

3. 土砂災害

3.1 概要

平成 20 年 6 月 14 日に発生した、マグニチュード 7.2、最大震度 6 強（岩手県奥州市、宮城県栗原市）の地震は、岩手・宮城県境付近を中心に大きな被害をもたらした。特に、震源が栗駒山の火山噴出物が厚く堆積している山体直下であったことから、多くの山腹崩壊等が発生した。このため、国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター（本章では、以下「国総研」）および独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ（本章では、以下「土研」）は、災害直後より現地調査をはじめ種々の危機管理的現地対応等を行ってきた。

今回の地震では、河道閉塞（天然ダム）（以下、「天然ダム」）が多数発生した。特に緊急の対応を行う必要があった天然ダムは、岩手県一関市の磐井川流域と、宮城県栗原市の迫川流域に集中的に発生した。このほか、三迫川上流域のドゾウ沢の源頭部を発生源とする大規模な土石流や二迫川に建設された荒砥沢ダムの貯水池末端付近で大規模な地すべりが生じた。

この地震によって、48 件の土砂災害（土石流 24 件、地すべり 9 件、がけ崩れ 15 件（平成 20 年 7 月 31 日まで、国土交通省河川局砂防部保全課調べ））が発生し、死者 13 名・行方不明者 10 名の人的被害が生じた¹⁾。

本章は、国総研・土研による土砂災害の調査結果、技術支援の概要を報告した文献^{2)、3)}を踏まえつつ、以下の項目について調査結果を報告するものである：

- 1) 崩壊地の分布と特徴、
- 2) 現地調査概要、
- 3) 荒砥沢ダムなどでの地すべり調査、
- 4) 三迫川ドゾウ沢の源頭部で発生した土石流調査、
- 5) 沼倉裏沢の天然ダムの調査、
- 6) 投下型水位観測ブイの開発、
- 7) 迫川における天然ダムの危険度評価、
- 8) 地震動による斜面崩壊危険度評価。

なお、本章で用いた数値等は、既往資料や速報値によるものを含む。

3.2 崩壊地の分布と特徴

今回の地震により急傾斜地崩壊および地すべりが計 3,500 箇所以上発生した⁴⁾。図-3.2.1 は岩手県一関市、宮城県栗原市および秋田県の東方の一部を含む多数の崩壊が発生した地域である。本節では、発生した崩壊地の斜面勾配、曲率を算出し今回の地震による崩壊の地形的特徴を述べる。なお、「崩壊」を急傾斜地崩壊と地すべりの総称として用いる。

解析に用いたデータは、空中写真による崩壊地判読結果⁴⁾および国土地理院数値地図 50m メッシュ（標高）である。地理情報システム上で解析する前処理として、空中写真判読に

よる崩壊地をベクタ形式からラスタ形式に変換（以下、「崩壊地メッシュ」）した。50mメッシュ内に複数の小さな崩壊地がある場合は、その崩壊地メッシュ数を1メッシュとした。崩壊地メッシュが50mメッシュ複数にまたがる場合は、当該メッシュ値の平均値をその崩壊地の地形量とした。崩壊地の標高の頻度分布をみると、最頻値は500m-600mの階級にある（図-3.2.2）。これは、栗駒山（標高1627.4）や焼石岳（標高1547.9m）など、熔岩流地形が分布する高標高地域では崩壊が少ないためと考えられる。斜面勾配の最頻値は20-25度の階級である（図-3.2.3）。2007年に発生した能登半島地震では30-35度⁵⁾、新潟県中越沖地震では40-45度に最頻値⁶⁾があることと比べると、緩勾配斜面における崩壊が多い。崩壊地の斜面型は、凸形尾根型斜面で卓越せず、等斉直線斜面（平板斜面）に多く分布し、凸形尾根型斜面と凹形谷型斜面にもほぼ等しく分布している（図-3.2.4）。図-3.2.4(b)は9種の斜面型の概念図⁷⁾であり、図-3.2.4(a)は、解析によって算出した曲率を、勾配方向曲率とその直交方向曲率を両軸とした図である。

なお、本節の解析におけるベクタ-ラスタ変換や地形量（傾斜および曲率）の算出には、GRASS GIS 6.3⁸⁾を使用している。解析結果は崩壊の規模に対してメッシュ間隔が50mと粗く、地形量も粗いデータであることに留意する必要がある。

（国総研砂防研究室）

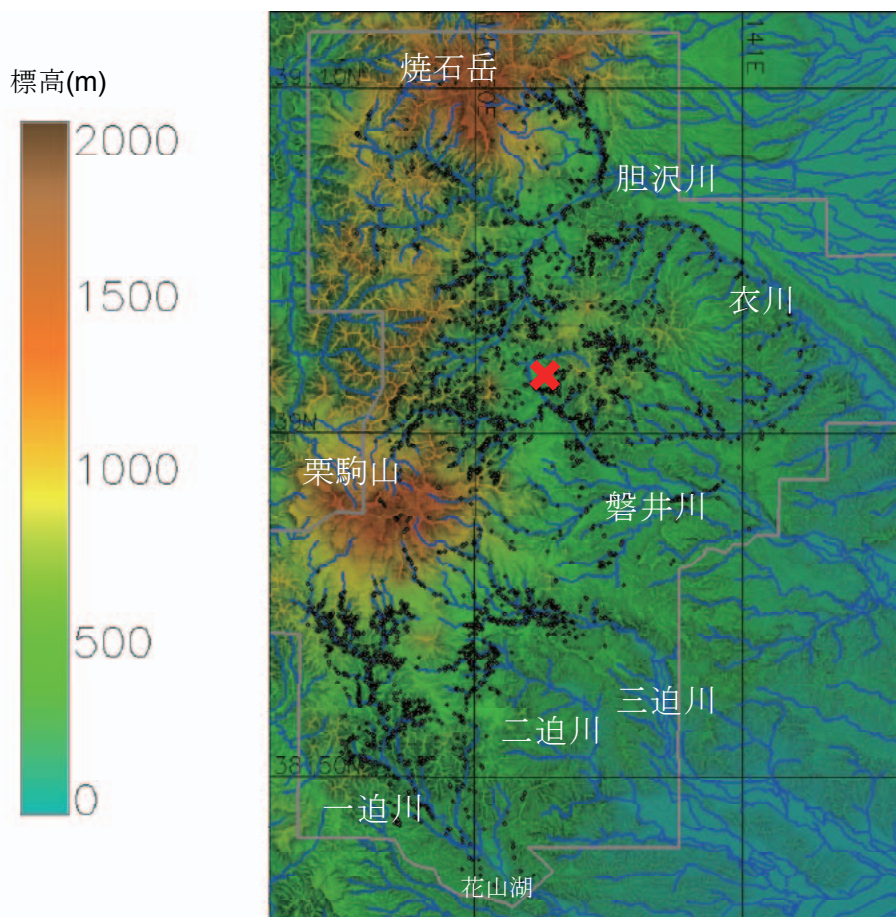


図-3.2.1 崩壊地の分布⁴⁾。●は崩壊箇所、×は震央、灰色線は空中写真判読範囲を表す。背景図には、国土地理院数値地図50mメッシュ（標高）、水域界には国土地理院数値地図25000（空間データ基盤）を使用した。

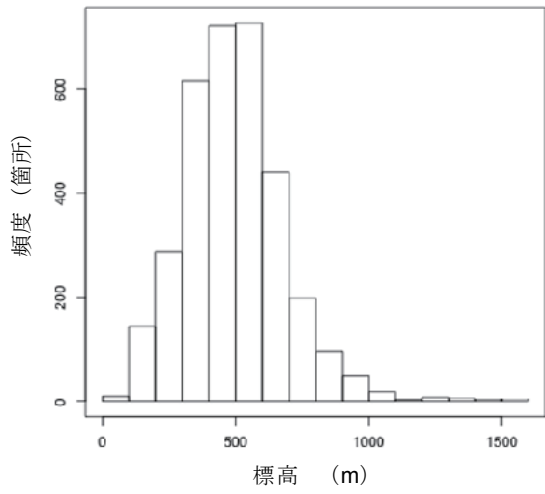


図-3.2.2 標高毎の崩壊地の頻度分布

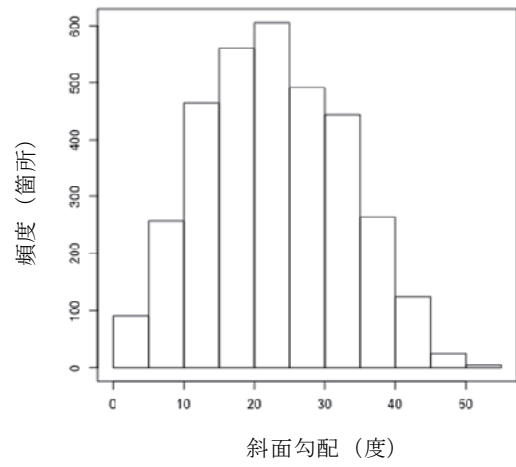
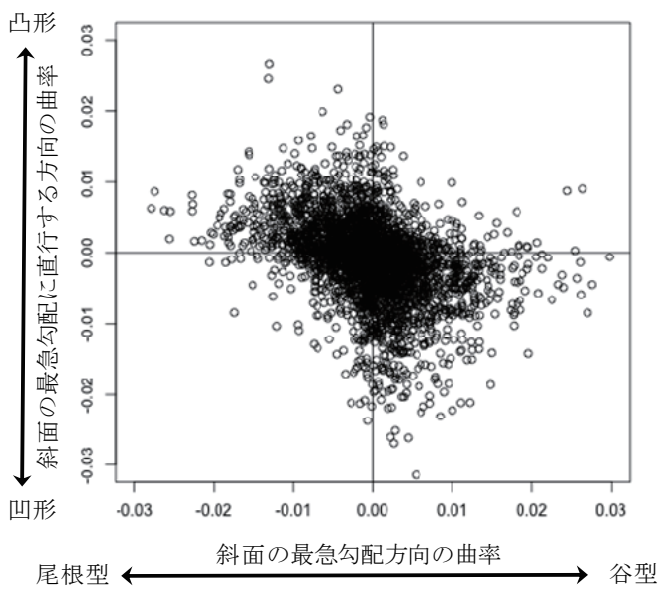


図-3.2.3 斜面勾配毎の崩壊地の頻度分布



(a) 崩壊地における曲率の分布

分類基準		最大傾斜の方向 (等高線の方向) の変化状態		
		水平断面形 (等高線の平面形) による斜面分類		
最大傾斜の大きさ (等高線距離) の変化状態	分類	尾根型斜面 (R)	凸形斜面 (C)	谷型斜面 (V)
	凸形斜面 (X)			
	凹形斜面 (V)			

(b) 斜面型の概念図⁷⁾

図-3.2.4 崩壊地における斜面型の特徴

3.3 現地調査概要

国総研と土研は、地震発生の当日より TEC-FORCE 隊員等として職員を派遣し、現地での技術支援を行った。2008 年 7 月末までのその総数は延べ 80 人日となり、その後も状況変化に対応して随時職員を派遣した。

地震発生当日に国土交通省東北地方整備局にて打ち合わせを行った後、翌日早朝より国土交通省中部地方整備局所有のヘリコプター「まんなか号」により状況把握を行った（図-3.3.1）。その後もヘリによる調査や現地踏査を実施した。地震発生直後の山腹の状況を示す写真を図-3.3.2、図-3.3.3、図-3.3.4⁹⁾に掲載する。調査結果は、国土交通省河川局砂防部、東北地方整備局、国総研、土研などの関係機関へ報告し、必要に応じて記者発表も行った。このような調査を基に、岩手県や宮城県、国土交通省東北地方整備局、警察などに対して、決壊の危険性が高い天然ダムの抽出や土砂災害対策に関する技術支援を行った。一方、国土交通省河川局砂防部は、以上のような調査結果を受け、2008 年 6 月 16 日付で天然ダム 11 箇所⁹⁾の調査を実施することを記者発表した。6 月 17 日には決壊や氾濫の恐れが特に高い、岩手県一関市磐井川の市野ノ原、宮城県栗原市迫川の浅布および小川原の計 3 箇所の天然ダムにおいて対策工事の実施が発表され、その後、6 月 19 日に天然ダム計 15 箇所が把握されたと発表した。さらにその後、湯ノ倉温泉や湯浜で対策工事が行われている。これらの情報をまとめた、国土交通省河川局砂防部砂防計画課の 6 月 19 日記者発表資料¹⁰⁾を図-3.3.5 に示す。

以下の節では、これらの調査結果の一部を詳細に報告するとともに、天然ダムが多数形成した迫川における天然ダムの危険度評価結果、および地震動による斜面崩壊危険度評価の結果を示す。

(国総研砂防研究室)

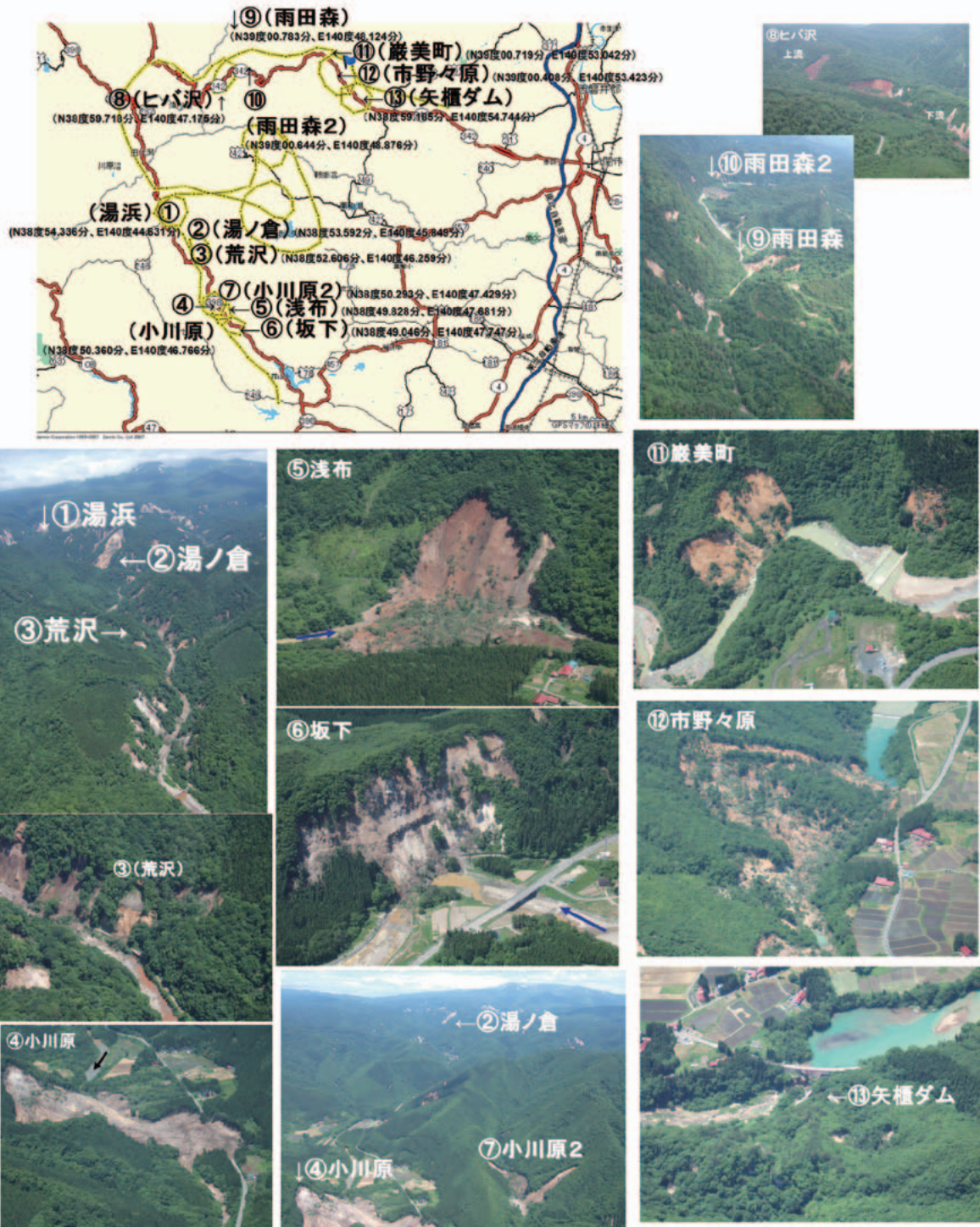


図-3.3.1 6月15日まんなか号にて行った現地調査写真。図中の座標はWGS84による。

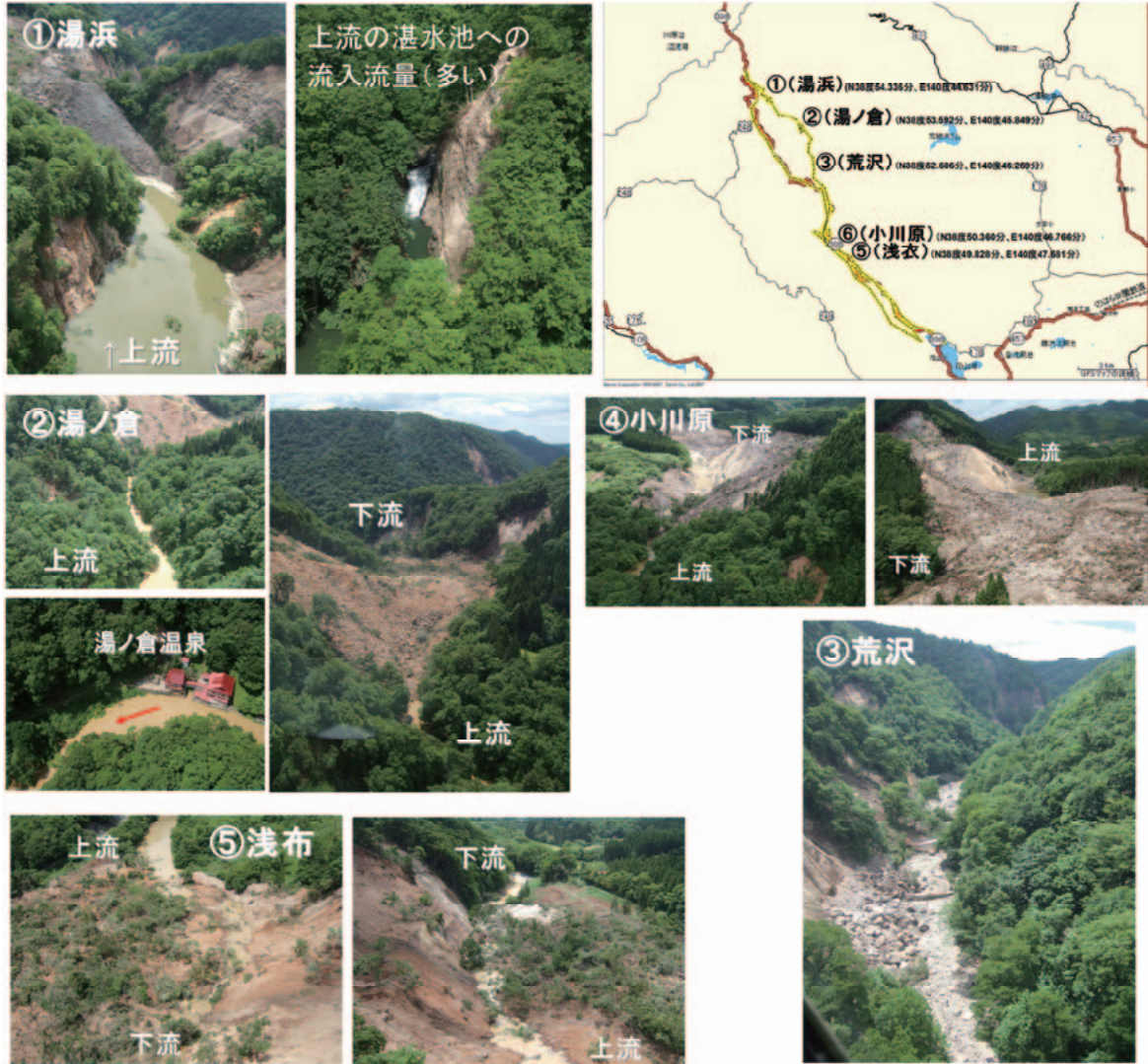


図-3.3.2 6月17日自衛隊ヘリにて行った現地調査写真。図中の座標はWGS84による。



図-3.3.3 6月20日みちのく号による調査写真。産女川の崩壊地

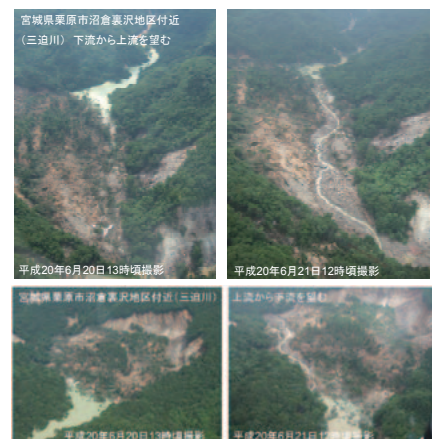


図-3.3.4 沼倉裏沢天然ダムの越流前後の空中写真⁹⁾



図-3.3.5 国土交通省が発表した15箇所の天然ダムの分布と対策工事実施箇所¹⁰⁾。上図は宮城県、下図は岩手県をそれぞれ示している。

3.4 荒砥沢ダムなどでの地すべり調査結果

3.4.1 二迫川流域

(1) 荒砥沢地区

宮城県栗原市栗駒の荒砥沢ダム右岸上流で、長さ 1400m、幅 810m、滑落崖高さ 140m、平均土塊厚 55m、移動土塊量 4,500 万 m³¹¹⁾ の大規模な地すべりが発生した。地震で動いた地すべりとしては国内最大級と言われている(写真-3.4.1)。この地すべりにより、ダム貯水池内への大量の土砂の流入による治水・利水容量の減少や、地すべり地周辺道路の寸断などの被害が発生している。



写真-3.4.1 大規模地すべり全景(6月15日空撮)

(2) 地形地質

周辺の地形は、平均勾配 10° 程度の緩やかな起伏が見られる南向きの緩斜面であり、既存文献¹²⁾では地すべり地形が抽出されている(図-3.4.1)。地すべり発生地の地形的特徴は、地すべり土塊本体は原形をとどめているが、地すべり地の上部には、本体の移動により形成した複数の陥没帯と前後に分離して三角に尖った形の分離小丘(引張り部)が帯状をなして交互に分布することである。また、地すべり頭部には明瞭な陥没帯が見られる(写真-3.4.2)。さらに、末端部の一部には、圧縮により土塊が乱された部分と二次すべりを起こした部分が確認される。

地すべり地周辺の地質は、下位が新第三紀の泥岩、上位が第四紀の軽石凝灰岩を主体とする層から構成され、その構造は約 5° で貯水池側に傾斜している緩い流れ盤構造をなすと考えられ、それらを火山噴出物が覆っている(図-3.4.2、図-3.4.3)。すべり面は、軽石凝灰岩主体層の下面付近であり、地すべり土塊は主に軽石凝灰岩からなると推定される。



写真-3.4.2 地すべり上部斜面(6月22日撮影)

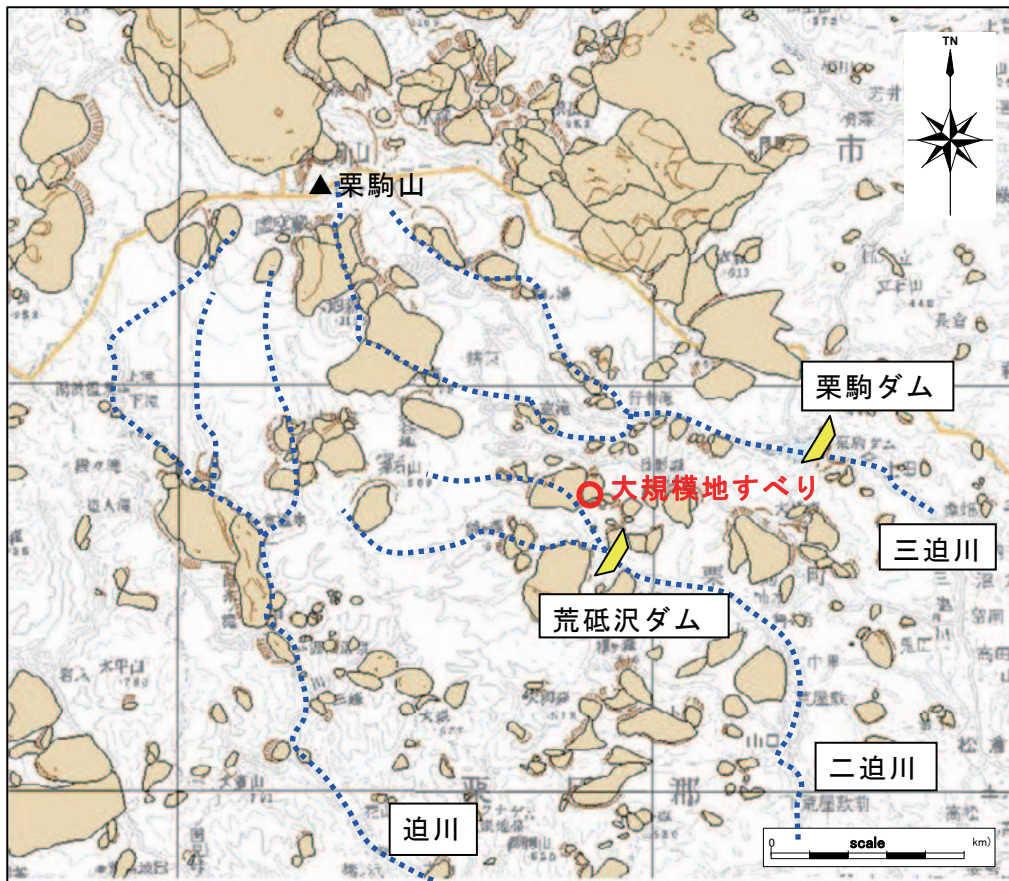


図-3.4.1 地すべり地形分布図（国立科学技術センター¹²⁾に加筆）

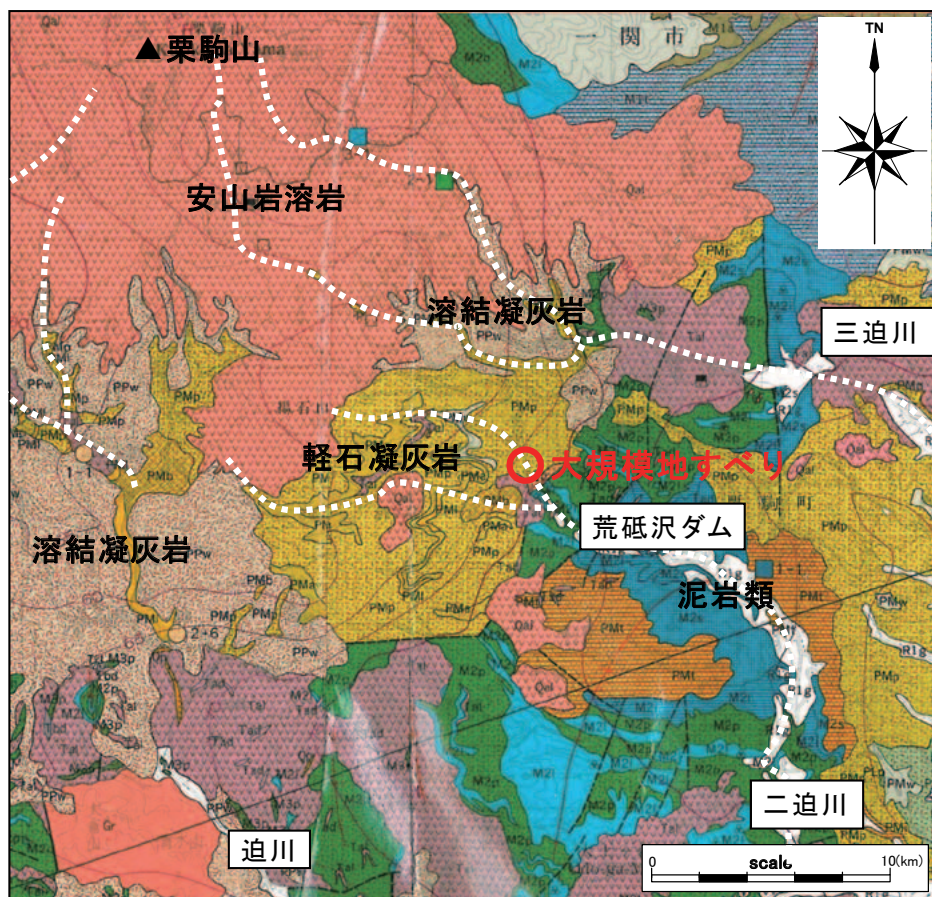


図-3.4.2 荒砥沢周辺の広域地質図（地質調査所¹³⁾に加筆）

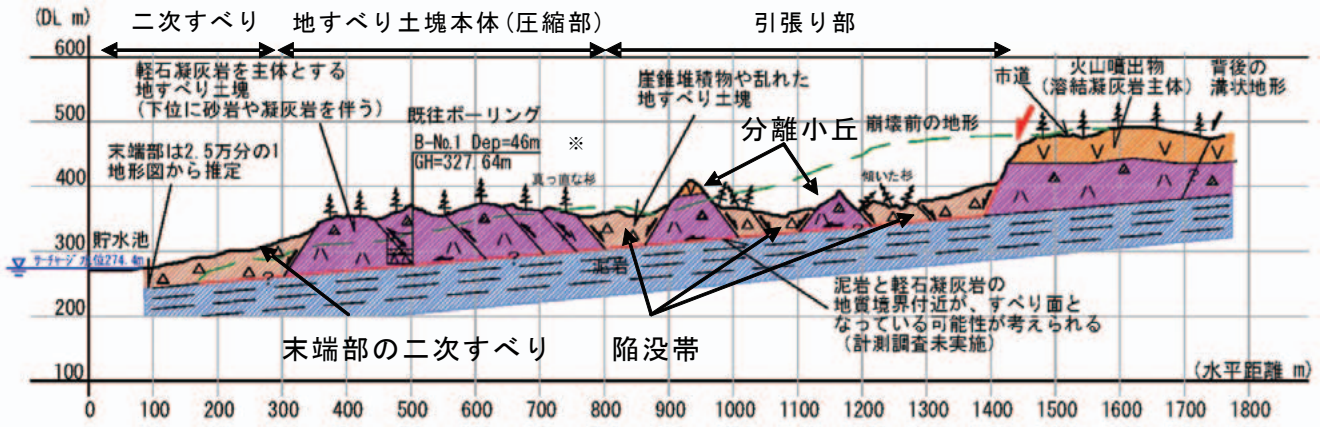


図-3.4.3 想定縦断面図

(3) 地すべり発生機構

本地すべりは、過去に発生した地すべり地の一部が、1,000gal を超える強い地震動によって滑動したものである。また、地すべりのタイプは、直線的なすべり面の形状、および引張り部と地すべり本体の圧縮部が明瞭に区分される地形の特徴から、すべり面が直線で末端が開放された流れ盤の地すべり(通称:椅子型地すべり)と考えられる(図-3.4.3)。

地すべり滑動時の状況は、①地すべり本体が広い範囲で斜面下方に動きながら、本体の上部が何個かの分離小丘に分かれて取り残された。②次に地すべり本体が斜面下方の尾根に達し、地すべり末端部は強い圧縮を受けて土塊の一部が乱されるとともに、貯水池付近の開放部分では二次すべりが発生③背後には本体ブロックの滑動により、不安定化したブロックが発生したものと推定される(図-3.4.4)。

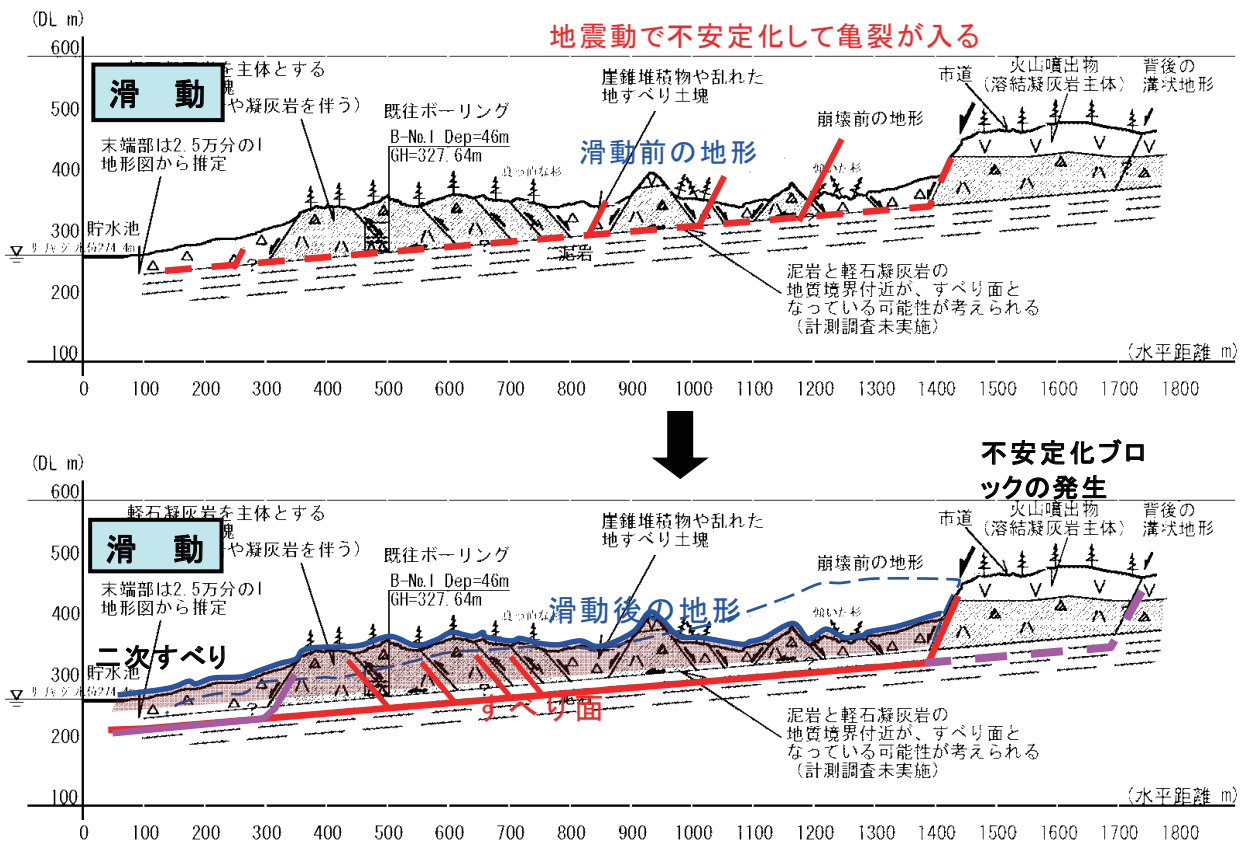


図-3.4.4 地すべり発生機構の模式図

(4) 荒砥沢地すべりの詳細状況

荒砥沢地すべりの詳細状況を示す。各写真の撮影位置は、写真-3.4.3のとおりである。

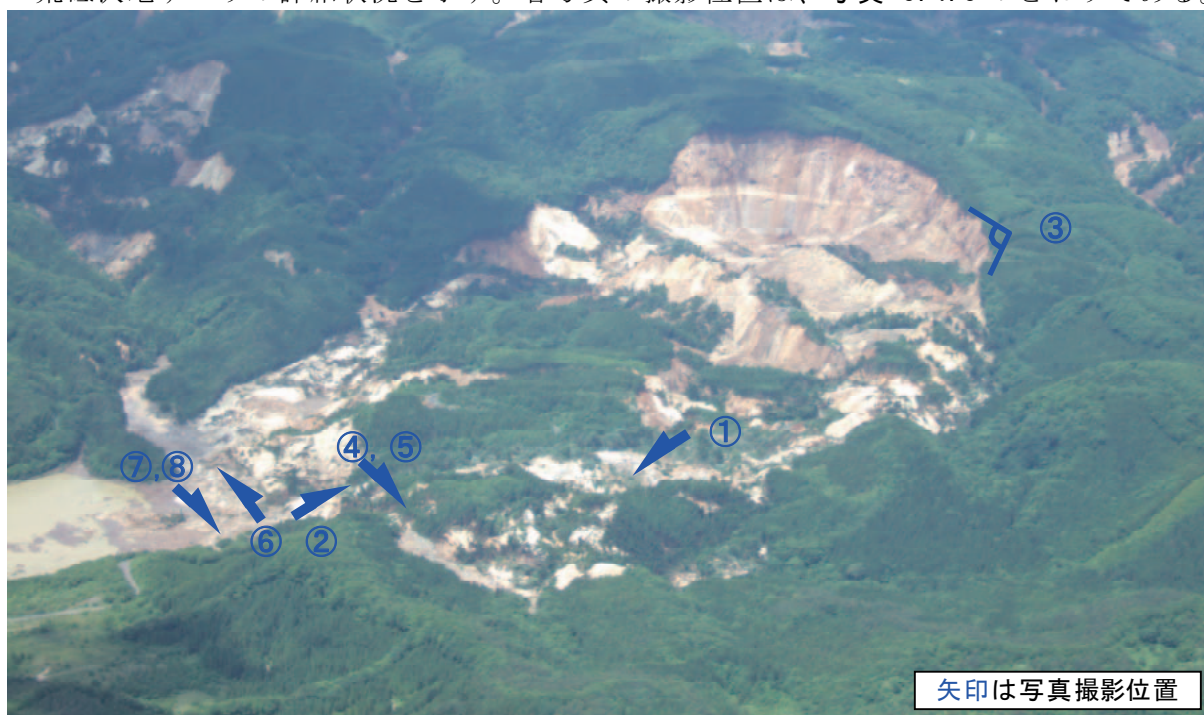


写真-3.4.3 地すべり範囲の全景。引張り部と圧縮部および細分化したブロックに分けられる。(6月15日空撮)



写真-3.4.4 圧縮部の近接。杉が様々な方向に倒れており土塊が乱れている。(6月15日空撮)

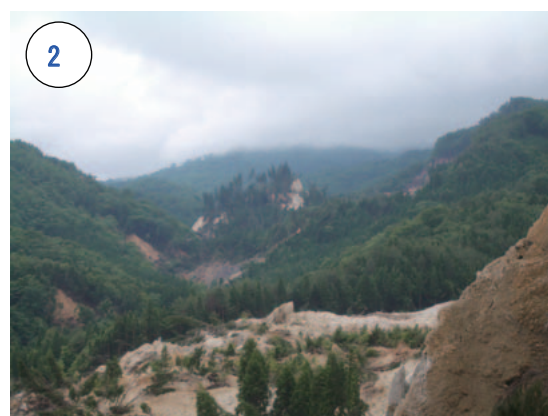


写真-3.4.5 地すべり土塊本体とその奥の分離小丘。比較的原形を保っている。(6月22日撮影)



写真-3.4.6 地すべり頭部の寸断された道路下方を望む。写真右の滑落崖の上部は溶結凝灰岩（茶色）が、下部は軽石凝灰岩（薄黄色）が露頭。写真中央～左側の露頭は、地すべり本体から取り残された分離小丘の斜面上側が滑落した面。明瞭な条線が見られる。(6月22日撮影)



写真-3.4.7 地すべり本体の末端部には、斜面への泥の付着や倒木が見られる。このことから、地すべり本体が尾根地形部に衝突したと考えられる。(6月22日撮影)



写真-3.4.8 上記の立木箇所との近接。斜面裾部から高さ約10mまで倒木し、その上方の立木にも泥が飛散している。(6月22日撮影)



写真-3.4.9 シツミクキ沢は地すべり本体により閉塞され、下流部には天然ダムができている。(6月22日撮影)



写真-3.4.10 尾根地形部の地すべりブロックにおける左翼道路部の段差を伴う亀裂。本ブロックの発生原因が地震か本体ブロックの衝突かであるかは不明。(6月22日撮影)



写真-3.4.11 左写真の沢部を正面から望む。この位置で道路が大きくせん断されている。(6月22日撮影)

(5) 荒砥沢地すべり背後地の状況

荒砥沢地すべりの背後地の現地調査では、主に地震により寸断された市道馬場駒の湯線等における地すべりや崩壊状況を調査した。その概要は下記のとおりである。

- ・荒砥沢ダム上流の地すべり範囲の背後（北側）には、長い年月をかけて形成された複数の溝状地形が見られ、その場所に市道馬場駒ノ湯線が通過している。
- ・今回の地震により、上記の溝状地形の一部に新しい亀裂が見られ、現在の市道馬場駒の湯線より北側にも複数の新たな亀裂が確認された。新しい亀裂は東西方向と南北方向のものが見られ、地すべり内部の分離小丘の配列と概ね調和している（溶結凝灰岩の節理の方向と関係する可能性がある）。
- ・暫定的に市道の通行を確保するための迂回路は、荒砥沢地すべり背後地の亀裂、溝状地形、不安定化した範囲を回避するように現道の北側に、迂回路が計画されているが、施工時及び供用時には地盤伸縮計などの設置・観測により安全を確認する必要がある（H20.6.21-22 調査結果）。
- ・耕英開拓線では、ヒヤシクラ沢支川の左岸に、緩勾配の円弧すべりによる崩壊が見られた（H20.8.9 調査結果）。

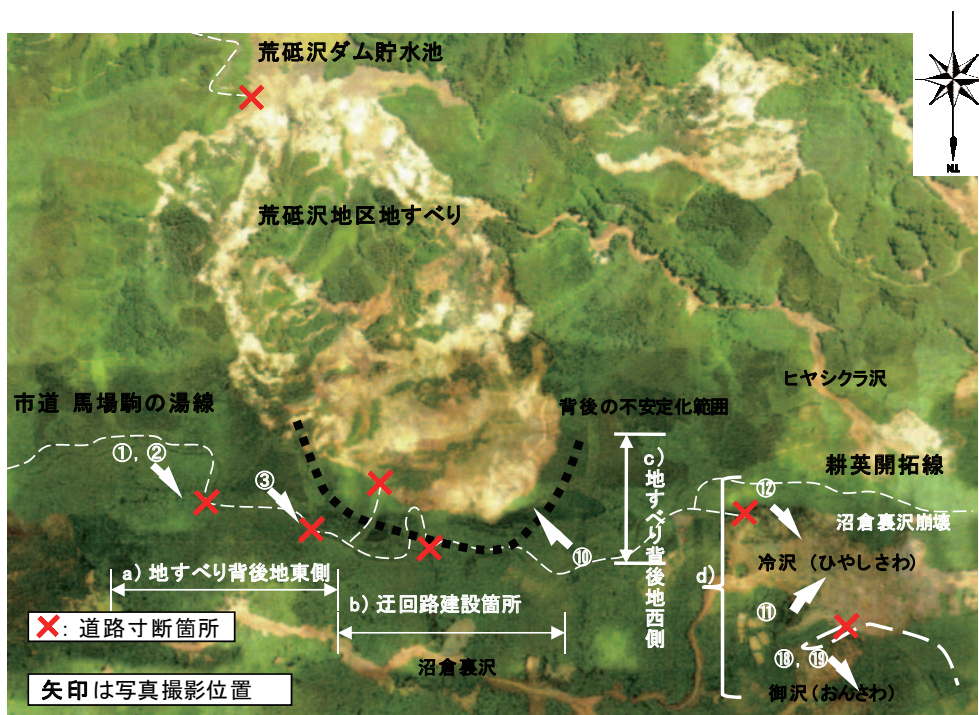


写真-3.4.12 航空鉛直写真（宮城県¹¹）に追記



図-3.4.5 迂回路の設置計画（宮城県¹¹）に追記

※各写真の撮影位置は写真-3.4.12及び図-3.4.5のとおりである。

荒砥沢地すべりの背後地（市道馬場駒の湯線等）の調査は、a)地すべり背後地の東側、b)迂回路計画（建設）箇所、c)地すべり背後地の西側、d)冷沢及び御沢支川の崩壊地、e)耕英開拓線において実施した（写真3.4.12にa）～d）の各範囲を示す）。調査結果は次のとおりである。

a) 地すべり背後地の東側

道路を横断する開口亀裂、引張り部に生じた陥没帯がみられた（写真3.4.13～3.4.15）。



写真-3.4.13
道路を横断する開口亀裂
(6月21日撮影)



写真-3.4.15 道路に生じた段差道路に見られる2m程度の段差。手前側が地すべりにより相対的に沈下したと考えられる。
(6月21日撮影)



写真-3.4.14
引張り部に生じた陥没帯。斜面下方（荒砥沢側）に連続してみられる。
(6月21日撮影)

b) 迂回路建設箇所

- ・平成20年6月22日の調査では、市道より奥側(北側)の林や休耕地の中に、連続した新しい開口亀裂が確認された（写真-3.4.16、写真-3.4.17）。また、市道を頭部とする幅50m程度の比較的小規模な地すべりがみられた（写真-3.4.18、写真-3.4.19）。
- ・平成20年8月11日の調査では、荒砥沢地すべりは、少しずつ後退しているように見受けられた。
- ・応急仮復旧道路は、平成20年7月14日の時点では着手され、平成20年8月9日の時点では完成していた。（写真-3.4.20、写真-3.4.21）



写真-3.4.16 市道北側の林の連続した新しい開口亀裂 (6月22日撮影)



写真-3.4.17 市道北側の休耕地の連続した新しい開口亀裂 (6月22日撮影)



写真-3.4.18 比較的小規模な地すべりの状況 (7月14日撮影)



写真-3.4.19 現道の崩壊箇所 (7月14日撮影)



写真-3.4.20 仮設道路建設状況（7月14日撮影）



写真-3.4.21 完成後の仮設道路の状況（8月9日撮影）

c) 地すべり背後地の西側

山側（左側）斜面の押し出しにより、谷側（右側）斜面が持ち上げられているように見える段差が生じていた（写真-3.4.22）。



写真-3.4.22 地すべり背後地に生じた段差（7月14日撮影）

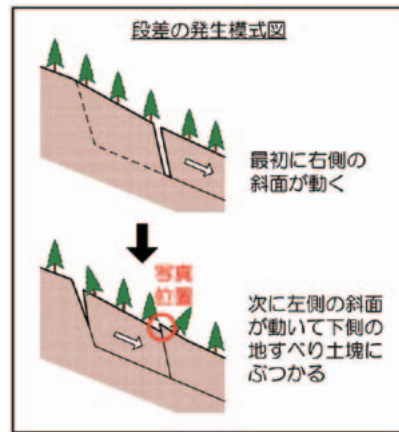


図-3.4.6 段差の発生模式図



写真-3.4.23 滑落崖上部斜面の亀裂、幅 50cm（7月14日撮影）



写真-3.4.24 地すべり地背後の亀裂（最大約 10m の段差）（8月9日撮影）

d) 冷沢および御沢支川の崩壊地

各写真の撮影位置を写真-3.4.25に示す。

- ・冷沢の右岸は崩積土の厚さから現道の高さ付近で滑っている可能性がある。現道は部分的な欠落はあるものの、崩壊せずに残っている箇所が多いと思われる。
- ・冷沢の右岸では、崩積土より深部に明瞭なすべり層がなく14付近のブロック積に変状がほとんど見られない（写真-3.4.28）。

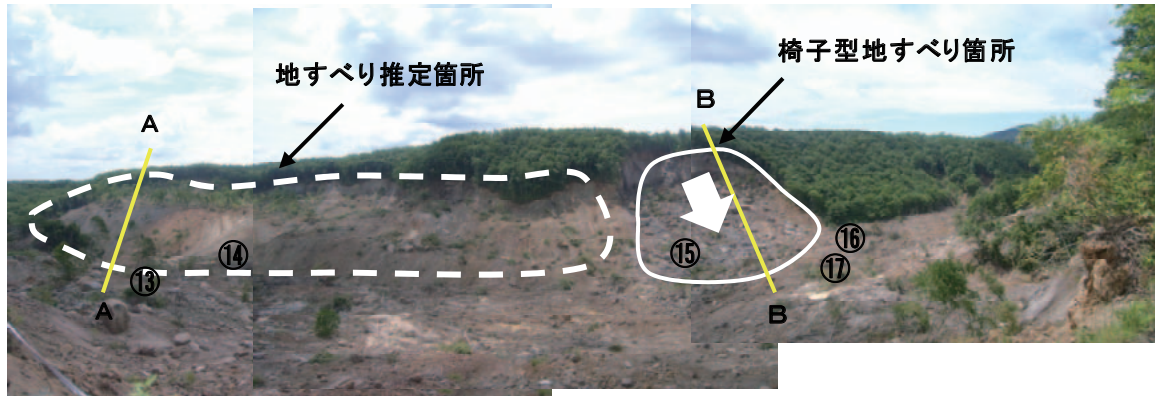


写真-3.4.25 冷沢右岸の崩壊の全景（7月14日撮影）



写真-3.4.26 崩壊地内から冷沢の左岸を撮影（8月9日撮影）



写真-3.4.27 A-A断面付近の頭部滑落崖（円弧すべり）（8月9日撮影）



写真-3.4.28 市道のブロック積擁壁（変状なし）（8月9日撮影）



写真-3.4.29 B-B断面付近の頭部滑落崖（8月9日撮影）



写真-3.4.30 B-5付近の頭部滑落崖（8月9日撮影）



写真-3.4.31 崩壊地内の岩（ $\phi=5\text{m}$ 程度）
（8月9日撮影）



写真-3.4.32 御沢支川の崩壊による市道に生じた亀裂（8月9日撮影）



写真-3.4.33 市道からみた御沢支川の全景（8月9日撮影）

e) 市道耕英開拓線

ヒヤシクラ沢で生じた地すべりによる市道耕英開拓線への影響について調査した結果は下記のとおりである。図-3.4.7の位置及び各写真の撮影位置を図-3.4.6に示す。

- ・ヒヤシクラ沢支川の左岸では、緩勾配の円弧すべりによる崩壊が見られる(写真-3.4.35、3.4.36)。
- ・崩壊地の上部斜面の段地形は過去に動いたものと思われるが、斜面上に新しい亀裂等がみられなかった。



図-3.4.6 市道耕英開拓線平面図¹¹⁾

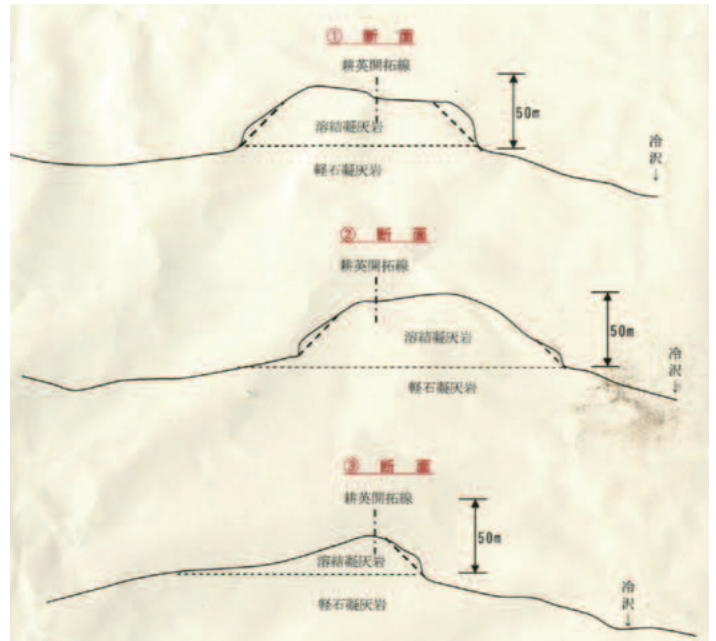


図-3.4.7 市道耕英開拓線断面図¹¹⁾



写真-3.4.34 左岸崩壊地の全景 (8月9日撮影)



写真-3.4.35 左岸の頭部滑落崖 (8月9日撮影)



写真-3.4.36 右岸の頭部滑落崖（8月9日撮影）

3.4.2 三迫川流域（^{きはら}築館栗駒公園線（栗原市栗駒））

本路線も地震による崩落などにより寸断されており、耕英地区への通行は不可能である。代替ルートについては、「市道馬場駒の湯線」で述べた迂回路により当面確保される予定であることから、本路線については恒久対策に関して調査を行った。

県道築館栗駒公園線は、地震の影響により多くの箇所が被災している（図-3.4.8）。本調査では、主に地すべり災害の中で規模が大きいT36、T33、T22について調査した。

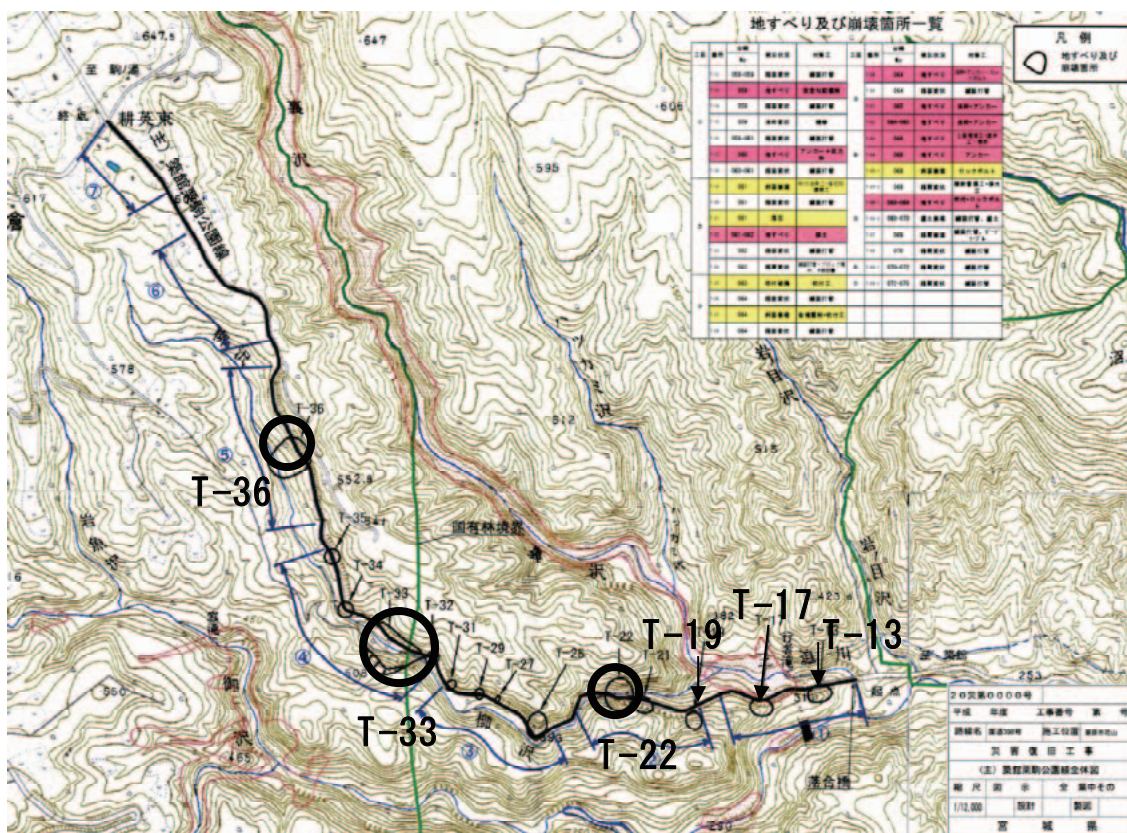


図-3.4.8 県道築館栗駒公園線 被災箇所位置図

1) T36 (地すべり)

各写真の撮影位置を図-3.4.9に示す。

- ・県道路面を頭部とする地すべり（幅約120m、深さ約10m）が発生している。
- ・滑落崖上部の斜面に連続した段差や亀裂が認められ、地盤伸縮計により計測を行っている。
- ・地すべり頭部付近の擁壁が上部斜面の押し出しによって被災していた。

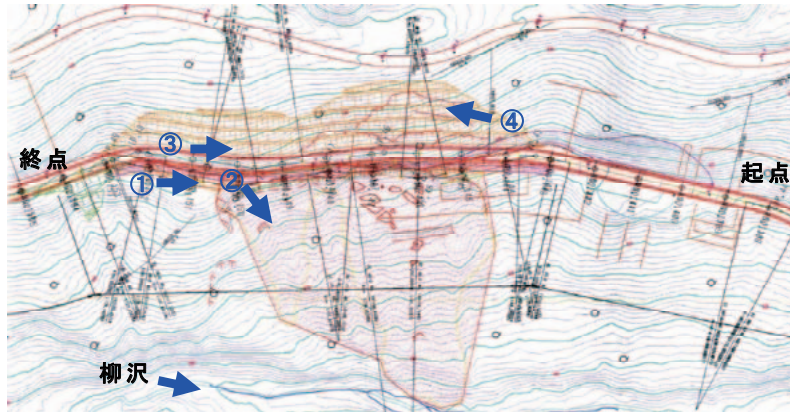


図-3.4.9 平面図¹¹⁾



写真-3.4.37 頭部滑落崖（高さ約6m）
（7月15日撮影）



写真-3.4.38 崩壊土砂の堆積状況
（7月15日撮影）



写真-3.4.39 滑落崖上部の擁壁の被災状況
（7月15日撮影）



写真-3.4.40 滑落崖上部斜面に発生した亀裂
（7月15日撮影）

2) T33 (地すべり)

各写真の撮影位置を図-3.4.10に示す。

- ・県道の対岸斜面に幅約200mの地すべりが発生し、柳沢を閉塞した。
- ・県道路面上部に大量の崩土が堆積している。

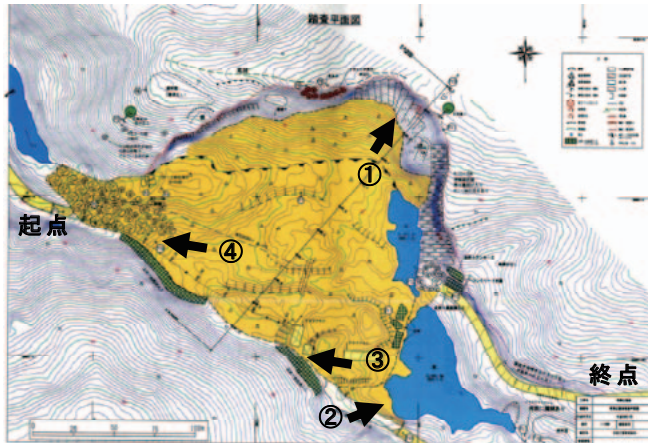


図-3.4.10 平面図¹¹⁾

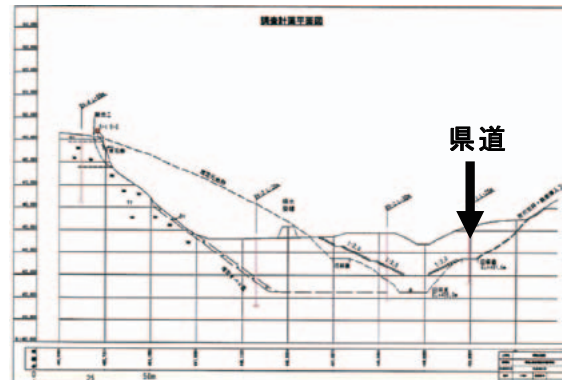


図-3.4.11 断面図¹¹⁾



写真-3.4.41 頭部滑落崖 (高さ30~50m)
(7月15日撮影)



写真-3.4.42 河道閉塞によるダム湖
(7月15日撮影)



写真-3.4.43 県道に堆積した崩土
(7月15日撮影)



写真-3.4.44 県道に堆積した崩土-2 (7月15日撮影)

3) T22 (地すべり)

各写真の撮影位置を図-3.4.12に示す。

- ・幅約 130m、長さ約 130m の地すべりが発生し、移動土塊が河道（柳沢）および県道（約 130m）を閉塞した。
- ・滑落崖の高さは、約 20m。地すべり土塊内に陥没帯が認められる。
- ・滑落崖の上部斜面は、線状の凹地が見られる。また、上流側の側方崖の上流側にも旧側方崖がみられる。

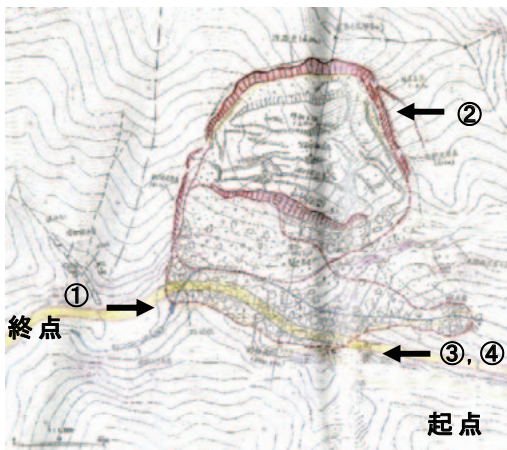


図-3.4.12 平面図¹¹⁾

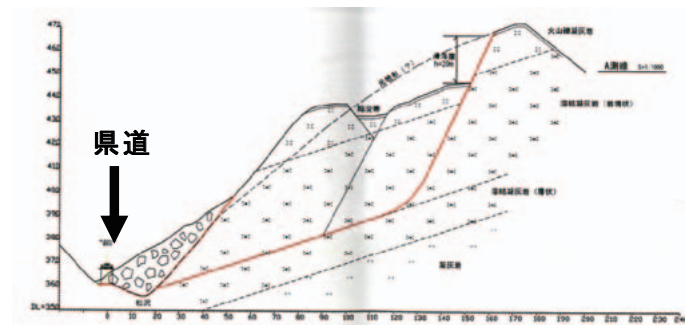


図-3.4.13 断面図¹¹⁾



写真-3.4.45 地すべり末端部の状況（上流より）（7月15日撮影）



写真-3.4.46 頭部滑落崖（高さ約20m）（7月15日撮影）



写真-3.4.47 地すべり末端部の状況（下流より）（7月15日撮影）



写真-3.4.48 溶結凝灰岩の硬さはハンマーの弱打で濁音を発して割れる程度である。（6月22日撮影）

4) その他

T19 地区：切土法面



写真-3.4.49 のり砕工の状況のり砕工は健全であるが路面上に落石が散在している。(6月22日撮影)

T17：地すべり



写真-3.4.50 路面に生じたせん断亀裂路面にせん断亀裂が複数見られ、背後は地すべり地形をなしている。(6月22日撮影)

T13 地区：地すべり



写真-3.4.51 最下流部の道路上に崩落した土砂の状況
(6月22日撮影)

(土研地すべりチーム)

3.5 三迫川ドゾウ沢の源頭部で発生した土石流調査

三迫川上流域のドゾウ沢の源頭部では、地震により大規模な崩壊が発生し、崩壊土砂が長距離にわたって流下した。崩壊地の幅は約 200m、長さ（水平距離）は約 300m であった。この土石流により崩壊地から下流約 4.8km の右岸に位置する駒ノ湯温泉では、死者 5 名・行方不明 2 名の被害が生じた。また、土石流は、崩壊地から約 10km 下流の行者の滝付近まで流下した痕跡が見られた。崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の平均勾配は約 10 度、土石流状態での流動がほぼ停止したと考えられる行者の滝の上流側の縦断勾配は約 2 度であり、土石流の等価摩擦係数（崩壊土砂の水平移動距離に対する鉛直移動（落下）距離の比）は約 0.1 であった。石川¹⁵⁾ は過去の地震によって発生した土石流の等価摩擦係数は 0.08 から 0.25 の範囲であることを示した。すなわち、今回の土石流はこれまでの地震による土石流の中でも、勾配の緩い位置まで到達する等価摩擦係数の小さい土石流であったと言える（図-3.5.1）。

崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の流下幅は、崩壊地直下を除くと約 100m で、現河床から約 50m の高さまで土石流が流下した痕跡が見られた。崩壊地から駒ノ湯温泉までの区間の湾曲部で顕著な偏流が見られ（写真-3.5.1、写真-3.5.2）、内湾側と外湾側でその痕跡水位に 23~40m の水位差が生じていた（http://www.gsi.go.jp/BOUDAI/h20-iwatemiyagi/index_komanoyu.html）。この結果を用いて、水山・上原¹⁶⁾ の手法に従い流速を算出すると、断面 1~断面 3 の区間を土石流は 20m/s 前後の流速で流下したものと考えられた（表-3.5.1）。

地震発生から 2 週間後の 6 月 28 日時点で、駒ノ湯温泉付近の堆積物は表面は乾燥しつつあるものの、その内部は高い含水状態で、堆積物上の歩行は困難であった。地震から 2 週間が経過した 6 月 28 日に、表面から 10~20cm の深さから採取した堆積物の含水比は 38% であった。地震の発生から同調査時点までにはほとんど降雨がなかったことから、土石流発生当初はさらに高い含水比であったと考えられ、等価摩擦係数が小さかった事実と矛盾しない。また、堆積物には、最大 5 m 程度の巨礫が含まれているものの、土質区分でいうと礫混じり砂質細粒土であった。駒ノ湯温泉には 7 棟の建物があったが、我々の調査時には 1 棟のみ確認できる状況であった。確認できた 1 棟は時計周りにほぼ 90° 回転した状態であった。地形図から推定すると、駒ノ湯温泉付近では、10~15m 程度土砂が堆積しているものと考えられた。

(土研火山・土石流チーム)

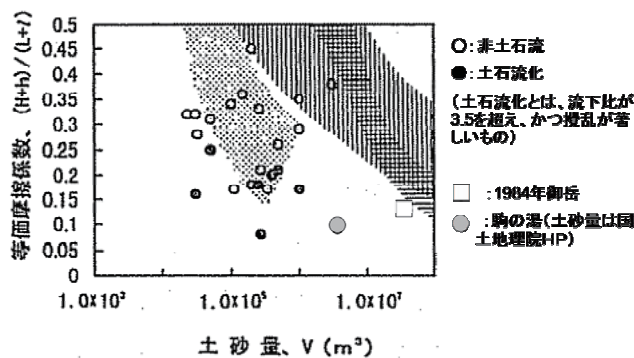


図-3.5.1 崩壊土砂量と等価摩擦係数の関係¹⁴⁾
(1984年長野県西部地震による御岳崩れと今回の土石流を追記)



写真-3.5.1 三迫川上流で発生した土石流の状況 (6月15日撮影)

表-3.5.1 偏流状況に基づく土石流の流速推定

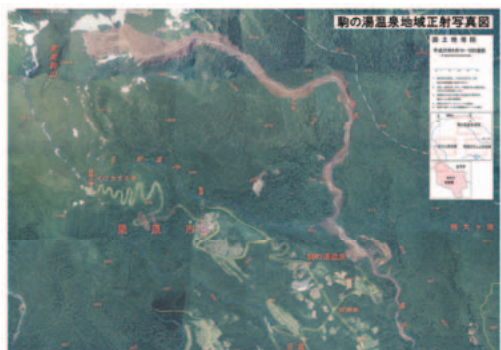


写真-3.5.2 土石流流下状況を示す
正射影写真¹⁵⁾

項目	水位差	流下幅	曲率半径	流速
	m	m	m	m/sec
断面1	23	115	730.4	12.0 ~ 26.8
断面2	36	90	230.2	9.5 ~ 21.3
断面3	40	100	140.7	7.4 ~ 16.6

3.6 沼倉裏沢の天然ダムの調査

3.6.1 天然ダムの形状

本節で対象とする沼倉裏沢地区は三迫川流域の栗駒ダムより上流 5km の地点に位置し、右岸斜面で大規模な崩壊が発生し、河道を閉塞した（**図-3.6.1**）。崩壊した斜面の勾配は約 35 度、崩壊地の幅は約 400～600m、高さは約 90m である。

図-3.6.2 に 6 月 16 日に取得された航空レーザー測量による越流前の天然ダム箇所付近の縦断図を示す。天然ダム箇所の堰止め幅は約 150m、堰止め長は約 550m であった。天然ダム箇所の下流端と天然ダム箇所の最高点の比高は約 42m、水平距離は約 400m であり、最高点から天然ダム下流端までの平均勾配（以下、「下流のり勾配」と呼ぶ）は約 6 度であった（**図-3.6.2**）。また、**図-3.6.2** に示したように、最高点では約 26m 河床が上昇したと考えられる。また、天然ダムの縦断勾配は約 1/24（2.4°）であった。

3.6.2 越流の状況

2008 年 6 月 21 日午前 0 時 30 分に、栗駒ダムの流入量が急激に増加しはじめ、同 1 時 20 分流量が最大の約 100m³/s に達した（**図-3.6.3**）。その後、急激に、栗駒ダムの流入量は減少し、増加開始から約 2 時間後には、ほぼ元の値に戻る急激な流入量の増減が観測された。なお、この栗駒ダムへの流入量の増加が生じた時間帯に、大きな余震はなかった。また、6 月 20 日～21 日にかけては栗駒ダム上流域の降雨量は 0mm であった。

この急激な流入量の変動があった直後の 6 月 21 日午前中にヘリコプターより、上空から、栗駒ダムの上流域の調査が実施され、沼倉裏沢地区にできた天然ダムにおいて、越流により侵食が生じた痕跡が見られ、湛水域が縮小していることが確認された。そこで、同箇所の天然ダムが侵食されたことにより栗駒ダムの流入量の急激な増加が生じたものと考えられた²⁾。

3.6.3 越流後の調査と結果

(1) 天然ダムの形状の変化

現地調査は 2008 年 6 月 29～30 日、7 月 2～4 日及び 7 月 29 日に行った。測量は GPS、トータルステーション、レーザー測距計を用いて行い、**写真-3.6.1** に示す 5 横断と河床の縦断勾配を計測した。最下流の横断①は天然ダムの下流端とほぼ同じ地点であり、最上流の横断⑤は、湛水域からほぼ 20m 下流に位置する。

侵食によって形成された溝の幅は溝の上端部で 32m～58m であり、下流に行くほど広がっていた（**図-3.6.4**）。一方、溝の底部の幅は 19～32m（なお、横断①では明瞭な底部を把握できなかった）であり、上端部の幅同様下流に行くに従い増大した。さらに、横断③～⑤では幅 5～9m、深さ 1～2m 程度で、他より 1 段低く削られている箇所があった。側岸の勾配は、最も急な地点（横断⑤の左岸）で約 52°、緩い地点で約 30°（横断④の左岸）であった。いずれの断面の側岸も崩壊前の地山と考えられる箇所はなく、天然ダムを形成した土砂が露出していた。また、侵食により形成された溝の深さ（横断の最低点と溝の縁との比高）は横断①を除くと、8～14m 程度であった（**図-3.6.4**）。このことと**図-3.6.2** に示したように横断⑤付近などでは河床が約 26m 上昇したと考えられることと併せて考えると、天然ダムを形成した土砂が完全に流されきってはいないことが分かる。実際調査時点にお



図-3.6.1 沼倉裏沢地区の位置

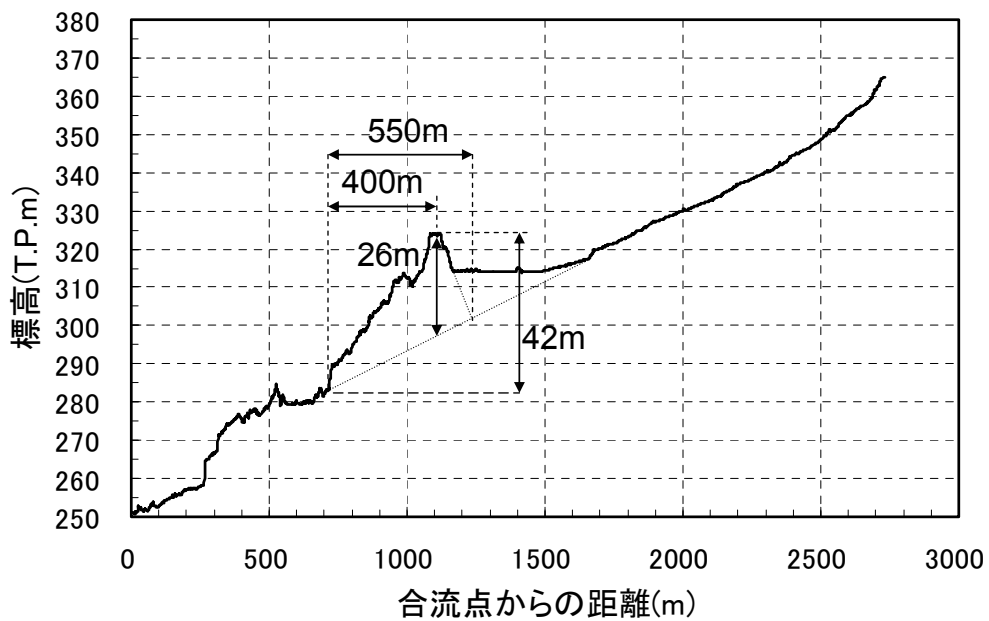


図-3.6.2 沼倉裏沢地区の天然ダムの縦断図

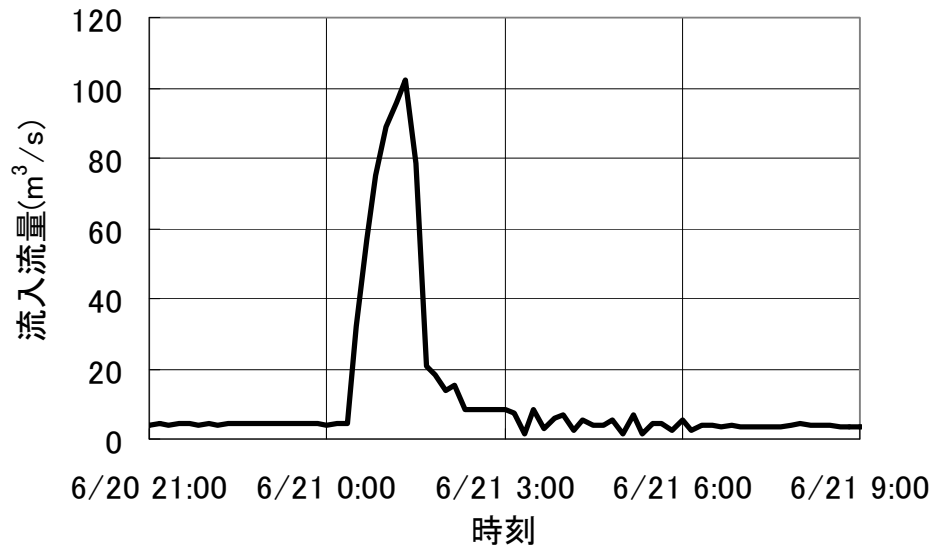


図-3.6.3 2008年6月21～22日の栗駒ダムの流入流量（宮城県観測データより作成）

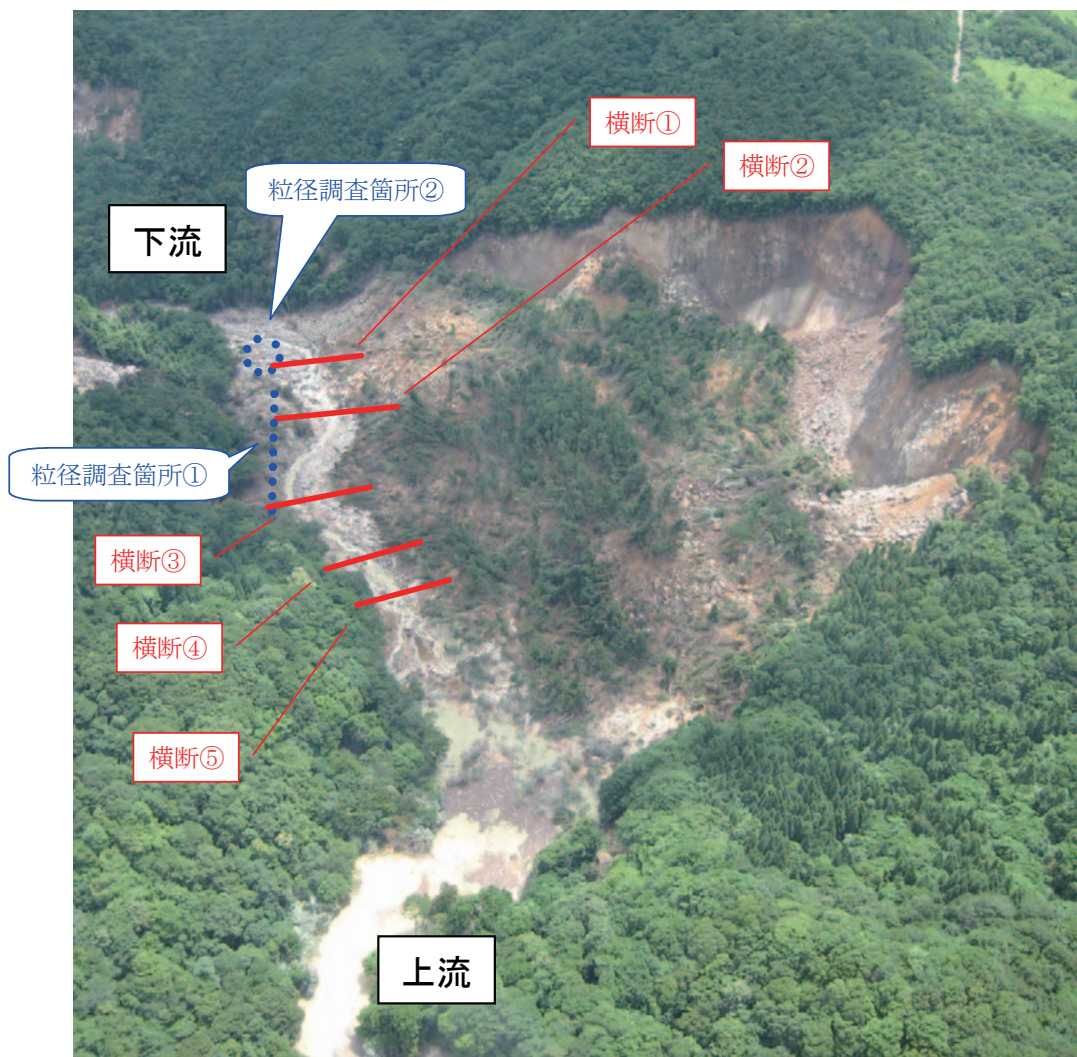


写真-3.6.1 沼倉裏沢地区（7月10日撮影）

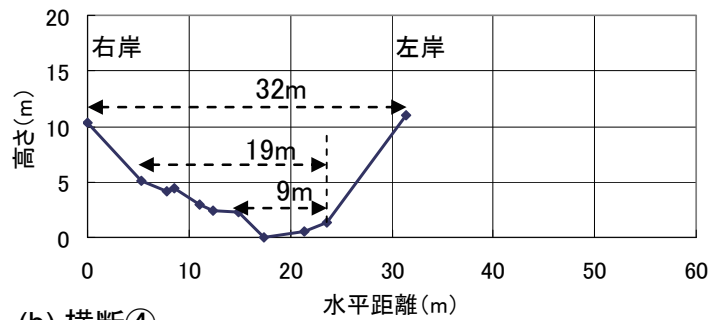
いても、ヘリコプターからの観察では天然ダム上流に湛水が確認されている。すなわち、越流による侵食によって形成された溝の底部は地震前の河床より高い位置にあったと考えられる。

侵食により形成された溝の底部の縦断勾配は天然ダム下流端から上流 80m の区間では $1/8$ (約 7.5°)、80~160m の区間の縦断勾配は約 2.6° 、160~250m の区間の縦断勾配は約 2.4° であった (図-3.6.5)。溝の底部の縦断勾配は、下流端から 80m の区間では侵食前の航空レーザー測量により求めた侵食前の天然ダムの下流のり勾配 6 度と近い値であったが、下流端から 80~250m の区間の勾配は、天然ダムの下流のり勾配より緩かった。

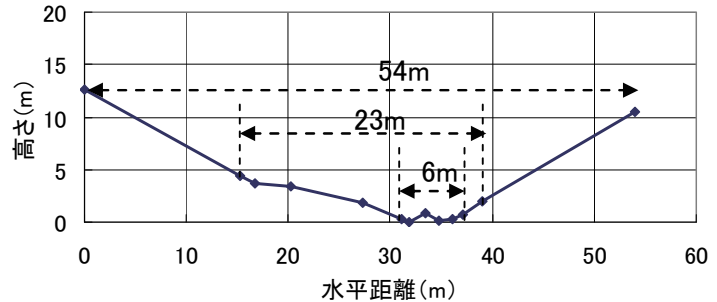
(2) 河床の様子・粒径の変化

侵食によって形成された溝の河床はほとんど砂やシルトのような材料は見られず、径が 10cm~数 m の礫に覆われていた。一方、側岸の様子を観察すると侵食後の河床を覆っていた材料とほぼ同様な 10cm~数 m の礫が天然ダムを形成した土砂にも含まれているものの、砂やシルト分も含まれている。また、溝の河床のほぼ最高点にあたる横断⑤の上流側には、多くの流木が堆積していたものの、下流端から横断⑤までの河床には流木の堆積はほとんど見られなかった。このことから、天然ダムを形成した土塊の表面にあった樹木は越流による侵食にともない下流

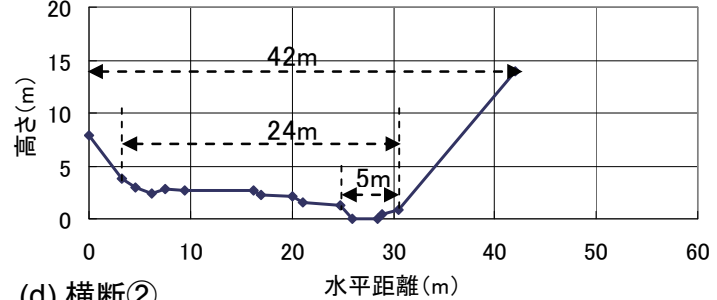
(a) 横断⑤



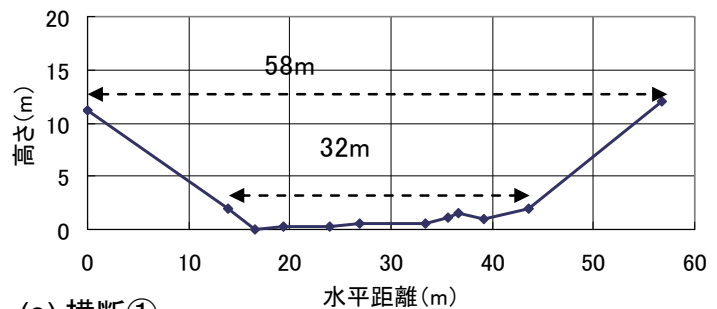
(b) 横断④



(c) 横断③



(d) 横断②



(e) 横断①

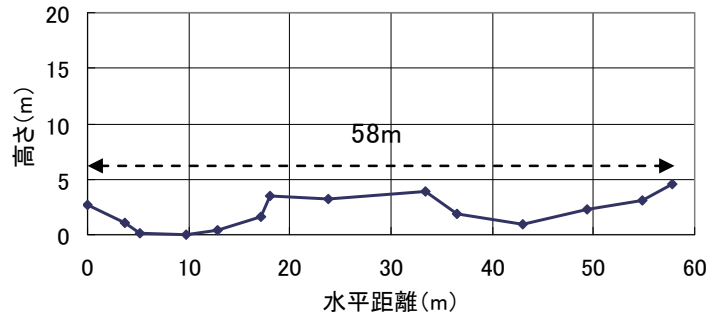


図-3.6.4 越流後の天然ダムの横断図 (水平距離は侵食により形成された溝の右岸の縁から距離)

に流されたものと考えられる。

次に、粒度分布の調査結果について述べる。粒度分布の調査は写真-3.6.1に示した2箇所において行った。粒径調査箇所①は、天然ダム上に位置し、越流による侵食が生じていない箇所である。同箇所では、溝の縁から約2~5mの地点を溝に沿うように1m間隔に112の測定点を設け、粒径を測定した。粒径調査箇所②は、天然ダム箇所の下流端に位置し、侵食によって形成された流路内に位置する。同箇所では、1m間隔で格子状に100(10×10)の測定点を設け、粒径を測定した。また、粒径が2cm以下の場合には、一律「2cm以下」とした上で、別途サンプルを採取し、粒度分布を測定した。粒径調査箇所①(天然ダムを形成した土砂)の調査結果、約40%が2cm以下の材料に、約10%が50cm以上の巨礫に覆われていた(図-3.6.6上)。また、細粒分に着目すると、細粒分の70%が0.01cm以下であった(図-3.6.6下)。

一方、粒径調査箇所②(侵食後の河床)には、天然ダムを形成した土砂に多く見られた2cm以下の材料はほとんど見られなかった(図-3.6.6上)。さらに、12%が天然ダムを形成した土砂にはほとんど見られなかった100cm以上の巨礫であった。また、細粒分にも着目した場合であっても、0.01cm以下の粒径はほとんど見られなかった(図-3.6.6下)。以上のように、溝の河床の材料は、天然ダムを形成した土砂に比べて明らかに粗粒化が生じていた。

(土研火山・土石流チーム)

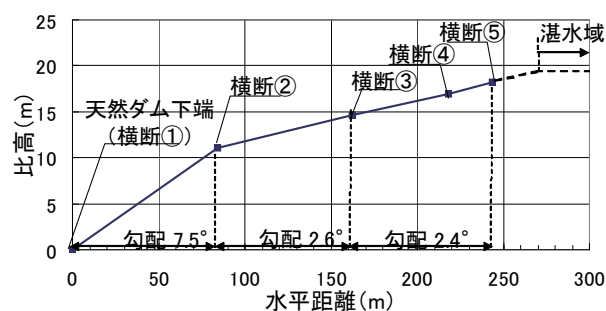


図-3.6.5 越流後の流路底の縦断図

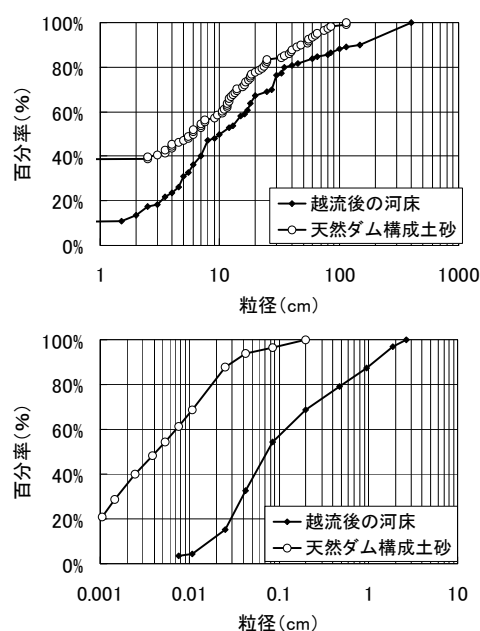


図-3.6.6 粒度分布 (上: 2cm以上の地点数の分布、下: 2cm以下の重量の分布)

3.7 投下型水位観測ブイの開発

3.7.1 開発経緯

宮城県栗原市の湯浜地区に形成された天然ダムは、一迫川に形成された天然ダムの中でも周辺の地形が厳しいことから、水位計の設置が困難とされていた。そこで、国土交通省東北地方整備局の依頼を受けて、土研火山・土石流チームはヘリコプターから投下するだけで水位計測・データ送信が可能な投下型水位観測ブイ（実願 2008-008836）を開発した。

3.7.2 投下型水位観測ブイの概要とヘリによる設置作業

山間部で発生した天然ダムに水位計を設置するための最大の問題は、作業員や資機材の陸送が困難であることと、山間部のために既存伝送設備がなかったり地震で破損していたりすることである。

このような場所に迅速に設置できる水位計として、以下の機能が必要と考えた。

- 1) ヘリコプターで空輸し、投下設置できること、
- 2) 人が地上に降り立っての機器調整が不要なこと、
- 3) 水位計の測定範囲が十分あること、
- 4) ブイに通信装置、電源装置を収容できること、
- 5) 衛星通信を利用してデータ伝送できること、
- 6) 内蔵バッテリーで必要期間駆動すること、などである。

これらの機能を実現することにより、天然ダム発生後に迅速に水位観測を開始できることや、通常の水位計施工方法で発生し得る二次災害の危険を回避できるなどの大きな効果を発現できるものと期待できる。

今回製作・設置した投下型水位観測ブイは、主に、ブイ、ケージ、ケーブル、水位センサなどから構成される（図-3.7.1、図-3.7.2）。運搬時はケージ内にブイなどが収容され、ヘリコプターで空輸しやすい形となる。水中投下後はケージと水位センサが河床に沈み、ブイはケージから分離して水面に浮上するとともにケージから水深に応じた長さのケーブルが繰り出され、観測できる体勢となる。

水位センサによって測定された水位データは、ブイに収容された衛星通信伝送装置に入力され、通信衛星を通じて設定した時間間隔で利用者にメール配信される。今回使用した衛星伝送方式は、数十機の低軌道衛星を使用して衛星間伝送するものであり、比較的狭隘な山間部でも安定した通信を確保でき、指向性アンテナが不要であるという特長を有する。

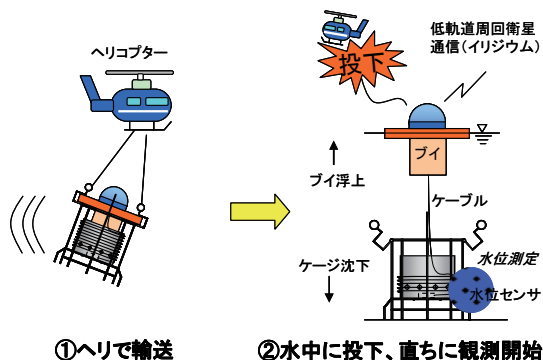


図-3.7.1 投下型水位観測ブイの構造



図-3.7.2 投下型水位観測ブイの外観



図-3.7.3 ヘリコプターによる設置の様子



図-3.7.4 設置後のブイ浮上状況

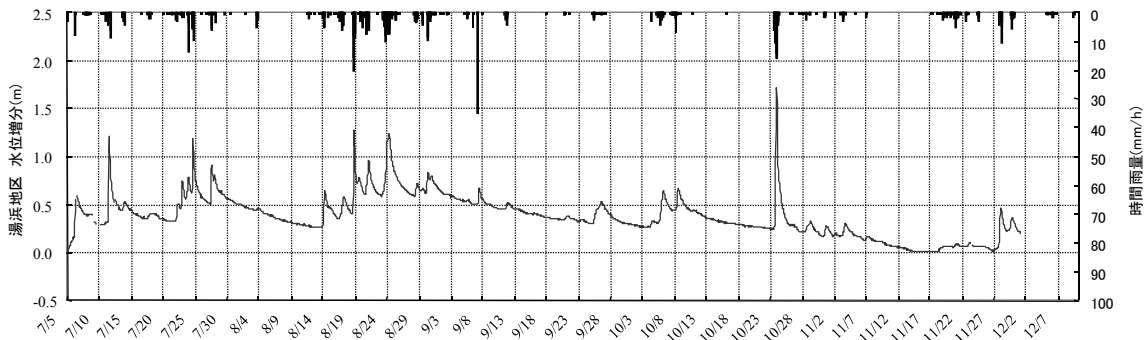


図-3.7.5 得られた水位データ

投下型水位観測ブイを設置するためにまず、ヘリコプターに投下型水位観測ブイを吊り、花山ダム湖畔に臨時設置されたヘリポートから約18km離れた湯浜地区まで空輸した。到着後、ブイ投下地点を決定するために、ロープの両端に浮きと錘をつないだ簡易な測深器具をヘリコプターから水面に投げ入れて適当な水深の地点を探した。これは、今回用いた水位計の測定可能範囲が10mであるため、水深が大き過ぎる地点にブイを投下してしまうと水位上昇時に測定可能範囲を超えてしまうからである。ブイ投下地点が決まったあと、ヘリコプターが水面上約10mまで降下してケージを吊り下ろして着水させた。着水後、ケージは河床に沈下するとともにブイはケージから離脱し水面に浮上して観測体勢となり、直ちに水位測定・衛星通信を開始することができた。

3.7.3 水位測定状況

設置後のデータ観測状況を図-3.7.5に示す。設置時の水位からの増分を示している。設置後約1日で約0.6m上昇して河道閉塞部の最低天端高に達した。その後は、非降雨時には水位は、設置時から+0.4m前後の水位で推移し、降雨時には+1.1~1.9m程度まで上昇している。また、7月8日、7月24日に、土砂流入や余震の影響による水位センサのずれが発生して、水位の急増が見られた(図ではずれ分を修正済み)。

最大水位は10月24日の大雨によって発生し、設置時から+1.75mを記録した。この時は下流側の湯ノ倉地区の河道閉塞部で土砂が大きく侵食されて約10mもの水位低下が生じ、湯浜地区の状況も懸念されたが、本水位計の監視によって大きな問題が生じていないことがリアルタイムで確認することができた。

3.7.4 まとめ

今回、地震による天然ダムの発生があり急遽開発・製作から設置・運用まで行い、ひとまずの成功を収めることができた。今後は改良を進めて、ケージからのブイ離脱の確実性向上、より大規模な天然ダムへの対応など、より適用範囲が広く利用しやすい形に発展させたいと考えている。

(土研火山・土石流チーム)

3.8 迫川における天然ダムの危険度評価

3.8.1 危険度評価の概要

迫川で形成した天然ダムが決壊して出水が生じた際の家屋の浸水可能性を検討した。まず、決壊による出水のピーク流量と流下能力を比較評価し、次いで、溪流の湾曲や合流等の地形条件と連続して形成された天然ダムの影響を考慮した2次元シミュレーションによる集落の浸水可能性を詳細に評価した。

3.8.2 緊急危険度評価

表-3.8.1 は天然ダムの形状とピーク流量の推定値を示したものである。なお、平成20年6月25日時点ですでに救助活動による開削あるいは自然に水が天然ダムの表面を流れていた箇所（川原小屋沢、温湯、小川原、浅布、坂下）は「越流による決壊」を想定し、表中では「-」と記載した。ここでは、湛水池へ流入する時点の水量を実績値とした場合と近傍の駒ノ湯アメダス観測所における既往最大24時間雨量からの推定値とした場合の2ケースを対象とした。この結果、ピーク流量は最大で900m³/s程度であった。

表-3.8.2 は迫川に沿って存在する集落内のいくつかの地点で推定した、等流状態の流下能力を示したものである。その結果、流下能力はピーク流量の推定値と比べて温湯温泉、猪ノ沢、大田の集落で下回り、その他の集落で上回った。

3.8.3 詳細危険度評価

図-3.8.1 は、湛水池に流入する流量を実績値とした場合での、各集落が存在する区間内を三角形に分割した要素における水深と堆積深の和のうち最大値をプロットしたものである。温湯温泉と切留・穴ノ原では、水深と堆積深の和が家屋のある地盤の標高と河床の標高の差を越えたことから、家屋が浸水する可能性が高いことが分かった。猪ノ沢、坂下・中村、越戸、大田では、家屋が浸水する可能性が低いことが分かった。

図-3.8.2 は図-3.8.1と同様であるが、湛水池に流入する流量を推定値とした場合のものである。湛水池に流入する流量を実績値とした場合と比べると、湛水池に流入する水量が多いため、水深と堆積深の和はなかなか小さくならなかった。大田を除く集落では、水深と堆積深の和が家屋のある地盤の標高と河床の標高の差を越えたことから、家屋が浸水する可能性が高いことが分かった。大田では、水深と堆積深の和は家屋のある地盤の標高と河床の標高の差よりも小さかった。

表-3.8.1 ピーク流量の推定値（緊急危険度評価）

河道閉塞 (天然ダム)の名称	形状			決壊する過程			ピーク流量の推定値 [m ³ /s]	
	高さ [m]	幅 [m]	長さ [m]	決壊まで要する時間[日]			湛水池に流入する水量を実績値とした場合	既往最大24時間雨量からの推定値とした場合
				越流による決壊	パイピングによる決壊			
湯浜	45	50	1200	39.2	1716	越流	15~838	273~838
湯ノ倉	20	53	630	3.4	1081	越流	10~471	187~528
川原小屋沢	30	50	600	—	—	越流	15~572	123~572

表-3.8.2 各集落付近での流下能力

地区名	流下能力 [m ³ /s]
温湯温泉	230~1200
小川原・切留	1850~3021
浅布	1194~8201
猪ノ沢・坂下・中村・大向	260~4900
早坂	1110~1150
大田	180~4900

3.8.4 天然ダム危険度評価のまとめ

調査対応時点での検討結果をまとめると次のようになった。1)小川原と浅布で形成した天然ダムでは、河道を閉塞している土砂を開削して排水路を設置し、流水が通過できる河道を確保するとともに、家屋の浸水を防ぐ必要がある。2)湯浜と湯ノ倉で形成した天然ダムでは、ポンプや排水路などによる湛水池の水を排水するといった応急対策により、決壊を防ぐ必要がある。3)湛水池が満水となっていない湯浜と湯ノ倉では、湛水池の水位を監視する必要がある。

(国総研砂防研究室)

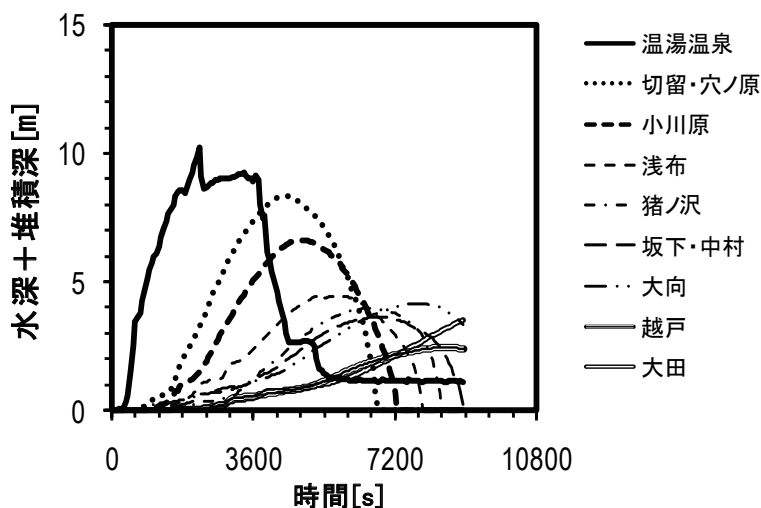


図-3.8.1 水深と堆積深の和の時間変化（湛水池に流入する水量を実績値とした場合）

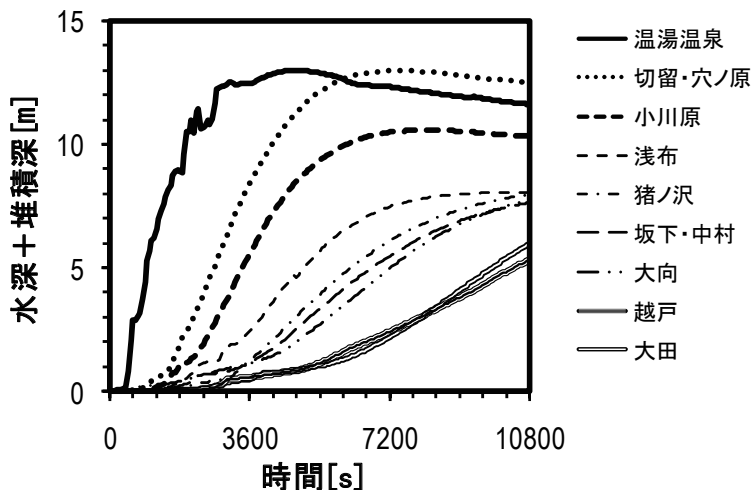


図-3.8.2 水深と堆積深の和の時間変化（既往最大24時間雨量からの推定値とした場合）

3.9 地震動による斜面崩壊危険度評価

国総研砂防研究室では兵庫県南部地震による六甲山地の崩壊事例を基に、一般的に入手可能な地形、地震動特性を説明変数とし、急傾斜地崩壊の正否を目的変数とした地震時の斜面崩壊危険度評価式（式（1））を開発してきた¹⁷⁾。

$$F = 0.75 I - 8.9 c + 0.0056 a - 3.2 \quad \dots (1)$$

ここに、Fは判別得点で、正であれば崩壊、0以下では非崩壊を意味し、値が大きいほど斜面崩壊の危険度が高い、Iは斜面勾配（度）、cは斜面の平均曲率、aは最大加速度（gal）である。判別得点は、①急勾配斜面で、②凸形尾根型斜面で、③最大加速度が大きいほど、大きくなる。式（1）は、六甲全山を対象に作成した、急傾斜地崩壊の場所を判定する式であるが、他の地震へ適用しても、地震による斜面崩壊の相対的危険度を評価できる¹⁸⁾。

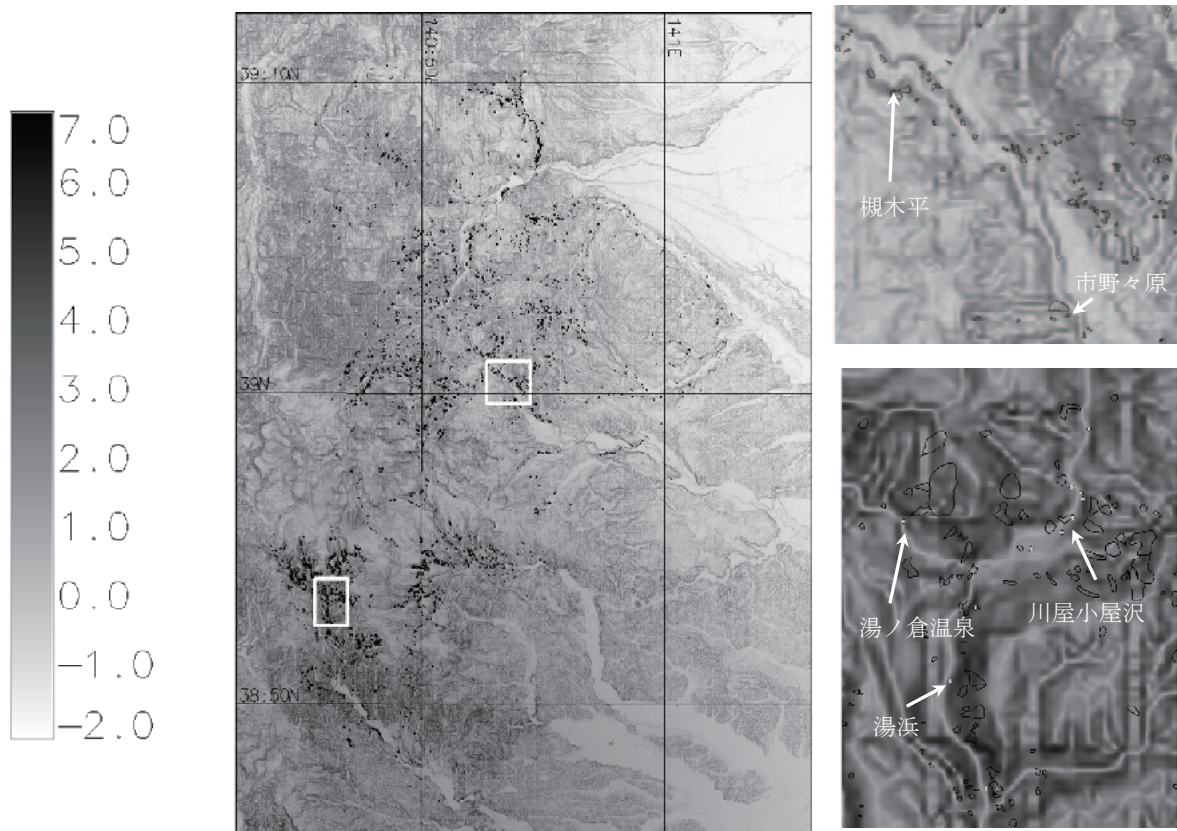
式（1）を導出する際には、地形条件と地震動特性を分析し、斜面崩壊に寄与が大きな変数を抽出している¹⁷⁾。その結果、地形条件に関しては、地形標高モデル（以下、「DEM」）のメッシュの大きさ、斜面崩壊に寄与する地形量の数と種類（斜面勾配、平均曲率、ラプシアン、地上開度、地下開度など）の崩壊に対する影響を検討した結果、DEMのメッシュサイズは10m、地形量は斜面勾配と平均曲率が最も斜面崩壊の判別に影響している変数であると推定された。また、最大加速度に関しては、破壊伝搬効果を考慮した、断層面からの観測点までの3次元距離を用いた最大加速度が適当であるとし、福島¹⁹⁾の距離減衰式を用いて推定している¹⁷⁾。今回の解析にあたり、地形量の算出に用いるDEMは、国土地理院数値地図50mメッシュ（標高）をバイキュービック法を用いて10mメッシュに補完したものを使用した。地形量（勾配、曲率）の算出手法については内田ほか¹⁷⁾に従った。最大加速度については、距離減衰式による最大加速度分布と観測結果から得られる最大加速度分布が異なったことから、独立行政法人防災科学技術研究所の強震ネットワークK-net (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>)による観測された加速度を使用し、各観測点の時系列加速度の3成分の合成値の最大値を用いて最大加速度分布を求めた。

図-3.9.1は、以上のようにして算出した判別得点の分布を表したものである。図-3.9.2に判別得点毎の崩壊地の頻度分布を示した。図-3.9.2を見ると、判別得点の正負によって崩壊地の有無がほぼ分離できていることがわかる。図-3.9.1の判別得点の分布のうち、左下の白枠および中央上の白枠を拡大した地域を、図-3.9.1右下、右上にそれぞれに示した。この両地域は判別得点が0以上で崩壊が多発している地域である。図-3.9.1右下図をみると、相対的に判別得点が高い地域で崩壊が多いことがわかる。この傾向は図-3.9.1右上図でも同様である。ここで、崩壊地を対象として判別得点と各変数の関係をみると、平均曲率とは顕著な関係は見られないものの（図-3.9.4）、斜面勾配（図-3.9.3）と最大加速度（図-3.9.5）とは正の相関があることがわかる。ただし、最大加速度が600～700galの範囲では、崩壊はほとんど発生していない。本手法を用いた場合、斜面勾配は地震前後で変化しないため、図-3.9.1右下図、右上図の両地域を比較すると、判別得点の絶対値は異なるにも係わらず、局所的な判別得点で相対的な斜面崩壊の危険度が同じ判定傾向になるのは、斜面勾配の寄与が大きいとと考えられる。一方、判別得点の絶対値の分布は、最大加速度の影響が大きいと考えられる。判別得点が高い地域の崩壊面積率が高いことが小山内ら¹⁸⁾によって示されており、図-3.9.1右下図、右上図を見ると判別得点が相対的に大きな右下図のほうが面積の大きな崩壊が多い傾向が定性的にみてとれる。このことから、

斜面崩壊の規模に、最大加速度の大きさが顕著に影響している可能性が考えられる。

今回の地震によって作成した判別式と比較する必要はあるものの、式（1）は崩壊の場所の判定のみでなく規模の推定もできる可能性があることが示せた。

（国総研砂防研究室）



左図の範囲は図-3.2.1と同様。黒いポリゴンは斜面崩壊の場所を表す。左図左下の白枠を拡大したものが右下図。宮城県栗原市迫川上流域であり、湯ノ倉温泉、湯浜、川屋小屋沢の天然ダム湛水池下流端を白丸で表す。崩壊地で判別得点が高いことがわかる。中央上の白枠を拡大したものが右上図。岩手県一関市磐井川流域の槻木平、市野々原の天然ダム湛水池下流端を白丸で表す。崩壊は判別得点比較的高い地域で発生しているものの、右下図と比べて判別得点の絶対値は低いことに注意。

図-3.9.1 判別得点の分布

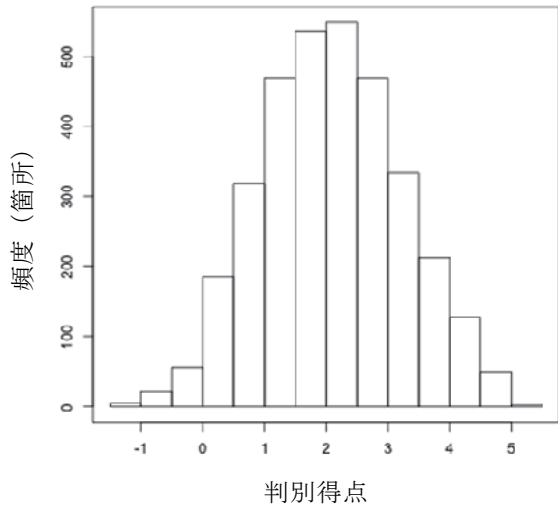


図-3.9.2 判別得点毎の崩壊地の頻度分布

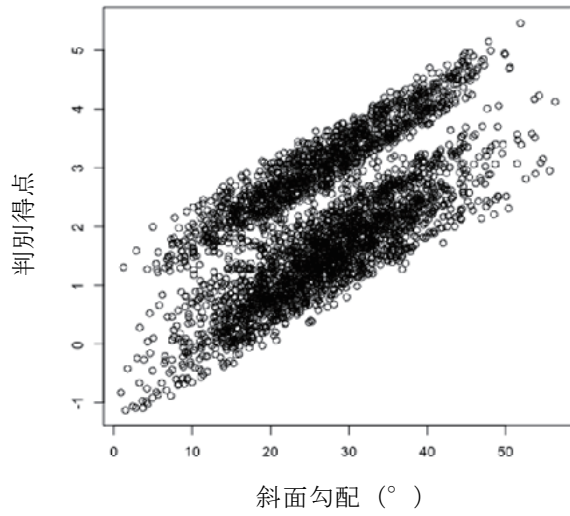


図-3.9.3 斜面勾配と判別得点の関係

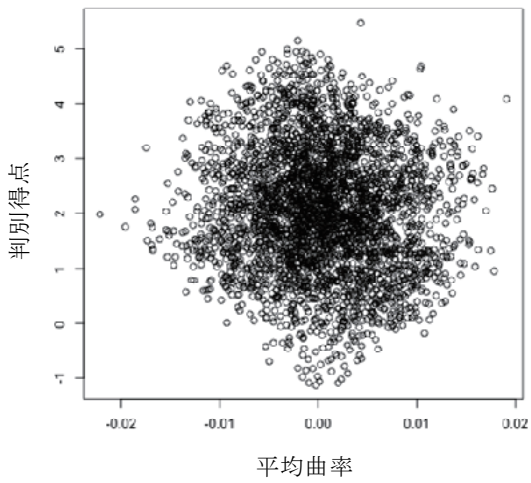


図-3.9.4 平均曲率と判別得点の関係

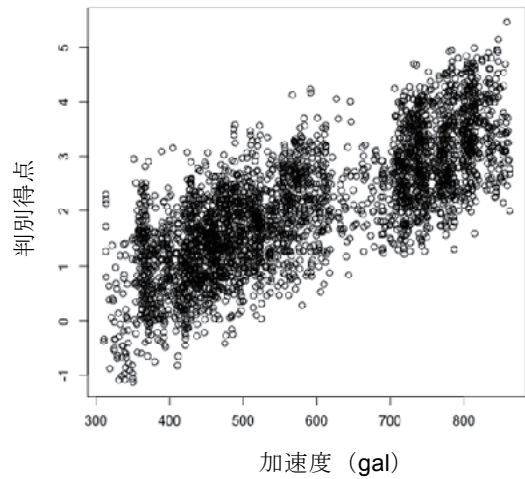


図-3.9.5 最大加速度と判別得点の関係

3.10 まとめ

今回の地震や平成16年新潟県中越地震は内陸直下型地震であり、予測困難であるが全国どこでも同様の災害を引き起こす可能性があることを改めて我々に認識させた。また、それが山間部であれば流域社会に長期間影響を及ぼす、天然ダムをはじめとする大規模土砂移動現象の恐ろしさも見せつけた。地震に伴う土砂災害は、これまでは、それほど頻繁に起こる現象とは思われていないかもしれないが、それ故に今回の多くの現象について詳細な調査・分析を行うことは、近い将来に発生が予想されている大規模地震時の危機管理上非常に重要である。

本章をまとめるにあたり貴重な資料をご提供いただいた国土交通省東北地方整備局、岩手県、宮城県の関係者、またK-netの加速度データをご提供いただいた（独）防災科学技術研究所に感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 消防庁：災害情報詳報 平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震災害（第74報）、2008年11月17日13：00発表 <http://www.fdma.go.jp/detail/811.html>
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター、独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ：平成20年岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴、土木技術資料、第50巻、第10号、pp.34-39、2008
- 3) 西本晴男：岩手県・宮城県内陸地震における河道閉塞（天然ダム）について、国土技術政策総合研究所資料、第482号、pp.115-130、2008（本資料は、2）を一部改訂した講演原稿）
- 4) 岩手県県土整備部砂防災害課・宮城県土木部防災砂防課：平成20年岩手・宮城内陸地震に係る土砂災害対策技術検討会、第3回委員会、参考資料、2008
- 5) 国土技術政策総合研究所・土木研究所・建築研究所：平成19年（2007）能登半島地震被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料、第438号、土木研究所資料、第4087号、建築研究資料、第111号、p.23、2008
- 6) 秋山一弥、松下智祥、小山内信智、稲葉千秋、新井雅史、谷内正博：2007年の地震で発生した斜面崩壊の特徴、平成20年砂防学会研究発表会概要集、pp.436-437、2008
- 7) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第1巻読図の基礎、古今書院、p.122、1997
- 8) GRASS Development Team: Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.3.0, 2008, <http://grass.osgeo.org>
- 9) 国土交通省砂防部砂防計画課：栗駒ダムへの異常流入を踏まえた現地調査結果、2008.6.20記者発表資料
- 10) 国土交通省砂防部砂防計画課：平成20年岩手・宮城内陸地震により発生した河道閉塞（天然ダム）箇所について、2008.6.19記者発表資料
- 11) 宮城県：平成20年宮城・岩手内陸地震の現地調査資料、2008（非公開資料）
- 12) 清水文健、大八木規夫、井口隆：地すべり地形分布図 第1集「新庄・酒田」21葉、国立防災科学技術センター、1982.3

- 13) 地質調査所：特殊地質図 No. 21-3「栗駒地熱地域地質図」、1986
- 14) 石川芳治：地震による土石流発生に係わる地形、地質条件、砂防学会誌、51-5、pp. 35-42、1999
- 15) 国土地理院：「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震」正射写真図 駒の湯温泉地域
http://photo.gsi.go.jp/topographic/bousai/photo_h20-iwatemiyagi/ortho/ortho.html
- 16) 水山高久、上原信司：湾曲水路における土石流の挙動、土木技術資料、23-5、pp. 15-20、1981
- 17) 内田太郎、片岡正次郎、岩男忠明、松尾修、寺田秀樹、中野泰雄、杉浦信男、小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第204号、2004
- 18) 小山内信智、内田太郎、野呂智之、山本悟、小野田敏、高山陶子、戸村健太郎：既往崩壊事例から作成した地震時斜面崩壊発生危険度評価手法の新潟県中越地震への適用、砂防学会誌、Vol. 59、No. 6、pp. 60-65、2007
- 19) 福島美光：距離減衰式の再構築と地盤増幅のモデル化、地球、Vol. 37、p. 80-89、2002