

地盤振動を利用した土石流のハイドログラフの推算

疋田 誠¹・榎並 利征¹・酒谷 幸彦²
山根 史郎³・大山 勉³・会田 和義⁴・石塚 浩一⁴

¹ 鹿児島工業高等専門学校 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝 1460-1)

² 国土交通省九州地方整備局大隅工事事務所 (〒893-1207 鹿児島県肝属郡高山町新富 1013-1)

³ (株) 建設技術コンサルタント (〒890-0003 鹿児島市伊敷町 7022-1)

⁴ (株) アイ・エム・ティー (〒899-5116 鹿児島県始良郡隼人町内熊元 932-5)

1. はじめに

昭和 32 年以降、桜島は継続して火山活動を続けており、火口から噴出される火山灰は山頂付近に堆積し、降雨を引き金として数多くの土石流が発生している。国土交通省大隅工事事務所では、平成 6 年 12 月及び平成 8 年 1 月に土石流の通過する野尻川下流に振動センサーを 3 個設置した。土石流の発生を検知し、流出規模を知ることを目的としている。本報は、土石流が流路工を通過する際に発生する地盤振動をシミュレートする屋外実験結果と桜島の土石流の観測結果を比較検討し、土石流の通過に伴う地盤振動の物理現象の解明を試みた後、土石流のハイドログラフの推算法を検討したものである。

2. シミュレーション実験

(1) シミュレーション実験装置

写真-1 は、屋外に設置した土石流が通過する流路工の河床の一例である。野尻川に見られる流路工の凹凸の影響を考えた河床のモデルとして、直径 12.5 cm の円柱状のコンクリート供試体を半分、土中に埋設し、水平に敷き並べた。供試体の間は、平均径 1 cm の玉砂利で埋設し、水平に均一に平坦化された河床の区間長は 10.5 m である。土石流は、通常、溶岩・火山灰・雨水が混在している。ここでは、河床に強い衝撃力を与える溶岩に着目、写真-2 に示すような桜島から採取してきた溶岩（直径約 13 cm、幅約 22 cm）を用い、駆動装置を用いて転がすことにした。写真-3 に示すように、振動センサーは流路工の中間地点の地表下 0.5 m に埋設した。3 軸方向に計測可能な高感度のセンサ

ーと、鉛直に 1 軸方向で周波数帯域の広い安価なセンサーを計 2 個、設置し、比較検討した。図-1 は、模型実験装置の模式図である。敷き並べたコンクリート供試体との間には、玉砂利・土・火山灰砂の 3 種類を敷き詰めた。土石流に相当する流下物体は、コンクリート供試体と溶岩の 2 種類である。図-2 に、シミュレーション実験の条件を示す。座標軸は、水平に下流方向を x 軸、x 軸に対して水平直角に y 軸、鉛直下向きに z 軸をとっている。

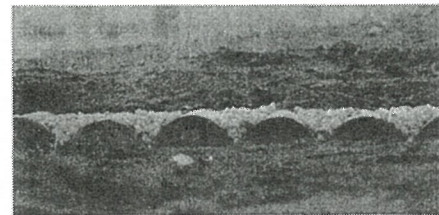


写真-1 河床（供試体＋玉砂利）



写真-2 溶岩の移動の様子

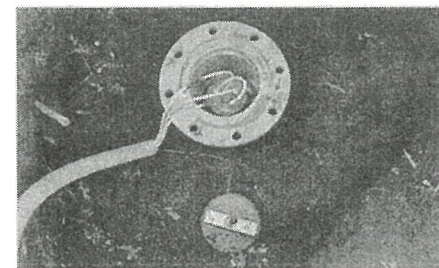


写真-3 振動センサー（埋設時）

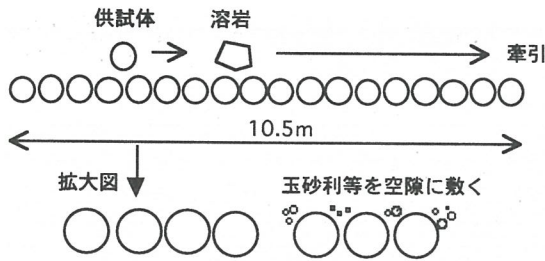


図-1 シミュレーション実験の模式図

(2) 実験結果と考察

コンクリート供試体は、円筒の中心軸で回転させ、溶岩は引きずる状態で牽引している。図-2の(a)は、河床の供試体の間に玉砂利等を置かず、供試体を速度 0.4m/s で走行させた場合である。一定時間間隔で、強い衝撃力が発生している。図-2の(b)は、溶岩を走行させた場合である。実際の野尻川の土石流の地盤振動の波形と比較的よく類似する。そこで、間隙に、図-2の(c)は玉砂利、(d)は表層土、(e)は野尻川の流路工で採取した火山灰砂を、河床の供試体の間隙に詰め、それぞれの波形を示している。図から、(c)玉砂利、(e)火山灰砂、(d)表層土の順に、振動の波形の大きさが小さくなっていることが分かる。

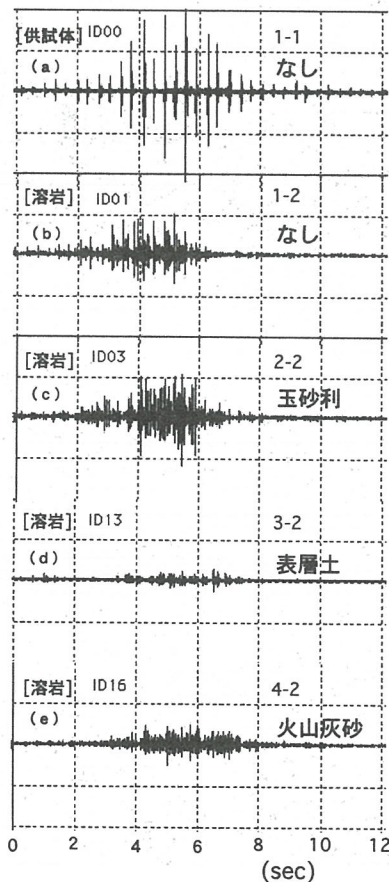


図-2 走行加重による地盤振動

図-3は、桜島野尻川の土石流 (z軸方向) による地盤振動の波形の記録。図-4、そのピーク流量付近の約0.5秒間と、火山灰砂を空隙に詰めた状態、図-3(e)の波形を比較したものである。野尻川では流路工の高水敷の地下約1mに埋設したものであるが、振動はかなり大きくなっている。図-6は、両者の地盤振動のスペクトルを示したもので、10~500Hz位で推移している。2種類の振動センサーを用いた測定を行った結果、地盤の振動波形を見た限りでは、安価なz軸のみの1軸方向のセンサーで十分使用可能なことが分かった。

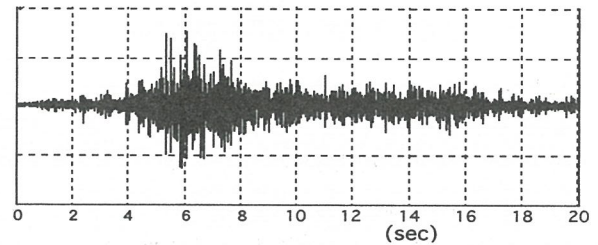


図-3 野尻川の土石流の波形 (1995.5.1)

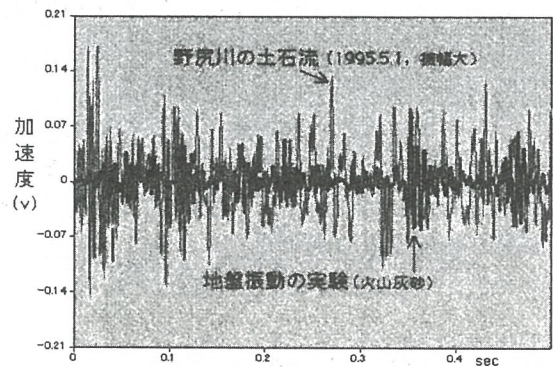


図-4 野尻川の土石流と地盤振動実験のデータの比較

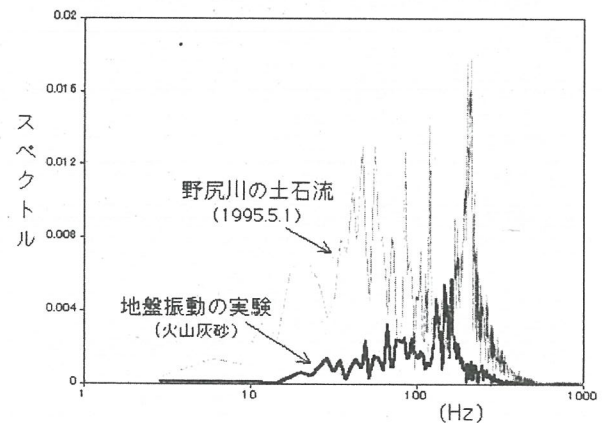


図-5 スペクトル解析結果の比較

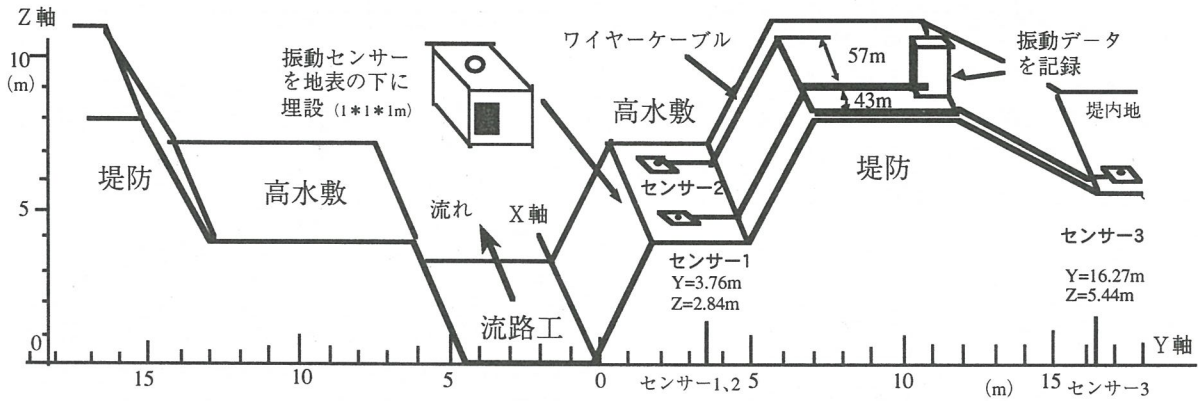


図-6 野尻川の振動センサーの設置状況

3. 桜島野尻川の振動センサー

(1) 振動センサーの設置状況とデータ

図-6は野尻川下流の流路工において、振動センサーの設置の状況を示したものである。下流方向をX軸、X軸に対して水平直角にY軸、鉛直上向きにZ軸をとる。センサー1と2は流路工右岸のコンクリートで被覆された高水敷に埋設している(X=0m及び100m)。センサー1と3はY方向に3.4m、18.1mの位置にある。

振動センサーにより検知された対象データは2つあり、平成9年3月29日(手動計測)及び9月16日(自動的に3回検知)の降雨時のものである。土石流の振動解析には流量等の計測されている9月16日の振動データを用いた。

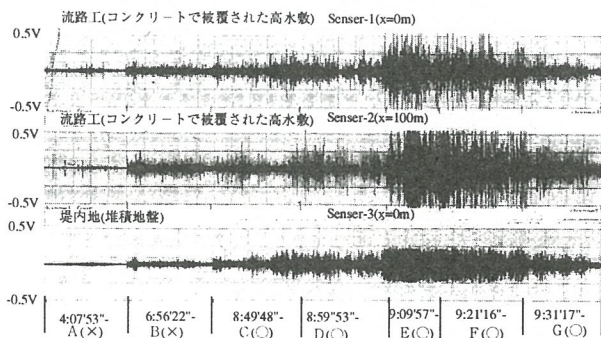


図-7 地盤振動の時間的推移 (1997.9.16)

図-7は、9月16日の土石流の地盤振動のデータ(X軸)である。データは合計7個(A~G)のデータで、各々10分間づつ連続している。センサー1と2は100m離れており、波形の大きさの変化から下流のセンサー2ではピークの遅れが明瞭に識別できる。センサー3は、センサー1より約15m離れた堤内地にある。センサー3の計測の最大値を2Vに制限していたため最大値はカットされているが、

土石流の地盤振動はよく伝わっている様子が理解できる。別途、行われたワイヤーセンサーで検知された土石流は、図のC~G(O)において、超音波を用いて、流量データ(水位及び流速を計測)を得ている。これから、振動センサーを用いると、ワイヤーセンサーの場合よりも、さらに小規模の土石流、図のA,B(X)も検知できることが分かる。

(2) 土石流による地盤振動の状況

土石流の振動解析には、流量等が観測されている平成9年9月16日のデータを用いた。図-1は、設置された3つの振動センサーの地盤振動レベル(gal)の時間的推移を示したものである。途中に一部データの欠測があるが、土石流の増減傾向を一望できる。ピーク流量は6時12分に227m³/sであった。振動レベルは、DATで記録されたデータを再度、AD変換し、30秒単位(30000個)で計測した。数値データは大きいものから、1/3最大、1/10最大の2種類の値を求めたところ、1/10最大は、1/3最大の約1.5倍となった。図-1は、1/10最大の値を、図-2は3つの振動センサーの関係を示したものである。

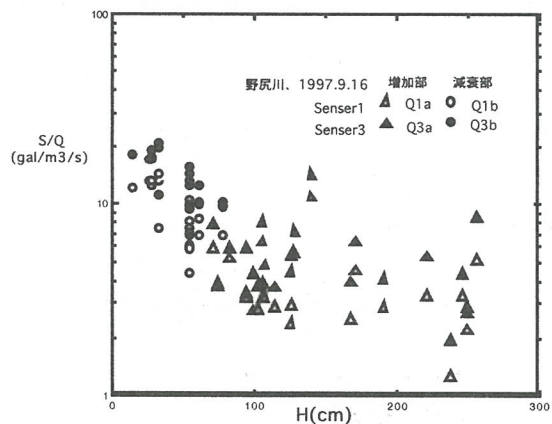


図-8 地盤振動/流量と水深の関係

図-8は、振動レベルと流量の比S/Qを、水深Hに対してプロットしたものである。増水部のS/Q

の値は、ばらついているが、水深 $H=70\text{cm}$ 以上ではほぼ一定とみなせるようである。減水部では、水深 70cm 以下となっている。水深が小さくなるに従って、 S/Q の値は次第に大きくなっていることが分かる。水深が小さくなると、河床の凹凸の影響が大きくなるためであろうか、振動レベルはより大きな値になっている。

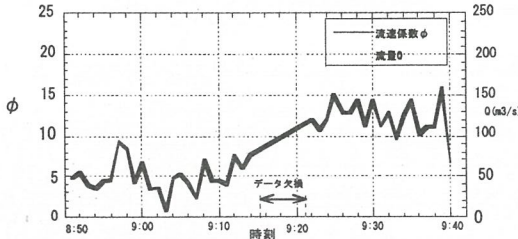


図-9 流速係数 ϕ の時間的推移

(2) 土石流のハイドログラフの推定

卓越するパワースペクトルの振動レベル (Spec) と観測流量 Q の関係式として、 $\text{Spec}=20*\log(Q)-\text{const}$ とおける。しかし、土石流の増水部と減水部を比較した場合、前者の方の振動レベルが高く、定数(const)の物理的意味を吟味する必要がある。図-8で $S/Q=5$ と置き、振動レベルから計算流量を求めた値を、プロットすると、ピーク直前までの増水部では、実測流量と比較的よく一致する。しかし、ピーク付近では、観測流量のばらつきが大きく、減水部では観測流量の約2倍程度の計算値となった。

次に、ニューラルネットを用いて、地盤振動のデータから土石流のハイドログラフの推定を試みた。学習させる際の入力データとして、振動データ $S1, S3$ 、水深 H 、流速係数 $\phi = \text{平均流速} / \text{摩擦速度}$ 、および時間 t を組み合わせた。教師付き学習法であるバックプロパゲーション (誤差逆伝播法) を利用し、教師となるデータとして、観測流量 Q を用いた。

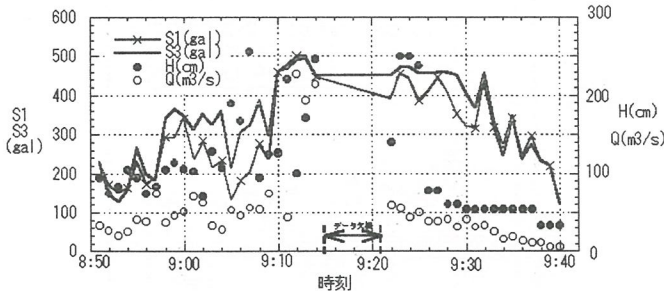


図-10 流量 Q 、水深 H 、振動レベル $S1, S3$ の時間的推移

ニューラルネットでは、各層の値を0から1で与えるので、各データをそれぞれの最大値で除し、入力データとした。

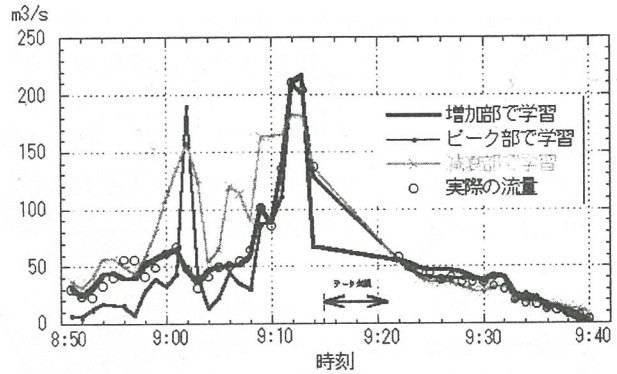


図-11 ニューラルネットによる流量の計算結果と観測値の比較

流量 Q 、センサー1とセンサー3の振動レベル $S1, S3$ 、水深 H の時間的推移を図-10に示す。データは、増加部、ピーク部および減衰部のそれぞれの時間帯で学習させた。データのばらつきを少なくするために移動平均させた所、図-11のように、増加部で学習させた結果が最もよい相関を示した。この観測例では、得られた重みを使用すると、センサー1と3の振動レベルは $S1 \leq 501\text{gal}$ 、 $S3 \leq 496\text{gal}$ 、水深は $H \leq 256\text{cm}$ の領域で、流量推定が可能であった。水深 H の代わりに、流速係数 ϕ を用いた場合も、ハイドログラフの推算を試みた。その結果、 ϕ の値を、増加部とピーク部で最大値の0.3倍、減衰部で0.8を用いると、減衰部を除けば実測流量とよく一致する。減衰部では補正を必要とし、土石流の流動機構が異なるための相違と考えられる。

謝辞：本研究をすすめるに際して、国土交通省大隈工事事務所調査第二課、(財)砂防地すべり技術センター、筑波大学の宮本邦明教授、摂南大学の澤井健二教授より、ご指導、ご支援を頂きました。鹿児島高専の卒業研究生には、多くのご協力をいただいた。ここに厚く謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 奥田節夫：桜島野尻川流域に発生した土石流と地震計記録の対応，昭和51年6月豪雨による鹿児島県の土砂および土石流災害に関する調査研究報告書，121～124，1976、
- 2) 山田孝・南哲行・水野秀明：土石流災害防止のためのセンサー開発の現状と今後の課題，砂防学会誌，Vol.50-5，60～64，1998
- 3) 諏訪浩・山越隆雄・佐藤一幸：地盤計測による土石流の規模推定，砂防学会誌，Vol.52-2，5～13，1999

(2002. 6. 30 受付)