

平成 20 年 度

独立行政法人 森林総合研究所

公 開 講 演 会

頻発する大規模山地災害はなぜ起きるか
－その発生予測と被害の軽減に向けて－

講 演 要 旨 集

独立行政法人

森 林 総 合 研 究 所

平成20年度
独立行政法人 森林総合研究所

公 開 講 演 会

頻発する大規模山地災害はなぜ起きるか ーその発生予測と被害の軽減に向けてー

日 時 平成20年10月15日（水） 14:00 ～ 17:30
場 所 ヤクルトホール
東京都港区東新橋 1-1-19 ヤクルト本社ビル
Tel. 03-3574-7255

はじめに

「森林総合研究所の山地災害研究が目指すもの」

加藤 正樹（国土保全・水資源研究担当研究コーディネータ）…………… 1

招待講演

「斜面災害研究の流れとこれからの防災」

沖村 孝（神戸大学名誉教授、財団法人建設工学研究所常務理事）… 5

講 演

「地下水から崩壊を予測する」

多田 泰之（国土保全研究領域山地災害研究室研究員）……………18

「地震による大規模崩壊・地すべりの発生メカニズム」

浅野 志穂（九州支所山地防災研究グループ長）……………25

「長距離にわたって流れる土石流災害の予測に向けて」

岡田 康彦（国土保全研究領域治山研究室研究員）……………32

森林総合研究所の山地災害研究が目指すもの

加藤 正樹（国土保全・水資源研究担当 研究コーディネータ）

1. はじめに

2007 年 11 月に公表された IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第 4 次評価報告書統合報告書の政策決定者向け要約（SPM）¹⁾ では、「地球温暖化は疑う余地がなく、今後干ばつ、熱波、洪水など極端な気象現象に伴う災害リスクが増大する」と予測している。一方、我が国では、1995 年兵庫県南部地震以降、2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島地震及び新潟県中越沖地震、2008 年岩手・宮城内陸地震など活断層型地震による災害が頻発するとともに、2003 年梅雨前線豪雨による熊本県水俣市での土石流災害、2004 年台風 21 号による三重県宮川村での崩壊・土石流災害、2005 年台風 14 号による九州地方での災害、2006 年長野県岡谷市での崩壊・土石流災害など、ほぼ毎年のように多くの山地災害が発生している。

こうした背景を踏まえて、頻発する大規模な山地災害の発生予測や被害軽減に向けた森林総合研究所の最近の成果を発表し、広く議論を深めることを通じて、安全・安心・快適な社会や生活環境の構築に向けた研究や技術開発を一層進展させるために本公開講演会を企画した。

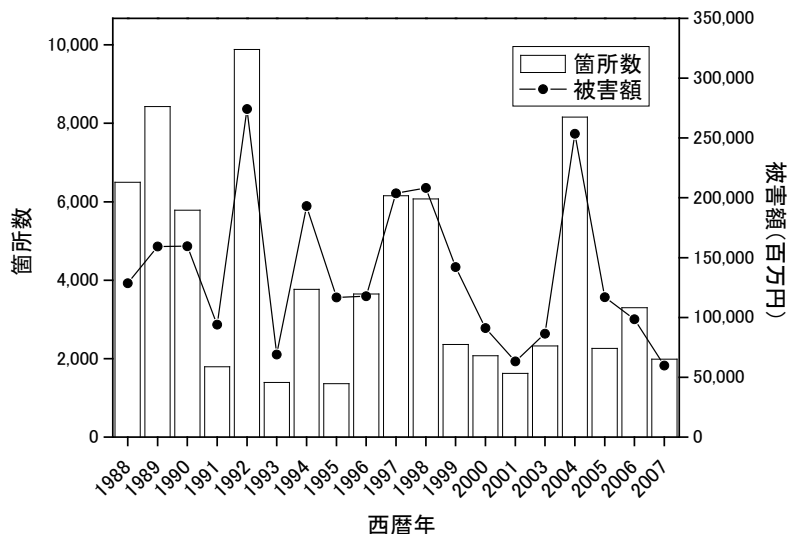


図 1 山地災害の発生状況（三森（2008）²⁾ より）

2. 森林総合研究所の山地災害研究の歴史

森林総合研究所の山地災害に関わる研究は、1911 年（明治 44 年）に森林測候所が林業試験場の所管として発足したことに始まり、森林治水試験の一環として山地の崩壊及び土砂かん止保安林の取り扱いなどに取り組んだ。第二次世界大戦後は、戦時中の過伐による国土の荒廃と度重なる台風の襲来を背景として、荒廃地の緑化を主と

する山地災害の復旧技術の開発、林業生産基盤の安定即ち林地の保全という見地からの予防的治山技術の開発、山地災害危険地区評価手法の開発などを進めた。さらに、樹木根系の強度評価による表層崩壊防止機能の解明、静岡県由比地区や積雪地帯での地すべり、長野県西部地震災害などへの対応を行い大きな成果を得た。近年では、特に、崩壊、地すべり、土石流など激甚な山地災害の発生メカニズムの解明や被害軽減を目指した実験的研究を推進し、2003 年に科学技術振興調整費により京都大学防災研究所などと共同で行った茨城県加波山での現地崩壊実験を成功させたことは大きな成果としてあげられる³⁾。

森林総合研究所では、今期、第 2 期中期計画（平成 18 ～ 22 年度）において、「健全な水循環の形成及び多発する山地災害・気象災害の軽減のため、環境変動、施業等が水循環に与える影響の評価技術、山地災害危険度の評価技術、治山施設・防災林による被害軽減に関わる技術等の開発を行う」ため、重点研究課題アイ b 「水土保持機能の評価及び災害予測・被害軽減技術の開発」を推進している。同時に、激甚な山地災害については、林野庁や都道府県などの要請に応じて専門研究職員を派遣し、災害の発生メカニズムの解明や復旧に関する技術的支援などの対応を行っている。また、本年 6 月に発生した岩手・宮城内陸地震による災害に関しても、所内交付金プロジェクト研究「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究（H20-21）」を立ち上げ、今後考えられる土砂災害を類型化してハザードマップとして示す他、崩壊の流動化機構や地震時の不安定化機構の解明、GIS ベースのデータベースの構築を図り、林野庁や森林管理局、県などの行政機関が進める被害軽減対策に活かすことを目指した研究を推進することとした。

3. 森林総合研究所の山地災害研究が目指す方向

こうしたこれまでの森林総合研究所における研究蓄積や大学・他機関などでの研究動向、今後予想される温暖化などの地球環境変動、地震や集中豪雨などによる山地災害の発生傾向、行政機関からの要望や社会的要請などを踏まえ、2007 年に公表した「**2050 年の森－森林を育て、有効活用するための研究開発ロードマップ**」⁴⁾では、「水を育み、国土を守る」研究として「山地災害を防ぐ」を大きく取り上げた。この中で、森林総合研究所の山地災害研究の 2050 年のゴールとして、

- ・山地災害防止システムの確立
- ・気候変動に対応した山地防災力の向上

を掲げ、これに向けて短期・中長期の研究を推進することとしている。具体的取り組みとして、「国土・森林管理技術」を取り上げて山地災害データベースの構築と山地災害危険度変化予測手法の高度化を進め、山地災害防止のための森林管理技術を開発する。「観測・監視技術」に関しては、広域・流域・斜面単位での観測・監視技術の開発を通じて、リアルタイム観測・監視技術やセンシング技術の開発を進め、遠隔探査技術や地上設置型観測技術の活用法を高度化する。さらに、「減災・防災技術」に関しては、ハザードマップ作成技術や治山施設の機能向上等を通じて山地災害発生リ

水を育み、国土を守る

山地災害を防ぐ



豪雨・豪雪や地震を原因とする山地災害が大きな問題となっています。地球温暖化により、今後はさらなる大型台風の来襲や各地の降水量の大きな変化が予想されています。このような中、土砂災害や山火事などの増加が懸念され、これらへの対応が求められています。

各種の世論調査によれば、行政に求める施策の中で、「自然災害の防止」は

常に上位にあり、森林の持つ多面的機能のひとつである「山地災害防止機能」への国民の期待の大きさがうかがえます。こうした期待に応えるために、山地災害を防止するシステムを確立し、山地における防災力を向上させることが急務となっています。このため、国土・森林管理技術、観測・監視技術、減災・防災技術に関する研究開発を行います。

未来の森を創造する技術・方策

- 山地災害防止機能の高度発揮のための森林管理技術の開発(国土・森林管理技術)
- 遠隔探査技術・地上設置型観測技術の活用法の高度化(観測・監視技術)
- 山地災害発生予測技術と対策技術の高度化(減災・防災技術)

2050年のゴール

GOAL in 2050

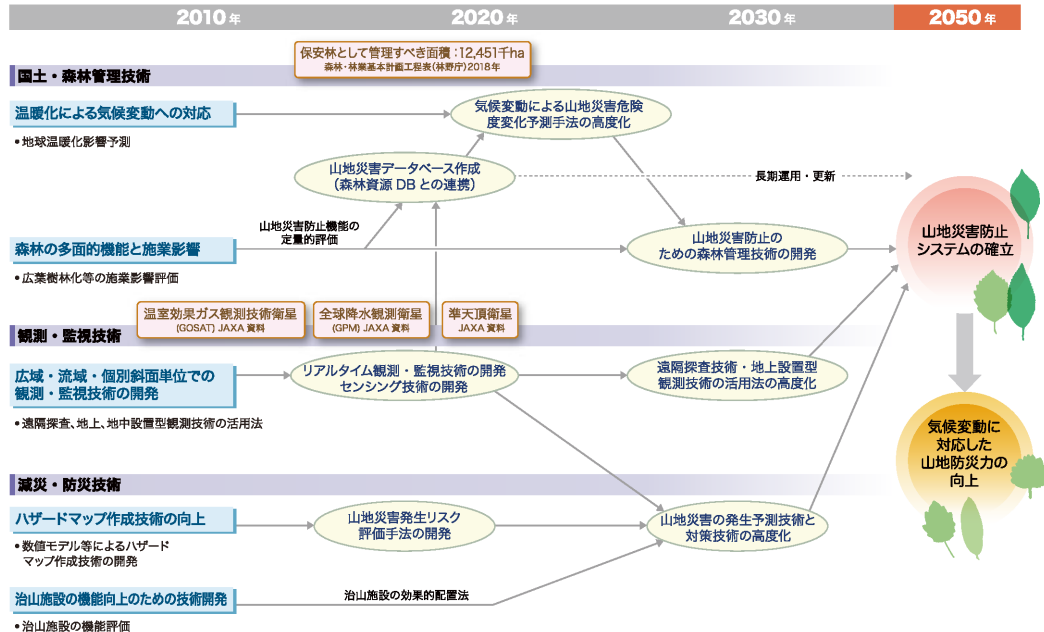
- 山地災害防止システムの確立
- 気候変動に対応した山地防災力の向上



7

山地災害を防ぐ

研究開発ロードマップ



8

図 2 山地災害の防止に関する研究戦略

(森林総合研究所(2007):2050年の森ー森林を育て、有効活用するための研究開発ロードマップより)

スク評価手法の開発を行い、観測・監視技術を合わせて山地災害の発生予測技術と対策技術の高度化を図ることとしている。

4. 終わりに

本公開講演会では、招待講演として神戸大学名誉教授 沖村 孝氏をお迎えし、斜面災害研究の流れとこれからの防災について、広い視野からのご講演をいただく。また、森林総合研究所における山地崩壊、地すべり、土石流に関する最近の研究から、地下流水音探査による崩壊発生危険箇所の予測技術、地震による大規模崩壊や地すべりの発生メカニズム、土石流の長距離流下メカニズムに関する成果を発表する。最後にパネルディスカッションを行い、この中で長崎県農林部の佐藤義高氏から、山地災害の予防や復旧に当たる現場の行政担当者の取り組みと研究機関に対する要望等についてコメントをいただく。

本公開講演会を通じて多くのご意見をいただき、山地災害の防止や被害の軽減に向けた今後の研究の進展に活かして参りたい。

引用・参考文献

- 1) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省 (2007)：気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 4 次評価報告書統合報告書の公表について、1-10.
- 2) 三森利昭 (2008)：最近の土砂災害の特徴と今後の予測、山林 1486、60-67.
- 3) 独立行政法人森林総合研究所 (2005)：森林総合研究所百年の歩み、50-56.
- 4) 独立行政法人森林総合研究所 (2007)：2050 年の森－森林を育て、有効活用するための研究開発ロードマップ、7-8.

斜面災害研究の流れとこれからの防災

沖村 孝（神戸大学名誉教授、財団法人 建設工学研究所 常務理事）

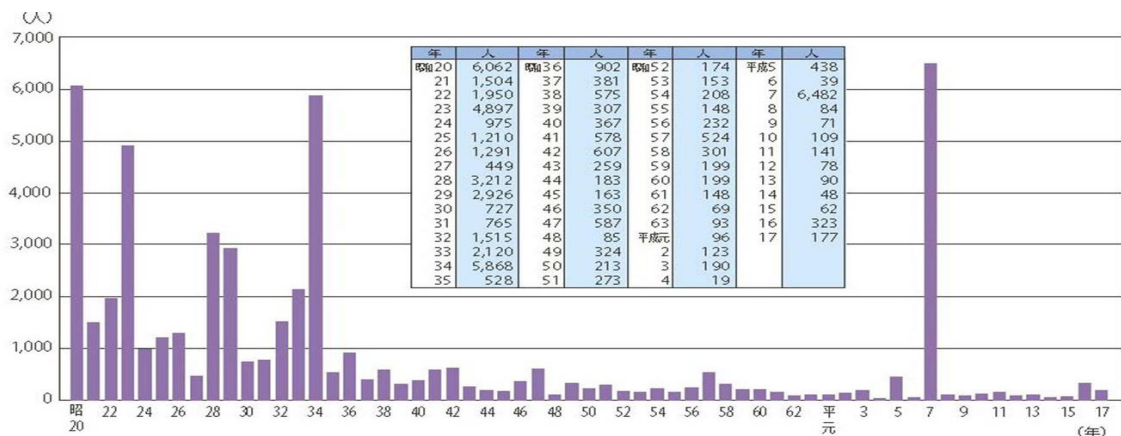
1. はじめに

災害は、結果としての災害とその原因となった自然現象、その災害に対してどのような対策が採用されたか、また災害を教訓として、近い将来そのような災害を未然に防止するためにどのような仕組みが構築されたか、学術的な貢献はどのような分野で貢献してきたか等を、考察する必要がある。本稿では戦後から現在に至るまでを 4 つの時代に区分し、これらの視点が時代の変遷とともにどのように変わってきたかをまとめてみる。

2. 災害の変遷と時代区分

戦後から現在に至るまでの約 60 年間の災害の時代変遷を見る場合に良く使われる資料は、自然災害による死者・行方不明者の変遷である（図－1¹⁾ 参照）。この図を見ると、1) 戦後から昭和 34 年の伊勢湾台風災害まではほぼ毎年 1,000 人を越える死者・行方不明者が出ていたこと、2) 伊勢湾台風災害の翌年の昭和 35 年から阪神・淡路大震災が発生した平成 7 年までは、1,000 人を越える死者・行方不明者が発生していないこと、3) しかし、この間でも死者・行方不明者はゼロにはなっていないこと、4) 平成 7 年の阪神・淡路大震災は戦後で最も大きな死者・行方不明者の災害となったこと、5) 平成 7 年以降も死者・行方不明者は大きく減少しているが、毎年数十人が自然災害のために命を失っていること、等が明らかである。

本報では、自然災害のうち、特に斜面災害を中心としてこの戦後の約 60 年間の、1) 戦後から 1960 年代まで、2) 1960 年代から 1980 年代まで、3) 1980 年代から阪神・淡路大震災まで、4) 阪神・淡路大震災から現在までの 4 つの時代に区分し、災害の種類、復旧・復興対策、災害を防止するための仕組みの構築、災害に対する防災の質の変遷、学術的研究等が、これらの時代でどのように変遷してきたかを考察する。



図－1 自然災害による死者・行方不明者¹⁾

3. 第 1 期（戦後から 1960 年代まで）の災害：自然災害多発時代

3.1 災害の内容・原因と対応

この時期には数多くの災害が多発した。1,000 人以上の死者・行方不明者を出した災害（カッコ内は死者・行方不明者数¹⁾：以下同様）は、昭和 20 年の三河地震（2,306）、枕崎台風（3,756）、昭和 21 年の南海地震（1,443）、昭和 22 年のカスリーン台風（1,930）、昭和 23 年の福井地震（3,769）、昭和 28 年の梅雨前線性大雨（1,013）、南紀豪雨（1,124）、昭和 29 年の洞爺丸台風（1,761）、昭和 33 年の狩野川台風（1,269）、昭和 34 年の伊勢湾台風（5,098）などが挙げられる。これらの災害は地震災害と台風や大雨による洪水災害が多かったことがわかる。

このようにこの時期に災害が多発した背景は、第二次世界大戦中の山林および堤防の維持管理不足による国土の荒廃と、地震や大規模台風が頻発したことが大きな原因と考えられる。昭和 20 年から昭和 40 年までの治水事業費も全体で約 5 兆円と少なく²⁾、国土の保全にまで対応が叶わなかった時代であったといえよう。

これらの災害発生に対して、地域住民で地域の河川に対する氾濫、洪水やその他水害に関する対処を行うため、昭和 24 年に水防法が制定され、「水防団」が構成され土嚢などを用いて水防や水に起因する事故に対して、地域住民が水防救急の役を務めるようになって来た。このような水防団活動は、単に緊急時の水防救急活動のみならず、日常時の河川の保全に対しても感心が高まり、河川の維持管理に大きな役割を果たした。

3.2 この時期の斜面災害研究

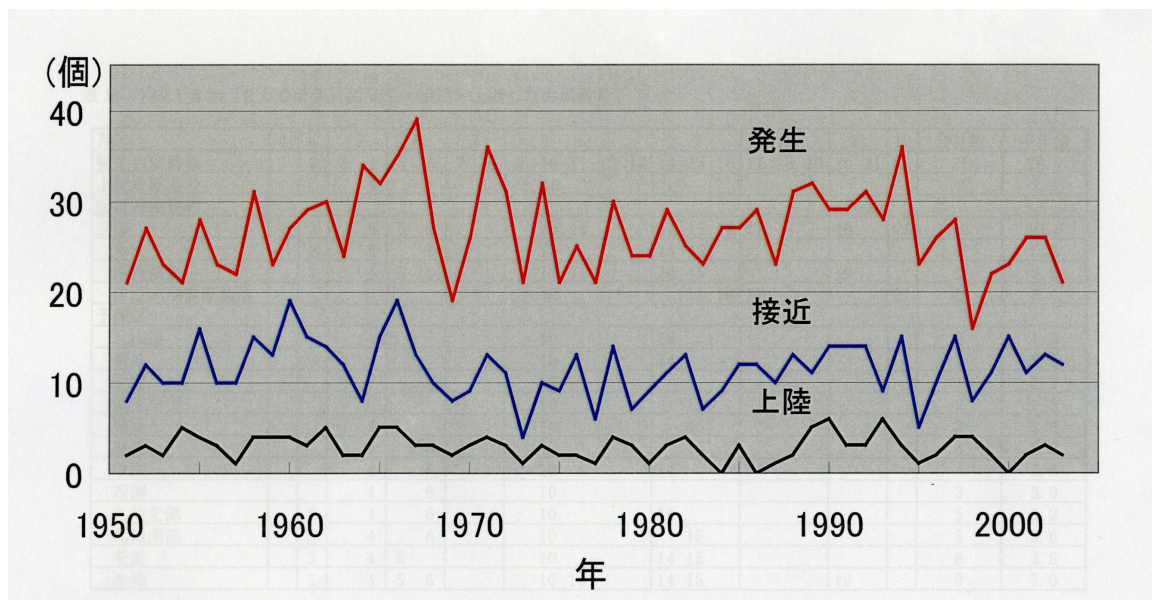
これに対して、この時期の学術的研究、特に斜面災害研究は土木工学、地質学、地形学、治山・砂防学の分野から、個々の崩壊斜面に対してその原因は何であったかを究明する、換言すれば災害防止の研究ではなく現象の理解・解明の研究が多く行われていた。しかし、各分野から進められたこれらの研究の成果は、お互いに交流することなく、それぞれの分野で個別に進められた。このため崩壊現象の理解においても、それぞれの学問分野が得意とする現象からの説明が行われ、同じ崩壊場所に対しても断層や傾斜、森林の樹種や粗密度が崩壊の原因として個別に指摘されることが多く、総合的に誰もが納得できる原因の究明が行われることが少なかったように思われる。これは、崩壊のメカニズムおよび土中水分の解析手法が未熟なためであったと思われる。

森林、治山工学の分野では上述した樹種や粗密度の他に、根系の影響に着目して樹齢や崩壊と根系の深さに関する研究が進められ、樹齢 10 ～ 15 年程度の地域で崩壊が多発すること³⁾や、花崗岩地域では根系の深さと崩壊すべり面との関係が求められ、すべり面が根系の深さよりも深い位置に出現すること⁴⁾などが明らかにされた。10 年程度の将来の崩壊危険度を予測する場合でも植生条件は変化するため、上述した結論は、崩壊の原因を説明し得ても、危険度予測には活用できなかった。

4. 第 2 期（1960 年代から 1980 年代まで）の災害：新たな斜面災害の出現

4.1 災害の内容・原因と対応

この時期になると、自然災害による死者・行方不明者は 1,000 名を切るようになり、劇的な変化を示している。この時期に 100 人以上の死者・行方不明者を出した大きな災害例（カッコ内は死者・行方不明者数）としては、昭和 36 年の第 2 室戸台風災害（194）、昭和 40 年の台風 23・24・25 号災害（181）、昭和 41 年台風 24 号と 26 号による災害（317）、昭和 42 年の 7 月、8 月豪雨災害（256）、昭和 47 年の台風 6 号・7 号・9 号災害（447）、昭和 51 年の台風 17 号災害（171）、昭和 54 年の台風 20 号災害（115）などが挙げられる。災害の原因となる大きな地震がこの第 2 期には昭和 39 年の新潟地震（26）、昭和 43 年の十勝沖地震（52）、昭和 53 年には伊豆大島近海地震（25）と宮城県沖地震（28）が発生しているが、被災は第 1 期に比すると小規模であった。100 人以上の被災を出した災害は、台風によるものが多かった。



図－2 台風の経年的変化⁵⁾

図－2⁵⁾ は昭和 26 年から平成 15 年までのわが国の台風に関するデータである。これによると第 2 期の前半に当たる 1960 年代には多くの台風が発生し、わが国に接近したことがわかる。このために、台風による災害が多かったものと思われる。にもかかわらず、この時期に自然災害による被害が減少した原因としては、ダム構築や河川改修による総合的な治水事業や治山・砂防事業による防災効果や、山地の植林による森林の回復が大きな原因と考えられる。このため、破堤による洪水災害が激減したが、この時期の大きな特徴である。

加えて、災害を構造物で防止するのみならず、仕組みでも防止するため、昭和 35 年に災害対策基本法が制定されたことも大きな影響があったといえよう。この法律により、国、県、自治体のそれぞれの責任が分担され、防災は市町村が責任を有するも

のとされ、市町村が防災計画を策定し、危険場所の周知、緊急時の防災体制の構築・整備、避難勧告や避難指示を行ない、都道府県は市町村に対する連絡調整を、国は地方公共団体に関する勧告、指導、助言を行う仕組みが構築された。この仕組みが大きく防災に寄与したと思われる。

一方、水防団活動は昭和 33 年に第二次改正が行われ、河川の管理は市町村が責任を有するような仕組みとなったため、1970 年はじめには 120 万人以上あった水防団員は、1980 年頃には 110 万人を切るようになり⁶⁾、地域住民による河川の水害や事故に対する対処や日常時の活動の機会が徐々に失われていった。

○顕著になった斜面災害

しかし、この時期は自然災害による死者・行方不明者がゼロになっていないことも事実である（図－1 参照）。この時期の死者・行方不明者の大きな原因は斜面崩壊などの土砂災害による場合が多いことである。この背景としては、以下のことが考えられる。第 1 期の終わり頃から高度経済成長政策が始まり、都市への人口の集中が顕在化してきた。これに伴い、都市及び都市周辺では都市構造の改変、住宅地の造成が盛んに行われるようになってきた。

斜面崩壊による土砂災害は、昭和 36 年梅雨前線性の集中豪雨により、神戸や横浜で新規の宅地造成斜面や石積擁壁が崩壊したことにより顕在化してきた。神戸では、この前年に六甲山麓における急速な宅地開発に起因する斜面災害を危惧して、「急傾斜地における土木工事の規制に関する条例」を整備していたが、昭和 36 年の斜面災害を期に、この条例を下敷きにして昭和 37 年に「宅地造成等規制法」が制定され、安全な宅地が造成されるようになってきた。平成 7 年に発生した阪神・淡路大震災で被災した宅地は、宅地造成等規制法以前に施工された宅地斜面や擁壁に圧倒的多く、施行後のそれは少なかったことにより、この法律により宅地の安全性が確保されていることが明らかになった。また昭和 42 年の梅雨前線性集中豪雨により広島県呉市や神戸市、横浜市などで市街地内に存在する急傾斜の自然斜面が崩壊したため多くの被害が出現した。この災害の背景も、急速な人口増大に対応するため、都市域では本来危険な場所である急傾斜地のガケ下にも人家が立地するようになってきたことが考えられた。本来、民間所有の自然斜面では公的な予算を使った工事の施工が不可能であったが、これらの災害を受け、民間所有の自然斜面であっても一定の条件を満たせば公的な予算を使って、斜面防災工事ができる「急傾斜の崩壊による災害の防止に関する法律」が昭和 44 年に施行され、都市内の自然斜面の崩壊による土砂災害が防止されることになった。

○通行規制による防災

昭和 43 年に発生した飛騨川バス転落事故は、104 人にも達する死者を出したが、この事故は、従来採用されてきた防災構造物による防災に加えて、新たに豪雨時通行規制による防災を目指した契機となった。この制度は、事前通行規制区間を設定し、異常気象時には通行止めをすることにより、崩壊が発生しても災害を防止しようとするものであり、現在でも防災に大きく貢献している。昭和 55 年当時は、全国で通行

規制区間が約 250 区間、総延長は約 1,600km であったが、平成 16 年には、対策の効果もあり 193 区間、総延長 1,500km 程度に減少している⁷⁾。この仕組みを使って防災を達成するためには、通行規制区間を設定する危険斜面の判定と、いつ通行規制を行うかという危険時刻および解除の判定が必要である。区間設定は、過去の災害事例や斜面の状況により、危険時刻は過去の経験的事実より総雨量を用いて規制が実施されている。直轄国道における平成 2 年度から平成 16 年度までの 15 年間の平均によれば、規制時間は、災害によるものが約 20%、災害がなかったものが約 30%、規制区間以外での災害によるものが約 50%となっている。

4.2 この時期の斜面災害研究

この第 2 期における学術的研究体制は、第 1 期が個別の研究分野でそれぞれ別個に研究が進められ、その結果の交流も少なかったことを反省して、学際的・総合的な研究体制が整備されたことが大きな特徴であった。この代表的な組織が、昭和 35 年に発足した「自然災害科学総合研究班」である。この研究班は、自然災害研究の企画調整、突発災害調査の組織編制及び実施、自然災害研究者のネットワーク構築や維持であった。昭和 38 年に科学研究費特定研究に「自然災害科学」の研究領域が設定され、昭和 39 年に第 1 回自然災害科学総合シンポジウムが開催されるなど、組織や研究費の面からも学際的・総合的な研究体制により、自然災害の防止に向けた活動が活発化していた。この制度下では、個別研究よりも 3 カ年程度の長期にわたる総合研究体制が重視され、計画研究体制の下での研究が大いに進展し、各研究分野の交流が活性化してきた。しかしこの研究班の体制内で、真に総合的な研究は残念ながら進展せず、個別の研究成果をファイルアップした報告書が出されることが多く、ひとつの論文を異なる研究分野の研究者がまとめて共著で出される論文が少なかった。すなわち、総合的な研究体制を組みながらも、斜面崩壊に関する原因究明の総合的な研究成果が出せず、このため防災に寄与する提案ができなかった。このため、この期間内に発生した自然災害に対して適切な提案・提言ができなかったことも大きな反省点であった。

根系と崩壊の関係に関しては、前期に引き続き根系の引き抜き試験が試みられた。これらの結果は、すべり抵抗力として評価されたが、危険度予測に関しては危険場所の予知が困難であったため、筆者の知る限りでは活用されることはなかったように思える。

5. 第 3 期（1980 年代から阪神・淡路大震災まで）の災害：災害の静穏時代

5.1 災害の内容・原因と対応

図-1 に示した自然災害による死者・行方不明者の変遷では、1960 年代から阪神・淡路大震災までは、1,000 人以下の被災者数として、一括にくくられていたが、本報では新たに、1980 年代から阪神・淡路大震災までを第 3 期として設定した。この時期の 100 人以上の死者・行方不明者を出した自然災害事例としては、昭和 57 年の長崎を中心にした 7、8 月豪雨災害及び台風 10 号による災害（439）、昭和 58 年の

日本海中部地震（104）および山陰西部の梅雨前線性豪雨災害（117）、平成 5 年の北海道南西沖地震（230）の 4 件を数えるに過ぎず、前期の 7 件に比して大幅に減少している。上述以外では火山災害として平成 2 年の雲仙普賢岳火砕流災害（44）がある。このように被災件数や、死者・行方不明者が減少している原因としては、台風が図－2 に示すように発生数、接近数共に少なかったことに加えて、大規模な地震の発生や梅雨末期の集中豪雨が少なかったことが大きな原因として考えられる。加えて、公的な予算による防災構造物の施工が防災に大きな役割を占めたことも由来するであろう。この間では約 30 兆円²⁾ が支出され、更なる安全が確保されてきた。さらに、第 2 期に構築された災害を防ぐための地域防災計画等の仕組みによる対策が実ったことも一因に挙げられるであろう。

○衰退した水防団活動

地域的な災害はあったものの、阪神・淡路大震災の出現まで、この時期は大規模な災害の発生が少なく、多くの人々は公が施工する構造物や公による防災の仕組みにより防災が達成できたものと勘違いし、第 1 期に大きな役割を果たした人による防災の仕組み、水防団活動は少しずつ減少していき、この第 3 期の終わり頃には水防団員は 100 万人を切るようになり、また、水防団員の高齢化も顕著になり、人の力による水防活動は衰退していった。これは消防団活動も然りで、効率化・合理化の名の下に地域の消防団活動を中止し、中央の消防署活動に集約していった神戸市消防局は、この人の力による防災が、実は大きな役割を果たすことを第 4 期の阪神・淡路大震災のときに改めて知ることになった。

5.2 この時期の斜面災害研究

学術的な研究の内容も、このような時代背景を受けて災害の原因となる事象のメカニズム究明に加えて、災害を防ぐことが研究の主な目的になってきた。第 2 期に大きな役割を果たした自然災害科学総合研究班は、科学研究費特別研究「自然災害科学」から重点研究領域に移行し、規模が縮小されることになった。これは、前項第 2 期のところで述べたように、小規模ながらも毎年発生する自然災害に対して、適切な提案・提言ができなかったためと考えられる。これを受けて、災害の原因、メカニズムを研究し、防災に貢献することを目指してきた自然災害科学総合研究班は平成 11 年に解散されることになった。一方、この第 3 期では、自然災害学会が昭和 56 年に、また地域安全学会が昭和 61 年に設立、第 4 期の平成 11 年には日本災害情報学会が設立するなど、災害をいかにして防ぐか、あるいは減少させるかに関する研究が進められることになった。

土砂災害の原因となる斜面崩壊研究も、従来のメカニズム研究から積極的に崩壊を予知・予測するための研究が盛んになってきた。そこでは数量化法を用いた危険斜面判別方法⁸⁾ や地形情報を活用した危険斜面判定方法⁹⁾ などが提案された。またメカニズムとしては無限長斜面安定解析法を用いて地形情報を活用した斜面崩壊発生位置の予測法も提案¹⁰⁾ されてきた。加えて、第 2 期から道路の通行規制で始まった危険

時刻の予測法に関しては、総降雨量と短時間降雨強度を有効降雨量で評価し、この二つのパラメータで表示する「砂防方式」や、先行降雨を評価するためタンクモデルを活用した手法、降り始めからの土中水の挙動を解析するため不飽和浸透解析を活用した手法¹¹⁾等が提案されるなど、第 3 期では第 2 期で提案された総降雨量という一つのパラメータから大きく進展した。しかし、これらの学術的成果が直ちに、実務に活用されることはなかった。これは、これらの活用が公により行われるため、より精度や信頼度が期待されたためであったと思われる。

植生に関しては、この時期に、根系が崩壊に影響を及ぼす評価を積極的に試みる斬新な研究が塚本¹²⁾により行われた。そこでは平面的に円形の根系モデルを提案したり、根系を射出根と水平根に分けて考える必要性のあることが提案された。また、人工衛星情報を活用して、植生の分布や活性度を求める研究¹³⁾が進められたが、これらの成果が崩壊研究に活用される機会は少なかったように思われる。上述した地形を活用した危険場所予知モデルでは、植生の効果は根系の引き抜き抵抗力が働くものとして、根系粘着力を導入する試みもなされた¹⁴⁾が、一般的には山地を対象としながら植生に関する効果（上裁荷重や根系抵抗力）をほとんど考えられることがなかった。一方森林発育の場となる表土層の分布に関する研究¹⁵⁾が進められた。表層崩壊にとって表土層の厚さ分布は、危険場所を予知する際には最も重要なパラメータであることが感度分析により明らかになっている¹⁶⁾にも拘わらず、形成過程に関する研究¹⁷⁾があまり行われていなかったために、現状の分布を把握する簡易貫入試験器等で求めざるを得ない。今後、流域の土砂収支に加えて、表土層の発達過程の研究の進展が望まれる。

6. 第 4 期（阪神・淡路大震災から現在まで）の災害：減災の視点の登場

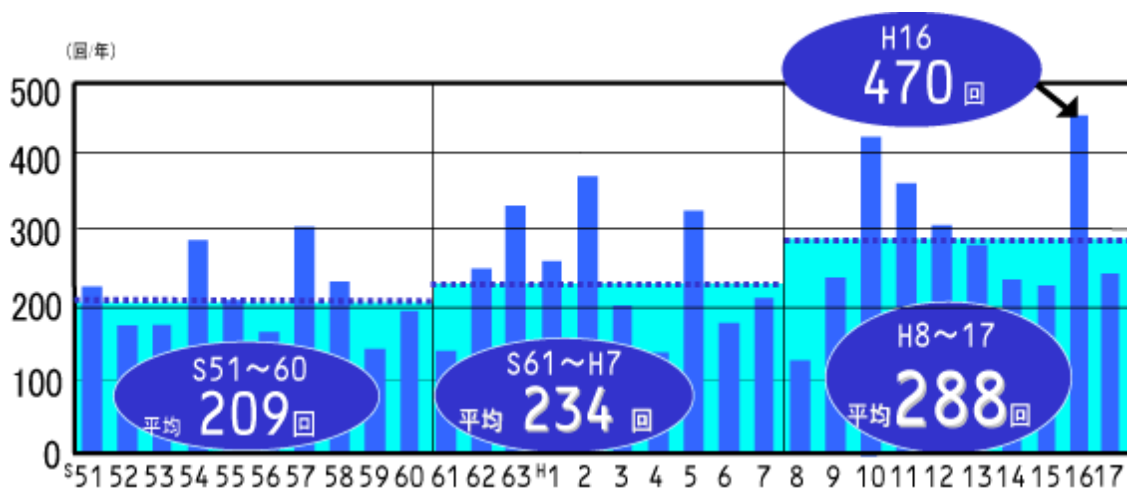
6.1 災害の内容・原因と対応

○頻発しだした地震

1995 年 1 月 17 日に出現した兵庫県南部地震は、近代的な都市直下で初めて出現した大規模な地震であった。関西は関東に比して地震が少なく、地震は関東の地域的な災害であると感じていた住民が多かったため、地震に関してまったく無防備な状態であったためか、6,437 名にも達する戦後で最も大きな自然災害となった。この地震を契機として、従来、地震静穏期であったといわれた西南日本にも、その後大きな地震が頻発した。この第 4 期に発生した主な地震は、平成 12 年の鳥取県西部地震、平成 13 年の芸予地震（2）、平成 15 年の宮城県沖を震源とする地震、宮城県北部を震源とする地震、平成 15 年十勝沖地震（2）、平成 16 年の紀伊半島沖・東海道沖を震源とする地震および新潟県中越地震（59）、平成 17 年の福岡県西方沖を震源とする地震（1）、平成 19 年の能登半島地震（1）および新潟県中越沖地震（15）、平成 20 年の岩手・宮城県境内陸地震（13）の 11 件であるが、西南日本ではこのうちの約半数が発生した。多くの場合、阪神・淡路大震災に比して、比較的人口が過疎な地域で発生したため、人的な被災は阪神・淡路大震災に比して幸いにも小さかった。

○集中豪雨の出現頻度の増大

地震以外でも、この第 4 期では 20 人以上の災害を出した事例としては、平成 9 年の鹿児島県出土石流災害（21）、平成 10 年の東北地方の 8 月末豪雨災害（22）、平成 11 年の西日本を中心とする梅雨前線性豪雨災害（39）および台風 18 号災害（31）、平成 15 年の梅雨前線性豪雨災害（23）、平成 16 年の台風 18 号災害（45）、台風 21 号災害（27）および台風 23 号災害（98）、平成 17 年の台風 14 号災害（29）と数多く発生し、8 件もの台風や集中豪雨による災害が発生している。災害が少なかった第 3 期の 2 件に比すると、第 4 期では、再び、台風、集中豪雨による災害が増大してきていることが特徴的である。



図－3 降雨強度 50mm 以上の出現回数¹⁸⁾

図－3¹⁸⁾ は降雨強度 50mm 以上の集中豪雨が、一年間に何回出現したかを示したものである。昭和 51 年から昭和 60 年間までの 10 年間の出現回数を平均すると約 209 回であったが、次の昭和 61 年から平成 7 年までの 10 年間は約 1.1 倍の 234 回になっている。ところが、第 4 期であるこの時期の平成 8 年から平成 17 年の 10 年間では、30 年前の約 1.4 倍に相当する 288 回になり、集中豪雨が頻繁に出現しやすくなっていることがわかる。この 30 年間の年間総降雨量はほぼ一定、もしくは減少傾向にあるといわれている。これより、雨の降り方としては、短期に集中豪雨が発生しやすくなっていることがわかる。この降雨パターンは、雨水が地中に浸透する量が弱雨に比して少なくなるため、結果的に地表流が多くなり、その結果、洪水が起きやすくなっている。都市周辺では、建物や舗装により雨水が浸透しにくくなっていることも一因として考えられる。このような降雨パターンの変化や都市構造の変化に由来して、第 4 期では再び豪雨災害が多くなっているものと推定される。

○減災の登場

阪神・淡路大震災は、第 3 期で災害の静穏期を過ぎてきた国民に大きなインパクトを与えた。筆者の教訓としてしばしば発表してきた事項は、1) 安全に構築してきた筈の道路や鉄道など、インフラストラクチャーが大きな破壊を受けたこと、2)

防災に大きな責任を果たしてきた「公」が緊急時には、機能が発揮できなかったこと、3) 結果的に、住民は自分の命は自分で守らなければならないことを知ったこと、4) 個人一人ひとりの力は限られており、緊急時には住民の協力が大きな力になることを知ったこと、である。このことは、換言すれば、災害を未然に防止する第3期までの考え方である構造物による防災や仕組みによる防災は、前提条件となる自然現象の外力の大きさが違えば基本的な防災対策にはならないこと、災害は防ぎきれものではなく、いつでもどこでも起きる可能性があることを示したものであった。このような状況下における防災は、起きるかもしれない災害の被災を少なくするための方策を考えることが必要になり、第3期までの災害を起こさないためという条件に加えて、「もし災害が発生すれば」という条件の研究が新たに必要になってきた。これら「減災」を達成するためには第3期ではほぼ消滅した人の力による「自助」や「共助」による防災が必要になってきた。

○避難による減災

さらに、第3期までに培ってきた防災、すなわち構造物による防災、仕組みによる防災に加えて、新たに「防災空間」を都市内に創造し、斜面崩壊による土砂災害が発生しても、崩壊土砂が住民の生活空間に及ばないようにして災害を防止する手法や、災害危険区域を設定し、ここから積極的に避難することにより災害を減少させるための新たな手法が提案されてきた。具体的には、前者は平成7年度から実施された「グリーンベルト」事業であり、後者は平成13年に施行された「土砂災害警戒区域等における土砂災害の防止に関する法律」により土砂災害を受けやすい地域に対して土砂災害警戒区域（イエローゾーン）や特別警戒区域（レッドゾーン）であり、避難はこの土砂災害警戒区域からの豪雨時の行動である。また道路では、平成8年に実施された道路防災一斉総点検により、道路防災工事を必要とする斜面や、当面はカルテにより危険度の推移を見守る斜面など空間的な危険斜面が明らかにされ、防災対策工事がこれらの斜面に重点的に行われることになり、道路斜面の崩壊が減少⁷⁾し、道路の防災機能が向上した。

これら空間的な情報である危険斜面に対して、いつ避難行動を開始するかという危険時刻の判定手法に関しては、第2期の国道の異常気象時通行規制に用いられた総降雨量からはじまり、第3期では総降雨量と降雨強度の2つのパラメータを活用する手法が提案されたが、この第4期では、平成12年に気象庁からタンクモデルを活用した「土壌雨量指数」¹⁹⁾が提案され、平成17年にはこの土壌雨量指数と短期時間雨量の2つを活用した土砂災害警戒雨量なるものが提案され、現在、土砂災害警戒情報に活用されている。この手法は、気象観測点の情報であり、この結果が空間的にどこまで適用できるかという課題を内蔵している。このため、地形モデルにアメダス解析雨量と短時間降雨予測を入力することにより、空間的に危険な斜面を予測しようとするモデルも学術的に提案されている。このモデルによる結果は、時間と共に変化する降雨の影響を評価した手法であり、降雨量の変化に対応した危険斜面の予測より、むしろ危険が迫ってくる斜面の危険度認知に有効であり、ひいては住民が避難行動に

移る動機付けに有効となろう。これらの手法が活用されれば、従来の構造物による手法と仕組みによる手法に加えて、第 4 期に新たに提案された避難手法による減災が達成できよう。

○宅地の耐震化

一方、近い将来予想される東南海・南海地震に対して、災害を未然に防ぐための積極的な対応策の構築が、平成 18 年の宅地造成等規制法の改正で住宅地で進められることになってきた。宅地造成等規制法は昭和 37 年に施行されたものであるが、これは、豪雨中に発生する宅地の斜面災害や擁壁災害を対象としたものである。このため、阪神・淡路大震災で発生したような谷埋め盛土が軟化で変形するような災害を想定していなかった。しかし、被災地を解析した結果、厚さ 10 ～ 20m 程度の谷埋め盛土で、盛土基盤の傾斜が緩く、地下水がある場合に液状化による変形が発生していることが明らかになったため、将来予想される地震に対して事前に積極的に対応をとることが求められた。具体的には、3,000m² 以上の谷埋め盛土を対象にして、これらの条件に当てはまる谷埋め盛土は積極的に耐震化対策を行う、あるいは高さ 15m 以上の腹付け盛土に対しても、未然に被害を防止しようとする画期的な施策である。しかし、現在宅地である盛土域の判定、盛土基盤の傾斜、地下水等を調査し、耐震化の必要性を判定する必要がある、今後、多くの事例の蓄積も必要であろう。

6.2 この時期の斜面災害研究

第 4 期における災害に関する学術的研究は、第 3 期における学術研究の成果すなわち防災を視野に入れた研究が引き続き行われると共に、新たな目標となった減災を達成するための研究も盛んになった。斜面関係では、防災の研究としては現象のメカニズムをさらに理解すると共に、予知・予測モデルの提案が行われた。中でも、不飽和浸透に関する研究が進展し、雨水の挙動に関する研究が行われるようになってきた²⁰⁾。しかし、自然斜面では多くの材料が混在するため、この不飽和浸透モデルを考慮した崩壊メカニズムの解明までには至っていない。また、斜面崩壊の予知・予測モデルでは、平成 8 年の道路防災一斉点検のような点数法による危険度判定、あるいは第 2 期の昭和 50 年代から行われるようになった統計的判別手法を用いた危険度判定に加えて、第 3 期では、三次元の地形モデルを対象として、山地の表土層内の地下水位を飽和横流れ浸透解析により求めて、これを無限長斜面安定解析により力学的に危険度を判定しようとするモデルが提案されてきていたが、第 4 期では新たな画期的なモデルの提案は未だ行われていないように思える。一方、いつ危険になるかという危険時期の予測の問題に関しては、降雨観測技術の発展により大きく進歩した。気象庁では平成 3 年からレーダーアメダス解析雨量を導入し、5 × 5km の解析単位で一時間ごとの雨量が観測できるようになった。平成 13 年からは解析単位が 2.5 × 2.5km と小さくなると共に、平成 15 年からは解析時間を 30 分単位とすると共に、気象庁が管理している約 1,300 箇所のアメダス観測点に加えて、国および地方自治体が管理している 4,000 箇所以上の雨量計を活用してより解析制度を向上させ、平

成 18 年度からは解析単位を $1 \times 1\text{km}$ としている。降雨予測は、3 時間及び 6 時間の短時間降雨予測に加えて、1 時間先までの降雨量を 10 分間単位で予測する降雨ナウキャストを導入している⁷⁾。さらに第 4 期に入って顕在化してきた局所的な短時間集中豪雨の頻発に対応するための局地予報モデルの導入を検討中である。これにより局所の降雨分布の把握および短時間降雨予測が可能となり、土砂災害に対しては第 3 期で提案された土壌雨量指数の活用が今後も進展すると思われる。一方、現地で土中水分量や変位を直接観測し、これを危険時刻予測に活用しようとするリアルタイム崩壊予測の研究も進展している。観測項目としては、土中水分量をサクションや電気伝導度により求める手法、孔内傾斜計により変位を求める手法や落石を検知する手法等が開発されている。これらの手法は限られた場所の情報であるが、あらかじめ危険を回避する手法の一つとして重要な方法である。

植生に関する研究としては、表土層内の水の動きに関連した研究が進められ、不飽和の研究と共に表土層内の不均一性や根系の腐食や動物活動に由来するパイプフローの研究²¹⁾が行われるようになってきた。パイプに関しては、地表より把握することが困難なため危険場所の予知に関してはまだ活用されていないように思われる。従来、試験室で求められる透水係数は、現地よりも一桁小さいと言われているが、これも現地の不均一性やパイプフローの影響によるものかもしれない。これらのことを考えると、現状では大きめの透水係数を使ったマトリックスフローの解析を当分進めざるを得ないと考えられる。

いずれにしても、山地における植生・森林は雨水の涵養、緑地環境の形成、地球温暖化防止に重要な役割を果たすことのみならず、崩壊防止にとっても非常に重要な要因であると考えられる。にもかかわらず、安定解析に基づく危険度予知には積極的に評価されていない。これは、植生・森林は時間的に変化する要因であるためと考えられるが、近年の目覚ましいセンシング技術を活用することにより積極的に評価される日が来ることを祈っている。

7. これからの防災

第 4 期の期間がいつまでになるか不明であるが、20 年をひとつの期間とすると、2015 年くらいから次の第 5 期の防災が始まるものと思われる。この第 5 期で進展するであろう、あるいは進展して欲しい課題は次の様なものが考えられる。

(1) 学術的課題研究の進展

- 1) 従来の微小変形理論から大変形理論の研究および解析手法の発展が望まれる。この理論の発展により、変形を許容した工法の開発が進展すると共に、崩壊から堆積に至るまでの過程が明らかになり危険範囲の設定に大きく寄与するであろう。
- 2) 不飽和浸透モデルおよび解析手法の発展が望まれる。これにより、降雨開始から崩壊発生に至るまでの時間的な危険度予測が可能となろう。
- 3) リモートセンシング手法による地表付近の地盤条件の把握・探査技術の開発が望まれる。これにより、今まで不明であった地表付近の地中の情報、例えば表土層厚、

水分情報、植生の力学的な寄与などが把握できるようになる。

(2) 信頼できる避難体制の確立 (5 カ年程度で達成すべき目標)

- 1) 第 4 期で数多く提案された高精度化した解析雨量や短時間降雨予測を活用して、雨量情報のみを用いた土砂災害警戒情報の提案を行うことが必要になるろう。
- 2) 雨量情報のみを用いた土砂災害警戒情報ではなく、雨量を入力して力学的解析により危険斜面や避難範囲の危険度を知る手法の提案が必要になるろう。
- 3) 上述した手法には、いくつかのパラメータを仮定することが必要になるが、現地で土中水分量や変形に関するモニタリングを行い、この結果を危険度判定に活用するリアルタイム防災手法の開発も必要になるろう。
- 4) 上述したいくつかの手法により危険度が判明した場合、この危険情報をどのようにして行政や住民に伝達するかに関する研究が必要になると共に、伝えられた情報で住民にリスクをどのように認知してもらい、避難行動に移行できるかに関する研究も必要になるろう。

(3) 人工斜面を安全に長持ちさせるための研究 (10 カ年程度で達成すべき目標)

- 1) 切土や盛土など人工斜面は造れば永久に安全が確保できるわけではない。このため新しい維持管理手法を提案し、危険度をあらかじめ知ることにより、壊れる前に補修する体制を確立する必要がある。今までは壊れた斜面を対象に解析してきたが、今後は壊れていない斜面の危険度を判定する必要がある。
- 2) 危険度が大きくなってきた場合は、崩壊する前に補強する必要がある。この場合には、ライフサイクルコストの概念を確立し、近年、厳しくなりつつある限られた予算を有効に活用する必要がある。
- 3) このライフサイクルコストの概念の確立には、地山やコンクリートなど斜面防災構造物の劣化に関する概念を確立する必要がある。このためには現状の劣化程度の把握と、劣化の速度も把握する必要がある。今後これらの研究の進展が望まれる。

(4) 共生的安全により備えるための仕組みの確立

- 1) 阪神・淡路大震災で明らかになった自助、共助による安全への備え、減災への仕組みの確立のため、リーダー育成やメモリアルイベント等により災害文化を育成、持続する必要がある。
- 2) 災害文化より得られた知見を防災教育に活用し、災害文化、被災体験の共有化を図り、命の大切さの確認、避難訓練、ボランティア活動への参加等に発展させていく必要がある。
- 3) 自助、共助など人と人との絆による防災の仕組みを、自主防災組織活動、避難訓練等を通して作り上げていく必要がある。
- 4) 阪神・淡路大震災で顕在化した自助、共助、公助をそれぞれ作り上げると共に、これらの仕組みが相互に連携を取り合う共生的な安全の概念を作り上げていく必要がある。

参考文献

- 1) 内閣府：防災白書、平成 18 年度版、2006.6.
- 2) 小池敏雄：豊かな水環境を未来へⅡ、(社)日本治水協会、48-56、2006.
- 3) 北村嘉一ほか：抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能、林試研報、313、1981.
- 4) 秋谷孝一ほか：六甲地区における森林と山地荒廃の関係について、防災科学技術研究総合報告、24、39-71、1970.
- 5) 気象庁：平成 15 年の台風について、報道発表資料、2003.12.
- 6) 道奥康治：社会・自然環境のうつりかわり、人と川の関係、平成 12・13 年度土木学会関西支部共同研究 G 報告書、2002.3.
- 7) 地盤工学会編：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測、地盤工学会、184p、2006.7.
- 8) 沖村孝・杉本博：統計的手法による自然斜面崩壊の研究、土木学会論文報告集、209、89-97、1979.
- 9) 沖村孝：山腹表層崩壊発生位置の予知に関する一研究、土木学会論文報告集、331、113-120、1983.
- 10) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法、土木学会論文集、358、69-75、1985.
- 11) 松尾稔・上野誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究、土木学会論文報告集、281、65-74、1979.
- 12) 塚本良則：樹木根系の崩壊抑止効果に関する研究、東京農工大学農学部演習林報告、23、65-124、1987.
- 13) 大林茂行・小島尚人・笠博義：斜面崩壊を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について、土木学会論文集、415、71-80、1990.
- 14) 沖村孝・西川亨：さまざまな土地利用条件下の山くずれ発生危険度評価の一例、土地造成工学研究施設報告、13、117-145、1995.
- 15) 田中茂・沖村孝：一試験地における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究、新砂防、116、7-16、1980.
- 16) 沖村孝：山地斜面崩壊の調査と対策、地質と調査、33、22-28、1987.
- 17) 沖村孝・吉永秀一郎・鳥井良一：地形特性値と地形区分、表土層厚の関係―仙台入菅谷地区を例として―、土地造成工学研究施設報告、9、19-39、1991.
- 18) 国土交通省ホームページより
- 19) 岡田憲治：土壌雨量指数、測候時報、69 (5)、67-100、2001.
- 20) 地盤工学会：不飽和地盤の透水性評価に関する研究委員会報告書、1997.
- 21) 北原曜：林地緩斜面土層中のパイプフローの特性、日本林学会誌、71、1989.

地下水から崩壊を予測する

多田 泰之（水土保持研究領域 山地災害研究室 研究員）

1. はじめに

日本列島は国土の約 7 割が急峻な山地からなり、その地質は大変脆弱である。また、梅雨や台風などの激しい降水条件に曝される。そのため、我が国では古くより幾度と無く風水害による犠牲者を出してきた（図 1）。一方で、近年の地球温暖化は大規模な台風や集中豪雨を引き起こし、深刻な土砂災害を生じさせると危惧されている。そのため、山崩れ災害を防ぎ、「国民の生命と安全・安心な生活を守る」ためには、土砂災害の発生源となる山崩れの場所を事前に予測する技術が求められている。

一般に、山崩れの原因は地形・地質などの素因と降雨や地下水などの誘因に分けられ、両者の条件が揃った場合に発生する。これまで山崩れの発生しやすい場所は、因子得点法・統計・数値解析などから評価されてきた。しかし、推定精度は満足のいくものではなかった。その原因は、誘因である地下水の評価が不十分なためであった。そこで、平常の降雨後に地下水の流れる「音」の強弱から地下水の集中する場所を特定し、豪雨時に山崩れの起こる場所を従来よりも高精度に予測する技術を開発した。

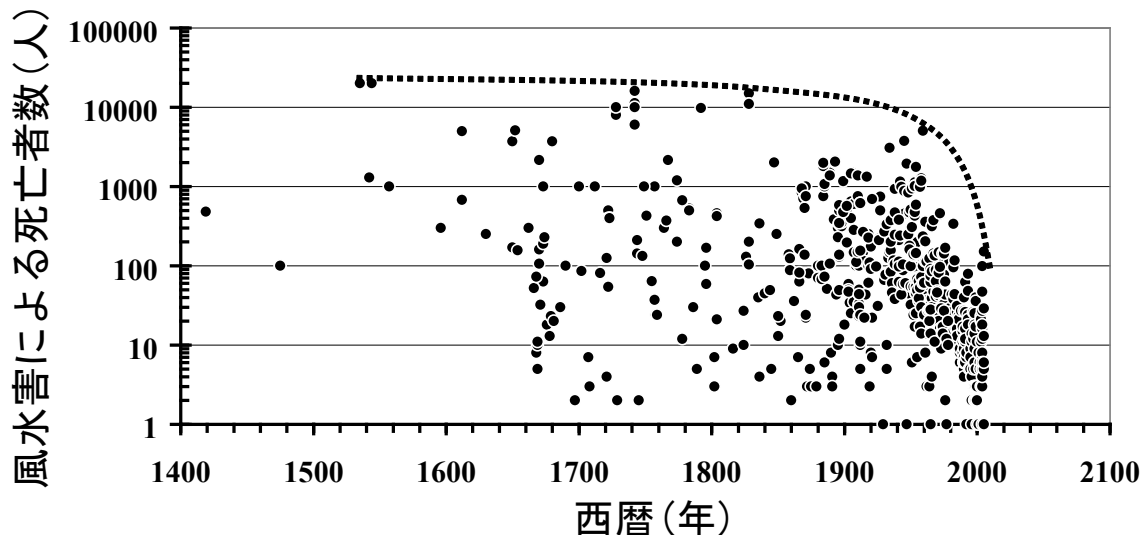


図 1 1 回の風水害による死亡者数の推移

（理科年表、日本砂防史、治山 80 年史、防災白書、日本災害辞典より作成）

※我が国では 1960 年代まで、一度の風水害で数千人～数万人規模の犠牲者を出してきた。しかし近年は防災対策技術の発展により 100 人を上回る災害の発生は少なくなっている。

2. 地下流水音の性質とその探査

2.1 測定装置と測定方法

山崩れの多くは大雨が降った時に発生する。これは雨が土層中に浸透し斜面に地下水が発生することで、土の強度が失われるためである。広い山の中で山崩れが起きる場所を事前に特定するには、この地下水の発生する場所を知ることが大きな鍵となる。そこで、山崩れの起きそうな急勾配の山で、地下水の発生しやすい場所を調べるために「地下流水音探査法」を開発した。

地下流水音の測定装置と測定の様子を写真 1 に示した。地下流水音測定装置は、1) センサー、2) 測定器、3) ヘッドホン、4) 録音部で構成されている。各部の機能は次の通りである。

①センサー：風等の雑音を防ぐために、写真 1 に示した $\phi 0.8 \times 10\text{cm}$ のステンレス棒をセンサーに取り付け、これを地表面へ挿入し地下流水音を捉える。

②測定器：測定部は、センサーで捉えた地下流水音を増幅する増幅回路、風等の雑音を遮断するフィルター回路、地下流水音の音圧を指示するレベルメータからなる。フィルター回路はセンサーで捉えた流水音のうち特定の周波数帯の音のみを取り出せ、現場で発生する雑音に柔軟に対応できる。また、レベルメータによって、音の強弱を視覚的に判断できる。

③ヘッドホン：センサーで捉えた地下流水音を測定部で設定した増幅率、周波数帯のものをリアルタイムで出力する。

④録音部：一般に市販されているボイスレコーダをヘッドホンと並列に繋ぎ、地下流水音を録音する。

地下流水音測定装置は、総重量 900g と非常に軽量であるだけでなく、最も大きい測定器のサイズは $17.5 \times 7.0 \times 10.5\text{cm}$ と小型で、山地の作業に十分利用できる。



写真 1 地下流水音の測定

2.2 地下水流の発する音波

一般に、地下水が発生していない状態の斜面の土層は、図 2 (a) に示すように、土粒子間のすき間に空気と水が存在する。これを不飽和状態という。不飽和状態では土

粒子間の小さいすき間に（毛管）水が吸着する。一方、大きいすき間には空気が存在する。ここへ図 2 (a) に示すように①から水が浸入すると、土粒子間の空気は②へ押し出される。しかし、空気の抜け道には、土粒子間に吸着している（毛管）水でふたがされているので、空気はこれを押しのけねばならない。このとき、シャボン玉を膨らませるのと同じように、土粒子間のすき間に吸着されていた（毛管）水は空気によって押し出され、図 2 (b) のように進行方向に水膜ができる。そして、水が土粒子間のすき間をうめると同時に割れてしまう。この水膜が割れる瞬間に「ポコ」と気泡のはじける音が発生する。この気泡の音色には「コロ」・「ポコ」・「ボコ」など音の高さの異なるものがある。これは土粒子間のすき間の大きさによって、気泡の大きさが変わるためである。大きい気泡は低い音を、小さい気泡は高い音を発する。このような大小さまざまな大きさの気泡が土の中でたくさんはじけることで地下水の流れる音は生じる。一方、地下水が多く流れている場所では、土の中の空気と水が盛んに交換される。つまり、地下水が多く流れている場所ほどたくさん気泡がはじけ、地下水の音の強さが強くなる。地下流水音探査は、平常の降雨後にこの音の強い場所を探すことで地下水の流れる場所を特定する。

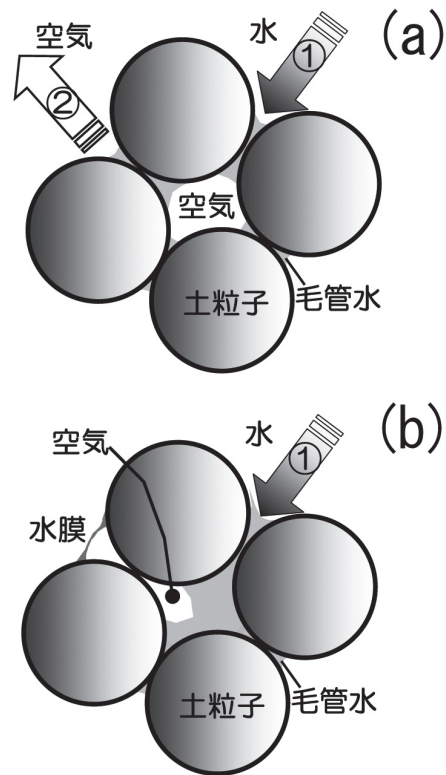


図 2 土層中の水と空気の移動

2.3 地下流水音の分布

均一な土層に水みちが 1 つ存在する場合の地下流水音の分布特徴を検討するために、次の模型実験を行った。

図 3 に示したように長さ 5m、幅 2m、深さ 0.7m の標準砂を盛土した土層の中央 2.5m の位置に、不織布で被覆した多孔管を設置し、図 3 の Q_{in} から給水した。実験条件は、給水用の多孔管の深さと流量を変えて行った。すなわち、深さは 35、62cm の 2 ケース、流量は 50、100、150、200、250、300 ml / 秒の 6 種類の定常給水とした。

地下流水音は図 3 に示したように、土層中央の地表面に測線を設け、多孔管直上から左右へ 2m 測定した。測定間隔は 0.2m とした。地下流水音の強さは、各測点でセンサーに取り付けたステンレス棒を地表面へ挿し込んだ後、ヘッドホンから聞こえる地下流水音の変動とレベルメータの指示値の変動の関係を良く観察し、ピーク値を 10 回測定した。そして、それらの値の平均値を地下流水音圧とした。なお、予備実

験の結果、地下流水音は 100 ～ 600Hz の間でよく捉えることが可能であったので、地下流水音のうちこの周波数帯のものを測定値とした。

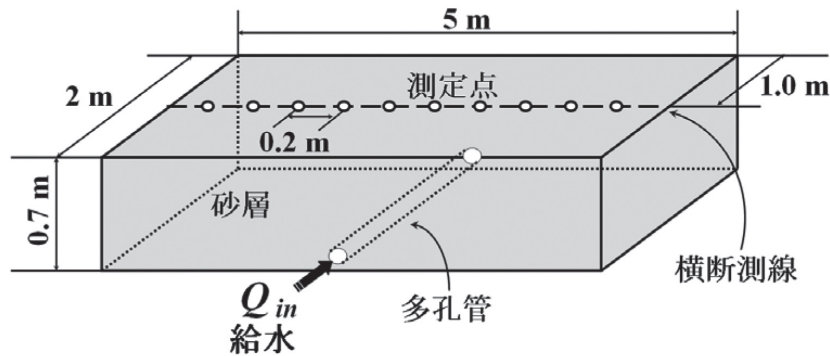


図3 模型土層

各測点で測定した地下流水音の強さ I (W/m^2) を多孔管の深さ別と流量別に図4に示した。なお、図中の Q は流量 ($\text{ml}/\text{秒}$) を表している。また、図中では多孔管の位置を 0m として表記した。

これらの実験結果から次の知見を得ることができた。

- ①地下流水音は水みちの直上で最も強く、水みちから離れるほど弱くなる。
- ②水みちの深さが等しければ、流量が多いほど音の強さ I のピークは大きい。
- ③水みちの流量が等しければ、水みちが浅い方が音の強さ I のピークは大きい。
- ④地表面へ伝わる地下流水音の強弱は、水みちの流量と深さの相互関係によって定まる。

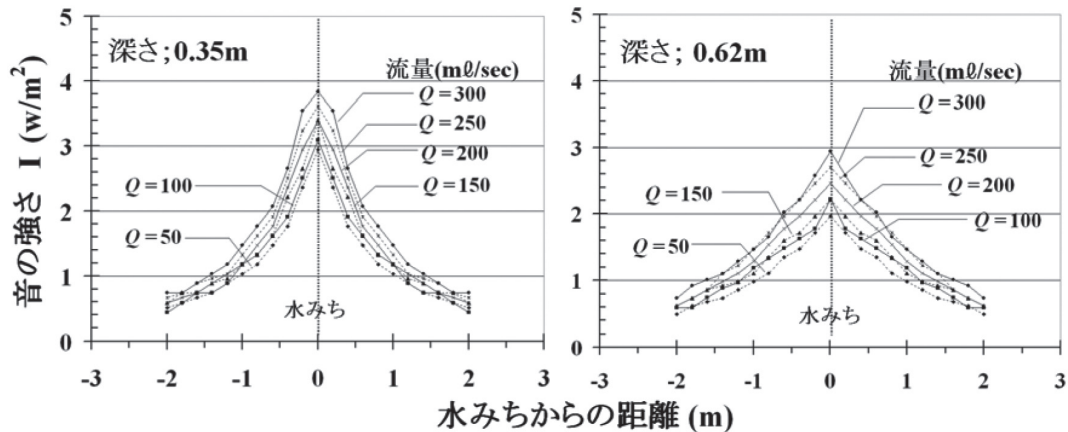


図4 深度毎の地下流水音の測定結果

2.4 本手法の現地への適用

地質や地盤の密度の異なる自然斜面において、模型実験と同様の結果が得られるかを調べるため、林道の切り取りのり面などの湧水の見られる場所で地下流水音探査を行った。調査は地質の蒜山（ひるぜん）高原・鳥取県三朝町、兵庫県六甲山、岐阜県上宝村ヒル谷で行った。地下流水音の測定結果と湧水点の位置を図5に示した。

何れの調査地においても○印で示した湧水点直上で地下流水音が最も強く、湧水点から離れるほど地下流水音は弱くなった。また、この傾向は、湧水点が複数存在する場合も同様であった（蒜山 B、ヒル谷）。各調査地で流量が異なるので一概に比較することは難しいが、湧水点が比較的深い蒜山 A、B、ヒル谷に比較し、湧水点が地表面から浅い位置に存在する六甲や三朝では地下流水音の波形分布の傾きが急である。これらの結果は、模型実験で確認された結果と合致している。

地下を流れる水流の発する音から水みちの位置を特定する手法について種々の検討をした結果、次のことが明らかになった。

- ①地下流水音によって水みちの位置を特定できる。
- ②水みちを横切る方向に測線を決め、任意の間隔で地下流水音を測定する。このとき、水みちは地下流水音圧のピーク直下に存在する。
- ③肉眼で湧水を確認できない時でも実施可能である。
- ④地下流水音探知装置は小型・軽量であり、山地で十分利用できる。

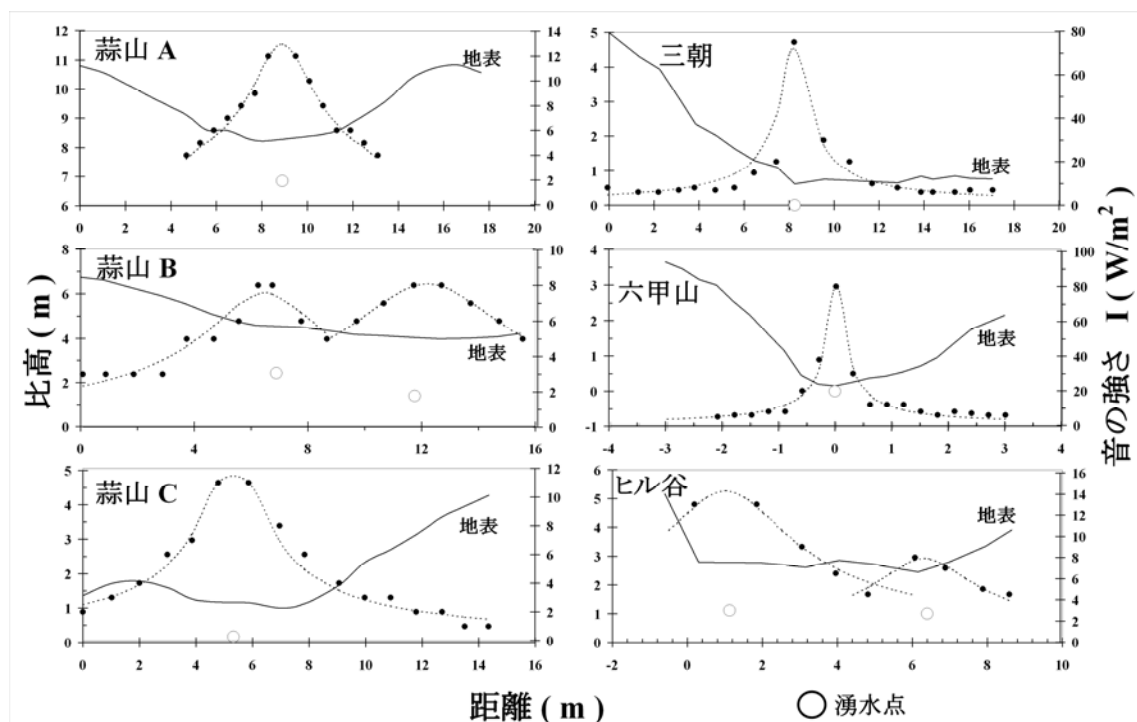


図5 湧水の位置と地下流水音の分布

3. 山崩れの場所と地下流水音の強さ

山崩れが既に起きた場所で地下流水音の強さを調べた事例を図6で紹介する。図中の A、B、C は上の写真の山崩れの位置に対応している。写真中に示した青色の点線の箇所で音の強さを測定すると、山崩れの起きた場所では、周囲に比べて地下水の流水音が強くなっていた。このような結果は、谷型・尾根型などの斜面形状や地質の種類に関係なく多くの斜面で確認された。山の中で地下水の発生する場所を知ることが、山崩れの場所を予測するために重要であることが明らかになった。

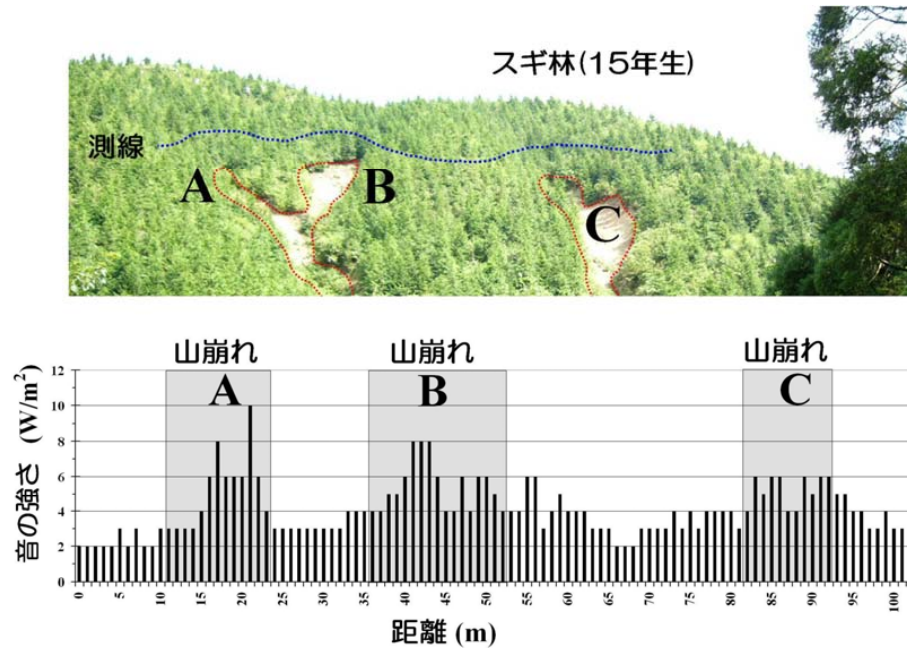


図 6 崩壊地での地下流水音の測定例

※花崗岩を地質にもつ既に山崩れの起きた斜面で地下流水音探査を実施した。山崩れの場所では地下流水音が強く、地下水の集中する場所で山崩れが発生することを明らかにした。

4. 山崩れの場所を予測する

夏期の降雨の少ない時期である 8 月に、写真 2 左に示した林道のり面で、今後崩れる危険性の高い場所の予測を試みた。

写真 2 左に示した林道のり面の点線の位置で地下流水音を測定した。その結果、のり面には図 7 に示したように地下水が集中し、崩れる危険性が高いと考えられる地下流水音の強い場所（図 7 中の矢印の範囲）が発見された。その後、台風などによって強い降雨がある度に、こののり面の地形変化を調査した。

9 月末に台風によって連続雨量約 200mm の降雨があり、こののり面では写真 2 右に示すように崩壊が発生した。台風で発生した崩壊の範囲を図 7 に照合すると、崩壊は地下流水音の強い図 4 中の破線の範囲で発生していることが明らかになった。

これらのことから、本手法が山崩れの危険性の高い場所を探すのに有効であることを確認できた。

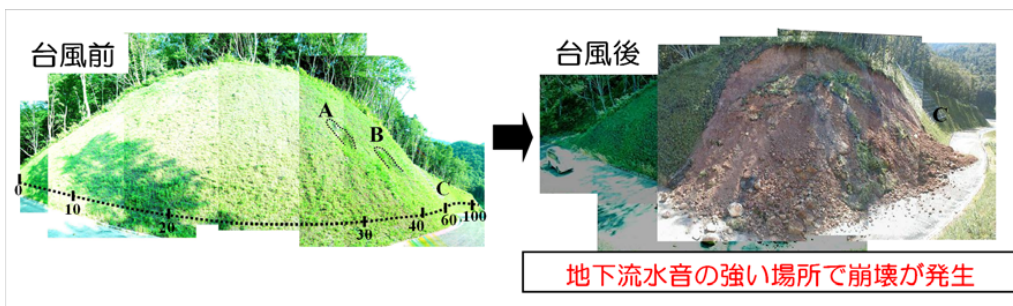


写真 2 台風前後の林道の様子

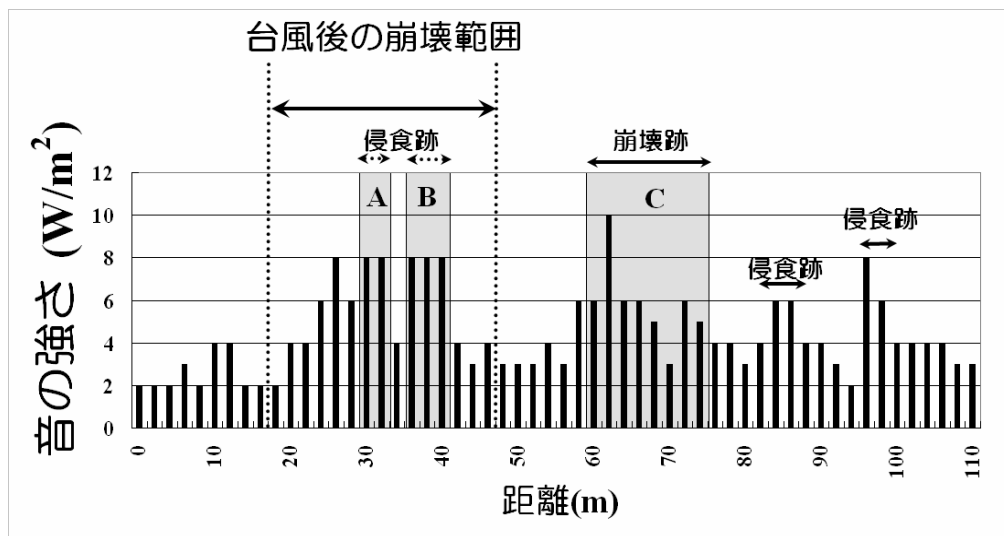


図7 台風前後の地下流水音の分布

5. まとめ

本研究では、地下流水音が強い場所の直下に水みちが存在する特徴を利用し、山地において簡便に水みち位置を特定する「地下流水音探査法」を開発した。この手法を崩壊地に適用した結果、崩壊は水みちの経路上で発生している事実が明らかとなった。そこで、地下流水音探査を用いて水みちの位置を特定し崩壊発生場所を予測した結果、豪雨で実際に崩壊が発生し、本手法が崩壊発生場所を予測するのに有効であることが確認された。

今後は、1人でも多くの人を山崩れ災害から守るために、誰でも簡単に地下水の流れる場所を特定できるように測定器に改良を加え、この手法を広く普及させる予定である。

本研究は、京都大学防災研究所 COE プログラム、および、文部科学省科学研究費補助金（17688007）「地下流水音による斜面崩壊発生場所の予測手法の開発」の成果である。また、（株）拓和と共同で特許（出願番号 2005-144369 地中音測定装置およびこの装置を用いた水みちの探査方法）を申請している。

引用・参考文献

- 1) 多田泰之、藤田正治、堤大三、小山敢、河合隆行 (2005)：地下流水音による地中水みち経路の推定、水工学論文集、50、283-288.
- 2) 多田泰之、藤田正治、堤大三、小山敢、河合隆行、奥村武信 (2007)：地中水みちと崩壊発生位置の関連性、砂防学会誌、60 (4)、25-33.
- 3) 多田泰之 (2008)：山の崩れる場所を探す (〈シリーズ〉森をはかる その 37) 森林科学、53、57.

地震による大規模崩壊・地すべりの発生メカニズム

浅野 志穂（九州支所 山地防災研究グループ長）

1. はじめに

日本列島は世界的にも有数の地震多発国の 1 つであり、大きな揺れを伴う地震がたびたび発生する。特に山地や丘陵地で大きな地震が発生すると、多数の斜面崩壊や地すべりが発生する（写真－1）。山地や丘陵地まで生活圏が広がっている地域において、これらの崩壊や地すべりは直下の建造物や道路・鉄道などのライフラインを破壊し、地域に甚大な被害を与える。また崩落する土砂量が特に多い大規模な崩壊や地すべりでは、斜面直下



写真－1 地震後に山地で見られた多数の崩壊
（岩手・宮城内陸地震（撮影：岡本隆））

の被害に留まらず、大量の土砂が土石流となって下流域に被害を与えたり、河川内に土砂によるダムを作る。土砂ダムは一般的に不安定で、ダムの決壊によって上流域の湛水（たんすい）が一気に流出し、洪水や土石流などを引き起こすこともある。このように山地や丘陵地で発生する地震による崩壊や地すべりの災害は大きな問題であり、その防止や減災に向けた対策が緊急の課題となっている。ここでは近年、地震により発生した大規模な崩壊・地すべりの特徴や発生メカニズム、被害の軽減に繋がる危険箇所の予測などに関する研究の現状について紹介する。

2. 地震に伴い発生した大規模崩壊や地すべりの例

大規模崩壊や地すべりなどが多数発生した最近の地震災害の例としては、2008 年岩手・宮城内陸地震、2004 年新潟県中越地震（写真－2）などが記憶に新しい。また過去にも 1998 年北海道南西沖地震（写真－3）、1984 年長野県西部地震などでも大規模な崩壊が発生しており、その他、能登半島地震、新潟県中越沖地震、福岡県西方沖地震、三陸南地震、兵庫県南部地震、鹿児島県西部地震など、近年各地で発生した大きな地震の際には山地で斜面崩壊や地すべりが発生している。また米国セントヘレンズ山や眉山（まゆやま）、磐梯山などでは山の形状が変わるぐらいの大規模な崩壊が発生したが、それには地震の影響があったものと考えられている。海外でも、2008 年中国汶（ブン）川地震や 2005 年パキスタン地震、1999 年台湾集集地震などで巨大な崩壊・地すべりが発生した。このように大きな地震が発生した場合には国内、国外問わず崩壊・地すべりなどの斜面災害が数多く発生する。



写真-2 新潟県中越地震時の大規模地すべり (撮影：落合博貴)



写真-3 北海道南西沖地震時の大規模崩壊 (撮影：落合博貴)

3. 地震による崩壊・地すべりの発生メカニズム

3.1 地震発生時の斜面の不安定化

崩壊・地すべりが発生するメカニズムは一般的には次のようになる。斜面の土塊は、重力によりすべり落ちる作用とこれに対する土粒子間の摩擦などの抵抗力が常に働くが、力が釣り合っていると斜面は安定している（図-1）。地震時には、地震が地下から地表の斜面に伝わり、斜面で地震による振動（地震動）が生じる。地震時に室内にある家具が見かけ上いろいろな方向に引っ張られて倒れるのと同じように、地震動によって土塊はさまざまな方向に繰り返し力が働く。大きな力が斜面下側向きに作用したときには、土塊に働く滑り落ちようとする作用が増大し、土塊の力の釣り合いが崩れて、崩壊や地すべりが発生する。力は質量と加速度（速度の変化率）に比例するので、地震による力は地震動による揺れの加速度（地震加速度）を用いて表すことができる。地震加速度は刻々と変化するため、釣り合いの計算は最も危険となる最大の地震加速度の値を用いたり、地震中を通じて平均的な地震加速度の値を用いて行うことが多い。

図-2 は図-1 の斜面の土塊の安定性と地震加速度の関係を示した。グラフ縦軸は安定性を示し、1 以上が安定、1 より小さい

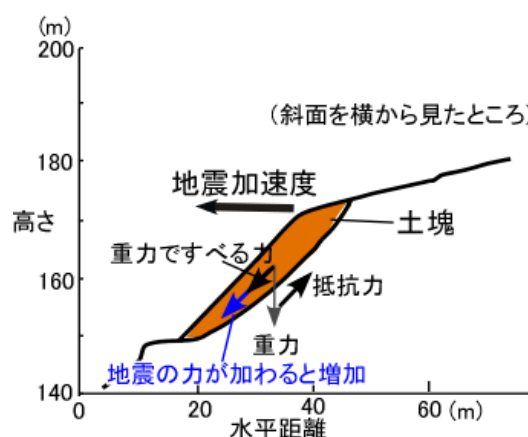


図-1 斜面に働く作用

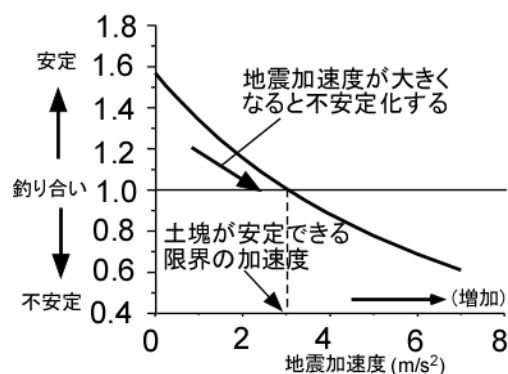


図-2 地震時の斜面の不安定化

と不安定を示し、横軸は地震加速度の大きさを示す。地震が無い場合（横軸が 0）では土塊は安定しているが、地震加速度が加わると土塊のすべる力が増加し安定度は低下する。ある限界の地震加速度以上になると斜面は不安定化する。

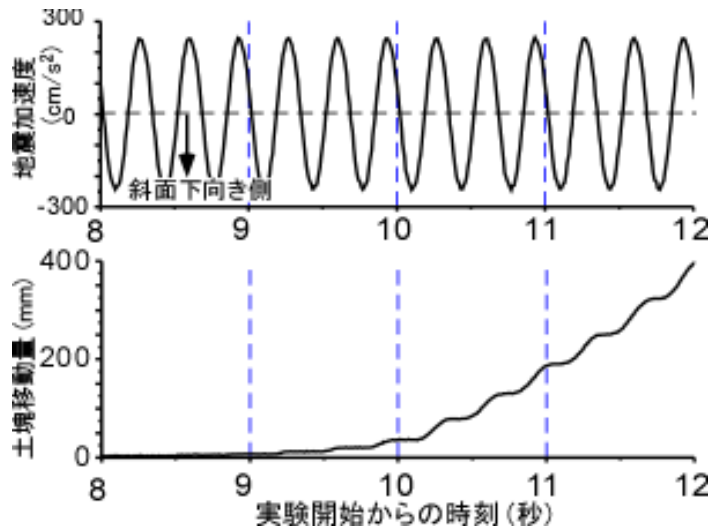
3.2 地震動と土砂の移動

前節ではある瞬間の地震加速度による斜面の安定性について示した。実際には、地震加速度は時間と共に変化するので、ある瞬間だけ斜面が不安定でもその後安定であれば、必ずしも大きな土砂移動が起きるとは限らない。このため崩壊・地すべりの発生の危険性を、より現実の現象に合わせて、土砂の移動量で調べる方法がある。これは斜面が安定できる限界の地震加速度（図－2 で釣り合う限界の地震加速度）を超えた分の加速度が土塊の移動を引き起こすと考えて、土塊の移動量を推定する方法である。この方法によれば、大きな加速度が長時間繰り返し作用するほど移動量が大きくなる。また、大きな加速度が一瞬だけであれば大きな移動が生じないことになる。

実際に地震中の斜面でどのような土砂移動が発生し崩壊に至るかについて調べるため行った崩壊実験の結果¹⁾ について紹介する（写真－4）。実験では人工的に地震を起こすことができる台の上に模型斜面を載せ、地震動（図－3 上のグラフ）を与えて崩壊を発生させるとともに、土砂の移動量を計った。その結果、地震動を与えた場合、斜面下側向きに地震加速度が生じた時に土砂は移動を始め、上向きの加速度の時には移動が停止した。また、移動と停止を繰り返して土砂は崩落を始め、ついには崩壊に至ることが示された（図－3 下のグラフ）。この土砂移動の特徴は、前述した限界を超える加速度による移動量の推定方法で表すことができる。また、崩壊は斜面の上の方から発生し、同時に地震加速度も斜面の上の部分で大きくなる等の特徴が認められた。このことは、斜面の上の部分で特に大きな地震加速度が発生し、崩壊が発生しやすい傾向があることを示していると考えられる。



写真－4 実験による斜面崩壊



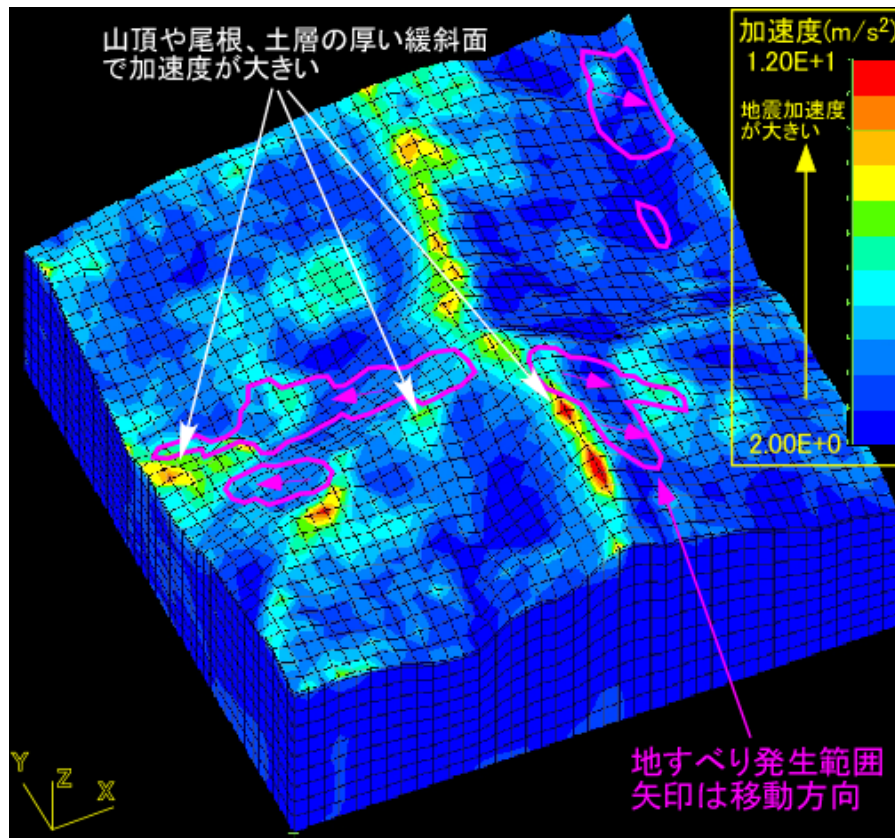
図－３ 地震動と土砂移動の関係

3.3 山地における地震動の分布

前節の地震時の斜面の安定性や移動量の検討から、崩壊・地すべりの危険性を考える上で、地震加速度の大きさを推定することが重要であると言える。広域を対象にした地震時の崩壊・地すべりに関しては、地震が発生する活断層の規模や震源地域との位置関係から地震動の大きさや崩壊・地すべりの発生分布を推定することがある。しかし詳細に検討すると1つの山体の中でも特に揺れが大きくなり易い場所があり、崩壊の発生に関係がありそうである。このため山地のどこで揺れが大きいかを考えることは、崩壊・地すべりを考える上で重要である。

山地の地震加速度の分布を調べるため、数値シミュレーション手法により行った数値実験の結果²⁾について示す。数値実験は新潟県中越地震の時に大規模な崩壊が発生した山地を対象に三次元モデルを作成して行った。実験はモデルの底面部分に、中越地震時に地下深部で観測した地震加速度を入力して、地震加速度が地表まで伝わる様子を数値計算により求める方法で行った。

図－４は実験で求められた各場所の斜面下側水平方向に発生する地震加速度の最大値の分布を示す。また崩壊発生範囲も合わせて示した。地震加速度の最大値の分布は均等ではなく、山地の尾根や山頂などで大きく、また山麓の緩斜面でもやや大きい。予備実験などから表層の軟らかい土層が厚いと地震加速度が大きくなりやすいことが分かっており、それを踏まえると地震時には、山地地域では尾根付近や、表層土が厚い緩斜面などで大きな地震加速度が発生しやすいと言える。これらのことから、山地地域では尾根や山頂など斜面の上部付近や軟らかい土層が厚く堆積している山麓の緩斜面などで大きな地震加速度に伴う力が発生し、崩壊・地すべりの危険性が高まり易いと言える。一方で大きな地震加速度が生じて、亀裂の発生などに留まって崩壊に至らない場所もあり、崩壊の危険性を考えるには地震動の力だけでなく、各場所の斜面が有する崩壊に対する抵抗力についても合わせて検討することが必要である。



図－４ 斜面下側向きの最大地震加速度の分布

3.4 岩手・宮城内陸地震による崩壊・地すべりの特徴

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震では、多数の崩壊や地すべりを伴う大きな被害が発生した。現在も調査研究が進められているが、予察的に当地震による斜面災害の特徴について述べる。岩手・宮城内陸地震における斜面災害は、発生件数が大変多いが、大きく分けて大規模な地すべり、地下深い部分から滑った崩壊性地すべり、表層の崩壊、土石流などに分けられる。これらは、山地斜面の上部や河川沿いの急斜面部の上部が崩壊の頭部になっていることが多い（写真－5）。これは斜面の上部で地震動が大きく作用して発生した崩壊が多いことを示すと考えられる。また当地域は古い火山性の地層が広く分布する特徴がある。過去の地震による斜面災害では、火山性の地層は地震に対する強度があまり高くないことが多いため、大きな崩壊に繋がったとされる調査例もある。このような火山性の地質が広く分布したことが崩壊・地すべりの発生件数の多さの要因の1つとなったとも考えられる。また、近年まれに見るような大規模な地すべり（写真－6）も発生した。当該地区には過去に地すべりが活動したことを示す痕跡がみられることから、地すべりで乱された土層が弱部となって、今回の大規模な地すべりの発生につながった可能性も考えられる。同様に過去の地すべり地が地震により大規模に滑った例は、新潟県中越地震でも指摘されていた。今回の災害は、地すべり履歴を持つ斜面の危険度についても、さらに研究を進める必要があることを示している。



写真-5 一迫川沿いの斜面上部で発生した崩壊
(撮影：岡本隆)



写真-6 栗駒山南方の大規模地すべり
(撮影：岡本隆)

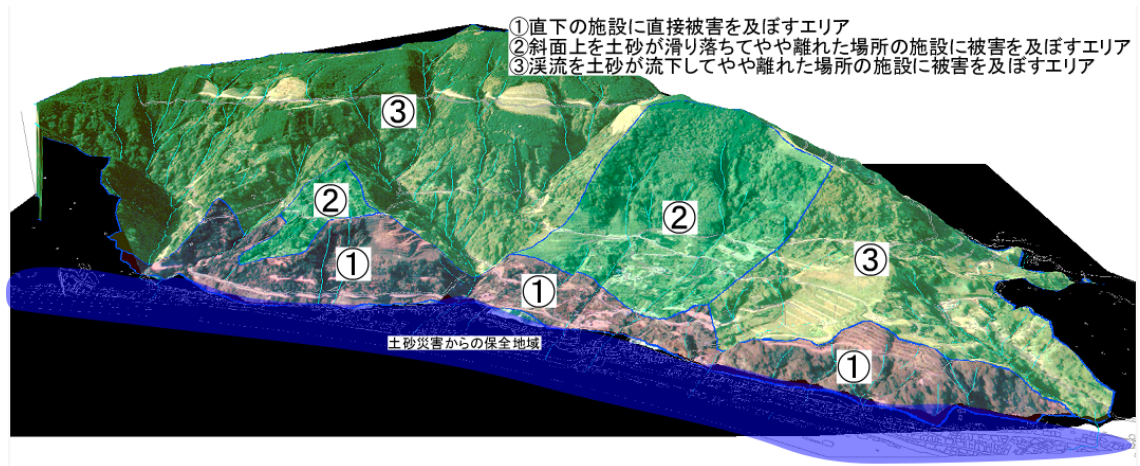
4. 地震による斜面災害の被害の軽減に向けて

地震時の崩壊・地すべりなどの災害の軽減については、今後どの様に考えたらよいであろうか。若干の考察を行った。

地震による崩壊・地すべり等の斜面災害には、地震中に起きるものと地震後に起きるものとがある。地震後に起きる斜面災害については、直接の引き金となるのは降雨などが多いため、基本的には降雨による斜面災害対策と同様になると思われる。しかし、地震により山地の土層は乱されて崩壊に対する抵抗力が低下していることも懸念される。例えば、兵庫県南部地震では地震後に降雨による山地の崩壊件数が増加したとの指摘がある。このため、地震後の降雨による斜面災害にはより十分な検討が必要になる。

一方、地震中あるいは地震直後に起きるものについては、地震による斜面災害が瞬時に発生するため、避難する十分な時間はほとんど期待できない。このため、地震によってどのような形態の崩壊や地すべりが起こりうるのか、どのような場所が特に危険なのか等の精度の高い予測がより重要となる。

次に地震時の斜面災害の発生予測に基づいて行われた災害防止の事例を示す。この例は地すべり多発地域において東海地震による斜面災害を想定して行われた。当地域では地震による斜面災害のタイプとして、表層土の崩落、地すべり地の下方部分の二次的崩壊、崩落土砂による溪流沿いの土石流、山地上部の大規模な崩壊などを想定し、斜面毎に検討した。各斜面で想定される発生様式や崩壊土砂量、保全対象までの移動経路等の情報に基づき、斜面災害の発生場所を、①直下の施設に直接被害を及ぼすエリア、②斜面上を土砂が滑り落ちてやや離れた場所の施設に被害を及ぼすエリア、③溪流を土砂が流下してやや離れた場所の施設に被害を及ぼすエリア、に区分して各々適した対策工が施工された(図-5)。対策工は、②や③では崩落した土砂を一度受け止めて、その後安全に下流へ通過させる手法を中心とし、①では空間的余裕がないため、斜面上で崩壊の発生を抑止する手法を中心として選ばれた。同時に対策工の施設は耐震性を考慮して設計された。地震を対象とした数少ない斜面災害防止事例として、その考え方に参考になる点も多いと思われる。



図－ 5 斜面災害の発生場所と発生様式

5. おわりに

地震によって崩壊や地すべりなどの大規模な斜面災害が各地で発生しており、調査研究が現在も精力的に進められている。これらの研究により、地震時の斜面災害の実態や特徴の一部が徐々に明らかにされてきている。しかし、降雨による災害などに比べて、地震による斜面災害の研究事例はまだ少ないため課題も多い。例えば、地震動の周波数や継続時間など加速度以外の振動の特性の影響、山地斜面に存在する地下水の影響、斜面が持つ地震動に対する抵抗力の特性やその空間分布を調べる方法などまだ多くの課題が残されている。このため今後も新たな災害防止技術の開発に向けて更に研究を進めることが必要である。

引用・参考文献

- 1) 浅野志穂、松浦純生、岡本隆、松山康治（2003）：振動台実験による斜面の地中変位量の計測、日本地すべり学会誌、40（2）、30-33.
- 2) 浅野志穂、落合博貴、黒川潮、岡田康彦（2006）：山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響、日本地すべり学会誌、42（6）、1-10.

長距離にわたって流れる土石流災害の予測に向けて

岡田 康彦（水土保持研究領域 治山研究室 研究員）

1. はじめに

我が国は急峻な地形が多く、また狭い国土に多くの人口を抱えることから、豪雨や地震などを誘因として山地災害が発生すると、甚大な人的・経済的被害へと直結する。山地災害をもたらす現象として、地すべり、崩壊、土石流が一般的に挙げられるが、これらのうち土石流は、土石が水と渾然一体となって長距離にわたり流れる現象をさし、高速で流下するため非常に危険な災害となる。

本年度においても、岩手・宮城内陸地震により数多くの山地災害が発生したり、2008（平成 20）年 8 月末豪雨では時間雨量 146.5mm（愛知県岡崎市）が観測されるなど、土石流を含む山地災害の発生危険性は増加していると推定され、山地災害の予測研究は喫緊の課題と言える。ここでは、土石流に関して森林総合研究所が行ってきた研究を紹介する。

2. 土石流とは

我が国では、山地災害を引き起こす現象として、一般に、地すべり（以前、すべったことのあるような斜面が再び比較的低速度で持続的にすべる現象）、崩壊（斜面の新規の崩れ）、土石流の用語が使用されている。これらのうち土石流は、土石と水が渾然一体となって長距離を高速で流下する現象である。この土石流という用語は、今でこそ、テレビやその他のマスメディアで多く使用され、大雨警報の際には「土石流などの土砂災害には充分注意してください」という言葉が普通に用いられている。しかしながら、土石流の実態が明らかにされたのは近年のことであり、1960 年代前半までは、各地で、山津波、山しお、蛇抜け、谷抜けといった名称で語り継がれてはいたものの、「幻の災害」と呼ばれていた。

1960 年代後半からの研究により、土石流は、1）溪床の不安定な堆積物が渓流水によって移動する、2）地すべり等によってできた湛水池が決壊する、3）崩壊した土塊が直接流動化することを主たる原因として発生することがわかってきた。また、①先端部は段波状を呈し盛り上がっている、②巨大な石であればあるほど先頭部に集まる、③巨大な石が多く質量が集中しているのは先頭部のみであり、後続部は泥状の流れであるといった特徴が明らかにされてきた。

さて、ここで日本国内から世界に目を転じると、地すべり、崩壊、土石流はいずれも Landslide となる。Landslide は、落下、トッピング（前倒）、すべり、側方伸張、流動の 5 つの運動形態に細分されるが、我が国では一般に分類して使用される地すべり、崩壊、そして土石流のいずれもが、すべて一つの用語（Landslide）で表現されるのは興味深いことである。Landslide の定義は、「岩、土石または土の集団の斜面下降運動」とされ、要は斜面を構成している、土（粘土、砂、礫）が下方に運動すればそれは Landslide になるということである。

3. 近年国内で発生した土石流災害

前述の通り、我が国は急峻な地形が多いことから、豪雨が襲う毎に、各地で土石流災害が発生している。近年では、1995（平成 7）年兵庫県仁川地すべり・土石流（死者 34 名）、1997 年鹿児島県針原川土石流（死者 21 名）、1999 年広島県亀山土石流（死者 4 名）、2003 年熊本県水俣土石流（死者 15 名）、2005 年宮崎県鰐塚山土石流（写真 1）などが発生している。また、本年の岩手・宮城内陸地震では宮城県栗原市の東栗駒山から土石流が発生した（写真 2）。この土石流により駒の湯温泉が被害を受け、死者行方不明者 7 名がでる惨事になったことは記憶に新しいところである。我が国最大級の土石流は 1984 年の長野県西部地震により発生しており、伝上川を流れ下った土石流は土量が 3,600 万 m^3 にも上ると推定されている。



写真 1 鰐塚山土石流



写真 2 東栗駒山で発生した土石流

これらの土石流災害は、2 節「土石流とは」で説明した発生原因のうち、3) の崩壊した土塊が直接流動化したために生じたと考えられている。豪雨により飽和に近づいた山腹斜面が崩壊し、崩壊した土塊が流下を続ける間に水と渾然一体となって土石流に変化したものである。針原川土石流の場合は、流路途中に設置されていた砂防ダムに衝突するまでは土塊の形状をある程度保ったまますべってきたものの、砂防ダムに衝突することにより土塊が乱されて土石流化したと考えられている。亀山土石流は、崩壊が発生した源頭部はそれほど大きくなく、深さも 1 ～ 2m 程度であったが、崩壊土砂が溪流を流下する際に溪床の堆積物を巻き込んで土石流化し、その土量を拡大させながら運動したため被害の拡大につながったと考えられている。このように、一言で土石流と言っても種々のケースが存在する。

一方、自然斜面に人工降雨を与えて崩壊が土石流化する現象を再現する研究も行われている。森林総合研究所では、京都大学防災研究所ほかとの共同研究により、2003 年 11 月に茨城県真壁郡大和村の加波山山腹の斜面を対象に土石流再現実験を実施した。時間雨量約 80mm の人工降雨を 7 時間弱連続して斜面（最大傾斜 35 度）に与えたところ、長さ 15m、幅 5m、深さ最大 1.3m の崩壊が発生した。その後、土砂が運動過程で流動化し勾配が 10 度以下の緩斜面を約 30m にわたって流下することが確認され、自然斜面における豪雨による崩壊－土石流の発生が実証された¹⁾。

4. 大型の模型水路を用いた土石流実験

4.1 模型および実験条件の概要

ここまで見てきたように土石流には種々のものがあるが、著者らは、土砂内部の間隙水圧の上昇が土石流の長距離運動を引き起こす最も重要な要素であるという視点から、森林総合研究所内に設置した大型の模型水路を用いて土砂の流下実験を実施してきた。大型の水路は、幅が 0.6m、全長が 13m（水平部 8m、傾斜部 5m）で、体積が 0.6m³ までの水で飽和した土砂を流下させることが可能な仕様を有する（写真 3）。

斜面の崩壊が土石流化する現象の現場検証から、地形条件のうち 1) 流動する土砂の厚さ、2) 溪流への流入角、3) 斜面の勾配、4) 流路の幅の変化が重要であることがわかっている。そこで、これらの因子の調査を室内実験規模で可能とするため、大型の水路模型は、傾斜部の勾配を 10 度から 45 度まで変更可能、水平部の幅は、0.6m だけでなく 0.3m および 1.2 m に変更可能、水平部への流入角度は、0 度以外に、20 度、60 度に変更可能な仕様にした（図－1）。

この土石流実験では、図－1 に示した通り、水路底面に設置した圧力センサーにより流下する土砂の間隙水圧を計測すると共に、レーザーセンサーを用いて圧力センサーに垂直方向の流下土砂の厚さを実測する。

実験に用いてきた土砂試料は、茨城県つくば市を流れる桜川から採取した川砂の他に、鹿児島県桜島火山から採取した軽石、火山灰である。川砂は土粒子の大きさが約 1mm 程度、軽石は 30mm 程度、火山灰は 0.01mm よりも細かいものを多く含む材

料である。観音開き方式でゲートを一気に開放することにより、水密ゲートで仕切られた飽和土砂試料を流下させる。

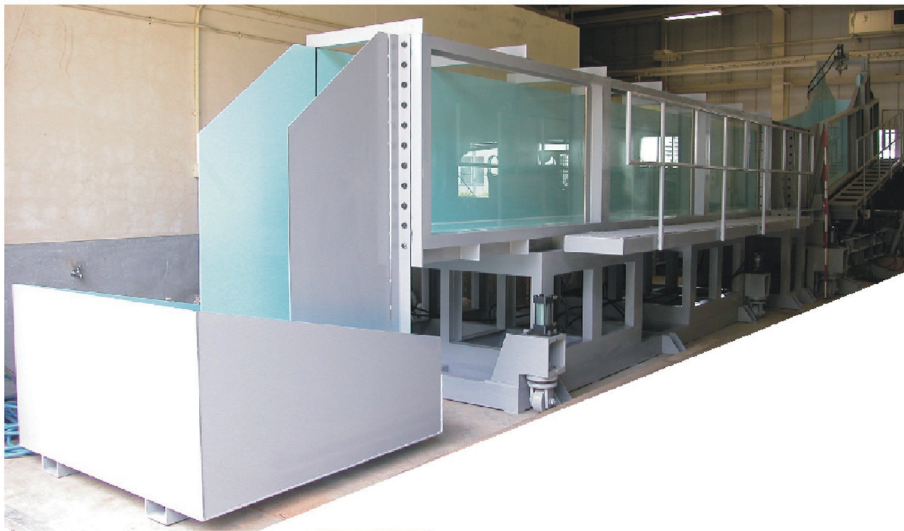


写真3 大型の模型水路の全景

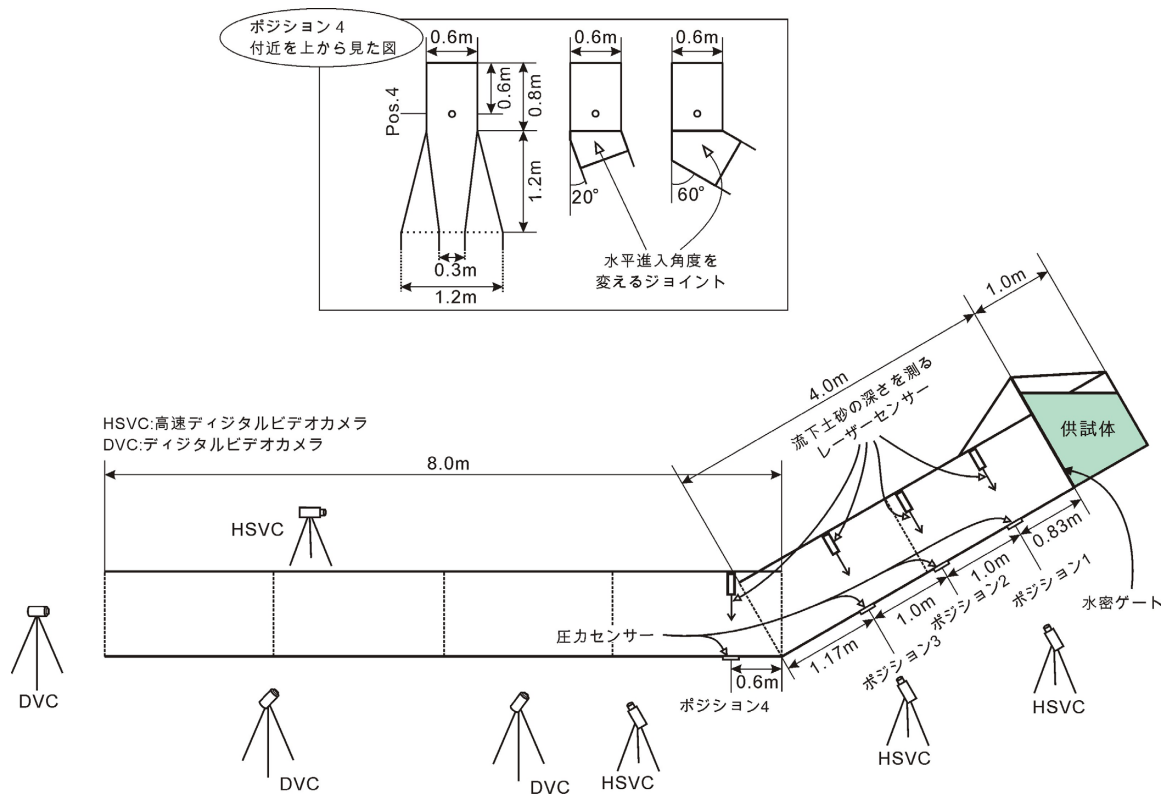


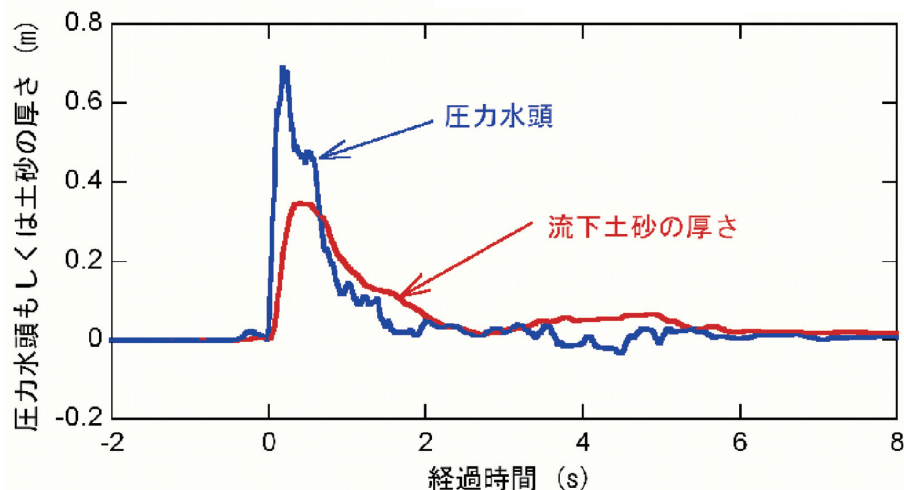
図-1 大型の模型水路の模式図と計測センサーの配置

4.2 実験結果

これまで、種々の条件下で実験を実施してきたが、ここでは、粗い粒子の軽石のみからなる土砂試料、ならびに軽石に細かい土を含む火山灰を混合（体積にして 10%）した土砂試料を対象に、水路の水平部幅を 0.3m に変更した条件下で実施した実験の結果²⁾を示す。

これら二種類の土砂試料は基本的には粗い軽石が主体であり、一方は、軽石材料の隙間に細粒の火山灰が混合されている試料と言えるが、各々流下させたところ、流下中に発生する間隙水圧が両者で大きく異なり、最終的な流下距離もかなり違うことがわかった。以下に、これらの実験で得られた成果を示す。

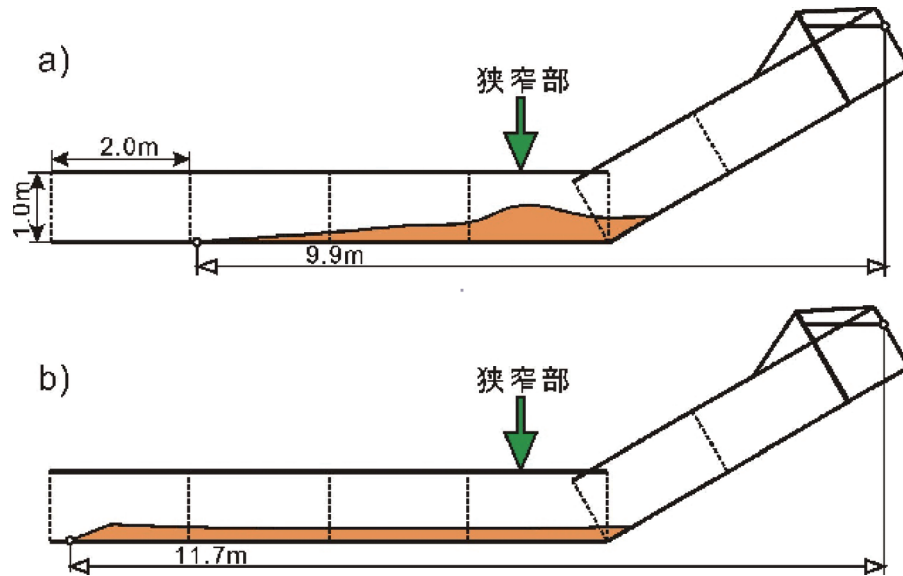
- 軽石と火山灰の混合試料では、流下する土砂の先端部付近で圧力水頭が土砂の厚さを大きく上回った（図－2）。つまり、粗い粒子の軽石と細かい火山灰の混合試料では、一時的に過剰な水圧の上昇が認められた。反面、軽石のみの試料では、圧力水頭は流下土砂の厚さを下回り、水圧の上昇は認められなかった。



図－2 軽石と火山灰の混合試料を流下させたとき、ポジション1（図－1参照）で計測された圧力水頭と流下土砂の厚さの関係

経過時間が約 1 秒までは、圧力水頭の値が流下土砂の厚さの値を大きく上回っている。圧力水頭は、液体の圧力を水の深さに置き換えた値であり、この値が土砂の厚さの値を大きく上回るということは、土砂が液体状に変化したことを示す。なお、圧力水頭が流下土砂の厚さを上回る結果は、図－1 のポジション 2、3、4 でも同様に認められた。

- 軽石のみの試料では、水路幅が狭くなる狭窄部（0.6m から 0.3 m に変わる場所）で目詰まりを起こし、遠くまで流下しなかった。一方、軽石と火山灰の混合試料では、狭窄部もスムーズに通過して、到達距離が長くなった。また、長距離運動した土砂の割合が多くなった（図－3）。



図－3 土石流実験終了時における土砂の堆積の様子

- a) 軽石試料：土は狭窄部で目詰まりを起こし大半が停止（到達距離は 9.9m）。
 b) 軽石と火山灰の混合試料：土砂は狭窄部をスムーズに通過し水路水平部の左端付近にまで到達（到達距離にして 11.7m）。到達距離が増大すると共に、長距離運動した土砂量が増加。

- 混合試料で認められた水圧の過剰な上昇は、流下中に火山灰が土砂の間隙水に浮遊して水よりも重たい液体（泥水）になったこと、火山灰が混合されることで土砂内部で一時的に上昇した水圧が低下しにくくなったことが主たる原因であると明らかになった。

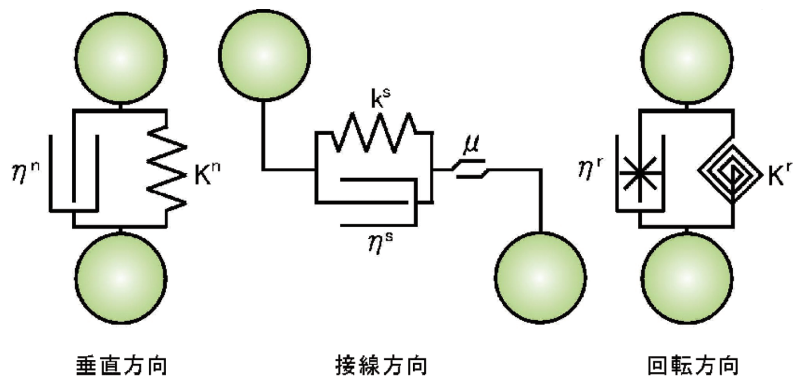
これらの結果から、軽石に火山灰のような細かい土が混合されると、流下土砂の内部で一時的に水圧が過剰に上昇し、狭窄部でもスムーズに通過が可能になる程度にまで液体に近い状態に変化することが明らかになった。

5. 土石流災害の予測にむけて

4 節で示した土石流実験の一例から、細かい土粒子が粗い土粒子の間隙に浮遊するような条件が整うと、流下土砂の到達距離が大きくなることがわかった。このような状況が現実の地すべりや崩壊現場で発生すると、その多くが土石流となって遠くまで流下して被災域の拡大に直結する可能性があることがわかった。

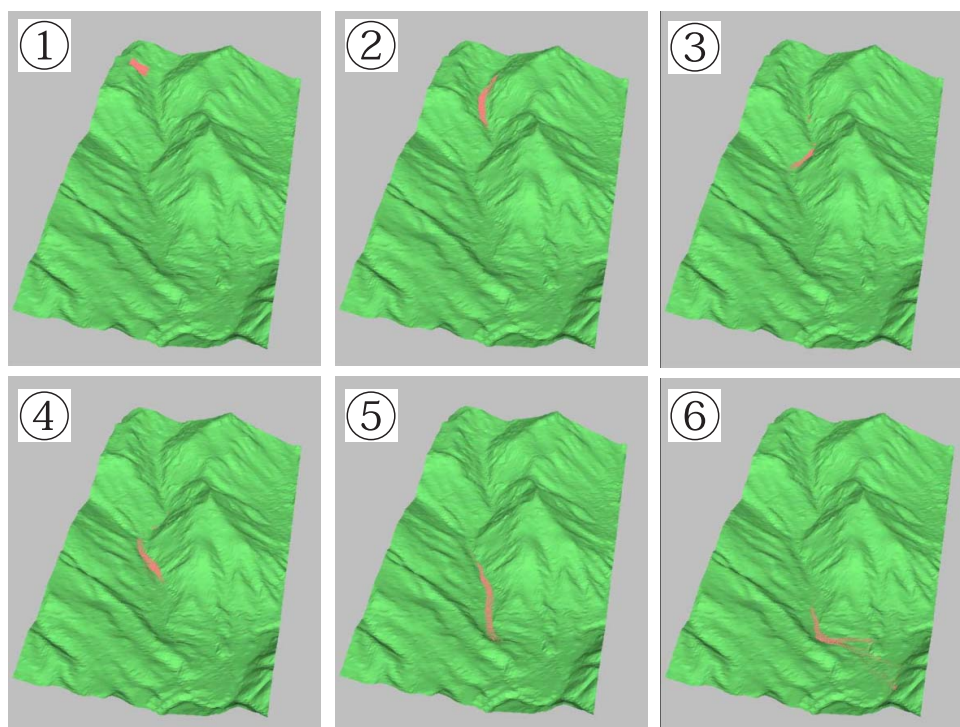
一方、実際の土石流現場では、複雑な地形条件の下、土石流が流下してきて災害につながっており、室内で実施する模型のような単純なものではない。そこで土砂の流下挙動を数値的にモデル化（再現）して、その運動の予測を行うための研究も行っている。この手法を用いれば、複雑な地形をもある程度再現した上で、その上で発生する土砂の流下挙動を調べることが可能となるため、今後さらに発展させていかなければならない重要な課題である。

物理モデルを用いた数値予測研究については、種々の手法を用いて多くの研究がなされてきたが、不連続体としての特徴が強くでる土石流を対象にした場合、個別要素法（図－４）の優位性が指摘されている。個別要素法では、膨大な計算時間の回避のために計算要素数に限界があるほか、計算要素に与える入力パラメータの調整が煩雑であるなど、なお改良点が多く確認されてはいるが、著者らはこの手法を用いて、土石流災害の予測にむけて、基礎的・応用的研究を行ってきた。



図－４ 土石流を数値的に再現する手法の一つである個別要素法における土粒子間の力の伝達系を示す模式図

一例として、土石流の流下挙動ならびに到達範囲の再現を目的に、2003 年熊本県水俣土石流災害を対象に個別要素法を用いて数値計算を行った結果を示す（図－５）。



図－５ 個別要素法による水俣土石流の再現状況

画像上段左から右に、さらに画像下段左から右に土石が流下していく様子。

土砂を模した数値要素が溪流に沿って流下している様子が認められるが、とくに、溪流の進行方向が変わる場所では、土石流は対岸を乗り上げ、必ずしも比高の一番低いところを通過するわけではないことも数値的に再現された。

ここまで紹介した研究項目以外では、大型模型水路に治山ダムを配置し（図－6）、流下してきた土砂が治山ダムに衝突する際に発生する衝突力、間隙水圧変化の計測も始めている。また、ダム背後に関して、水で飽和した堆砂を与えた場合、あるいは空気と水が混在した（不飽和）堆砂を与えた場合、さらには堆砂の土量を変えた条件下で土石流実験を行い、土砂の流下挙動がどのような影響をうけるのか、治山ダムの土砂捕捉機能はどのように見積もることができるのかについても調べている。



図－6 模型水路に配置した治山ダム

荷重計と圧力センサーがそれぞれ左右対称 4 深度に設置されている。

これらの模型実験研究および数値計算研究の成果は、例えば、流域ごとに土質に応じて治山ダムの規模を適切に決定する、さらには防災施設を効果的に配置する際に重要となる。また、経済性・安全性の両面からみて信頼できる強度設計（例えば、流下する土砂の最大衝突エネルギーを考慮した設計など）を検討する上で欠かせないものであると考えられ、今後の防災計画、山地治山計画に活かされる研究成果と言える。

引用・参考文献

- 1) Ochiai, H., Okada, Y., Furuya, G., Okura, Y., Matsui, T., Sammori, T., Terajima, T. and Sassa, K.(2004): A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall, *Landslides*, 1(3), 211-219.
- 2) Okada, Y. and Ochiai, H.(2008): Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests, *Engineering Geology*, 97, 1-14.

平成 20 年度
独立行政法人 森林総合研究所
公開講演会講演要旨集

平成 20 年 10 月 15 日 発行

編集・発行

独立行政法人 森林総合研究所

企画部 研究情報科 広報係

〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 番地

Tel 029-829-8134 Fax 029-873-0844

E-mail : kouho@ffpri.affrc.go.jp

URL : <http://www.ffpri.affrc.go.jp/>