

◆特集：自然災害に対応する危機管理技術◆

振動検知式土石流センサーの検知基準値の設定方法

武澤永純* 田中秀基** 山越隆雄*** 笹原克夫****

1. はじめに

一般に、土石流には石礫が数多く含まれており、中には1mを超えるような巨礫が含まれていることもある。そのような石礫が秒速数m～十数mの速度で流下するため、土石流は周辺地盤に大きな振動を与える。振動検知式土石流センサーはこの地盤振動を捉え、土石流の発生を検知するセンサーである。非接触で土石流を検知するため、繰り返し発生する土石流に対しても対応できる等、従来よく使われているワイヤーセンサーと比べて有利な点が数多くある¹⁾。しかし、土石流と認定するための振動の大きさ（検知基準値）の定め方が決まっていないことが課題である。

土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームは、これまで、振動検知式土石流センサー（以下、振動センサーと呼ぶ）の検知基準値の設定方法に関して研究を実施してきた。本報では、その結果をとりまとめて報告する。

2. 現行の振動センサー設置にあたっての検知基準値の決定方法とその問題点

地盤にはノイズとして微小な振動が常に存在している。振動センサーは地盤の振動を感知することによって土石流の接近を捉えるセンサーであることから、土石流のみを検知するためには、土石流による地盤振動をノイズと区別するための検知基準値が必要である。しかし、検知基準値を決定する方法がこれまで定められてこなかったため、

現状では様々な便宜的な決定方法が使われている。平成15年4月の国土交通省砂防部保全課の調べによると、振動センサーは、全国に112基設置されている。それらの設置事例における検知基準値の決定方法は様々であるが、震度3弱相当の振動強度や、センサー近傍で人がジャンプして検知できる程度という基準で設定されている事例が目立つ。いずれの方法も、実際の土石流による地盤振動の強さを考慮して設定された方法ではないため、土石流が発生した場合に本当に検知できるのか、という点に疑問が残る。

本来であれば、振動センサーを設置する溪流で実際に発生した土石流の地盤振動を計測し、その強度を目安にして検知基準を決めることが理想である。しかし、多くの溪流では度々土石流が発生することはなく、土石流の発生を待って検知基準値を決めていたのでは、いつまでも検知基準値を決めることができないという課題がある。

3. 土石流によって発生する地盤振動強度の推定方法について

2. で示した課題を解決するため、土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームでは既往の観測事例を用いて土石流の地盤振動を推定する手法を検討してきた。以下では、振動センサーが設置されていない溪流で土石流の流量から検知基準値となる地盤振動強度を推定する手法について説明する。

1) 土石流の振動と流量の関係式について

検知対象の土石流流量から地盤振動強度を推定する場合、流量と振動の関係を示さなければなら

The Determination Method of Detection Threshold of Debris-Flow Vibration Sensor

ない。ここで、日本国内において土石流による地盤振動と流量が計測された事例を用いて、その関係式の導出を検討した。

図-1は、富士山大沢において2000年11月20日に土石流が発生した際に建設省中部地方建設局富士砂防工事事務所（現 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所）が計測した地盤振動波形とハイドログラフである。なお、ここに示す振動波形は、1秒間の最大振動振幅の絶対値をつないだものである。

この図によると、土石流による地盤振動は、土石流の流量に応じて増減していることが分かる。

既往の文献によれば、焼岳上々堀沢²⁾、桜島野尻川³⁾においても土石流による地盤振動が計測されている。図-1に示した富士山大沢のデータとともに、データの主な諸元を表-1にまとめて示す。12～66mの距離を離して設置されたセンサーによって、ピーク流量83～1423m³/sの土石流による最大速度値として、5～91mkineという値が計測されていることが分かる。

図-1にも示した通り、土石流による地盤振動強度は、土石流の流量と正の相関関係が認められる。諏訪ほか(1999)は、土石流によって生じる地盤振動は、流量の3/2乗に比例することを示した⁴⁾。

$$P = CQ^{3/2} \quad (1)$$

ここで、P：土石流による地盤振動の強度、Q：土石流の流量、C：比例係数である。

2) 比例定数Cの決定

ここで、表-1に示した全データからこの比例係数Cを求め、想定される土石流の流量から設置する振動センサーで検知される地盤振動強度を推定する式を作ることにした。そのため、表-1に示した事例における土石流のピーク流量(Q)と地盤振動強度(P)の関係図を作成することとした。ただし、表-1に示した事例では、センサー

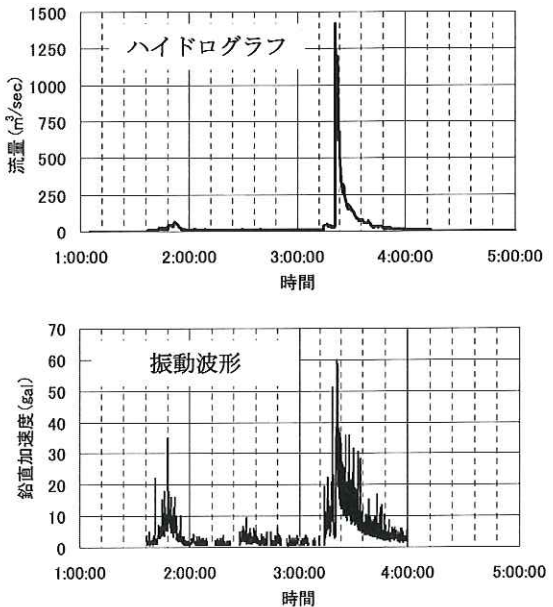


図-1 2000年11月20日に計測された土石流のハイドログラフと地盤振動波形

表-1 土石流による地盤振動計測事例

溪流名	計測日時	設置距離 (m)	最大速度値 (mkine)	土石流ピーク流量 (m ³ /s)	備考
富士山大沢川	2000/11/20 1:50頃	25	14.5	83	
富士山大沢川	2000/11/20 3:20頃	25	91	1423	
焼岳上々堀沢	1997/7/17	12	5	130	出典 参考文献2)
桜島野尻川	1997/9/16	66	65	641	出典 参考文献3)

の設置距離が溪流毎に異なるので、そのまま同じQ-Pの関係図の上にデータをプロットすることができない。そこで、富士山大沢における設置距離(25m)を標準距離と定め、後述する地盤振動強度の距離減衰の評価方法によって、設置距離が異なる焼岳上々堀沢と桜島野尻川の事例についても、標準距離における地盤振動強度を算定し、富士山大沢のデータとともにQ-P関係図上にプロットした(図-2)。

この図におけるデータのばらつきは大きいですが、式(1)の比例係数を求めたところ、Cを0.003とした時に最もよく適合した。したがって、標準距離(25m)だけ離れた地点で、流量Q(m³/s)の土石流の通過に伴って計測される地盤振動強度を求める式は以下の通りとなった。

$$P_{STD} = 0.003Q^{2/3} \quad (2)$$

ここで、P_{STD}:標準距離(25m)だけ離れた地点で計測される地盤振動強度(mkine)である。

実際には、伝えられる地盤振動の強度は、周辺の地盤の振動伝播特性によっても異なると考えら

れ、厳密にはここで示すように唯一つの関係式から求めることはできない。しかし、土石流による地盤振動強度の一応の目安を得ることが可能であり、現行の振動センサー設置にあたっての検知基準値の決定方法に比べれば合理的かつ実用的であると考ええる。しかし、データの数に限られており信頼性は十分ではない。データをさらに多く収集して回帰式の信頼性を高めることが今後の重要な課題である。

4. 地盤振動強度の距離減衰の評価方法について

4.1 地盤振動強度の距離減衰の評価式について

前述の式(2)によって推定できる土石流による地盤振動強度は、標準距離(25m)に振動センサーを設置した場合に、その溪流で発生する流量(Q)の土石流によってもたらされる地盤振動の強度である。実際に振動センサーを設置する場合、常に標準距離だけ離れた位置にセンサーを据えつけられるわけではないので、式(2)によって求めた標準距離における振動強度(P_{STD})から、実

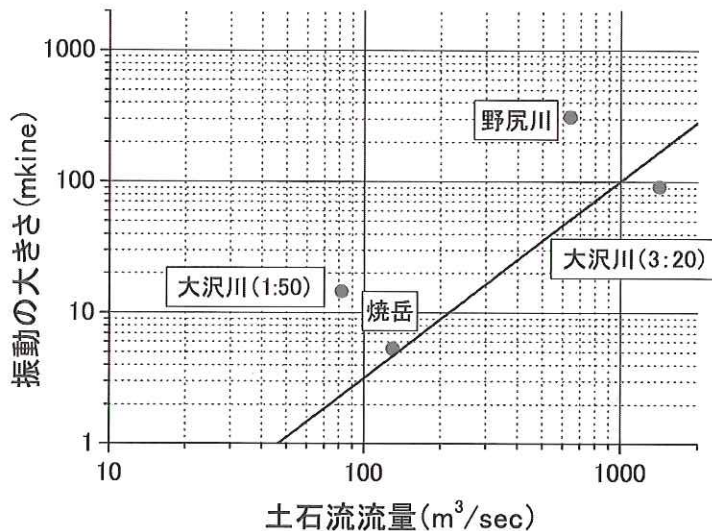


図-2 既往の観測事例から推定した土石流の流量と地盤振動強度の関係(標準距離(25m)における値)

際の設置位置における振動強度 (P) を求める必要がある。

そこで、ここでは一般的に用いられている半無限均質弾性体における振動減衰式 (式 (3)) を用いて距離減衰を評価することとした。

$$P = P' \left(\frac{d}{d'} \right)^{-n} e^{-a(d-d')} \quad (3)$$

ここで、 d, d' : 振動発生源からの距離、 p, p' : 距離 d, d' の位置での振動強度、 n : 幾何減衰係数、 a : 内部減衰係数である。

この式の d' に標準距離 (25m)、 d に実際の設置位置に対応した設置距離、そして、 p' に標準距離における土石流による地盤振動強度 (P_{STD}) を代入し、後述の通り a, n を定めることによって、ある流量 (Q) の土石流が発生した場合に、ある設置距離に設置した振動センサーが感知する地盤振動強度を計算することができる。

4.2 地盤の内部減衰係数 (a) の評価方法について

式 (3) によって地盤振動の距離減衰を評価する場合、幾何減衰係数 (n) と内部減衰係数 (a) を決める必要がある。このうち、幾何減衰係数 (n) は、既往の公害振動の分野における研究事例によれば、近距離 (数十 m 以内) では 0.75 という値が妥当であると言われており⁵⁾、ここでは、その知見を踏襲し、常に 0.75 を用いることとした。

したがって、式 (3) によって地盤振動の距離減衰を計算するためには、評価する上で決める必要のある二つの係数の内、残る内部減衰係数 (a) を求める必要がある。そこで、内部減衰係数 (a) を求める方法の一つとして、これから振動センサーを設置する現地において、地盤振動の距離減衰計測実験を行い内部減衰係数 (a) を求める方法を以下に説明する。

(1) 地盤振動の距離減衰計測実験

地盤振動の距離減衰計測実験は、これから振動センサーを設置しようとする地点から河道の流心

線に直交する測線において実施する。ここで行う実験は、図-3に示すとおり、センサー設置位置から測線上に河道の流心に向かって地盤振動計測器を設置し、河道内においてかけやで叩くなどの方法で地盤に振動を与える。そして計測器によって振動を同時計測することにより、距離による地盤振動の減衰状況を把握するものである。

図-4および図-5に、長野県の焼岳上々堀沢と、鹿児島県の桜島野尻川の、既設振動センサー設置地点近傍で実施した地盤振動の距離減衰計測実験の結果を示す。横軸は、起振地点からの距離であり、縦軸は、計測された振動を電気的に記録した際のセンサー出力電圧値である。この結果から、以下に示す方法によって内部減衰係数 (a) を求めた。

(2) 実験結果から内部減衰係数 (a) の導出

図-4及び図-5に示したような地盤の距離減衰計測結果図中に、式 (3) に示した振動の距離減衰式に基づいた距離減衰曲線を、様々な内部減衰係数 (a) について描き、目視により a の値毎の減衰傾向の適合性を見ることによって、最適な値を決定した (図-6)。図-4及び図-5中にすでに

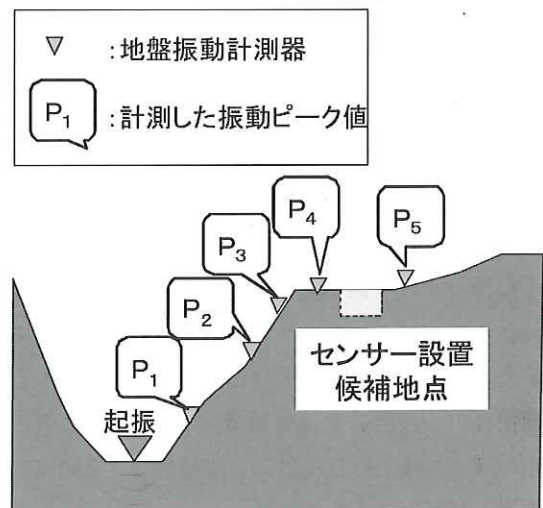


図-3 地盤振動の減衰特性を調査する測線における地盤振動計測器の配置

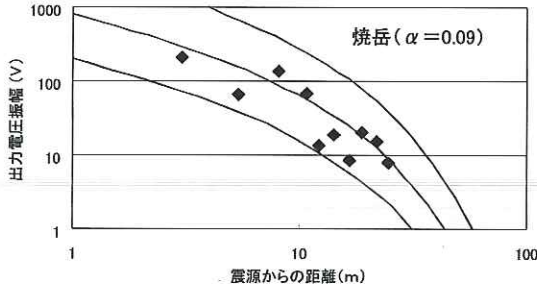


図-4 焼岳・上々堀沢における
振動減衰傾向と内部減衰定数

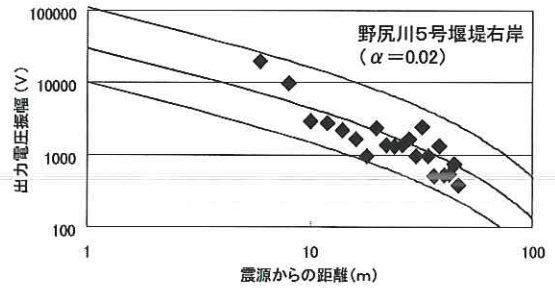


図-5 桜島・野尻川における
振動減衰傾向と内部減衰定数

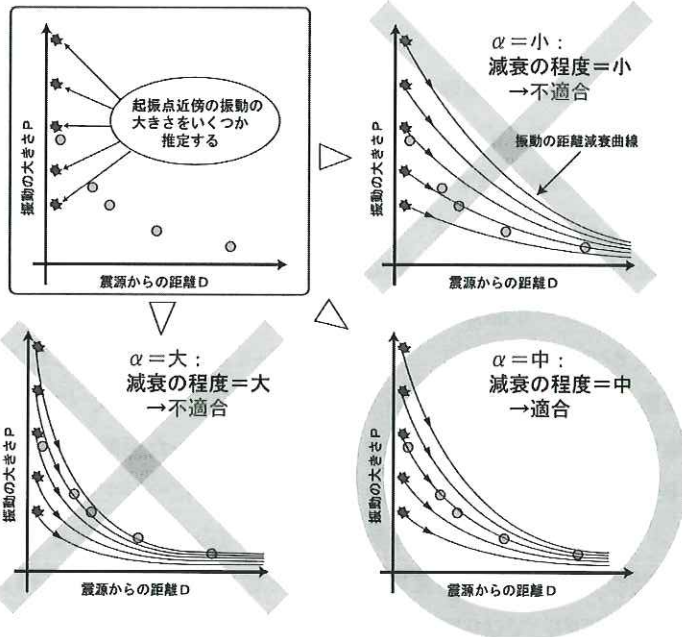


図-6 地盤内部減衰定数の決定手順

描かれている3本の曲線は、それぞれこのようにして決定された内部減衰係数 (α) の最適値に基づいて描かれている。具体的には、式 (3) の p' に、起振点近傍地点 (距離: d') での振動の大きさを数パターン設定し、そのほか、 n には0.75を与えることによって、パターン毎の減衰曲線を描いた。ここで、数パターンの減衰曲線を設定する理由は、一般的に計測値はばらつくため、1本の距離減衰曲線から目視によって最適な α を同定することは難しいためである。

図-4、図-5中に示している通り、焼岳・上々堀沢

と桜島・野尻川においては、それぞれ $\alpha = 0.09$ 、 0.02 という値が最適であるとして得られている。図-2に示した、焼岳上々堀沢と桜島野尻川の標準距離における地盤振動強度は、この α の値をもとに式 (3) によって計算して求めたものである。

5. おわりに

本報では、既往の観測事例を用いて土石流の地盤振動を推定する手法についてこれまで検討してきた結果について報告した。ここで報告した検知基準値の決定方法は、現行の検知基準値の決定方

法に比べれば十分に合理的かつ実用的であると考
えられるが、根拠となるデータ数が少ないため、
今後さらに土石流の振動波形データを集め、信頼
性を高める必要がある。

参考文献

- 1) 南 哲行、山田 孝、水野秀明 (1998) : 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, No.5, pp.60-64
- 2) Suwa, H., Akamatsu, J. and Nagai, Y. (2003) :
Energy radiation by elastic waves from debris
flows, Proceedings 3rd international Debris Flow
Hazard Mitigation Conference, Davos, Switzerland,
pp.895-904.
- 3) 南 哲行、山田 孝、水野秀明、R. G. LaHusen、吉
川知弘、永田謙二 (1998) : 土石流の流下に伴う地
盤振動の減衰特性、平成10年度砂防学会研究発表会
概要集, pp.366-367
- 4) 諏訪 浩、山越隆雄、佐藤一幸 (1999) : 地盤振動
計測による土石流の規模推定、砂防学会誌, Vol.52,
No.2, pp.5-13
- 5) 例えば、塩田正純 (1986) : 公害振動の予測手法、
井上書院, p.237

武澤永純*



独立行政法人土木研究所土
砂管理研究グループ火山・
土石流チーム研究補助員
Nagazumi TAKEZAWA

田中秀基**



(財)砂防フロンティア整備推
進機構(前 独立行政法人土木
研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム主任研究
員)
Hideki TANAKA

山越隆雄***



独立行政法人土木研究所土
砂管理研究グループ火山・土
石流チーム研究員, 博士(農
学)
Dr. Takao YAMAKOSHI

笹原克夫****



高知大学農学部教授, 博士
(農学)(前 独立行政法人土木
研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム上席研究
員)
Dr. Katsuo SASAHARA