

水が関与する際、地盤の挙動や破壊に関するメカニズム：海底地すべり/パイピングを対象として

東北学院大学工学部環境建設工学科 学生会員 ○佐藤隼也 松本渉
 東北学院大学工学部環境建設工学科 フェロー会員 飛田善雄

1. はじめに

海底地すべりとパイピングは異なった現象であるが、両者とも水が関与し地盤が破壊に至り大きな被害をもたらす可能性のある現象である。

海底地すべりは、条件によっては津波などの大きな被害をもたらす可能性がある。特に、南海トラフでは海底地すべり跡が200以上見つかっており、東海、四国地方の、津波高さを上昇させ大きな被害をもたらす可能性が高いとされている¹⁾。パイピング現象は、図.1に示すように、大雨や洪水などにより河川水位が上昇した際に、堤防下部の透水層における水頭差が拡大し地盤の有効応力が低下し、ゼロに至ることで噴砂や漏水現象を起こす。さらに、浸透流の速度増加とともに土粒子を巻き込みながら移動し、破堤に至ることもある²⁾。

本報告では、これらの現象を理解し、特に破壊が起こった後の挙動を観察するために、簡単な室内実験を行った結果を報告する。

2. 実験の概要と結果

今回は砂の落下実験、砂山振動実験、表面に粘土層を有する砂層地盤のパイピング実験を行った。

(1) 砂の落下実験

この実験は空中落下と水中落下の2つの条件で、豊浦砂（500g）を口の細い漏斗からゆっくり落下させ円錐型の砂山を作り、砂山の角度（安息角）と高さを計測、比較を行った。表1にその結果を示す。空中落下の安息角の平均は34.0° 水中落下の砂山では、その角度は29.2°と測定された。

(2) 砂山振動実験

水槽に堤体を模擬した斜面（豊浦砂6000g）を作り空気中と水中二つの条件で振動させ破壊する。破壊後の斜面の角度、高さ、到達距離の測定、崩壊後の形態の観察を行い、水が存在する状態で振動させるとどのような変化が起こるか実験を行った。

その主たる結果を表2に示す。空気中では振動後18°、水中では14°の平均傾斜角となり、水が存在することで4°程度斜面角度が低くなった。到達距離は振動後、空気中は12cm、水中は27cm伸び、水中のほうが長い距離移動しやすいことが観察された。

(3) 表面に粘土層を有する砂層のパイピング実

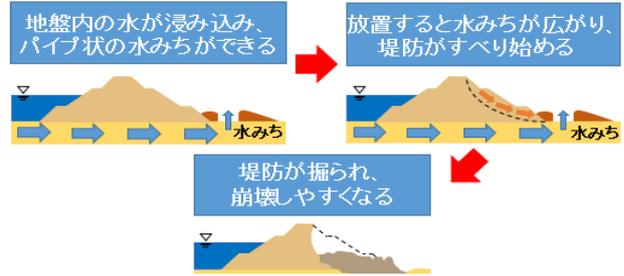


図.1 パイピングによる破堤²⁾

表1 砂山の落下実験

空中	角度(°)	高さ(cm)	水中	角度(°)	高さ(cm)
1回目	33.4	5.65	1回目	30.4	4.75
2回目	33.9	5.65	2回目	30.0	4.25
3回目	34.8	5.75	3回目	27.1	4.05
平均	34.0	5.68	平均	29.2	4.35

表2 砂山の振動実験

空中	振動前	振動後	差	水中	振動前	振動後	差
角度(°)	34.2	18.0		角度(°)	33.0	13.8	
高さ(cm)	12.3	7.1	5.2	高さ(cm)	11.5	5.6	5.9
到達(cm)	20.7	32.9	12.2	到達(cm)	21.5	48.7	27.2

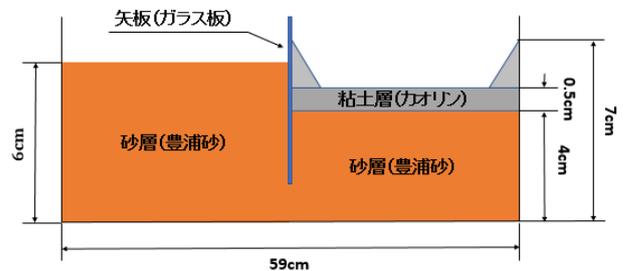


図.2 パイピング実験の断面図

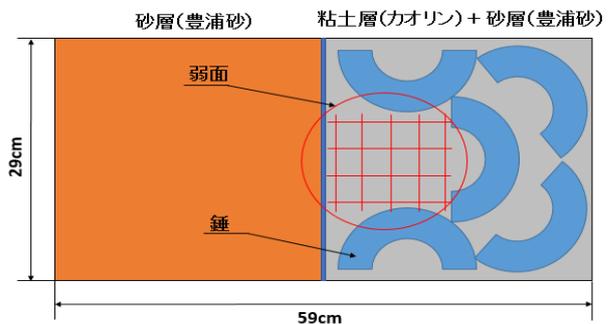


図.3 パイピング実験の平面図

験

本実験の断面図を図. 2、各実験の平面図を図. 3、4 に示す。矢板（ガラス板）を挟んで左側に高さ 6cm、奥行き 29 cm の砂層を敷設し、右側に高さ 4cm の砂層の上に高さ 0.5cm、奥行き 29cm の粘土層を敷設した簡易モデル地盤を作成した。はじめに、左右の砂層を締固め、粘土層上に 1.2 kg の錘を乗せ、矢板を入れ、弱面を設定し（図. 3）、もう一つは、粘土層中央に 1.6 kg の錘を乗せた（図. 4）。矢板の左側の水位を上昇させ、破壊を起こした。破壊後水を抜き、クラックや粘土層の状況を観察した。

（Ⅰ）粘土層上に錘、切り欠きを入れた実験の観察

粘土層の弱面が大きく膨れ上がり、特に重り付近の切り欠き部分から新たなひび割れが発生し漏水が見られた。切り欠き部分よりも、錘で抑えていた部分が膨らみに耐えられず最初に割けてしまったように観察された。水抜き後、浸透破壊により弱面部の粘土層が吹き飛び、顕著なパイピング孔の発生が観察された。

（Ⅱ）粘土層の中心に錘を載荷した実験の観察

矢板側の錘付近からひび割れが発生し漏水が見られ、浸透流により噴砂が発生した。水抜き後、錘下の粘土層にひび割れは確認できず、錘の周辺にクラックが集中していた。

3. 実験結果に対する考察

（1）空中と水中の安息角の違い

無限斜面の安全率は式 (1) により求められる。 ϕ は内部摩擦角であり、 θ は斜面角度である。 $\gamma' = 0.5\gamma_{sat}$ とし、 ϕ を 30 度とし、安全率 F_s を 1.0 とすると、斜面角度は 16 度と求められる。そのため本実験でも水中落下の角度は約 16 度程度を予測していたが、実際の結果は約 30° の斜面角度を示した。この結果から、海底の中にも斜面角度の高い不安定な斜面が、境界条件によっては存在しても不思議ではないことがわかる。

（2）空中と水中の斜面の崩壊後の変状の違い

空中落下では、振動後の砂山の法面下部に砂が堆積し到達距離が伸びなかった。崩壊し法面下部に流れた砂が粒子間に力の鎖を新たに形成し、安定することで到達距離が伸びにくかったと考えられる。

水中の場合、土粒子間に水が存在することで潤滑油のような役割を果たし、粒子間の力の鎖の発達が困難になる。さらに、振動による水の流れの存在が力の鎖を形成しにくくし、到達距離が伸びたのではないかと推論できる。

（3）パイピングの実験

本実験を砂層地盤のみで行った場合、水頭差が 7 cm で完全に砂地盤が液体状になり水が沸騰する

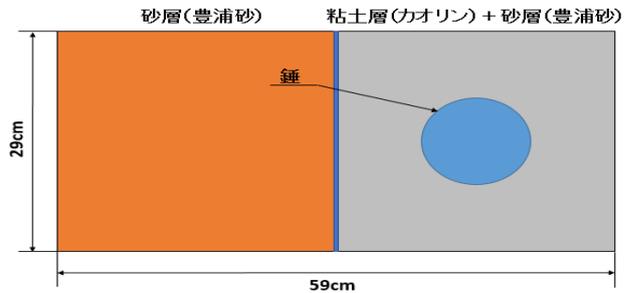


図. 4 パイピング実験の平面図

$$F_s = \gamma' \tan \phi / \gamma_{sat} \tan \theta$$

$$F_s = \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \theta}$$

$$F_s = \gamma' \tan \phi / \gamma_{sat} \tan \theta \tag{1}^{(3)}$$

ように吹き上がり崩壊に至った。動水勾配は約 1.2 であった。粘土層地盤を入れた場合は、水頭差 11 cm で粘土層と粘土層と水槽、矢板面との粘着力が弱まり、粘土層にひび割れが生じる前に水圧により、粘土層が板状に浮き上がった。動水勾配は、約 1.9 であった。本実験は、予備の実験をもとにして、錘を乗せ粘土表面に切り欠きを入れた。矢板を挟んだ一方の水位が上昇するとともに、他方の地盤が浸透圧により膨らんだ。この膨らみによる引張応力により、切り欠き付近でクラックが生じた。このクラックの発生に伴い、浸透流の速度が増加し、パイピングが起こったと考えられる。しかし、クラックの発生が錘付近から生じている。さらに、（Ⅱ）粘土層の中心に錘を載荷した実験とき、水抜き後の錘付近の粘土層からはクラックが確認されたが、錘直下の粘土層からはひび割れが確認できなかった。これらのことより、錘直下の地盤と重り近傍の地盤との応力状態の違いがパイピングの発生位置に影響を与えていると考えられる。すなわち、パイピング現象は、常に水圧（浸透力）の上昇により有効応力が低下し発生するだけではなく、地盤のある個所が破壊条件に近いところでは、動水勾配が低くても先んじてパイピングが起こる現象が観察された。

参考文献

1) NHK 取材班, 『巨大地震 日本列島“大変動期” 最悪のシナリオに備えろ』, NHK スペシャル MEGAQUAKE II, 2012, 185p.
 2) 鬼怒川決壊の原因と思われる『パイピング現象』とは? <https://matome.naver.jp/odai/2144435343407303701>, 2020 年 1 月アクセス
 3) 安川郁夫 (他), 『絵とき 土質力学』 栗津清蔵監修, 改訂 3 版 5 刷, オーム社, 2017, 243p.