

# 穴あきパイプを挿入した盛土の浸透流解析

## SEEPAGE ANALYSIS FOR REINFORCED EMBANKMENT WITH DRAIN PIPE

中村 大樹<sup>1</sup>・笠間 清伸<sup>2</sup>・浜崎 智洋<sup>3</sup>・古川 全太郎<sup>4</sup>

Daiki NAKAMURA, Kiyonobu KASAMA, Tomohiro HAMASAKI and Zentaro FURUKAWA

<sup>1</sup>九州大学大学院工学府建設システム工学（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

E-mail: nanohfate@gmail.com

<sup>2</sup>九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>西日本高速道路株式会社九州支社（〒818-0131 福岡県太宰府市水城 2-25-1）

E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

<sup>4</sup>九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地）

E-mail: z.furukawa@civil.kyushu-u.ac.jp

**Key Words:** drain pipe, permeability, water pressure, seepage analysis

### 1. 研究背景と目的

地盤内に鋼材やジオテキスタイルなどの補強材を敷設あるいは挿入して土構造物全体を安定させる補強工法がある<sup>1)</sup>。最近では、ゲリラ豪雨等による斜面崩壊も度々発生しており、平成24年に発生した九州北部豪雨での斜面崩壊は大きな被害をもたらした<sup>2)</sup>。この様な背景から、局所的な豪雨や想定外の地震動など狂暴化する自然外力に対して、既存の盛土や切土のり面を補強する技術が希求されている<sup>3)</sup>。

そこで、我々の研究グループでは、斜面や盛土に穴あきパイプを挿入することで豪雨時や地震時に発生する地盤内の間隙水圧の上昇を低減させ、地盤の安定性を向上させる地盤補強技術の開発を試みている<sup>4)</sup>。穴あきパイプを斜面に挿入する効果は、①平常時では、地盤内に存在する地下水位を低下でき、地盤の単位体積重量ならびに水圧を低下させることができる、②豪雨時や地震時においては、地盤内に流入する水や発生する水圧を素早く逃がすことができる、③さらに表面に凹凸を有するパイプを挿入できればパイプ 자체が補強材となり斜面の安定性が向上するなどがあげられる。

本論文では、穴あきパイプの透水性を確保するのに必要な穴の大きさや開口率、形状を実験的に調査した。

また、サンドドレンの圧密促進の考え方を用いて、斜面から効率的に水を排水するために必要な穴あきパイプの最適打設間隔を検討した。さらに、実際の盛土を想定した、飽和・不飽和浸透流解析を行い、穴あきパイプの排水による有効性を数値解析的に検討した。

### 2. 穴あきパイプの透水実験

実験では、変水位透水試験装置を参考にアクリル円盤のみの透水係数を求めるため、高さ100cm、直径10cmの透明な円柱を使用して簡易な実験装置を開発した。排水面となる装置の下部に、厚さ1cmでアクリル円盤を装着し、基準面をアクリル円盤上部、初期水位を90cmとして実験を行った。パイプに空ける穴の大きさおよび形状の影響を調べるために、穴の開口率(単位面積当たりの開口部の面積割合)と形状の異なるアクリル円盤を用いた。穴の直径は5, 7, 10mm、開口率は5, 10, 15, 20%、穴の形状は、円形と5×50mmのスリットとした。

写真-1にアクリル円盤の1例(直径5mm、開口率10%)を示す。初期水位がなくなるまでの時間を計測し、3回の実験の平均値を透水係数とした。透水係数は、以下の変水位透水試験の式によって算出した。

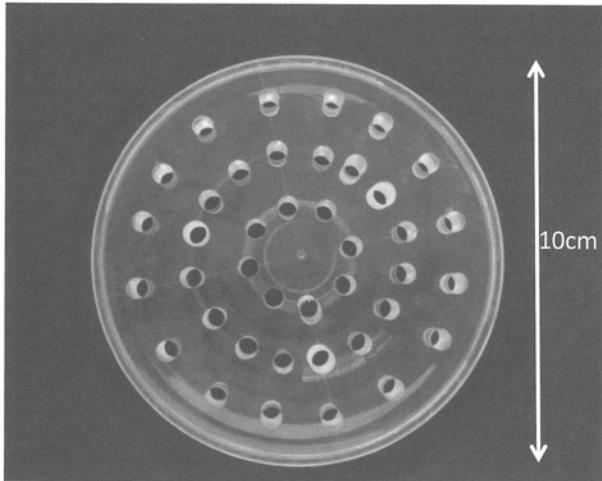


写真-1 アクリル円盤の例

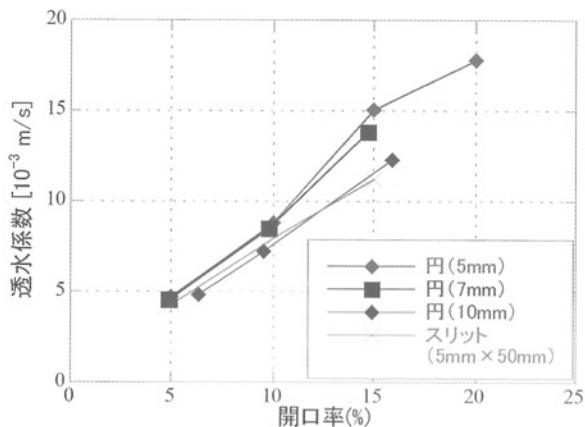


図-1 開口率と透水係数の関係

$$k = 2.3 \frac{L}{t} \log_{10} \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

ただし,  $H_1$ (初期水位) = 90 cm,  $H_2$ (時間  $t$  での水位差) = 1 cm,  $A = 78.5 \text{ cm}^2$ ,  $L = 1 \text{ cm}$ ,  $t$  は水位が  $H_1$  から  $H_2$  になるまでの時間である。

透水実験によって得られた結果を図-1 に示す。穴の大きさや形状によらず透水係数は開口率の増加とともに直線的に增加了。同じ開口率での透水係数の違いは最大でも  $4.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  程度で、穴の直径、形状による透水係数の大きな違いは見られなかった。地盤材料とアクリル円盤の透水係数を比較してみると、どの形状、開口率でもきれいな砂と同等あるいはそれ以上の透水係数であり、例えば開口率 10 % の透水係数は  $7.5 \sim 9.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  で、十分な透水性を有した。

### 3. 穴あきパイプの打設間隔に関する検討

サンドドレン工法の圧密促進の考え方を用いた穴あきパイプの打設間隔と脱水時間の計算法の概要を示す。サンドドレン工法とは、圧密対象粘性土層の層厚

より狭い間隔で鉛直方向にドレンを打設し、軟弱層の排水を容易にすることにより、圧密沈下を促進して地盤を安定化する工法である。今回用いた式は、以下のものであり、ドレンピッチ  $d_e$ 、パイプの直径  $d_w$ 、地盤の圧密係数  $c_h$  および圧密度  $U$  を入力値として、排水時間  $t$  を算出した。ここで、 $T_h$  は時間係数、 $n = d_e/d_w$ 、 $\lambda$  は次式で与えられる定数である。式(2)(3)より  $t$  を算出した。

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} \quad (2)$$

$$T_h = \frac{\lambda}{8} \ln\left(\frac{1}{1-U}\right) \quad (3)$$

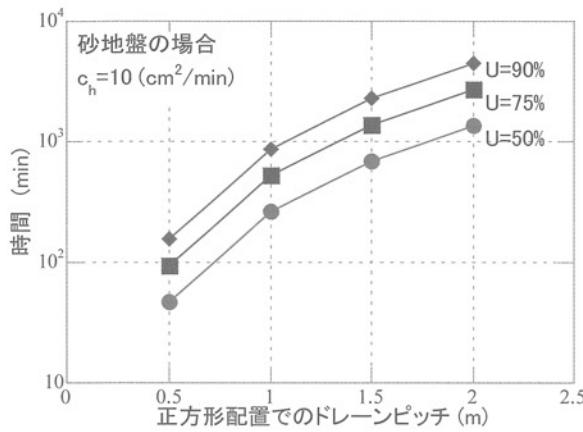
$$\lambda = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (4)$$

それぞれのパラメータの値を表-1 に示す。圧密係数  $c_h$  の値は、それぞれ大きいものから砂地盤( $10 \text{ cm}^2/\text{min}$ )、シルト地盤( $1.0 \text{ cm}^2/\text{min}$ )、粘土地盤( $0.1 \text{ cm}^2/\text{min}$ )を想定した。配置は、三角形配置( $d_e = 1.05d$ )と正方形配置( $d_e = 1.13d$ )の二つの配置を考慮した。ここでは、圧密度が 50 % の時には、地盤に雨などで侵入した水の 50 % が排水すると仮定した。実際には、サンドドレンの考え方(最初に過剰間隙水圧が一気に発生し、それが徐々に消散していく)と穴あきパイプからの排水(初期の過剰間隙水圧がゼロで、降雨とともに水圧が増加していく)は異なり、初期の間隙水圧の関係上、ここで計算される降雨の排水時間は実際の排水時間と比べ、その排水時間は極めて長めの値であると考えられる。

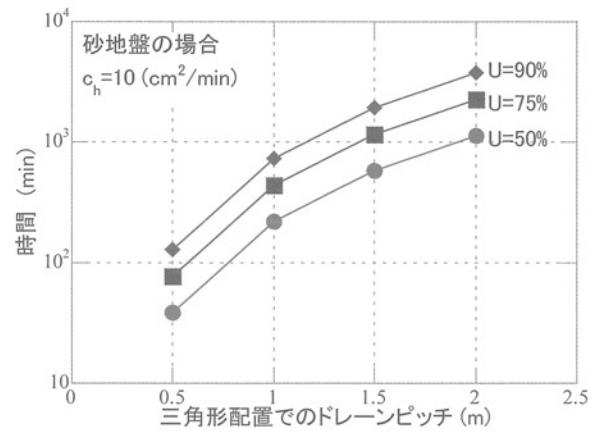
図-2 は、ドレンピッチと排水時間の関係である。三角形配置で排水時間が最も短いのは砂地盤、ドレンピッチ 0.5 m、圧密度 0.5 で 38.8 min であり、最も長いのは粘土地盤、ドレンピッチ 2 m、圧密度 0.9 で 379512 min となりおよそ 10000 倍になった。三角形配置よりも四角形配置のほうがより排水に時間がかかることも確認できた。パイプのピッチの変化による排水時間の変化量に着目してみると、ドレンピッチが 0.5 m から 1.0 m になった場合、排水時間は 5.6 倍、1.0 m から 1.5 m では 2.6 倍、1.5 m から 2.0 m では 1.96 倍とドレンピッチが大きくなるにつれて排水時間の変化量が小さくなつた。

表-1 計算に用いたパラメータ

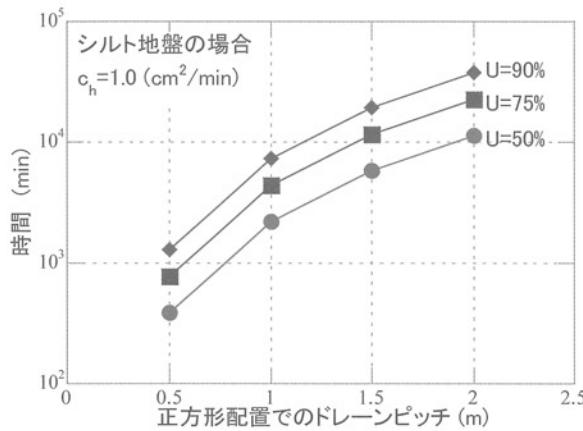
ドレンピッチ [m]	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
ドレン直径 [m]	0.05
圧密係数 [cm <sup>2</sup> /min]	10(砂), 1.0(シルト), 0.1(粘土)
圧密度 [%]	50, 75, 90



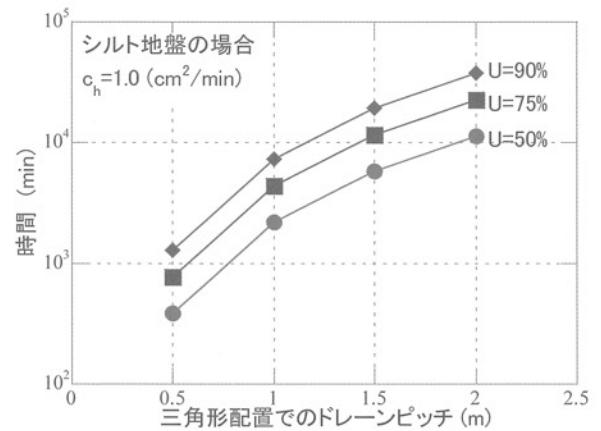
a) 砂地盤で正方形配置



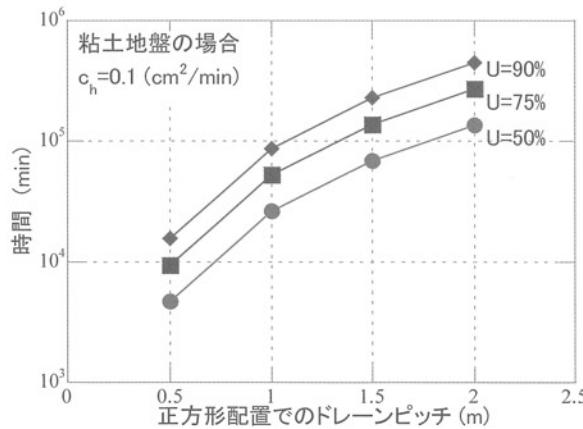
d) 砂地盤で三角形配置



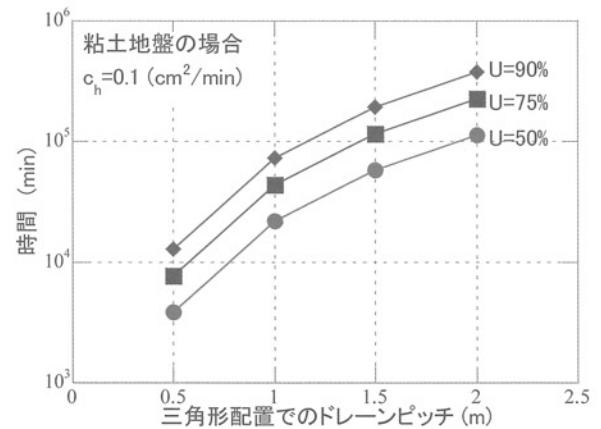
b) シルト地盤で正方形配置



e) シルト地盤で三角形配置



c) 粘土地盤で正方形配置



f) 粘土地盤で三角形配置

図-2 排水時間とドレーンのピッチの関係

サンドドレーン工法の圧密促進の考え方を用いることにより排水パイプを挿入した際の降雨の排水時間の予測ができた。またドレーンのピッチが短くなるほどその変化によって発生する排水時間の変化は大きく、施工計画を行う場合は注意しなければならないことが分かった。

#### 4. 穴あきパイプを打設した盛土の浸透流解析

本章では、穴あきパイプを挿入した盛土を対象に飽和・不飽和浸透流解析を実施し、降雨時に地盤内に発生する間隙水圧の低減効果を検証した。図-3 は、排水

パイプを挿入した場合の解析地盤の一例(打設間隔 2 m, 打設長 6 m, 法面から奥に向かい水平に打設した)で Bs<sub>1</sub>, Bs<sub>2</sub>, Bs<sub>3</sub>, Bs<sub>4</sub> はそれぞれ地盤の種類を示す。法高は 6m で、段数は 2 段、小段幅 2m、法勾配は 1:1.7 とした。図-4 はそのメッシュ図である。さらに材料定数を表-2 に示す。表の a, n, m は、van genuchten モデルを用いた時の水分特性曲線のフィッティングパラメータである。盛土の透水係数は、宮崎自動車道で採取された試料を対象に、変水位透水試験により求めた。近年ゲリラ豪雨等で激しい雨が 50mm/hr を超える雨が降ることもあり、そういった場合を想定して降雨強度は 50 mm/hr とした。さらに背面から流入してくる水を考慮し、左面から 10mm/hr の水が流入する境界条件を与えた。斜面に挿入するパイプは打設間隔(鉛直方向)1 m, 1.5 m, 2 m, 打設長 6 m, 12 m の組み合わせの計 6 パターンとし、試験結果より開口率 10~15% と仮定し透水係数を  $1.0 \times 10^{-2}$  m/s として透水係数の良い地盤として置き換えることで解析を行った。本来なら浸透解析とは別にパイプ流計算が必要となるが、今回は簡略化した。初期地下水位はモデルの下端に一致するとし、モデル下面と左面は不透水とした。今回は、地盤内の点 A において間隙水圧の時間的変化、打設長と打設間隔による間隙水圧低減率の変化について解析を行った。

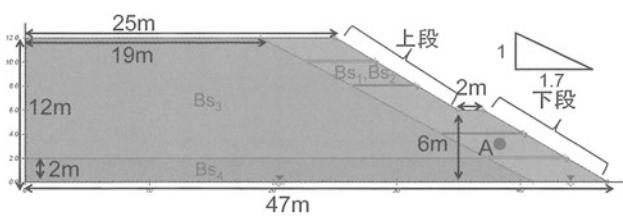


図-3 解析地盤の一例

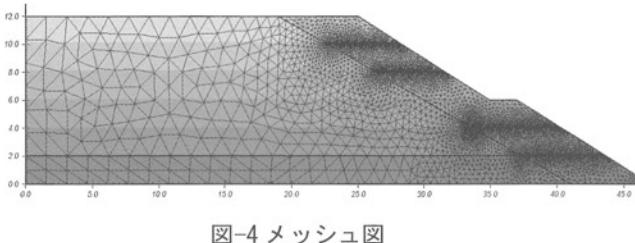


図-4 メッシュ図

表-2 材料定数

	Bs <sub>1</sub> , Bs <sub>2</sub>	Bs <sub>3</sub>	Bs <sub>4</sub>
透水係数 [m/s]	$8.4 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$
粘着力 [kN/m <sup>2</sup> ]	8	39	23
内部摩擦角 [°]	29	17	24
飽和単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ]	14.5	15.5	15.5
残留体積含水率	0.1	0.1	0.1
飽和体積含水率	0.6	0.6	0.6
a	0.1	0.1	0.1
n	2	2	2
m	2	2	2

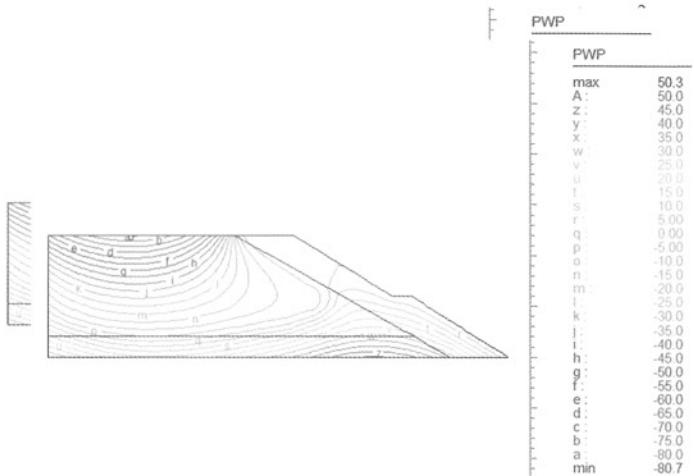


図-5 対策なしのコンター

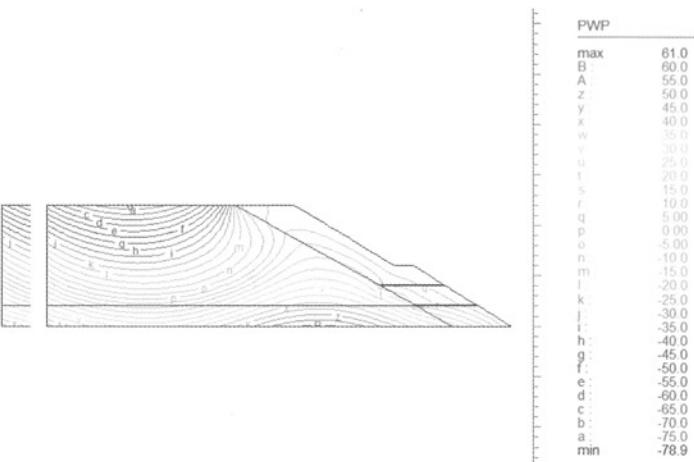


図-6 下段のみ打設のコンター

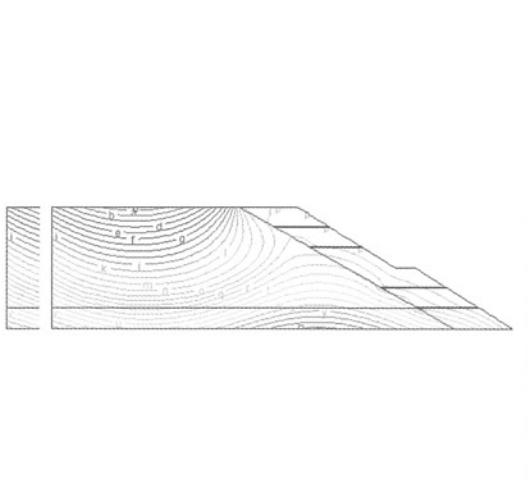


図-7 上下段打設のコンター

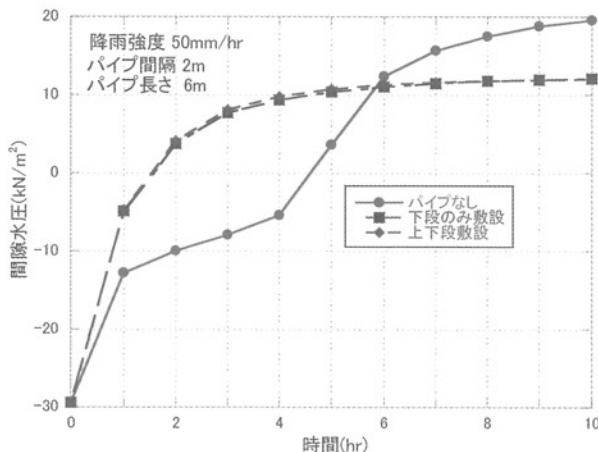


図-8 間隙水圧の経時変化

打設間隔が 2 m、打設長さ 6 m のときの図-3 のパイプに挟まれた点 A における間隙水圧の経時変化を示す。図-5 は対策を行わなかった場合のコンター図であり、図-6、図-7 はそれぞれ下段のみに打設した場合と上下段ともに打設した場合のコンター図である。コンター図をみると、斜面崩壊の原因となる間隙水圧の最大値を示す位置が斜面の浅い位置から深い位置に移動しているのがわかる。図-8 に間隙水圧の経時変化について示す。短い時間において、間隙水圧は対策なしの方が小さくなっているものの時間が 6 時間を超えると間隙水圧の値はパイプを打設したものの方が小さくなった。長期的な視点で見るとパイプを打設することにより間隙水圧の上昇を抑えることができることがわかった。今回の解析においてはパイプを下段のみ打設する場合と上下段打設する場合で間隙水圧の大きな違いは見られなかった。しかし盛土深部や、より高い位置では打設の方法による違いが発生する可能性もあるので今後検討していきたい。

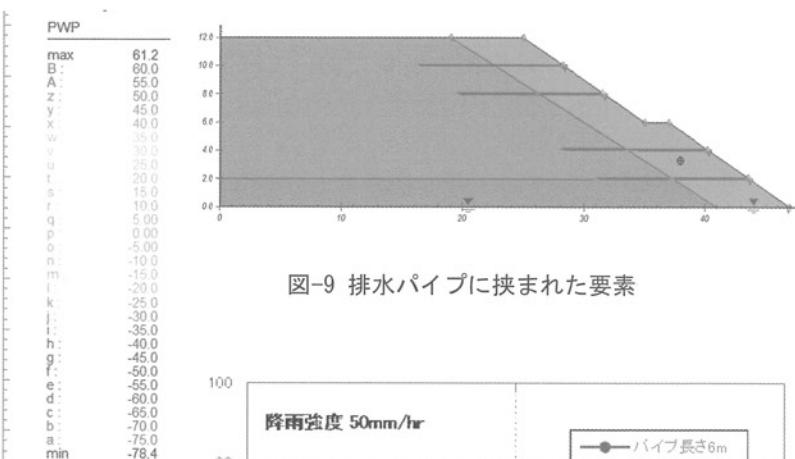


図-9 排水パイプに挟まれた要素

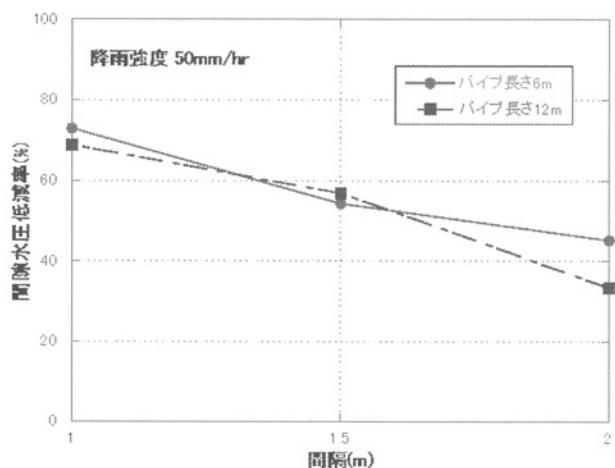


図-10 打設間隔と間隙水圧低減率

間隙水圧の低減に有効な打設間隔を評価するため図-9 の点のように穴あきパイプに挟まれた要素において打設間隔を横軸、間隙水圧低減率を縦軸にとった図を図-10 に示す。間隙水圧低減率は((補強材のない場合の間隙水圧- 補強材入りの間隙水圧)/(補強材のない場合の間隙水圧))で算出し、経過時間は 10 hr とした。打設間隔 1, 1.5, 2 m、打設長 6, 12 m でそれぞれ解析を行った。間隔 1m の場合は間隙水圧低減率は 70% 程度であり十分に排水効果を発揮しているといえる。しかし間隔が大きくなるごとにパイプに挟まれた深い地点の間隙水圧低減率は低下し、間隔 2m では 50% を下回る結果となった。間隔を短くするほど間隙水圧低減率は増加するが、排水による斜面崩壊に対する安全率の向上とコストの両面からの最適な補強材の長さを検討する必要がある。

## 5. まとめ

本論文では、穴あきパイプの透水試験、最適な打設間隔に関する検討ならびに穴あきパイプを挿入した盛土の飽和・不飽和浸透流解析を行った。得られた知見は、以下のようになる。

- 1) 穴の大きさや形状によらず透水係数は、開口率の增加とともに直線的に増加した。例えば、開口率

10 %の透水係数は、 $7.5 \sim 9.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  で、十分な透水性を有する。今回の解析においては開口率を 10%~15%とし透水係数は  $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  とした。

- 2) サンドドレン工法の圧密促進の考え方を用いて、穴あきパイプを挿入した際の降雨の排水時間を推定することができた。例えば、三角形配置で穴あきパイプを 1.5m 間隔で打設した場合には、降雨の 50 %を排水するのに最低で約 581 分が必要となる。
- 3) 間隙水圧の経時変化を解析によって求めることで長期的に見た場合の穴あきパイプを挿入することの有用性を確認できた。
- 4) 間隔を短くするほど斜面の浅い地点での間隙水圧低減率は増加するが、排水による斜面崩壊に対する安全率の向上とコストの両面からの最適な補強材の長さを検討する必要がある。

今回は、排水効果のみに着目したが、今後は安全率に着目して考察を進めるとともに降雨の条件設定での違いや計算結果との比較も進めていく。

#### 参考文献

- 1) 三木博史:ジオテキスタイルを用いた補強土工法 高含水比粘性土を用いた盛土の補強工法, 土と基礎, 第 41 卷, No.9, pp.69-76, 1993.
- 2) (公社)地盤工学会 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査団: 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書, 2013.
- 3) 鶴飼恵三・祭飛・阪上最一・若井明彦:降雨時の斜面安定性の全体安全率による評価, 地すべり, Vol.35 No.1, pp.19-23, 1998.
- 4) 中村大樹・笠間清伸・陳光齊・浜崎智洋:穴あきパイプの打設間隔と透水性について, 自然災害研究協議会 西部地区部会報研究論文集, Vol.38, pp.61-62, 2014.

(2014. 5. 9 受付)