

海底地すべり発生メカニズムに関する研究 Study on mechanism of occurrence of submarine landslides

木村真郷¹, 岩井裕正², 川崎貴也³, 張鋒⁴

1 名古屋工業大学・工学部社会工学科・E-mail address 30415035@nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・工学部社会工学科・E-mail address iwai.hiromasa@nitech.ac.jp

3 名古屋工業大学・工学部社会工学科・E-mail address 29415031@nitech.ac.jp

4 名古屋工業大学・工学部社会工学科・E-mail address choho@nitech.ac.jp

概 要

海底地すべりの発生は、海底ケーブルの破断や地震動を伴わない津波を引き起こすだけでなく、地震時の海底地すべりは地震による津波の規模を増大させる可能性もある。海底地盤における地すべりは陸上地盤の地すべりと比較すると大規模であることや、 1° にも満たない緩い角度でも地すべりが発生することがあることが特徴である。しかし海底地すべり発生メカニズムおよびその規模について地盤力学的観点から検討した事例は過去、極めて少ない。そこで本研究では、海底地すべり発生の要因の一つとされる間隙水圧の上昇に着目し、海底斜面を模擬した模型実験を行った。水中に形成した斜面に人工的に間隙水圧を与え、その大きさ、過剰間隙水圧が発生する位置および不透水層の有無を変化させることによって、海底地すべり発生時の間隙水圧の大きさおよび地すべりの規模や形状について観察した。

キーワード：海底地すべり，ボーリング，間隙水圧，模型実験

1. はじめに

海底地盤における地すべりは陸上地盤の地すべりと比較すると大規模かつ、緩い角度でも地すべりが発生することが特徴である。陸上地すべりと海底地すべりの比較を表1に示す。近年の海底地形に関する調査によって、日本列島周辺海域には海底地すべりの痕跡が多数発見されている。海底地すべりが発生すると、海底に設置された通信インフラに損傷を与えることや、海底地形の大規模な変化による津波を引き起こす危険性が指摘されている²⁾。

表 1 陸上地すべりとの比較

	陸上地すべり	海底地すべり
移動距離	数 m～数十 m	数百 m～数万 m
土砂容量	数千 m ³ 程度	数千 km ³ 以上
斜面傾斜	10° 以上	0.5° 以上
土質状態	不飽和	飽和 (サクシオンなし)

過去の報告の中で最も大きな海底地すべりが発生したと知られている例は紀元前 6100 年にノルウェー沿岸の大陵棚の端に沿って発生した海底地すべりである Storegga Slide である³⁾⁴⁾。ノルウェー沖で 800km に渡り厚さ 450m に及ぶ海底地すべりが発生しそれに伴い内陸 80km にまで及ぶ津波が発生した。また、2011 年に発生した東日本大震災における津波も海底地すべりが原因で被害が拡大した事例がある。この津波はプレート変動が原因で発生した

ものであるが、実際に観測された津波の規模を解析的に再現しようと試みたところ、プレート変動に起因する津波より大きな規模で発生したという結果が出ている⁵⁾。この解析結果によると、地震動により発生した波と震源から離れた海底で起きた海底地すべりを要因として発生した波とが合わさり巨大化したのではないかと発表している。また、緩傾斜の例としてアメリカ合衆国のミシシッピデルタにおける海底地すべりが挙げられる。この海底地すべりは 0.01° というわずかな傾斜であったのにも関わらず、海底地すべりが発生した。水中での安息角度を考慮しても、海底地すべりがせん断抵抗力の低下および重力による土塊の移動という論理では、流動規模の大きさや緩い角度での地すべり現象を説明することができない。

海底と陸上の地すべりとの大きな違いは、そのすべりの規模だけでなく発生要因の多様性である。例えば、陸上地すべりにおける土塊体積は、大きいものでも数十 km³ であるのに対して、海底地すべりの場合最低でも数百 km³、大きいものだと数万 km³ という規模に達する。また、陸上地すべりが発生する一般的な要因は、地質の風化、降雨による斜面地盤の飽和度上昇および間隙水圧の上昇、地震慣性力あるいは地震動による液状化によって弱面が形成されることが挙げられる。これに対して海底地すべりの場合、通常海底地盤内は海水によって完全飽和の状態にあり飽和度の大きな変化は生じない。また、降雨のような地盤内の間隙水量を急激に変化させるような現象は海底においては頻繁には発生しないとされている⁶⁾。従って、海底地

すべりの誘発原因としては地盤内の間隙圧の変化が大きな要因であるが、この間隙圧を上昇させる事象が多岐にわたっており、発生原因を特定できないのが現状である。

その中でも特に注目されているのが、地震による海底地盤の液状化やメタンハイドレート分解などによる海底地盤内の水圧およびガス圧の上昇である。しかし、液状化やメタンハイドレート分解による地盤内の間隙圧の上昇に伴う有効応力低下だけでは、緩傾斜で海底地すべりが発生することを説明することはできないとされている。これについて國生(2000)⁷⁾は、不透水層下で水膜が形成されることも海底地すべりが低角度でも発生する原因の一つとして考えられているが、海底地すべり発生メカニズムおよび規模について地盤工学的観点から検討した事例は極めて少ない。そこで本研究では海底斜面を模擬した模型実験により海底地すべり発生メカニズムおよびすべり規模の把握に取り組む。

2. 実験装置概要および実験条件

本実験では、海底斜面を模擬した模型土槽を用いる。模型土槽内に設置した斜面模型上に砂を堆積させ、斜面下面から定水位昇降装置による水位差の増減により水圧を与えることで、海底地すべり発生時の過剰間隙水圧及び土塊の移動を観察することを目的とした実験を行う。本研究では、特に以下の2つの項目に着目する。

- 1) 海底地盤内の過剰間隙水圧の大きさと圧入範囲。
- 2) 不透水層の有無。

2.1 実験装置概要

2.1.1 実験土槽本体および斜面模型

実験土槽は図1に示すようなアクリル製の土槽を用いた。また、図2に実験装置全体の平面図を示す。模型土槽の寸法は表2に示すように内寸で幅1500mm、深さ600mm、奥行400mmであり、模型内に斜面角度10°、水平距離1000mmの斜面模型を設置した。斜面模型の中央には幅200mmで加工されたプラスチック樹脂製のポーラスフィルターが設置されており、所定の範囲に水圧を分散させて与えることができる。

表2 実験装置概要

幅 (内寸)	1500mm
深さ (内寸)	600mm
奥行き (内寸)	400mm
斜面角度	10°
斜面水平距離	1000mm

また、図3に示す定水位昇降装置は水槽の位置を上下させることにより、土槽に張られた水との水位差を連続的に変化させることができる。この時、昇降装置から土槽内へ水を供給することで土槽内水位が上昇してしまわないように土槽側面に設置されている排水コックからの定期的

な排水により土槽内の水位を一定に保つ。



図1 実験土槽

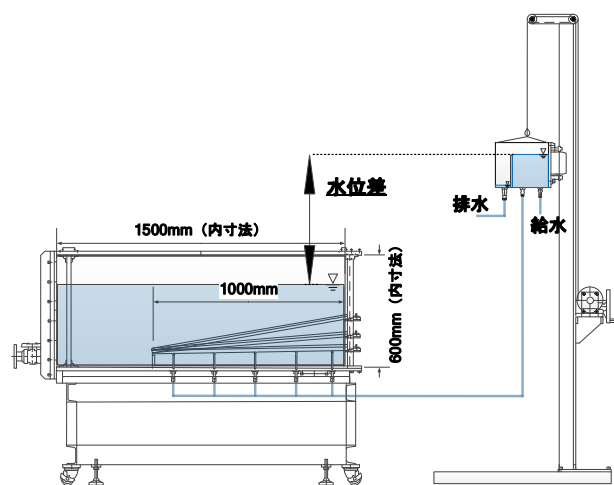


図2 実験装置全体の平面図



図3 定水位昇降装置 (左: 定水位水槽 右: 全体図)

図4は斜面上に設置されたポーラスフィルターの模式図である。ポーラスフィルターは全部で5枚設置されており、法尻方向から番号が①～⑤と振り分けている。対応している付属のコックを開閉することにより、水圧を与える位置を変化させることができる。また、黒四角、赤丸、青三角でそれぞれ1～3と示されるのは斜面上に設置した水圧計の設置位置であり、その色とシンボル形状は後述する間隙水圧計の時刻歴グラフのシンボルと対応している水

圧計はフィルター①の直上、フィルター②と③の中央、フィルター④の直上を目安に設置している。

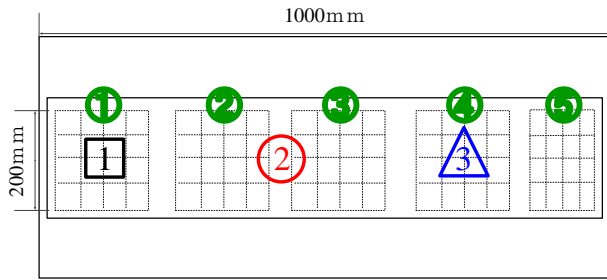


図 4 水圧を与えるコックと水圧計の配置図

2.1.2 水中カメラの配置とその目的

図 5 に示すようにモデル水槽内に 3 台の水中カメラと土槽外にビデオカメラを設置した。水中カメラは法尻から法肩へかけて水中カメラをそれぞれ①、②、③とする。水中カメラ①は斜面法尻と基礎地盤の境目、水中カメラ②は斜面中央とその側壁、水中カメラ③は斜面法肩部分と壁との境目をそれぞれ観察している。

また、ビデオカメラを使って斜面全体の動きを土槽外から撮影することで土槽全体を観察している。

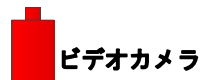
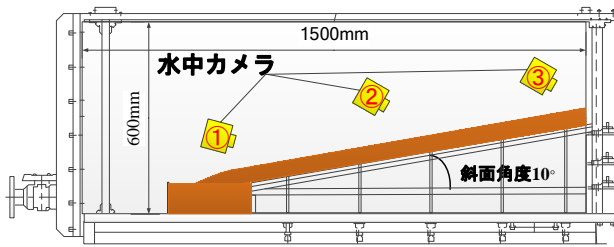


図 5 カメラの撮影位置

2.2 実験条件

与える間隙水圧の大きさと圧入範囲を変えた時の地盤変動、不透水層の有無が地すべり発生に及ぼす影響に着目するため、表 3 に示す実験ケースで実験を行った。Case-w1 から Case-w3 は水圧計を導入しておらず、水中カメラにより、地すべりやボイリングなどの地盤変動を観察した。Case-w4 から Case-w6 は水圧計を新しく設置したケースである。

本実験では地盤材料として豊浦砂を用い、水中落下法で斜面を形成する。斜面層厚 40mm を目標としている。この時、少量の豊浦砂が水中落下法の時に基礎地盤に流れ込んでしまうことを想定して必要な土量より 3% 多く土を使用する。また、Case-w1～Case-w3 については相対密度 60% を目標としていたが、不透水層および間隙水圧計を設置した Case-w4～Case-w6 については相対密度 40% に目標を変更し、地盤形成している。

初期に与える水圧は、地盤の厚さおよび間隙比から限界

導水勾配の水位差 36mm を算出し、その値を基準に 42 mm の水位差を与える。そこから 100mm 刻みに 1300mm までの計 14 パターンの調査を行った。なお、それぞれの水位差において水圧を与える時間は全ケース 3 分間で統一し、3 分経過後は地盤内の水圧がある消散するための時間を 1 分程度設けている。

Case-w1～Case-w3 は不透水層を設置しない豊浦砂のみを堆積させたケースであり、Case-w4～Case-w6 は不透水層を地盤に設置したケースである。不透水層には厚さ 1.0mm、幅 398mm、長さ 920mm のビニールシートを用いた。不透水層を地盤に設置するときは、斜面底面から 29.5mm の位置に設置し、さらに相対密度を保ったまま、全層厚が 40mm となるようにビニールシートの上からさらに 9.5mm の砂地盤を作製する。その様子を図 6 に示す。

表 3 実験ケース

Case	不透水層	水圧計の設置	水圧を与える位置	相対密度(%)
Case-w1	なし	なし	①	60
Case-w2	なし	なし	①②	60
Case-w3	なし	なし	①②③	60
Case-w4	あり	あり	①	40
Case-w5	あり	あり	①②③	40
Case-w6	あり	あり	①②③④⑤	40

拡大図

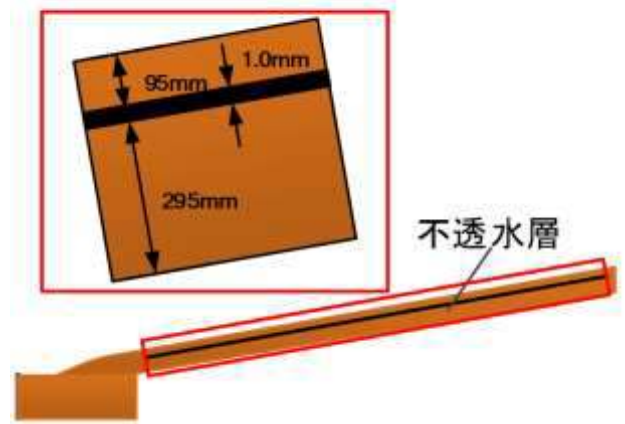


図 6 不透水層の与えた位置模式図

3. 実験結果および考察

3.1 不透水層のないケースの実験結果

不透水層のない Case-w1～Case-w3 においては、水圧を与えたエリアに円形の変形が生じ、その下方に砂が堆積した。この現象は、高い水圧によって液状化した砂が斜面に沿って流れたものと考えられる。Case-w1 から Case-w3 のどのケースも斜面全体のすべりは発生しなかった。以下の表 4 に示されるように、液状化による砂の流動は水圧を与える範囲によって形状に変化を見せた。また、図 7 に Case-w3 において水位差 42mm から 1300mm まで変化させ、水圧を与えた時の斜面法尻部分の地盤挙動を示した。図 7 下図

に示すように斜面法尻部に砂の堆積を確認できる。また砂の流動距離の測定位置は図8に示されるように、流動開始位置から流動による砂の堆積終了位置までの間の縦および横方向それぞれの最長距離である。

表 4 Case-w 1 から Case-w 3 の地盤挙動のまとめ

Case	流動開始 水位差	最終流動距離 (縦方向)	最終流動距離 (横方向)
Case-w1	600mm	178.3mm	192.1mm
Case-w2	400mm	268.8mm	189.2mm
Case-w3	500mm	207.0mm	207.0mm



図 7 液状化発生に伴う砂の流動距離の比較

上図：斜面流動開始前の斜面の様子 下図：斜面流動の様子

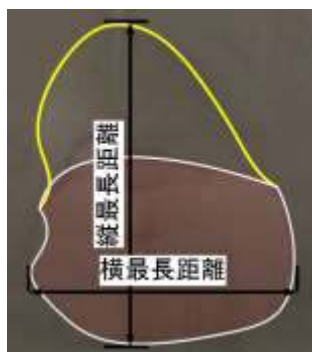


図 8 法尻部流動距離の測定位置

また図9に Case-w1 から Case-w3 の時の水中カメラで撮影した画像から算出した地盤の変状について縦横方向の流動距離の観点から比較した。図9より、最終的な流動距離に限らず、全体的に水圧を与える範囲が広い Case-w2 や Case-w3 のほうが Case-w1 よりも大きな規模の流動になっていることが分かる。さらに土砂流動がより低い水圧で発生する。しかし、Case-w2 と Case-w3 を比べると、水圧を与える範囲の小さい Case-w2 のほう流動開始が早くや縦方向への流動距離が大きくなっているのが分かる。この

ことから不透水層がない場合、水圧を与える範囲によって地盤に与える影響を最大限にする地点が存在する可能性があると考えられる。なおそれぞれのケースは一定の水位差をピークとして縦方向・横方向とも流動距離の増大が緩やかになっている。この現象は、砂が斜面法尻下方に堆積したことで土の移動がせき止められたのではないかと考えられる。

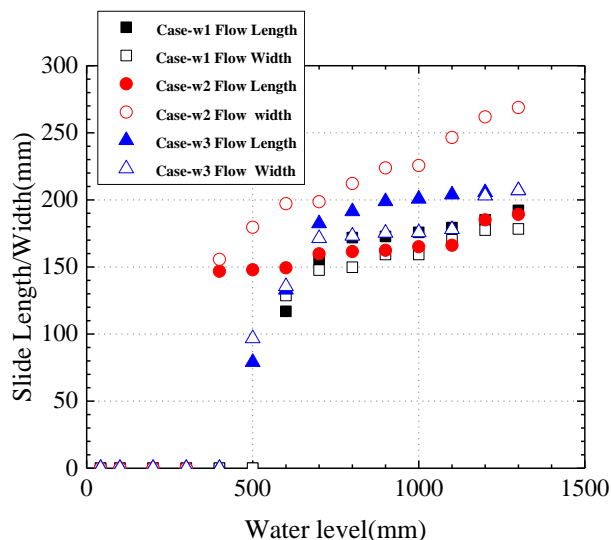


図 9 法尻部流動距離の測定位置

3.2 不透水層のあるケースの実験結果

3.2.1 水中カメラによる整理

次に、不透水層のある Case-w4~Case-w6 の結果について述べる。不透水層のない Case-w1~Case-w3 では、水圧が与えられるポーラスフィルター上部において局所的に砂の流動が発生したのに対して、不透水層を有するケースでは、斜面全体が不透水層にそってすべり、法尻部分に横幅全体にわたって砂が堆積した。不透水層に沿って斜面がすべる現象は、与えた水圧が不透水層下に溜まることにより、不透水層と砂層の間にある摩擦が極端に低下したことが原因であると考えられる。

また図10は Case-w5 において水位差 200mm の時、水圧入から 10 秒後~30 秒後までに発生した斜面前方へのすべりの様子を PIV 解析によって示したものである。粒子が法尻部に向けて移動している様子からわかるように水圧を与える範囲がポーラスフィルターからと限定的であっても、斜面全体のすべりが確認されているといえる。

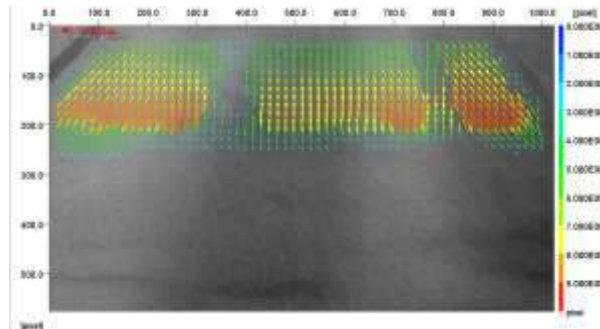


図 10 PIV 解析によるすべりの様子

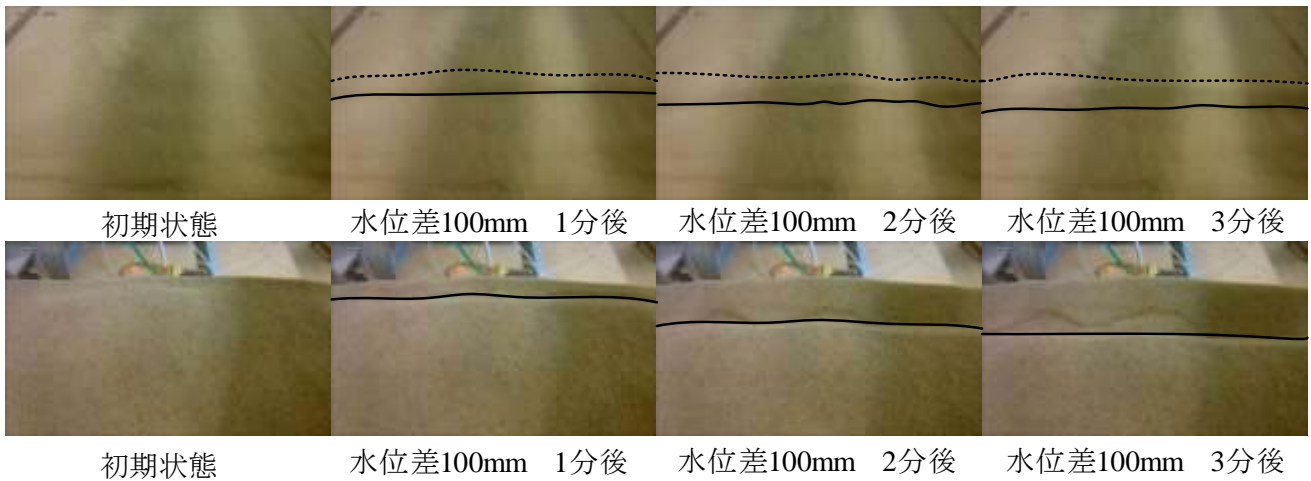


図 11 Case-w5 の地盤挙動

また、Case-w5 における水位差 100mm を与えた時の地すべりの一連の様子を水中カメラ①および水中カメラ③で撮影したものを時系列に並べたものを図 11 に示す。この時、図 11 の 8 枚の写真の上段は水位差 100mm の水圧を与えたケースを水中カメラ①で撮影した、初期状態から水圧を与えてから 3 分後まで 1 分ごとに地盤挙動を撮影したものである。下段の 4 枚の写真は水中カメラ③の同ケースの同時刻に撮影された画像である。斜面のすべりにより法尻に堆積した砂の範囲について、堆積物の先端部を実線で、堆積物後方を点線で示した。図 11 より、水位差 100mm において水圧を与えてからおよそ 1 分後に斜面が前方にすべり始め、それに伴って斜面法尻部分に砂が堆積し始めたことが分かる。その後、継続してすべりが進行している。水位差 100mm を与えて 3 分後にはおよそ 37.5mm すべった。また、水位差 200mm では、水位差 100mm の時と比較して斜面の移動距離が増加している。特に、水圧を与えて 2 分後において、一気にすべりが進行している。これは、与える水位差を 100mm から 200mm に増加させたことで不透水層下のより広い範囲で摩擦が低下したためと考えられる。また先述の PIV 解析結果だけでなく二つの水中カメラの画像からも、斜面全体がすべっていることが分かる。

次に、Case-w4～Case-w6 において与えた水位差とすべった累積距離の関係を図 12 に示す。すべり距離に関しては、水中カメラ①で撮影した画像から算出している。図 12 から分かるように、水圧を与える範囲の広い Case-w5 は Case-w4 と比べ、すべりが発生する時の水位差が小さくなっていることと、最終的なすべりの距離が大きくなっていることが確認された。これは、不透水層が設置されている場合、水圧を与える範囲が広がることで、不透水層下の水圧が上昇する範囲も広がり、早いすべり出し、大規模なすべりになったと考えられる。しかし、Case-w6 では①～⑤までのすべてのコックを開けており、水圧を与える範囲が最も大きいにも関わらず Case-w5 (コック①～③開) と比べてすべり距離は小さくなった。これは Case-w6 において、すべりが発生する直前の水位差 600mm で不透水層の

法尻部分の切れ目からボイリングが発生したため、不透水層下の水圧が消散し、すべりの距離が Case-w6 と比べ小さな値にとどまったと考えられる。また、Case-w4～Case-w6 のいずれのケースにおいても、水位差の増加に対してすべり距離の増加割合が緩やかになる点が存在するが、これは、すべりに伴い斜面法尻部分に土砂が堆積し、すべりを妨げることが理由として考えられる。

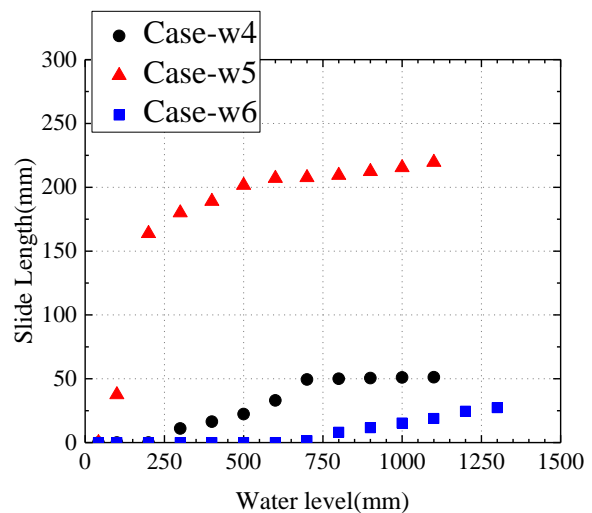


図 12 不透水層が有りのケースのすべり距離の比較

3.2.2 水圧計による整理

水圧計を設置している Case-w4 から Case-w6 における、過剰間隙水圧の変化と、すべりとボイリングのタイミングを示した図を図 13 から図 15 に示す。横軸の時間が 0 秒から 720 秒となっているが、実際には各水位差のステージにおいて 180 秒経過後、水圧を与えるのと停止し約 1 分間水圧の消散のための時間を設けているが、ここでは水圧消散に要した時間を省いて時間を整理している。また、図 13 から図 15 には、Case-w4 から Case-w6 におけるボイリングの発生位置を右上の斜面を模擬した図に斜線で示した。この時、それぞれのケースの斜面に変状が発生した前後の

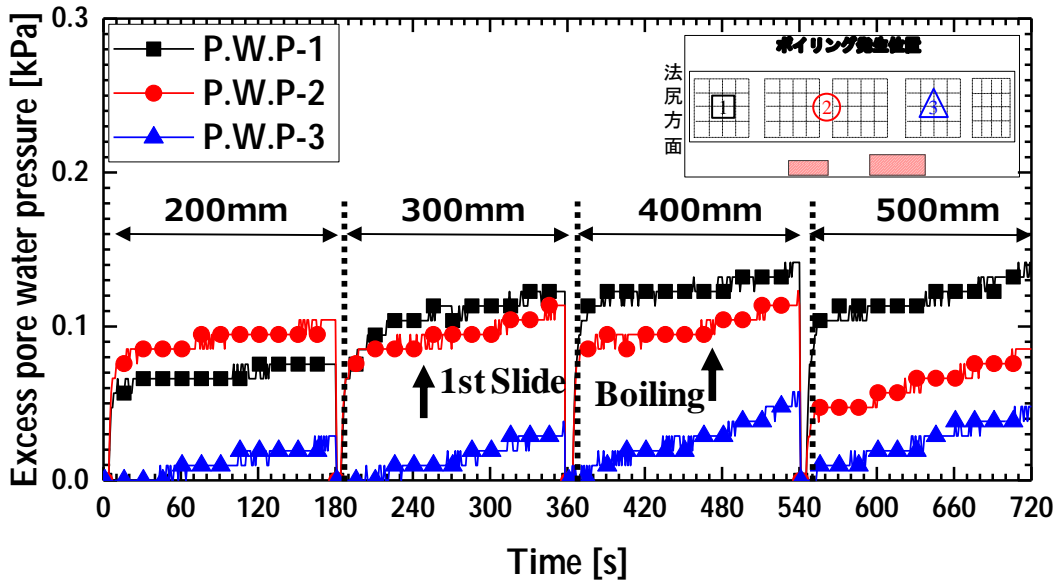


図 13 Case-w4 の水圧の変化

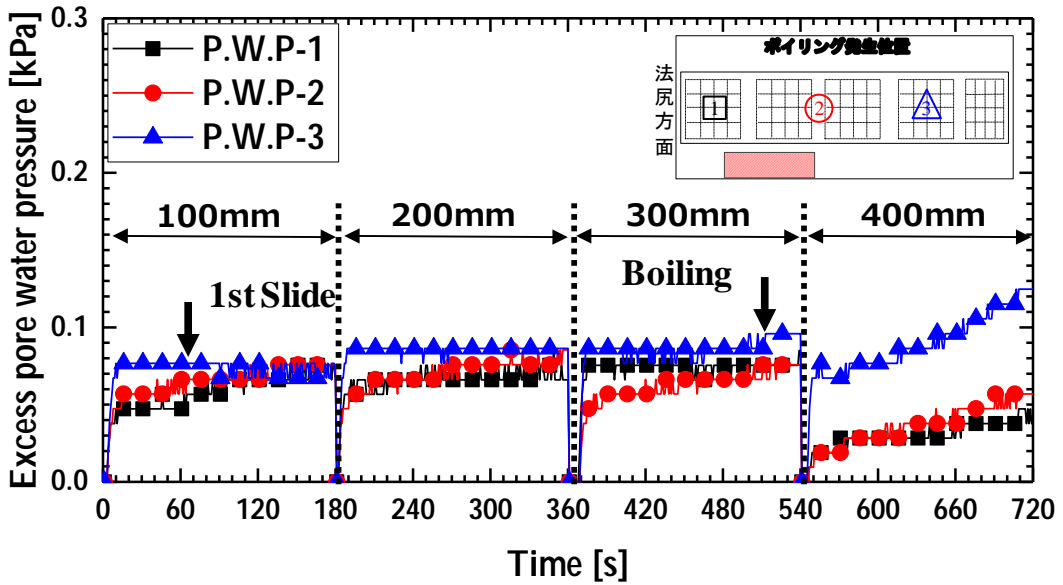


図 14 Case-w5 の水圧の変化

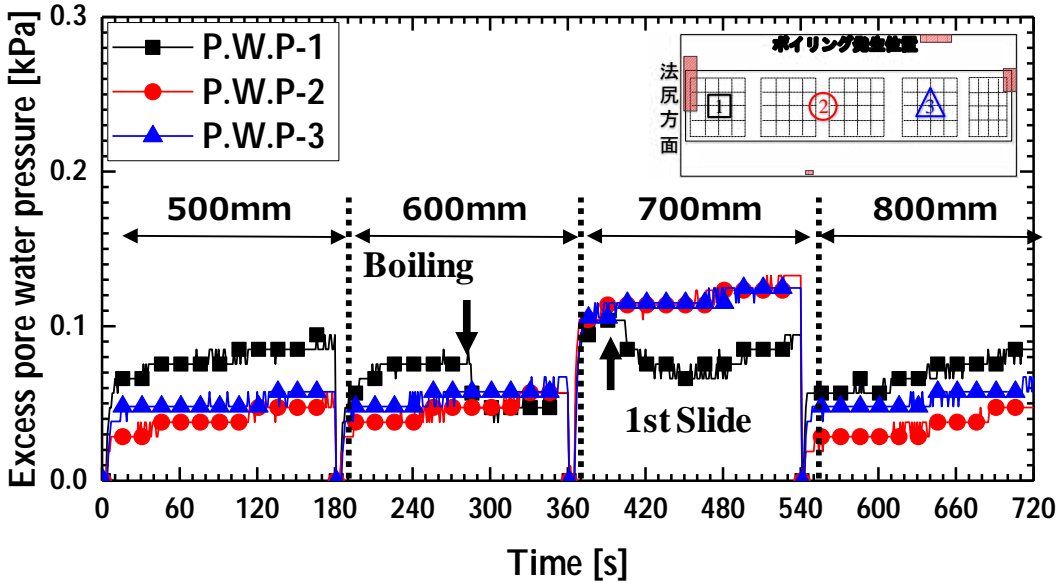


図 15 Case-w6 の水圧の変化

4つの水位差でのケースの斜面に変状が発生した前後の4つの水位差での水圧のデータを対象に選定している。また、すべりとボーリングが発生した水位差をそれぞれ表5に示す。

表5 Case-w4からCase-w6の地盤挙動のまとめ

Case	ボーリング発生水位差	すべり発生水位差
Case-w4	400mm	300mm
Case-w5	300mm	100mm
Case-w6	600mm	700mm

まず、Case-w4における水位差100mm～300mmの時は水圧がステージごとに上昇しており、水圧計が②>①>③の順に高い値を示すが、水位差400mmの時は①>②>③の順に高い値を示している。これは水位差400mmの時に発生した斜面左壁面でのボーリングにより水圧計②付近の過剰間隙水圧が消散したため水圧計②の値が低下したと考えられる。水位差400mm以降も継続してボーリングが発生し、その規模が拡大していったため、それ以降、水頭差を大きくしても、検出する水圧は大きく増加することはなかった。また、Case-w4では水圧を与える位置は法尻付近のcock①だけであるため、斜面上方の間隙水圧計③は特に小さい値を示している。

次に、Case-w5に注目する。Case-w4と見比べると、水圧計①、②、③はそれぞれ同程度の値を示しており、水圧が不透水層によって広い範囲にわたって伝達していることがわかる。これは、Case-w4に比べ水圧を与える範囲が広がったため、不透水層下のより広い範囲で水圧が広がったと考えられる。また、cock③から離れた水圧計③も反応しており、不透水層が存在すれば水圧を与える箇所が局所的であっても、水圧が不透水層下全体に広がると考えられる。また、水位差100mm～300mmの時は水圧計がケースごとに緩やかに上昇し、同程度の値を示すが、水位差400mmの時は水圧計①、②の水圧が減少している。これは水位差300mmの時に発生した斜面中腹壁面付近の広い範囲で発生したボーリングにより水圧計①、②付近の過剰間隙水圧が消散したためだと考えられる。またこの時、水圧計③は高い値を示している。これは、水圧計③近傍ではボーリングが発生していないことで、この周辺の水圧が消散することなく、水位差上昇により水圧が増加したと考えられる。また、ゆるく堆積した砂にすべりによるせん断が発生することで負のダイレイタンスが発生し、地盤内の過剰間隙水圧が発生したと考えるが、実験ケースが少ないため、この詳細なメカニズムに関しては今後の検討事項である。また、Case-w4同様にボーリング発生後は水圧の大きな増加は確認できなかった。

最後に、Case-w6に注目する。まず、水位差600mmにおいてcockを開けた時から100秒が経過時に斜面法尻部からのボーリングが発生し、不透水層下の過剰間隙水圧が消散したため、水圧計①付近の水圧が急激に減少し、ほ

かの2つの水圧計と同程度の水圧の値になった。次に、水位差800mmにおいて、斜面法肩部と斜面側面の両側からのボーリングが発生し、水圧計②、③の水圧が減少した。また、このケースもボーリング発生後は水圧の大きな増加は確認できなかった。また、水位差700mmの時に水圧が全体的に高い値を示しているが、このケースはすべりの前から高い水圧が計測されているので、水位差上昇による間隙水圧の上昇が原因として考えられるが、水位差600mmで発生したボーリングによる水圧の消散と水圧の増減の関係が合致せず、詳細については今後検討が必要である。

以上まとめると、水圧を与える範囲を変化させると、不透水層下での水圧の挙動に変化が見受けられる。その中でも、不透水層が存在すれば水圧を与える箇所が局所的であっても、水圧が不透水層下全体に観測された。このことは実際の海底地盤においても、不透水層が存在すれば、局所的な圧力が海底地すべり発生につながる危険性を示唆しているのではないかと考えられる。また、ボーリングが発生すると、発生付近の地盤の不透水層下の水圧が減少した。また一度ボーリングが発生すると、それ以降、水頭差を大きくしても、検出する水圧は大きく増加することはなかった。このことから、一度水圧が消散してしまうと再度水圧がたまりにくくなる可能性が示唆される。

4. 結論

本研究では、海底地すべり発生メカニズムおよびすべり規模の把握を目的とした模型実験を行った。特に間隙水圧を与える大きさ、範囲および不透水層の有無に着目した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 不透水層のない地盤に水圧を与えると、水圧を与える範囲に円形の変形が生じた。この変形は水圧を与える範囲を増やすことや高い水圧を与えることでより大きくなることが分かった。
- (2) 不透水層のある地盤に水圧を与えると、水圧を与える範囲が局所的であっても、斜面全体が不透水層と共にこの不透水層に沿ってすべる。
- (3) 不透水層のある地盤に水圧を与えると、cockを開ける位置が1か所であっても広範囲で過剰間隙水圧の上昇が観測された。また、ボーリングが発生すると、水圧が消散し、過剰間隙水圧がそれ以降大きく上昇しないことが分かった。
- (4) 今回の実験では、過剰間隙水圧のみに着目し、既往の研究で報告されている不透水層下の水膜については観察していない。水膜の形成も含めた詳細な海底地すべり発生メカニズムに関しては今後の検討事項である。

参考文献

- 1) Yamada, Y., Matsuoka, T., 2008. Accretionary prism formation and submarine landslide, in: 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集. pp. 357-360.

- 2) Nisbet, E.G., Piper, D.J.W., 1998. Giant submarine landslides. *Nature* 392, 329.
- 3) Bryn, P., Berg, K., Forsberg, C.F., Solheim, A., Kvalstad, T.J., 2005. Explaining the Storegga slide. *Mar. Pet. Geol.* 22, 11-19.
- 4) Dawson, A.G., Long, D., Smith, D.E., 1988. The Storegga slides: evidence from eastern Scotland for a possible tsunami. *Mar. Geol.* 82, 271-276.
- 5) Kvalstad, T.J., Andresen, L., Forsberg, C.F., Berg, K., Bryn, P., Wangen, M., 2005. The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics. *Mar. Pet. Geol.* 22, 245-256.
- 6) 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., 2014. Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami? *Mar. Geol.* 357, 344-361.
- 7) 國生剛治, 2000. 砂層の成層構造による液状化時の水膜生成と地盤安定性への影響. *応用地質* 41, 77-86.