

砂質盛土内の水の流れとその崩壊に関する研究*

STUDY ON THE FLOW OF WATER AND THE COLLAPSE OF SANDY EMBANKMENT

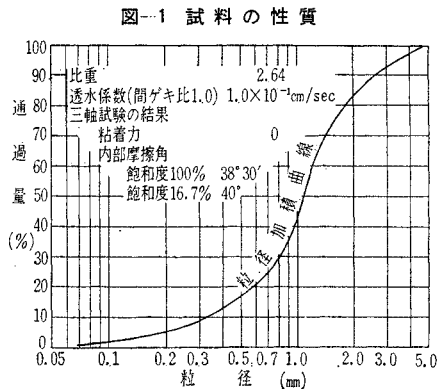
内田 一郎**・鈴木 敦巳***・谷口 嘉紀****

By Ichiro Uchida, Atsumi Suzuki and Yoshinori Taniguchi

1. まえがき

盛土内の水の流れおよびその崩壊に関しては、すでに多くの研究がなされているが、ここでは盛土内の浸透水に着目して、その水にもとづく水位の上昇と盛土の崩壊の機構を実験的に調べ、さらに理論的な検討を加えてみた。

盛土の試料としては、実験時の崩壊およびその後の解析を容易にするために、九州大学工学部構内の粗砂を水洗したものを使用した。その粒径加積曲線、比重、透水係数および三軸試験の結果を示したものが図-1である。



実験は、

- i) 前述の試料でつくった一様な盛土
- ii) 盛土の上部に水平しゃ水膜を入れ、かつ縦下水を設けたもの

に対して、盛土上部から水を浸透させて行なった。そして盛土内の水の流れの状況およびのり面の崩壊状況について、実験的にまた理論的に検討してみた。

2. 実験の方法

実験は図-2、写真-1に示すような装置を使用して行なった。すなわち木製の前面ガラス張りの実験槽の中

図-2 実験装置要図

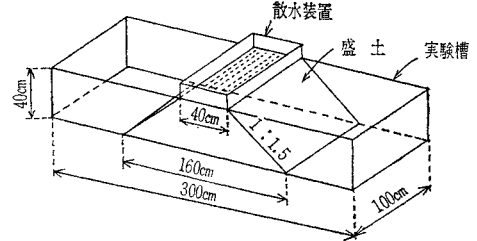
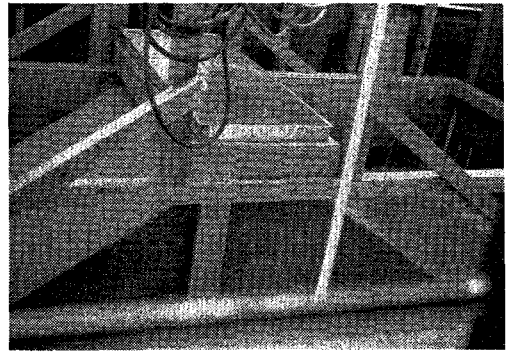


写真-1 実験装置



に盛土して、その上に散水装置を置き、盛土の天端だけに散水するようにした。このように天端だけに散水したのは、後の理論的な取り扱いを容易にするためであるとともに、盛土内にはいり込む水が主として天端にたまったものであると考えられるためである。盛土の寸法は図-2に示すように、天端幅 40 cm、高さ 40 cm、底幅 160 cm、またそののり勾配は 1.5 割である。なお、実験槽の前面ガラスの盛土断面に当たる部分には縦横に 5 cm 間隔の直線を引き、実験中の水の浸透状況を観察しやすくした。水は散水量の変動を避けるために、上水道から水頭一定の屋上のタンクにあげて、そこから散水装置に供給した。

実験はつぎの 8 つの場合について行なった。これらを図示したものが図-3~図-7である。

Ex-1, Ex-2, Ex-3, Ex-4: 前述の盛土用試料だけで盛土したもの(図-3 参照)

Ex-5: のり尻にフィルターとして高さ 10 cm の三角形断面に碎石を入れたもの(図-4 参照)

Ex-6: のり尻にフィルターとして高さ 5 cm の三角

* 土木学会第 19 回年次学術講演会(昭 39.5)において発表

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 運輸技官 運輸省港湾技術研究所

**** 九州大学助手 工学部土木工学教室

図-3 盛土の構造 (Ex-1~Ex-4)

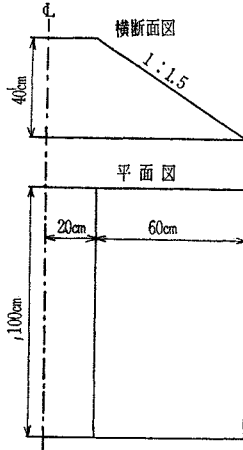


図-4 盛土の構造 (Ex-5)

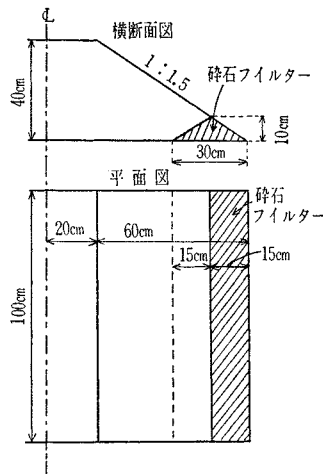


図-5 盛土の構造 (Ex-6)

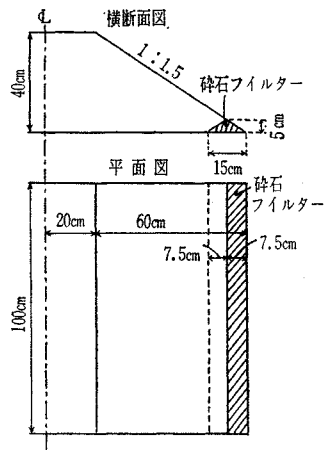


図-6 盛土の構造 (Ex-7)

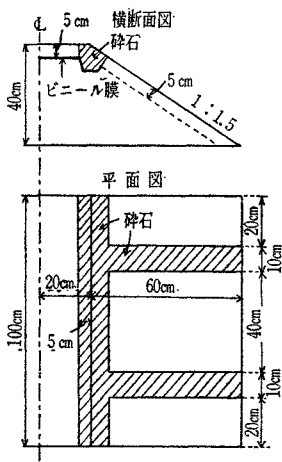


図-7 盛土の構造 (Ex-8)

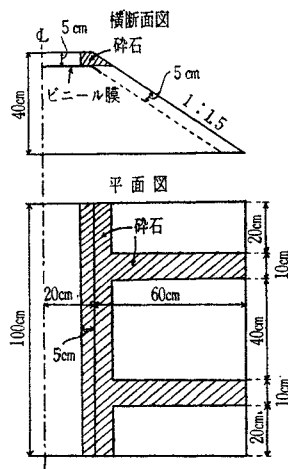
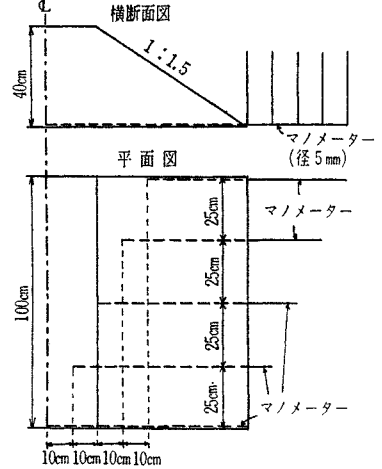


図-8 マノメーターの配置図 (Ex-1~Ex-6)



形断面に碎石を入れたもの (図-5 参照)

Ex-7: 天端から 5cm の深さのところをビニール膜を敷き、のり肩に碎石集水溝を、またのり面に碎石排水溝を設けたもの (図-6 参照)

Ex-8: 天端から 5cm の深さのところをビニール膜を敷き、このビニール膜をのり肩まで伸ばして溝状につくり、その上に碎石集水溝を、またのり面に碎石排水溝を設けたもの (図-7 参照)

フィルターあるいは集水溝、排水溝に使った碎石は径 10~20mm のものである。

測定は、

- i) 実験前の盛土の重量および含水比
- ii) 盛土内の水位の時間的变化
- iii) 崩壊あるいはつり合いにいたるまでの時間
- iv) 実験直後の盛土の含水比

などについて行なった。

水位の測定は 図-8、図-9 に示す径 5mm の L 形

のガラス管マノメーターによったが、実験終了後盛土を掘って地下水面を露出させることによって点検を行なった。また、ガラス面にあらわれる水の浸透状況を 1分ご

図-9 マノメーターの配置図 (Ex-7~Ex-8)

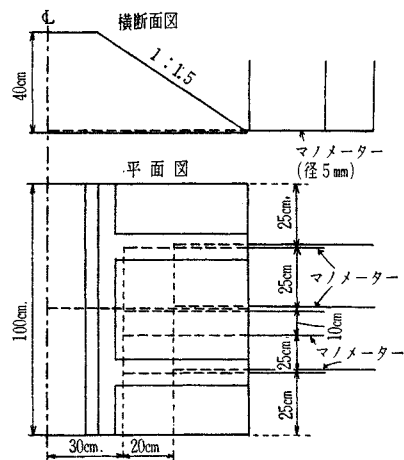


表-1 散水量および実験前の盛土の状態

| 実験の種類 | 散水量 (cc/cm ² /sec) | 乾燥密度 (g/cm ³) | 間げき比 | 含水比 (%) |
|-------|----------------------------------|------------------------------|------|---------|
| Ex-1 | 0.036 | 1.36 | 0.94 | 2.33 |
| Ex-2 | 0.082 | 1.44 | 0.83 | 1.31 |
| Ex-3 | 0.082 | 1.34 | 0.97 | 3.38 |
| Ex-4 | 0.082 | 1.49 | 0.77 | 2.24 |
| Ex-5 | 0.082 | 1.44 | 0.83 | 1.96 |
| Ex-6 | 0.082 | 1.52 | 0.74 | 1.49 |
| Ex-7 | 0.082 | 1.52 | 0.74 | 2.53 |
| Ex-8 | 0.082 | 1.37 | 0.93 | 5.00 |

とに白墨で記録し、さらに写真、観察などによって現象の把握に努めた。

表-1 は散水量、実験前の盛土の状態すなわち乾燥密度、間げき比、含水比を示したものである。

3. 実験の結果

Ex-1~Ex-4 は同じ構造の盛土であるが、Ex-1 だけは散水量が他に比べて少なかったため水の流れが定常状態となり、崩壊を生じなかった。Ex-2, Ex-3 の2つはだいたい同じような経過をたどって崩壊にいたった。すなわち散水をはじめて5'(Ex-2) および4'40"(Ex-3)後に、写真-2 にみられるようにのり尻から水が浸出しはじめ、時間の経過とともにのり面が下方から上方に向けてぬれていった。のり尻から6~7cm程度までぬれると、のり尻のわずかの高さ(1~2cm)の部分がまず浸透圧によって流動化してくずれ(散水開始後6'15"(Ex-2), 6'35"(Ex-3)経過)、それが拡大していった(写真-2 のり尻からの水の浸出状況(マンメーターのある側))

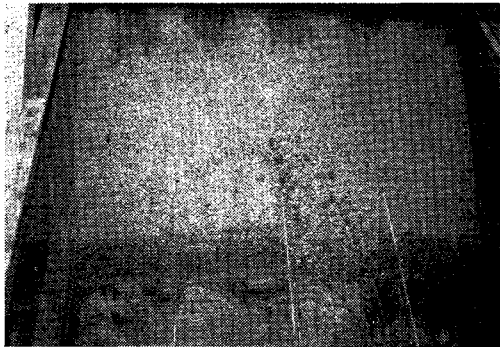
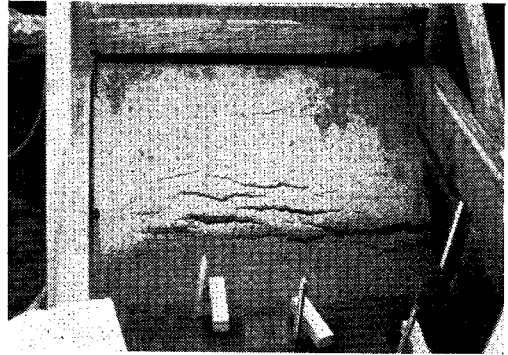


写真-3 のり尻の流動化状況 (マンメーターのない側)



写真-4 崩壊状況 (マンメーターのある側)



真-3 参照)。そしてのり面が下から1/3ぐらいいでぬれたときに(散水開始後9'20"(Ex-3)経過、Ex-2は時間不明)、本格的な崩壊が起こった。写真-4はその状況を示したもので、のり尻をとおり円弧すべりのように思われた。Ex-4では、5'30'でのり尻からの水の浸出がはじまり、6'で崩壊を生じた。この崩壊はEx-2, Ex-3の二度目の崩壊と同程度の大きさのものである。のり尻の流動化現象も途中にあったものと思われるが、はっきり認めることができなかった。

Ex-5, Ex-6は、のり尻の碎石フィルターの効果があって崩壊は起こらず、水は5'2"(Ex-5)および5'20"(Ex-6)でのり尻に達し、さらにその流れは9'(Ex-5)および14'(Ex-6)でつりあいの状態に達した。写真-5はそのときのEx-5の状況を示したものである。しかしEx-6では、実験終了後、盛土内の含水比をはかるために堤体にふれた瞬間に大きく崩壊した。これはEx-6においてはフィルターが十分でなかったためと考えるよ

ろう。Ex-7, Ex-8は、構造が悪かったために排水施設の効果があらわれずに崩壊した。Ex-7では、水がのり面の排水溝にはいる前に、のり尻から盛土内に浸透してしまい、のり面を崩壊した。またEx-8では、のり面の排水溝までは水を導くことができたけれども、のり面の排水溝をつたわってのり尻までゆきつけず、途中で盛土内に浸透して崩壊を生じた。のり尻の流動崩れはEx-7で5'10", Ex-8で6'20", のり面の全面的な崩壊はEx-7

写真-5 Ex-5の流水後の状況

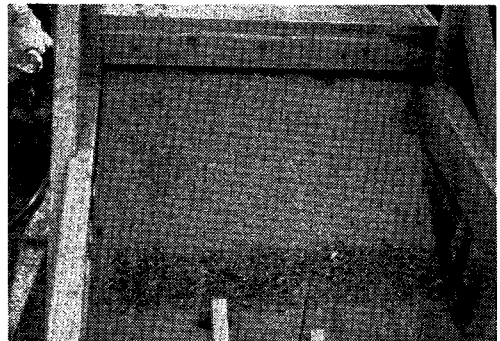
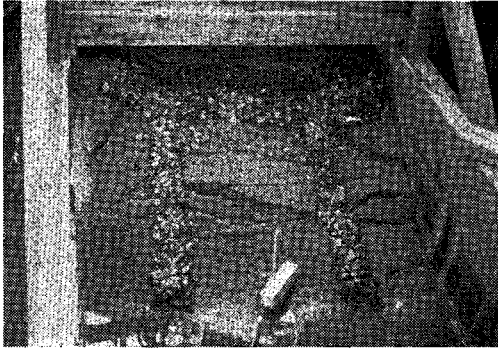


写真-6 Ex-8 の崩壊状況



で 5'30", Ex-8 で 9' 経過して後である。写真-6 は、Ex-8 の崩壊状況を示したものである。

水を流しはじめてからその浸透の状況を、だいたい1分ごとにガラス面に白墨で書きとめた。また、水位はマンومترで測定したが、初期においてはマンومترへの水の供給量が不足だったためか、不正確であった。約5分経過以後の測定値はほぼ信頼してよからう。これらの浸透の状況および水位の変化状況の例を示したものが図-10、図-11 である。2', 3', 4', ...などは流水開始後の時間を示す。

Ex-1 を除く各実験について、崩壊時あるいは水の流れが定常状態に達したものはそのときの水位と土の含水比の測定値を示したものが図-12 である。測定は左右対称に行なっているが、図に示したものはその平均値で

図-10 水の浸透および水位の変化状況 (Ex-4)

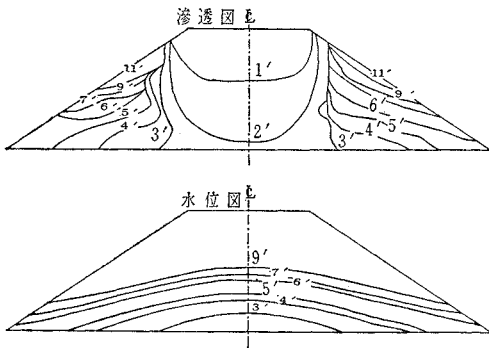


図-11 水の浸透および水位の変化状況 (Ex-6)

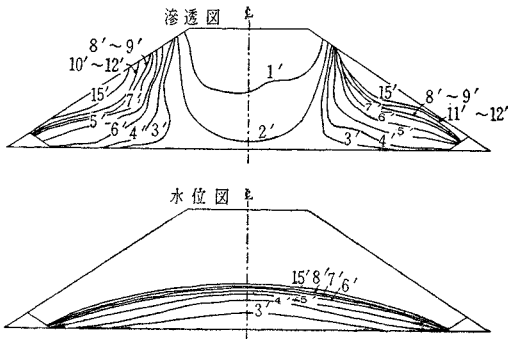
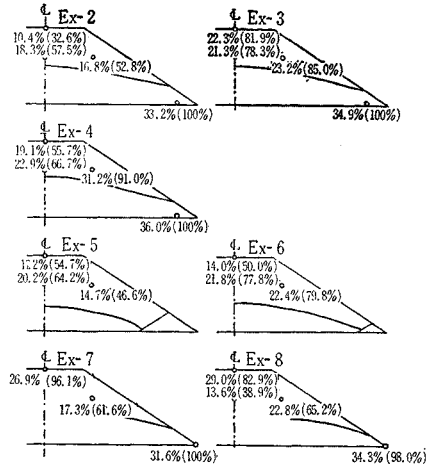


図-12 崩壊時あるいは定常的水位および土の含水比 (() 内は飽和度)



ある。フィルターを入れた Ex-5, Ex-6 においては、定常状態に達したときの水位が他の場合に比べて当然のことながら低くなっている。なお、崩壊したものはわずかながらであるが以後の水位およびその勾配の増加が観測された。

4. 理論的な検討

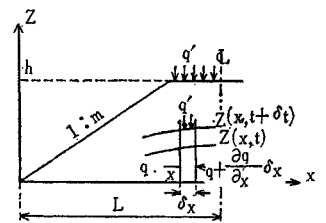
(1) 水位の上昇について

a) 基本式の誘導 基本式はつぎに示すような仮定の下に誘導した。

- i) 盛土内の間げきは均等である。
- ii) 天端からの水は均等に鉛直方向にだけ浸透する。
- iii) 盛土内の地下水面以下の水は飽和して、中央からのり尻に向かってダルシーの法則にしたがって流れる。

いま、図-13 のようにのにり尻を原点とした座標を設ける。ある点 x について、微小区間 δx を考え、この部分を出入する水量とこの部分における微小時間 δt の間の水位の

図-13 盛土内の水の流動状況



変化量とを考慮すると、つぎのような連続の式が得られる。なお、盛土の奥行は単位厚さを考える。

$$\begin{aligned} & \left(q + \frac{\partial q}{\partial x} \delta x \right) \delta t - q \delta t + q' \delta x \delta t \\ & = n(1 - S_r) \frac{\partial z}{\partial t} \delta t \delta x \end{aligned}$$

これより、

$$\frac{\partial q}{\partial x} + q' = n(1 - S_r) \frac{\partial z}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

q : x 断面より流出する流量
 q' : 上部からの単位面積あたりの給水量
 n : 土の間げき率
 S_r : 飽和度

z : x 点における水位
 ここでつぎのダルシーの法則が成り立つものとする。

$$q = k \frac{\partial z}{\partial x} z \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

k : 土の透水系数

式 (2) を式 (1) に入れると、

$$\frac{k}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (z^2) + q' = n(1-S_r) \frac{\partial z}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

$z^2 = y$ とおいて、

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{n(1-S_r)}{k\sqrt{y}} \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{2}{k} q' \dots\dots\dots (4)$$

水深の変動があまり大きくないと考えて、

$$\sqrt{y} = D \text{ (定数)}$$

とおき、

$$\frac{n(1-S_r)}{kD} = a \text{ (定数)}$$

とすると、式 (4) はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = a \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{2}{k} q' \dots\dots\dots (5)$$

q' は 図-14 に示すようにつぎのような値をとる。

$$q' = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < mh) \\ q' & (mh < x \leq L) \end{cases}$$

したがって式 (5) はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \begin{cases} a \frac{\partial y}{\partial t} & (0 \leq x < mh) \\ a \frac{\partial y}{\partial t} - K & (mh < x \leq L) \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $K = \frac{2q'}{k}$

この式 (6) にもとづいて、以下の各場合を解いてみよう。

① 均質な盛土における定常状態: このときは、図-15 のように (x_e, z_e) 点で地下水面がのり面を切るものとする。 (x_e, z_e) 点での流線がのり面勾配と一致するものとすれば、この (x_e, z_e) 点において立てた鉛直面内を流れる水量は、 $L-mh$ の間を天端より流下してくる水量に等しいことからつぎの式が成立つ。

$$k \cdot \frac{1}{m} z_e = q'(L-mh)$$

これより、

図-14 盛土の寸法

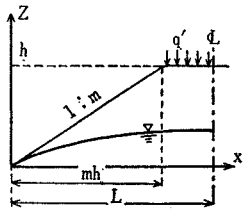
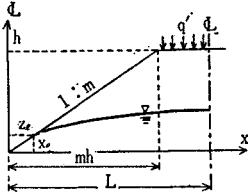


図-15 定常状態のときの流れの状況



$$\left. \begin{aligned} z_e &= \frac{mq'}{k} (L-mh) = \frac{mK}{2} (L-mh) \\ x_e &= mz_e = \frac{m^2 q'}{k} (L-mh) = \frac{m^2 K}{2} (L-mh) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

また、 $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ であるから式 (6) はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < mh) \\ -K & (mh < x \leq L) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

この式 (8) を、

$$\begin{cases} y(x_e) = z_e^2, & \frac{\partial y}{\partial x}(L) = 0 \\ y, \frac{\partial y}{\partial x} \text{ はいずれも } x = mh \text{ で連続} \end{cases}$$

の条件で解く。

いま、

$$y = \begin{cases} C_1 x + C_2 & (0 \leq x < mh) \\ -\frac{K}{2} x^2 + C_3 x + C_4 & (mh < x \leq L) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

とおき、上述の条件を使って定数を定めるとつぎのようになる。

$$\begin{aligned} C_1 &= K(L-mh) \\ C_2 &= z_e^2 - K(L-mh)x_e \\ C_3 &= KL \\ C_4 &= z_e^2 - K(L-mh)x_e - \frac{K}{2} m^2 h^2 \end{aligned}$$

これを式 (9) に入れるとつぎの解を得る。

$$y = \begin{cases} K(L-mh)x + z_e^2 - K(L-mh)x_e \\ -\frac{K}{2} x^2 + KLx + z_e^2 - K(L-mh)x_e - \frac{K}{2} m^2 h^2 \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

② 均質な盛土における非定常状態: この場合式 (6) をつぎの条件で解くことにする (図-14 参照)。なお、この条件中 $y(0, t) = 0$ は、解を求める便宜上りの尻での水位は常に 0 と考えたためである。

$$\begin{cases} y(x, 0) = 0, & y(0, t) = 0, & \frac{\partial y}{\partial x}(L, t) = 0 \\ y, \frac{\partial y}{\partial x} \text{ はいずれも } x = mh \text{ で } x, t \text{ の連続関数} \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

式 (6) を解くために、

$$y = \alpha y_1, \quad x = \beta x_1, \quad t = \tau t_1$$

とおきかえるとつぎのようになる。

$$\frac{\alpha}{\beta^2} \frac{\partial^2 y_1}{\partial x_1^2} = \begin{cases} \frac{\alpha \alpha}{\tau} \frac{\partial y_1}{\partial t_1} & (0 \leq x_1 < \frac{mh}{\beta}) \\ \frac{\alpha \alpha}{\tau} \frac{\partial y_1}{\partial t_1} - K & (\frac{mh}{\beta} < x_1 \leq \frac{L}{\beta}) \end{cases}$$

さらに $\frac{\alpha}{\beta^2} = \frac{\alpha \alpha}{\tau} = K$, すなわち $\alpha = \beta^2 K$, $\tau = \beta^2 a$ と

おき、 $\frac{L}{\beta} = l$ とすると、

$$\frac{\partial^2 y_1}{\partial x_1^2} = \begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial t_1} & \left(0 \leq x_1 < \frac{mh}{\beta}\right) \\ \frac{\partial y_1}{\partial t_1} - 1 & \left(\frac{mh}{\beta} < x_1 \leq l\right) \end{cases} \dots\dots(12)$$

$x = mh$ で $x_1 = 1$ とすると $\beta = mh$ となり、したがって、

$$\left. \begin{aligned} y &= m^2 h^2 K y_1, & x &= m h x_1 \\ t &= m^2 h^2 a t_1, & L &= m h l \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

式 (12) に対して $\frac{mh}{\beta} = 1$ とし、 y_1, x_1, t_1 を改めて y, x, t とおきかえるとつぎの式を得る。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \begin{cases} \frac{\partial y}{\partial t} & (0 \leq x < 1) \\ \frac{\partial y}{\partial t} - 1 & (1 < x \leq l) \end{cases} \dots\dots(14)$$

この式 (14) が式 (6) に相当するもので、前述の条件 (11) はつぎのようになる。

$$\left\{ \begin{aligned} &y(x, 0) = 0, \quad y(0, t) = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x}(l, t) = 0 \\ &y, \frac{\partial y}{\partial x} \text{ はいずれも } x=1 \text{ で } x, t \text{ の連続関数} \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

いま、 $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial y}{\partial t}$ の解を Y 、式 (14) で $\frac{\partial y}{\partial t} = 0$ としたときの解を y^* とすると、式 (14) の解は、

$$y = y^* + Y \dots\dots(16)$$

で与えられる。

まず y^* を求めてみる。式 (14) において $\frac{\partial y}{\partial t} = 0$ とすれば、

$$\frac{\partial^2 y^*}{\partial x^2} = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < 1) \\ -1 & (1 < x \leq l) \end{cases}$$

したがって y^* はつぎのようによくすることができる。

$$y^* = \begin{cases} a_1 x + b_1 & (0 \leq x < 1) \\ -\frac{1}{2} x^2 + a_2 x + b_2 & (1 < x \leq l) \end{cases}$$

式 (15) の条件より $a_1 = l - 1, b_1 = 0, a_2 = l, b_2 = -\frac{1}{2}$ が求まる。したがって、

$$y^* = \begin{cases} (l-1)x & (0 \leq x < 1) \\ -\frac{1}{2} x^2 + lx - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2} (l-x)^2 + \frac{1}{2} (l^2-1) & (1 < x \leq l) \end{cases} \dots\dots(17)$$

つぎに $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial y}{\partial t}$ の解 Y を求める。この式は熱伝導の式であるから一般に、

$$Y = \sum_p e^{-p^2 t} (A_p \cos px + B_p \sin px)$$

で与えられる。

$Y(0, t) = 0$ (式 (15)) の条件によって、

$$A_p = 0$$

$$\therefore Y = \sum_p B_p e^{-p^2 t} \sin px$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = \sum_p p B_p e^{-p^2 t} \cos px$$

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial x}\right)_{x=l} = 0 \text{ (式 (15)) により,}$$

$$\sum_p p B_p e^{-p^2 t} \cos pl = 0$$

$$\therefore p=0 \text{ または } p=(2n+1)\frac{\pi}{2l} \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

$p=0$ では $Y=0$

$p=(2n+1)\frac{\pi}{2l}$ では、

$$Y = \sum_{n=0}^{\infty} C_n e^{-\left\{(2n+1)\frac{\pi}{2l}\right\}^2 t} \sin(2n+1)\frac{\pi}{2l} x \quad (0 \leq x \leq l) \dots\dots(18)$$

式 (18) の C_n を求めるためにつぎのようになる。
 $y=(x, 0) = 0$ (式 (15)) であるから、式 (16) より、

$$Y(x, 0) = -y^*(x)$$

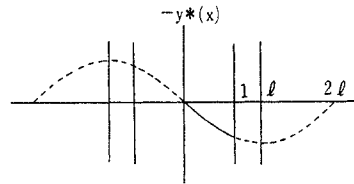
式 (18) において $t=0$ とすれば、

$$\sum_{n=0}^{\infty} C_n \sin(2n+1)\frac{\pi x}{2l} = -y^*(x) \quad (0 \leq x \leq l) \dots\dots(19)$$

つぎに、

$$-y^*(x) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \sin m \frac{\pi x}{2l} \quad (-2l < x < 2l)$$

図-16 $-y^*(x)$ の拡張



として、 $-y^*(x)$ を 図-16 のように拡張してフーリエ級数に展開すると、

$$C_m = \frac{1}{2l} \int_{-2l}^{2l} \{-y^*(x)\} \sin m \frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda$$

$$= \frac{1}{l} \int_0^{2l} \{-y^*(x)\} \sin m \frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda$$

いま、 $m=2r(r=0, 1, 2, \dots)$ の場合を考えると、

$$\sin 2r \frac{\pi}{2l} (2l-\lambda) = \sin\left(2r\pi - \frac{2r\pi}{2l}\lambda\right)$$

$$= -\sin 2r \frac{\pi}{2l} \lambda$$

となつて、 $\sin 2r \frac{\pi \lambda}{2l}$ は $\lambda=l$ に関して点対称である。

したがって、

$$C_{2r} = \frac{1}{l} \int_0^{2l} \{-y^*(\lambda)\} \sin 2r \frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda = 0$$

$$\therefore C_m = C_{2r+1} = \frac{1}{l} \int_0^{2l} \{-y^*(\lambda)\} \sin(2r+1)\frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda$$

$$= -\frac{2}{l} \int_0^l y^*(\lambda) \sin(2r+1)\frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda \dots\dots(20)$$

この式 (20) によつて式 (18) はつぎのようになる。

$$Y = \sum_{n=0}^{\infty} C_{2n+1} e^{-\left\{(2n+1)\frac{\pi}{2l}\right\}^2 t} \sin(2n+1)\frac{\pi x}{2l}$$

$$= -\frac{2}{l} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{(2n+1)\frac{\pi}{2l}\right\}^2 t} \sin(2n+1)\frac{\pi x}{2l}$$

$$\times \int_0^l y^*(\lambda) \sin(2n+1)\frac{\pi \lambda}{2l} d\lambda \dots\dots(21)$$

式 (21) の \int の項は式 (17) を参考にしてつぎのように求まる。

$$\begin{aligned} & \int_0^l y^*(\lambda) \sin(2n+1) \frac{\pi\lambda}{2l} d\lambda \\ &= \int_0^l (l-\lambda) \sin(2n+1) \frac{\pi\lambda}{2l} d\lambda \\ &+ \int_1^l \left\{ -\frac{1}{2}(l-x)^2 + \frac{1}{2}(l^2-1) \right\} \sin(2n+1) \frac{\pi\lambda}{2l} d\lambda \\ &= (l-1) \left\{ -\frac{2l}{(2n+1)\pi} \cos(2n+1) \frac{\pi}{2l} \right. \\ &+ \frac{4l^2}{(2n+1)^2\pi^2} \sin(2n+1) \frac{\pi}{2l} \left. \right\} \\ &+ \left\{ \frac{8l^3}{(2n+1)^3\pi^3} + \frac{2l(l-1)}{(2n+1)\pi} \right\} \cos(2n+1) \frac{\pi}{2l} \\ &- \frac{4l^2(l-1)}{(2n+1)^2\pi^2} \sin(2n+1) \frac{\pi}{2l} \\ &= \frac{8l^3}{(2n+1)^3\pi^3} \cos(2n+1) \frac{\pi}{2l} \end{aligned}$$

これを式 (21) に入れて、

$$\begin{aligned} Y &= -16l^2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right\}^2 t} \\ &\times \frac{\cos(2n+1) \frac{\pi}{2l}}{(2n+1)^3\pi^3} \sin(2n+1) \frac{\pi x}{2l} \dots (22) \end{aligned}$$

式 (17) とこの式 (22) の値を式 (16) に入れて、ここで x, y, t を再びそれぞれ x_1, y_1, t_1 と書き直す

$$y_1 = \left\{ \begin{aligned} & (l-1)x_1 - 16l^2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right\}^2 t_1} \\ & \times \frac{\cos(2n+1) \frac{\pi}{2l}}{(2n+1)^3\pi^3} \sin(2n+1) \frac{\pi x_1}{2l} \\ & \hspace{10em} (0 \leq x_1 < 1) \\ & -\frac{1}{2}(l-x_1)^2 + \frac{1}{2}(l^2-1) - 16l^2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2l} \right\}^2 t_1} \\ & \times \frac{\cos(2n+1) \frac{\pi}{2l}}{(2n+1)^3\pi^3} \sin(2n+1) \frac{\pi x_1}{2l} \\ & \hspace{10em} (1 < x_1 \leq l) \end{aligned} \right. \dots (23)$$

この式 (23) に式 (13) の値を入れて整理すると、

$$y = \left\{ \begin{aligned} & K(L-mh)x - 16KL^2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2L} \right\}^2 \frac{t}{a}} \\ & \times \frac{\cos(2n+1) \frac{\pi mh}{2L}}{(2n+1)^3\pi^3} \sin(2n+1) \frac{\pi x}{2L} \\ & \hspace{10em} (0 \leq x < mh) \\ & -\frac{K}{2}(L-x)^2 + \frac{K}{2}(L^2-m^2h^2) \\ & - 16KL^2 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2L} \right\}^2 \frac{t}{a}} \\ & \times \frac{\cos(2n+1) \frac{\pi mh}{2L}}{(2n+1)^3\pi^3} \sin(2n+1) \frac{\pi x}{2L} \\ & \hspace{10em} (mh < x \leq L) \end{aligned} \right. \dots (24)$$

③ のり尻に碎石フィルターを入れた場合の定常状態：図-17のように、流線はフィルター面に直角にはいるものとする。また、①の場合と同じように水面がフィルター面と交わる (x_e, z_e) 点で立てた鉛直面で連続の式をたてると、

$$k'mz_e = q'(L-mh) \dots (25)$$

k' は碎石の透水係数で、碎石層においてダルシーの法則が成り立つことには疑問があるが、ここでは一応成り立つものと仮定して取り扱った。

式 (25) より、

$$\left. \begin{aligned} z_e &= \frac{q'}{mk'}(L-mh) \\ x_e &= 2md - mz_e = 2md - \frac{q'}{k'}(L-mh) \end{aligned} \right\} \dots (26)$$

以下は ① の場合とまったく同じに取り扱えばよから、式 (10) をそのまま用いることができる。

④ のり尻に碎石フィルターを入れた場合の非定常状態：図-18のように座標を考えて、水位を原点で常に 0 とすると、境界条件は②の場合とまったく同じとなり、式 (24) において $m=m', L=L'$ とすれば、この式をそのまま用いることができる。

b) 実験結果の検討

いままでの理論における時間 t は、浸透水が底に達した時刻を 0 としてそれ以後の経過時間である。

図-19 は実測の水位線と前述の理論式によって計算した水位線とを示したもので、この図中の時間は流水開始後の経過時間である。したがって時間 t としては、図中の時間から注水してから底に達するまでの時間を差し引いて考える

図-17 定常状態のときの流れの状況 (碎石フィルターを入れた場合)

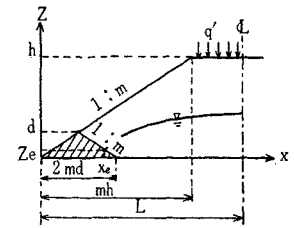


図-18 非定常状態のときの流れ状況 (碎石フィルターを入れた場合)

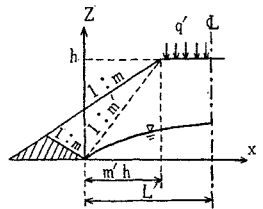
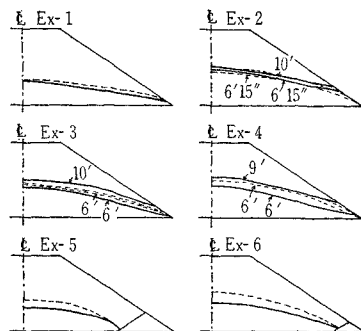


図-19 実測値と計算値との照合



(注) 実線は実測、点線は計算によるもの

必要がある。

計算に際しては透水係数が必要であるが、これに関しては 図-1 に間げき比 1.0 の場合の値として 1.0×10^{-1} cm/sec が与えてある。この k の値で試算してみると実測値と大きなへだたりがあり、これをそのまま使うことは意味がないと考えられたので、ここではつぎのようにして求めた k の値を使用した。

Ex-1 は崩壊に達せず最後に定常流となったが、この実験結果から k の値を逆算したのである。すなわち、式 (7) から、

$$k = \frac{mq'}{z_e} (L - mh)$$

この式中の各値は、

$$m = 1.5, q' = 0.045 \text{ cm}^2/\text{sec} \cdot \text{cm}^2, z_e = 2.0 \text{ cm}$$

$$L = 80 \text{ cm}, h = 40 \text{ cm}$$

であるから、

$$k = \frac{1.5 \times 0.045}{2.0} (80 - 1.5 \times 40) = 0.67 \text{ cm/sec}$$

各実験において、盛土の間げき比に変動があるから、この Ex-1 ($e = 0.94$) の値を基準にして間げき比と透水係数との関係を示す 図-20 (Terzaghi, Peck: Soil Mechanics in Engineering Practice, p. 45) によって各実験における盛土の透水係数を求めた。

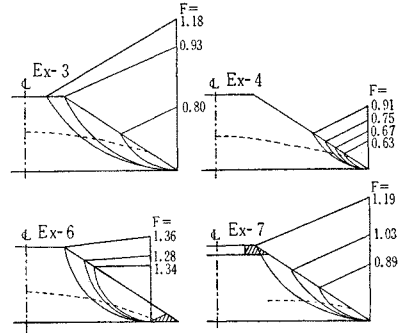
図-19 の点線は以上のようにして求めた透水係数を使って計算した結果を示したもので、各実験において上部の点線は定常流の、下部に位置する点線は非定常のもので、後者については経過時間も示しておいた。なお、

Ex-1, 5, 6 は定常状態についてのみ計算を行なった。実線は測定結果を示したものであるが、崩壊のみられなかった Ex-1, 5, 6 は定常状態のみを、崩壊した Ex-2, 3, 4 は最終の状態と非定常状態の計算を行なった時間の水位線とを示しておいた。実測値と計算値との差は Ex-5, 6 において特に大きかった。

(2) 安定計算

崩壊は Ex-2~4, Ex-7, 8 において起こり、Ex-6 は実験終了後ふれた瞬間に崩壊した。安定計算は間げき水圧を考慮して普通の分割法で行なった。そのすべり面は崩壊の状況から判断して、底に接する円弧とした。図-21 はそのうちの Ex-3, 4, 6, 7 について安全率を示したものである。このうち Ex-3, 4, 7 などは安全率が 1 以下であって、半径の小さい円弧ほど、その安全率が小さく崩壊は安全率が 1 になる高さのところまでほぼ同時に崩壊したようである。Ex-6 は一応安全率が 1 以上で、実

図-21 安定計算の結果



際においても実験中は崩壊しなかった。

5. むすび

まず実験の結果から、排水装置の効果を比較してみよう。盛土中にはいった水をのり尻に設けた砕石フィルターで抜く方法 (Ex-5, 6) は一応成功したようである。これに対して盛土内に浸透させないように路面近くに不透水層を設け、そこでさえぎられた水を排水溝で導く方法 (Ex-7, 8) は失敗に終わった。これは盛土の材料である砂の透水性が非常に大きく、排水溝がその役割を果たさなかったため、もし盛土材料の透水性が小さいか、あるいは排水溝のろう水が防げる構造になっておれば、もちろんその効果を十分に発揮できるものと思われる。

つぎに水位の上昇に関して、均質な盛土においては、定常流に対しては式 (10)、非定常流に対しては式 (24) でだいたい説明できるようである。しかし、実際値と計算値との間にはかなりの差が認められ、特に砕石フィルターをいれた場合にいちじるしい。その原因としては、

- i) 理論における仮定と実際との相違
- ii) 透水係数の違い
- iii) マノメーターの不完全

などが考えられる。透水係数は通常 10^{-3} cm/sec というようにオーダーを問題とするが、ここでは透水係数はたとえば式 (10) にみるように各項に $K = \frac{2q'}{k}$ という形ではいつてきて、 1×10^{-3} cm/sec, 2×10^{-3} cm/sec の 1, 2 というような係数が問題になる。すなわち透水係数のわずかな差が計算値に大きな影響を与え、透水係数の想定そのものが重要である。

崩壊に関しては、まず浸透圧によってのり尻にわずかなくずれが起こり、続いてのり面の中央付近を上端とするすべりが発生している。これは安全率の面から考えてもだいたい妥当である。

本研究に際しては、理論的な解析について九州大学工学部 渡部信夫教授のご指導を受け、また実験について松本鍊三氏のご援助を受けた。ここに深く感謝の意を表す。

(1965.6.19・受付)

