

天然ダム—出現過程、危険性、被害軽減—

地盤工学専門出版、No.3、1986.4.7

米国土木学会

編集；Robert L. Schuster

Pp21~41

ワシントン州セントヘレンズ山の崩壊による堰止湖 ＜閉塞体(天然ダム)のパイピング、液状化、法面崩壊の可能性解析＞

William Meyer, Martha A. Sabol, and Robert Schuster, F.ASCE

概 要

1980年5月18日にセントヘレンズ山の北壁が崩壊し、その結果発生した土石なだれによって、スピリット湖とコールドウォーター・クリークおよびサウスフォーク・キャッスル・クリークからの流出が遮断された。スピリット湖のサイズが大きくなり、コールドウォーター・クリークとサウスフォーク・キャッスル・クリークの峡谷に湖が形成され始めた。スピリット湖の閉塞体のクレスト部にある火砕流堆積物はパイピングの影響を受けやすいため、湖の決壊と壊滅的な洪水を防ぐためには、湖の水位をこれらの堆積物より下で安定させなければならなかった。コールドウォーター湖とキャッスル湖は、1981年後半から1982年前半にかけて、それぞれの閉塞箇所を越水する可能性が高く、越水すると、閉塞体が急速に侵食されて湖水が急速に放出される。コールドウォーター湖の決壊は壊滅的な洪水を引き起こし、キャッスル湖の決壊はおそらく深刻な洪水を引き起こす可能性があった。結果としては、両湖の水位は1981年に放水路が建設されて安定した。

3つの閉塞体（天然ダム）は、液状化と重力による法面崩壊に対しては安定していた。スピリット湖とコールドウォーター湖の閉塞体は、現存する湖面の高さではパイピングに対して安定であるが、キャッスル湖の閉塞体はパイピングに対してぎりぎり安定の状態であると考察された。

閉塞体における地下水の存在は、1981年から1983年にかけて設置されたピエゾメーターで観測された。水位が湖面より高い地下水マウンドが、すべての閉塞体のクレスト下に存在していた。地下水位標高は、閉塞体の安定性を分析する際に重要である。

はじめに

1980年5月18日、セントヘレンズ山の爆発的噴火の直接的なきっかけは、マグマ貫入、熱水活動、3月、4月、5月の間の地震によって弱体化した火山の円錐形の北側の膨ら

んだ部分が午前 8 時 32 分に崩壊したことであった。この崩壊はマグニチュード 5 クラスの地震の直後に発生し、 2.3km^3 の岩石滑落をもたらした。

岩なだれは山の北斜面を高速で移動しながら巨大化し、高温の土石なだれとなった（図 1）。この岩屑の一部はスピリット湖に流入し、湖の標高を 63m 上昇させた（Meyer and Carpenter, 1982）。また、土石なだれの一部は、セントヘレンズ山の北 8km のジョンストン尾根にも乗り上げ、スピリット湖の流出口を塞いだ（Glicken, 1986）。そして、土石なだれの大部分はノースフォーク・タートル川の渓谷を下った。

10 分ほどで、土石なだれはノースフォーク・タートル川（図 2）の谷を平均速度 35m/s 、最大速度 70m/s で 24km 流下した。平均厚さは 45m 、総体積は 2.8km^3 であった（Voight ら、1983）。ノースフォーク・タートル川の流域の約 60km^2 が、表面が凹凸でほとんど分類されていない土砂で覆われ、ノースフォーク・タートル川の谷の壁に沿って、土石なだれ堆積物が堤防となり流入する支流をせき止めた。



図 1. ワシントン州南西部、North Fork Toutle River 上流の谷に堆積した土石なだれ。なだれの遠縁からセントヘレンズ山の頂上に向かって東側を望む。

（R. M. Krimmel による写真、米国地質調査所）。

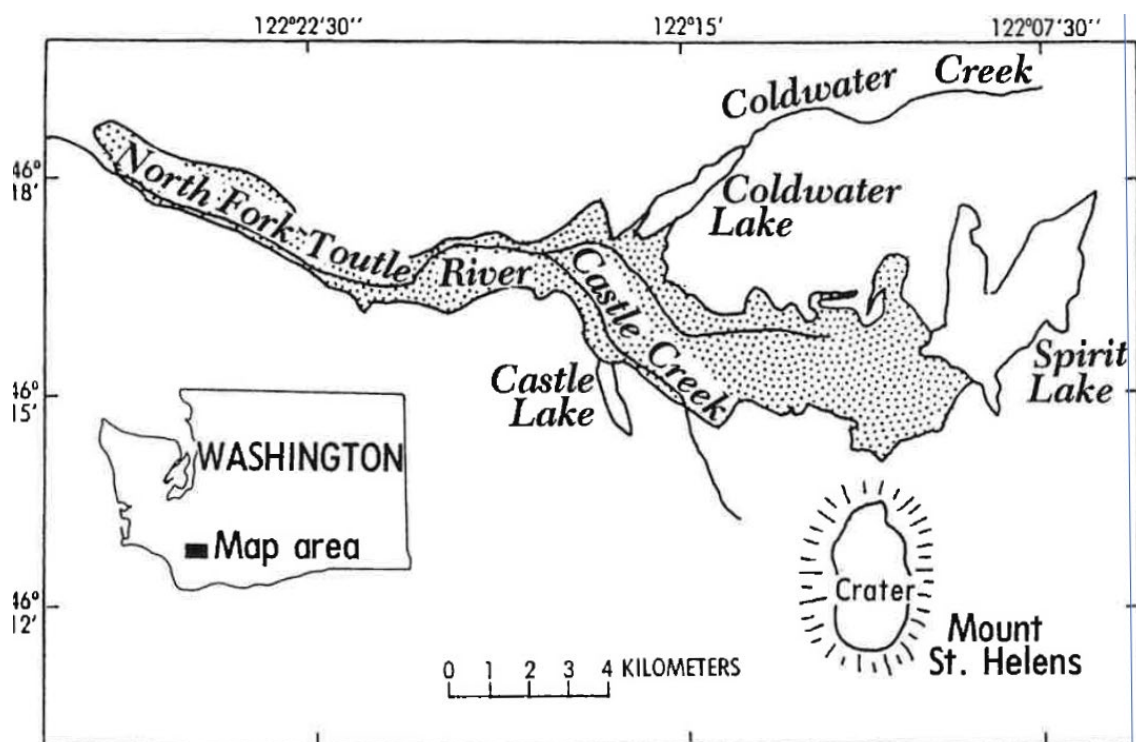


図2. 1980年5月のセントヘレンズ山の土石なだれで埋まった地域（グレー部）、ワシントン州南西部、ノースフォーク・タートル川源流の地図。また、土石なだれによってせき止められたスピリット湖、コールドウォーター湖、キャッスル湖の位置も示している。

新たにせき止められたスピリット湖（図3）、およびコールドウォータークリークとサウスフォークキャッスルクリークのせき止められた谷に形成され始めた湖（図4と5）の想定規模は、下流域に洪水の危険をもたらす可能性が非常に大きかった。スピリット湖が最大容量まで湛水した場合、その表面積は約1,425ヘクタール（ha）、最大水深は約69m、貯水量は6億1,800万 m^3 であり、湖面の標高は1,077mに達すると想定された。最大標高722mになった場合のコールドウォーター湖の表面積は約421ha、最大水深は71m、貯水量は約1億4,000万 m^3 と想定され、キャッスル湖の最大標高は791m、表面積は138ha、水深は約37m、貯水量は3,000万 m^3 と想定された。

噴火後、米国地質調査所（USGS）は各湖の水位と貯水量の監視を開始し、湖が満杯になる可能性と、閉塞体を構成する土石なだれや噴出物の安定性を調査した。「パイピング」、「液状化」、「重力」による斜面崩壊に対する閉塞部の安定性の解析を行ったので、その結果をここに述べる。「地震による斜面崩壊」や「閉塞体浸食」に対する閉塞体の安定性に関する調査は現在進行中である。閉塞体全体の安定性に関連する地下水位が重要であるため、各閉塞体の地下水位システムについても議論している。



図3 スピリット湖と土石なだれの堆積物。背後はセントヘレンズ山



図4 コールドウォーター湖と閉塞体



図5 キャッスル湖と閉塞体

閉塞体を形成する堆積物の特徴

この3つの閉塞体の大部分は土石なだれで構成されており、スピリット湖の閉塞体では厚さ135mにもなる。その後噴出した堆積物は主に土石なだれの表面に堆積し、厚さが10mを超えることはほとんどない (Glicken and Voight, in press)。土石なだれは、粘土から転石までの大きさの、角ばった未分類の瓦礫で構成されている。3つの土石なだれの大部分を占める岩屑は、未固結のブロックからなり、古い山の破片が比較的そのままの形で堆積した場所に運ばれたものである。これらのブロックは、様々な大きさに変形し、剪断され、破碎されている。中には、元となった火山岩（主に変質したデイサイト、安山岩、玄武岩）の特徴を持つものもある。しかし、閉塞体を構成する土石なだれ物質の多くは、砕けすぎて土木土壌の特性を示している。構成している材料の土のような部分（#4以下）は非塑性で、平均内部摩擦角は 40° 、平均空隙率は約0.47、平均透水係数は 9×10^{-6} m/s(屋内試験で決定) (Voight 他、1983)である。粒子の角ばった形状と高いせん断強度のため、土石なだれは概して安定した斜面を形成する。

岩盤の滑落によって、山のマグマだまりの中で高まっていた圧力が解放され、その結果、横方向の爆発によって火砕流が発生し、土石なだれの表面に爆風堆積物、火山灰堆積物、火砕流の3つの基本的なタイプの火砕流群が堆積した (Glicken and Voight, in press)。

最初の爆発によって爆風堆積物 (Hoblitt 他、1981) と呼ばれるものが生成された：この堆積物は、3つの湖の閉塞体に存在する土石なだれの上部を覆った。スピリット湖の閉塞体では、爆風堆積物の厚さは、小丘のゼロから深い窪地の13 mまであり、コールドウォーター湖とキャッスル湖の閉塞体の爆風堆積物の厚さは、深い窪地の一部で3mになると推定された (Glicken and Voight, in press)。スピリット湖の閉塞体の爆風堆積物は2つのユニットからなる。下層は、粗い砂から玉石まで、角ばった分級されていない細粒分の乏しい礫で構成されている。この非常に砕けやすい物質は、浸食に対する抵抗力が弱い。上部ユニットの粒度は、シルトや砂から小石や玉石までと幅広い。下部ユニットよりも細粒分を多く含むため、このユニットは破碎性が低く、浸食に対する抵抗力が強い。コールドウォーターとキャッスル湖の閉塞体にある爆風堆積物は、シルトや粘土から転石の大きさまでの未分類の混合物から成る。

火山灰堆積物は、5月18日の側方爆風で流動火砕流から上方に対流した微細な火山灰の雲から生じたものである。これらの堆積物は、スピリット湖の閉塞体土石なだれの上を厚さ0~18m覆った。これらの堆積物は主にほぼ均一なシルトから細かい砂で構成されており、非常に破碎しやすく、表面の浸食やパイピングに対する抵抗力が低い (図6と7)。

最初の噴火による堆積物に続いて、1980年5月18日午後と6月12日の噴火によって火砕流が発生した (Glicken and Voight, in press)。これらの火砕流堆積物は、スピリット湖閉塞体の南側の表面に9~29mの厚さで存在するが、コールドウォーター・クリークとキャッスル・クリークの天然ダムには達していない。堆積物は主に砂の大きさであるが、

粘土の大きさから軽石や直径数十 cm の石塊まで様々である (Glicken and Voight, in press)。一般的にルーズで砕けやすいため、浸食に対する抵抗力が弱い。



図 6 1982 年夏、スピリット湖の閉塞体の火山灰堆積物に形成された、深さ 50 フィート(15m)の垂直な壁が形成された流路。(写真：H.グリッケン、米国地質調査所)。

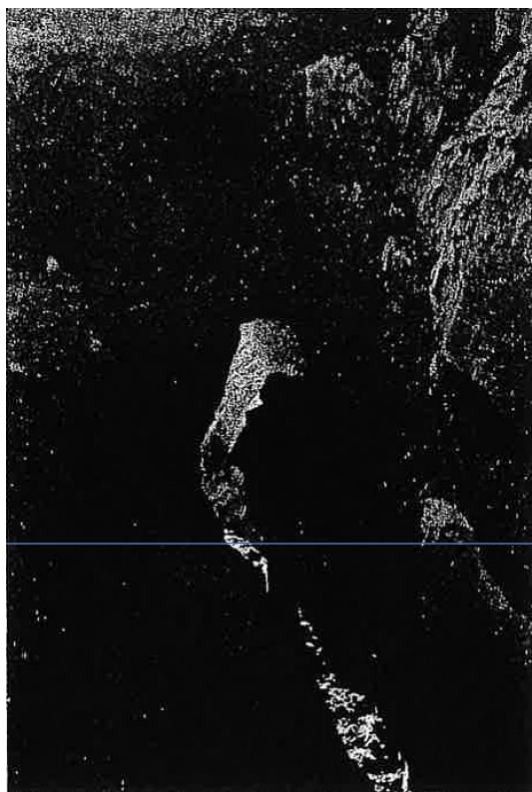


図 7 1982 年夏、スピリット湖の閉塞体の火山灰堆積物のパイピング (写真：同上)

湖の満水に関する初期の想定

湖の満水、越水、その後の閉塞体の浸食による湖の水の流出が、最も可能性の高い決壊のメカニズムであると考えられたため、各湖の満水に要する時間の初期推定が行われた。ワシントン州運輸局と米国地質調査所によって作成された地形図をもとに、各湖の水位と水量の関係が設定された。各流域の月降水量は、キッドバレー（調査地域の西 29km）とグレノマ（調査地域の北 27km）の平均月降水量と平均年降水量、および国立気象局の等比図から流域の平均年降水量を用いて推定した。平均値は、(1)流域内のすべての降水が湖に到達する、(2)蒸発や浸透による湖の損失はない、(3)土砂堆積による湖容量の損失はない、(4)すべての降水は降雨として発生する、と仮定して、各湖のステージ-容量-時間曲線を計算するために使用された。上記の仮定に基づき、スピリット湖の閉塞体を越水する推定日は 1984 年 11 月 となり、コールドウォーター湖とキャッスル湖の両方が閉塞体を越える推定日は、1981 年 12 月となった。

この情報は、USGS によって 1980 年 10 月に連邦緊急事態管理庁（FEMA）と米国陸軍工兵隊に提示された。その後まもなく、FEMA は、コールドウォーター湖に関連する潜在的な洪水危険性を推定するため、ダンとレオポルド（1981）による検討を開始した。この検討結果は、コールドウォーター湖の越水決壊による洪水は壊滅的であり、タートル川河口でのピーク流出量は、5 月 18 日に発生したノース・フォーク・タートル川の泥流の 2 倍に達する可能性があるということであった。

コールド・ウォーターとキャッスル湖の両方からの潜在的な洪水の危険を軽減するため、工兵隊は 1981 年の夏と秋に放水路を建設し、それぞれ標高 753m と 785m で水位を安定させた。コールドウォーター湖の放水路は、その閉塞体の右岸を形成する岩盤の尾根を掘削し、キャッスル湖の放水路は、その閉塞体の右端に建設された。

観測された湖の貯水量

噴火後、USGS は湖の水位と貯水量の体系的なモニタリングを開始した。湖水位の測定は各湖で異なる時期に開始され、スピリット湖では 1980 年 5 月 21 日、キャッスル湖では 1980 年 9 月 3 日、コールドウォーターでは 1980 年 9 月 18 日に測定が開始された。各湖の貯水量を図 8 に示す。

図 8 に示すように、キャッスル湖とコールドウォーター湖では放水路、スピリット・レイクでは閉塞部に埋設された仮設放水管への汲み上げによって水位の安定化が達成されるまで、各湖の貯水量は概ね時間とともに増加した。しかし、湖の貯水は連続的なものではなかった。スピリット湖の水量は 1980 年 5 月から 7 月にかけて減少し、降雨のない 1981 年 8 月から 9 月中旬までは基本的に安定していた。それ以外の時期には貯水量は増加した。コールドウォーター湖とキャッスル湖は、1981 年 7 月まで湖水量が増加し、その後一時的に安定した。コールドウォーター湖の放水路は 7 月に完成し、湖水位は 1981 年 7 月

下旬に放水路の水位まで下った。キャッスル湖は7月下旬に上昇を始めたが、1981年10月に完成し開通した放水路によって安定した。

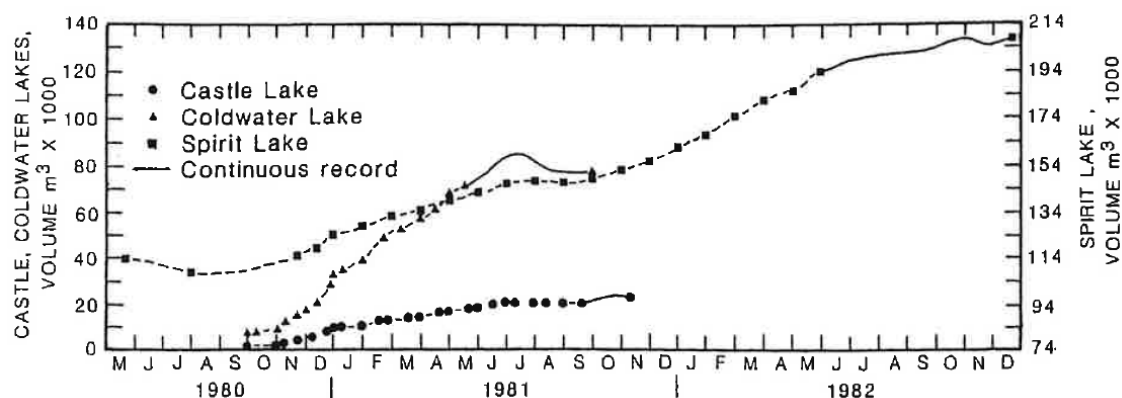


図8 スピリット、コールドウォーター、およびキャッスル湖の貯水量曲線

スピリット湖の緊急事態

現地調査によると、スピリット湖を堰き止めている閉塞体のクレストで最も低い地点は標高 1,077m であった。この地点は、1980 年 5 月 21 日に測定されたスピリット湖の水位より 39m 高い。この低地点を含むクレストの大部分において、閉塞体は細かい粒子の低密度の火山灰の堆積物に覆われた土石なだれ堆積物で構成されていた。

スピリット湖の湛水速度を継続的にモニタリングした結果、年間平均降水量を仮定すると、1985 年 12 月頃に最大湛水量に達することが分かった(Meyer and Carpenter, 1982)。しかし、1981 年から 82 年の冬にかけての火山灰の堆積物の浸食状況から、これらの堆積物はパイピングの影響を受けやすく、クレスト付近では 15m もの厚さがあることがわかった。この後者の事実は、堆積物の中に、浸食されクレストに向かって伸びている深さ 15m もの垂直壁の水路によって確認された。浸食によってクレストが低くなる可能性と、火山灰堆積物がパイピングを受けやすいことから、1985 年 12 月までに湖が決壊する可能性が示唆された。Meyer と Carpenter による予測によると、年間平均降水量で、湖水は 1983 年 7 月までにクレストから 15m 以内まで上昇する。

USGS は、1982 年 5 月と 6 月に、米国森林局 (USFS) と州およびカウリッツ郡の職員に、湖に関する状況を報告した。1982 年 7 月、USFS、工兵隊、USGS、カウリッツ郡の職員からなるタスクフォースが結成され、湖の湛水とその潜在的な決壊に関連する諸問題に取り組んだ。1982 年 7 月 27 日のタスクフォース報告書は、スピリット湖の天然ダムが自然決壊する可能性について、緊急事態を宣言することを勧告した。この勧告の理由は、土石なだれの最上部 9 メートルから 12 メートルを持続可能な遮水壁としては除外しなければならず、準備期間を設け、安全な湖水の出口を造り、危険を排除するためである。そして、湖の水をコントロールするための放水口を 1983 年の夏までに建設する必要があるとされた。

Kresch(1982)は、閉塞体の越流とそれに続く急速な浸食によって、4,760~16,240m³/sのピーク流量が発生すると推定した。この流量は、スピリット湖から97km下流にあるケルソのカウリッツ川の堤防の標高より9~12m高いラハールとなり (Swift and Kresch, 1982)、コロンビア川に堆積する土砂は、現在の河床よりも約13.4メートル高い河床となって、堆積物の上を流れるコロンビア川の水位は16日間上昇し続ける可能性がある。

Bissell and Hutcheon (V. C. Bissell and R. Hutcheon, National Weather Service unpublished report, 1983) は、Swift and Kresch (1983) と National Weather Service がモデル化した仮想のスピリット湖の決壊による洪水は、スピリット湖から97km下流のKelsoにあるカウリッツ川の堤防の標高を2~8m上回る可能性があることを示した。

タスクフォースの報告書が作成された後、1982年8月3日にワシントン州知事がセントヘレンズ山周辺の非常事態を宣言し、1982年8月19日にレーガン大統領が洪水非常事態を宣言した。この非常事態宣言を受けて、USGSは、湖の閉塞体とその決壊に起因する洪水の早期警告を提供する監視システムの設計、設置、運用を要請された。このシステムは、1982年11月までに運用が開始された (Childers and Carpenter, 1985)。

工兵隊は、スピリット湖からの水をポンプで排水するパイプの設置を完了し、ポンプは1982年11月5日にフル稼働を開始して、湖水位は一時的に1,055mに安定した。その後、1985年夏、スピリット・レイクのすぐ西に位置するハリーズ・リッジを構成する第三紀火山岩を貫く排水トンネルによって、湖面は1,049mで恒久的に安定した。

工兵隊の取り組みと併行して、USGSは閉塞体クレストの火山灰の堆積物の厚さを決定するための調査を行った。この調査の結果 (Glicken 他、準備中)、閉塞体の有効なクレスト (岩屑なだれ堆積物の上端) の最低点はおおむね1,069mであることが分かった。通常の降水量を仮定すると、湖の水位の安定化が行われていなければ、1984年の春にはこの標高に達していたことになる。

地下水系統

試験ボーリングとピエゾメーターの設置は、1981年の夏と秋にコールドウォーター閉塞体で、1982年から83年にかけてスピリット湖で、1983年の夏にキャッスル湖で行われた。ピエゾメーターの水位観測結果に基づき、各閉塞体の地下水システムの地図が作られた。地下水システムは3つの閉塞体すべてで形成され、1983年後半には地下水の一般的な流動パターンが類似するようになった。

水位が湖面より高い地下水マウンドが、それぞれの閉塞体のクレスト下に形成されていた。地下水の動きは、それぞれのマウンドから湖の方向と、閉塞体の法尻に向かう水平方向と垂直方向の両方向がある。1984年4月のキャッスル・レイク閉塞体の水位を図9に示す。

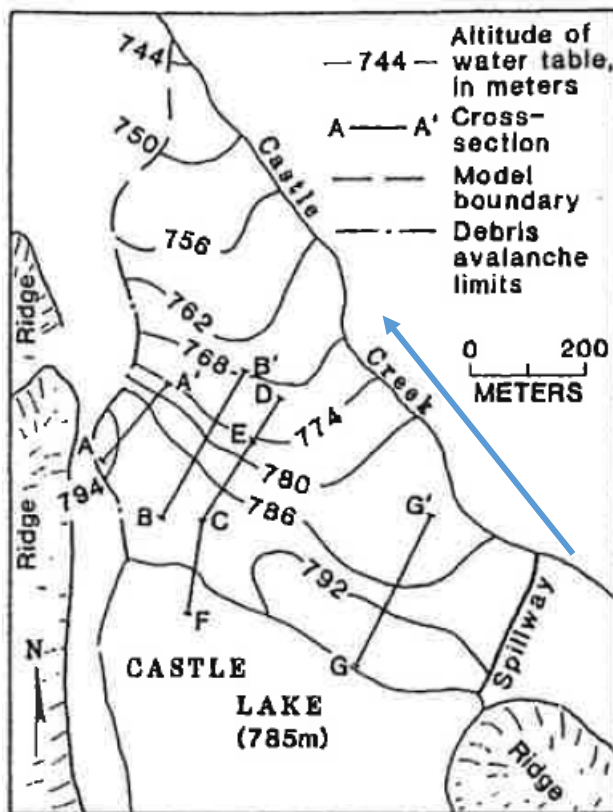


図9 キャッスル湖閉塞体の斜面の安定性を解析した地下水位と断面の位置。

図9に示されているように、ダム湖の水位を上回って閉塞体のクレストの下に地下水マウンドが形成されるのは、一般に地下水位がダム湖よりも低いと想定される人工のアースフィルダムに通常見られる地下水流動システムの特徴とは異なる。

しかし、ここでは、閉塞体の形状、透水性、流入量の組み合わせにより、地下水位が湖水位より上にある。

地下水位を測定した結果、キャッスル湖とコールドウォーター湖の閉塞体の地下水系は、1984年までの間に平衡化し、年間ベースで涵養量と同程度の湧出量となった。

スピリット湖閉塞体の地下水位は通年上昇を続けており、平衡状態にまだ達していないことを示している。平衡化以前は、コールドウォーター閉塞体では年間5mまでの地下水位の上昇が記

録されており、スピリット湖の閉塞体では最大17mの年間純増が記録された。キャッスル湖の閉塞体では年間純増水位は観測されず、1983年にピエゾメーターが設置される前、または設置された直後に地下水システムが平衡化したことを示している。これ等の状況を表す水位図を図10に示す。

コールドウォーターとキャッスル湖の閉塞体における水文学的環境に変化がないと仮定した場合、これらの地点の地下水位は、涵養量と湧出量の季節差に応じて季節変動するが、長期的な年間ベースでは比較的安定していると推定される。キャッスル湖の閉塞体では最大7m、コールドウォーター湖では最大約3mの季節変動が記録されている。スピリット湖の閉塞体の水位は、平衡に達するまで短期的には上昇を続けると予想された。

一般的に、閉塞体部への供給水源は、降水の浸透によるものであり、隣接する尾根の一部からの地表水と地下水の流入によるものもある程度ある。モデル分析によると、スピリット、コールドウォーター、キャッスル湖の地下水量は、それぞれ降水による涵養が55%、93%、80%を占めていることが分かっている。さらに、閉塞体に降った総降水量の約64%が地下水系に浸透している。

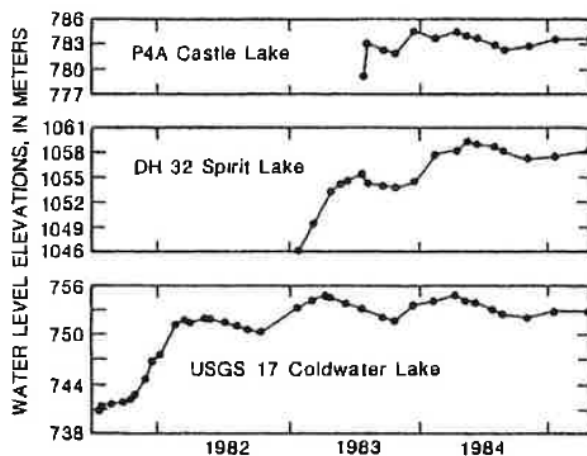


図 10 各閉塞箇所の地下水の水位図の例

め、尾根と閉塞堆積物の間で地下水の移動が起こるが、この移動は小さいと考えられる。コールドウォーター湖の閉塞体にあるピエゾメーターで実施されたスラグ試験の結果、土石なだれ堆積物の水平透水係数は $3.9 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、平均 $8.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ という値が得られた。

それぞれの閉塞体における地下水システムを理解・定量化するための手段として、また、本報告書で後述しているように、閉塞体の安定性を判断するための手段として、各閉塞体における地下水の3次元移動をシミュレートするデジタルモデルが構築された。コールドウォーターとキャッスル湖の閉塞体における地下水流動システムのモデル解析の結果から、スラグ試験で得られた透水係数の値は、少なくともオーダーとしては堆積物の透水性を代表していると考察した。また、モデル分析によると、垂直方向の透水係数と水平方向の透水係数の比はおよそ1対10である。

重力による斜面崩壊

閉塞体における重力による斜面崩壊の可能性は、パデュー大学の合同道路研究プロジェクトによって作成された STABL3 と呼ばれるデジタル・コンピュータ・プログラムを使用して判定された。このプログラムは、定義された断面に沿ってすべり面を探索し、最も崩壊しそうなすべり面の安全係数を計算する。各断面について100のすべり面が作成され、最も低い安全係数 (FS*) を持つものが特定される。以下、これを“**臨界安全係数**”と呼ぶ。プログラムの解析手法として、修正ビショッブ法とヤンプ法が利用できる。STABL3の結果は、Morgenstern and Price 法によって独自にチェックした。

閉塞してから少なくとも数カ月は、閉塞体に流れや湧水は見られなかった。やがて、そのすべてに湧水と池が形成された。湧水は地下水の流出を表し、池は地下水が窪地に溜まったか、地表流出水が流れ込んだか、あるいはその両方を表している。

それぞれの閉塞体を構成している堆積物は、それらが突き当たっている尾根やその下にある物質よりも透水性が高いと考えられた。尾根もその下の堆積物もある程度の有限の透水性を持っているた

材料特性の仮定

STABL3 プログラムでは、湿潤・飽和单位重量、内部摩擦角、粘着力の設定が必要である。深部における閉塞体の層序は、テストホールが掘削された場合を除き非常に不確かであるため、設定した値は、閉塞体厚さ全体の材料特性を表すものと仮定した。

3つの閉塞体すべてにおいて、湿潤および飽和の単位体積重量は、初期の測定値からそれぞれ $1,682\text{kg/m}^3$ および $9,852\text{kg/m}^3$ と設定した。これらの推定値は、現地および実験室での試験プログラムが完了する前に決められたものであり、想定された単位体積重量値は現在では低いと考えられている。しかし、単位体積重量が予測安全係数に与える影響を調べるために感度分析を行った結果、単位体積重量が極端な値であっても安全係数の変化は0.1以下であった。したがって、この分析で用いられた値は妥当であると考えられる。

内部摩擦角は35度、粘着力は0.0としている。内部摩擦角35度という値は、閉塞材料の最大強度ではなく、実験室での極限強度とほぼ同じである。実験室での値は、より大きな碎屑物や適度な自然圧密による強度の影響を無視している。

安定解析

この解析では、FSは通常の崩壊面を表し、FS*は臨界崩壊面（安全率が最も低い崩壊面）を表す。FSが1.2以下であれば、斜面が不安定になる可能性のある断面を特定することができる。閉塞体の安定性解析は、閉塞体の地形図から選定した断面と、キャッスル湖閉塞体で現地調査された3つの断面で行った。これらの断面は、閉塞箇所でも最も勾配が急であり、したがって最も崩壊しやすいと考えられる場所である。

1984年の季節的に高い地下水位として、キャッスル湖とコールドウォーター湖の堤体では1984年4月、スピリット湖堤体では1984年5月の水位コンターマップから作成された水位を用いて、それぞれの閉塞体を解析しシミュレートした。また、最も危険側の地下水位条件でシミュレートするため、地表に水位があると仮定した解析も各断面で行った。

キャッスル湖の閉塞体（天然ダム）

キャッスル湖の閉塞体では5つの断面が解析され、その位置は図9に示した。5つの断面のうち4つは、閉塞体の下流側、つまり閉塞体のクレストからキャッスル・クリークに向かう領域の安定性を調べる。このうち、閉塞体の西側にある3つの断面（AA'、BB'、CD）は、下流側の地表の起伏が最も大きく、斜面崩壊の可能性が最も高い下流側の代表的な場所である。4つ目（GG'）は、閉塞体の東部に位置し、下流側の地盤傾斜が緩やかな場所である。閉塞体の上流側の斜面と地下の状態、および頂上からキャッスル湖に向かう地形は概ね一様であるため、上流方向の斜面崩壊の可能性を調査するために、1つの断面CFを使用した。断面AA'とBB'は、湖の西側に面する基盤岩の尾根の付近に末端がある。断面AA'とBB'に沿った斜面崩壊は、この崩壊が残存する閉塞体を弱めない限り、あ

るいはこれらの断面の近くで湖側への崩壊を伴わない限り、湖の決壊には至らないと考えられる。後者の可能性は存在するため、AA'と BB'の断面の安定性が検討された。

静的解析

キャッスル湖の閉塞体を 1984 年の地下高水位と粘着力ゼロで解析した結果、FS*が 1.4 未満の破壊面は得られなかった。FS*の値は、AA'断面の 1.4 という最小値から GG'断面の 3.9 という最大値まで幅がある。1.2 以下の安全係数を持つ崩壊面は作成されなかったため、1984 年 4 月と同じ地下水位を想定した場合、閉塞体は安定していると考えられる。

地表に地下水位がある場合、断面 AA'、CE、CF で潜在的崩壊面が予測される。AA'断面では、潜在的な崩壊面は浅く、湖面下には及ばない。したがって、これらの崩壊は短期的な閉塞体の安定性にはほとんど影響しない。CE と CF を組み合わせた断面を図 11 に示す。断面 CE では、潜在的な崩壊面は湖面から最大 8m、閉塞体クレストの後方 30m まで延びている。断面 CF では、潜在的崩壊面は浅く、FS=1.2 の面が湖面から約 9m、閉塞体クレストの 15m 後方まで延びている。臨界崩壊面(FS=0.6)は湖面下には延びていない。

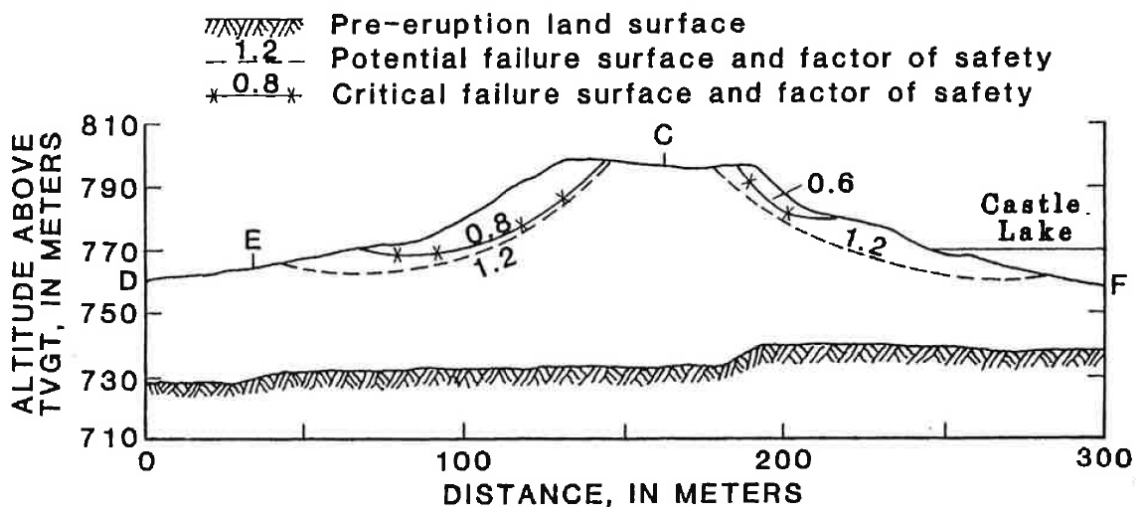


図 11 閉塞体の最大断面を包含する CE と CF 断面において、地表に地下水位があり、粘着力がゼロの場合の予測崩壊面および潜在的崩壊面 (Meyer 他, in press)。

地表に地下水位がある断面 CE と CF に沿った潜在的な崩壊面 (FS=<1.2) は、閉塞体のかなりの大きさで発生し、一部は湖面よりかなり下まで伸びている。しかし、FS 値が 1.2 である両断面に沿った崩壊は、閉塞体のかなりの部分を無傷のまま湖面上に残すことになる。このことから、地下水位に関係なく、閉塞体の初期斜面の崩壊では湖の決壊は予測されない。

遡行的／静的分析

遡上性斜面崩壊については、地表に水位があると仮定し、初期斜面崩壊の後に残った閉塞部分について複合断面 DF の解析を行った。解析には、以下の仮定が含まれており、これらは安全側であると考えられる：(1)初期滑り面および連続するすべての滑り面の上の材料が閉塞体から分離される、(2) 遡上すべり面が、 $FS < 1.2$ の深くくぼんだ滑り面に沿って生じ、閉塞体の最大量を包含する、(3)各すべり塊は、連続するすべり塊の動きを妨げたり、影響を与えたりしない。すべての解析において、粘着力はゼロと仮定した。

地表に水位がある状態で、遡上性崩壊の解析を行った結果、閉塞体が湖面よりも低くなり、それによって湖の決壊を引き起こす可能性が考えられることが示された。しかし、遡上性崩壊で想定される高い流動性は、閉塞体が中程度に圧縮された粗い岩屑で構成され、大きな碎屑物を含み、中程度の拘束圧にさらされているため、あり得ないと考察された (Meyer ほか、準備中)。斜面崩壊は、土石流、スランプ、スランプフローとして発生する可能性が高く、これらは崩壊した塊のつま先でゆっくりとした流動性を示す。深い位置にある湾曲したすべり面では、変位の増加に従い推力が減少する。したがって、変位は限定的であり、約 30m を超えることはめったにない。この程度の変異では、閉塞体のクレストを湖面以下まで下げるには不十分である。したがって、遡上斜面破壊による湖の決壊の可能性は低いと考察された。

コールドウォーター湖の天然ダム

図 12 に示すコールドウォーター湖の閉塞体の 5 つの断面について、斜面の安定性を解析した。キャッスル湖の閉塞体と同様、5 つの断面のうち 4 つ (AA'、BB'、CC'、DD') は閉塞体の下流側を代表するもので、1 つ (EE') は閉塞体の湖側を代表するものである。

コールドウォーターの閉塞体では、1984 年の地下水位を想定した場合、 $FS < 1.4$ となる崩壊面は予測されなかった。FS の値は、CC'断面の低い 1.4 から、EE'断面の高い 6.3 である。FS が 1.2 以下となるような崩壊面は発生しないと予測されたため、この閉塞体は 1984 年 4 月の水位では安定していると考察された。

地表の地下水位では、断面 AA'、BB'、EE'沿いには潜在的な崩壊面はなく、断面 CC'と DD'沿いにはごく軽微な局所的崩壊が予測されるだけである。断面 CC'に沿っては 2 つの不安定領域が予測されている。エリア A 内の崩壊はすべて湖面より上で発生し、 FS^* は 1.0 である。エリア B 内のいくつかの崩壊は湖面下で発生すると予測され、 FS^* は 0.6 である。断面 DD'に沿っては 3 つの不安定領域が予測された。ここでは、すべての崩壊面は湖面より上にあり、エリア A での FS^* は 0.8、エリア B での FS^* は 1.1、エリア C での FS^* は 0.8 である。

断面 CC'と DD'に沿って、潜在的な崩壊が湖面下で発生すると予測されるが、その規模は非常に小さく、閉塞体の局所的な急峻な領域に限定され、閉塞物質の大きな塊にはなら

ない。これらの断面で遡行崩壊解析が実施されなかったのは、閉塞体が湖水の流出が可能な形状にまで縮小されるには、非常にあり得ない数の連続崩壊が発生し、大量の物質が除去される必要があるからである。これらのことを考慮した解析の結果、コールドウォーターの閉塞体は、静的斜面の安定性に関しては安定していると考察した。

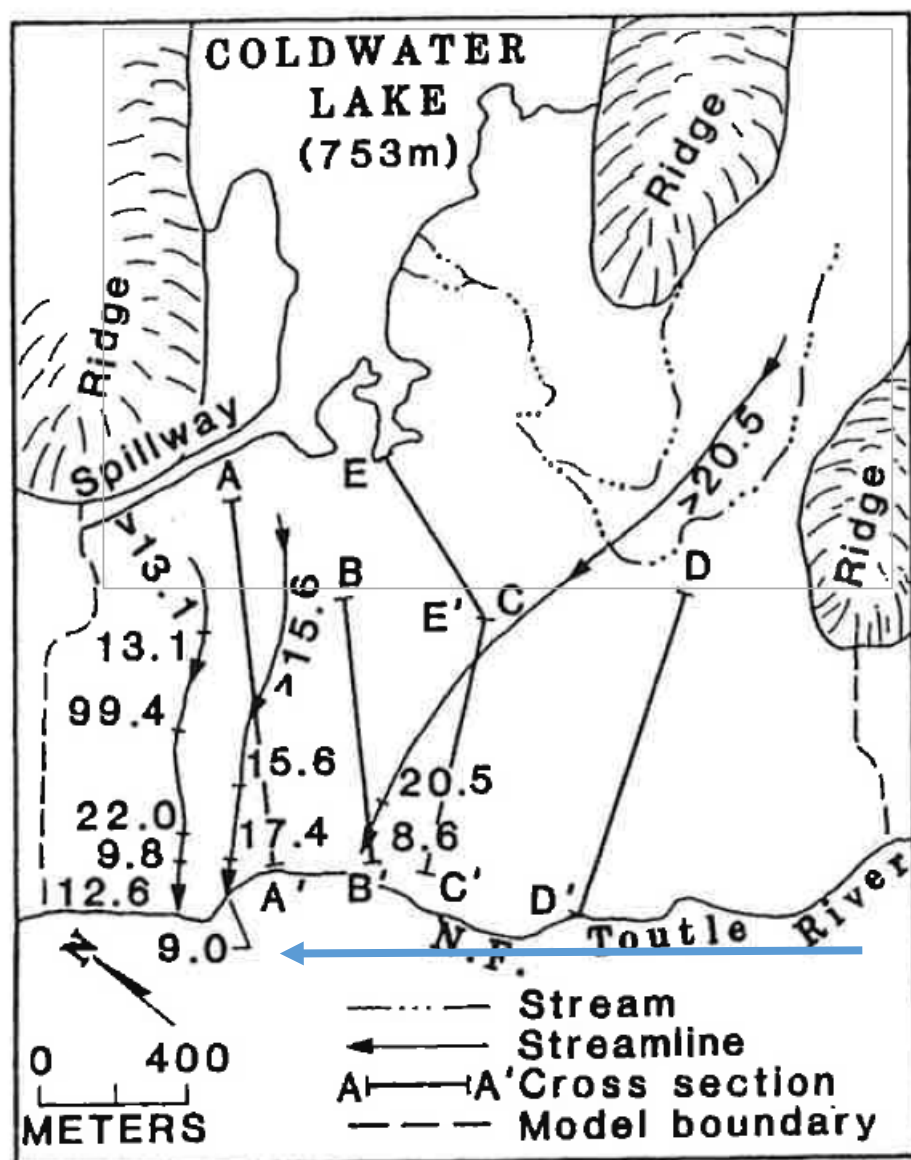


図 12 コールドウォーター湖の閉塞体のパイピングについて、流線沿いの斜面の安定性と安全係数を解析した A、B、C 断面の位置。

スピリット湖の天然ダム

スピリット湖の閉塞体の 4 つの断面について、斜面の安定性を分析した（図 13）。AA'、CC'、DD'断面は閉塞部の下流側で、BB'断面は湖に面した上流側である。

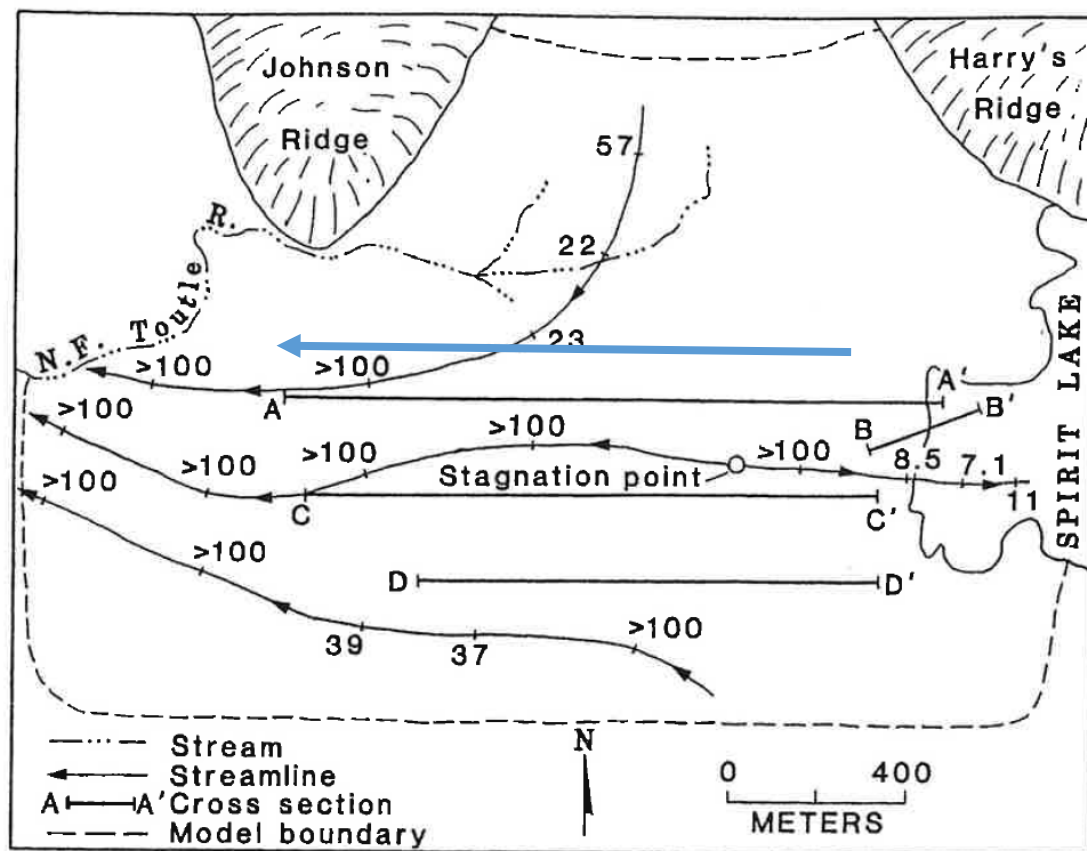


図 13 スピリット湖の閉塞体で決定された斜面の安定性を分析した断面の位置と流線、パイピングに対する安全係数の値

1984 年の高地下水位条件において、スピリット湖の断面で $FS^* < 1.6$ となる崩壊面は存在しないと推定された。したがって、キャッスル湖やコールドウォーター湖と同様に、スピリット湖の断面も、地下水位が 1984 年の季節最高水位となった場合においても、静的斜面の安定性に関しては安定であると考察した。

水位が地表にある状態では、断面 CC' 沿いでは潜在的な崩壊面は予測されず、断面 AA'、BB'、DD' 沿いでは、非常に小さな斜面の崩壊のみが予測される。AA' 断面と DD' 断面では、スピリット湖の水位以下に $FS \leq 1.2$ の破壊面は伸びていない。BB' 断面では、 $FS=1.0$ の崩壊面が湖面から約 9m の深さまで達している。しかし、この潜在的な崩壊塊は、閉塞体の主要な部分ではない。

スピリット湖の閉塞体で予測された崩壊は、コールドウォーター湖の閉塞体で予測された崩壊と同様、閉塞体の全体的な安定性を低下させることはないと考えられる。したがって、スピリット湖の閉塞体もまた、静的斜面崩壊に関して安定していると考察した。

パイピングに対する閉塞体（天然ダム）の安定性

閉塞体における地下水の移動パターンでは、地下水はクレストの下を下降し、湖や閉塞体の法尻部で上方に向かうため、ヒープ<heave>（Terzaghi and Peck, 1967）と呼ばれるタイプのパイピングによる破壊の恐れがある。

ヒープによるパイピングは、粘着性のない地盤において、上方へ移動する水の浸透によって及ぼされる力が、どの位置においてもその上にある地盤の土砂の重量を上回ったときに発生する。水の移動によって発揮される単位体積当たりの上向きの力は $i\gamma$ に等しい。 i は鉛直方向の動水勾配で γ は水の比重である。単位体積あたりの下向きの重量は、 $\gamma (S_s - 1/1 + e)$ である。 S_s は閉塞物質の比重、 e は空隙率である。したがって、ヒープによるパイピング破壊は、 i の値が $(S_s - 1/1 + e)$ より大きい場合に発生する。 i の値が $(S_s - 1/1 + e)$ に等しいとき、パイピングは切迫状態にある。この i の値を“**臨界動水勾配**”と呼び、本稿では i^* と表記する。

これまで述べてきたように、閉塞材料は粘着性がないと考えられる。ヒープによる破壊に対する閉塞体の安定性を調べるために、まず、各閉塞体の i^* の値を決定し、次に、この値を閉塞体内の動水勾配と比較することにより行った。 i^* と閉塞体内の任意の位置で測定された動水勾配の比から、その位置でのヒープによる破壊に対する閉塞体の安全率(FS)を推定することができる。この比率が高いほど、安全率は高い（Harr, 1962）。

それぞれの閉塞体を構成する材料の S_s と e の値が変動するため、 i^* の値も変動する。本論文で示す FS 値は、安全側とするため、 i^* の最低値（0.83）を用いて決定した。

閉塞体の動水勾配の決定は、季節的に高い地下水位をシミュレートするモデルによって予測された水位に基づいて行った。最大動水勾配は、地下水位が季節的に高くなるときに存在する。そのため、これらのモデルを構築し使用した。モデルによって計算された水位の3次元形状を使って地下水系の流線を設定し、そこから垂直フローネットを構築して、その後、フローネットから動水勾配を決定した。

Harr (1962)は、FS の値が約 4 または 5 より低い場合は、ヒープによるパイピングの可能性があることを示唆している。Harr (1962)は、フローネットの構造や S_s 、(または) e に固有の不確実性があるため、FS=1 ではなく、これらの値を使用することを提案している。

キャッスル湖の天然ダム

フローネットが構築された流線と、流線に沿って選択した位置におけるパイピングに対する FS の計算値を図 14 に記載した。見てわかるように、FS 値は、流線 BB' 沿いの最小値 5.2 から、流線 BE 沿いの最大値 23.5 までの範囲である。FS 値は、湖面下のどこにおいても 8.8 以上である。これらの結果は、閉塞体がヒープによるパイピングに対してぎりぎり安定していることを示唆している。

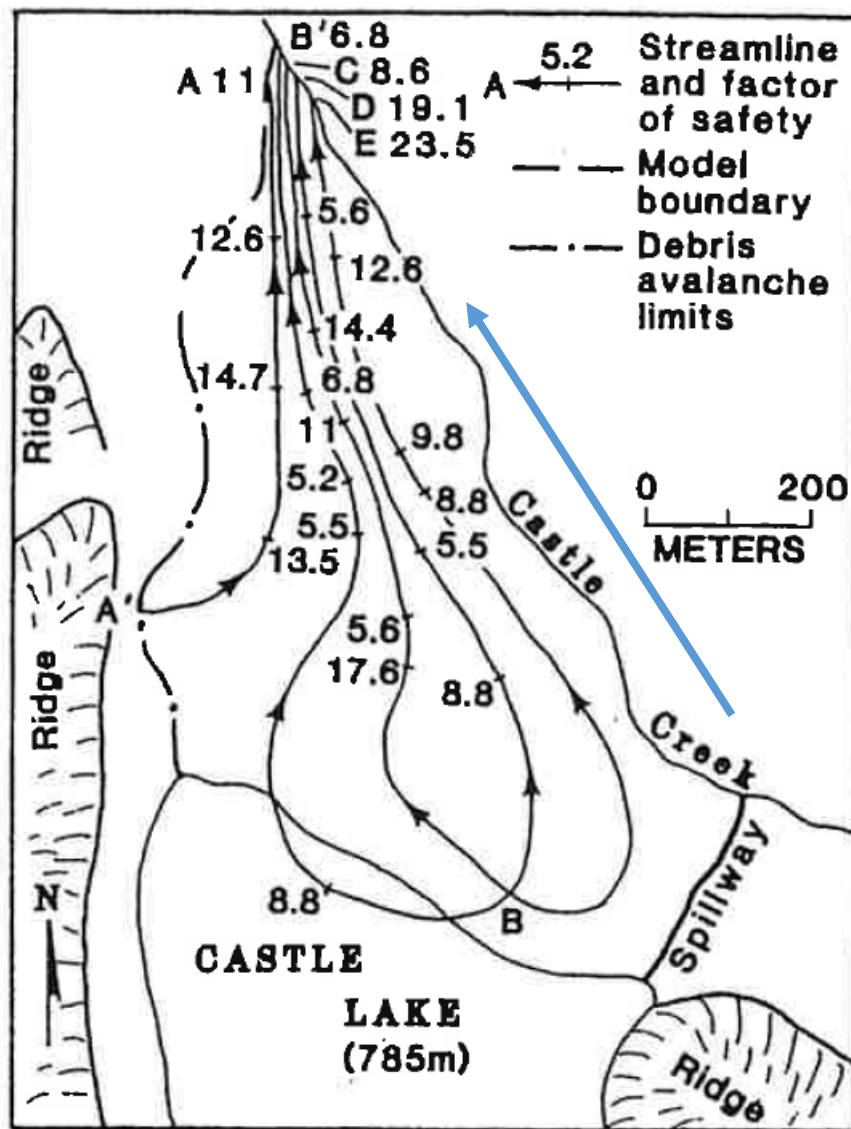


図 14 キャッスル湖の天然ダムのパイピングに対する流線と安全係数値

コールドウォーター湖の天然ダム

FS 値は、図 12 に示す流線に沿って構築されたフローネットから、閉塞体の選択した地点で計算した。これらの値は、流線 C に沿って 8.6 という低い値から、流線 A に沿って 99.4 という高い値まで幅がある。すべての FS 値が 5 以上であることから、コールドウォーター湖の閉塞体は、ヒープによるパイピングに関して安定していると考察した。

スピリット湖の天然ダム

フローネットを構築し、FS 値を算出したスピリット湖閉塞体の地下水系の流線を図 13 に示した。計算された安全係数はすべて 5 以上であり、湖面下の最低値は 7.1、閉塞体

の他のさまざまな場所での最高値は 100 を超えている。この分析に基づき、スピリット湖の閉塞体は、ヒープによるパイピングに関して安定していると考察した。

閉塞体の液状化

土石なだれによる閉塞体の液状化に関する解析は、(1)地形が不規則であること、(2)地質材料が不均質な非圧密状態で堆積していること、(3)礫や転石サイズの材料が豊富であることから人工のアースフィルダムの解析よりも複雑である。礫質砂や砂質礫の液状化プロセスは十分に解明されておらず、液状化の可能性を評価するための標準化された技法は、これらの材料ではまだ利用できないため、解析はさらに複雑になる（Chen ら、インプレス）。

セントヘレンズ山周辺では、1980 年の噴火の前後を問わず、小規模から中規模の地震が多数発生している。地震によって、3 つの閉塞体のうちのかかなりの部分が液状化すると、その閉塞体の越流および／または決壊につながる可能性がある。Chen et al. (in press) と Winters and Kayen (1985) は、3 つの閉塞体の液状化に関する調査を行った。Chen らは、閉塞体の大部分を占める土石なだれの物質だけを扱った。これらの材料で利用可能な動的物性データは限られているため、彼らは、Seed and Idriss (1971)の「簡略化手順」の修正版を液状化の評価に使用した。

この方法は、関係する材料の標準貫入抵抗の測定に大きく依存している。この調査においては、この方法はおそらく安全側の結果をもたらしたと思われる。というのも、この方法では、土石なだれ中に豊富に存在する砂利や大きな粒子を十分に考慮することができないからである。（砂の大きさよりも大きな粒子が存在した場合、土石なだれ材料の液状化に対する抵抗力は増大する。）

セントヘレンズ山地震帯の利用可能な地震データに基づき、 $M=6.8$ の設計地震が解析に利用された。この地震荷重の下で、Chen ら (in press) は、スピリット、コールドウォーター、キャッスル湖の閉塞体の多くの場所で、小規模な液状化がおそらく発生すると結論づけた。しかし、液状化が十分に大規模であったり、越水や破壊を可能にするほどのダメージを与えたりすることを示唆する根拠はないと考察している。

Winters と Kayen(1985)は、スピリット湖の閉塞体の上に堆積した火山灰の液状化しやすさの研究を彼らの分析に含めている。これらの降灰堆積物は、動的荷重による液状化に対して、土石なだれ堆積物よりもかなり影響を受けやすいことがわかった。しかし、スピリット湖の水位は降灰堆積物の下面より低い高さで安定化されているため、これらの材料の液状化しやすさは、湖の存続には影響しない。

結 論

スピリット湖、コールドウォーター湖、キャッスル湖の水量は、湖の水位が安定するまで、時間の経過とともに増加した。もしスピリット湖が満水状態になっていたら、おそらく 1984 年の春のある時期に降灰堆積物のパイピングによって湖が決壊していた可能性があった。コールドウォーター湖とキャッスル湖は、1981 年末か 1982 年初頭に閉塞箇所を越水した可能性があった。スピリット湖かコールドウォーター湖のどちらかが決壊すれば、下流の地域は壊滅的な被害を受けた可能性があり、キャッスル湖が決壊した場合、おそらく深刻な洪水が起こることが予測された。

湖を堰き止めている閉塞体（天然ダム）は、重力による斜面崩壊や液状化に対しては安定していた。スピリット湖とコールドウォーター湖の閉塞体は、現在の湖面レベルでは、パイピングによる決壊に対して安定している。パイピングに対する安定性を判断する安全係数の選定はやや主観的であり、キャッスル湖閉塞体の安全係数の計算値が本研究で選定した臨界値に近いことから、キャッスル湖閉塞体はパイピング破壊に対してギリギリ安定している状態と考察した。

最後に、すべての閉塞体のクレスト部に、水位が湖面より高い地下水マウンドが形成されていた。その結果として起こるマウンドから湖と閉塞体の法尻部に向かって水が移動する流動系は、通常アースフィルダムで想定される流動系とは異なる。後者の場合、水は湖から浸透してダム堤体を通り、法尻付近で放流されると仮定される。閉塞体の形状、透水性、地下水涵養の組み合わせが地下水マウンドの形成を引き起こしたものと考えられる。

付録--参考文献（本文を参照してください）