地すべりダム—世界中でみられる現象

Landslide Dams—A Worldwide Phenomenon

米国地質調査所

R. L. Schuster

翻訳: 日 浦 啓 全*

1. はじめに

地すべりダムは種々の地すべりの運動の結果形成される。兩岸の切り立った狭い峡谷の中で起こる岩石すべりや岩石なだれにはじまって、平坦な河川の低地において発生する鋭敏な粘土のスランプや流動に至るまで、異なった地形学的な環境の中で起こる (Schuster and Costa, 1986 a; Costa and Schuster 1988)。このようにして形成されるダムには、人の手によって建造された世界で最も巨大な建造物にも匹敵するような、あるいはそれ以上の高さをもったものも発生している。

記録に残されているもっとも最初の地すべりダムは中国の中央部の湖南省で紀元前1737年に発生したが、これは地震によって引き起こされた地すべりが、依川と罗川を堰止めたものである (Xue-Cai and An-ning, 1986)。記録に残るもっとも初期の地すべりダムの決壊による洪水災害のうちの2つの例は、A. D. 563年にスイスで起こったもの (Eisbacher and Clague, 1986) と中央ジャワで A. D. 1006 年に起こったものである。ジャワでの災害のときには、メラピ火山の円頂丘の南西部分が大規模な岩石すべりとなって崩落し、地すべりダムを形成した。その背後には、ヒンズーの寺院や遺跡で有名な、繁栄を誇っていた地区があったのだが、これを深くて広大な堰止め湖の中に沈めてしまった。ヨーロッパアルプスのドイツ側では、地すべりダムはとつてもよく知られており、“Stausee” (地すべりが堰止めた湖) の名を与えられている (Montandon, 1933)。

ひとつの地すべりダムとそれによってできた湖の持続する時間は数分あるいは数千年であるが、早晩、ほとんどの地すべりダムは堰止められた湖の水が越流するようになる。多くの地すべりダムはその時に壊滅的な崩壊を起こし、下流部に甚大な被害をともしなう洪水を引き起こす。それぞれの地すべりダムの決壊による被害者の総数は何千人にも及んでいる。世界でもっとも最悪な地すべ

りダムに関する災害は、1786年中国の四川省で起きた、康定—泸定地震が引金となって大渡川を堰止めた大地すべりの際に起こった (Li, 1989)。10日後に地すべりダムの貯水が越流し決壊した。そのため発生した洪水は1400 km も下流にまで及び約10万人の人々が溺れ死んだ。

1840年から41年にかけての冬に発生した地震のために、現在のパキスタンの Nanga Parbat の山脚部がインダス河の渓谷に崩落し、そのため河を完全に堰止め高さ200 m以上の天然のダムを形成した (Code and Sirhindi, 1986)。1984年6月の初旬に地すべりダムは破壊し、60 km×65 kmの大きさがあった湖の水は24時間かかって完全に空っぽになり、大規模な洪水を起こした。何百もの村落が流され多数の犠牲者を出した (Mason, 1929)。420 km下流部でインダス河沿いの場所でキャンプしていたシーク派の軍隊が、洪水に襲われ、厚さ約25 mの水と泥の堆積物の下に埋められてしまった。1933年中国の中部の岷江では、地震が引金となって形成され255 mの高さをもっていた迭溪の地すべりダムが決壊し、60 mの高さの段波が発生し、2400人以上の人々が死んだ (Li et al., 1986)。

同様な悲劇が「悲しみの湖」として知られている地すべりダムでも起こった (Gupta, 1974)。北部イタリアの地すべりの堰止めによりできた湖、Passeir Wildsee は1419年、1503年、1512年、1572年、1721年および1774年に、その都度地域の住民に大きな被害を及ぼしながら、形成されたり決壊したりを繰り返し、人々によって「悲しみの湖 (ドイツ語) (心配事の湖) という、ここでの出来事にふさわしい適切な言葉でよばれている (Montandon, 1933)。

この論文では地すべりダムの発生する原因とその特性について、地すべりダムの危険性、ダムの決壊による効果、決壊を食い止めるか制御するための緩和的な対策工法、そしてわずかではあるが、ダムによる効用について議論している。議論は世界の44カ国から集めた、歴史上の地すべりダム477例の記録から得た情報に基づいて

* 高知大学農学部

行った。この内、463 例は Costa と Schuster によって 1991 年に目録が作成されたものであるが、残りの 14 例は筆者によって 1991 年以降に集められたものである。この中では合衆国が 81 例と数がもっとも多く、ついで日本の 79 例そして中国の 48 例と続く。数の上では合衆国と日本が多数を占めているが、これは部分的にはこれらの国々で出版されている情報が利用しやすいために、これを報告しようとする偏向があることから生じているに違いない。

2. 地すべりダムの自然地理学的背景

地すべりダムは幅広い地形的背景の中で生じる。しかしながら、高さが高く危険性の多い地すべりダムがもっとも頻度高く起こるのは、山岳地域の、谷幅が狭くて兩岸が切り立っている渓谷の中である。それは(1)このような渓谷では斜面崩壊が起こりやすいためと(2)このような渓谷の断面は、これを堰止めるためには相対的に少量の堰止め材料で済むからである。また、山岳地域の渓谷は高さの低い地すべりダムの形成される場所にもなり得る。それは支流の渓谷から土石流や泥流の形で出てくる土砂により形成される場合である。渓谷が幅広く開けているようなところでの河川の堰止めは、それほどよく見られる現象ではない。高さの低い地すべりダムは、海成粘土よりなっている相対的に偏平な河川低地で時おり形成される。

3. ダムを形成するような地すべりの発生原因

歴史上の地すべりによる堰止めに関する 477 例のうち、392 例について解析した結果から地すべり発生引金となる過程が何であるかについてみると、地すべりダムを形成するような地すべりを発生させる 2 つの重要な過程は、過度の雨量（降雨量と融雪量）と地震である（図-1）。検証した地すべりダムの 90% は、この 2 つの過程が一緒に作用した結果であることで説明ができた。

発生の頻度からいうと、火山の噴火による地すべりダムの形成は相対的に優位な過程ではない。しかし、噴火は時として大規模なダムを形成することの出来るような大規模な地すべりを誘発する。1889 年の日本の磐梯山の噴火 (Sekiya and Kikuchi, 1889) と 1980 年のアメリカ合衆国ワシントン州のセント・ヘレンズ山の噴火 (Meyer et al., 1986) は大規模なダム形成に至る岩屑なだれを発生させた火山活動の突出した例である。

自然にできたダム（氷河起源の堰止め湖、モレーンによる堰止め湖、あるいはその他の地すべりダム）の上流側で起きた崩壊物質が土石流となって流下してきて再堆積したり、河川の下部掘削（河川による下方侵食、下刻作用）、灌漑、河川への構造物の施工、鉱山、伐採（立木の除去）といった人為的な破壊作用は、引金作用として

図-1 地すべりダムを形成した地すべりの原因、コスタ、シュスター (Costa and Schuster (1991)) と筆者のファイルから引用した 394 例の有史以来の例を基にした解析結果 (Schuster and Costa, 1986 a を修正)。

の過程を説明するものとしてはわずかな割合しか占めない。人為によって引き起こされた地すべりの一例として、灌漑が引金となって軟かな火山性の岩石の中で地すべりが発生し、それによって 1990 年にエクアドルのビスク河に高さ 58 m の地すべりダムが形成された (Asanza et al., 1992)。

たった一度の豪雨やあるいは一度の地震だけでも、多くの地すべりダムが形成される (Costa and Schuster, 1988)。例えば、1889 年に日本の十津川水系の上流部の 1100 km² の地区で、豪雨によって 53 カ所で地すべりダムが形成されている (Swanson et al., 1986)。主要ないくつかの地震に続いて地すべりが河川を堰止めることはよく起こることなので、「堰止め湖」の場合も修正メルカリ震度階Ⅷ (Modified Mercalli Intensity Scale) の地震により発生したことが明確に記述されている (Wood and Neumann, 1931)。1783 年、イタリアの Calabria 地方で起こった地震のために、200 個もの堰止め湖や池が形成されるような土砂移動現象が起こった。これらのうち、少なくとも 12 個の湖は大規模な地すべりダムによって形成されたものであり、現在でもなお決壊しないで残されているものを判別することは可能である (Cotecchia et al., 1986)。1929 年、M 7.6 の Biller 地震がニュージーランドの南島で起こり、その時に発生した

いくつかの地すべりのために 11 個の地すべりダムが形成された (Adams, 1981)。大規模なダムの形成から決壊までを図解しているような、一連の異常な現象の記録が台湾の中央部の Tsao-Ling 地すべりについて残されている (Chang, 1984)。1862 年にあった強い地震のとき、この場所で地すべりが発生し Chin-Shui-Chi 河を堰止めた。ダムが決壊するまでに 36 年経過した。1941 年、別の強い地震のために同じ場所で、高さ 140 m の新しい地すべりダムができた。1942 年 8 月の豪雨は地すべりの運動を再開させ、ダムはその高さが 140 m から 217 m に増加した。1951 年には強い雨が数日続いたためダムは越流し、地すべりダムは決壊した。その結果発生した洪水によって 154 人が殺傷され、564 戸の家屋に被害が及んだ。1979 年の 8 月に降った豪雨のために地すべりは再び活動を開始し、高さが 90 m の新しい地すべりダムを形成した。その 9 日後にこの新しいダムも越流によって決壊し、甚大な洪水を引き起こした。

4. ダムを形成する地すべりのタイプ

記録にある 477 例の内、バーンズの分類 (Varnes, 1978) による地すべりのタイプを決定できるものが 390 例含まれている。390 例の中で 50% が岩石、土壌のスランプおよび崩落であり、25% は土石流 (debris flow)、泥流 (mud flow) あるいは土砂流 (earth flow)、そして 19% は岩石あるいは岩屑のなだれとなっている; 残りは鋭敏粘土の崩壊と岩石および土壌崩落 (earth falls) がほぼ同数である (図-2)。鋭敏な粘土でできている斜面の崩壊数はこの粘土の分布自体が限られた範囲にあることよりごくわずかである。崩落土砂により形成される地すべりダムの数は、通常は崩落土砂の量が少ないため、多くはない。

大規模な地すべりダムは、しばしばスランプや滑落 (すべり; slide) の形で始まり、その後、岩石なだれまたは岩屑なだれという形をとり減衰していく、複合した地すべり現象によって形成される。この顕著な例としては、1980 年のセントヘレンズ山の噴火にともなう 2.8 km^3 の規模の、岩石すべりから岩屑なだれへ移行した (有史以来、世界中でも最大規模の地すべり) 地すべりが挙げられる。この時発生したこの高速度の地すべりは、North Fork Toutle 渓谷を 24 km 流下し、その際に上流部および 2 支川をせき止めて 3 つの堰止め湖を形成した (Meyer et al., 1986)。

上述のように地すべりダムの大部分のものが泥流、土石流、土砂流によって形成されていることが解った。これらのダムのほとんどは支流の流域内で発生し、本川を一時的に堰止める相対的に移動速度の早い土石流によって形成されている。このようにして形成された地すべり

図-2 原因となった地すべりのタイプからみた地すべりダムの分布、コスタ、シュスター (Costa and Schuster (1991)) と筆者のファイルに基づいた 390 例について。ここでは、初めに起こった斜面崩壊が異なった形の地すべり運動となった場合であっても、実際に形成されるに至った地すべりダムに作用した過程をもとに分類してある (Schuster and Costa, 1986 a を修正)。

ダムの高さは、一般に高くはない。そして、土石流が粘着力のない構成材料でできているためにダムは早期に越流し決壊する。

図-2 に示されている鋭敏な粘土でできている地すべりダムの例はすべて、カナダ東部とノルウェーやスウェーデンの海岸地方にある海成粘土によるものである。よく知られたカナダの例は Blanche 河にできた高さ 10 m の低ダム (Dawson, 1898) とケベック州の Yamaska 河のものである (Clark, 1947) が、この 2 つとも浅くて幅が広い溪谷に形成されている。低いダムは越流によって数時間から数日以内に決壊している。

岩石および土砂の崩落による堰止めの例は、通常は崩落土量が多くないためその数も少ない。この例としてはよく知られた 3 つの例がある。(1) 1835 年にキルギスタン共和国の Yashinkul 湖を形成した岩石および岩屑の崩落 (Pushkarenko and Nikitin, 1988), (2) 1943 年にカナダのケベック州の Grande Riviere du Chene の海成粘土の堤の「がけ崩れ (cliff fall)」(Clark, 1947) そして (3) 1960 年にアフガニスタン北部の Ajar 河で地震により誘発された岩石なだれ (Shank et al., 1977) である。

5. 地すべりダムの規模と外形

地すべりダムの高さは数 m のものから数百 m のものである。世界で最大規模、かつ最も高さの高い地すべり

りダムは、1911年の地震によって引き起こされた崩壊土量が20～25億m³のUsoyの岩石すべりあるいは岩石なだれにより形成された地すべりダムで、タジク共和国内のパミール山脈の中を流下しているMiurgab河を堰止めたものである。その結果、高さが570mのダムができ(V. Adushkin, Institute for Dynamics of the Geosphere, Moscow, 個人的にデータを入手)、長さ53kmのSarez湖ができた(図-3)。この湖は深度が約500mである(Gasiev, 1984)。Murgab河から流入してくる水量と浸透によるダムからの流出量が平衡状態にあると思われた。そのため湖面の水位は一定であった。大規模な地すべりダムの例としては、中国中央部にある岷江の地震が引金となりできた迭溪(高さ: 255m)(Li et al., 1986)、ペルーのMantaro河に1974年にできたMayunmarca地すべりダム(高さ: 170m)(Hutchinson and Kojan, 1975; Lee and Duncan, 1975)そして1985年パプアニューギニアのニュー・ブリテン島のBairaman河に形成された地すべりダム(高さ: 200m)(King et al., 1989)等である。

UsoyとBairaman河の地すべりダム下流部の縦断形状は、図-4上で世界でも最大級の盛り土によるダムの

ひとつであるアメリカ合衆国カリフォルニア州のOrvilleダムの下流部の縦断計と比較されている。Usoyの地すべりダムはこれもタジキスタンにある、世界でも最大規模の、建造された、高さ300mのNurekダムのほぼ2倍の高さをもっている。

高さが10～20mの地すべりダムに対し、ほんの1～2m程度の高さしかない地すべりダムの数は多数ある。ほとんどの高さの低いダムは、数分あるいは数時間から数日間で決壊するが、その様子は決して観測されることはない。これらの多数を占める高さの低い地すべりダムは支溪からの土石流によって形成される。

図-4に示されているように、通常は地すべりダムの方が、同じ高さをもつ人為的に盛土によって作られたダムに比べて、河の流下方向の大きさはかなり大きい。したがって、それを構成している土砂の量もかなり大量となる。その良い一例として挙げられるのは、Madison渓谷で起きた地震に誘発された岩盤すべりによってできたダムである。この地震は1959年に起こり、アメリカ合衆国コロラド州の南西部で堰止め湖を生じさせた。この高さ70mの地すべりダムの底敷の長さは、同じ高さの盛

図-3 1911年、地震に誘発されたUsoy地すべりの時に、タジキスタン共和国のMurgab河の堰止めにより形成された、53kmの長さをもつSarez湖(位置を矢印で示す)(NASAのLandsatの映像より)。

図-5 アメリカ合衆国、モンタナ州のマディソン渓谷で1959年の地震により誘発された地すべりダムと堰止め湖(1959年にUSGSのJ. R. Staceyが撮影)。

図-4 河の流下方向のダムの断面形の比較; 年1911年のタジキスタン共和国で発生したUsoyの地すべりダム(V. Adushkin, Institute for Dynamics of the Geosphere, Moscow, 個人的にデータを入手)、1986年にパプア・ニューギニアのBairaman河で発生した地すべりダム(King et al., 1989)、そしてアメリカ合衆国カリフォルニア州のOrovilleに建設されたアースダム。ダム頂部の高さとは図中の左側に、そしてUsoyの地すべりダムが堰止めたSarez湖の現在のおよその水位は図中の右側に示してある。

土によるダムの場合の5~8倍となっている (Knight and Bannett, 1960)。

6. 地すべりダムの分類

地すべりダムはそれが形成される溪床の形状によって地形学的に分類することができる。図-6に示されているのはSwansonら(1986)によって提案された分類方法をCostaとSchusterが修正を加えたものである。タイプIの地すべりダムは溪床幅に比べると短いものである;これによって流れは堰止められるが、一方の岸からでも他方の岸へは到達していない。タイプIIの地すべりダムはより長くなる。地すべりダムは流れを堰止めるだけではなく溪床上に広がり、時には流下してきたのとは反対側の岸のかかなりの高さの所まで達する。タイプIIIは溪床全体を埋め尽くし、さらに土塊が流れ込んできた地点の上流部にまで、ある時には下流部に向かっても土砂は広がって堆積する。このタイプの地すべりダムは土石流や泥流、そして岩石なだれおよび岩屑なだれの場合に共通して見られるものである。タイプIVの地すべりダムは溪谷の同じ地点の相対する斜面から同時に崩壊が発生して形成される地すべりダムである。地すべりは溪谷の中央部でお互いに頭同士が接するか、あるいは全体が並ぶように堆積する。タイプVは同じ地すべりがいくつものロープ(丸い突出部)をもっている場合で、溪床を横断する方向にいくつもの地すべりダムを形成するものである。タイプVIは河床の底部に潜り込み発生源とは反対側の溪岸部が持ち上がる形となる、ひとつあるいはそれ以上のすべり面をもった地すべりダムである。典型的なものとしては、溪床を堰止めている物質の底部がゆっくりスランプするかあるいはすべり出しているもので、河川はこの地すべり現象により溪床が持ち上げられ、そ

図-7 歴史上の地すべりダムのタイプによる分布図。
図-6による分類方法にしたがって、259例についてCosta and Schuster(1991)および筆者のファイルからまとめた。

の結果堰止められる。

CostaとSchusterによって検証された477例の有史以来の地すべりダム(1991)のうち、259例がこの分類に十分に適合するものであった(図-7)。もっとも普通にみられる地すべりダムは、タイプII(61%)とタイプIIIである(28%)。その他のタイプの地すべりダムは、その発生頻度ははるかに小さい。タイプIは3%,タイプIVも3%,タイプVは2%そしてタイプVIは3%であった。タイプIは一般に高さが低く、堰止めている土砂の量も少ないため危険性はない。タイプIIの地すべりダムは概ね高さも高く、堰止めている土砂も多いので形成されている湖の危険性は高い。タイプIIIの場合には決壊の危険性

図-6 地すべりダムの分類。あるタイプの地すべりダムを形成したであろうと思われる土砂移動現象が各図面の左下隅に記載してある。ここで主流は図の左から右方向へ溪谷内を流下する(Costa and Schuster, 1988; Swanson et al., 1986を修正)

図-8 1985年10月撮影の、中国四川省の岷江の上流方向を望む写真。1933年に地震に誘発されて起こった銀屏地すべりダム(タイプIV)の残害。中央部の後方にみられるのがその時に生じた大湖であり、手前にみえるのは同じ地震の時に別の地すべりダムによって堰止められた小湖である。

のある大規模な湖を形成するばかりでなく、本線の渓流以外に支川の渓流をも堰止めてしまうことになるので、湖の決壊の危険性はさらに高くなる。1980年にNorth Fork Toutle河の支流のいくつかを岩屑なだれによって堰止めてしまったセント・ヘレンズ山の場合がこの例である(Meyer et al., 1986)。

タイプIVやVの場合も渓谷の幅が狭く、しかも深度のある堰止め湖を形成するのに十分な堆積物がある場合には危険なものとなる。タイプIVの傑出した例としては、中国四川省北部の岷江の上流部で1933年に発生した銀屏の岩石なだれは大湖を形成した(図-8)(Li et al., 1986)。タイプVの例としては(1)1910年アメリカ合衆国のモンタナ州の国立の水河公園で、岩石なだれがOtatso溪を2カ所で堰止めた。そして(2)1937年にスイスのBirse河の2カ所で起こった岩屑なだれによる地すべりダムがある。タイプVIの例としては、1931~32年に日本の奈良県の大和川(亀の瀬地すべり)(Swanson et al., 1986)、1985年にアメリカ合衆国コロラド州のMuddy Creek(東マディ・クリーク地すべり)(Stover and Cannon, 1988)で、そして1988年には同じくアメリカ合衆国の南ダコタのCedar溪(Red Shirt地すべり)において起こったものがある。これらの地すべりのいずれもが地すべりの動きによって河床が持ち上げられている。

7. 地すべりダムの決壊の様相

地すべりダムを土木工学の手順によって作られた盛土によるダムに比べると、十分には圧密されておらず、しかも種々の物質によって形成されているという点が違う。しかも人為を加えたものでない限り、人為的に強化された排水路や他の排水のための構造物はほとんど存在しな

い。侵食に対して抵抗を示すような排水路がないために、たいていの地すべりダムでは頂部から越流が始まるが、それに続いて堤体表面の急速な侵食が始まる。表面侵食はダムの底部から順次堤冠へと達する。侵食力を受ける排水路の「セルフ・アーマリング」(流水の侵食力によって水路内の細粒部分の物質は流下するが、その際、より粗粒の侵食に強い粒子は残される過程)作用のため、地すべりダムが形成される以前の河床の位置より下方への侵食は進行しない。この理由のために地すべりダムが決壊した後に小さな湖が残される。

地すべりダムはしばしば多孔質なことが多い。主として破碎された岩塊からできている地すべりダムには細粒の充填物質が少なく、岩塊同士の間にある空隙の存在のために堤体の透水性が高い。岩塊を多く含んでいない地すべりダムの場合にも十分に締め固められていないため、やはり多孔質になり得る場合がある。後者の場合には堤体内部に水が浸透しパイピングにより決壊に至ることがある。このパイピングによる地すべりダムの決壊例としては、(1)今日のキルギスタン共和国で131年間決壊せずに維持されていた堰止め湖: ヤシングル湖が1966年に決壊(Glazyrin and Reyzvikh, 1968; Pushkarenko and Nikitin, 1973)、そして(2)1973年に南イタリアのカラブリア地方のブオナミコ河の岩石なだれにより形成されていた90mの高さのダムの決壊(Guerricchio and Melidoro, 1973)がある。

検証を行った全477例の地すべりダムの中で、202例についてはそれらがどのように決壊したのかという情報が得られていた。つまり202例のうち197例は頂部の越流により決壊し、4例はパイピングにより決壊し、そして1例が下流側の表面の侵食によって決壊した。

8. 地すべりダムの寿命

地すべりによって堰止められてできた湖には数分しか寿命のないものや、あるいは数千年もつものがあるが、これには多くの因子が関わっている: すなわちこれらの因子は(1)新しくできた湖へ流入してくる水および土砂の量とその速さ、(2)ダムの大きさと形、(3)ダムを構成している物質の地質学的立場からみた性質、そして(4)ダムの堤体内を浸透する水の浸透速度である。地すべりダムは地すべりしてきた異質な土塊から構成されており、したがってその埋設物の多くは、土木構造物に比較すると、ほんの短期間で決壊する—しばしば、形成された後数分から数日で決壊してしまう。

解析を行った477例のうち、形成された時間と決壊した時間の判明しているものは187例であった(図-9)。地すべりダムの決壊の危険性は以下のような短命さによっても強調することができる: すなわち、35%が1日

図-9 歴史上の地すべりダム187例について、Costa and Schuster (1991)および筆者のファイルをもとにして検証したもの(Schuster and Costa, 1986 aを修正)。

以内に決壊、一週間以内に決壊したものが55%、一ヶ月以内のものが68%、6ヵ月持続したものは83%、そして89%は一年以内に決壊してしまっている。

地すべりダムの安定性は侵食、すなわち表流水によるダム表面の侵食、あるいは堤体内部での浸透により引き起こされるパイピング現象のいずれかに対する抵抗性に厳密に依存している。大きな岩塊や粘性を持った粘土でできている地すべりダムは、大部分が圧密作用を受けていない移動物質からできているダムに比べると、はるかに崩壊に対する抵抗性は高い。主に軟らかくて、低密度の細粒の物質あるいは液状化しやすい物質からできている地すべりダムは容易に侵食作用を受けるので、もっとも危険性の高いものである。

いくつかの大規模なダムではそれほど早期には決壊しない。というのは、これらのダムは規模が大きいために、満水しさらに越流するまでに何ヵ月もかかるからである。16億 m^3 の土砂の移動したMayunmarca地すべりは、おそらく豪雨により発生したものであるが高さ170mの地すべりダムを形成し、地すべり発生後42日目に決壊して下流部に多大の洪水災害を引き起こした(Hutchinson and Kojan, 1975; Lee and Duncan, 1975)。地震により発生し、2億 m^3 の土砂が移動したパプアニューギニアのBairaman河における地すべりは200mの高さのダムを形成したが、それが満水するのに16ヵ月も要した。このダムは水が越流しはじめてから一日以内に決壊し、100mの流深をもった土石流および洪水となって下流へ流下した(King et al., 1989)。

何年も安定な状態を経たあとで地すべりダムが決壊するような例はごくわずかである。それは、1191年に岩石なだれから土石流に移行して形成された、フランスアルプスのRomanche河の地すべりダムで、下流側の斜面が侵食されたために28年後に決壊した。決壊のために発生した破壊的な洪水のためにグルノーブルの街が半分破壊

された(Montandon, 1933)。日本では、栃木県の小鹿川にできた地すべりダムは、形成されてから40年後に決壊し、下流に洪水による甚大な被害を及ぼした(Fujita, 1985)。先にも述べたが、キルギスタン共和国で1835年に発生した岩屑なだれのためにTegermach河にYashinkul湖を形成した地すべりダムは、131年間安定状態を保った後で、1966年にパイピングにより決壊した(Glazyrin and Reyzykh, 1968; Pushkarenko and Nikitin, 1968)。ごくわずかな例ではあるが、隣接した基岩のアバットメントを横断するように自然に排水路のできた地すべりダムもある。これらの排水路は越流によるダム頂部の侵食を妨ぐため、結果的にダムの決壊を

起こりにくくする。このようなことは隣接した基岩のアバットメントの表面よりも地すべりダムの脚部の位置の方が高い場合に起こる。地すべりダムによる堰止め湖からの、自然にできた排水路の一例として、700年前にアメリカ合衆国コロラド州のスラムガリオン(earth flow)のできた地すべりダムの左岸側のアバットメントを横断するように形成されている放水口がある(Savage et al., 1992)。

いくつかの例では流入する水量が、浸透や蒸発散さらには/あるいは、灌漑のための取水による損失水量にほぼ等しいために、頂部から越流したことのないダムも存在する。タジキスタンのMurgab河にある有史以来最大の、高さが570mのUsay Damは1911年に形成されてから今もなお存立している。この永続性の主な理由はダムからの浸透水量が、ダムの背面の貯水池、すなわちSarez湖へMurgab河から流入する量にほぼ一致しているからである。しかも、この堰止め湖の水面はダム頂部から約50m下方にあり、水深が500mであるにもかかわらず平衡を保っている(V. Adushkin, Institute for Dynamics of the Geosphere, Moscow, 個人的にデータを入手)。もう一つの例として、中国中央部の青海省の比塘湖では灌漑、蒸発散そして浸透のためにダム頂部よりかなり下方に水面があり、地すべりダムが安定を保っている(Li et al., 1986)。

9. 地すべりダムによる洪水

地すべりダムでは2つの、全く異なるタイプの洪水が発生する可能性がある。それらは(1)河川を堰止めたために生じる上流での洪水(背水の影響)(図-10)、そして(2)ダムの破壊のためにダムの下流側で発生する洪水である。上流側で生じる洪水による人命の損失の恐れはほとんどないが、財産等に対する損害は多大なものとなる。水力発電所や輸送のための構造物のような重要な施設は

図-10 北イタリア, San Antonio Morignone の村の一部が浸水している様子。下流方向を見ている。1987年にVal Polaの岩石すべり/岩石なだれによってAdda河堰止められたために村が洪水に見舞われた(ISMSEのS. p. A., Bergamo提供)。

機能が失われてしまう。地すべりダム上流側での洪水の例外的な結果としては、アメリカ合衆国のユタ州で1983年の春に発生した地すべりダムの例がある。この時にはThistle地すべりの2千2百万 m^3 の移動土砂がSpanishi Folk河を堰止めたために、60 mの深さの堰止め湖ができ小規模なThistleの町を破壊した。この破壊のために15軒の商家と10軒の住宅と鉄道の線草場が失われた(KaliserとFleming, 1986)。

さて、地すべりダムの上流への洪水の伝播ほどには知られてはいないが、ダムの破壊による下流側の被害は広々にして深刻な結果となる。壊滅的な洪水についての特筆すべき例として、1515年にスイス南部のTocino河の支川のBrenno川を堰止めていた岩石なだれでできた地すべりダムの破壊が挙げられる。この際、水と土砂の混じり合った破壊的な洪水波がBiascaの街を呑込み、さらに35 km流れ下ってイタリア国境にあるMaggiore湖にまで達した。この洪水のためおよそ600人が死亡した(Montandon, 1933)。

10. 溪谷の地形に及ぼす地すべりダムの効果

地すべりダムは以下のように、種々の形で溪谷の地形に影響を及ぼす。すなわち(1)地すべりダムに、湖や沖積地そして三角州起源の土砂が堆積すると、ダム上流部において河川勾配、地表面地形、そして表層地質の変化が生じる。(2)地すべり堆積物の侵食土砂が多量に流されることによって、ダム下流部では流路の変更等が生じる。そして(3)貯水池の埋設あるいはダムが破壊したときに起こる急速な水位低下のために貯水池に沿った部分で起こる2次的地すべり。これらの因子のことは、地すべりダムが生じた、あるいは生じる可能性のある峡谷に水力発電ダムのような構造物を設置しようとするときには必ず考慮しなければならない(Schuster and Costa, 1986

b)。例えば、前に述べた北部パキスタンのインダス河で、1841年に形成された地すべりダムの現状がどうなっているか、ということがこの地すべりダムの下流80 kmで、かつ既設のTarbelaダムの上流315 kmの位置に大規模の水力開発プロジェクトが計画された際に考慮されたことがある(Code and Sirhindi, 1986)。

地すべりダムから侵食されて流下してくる土砂は、将来河川に構造物の設計や施工をする際に重要な影響を及ぼし得る。台湾中央部のChin-Shui-Chi河で1941年に起こったTsao-Ling地すべりダムの場合は、ダム湖の上流部に厚い堆積土砂が存在したために、計画中の水力発電所の位置決定のさいに大きな問題となった(Chang, 1984)。もし計画通りに建設が行われるとすれば、堆積土砂の厚みが50 mもあるため、広範囲の大深度の基礎工事が必要となっていたであろう。Costa RicaのRio Toro河に形成されている、高さ100 mの地すべりダムの一部が1992年の7月に決壊した時、地すべりダムの下流側700 mの地点に計画されていた、水力発電所と水圧管の放水口の設置位置に10 mの厚さの土砂が堆積した(Mora et al., 印刷中)。

地すべりダムの形成による地形的变化のために起こる河川の流路の侵食は、下流にある水力発電所、橋梁あるいは灌漑施設等の構造物に悪影響を及ぼし得る。Tsao-Ling地すべりダムの地点で起こっている侵食は、地すべりダムが新たな遷急点となり、それが上流側へ移動していき、その結果計画中の水力発電ダムの基礎を侵食によって掘削してしまう恐れがあるため、潜在的な問題をかかえている(Chang, 1984)。

地すべりダムの決壊後の急激なダムの水位低下のため生じる2次的な地すべり現象が、地すべりダムより上流の溪谷にそって設けられている、前述した高速道路や、パイプラインや通信システムのような、構造物や種々の生活線(ライフライン)のいずれかに対して危害を及ぼす危険のあることを証明することができる。その一例として、ペルーにあるMantaro河を1974年に堰止めてできた30 kmの延長距離をもつ湖に沿う地区で起こった水位低下によって、2次的な地すべりが発生した(Hutchinson and Kojan, 1975)。2次的な地すべりは、そのほとんどが深度の浅いすべりであるが、残された溪谷沿いの主要高速道路の破壊に寄与している。この道路は現在でも封鎖されたままである。

11. 巧みに設計された対策工法

地すべりダムの安定性を増加させるためのもっとも単純で、よく用いられる方法は隣接する基岩のアバットメントを横切るか、あるいはダム自身の上を越える経路をもつ、保護された構造を有する余水路の建設である。一

図-11 図-5に示した、アメリカ合衆国モンタナ州のMadison 溪谷の地すべりダムの排水路から下流方向を望む。Madison 河の侵食作用のために、排水路の底部は1959年に最初に開削されたときのものよりも6 m 下方に移動した。初期の排水路の位置が矢印で示されている。

例として、アメリカ・モンタナ州の Madison Canyon 地すべりダムを横切って、アメリカ陸軍工兵部隊によって注意深く建設された余水路がある (図-5 および 図-11)。この幅が 75 m ある余水路を流れる流量は $280 \text{ m}^3/\text{s}$ で、地すべりダムの表面を構成している岩石の斜面をごくゆっくりしか侵食しない程の流速になるように設計されている (Harrison, 1974)。

ごく少ない例ではあるが、地すべりダムの中を貫流させるための新しい水路の掘削を行うために、大規模な発破が行われている。これと同じ手法が1964年、歴史的な都市であるサマルカンドから Zeravshan 河を遡った上流にある、ソ連のタジキスタン (現在のタジク共和国) 国内で Zeravshan 河を堰止めた 1500 万 m^3 の地すべりダムを通過する水路を開削するために用いられた (Engineering News-Record, 1964)。地すべりダムの規模は高さ 220 m、長さ 400 m そして幅は 1800 m 以上であった。通常の火薬 250 トンを使用した2度の発破により 23 万 m^3 の土砂を掘削して、40~50 m の深さをもつ排水路を開削した。

堰止め湖の水位を安定化することで地すべりダムからの越流を阻止するその他の方法の中には、サイフォン・パイプ、揚水システム、トンネルによる排水そして迂回水路による排水がある (Schuster and Costs, 1990)。20 台の大ポンプ群による最大の総揚水量が毎秒 5 m^3 の揚水システムが、1980年のセント・ヘレンズ山の崩壊土砂の堰止めによるできた Spirit 湖の水位の増大による越流を防ぐために一時的に使用された (図-12) (Sager and Chambers, 1986)。その後、地すべりダムの右岸のアバットメントにある火山性の凝灰岩と角礫岩の中をくり抜いて、長さ 2590 m、直径 3.4 m のトンネル (図-13) がトンネル掘削機 (TBM) によって掘削され、これによって

図-12 噴火のために頂上部分が消失してしまった、合衆国ワシントン州のセント・ヘレンズ山を北方から望む。写真は1980年の噴火後数日のもの。Spirit 湖(手前にみえる)を堰止めた岩屑なだれにより形成されたダムの頂部が右方に黒い矢印で示されている。1982年にダムの右岸のアバットメントの部分に建設された排水トンネル(図-13に示す)の入口の位置は白い矢印で示されている。噴火の際に根こそぎ倒された、周囲の斜面上にあった木々が湖面上に浮いている (USGS の R. M. Krimmel 撮影)。

水位はさらに 4 m 低い恒久値にまで下げられた。この成功したトンネル掘削のプロジェクトの例の場合に要した費用は 2900 万ドルであった。

同様の方策が1987年の北部イタリアの Adda 河を堰止めた Val Pola の地すべりダムの場合に用いられた (Govi, 1989)。越流を食い止めるための一時的な工法としてサイフォンとポンプによる揚水が行われた。1988年に2本の迂回用のトンネル (それぞれの直径は 6.0 m と 4.2 m であった) が Adda 河のダムの左岸のアバットメントに掘られた (図-14) (Cambiaghi and Schuster, 1989)。

Valtellina 河の流域のもうひとつの箇所では、これから起こるかも知れない地すべりダムに対して排水路が建設中であるという興味深い例がある。Spriana 地すべりは土量が $2000 \sim 2500 \text{ 万 m}^3$ の崩壊土、漂礫土および変性岩から成る地すべりであるが、Val Pola 地すべり地の下流で Adda 河に合流する支川、Mallero 河の切り立った溪谷の斜面上に堆積している土塊がゆっくりとクリープ的な動きをしている。イタリアの技術者と地質学者達は、今後、異常な豪雨によってその動きが加速されて高速で移動する地すべりとなって Mallero 河を堰止め、多量の水を貯留するようなことになると、これが Mallero 河と Adda 河の合流地点にある Sondrio の町を危険にさらすことになるのではと心配している。もしもしかるべき緩和の対策が講じられなければ頂部からの越流によって破壊してしまうかも知れない、仮定上の堰止め湖の可能性に対して準備するために、クリープ移動をしている土塊のある斜面に合対する斜面の基岩内に迂回のための排水

図—13 Spirit 湖からの排水トンネル沿いの地質断面図(Sager and Chambers, 1986)

図—14 北イタリアの Val Pola の岩屑なだれにより形成された地すべりダム周辺地域の、Adda 河の水を排水するための排水トンネルの入口。写真は 1988 年 8 月に撮影されたものだが、この時に向かって右側のトンネルは供用を開始していたが、左側のものは間もなく供用を開始する状態にあった。

用のトンネルを 1 本建設すべきであるとする予備的な勧告がなされた (Cancelli, 1980)。

12. 地すべりダムの有益な面

すべての地すべりダムが危害を及ぼすわけではない。あるものは人類にとって有益であることが証明された。かなり長期間にわたって安定状態にあると認められたいくつかの地すべりダムが水力発電のために使われている。ニュージーランドにある地すべりダムによって堰止められてできた、最大規模の Waikaremoana 湖(貯水量 5.2 bill. m³) は水力発電に必要な水頭と水量を提供している特筆すべき一例である。Waikaremoana 湖はカーボン・デイティングによると、2200 年前に砂岩とシルト岩の中に発生した土砂量 2.2 億 m³ の岩すべりの堰止めによりできたものである。そして、ダムは現在もお安定な状態にある (Read et al., 1992)。124 MW の発電容量をもつ Waikaremoana の水力発電所は湖と地すべりによって提供された 450 m の水頭を利用している。

ソヴィエト連邦およびそれに従う共和国では、ダムを形成させる目的で人為的に地すべりが発生させられる。1969 年にはカザフ共和国 (現在のカザフスタン共和国)

で、その首都であるアルマ・アタを土石流から守るために、Malaya-Alma-Atinka 河に高さ 100 m の土石流停止ダムを建設した。この地すべりダムは通常の発破によって地すべりを発生させて形成された (Yesenov and Degovets, 1982; V. Adushkin, Inst. for Dynamics of the Geosphere, Moscow, 個人的にデータ入手, 1991)。

この同じ考えに基づいて、キルギスタン共和国の Naryn 河では、完成すれば世界で 2 番目に高い人工のダムになるであろう、270 m の高さをもつ水力発電所を計画中である (Monastersky, 1992; V. Adushkin, 個人的にデータ入手, 1991)。この計画中の、土砂量が 1 億 1200 万 m³ のダムはカムバラータ・プロジェクトの一部をなすもので、狭い花崗岩のバットレスの壁の中に 275 キロトンの通常火薬を仕掛けて、地すべりを発生させようとするものである。この計画はソ連邦の崩壊以前になされており、プロジェクトの遂行に必要な基金はキルギスタンが用立てることになっていたが、現在まで延期されている。これらの計画を遂行するには西暦 2000 年代に大規模な地すべりの発生することが必要である。

13. 結 論

歴史上の 477 例の地すべりダムに関する資料は、地すべりによる河川の堰止めに関して、その過程、危険性、効果、緩和措置そして利益についての情報を提供してくれた。これらの情報によって地すべりダムに関する以下のような普遍化がなされた。

- (1) 地すべりダムは通常は山岳地域の狭い峡谷のなかの、切り立った壁ともいえる斜面において発生する。しかしながら、時には幅の広い相対的に平坦な峡谷の底の部分においても発生する。
- (2) ほとんどの地すべりダムの高さは 10 m 以下である。また、ごくわずかではあるが、世界最大級の人工のダムと同等かそれ以上の高さを持ったものも形成され得る。
- (3) 地すべりダムを形成する最も一般的な地すべりのタイプは、スランプ、すべり、流動そして崩壊である。
- (4) 地形学的にみると、少なくとも 6 つの異なったタイプの地すべりダムがあり、タイプ毎にダムの決壊や洪水の危険性に違いがある。
- (5) 決壊する地すべりダムのなかでは、ほとんどのものが形成後、直ちに決壊する (55% が形成後一週間

以内に決壊した)。

- (6) 主たる地すべりダムの決壊の機構としては、頂部の越流によって防御が破れ、それに続く侵食によるものが断然に多い。
- (7) 世界で最も壊滅的な洪水のいくつかは、地すべりダムの決壊によって発生したものであった。
- (8) ごくわずかな例であるが安定な状態にある地すべりダムでは、第1に水力発電のための場所として有効である。

引続き以下の項目に関して系統だった研究をおこなっていくことが必要と思われる; (1) 溪谷が地すべりによって堰止めを行うかどうかの可能性, (2) 地すべりのタイプとダムの性質との関連性, (3) ダム, 河川と堰止め湖の特性, そして地すべりダムの安定性/持続性との相互の関係, (4) ダムの決壊の機構, (5) ダムの決壊を防止するための物理的制御方法, (6) ダムの上流および下流側で発生する洪水の特徴と予測の可能性, (7) 洪水の発生の一次的および2次的効果, そして(8) 安定な状態にある地すべりダムの水力発電所としての利用。

14. 謝 辞

合衆国地質調査所の John E. Costa 氏は、この論文の中で提示された概念の多くを発展させるに当たり、こころよく協力して頂いたので、そのことをここに記して感謝の意を表明します。

参考文献

- Adams, John (1981): Earthquake-dammed lakes in New Zealand, *Geology*, 9, pp. 215~219.
- Asanza, M., Plaza-Nieto, G., Schuster, R. L., Yepes, H., and Ribadeneira, S. (1992): Landslide blockage of the Pisque River, northern Ecuador, *Proceedings, 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand, 10-14 February, 2, pp. 1229~1234.
- Butler, D. R., Oelfke, J. G., and Oelfke, L. A. (1986): Historic rockfall avalanches, northeastern Glacier National park, Montana, U.S.A., *Mountain Research and Development*, 6 (3), pp. 261~271.
- Cambiaghi, A., and Schuster, R. L. (1989): Landslide damming and environmental protection—A case study from northern Italy, Fang, H. Y., and Pamukcu, S., eds., *Proceedings, 2nd International Symposium on Environmental Geotechnology*, Shanghai, May, pp. 469~480.
- Cancelli, A. (1980): The control of movements for a landslide involving coarse rock debris in central Alps (northern Italy), *Proceeding, 3rd International Symposium on Landslides*, New Delhi, 7-11 April, 1, pp. 461~464.
- Chang, S. C. (1984): Tsao-Ling landslide and its effect on a reservoir, *4th International Symposium on Landslides*, Toronto, Canada, 16-21 September, 1, pp. 469~473.
- Clark, T. H. (1947): Two recent landslides in Quebec, *Transactions of the Royal Society of Canada*, v. 41, ser. 3, sec. 4, pp. 9~18.
- Code, J. A., and Sirhindi, S. (1986): Engineering implications of the impoundment of the upper Indus River, Pakistan, by an earthquake-induced landslide, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams: Processes, risk, and mitigation*, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication No. 3, pp. 97~110.
- Costa, J. E., and Schuster, R. L. (1988): The formation and failure of natural dams, *Geological Society of America Bulletin*, 100, pp. 1054~1068.
- Costa, J. E., and Schuster, R. L. (1991): Documented historical landslide dams from around the world, U. S. Geological Survey Open-File Report 91-329, 485 pp.
- Cotecchia, V., Guerrecchio, A., and Melidoro, G. (1986): The geomorphogenetic crisis triggered by the 1783 earthquake in Calabria (southern Italy), *Proceedings, International Symposium on Engineering Geology in Seismic Areas*, Bari, Italy, 6, pp. 245~304.
- Dawson, G. M. (1898): Remarkable landslip in Portneuf County, Quebec, *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 10, pp. 484~490.
- Eisbacher, G. H., and Clague, J. J. (1984): Destructive mass movements in high mountains; hazard and management, *Geological Survey of Canada Paper* 84-16, Ottawa, 230 pp.
- Engineering News-Record (1964): Russians blast through landslide dam, 7 May, p. 24.
- Fujita, M. (1985): Sabo in Japan, in *Proceedings of International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention*, Tsukuba, Japan, 3-5 September pp. 23~32.
- Gasiev, E. (1984): Study of the Usay landslide in Pamir, *Proceeding, 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, Canada, 16-21 September, 1, pp. 511~515.
- Glazyrin, G. Ye., and Reyzykh, V. N. (1968): Computation of the flow hydrograph for the breach of landslide lakes, *Soviet Hydrology, Selected Papers*, American Geophysical Union, 5, pp. 492~496.
- Govi, M. (1989): The 1987 landslide on Mount Zandila in Valtellina (northern Italy), *Landslide News*, The Japan Landslide Society, 3, pp. 1~3.
- Guerricchio, A., and Melidoro, G. (1973): Segni premonitori e collassi dell grande frane nelle metamorfiti della valle della Fiumara Buonamico (Aspromonte, Calabria), *Estratto da Geologia Applicata e Idrogeologia*, Bari, Italy, 8 (2), pp. 315~336.
- Gupta, A. C. (1974): Lakes of sorrow, *Journal of Institution of Engineers (India)*, Civil Engineering Division, 55, pp. 6~11.
- Harrison, A. (1974): Madison Canyon slide modification by the U. S. Army Corps of Engineers, in Voight, Barry, ed., *Rock mechanics—The American Northwest*, International Society for Rock Mechanics, 3rd International Congress on Rock Mechanics, Pennsylvania State University College of Earth Sciences Experiment Station Special Publication, pp. 138~143.
- Holmes, Arthur (1965): *Principles of Physical Geology*, 2nd edition, Ronald Press, New York, 1, 288 pp.
- Hutchinson, J. N., and Kojan, E. (1975): The Mayunmarca landslide of 25 April 1974, *UNESCO Serial* 3124/RHO. RD/SCE, Paris, 21 pp.
- Kaliser, B. N., and Fleming, R. W. (1986): The 1983 landslide at Thistle, Utah, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams: Processes, risks, and mitigation*, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication 3, pp. 59~83.
- King, J., Loveday, I., and Schuster, R. L. (1989): The 1985

- Bairaman landslide dam and resulting debris flow, Papua New Guinea, *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geology, Geological Society of London*, 22 (4), pp. 257~270.
- Knight, D. K., and Bennett, P. T. (1960): Stability of slide dam and recommendations for overflow spillway, in *Madison River, Montana, report on flood emergency, Madison River slide, Appendix 6, U. S. Army Corps of Engineers, Riverdale, North Dakota*, 5 pp.
- Lee, K. L., and Duncan, J. M. (1975): Landslide of April 25, 1974, on the Mantaro River, Peru, *Committee on Natural Disasters, Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council, Washington, D. C.*, 72 pp.
- Li Tianchi (1989) Landslides: Extent and economic significance in China, in Brabb, E. E., and Harrod, B. L., eds., *Proceedings of the 28th International Geological Congress, Symposium on Landslides, Washington, D. C., July 17, A. A. Balkema, Rotterdam*, pp. 271~287.
- Li Tianchi, Schuster, R. L., and Wu Jishan (1986): Landslide dams in southcentral China, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams—Processes, risk, and mitigation, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication 3*, pp. 146~162.
- Mason, Kenneth (1929): Indus floods and Shyok glaciers, *The Himalayan Journal*, 1, pp. 10~29.
- Meyer, W., Sabol, M., and Schuster, R. L. (1986): Landslide dammed lakes at Mount St. Helens, Washington, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams—Processes, risks, and mitigation, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication No. 3*, pp. 21~41.
- Monastersky, R. (1992): Dams on demand, *Science News*, 142 (9), p. 136.
- Montandon, F. (1933): Chronologie des grands eboulements alpins, du debut de l'ere chretienne a nos jours, in *Materiaux pour l'Etude des Calamites, Societe de Geographie Geneve*, 32, pp. 271~340.
- Mora, Sergio; Madrigal, Carlos; Estrada, Javier; and Schuster, R. L. (in press): The 1992 Rio Toro landslide dam, Costa Rica, *Landslide News, The Japan Landslide Society*.
- Peter, A. (1938): Le glissement de terrain dans les gorges de Moutier-Court, Strasse and Verkehr, Solothurn, Switzerland, 10, pp. 165~172.
- Pushkarenko, V. P., and Nikitin, A. M. (1988): Experience in the regional investigation of the state of mountain lake dams in central Asia and the character of breach mudflow formation, in Kozlovskii, E. A., ed., *Landslide and mudflows, UNESCO/UNEP, Moscow*, 2, pp. 1359~1362.
- Read, S. A. L., Beetham, R. D., and Riley, P. B. (1992): Lake Waikaremoana barrier—A large landslide dam in New Zealand, in Bell, D. H., ed., *Landslides, Proceedings, 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, 10-14 February*, 2, pp. 1481~1487.
- Sager, J. W., and Chambers, D. R. (1986): Design and construction of the Spirit Lake outlet tunnel, Mount St. Helens, Washington, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams—Processes, risk, and mitigation, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication 3*, 42~58.
- Savage, W. Z., Varnes, D. J., Fleming, R. W., and Schuster, R. L. (1992): The Slumgullion earthflow, southwestern Colorado, USA, *Landslide News, The Japan Landslide Society*, 6, pp. 19~22.
- Schuster, R. L., and Costa, J. E. (1986a) A perspective on landslide dams, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams: Processes, risk, and mitigation, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication No. 3*, pp. 1~20.
- Schuster, R. L., and Costa, J. E. (1986b): Effects of landslide damming on hydroelectric projects: *Proceedings of 5th International Congress of the International Association of Engineering Geology, Buenos Aires, 20-25 October*, 4, pp. 1295~1307.
- Schuster, R. L., and Costa, J. E. (1990): Tunnel drains for natural dams—A unique underground-technology application: *Proceedings, International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, Colorado, 12-15 June*, 2, pp. 84-1 to 84-22.
- Sekiya, S., and Kikuchi, Y. (1889): The eruption of Bandai-san, *Imperial University College of Science Journal, Tokyo*, 3 (2), pp. 91~172.
- Shank, C. C., Petocz, R. G., and Habibi, K. (1977): A preliminary management plan for the Ajar Valley Wildlife Preserve, Field Document, United Nations Development Program, Kabul, Afghanistan, 35 pp.
- Sheikh, I. A. (1989): Investigation of the Red Shirt landslide in Shannon County, South Dakota, M. S. thesis, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, 134 pp.
- Stover, B. K., and Cannon, S. H. (1988): Reactivation of the Muddy Creek landslide, west-central Colorado, U. S. A., *Landslide News, The Japan Landslide Society*, 2, pp. 8~10.
- Swanson, F. J., Oyagi, N., and Tominaga, M. (1986): Landslide dams in Japan, in Schuster, R. L., ed., *Landslide dams: Processes, risk, and mitigation, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication No. 3*, pp. 131~145.
- Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes, in Schuster, R. L., and Krizek, R. J., eds., *Landslides—Analysis and control, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D. C.*, pp. 11~33.
- Wood H. O., and Neumann, F. (1931): Modified Mercalli Intensity Scale of 1931, *Seismological Society of America Bulletin*, 21 (4), 277~283.
- Xue-Cai, F., and An-ning, G. (1986): Principal characteristics of earthquake landslides in China, *Geologia Applicata e Idrogeologia, Italy*, 21 (2), pp. 27~45.
- Yesenov, Yu. E., and Degovets, A. S. (1982): Protection of the City of Alma-Ata from mud-rock flows, in Sheko, A., ed., *Landslides and mudflows, UNESCO/UNEP, Centre of International Projects, GKNT, Moscow*, pp. 454~465.

あと書き

R. L. シュスター博士は米国地質調査所の研究者であり、平成5年4月27日、氏の来日を期して第1回谷口奨励賞が授与されました。これは氏がこれまで地すべり研究の国際的活動に多大の功績を残し、さらに地すべり学会の国際的活動に協力し、多大の貢献をされたためです。本論文は平成5年4月27日の地すべり学会関西支部のシンポジウムの資料集に寄稿され、同日特別講演されたものである。なお、訳文全体については京都大学防災研究所の佐々恭二教授に目を通していただいた。