

## 海底地すべりによって励起される津波特性の基礎的研究

### Fundamental research on tsunami characteristic generated by submarine landslide

弘津 航太郎<sup>1</sup>, 岩井 裕正<sup>2</sup>, 安井 俊平<sup>3</sup>, 張 鋒<sup>4</sup>

1 名古屋工業大学大学院工学専攻社会工学系プログラム・修士課程1年

2 名古屋工業大学大学院工学専攻社会工学系プログラム・助教・E-mail: iwai.hiromasa@nitech.ac.jp

3 現五洋建設株式会社・E-mail: syunpei.yasui@mail.penta-ocean.co.jp

4 名古屋工業大学大学院工学専攻社会工学系プログラム・教授・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

#### 概 要

海底地すべりによる大規模な地形変化は、地震動を伴わない津波を発生させる危険性が指摘されている。励起される津波規模には土塊の移動速度や移動体積が大きく関わりとされているが、それらを直接計測することは困難である。特に速度や加速度などの運動学的パラメータと津波振幅の関係については未解明な点が多く、海底地すべり運動と励起される津波の経時変化を計測し、その特性を把握する必要がある。そこで本研究では、難透水層を有する水中斜面に過剰間隙水圧が発生することにより生じる海底地すべり運動と励起される水位変動を観測する模型実験を実施した。その結果、津波特性振幅である初期ドロウダウンはすべり初期の加速度と線形関係にあり、その勾配は地すべり土塊の層厚の1乗に比例することを明らかにした。また、クリープ破壊的な挙動を示す地すべり形態においては、加速クリープ段階において津波が増幅されることが示唆された。

キーワード：海底地すべり，津波，初期ドロウダウン，地すべり加速度，過剰間隙水圧

#### 1. はじめに

海底地すべりによる大規模な地形変化は、地震動を伴わない津波、いわゆる「サイレント津波」を発生させることや、地震動による津波を増幅させる危険性が指摘されている<sup>1)</sup>。例えば、1998年7月17日にパプアニューギニアで発生したM7.1の地震では、沿岸部で10mを超える津波が発生した。これは地震の規模に対して想定される津波振幅以上の津波であるため、沖合で地震動によって誘発された海底地すべりが津波規模を増大させた可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で発生した津波は、海底地すべりにより規模が拡大されたことが指摘されている<sup>3)</sup>。地震動のみに起因した津波モデルのシミュレーションでは三陸海岸で記録された遡上高を説明できなかった。しかし、地震によって発生した海底地すべりを津波源に追加したモデルのシミュレーションでは、観測された津波の高周波成分や遡上高を正確に再現することができたとしている。

地すべり土塊の移動速度や移動体積は、励起される津波の規模に大きく関わりとされている<sup>4)</sup>。しかし、海底地すべりは後退地すべりなどの複数の地すべりイベントが生じることもあり、1回の地すべりの体積を試算することは難しい。また、海中で発生することから移動速度を直接計測することは困難である。そのため、既往の研究<sup>5)</sup>ではす

べり土塊の幾何学的パラメータに着目したものが多く、速度などの運動学的パラメータと津波の関係に言及している研究事例は少ない。また、固体の模型を地すべり土塊と仮定して実験を行っている点で、地すべり土塊が変形を伴いながら斜面を滑動する実現象とは振る舞いが異なる。

そこで本研究では、実際の地盤材料を用いた海底地すべり模型実験を実施し、過剰間隙水圧の上昇により発生した地すべり運動とそれに伴う水位変動を観測した。

まず、沿岸部における津波遡上高を決定づけるとされる初期ドロウダウン(初期の水位低下量)<sup>6)</sup>をすべり初期段階における土塊の加速度と関連付けて結果の整理を行った。また、クリープ破壊的な挙動を示す地すべり形態については、特に三次クリープ段階における津波振幅に着目し、地すべり速度の加速と津波規模増大の危険性について検討した。さらに、土塊の初期加速度の発現機構とすべりが三次クリープに至る要因について探るために、すべり進行過程における過剰間隙水圧の変動や噴砂の発生に着目して検討を行い、海底地すべり発生から津波励起及び増幅までの一連のプロセスを整理した。また既往の研究として安井ら<sup>7)</sup>は、模型実験で得られた地すべり形態を、速度時刻歴の観点から、3パターンに大別した。これを参考に、本模型実験で得られた地すべりの運動形態を、そのメカニズムと励起される水位変動を踏まえてより詳細に分類した。

## 2. 地すべり模型実験概要

陸上、海底に共通して、地盤内の間隙圧が様々な要因により上昇することで有効応力が低下し、それに伴いせん断抵抗が低下することが地すべりの主な発生メカニズムである。本研究では水中斜面に難透水層を有する地盤を形成し、過剰間隙水圧を作用させることにより地すべり及び水位変動を発生させる模型実験を実施した。地すべり土塊の速度と変位、地すべりに伴う水位変動は Particle Tracking Velocimetry(PTV)法で計測し、土塊底面に発生した過剰間隙水圧は斜面模型の表面に設置した間隙水圧計によって計測した。

### 2.1 実験装置の概要

実験には図1に示すアクリル土槽を用いた。図2に実験装置全体の概略図を示す。模型土槽の寸法は内寸で長さ1500mm、高さ600mm、奥行398mmであり、土槽内には斜面角度 $10^\circ$ 、水平長さ1000mm、奥行398mmの斜面模型を設置した。斜面模型の中央には幅200mmのポラスフィルターが5箇所設置されている。土槽外部に定水位昇降装置を併設し、任意の水位差を設定することで斜面に設置したポラスフィルターから疑似的に水圧を与えた。なお、ポラスフィルターと繋がるコックの開閉により水圧を与える範囲を制御できるが、本研究では全てのコックを開けて実験を実施した。

斜面模型表面に水圧計を設置し、土塊底面の過剰間隙水圧を測定した。過剰間隙水圧の平面的な分布を把握するため、斜面中央の3箇所と土槽側壁近傍の3箇所の計6箇所に水圧計を設置した。ここで、図2の水圧計のシンボルは、後述する過剰間隙水圧時刻歴のプロットと対応している。

なお、図2に示すように、斜面模型の法尻部は土槽底面より100mm高くなっているため、長さ300mm、高さ100mm、

奥行398mmの水平基礎地盤を設置している。

水中斜面模型上に形成した地盤の表面には法尻から水平距離で約100mm、500mm、700mmの位置に3つの標点を設置し、土槽上方から高速カメラ(cam1)で撮影した。加えて、地すべりの様子を水中からも観察できるように、水中カメラを設置した。

水位変動計測用の標点は穴の開いた直径12.5mmの木製のボールを用いた。このボールにテグスを通し、土槽の両端に固定して水面に浮かべた。土槽の法尻から約100mm-500mmの範囲を高速カメラ(cam2)で撮影し、その中から5点を選択してPTV解析の対象とした。なお、解析時は図3に示した座標を設定し、土塊運動計測用標点(法尻から水平距離で100mm)の直上に位置する標点をP1、上部地すべり土塊の重心位置G(斜面に沿って460mmの位置)上の標点をP5とした。P1とP5の間に等間隔でP2、P3、P4も設定したが、本稿ではP1とP5の結果について詳述する。

### 2.2 模型斜面形成方法

斜面は下部層、難透水層、上部層の3層構成とし、全層

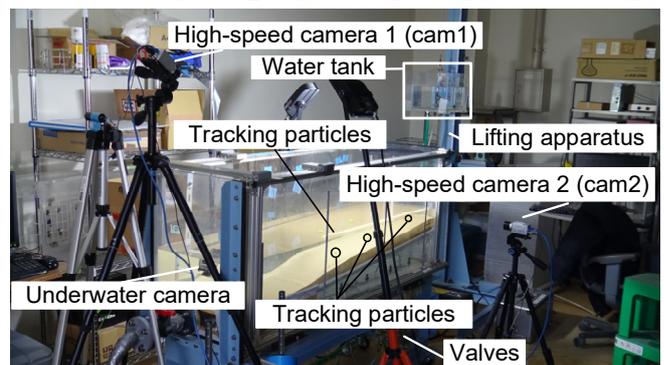


図1 実験土槽外観

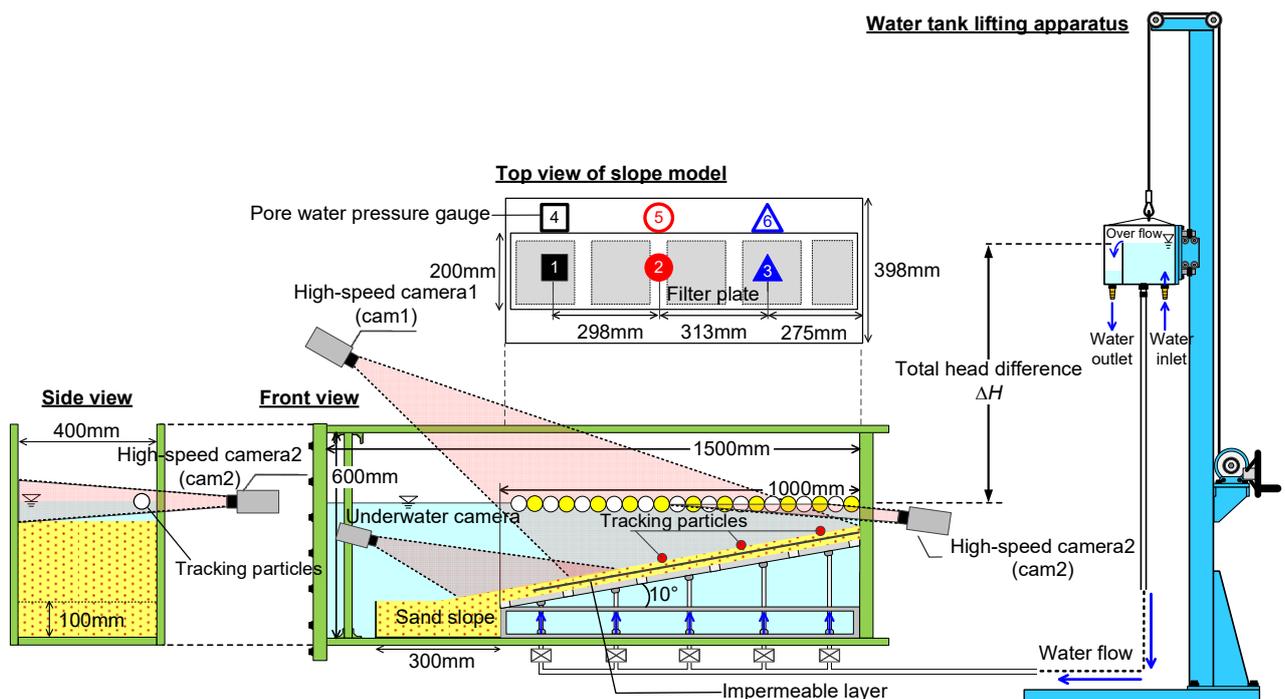


図2 実験装置概略図

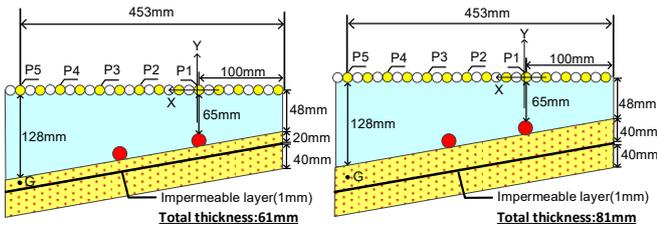


図3 地すべり運動及び水位変動の計測用標点の位置関係

厚は61mmあるいは81mmに設定した。なお、下部層と難透水層の厚さは全ケースで統一し、上部層の厚さのみを変えて全層厚を調整している。

地盤材料は豊浦砂を用いて目標相対密度を40%とし、以下の手順で斜面を形成した。

1. 砂を斜面上に水中落下法で40mm堆積させ、下部層地盤を形成する。
2. 難透水層を模擬した長さ920mm、幅395mm、厚さ1mmのビニールシートを水面から静かに沈め、下部層の上に斜面と平行になるように静置する。その際、ビニールシート両端と土槽側壁の間には2.5mmずつの隙間が生じるが、噴砂発生防止を目的とした締固めなどの処理は特に実施していない。
3. 難透水層の上から砂を再び堆積させ上部層を形成する。目標全層厚61mmのケースでは20mm、目標全層厚81mmのケースでは40mm堆積させた。

ビニールシートは完全に不透水であるため、間隙水の境界はビニールシート両端と土槽の隙間である。

### 2.3 水位差の設定

土槽内の水位と定水位昇降装置の水位差により難透水層下に疑似的に水圧を与えた。砂層の限界動水勾配を考え、式(1)に示す関係式から求めた限界動水勾配時の水位差 $h_c$ を基準として、この値に任意の係数を乗じた値を水位差として設定した。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{h_c}{L} \quad (1)$$

ここで、 $i_c$ は限界動水勾配、 $G_s$ は豊浦砂の土粒子比重、 $e$ は間隙比、 $L$ は斜面の全層厚である。全層厚が61mmのケースでは $h_c = 55\text{mm}$ であり、全層厚81mmのケースでは $h_c = 77\text{mm}$ である。なお、図3に示すように層厚61mm、層厚81mmともに法肩位置での水深が48mmとなるように土槽内の初期水位を設定した。これは、地すべり土塊の初期没水深を等しくすることで、土塊の層厚が津波振幅に及ぼす影響について検討するためである。

### 2.4 模型の縮尺について

本模型実験におけるモデルの縮尺は実規模のおよそ1/10,000~1/5,000を想定している。これは全層厚81mmのケースについて考えると、幅2,000~4,000m、長さ5,000~10,000m、厚さ200~400m、体積 $2.0 \times 10^9 \sim 1.6 \times 10^{10}\text{m}^3$

の地すべり規模を想定していることとなる。Hampton et al.(1996)<sup>8)</sup>がまとめた海底地すべりの体積を例示すると、Grand Banks :  $7.6 \times 10^{10}\text{m}^3$ 、相模湾 :  $7 \times 10^{10}\text{m}^3$ 、Storegga :  $8 \times 10^{11}\text{m}^3$ などがあり、本模型実験における地すべり規模は十分に発生しうる規模だと考えられる。また、1975年4月27日にカナダのKitimat Armで発生した海底地すべりの滑落崖は、幅約2km、長さ約6kmであり<sup>9)</sup>、実験想定スケールとおおよそ一致している。

### 2.5 実験条件

1.で述べた通り、海底地すべりの移動速度や移動体積は励起される津波規模に大きく関わるとされている。そのため、本模型実験は各ケースで水位差とすべり土塊の層厚を設定した。本模型実験において、設定水位差が大きいほど斜面への水の流入量は大きいため、地すべり土塊に働く摩擦抵抗力は小さくなり、地すべり速度は大きくなると考えられる。津波増幅の危険性が高いすべり形態を重点的に検討するために、設定水位差が大きいケースを中心に実験を実施した。また、地すべり土塊の層厚は、全層厚61mm、81mmのケースで、それぞれ20mm、40mmとして2通り設定し、地すべり土塊の層厚が津波振幅に及ぼす影響について考察する。

### 3. 模型実験結果及び津波振幅に関する考察

本研究では、全層厚、水位差の条件をケース毎に設定したため、ケース名はCase-(全層厚)-(設定水位差)-(実施回数)と表した。例えば、Case-61-12hc-1の場合、全層厚61mmの斜面において、土槽内の水位と定水位昇降装置の水位に12hc mmの水位差をつけることにより水圧を与えた、1回目のケースであることを示している。

模型実験において高速度カメラで撮影した地すべり運動と水位変動の画像を図4に示した。ここで、図4には代表ケースとしてCase-61-12hc-3を用いた。実施した全てのケースにおいて、図4のcam1で示したように斜面下方向に難透水層と上部土塊が一体となり剛体的に平行移動する、直線すべりが発生した。また、すべり発生後には滑落ドメイン(Headwall domain)<sup>4)</sup>が形成され、実際の海底地すべり跡で見られるような地形的特徴が確認された。なお、図4のcam2においては、画像では観測しがたいが、0.5mm程度の水位変動が発生している。

また、図5(a)にはCase-61-12hc-3の地すべり変位・速度及び水位変動の時刻歴、図5(b)には、図5(a)の10~13秒を拡大したグラフを示した。図5(a)、図5(b)より、すべり開始時の加速に伴い、12.16秒で初期ドローダウンが発生していることが確認できる。P1の初期ドローダウンは0.37mmであるのに対し、P5の初期ドローダウンは0.19mmである。P1の方が、没水深が小さいため、初期ドローダウンは大きくなっていると考えられる。

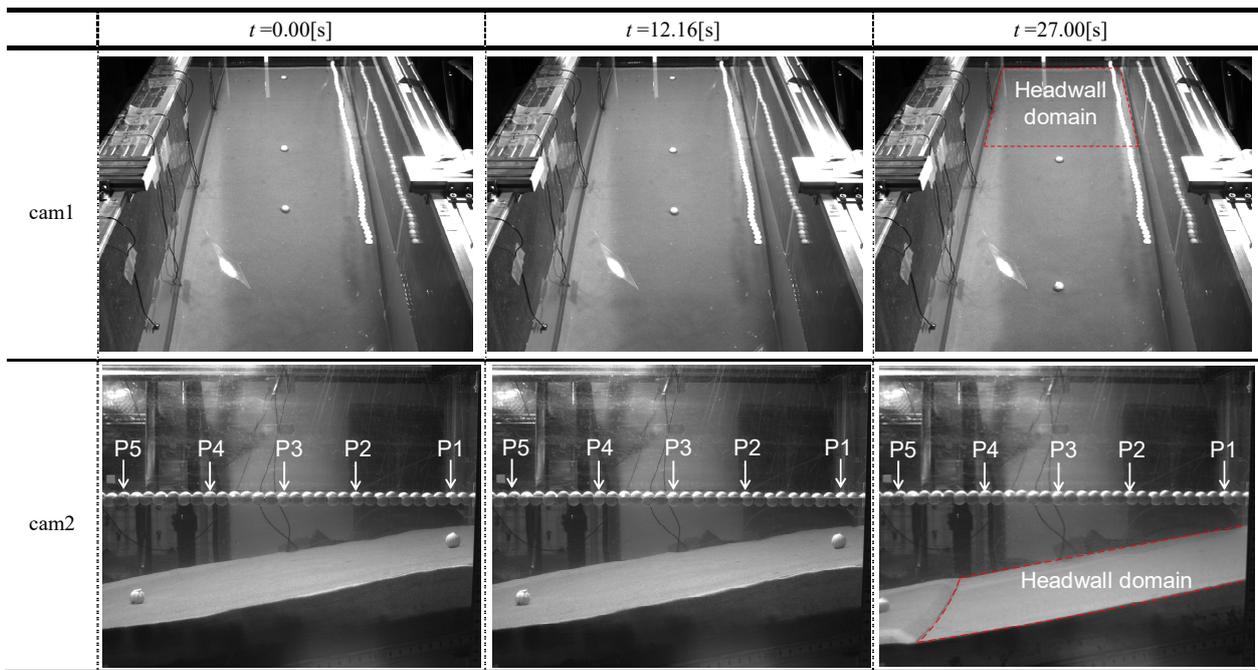


図4 高速度カメラで撮影した地すべり運動と水位変動の画像 (Case-61-12hc-3)

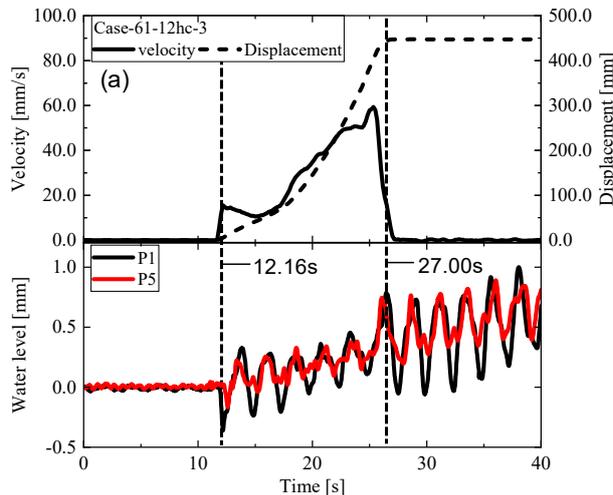


図5(a) Case-61-12hc-3の地すべり運動と水位変動の関係

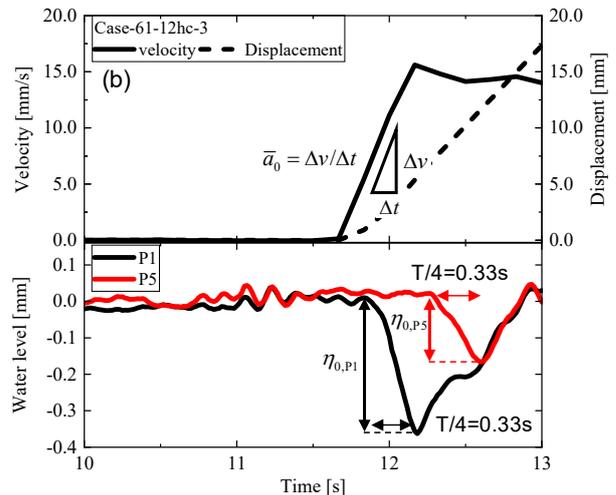


図5(b) Case-61-12hc-3のすべり出し直後の拡大図

また図5(b)より、P5の初期ドローダウンは、12.60秒で観測されており、P1と位相がずれていることが確認できる。そこで、P1側で発生した津波が伝播してP5で観測されていると考え、P1-P5間の距離と谷が観測された時刻から波速 $c$ を算出すると、 $c = 732.1\text{mm/s}$ となった。また、初期ドローダウンまでの時間を4倍することにより周期 $T$ を算出したところ、 $T = 1.3\text{s}$ となった。次にこれらの実験値から波長 $\lambda = cT$ を算出すると、 $\lambda = 976.2\text{mm}$ となった。ここでP1の水深は $d = 65\text{mm}$ であるため、相対水深は $1/25 \leq d/\lambda \leq 1/2$ となり、本研究で観測された波が浅水波であることがわかる。本実験では水面が静止状態から波が励起されており、Kelvinの循環定理より渦度0であるので、水面波についてポテンシャル流理論が近似的に適用可能であると考えられる。さらに、波高 $H$ は $\eta_{0,P1}$ を2倍して $H = 0.74\text{mm}$ であるため、 $H/\lambda \ll 1$ であることを考慮して、微小振幅波と仮定する。以上の仮定より、式(2)に示す分散関係式より収束計算を行う。

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (2)$$

ここで、 $c$ : 波速、 $g$ : 重力加速度、 $\lambda$ : 波長、 $d$ : 水深である。式(2)より収束計算を行った結果、波速は $c = 785.5\text{mm/s}$ に収束し、P1およびP5の位相差から算出した波速と概ね同様の値となった。また、波長は $\lambda = 1041.7\text{mm}$ に収束し、P1およびP5の位相差から算出した波速と初期ドローダウンまでの時間を4倍することにより得られた周期から算出した波長と概ね同様の値となった。

図5(a)の下のグラフでは時間経過とともに水位が上昇しているが、これは水圧を与えるために斜面底部より水を供給しているためである。また、27.00秒以降、約450mmの変位が生じたところで波が大きく増幅しているのは、模型土槽の長さが1500mmであるため、約450mmのすべり変位が生じると、地すべり土塊は基礎地盤を通過して模型土槽の端部まで到達し壁面と衝突したためである。

Case-61-12hc-3と同様にその他のケースについても地す

表 1 実験結果一覧

ケース名	初期ピーク速度	平均初期加速度	初期ドロー ダウン(P1)	初期ドロー ダウン(P5)	過剰間隙水 圧比の差	最大速度	噴砂
	$v_{peak}$ [mm/s]	$\bar{a}_0$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$\eta_{0,P1}$ [mm]	$\eta_{0,P5}$ [mm]	$\Delta u^w / \sigma'$	$v_{max}$ [mm/s]	
Case-61-4hc-4	1.83	2.18	0.04	0.04	0.62	1.83	発生
Case-61-8hc-3	14.15	21.28	0.32	0.19	0.51	69.61	—
Case-61-12hc-1	6.93	10.43	0.16	0.12	0.45	40.59	—
Case-61-12hc-2	4.76	1.68	—	—	0.74	70.67	—
Case-61-12hc-3	15.61	30.97	0.37	0.19	0.45	59.32	—
Case-81-6hc-2	1.46	2.93	0.07	0.05	0.68	1.88	発生
Case-81-8hc-3	1.37	2.04	0.04	0.04	0.71	98.95	—
Case-81-10hc-3	7.36	11.11	0.42	0.21	0.45	7.36	発生
Case-81-12hc-2	9.37	18.64	0.39	0.24	0.48	100.92	発生
Case-81-16hc-1	3.34	6.70	0.16	0.11	0.57	16.88	発生
Case-81-16hc-3	14.50	21.75	0.54	0.26	0.42	32.04	—

べり開始と同時に初期ドローダウンが観測されたため、表 1 に実験結果をまとめたもの示す。表 1 には、すべり開始直後の最大速度である初期ピーク速度  $v_{peak}$ 、初期ピーク速度に至るまでの平均初期加速度  $\bar{a}_0$ 、P1 及び P5 ですべり開始時に記録された初期ドローダウン  $\eta_{0,P1}$  及び  $\eta_{0,P5}$ 、過剰間隙水圧比の差  $\Delta u^w / \sigma'$  (4.1 で詳述)、最大速度  $v_{max}$ 、すべり過程における噴砂発生の有無を示した。

### 3.1 初期加速度と初期ドローダウン

表 1 に示したように実施した 11 ケースの内 10 ケースで初期ドローダウンが確認された。しかし、Case-61-12hc-2 では明瞭な初期ドローダウンが確認されなかった。このケースにおいて、初期ピーク速度は 4.76mm/s であり顕著に小さいとはいえないが、平均初期加速度は 1.68mm/s<sup>2</sup> で最小であり、比較的緩やかにすべり出している。そこで、初期ドローダウンの大きさに対しては、初期速度ではなく初期加速度が支配的な要因であることが考えられる。

表 1 より、例えば Case-61-12hc-1、Case-61-12hc-3 において、それぞれの平均初期加速度が 10.43mm/s<sup>2</sup>、30.97mm/s<sup>2</sup> に対して、法肩から水平距離 100mm に位置する標点 P1 で観測された初期ドローダウンの大きさは 0.16mm、0.37mm である。従って、初期加速度が大きいほど初期水位変動量も大きくなっている。すべり土塊の重心位置の直上に位置する標点 P5 については、P1 と比較すると、同じ初期加速度に対する水位変動量は小さいものの、同様の傾向が見られた。そのため、全ケースについて平均初期加速度と初期ドローダウンの関係を計測位置 (P1, P5) 及び全層厚別にプロットし、得られた近似直線を図 6 に示す。平均初期加速度が 0 ならば水位変動は発生しないため、近似直線の切片は原点に固定している。得られた近似直線の決定係数は P1 について、全層厚 61mm の場合 0.99、81mm の場合 0.98 となった。また、P5 については、全層厚 61mm の場合 0.97、全層厚 81mm の場合 0.97 となった。従って、全層厚及び計測位置の没水深に関係なく平均初期加速度

と初期ドローダウンに相関関係があることが分かった。

さらに、すべり土塊の層厚と得られた近似直線の勾配に着目する。図 6 の P1 の近似直線において、全層厚 61mm、81mm の勾配はそれぞれ 0.013、0.025 である。ここで、2. で述べたように、全層厚 61mm、81mm のケースにおける地すべり土塊層厚はそれぞれ、20mm、40mm であるため、地すべり土塊の層厚が 2 倍になると直線の勾配も約 2 倍となっている。また、P5 の近似直線でも同様のことが確認された。

ここで、津波振幅予測式である Watts 式<sup>6)</sup>を式(3)に示す。

$$\eta_{0,2D} = \frac{u_r^2}{a_0} (0.0574 - 0.0431 \sin \theta) \left( \frac{T}{b} \right) \left( \frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} (1 - e^{-2.2(\gamma-1)}) \quad (3)$$

上式において、 $\eta_{0,2D}$  : 津波特性振幅、 $u_r$  : 終端速度、 $a_0$  : 初期加速度、 $\theta$  : 斜面傾斜、 $T$  : 土塊の層厚、 $b$  : 土塊の長さ、 $d$  : 初期没水深、 $\gamma$  : 土塊の比密度である。式(3)より、津波規模は地すべり土塊の層厚  $T$  に線形比例することが示されており、得られた実験結果との整合性が確認された。

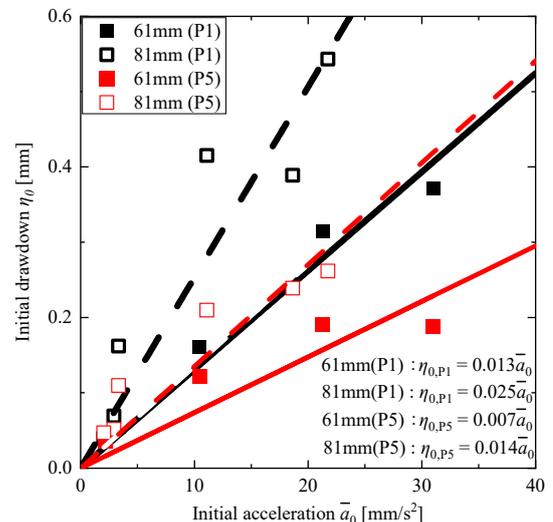


図 6 平均初期加速度－初期ドローダウン

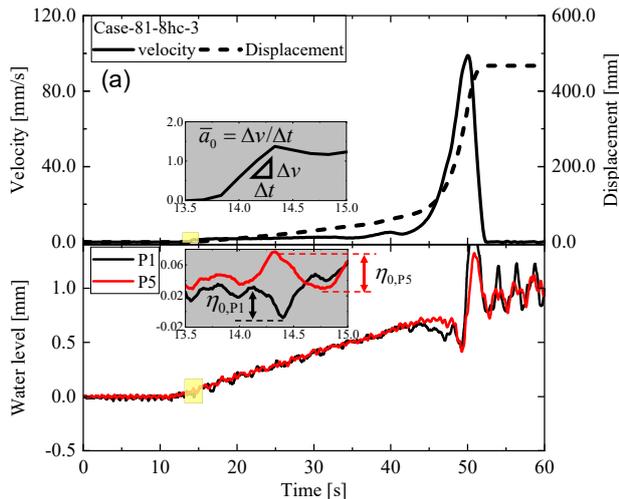


図 7(a) Case-81-8hc-3 の地すべり運動と水位変動の関係

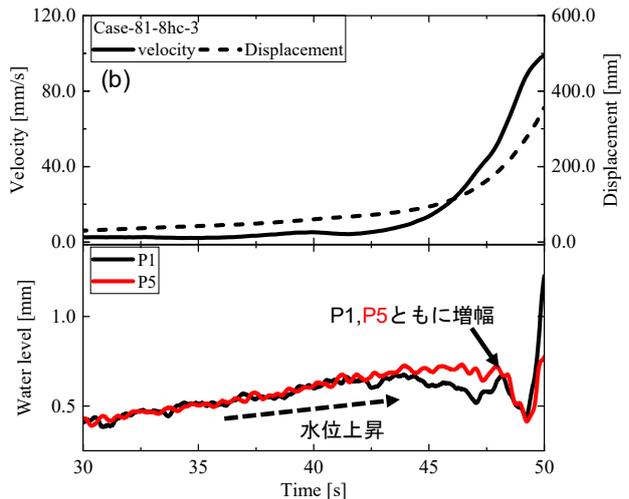


図 7(b) Case-81-8hc-3 のすべり後期の拡大図

### 3.2 三次クリープ時の津波振幅増加

3.1 ではすべり出し直後の平均初期加速度と初期ドロウダウンの相関関係について述べた。本節では、すべり後期で見られた津波振幅に着目する。

図 7(a)には Case-81-8hc-3 の地すべり変位・速度及び水位変動の時刻歴、図 7(b)には、図 7(a)の 30~50 秒を拡大したグラフを示した。なお、図 7(a)には、すべり出し直後の速度時刻歴と水位変動の拡大図も併せて示した。平均初期加速度は  $2.04\text{mm/s}^2$ 、P1 及び P5 の初期ドロウダウンはともに  $0.04\text{mm}$  で、いずれも層厚  $81\text{mm}$  のケースの中では最も小さい。初期ドロウダウン発生以降、P1 は約  $42.5$  秒、P5 は約  $48$  秒まで、水の流入により水位が上昇している。しかしその後、それぞれ水位が大きく減少しており、ドロウダウンが発生している。このとき土塊は三次クリープ段階であり速度が指数関数的に増加していることから、大きな加速度が生じている。すべり初期のみでなく、クリープ段階においても土塊の加速度によりドロウダウンが生じる可能性が示された。従来の海底地すべりに伴う津波においては、すべり初期の運動が中心に議論されてきた<sup>9)</sup>が、たとえ初期の加速が緩やかであっても、三次クリープに至るような海底地すべり挙動では、すべり後期の加速段階においてもさらに波が増幅される可能性が示された。

ここで、図 5(a), (b)に示した Case-61-12hc-3 も三次クリープに至っているが、これらはすべり初期に発生した波の影響が大きく、加速段階における引き波は顕在化しなかったと考えられる。

## 4. 模型実験結果及び土塊の運動に関する考察

3.では、すべり出し直後と三次クリープ段階、つまり地すべり土塊に大きな加速度が生じたときに波が発生・増幅していることが示された。したがって、地すべり土塊に大きな加速度が生じる要因についてより詳細に検討する。

図 8、図 9 に、Case-81-12hc-2、Case-81-10hc-3 の速度・変位・過剰間隙水圧の時刻歴を示した。なお、図 8 にはすべり出し直後の速度時刻歴の拡大図も併せて示した。図 8 の速度時刻歴に着目すると、およそ  $12$  秒に  $9.37\text{mm/s}$  の初

期ピーク速度が観測された後に急減速し、速度一定の定常状態となっている。ここで、定常状態における速度の平均値は  $2.31\text{mm/s}$  であった。その後、 $26$  秒付近から三次クリープに至っている。次に、図 9 の速度時刻歴に着目すると、およそ  $22$  秒に  $7.36\text{mm/s}$  の初期ピーク速度が観測された後に急減速し、速度一定の定常状態となっている。ここで、定常状態における速度の平均値は  $1.39\text{mm/s}$  であった。その後、速度は緩やかに  $0.0\text{mm/s}$  まで収束している。これらの 2 ケースを比較すると、定常状態までの初期速度および定常状態における速度の大きさや、速度時刻歴の概形は類似している。しかし、Case-81-12hc-2 は定常状態後にすべり速度が発散しているのに対し、Case-81-10hc-3 ではすべり速度が収束している。このことは地すべり運動の分岐現象と捉えることができ、すべりの形態は発生直後の速度のみでなく、進行過程における過剰間隙水圧の変動などの様々な要因によって左右されると考えられる。以上より、すべり出し直後の速度の発現と最終的な速度の収束あるいは発散には異なるメカニズムがあり、それらを別々に検討する必要があることが分かった。そこで本研究では、すべりの進行過程について、すべり出し直後を「初期」、速度一定の定常状態を「中期」、定常状態後の速度が発散あるいは収束する段階を「後期」と定義し、特に初期と後期において大きな加速度が生じる要因を別々に検討する。さらに、既往の研究を参考に、本模型実験で確認された地すべり運動形態を、発生した振幅とともに整理する。

### 4.1 すべり初期

地すべり土塊の初期段階における運動について検討する。表 1 に示したように、Case-81-16hc-1 と Case-81-16hc-3 は水位差と全層厚が同条件であるが、平均初期加速度の大きさに差が見られた。そこで、初期ピーク速度が観測された時刻において図 2 に示した斜面底面の 6 箇所計測した過剰間隙水圧の値に着目し、式(4)に示した式を用いて考察を行う。

$$\Delta u^w / \sigma' = (u_{\max}^w - u_{\min}^w) / \sigma' \quad (4)$$

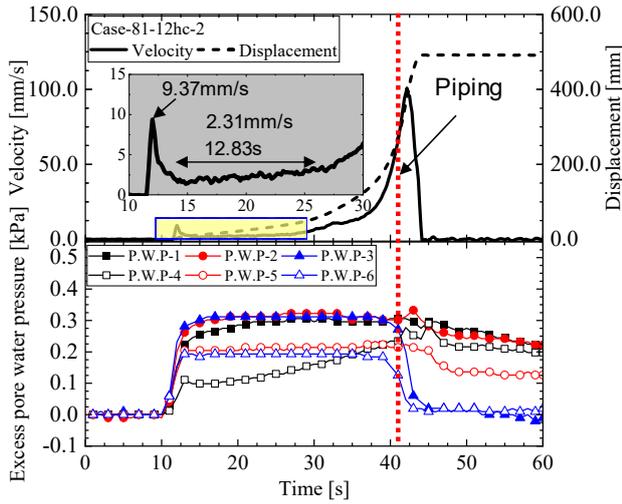


図8 Case-81-12hc-2の速度・変位・過剰間隙水圧の時刻歴

ここで、 $\Delta u^w / \sigma'$  : 過剰間隙水圧比の差,  $u_{max}^w$  : 初期ピーク速度が観測された時刻での水圧計 1~6 の最大値,  $u_{min}^w$  : 同時刻での水圧計の最小値,  $\sigma'$  : 各層厚における上部層の有効上載圧である。

過剰間隙水圧比の差を横軸に、平均初期加速度を縦軸にとったグラフを図 10 に示した。黒のプロットは全層厚 61mm, 赤のプロットは全層厚 81mm のケースの結果を示している。ここで、×でプロットしたものは斜面形成時に微小なすべりが生じてしまったケースを示しており、区別のためシンボルを変えている。図 10 より、過剰間隙水圧比の差が小さいほど、平均初期加速度が大きいことがわかる。すなわち、斜面全体に過剰間隙水圧が均等に分布することにより平均初期加速度が大きくなると考えられる。

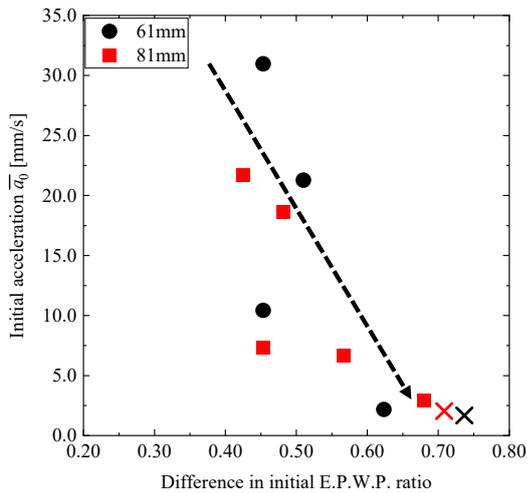


図 10 速過剰間隙水圧比の差と平均初期加速度の関係

#### 4.2 すべり後期

前述のように、図 8 及び図 9 に示すケースでは、初期速度と定常状態における速度が類似しているが、定常状態後にすべり形態の分岐が生じている。この分岐現象の要因について、Case81-10hc-3 では 45 秒で法肩付近の難透水層底部から噴砂が発生し、斜面中央の水圧計 1~3 の過剰間隙水

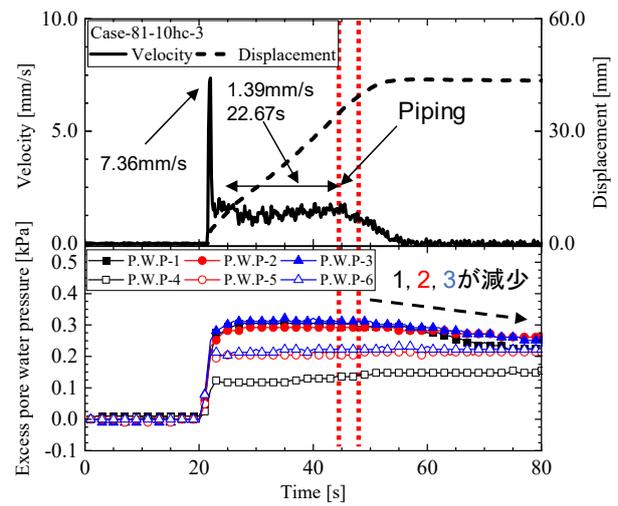


図 9 Case-81-10hc-3 の速度・変位・過剰間隙水圧の時刻歴

圧とすべり速度が減少している。一方、Case-81-12hc-2 では、定常状態においては噴砂が発生していなかった。以上より、定常状態で噴砂が発生することで難透水層下の被圧状態が低減され、せん断抵抗が増加することですべりが停止すると考えられる。

#### 4.3 地すべり運動形態及び津波振幅のまとめ

3.では、すべり初期と後期における波の発生・増幅と土塊の加速度の関係に着目し、その関係を整理した。さらに、4.ではこれまでに、すべり初期と後期における加速度の発現機構を明らかにしてきた。まず、4.1 では斜面全体に過剰間隙水圧が均等に作用することで平均初期加速度が大きくなることを示した。次に、4.2 ではすべり後期で速度が収束、あるいは発散する要因は定常状態における難透水層下の被圧状態の低減、あるいは継続であることを述べた。

以上より、既往の研究<sup>7)</sup>を参考に、本模型実験で得られた地すべり運動形態について、発生した波を踏まえて分類を行い、表 2 にまとめた。従来の形態分類のパターン②とパターン③はそれぞれ 2 つのタイプに細分化した。各パターンの特徴は表 2 に示すとおりである。

#### 5. 結論

本研究では、海底地すべり運動と励起される津波特性を把握するために模型実験を実施した。振幅を増大させる要因として地すべり土塊の加速度に着目し、その関係を整理したことに加え、地すべり土塊に大きな加速度が発生するメカニズムについても検討した。さらに、既往の研究を参考に、本模型実験で確認された地すべり運動形態を、発生する振幅とともに分類した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) すべりの初期加速度とすべり初期の水位低下量である初期ドロウダウンは線形関係にあり、その勾配はすべり土塊の層厚に比例する。
- (2) クリープ破壊に至るすべり形態では、すべり初期のみでなく三次クリープ段階においても津波振幅が増大することが示された。

表2 すべりの運動形態の分類と発生する波の特徴

	パターン①	パターン②	パターン③
地すべり形態	初期ピーク速度が観測された後、定常状態を経ずに直ちに速度が 0.0mm/s まで減少する。再び速度が増加に転じ、速度ピークが現れる場合もある。	一定時間すべりが継続するが、定常状態において被圧状態が低減され、その後速度が収束する。	定常状態において被圧状態が継続し、大規模なすべりへ進展するクリープ破壊的な特徴を持つ。
津波	すべり出し直後の加速度が大きいほど大きな初期ドロウダウンが生じる。	すべり出し直後の加速度が大きいほど大きな初期ドロウダウンが生じ、その後波は減衰する。	すべり出し直後および三次クリープの加速段階で大きな加速度が生じ、津波振幅が増幅する。

- (3) すべり初期において斜面面全体に過剰間隙水圧が均等に作用することにより、初期加速度が大きくなる。
- (4) 定常状態における被圧状態の低減あるいは継続によって、すべり速度の収束あるいは発散が左右される。
- (5) 模型実験により観察された地すべりの形態は 3 パターンに大別され、すべり出し直後や加速クリープのように大きな加速度が生じる時に振幅が大きくなる事が示された。

最後に、今後の課題を挙げる。本稿で初期加速度と初期ドロウダウンの相関関係を示したように、三次クリープ段階の加速度とその時に発生するドロウダウンについて定量的に評価し、その関係を調べる必要があると考えられる。また、本稿では地すべり土塊の初期没水深を統一することにより、地すべり土塊の層厚が初期ドロウダウンに及ぼす影響が明らかになった。そこで今後は、地すべり土塊の層厚を統一し、初期没水深が初期ドロウダウンに及ぼす影響についても検討する。さらに、本研究で得られた初期ドロウダウンの実験値と Watts 式などの理論値との比較を行い、その整合性についても検討していく。

参考文献

- 1) 池原研：講座 すべりに伴う物質の移動と変形 No.5 海底地すべり，日本地すべり学会誌，Vol.41，No.5，pp.112-116，2005.
- 2) 平石哲也，柴木秀之，原崎恵太郎，原信彦，三嶋宣明：地震断層と海底地滑りを考慮した 1998 年パプアニューギニア地震津波の日本沿岸への適用，海岸工学論文集，Vol.47，pp.341-345，2000.
- 3) Tappin, D.R., Grilli, S.T., Harris, J.C., Geller, R.J., Masterlark, T., Kirby, J.T., Shi, F., Ma, G., Thingbaijam, K.K.S., Mai, P.M.: Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami? *Marine Geology*, Vol.357, pp.344-361, 2014.
- 4) 川村喜一郎，金松敏也，山田泰広：海底地すべりと災害-これまでの研究成果と現状の問題点-，地質学雑誌，Vol.123，No.12，pp.999-1014，2017.
- 5) 橋本貴之，壇和秀：地滑り形状を変化させた場合の海底地滑り津波に関する実験的研究，土木学会全国大会第 63 回年次学術講演概要集，仙台，pp.395-396，2008.
- 6) Watts, P., Grilli, S.T., Tappin, D.R. and Fryer, G.J.: Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case studies, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.131, No.6, pp.298-310, 2005.
- 7) 安井俊平，岩井裕正，木村真郷，張鋒：難透水層を有する海底斜面における地すべり運動に関する研究，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol. 76，No. 2，pp.I\_313-I\_323，2020.
- 8) Hampton, M.A., Lee, H.J. and Locat, J.: Submarine landslide, *Reviews of Geophysics*, Vol.34, pp.33-59, 1996.
- 9) 川村喜一郎，金松敏也，山田泰広：海底地すべりと災害，地質学雑誌，Vol. 123，No. 12，pp. 999-1014，2017.