Kanako による土石流対策工の機能評価 (中国四川省紅橋谷を対象として)

EFFECT EVALUATION OF DEBRIS FLOW COUNTERMEASURES WITH KANAKO (CASE STUDY ON HONGQIAO GULLY, CHINA)

中谷加奈¹・柳金峰²・里深好文³・水山高久⁴

Kana NAKATANI, LIU Jinfeng, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

¹ 正会員 農博 学振特別研究員(PD) 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

² Ph.D., Institute of mountain hazards and environment, Chinese Academy of Sciences

³ 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

⁴ 正会員 農博 京都大学大学院教授 農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Debris flow is a natural disaster common in mountainous areas in Japan and China. It has great destructive force because of its high density and speed, and often causes great losses to human life and the economy. Therefore, countermeasures such as sabo facilities are very essential to reduce the damages. In this study, we applied GUI equipped debris flow simulator KANAKO to evaluate the effects of the debris flow countermeasures in Hongqiao Gully, Sichuan Province, China. The results show that the full dams which were constructed in 2001 still have the function for controlling debris flow to a certain degree. Because the trapped debris flow materials decrease the gully bed slope, and debris flow velocity decreases consequently. Through the comprehensive control of debris flow including trapping, drainage and deposition works, the simulation results indicate that the effects of the countermeasures in 2001 and 2006 are very good. The countermeasures can ensure residents' life and property on the alluvial fan.

Key Words : debris flow, numerical simulation, Hongqiao Gully, KANAKO, sabo planning, effect evaluation

1. はじめに

降雨量が多く山地が国土の6割を占める日本だけでなく、最近では中国においても2008年四川大地震や2010年甘肅省において豪雨の影響より、大規模な土石流が発生して甚大な被害が発生しており、その被害を軽減することが望まれている。

砂防堰堤、導流堤、遊砂地のような対策工を設置することが、土石流の被害を軽減する上で有用であり、砂防計画の立案においては、砂防構造物の設置位置、規模、形式を合理的に決定することが必要である¹⁾。また、実際に施工した構造物の機能を評価して、その合理性を検証することも必要となる。土石流災害規模の予測²⁾や再現³⁾、砂防構造物の土砂調節効果を検証⁴⁾する際、土石流数値シミュレーションは非常に有効なツールとなる。

本研究では、数値シミュレーションによって、中国四川省紅橋谷(中国語表記は紅橋沟, 以下は英語でHongqiao Gullyと記述)を対象として、2001年および2006年に施工

された砂防構造物の機能評価を実施した。シミュレーションには、筆者らが開発を進めてきたGUIを実装した汎用土石流シミュレータKanako⁵⁾を用いた。対策工の有無による流量・流砂量を比較し、下流側での氾濫・堆積状況の変化や、これまでに設置された対策工の機能について検証した。

2. 検討対象地：中国四川省Hongqiao Gully

(1) 地区概要

計算対象としたHongqiao Gullyは中国四川省に位置する溪流である。過去には1926年6月(死者13名)、1993年8月(家屋損壊124棟、写真-1)に土石流が発生している。年平均降雨量は621mm、降雨は雨季に集中して発生し、日最大降雨量は52.1mmが1971年7月7日に記録されている。

対象流域の流域面積は0.54km²、平均溪床勾配は24.78°と極めて急峻な地形を呈し、流域直下には多数の人家や道路等の保全対象が位置している^{6),7)}。

写真-1 Hongqiao Gullyで土石流によって破壊された家屋

写真-2 2001年に設置された上流側の砂防堰堤

写真-3 2001年に設置された下流側の連続した砂防堰堤
(写真右は堰堤上流側の満砂状況)

写真-4 2006年に設置された砂防堰堤

写真-5 2006年に設置された導流堤と遊砂地

しかし、これらは通常の出水や小規模な土石流によってほぼ満砂しており、土砂捕捉効果は設置してから数年で大幅に減少した。そこで2006年には、新たに上流域に高さ8 mの砂防堰堤が2基(写真-4)、下流には導流堤と遊砂地(写真-5)が設置された。

3. シミュレーション条件

Hongqiao Gullyにおいて、2001年および2006年に設置された対策工の効果を、汎用土石流シミュレータKanakanoを用いて検証した。Kanakanoでは、谷部を一次元計算、扇状地部では二次元計算を行い、境界では相互に流動・堆積過程が反映され、砂防堰堤による堆積過程も表現できる。図-2は、計算対象(青線が一次元領域、赤の長方形が二次元領域)を示している。

(2) これまでに設置された対策工

Hongqiao Gullyでは2001年と2006年に図1に示される対策工が設置された。2001年には高さ11mの砂防堰堤が1基と、高さ7.4 mの砂防堰堤3基が(写真-2,3)された。

図-1 Hongqiao Gullyで実施された対策工

図-2 Hongqiao Gullyの計算領域(出典:Mapabc.com)
(青線が一次元計算領域, 赤の長方形が二次元計算領域)

図-3 計算で用いたHongqiao Gullyの供給ハイドログラフ

(1) 流入ハイドログラフ

一次元領域の平均河床勾配は約24°と急傾斜であり、十分に土石流の発生・流動域であると考えられるので、本検討では上流端から供給する土石流の土砂濃度を50%としてシミュレーションを実施した。

また、ピーク流量や土石流の総量については、下記の式(1) - (3)のように中国で用いられる降雨や洪水のピーク流量についての経験式^{8),9)}から設定した。

$$Q_C = (1 + \phi_C) Q_B D_U \quad (1)$$

ここに、 Q_C : 土石流のピーク流量(m^3/s)、 ϕ_C : 洪水と土石流のピーク流量に関する係数で

$$\phi_C = (\gamma_C - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_C) \quad (2)$$

ここに、 γ_C : 土石流の密度(t/m^3)=2.2、 γ_w : 水の密度(t/m^3)=1.0、 γ_s : 砂礫の密度(t/m^3)=2.65、 Q_B : 洪水のピーク流量(m^3/s)=2.79、 D_U 閉塞係数=2.85であり、それぞれ100

年確率の降雨を対象としている。

これらから土石流ピーク流量 $29.0 m^3/s$ が算出された。土石流の総流量(m^3)は、下記の式を用いて導かれる。

$$W_C = 19TQ_C / 72 \quad (3)$$

ここに、 W_C : 一つの土石流で発生する土石流総流量(m^3)、 T : 一つの土石流が継続する時間(s)であり、現地のヒヤリング調査から、対象溪流における土石流の発生から停止するまでの時間は35-40分との報告が得られており、本検討では38分と想定した。

前述した値を用いると、総流量 $17,400 m^3$ が算出された。本シミュレーションで適用する供給ハイドログラフは、三角形のピークを持つものとして継続時間は20分と仮定して、図-3のように上流端から供給した。

(2) 検討ケース

3つのケースで計算を実施し、一次元領域における流量・流砂量と、計算終了時における二次元領域での流動深・堆積厚変化を比較した。3ケースはそれぞれ施設無し(Case1)、2001年の砂防対策工実施(Case2)、2001年及び2006年の砂防対策工を実施した場合(Case3)である。

(3) 地形条件・砂防対策工の詳細

図-4は、Kanakoで表示されるHongqiao Gullyの1次元領域及び、流量・流砂量を出力するNo.1-No.9までの観測点の位置、及び2001年と2006年に設置された砂防対策工の設置位置を示している。縦断距離990m、標高差460m、川幅は一律4mと設定している。一次元領域での初期河床材料は、現地調査から一律2mの堆積層厚として設定した。

Case2、Case3の対策工の設置位置は、図-4のように設定した。構造物の高さ・種類・機能については、2001年に設置された砂防堰堤は上流側に不透過型(高さ11m)、下流側に3基の不透過型(高さ7.4m)を連続して設定した。2006年については、2001年の対策工(Case2)に加えて、堰堤高8mの不透過型砂防堰堤が上流側に2基追加された条件となる。

なお、2001年に設置された4基の砂防堰堤は、写真-2、3から示される様に早い段階で満砂したと推定される。そこで、Case2、Case3の両ケースにおいて、この4基は満砂(元河床勾配の2/3で堆砂)条件の下で計算を実施した。

図-4 Kanakoで示されるHongqiao Gullyの1次元領域、流量観測点 (No.1-No.9)、対策工の設置位置

図-5 Kanakoで示されるHongqiao Gullyの2次元領域（左図：対策無、右図：2006年の導流堤及び遊砂地設置）

表-1計算に用いたパラメータ

パラメータ	数値
計算時間(s)	2400
計算の時間間隔(s)	0.01
土砂の粒径(m)	0.4
砂礫の密度(kg/m ³) σ	2650
流体相密度(kg/m ³) ρ	1000
河床の容積濃度	0.60
重力加速度(m/s ²)	9.8
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マニングの粗度係数(s/m ^{1/3})	0.03
1次元の計算点間隔(m)	10
1次元領域計算点個数	99
2次元の x 計算点間隔(m)	3
2次元の y 計算点間隔(m)	3
2次元平面の x 方向計算点個数	100
2次元平面の y 方向計算点個数	60

図-5は、Kanakoで表示されるHongqiao Gullyの2次元領域であり、左図がCase1とCase2に相当する対策無の条件、右図が2006年に設置された導流堤及び遊砂地を設置した地形条件である。二次元領域の兩岸端及び下流端の境界メッシュでは、一つ手前のメッシュと等流を仮定した。

その他の計算に用いた各パラメータ値を表-1に示す。粒径や流体相密度などは現地調査の結果から決定した。

4. シミュレーション結果・考察

(1) 流量・流砂量

図-6では、Case1-Case3までの各観測点における総流量及び流砂量が示されている。無施設のCase1では、一次元領域を流下するに従って、侵食によって流砂量が増大し、それに伴って総流量も増加している。一次元領域の下流端No. 9においては、総流量のピークが43.92 m³/sであり、これは上流端から供給したピークの約1.5倍に相当する。一次元領域から流下する総流量も19,500 m³と上流端から供給した土石流と比較して1.12倍に増加している。

次に2001年に設置した対策工を考慮したCase2の結果からは、対策工より下流側に位置する観測点No. 4よりも下流において、侵食による流砂量の増加が抑制されたことがわかる。総流量についても同様の傾向がみられる。前述のように、2001年の対策工については、満砂状態を仮定して検討したが、無施設のCase1と比較した場合には、砂防堰堤によって侵食が抑制されており、土砂捕捉効果はポケットが空の場合と比較すると減少したとはいえ、被害軽減効果は見られることが示された。

Case3では、2001年の対策工に加えて2006年に設置された上流側の砂防堰堤の影響が、特に観測点No. 2及びNo. 3で見られる。流砂量の増加が、計算開始から700秒後にかけてはCase2よりも抑えられており、ピークに達する時間も若干遅らせている。しかし、観測点No. 2において、700秒付近でピークの急増が見られる。これは、最上流の砂防堰堤が700秒付近で満砂しており、満砂直後については、下流側への流量が急増することによって、堰堤下流での侵食が急激に増大したことの影響と見られる。しかしながら、このピークの急増は観測点No. 3においては上流から2基目の砂防堰堤の機能により、概ね抑制されている。観測点No. 4から下流側の観測点においては、Case2と比較した場合に大きくは変化しないが、ピーク到達時刻がやや遅らされたこと、およびピークの流砂量・流量が減少していることが示されており、新たに設置した2基の砂防堰堤が機能したことがわかる。

(2) 流動深・堆積厚変化

図-7は、計算終了時における各Caseの流動深および河床位変化を示す。Case1（無施設）の場合には、二次元領域の居住エリアの下流まで広範囲に10-20cmの流動深が示された。河床位変化からは、二次元領域の上流付近で3m以上の堆積が広い範囲で見られ、最大では7.5mの堆積が示された。写真-1、5や図-2の流域状況から判るように、二次元領域に相当するエリアには家屋が多く存在し、無施設では甚大な被害が生じることが改めて示された。

2001年の対策工を設置したCase2では、Case1と比較して水・土砂が存在する領域は狭く、流動深・堆積厚変化とも値が小さい。これは、Case2ではCase1と比較して一次元領域から流出する水・土砂が減少したことによる。

図-6 Case1（上段）, Case2（中段）, Case3（下段）の1次元領域における各観測点での総流量（左図）および流砂量（右図）

一方で、流れは二次元領域の下流端にまで存在し、河床位も高い所では3m以上の堆積（最大4.55m）が生じることから、対策としては十分でないことも示される。

2001年および2006年の対策を実施したCase3については、一次元領域から流出する水・土砂がCase2よりも減少したこと、並びに導流堤および遊砂地を二次元領域に設置することによって、流れはほぼ全て対策工の範囲内に収まることが示された。土砂については、全て対策工の内部に堆積しており、非常に有効に機能したことが示された。

なお、Case2及びCase3の計算終了時には、領域の右岸側に流動深変化が表示されたメッシュが点在している。これは、流動深の結果表示で5cm未満の浅い流れを表示しないことによるものである。すなわち、計算過程で浅い流れが発生した後、緩勾配で流動深が5cm以上に増大して溜まったメッシュがこれらに相当する。

計算時間の2400秒間を通じて、全Caseについて流動深、及び堆積厚変化が見られたメッシュは、計算終了時に色が付いたメッシュと概ね同じであった。

5. おわりに

本研究では、汎用土石流シミュレータKanakanoを用いてHongqiao Gullyで実際に施工された砂防構造物の機能評価を、流量や流砂量並びに居住エリアでの流動・堆積状況を、無施設の場合と比較して検討した。

結果からは、土石流が発生した場合に保全対象に被害を及ぼす氾濫・堆積が起こりうることが確認され、2001年や2006年に設置された砂防堰堤、導流堤や遊砂地などの砂防構造物は、効果的に機能することが明らかとなった。中でもCase2で検討した満砂した砂防構造物は、検討前は直感的には機能しないように思われたが、結果から河床における土砂移動を抑制することで一定の効果を示すことが明らかとなった。Case3からは、ポケットが空の砂防堰堤や居住エリアにおける導流堤や遊砂地を設置することが、非常に有効であることが示された。

手軽に多様な条件を検討できるのは数値シミュレーションの利点なので、今後も既に対策が施された地域で、施工時と現況の構造物の効果の差異などを検討したい。

図ー7 Case1 (上段) , Case2 (中段) , Case3 (下段) の2次元領域における流動深 (左図) および堆積厚変化 (右図)

参考文献

- 1) 国土交通省: 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編), 2007.
- 2) 芦田和男, 江頭進治, 村岡猛, 里深好文: 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号 B-2, p. 421-439, 1987.
- 3) 中川一, 高橋保, 里深好文, 川池健司: 1999年ベネズエラのカマリグランド流域で発生した土砂災害について, 京都大学防災研究所年報, 44B-2, p. 207-228, 2001.
- 4) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来者 p. 342-369, 2004.
- 5) 中谷加奈, 和田孝志, 里深好文, 水山高久: GUIを実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p. 149-154, 2008.
- 6) Liu, J.: Sabo Planning and Effect Evaluation of Debris Flow Countermeasures Based on Numerical Simulation by Using Kanako Version 1.43 and Version 2.04, Report for the Japan International Cooperation Agency, 2010.
- 7) Kang, Z., Li, Z., Luo, J.: Research on debris flow in China, Beijing Science Press, 2004.
- 8) 周必凡, 李德基, 罗德富: 泥石流防治指南, 科学出版社, 北京, 1991
- 9) Fei, X., Shu, A.: Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow, Beijing Tsinghua University Press, 2004.

(2010. 9. 30受付)