山体崩壊等に伴う津波の発生過程に関する実験的研究

Experimental Study on the Mechanism of Tsunami Generation due to Sector Collapses

松原隆之¹・関島正浩²・神田典昭³・今村文彦⁴

Takayuki MATSUBARA, Masahiro SEKIJIMA, Noriaki KANDA and Fumihiko IMAMURA

The mechanism of tsunami generation due to sector collapse modeled with solid and semi-oval objects, beads, and sands was studied by hydraulic experiments. The profiles of mass flow due to the sector collapse flow with several conditions are designed. The thickness, velocity, and apparent density at the point where the mass plunged into the water surface were measured by laser displacement meters on the slope. Wave height and period of tsunami were measured by four wave gages. As a result, we found the two types of the tsunami generation influenced by the apparent density in case of beads and sands. When the density is high, the objects go deep along the slope. When the density is low, the objects stop near plunging point, and generate tsunami like a wave making plate.

1. はじめに

大規模な山体崩壊、岩塊・土石流、火砕流等が海域に突入することによって発生する津波（以下、山体崩壊津波という）は、断層運動によって発生する津波と比べて発生頻度は低いが、歴史的に見てもその規模・被害ともに大きな事例がある。

山体崩壊津波の発生過程に関する研究としては、過去、ブロック型落下モデル、2層流モデルなどの提案がなされている。水理模型実験による実験的研究は、重松・河野（2006）や柿沼ら（2008）のガラスビーズやロック状粒子等の突入による生成波に関する水理実験や、今村ら（2001）のけい砂を突入させる実験、富樫ら（1992）の箱型の滑落物体モデルを突入させる実験がある。上記の研究では、突入物の初期状態と生成波の関連性について評価されているものの、突入物が水塊に突入する瞬間の状態（例えば速度や密度）と関連付けた研究や突入角度30°未満の低角度条件での実験は実施されていない。

本研究では、北海道駒ヶ岳の山体崩壊津波（1640）のような沿岸部が平野で比較的緩勾配斜面で発生する山体

崩壊津波を念頭に山体崩壊津波の発生過程を実験的に解明するため、複数の山体崩壊等の模擬物を突入角度15°で斜路を流下させ、突入物の突入状態を計測しつつ水面に突入させて津波を発生させる水理実験を実施した。

2. 実験装置

本研究では、図-1に示す実験装置を用いた。実験は、可変勾配型のアクリル傾斜路（長さ4m、幅17cm、高さ30cm）が設置された長さ6m、幅20cm、高さ50cmのアクリル製水槽を使用した。計測は、CCDレーザー変位センサ（（株）キーエンス社製）を傾斜路と静水面の交点部（以下、突入部という）と突入部上流側10～25cmの2箇所に設置して突入物の通過厚さを測定した。また、高速容量式波高計（（株）KENEK社製）を4台設置し、水位変動を計測した。また津波の発生過程を汎用デジタルビデオカメラ（30fps）で撮影・記録した。

3. 実験方法

表-1に実験条件を示す。一定水深（ $h=30\text{cm}$ ）で突入角度15°を基本条件として実験を行った。

第1段階（Case1）として、崩壊物をシンプルに模擬し

図-1 実験設備の概略図

表-1 実験条件

	模擬物	形状粒径*1 (mm)	角度 (°)	質量 (kg)	密度*2 (g/cm ³)	速度 (m/s)	水位 (m)
Case1	固体 模型	形状1	15	5.0	大:2.50 小:1.25	大:3.4~3.8 小:2.2~2.7	0.3
		形状2		2.5			
Case2	均一 粒子	6.00	15	5.0	大:2.25 小:1.06	大:5.0 小:3.6~3.8	0.3
Case3	けい砂	0.66	15	5.0	2.60	3.6	0.3
		0.34				3.2	
		0.12				2.9	

※1粒径またはD50 ※2粒子密度または土粒子密度

1	正会員	工修	電源開発(株)技術開発センター	茅ヶ崎 研究所 課長代理
2			電源開発(株)原子力建設部	部長代理
3		工修	電源開発(株)原子力建設部	土木技術管 理グループ 課長代理
4	正会員	工博	東北大学教授	工学研究科付属災害制御 研究センター 津波工学研究分野

た4種類の半楕円形固体模型を突入させ、突入物の速度・固体密度・形状の影響を確認した。形状1は長さ40cm、高さ4cm、幅15cm、形状2は長さ20cm、高さ8cm、幅15cmの塩化ビニル製半楕円形状模型で、模型内の重りの質量を変えて突入物総質量（密度）を調整した。

第2段階（Case2）として、実現象は崩壊物が変形・分離しながら突入して津波が発生するため、密度の異なる均一粒径粒子（ $\phi 6\text{mm}$ ）を突入させた。粒子は樹脂状粒子（BB弾）で2種類の粒子密度の粒子を用い、突入速度、粒子密度の影響を確認した。

第3段階（Case3）では、より実現象に近づけるため土粒子密度が一定で平均粒径が異なる3種類のけい砂を突入させて、粒径の影響を確認した。

なお、本実験では突入角度 15° の低角度条件で所定の速度で突入可能となる装置（図-2）を製作した。半楕円形模型（Case1）は台車方式とし、模型を搭載した台車を滑走させ、気中部で台車を強制停止させて模型のみを滑走・突入させた。突入速度は台車の初期位置を調整して設定した。均一粒子（Case2）およびけい砂（Case3）は、傾斜路（傾斜角 15° ）上に別の傾斜路（傾斜角 45° ）を突入部から上流側15cmの位置で接続させた加速傾斜路を使用し、加速傾斜路上のゲート設置位置を調整して突入速度を調整した。突入速度は、事前に水の無い状態で滑走実験を実施して調整した。2箇所に設置されたCCDレーザー変位センサの計測結果を用い、2点間の距離と2点の変位開始時刻差から突入部での突入速度を算定し、各条件で設定された初期位置に対し3回以上繰返し滑走させて所定の速度になっていることを確認した。

4. 実験結果および考察

(1) 突入物通過厚さと水位変動波形

図-3から図-5に代表ケースの突入部の突入物通過厚さと水位変動計測波形をしめす。なお、実験条件毎に3回

実験した結果、ばらつきも小さく再現性があることを確認した。また、突入物の通過厚さは画像との比較から妥当な数値であることを確認した。

(2) 突入速度と第1波の波高および周期

図-6に突入部近傍と突入部から1.5m位置での突入速度と波高・周期の相関を示す。突入部近傍とは突入部から波高計①の範囲である。波高及び周期はデジタルビデオ画像または波高計計測結果のうち第1波の最高水位・最低水位から波高を求め、ゼロアップクロス法にて周期を求めた。図は各条件3回実験した結果の平均値を示す。

3種類の模擬物はそれぞれ突入速度の増加に伴い波高が増加する傾向となった。また、波の進行に伴い波高は減少し、周期は長くなる傾向となった。なお、固体模型実験 (Case1) では形状1よりも形状2のほうが波高・周期が2倍程度大きくなり、突入物の質量・速度が同程度であっても形状 (厚さ) が異なると生成波の規模が大きく変化することがわかる。

(3) 突入物の密度と第1波の波高および周期

図-7に突入部近傍と突入部から1.5m位置での突入物の密度と波高・周期の相関を示す。図は各条件3回実験した結果の平均値を示す。

固体模型実験 (Case1) およびけい砂実験 (Case3) は密度の増加に伴い、波高は若干増加し、周期は若干低下する傾向となったが、均一粒子実験 (Case2) のうち、突入部近傍では速度が速い条件については、粒子密度が増加すると波高が減少する傾向となった。したがって、均一粒子の突入実験では、粒子密度影響で波の発生過程が変化し、条件によっては粒子密度が小さい条件のほうが波高が大きくなる場合もあることがわかった。

(4) 粒径と第1波の波高および周期

図-8に突入部近傍と突入部から1.5m位置でのけい砂の平均粒径と波高・周期の相関を示す。図は各条件3回実験した結果の平均値を示す。

平均粒径の増加に伴い波高が若干増加する傾向となった。周期はほとんど変化が無い結果となった。ただし、平均粒径の大小関係と突入速度の大小関係が一致していることから、図で確認できる波高の増加傾向は粒径と速度の両方の影響によると考えられる。

(5) 津波の発生状況

写真-1～5に代表ケースの津波発生状況を示す。

固体模型実験 (写真-1および写真-2) では、ほぼ同一の突入条件にもかかわらず、形状2のほうが大きく水塊を上方に跳ね上げながら波が発生しており、突入物の形状は津波の発生過程に大きく影響することがわかる。

均一粒子実験 (写真-3および写真-4) では、粒子密度の変化に伴い、突入時の突入物先端形状が変化していることが分かる。粒子密度2.25g/cm³では粒子が水塊の下に

図-6 突入速度と第1波の波高・周期

図-7 突入密度と第1波の波高・周期

図-8 平均粒径と第1波の波高・周期

潜行して斜面に沿って流下しつつ突入物先端の上方に波の峰を形成しながら津波が発生したのに対し（以下、潜行型発生過程という）、粒子密度 1.06g/cm^3 では粒子が水塊の下に潜行できずに突入部近傍で急停止して壁が立ち上がりながら突入物先端の前方に波の峰を形成して津波が発生した（以下、急停止型発生過程という）。

けい砂実験（写真-5）では、土粒子の密度が一定にもかかわらず、突入直後の先端形状に変化が確認でき、平均粒径（D50） 0.66mm では潜行型発生過程となったが、平均粒径 0.12mm では急停止型発生過程となった。

写真-1 固体模型実験の津波発生状況（速度：大，密度：大）

写真-2 固体模型実験の津波発生状況（速度：大，密度：小）

写真-3 均一粒子実験の津波発生状況（速度：大）

写真-4 均一粒子実験の津波発生状況（速度：小）

写真-5 けい砂実験の津波発生状況

(6) 2つの津波発生過程と突入直前の見かけの密度

均一粒子実験（Case2）では、粒径一定条件で粒子密度の変化に伴い2つの津波発生過程が生じ、けい砂実験（Case3）では、土粒子密度一定条件で平均粒径の変化に伴い2つの津波発生過程が生じた。そこで、各実験における突入物の突入直前の見かけの密度を算定し、2つの津波発生過程との関連性を調べた。

突入直前の見かけの密度はCCDレーザー変位センサで計測された突入部の突入物通過厚さから推定した。突入部での通過速度は一定と仮定し、通過厚さの時間積分値に通過速度を乗じて突入部での見かけの体積を求め、突入質量（5kg）を除すことで見かけの密度を算定した。

$$\rho_{\text{impact}} = m_s \div \sum (v_s \times \eta_s \times B \times \Delta t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに ρ_{impact} ：突入直前の見かけの密度、 m_s ：突入物質量（5,000g）、 v_s ：突入速度（cm/s）、 η_s ：通過厚さ（cm）、 B ：傾斜路幅（17cm）、 Δt ：サンプリングタイム（0.01s）である。

表-2に各実験条件の突入直前の見かけの密度（3回の平均値）と津波発生過程（潜行型・急停止型）を示す。津波発生過程は、各ケース3回の実験画像から判定した。

見かけの密度を算定した結果、見かけの密度が 0.7g/cm^3 を上回る場合に潜行型の発生過程となり、下回る場合に急停止型の発生過程となった。ビデオ画像と合わせて考察すると、見かけの密度が大きい場合（潜行型）、見かけの密度が大きいことにより相対的に突入後の減速の程度が小さく、後続粒子との速度差も小さいため突入物が斜面に沿って潜行しやすいが、水に対して見かけの密度が小さい場合（急停止型）、突入後に急激に減速し、後続粒子との速度差が相対的に大きく、逃げ場を失った後続の突入物が拘束力の小さい鉛直上方へと移動することで壁が形成されるようにして津波が発生すると考えられる。実際には、速度や全質量、突入角度など多くの要因をより総合的に評価する必要があるが、定性的には見かけの密度が低下すると潜行型から急停止型の発生過程

表-2 見かけの密度と津波発生過程

	突入物	粒径 ^{※1} (mm)	密度 ^{※2} (g/cm ³)	速度 (m/s)	見かけ密度 (g/cm ³)	発生過程 ^{※3}
Case2	均一 粒子	6.00	2.25	5.0	0.749	●●●
				3.6	0.938	●●●
			1.06	5.0	0.385	○○○
				3.8	0.424	○○○
Case3	けい砂	0.66	2.60	3.6	1.127	●●●
		0.34		3.2	1.106	●●○
		0.12		2.9	0.652	○○○

※1 粒子径またはD50 ※2 粒子密度または土粒子密度

※3 ●：潜行型，○：急停止型

に移行すると考えられる。

(7) 津波の伝播特性

各突入条件で発生した波の伝播特性を評価するため、突入物の運動エネルギー E_s と発生した第1波の運動エネルギー E_w を比較した。

$$E_s = 1/2 \times m_s \times v_s^2 \div W \quad \cdots \cdots (2)$$

$$E_w = 1/8 \rho g H^2 \times c \times T \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに m_s : 突入物総質量, v_s : 突入速度, W : 水路幅 (0.2m), ρ : 水の密度 (1t/m³), g : 重力加速度 (9.8m/s²), H : 波高 (m), c : 波速 (m/s), T : 周期 (s) である。波高・周期は波高計の水位変動計測結果および画像から算定した。突入部近傍の波速は、突入部からの距離1mと1.5m位置の水位変動計測結果から3.0m位置の波速は、突入部から2.0mと3.0m位置の水位変動計測結果から2箇所の水位変動開始時間差と波高計間隔から求めた波速を用いた。

図-9に各実験ケースの突入エネルギーと波エネルギーの相関を示す。突入部近傍および沖側において突入エネルギーの増加に伴い波のエネルギーが増加しているが、形状2 (図中の■と□) は突入部近傍で形状1 (図中の◆と◇) より発生波のエネルギーが5～6倍となり、均一粒径粒子 (図中の●と○) は突入エネルギーが約300N・mの条件で粒子密度の軽い条件の方が (図中の○) 波エネルギーが大きい。なお、形状2の波エネルギーは突入エネルギーよりも大きい値となっている。これは、波高をビデオ画像から判読した最高水位 (写真-1, 2参照) から算出するため通常の波より波高が大きいことと、ビデオ画像からの周期測定誤差等により結果として波エネルギーが大きくなっている可能性がある。沖側3.0mの位置では突入物の形状や粒子密度の差がほとんど無く線形となった。なお、他の波高計設置位置についても $L=3.0m$ と同程度の

波エネルギーとなった。したがって、波の発生初期段階では突入条件 (形状や密度) の影響が大きいものの、波の進行に伴い突入条件の影響が小さくなり、突入部からある程度沖側では、波のエネルギーと突入物の運動エネルギーが線形な関係になると考えられる。ただし、個々の波の波高・周期は突入条件ごとに異なる。

5. 主な結論

本研究によって得られた主要な知見を以下にまとめる。

- 1) 半楕円形状模型を用いた固体模型実験 (Case1) から、突入物の速度、質量が一定であっても、形状によって発生する波の規模が大きく異なり、津波の発生過程に突入物の突入形状が大きく影響する。
- 2) 2種類の同一粒径粒子を用いた実験 (Case2) から、粒子密度の変化により津波発生過程が変化する (潜行型と急停止型)。また、粒子密度の小さい方が突入部近傍で波高が大きくなる場合がある。
- 3) 土粒子密度一定で平均粒径が異なる3種類のけい砂を用いた実験 (Case3) から、土粒子密度一定条件においても平均粒径の変化により津波発生過程が変化する (潜行型と急停止型)。
- 4) 突入直前の見かけの密度を算定した結果、見かけの密度が低下することによって津波の発生過程が潜行型発生過程から急停止型発生過程に変化しており、見かけの密度変化は固体模型実験の突入物の形状変化と同様な効果があることが分かった。
- 5) 突入物の突入エネルギーと生成波のエネルギーを比較した結果、波の伝播に伴って突入条件の違いによる影響が小さくなり線形な関係となった。

今後は、突入条件 (速度、質量、密度、粒度、角度) や水位条件についてより多くの条件で評価していく必要がある。また、水理模型実験で把握できる定量データには限界があるため、今回得られた定量データをもとに突入物の密度変化の影響を適切にモデル化した数値解析モデルを構築することで津波発生過程をより正確に評価することが出来るものと考えられる。

参 考 文 献

- 今村文彦・後藤大地・鳴原良典・喜多村雄一・松原隆之・高岡一章・伴一彦 (2001) : 土砂突入による津波発生機構に関する基礎検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 321 - 325.
- 柿沼太郎・浅野敏之・中村和夫・劉魯安 (2008) : 地滑りによる津波の生成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 346 - 350.
- 重松孝昌・河野哲也 (2006) : 斜面上を運動する粒子群に誘起される流体運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 136 - 140.
- 富樫宏由・平山康志・谷口祐治・松本慎市 (1992) : 1792年有明海津波の再現性水理実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 221 - 225.

図-9 単位幅当りの突入エネルギーと波エネルギー