

模型土層にサイフォンを用いた際の 内径と排水量、水位に関する研究

RELATIONS AMONG TUBE DIAMETER, DRAINAGE FUNCTION AND WATER LEVEL
UTILIZING SIPHON DRAIN EFFECT ON SOIL MODEL EXPERIMENTS

南口 優貴¹・小泉 圭吾¹・小田 和広¹・小橋 俊也¹・小松 満²・Adrin Tohari³
Yuki MINAMIGUCHI, Keigo KOIZUMI, Kazuhiro ODA, Shunya KOBASHI and Tohari ADRIN

¹大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1)

E-mail: yminamiguchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²岡山大学大学院環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県北区津島中3-1-1)

³インドネシア国立科学院地質研究所

Key Words: siphon, drainage technology, landslide mitigation, model experiment

1. はじめに

近年の異常気象による地すべりの増加に伴い、人的被害や経済的損失が発生している。地すべりの発生頻度が高い東南アジアでは、サイフォンを利用した地すべり対策工(以下、サイフォン工とする)の検討が行われている。サイフォン工とは図-1に示すように、水頭差を利用して地下水の排水を行い、地下水位を低下させる工法である。サイフォン工を適用する際には、サイフォン工によってどれほどの水位低下が見込めるかを推定することが重要であるが、現状においてその効果を定量的に評価する手法は確立されていない。本研究では、カラム模型実験を通じて、サイフォン管の径の違いによる水位低下効果を確認し、計測されたサイフォン管の排水量に基づくカラム模型内の水位算出式の提案と、その妥当性の検証を行った。更に、模型斜面において、サイフォン工を用いた際の水位低下効果の検証を行った。

2. カラム模型における水位算出方法の検討

(1) 実験概要

図-2に示す塩ビ製カラムを用いた模型実験装置を作成し、サイフォン管の径の違いによる水位低下効果の評

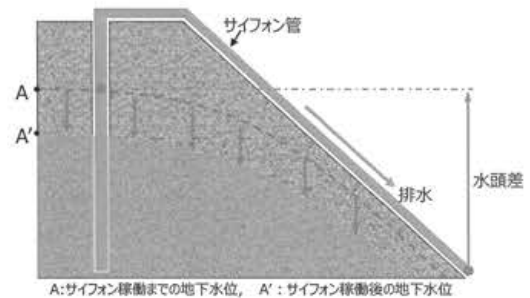


図-1 サイフォン工のメカニズム

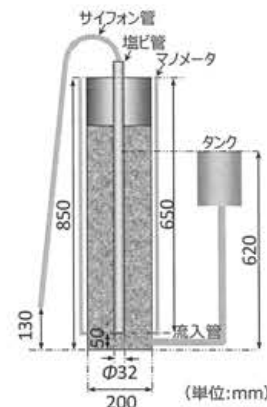


図-2 カラム模型のモデル

価する。表-1は使用した土の物性値を示している。まず、タンクの水位を地面から高さ62cmの位置に設定し、内

径 16mm のホースを通して土を充填したカラムに水を流入させる。カラム内の水位が 62cm になったことを確認し、水頭差を利用してサイフォン管から水を排水する。なお、実験中のタンクの水位は 62cm で一定とする。その後、カラム内の水位が低下し、一定となった状態での水位を計測し、実験を終了した。この実験を表-2 に示す、径の異なる 3 種類のサイフォン管で行った。実験ではマンメータを使用し、カラムの中心から 1.6cm, 5.0cm, 8.0cm の地点における模型土層内の水位を測定した。

表-1 土の物性値

使用土	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	間隙比 e [-]	透水係数 k [cm/s]
日光珪砂6号	2.68	1.06	1.67×10^{-2}

表-2 実験ケース

実験ケース	Case5	Case6.5	Case10
サイフォン管[mm]	$\phi 5$	$\phi 6.5$	$\phi 10$

(2) 実験結果

図-3 はサイフォン管毎の排水量と各マンメータで計測された水位の関係を示している。全体的な傾向として、サイフォン管の管径が大きいくほど水位低下効果が見られることが確認された。一方、Case5 と Case6.5 の水位差に比べて、管径の差が相対的に大きな Case6.5 と Case10 の水位差にはそれほど違いは見られなかった。特にカラムの中心から離れるに従って、Case6.5 と Case10 の水位はほぼ等しい結果となった。

(3) 水位算出式の導出

図-4 はサイフォン管からの排水によって定常状態に達したカラム内の水位を模式的に表した図である。ここで、サイフォンの管路を流線とみなし、図-4 の a 点と b 点で損失水頭を考慮したベルヌーイの定理を用いると、式(1)が成り立つ。

$$h_a = h_b + \frac{v^2}{2g} + h_L \quad (1)$$

ここで、 h_a と h_b はそれぞれ a 点と b 点における位置水頭[m]、 v は流速[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]、 h_L は損失水頭[m]である。

流速 v は、定常状態における排水量によって決定する。また、損失水頭はサイフォン管内での摩擦損失水頭 h_f のみを考慮する。摩擦損失水頭 h_f は式(2)より算出される。

$$h_f = f \frac{l v^2}{D 2g} \quad (2)$$

ここで、 f は摩擦損失係数[-]、 l は管の長さ [m]、 D は管の内径[m]を表す。乱流における摩擦損失係数 f は式

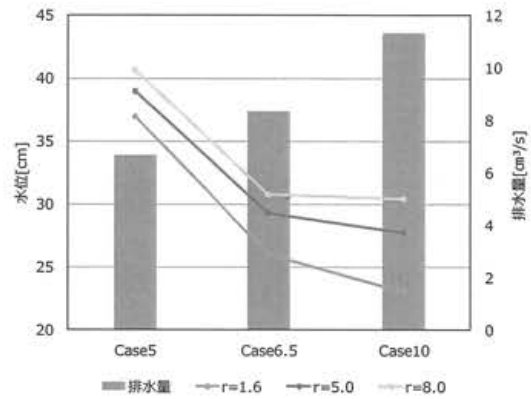


図-3 管径ごとの水位と排水量の関係

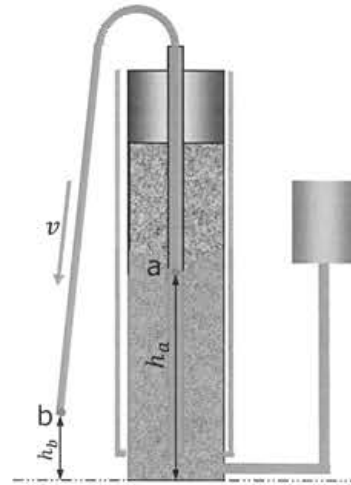


図-4 カラム内水位の定常状態を示す模式図

(3) の形で表される。

$$f = \frac{8gn^2}{R^3} \quad (3)$$

ここで、 n は粗度係数[m^{3/2}・s]、 R は管の径深[m]を表す。今回の実験において、サイフォン管はポリウレタン製のチューブを用いたので、粗度係数 n はウレタンの粗度係数 $0.009 \text{ m}^{3/2} \cdot \text{s}$ を用いる¹⁾。

以上より、各ケースにおける a 点の水位を算出する。

次に、カラム内の任意位置での水位を算出するために、式(4)に示す、重力井戸における揚水量と水位の関係式を用いる。

$$Q = \pi k \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \quad (4)$$

ここで、 Q は揚水量[cm³/s]、 r_1 、 r_2 は井戸中心からの距離[cm]、 h_1 、 h_2 は r_1 、 r_2 におけるそれぞれの水位[cm]を示している。式(4)において Q をサイフォン管からの排水量、 h_1 を式(1)より算出した a 点での水位、 r_1 をサイフォン管の半径として、任意位置での水位を算出することができる。

(4) 水位算出式の検証

前節にて示した算出式による水位と実験値との比較を表-3 に示す。算出式による水位と実験値はほぼ等しいことが分かる。このことから、サイフォン管からの排水量を基に、ベルヌーイの定理から水位を算出できることが確認された。

表-3 算出式による水位と実験値との比較

中心からの距離 (マンメータ位置) [cm]	1.6		5.0		8.0		
	理論	計測	理論	計測	理論	計測	
水位 [cm]	Case5	38.1	37.0	40.0	39.0	40.7	40.6
	Case6.5	27.0	26.0	30.2	29.3	31.4	30.8
	Case10	21.9	23.0	26.9	27.7	28.7	30.4

3. 模型斜面における水位低下効果の検証

(1) 実験概要

ここでは、図-5 に示す模型斜面を用いて、水位低下効果の検証を行う。模型斜面の左端から 300mm は礫層、それより右側は砂層とした。使用した砂の物性値を表-5 に示す。砂層の左端から 400mm の位置に直径 42mm の塩ビ管を、設置できる最大本数である 5 本を等間隔に設置し、各塩ビ管に管径 8mm のサイフォン管を通し、実験を行った。まず、タンクの水位を地面から 80cm に設定し、管径 25mm の流入管を 3 本用いて模型内へ水を入らせる。水位が最高地点に達した後、5 本のサイフォン管からの排水を開始する。水位が低下し、一定となった定常状態に達した時点での水位と排水量を計測し、実験を終了した。水位の測定には側面に 10cm 間隔で設置したマンメータを使用した。

表-5 砂の物性値

使用土	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	間隙比 e[-]	透水係数 k[cm/s]
火山砂	2.86	1.25	5.19×10^{-3}

(2) 実験結果と水位低下効果の検証

サイフォン管からの排水量を図-6 に示す。5 本のサイフォン管からの排水量の合計は毎秒 60.34cm³で、平均値は毎秒 12.07cm³であった。各サイフォン管からの排水量が異なった理由としては、管の内部に空気が微量に入り込んだことで、各サイフォン管の排水機能に差が生じた可能性があると考えられる。続いて、サイフォン稼働前の初期水位と定常状態に達した後の水位(定常水位)を図-7 に示す。この図より、サイフォン管付近を最大として、斜面全体の水位低下が確認された。そこで、水位低下効果を検証するために、サイフォン管位置で低

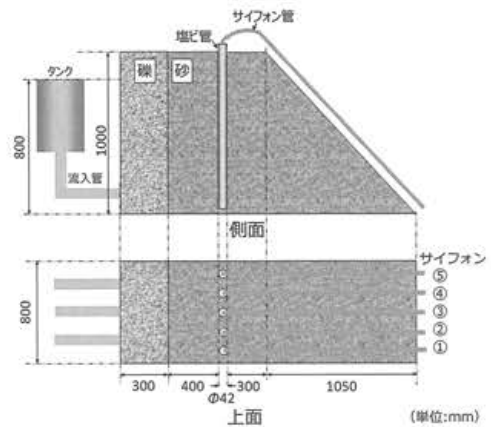


図-5 模型斜面の模式図

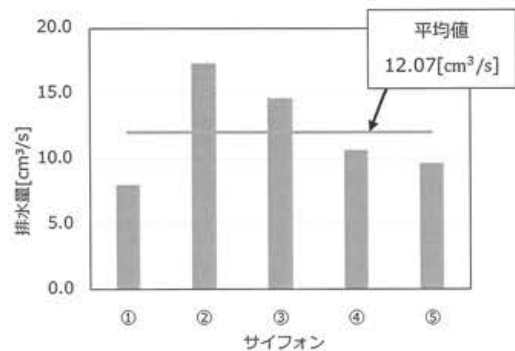


図-6 サイフォン管からの排水量

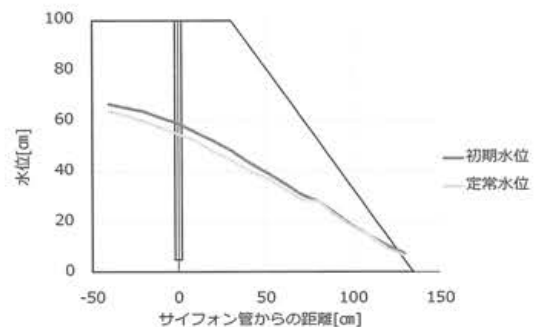


図-7 初期水位と定常水位の比較

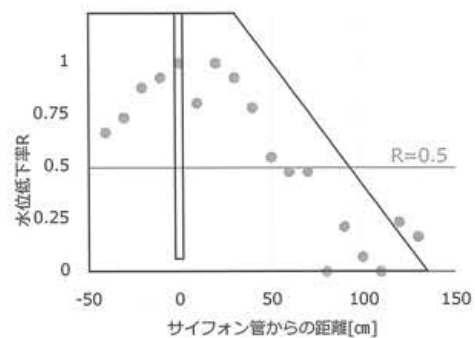


図-8 各地点における水位低下率

下した水位を1とし、それに対する各位置における水位の低下割合(水位低下率 R とする)を算出した。これを

図-8 に示す。この図より、全体の傾向として、サイフォン管から距離が離れる程、水位低下率が低くなることがわかる。特に、サイフォンから 50cm 以上離れた位置での水位低下率 R は 0.5 を下回ることから、効果が半減しているといえる。以上の結果を解釈すると、斜面全体の水位を低下させるためには、水位低下率を考慮しながら、斜面方向にサイフォン管の配置を検討する必要がある。

(3) 水位算出方法の検討

続いて、カラム模型実験と同様に、水位の算出方法について検討を行う。図-9 はサイフォン管からの排水によって、定常状態に達した模型斜面内の水位を模式的に表した図である。サイフォンの管路を流線とみなし、図-9 の a 点と b 点において、損失水頭を考慮したベルヌーイの定理を用いると、式(5)が成り立つ。

$$h_a = \frac{v^2}{2g} + h_L \quad (5)$$

今回の水位導出において、流速 v を 5 本のサイフォン管からの排水量の平均値(毎秒 12.07cm^3)から算出する。また、損失水頭はサイフォン管内での摩擦損失水頭のみを考慮する。摩擦損失水頭の算出方法は前章と同様である。これによって a 点での水位を算出する。

次に、模型斜面内の水位を算出するが、斜面全体の水位を理論的に算出するのは困難であるため、天端を重力井戸と仮定し、式(4)に示す重力井戸における揚水量と水位の関係式を用いて、天端での水位を算出する。

以上より算出された水位と、実験値との比較を表-6 に示す。概算的に水位を算出できることは確認されたが、最大で 8.2cm の誤差が生じた。その原因としては斜面と重力井戸のモデルの違いが挙げられる。図-10 に示すように、重力井戸は軸対象で中心から同心円での水位が等しいとしているが、斜面は軸対象ではない。また、重力井戸は初期水位が水平であるが、斜面は斜度による影響のため、初期水位が水平ではない。これらの影響によって、斜面における水位の理論値と計測値に誤差が生じたと考えられる。

4. 結論

カラム模型実験を通じて、サイフォン管の径の違いによる水位低下効果を確認したところ、管径が大きいほどその効果が見られた。次に、損失水頭を考慮したベルヌーイの定理と重力井戸における揚水量と水位の関係式を用いて、サイフォン管の排水量から、カラム模型内の水位を算出する式を提案し、妥当性の検証を行ったところ、算出した水位と実験値がほぼ等しい値となった。続いて、模型斜面実験によるサイフォン工の水位低下

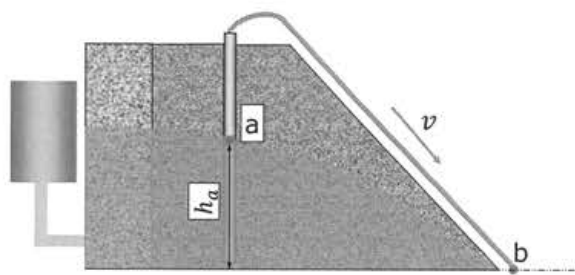


図-9 模型斜面内水位の定常状態を示す模式図

表-6 算出式による水位と実験値との比較

サイフォン管からの距離 [cm]		50	30	20	10
水位 [cm]	理論	60.1	56.8	54.1	49.1
	計測	63.8	61.9	60.0	57.3

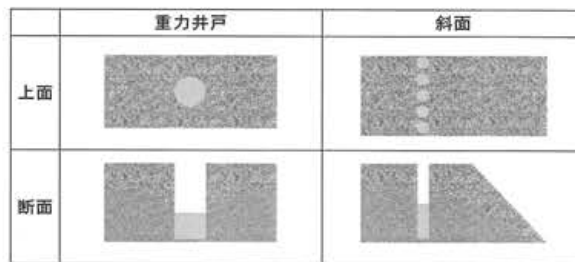


図-10 重力井戸と斜面のモデルの違い

効果を検証したところ、斜面全体で水位は低下したが、サイフォン管から距離が離れるに従って、その効果が小さくなることがわかった。このことから、水位低下効果を期待するためには、斜面方向に適切なサイフォン管の配置を検討する必要がある。また、サイフォン管からの排水量の平均値を用いて、カラム模型と同様に天端における水位算出を試みたが、計測値との間に最大 8.2cm の誤差が生じた。この原因としては、重力井戸と斜面のモデルの違いが考えられ、斜面における水位算出には別のモデルの検討や、数値解析等を用いる必要があると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会とインドネシア LIPI との二国間交流事業(共同研)による支援を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人農業農村整備情報総合センターHP (ネプトライニング水路工法)
http://www.nn-techinfo.jp/mdb_web/MdbShiryo.DO?process_flg=download&sc_touroku_no=1082&pdf_id=0302

(2016. 5. 31 受付)