

天然ダム越流侵食による水みちの形成過程

独立行政法人 土木研究所 ○吉野弘祐, 石塚忠範
国土交通省 国土技術政策総合研究所 内田太郎

1. はじめに

天然ダムの決壊は下流に甚大な被害を及ぼすことがある。天然ダムの決壊はそのほとんどが越流侵食によるもの(例えば田畑ら, 2002)である。天然ダム決壊による洪水被害の予測や適切な対策施設配置の検討を行う際には, 数値シミュレーションによる流量及び侵食形態の予測が重要であり, そのためには越流侵食過程の実態を把握し, 数値シミュレーションの更なる精度向上を図る必要がある。これまでも越流侵食の実態の解明に向けて, 水路実験, レーザプロファイラ(LP)計測データによる地形解析等が行われてきた。しかし, 越流侵食前後の詳細な地形変化および侵食後の地形を検討したものは少なく, 越流侵食プロセス, 特に側岸侵食過程が十分に理解されているとは言い難い。そこで本検討では, LP 計測データのある天然ダムを対象に, 越流侵食後に形成した水みちの形状について詳細に把握し, 越流侵食による水みちの発達過程について考察した。その上で, 数値シミュレーション技術の高度化のため, 側岸侵食過程の定式化についての検討を行った。

2. 検討内容

2.1 検討対象地区

本検討では, 表 1 に示す 5 地区を対象とした。これらの 5 地区は, 天然ダム越流侵食後の詳細な地形データがある, 明瞭な越流侵食痕跡が確認できる, 天然ダム形成から地形計測までに工事など人工改変の影響がない, といった 3 つの条件を満たしている。

2.2 検討方法

本検討では, 天然ダムの形状を評価するために, まず天然ダム決壊後の地形から, 水みちの範囲を設定した。その上で, LP データより天然ダム及びその下流の河道の中心に沿って測線を引き水みちの縦断形を求めた。さらに, 20m 間隔で縦断測線に直交する横断測線を設定し, 天然ダム及び水みちの横断形を把握した(図 1)。

2.3 側岸侵食に関する解析方法

これまでの実験から, 天然ダムの越流侵食時には, まず縦侵食が生じ(水みちが深くなり), その後, 側岸が崩落し, 水みち幅が広がることが報告されてきた(小田ら, 2007)。その後, 縦侵食の継続にあわせて, 断続的に側岸崩壊が生じることが報告されている。そこで, 本研究では, はじめに縦侵食のみが生じ(図 1 中の B, L は変化せず), 水みちの比高(図 1 中の H)が増大し側岸が不安定になった場合に側岸が崩落し, 水みち側岸の幅(L)が広がると仮定した。なお, この際, 水みち底部の幅(B)は変化しないと仮定した。この仮定に従うと, 最初の側岸の崩落がおきるまでは, 側岸の勾配($\theta(H)$)と水みちの比高(H)の関係は式1で表すことができる。

$$\theta(H) = \text{atan}(H/L_0) \tag{式 1}$$

ここで, L_0 は初期の側岸の幅である。次に, 側岸の崩落は水みち底部から上部まで同時に生じ, 形状は図 2 左図に示すように, 楔形(幅 D , すべり面の勾配 β)を仮定すると, 斜面の安定解析の式に従い, 側岸の安全率は

$$F_s = \frac{C_i + (W_i \cos \beta_i - U_i) \tan \phi}{W_i \sin \beta_i} \tag{式 2}$$

表 1 検討対象地区

形成した 溪流等	形成地区	形成時期	形成理由	決壊条件	形成から決壊 までの時間
塩谷川	新潟県 芋川流域	平成 16 年 10 月 24 日	新潟県 中越地震	不明	不明
冷子沢川				不明	不明
沼倉裏沢	宮城県 三迫川流域	平成 20 年 6 月 14 日	岩手・宮城 内陸地震	無降雨時	7 日
川原小屋沢	宮城県 一迫川流域			小規模降雨時	28 日
赤砂川	山形県 銅山川流域	昭和 51 年 5 月 9, 10 日	不明	不明	1 日以内

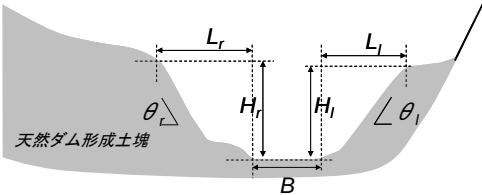


図 1 越流侵食により生じた天然ダムの水みちの模式図

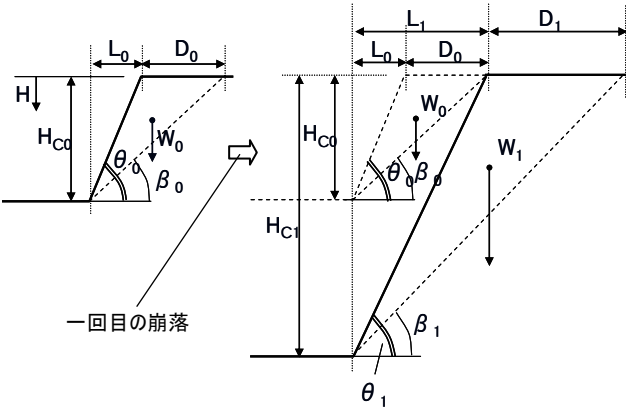


図 2 斜面崩落の模式図

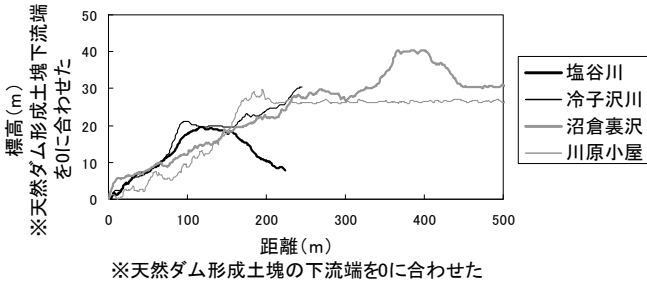


図 3 天然ダムの縦断形状

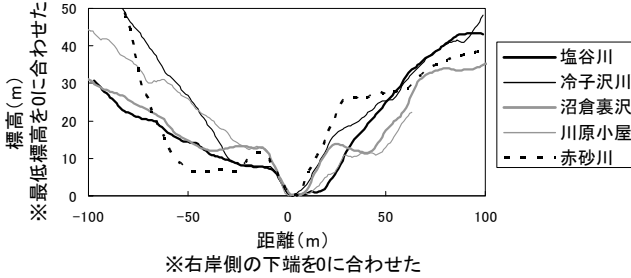


図 4 天然ダムの天端付近の横断形状

で表される。ここに $W_i = H_i D_i \gamma / 2$, $C_i = c \sqrt{(L_i + D_i)^2 + H_i^2}$,

$U_i = u \sqrt{(L_i + D_i)^2 + H_i^2}$, $\beta_i = \tan\{H_i / (L_i + D_i)\}$, c , ϕ , γ , u はそれぞれ土の粘着力, 内部摩擦角, 単位堆積重量, 間隙水圧, 添え字の i は崩落の回数である。ここで, $F=1$ となる最小の水みちの比高 ($H_{C0}(L_0)$) は, Culmann (1875) による限界の斜面の比高と勾配の関係式より, 式 3 のように表すことができる。また, その時の厚さ D_0 は式 4 で表すことができる。

$$H_{C0}(L_0) = \frac{(4c + \gamma \cdot L_0) \sin \phi + \sqrt{16c^2 + 8c \cdot \gamma \cdot L_0}}{\gamma \cdot \cos \phi} \quad (式 3)$$

$$D_0 = \frac{\gamma \cdot H_{C0}^2 - \gamma \cdot H_{C0} L_0 \tan \phi - 4c L_0 + H_{C0} \sqrt{A_0}}{4c + 2\gamma \cdot H_{C0} \cdot \tan \phi} \quad (式 4)$$

ここに, $A_0 = \gamma \cdot H_{C0}^2 - 2 \cdot \gamma \tan \phi (\gamma \cdot L_0 + 4c) H_{C0} - 8c (\gamma \cdot L_0 + 2c)$ である。その結果, 1 回崩落をした後の形状は図 2 右図で示す通りとなり, L_1 は以下の式で表すことができる。

$$L_1 = L_0 + D_0 \quad (式 5)$$

その後も, 側岸が式 2 で表す安定条件を満たす限り, L_i は変化せず, H だけが增大すると仮定した。以上より, L_0 , c , ϕ , γ が決まると, H と $\theta(H)$ の関係が順次計算可能となる。

3. 天然ダムの水みちの形成状況

3.1 天然ダムの諸元

ここで, 本検討に用いた天然ダムの諸元及び縦横断形状を図 3, 図 4 に示す。縦断図については, 天然ダム形成土塊の下流末端の位置および標高を 0 とし, 横断図については右岸側の下端の位置および標高を 0 とした。

3.2 越流侵食による水みちの形状の比較

水みちの側岸勾配と比高の関係の一例 (塩谷川及び冷子沢川) を図 5 に示す。図の実線は $L_0 = \text{約 } 7\text{m}$ の際の式 1~5 に基づく側岸勾配と比高の計算結果であり, 図中のプロットは LP データによる測定結果である。実際の水みちでは, 水みちの比高 (H) が大きくなるに従い, 側岸勾配は $L_0 = 7\text{m}$ のときの式 1 の関係に沿って大きくなる傾向が確認された。さらに, 比高が式 3 で算出される $H_{C0} = \text{約 } 7.2\text{m}$ に到達すると, 式 1, 3~5 で求まる勾配と比高の関係とはほぼ一致する関係を示した。

3.3 水みち形状の縦断的な把握

次に沼倉裏沢地区について LP 計測データを使用して水みち部の縦断方向の変化を詳細に把握した。図 6 の上流側の区間では, 鉛直方向の変動高 (c) と土砂変動量 (d) の傾向が対応しているのに対して, 下流側の区間では土砂変動量 (d) の傾向に比べて鉛直方向の河床変動高 (c) は小さい。これは, 全侵食土砂量の内, 天然ダム上流側の区間では鉛直方向の侵食量, 下流側の区間では水平方向の侵食量が占める割合が多いことを意味している。すなわち, 下流側では初期河幅 (b) が大きいため, 横断方向の広い範囲で河床侵食が生じたことによるものと考えられる。

また, 各地区における水みちの比高と幅との関係を図 7 に示した。図の横軸是水みちの比高 (H), 縦軸是水みちの幅 (B) を表しており, 白色のプロットは天然ダム天端から下流 100m 未満, 黒色のプロットは 100m 以上の地点の断面で計測した値を表している。中越地震及び岩手・宮城内陸地震とも水みちの比高が大きいほど水みちの幅が小さい傾向が確認された。さらに, 天然ダム形成土塊上流側では水みちの比高が大きく, 水みちの幅が小さい傾向が確認された。

4. 考察

ここで得られたデータは, 数値シミュレーションの更なる精度向上のための検討データとして活用できると考えられる。また, 現段階では土質パラメータの設定方法に課題があるものの, 水みちの比高の変化が大きい上流側の領域から変化の小さい下流側の領域まで天然ダムの越流侵食形状を一連で定式化し, 侵食プロセスを正確に予測できる可能性がある。そのためには, 今後さらにデータを蓄積し, 妥当性の検証していく必要がある。

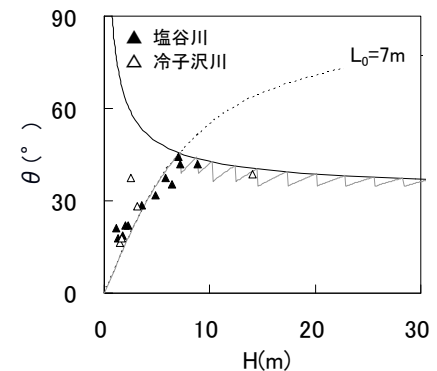


図 5 水みちの比高と側岸勾配の関係

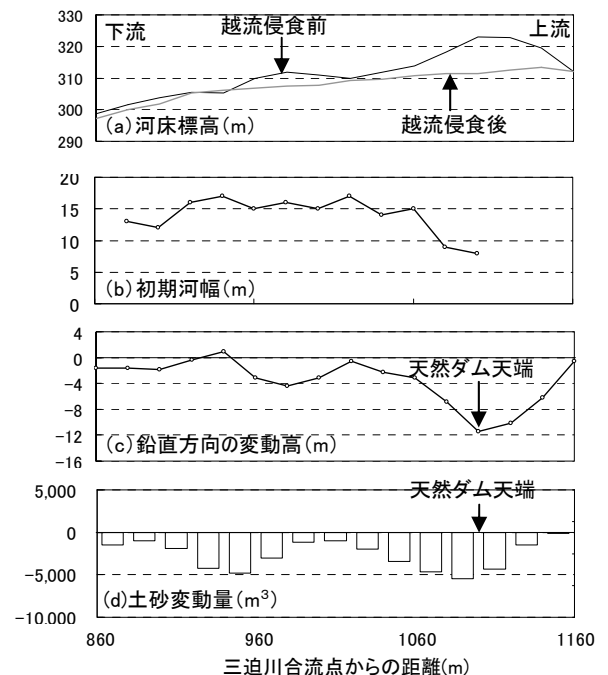


図 6 天然ダムの越流侵食状況

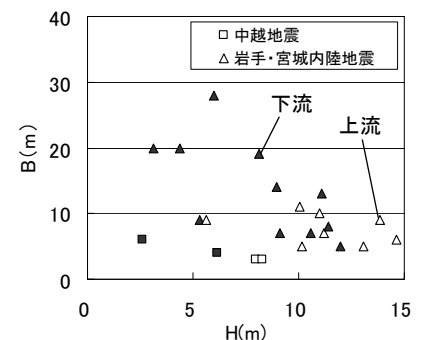


図 7 水みちの比高と幅の関係