

## 9. 浸透の状態が異なる条件での天然ダムの越水による 崩壊機構に関する水理実験

### HYDRAULIC EXPERIMENTS ON THE FAILURE MECHANISMS OF LANDSLIDE DAM DUE TO OVERFLOW UNDER DIFFERENT INFILTRATION CONDITIONS

渡邊 康玄<sup>1</sup>・川尻 峻三<sup>2</sup>・早川 博<sup>1</sup>

Yasuharu WATANABE, Shunzo KAWAJIRI and Hiroshi HAYAKAWA

<sup>1</sup>北見工業大学 社会環境系 教授

<sup>2</sup>北見工業大学 社会環境系 准教授

#### 要 旨

天然ダムが越水により崩壊すると、下流域では甚大な被害が発生する。このため、天然ダムの崩壊対策が早急に実施されている。しかしながら、ダム上流に湛水した貯留水の天然ダムの土塊中への浸透状況に起因する破壊現象の違いは明らかにされていない。2018年9月に発生した北海道胆振東部地震では、無数の斜面崩壊が発生するとともに天然ダムも数多く形成された。日高幌内川では、そのような天然ダムの中で最大の天然ダムが形成され、北海道開発局によって詳細な調査が行われた。本研究では、これらの調査の結果に基づいて実験条件を決定した水理実験を実施し、天然ダムへの浸透の違いが越流による天然ダムの浸食現象に及ぼす影響を考察した。その結果、天然ダムの崩壊現象を考える場合、天然ダム内の河川水の浸透状態を十分に考慮する必要があることが明らかになった。

《キーワード：天然ダム；越水；破壊；浸透；水理実験；日高幌内川；胆振東部地震》

## 9. 1. はじめに

我が国は、地震や火山活動も活発で台風などの豪雨が起りやすく、自然災害に見舞われることが多い。また、山地や丘陵地が国土の7割を占め、それに加え脆弱な地質を有しているため、天然ダムが発生しやすい環境にもある。天然ダムは越水により決壊が発生すると下流域に甚大な被害が発生することから、越水への対策が早急に実施される必要があるとともに、対策の実施にはその機構解明が必要不可欠となっている。高橋ら<sup>1)</sup>は、天然ダム決壊機構の予測システム構築を目的として研究を実施し、天然ダムの決壊する過程として、給水流量及び堤体材料の性質に応じて越流侵食、すべり崩壊、進行性破壊の3つの型が存在することを明らかにした。これらの型は天然ダムの材料に左右されると指摘されているが、実際に発生した天然ダムの地盤情報が少なく、またそれをもとにした模型実験があまり行われていないのが現状である。そのことから、渦岡ら<sup>2)</sup>は、2008年岩手・宮城内陸地震で発生した湯ノ倉温泉地区の天然ダムを対象とし、原位置試験を行い、堤体材料を用いた堤体模型の遠心力場での浸透・越流実験を実施した。その結果から、浸透・越流時の堤体模型の遠心実験データを蓄積し、安定性評価指標の確立を図る必要があることを示している。このように、天然ダムの決壊機構の解明について種々研究が実施されてきているものの、天然ダムへの堰き止められた河川水の浸透状況による崩壊現象の違いなど、十分に明らかにされていない状況にある。

2018年9月に発生した北海道胆振東部地震によって厚真川水系日高幌内川で天然ダムが形成された。国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部によりこの天然ダムの形状や土質等詳細な調査<sup>3)</sup>が行われている。このことを受け、本研究ではこれらの調査結果をもとに実験条件を決定し、天然ダムへの浸透の違いが越流破堤にどのような違いをもたらすかを明らかにすることを目的として水理模型実験を実施した。

## 9. 2. 厚真川における天然ダムの概要

### 9. 2. 1. 北海道胆振東部地震の概要<sup>4)5)</sup>

2018年9月6日3時7分に胆振地方中東部を震源とするマグニチュード(6.7)の地震が発生した。この地震により厚真町では最大震度7を観測したほか、北海道全域で震度1～6強を観測した。厚真町では死者36人、住宅被害全壊192戸に被害が及んだ。この地震の影響により、無数の斜面崩壊が発生し、13.4km<sup>2</sup>約3000万m<sup>3</sup>の土砂が崩落している。この結果、天然ダムもいたるところで形成された。その中で規模の最大のものが、本研究で対象とする日高幌内川の天然ダムである。



図9-1 日高幌内川の天然ダムを形成した斜面崩落状況

### 9.2.2. 天然ダムの概要<sup>3)</sup>

日高幌内川における天然ダムは右岸側の幅約400m、長さ約800mの尾根が約350m崩落し、日高幌内川を塞ぐかたちで移動したことにより発生している。天然ダムの高さは約50m、天然ダムの土量は約500万 $m^3$ である。また、直下流に民家があり、約3.5km下流には幌内地区、約16km下流には厚真町市街地が位置していることから緊急的な対策が求められた<sup>6)</sup>。主な対策としては、監視・観測機器設置、地質調査、水路工整備のための堆積土砂掘削砂防堰堤、工事用道路などがあげられる<sup>6)</sup>。図9-1に日高幌内川の天然ダムを形成した斜面崩落状況を示す。また、日高幌内川の天然ダムを形成した移動土塊の断面図を図9-2に示す。

### 9.3. 水理実験

#### 9.3.1. 実験に用いた地盤材料

天然ダムは、地盤上に、崩壊土砂が堆積して形成される。このため、実験にあたっては、元地盤と崩

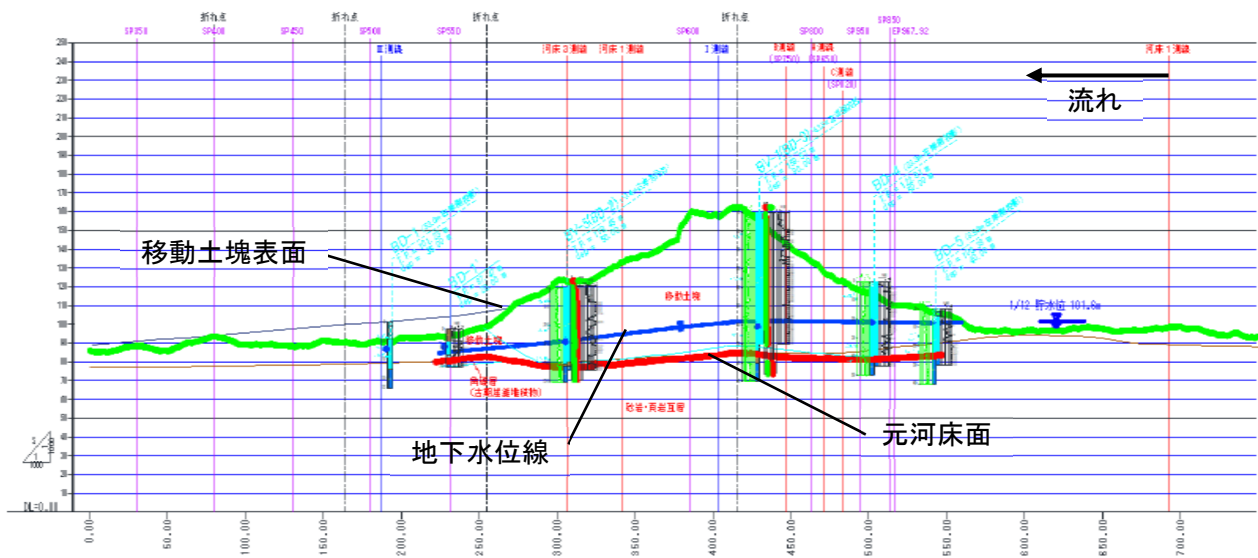


図9-2 日高幌内川の天然ダムを形成した移動土塊の断面図  
資料提供；北海道開発局室蘭開発建設部

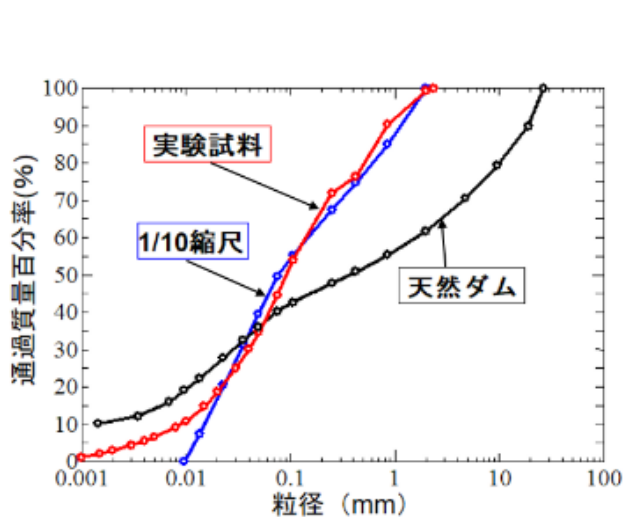


図9-3 実験材料の粒径加積曲線

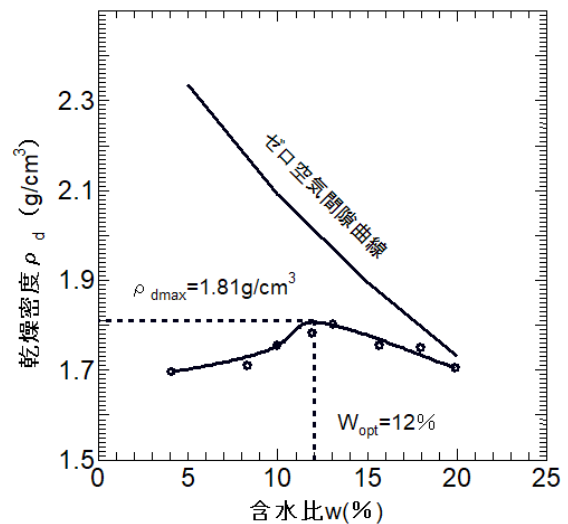


図9-4 実験材料の締固め曲線

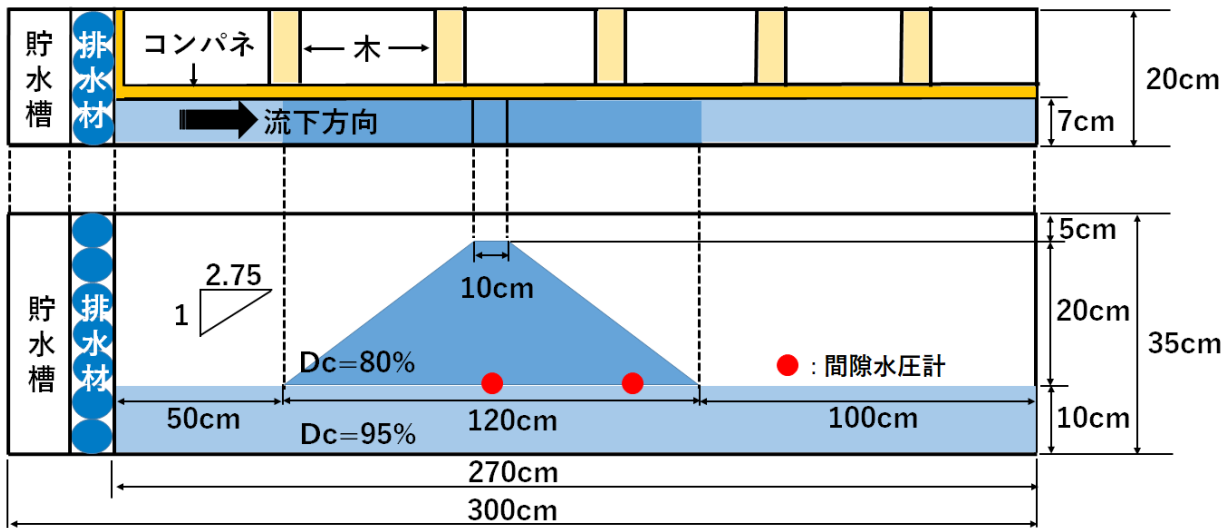


図9-6 水路と模型の概要

落土砂で形成された天然ダムの特徴を表現する必要があると考えられる。一方で、土質に関しては大きな違いはないため、基礎地盤と崩落土砂の違いを表現するため、同一の材料を用いるものの、締固め度を変化させることとした。

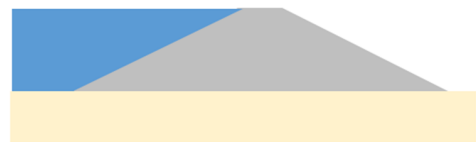
基礎地盤及び天然ダムの形成に用いた土は、できる限り粒度構成の広いものとするため、日高幌内川の天然ダムの0.1mm以上の資料に対して1/10縮尺の粒度構成を基本として、珪砂3号、珪砂4号、珪砂5号、珪砂6号、珪砂7号、珪砂9号およびファインサンドを1:1:1:1:1:3:4の重量比で混合した材料を使用した。実験に使用した材料の粒径加積曲線を図9-3に示す。その材料の物理特性は、土粒子の密度 $\rho_s$ が $2.646\text{g/cm}^3$ であった。また、突固めによる締固め試験(A-b法)では、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ が $1.81\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $W_{pot}$ が12%であった。図9-4に実施した試験により得られた締固め曲線を示す。最適含水比は12%であるが、予備実験で基礎地盤作製の際、液状化が発生したため含水比を下げ、10%で使用する事とした。

変水位透水試験の結果、締固め度80%で $1.44 \times 10^{-6}\text{m/s}$ 、締固め度95%で $9.57 \times 10^{-7}\text{m/s}$ の値を得たことから、基礎地盤を締固め度95%、天然ダムを締固め度80%で作成することとした。

### 9.3.2. 天然ダムと基礎地盤の形成

模型実験には図9-6に示すような長さ300cm、幅20cm、高さ35cmの亚克力製の水路を用いた。幅20cmで予備実験を行なった際、水みちの幅が7cmだったことから、2次元的な破堤とするため、耐水ベニアで水路幅を7cmとして使用することとした。図9-6に示すように基礎地盤は水路床から厚さ10cm幅は270cmとし、締固め度95%で形成した。その上に、のり面勾配1:2.75で下幅120cm、天端幅10cmの台形

Case1(浸透無し)



Case2(天端直下まで浸透)



Case 3(法尻まで浸透)



Case4(基礎地盤を飽和させ法尻まで浸透)



図9-5 越水時の浸透状況の違い

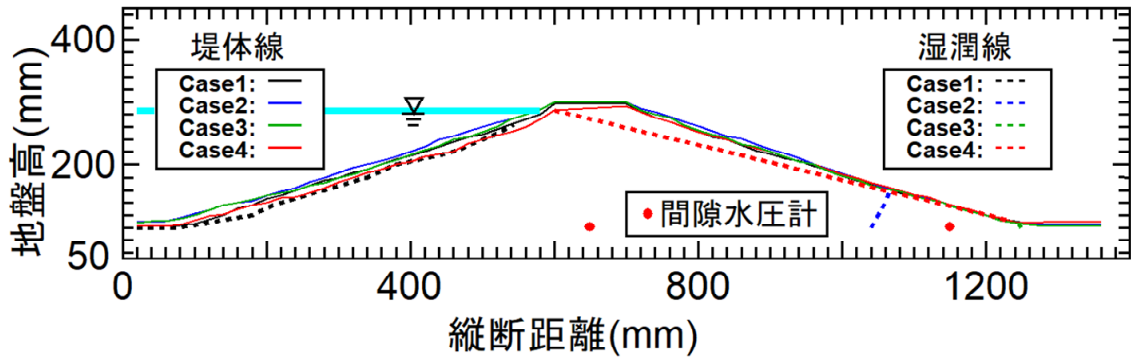


図9-7 越水開始時の湿潤状態

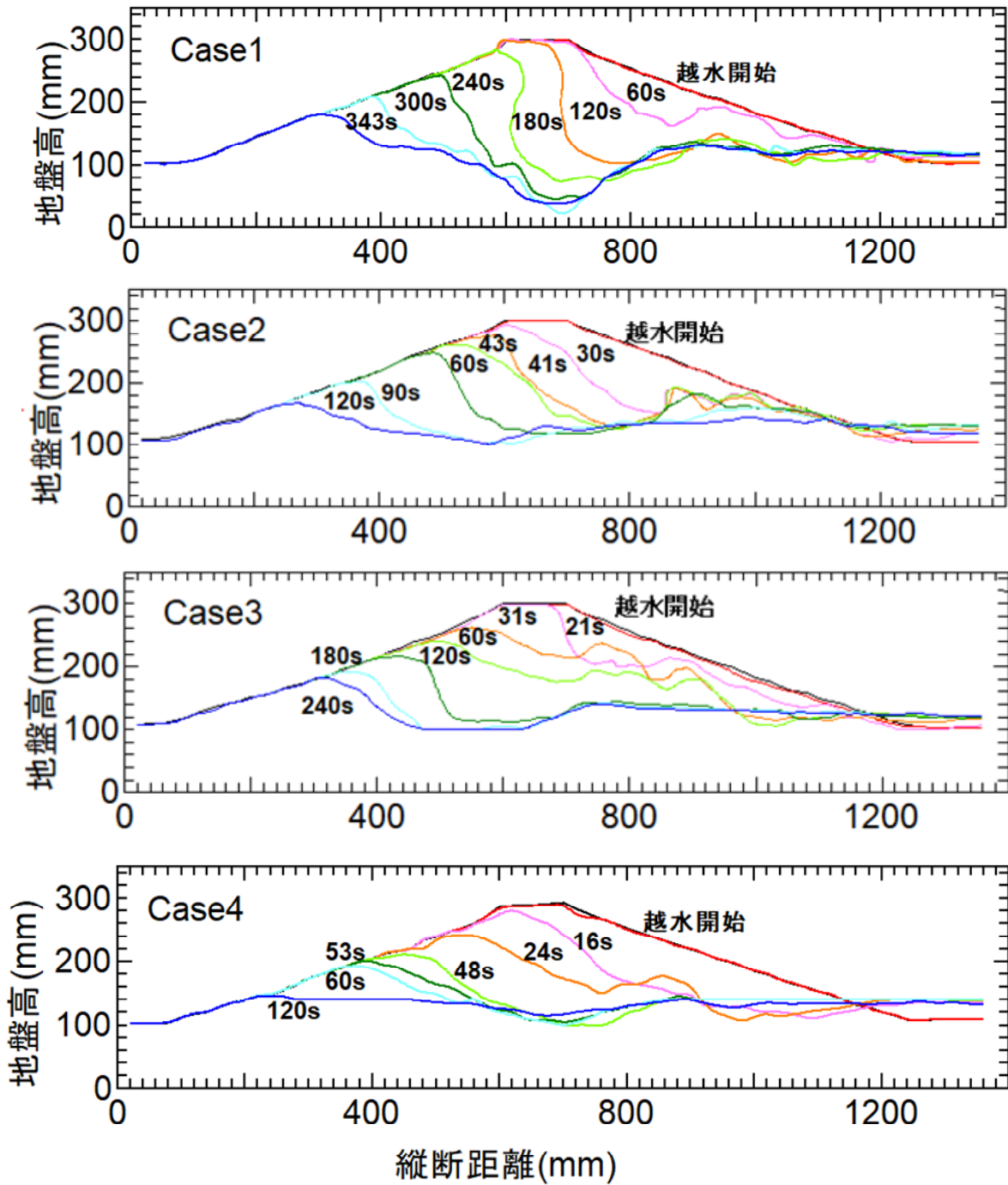


図9-8 天然ダムの浸食・崩壊の時間変化

状の天然ダムを締固め度80%で形成した。これは、日高幌内川で発生した天然ダムの約1/350の縮尺となっている。

破堤現象の把握は、簡易的に透明なアクリル製の水路側壁を通して、ビデオ撮影により行った。また、側壁沿いに浸透が進行することも考慮し、天端下流端直下の基礎地盤上と天然ダム下流側法尻から上流側に10cmの基礎地盤上に水圧計を設置して、その水圧により把握することとした。なお、基礎地盤および天然ダムの形成は、各層を2cmとして所定の高さに到達するまで締固めを行って作製した。天然ダムの法面の整形は最終層まで作製した後に、余分な箇所を金ゴテで整形した。

### 9.3.3. 水理条件

天然ダムに湛水し越水させるための流量は、現地の融雪出水流量生起時に天然ダム下流側の斜面で生じる無次元掃流力が、同一となるように設定した。ここで、融雪出水流量は、日高幌内川の天然ダム発生個所に近い砥山ダムで観測された融雪量のピークである $5\text{mm/hr}^7$ を雨量として用い合理式により算出し、 $9.48\text{ m}^3/\text{s}$ とした。なお、合理式における流域面積及び流出率はそれぞれ、天然ダム崩壊地上流の流域面積である $9.75\text{km}^2$ および一般的に山地の流出係数として用いられる0.7を用いた。

この流量を用いて、天然ダムの形状から越水幅を14mと仮定し、勾配が70/200である斜面の粗度係数を0.02としてこの時の無次元掃流力を算出し、模型上の天然ダム下流斜面(4/11)で同じ掃流力となるように模型の流量を $805.2\text{cm}^3/\text{s}$ と決定した。なお、模型上の斜面上の粗度係数は0.012としている。

本研究では、天然ダム内の浸透状況の違いによって越水破壊状況がどのように異なるかに焦点を当てていることから、越水に至るまでの湛水のさせ方を図9-5に示す4ケース設定して、実験を行うこととした。すなわち、急激に外水位を上昇させて1分後に越流破壊させた場合をCase1、外水位を天端高さまで上昇させ天端直下まで浸透したのを確認した160分後に越流破壊させた場合をCase2、外水位を天端高さまで上昇させ法尻まで浸透したのを確認した413分後に越流破壊させた場合をCase3、先に基礎地盤を飽和させ、外水位を徐々に上昇させてのり尻まで浸透したのを確認した1580分後に越流破壊させた場合をCase4とした。

基本的な実験手順は、ケースごとに設定した天然ダムへの浸透状況となるよう上流側に湛水させた後、所定の流量を通水して天然ダムを越水させ、天然ダムの崩壊が終了した時点で通水を停止した。

## 9.4. 実験結果と考察

### 9.4.1. 浸透状況

越水開始時点における浸潤線を図9-7に示す。Case1はほとんど浸透せず、Case2は法尻付近まで、Case3は法尻まで浸透しているのが確認できる。基本的には目視で浸潤線を判断したが、Case4における浸潤線は明瞭に確認できなかった。しかしながら、法尻からの浸透水の浸出が確認できたことから推定の浸潤線を描いている。

### 9.4.2. 越水後の浸食状況

図9-8に破堤の進行過程の様子を示す。ケースごとに見ていくと、Case1では、鉛直下向きに直角で洗堀が進行した。Case2では、法尻方向に約60度の角度で浸食が進み、越水開始41秒後に天端上流側の土塊の滑りが生じてその土塊が流掃される間、裏法面の浸食は抑制された。Case3では、法尻方向に約16度の傾きで洗堀が進行し、越水開始31秒後にCase2と同様の土塊の滑りが生じた。この土塊は、Case2や次に述べるCase4の土塊に比べ規模が大きく、流掃されるまでの時間が長かかった。Case4では、越流開始16秒と48秒後にCase2と同様の土塊の滑りが生じた。

### 9.4.3. 浸食面の角度

実験で形成された堤体の浸食面の勾配に変化が見られたことから、浸食面の角度について、比較を行うこととした。なお、浸食面は、上流側が上に凸、下流側が下に凸の形状となっていることから、図9-9に示すように、形成された堤体の浸食面の頂点①から変曲点②に向かって引いた線の角度を浸食面の角度として整理している。

上記の方法で求めた浸食面の勾配の時間変化をまとめものが図9-10である。各ケースとも浸食面の勾配は経過時間とともに大きくなり、その後小さくなるピークを持つ変化を示した。ケースごとに比較していく。Case1では最大角度が90°になり、最終的な角度は27°になった。Case2では最大角度が58.5°になり、最終的な角度は16°になった。なお、41秒後に生じた土塊の滑りにより一時的に角度は小さくなっている。Case3では最大角度が59.2°になり、最終的な角度は27.6°になった。Case3においても31秒後の土塊の滑りにより角度が小さくなっているが、土塊の規模が大きかったため、斜面角度が小さくなる時間も長くなっている。Case4では最大角度が33.7°になり、最終的な角度は2.8°になった。Case4でも土塊の滑りは生じているものの、規模が小さく斜面が緩くなる傾向は明確ではなかった。

各ケースを比較すると、浸透の進捗度が大きいほど斜面角度が緩くなる傾向を示すとともに、そのピーク出現時間は早まることわかる。

### 9.4.4. 浸食量

浸食の状況の時間変化を浸食された土砂の堆積で表現したものが、図9-11である。越水開始から30秒までの浸食量を比較すると、Case4, Case3, Case2, Case1の順で浸食量が多くなっているが、その後は、Case2と3の浸食量が逆転し、Case4, Case2, Case3, Case1の順で浸食量が多くなっている。このことから、一般的に、天然ダムへの浸透が進むにしたがって浸食が速く進むが、大規模な土塊の崩壊が生じた場合にはその土塊の流掃に時間を要し、結果的に浸食が遅くなる場合も存在することが明らかとなった。

なお、Case1の最終的な浸食が多くなった原因は、堤体に上流に湛水した水が浸透していない場合、浸食面が切り立ち、流れが滝状になることから、基礎地盤まで洗掘したためである。

### 9.5. おわりに

今回の実験では、天然ダムの崩壊メカニズムについて、浸透の違いにより崩壊の状況が大きく変化することが明らかとなった。また、崩壊の仕方によっては、崩壊土砂の流掃に時間を要し、現象が遅くなりことも確認された。天然ダムの越水破堤を考える場合には、堤体内部の浸透状況も考慮し、現象を把握していく必要があることが明らかとなった。

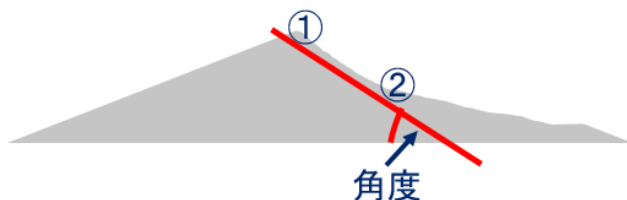


図9-9 浸食面角度の定義

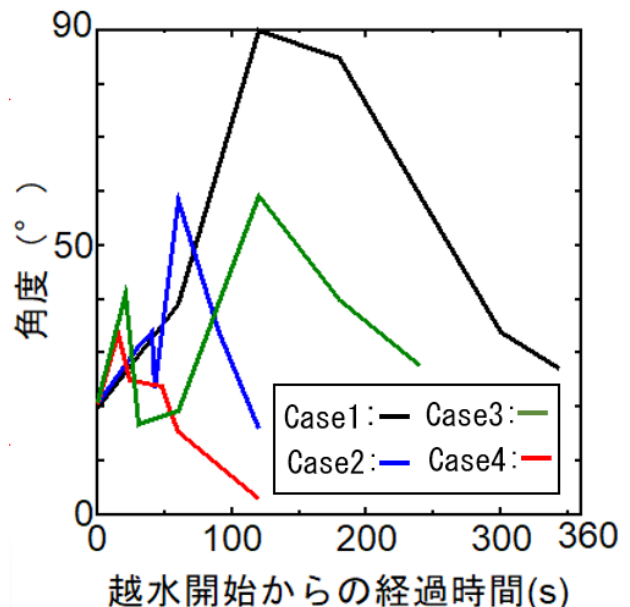


図9-10 浸食面の角度の時間変化

## 参考文献

- 1) 高橋保・匡尚富：天然ダムの決壊による土石流の規模に関する研究，京都大学防災研究所年報，第31号，B-2，pp.601-615，1988.
- 2) 渦岡良介・仙頭紀明・森友宏・風間基樹：2008年岩手・宮城内陸地震で発生した湯ノ倉温泉地区の天然ダム堤体の地盤工学的特性，日本地震工学会論文集 第11巻，第5号（特集号），pp.80-93，2011.
- 3) 北海道開発局室蘭開発建設部：厚真川水系直轄砂防工事技術検討会資料，2019.
- 4) 横濱秀明：平成30年北海道胆振東部地震における北海道開発局の対応について，第16回北海道測量技術講演会，2019
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成30年北海道胆振東部地震の評価，2018.
- 6) 北海道開発局室蘭開発建設部厚真川水系砂防事業所：厚真川水系土砂災害復旧事業について，2019.
- 7) 八田茂実：山地流域における流出過程のモデル化とその応用に関する研究

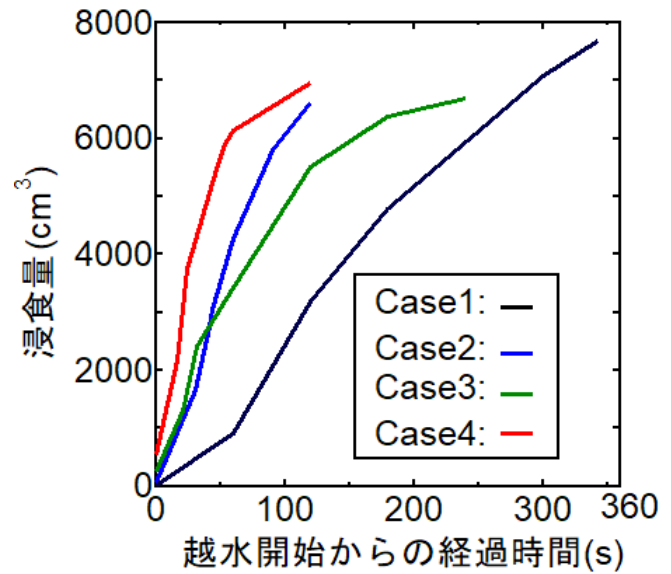


図9-11 浸食量の時間変化