

## 桜島軽石の流下実験における治山堰堤の土砂捕捉機能の検討

岡田康彦・落合博貴 (森林総研)

要旨：全長 13m, 幅 0.6m の大型水路を対象に土砂の流下実験を行った。流下させた土は鹿児島県の桜島において土石流が頻発している軽石（粒径は、20mm 以上 50mm 未満を使用）であり、体積にして 0.6m<sup>3</sup> の飽和試料を、傾斜 30 度、長さ 4m（供試体を作成する水密のゲートからの水路水平部までの距離）の水路上を流下させるものである。傾斜水路と水平水路の連結点から 1.3m 下流側の位置に、治山堰堤模型を設置した。治山堰堤模型の背面には荷重計を設置し流下土砂による衝撃力を計測可能としている。堰堤背後の堆砂量および水分条件を変えて土砂流下実験を行い、治山堰堤の土砂捕捉機能について検討した。

堰堤背後の堆砂が不飽和の場合および堆砂を与えない条件の時、堰堤背後の堆砂が飽和の時に比べて流下土砂が多く捕捉される結果が得られた。また、堰堤背後に堆砂を与えない場合は堰堤背後の堆砂を不飽和に保った場合に比べ、堰堤に載荷される最大の荷重が著しく大きいこともわかった。これらから、桜島の軽石を対象にした場合、治山堰堤背後には堆砂があり、かつこの堆砂の水抜きを効率良く行うことにより治山堰堤の土砂捕捉機能が強化される可能性が示された。

キーワード：治山堰堤、土砂の捕捉、流下土砂、軽石

## I はじめに

近年、地球温暖化の影響も疑われる集中豪雨が頻発し、各地で地すべりや斜面崩壊の他、土石流が多発している。本年においても広島県庄原市では、平成 22 年 7 月豪雨により約 10km<sup>2</sup> 程度の非常に狭い範囲で数百もの土砂移動現象が発生している。5 つのタイプの土砂移動現象 (1) の内、人的・経済的観点から見て、流れタイプの土砂移動現象がその危険度がより大きいとされている。なぜならそれほど勾配の大きくない斜面をも長距離運動してきた災害を引き起こす可能性が高いからである。

さて、山地斜面における地すべりや斜面崩壊の発生を抑制し、また被害を軽減することを目的として、山地溪流には多くの治山堰堤が設置されている。治山堰堤は、通常その背後に堆砂を伴うことから、治山堰堤背後の溪流沿いの溪岸斜面を安定させる働きその他、溪床勾配の緩和に伴って浸食を抑制する働きがあるとされている (2)。一方、土石流のように土砂が流下してきた際に、どのような条件の時どの程度の土砂を捕捉し、流下距離を減じる効果があるのかについては未解明であり、その実証的な検討が望まれていた。

そこで大型の人工水路を対象に、0.6m<sup>3</sup> の飽和土砂を流下させた時、治山堰堤およびその背後堆砂により、土砂がどの程度捕捉されるのか、また、治山堰堤背面に載荷される衝突荷重はどのようになるのかについて検討を行った。流下させた試料は、桜島から採取した軽石で、堆砂の土量、および堆砂内部の水分条件を変えて実験を行った。本報ではこれらの結果を報告する。

## II 実験の概要

実験に使用した大型水路の全景を図-1 に、その概略および計測器の配置状況を図-2 に示す。水路は、勾配を変更可能な上流部と水平な下流部からなる。上流部の水路長は 5m, 下流部の水路長は 8m であり、水路幅は上下とも 0.6m である。水路の片面は強化ガラス製で、側部から土砂の移動を撮影可能である。水路底面には、粗度を与えるために粒径 0.4mm から 2.0mm の砂を密に吹きつけたシートを貼りつけた。土砂を流下させるため、水路上流部の最上端部 1m を水密のゲートで仕切り、そこに詰めた土試料に対し給水を行って飽和試料を作成した。ゲートは電気制御により観音開き方式で開放することが可能である。なお、大型水路の詳細は (3) および (4) に詳しい。

高さ 0.6m の治山堰堤模型は、上流部と下流部の連結点から 1.3m 下流側の位置に設置した (図 2 参照)。また、堰堤背後の堆砂量を変えた実験を実施するため、適宜、高さ 0.3m の底上げ台を堰堤背後に取り付け、堆砂の表面は同じであるものの堰堤高が 0.3m になるように調整した。治山堰堤模型の背面には 4 段にわけて荷重計が設置されている (図-3)。荷重計の容量は 500N であり、直径 0.1m のジュラルミン板に載荷される荷重を計測した。荷重計の計測データは 1000Hz で PC に収録した。また、PC に収録される経過時間を、100 分の 1 秒単位で水路周辺に設置した 4 台の時刻表示器にも同時出力することにより、デジタルビデオカメラによる撮影画像との同期を得る仕様とした。

用いた試料は、鹿児島県鹿児島市桜島火山の引之平地区から採取した降下軽石（ボラ）である。ボラは大小種々の粒径を含むため、ハンマーで相当量を破碎させた後、50mm 篩い通過、20mm 篩い不通過の分を使用した。ボラの土粒子密度は  $2430\text{kg/m}^3$  である。なお、実験は、表-1 にまとめた通り 6 回行った。

### III 実験結果

1. 越流土砂量 上流から流下してきた土砂が治山堰堤を越えてさらに下流に運動することにより災害が生じると考える。そこで、ここではボラ試料の流下実験において、流下してきた土砂が治山堰堤を越えてさらに流れた土砂量を計測した。その結果、Ex-1 から Ex-6 に関して越流土砂量は、 $0.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ ,  $0.22 \text{ m}^3$ ,  $0 \text{ m}^3$ ,  $0.15 \text{ m}^3$ ,  $0.14 \text{ m}^3$ ,  $1.4 \times 10^2 \text{ m}^3$  となり、越流土砂量は実験条件に応じて大きく異なる結果となった。

2. 衝突荷重 治山堰堤模型の背面で計測された土砂の流下に伴って発生する荷重値の変化について、例として治山堰堤模型の高さが 0.6m の Ex-1, Ex-2 および Ex-3 の結果を示す（図-4a, 4b, 4c）。荷重値は、実験条件に応じて堆砂を与えた後、土砂を流下させる直前を初期値ゼロとして表示している。治山堰堤背後の堆砂が無い Ex-1 では、流下土砂が治山堰堤に衝突する（経過時間が約 18.4 秒時）と同時に、最下段における荷重がシャープに上昇し、最大で約 560N（経過時間が約 18.4 秒時）もの値を示した。その後は急激に減少するものの約 60N の残留値を示した。最下段の荷重以外についても、下から 2 段目が 184N（経過時間が約 18.5 秒時）、3 段目が 58N（経過時間が約 18.6 秒時）という大きな値が計測された。Ex-1 では堰堤背後が空の状態であり、流下してきた土砂が直接堰堤に衝突するためかなり大きな衝撃力が計測された。治山堰堤模型背後の堆砂が飽和の Ex-2 においては、堰堤背面に載荷される荷重はシャープに上昇する結果となった。計測された最大の荷重は最下段で約 25N（経過時間が約 14.5 秒時）と小さく、また、その他の荷重計においても最大値が 15N から 24N の範囲に収まっていた。最大値を示した後はなだらかに減少し、2N から 7N 程度の残留値に収まり、土砂を流下させる前と同程度の値まで減少した。一方、治山堰堤背後の堆砂が不飽和の Ex-3 においては、荷重は最大値を示した後もほとんど減少しない結果となった。計測された最大荷重は約 31N（経過時間が約 32.7 秒時）と小さい結果になった。下から 2 段目、3 段目についても計測された荷重は 15N 以下となっている。なお、流下させた土砂に含まれていた水が堆砂に流入したこともあり、土砂を流下させる前よりも大きな値が残留している。

### IV 考察

前章で、ボラを対象にした土砂の流下実験における治山堰堤を越流する土砂量、ならびに治山堰堤の背面に載荷される荷重について調べた。ここでは、これを受けて治山堰堤の土砂捕捉機能について考察する。図-5 に、各実験における土砂の捕捉率を示す。土砂の捕捉率は、流下させた土砂量 ( $0.6 \text{ m}^3$ ) と、前述の治山堰堤を越流した土砂量の差をとり、 $0.6 \text{ m}^3$  に対する百分率で表示したものである。越流した土砂には、堆砂が流れたものも含まれているがその判別は困難である他、一定体積の土砂が流下してきた場合の影響を調べることを目的としているため、ここでは上記の通り算出した。

その結果、Ex-2, Ex-4, Ex-5 で捕捉率が小さく、Ex-1, Ex-3, Ex-6 で土砂の捕捉率が 90% を越えた。治山堰堤背後の堆砂を飽和させた Ex-2, Ex-5 については、流下させた土砂の多くが治山堰堤を越えて流れた他、流下土砂の衝突により堆砂の一部が流動化して水流に乗って治山堰堤を越えて移動したことが原因である。

Ex-4 については堰堤背後の堆砂は無し条件であったが、堰堤高が 0.3m しかなく、流下してきた土量に対しポケット容量が不十分であったため多くが越流する結果となった。Ex-1 も堰堤背後の堆砂を与えない条件であったが、Ex-4 に較べ堰堤高が 0.6m と 2 倍と大きく、ポケット容量が十分であったためほぼ全量が捕捉された。

治山堰堤背後の堆砂を不飽和で与えた Ex-3, Ex-6 については、堆砂内部には空隙が十分にあり、飽和土砂が流下してきた際に、流下土砂の間隙水が堆砂内に浸透したため、流下土砂内部の間隙水圧が減少し摩擦抵抗が増大したためそのほとんどが捕捉される結果となった。

続いて、各実験において治山堰堤の背面に載荷された最大の荷重を図-6 に示す。明らかなように、治山堰堤背後に堆砂を与えなかった Ex-1 および Ex-4 で大きな荷重が載荷されていた。これは前述の通り、堰堤背後に堆砂が存在しないため、流下してきた土砂が直接治山堰堤背面に衝突し、急激な衝撃力として作用したためと考えられる。一方、堆砂を与えた Ex-2, Ex-3, Ex-5, Ex-6 では、最大でも 31N が計測されたのみで小さな値に収まっている。これは、堆砂が存在することにより流下してきた土砂のエネルギーが吸収されると共に、治山堰堤に直接衝突しないことが最も大きな影響を与えたと考えられる。

限られた予算の中で如何に経済的に治山堰堤を製作し、かつ効率的に機能強化を図るのかのかという 2 つの視点が重要であると考えられる。一般に、大きな耐力をもつ構造物を作る場合は高額になる。治山堰堤背後に堆砂を

与えない場合、治山堰堤背面に載荷される流下土砂による動的荷重は、治山堰堤背後に堆砂を与えた場合に較べて著しく大きいことから、仮に治山堰堤を設計するとしてかなり耐力の大きなものが必要となる。一方、治山堰堤背後に堆砂がある場合は、流下土砂による動的な荷重はそれほど大きくなく、比較的耐力の小さな設計で済む可能性が高い。また、治山堰堤による流下土砂の捕捉率で機能を評価した場合、治山堰堤背後の堆砂無しの場合、および治山堰堤背後の堆砂を不飽和で与えた場合に捕捉率が大きい結果が得られているこの2つの視点に鑑みると、ボラについては、治山堰堤背後の堆砂を不飽和に制御し、流下してくる土砂の間隙水を吸収可能な空隙を保持することが最も効果的であろう。

治山堰堤背後の堆砂の水抜きに関して、従来は、治山堰堤に水抜き孔を穿つに留まってきた。例えば、治山堰堤の水抜き孔から上流側の堆砂内部に排水工を施工したり、堆砂の流出を考慮した上で堰堤を格子状にするなどの工夫を行うことにより相当改善されると考える。

V 終わりに

桜島で採取した軽石（ボラ）を対象に、大型水路を用いて土砂の流下実験を実施した。流走域に治山堰堤模型を設置した他、実験条件に応じて治山堰堤模型背後に堆砂を与えて実験を行い、治山堰堤背面に載荷される荷重、ならびに治山堰堤による流下土砂の捕捉について検討を行った。本実験は、大型水路を用いたものであるものの、その全長が13mであり、また飽和供試体が流下する勾配のある水路長は4mであるなど、実際に土砂が山地溪流を流下する現象に較べて規模が小さいため実際の土砂の流下現象、およびこれを受けた治山堰堤の機能が再現されているとは必ずしも言えない。しかし、軽石に限定されているものの、治山堰堤の機能を検討する上で有益な知見が得られたので下記する。

1) 治山堰堤背後に堆砂を与えない場合、治山堰堤背面に載荷される流下土砂による衝突荷重が、治山堰堤背後に堆砂を与えない場合に較べて著しく大きい。これは、堆砂が無いと、流下土砂が直接治山堰堤背面に衝突し衝撃力として作用するためであると考えられる。

2) 治山堰堤による流下土砂の捕捉機能を検討する場合、治山堰堤背後堆砂を与えない場合、および治山堰堤背後の堆砂を不飽和に保つ場合において、その機能がより発揮される。堆砂の水抜きが機能していると、流下土砂の間隙水が堆砂内部に浸透し、流下土砂内における摩擦抵抗力が増大することにより、捕捉機能が強化されることがわかった。なお、堆砂が無い場合はポケット容量が十分確保される必要がある。

3) 治山堰堤背後に堆砂を与えない場合、流下土砂の捕捉機能は発揮されるものの、流下土砂による衝突荷重が著しく大きいという問題がある。治山堰堤を安価で製作し機能化させるという2つの視点に鑑みると、治山堰堤背後堆砂の水抜き制御を効果的に行うことが重要であり、堆砂内部の縦断方向に排水工を施工することが手段として考えられる。

引用文献

(1) CRUDEN, D.M., VARNES, D.J. (1996) Landslides types and processes. In: Turner, A.K., SCHUSTER, R.L. (des.), Landslides, investigation and mitigation: Special Report 274, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 36-75.

(2) 社団法人砂防学会 (2004) 改訂砂防用語集. 432pp. 山海堂, 東京.

(3) 岡田康彦・落合博貴 (2007) 土砂流下実験における間隙水圧の動的変化と流下土砂の運動特性. 日本地すべり学会誌. 43(5):33-43.

(4) OKADA, Y., OCHIAI, H. (2008) Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests. Engineering Geology. 97(1):231-236.

表-1. 実験番号および実験条件

	Dam height (m)	Void ratio	Degree of Saturation (%)
Ex-1	0.6	5.73	—
Ex-2	0.6	5.31	100*
Ex-3	0.6	5.87	27.0
Ex-4	0.3	5.34	—
Ex-5	0.3	5.56	100*
Ex-6	0.3	5.49	31.3

なお、間隙比は流下させた供試体の値、飽和度は治山堰堤背後に与えた堆砂の値、\*は推定値である。

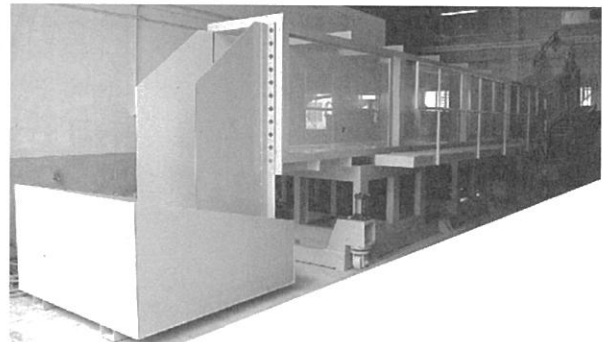


図-1. 土砂流下実験に使用した大型人工水路の全景

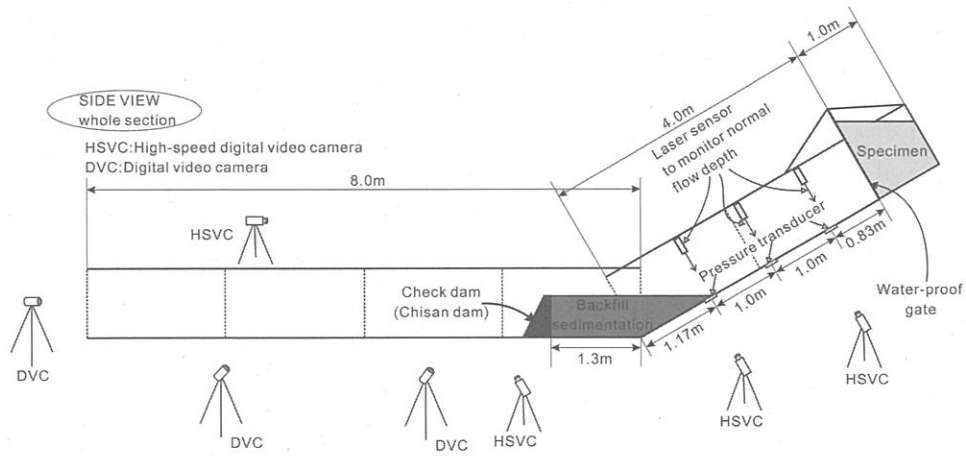


図-2. 大型人工水路の概略と治山えん堤模型およびその背後堆砂の模式図

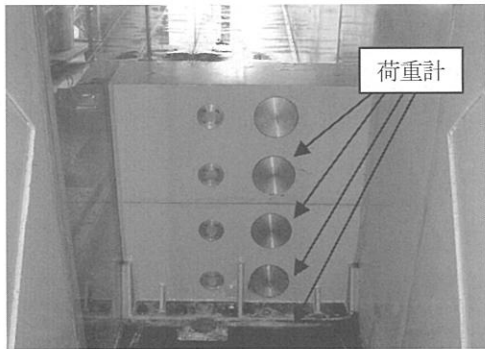


図-3. 治山堰堤背面に設置した荷重計

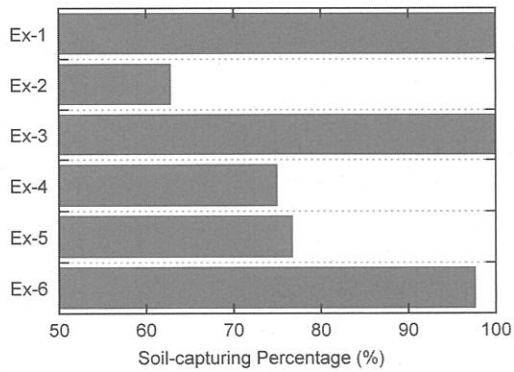


図-5. 各実験で得られた流下土砂の捕捉率(%)

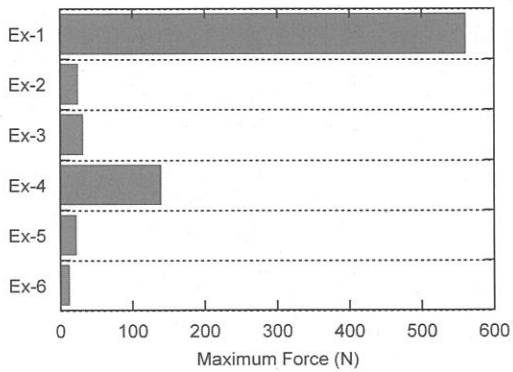


図-6. 各実験で計測された最大の荷重

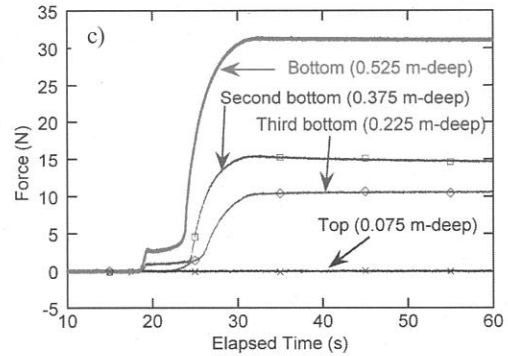
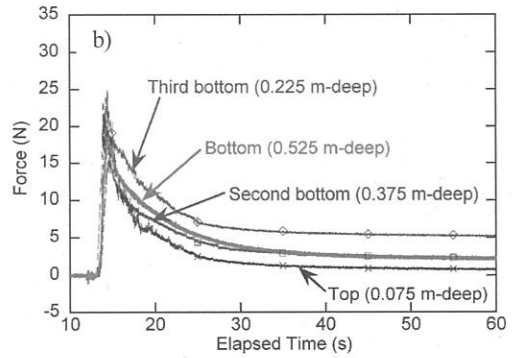
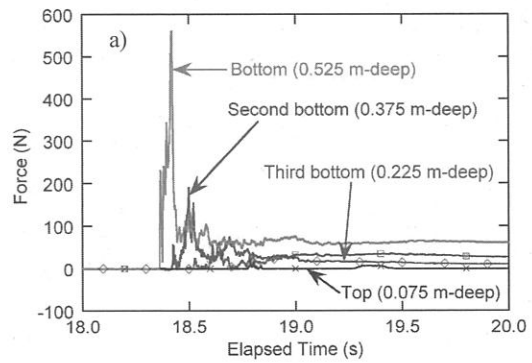


図-4. 治山堰堤背面に載荷された荷重の経時変化, a) Ex-1, b) Ex-2, c) Ex-3