

京都大学 防災研究所 ○諏訪 浩・赤松純平
国土交通省 北陸地方整備局 松本砂防工事事務所 長井義樹

土石流が流れ下るとき、雷鳴の轟きあるいはジェット戦闘機が至近距離に飛来するような轟音が響きわたり、地盤が振動する。土石流の運動エネルギーの一部が音波として大気中へ、また弾性波として地盤中へ散逸するからである。したがって、振動センサや音響センサを土石流警報装置に用いたり（山田ほか、1998）、地盤振動をモニターして土石流のピーク流量や体積を推定したりすることができる（諏訪ほか、1999）。音波と弾性波は主として境界摩擦によるエネルギー損失の一部を担い、最終的には熱になる。石礫が多い場合には、大量の巨礫を先頭部へ集めて流れるため、地盤振動はとくに強い。土石流のエネルギー散逸に占める弾性波成分が一体どの程度に達するか気になるところである。

そこで焼岳上々堀沢で発生する土石流について、流量と地盤振動データから、エネルギー損失に占める弾性波成分を評価する。図1から解るように、土石流のハイドログラフと振動強度時間曲線の尖度とともに大きく、しかもピークの出現時刻がおおむね一致することを考慮すると、次のようなモデルで弾性波のエネルギー散逸速度を求めることができる。

すなわち、振動のピーク強度が現れるところに点振動源を仮定し、この振動源が流路内を等速で移動するものとする。観測される弾性波は表面波と実体波が混合したものである。表面波は振動源から、図2に示すような円筒状の波面で伝播するとし、実体波は図3に示すような半球状の波面で伝播すると仮定する。弾性波の距離減衰を評価するのに必要となる位相速度 c と Q 値は、弾性波探査を行って、それぞれ300m/s、 $0.2f$ （ f は周波数）と求めた。表面波の伝播に寄与する地盤厚 h は1/4波長と仮定する。表面波として伝播する弾性波エネルギーの振動源での散逸速度 $E_s(i)$ は、時刻 $t(i)$ に

$$E_s(i) = \int_i^{i+1} \left\{ (\rho \cdot c \cdot v(t))^2 (2\pi \cdot r(i) \cdot h) \cdot e^{\frac{\pi \cdot f \cdot r(i)}{Q(f)c}} \right\} dt$$

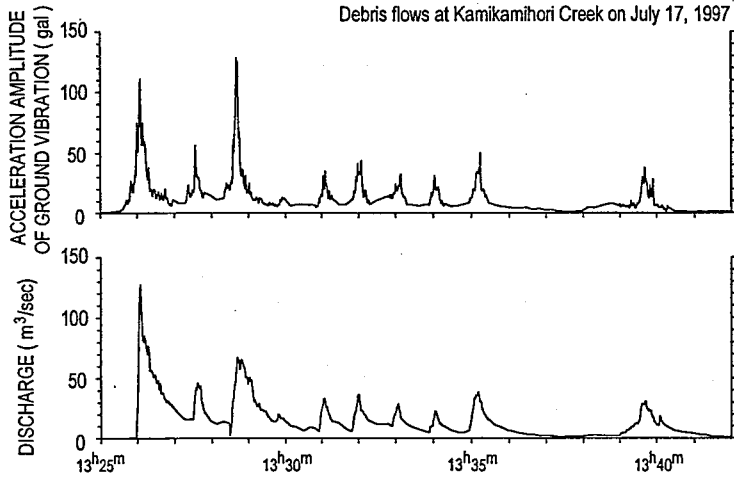
である。ここに、 ρ ：地盤の密度、 $v(t)$ ：振動の速度、 $r(i)$ ：振動源と観測点の間の距離、 f ：周波数である。実体波として伝播する弾性波エネルギーの振動源での散逸速度 $E_b(i)$ は、時刻 $t(i)$ に、観測点における地表面近傍での振動増幅効果を考慮して、

$$E_b(i) = \int_i^{i+1} \left\{ \left(\frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot v(t) \right)^2 \cdot (2\pi \cdot r(i)^2) \cdot e^{\frac{\pi \cdot f \cdot r(i)}{Q(f)c}} \right\} dt$$

となる。観測点近傍の流路縦断傾斜角（ $4.2^\circ \sim 7.4^\circ$ ）と、土石流先頭部の寄与長（20m～80m）を考慮して、土石流のエネルギー損失速度が大きい条件（傾斜角が 7.4° で寄与長が80m）と小さい条件（傾斜角が 4.2° で寄与長が20m）で結果を示すと、表1および表2となる。表面波の場合には、弾性波成分は土石流のエネルギー損失の 10^{-4} 倍～ 10^{-3} 倍のオーダーであり、実体波の場合には $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 倍であることが解る。実際は両者の中間であるので、おおむね 10^{-3} 倍のオーダーであると考えられる。弾性波へのエネルギー変換効率は予想に反しあまり大きくない。

ここに、土石流のエネルギー損失に占める弾性波成分のオーダー評価は出来たが、さらに精確な値を得るには、点振動源モデルによる計算から、振動強度分布型振動源モデルへと拡張することが考えられる。いっぽう、土石流による災害を抑制するためには、その勢いをそぐ、すなわちエネルギー散逸の効率を増大させることが重要だ。この研究の結論が直ちに役立つわけではないが、効率を増大させる方法は多様であるように思われる。なお、土石流のエネルギー損失は、土石流が断熱条件下で流下すると仮定すると、 $0.64^\circ/(-100\text{m})$ の昇温に相当する。これは大気の平均的な高度気温減率にほぼ等しい。

引用文献 1) 山田 孝ほか（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、50(5)、60-64。 2) 諏訪 浩ほか（1999）地盤振動計測による土石流の規模推定、砂防学会誌、52(2)、5-13。



← 図1. 土石流のハイドログラフ (下) と地盤振動加速度の時間曲線 (上)

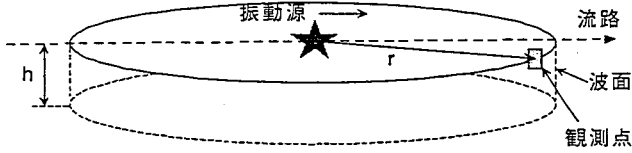
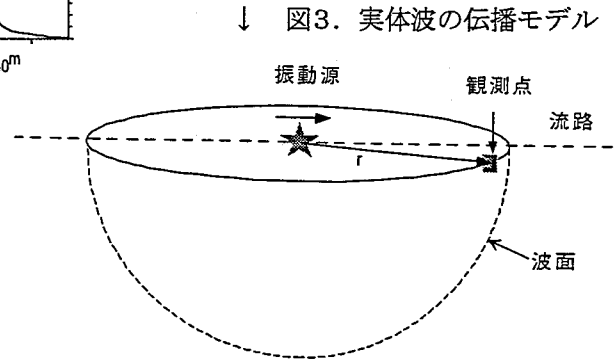


図2. 表面波の伝播モデル



↓ 図3. 実体波の伝播モデル

表1 土石流先頭部のエネルギー散逸(1997年7月17日)

波	流速	ピーク流量	先頭部の体積 (20秒間)	その質量	全エネルギー散逸速度 Et ($\theta=7.4$)	弾性波によるエネルギー散逸の速度 (Ews) (表面波)	Ews/Et (表面波)	弾性波によるエネルギー散逸の速度 (Ewb) (実体波)	Ewb/Et (実体波)
	m/s	m ³ /s	m ³	$\times 10^3$ kg	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^{-3}$	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^{-3}$
第1波	4.2	123.0	1603	2885	15390	8.01	0.52	16.64	1.08
第2波	5.2	46.1	689	1240	8190	2.37	0.29	6.49	0.79
第3波	5.1	67.3	940	1692	12220	9.04	0.74	20.5	1.68
第4波	4.2	33.3	477	859	4570	1.79	0.39	4.14	0.91
第5波	4.1	36.6	492	886	4700	2.04	0.43	4.57	0.97
第6波	4.0	28.7	388	698	3640	1.63	0.45	3.95	1.09
第7波	4.0	22.9	289	520	2690	1.22	0.45	2.86	1.06
第8波	4.1	38.7	559	1006	5370	2.38	0.44	5.72	1.07
第9波	4.0	30.9	511	920	4670	1.63	0.35	3.63	0.78

表2 土石流先頭部のエネルギー散逸(1997年7月17日)

波	流速	ピーク流量	先頭部の体積 (5秒間)	その質量	全エネルギー散逸速度 Et ($\theta=4.2$)	弾性波によるエネルギー散逸の速度 (Ews) (表面波)	Ews/Et (表面波)	弾性波によるエネルギー散逸の速度 (Ewb) (実体波)	Ewb/Et (実体波)
	m/s	m ³ /s	m ³	$\times 10^3$ kg	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^{-3}$	$\times 10^3$ J/s	$\times 10^{-3}$
第1波	4.2	123.0	594	1068	3210	8.01	2.50	16.64	5.18
第2波	5.2	46.1	195	351	1307	2.37	1.81	6.49	4.97
第3波	5.1	67.3	244	439	1604	9.04	5.64	20.5	12.78
第4波	4.2	33.3	122	220	660	1.79	2.71	4.14	6.27
第5波	4.1	36.6	140	252	739	2.04	2.76	4.57	6.18
第6波	4.0	28.7	95	170	488	1.63	3.34	3.95	8.09
第7波	4.0	22.9	74	133	380	1.22	3.21	2.86	7.53
第8波	4.1	38.7	135	242	711	2.38	3.35	5.72	8.05
第9波	4.0	30.9	133	240	687	1.63	2.37	3.63	5.28