

平成 23 年台風 12 号による深層崩壊の メカニズムに関する検討

木下篤彦¹・北川眞一¹

¹ 近畿地方整備局 河川部 河川計画課 (〒540-8586 大阪府大阪市中央区大手前 1-5-44)

平成 23 年の台風 12 号により発生した深層崩壊について、栗平、長殿、赤谷、坪内の各地区について地表踏査と土質試験等を実施し、そのメカニズムについて検討した。

斜面上部では過去に土塊の移動があり、斜面下部では急傾斜の不連続面が側壁方向と滑落崖方向の 2 方向に発達してクサビ状に交差している共通点があり、豪雨時に地下水を深部まで到達でき地下水が集中しやすいことが分かった。また、土質試験結果ではせん断抵抗角()が 28°～40°と高く、リングせん断試験結果では崩壊面に過剰間隙水圧の発生していることが分かった。

キーワード 深層崩壊，地質構造，すべり面せん断試験，過剰間隙水圧

1. はじめに

平成 23 年台風 12 号により、紀伊半島で多数の深層崩壊が発生した。紀伊半島には、白亜系四万十帯の堆積岩類が広く分布している。台風 12 号による深層崩壊の多くは、流れ盤である北側斜面で発生しており、層理面等の地質構造が崩壊の素因のひとつであった可能性が高い。

これまでの研究では、崩壊の地形・地質的要因に関するもの(例えば、岩松・下川¹⁾、寺戸²⁾; 千木良³⁾)、地下水に関するもの(例えば、恩田ら⁴⁾、八反地⁵⁾、地頭蘭ら⁶⁾)が主体であったが、統一的な視点で事例を比較する研究は実施されていない。深層崩壊のメカニズムを議論するためには、同様の条件で発生した事例において共通点を見出し、深層崩壊に関連性の高い構造や現象を整理する必要がある。

そこで本稿では、台風 12 号で発生した深層崩壊を対象に、現地調査や地形判読を行い、深層崩壊斜面に共通の地質構造を明らかにした。また、滑落崖面に付着している破碎試料を採取し土質試験を行い、土質特性や間隙水圧の挙動から深層崩壊の発生メカニズムについて考察を行った。

2. 対象地域

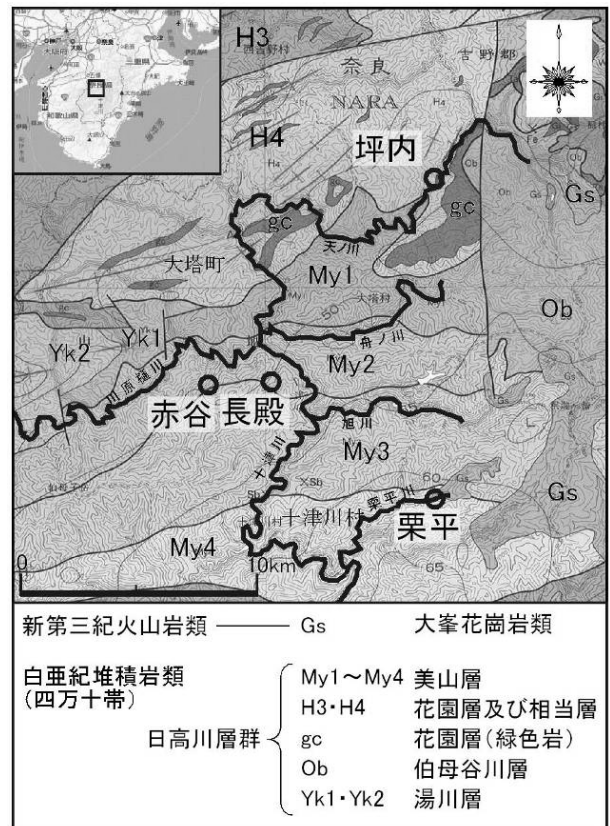


図-1 調査位置図および地質図

調査位置を図-1 に示す。対象地域は、台風 23 号によ

り大規模な深層崩壊が発生し、河道を閉塞した奈良県五條市大塔町赤谷、十津川村長殿、栗平、天川村坪内の4箇所である。地質は、白亜系四万十帯である日高川層群が分布している。赤谷・長殿・栗平は、主にチャート、緑色岩類、砂岩頁岩互層で構成されている。坪内は、赤色凝灰岩や凝灰質角礫岩からなる塩基性岩類、頁岩層で構成される。

3. 調査方法

(1) 地質構造の調査方法

深層崩壊の素因と考えられる地質構造を明らかにするために、地表踏査、ポアホールカメラによる孔壁観察を行った。

地表踏査では、崩壊斜面周辺の岩相、走向傾斜、節理面について調査し、特に滑落崖や側壁などの崩壊ブロックを形成する不連続面（層理面や節理面、破断面等）の傾斜方向の計測や露岩状態の観察を行った。滑落崖や側壁に擦痕が残されている場合は、電子スピン共鳴（Electron Spin Resonance、以下 ESR）を用いて、擦痕の形成年代を測定した。ESR は、断層粘土や変質岩の年代測定に用いられている手法である（例えば、福地⁷⁾）。

ポアホールカメラは、奈良県吉野土木事務所により坪内で実施されたボーリング孔を使用し、岩盤内部の亀裂や破断面を抽出した。

(2) 土質特性の調査方法

深層崩壊の崩壊面の土質特性を把握するために、以下の2つの力学試験を実施した。

ボーリングコアの崩壊面の不攪乱試料を対象にした繰り返し定体積一面せん断試験

現地滑落面から採取した乱した試料を対象にした応力制御型リングせん断試験（クリープ試験）

の試験は、崩壊後の現状斜面の安定度評価に必要なすべり面材料のせん断強度を計測することを目的に、坪内地区の径径 86mm ボーリングコアで崩壊面と判断された試料を用い一面せん断試験を実施した。攪乱された崩土と岩盤との境界面付近のレキ混り土状コアを試験対象とした。試験方法は、眞弓ら⁸⁾、木下ら⁹⁾の方法を参考に、同一試験供試体を用いて定体積繰り返し一面せん断試験を複数の垂直応力条件下で実施し、大変形を受けたすべり面材料の残留強度に相当する土質強度を求めた。せん断速度は、0.1mm/min とした。

の試験は、長殿、赤谷、坪内地区の3地区の滑落崖面に付着している破碎土壌を採取して乱した試料を用い、応力制御型非排水リングせん断試験を実施した。

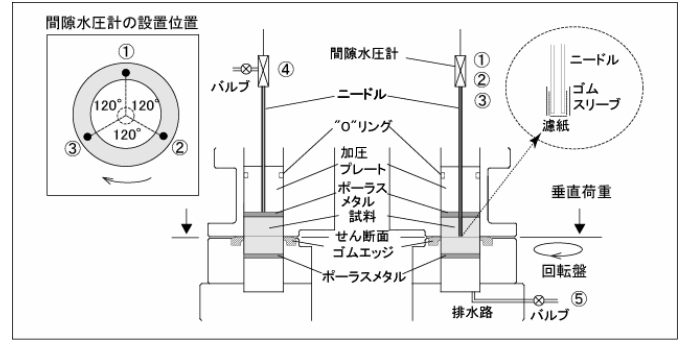


図-2 せん断箱の構造と間隙水圧計測方法の模式図

試料の粒度試験およびコンシステンシー試験も併せて実施した。斜面のすべり面における応力条件を考慮し、土塊重量が作用するせん断応力を一定制御させ、3次クリープ的に変位が進行する過程における間隙水圧挙動を把握し、崩壊機構の検討を行った。

せん断試験に用いる試験機は、図-2 に示す。改良型非排水リングせん断試験機を用いた。

120°離れた位置に等間隔で設置した3本のニードルを介して3カ所（センサー、）で間隙水圧を計測し、供試体上面（センサー）および、間隙水圧載荷側の水圧（センサー）も計測した。

せん断速度は、5mm/min とした。

4. 調査結果

(1) 深層崩壊発生斜面の地質構造

a) 赤谷地区

赤谷の深層崩壊は、斜面長約 1,030m、幅約 420m、比高差約 610m の規模である（図-3）。赤谷は、尾根部の風化層を移動層とする上部ブロック、斜面下部の凹部が崩落した下部ブロック、滑落崖の2次的崩壊となった拡大ブロックの3つに区分される。

左側壁の崩壊幅が大きく変化する地点では、崩壊地内側から外側に土塊が押し出されている状況（写真-1）があり、上部ブロックの土塊が下部ブロックに一時的に乗り上げた可能性がある。

地層の走向は、左側壁と溪岸部では西北西 - 東南東方向、40～60°北傾斜が多いが、冠頭部では北東 - 南西方向、40～50°北傾斜で、斜面に対して流れ盤となっている。これらの方向は、左側壁と冠頭部滑落崖の方向に一致する。特に左側壁の砂岩優勢層には亀裂や節理が発達し、滑落崖と同じ方向の走向傾斜で急崖を形成して不安定岩塊となっている。

斜面下部の滑落崖は、2方向の不連続面が交差して形成されている。1つは北北西 - 南南東方向で55°北西傾斜の節理や破断面で、2つ目は左側壁方向の西北西 - 東南東方向で東傾斜の砂岩層である（図-3）。

崩壊発生前の地形を見ると、稜線直下の緩傾斜面に二重稜線や地すべり地形が判読されており、緩みゾーンが形成され、地表水も浸透しやすかったと考えられる。また、崩壊前の斜面下部は、2つの不連続面がクサビ状に交差して地下水が集中しやすく、深部まで地下水が到達できる水文地質構造となっていた。

b) 長殿地区

崩壊規模は、斜面長約 680m、幅約 350m、比高差約 400m である。長殿は、崩壊発生前は、稜線直下の緩斜面に二重稜線や地すべり地形があり、緩斜面の縁辺部には崩壊地形が判読されていたことから、稜線直下の緩斜面はクリープ等による岩盤の緩みゾーンが形成されていたと考えられる。

長殿で発生した深層崩壊は 3つのブロックを形成している。上部ブロックは、稜線から斜面中腹部にまで及ぶ風化層が崩壊したブロックである。下部ブロックは、斜面下部の凹地形部で未風化岩盤の滑落崖からなり上部ブロックよりもやや幅広いブロックである。更に滑落崖の2次崩壊の拡大ブロックに区分される。

地層の走向傾斜は一定ではないが、大局的な地層構造は、北東-南西方向の走向で 20°北西傾斜、北西-南東方向の走向で 62°南西傾斜の2方向が卓越し、斜面に対して流れ盤構造である(図-4)。北西-南東の層理面の方向は、崩壊の側壁方向に一致する。

側壁や滑落崖で観察される節理や破断面は、北西-南東方向~北北西-南南東方向で 62°南西傾斜(写真-2)が最も多く、次いで南北方向で鉛直および東西方向で 40~60°の北傾斜が卓越する。

長殿は、側壁方向と滑落崖方向の2方向の急傾斜の不連続面が交差し、緩傾斜の層理面との組み合わせによる不連続面から滑落崖が形成されていたと考えられる。岩盤面には北西方向の擦痕が認められた。

c) 栗平地区

深層崩壊の規模は、斜面長約 850m、幅約 600m、比高差約 460m であった。崩壊は 3つのブロックを形成している。上部ブロックは、主稜線を頭部としやや上流側へ移動したブロックである。下部ブロックは、上部ブロックのほぼ中央に位置する遷急線を頭部とし、下流側へ移動したブロックである。更に、上部と下部ブロックの右側壁から頭部を覆う形で尾根部から崩壊した拡大ブロックに区分される。

左側壁の斜面中部から対岸には砂岩層、斜面中部に砂岩頁岩互層の頁岩優勢層、稜線下には凝灰質頁岩層が分布している(図-5)。上部ブロックは、風化した凝灰質頁岩が移動層となっている一方、下部ブロックの

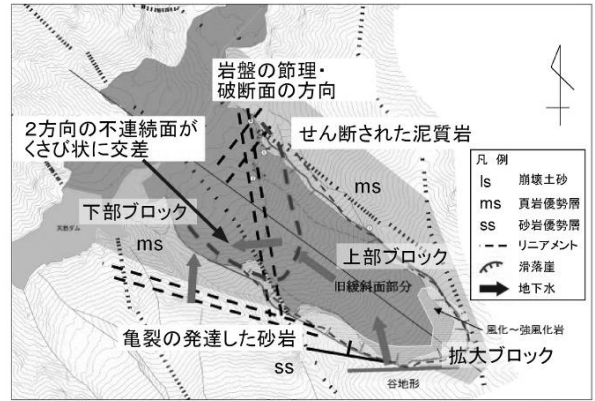


図-3 赤谷地区の地質概要図



写真-1 赤谷地区の左側壁に乗り上げる土塊

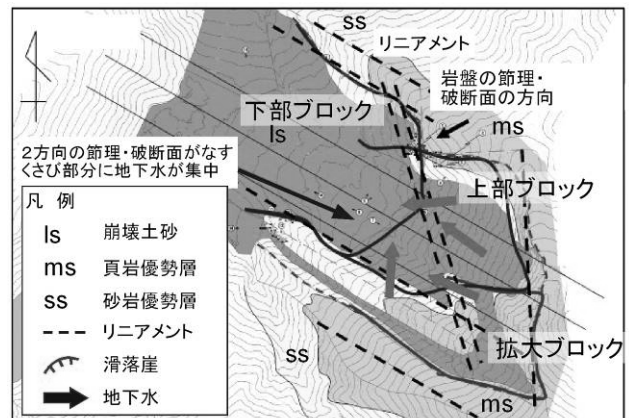


図-4 長殿地区の地質概要図



写真-2 長殿地区の斜面下部の直線的な岩盤の滑落崖

滑落崖は、未風化岩盤で形成されている。

層理面は、東西および西北西 - 東南東方向の走向で、 $20 \sim 33^\circ$ の北傾斜が卓越し、斜面に対して流れ盤構造となっている。側壁や滑落崖で観察された節理や破断面は、北北東 - 南南西の走向で 60° 西傾斜、西北西 - 東南東の走向で 60° 北傾斜が卓越している。2つの節理の方向は、前者が右側壁方向に一致し、後者は尾根の滑落崖の方向に一致しており、2方向の不連続面が交差して滑落崖が形成されている（写真-3）。

滑落崖面では、北方向の擦痕が確認できた。右側壁では、節理面に沿って風化部が滑落している状況が確認できた。滑落部頂部の凹地には成層した水中堆積物があることから、崩壊発生前に、尾根部に凹地形が形成され、水等がたまりやすい地質的に緩みゾーンが形成されていたと考えられる。

d) 坪内地区

坪内の深層崩壊は、天ノ川右岸の水衝部に位置し、斜面長約 400m、幅約 360m、比高差約 180m の規模である。崩壊した土砂は、南東方向に崩落し、一時的に河道を閉塞した。

ポアホールカメラにより基盤の地質構造を把握した結果、地層の走向傾斜は一定せず、流れ盤となっていない。左側壁では、層理面の走向が北東 - 南西方向、 18° 北西傾斜で斜面に対して受け盤構造となる（図-6）。一方、中央では北東 - 南西方向、 10° 東傾斜で流れ盤となる。右側壁では西北西 - 東南東の走向となり、 25° 前後で東と西傾斜で変化が大きい。

節理や破断面は、左側壁では東西方向、 10° 南傾斜が卓越し、右側壁で北北東 - 南南西方向、 20° 東傾斜、西北西 - 東南東方向、 27° 北傾斜となっている。中央では、東西方向、 26° 北傾斜である。節理や破断面は、傾斜方向が $10 \sim 27^\circ$ で崩壊地内に傾斜し流れ盤構造を有している。層理面よりも節理や破断面が崩壊の素因となっている。

(2) 滑落崖擦痕の年代

滑落崖の擦痕の年代測定結果を表-1 に示す。

表-1 滑落崖の年代測定結果

箇所	形成年代	
赤谷	587,600	775,900
	$\pm 63,300$ 年	$\pm 83,600$ 年
栗平	1,005,500	1,596,700
	$\pm 44,200$ 年	$\pm 70,300$ 年
長殿	225,900	554,200
	$\pm 8,700$ 年	$\pm 21,400$ 年

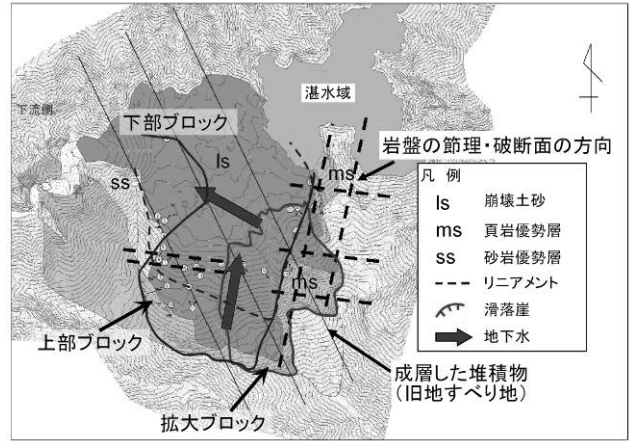


図-5 栗平地区の地質概要図

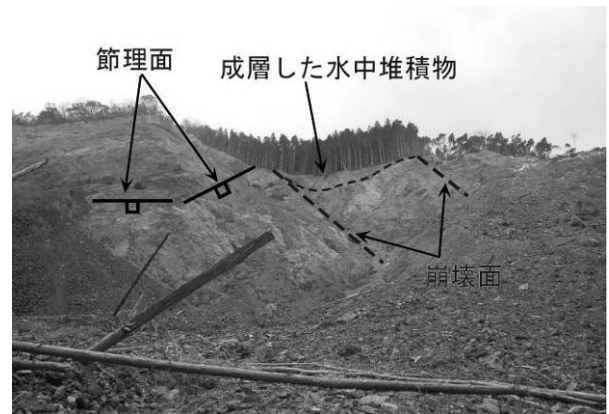


写真-3 栗平地区の右側壁の旧地すべり滑落崖

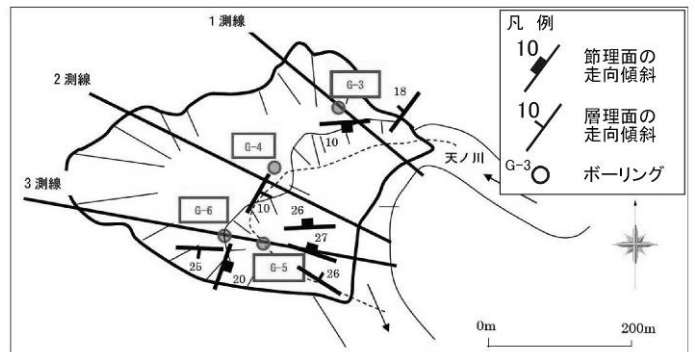


図-6 坪内地区の調査平面図

20 万 ~ 50 万年前となった長殿の滑落崖が最も新しくあった。一方、栗平が最も古く 100 ~ 150 万年前となった。いずれも第四紀更新世頃に形成された古い破断面であると考えられる。

(3) 土質特性

坪内のボーリングコアを利用した崩壊面のすべり面せん断試験結果によるせん断抵抗角を、表-2 に示す。すべり面せん断抵抗角()が $28^\circ \sim 40^\circ$ の間である。

赤谷、長殿、坪内の滑落崖破碎土の粒土分布を図-7 に示す。3 地区とも同様の粒度分布（粘土含有率 $22 \sim 26\%$ ）、コンシステンシー特性（ $IP=21 \sim 24$ ）を示す。

表-2 すべり面せん断試験結果

ボーリング No.	測定区間	せん断抵抗角 (°)
G-3	GL-18.559 ~ 56.520m	31.1 ~ 36.1
G-4	GL-29.143 ~ 61.068m	28.1 ~ 32.0
G-5	GL-21.946 ~ 36.892m	29.9 ~ 35.9
G-6	GL-21.601 ~ 47.071m	35.9 ~ 39.3

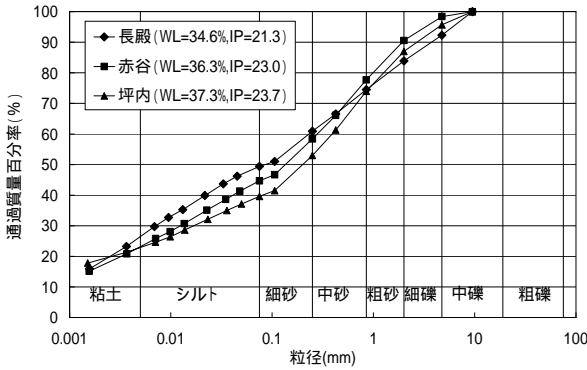


図-7 3地区の滑落面から採取した土の粒度分布

長殿地区の滑落崖に付着する破碎土のリング断試験の結果を図-8に示す。せん断変位が発生した直後には、間隙水圧計で100kPa近い負の間隙水圧が計測され、正圧よりも負圧が卓越している。その後は、正の間隙水圧が激しく変化し、最大300kN/m²に達する過剰間隙水圧が発生した。特に、34×10³sec以降では、数度にわたり大きな過剰間隙水圧が発生している。

また、試験終了後のせん断面には、試験開始時には存在しない細粒分が薄層を形成する状況が確認された。すなわち粒子破碎により徐々に崩壊面周囲に細粒分が凝集し、これが難透水となって正の過剰間隙水圧を増大することとなったと考えられる。

この現象は、地すべりのすべり面粘土の試験で正の間隙水圧のピークが規則的に発生する現象とは異なっており、深層崩壊の崩壊面と地すべりのすべり面とは異なる土質特性を有していると考えられる。

5. 考察

(1) 地質的規制面と地下水流動

栗平、長殿、赤谷の深層崩壊について、以下の地形・地質的特徴に関する共通点を確認できた。

深層崩壊は、上部ブロックと下部ブロックに大きく区分できる。上部ブロックは尾根部の強風化層の移動層であり、下部ブロックは崩壊前の斜面下

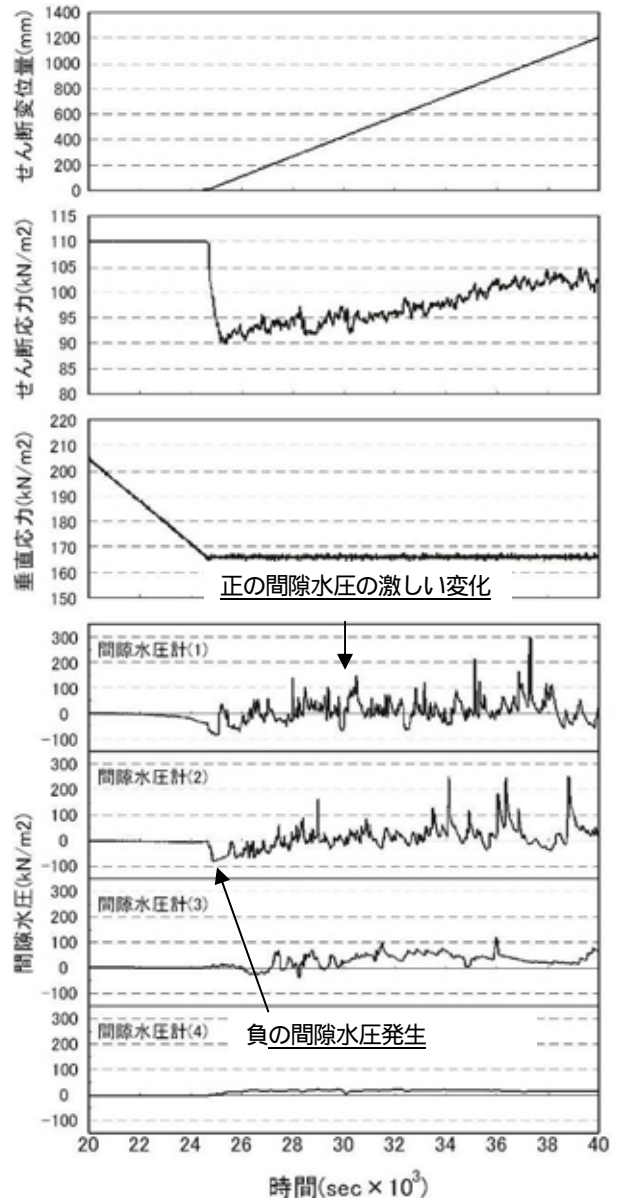


図-8 リングせん断試験結果 (長殿の例)

部の凹部で岩盤の滑落崖からなる。上部ブロックでは、強風化層が厚く形成され崩壊前にも活動履歴があり、亀裂の発達した砂岩やクリープ変形した泥質岩により斜面全体に緩みゾーンが形成され、地下水が容易に浸透しやすい条件であった。

下部ブロックでは、側壁や下部ブロック滑落崖と同じ方向の不連続面が発達し、2方向の不連続面がクサビ状に交差していた。また、基盤の泥質岩には、低角度の不連続面が発達していることから、崩壊前にはこれらの不連続面が組み合わさりクサビ状となった不安定岩塊が形成されていた。

このような地質的規制面により、地下水がクサビ部分に集中しやすく、深部まで到達しやすい水文地質構造が形成されていたと考えられる。

(2) 深層崩壊の発生メカニズム

調査結果から、調査地の深層崩壊は地下水の集中しやすい水文地質構造であることが明らかになった。しかし、崩壊面の土質特性から考察すると、せん断抵抗角()が $28^{\circ} \sim 40^{\circ}$ と高く、また、崩壊発生前には、崩壊面としての連続性にも乏しいため、通常の地下水圧では岩盤が破断して深層崩壊に至る現象には成り得ない。しかし、リングせん断試験結果では、崩壊面に過剰間隙水圧の発生している。このような現象が実斜面内でも起こるとすれば、深層崩壊発生メカニズムを説明できる可能性がある。現時点で考えられる深層崩壊発生メカニズムは次のとおりである(図-10)。

上部斜面には岩盤の緩みゾーンが形成され、地表水が浸透しやすい状態となっていた。豪雨が連続すると、地下水が縦方向の節理や破断面に沿って深部まで到達する、あるいは周辺から不連続面を通して地下水が深部まで供給される。下部斜面では2方向の不連続面がクサビ状に交差し基盤内が集水形となっているため、このクサビ部分に地下水が賦存され、高い水圧が形成される。深層まで到達した地下水により、深部の岩盤の低角度の不連続面に所々、高い間隙水圧が生じる。この状態で上部斜面の移動土塊が下部斜面に載荷することで、下部斜面の岩盤に過剰間隙水圧が形成され、深部の低角度の不連続面が破断される。下部斜面の崩壊面が移動により細粒化することで、更に高い過剰間隙水圧が形成されて深層崩壊が発生するメカニズムが考えられる。

6. おわりに

台風12号で発生した深層崩壊について、地質構造および土質特性から、以下のことが判明した。

斜面上部では過去に土塊の移動があり、地表水が浸透しやすく今回の深層崩壊で再活動していた。斜面下部では、不連続面が側壁方向と滑落崖方向の2方向に発達して両者がクサビ状に交差している。この縦方向の不連続面が地下水を集中させやすく、深部まで容易に地下水が到達できたことが深層崩壊を発生させた素因と考えられる。

崩壊面のせん断抵抗角が $28 \sim 40^{\circ}$ の間で、リングせん断試験結果で過剰間隙水圧のピークがランダム発生することから、地すべりのすべり面と崩壊面とは土質特性が異なると想定される。

過剰間隙水圧発生が深層崩壊発生メカニズムを解明する鍵となる可能性が高く、今後は誘因となる地下水の分布や岩盤に発達する低角度のせん断面強度等の

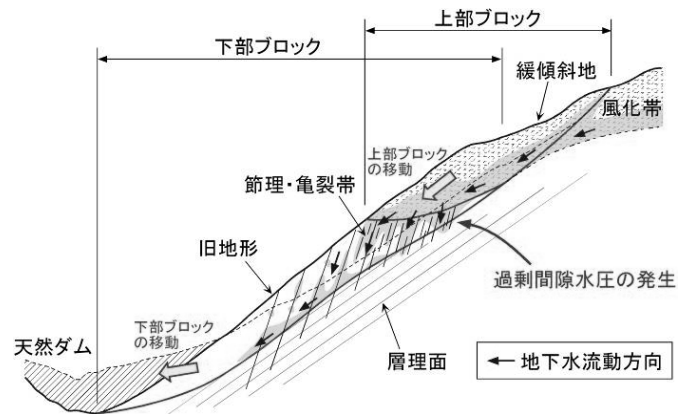


図-10 深層崩壊発生メカニズムイメージ(断面図)

詳細調査、過剰間隙水圧の発生を明らかにして、深層崩壊発生メカニズムの研究をさらに進める予定である。

謝辞：奈良県吉野土木事務所には、坪内の調査孔においてボアホールカメラ観測の許可を頂き、またコアの一部を試料として提供いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)岩松 暉・下川悦郎：片状岩のクリープ性大規模崩壊，地質学論集，28，p.67-76，1986
- 2)寺戸恒夫：四国島における大規模崩壊地形の分布と地域特性，地質学論集，28，p.221-232，1986
- 3)千木良雅弘：巨大崩壊発生の地質的要因と土砂生産 - 赤石山地の堆積岩の崩壊例 - ，電力中央研究所・研究報告，U88064，1989
- 4)恩田裕一・小松陽介・辻村真貴・藤原淳一：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.48-52，1999
- 5)八反地 剛：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，55-6，p.74-77，2003
- 6)地頭菌 隆・下川悦郎：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.21-26，1998
- 7)福地達郎：ESR法による断層活動年代測定 - その原理と実線 - ，第63回深田研談話会，pp.45，2004
- 8)木下篤彦・山口真司・山崎孝成・柴崎達也・小島健・吉松弘行(2009)：2004年新潟県中越地震により大滑動した地すべりのすべり面の土質特性に関する研究．日本地すべり学会誌，Vol.45，No.6，pp.418-427
- 9)眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成(2003)：すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価．日本地すべり学会誌，Vol.40，No.4，pp.273-282