩壊深度が非常に深く広範囲のエリアの監視対応となること、現地アクセスが困難な遠隔地エリアに

おける観測監視や対策実施となる場合があることから、例えば無人観測ロボットや無人飛行体からの遠隔調査等、新分野技術の導入を視野に入れた検討も必要となる。そのためには、(社)砂防学会としてもさらに他分野からの技術者が参画活動できるような体制、環境づくりを考えて行くことが必要となる。

5. おわりに

深層崩壊は規模が大きいため一度発生すると人家、人命、公共施設等に対する被害が大きく、更に天然ダムを形成すると上流や下流の広い範囲にわたって人家や人命、公共施設にも甚大な被害を発生させる危険性が高い。深層崩壊の発生頻度は表層崩壊に比べると少なく、また地域の地質や地質構造の影響を強く受けるために発生機構等に不明の点も多かった。しかしながら最近の多方面からの調査・研究の進展により、深層崩壊に関する多くの情報が分析されて、深層崩壊の発生予測手法は格段に進歩しており、その精度も向上している。最近の深層崩壊の調査・研究の進展には(社)砂防学会会員の寄与が大きく、(社)砂防学会としても平成 22 年 10 月に「深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会」を設置し、平成 23 年 1 月には「深層崩壊を考える」をテーマに特別シンポジウムを開催して深層崩壊の定義や対応のあり方、さらに今後の調査・研究の方向について検討を行った。さらに平成 23 年度からは国土交通省の河川砂防技術研究開発公募に採択されて、「深層崩壊の発生危険斜面の抽出手法および避難基準策定手法の開発」を行っている。加えて、平成 23 年 9 月の台風 12 号により紀伊半島で発生した深層崩壊とそれにとまなう天然ダムの形成に関しては多数の学会員の参加を得て広域的、多方面の調査を実施している。このように(社)砂防学会では深層崩壊に関する調査・研究を積極的に推進しており、それらの成果もあがってきた。

(社)砂防学会は今後も引き続き深層崩壊に関する調査・研究に積極的に取り組むと共に、これまでの調査・研究により得られた成果・技術を広く国民の安全・安心な社会基盤作り、防災力の向上に役立てることが重要である。このためには、(社)砂防学会は広く国民に深層崩壊に関する科学的な知識や情報を提供するとともに、特に深層崩壊の発生する可能性の高い地域の住民に対する防災教育を積極的に実施していく必要がある。さらに地域防災を担う、地方自治体の職員に対する防災教育や技術的な支援・協力を積極的に実施していく必要がある。

社団法人砂防学会「深層崩壊に関する基本事項に係る検討委員会」 委員名簿

委員長	鈴木 雅一	東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授
委員	石川 芳治	東京農工大学 大学院農学研究院 教授
委員	川邊 洋	新潟大学 農学部 教授
委員	笹原 克夫	高知大学 農学部 教授
委員	地頭菌 隆	鹿児島大学 農学部 准教授
委員	土屋 智	静岡大学 農学部 教授
委員	綱木 亮介	(財)砂防・地すべり技術センター 斜面保全部長
委員	原 義文	(独)土木研究所 土砂管理研究グループ長(平成 22 年度)
委員	小山内 信智	(独)土木研究所土砂管理研究グループ長(平成 23 年度)
委員	平松 晋也	信州大学 農学部 教授
委員	藤田 正治	京都大学 防災研究所 教授
委員	山口 真司	国土交通省 砂防部 地震・火山砂防室長

委員会・シンポジウムの開催経過

平成 22 年	10 月 27 日 (水)	第一回委員会	(山口県防府市)
	11 月 24 日 (水)	第二回委員会	(東京)
	12 月 20 日 (水)	第三回委員会	(東京)
平成 23 年	1 月 18 日 (火)	砂防学会特別シンポジウム	(東京)
	9 月 30 日 (金)	第四回委員会	(東京)
	12 月 2 日 (金)	第五回委員会	(東京)
平成 24 年	2 月 7 日 (火)	第六回委員会	(東京)

深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会 報告・提言

平成24年3月31日発行

編集兼発行人 社団法人 砂防学会

発行所 社団法人 砂防学会

〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5

TEL:03-3222-0747, FAX:03-3230-6759

<http://www.jsece.or.jp/>