

パワカラエン山大規模崩壊災害後の土砂移動

八千代エンジニアリング(株) 国際事業本部 渡辺岳志、松永 繁、水野直人
総合事業本部 ○池田 誠、下田義文

1. はじめに

インドネシア国南スラウェシ州に位置するジェネベラン川源頭部のパワカラエン山で、2004年に大規模なカルデラ壁崩壊が発生し、岩屑雪崩となってジェネベラン川を流下し、死亡・行方不明32名の犠牲者をもたらした。しかし、この大崩壊で一番懸念されたのは岩屑雪崩堆積土砂が降雨により土石流等の形態で大量に流下し2次土砂災害を発生することであった。インドネシア政府は2次災害を軽減するためにパワカラエン山緊急防災事業（以下「防災事業」と略す）を2005年から2013年の間に実施し砂防施設を建設した。8年間の防災事業期間に実施した土砂移動モニタリングに基づき、大崩壊後の土砂移動を整理し、且つ、逐次竣工した砂防施設の効果について考察を加えたので報告する。

2. パワカラエン山カルデラ壁崩壊及びジェネベラン川流域の概要

2004年3月26日にパワカラエン山東側カルデラ壁が大崩壊を起こした。崩壊量は約1.8億 m^3 と推定され、岩屑雪崩は約9km流下した。

ジェネベラン川は、大崩壊が発生した東側カルデラ壁を源流とし、カルデラ内を西方に直線的に流下し、河口から35km地点に位置する多目的ダムのビリビリダム（総貯水容量3.75億 m^3 ）に流入する。ダムから放流された流水はさらに西流し、マカサル湾に注ぐ河川全長75km、流域面積727 km^2 の大河川である。ビリビリダム堆砂対策として5基の既設サンドポケットがあり、前述の防災事業により新たに11基の砂防堰堤と4基の床固め工が建設された。

岩屑雪崩堆積土砂の再移動による2次災害で最も深刻なのは、ビリビリダムの堆砂及びダム機能障害である。

3. 河床変動量測定結果の整理

大崩壊後50-1600m間隔で河床横断測定及びダム深浅測定を実施した。この測定結果に基づき堆積土砂変動量を整理し図-2に示した。堆積土砂の変動傾向を見ると次の通りである。

河道Ⅰ、河道Ⅱ、サンドポケットの区間は、河床変動は2004年～2005年に顕著であるが2005年～2013年の変動が少ない傾向にある。一方、貯水池は堆積土砂の増加は継続している。

- ① 河道Ⅰ（砂防堰堤7基建設）：浸食傾向
- ② 河道Ⅱ（砂防堰堤4基建設、床固め工4基建設、既存サンドポケット1基）：著しい堆積傾向
- ③ サンドポケット区間（既存サンドポケット4基）：変動が少ない傾向
- ④ ビリビリダム貯水池：著しい堆砂傾向

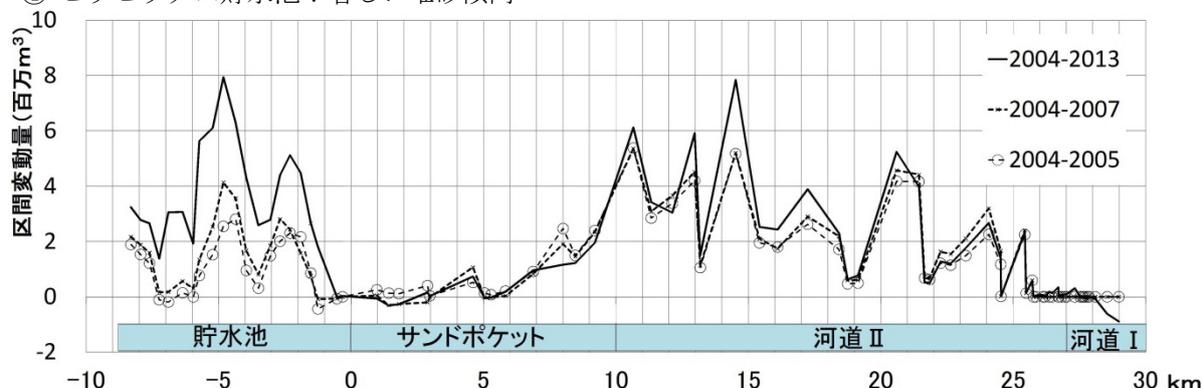


図-1 流域概要

図-2 河床変動量モニタリング結果

4. 堆積土砂変動量と流下土砂量

4.1 カルデラ内の土砂移動、ダム下流への土砂流出、砂利採集及びダム堆砂除石の整理

パワカラエン山岩屑雪崩後のカルデラ内の土砂移動については、清水等の衛星観測データに基づく調査

りがあり、ダム下流への土砂流出については、ダム利水放流量に基づき、2004年～2005年間のSS濃度観測に基づく「流量—SS濃度関係式」²⁾を用いて算定した。

貯水池末端部では崩壊後に利水容量保全のために緊急除石が実施されており、さらに既設サンドポケットでは従来から継続的に砂利採集が実施されている。それぞれ、工事記録の搬出量からその量を整理した。これらの計測時期は同じ年内であるが、河道測量とは時期がずれているが、同時点の堆積量として扱った。

4.2 崩壊及び河床堆積土砂の変動量及び流下土砂量

カルデラ内及び河床等における堆積土砂変動量を図-3に示した。カルデラ内の変動量調査は2006年以降実施されていない。防災事業による砂防施設は2007年から建設が始まり2011年までに逐次竣工しているので、2007年からは砂防施設の影響があると考えられる。

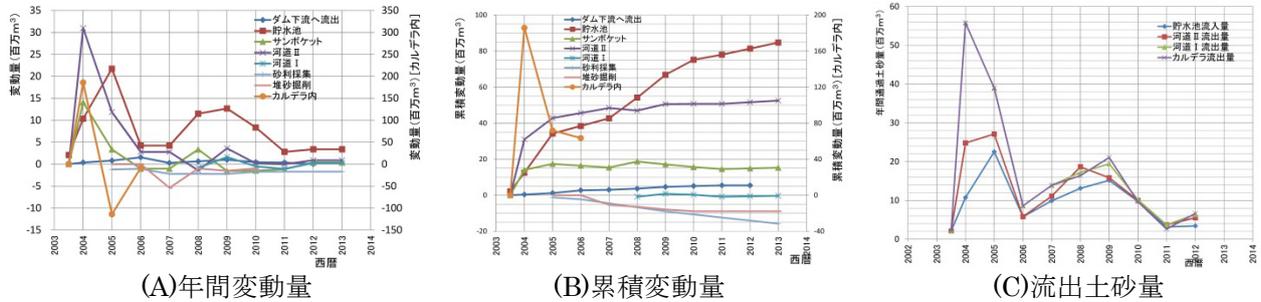


図-3 崩壊土砂、河床変動量、断面通算土砂

4.2.1 堆積土砂変動量の経年変化

2004年3月26日に崩壊が発生した後の、最初の測量は同年7月であるが、河床変動量の経年変化を見ると、この約4ヶ月間に岩屑雪崩堆積土砂が再移動し河道、貯水池に堆積した量が著しく多い。崩壊直後に数回土石流が発生しているので、これによって崩壊堆積土砂が大量に再移動したと考えられる。2004年の貯水池堆砂量が2005年よりも少ないのは、貯水池に堆積する浮遊砂成分は年間総流量に比例すると考えると、4か月の期間が短かったのが原因と考えられる。

ダム堆砂量以外の変動量は、2005年以降は急激に減少している。ダム堆砂量は2008年から2010年の間に再び増加している。この3年間の年間雨量は平年と大差ないが、1～2月の雨量が1000mmを超え、平年の1.2倍～1.5倍の雨量が見られる。この雨量により土石流・浮遊砂等が流下したと考えられる。

河床変動は崩壊発生後5年経過した2009年からは年間百万m³以下へ減少し安定しているが、ダム堆砂量は年間約300万m³であり、崩壊以前の年間堆砂量200万m³に比較すると50%程度は多い。

4.2.2 流出土砂量

堆積土砂変動量から4地点の通過土砂量（流出土砂量）を算出し図-3(C)に示した。この図から流出土砂量は崩壊後2年間で急激に減少し、各地点の差が小さくなっており河道が安定したことを示している。また、土石流の多発した2007年から2010年の間は一時的に大きくなっているが、各地点の差は小さい。

5. 砂防施設の効果

既設のサンドポケット5基、新設床固め工4基及び新設砂防堰堤11基の貯砂量(1/2i₀堆砂)及び調節量(2/3i₀と1/2i₀堆砂の差)の合計は3,639,600m³である。これに対して、年間流出土砂量は1千万m³～5千万m³であるので、砂防施設による流出土砂捕捉効果は小さいと考えられる。しかし、上記のように2010年以降は、貯水池周辺の変動量が減少し、各地点の流下土砂の差が無くなったことは河床が安定化していると評価でき、河道に建設された砂防施設の河床堆積土砂再移動抑制（固定）効果が大きいと考えられる。実際の砂防堰堤の堆積状況を見ても、河道に土砂が堆積した状態で安定化している状況を把握できる。河床で固定された堆積土砂量は図-3(B)から河道I、河道II、サンドポケットで57百万m³と推定される。



写真-1 防災事業で完成した砂防堰堤の堆積状況

- 1) 清水、小山内、山越、笹原、筒井：衛星観測高精度DEMによるインドネシア国パワカラエン山の大规模崩壊後の土砂流出の経年変化把握、J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol.45, No.2, 95(2008), PP95-105
- 2) Laurentia Lestari DHANIO: Changes in Sediment Discharge after the Collapse of Mt. Bawakaraeng in South Sulawesi, Indonesia, pp34-36, Master Thesis, Laboratory of Erosion Control, Forestry Division, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2009