

2004年新潟県中越地震による斜面災害 -再活動地すべりにおける地震時高速地すべり発生・運動機構-

佐々恭二・福岡 浩・汪 発武・王 功輝

要 旨

2004年新潟県中越地震による斜面災害の全体像を紹介すると共に、地すべりダムを形成した東竹沢地すべり及び寺野地すべりを対象に、現地調査及びリングせん断試験を実施し、再活動地すべりにおける地震時高速地すべり発生・運動機構を研究したものである。東竹沢地すべりと寺野地すべりとも過去に地すべりを引き起こした移動土塊内部の再活動である。斜面土層は、海成の砂層とシルト層から形成されていたことから、この両者からサンプルを採取して地震時地すべり再現試験を行った結果、砂層ではすべり面液状化が発生し、高速地すべりが生じること、一方シルト層はほとんど移動しないことが見いだされた。また、同時に降雨・融雪により地すべりが発生する場合は、シルト層ですべることも推定された。

キーワード：地すべり，地震，降雨，砂層，シルト層，すべり面液状化

1. はじめに

本稿は、平成16年度京都大学防災研究所・研究発表講演会において、文部科学省科学技術振興調整費「平成16年(2004年)新潟県中越地震に関する緊急研究のサブテーマ2：地震時の土砂災害研究(研究代表：佐々恭二)」として実施した研究の中から、地すべり分布に関する国土地理院と防災科学技術研究所の実施した内容を紹介した後、斜面災害研究センターが担当した高速地すべり発生運動機構の研究結果を発表したものをとりまとめたものである。

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震(本震M6.8)では、山古志村、小千谷市とその周辺で数多くの地すべり(幅50m以上のもので234カ所：国土交通省調べ)が発生した。地震による地すべり災害としては、平成7年の兵庫県南部地震以降で最大規模のものとなった。平成7年の兵庫県南部地震での地すべり災害(特に仁川地すべり)の場合は、歴史上最も降雨の少ない年に続く渇水期(1月17日)に発生したのに対し、今回の地震時地すべりの特徴は、7月の新潟豪雨、福井豪雨の際の多量の降雨につづき、全国に大きな災害をもたらした台風23号の影響で地震の直前の10月20日にも100mm以上の降雨があったこ

とであり、地すべりの2大誘因である地震と降雨の影響が重なった斜面災害、すなわち地震・降雨複合斜面災害とも呼べる。また、山古志村を中心とする地域は、日本の代表的な再活動地すべりである三紀層地すべりと呼ばれる地すべり分布地帯であり、規模の大きな地すべりを引き起こす構造を持っている地域であることも特徴である。

今回発生した地すべり災害の中で注目されたものの一つは、地すべりにより川が閉塞されてダムが形成されたことである。地すべり土塊によって河川が閉塞されて湖が形成される現象は、国際的にLandslide dam(地すべりダム)と呼ばれている。

1986年に開催されたアメリカ土木学会の特別セッションとして「地すべりダム：形成過程と危険度及び軽減」が開催され、米国、カナダ、日本、中国などの例が発表され、単行本として編集され出版されている(Schuster, 1986)。

また、Landslides(地すべり)については、1990-2000年に国連主導で世界的に実施された「国際防災の十年」の活動の一環として国際地質学連合、ユネスコの協力の下で世界の地すべり関連の国際学会の委員で組織された「世界地すべり目録委員会」における検討により、Landslidesを「岩、土あるいは

その混合物の斜面下降運動」と定義した(Cruden and Varnes, 1996)。これを受けて日本地すべり学会でも議論を行い、学会の地形地質用語委員会の検討を踏まえて、日本語の「地すべり」の学術定義としては、国際的なLandslidesの定義と同じく「岩、土あるいはその混合物の斜面下降運動」とすることとした(佐々恭二, 2004)。一方、日本においては、再活動型の地すべり、すなわち繰り返しゆっくりと動く地すべりを指すことが多い。そこで紛らわしい場合には、従来の速度が遅く繰り返し移動する再活動型の地すべりを意味する場合は、地すべり(狭義)、Landslidesの意味で使う場合は地すべり(総称)あるいは地すべり(広義)と注釈をつけることが望ましいが、紛らわしくない場合は、ただただし書きは必要ではないとした(大八木, 2004)。日本で用いられている地すべりと地すべりの分類は、厳密には難しいため本稿では、地すべり・斜面崩壊・岩盤崩落等の総称として地すべり(広義)を用いることとする。

地すべりの速度範囲は、極めて広いが、Cruden & Varnes (1996)では、Very rapidを50 mm/sec以上、Extremely rapidを5m/sec (Very slowは、1.6m/year,

Extremely slowを16 mm/year)としているが、被害に重点をおいて高速を定義すると人が危険にさらされる速度として1m/秒以上を高速と呼ぶのが適当と思える(IUGS高速地すべり予測委員会での検討)。したがってここでは1m/秒以上の速度で動く地すべりを高速と呼ぶことにする。

今回発生した高速地すべりの代表的なものが、大規模な地すべりダムを形成した「東竹沢地すべり」と「寺野地すべり」である。本論文では、まず中越地震で発生した各種の地すべりの典型的なものを紹介し、ついで両地すべりについて実施した現地調査、サンプル採取、及び地震時地すべり再現試験の結果とこれらを総合して見いだした再活動地すべり地における地震時高速地すべり発生・運動機構について報告する(Sassa et al., 2005a, 2005b)。

2. 斜面崩壊分布図について

地すべり分布については、科学技術振興調整費緊急研究において国土地理院と防災科学技術研究所が担当したのでその研究成果を次に紹介する。

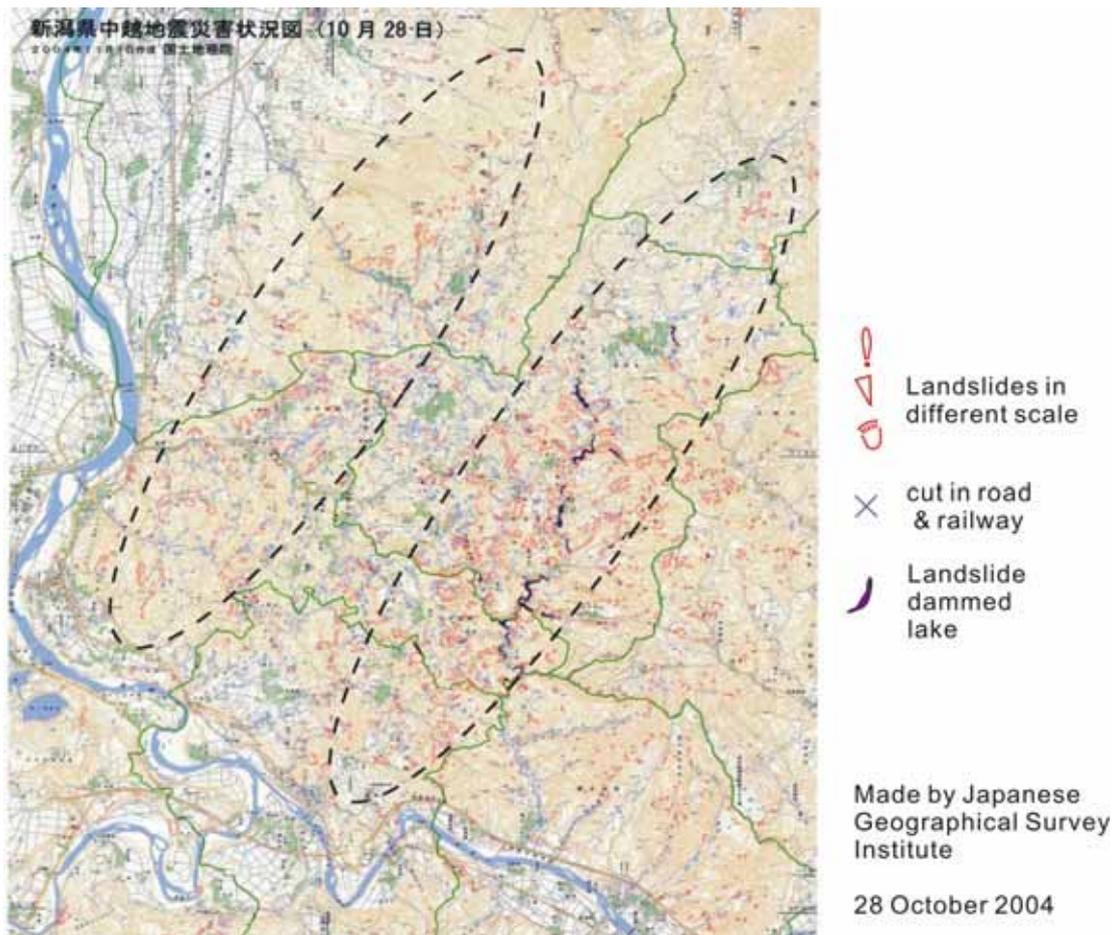


Fig. 1 Distribution of landslides triggered by the earthquake. Mapped landslide dams indicate the areas as of October 28, 2004 (from Sato et al., 2005)

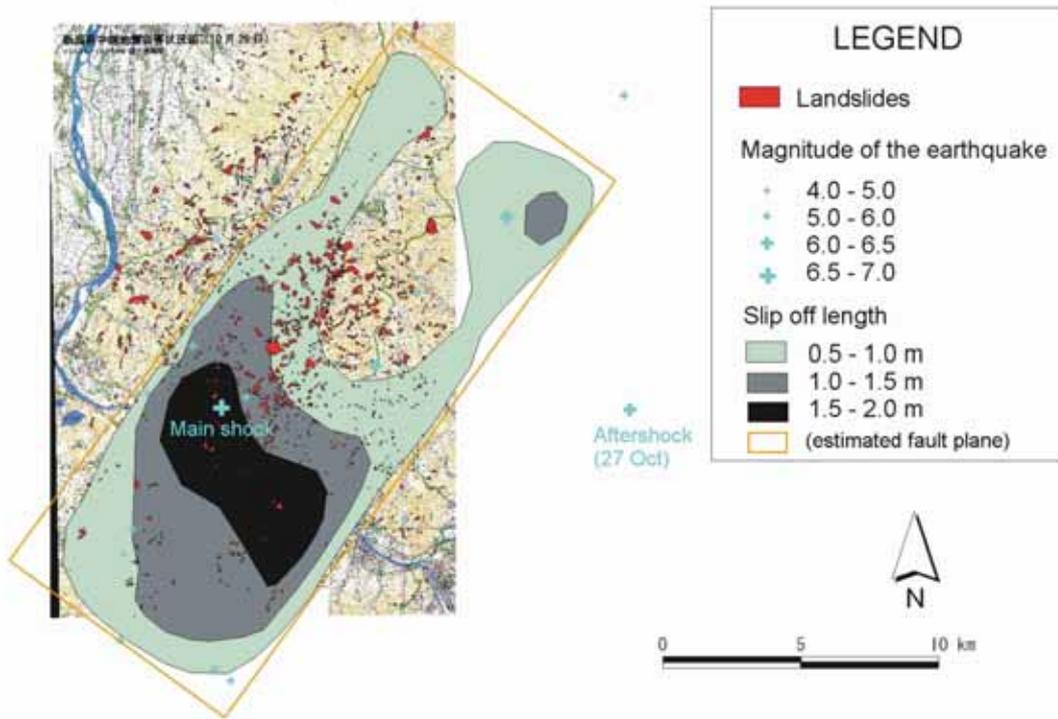


Fig. 2 Overlap of landslides distribution on the seismological data (from Sato et al., 2005)

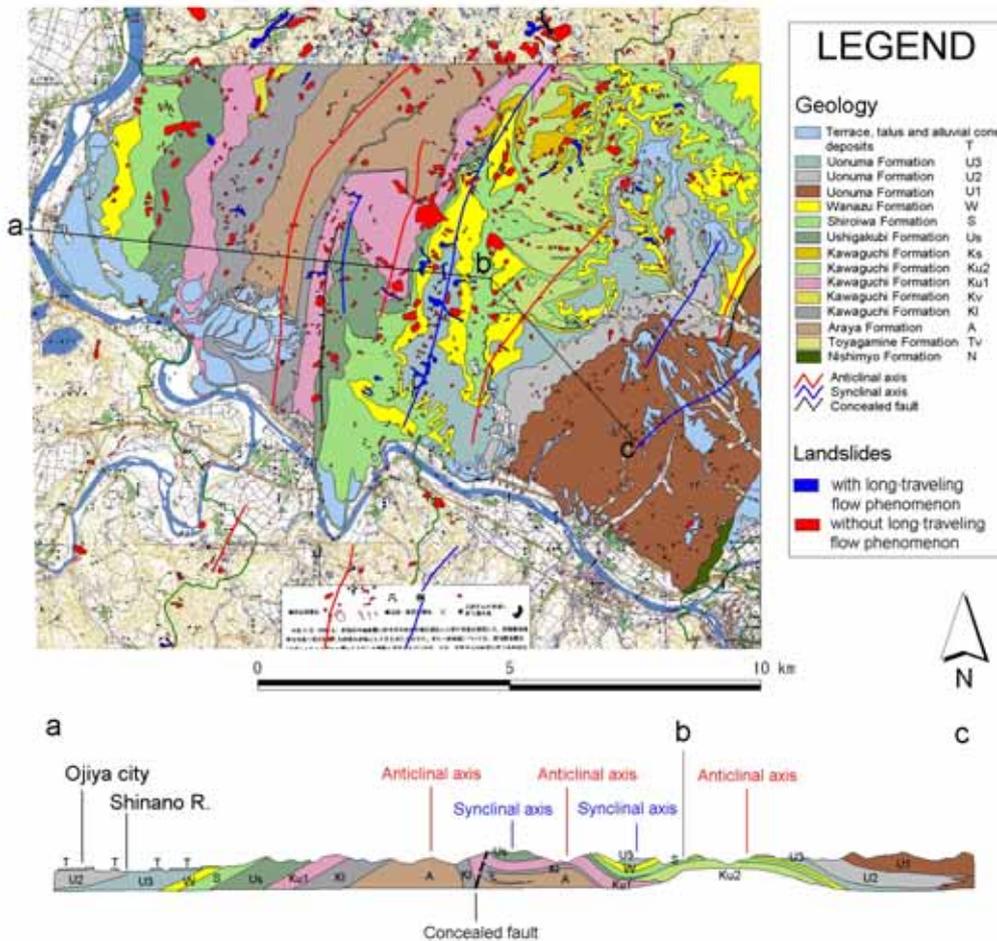


Fig.3 Overlay of landslide distribution over the geological map (from Sato et al., 2005)

図1は国土地理院によって、2004年10月24日と28日撮影の縮尺1/10,000と12,500空中写真を判読した結果を1/25,000地形図の上に重ね合わせたもので、図上1mm×1mm以上の地すべりを図に示した地すべり分布図である。これらの地すべりは全部で1353箇所が確認でき、大きく分けて二つの地すべり集中帯(点線で囲まれている)が認められる。その形成機構を解明するために、地すべり分布と震源データの重ね合わせた結果、図2に震源と地表面に投影したモデル断層面上のすべり量の分布を示す。今回の地震の発生機構は、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である(気象庁, 2004)。

図2から、下盤側ではあまり地すべりは生じていないが、上盤側では多発していることが判った。断層のすべり量の大小と地すべりの多寡に関連性は見出せないことが明らかになった。そして、地すべり分布と数値化した地質データ(柳沢他, 1986)との重ね合わせた結果を図3に示している(Sato et al. 2005)。地すべりの分類は、長距離運動した流動性地すべりとそれ以外の非流動性地すべりの2分類で表示している。図3のa-b-c地質断面で見ると、2列の地すべりの多発帯は、荒谷層(新第三紀塊状泥岩)が分布する背斜軸よりも西側にある地層が西に傾斜してケスタ状の地形をなしている部分と、芋川を中心とする向斜軸に沿った部分に相当している。

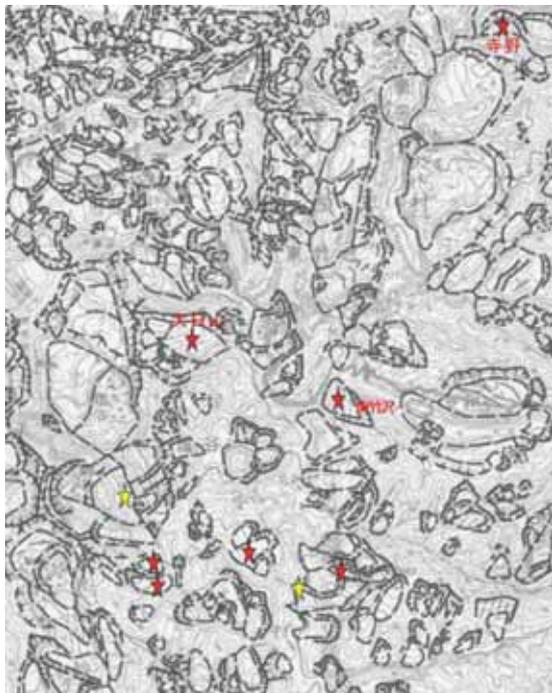


Fig. 4 Landslide distribution map in the Ojiya area with the scale of 1/50000 (from Inoguchi et al., 2004)

防災科学技術研究所(井口他, 2004)の研究によ

ると、今回の地震で大きな被害をもたらした斜面変動は再滑動型の地すべりが主体であり、それらは地震前から防災科学技術研究所の地すべり地形分布図に判読されていた(独立行政法人防災科学技術研究所, 2004a)。マッピングによって抽出された地すべり型の変動のうち7割が地すべり地形に関連した斜面である。地震前から存在した地すべり地形と中越地震で発生した斜面変動の関係を見ると、1)地すべり移動体のほぼ全体がそっくりすべったもの; 2)地すべり移動体の末端部分がすべりを起こしたもの; 3)地すべり地形の滑落崖の部分に変動域が拡大してすべったものの3種類が確認できた。この再滑動型の地すべりの発生域は芋川とその支流に多く分布し、流れ盤型のすべりが多く砂岩卓越層地域で発生し、地すべりが地質構造と地質構成に依存していることが分かる。図4に2004年3月に防災科学技術研究所(2004a)が発行した地すべり地形分布図を示す。この図に示した様に本地域は大小様々の地すべり地形が分布している。

例として、東竹沢地すべり(図5)と寺野地すべり(図6)を取り上げて説明する。東竹沢地すべりは芋川の左岸、山古志小学校の対岸の斜面で生じた地すべりである。幅300 m、全長400 mの勾配15度の斜面で層すべりが発生し、一部が対岸の斜面に乗り上げて芋川を堰止めた。この堰止めにより上流側に地すべりダム湖が形成され、上流の集落が水没する被害を生じた。地すべりを起こした斜面はかなり明瞭な地すべり地形を呈していた(図5)。この地すべり地形は流れ盤型の地すべりである。中越地震で発生した地すべりは古い地すべり移動体のほぼ全体に近い範囲で滑りを生じている。

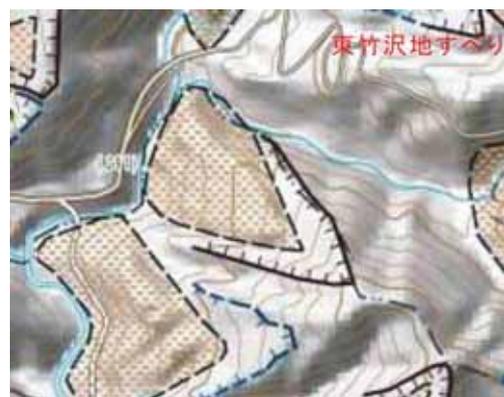


Fig. 5 Landslide distribution map around the Higashi Takezawa landslide (dotted mesh: topography changing area; dotted line: deposited area)

寺野地すべり(図6)は東竹沢より芋川を4.5kmほど上流の左岸斜面に発生した地すべりである。同じ

く芋川をせき止めて地すべりダム湖を形成している。地すべりの幅は200m、全長350mである。寺野付近の地すべり地形は何回かの変動によって形成されている場所で、三段の地すべりが重なり合っている(図6)。今回の地震で滑動したのは最下段の地すべり地形で、ほとんどそのままの形状で滑り落ちている。



Fig. 6 Landslide distribution map around the Terano landslide (dotted mesh: topography changing area; red line: deposited area)

3. 典型的な斜面崩壊

図7は2004新潟中越地震によって発生した典型的な地すべりの場所と本震の震央を示している。今回発生した地すべりのうち地域に最も大きな危険性をもたらしたのは東竹沢地すべりである。東竹沢地すべりは芋川を塞ぎ止めて、大きな地すべりダムを形成した。図8a, bはヘリコプターから撮った地すべりの全体写真である。因みに、図8aは11月3日に撮影したもので、図8bは11月6日に撮影したものである。図8aに見える道路橋は地すべりダム湖に水没されていることが確認される(図8b)。二つの写真から、東竹沢地すべりは約100メートルを運動した後でも、ほとんど形がくずれていないことが分かる。図8bから分かるように、地すべりの上にある樹木は立ったままである。しかし、地すべりが芋川の中に入り込んで、そして、川を乗り越えて、対岸まで上りあがったため、末端部で分布している樹木は後方への回

転を示している(図8a)。写真の中の建物は山古志小学校である。図8cからは、地すべりの先端部の土砂が学校の玄関及び窓から高速で流れ込んで様子と高速で移動して来た土砂が建物の壁に飛び散っている状況が確認できる。このような現象はこの地すべりの高速運動の特徴を示している。学校の建物に流れ込んだ土砂と壁についている泥は、おそらく地すべり土塊の対岸への衝突による衝撃により、末端部の一部が小さい地すべりとして跳ね出たものと思われる(図8aの中の“A”で示している小さい地すべりブロック)。この部分の土砂は樹木を含まず、芋川の中あるいは周辺のもので地すべりによって押されて、そして運ばれたものと考えられる。図8dは横から見た東竹沢地すべりであり、地すべりの高い流動性がこの横からの写真で推定できる。源頭部の滑落崖から末端までの勾配で示す地すべり運動中の見かけの摩擦角は7.5度であった。地すべりの末端部は芋川の対岸に上った。地すべりダムの越流を防ぐために、ダムの最も低いところには、自衛隊のヘリによって運ばれた土のうが積まれている。立ったままの樹木より、地すべりが液状化したすべり面でスムーズに運動したことが推定できる。すべり面はおそらく飽和されていたと思われるが、すべり面以上のすべり面土塊部分は、森林が乱れることなく立っていることからあまり飽和されていなかったと思われる。

寺野地すべりは、東竹沢地すべりの北4.5 kmのところでも発生し、地すべりダムを形成した。寺野地すべりも過去運動した地すべりブロックの中で発生した。図9aは緩斜面で発生した寺野地すべりの全体写真を示しており、地すべり土塊が芋川を塞ぎ止めて、地すべりダムを形成していることが判読できる。地すべりの発生地域はかつての水田である。中には民家や他の建物がなかったため“地すべり防止区域”に指定されていなかった。しかし、その隣は“地すべり防止区域”と指定されている。図9bの写真には、一軒の民家がちょうど地すべりの境界に立っていることが分かる。

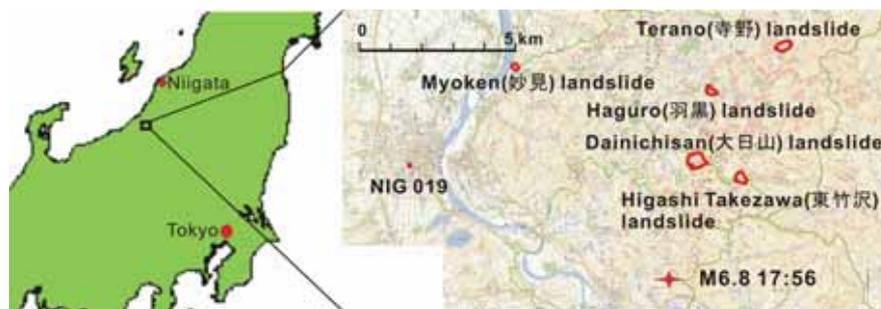


Fig. 7 Locations of typical landslides triggered by the M6.8 Mid-Niigata Prefecture earthquake

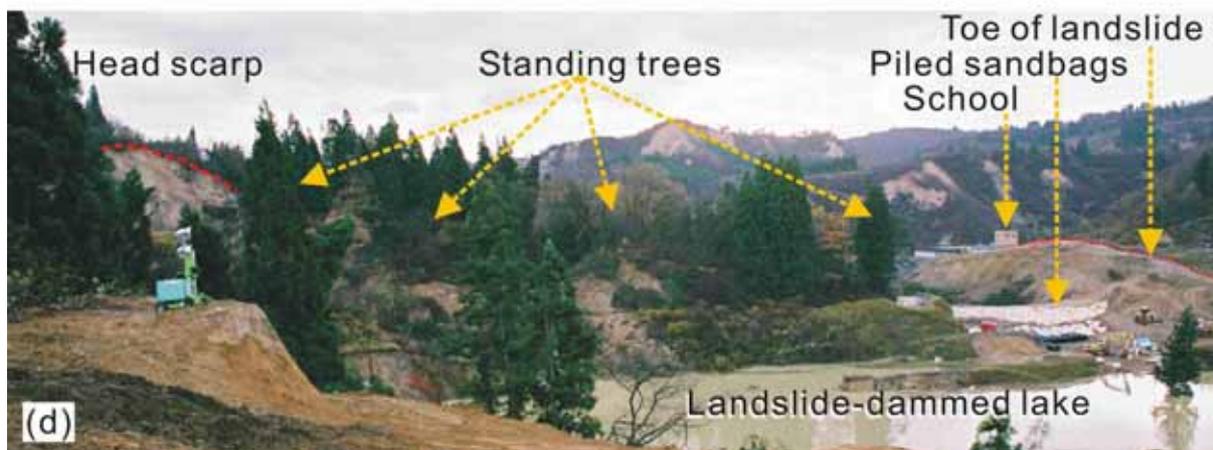
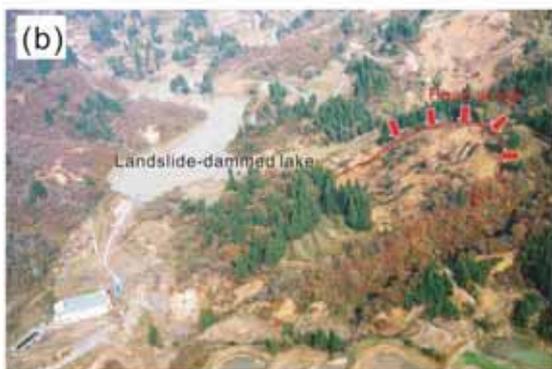


Fig. 8 General view of the Higashi Takezawa landslide

a) Oblique airphoto taken by Marui on 3 November 2004, b) Oblique airphoto taken by Sassa on 6 November 2004, c) Debris intruded into a school building, d) Side view of the Higashi Takezawa landslide taken on 16 November 2004

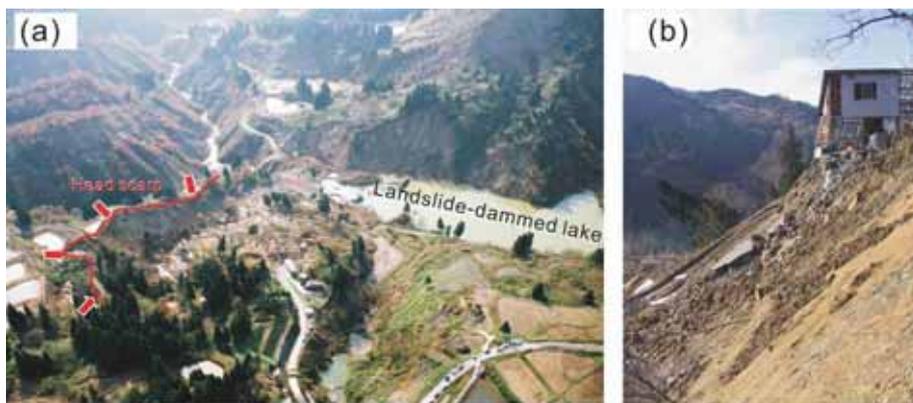


Fig. 9 View of the Terano landslide and landslide distribution map of the vicinity
 a) Oblique airphoto taken by Sassa on 6 November 2004, b) Side view of the Terano landslide

2004年新潟中越地震によって引起された地すべりの中で、規模的に最も大きいのは大日山地すべりである。大日山地すべりは東竹沢地すべりの西約1kmに位置している。図10aの写真で示されているように、大日山地すべりは典型的なslump型地すべりである。芋川まで到達していないため、地すべりダムを形成しなかった。図10bの写真は露出したすべり面を示しており、傾斜しているシルト岩の層理面であることが判断できる。

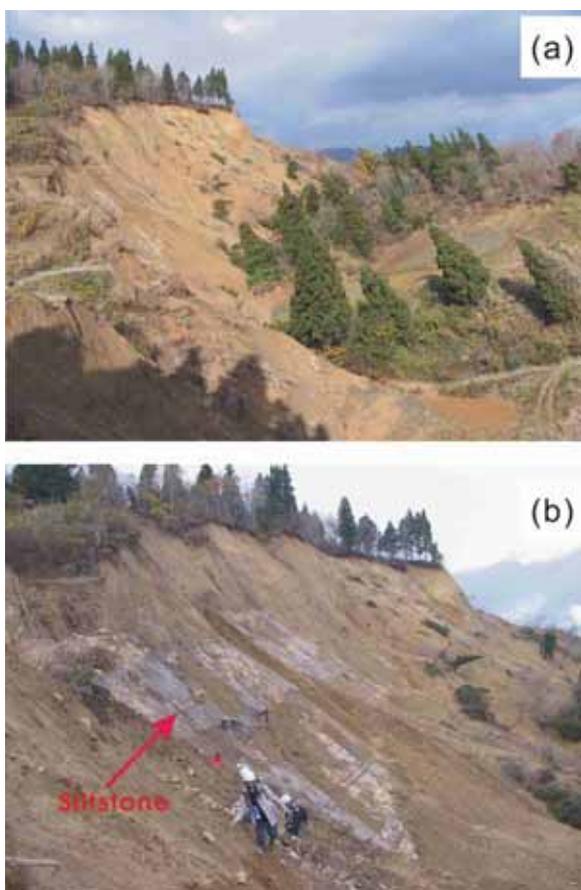


Fig. 10 The Dainichisan landslide (a) and head scarp (b)

シルト岩の層理面の上には砂層が覆っている。今回の地震による地すべりのほとんどは砂層と(あるいは)シルト砂層の境界で発生している。すべり面が砂層の底面で形成していたか、あるいはシルト層の上面で形成されたかは、高速地すべりの発生機構を考える上で重要なポイントである。

東竹沢地すべり、寺野地すべり、及び大日山地すべりは深さ25-50mの深い地すべりである。そのほかに、羽黒地すべり(図11)は相対的に浅い。薄いすべり土塊が急な斜面をすべり下ったため、地すべり土塊は相当攪乱されている。この地すべりは一本の道路を破壊し、パーキング中の自動車を数多く潰したが、幸い人的な被害がなかった。



Fig. 11 Oblique airphoto of the Haguro landslide (taken from a helicopter by Sassa on 6 November 2004)

妙見地区では、相対的に規模の小さい地すべりが川沿いの道路を覆って、女性一人と子供二人が乗っていた車を埋めた(図12)。救急隊員が地すべり土塊に埋められた車を発見し、懸命に救援活動を行なったが、地すべり土塊が非常に不安定であるため、救援活動には三日間かかった。この救急活動はテレビ及び新聞に詳細に取り上げられた。救援活動の結果、2

歳の男児（優太ちゃん）が無事埋められた車から救出された。妙見地すべりは凸状の斜面で発生しており、地下水が豊富ではなかったと推定されるが、これが子供が地すべり発生後92時間たって救出できた理由の一つであると思われる。



Fig. 12 Oblique airphoto of the Myoken landslide (taken from a helicopter by Sassa on 6 November 2004)

4. 再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構

2004新潟中越地震による地すべりの特徴としては、(1)地震発生前の10月20日に台風23号の影響で、当地域では100 mm以上の降雨が記録され、いわゆる地震前の先行降雨があったこと；(2)多数の地すべりが再活動地すべり地内で発生したことが挙げられる。再活動地すべりの中で大規模な高速地すべりが発生したことは、これまで報告されておらず、今までに研究されていない。なぜ再活動地すべりの中で大規模高速地すべりが発生したのかメカニズム

の解明が必要である。そこで研究グループは東竹沢地すべり及び寺野地すべりを対象に平成16年11月5～7日と11月14～17日の2回の現地調査、及び室内リングせん断試験を実施し、再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構を調べた。

4.1 東竹沢地すべりの現地調査の概要

図13は、東竹沢地すべりをヘリコプターから撮影したものであるが、今回の地すべりによって形成された滑落崖の上に過去に発生した地すべりによって形成された滑落崖が認められる。図14は今回の地すべりによって形成された新しい滑落崖である。傾斜約20度の堅いシルト岩の層理面がフラットの的に露出している。地質的にはこの層理面が今回発生した地すべりのすべり面を形成したといえるだろう。シルト岩は、極めて強く締まっており明らかに透水性が小さく、その表面には地下水が流れていた。この面の上にある砂層は非常に粗であり、古い地すべりの一部だと思われる。

この場所の観察より、すべり面の位置に関して、疑問が生じる。露出したシルト岩層が非常に堅くて、それに沿ってすべることは困難だと思われる。しかし、砂層との境界付近のシルト層は豊富な地下水が存在したため、風化作用によって柔らかくなる可能性がある。よって、この露出している滑落崖において、すべり面の位置に関して、二つの可能性があると考えられる。1)シルト岩の上面にあったかもしれない風化・軟化層、2)シルト層の上にあった砂層の底部。



Fig.13 Higashi Takezawa landslide and the head scarp of past landslides (Taken by Sassa on 6 November 2004)



Fig. 14 Stiff silt (stone) layer outcropped in the head scarp (it inclined around 20 degrees to the landslide moving direction and groundwater flowed over the layer)



Fig. 15 Sampling from the sand layer behind the sliding surface and over the stiff silt (stone) layer

しかし、シルト岩の風化層はこの場所には見あたらなかったため別の場所でのサンプリング調査を実施することとして、露出したシルト岩の上部(後方)に堆積する砂層から攪乱試料を採取した(図15)。

どちらにすべり面を形成されたかは、後述のリングせん断試験により解決される。

図16は地震発生三日後(2004年10月26日)に朝日航洋株式会社が実施した空中レーザー測定の結果に

加筆した東竹沢地すべりの発生後の地形図である。

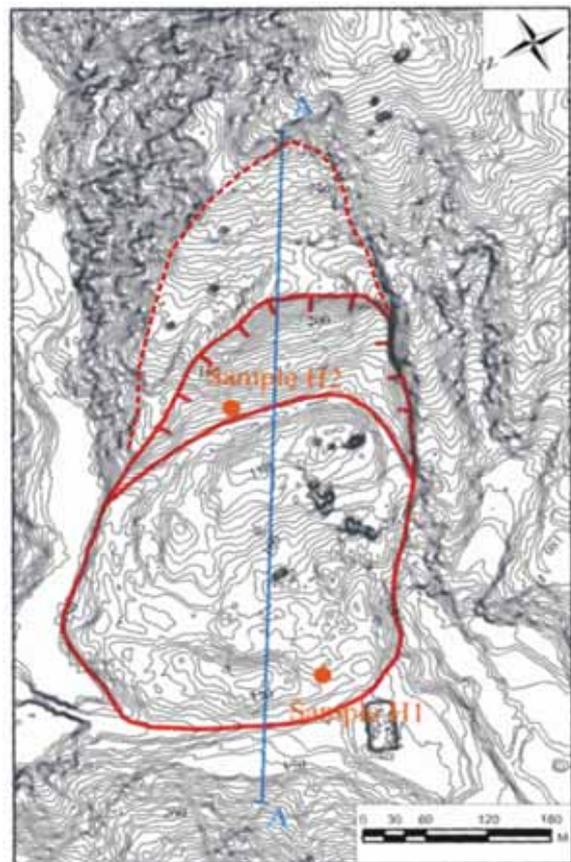


Fig. 16 Plan of the landslide (the map was made by the air borne laser scanning in the courtesy of Aero Asahi Corporation. Contour lines are 2 m spacing)

図16の平面図から、今回発生した地すべりの滑落

崖上方には、緩やかな斜面が存在しており、過去の地すべり地形を表している。その中央測線A-Aの断面図は図17に示しており、地震発生前の1/25,000の地形図を比較した上で、現場調査による地すべり運動に関する知見も表示している。今回の地すべり土塊は、おそらく融雪・降雨により過去にすべった地すべり土塊が、地震により再度移動したものとわれ

る。図17には、現地観察と後述する地すべりのメカニズムに関する研究成果を含めた解釈に基づき、今回のすべり発生前の土塊(土塊A: 細かなメッシュとB: 粗いメッシュ)、見にくい地すべり運動後の地すべり土塊(P3, P4, H1のあたり)と移動後の地表(after failure)を実線で示している。

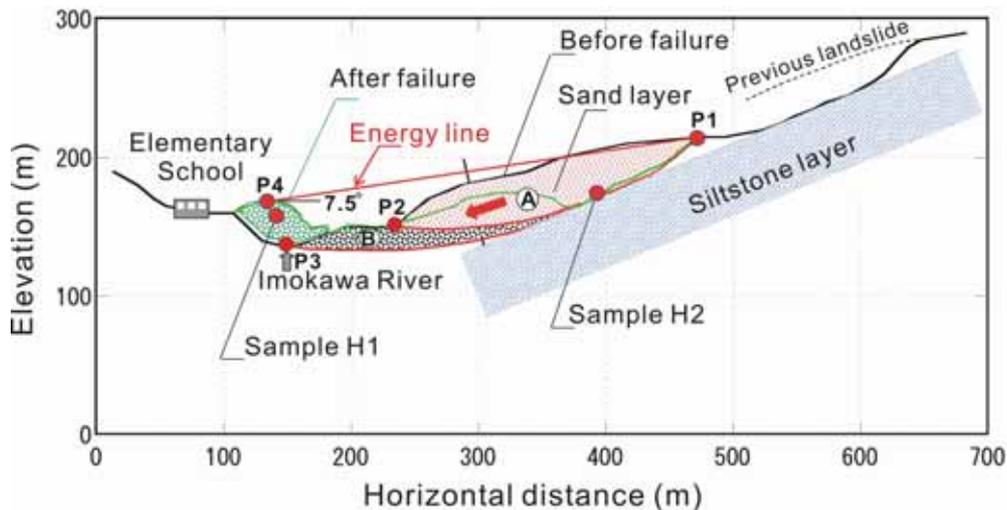


Fig. 17 Section of the landslide (the location of section is shown in Fig.5 as A-A line)

図17により、地すべり発生前のP1点とP2点間の斜面勾配は14.6度であり、P1点とP3点間の斜面勾配は13.5度である。地すべり運動中発揮したエネルギー線(P1点とP4点間)の勾配は7.5度くらいである。ゆえに、東竹沢地すべりは15度以下の緩斜面で発生し、運動中に発揮された見かけの摩擦角は7.5度であったことが分かる。エネルギー線とすべり土塊の重心との大きな差は、運動エネルギーを意味し、地すべりが高速運動になった理由と考えられる。

地すべり運動の順番に関しては、二つの可能性がある。1) すべり土塊Bが先に液状化し、末端部の支持力がなくなったため、すべり土塊Aが土塊Bの後について行くことが考えられる；2) 地震動によって、すべり土塊Aが先に運動し始め、それによって、すべり面で過剰間隙水圧が発生し、蓄積する。そして、土塊Aの運動が土塊Bに非排水载荷をさせる。その結果、土塊Bが土塊Aと共に動き出し、芋川を越えて、対岸を直撃する。土塊Bが芋川に近いため、その下半分は常時に飽和されていると思われる。この部分では、還元した部分は青色あるいは灰色を呈しており、酸化した部分は褐色を呈している。芋川の対岸特に小学校の付近では、還元した灰色の土が分布していたことが確認できた。

破砕性砂質土の中にあるすべり面での間隙水圧の

発生はせん断距離に大きく影響される(Wafid et al. 2004; Sassa et al. 2004)。すべり土塊Aには自重及び地震力によるせん断応力が载荷される。すべり土塊Bはほぼ平坦であったため、地震力のみによってせん断される。したがって、すべり土塊Aの底面が飽和されている時、すべり土塊Bより、せん断面に大きなせん断変位が発生し、大きな過剰間隙水圧が発生すると推定される。芋川沿いには、多数の台地が分布しているが、液状化現象はほとんど観察されなかった。もう一つの原因としては、この地域に分布している砂層は第三紀の海成の堆積物であるため、非常に固くて、液状化しにくいものである。海まで長距離運搬されたため、柔らかい部分は既に存在しなくなって、堆積物としては、火山灰、凝灰岩及び風化した花崗岩よりは液状化しにくい。また、すべり土塊Bの深さ(河床以上約13 m)はすべり土塊Aの深さ(約40 m)より、かなり小さい。大きい荷重でのせん断や振動は粒子破碎をより発生させやすく、過剰間隙水圧も上昇させやすい。よって、地すべり土塊の運動の順番としては、すべり土塊Aが地震動及び大きい自重によるせん断応力によって先に動き出したと考えられる。後述のように、すべり土塊Aを対象にリングせん断試験装置を用いて、東竹沢地すべりの地震時再現試験を行ない、その発生・運動

メカニズムを検討・検証した。



Fig. 18 Overview of the Terano landslide (Taken by Sassa on 6 November 2004)

4.2 寺野地すべりの現地調査の概要

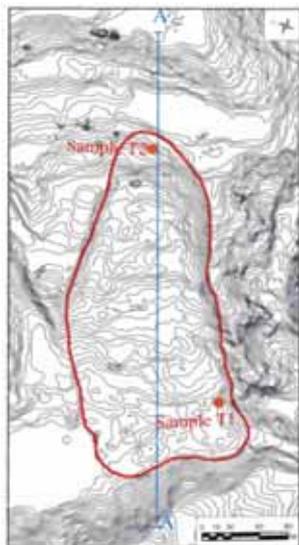


Fig. 19 Plan of the Terano landslide (A: Plan obtained from air bone lazard scanner. Contour lines are 2 m pitch)

図18は寺野地すべりの全体写真である。滑落崖の上に見られる水田も過去の地すべりによって形成された地形の一部と思われる。寺野地すべりの主体も三紀層の砂層であった。この砂層からサンプルT1を採取した。また、源頭部に出ていたものは完全に軟化したシルト層であり、すべり面が形成される可能性があると考えられたことから、このシルト層からサンプル(T2)も採取した。図19に寺野地すべりの平面図、図20にその中央断面を示す。P1点(地すべり頭部)とP2点(河岸頂部)間の勾配は14.9度で、P1点とP3点(川沿い)間の勾配は17.5度であった。地すべり運動中発揮された見かけの摩擦角(P1点とP4点間の勾配で示す)は12.7度であった。東竹沢地すべりと比べて、エネルギー線とすべり土塊の重心との距離は小さいので、寺野地すべりは東竹沢地すべりより速度は遅かったと推定される。

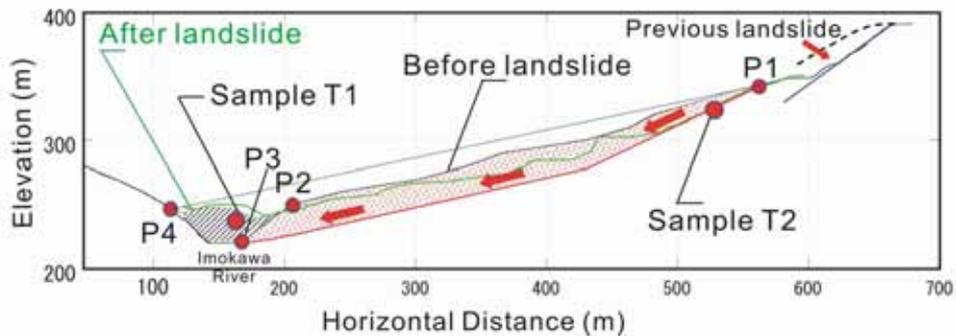


Fig. 20 Central section A-A of the Fig.19

4.3 現地から採取したサンプルのリングせん断試験の結果

図21にはサンプルT1, T2, H2の粒度分布を示している。T1の方が細粒部が若干多いものの、両地すべりの砂層から採取した試料T1とH2は似た粒度を示している。寺野地すべりの源頭部から採取した試料T2は明らかにシルト質であり、T1とH2より細かい構成である。

採取してきたサンプルを地すべり再現試験機にかけてダイナミクス特性（地震载荷と繰返し载荷）を測定した。用いた試験機は防災研究所で開発した地震時地すべり再現試験機（DPRI-3, 4, 5, 6, 7）の内、DPRI-5（内径120mm、外径180mm、最大速度10cm/sec）を用いた。最大可能な繰返し载荷の周波数は5 Hzであり、最大データサンプリング速度は200回/秒である。

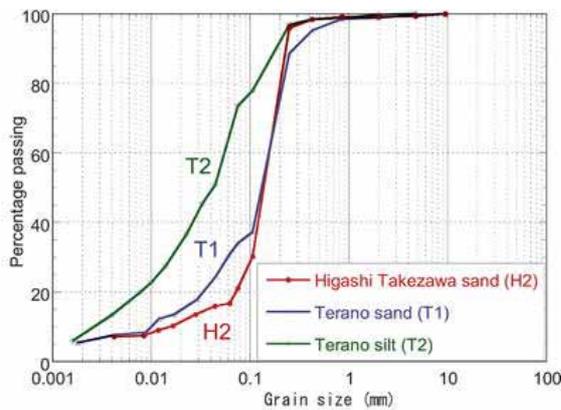


Fig. 21 Grain size distribution of three collected samples

4.3.1 東竹沢地すべりによる実地震波形せん断試験

東竹沢地すべりから最も近い地震観測点での地震記録波形を用いて、東竹沢地すべりの地震による発生・運動を再現する目的で、実地震波形载荷試験を実施した。用いた地震波形は強震観測ネットワークK-NETの小千谷観測点(NIG019)の観測データである。K-NETは独立行政法人防災科学研究所(2004b)が全国に約25kmの間隔で建設された強震観測施設である。この施設に設置された広ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計、及び記録された強震記録を収集して編集する強震観測センターを軸として、強震記録をインターネット発信するシステムである。小千谷観測点は東竹沢地すべりの西10 kmで、2004年新潟中越地震の本震震央の北西西7 kmに位置している。東竹沢地すべりは本震震央の北東東3.6 kmに位置している(図7)。

地質条件、地形条件、地下構造及び発震断層・震央からの距離などによる影響が複雑であり、東竹沢

地すべりの土塊に入力した実際の地震加速度及び波形を正確に知ることは容易ではない。ここでは、単純化のため、小千谷観測点で観測された地震波(3成分)を利用して、その地震波が東竹沢地すべりのすべり面に入力すると仮定し、すべり面に垂直な成分(地震による垂直応力成分)とすべり面に平行な成分(地震によるせん断応力成分)を算出し、この地震力+斜面土層の自重による応力を载荷した。

図22が、東竹沢地すべりのすべり面底面に地震時に作用すると考えた垂直応力成分及びせん断応力成分である。具体的な試験手順は以下の通りである。

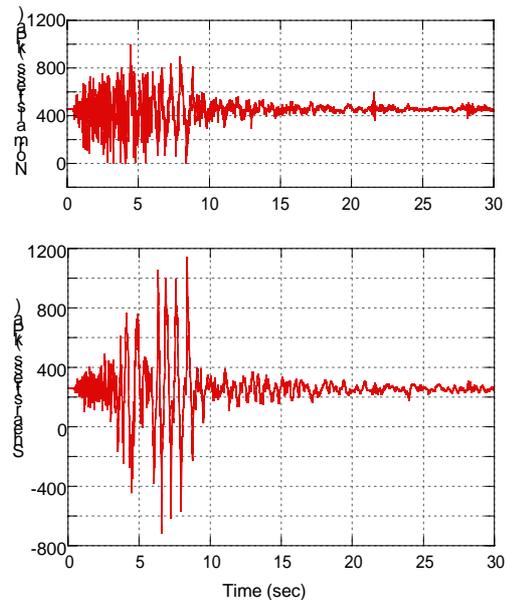


Fig. 22 Normal stress and shear stress during the Mid-Niigata earthquake working on the sliding surface of the Higashi-Takezawa landslide, which was calculated from the monitored earthquake record at the monitoring site NIG019 in K-NET (NIED)

地すべり再現試験の条件としてすべり面を無限長斜面と仮定し、中央断面(図17)を参考に、すべり面勾配を20度、すべり面深さを40m、地下水面深さを20mとして近似化し、すべり土塊の単位体積重量としては 18 kN/m^3 を与えた。炉乾燥した試料H2をせん断箱に入れて、最初に CO_2 を通過させ、そして、脱気水を入れて試料を飽和させる。そして、50 kPaで圧密した後、間隙水圧係数($B_D = \Delta u / \Delta \sigma$)を測定し、完全飽和したことを確認した($B_D = 0.98$)。その後、すべり面の初期応力条件に対応する有効垂直応力458 kPa(全垂直応力635 kPa, 間隙水圧177 kPaの差)を载荷して、圧密させた後、排水条件下で重力による初期せん断応力231 kPaを载荷した。そして、せん断箱を非排水状態に変え、図22に示す地震荷重による

地すべり土塊の垂直応力成分とせん断応力成分を同時にすべり面に載荷した。

図23には、この試験の結果を経時変化（載荷された垂直応力、発揮されたせん断抵抗、発生した過剰間隙水圧、及びせん断変位）と応力経路で示している。実験で発揮された垂直応力は、入力した地震波の垂直応力成分（図22）とほぼ等しいが、発揮されたせん断抵抗のピークは、載荷したせん断応力成分よりもかなり小さくなっている。これはせん断応力が、せん断強度に達するとそれ以上のせん断応力は載荷できず、その力の差は加速に消費されるからである。地震載荷による振動の間、せん断破壊が発生し、せん断変位が生じ、そして、過剰間隙水圧が発生した。せん断の進行につれて、典型的な「すべり面液状化現象」が再現された（Sassa 1996, 2000; Sassa et al. 1996, 2004）。いわゆる、せん断変位の増加に伴って、せん断面での粒子破碎が発生し、より高い間隙水圧が発生した。有効応力の低下によりせん断抵抗が極めて低い状態になり、せん断変位が加速し、高速地すべりの発生が再現された。

せん断抵抗が極めて低い状態になり、せん断変位が加速し、高速地すべりの発生が再現された。

この試料はもともと海成の堆積物の砂層であり、火山灰、火砕流堆積物のような火山性堆積物よりずっと強く強い。しかし、厚さ40 mのすべり土塊に相当する垂直応力の下でせん断を受けるとこの試料でも粒子破碎が生じ、試料の体積収縮に伴う過剰間隙水圧の発生が確認された。そして、定常状態で発揮した見かけの摩擦角は2.5度しかなかった（図23）。

図23の応力経路において、有効摩擦角を表す破壊線が十分明瞭でないため、上記の再現試験後、せん断箱を排水状態にし、過剰間隙水圧を十分発散させた後、試験機を速度制御に変えて、0.2 mm/secの一定のせん断速度で排水せん断をしながら、垂直応力を0.5 kPa/secの速度で除荷した。その結果から得られたH2試料の残留状態での摩擦角は36.9度であった（図24）。

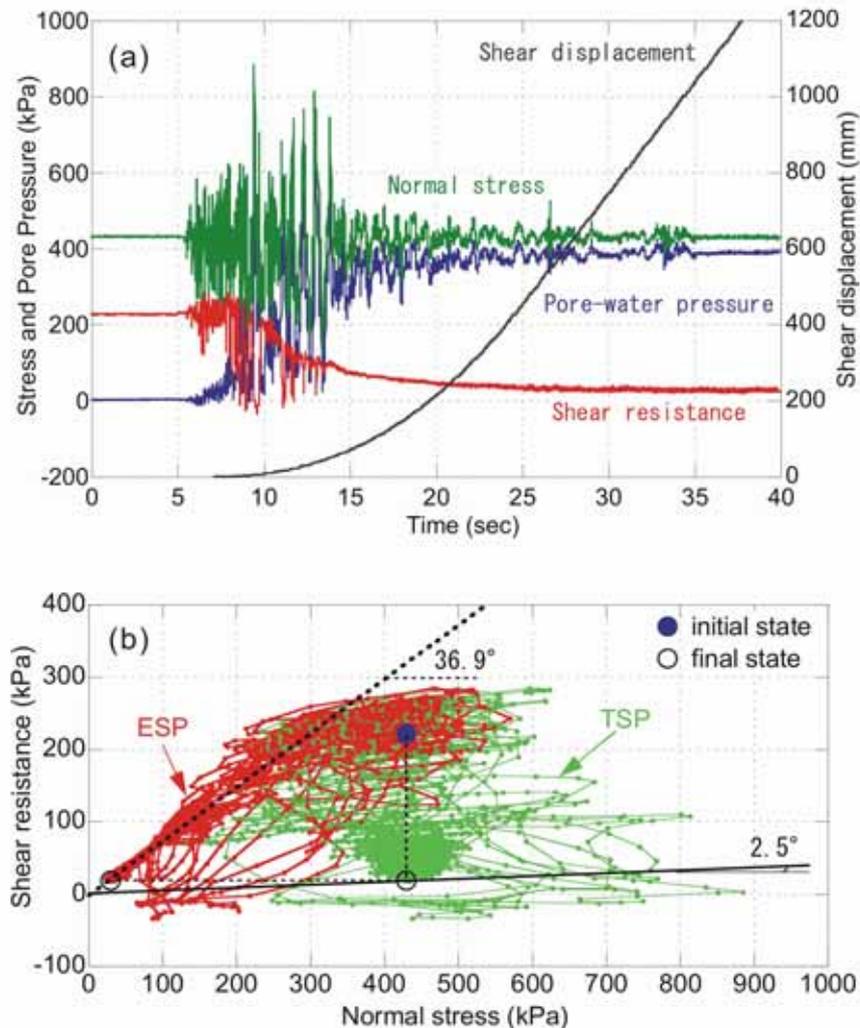


Fig. 23 Undrained real earthquake wave loading test to simulate the Higashi-Takezawa landslide ($B_D = 0.98$)

(a) Time series data, and (b) Stress path

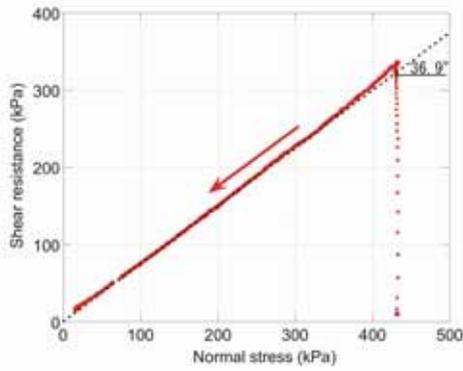


Fig. 24 Stress path obtained in the drained constant speed test after the real wave loading test (Fig.22)

4.3.2 東竹沢地すべりによる繰り返しリングせん断試験 (H2試料)

先述した東竹沢地すべりによる実地震波形載荷試

験と同じ初期応力条件の下で、同じ試料 (H2試料) を用いて、繰り返しリングせん断試験を行なった。この試験では、垂直応力を一定とし (理由としては、完全飽和非排水状態において、垂直応力を変化させても、有効垂直応力が一定である)、せん断応力を周波数1Hzの正弦波を15サイクルまで載荷した。試料を確実にせん断破壊させるため、せん断応力を1サイクルごとに増加させた。図25に試験の経時変化及び応力経路を示す。実地震波形せん断試験と同様に、「すべり面液状化」現象が起きたことが確認できる。この試験において定常状態で発揮された見かけの摩擦角は3.3度で、実地震波形せん断試験と同じレベルである。せん断破壊後の有効応力経路から推定される運動中の摩擦角は36.9度であり、先の実験結果と同じ値である。

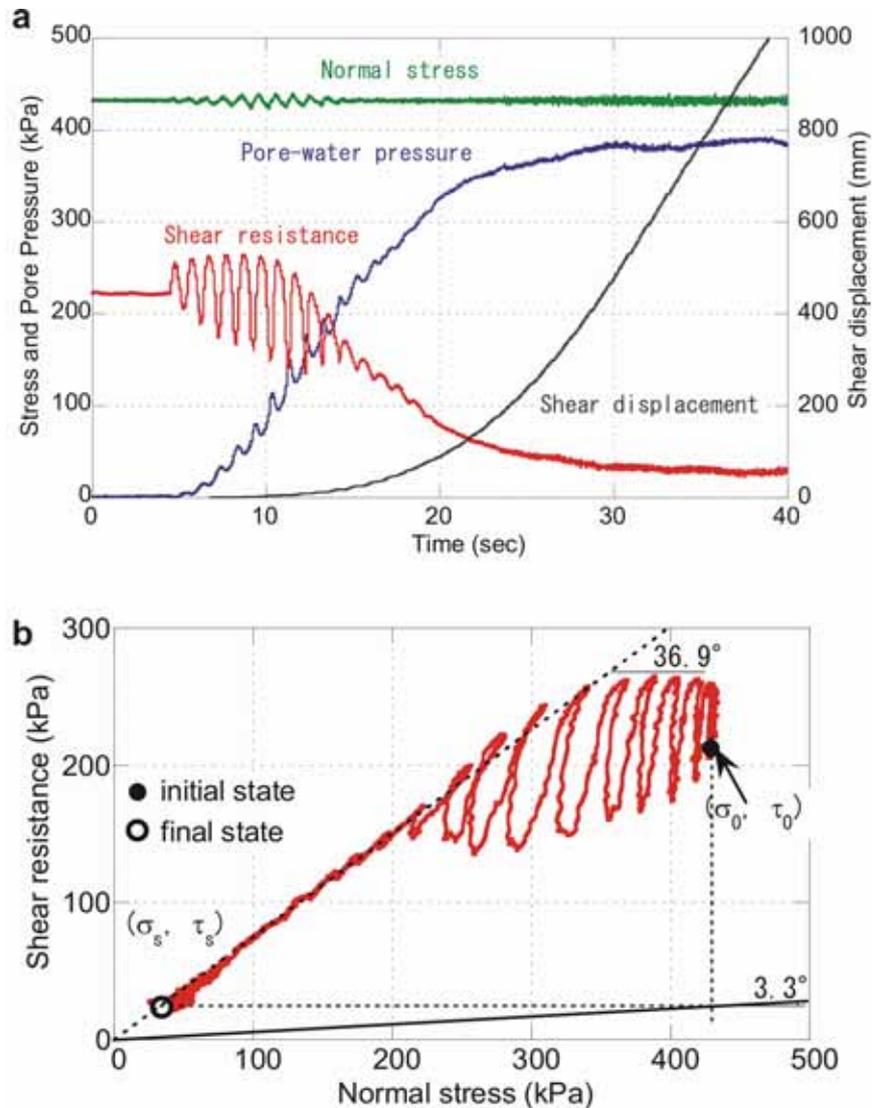


Fig. 25 Undrained cyclic loading test of the Higashi Takezawa sand (H2) ($B_d = 0.98$)

(a) Time series data, and (b) Stress path

4.3.3 寺野地すべりによる繰り返しリングせん断試験 (T1試料の砂層とT2試料のシルト層)

図19より、寺野地すべりが発生前の斜面表面勾配は、滑落崖の頂点(P1)から芋川にある地すべりの末端部(P3)までの平均傾斜角度は17.5度である。繰り返しリングせん断試験では、寺野地すべりの初期条件として、すべり面の傾斜を17度とし、すべり土塊の深さを20 mとした。すべり土塊が半分飽和されていたと想定し、地下水位の深さを10 mとした。

この試験条件は、図25に示した繰り返し載荷リングせん断試験と同じく、垂直応力を一定とし、せん断応力を周波数1Hzの正弦波を15サイクルまで載荷し、またせん断応力をサイクルごとに増加させた。T1試料の砂層とT2試料のシルト層の両試料に対して、

全く同一条件で、それぞれ試験を行なった。

T1試料の砂層に対する試験結果は図26に示している。東竹沢地すべりと同様に、寺野地すべりの砂層でも「すべり面液状化」現象が発生した。定常状態で発揮した見かけの摩擦角が3.8度であり、東竹沢地すべり(実地震波形試験では2.5度;繰り返しせん断試験では3.3度)より若干高い。応力経路から推定される破壊後野運動時の摩擦角は35.7度であり、東竹沢地すべりの砂層(36.9度)より1度ほど低くなっている。これはおそらく寺野地すべりの砂層には細粒子が若干多くなっているからと推定される。しかし、基本的には東竹沢地すべりの砂層と寺野地すべりの砂層はほぼ同じ動的特性を持つと考えられる。

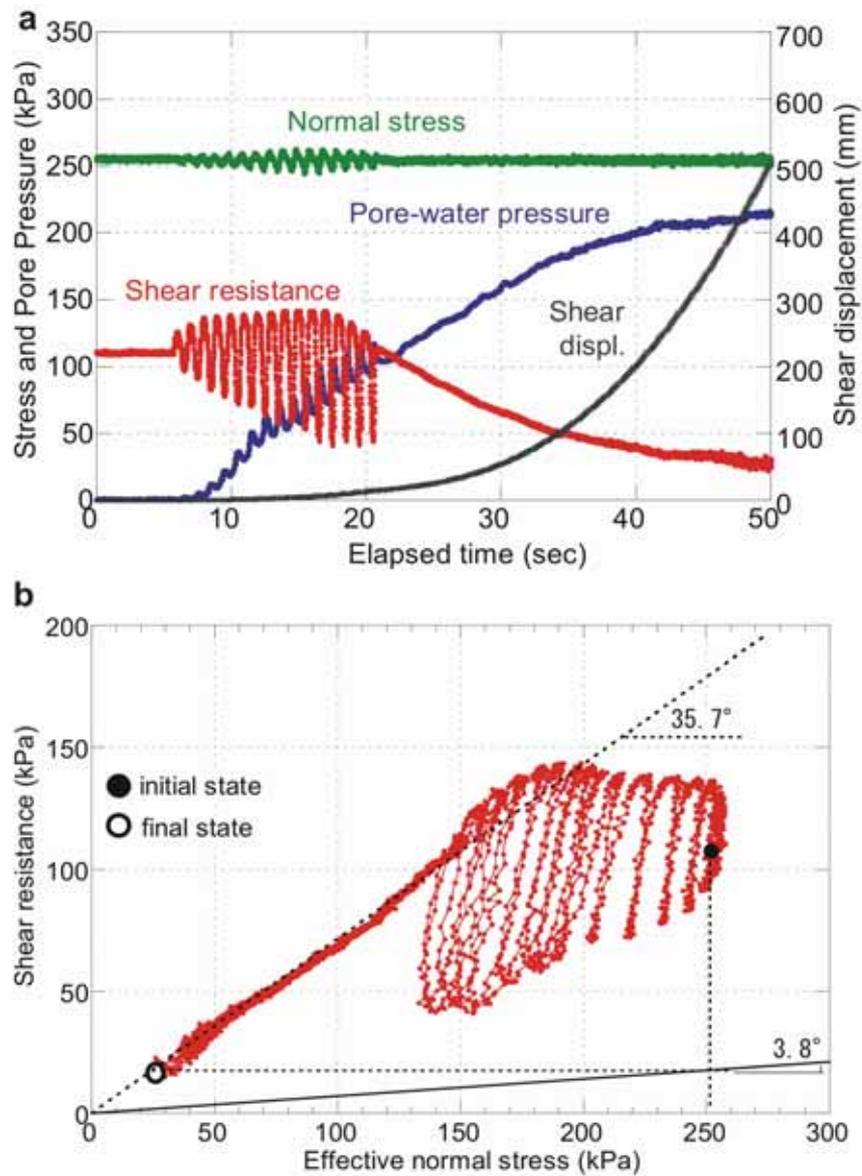


Fig. 26 Undrained cyclic loading test on the Terano sand (T1) ($B_D = 0.98$)

(a) Time series data, and (b) Stress path

T2試料のシルト層に対する試験結果を図27に示す。寺野地すべりのシルト層の試験結果は、砂層の試験結果と全く異なる挙動を示している。すなわち繰り返し載荷を与えても過剰間隙水圧は発生せず、せん断変位は繰り返し載荷の間にしか発生しなかった。厳密に言うと、せん断応力がせん断抵抗に達した時、あるいは超える時のみ、僅かづつせん断変位が生じ、最後のサイクルの載荷が終了と同時に、せん断が停止した。累計したせん断変位は約8mmであり、「すべり面液状化」現象及びそれによる高速せん断現象が一切発生しなかった。したがってシルト層は、地震では破壊しにくく、破壊して運動が始まってもせん断抵抗が低下せず、高速の運動が生じない土であることがわかった。

ることがわかった。

図27の試験の後で過剰間隙水圧を排水し、排水条件で垂直応力を変化させてこの土の残留摩擦角を測定したところ23.9度であり（図28）、砂層（寺野地すべりの砂層の残留状態での内部摩擦角は35.7度（図26）、東竹沢地すべりの砂層の残留状態での摩擦角は36.9度）の値より10度以上小さな値を示した。したがって地震に対応する繰り返し載荷に対しては、過剰間隙水圧の発生が少なく地すべりを発生させにくい、降雨・融雪などにより水位上昇・水圧上昇に対しては、シルト層の方が地すべりを起こしやすいといえる。

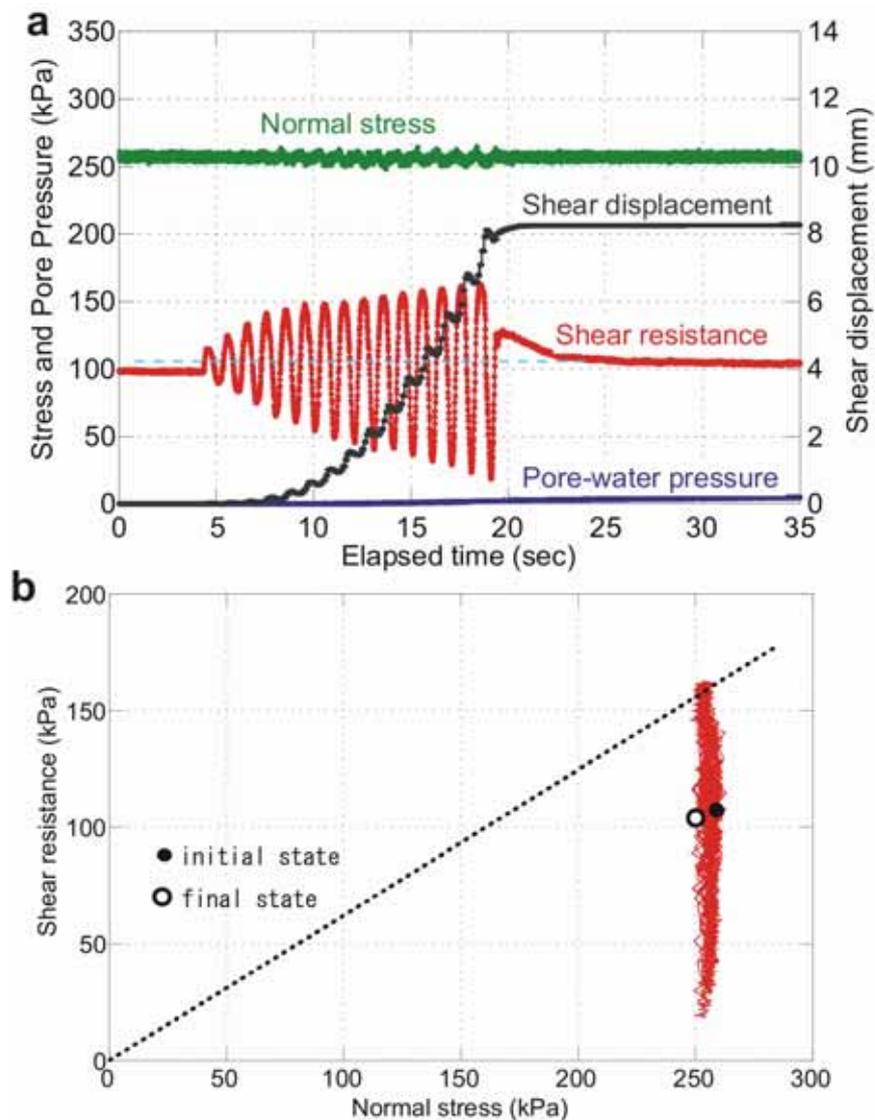


Fig. 27 Undrained cyclic loading test on the Terano silt (T2) ($B_d = 0.98$)

(a) Time series data, and (b) Stress path

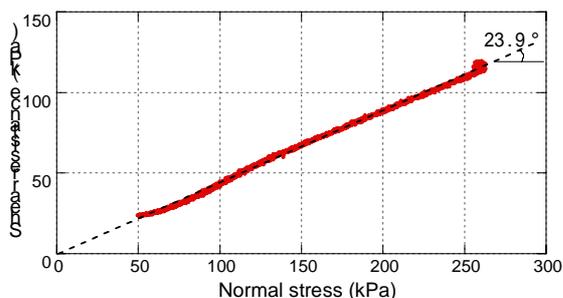


Fig. 28 The residual state of friction angle for Terano silt (T2)

5. 現地調査と試験結果から推定される高速地すべりの発生・運動機構

室内リングせん断試験結果より、東竹沢地すべり、寺野地すべりの双方とも砂層が飽和した状態であれば、地震力の載荷により「すべり面液状化」が発生し、高速地すべりが発生しうることがわかる。一方、シルト層は地震力の載荷時の過剰間隙水圧の発生が少なく、地震時には地すべりを起こしにくい材料であることが推定される。しかし、降雨・融雪などにより水位が上昇した場合には、シルト層の摩擦角(残留状態での摩擦角)の方が小さいため、このシルト層内にすべり面をもつ地すべりを発生させたと推定される。寺野地すべり、東竹沢地すべりとも過去に地すべりが発生していたことが地形的に認められるが、おそらくシルト層がそのすべりの主因となっていたと推定される。

1) 東竹沢地すべり

図17の中央断面図と実地震波形せん断試験及び繰り返し載荷せん断試験に基づいて、東竹沢地すべりの発生メカニズムについて下記の如く推定した。

東竹沢の斜面では、過去の融雪・豪雨時に、約20度の勾配を持つシルト岩表面の軟化シルト層(寺野地すべりで認められたもの、すなわち図28の試験結果：摩擦角が23.9度を示した材料とほぼ同様なもの)をすべり面とし、またこの透水性の低いシルト層の上に堆積する砂層内で地下水水位が上昇し、その間隙水圧上昇により地すべりが発生した。この過去の地すべりで滑った土塊が平均斜面勾配17度程度で堆積していた(図17の土塊A)。この砂層は台風23号の影響を受けた降雨により、その下半分程度が飽和されていたと推定され、上半分程度が不飽和であったことは、約100mにわたって地すべり土塊が高速で移動したにも関わらず、地すべり土塊の上の森林がほとんど攪乱されることなく立っていたことから推定される。地すべり土塊Aの移動により、芋川河岸の水田部(B)が急速載荷(非排水載荷)され、地震力以上

の急激な応力載荷を受けてすべり出し、両者一体となって対岸に乗り上げた。乗り上げた際に灰色の還元色の土砂が小学校の校舎やその前の道路に吹き飛ばされていたが、これはB及び芋川の河床に堆積していた土砂がえぐられたものと思われる。

2) 寺野地すべり

この地すべりは、地形的にみて典型的な第三紀の再活動型の地すべりであり、極めて緩傾斜の斜面を形成していた。今回の地すべりの上部にも過去の地すべりによるものと思われる滑落崖が認められる。また、図20に示す如くすべり面と地表面はほぼ平行と思われる。この地すべりについても今回の地震で滑った原因は、図26-27に示す結果より、おそらく地震時の砂層内での水圧上昇により、砂層内にすべり面が形成され、すべりの進行とそれに伴う粒子破碎によりさらに高い過剰間隙水圧が発生したためと推定される。

両地すべりの運動速度は、エネルギー線を用いて概算すると、東竹沢では最大速度で20m/sec以上、寺野で10m/sec以上になり、いずれも高速地すべりであったと推定される。

6. 大規模地すべりダムを形成する高速地すべりの予測について

東竹沢、寺野両地すべりとも地すべりを引き起こした斜面は、13~15度程度の緩斜面である。この程度の緩斜面は、全国至る所にある。平成15年に三陸南地震で発生した築館地すべりは、僅か10度程度の緩斜面で高速長距離運動地すべりを引き起こしたが、これは極めてもろい火砕流堆積物であった。これに対して今回の土層は、第三紀の海底堆積物であり、砂粒子自体の強度は火砕流堆積物よりはるかに強い。しかし土層厚さが築館地すべりの場合は僅か2m程度であったのに対し、寺野・東竹沢地すべりでは20-40mと10倍以上大きい。土被り厚さが大きいほど地震の揺れを受けた際に粒子が破碎しやすく、水圧が発生しやすい。そして運動が開始した場合も土粒子が破碎しやすく「すべり面液状化」が発生しやすい。したがってシルト岩などひびの少ない透水性の低い土層の上に「すべり面液状化」を引き起こしうる砂層、シルト混じり礫層などが堆積している場所であれば、大規模高速地すべりが発生しうる。また、高速地すべりが、谷へほぼ直行して入る場合には、地すべり土塊は谷を流下できず、地すべりダムが発生しうる。

7. 結論

- 1) 東竹沢地すべりも寺野地すべりも過去に地すべりを引き起こした土塊内部の再活動地すべりである。
- 2) 地震時地すべり再現試験の結果より、シルト層は地震に強いことから、今回の高速地すべりの運動は砂層内ですべり面が形成されたものと推定される。
- 3) 摩擦角は、シルトでは24度、砂では35度以上と推定されることから、降雨融雪によって水位が上昇する場合には、シルト層がすべり面を形成すると推定される。
- 4) 今回の両地すべりは、地震だけでも、降雨だけでも発生し得ないことから、地震・降雨複合斜面災害と呼べる。
- 5) 両地すべり地の発生前の斜面勾配は、13-15度と極めて緩斜面である。このような緩斜面でも、比較的強固な海底堆積物からなる砂層でも20-40mの深さであれば、高速地すべりが発生することが認められた。
- 6) 今後、斜面表層での地震波の干渉・増幅効果を含む斜面強震動マップの作成、地震降雨複合作用の評価、地震時地すべりの力学特性計測に基づく地震時斜面災害ハザードマップ作成が緊急の課題である。

謝 辞

科学技術振興調整費・平成16年新潟県中越地震に関する緊急研究テーマ2：地震時の土砂災害研究の実施にあたり、文部科学省地震・防災研究課および(独法)防災科学技術研究所の皆様には種々のご協力をいただきましたことに対し、感謝致します。また、朝日航洋株式会社地図・コンサルタント事業部の村上桂山氏には、東竹沢、寺野両地すべりの地すべり後の詳細な地形図及び空中写真の提供ほか大変ご協力いただいたこと及びヘリコプターの手配や現地調査においてはアジア航測株式会社の天野 篤氏にご協力をいただいたことを記しここに感謝の意を表します。また、本調査の実施に当たり、300kg以上のサンプル採取、道のないところの運搬、調査の分担、現地での討論及び実験に参加した国際斜面災害研究機構の古谷 元氏、京都大学防災研究所斜面災害研究センターの日本学術振興会特別研究員のWang Huabin氏及び院生の Ivan Gratchev、齋藤龍太、Jozef Jurkoに感謝致します。

参考文献

- 井口 隆・森脇 寛・内山庄一郎 (2004): 地すべり地形分布図と今回の地すべり発生箇所の対比, 平成16年新潟県中越地震による斜面災害緊急シンポジウム講演集, pp. 16-25.
- 大八木規夫 (2004) : 分類/地すべり現象の定義と分類, 地すべり (Landslides) 地形地質的認識と用語, (社)日本地すべり学会, pp.3-15.
- 気象庁(2004): 平成16年(2004年)新潟県中越地震について - 速報 - .
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2004_10_23_niigata/sokuho/index.html
- 佐々恭二 (2004) : 巻頭言. 地すべり (Landslides) 地形地質的認識と用語, (社)日本地すべり学会, pp. I-II.
- 清水文健・大八木規夫・宮城豊彦・井口 隆 (2004): 地すべり地形分布図(第17集)「長岡・高田」, 防災科学技術研究所研究資料, 5万分の1ないし2万5千分の1図葉30面.
- 独立行政法人防災科学技術研究所(2004a): 地すべり分布図Website:
http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/jisuberi_top.html
- 独立行政法人防災科学技術研究所 (2004b): K-Netwebsite, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/data/>
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・矛盾一也・加藤碩一(1986): 小千谷地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅). 地質調査所, 177p.
- Cruden, D. and Varnes, D. (1996): Landslide types and process. In Landslides-Investigation and mitigation-, Editors: Turner, K., Schuster, R., National Academy of Sciences (USA), pp: 36-75.
- Sassa K (1996): Prediction of Earthquake Induced Landslides, Special Lecture for 7th International Symposium on Landslides, "Landslides", Balkema Co. Ltd. Vol.1, pp. 115-132
- Sassa K, Fukuoka H, Scarascia-Mugnozza G, Evans S (1996): Earthquake-induced landslides: distribution, motion and mechanisms. Special Issue of Soils and Foundations, pp. 53-64.
- Sassa K (2000): Mechanism of flows in granular soils. Invited paper, Proc. GeoEng2000, Melbourne, 1, 1671-1702.
- Sassa K, Fukuoka H, Wang G, Ishikawa H (2004): Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, Landslides, Vol. 1, No.1, pp. 9-17.

Sassa, K., H. Fukuoka, F. Wang and G. Wang (2005a): Dynamic properties of earthquake-induced large-scale rapid landslides within past landslide masses, *Landslides*, Vol.2, No.2, in press.

Sassa, K., H. Marui and K. Okada (2005b): Landslide Disasters in the 2004 Mid-Niigata earthquake in Japan, *Landslides*, Vol.2, No.2, in press.

Sato H, Sekiguchi T, Kojiroi R, Suzuki Y, Iida M (2005): Overlaying landslides distribution on the earthquake source, geological and topographical data: the Mid-Niigata Prefecture earthquake in 2004, Japan. *Landslides*, Vol.2, No.2, in press.

Schuster, L. Editor (1986): Landslide dam: process, risk and mitigation. American Society of Civil Engineers. Geotechnical special publication No.3. 164 p.

Wafid M, Sassa K, Fukuoka H, Wang G (2004): Evolution of shear-zone structure in undrained ring shear tests. *Landslides* Vol.1, No.2, pp. 101-112.

付 録

本報告のもととなった平成16年新潟県中越地震による斜面災害緊急研究参加者は、「地震時斜面災害軽減のための調査研究の推進」に関する下記の4項目のアピールを発表した。

「地震時斜面災害軽減のための調査研究の推進」に関するアピール（平成16年12月7日）

- 1) 平成16年新潟県中越地震では、甚大な斜面災害が発生した。その特徴は地形・地質・地盤の特性に応じて様々な種類の地すべりが多数生じるとともに、20度以下の緩斜面において大規模な高速地すべりが発生して地すべりダムを形成したことである。地震と降雨を含めた複合的なメカニズムの斜面災害を解明し予測することが今後の課題である。
- 2) 地すべりによって生じた地形変化（地すべりダム＝自然の谷埋め盛土、滑落崖、クラック）に起因する斜面災害の危険度予測を推進することが重要である。特に、来春の融雪期に想定される斜面災害・雪崩災害を予測すると共に、具体的対策を示すことが緊急の課題である。
- 3) 地域社会に被害を与える斜面災害^{*1}を軽減するため、研究者コミュニティが住民と一体となって防災体制を構築すべき時期に来ている。
- 4) 本シンポジウム^{*2}に参加した研究者は、地震学、水文・気象学、地形・地質学、工学等との連携を深め、関連機関の協力のもとに学際的な斜面災害の研究を強力に推進するとともに、斜面災害を軽減するための全国的研究計画の構築を提案する。

*1：地すべり（岩、土あるいはその混合物の斜面下降運動）による災害；*2：平成16年新潟県中越地震による斜面災害緊急シンポジウム（平成16年12月2日、於：東京大学地震研究所）

Landslide Triggered by 2004 Niigata Prefecture Earthquake and the Sliding Mechanism of the Rapid Landslides Occurred within the Past Landslide Masses

Kyoji SASSA, Hiroshi FUKUOKA, Fawu WANG, Gonghui WANG

Synopsis

During the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, thousands of landslides were triggered, among them two large scale rapid landslides (Higashi Takezawa and Terano landslides) occurred within past landslide masses and dammed the river at the toe of the landslides. By using a ring shear apparatus, real earthquake wave loading test and cyclic loading tests were performed on the samples from the two landslides. The results revealed that those sand samples from both landslides can suffer from sliding surface liquefaction phenomenon, while the silt sample from Terano landslide showed no liquefaction failure, indicating that the sliding surfaces of these landslides must have been formed within the sand layer in the past landslides masses.

Keywords: landslides, earthquake, rainfall, sand, silt, sliding surface liquefaction

