

# 高含水比粘性土盛土における 水平排水層の排水効果の評価法

宮田喜壽<sup>1</sup>・木暮敬二<sup>2</sup>・落合英俊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 防衛大学校土木工学教室 助手 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)

<sup>2</sup>正会員 工博 防衛大学校土木工学教室 教授 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)

<sup>3</sup>フェロー 工博 九州大学工学部建設都市工学科 教授 (〒812 福岡市箱崎 6-10-1)

高含水比の粘性土を用いて盛土する場合、水平排水層を適当な間隔で配置しながら盛土する工法は有効である。しかし、その設計計算法は十分には確立されていない。本論文では、水平排水層を平面的に配置する場合を対象とした排水効果の解析法を示し、その妥当性を現場データを用いて検証する。そして、数値計算によって種々の因子が排水効果に及ぼす影響を明らかにする。さらに、誘導した解析解の数学的特性より、水平排水層に要求される排水機能の評価式を示し、その有効性を複数の現場データより検証する。

**Key Words :** *embankment, clayey soils, pore pressure, horizontal drainage, drain resistance, geotextile*

## 1. はじめに

リサイクル法の施行に伴って、従来は捨土とされてきたような高含水比の粘性土を高盛土施工に用いようとする気運が高まっている<sup>1)</sup>。しかし、そのような土を用いて高盛土を急速施工すると、比較的高い過剰間隙水圧が盛土内に発生して、盛土の安定性は低下する。そのため、水平排水層を適当な間隔で配置して、間隙水圧の消散を促進させながら盛土が行われる(以後、この工法を水平排水工法と呼ぶ)。この工法は、土質安定処理工法などと比較して、施工性、経済性に優れている<sup>1)</sup>。従来は、排水材として砂や礫が用いられてきたが、1970年ごろから、ジオシンセティックスが排水材として用いられるケースが増加している<sup>2)</sup>。

様々な用途の盛土に適用できる設計法を考えると、この工法の設計は、シンプルなアルゴリズムを有する1次設計段階と変形の照査など詳細な検討を行う2次設計段階の2つのプロセスを経ることが实际的であろう。しかし、現在は1次段階の設計に適用する解析法も十分には確立されておらず<sup>3)</sup>、一連の設計システムを確立するためには、まず設計への適用性を有する排水効果の解析法を確立する必要がある。

著者らは、以上に示した設計システムの確立を目的として、解析的検討<sup>4)</sup>、室内および現場における実験的検

討<sup>5,6)</sup>を行っている。本論文においては、まず水平排水層を盛土内に平面的に設ける場合を対象とした盛土内間隙水圧の予測式を誘導し、排水層の長さや間隔、排水層の水平方向の通水性能が排水効果に及ぼす影響を考察する。次に、解析解の数学的特性に着目して行った数値計算より、水平排水層に必要とされる排水機能の評価式を定式化し、その有効性をいくつかの現場計測結果を用いて検証する。

## 2. 既往の研究

### (1) 現場実験および現場計測事例

本工法の水平排水材として砂や礫を用いた場合については、松井ら<sup>7)</sup>、熊谷ら<sup>8)</sup>等が、ジオテキスタイルを用いた場合については、久楽ら<sup>9)</sup>、三木ら<sup>10)</sup>、菅原ら<sup>11)</sup>等が、現場実験、現場計測を行い、工法の有効性を検討している。それらの多くは、排水層が理想的に機能したことを報告するものであるが、排水層の盛土深部において、比較的大きな間隙水圧が生じている例も報告されている。また合理的な解析法が確立されていないことから、盛土材と排水材の性質、排水層の配置条件など排水効果に影響を及ぼすと考えられる各因子を考慮した考察は十分ではない。

## (2) 既往の解析法と設計法

Gibson<sup>12)</sup>は、排水層の配置された盛土内間隙水圧分布の予測式を圧密方程式の解として表現し、排水層の配置計画法を検討している。菅原<sup>11)</sup>は、この解析法に基づく設計法を提案している。しかし、粘性土層における間隙水の流れを1次元と仮定しているため、合理性に欠けるきらいがあると考えられる。

Giroud<sup>13)</sup>は、ジオテキスタイルを排水材として用いる場合を対象として、解析的な研究を行っている。この研究においては、ジオテキスタイルに要求される通水性能を非常に実用的な評価式で示している。三木<sup>14)</sup>は、この解析法に基づく設計チャートを提案している。しかし、その定式化の過程において、排水層内の水圧の取り扱いに一貫性を欠くなど解析的な厳密性に欠けるため、誘導された評価式の位置づけが不明という問題点がある。

帯状千鳥に排水層を設ける場合について、バーチカルドレーンに関するBarronの式を用いる方法が提案されている<sup>15)</sup>。しかし、この解析法は水平排水層を完全排水面とする解析法であることから、その考え方に従って排水層に必要とされる通水性能を評価することはできない。

詳細に検討する方法として、Biotの2層混合体理論<sup>16)</sup>に基づく水/土骨格の連成解析法<sup>17)</sup>に従って盛立て過程の解析を行い、その排水効果を検討する方法が考えられる。しかし、盛土材の材料特性、盛土工事を行う周辺地盤の境界条件や種々の施工条件などを合理的に算定して、盛土内に配置する排水層の長さや間隔、排水層の仕様などをその計算結果のみから決定することは煩雑さを伴うと考える。

## 3. 排水効果の解析法

著者らは、現場計測によって、水平排水層が平面的に設けられた盛土内の間隙水圧の分布は2次元的で、盛土の深部側程、大きな間隙水圧が発生し、その消散が遅れることを確認した<sup>9)</sup>。粘性土を用いた盛土の安定は、排水層の有無に関わらず、盛立て直後が最も低いと考えられることから、水平排水層の効果を検討する場合、排水層の配置条件を想定して、盛立て直後における盛土深部の間隙水圧を検討することが实际的であろう。本章では、以上の場合に適用できる解析法の概要を説明する。

### (1) 解析における仮定

本研究は、自然含水比が最適含水比を大きく上回っている高含水比粘性土を対象としている。この種の土を用いた盛土施工においては、飽和度あるいは空気間隙率が締固め管理値として用いられ、飽和度90~98%、空気間隙率10~1%程度が目標値となる場合が多い<sup>18)</sup>。このよう

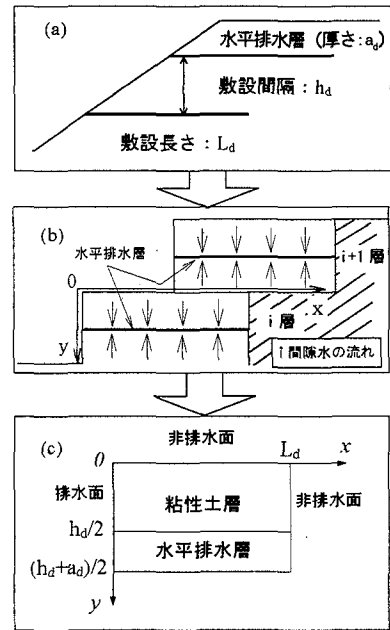


図-1 解析断面のモデル化

な高い飽和度を有する締固め粘性土の力学挙動は、比較的飽和状態の粘土に近い<sup>19)</sup>。このことから、盛土を完全飽和と仮定する。また、盛土内に間隙水圧が発生する原因として、雨水の影響なども考えられる。しかし、締固めた高含水比粘性土の透水性は一般に非常に小さいことから、盛立て荷重の増加のみを間隙水圧の発生要因として考慮する。

### (2) 盛土断面のモデル化

盛土断面のモデル化の流れを図-1に示す。まず、図-1(a)、(b)に示すように、水平排水層の配置された位置を考慮して、傾斜を有する盛土断面を複数の長方形の層の重なりとしてモデル化する。解析においては、排水層に挟まれた粘性土層内の間隙水圧は、その中央の高さで最大値を示す、すなわち、排水層に挟まれた土層内の間隙水の運動に対する重力の影響を無視できる程小さいと考える。また、排水層を配置していない盛土深部から排水層を配置した領域への浸透流は存在しないと考える。以上の考えに基づき、(b)図に示すような座標系を各層について考え、さらに解析断面の相似性を考慮すると、解析領域を図-1(c)に示すように設定できる。

### (3) 場の方程式

盛土を飽和とみなせる場合、Biot理論の系統に分類される場の方程式が、詳細性、厳密性を有しており<sup>20)~22)</sup>、それに基づく解析法も整備されている<sup>17)</sup>。しかし、排水

層の設計を、一般に数値計算を必要とするそれらの解析法のみから行うことはかなり煩雑となる。一方、Terzaghi 系の圧密方程式を多次元化した Rendulic 系の圧密方程式は理論的な厳密性を欠くものの、工学的に有用な解析解や近似解がそれに基づいて提案されている。水平排水工法的设计においては、盛土材の特性などを考慮して、長さや間隔などといった排水層の仕様を合理的に決定しなければならない。そこで、本研究においては、一次設計においては、厳密性を多少犠牲にしても、簡易性や機動性を有する解析法が有用であるという観点から、場の方程式として、以下に示す Rendulic 系の圧密方程式を用いることにした。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $u$  は  $u(x, y, t)$  で表される間隙水圧で、 $C_v$  は圧密係数である。

#### (4) 水理学的境界条件

粘性土層-排水層以外の境界条件は、図-1 に示す解析断面のモデル化の際に行った仮定に基づけば、次式で表わすことができる。なお、これらの条件式は、図-1 に示すように、傾斜を有するのり面を段切り状にモデル化した境界に対するものであることに留意する。

$$u(x=0, y, t) = u_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x=L_d, y, t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (4)$$

粘性土層-排水層間の境界条件は、Yoshikuni et al<sup>(23)</sup> にならない、排水層と粘性土層間の流量に関する連続条件を用いることによって定式化できる。まず図-2において、時間  $dt$  間に排水層内の着目要素に入る単位奥行き当たりの流量  $dV_1$  を考える。 $dV_1$  は、排水層内の流れにダルシー則を適用すると、次式で表わされる。

$$dV_1 = \frac{a_d}{2} \cdot \frac{k_d}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{y=\frac{h_d}{2}} \cdot dx \cdot dt \quad (5)$$

一方、時間  $dt$  間に粘性土層から排水層への流入量  $dV_2$  は、次式で表わされる。

$$dV_2 = -\frac{k_c}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\frac{h_d}{2}} \cdot dx \cdot dt \quad (6)$$

有効応力の変化による排水層の圧縮変形を無視すれば、連続条件より、粘性土層-排水層間の境界条件は式(7)で表わされる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{y=\frac{h_d}{2}} - \frac{2}{a_d} \cdot \frac{k_c}{k_d} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\frac{h_d}{2}} = 0 \quad (7)$$

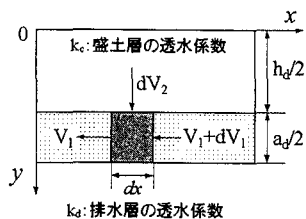


図-2 式(7)の誘導時に用いる模式図

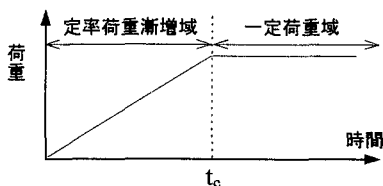


図-3 盛立て荷重の変動

#### (5) 初期条件

初期条件は、盛土深部側の排水層末端に作用する荷重に相当する間隙水圧が排水層敷設領域全体に生じるという考え方に基づいて、式(8)とする。

$$u(x, y, t=0) = u_0 \quad (8)$$

実際の盛立て荷重の変動は、図-3に示すように、定率荷重漸増域と一定荷重域にモデル化できる。本解析法においては、漸増荷重条件を、荷重漸増終了時間  $t_c$  までの時間  $t$  における間隙水圧の消散度  $U(t)$  は、時刻  $t/2$  において瞬時に発生した間隙水圧の時刻  $t$  における消散度に等しいと仮定することによって考慮する。すなわち、以上の仮定より、 $U(t)$  を次式で評価する。

$$U(t) = \frac{t}{t_c} U\left(\frac{t}{2}\right) \quad (9)$$

#### (6) 解析解の誘導

式(1)を以上に示した境界条件と初期条件のもとで解くと、その解は次式で表される (Appendix A 参照)。

$$u = \sum_m \sum_n C_{mn} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{x}{L_d}\right) \cdot \cos\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right) \cdot \exp(-A_{mn}^2 \cdot T_{hd}) \quad (10)$$

$n = 1, 3, 5, \dots, \quad m = 1, 2, \dots$

式(10)において、係数  $C_{mn}$  は、

$$C_{mn} = \frac{16 \cdot u_0 \cdot \sin \lambda_{mn}}{n\pi \cdot \{\sin(2 \cdot \lambda_{mn}) + 2 \cdot \lambda_{mn}\}} \quad (11)$$

であり、式(12)を満足する正の定数  $\lambda_{mn}$  の関数として表わされる。なお式(12)における各係数は、式(13)~(15)で表される。特に、本文ではこれ以降、排水層の透水係数  $k_d$  と排水層の厚さ  $a_d$  の積を通水性能  $\theta_d$  と呼び、 $\theta_d = a_d \cdot k_d$  で定義する。

$$\frac{1}{\tan \lambda_{mn} \cdot \lambda_{mn}} = \frac{DR_a}{m^2} \quad (12)$$

ここで、

$$DR_a = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\beta^2}{\xi} \quad (13)$$

$$\beta = 4 \cdot \frac{L_d}{h_d} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{a_d \cdot k_d}{h_d \cdot k_c} = \frac{\theta_d}{h_d \cdot k_c} \quad (15)$$

また、式(10)の係数  $A_{mn}^2$  および本解析解における時間係数  $T_{hd}$  は各々次のようである。

$$A_{mn}^2 = 4 \cdot \left\{ \lambda_{mn}^2 + \left( \frac{m\pi}{\beta} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

$$T_{hd} = C_v \frac{t}{h_d^2} \quad (17)$$

解析解は、排水層の配置条件を表わす係数  $\beta$  (式(14)) と、排水層の透水性能と盛土層の水平方向の透水量係数の比を表わす  $\xi$  (式(15)) の2つのパラメータによって一義的に算定される。 $DR_a$  は、上記  $\beta$  と  $\xi$  の関数で、水平排水層のドレーンレジスタンスの影響の大きさを表わすパラメータである。

#### (7) 解析解の妥当性の検証

菅原ら<sup>11)</sup>による計測結果を用いて、解析解の妥当性を検証する。解析対象盛土の概要を図-4に示す。図中に示す5つの計測点A~Eにおける間隙水圧の実測値と計算値の比較を表-1に示す。表中の $\theta_d$ は、菅原らの透水性能試験結果<sup>11)</sup>である。なお、 $u_0$ は次式で算定し、盛土材の単位体積重量 $\gamma$ は、従来多く報告されている火山灰質粘性土の物理特性より $1.2 \text{ tf/m}^3$ とした。

$$u_0 = \gamma \cdot h \quad (18)$$

$h$ : 排水層における最終土かぶり厚(m)

同表より、盛土の上層部においては実測より大きい値を見積もっていることが分かる。しかし、各層の $L_d$ 、 $\theta_d$ が互いに異なる条件下においても、本文で提案する解析法は、全体的な傾向を比較的良く説明している。

#### 4. 排水層の配置条件、排水材の透水性能が排水効果に及ぼす影響

解析解を支配する係数  $\beta$  および  $\xi$  は、水平排水層の設計変数に直接的に関係する。水平排水工法の適用例を見ると、用いられる盛土材の透水係数  $k_c$  は、 $10^{-8} \leq k_c \leq 10^{-4}$  (cm/s)、用いられる排水材の透水性能  $\theta_d$  は、 $10^{-2} \leq \theta_d \leq 10^1$  (cm<sup>2</sup>/s)程度であり、排水層の配置間隔を表す $h_d$ は、 $0.5 \leq h_d \leq 4.0$  (m)、排水層の長さを表す $L_d$ は、 $5 \leq L_d \leq 20$  (m)程

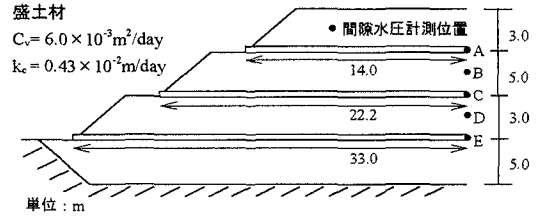


図-4 解析対象盛土(菅原ら<sup>11)</sup>)

表-1 実測値と計算値の比較

測定点	$\theta_d$ (m <sup>2</sup> /day)	$t_c^*$ (day)	実測値 (tf/m <sup>2</sup> )	計算値 (tf/m <sup>2</sup> )
A	19.00	10	0.0	1.9
B	19.00	30	4.2	6.0
C	4.32	60	4.4	4.9
D	4.32	75	11.3	10.9
E	2.16	90	10.3	11.0

\* $t_c$ : 着目点の高さから盛立て終了までに要した時間

度である。ここでは、上述の条件を、本論文で提案する解析解の係数  $\beta$ 、 $\xi$  に換算した結果と、予備的な計算結果より、 $5 \leq \beta \leq 80$ 、 $10^4 \leq \xi \leq 10^6$  の範囲で、パラメトリックな演算を行い、 $\beta$  と  $\xi$  が水平排水層の効果に及ぼす影響について検討する。

#### (1) $\xi$ の影響

$\beta=80$  すなわち  $L_d=20h_d$  の場合における、排水層内の間隙水圧の経時変化を図-5(a)(b)(c)に示す。間隙水圧の分布形状は、盛土深部側の排水層末端を最大とする半円弧状であり、 $\xi$  が大きいほど、すなわち排水層の排水機能が高いときほど、その円弧の曲率半径は大きくなり、排水層内の間隙水圧の消散が早くなることが分かる。

次に、図-5と同じ  $\beta=80$  の条件下で、のり面からの距離が盛間隙水圧の消散速度に及ぼす影響を示す。のり面からの距離  $x$  における盛土間隙水圧の平均消散度  $U_x$  は、式(10)より次式で表わされる。

$$U_x = 1 - \frac{1}{u_0 \cdot h_d} \int_0^{hd} u(x, y, t) dy \quad (19)$$

$x=L_d/4$ 、 $L_d/2$ 、 $L_d$  における  $U_x$  の経時変化を図-6に示す。同図において、 $\xi=10^4$  では、のり面からの距離によって消散速度が異なるが、 $\xi=10^6$  では、3者の挙動をほぼ同一と見なすことができる。このことは、 $\xi$  が  $10^6$  以上になると、排水層配置領域内において、盛土内間隙水の鉛直方向流れが大きく卓越することを示している。

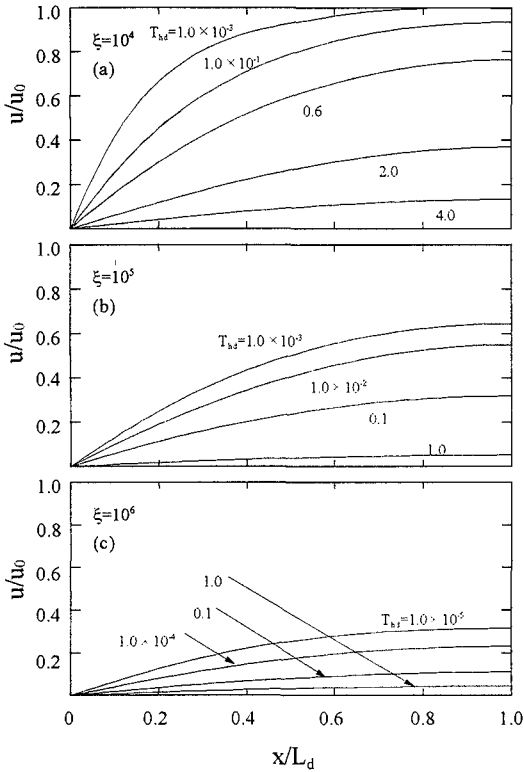


図-5 排水層内の間隙水圧分布の経時変化

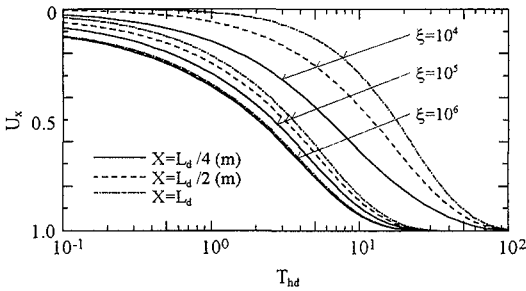


図-6  $U_x$  (式(19)) の経時変化

(2)  $\beta$  の影響

$\beta$  が排水効果に及ぼす影響について、盛土深部側の排水層末端部における間隙水圧の平均消散度  $U_e$  の経時変化より検討する。ここで  $U_e$  は次式で定義される。

$$U_e = 1 - \frac{1}{u_0 \cdot h_d} \int_0^{h_d} u(L_d, y, t) dy \quad (20)$$

$\xi=10^4$  における  $U_e$  の経時変化を図-7 に示す。この場合、 $\beta$  が排水効果に及ぼす影響は大きい。 $\xi=10^6$  の計算結

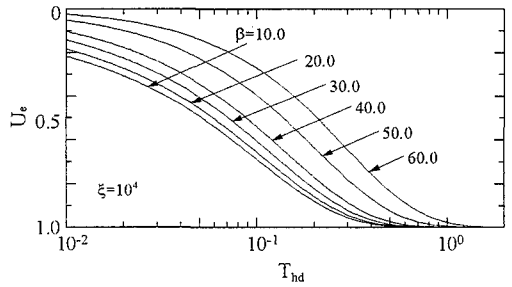


図-7  $U_e$  (式(20)) の経時変化

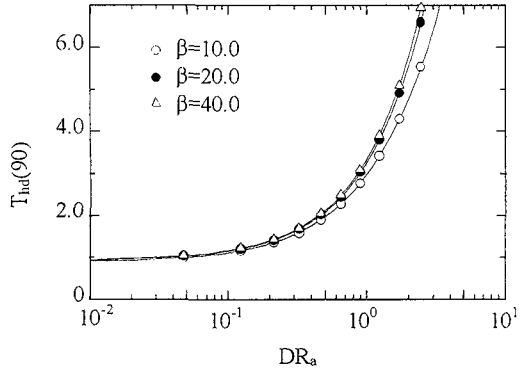


図-8  $U_e=90\%$  までの到達時間係数- $DR_d$  の関係

果は省略するが、この場合、図-6 から推察できるように  $\beta$  の影響はほとんど無視できるようになる。

5. 水平排水層に必要とされる通水性能

排水層に必要とされる通水性能  $\theta_{req}$  は、盛土材の材料特性や排水層の長さや間隔の組み合わせによって異なると考えられる。ここで、式(10) に示した解析解を基に、 $\theta_{req}$  の評価式を誘導する。

(1) 必要通水性能算定式の定式化

式(10) より明らかのように、排水効果には、 $DR_d$  のみならず  $\beta$  も単独で影響することから、代表的な  $\beta$  に対して  $U_e=90\%$  に達するまでの時間係数  $T_{hd}(90)$  と  $DR_d$  の関係を計算した。その結果を図-8 に示す。同図において、 $DR_d$  が  $10^1$  よりも小さい範囲においては、 $T_{hd}(90)$  はほぼ一定であることが分かる。 $T_{hd}(90)$  は、敷設間隔  $h_d$  で正規化された時間係数であることから、この結果は、 $DR_d < 10^1$  において、排水層の長さ  $L_d$ 、間隔  $h_d$ 、通水性能  $\theta_d$  のうち、 $h_d$  のみが排水効果に影響することを示している。一方、同図からは、 $DR_d$  が  $10^1$  よりも大きくなると、 $T_{hd}(90)$  は

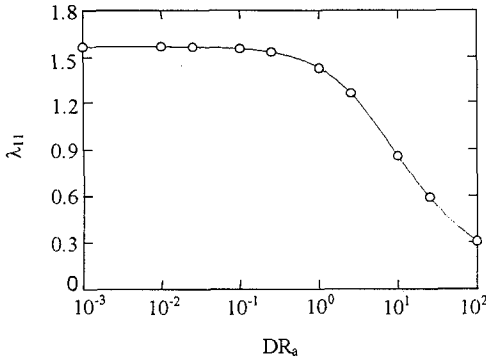


図-9  $\lambda_{11}$ - $DR_a$ 関係

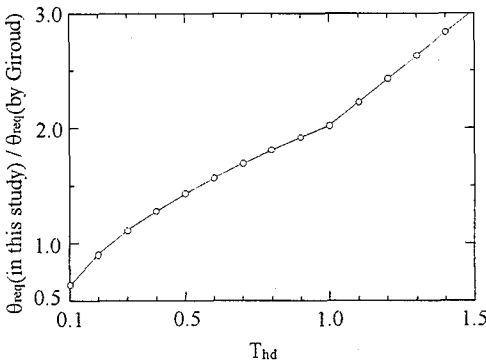


図-10 提案式とGiroud式の比較

$DR_a$ の増加に伴い大きくなり、 $\beta$ 単独の影響も大きくなる  
ことが分かる。

浅岡<sup>25)</sup>、田村<sup>26)</sup>などは、圧密解析において一次固有値  
を扱う工学的有効性を示している。以下では、解析解の  
一次固有値 $\lambda_{11}$ の数学的特性に着目して、排水層に必要と  
なる機能を具体的な式で示す。 $DR_a$ と $\lambda_{11}$ の関係を図-9  
に示す。 $\lambda_{11}$ は、 $DR_a$ が $10^1$ よりも大きくなると、排水層  
の透水性を無限大とした場合の $\lambda_{11}=\pi/2$ から急激に小さ  
くなる。以上のことは図-8に示した $T_{hd}(90)$ と $DR_a$ の関  
係に対応している。つまり、 $DR_a$ が $10^1$ よりも小さい場合  
は、排水層を完全排水条件と見なせること、またそれ以  
上の場合、排水層は完全排水面とならず、ドレーンレジ  
スタンスの影響を考慮した設計が必要になることが分  
かる。逆に、ある排水層の長さと同隔の条件で、 $DR_a$ が  
 $10^1$ より大幅に大きくなるように排水層の透水性能を大  
きくしても、排水効果は一定であり、さらにその効果を  
期待するためには、排水層の配置間隔を密にしなければ  
ならないことが分かる。

施工中確実に盛土材の圧密による強度増加を確保する  
こと、また施工後、出来るだけ早く盛土によって確保さ  
れた敷地を活用することを考えると、排水層は常に排水  
条件を保つことが望ましい。この場合、図-8、9に示  
した結果より、次の関係が満足される必要があると考  
える。

$$DR_a \leq 10^{-1} \quad (21)$$

そして、以上の条件式より、排水層に必要となる通水性  
能は式(13)より次式で表わされる。(Appendix B 参照)

$$\theta_{req} = \frac{160}{\pi^2} \left( \frac{L_d}{h_d} \right)^2 k_c h_d \quad (22)$$

ここで、必要となる通水性能を規定する評価式として  
広く使われているGiroudの提案式<sup>13)</sup>(以後、Giroud式)  
は、本文中の記号を用いて示せば、以下の通りとなる。

$$\theta_{req} = 8 \left( \frac{L_d}{h_d} \right)^2 \frac{k_c h_d}{\sqrt{T_{hd}}} \quad (10^{-6} \leq T_{hd} \leq 1) \quad (23-1)$$

$$\theta_{req} = 8 \left( \frac{L_d}{h_d} \right)^2 \frac{k_c h_d}{T_{hd}} \quad (T_{hd} \geq 1) \quad (23-2)$$

Giroud式と著者の誘導した式(22)(以後、提案式)は、基  
本的に同じパラメータで構成されているので、正規化す  
れば、容易に両式の間関係を考察できる。提案式をGiroud  
式で正規化した量と、時間係数 $T_{hd}$ との関係を図-10に  
示す。ここで、提案式は、盛土の施工期間を表す時間係  
数 $T_{hd}$ に関わらず、一定の $\theta_{req}$ をもたらすことになる。提  
案式より算定される $\theta_{req}$ は、施工期間が長くなる、すな  
わち $T_{hd}$ が大きくなるにつれて、Giroud式よりも大きな通  
水性能を排水層に要求することになることが分かる。

## (2)現場データに基づく妥当性の検証

8つの盛土における間隙水圧の計測結果を用いて、式  
(22)の有効性を考察する。検討に用いる各盛土の諸元を表  
-2に示す。検討するデータは、施工終了時の排水層末  
端領域における間隙水圧の大きさ $u_{end}$ と排水効果の評価  
パラメータ $DR_a$ の関係である。 $u_{end}$ には、ドレーンレジ  
スタンスの影響が最も顕著に表れると考えられる。

各盛土 $DR_a$ の $u_{end}$ の関係を図-11に示す。 $DR_a$ の算定  
に必要な値は、各文献に記載された物性値を用いた。同  
図より、 $DR_a=10^1$ 付近が、排水層が完全な排水条件を保  
って機能するかどうかのしきいになっていることが分か  
る。このことは、先に示した $DR_a$ と $\lambda_{11}$ の関係より得られ  
た知見と一致する。種々の条件の異なる盛土について、  
以上の結果が得られたことから、式(22)に示した必要通水  
性能の算定式は有効と考えられる。

表-2 検討に用いた各盛土の諸元

	文献	H(m)	L <sub>d</sub> (m)	h <sub>d</sub> (m)	k <sub>c</sub> (cm/s)	θ <sub>d</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	排水材(仕様)*
A	菅原ら(1988) <sup>11)</sup>	11.0	14.0	4.0	5.0×10 <sup>-6</sup>	2.20	やし繊維 (a <sub>f</sub> =9mm, w=920g/m <sup>2</sup> )
			22.2			0.50	
			33.3			0.25	
B	久楽ら(1988) <sup>9)</sup>	11.0	12.0	2.3	1.0×10 <sup>-8</sup>	0.02	ジオテキスタイル (a <sub>f</sub> =3mm, w=300g/m <sup>2</sup> )
			13.0				
C	久楽ら(1988) <sup>9)</sup>	11.0	12.0	2.0	1.0×10 <sup>-8</sup>	0.30	碎石 (a <sub>f</sub> =30cm)
			13.0				
D	三木ら(1990) <sup>10)</sup>	7.0	13.0	0.3	5.0×10 <sup>-8</sup>	0.01	ジオテキスタイル (a <sub>f</sub> =3mm, w=300g/m <sup>2</sup> )
			18.0				
E	三木ら(1990) <sup>10)</sup>	7.0	13.0	0.6	5.0×10 <sup>-8</sup>	0.01	ジオテキスタイル (a <sub>f</sub> =3mm, w=300g/m <sup>2</sup> )
			18.0				
F	横田ら(1995) <sup>27)</sup>	7.5	13.6	2.5	1.0×10 <sup>-8</sup>	0.01	やし繊維 (a <sub>f</sub> =20mm, w=920g/m <sup>2</sup> )
G	Y.Miyata et. al. (1998) <sup>6)</sup>	18.0	70.0	5.0	1.0×10 <sup>-7</sup>	0.32	碎石 (a <sub>f</sub> =30cm) + ジオテキスタイル (a <sub>f</sub> =3mm, w=300g/m <sup>2</sup> )
H	Y.Miyata et. al. (1998) <sup>6)</sup>	18.0	70.0	5.0	1.0×10 <sup>-7</sup>	0.50	碎石 (a <sub>f</sub> =50cm)

\* 排水層の使用において、a<sub>d</sub>は排水層の厚さを、wはジオテキスタイルの単位面積当たりの重さを表す。

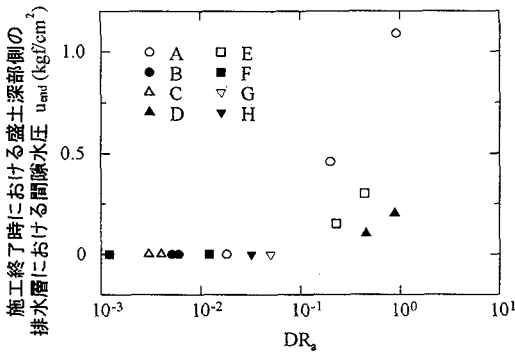


図-11 DR<sub>d</sub>とu<sub>int</sub>の関係

## 6. 結論

本論文は、粘性土盛土内における水平排水層の排水効果の評価方法について解析的に検討を行った。得られた結論をまとめれば以下のとおりである。

- (1) 1次設計への適用性を意識して、水平排水層を設けた盛土深部側における間隙水圧の予測式を定式化した。解析解は、排水層の配置条件を表わすβと排水層の通水性能と粘性土層の水平方向の透水量係数の比を表わすξの、それぞれ無次元量の関数として表わされる。
- (2) 実大盛土における間隙水圧の計測値を、本文に示した解析解よりシュミレートして、解析解の妥当性を明らかにした。
- (3) 種々の因子を変化させた計算結果において、ξ>10<sup>6</sup>の場合、βが排水効果に及ぼす影響は小さい。
- (4) 固有値 λ<sub>nm</sub>のうち、間隙水圧の消散速度を支配する一

次固有値に着目した計算の結果、DR<sub>d</sub><10<sup>1</sup>の条件下において、ドレーンレジスタンスの影響を無視できる。(5)(4)の知見に基づいて、排水材に必要な水平方向の通水性能(透水量係数)の評価式を定式化した。(6) 8つの異なる実大盛土の計測結果とDR<sub>d</sub>の関係を整理して、(4)に示した知見の妥当性を明らかにした。

解析解の誘導においては、一次設計への適用性を有する解析法を確立することを念頭において、地盤材料の非線形な力学的性質、水/土骨格の連成効果を軽視した場の方程式を用い、盛土断面に関する幾何学的条件や漸増荷重条件に対しては、あらいモデル化を行った。1. で述べたように、本文で示した解析法をもとにした1次設計を行い、次いで有限要素法による水/土骨格の連成効果を考慮した数値解析を行って、合理的な設計断面を決定することが実際的と考えられる。

## Appendix A

この問題は、境界条件が同位性を有することから変数分離法で解くことができる。u = u(x, y, t) が自明でない解であることを考慮すると、式(1)~(8)より、u は次式となる。

$$u = C \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{2 \cdot L_d} \cdot x\right) \cdot \cos(a_1 \cdot y) \cdot \exp(-a_2^2 \cdot t) \quad (A-1)$$

ここで、a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>は、積分定数

上式を式(1)に代入し、a<sub>1</sub>・h<sub>d</sub>=λとすれば、次式が得られる。

$$\frac{1}{\tan \lambda \cdot \lambda} = \frac{\beta^2}{(n \cdot \pi)^2 \cdot \xi} \quad (A-2)$$

(n=1,3,⋯,2k-1,k:整数)

ここで、 $\tan \lambda_n$  は周期関数であることから、上式を満たす  $\lambda_n$  は無限個存在する。それぞれの  $n$  に対する正根を小さい方から順に  $\lambda_{1n}, \lambda_{2n}, \dots, \lambda_{mn}$  とすると、 $\lambda_{mn}$  は、式(13)を満足する定数となり、特解は次式で表わされる。

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C' \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{x}{L_d}\right) \cdot \cos\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right) \cdot \exp(-A_{mn}^2 \cdot T_{hd}) \quad (m=1,2,\dots,k) \quad (A-3)$$

次に初期条件を満足するように、 $C'$  を決定する。式(A-3)において、

$$E_n = \sum_{m=1}^{\infty} C' \cdot \cos\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right) \quad (A-4)$$

とおけば、

$$u_0 = \sum_{m=1}^{\infty} E_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{x}{L_d}\right) \quad (A-5)$$

よって、

$$E_n = \frac{2}{L} \int_0^{2L_d} u_0 \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2} \cdot \frac{x}{L_d}\right) dx = \frac{4u_0}{n\pi} \quad (A-6)$$

さらに式(A-3)において、 $\cos\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right)$  が区間  $(0, h_d/2)$

において重み関数  $p(y)=1$  に対して直行性を示す性質を利用すると係数  $C_{mn}$  は次式であらわされ、定積分を実行すると、式(14)が得られる。

$$C_{mn} = \frac{\int_0^{h_d/2} E_n \cos\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right) dy}{\int_0^{h_d/2} \cos^2\left(2\lambda_{mn} \cdot \frac{y}{h_d}\right) dy} \quad (A-7)$$

## Appendix B

式(13)、(21)より次の不等式が得られる。

$$\xi = \frac{\theta_d}{h_d \cdot k_c} > 10 \cdot \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^2 \quad (B-1)$$

ここで、 $\theta_d = \theta_{req}$  とし、上式を  $\theta_{req}$  に関する式に変形すると、式(22)が得られる。

## 参考文献

- 1) 三木博史：高含水比粘性土を用いた盛土の補強方法，土と基礎，Vol.41, No.9 (428), pp.69-76, 1993.
- 2) 山内豊聡：研究展望：ジオテキスタイル，土木学会論文集，No.370/III-5, pp.27-38, 1993.
- 3) 土質工学会：盛土の調査・設計から施工まで，1990.
- 4) 宮田喜壽，木暮敬二，落合英俊：ジオテキスタイルの盛土内間隙水圧の排水効果に関する解析的検討，第9回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集，pp.47-57, 1994.

- 5) 宮田喜壽，木暮敬二，亀山 誠，谷澤房郎，小笠原邦洋：不織布の水平排水材としての適用性に関する一考察，第10回ジオシンセティックシンポジウム発表論文集，pp.1-10, 1995.
- 6) Miyata, Y., Kogure, K., Nomoto, K., Tanizawa, F. and Ogasawara, K.: Pore Pressure behavior in the high embankment with volcanic cohesive soil placed horizontal drainage, Proc. of Int. Sym. on problematic soils (accepted), 1998.
- 7) 松井正弘，土屋忠三，三島信雄：道路盛土の変形と対策—火山灰粘性土の測定例を中心に—，土と基礎，Vol.20-12(178), pp.11-16, 1972.
- 8) 熊谷英哉，原 精一，大阪智通：高含水比火山灰質土による高盛土の設計・施工，土木学会論文集，第391号/VI-8, pp.24-33, 1988.
- 9) 久楽勝行，三木博史，藤藤浩一郎：スパンボンド不織布による盛土内浸透水の排水効果に関する現場計測，第3回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集，pp.116-121, 1988.
- 10) 三木博史，藤藤浩一郎，土井鐵徳，平井卓也：高含水比粘性土を用いた高盛土におけるジオテキスタイルの利用，ジオテキスタイルの適用性に関するシンポジウム発表論文集，pp.147-152, 1990.
- 11) 菅原紀明，石川 昭：ジオテキスタイルの平面方向の透水試験装置とその結果の応用，第3回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集，pp.116-121, 1988.
- 12) Gibson, R. E.: The efficiency of horizontal drainage layers for accelerating consolidation of clay embankments, Geotechnique, Vol.18, pp.327-335, 1968.
- 13) Giroud, J. P.: Geotextile drainage layers for soil consolidation, Civil engineering for practicing and design engineers, Vol.2, pp.275-295, 1983.
- 14) 三木博史，福田直三，中村和之，岩崎高明：粘性土盛土の圧密促進用排水材の配置設計チャートの提案，第27回土質工学会講演概要集，pp.2025-2026, 1992.
- 15) ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル，(財)土木研究センター，1993.
- 16) Biot, M. A.: Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal Applied Physics, Vol.33, pp.1482-1498, 1962.
- 17) 例えば，赤井浩一，田村 武：弾塑性構成則による多次元圧密の数値解析，土木学会論文報告集，No.269, pp.95-104, 1978.
- 18) 関東ロームの土工—その土質と設計・施工—，高速道路調査会，1973.
- 19) 例えば，土木学会編：新体系土木工学17，土の力学(Ⅲ)—特殊土，締固め，土と水—(吉国 洋，宇野尚雄，柳沢栄司・共著)，第2章 火山灰質粘性土，pp.3-33, 技報堂出版，1984.
- 20) 吉国 洋：多次元圧密理論と，その軸対象問題への適用，



- 東京工業大学学位論文, 1973.
- 21) 田村 武: Biot の圧密方程式に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第274号, pp.57-67, 1978.
- 22) 大津宏康, 大西有三, 亀村勝美: 間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察, 土木学会論文集, No.457/III-21, pp.87-96, 1992.
- 23) Yoshikuni, H. and Nakanodo, H.: Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, Soils and Foundations, Vol.14, No.2, pp.35-46, 1974.
- 24) 山口柏樹, 大根嘉男: フィルダムの設計および施工, 技報堂, 1973.
- 25) Asaoka, A.: Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87-101, 1978.
- 26) 田村 武: 多次元圧密問題における固有値問題とその応用, 土木学会論文報告集, 第293号, pp.79-89, 1980.
- 27) 横田聖哉, 三島信雄, 星野克之: 火山灰質粘性土を用いた高盛土の施工事例, 火山灰質土の性質とその設計, 施工に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.271-278, 1995.

(1997. 2. 4 受付)

## EVALUATION METHOD OF DRAINAGE EFFECT OF HORIZONTAL DRAINAGE FOR EMBANKMENT WITH HIGH WATER CONTENT COHESIVE SOIL

Yoshihisa MIYATA, Keiji KOGURE and Hidetoshi OCHIAI

In the construction of embankment with high water content cohesive soil, placing horizontal drainage layers are effectiveness for stabilizing the embankment. However, analysis method for the design has not been established enough. In this paper, the analysis method of drainage effect is proposed. Its effectiveness is proved by comparing field observation data and analysis results, and the effect of some design condition on the drainage effect are investigated based on some analysis results. Additionally, simple equation to evaluate the requested permeability for horizontal drainage is proposed. In the equation, requested permeability is evaluated from placing condition of horizontal drainage and permeability of fill material. Its effectiveness is proved using 8 kinds of field observation data.