

自然斜面崩壊の特徴

豊田 浩史

長岡技術科学大学 環境・建設系

1. はじめに

2004年10月23日17:56、マグニチュード6.8の地震が新潟県中越地方を襲い、川口町、小千谷市、長岡市などの中山間地に大きな被害を与えた(図1)。この地震は、震源深さが約10kmの逆断層型の直下地震であり、たび重なる余震が被害を増大させた。

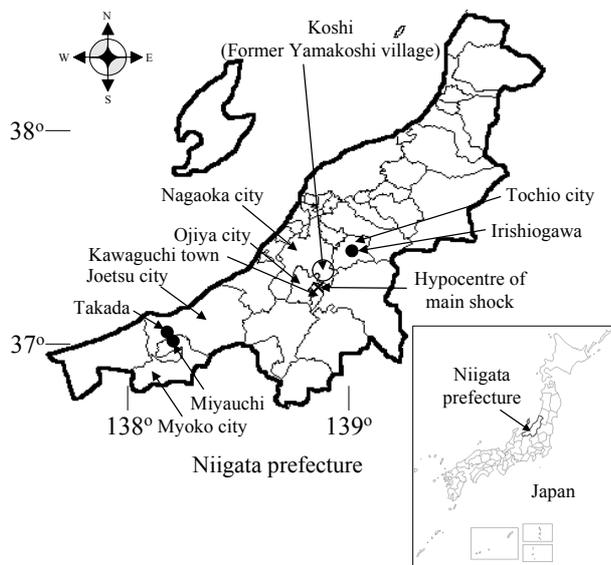


図1 新潟県の地図

中越地域の平野部には、厚い沖積層が広がり、丘陵部は主に第三紀と四紀の軟らかい泥岩からなっている。第四紀層は200万年前に堆積し、第三紀層は2400万年から200万年前に堆積したものである。褶曲によって形作られた地形は、有数の地すべり地となっている。さらに、台風23号の影響により、地震の2日前に100mm以上の降雨があった。気象庁のデータに基づいた長岡市での2004年10月21日の雨量は115mmに達している。このような状況下で、中越地震では、震源地

付近の丘陵地帯において、大小合わせると3000以上の土砂崩壊が発生した。

本報告では、地震による斜面崩壊の地形的、地質的特徴を取り上げ、過去の地すべりとの関連性について述べる。また、崩壊地で採取した土の物理試験や力学試験の結果についても考察を加える。さらに、融雪後に、斜面崩壊地がどのような変化をしたか、踏査した結果を報告する。



図2 古志周辺の災害地図(国土地理院)

2. 古志地域における過去の地すべり

古志の種芋原、虫亀、朝日川などは、代表的な地すべり地として知られている。図2は国土地理院によって提供された、中越地震時におけるこれらの地域の地すべり地図である。芋川沿いに、上

流より、寺野、南平、榎木、東竹沢、十二平で河道閉塞地すべりが発生した。これらの中でも、寺野と東竹沢は、緊急対策工を必要とした大規模な河道閉塞地すべりであった。

表 1 古志で起こった地すべり数 (1949~2002 年)

(a) 流域別		(b) 地域別	
朝日川	29	朝日川	32
太田川	19	種芋原	15
七滝川	19	虫亀	7
芋川	17		

表 2 古志で起こった地すべり

年号	場所	被害状況	
1	1824	中野	4月の雪解け時期、長さ1.4km 幅700m 被害は村全体に及ぶ被害を受ける。田の50%が耕作不能。川の堰き止め湛水あり。長さ約一丁深さ約三丈なる池を2箇所。
2	1926	中野	5月、長さ600間幅100間にわたり地盤が破壊。200町歩以上にわたる田畑、山林に被害を生じた。川を堰き止め湛水あり。
3	1929	寺野	4月、県道栃尾小千谷線の寺野地内で30間が決壊、橋梁が落ちる。湛水不明
4	1932	中野、寺野	対策工事中に大きな地すべりあり。詳細不明

表 1 は 1949 年から 2002 年に古志で起こった地すべり数を示している。虫亀から流れ出ている朝日川流域で多くの地すべりが発生している。蓬平や濁沢の地すべり地を有する太田川でも地すべりが多数発生している。芋川においても、17の地すべりが起こっているが、そのほとんどが上流の種芋原や中野周辺で起こっており、河道閉塞地すべりを発生させた南平、東竹沢、十二平では、地すべりはほとんど報告されていない。地域別でみると、朝日川、種芋原、虫亀の順になる(表 1(b))。

地すべり学会新潟支部編集による「新潟の地すべり'98」によると、1751 年上越市高田で起こった地震時に、古志の北部に位置する栃尾市で大きな地すべりが発生した。以後、この地域は東中野俣地すべり指定地と呼ばれている。震央から 80km も離れたところで、このような大きな地すべりが起こったことは興味深い、その詳細については

不明である。地質図によると、この地域は第 4 紀の砂岩泥岩互層となっている。

旧山古志村の歴史が 1700 年から村史に記されている。ほとんどの土砂災害の場所は種芋原となっている。表 2 に種芋原における地すべりの記録を示す。種芋原の様に大きい集落がなかったためか、それ以外の地域についての記録は少ない。有史以前の地すべりは不明であるが、1842 年にはじめの地すべりが記録されている。地すべりの誘因は、春先の雪解け水と考えられる。このとき、芋川に 2 つの大きなせき止め湛水ができた。約 100 年後、同様の場所で融雪時期に、地すべりによる河道閉塞が記されている。その約 80 年後の中越地震では、このあたりの寺野において河道閉塞地すべりが発生した。違いは地すべりの誘因が融雪でなく、地震ということである。上述のとおり、種芋原周辺においては、100 年毎に河道閉塞地すべりが起こっており、特異な現象とはいえない。

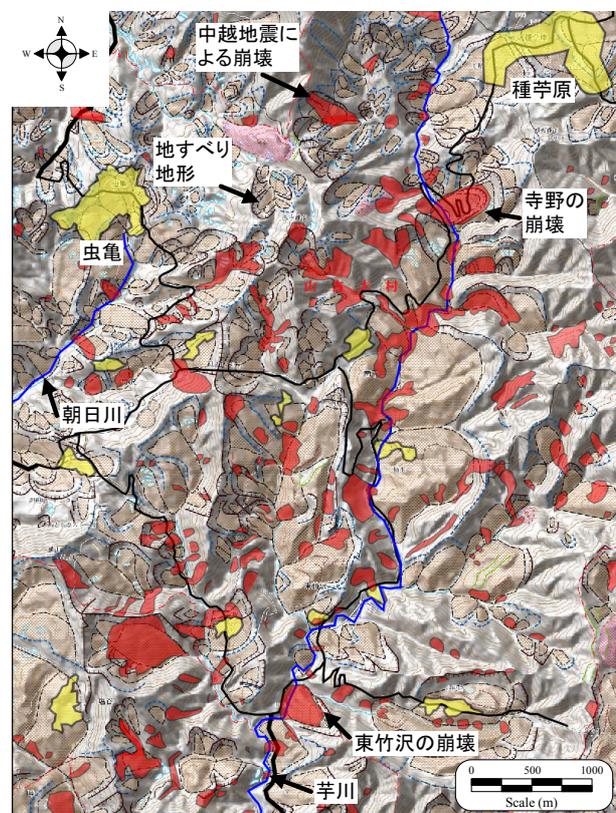


図 3 古志における地すべり地図

有史以前の地すべりについては、航空写真から造られた地形図を用いて考察する。図3は、古志地域について、(独)防災科学研究所と(独)科学技術振興機構による地すべり地図に国土地理院から提供されている中越地震災害状況図による地すべり位置を重ねたものを示す。その年代はわからないものの、多くの地すべり地形が寺野と中野の芋川沿いに残っている。地すべりが起こりやすい地質的要因があると考えられる。山古志村村史によると、地すべりの原因は雨や地震でなく、融雪時期である。種芋原や虫亀は地すべりの後に平になった場所に造られたように見える。これらの村は肥沃な土砂で覆われ、現在安定しているが、周辺では地すべりが続いている。寺野や東竹沢の大規模地すべりは、地すべり地形と一致しているため、再すべり型と考えられる(図3)。これらは尾根地形で、両側に谷を持っている(図2)。地震動はこの様な尾根で増幅する傾向にある。

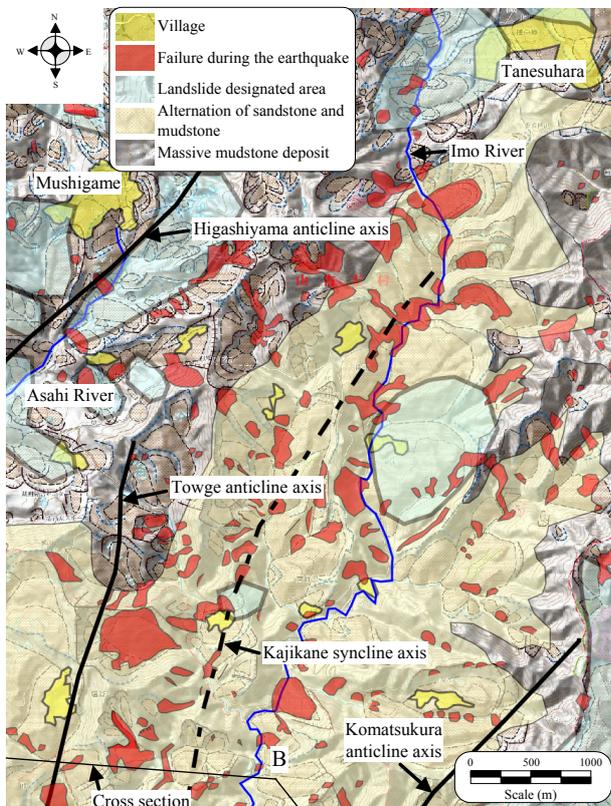


図4 地質と地すべり分布

3. 自然斜面崩壊の特徴

中越地震時に芋川沿いで多くの河道閉塞地すべりが起こった。図4に竹内ら(2004)による地質図を簡略化したものに、中越地震時の地すべり位置をプロットしたものを示す。さらに、新潟県保全図から得られた地すべり指定地も記してある。

虫亀を含んだ地図の西側は朝日川流域に分類され、黒灰色の塊状泥岩の荒谷層である。地図の東側に移動すると、芋川流域に分類され、川口層、和南津層と呼ばれる砂岩泥岩互層となる。上流を除き、芋川沿いは、砂岩泥岩互層である。地震時に起こった地すべりの多くは、塊状泥岩に比べ、砂岩泥岩互層で発生している。このことは、地震時には砂質地盤の方が粘性地盤より脆いことを示唆している。一方、地すべり指定地は主に塊状泥岩層に分布している。これより、融雪などの水の作用によって引き起こされる地すべりと、地震による地すべりはメカニズムを異にしていることがわかる。

さらに、この地域の特筆すべき地質的特徴は、向斜、背斜構造である。向斜、背斜軸が短い間隔で起こる複雑な地形を構成し、特徴的なケスタ地形が形成されている。この様な背景では脆く弱い斜面が形成され、さらに、川が地表を削り取ることにより、斜面先が不安定になっている。

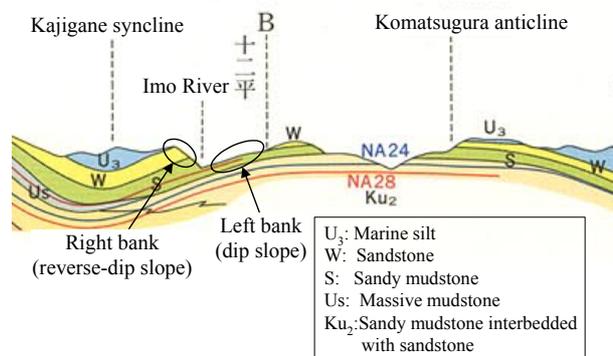


図5 芋川周辺の地質断面図 ((独)産総研)

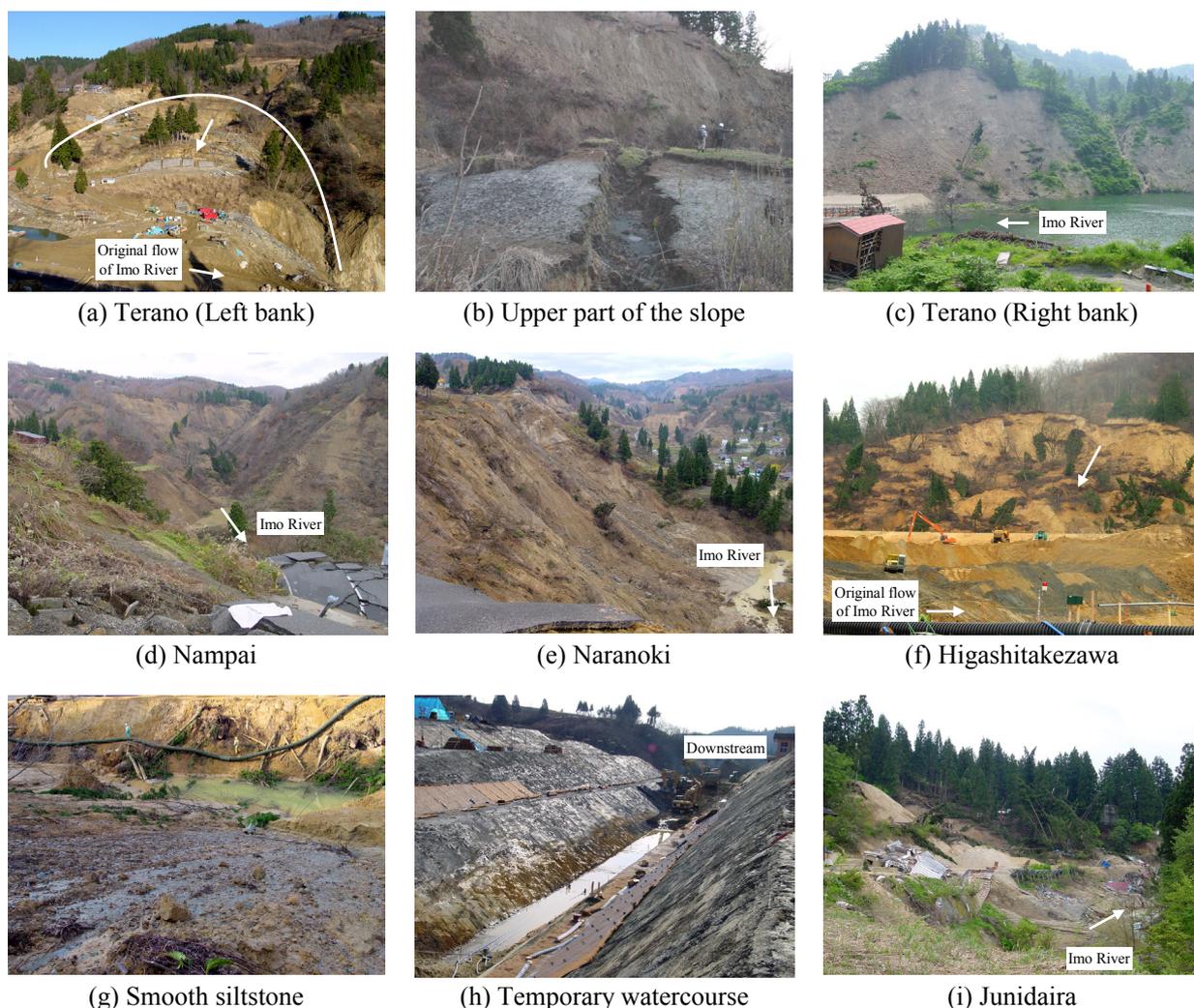


写真1 芋川沿いの斜面崩壊

図5は、(独)産業技術総合研究所提供の旧山古志村の北、十二平での地質断面図を示している。地質断面図の位置は図4に示してある。芋川の左岸では流れ盤構造で、右岸は受け盤構造であることがわかる。

写真1は芋川の閉塞を引き起こした地すべりを示している。寺野は種芋原の南に位置し、芋川の左岸が動いた(写真1(a))。その規模は、幅上部で約200m、下部で290m、長さ約360mであった。崩壊前の傾きは約17度で、深さは明確でないものの、深いところでは20m程度ありそうである。滑落崖においては、物理試験のために採取した低固結の砂質地盤が分布している。天然ダムの崩壊を防ぐため、河道閉塞に対する緊急排水対策が即座に取られた。動いた土塊は、古い地すべり地形

とほぼ一致しており(図4)、地すべり土塊の両側は谷地形になっているようである。この斜面の上には池があることより、常時地下水が集まってくる地形であることがわかる(写真1(b))。この地すべりは、本震でなく余震で起こったという証言もある。地盤が本震で乱され弱くなったことも考えられる。一方、右岸においてはいくつかの表層崩壊が見られる(写真1(c))。しかしながら、受け盤の表層崩壊であるため、川に流れ込んだ土砂量は少ない。

南平は寺野の約1km下流である。芋川の両岸において、約35度の急崖が数百メートルにわたって崩落した(写真1(d))。深さ数メートルの表層崩壊であったため、河道閉塞の緊急対策は必要となかった。

榑木においては、芋川の右岸、約 30 度の斜面が、幅 420m、長さ 200m にわたり崩壊した。崩壊深さは南平よりは深そうであるが、表層崩壊に分類されるであろう。崩壊地の基盤岩の上に現れた土は低固結の砂質土であった。物理試験とせん断試験のために、この土を採取した。

芋川と前沢川の合流点に当たる東竹沢において、地震により、幅上部で 220m、下部で 340m、長さ 340m の土塊が約 70m 滑動した。写真 1(f) はこの地すべりの滑落崖である。滑落崖の堆積物は貧配合の砂であり、物理試験のために採取した。河道対策工のための整地がすでに行われている。斜面は芋川の左岸で、斜度は尾根部で 15 度、側部で 21 度と緩やかである。くすんだ青い滑らかな泥岩が、滑落崖の下部に現れている(写真 1(g))。この傾きは約 18 度であった。物理試験のためこの泥岩も採取された。この地すべりは古い地すべり地形に一致しており(図 4)、寺野と同じく両側が谷地形となっている。天然ダムの崩壊を防ぐために、排水ポンプとともに仮排水路が建設されている(写真 1(h))。

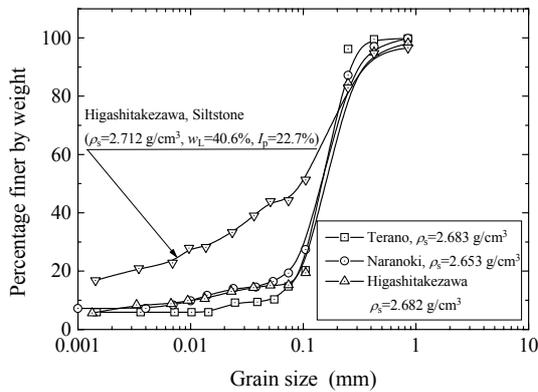


図 6 崩壊土砂の粒度

規模はそれほど大きくないものの、十二平の芋川両岸において斜面崩壊が発生した。写真 1(i) は流れ盤の左岸での地すべりを示している。斜度は 20 度以下と緩やかである。雪崩防止柵や木がそのまま動いていることから、表層崩壊よりは深いことがわかる。この斜面は東竹沢から連続しており、

東竹沢同様の大きな地すべりを起こす可能性もある。芋川右岸、左岸それぞれで特徴的な地すべりが起こった。つまり、受け盤の右岸では表層崩壊が多く起こり、緩やかな流れ盤の左岸においては、しばしば大問題となる大きな地すべりが発生した。

図 6 に芋川沿いの崩壊地から得られた試料の粒径加積曲線を示す。滑落崖からの試料すべて、細粒分 10% 以下の砂である。これらは、地質図からの情報である、砂岩泥岩互層とも一致している。榑木の土粒子密度は他と比べて若干小さい。露頭した東竹沢の泥岩はシルト岩であることがわかる。

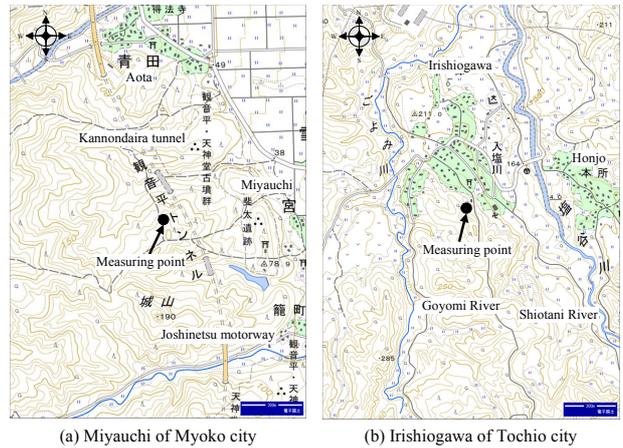


図 7 水圧測定地点の地形図(国土地理院)

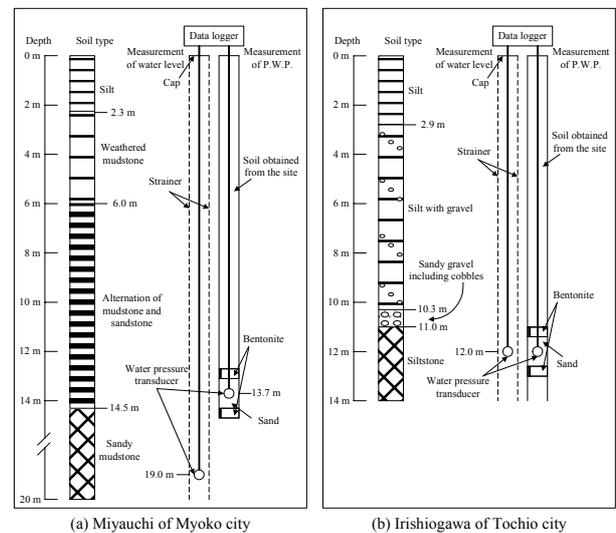


図 8 水圧計設置位置と土質柱状図

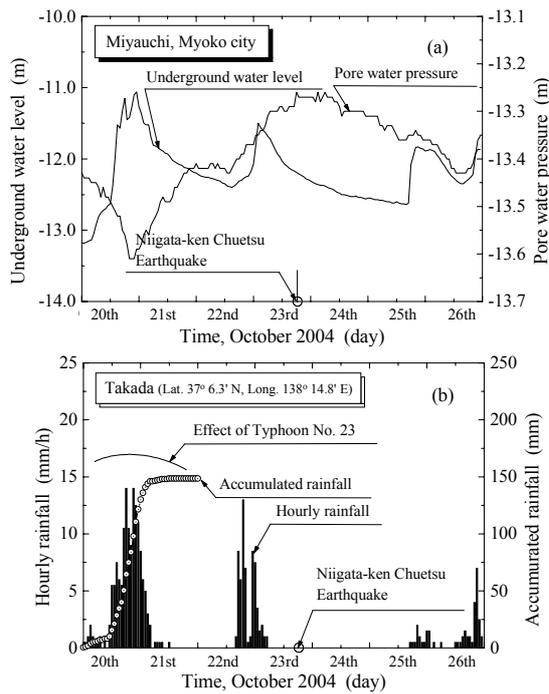


図9 地震時の地下水圧測定結果（宮内）

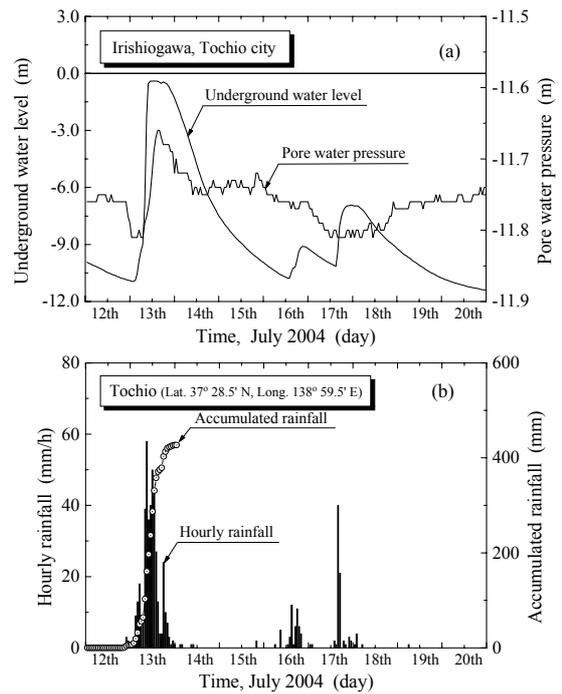


図11 豪雨時の地下水圧測定結果（入塩川）

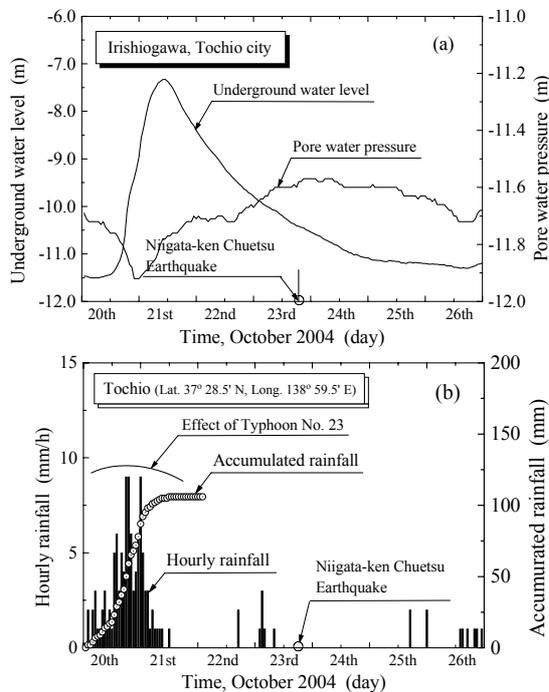


図10 地震時の地下水圧測定結果（入塩川）

4. 地すべり地での水圧測定

水位と水圧が地すべり地において測定されている。図7(a), (b)にそれぞれ、妙高市宮内と栃尾市入塩川の地形図を示す。図1には、新潟県での位置関係が示されている。観測点は、地すべり地の上部と推定される場所である。宮内の測定点は上信越自動車道の隣である。変位については測定されていないため、地震時の移動は明白ではないが、目視では移動は観測できなかった。

図8(a), (b)に宮内と入塩川それぞれの、水圧計設置深さと地質柱状図を示す。ストレーナー付きのボーリング孔が水位測定に使われ、水圧測定には、水圧計を砂で埋め、その上下をベントナイトで蓋をした。水圧測定用のボーリング孔は、原位置土で完全に埋め戻された。

図9, 10にはそれぞれ宮内と入塩川の測定結果と気象庁より提供された時間雨量が示されている。雨量のデータは、気象庁から提供されているものの中で最も測定点に近い地域のものが選ばれた。



写真 2 崩壊地の地震直後と融雪後の変化（その 1）

2004年10月20日の台風23号でまとまった雨量があり、累積雨量は100mmに達していることがわかる。地下水位は、降雨で即座に、宮内で2m、入塩川で4m上昇している。宮内と入塩川の水位上昇の差は、地質や地形の違いにあると考えられる。一方上昇した地下水位は、集水地形であるためか、数日かけてゆっくりと下降している。間隙

水圧に関して、両地点において同様の結果が得られた。すなわち、間隙水圧は10月20日に低気圧により下降し、その後ゆっくりと上昇している。間隙水圧は中越地震時にピークを取っているが、その上昇は水頭に直して約20cmほどで、斜面崩壊に影響したとは考えにくい。宮内においては、地震前夜にもまとまった雨が降っている。



写真2 崩壊地の地震直後と融雪後の変化（その2）

追加情報として、図11に2004年7月13日新潟豪雨時の入塩川の観測結果も示しておく (Toyota et al., 2006). 不幸にも、宮内ではデータが得られなかった。総雨量は400mmに達し、地下水位は10m以上も上昇した。しかしながら、間隙水圧は水頭で数十センチの上昇である。これらの結果より、間隙水圧は、それほど変化しない層で測ら

れている可能性がある。

5. 斜面崩壊地の融雪後の変化

2004年の冬は、新潟県中越地方は20年ぶりの大雪となった。崩壊した斜面は水が浸透しやすくなっているため、水の影響で容易に再度崩壊する危険性も高い。また、地すべり地帯では、融雪時

期に最も土塊が移動し、地すべりを起こしやすいといわれている。そこで、主な崩壊地点について、崩壊直後と、融雪後に調査を行った。写真 2, 3 にはそれらの比較を示す。

寺野 (写真 2(a)) においては、崩壊後早い時期より、河道閉塞対策工が取られた。これにより、融雪時にもそれほど水位が上昇することなく、のりきることができた。写真からわかるように、融雪後に大きな変形跡は確認できない。

南平 No.1 (写真 2(b)), No.2 (写真 2(c)) は、表層崩壊である。ここでも融雪後に新たな土砂崩壊は認められない。すべり落ちた木も、根が生きているためか、ほとんどが枯れずに残っている点は興味深い。崩壊斜面は急斜面であるが、新たな植生が芽生えはじめている。

檜木 (写真 2(d)) においては、河道閉塞対策工が進んでいる様子が見える。場所によっては、10m 近くの厚みで崩壊しているようであるが、表層崩壊に分類されるであろう。しみ出してくる水の影響か、若干表層土砂が削られているようにも見受けられるが、大きな崩壊は起こしていない。

東竹沢 (写真 2(e)) は、滑落崖は低固結の砂である。写真でははっきりしないが、融雪時に滑落崖が少し後退したということである。大きな被害には至っていないが、今後も滑落崖が後退していく可能性があるため、対策が必要であることがわかる。

油夫 (旧山古志村役場の裏の斜面) (写真 2(f)) であるが、ここにおいても融雪後に大きな変化は見られない。

旧山古志村の民俗資料館を越え、池谷の集落に向かう道 (写真 3(a)) であるが、地震により土石流的な崩壊が起こっている。少し表層土砂が減っているようであるが、雨の影響か、融雪の影響か明確ではない。

池谷の集落を越え、寺野方面に向かう途中にある雪崩防護柵 (写真 3(b)) である。基礎の形態が違うのか、赤い雪崩防護柵は崩れ落ちているのに対し、周辺地盤は崩れているものの、銀色の防護

柵は、崩れ落ちていないように見える。このような状態で、雪崩防護柵が雪に耐えられるか疑問であったが、雪崩防護柵はほとんど移動していないようである。

濁沢 (写真 3(c)) は、中越地震において、家屋ごと土塊が移動し、人的被害のあった数少ない地すべりの一つである。整地されて、その変化がわかり難いが、融雪により大きなすべりが誘発された様子はない。

妙見 (写真 3(d)) は、岩盤崩落に分類され、道路を走行中の車が巻き込まれた。上越線の安全性のため、落石を防ぐ工事が行われている。こちらも大きな変状は見られない。

小栗山 (写真 3(e)) では、中越地震により、土石流が発生した。表層土、細粒土が流されたような跡はあるが、大きな変状は見られない。



写真 4 崩壊地からの試料採取と成形の様子

塩谷（大日山）（写真 3(f)）では，中越地震による最大級の地すべりが発生した．滑落崖は東竹沢と同じく，低固結の砂である．大きな変状は見られないが，滑落崖が少し削られた様子がある．

このように，調査した範囲内では，融雪により大きな崩壊は誘発されていない．水が浸透しやすい状態であったものの，地震により不安定斜面が崩れ，安定化した状態になっていたため，大きな崩壊が起こらなかったであろう．20年ぶりの大雪ということもあったが，崩壊斜面には雪が着きにくいのか，雪崩は頻繁に発生した．雪崩には十分注意する必要がある．今回の崩壊に限らず，行われていることであるが，滑落崖をそのままにしておくとともにさらに後退していく可能性があるため，対策を施す必要があることがよくわかる．

6. 採取試料の力学試験

柵木の崩壊現場（写真 1(e)）で採取した試料を詳細に調べることとする．写真 4(a)のような崩壊面側方から，ブロックサンプルを採取し，実験室で三軸と一面せん断試験を行うために成形した（写真 4(b)）．固結度は低く，注意して扱わないと，簡単に手で割れる程度であった．粒径加積曲線は図 6 に示してある．供試体サイズは，三軸試験で，直径 5cm，高さ 10cm，一面せん断試験で，直径 6cm，高さ 2cm である．供試体は，二重負圧法で飽和させた．有効平均主応力 p' 一定の排水三軸圧縮試験（軸ひずみ速度 0.02 %/min）と定圧一面せん断試験（せん断変位速度 0.02 mm/min）を行った．近接した同様な層に，2 種類の密度があり，1 つは非常に密($e=0.69$)，もう 1 つは中密($e=0.85$) である．JIS A 1224 による最大，最小間隙比はそれぞれ，1.207，0.676 であった．

図 11 と 12 にそれぞれ不攪乱試料の三軸と一面せん断試験のせん断挙動を示す．一面せん断試験は，中密砂のみで行われた．密な砂では，明確なピークが応力ひずみ関係に表れ，堆積膨張挙動を取っている．

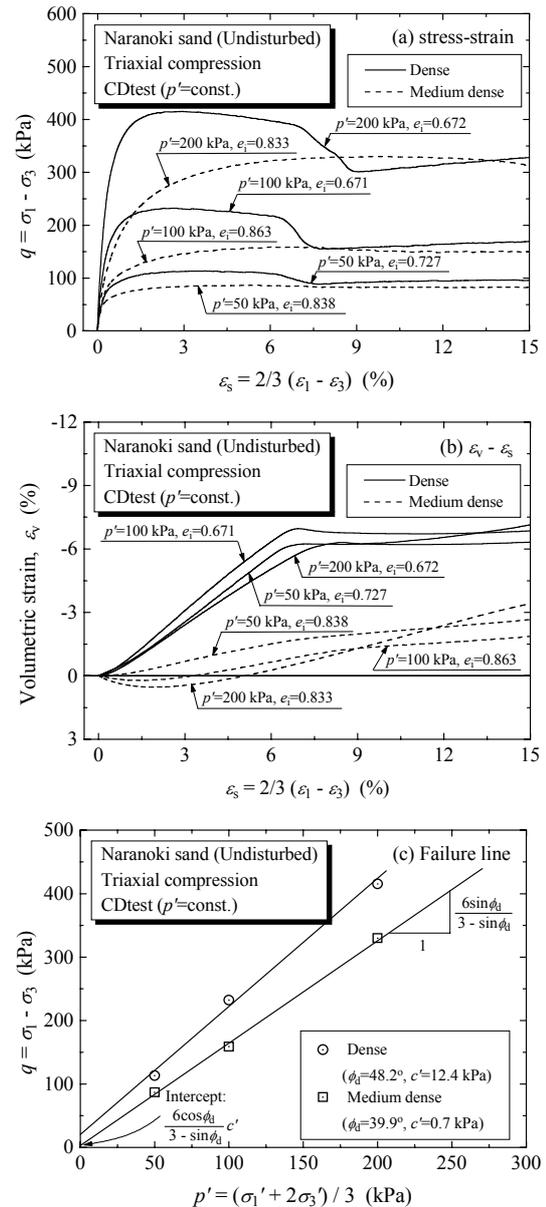


図 11 柵木より採取した試料の三軸圧縮試験

対照的に，中密砂ではピークが不明確で，拘束圧が大きいケースにおいては，ひずみの小さい領域で，圧縮的な挙動を取っている．間隙比とせん断挙動から，密な柵木砂は，相当密であることが読みとれる．ピーク後の終局状態において，密な砂の終局強度は中密砂の終局強度とほぼ一致する．これは，密な砂と中密砂が同じ物理的性質を持っているからである．一面せん断試験においても，三軸試験と同様のせん断挙動が得られた．

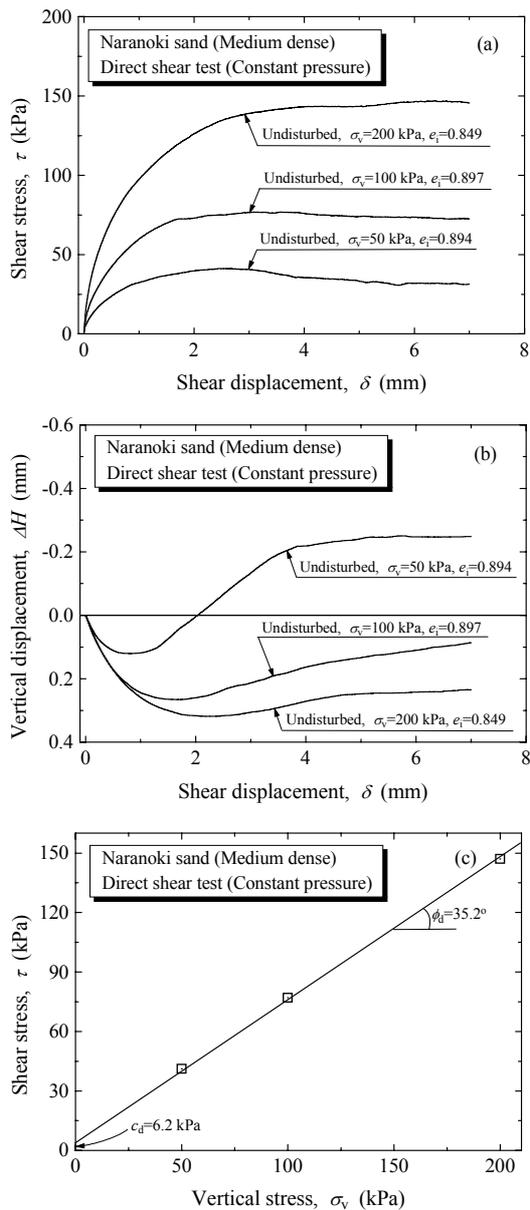


図 12 柵木より採取した試料の一面せん断試験

図 11(c)と 12(c)にそれぞれそれぞれ三軸試験と一面せん断試験から得られた破壊線を示す。密な砂は中密砂よりずっと大きな内部摩擦角と粘着力を持っている。中密砂において、三軸試験から得られた内部摩擦角は、一面せん断試験から得られてのものより大きい、三軸試験から得られた粘着力は一面せん断試験から得られたものより小さい。この理由は、データのばらつきが小さくても、強度定数 c' 、 ϕ_d は敏感に変動してしまうから

である。いずれにせよ、中密砂の粘着力は非常に小さい。つまり、中密柵木砂層のセメンテーションや年代効果は小さいといえる。

破壊は中密層で引き起こされたと考えられるため、再構成供試体を湿潤締め法で中密($e=0.85$)に作成し、水分特性曲線を求めた。湿潤締め法においては、10%の土を直径 5cm のモールドに入れ、密度を調整するために、1cm の層ごとに、直径 2cm の締め棒で注意深く突き固めた。

図 13 に加圧板法による脱水過程で求めた水分特性曲線を示す。実験は三軸試験装置を用い、 $p_{net}=100$ kPa のもとで行われた。この中密砂の空気侵入値は 5 kPa から 10 kPa の間にある。砂であるので、飽和度は空気侵入値において、劇的に低下している。つまり、この土が定常状態にあるならば、飽和しているか、またはかなり低い飽和度にあるかのどちらかであると考えられる。

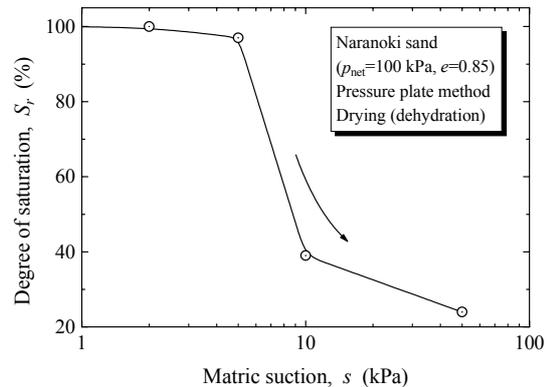


図 13 柵木より採取した試料の水分特性曲線

7. 結論

新潟県中越地震は中山間地に多大な被害をもたらした。地すべりが河道を塞ぎ、天然ダムを形成した。このような地すべりには、活褶曲地帯という、地形的、地質的特徴があることがわかった。天然ダムの問題は、集落を水没させ、全村民が避難を強いられるなど、社会問題となった。さらに、下流の集落も天然ダム崩壊による土石流の危険性にさらされた。これらの斜面崩壊のメカニズムを解明するために、詳細な調査が行われた。主な

知見は次の通りである。

1. 新潟県中越地震で起こった大地すべりは、地すべり地形と一致しており、再滑動型と考えられる。
2. 融雪時にゆっくりと土塊が移動する地すべりは、第三紀または第四紀の泥岩層で多く起こるが、地震時の斜面崩壊は、主に軟らかい砂岩の地質で起こっている。
3. 表層崩壊は受け盤の急崖で多発し、大地すべりは、しばしば、流れ盤のゆるやかな斜面で起こる。
4. 台風 23 号の影響により、宮内や入塩川の地すべり地帯では地下水位が数メートル上がった。しかし、中越地震時には、その上昇した地下水位の 8 割程度は低下していた。
5. 榑木崩壊地には、密と中密砂層が存在した。三軸圧縮試験の結果、中密砂層で破壊が起こったと推測できる。
- 5) (独) 防災科学技術研究所, 山古志村周辺地すべり分布図
(http://lswb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_minni/jisuberi_top.html)
- 6) 竹内圭史, 柳沢幸夫, 宮崎純一, 尾崎正紀, 中越魚沼地域の 5 万分の 1 数値地質図 (Ver.1), 地質調査総合センター
(<http://www.gsj.jp/GDB/openfile/files/no0412/index.html>)
- 7) 柳沢幸夫, 小林巖雄, 竹内圭史, 立石雅昭, 茅原一也, 加藤碩一, 5 万分の 1 地質図幅「小千谷」。地質調査所, 1986.
- 8) Toyota, H., Nakamura, K. and Sakai, N. (2006): Evaluation of dike and natural slope failure induced by heavy rainfall in Niigata on 13 July 2004, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 1, pp. 83-98, 2006.

謝辞

多くの研究者と一緒に現地調査を行う機会があり、様々な情報を得ることができた。土質試験は、長岡技術科学大学環境・建設系地盤研究室の学生の協力により実施された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 山古志村史編集委員会, 山古志村史史料二, 1981.
- 2) (社) 日本地すべり学会新潟支部編集, 新潟県地すべり災害の記録 (2003 年度版), CD-Rom 版, 2003.
- 3) 新潟県, 土地保全図 (防災・保全等規制図), 1982.
- 4) 国土地理院, 平成 16 年新潟県中越地震災害状況図
(<http://zgate.gsi.go.jp/niigatajishin/index.htm>)