



数値シミュレーションによるL型排水盛土防水工における盛土内外の水位上昇抑制効果の評価

齋藤, 雅彦
吉田, 明日香
白, 濟民
原, 健二
澁谷, 啓

(Citation)

ジオシンセティックス論文集, 28:23-30

(Issue Date)

2013-12

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003302>



数値シミュレーションによるL型排水盛土防水工 における盛土内外の水位上昇抑制効果の評価

齋藤雅彦¹・吉田明日香²・白濟民³・原健二⁴・澁谷啓⁵

盛土の浸水対策工法の一つとして、盛土内に高透水性のジオシンセティック排水材をL字型に配置し、盛土側面からの浸透による盛土内の水位上昇を抑制する工法（L型排水盛土防水工）が提案されている。本研究では、鉛直排水材を千鳥配置した場合の水位上昇抑制効果を3次元数値シミュレーションにより評価するとともに、従来提案されている盛土内水位の簡易推定式の適用性について確認している。これに加えて、雨水が斜面から盛土に流入する際の盛土側面の水位及び盛土内部の水位について、2次元数値シミュレーションにより評価している。

キーワード：盛土，排水，数値解析，ジオシンセティックス

1. 序論

近年、豪雨や地震による盛土構造物の大変形や崩壊による災害が多発している。これらの発生原因の一つとして、盛土の側面（背部の斜面や地山）からの雨水浸透による盛土内水位の上昇と、それに伴う盛土材料の強度低下が考えられるが、従来の設計法ではこのような盛土内への浸水に対する配慮が十分ではなかった可能性が指摘されている¹⁾。

これに対し、新しい浸水対策工法として盛土内に高透水性のジオシンセティック（土木用途で用いられる高分子材料）排水材をL字型に配置し、盛土側面からの浸透による盛土内の水位上昇を抑制する工法（以下「L型排水盛土防水工」と記す）が提案されている^{2,5)}。

しかしながら、本工法の排水性に関するこれまでの研究では、鉛直排水材を一直線に配置すると仮定し、2次元的に取り扱われてきたが、実際には施工上の問題から千鳥配置されることが多い。その場合の排水材周辺の流れ場は3次元になるため、2次元的な取り扱いでは十分ではない。また、上流側の盛土側面の水位は常に一定の条件で検討されてきたため、盛土側面における水位上昇抑制効果については確認されていない。

本研究では、鉛直排水材を千鳥配置した場合の水位上昇抑制効果について3次元数値シミュレーションにより評価するとともに、これまでに提案されている盛土内水位の簡易推定式^{3,5)}の適用性について確認する。これに加えて、雨水が斜面から盛土に流入する際の盛土側面の

水位及び盛土内部の水位について2次元シミュレーションにより評価する。

2. 数値シミュレーション

(1) 基礎方程式

飽和・不飽和浸透流の基礎方程式は以下のように表される⁶⁻⁸⁾。

$$(C + \omega S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \nabla Z)] \quad (1)$$

ここに、 C ：比水分容量（ $=\phi dS_w/d\psi$ ）， ϕ ：土の間隙率， S_w ：飽和度（ $0 \leq S_w \leq 1$ ）， S_s ：比貯留係数， \mathbf{K} ：透水係数テンソル， ψ ：圧力水頭または毛管ポテンシャル， Z ：位置水頭である。また、 ω は完全飽和状態（ $S_w=1$ ）および不飽和状態（ $S_w \neq 1$ ）において、それぞれ $\omega=1$ および $\omega=0$ となるパラメータである。

透水係数テンソル \mathbf{K} は、比透水係数 k_r および飽和透水係数テンソル \mathbf{K}_s を用いると下式となる。

$$\mathbf{K} = k_r \cdot \mathbf{K}_s \quad (2)$$

境界条件は、圧力規定の境界 Γ_1 上で、

$$\psi = \psi_1 \text{ on } \Gamma_1 \quad (3)$$

¹正会員，神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻，助教（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²非会員，三菱電機株式会社（〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-7-3）

³学生会員，神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 博士課程後期課程（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

⁴正会員，太陽工業株式会社 国土環境エンジニアリングカンパニー技術課（〒532-0012 大阪市淀川区木川東4-8-4）

⁵国際会員，神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻，教授（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

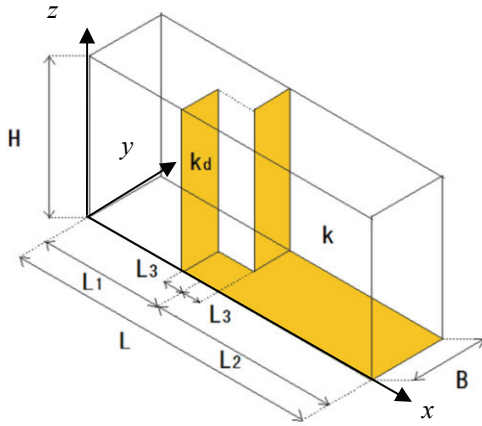


図-1 解析領域の概要

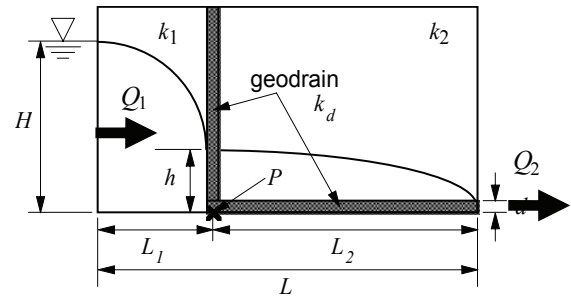


図-2 盛土内の流れの模式図 (2次元モデル)

表-1 使用したパラメーター一覧

<div></div>	H (m)	B (m)	L (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)	k (cm/s)	$k_d d$ (cm ² /s)
Case1-0	2.0	1.0	4.0	-	-	-	0.001	-
Case1-1				1.0	3.0	0.2	0.002	1.0
Case1-2							0.0005	
Case1-3								
Case1-4		2.0	1.0	4.4	2.6	1.8	0.001	
Case1-5		10		1.2	8.8			
Case1-6								

流束 q が規定される境界 Γ_2 上で,

$$q = q_2 = -n \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \nabla Z) \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (4)$$

ここに、 n は外向きの単位法線ベクトルである。

(2) 不飽和浸透特性

式(1)の基礎方程式を解く際に必要となる水分特性曲線は、van Genuchtenの式⁹⁾で与えた。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \left\{ 1 + (\omega \psi_c)^n \right\}^{-m}, m = 1 - 1/n \quad (5)$$

ここに、 S_e および S_r は、それぞれ有効飽和度および残留飽和度、 ψ_c は毛管圧(=圧力), ω , n , m はパラメータである。比透水係数 k_r は、有効飽和度 S_e の関数として次式で求めた¹⁰⁾。

$$k_r = S_e^\varepsilon \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (6)$$

ここに、 ε は空隙の連続性に関わるパラメータであり、

$\varepsilon=1/2$ とする。また、比水分容量 C については、式(5)を ψ_c で微分することによって得られる次式より求めた。

$$C = -\phi \frac{dS_w}{d\psi_c} \\ = \phi \omega m n (1 - S_r) (\omega \psi_c)^{n-1} \left\{ 1 + (\omega \psi_c)^n \right\}^{-m-1} \quad (7)$$

また、一般に水分特性曲線はヒステリシスを有するが、ここではScott et al.¹¹⁾の方法を用いてヒステリシスを考慮する。ここで主吸水曲線と主排水曲線の関係は、式(5)における ω で主吸水曲線と主排水曲線を区別し、それぞれ ω_w と ω_d とすると、Luckner et al.¹²⁾を参考に $\alpha_w = 2\alpha_d$ とする。

3. 鉛直排水材を千鳥配置した場合の排水性

(1) 解析モデル

図-1のように直交座標 (x, y, z) を定義し、3次元問題として取り扱う。底面($z=0$ m)および上面($z=2.0$ m)は不透水性境

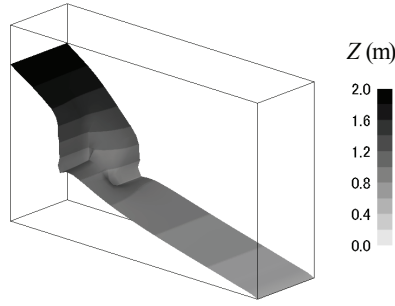


図-3 水面形(Case1-1)

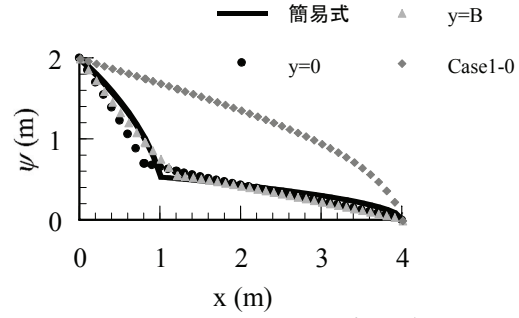


図-4 Case1-0 と Case1-1 の水面形

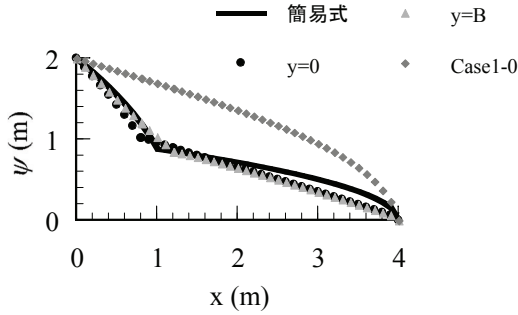


図-5 Case1-0 と Case1-2 の水面形

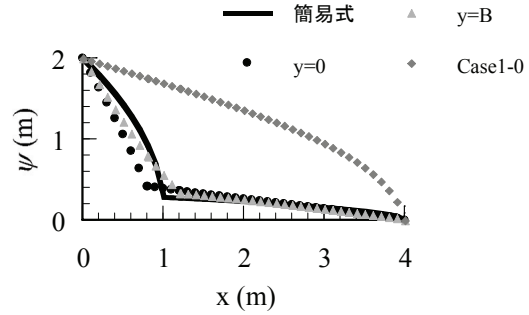


図-6 Case1-0 と Case1-3 の水面形

界($q=0$)とする。また、対称性から、 $y=0$ および $y=B$ 断面は境界面は浸出面境界とする。ここで、 B 、 L 、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 k をパラメータとし(k は盛土の飽和透水係数、 k_d は排水材の飽和透水係数、 d は排水層の厚さ)、表-1に示すCase1-0～Case1-6までの様々な配置パターン(合計7ケース)について3次元数値シミュレーションを実施した。

(2) 盛土内水位の簡易推定式^{3),5)}

図-2 の 2 次元模式図において、鉛直排水材に流れ込む流量 Q_1 および下流側からの排水量 Q_2 は、1 次元不圧地下水の流量公式を適用すると以下のように表される。

$$Q_1 = \frac{k_1}{2L_1} (H^2 - h^2) \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{k_2}{2L_2} h^2 + \frac{k_d d}{L_2} h \quad (9)$$

ここに、 L_1 は給水面から鉛直排水材までの距離、 L_2 は鉛直排水材から浸出面までの距離、 $L (=L_1+L_2)$ は給水面から浸出面までの距離、 H は給水面における水位、 d は排水材の厚さ、 k_1 および k_2 はそれぞれ上流側と下流側の地盤の透水係数、 k_d は排水材の透水係数、 h は鉛直排水材の設置位置における水位である。

また、定常状態においては連続の式より $Q_1=Q_2$ なので、式(9)および式(10)から h は以下の 2 次方程式の解として求められる。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} \right) h^2 + \frac{k_d d}{L_2} h - \frac{k_1}{2L_1} H^2 = 0 \quad (10)$$

不透水性境界とし、 $x=0$ 断面は圧力水頭既知境界、 $x=L$ のこのときの水面形 h' は鉛直排水材の上流側と下流側でそれぞれ以下のように求められる。

$$\text{上流側: } h'(\xi_1) = \sqrt{H^2 - \xi_1(H^2 - h^2)} \quad (11)$$

$$\text{下流側: } h'(\xi_2) = \sqrt{h^2(1 - \xi_2)} \quad (12)$$

ここに、 ξ_1 、 ξ_2 は局所座標であり、 x を上流端が0の流れ方向を正とする水平方向の座標とすると、それぞれ $\xi_1 = x/L_1$ および $\xi_2 = (x-L_1)/L_2$ である (ただし、 $0 \leq \xi_1 \leq 1$ 、 $0 \leq \xi_2 \leq 1$)。

ここで、上流側と下流側の透水係数が等しいと見なせる場合は ($k_1=k_2=k$)、無次元量として α 、 β 、 γ を式(14)のように定義し、式(11)に代入して整理すると、 α 、 β 、 γ の関係は式(14)で表すことができる。

$$\alpha = \frac{k_d d}{kH}, \quad \beta = \frac{h}{H}, \quad \gamma = \frac{L_1}{L} \quad (13)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 \gamma^2 + 1 - \gamma - \alpha \gamma} \quad (14)$$

(3) 解析結果

図-3は、Case1-1における定常状態の水面形の解析結果である($\psi=0$ mの等数値面)。これより鉛直排水材の近傍のみ局所的に3次元的水面形が現われているが、その影響は下流端には見られない。また、図-4～図-6は ($x, y=0, z=0$) と ($x, y=B, z=0$) の線上における圧力水頭 ψ を近似的に水面高さで見なし、Case1-1～Case1-3と簡易式およびCase0と比較したものである。これより、場の透水性が小さいほど、鉛直排水材より下流の水位が低下し排水

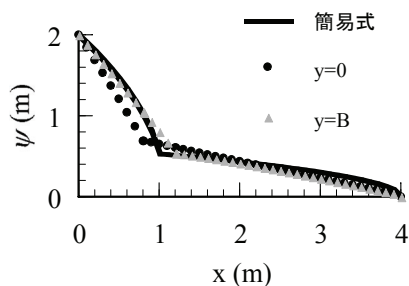


図-7 Case1-4の水面形

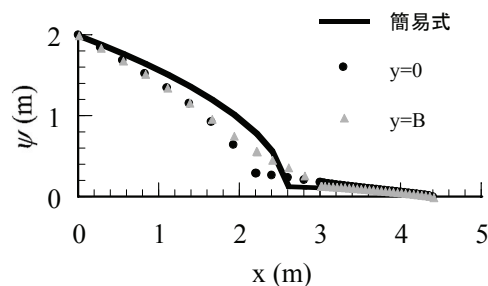


図-8 Case1-5の水面形

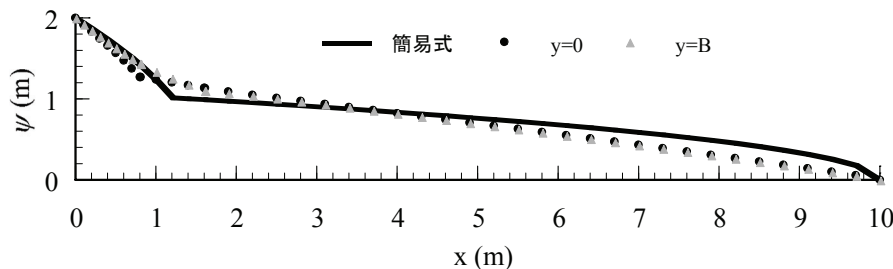


図-9 Case1-6の水面形

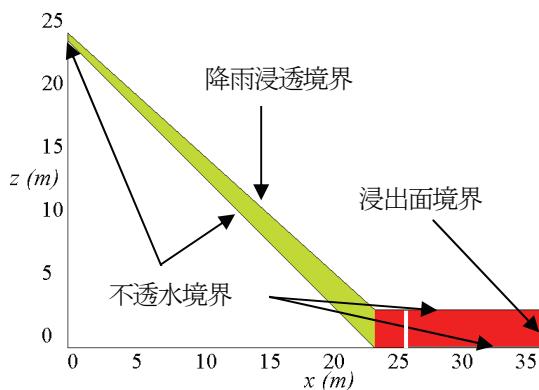


図-10 解析領域と境界条件

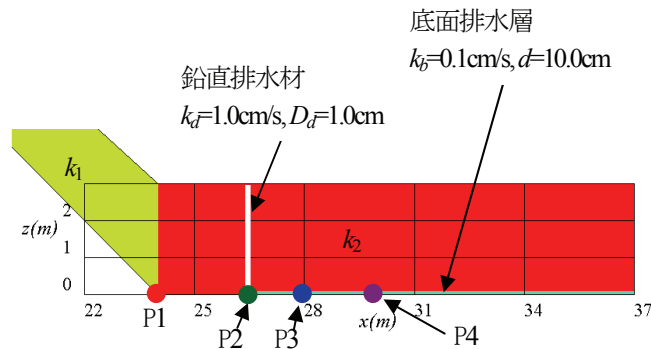


図-11 盛土拡大図

材の効果が大きく現われることがわかる。また場の透水性が大きくなると、下流部で簡易式の水位がやや大きく評価される傾向が見られるものの、全体的には簡易式と数値解析に大きな乖離は見られない。

図-7～図-9は、同様にCase1-4～Case1-6について、数値解析結果と簡易式を比較したものである。まず、Case1-4については、鉛直排水材の千鳥配置の間隔をCase1-1の2倍としたものであるが、水面形はほとんど変化しておらず、設置間隔の影響は無視し得る程度であることがわかる。また、Case1-5は L_1 と L_3 を大きくした場合であるが、この場合は鉛直排水材の上流側でやや簡易式の方が大きく評価されている。一方、Case1-6は、 L_2 と L_3 を大きくした場合であるが、ここでは下流端付近において簡易式の方が最大0.2m程度大きく評価されている。しかし全体的には両者は概ね一致しており、千鳥配置の場合でも簡易式による排水性能の評価は有効であると考えられる。

4. 盛土側面の水位上昇抑制効果に関する検討

従来の研究では、実験／解析的を問わず、盛土内水位にのみ着目しており、盛土側面の水位（境界条件）は一定と仮定し定常問題として取り扱われてきた。本章では、盛土に隣接する斜面を考慮し、斜面に与えられた降雨が盛土に至る過程を包括的に取り扱い、降雨パターンと盛土内外の水位の時間変化の関係について検討した。

(1) 解析モデル

図-10のように直交座標 (x, z) を定義し、2次元問題として取り扱う。盛土上面と盛土底面 $(z=0\text{m})$ および斜面上流端と下面は不透水性境界 $(q=0)$ 、斜面上面は降雨浸透境界、盛土下流端は浸出面境界とする。ここで、斜面の透水係数 k_1 を $5.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、盛土の透水係数 k_2 を $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ および $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、鉛直排水材の透水係数 k_d を 1.0cm/s 、底面の排水層の透水係数 k_b を 0.1cm/s 、排水材の厚さ D_d を 1.0cm 、底面の排水層の厚さ d を 10.0cm とする（図-11）。解析ケースは、降雨パターンおよび盛土の透水係数を変化させ、表-2に示す5ケースとし、それぞれのケースについて排水材の有無について比較した。また、図-11におけるP1～P4は着目点であり、P1は $x=24\text{m}$ （盛土側面）、

表-2 解析ケースとパラメータ (Case2-aは排水材無, Case2-bは排水材有)

	降雨パターン	k_2 (cm/s)	α_d (cm ⁻¹)	α_w (cm ⁻¹)	S_r (-)	n (-)
Case2-0a, Case2-0b	1	5×10^{-4}	9.3×10^{-3}	1.86×10^{-2}	0.3	3
Case2-1a, Case2-1b	2					
Case2-2a, Case2-2b	3					
Case2-3a, Case2-3b	4					
Case2-4a, Case2-4b	2	1×10^{-3}	1.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	0.25	

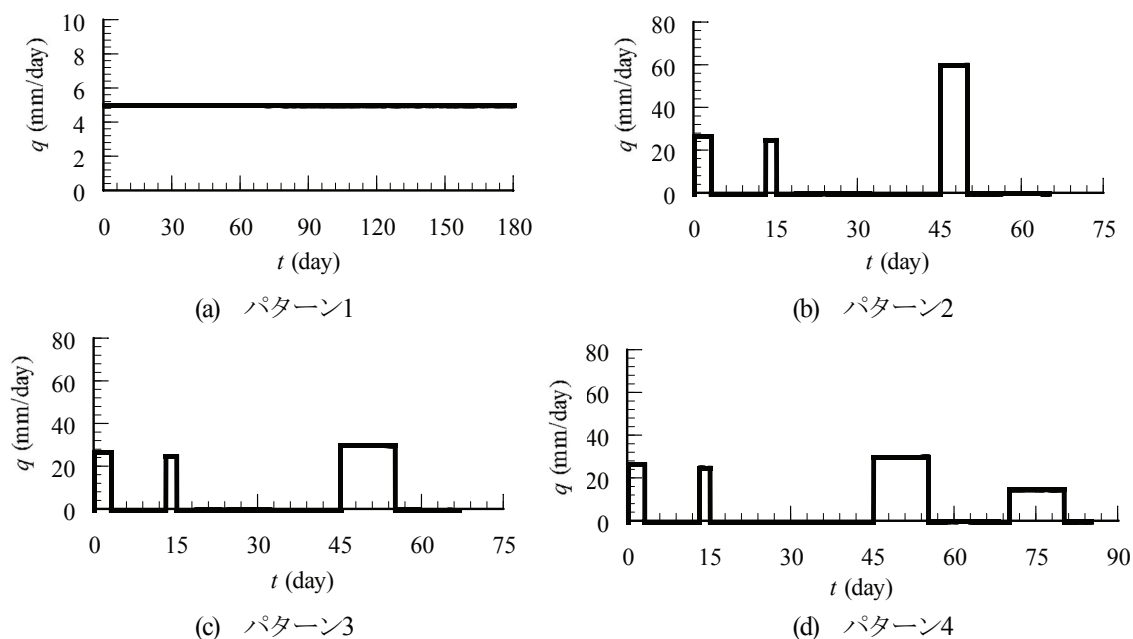


図-12 降雨パターン

P2は $x=26.51\text{m}$ (鉛直排水材直下), P3は $x=28\text{m}$, P4は $x=30\text{m}$ として各点の圧力水頭の時間変化を比較した。

図-12に使用した降雨パターンを示す。まずパターン1は5mm/dayのわずかな降雨を継続的に与えた続けた場合である。パターン2～4については、2回の先行降雨を与えた後に300mmのまとまった降雨を与えている。パターン4については、さらにその15日後に150mmの降雨を与えた場合である。

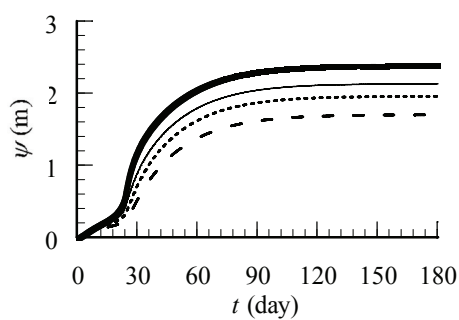
初期条件は、 $z < 2\text{m}$ で $\psi = -z$, $z \geq 2\text{m}$ では $\psi = -2\text{m}$ で一定値とした。

(2) 解析結果

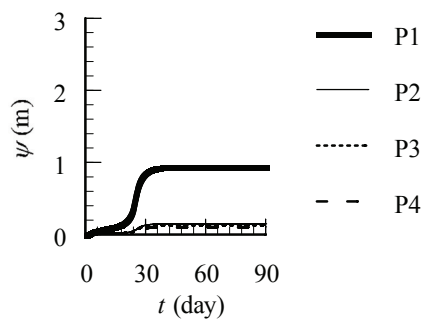
図-13はCase2-0における着目点の圧力水頭の時間変化を示している。Case2-0a (排水材を設置しなかった場合)は120日程度、Case2-0b (排水材を設置した場合)は30日程度で概ね定常状態に達している。また、Case2-0bでは、盛土側面 (P1) においても圧力水頭の上昇量は1m程度となっており、Case2-0aの約40%に抑制されていることがわかる。図-14はCase2-0の定常状態における ψ の分布である。これより排水材の設置によって盛土全体において水位の上昇が抑制されていることがわかる。

図-15はCase2-1における着目点の圧力水頭の時間変化である。Case2-1aでは、2回の先行降雨によりP1の圧力水頭は最大約1.5mに上昇し、3回目の降雨直前では約1.2mとなっている。その後の3回目の降雨では盛土高さと同じ3m程度まで上昇している。一方、Case2-1bでは、先行降雨によるP1の圧力水頭の上昇は約1mであり、3回目の降雨直前には0.5m程度まで低下している。しかし、3回目の降雨についてはCase2-1aと同様にP1では約3mまで上昇しており、排水材による水位上昇抑制効果は見られない。ただし、盛土内の鉛直排水材より下流部 (P2～P4) については、最大でも1mに達していないことが確認できる。

図-16はCase2-2における着目点の圧力水頭の時間変化である。このケースはCase2-1と比較して3回目の降雨強度を1/2, 継続時間を2倍としたものである。Case2-2aでは、圧力水頭の時間変化はCase2-1aとほぼ同様となっているのに対し、Case2-2bについては、P1の最大値は約2.8mであり、Case2-1bと比較して若干低下していることが確認できる。これらのことから、短時間に集中的に降る雨に対しては盛土側面の水位上昇抑制効果はほとんど期待できないが、降雨強度が小さい雨が長期間にわたる場合には幾分かの水位上昇抑制効果を期待することができると

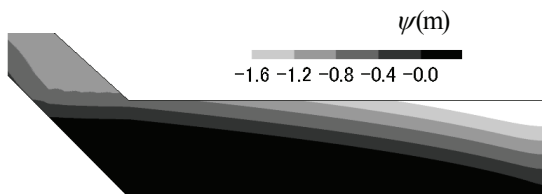


(a) Case2-0a

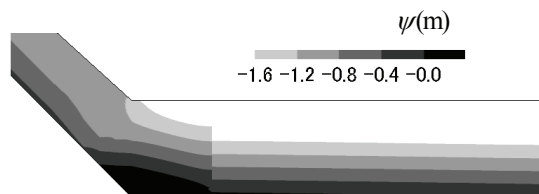


(b) Case2-0b

図-13 圧力水頭の時間変化 (Case2-0)

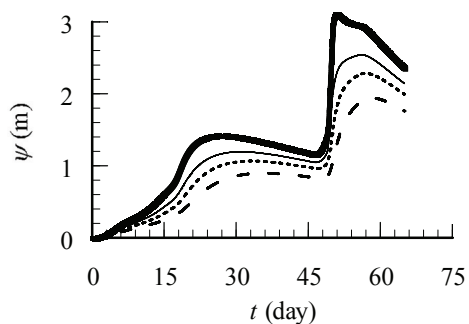


(a) Case2-0a

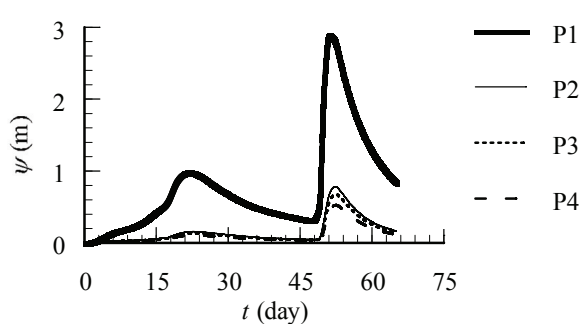


(b) Case2-0b

図-14 定常状態におけるψの分布

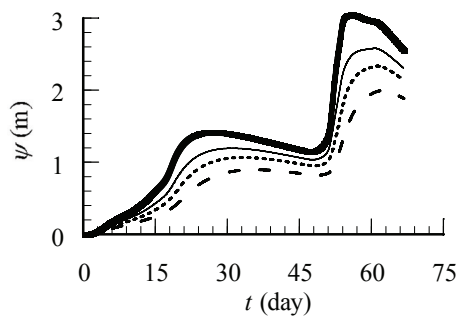


(a) Case2-1a

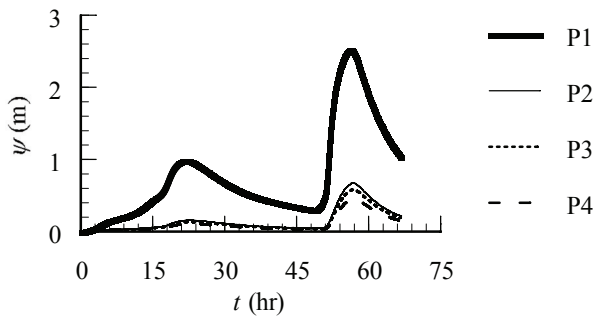


(b) Case2-1b

図-15 圧力水頭の時間変化 (Case2-1)

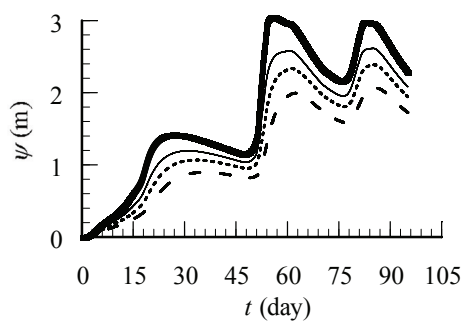


(a) Case2-2a

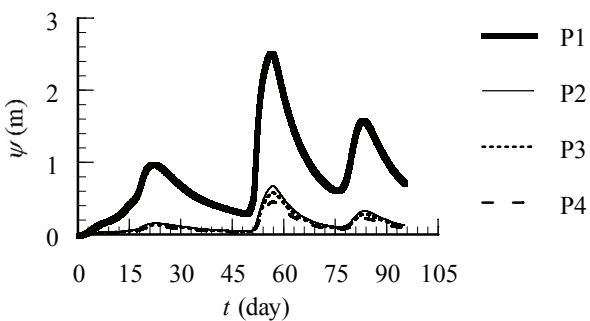


(b) Case2-2b

図-16 圧力水頭の時間変化 (Case2-2)



(a) Case2-3a



(b) Case2-3b

図-17 圧力水頭の時間変化 (Case2-3)

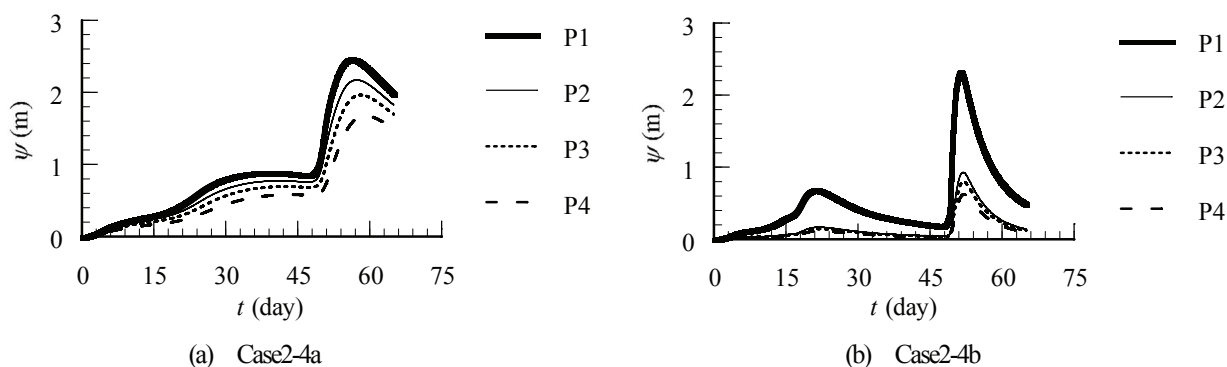


図-18 圧力水頭の時間変化 (Case2-4)

考えられる。

図-17は、大雨の15日後に再びまとまった降雨を与えたケースである。Case2-3aでは、最後の降雨の直前におけるP1の圧力水頭は2.2m程度までしか低下しておらず、その後再び3.0mまで上昇している。一方、Case2-3bでは、最後の降雨の直前では0.8m程度まで低下、その後も1.7m程度までしか上昇していない。つまり、排水材を設置した場合は、排水性能が大きいので一旦上昇した盛土側面の水位は比較的速やかに低下する。このため、大雨の後の降雨については、ある程度のインターバルがあれば無対策と比較して水位上昇を抑制する効果が期待できると考えられる。

図-18は、Case2-1と同様の降雨パターンについて、盛土の飽和透水係数をCase2-1の2倍に設定したケースである。ここでも大雨時にはP1の圧力水頭は排水材の有無に関わらず同程度まで上昇している。また、圧力水頭の上昇量は全体的にCase2-1より小さくなっているが、盛土の飽和透水係数を2倍に設定したにもかかわらず、圧力水頭の低下量は20-30%程度である。つまり、盛土内の水位は、盛土本体の透水性にも影響されるが、それに単純に比例するわけではないことがわかる。

5. 結論

本研究では、3次元数値シミュレーションによって、L型排水盛土防水工において鉛直排水材を千鳥配置した場合の水位上昇抑制効果および盛土内水位の簡易推定式の適用性について検討した。また、雨水が斜面から盛土側面に流入する際の側面水位および盛土内部の水位について2次元モデルによって検討した。これらによって得られた結論を以下にまとめる。

- 1) L型排水盛土防水工により、鉛直排水材を千鳥配置した場合、鉛直排水材の近傍のみ局所的に3次元的水面形が現われているが、全体的には2次元モデルと大きな違いは見られなかった。
- 2) 千鳥配置の数値シミュレーションによって得られた水面形と簡易式とを比較すると、相対的に上流端に近い位置に鉛直排水材を設置した場合は下流端付近において簡易式がやや過大評価となり、下流端に近

い位置に設置した場合は、その鉛直排水材の上流側がやや過大評価となる傾向が見られた。しかし全体的には両者は概ね一致しており、千鳥配置の場合でも簡易式による排水性能の評価は有効であることが確認された。

- 3) 盛土側面の水位上昇抑制効果については、短時間に集中的に降る雨に対してはほとんど期待できないが、降雨強度が小さい雨が長期間にわたる場合には幾分かの水位上昇抑制効果を期待することができると考えられる。
- 4) 盛土内外の水位は、盛土本体の透水性にも影響されるが、それに単純に比例しないことが確認された。

参考文献

- 1) Shibuya, S., Li, D.J., Noda, T. and Nakano, H.: Mechanical behaviour of structured clay and its simulation, Geomechanics - Testing, modelling and simulation, ASCE Special Technical Publication, No.143, pp.286-306, 2005.
- 2) 原健二, 澁谷啓, 齋藤雅彦: ジオシンセティックスを用いた「L型排水盛土防水工」の研究開発, ジオシンセティックス技術情報, Vol.24, No.1, pp.9-20, 2008.
- 3) 澁谷啓, 齋藤雅彦, 原健二, 梶尾孝之: ジオシンセティックスを用いたL型排水盛土防水工— 数値シミュレーションと模型実験による評価 —, ジオシンセティックス論文集, 第23巻, pp.139-146, 2008.
- 4) 原健二, 澁谷啓, 齋藤雅彦, 鳥居宣之, 蔡鍾吉, 梶尾孝之: ジオシンセティックスを用いたL型排水盛土防水工— 実物大実験による評価 —, ジオシンセティックス論文集, 第23巻, pp.147-154, 2008.
- 5) 齋藤雅彦, 原健二, 澁谷啓: ジオシンセティックスを用いたL型排水盛土防水工の水位上昇抑制効果に関する研究, 水工学論文集, 第53巻, pp.505-510, 2009.
- 6) Neuman, S. P.: Saturated unsaturated seepage by finite elements, Proc., ASCE HY, Vol.99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 7) Neuman, S.P.: Galerkin method of analyzing non-steady flow in saturated-unsaturated porous media, Finite Element Method in Flow Problem, edited by C. Taylor, O.C. Zienkiewicz, R.H. Gallagher, John Wiley & Sons, Chap.19, 1974.
- 8) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 第264号, pp.87-96, 1977.
- 9) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the

- hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
- 10) Maulem, Y. :A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 11) Scott, P. S., Farquhar, G. J. and Kouwen, N. :Hysteretic effects on net infiltration, *Advances in Infiltration*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich., pp.163-170, 1983.
- 12) Luckner, L., van Genuchten, M.Th. and Nielsen, D.R.: A Consistent Set of Parametric Models for the Subsurface, *Water Resources Research*, Vol.25, pp.2187-2193, 1989.

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECTS OF WATER LEVEL REPRESSION IN EMBANKMENT WITH L-SHAPED DRAIN

Masahiko SAITO, Asuka YOSHIDA, Jemin BAEK,
Kenji HARA and Satoru SHIBUYA

Geotechnical engineers are increasingly concerned with embankment failures induced by heavy rainfalls. In an attempt to reduce the risk for embankment failures, geotechnical engineers have recently proposed an L-shaped geodrain system with which seepage water flow into the embankment may be prevented even in the event of heavy rainfalls. In the conventional research, the vertical drain material has been arranged to form a straight line. In geotechnical engineering practice, however, the vertical drain may conveniently be mounted in a form of alternate arrangement. Moreover it is assumed that water level of the side of embankments is always constant. In this paper, the effects of water level repression in embankment is discussed when the vertical drain material is set to be alternate arrangement. And also the applicability of a simple estimate equation is examined. The effects of water level repression at the side of embankments are investigated as well.

KEYWORDS: embankment, drainage, numerical simulation, geosynthetic