

# 모래로 築造된 댐 模型의 浸透에 關한 研究(I)

## A Study of the Seepage through Sand-Constructed Model Dams

申 芳 雄\*  
Bang Woong Shin

### Summary

The aim of this thesis, when water permeates dam, is to study the shape of seepage line and seepage quantity. As for the process, various sand model dams of same capacity were constructed in the water tank : they are a central, middle, inclined, up and down stream point of which is paralld, and filter-installed types. And the slope of seepage line and seepage quantity in these various models for experiment were measured, observed data were analyzed, and several formulas which already published were compared and examined.

As for the shape of seepage line, the relation between upstream water level and exit slope of seepage line, near the entrance and exit point, geometrically similar model, and the shape of seepage line filter-installed were examined.

As regards to the seepage quantity, several formulas which already published and testing result values were compared and examined, and relation with the slope of seepage line, the seepage quantity, the slope of upstream point, and the upstream water level were mutually studied.

Particularly, when horizontal filter was installed, propriety of the existing formulas for effective filter length was examined, and the relative position of exit point in various conditions was also studied.

### I. 緒 論

貯水用으로 만들어진 Fill dam은 歷史나 古代 構造物의 남은 遺物이 證明하는 바와 같이 文化의 初期以來 使用되어온 것이다. 世界的으로 가장 오래 된 Dam으로 알려진 B.C 5世紀의 Fommel gerye dam은 Pyramid 工事의 勞動者들의 食水供給을 위하여 만들어졌던 Rock fill dam으로 中央部에는 遮水를 하기 위해서 土質材料를 使用했다.

近代式 댐으로서는 Rock fill dam의 한 型式인

19世紀 前半 美國의 California에서 鑛山技術者들에 使用했던 Log Crib dam으로<sup>(1)(2)</sup>부터 發達한 것으로 알려져 있다. 이러한 種類의 댐은 그의 上流面에 木材로서 遮水壁을 만들었으며 그로부터 차차 發達하여 鐵筋콘크리트 슬래브를 使用하기에 이르렀고 더욱 오늘날에 와서는 土質材料를 使用해서 堤體속에 遮水壁으로서 心壁을 만들기 始作하게 되었다.

옛날과 마찬가지로 흙 댐은 最小의 工程으로서 自然狀態의 材料를 利用해서 築造할 수 있기 때문에 가장 보편적인 形態의 낮은 흙 댐으로서 계속 築造

\*忠北大學校 工科大學

될 것으로 믿는다. 現在까지 흙댐은 經驗에 의하여 築造되어 왔으며, 設計와 施工에 있어서 經驗方法을 理論的인 工學의 方法으로 代置하여 實現되어 왔다.

1907年 Bassell은 흙 댐의 側面傾斜는 基礎의 選擇에 左右된다고 처음으로 提案했을 뿐 1930年<sup>(1)</sup>에 이르기까지는 理論的인 設計方法이 거의 進展되지 않았다. 그후 土質力學의 發達이 계속되어 흙 댐의 設計에 必要한 改良된 方法이 發達하게 되었다.

이들 方法은 다음과 같다.

(1) 基礎地盤狀態와 築造材料의 築造前의 徹底한 調查

(2) 工學的 熟練과 技術을 設計에 適用하는 것

(3) 注意깊은 設計와 築造方法의 調節

그 結果 Fill dam은 基礎地盤上 300m에 가까운 높이까지 築造되었으며 數百個의 큰 Fill dam이 失敗없이 築造<sup>(2)</sup>되고 있는 바와 같이 最近 世界各國에서 Fill dam이 많이 採擇되고 있다.

이는 Fill dam이 堤體를 構成하는 材料를 dam 設置地點으로 부터 가까운 곳에서 쉽게 求得할 수 있으며 地形, 地質, 土質材料等의 條件에 그다지 拘碍받지 않고 比較的 적은 經費로 建設할 수 있기 때문이다.

그러나 Dam의 築造材料인 흙은 다른 築造材料(人工材料)에 比하여 均一性이 明確하지 않고 複雜하며 越流에 對해서는 거의 抵抗力이 없다.

또 Fill Dam의 心壁은 dam의 透水에 對해서 가장 重要한 部分이므로 dam의 內部를 穿하는 浸透流量의 變化를 實驗模型으로 測定하며 各 模型別 浸潤線의 觀察를 通하여 흙속에 흐르는 浸透水의 正確한 究明이 要求된다.

따라서 Fill dam의 浸透에 關한 諸式들을 利用하여 本 論文에서는 實驗으로 浸透水의 흐름<sup>(4)(5)</sup>을 正確히 觀測하여 分析 究明하므로써 實際現場 dam에서 漏水量과 浸潤線을 推定할 수 있도록 하였다.

그리고 實驗模型을 變化시키므로써 浸透流量을 減少시킬 수 있는 模型을 찾아 내고 또 下流測 部分의 浸潤線을 降下시켜 dam의 安定을 圖謀함과 同時에 浸透流量을 減少시킬 수 있는 方法을 究明했다.

本 論文에서는 浸潤線形狀과 浸透流量을 實驗의으로 研究하기 위하여 모래로 築造된 dam의 여러가지 心壁模型을 使用하였으며 實驗資料를 分析 整理하여 얻은 浸透流量式과 模型別 浸潤線 形狀을 既發表된 諸式<sup>(6)(7)(8)</sup>과 比較 檢討하였으며 特히 filter를 設置<sup>(9)</sup>한 경우와 上流面傾斜角이 90°以上인 模

型을 分析하는데 力點을 두었다. 卽 Fill dam의 各種 心壁型에 對한 浸透流量에 對하여는 既發表된 諸式<sup>(10)(11)(12)(13)(14)(15)</sup>과 實驗 結果值와 比較 分析하여 模型別, 水位別 및 上流面 傾斜와 浸透流量과의 相關關係를 究明하였고, 또한 浸潤線 算定式에 依한 實測值를 比較하여 그 相異點을 究明하였다.

그리고 各 實驗模型에 對하여 流入點 및 流出點의 浸潤線形狀을 實驗을 通하여 分析하였다. 한편 Fill dam에 있어서 上流面 끝부분에 Filter를 設置한 경우와 浸透에 關한 問題를 研究하기 위하여 實驗模型으로는 鉛直 및 水平, 傾斜 filter<sup>(16)</sup>를 使用하였다.

## II. 研究史

現在까지 發表된 浸透理論에 關한 研究<sup>(17)(18)</sup>에 對해서 調查해 보면 貯水池의 水面變動이 거의 없다고 볼수 있는 fill dam 堤體內에 浸透流과 같은 定常的인 浸透水의 흐름에는 Forchheimer를 비롯하여 Schoklitsch<sup>(12)</sup>, Schaffernak<sup>(14)</sup>, Itersen, Pavlovsky 等の 研究가 있었다.

이들은 모두 Darcy의 浸透理論<sup>(19)</sup>으로부터 浸潤線形狀과 浸潤線長을 求하는 近似式을 誘導하였으며 R. Dachler<sup>(20)</sup>, A. Casagrande<sup>(10)</sup> 등은 圖式的인 半理論式을 考察한 것이다. 特히 흙속에 흐르는 浸透水의 흐름에 對해서는 Musket<sup>(21)</sup>, Forchheimer 等の 取扱하였으며 그 외에도 Tsunker<sup>(20)</sup>, Baver<sup>(22)</sup>, Terzaghi<sup>(23)</sup>, Todd<sup>(19)</sup> 및 Uginchus<sup>(20)</sup> 等の 研究가 있다.

또한 心壁內의 浸潤線形狀과 浸透流量에 對하여는 Kozeny<sup>(2)</sup>, Schaffernak<sup>(12)</sup>, Itersen, A. Casagrande 等に 의하여 浸潤線이 拋物線이라는 가정하에 研究되었고 Forchheimer, Schmied 等は 矩形斷面인 경우에 對하여 研究하였다. 또 傾斜斷面인 경우<sup>(10)(20)(25)</sup>에 對하여는 수많은 研究가 되고있다. 그리고 filter를 設置한 경우<sup>(15)(16)</sup>에 關한 研究도 있다.

### 1. 浸潤線形狀

#### 가. 矩形斷面인 경우

Fig. 2-1에서 浸潤線을 動水傾斜線으로 假定하여 다음과 같은 近似式이 成立한다<sup>(24)</sup>

$$v = -k \frac{dy}{dx} \dots \dots \dots (2-1)$$

浸潤線의 傾斜를 完만하다고 볼때  $d_x = d_x$ 이므로 流線上의 1點을 (s, y)로 나타낼 수 있어서 近似的

으로  $\beta y$ 로 하면 浸透流量은 다음과 같이 表示할수 있다.

$$q = -k \cdot \beta y \frac{dy}{ds} \dots\dots\dots (2-2)$$

(2-2) 式은  $s=0$ 에서  $y=h$ 되는 條件을 써서 다음과 같이 된다.

$$y = \sqrt{h^2 - \frac{2q}{k} \int_0^s \frac{1}{\beta} ds} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$h_1 = S - \sqrt{s^2 - h^2} \dots\dots\dots (2-4)$$

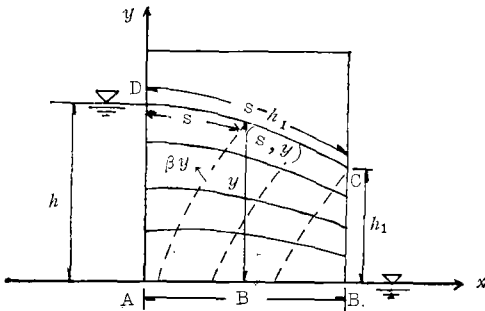


Fig. 2-1. Seepage line through rectangular section.

(2) 사다리꼴 斷面인 경우

從來의 浸潤線은 대개 特定한 曲線으로 假定하여 使用해왔으며 Kozeny는 이를 拋物線<sup>(1)</sup>으로서 假定하여 다음과 같이 誘導하였다.

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2} \quad y = \sqrt{2y_0 \cdot x + y_0^2} \dots (2-5)$$

여기서  $y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$ ,  $d = 0.3l_1 + l_2$   
 $h$ : 水深

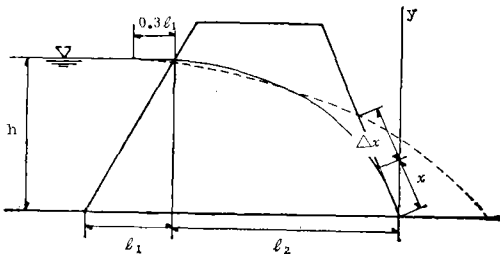


Fig. 2-2. Seepage line through trapezoid section.

Schaffernak<sup>(13)</sup>와 Iterson은 사다리꼴 斷面을 갖는 경우의 浸潤線을 Fig. 2-3과 같은 拋物線으로 假定하여 下流側 斜面은 이 拋物線과 A<sub>0</sub>에서 接하고 流出點의 높이  $h_1$ 은 (2-6)式으로 表示하였다.

$$h_1 = -l \tan \beta + \sqrt{l^2 \tan^2 \beta + h^2} \dots\dots\dots (2-6)$$

또 A. Casagrande<sup>(9)</sup>는 實驗을 통하여 이들의 式이 實驗結果와 잘 一致한다는 것을 立證했다. 여기서 A. Casagrande는 Fig. 2-3에서 拋物線과 下流側 斜面이 이루는 接線의 傾斜度  $m_2$ 를 考慮하여 다음 式을 提示하였다.

$$h_1 = a \sin \beta = m_2 \sin \beta - \sqrt{m_2^2 \sin^2 \beta - h^2} \dots\dots\dots (2-7)$$

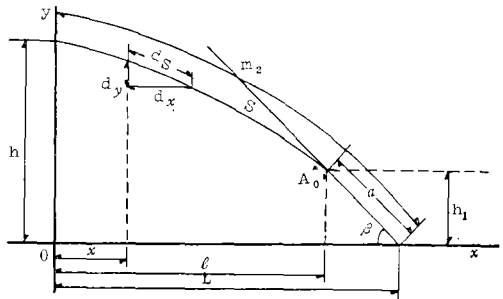


Fig. 2-3. Seepage line through trapezoid section.

A. Casagrande와 Kozeny에 依하면 filter를 設置한 경우에 있어서 水平 filter<sup>(12)</sup>의 流出길이는 Fig. 2-4에서  $a_0 = \frac{y_0}{2}$ 이다. 여기서  $y_0 = \sqrt{d_s^2 + h^2} - d_s$ 이다

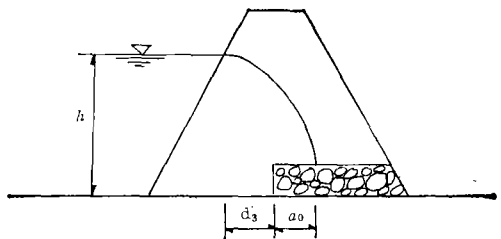


Fig. 2-4. Trapezoid section with a horizontal filter.

## 2. 浸透流量

### 가. 矩形斷面인 경우

普通 使用되고 있는 方法으로는 幾何學의 으로 乎는 近似式이 있는데, 運動方程式을 利用하고 境界 條件을 滿足시킨 理論解의 方法으로는 矩形斷面에 對한 Forchheimer의 提案이 있다.

지금 Fig 2-5에서 MN을 浸潤線, A로부터 D까지 흐르는 사이에 損失되는 水頭는  $\Delta h$ 이고 A'부터

D'까지의 損失水頭를  $\Delta h_0$ 라 하면, 一般으로  $\Delta h \approx \Delta h_0$ 가 된다.

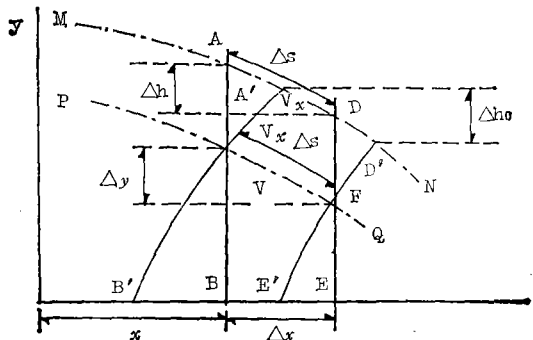


Fig. 2-5. Shape of seepage line at exit point.

그러나

Forchheimer는  $\Delta h = \Delta h_0$ 로 하여 다음식을 提案하였다.

$$q = k \frac{h^2 - h_1^2}{2B} \dots\dots\dots(2-8)$$

그외에 流線을 實驗에 의해서 얻는 特定한 曲線으로 假定하는 方法으로 浸潤線을 特定 拋物線과 橢圓으로 보아 그 拋物線을  $y^2 = 2h(x + \frac{h}{2})$ 으로 하여 堤體幅을 B, 上流側水位를 h라 할때 (Fig. 2-6)  $h^2 = 2h_1(B + \frac{h}{2})$ 인 關係가 成立되므로  $h = \sqrt{B^2 + h_1^2} - B$ 가 되며 浸透流量은 (2-9)식과 같이 된다.

$$q = kh \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{B}{h}\right)^2} - \frac{B}{h} \right\} \dots\dots\dots(2-9)$$

한편 橢圓으로 假定하는 方法은 Schmied에 의해서 다음과 같이 나타내고 있다. (Fig. 2-7)

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{h^2} = 1 \dots\dots\dots(2-10)$$

단,  $c = \sqrt{\frac{4\mu}{3nkt}}$

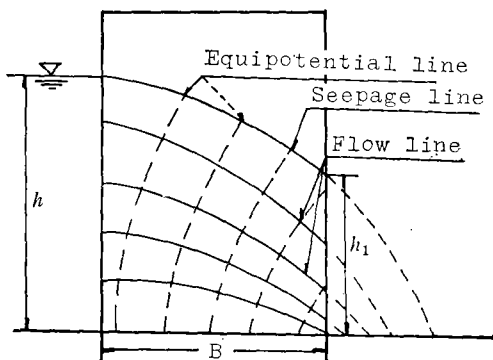


Fig. 2-6. Basic parabolic flow lines.

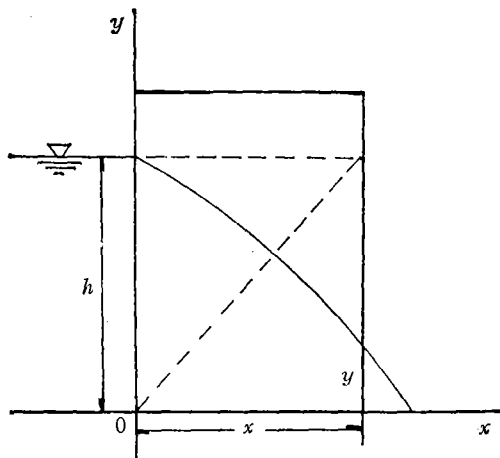


Fig. 2-7. Elliptic seepage line.

여기서  $\mu$ : 粒度分布에 따른 定數

$n$ : 空隙率

나. 傾斜斷面인 경우

傾斜斷面을 갖는 從來의 方法은 Dachler, A. Casagrande 및 Schoklitsch의 方法 등이 있으며, 形態別로 區分하면 다음과 같다. 사다리꼴인 경우에는 A. Casagrande法으로 (2-11)식과 같다. (Fig. 2-8)

$$q = k \frac{h^2 - (a \sin \beta)^2}{2d'} = \frac{h^2 - a^2 \sin^2 \beta}{2d - a \sin \beta} \dots\dots\dots(2-11)$$

단,  $d' = d - \frac{1}{2}a \sin \beta$ ,  $a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \beta}$

簡略式으로는 위식의  $h^2 \cot^2 \beta$ 의 값이  $d^2$ 에 비해 극히 작으므로 (2-12)식과 같이 된다.

$$q = k(\sqrt{h^2 + d^2} - d) = k \cdot S \dots\dots\dots(2-12)$$

여기서  $S = \sqrt{h^2 + d^2} - d$

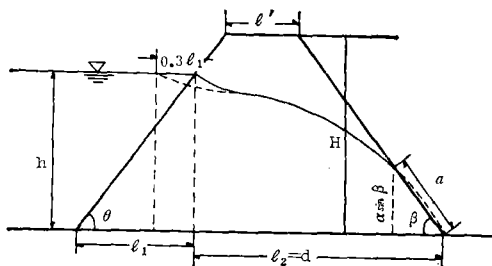


Fig. 2-8. A. Casagrande's Seepage line.

또한 Schoklitsch<sup>(20)</sup> 및 L. Casagrande<sup>(10)</sup>는 上流面傾斜를 各各  $m_1, m_2$ 로 고려하고 (Fig. 2-9), 또  $GH = b'$ ,  $i = BC$ 를 浸潤線의 平均動水傾斜라 할때 (Fig. 2-10) 다음과 같이 表示된다.

$$q = \frac{k(h^2 - h_1^2)}{2(B' + m_2(h - h_1))} \dots\dots\dots(2-13)$$

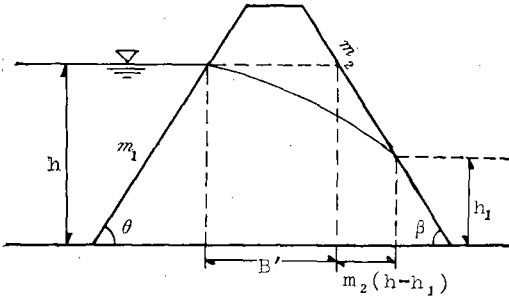


Fig. 2-9. Schoklitsch's Seepage line.

Fig. 2-10에서

$$q = k a \sin^2 \beta \dots\dots\dots(2-14)$$

단,  $a = \sqrt{d^2 - h^2} - \sqrt{d^2 - n^2 \cot^2 \beta}$

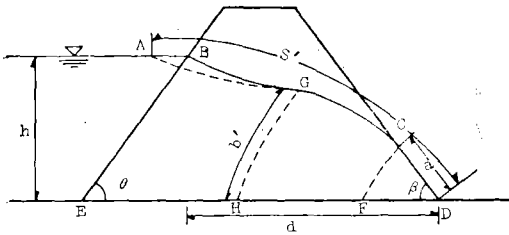


Fig. 2-10. L. Casagrande's seepage line.

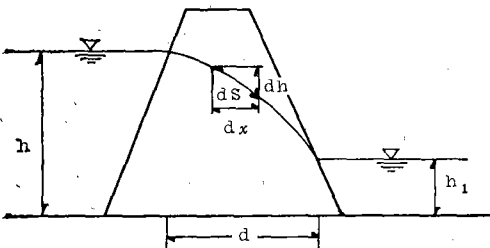


Fig. 2-11. Dupuit's seepage line.

Dupuit theory에서의 浸透流量은 Fig. 2-11에서

$q = kh \frac{dh}{dx}$  이므로 (2-15)식과 같이 된다.

$$q = \frac{k}{2d} (h^2 - h_1^2) \dots\dots\dots(2-15)$$

上下流面이 平行한 心壁에서 福田<sup>(25)</sup>는 Darcy의 法則을 利用하여 dy를  $(h - \frac{h_1}{2})$ 으로 보고 ds를  $\frac{1}{2}(b + B \sin \theta)$ 라 하여 動水傾斜를 考慮하였으며 斷面 積을  $A = \frac{h + h_1}{2} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$ 라 하여 (2-16)식과 같이

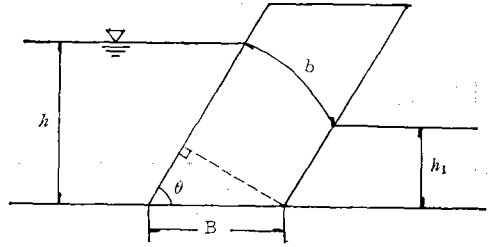


Fig. 2-12. Fukuta's method for parallel section.

표시하였다.

$$q_F = k \frac{(2h - h_1)(h + h_1)}{2 \sin \theta (b + B \sin \theta)} \dots\dots\dots(2-16)$$

여기서 秦은 d,를 福田는 浸潤線長과 最下部の 길이의 平均値를 取했는데 特히 秦<sup>(20)</sup>은 任意의 位置에서의 流線長과 最下部の 길이의 全平均値를 求했고 A는 流入面과 流出面の 平均値대신 浸潤線과 心壁幅의 中間線長에 單位線長을 곱한 것으로 했다.

$$q_I = k \frac{nL(2H - h_1)}{2(b_1 + b_2 + \dots + b_n)} \dots\dots\dots(2-17)$$

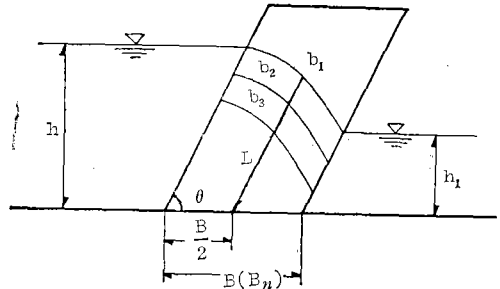


Fig. 2-13. Jin's method for parallel section.

申<sup>(8)</sup>은 上流面 傾斜角을  $\theta$ , 水位를 h, 幅을 B라 하

여  $\frac{dy}{ds} = \frac{h - \frac{h_1}{2}}{\frac{1}{2}(b + B \sin \theta)}$ 로 되며 이때에

$A = \frac{(h_1 + 2h)}{3} \text{cosec} \theta$ 라 하면

$$q_s = k \frac{(2h - h_1)}{(b + B \sin \theta)} \cdot \frac{(h_1 + 2h)}{3} \text{cosec} \theta \dots\dots\dots(2-18)$$

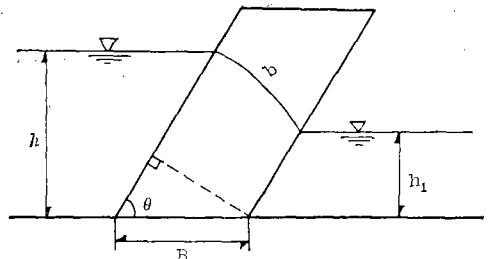


Fig. 2-14. Shin's method for parallel section.

로 된다.

上下流面이 平行하지 않는 경우 福田<sup>(25)</sup>는 心壁의 上流面의 傾斜角을  $\theta$ , 下流面의 傾斜角을  $\alpha$ 라 하고, A點에서 角  $\alpha$ 인 直線을 그려 B點에서 그 線이 直線으로 交叉되게 하여 前面傾斜과 交叉하는 點 C까지의 距離를 BC라 할때,  $\frac{1}{2}(b+BC)$ 를  $d_s$ 로 하고  $h_0 - \frac{h_1}{2}$ 를  $dy$ 로 하여 動水傾斜로 고려하고, 또 斷面積은 上下流傾斜面 面積의 平均面積을 고려하여 다음과 같이  $A = \frac{1}{2} \left( \frac{h}{\sin\theta} + \frac{h_1}{\sin\alpha} \right)$ 이므로

$$q_F = k \frac{h - \frac{h_1}{2}}{\frac{b+BC}{2}} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{h}{\sin\theta} + \frac{h_1}{\sin\alpha} \right) \dots \dots \dots (2-19)$$

로 된다.

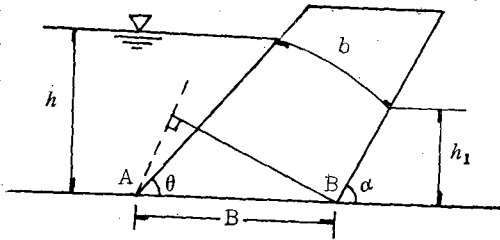


Fig. 2-15. Fukuta's method for non-parallel section.

$$\frac{BC}{\sin\theta} = \frac{AB}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \theta\right)}$$

$$\therefore BC = B \cdot \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \alpha)} \dots \dots \dots (2-20)$$

秦<sup>(20)</sup>도 上下流面이 平行한 경우와 同一하게 생각해서 같은 式인 (2-17)式을 使用할 수 있다.

$$q_J = k \frac{nL(2h - h_1)}{2(b_1 + b_2 + \dots + b_n)}$$

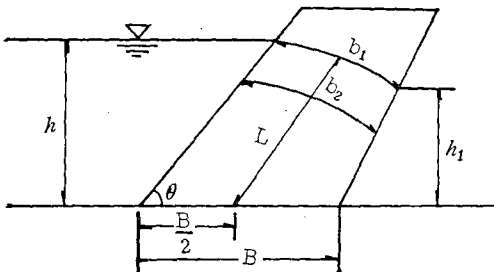


Fig. 2-16. Jin's method for non-parallel section.

### 3. 既存研究의 評價

이미 發表된 諸式은 近似解法으로서 各 模型에 따라 實測值와는 적지않은 差가 있다. 즉 浸潤線의 形狀에 있어서 矩形斷面의 경우 Kozeny는 浸潤線을 拋物線으로 假定하여 使用하였으나 그 流入點과 流出點이 實驗結果와 一致하지 않으며, 사다리꼴斷面의 경우 水位가 낮을 때  $(h \leq \frac{H}{3})$ 에는 浸潤線의 傾斜가 완만하므로 適用할수가 없다. 그리고 Schaffernak와 Iterson은 浸潤線을 拋物線으로 假定하여 이 拋物線과 下流側 斜面이 接하는 것으로 보아 流出點의 높이 ( $h_1$ )를 算出하였으며, A. Casagrande는 이것이 實驗結果와 잘 一致함을 立證하였다. 한편 申은 上流水位  $h$ , 下流水位  $h_1$ , 流入點과 流出點間의 距離  $d_1$ 을 變數로 하는 浸潤線 算定式을 實驗結果의 電算處理에 依하여 求했다<sup>(6)</sup>.

浸透流量에 있어서는 矩形斷面의 경우 Forchheimer는 運動方程式을 利用한 理論解의 方法을 提案하였으며, Schmid는 流線을 橢圓으로 假定하고 堤體內의 粒度分布와 空隙率을 고려하였다. 傾斜斷面인 경우에 있어서 사다리꼴斷面의 경우 A. Casagrande, Dupuit, Schoklitsch, L. Casagrande 등이 Darcy의 法則을 利用하여 各各 浸透流量 算定式을 提示하였고 上下流面이 平行한 경우와 平行하지 않은 경우에는 福田와 秦의 式이 있으나, 이들 모두는 各各 算出條件 및 適用方法을 달리하고 있다. 따라서 위의 研究式들은 여러 境界條件(模型, 上下流水位, 透水係數 등)에 따라 浸潤線의 形態는 變함에도 近似한 線形을 고려하여 解析하고 있으므로 嚴格하게는 特定한 形態에 適用될 수 없음에도 불구하고 지금까지 별 支障없이 使用되어 왔다.

浸潤線은 堤體形態에 따라 또 上下流水位 및 流出點의 變化에 따라 달라질 것이다. 따라서 여러 堤體形態別로 이를 實驗檢討하여 여러 既存研究와 比較하는 것도 價値가 있을 수 있다.

더욱 堤體上流面傾斜角이 鈍角이 되면 浸潤線이 일단 上昇했다가 流下하는 線形으로 취함을 미루어 알수 있으나 이런 경우 단순한 拋物線, 橢圓으로 가정하는 것은 距離가 있을 것으로 본다. 따라서 이와같은 경우에도 一般의로 適用possible한 浸潤線式을 究明하는 것도 바람직하다고 생각된다.

또한 filter를 設置한 경우는 浸潤線이 크게 變化하며 filter形態에 따라서도 여러 線形으로 나타남에도 이에 대한 研究가 없다. 따라서 이에 대한 浸潤

線 및 그 특성도 研究할 價値가 있다고 본다.

浸透流量은 浸潤線이 直接的인 關聯이 있을 것이므로 浸潤線形에 따라 變化할 것이다. 따라서 여러 形態에 따라 適用될 수 있는 浸潤線 및 浸透流量式을 얻는 것도 바람직하지만 모든 形態에 一般的으로 適用할 수 있는 式은 求할수 있다면 그 寄與가 클 것으로 본다.

### III. 研究方法

浸潤線은 上下流面, 堤體形態 및 流出點의 流量에 따라 달라지므로 上下流水位를 變化시켜가면서 流出點의 位置를 觀察하고 堤體形態는 從來에는 堤體安定性에서 中央形인 心壁은 많이 使用해왔다. 그러나 既存貯水池에 漏水가 있다든지 또는 貯水量을 增加시켜 施工補完할 때에 그 形을 傾斜形 模型으로서 上下流面이 平行한 경우와 平行하지 않은 경우가 있을 수 있으며, 또한 filter를 設置하여 漏수를 인도될 수 있게 한다.

따라서 考慮할 수 있는 여러 形態에 대하여 實驗的으로 그 浸潤線을 觀察하고 浸透流量을 觀測하여 既存研究와 比較 檢討할수 있도록 實驗資料에 의하여 보편적으로 사용할수 있는 式을 統計的으로 分析하여 얻고자 한다.

#### 1. 實驗

##### 가. 實驗方法

實驗에 있어서는 上流面 水位를 20cm, 30cm, 40m, 50cm의 경우에서의 浸潤線 및 浸透流量을 測定

하였다.

測定用 色索은 물의 比重에 近似한 과망간산카리(KMnO<sub>4</sub>)를 利用하였으며 前面 유리판에 接하는點으로 부터 注入시켜 浸潤線을 追跡 測定하고 또 流出點의 下流水位에도 큰 영향을 받으므로, 이를 고려하여 下流水位를 0cm, 5cm, 10cm로 變化시켜가면서 流出點을 觀察할수 있도록 下流水位를 調整할수 있게 하였다. 浸透流量은 下流水位  $h_2=0$ cm인 경우 透水量이 定常的으로 되었다고 보여진 후 測定하였고 浸透流出된 流量은 messcylinder로 받아計測하였다.

##### 나. 實驗裝置

###### (1) 水槽

180cm×60cm×30cm인 水槽를 두께 2mm의 鋼板으로 만들고, 前面에 두께 10mm의 玻璃板을 붙여서 浸透現象을 볼 수 있도록 만들었다. 玻璃板에는 5mm格子間隔으로 눈금을 그었으며 水位調節用 排水孔(cock)을 밑바닥으로 부터 5cm간격으로 設置하였다. 背面에는 potential 測定用으로 piezometer를 5cm×5cm 간격으로 5個를 設置하여 5mm의 비닐관으로 連結하였다.

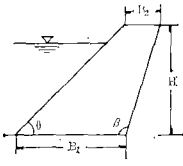
水槽의 中央에 試驗材로서 實驗模型을 만들어 자갈을 心壁의 上下流에 쌓아올려 模型을 保護·支持케 하였다. 그리고 模型材料의 流失을 막기 위해 標和과 자갈 層사이에 가는 鐵綱을 使用하였다.

###### (2) 實驗模型

本 實驗에 使用한 模型은 Table-1, 2, 3과 같이 上下流面이 平行하지 않은 模型  $E_A, E_B$  各 14種,

(1) 上下流面이 平行하지 않은 경우

Table-1. Types of Model (non-paraller section)

Experiment Sign	$B_1$ (cm)	$B_2$ (cm)	$\theta^\circ$	$\beta^\circ$	$H$ (cm)	Model
$E_A$ — 1	60	20	21.8	151.4	60	
$E_A$ — 2			22.6	150.0		
$E_A$ — 3			23.2	149.0		
$E_A$ — 4			24.8	146.3		
$E_A$ — 5			26.6	143.1		
$E_A$ — 6			28.6	139.4		
$E_A$ — 7			30.0	136.8		
$E_A$ — 8			31.0	135.0		
$E_A$ — 9			33.7	129.8		
$E_A$ — 10			36.9	123.7		
$E_A$ — 11			38.8	120.0		
$E_A$ — 12			40.6	116.5		
$E_A$ — 13			45.0	108.4		
$E_A$ — 14			50.2	99.5		
$E_B$ — 1			99.5	50.2		
$E_B$ — 2			108.4	45.0		
$E_B$ — 3			116.5	40.6		
$E_B$ — 4			120.0	38.8		
$E_B$ — 5			123.7	36.9		
$E_B$ — 6			129.8	33.7		

모래로 築造된 埴 模型의 浸透에 關한 研究(I)

$E_B$ — 7	60	20	135.0	31.0	60	
$E_B$ — 8			136.8	30.0		
$E_B$ — 9			139.4	28.6		
$E_B$ — 10			143.1	26.6		
$E_B$ — 11			146.3	24.8		
$E_B$ — 12			149.0	23.2		
$E_B$ — 13			150.0	22.6		
$E_B$ — 14			151.4	21.8		
$E_C$ — 1	60	20	56.3	90.0	60	
$E_C$ — 2			90.0	56.3		
$E_D$ — 1	60	20	60.0	84.9	60	
$E_D$ — 2			63.4	80.5		
$E_D$ — 3			71.6	71.6		
$E_D$ — 4			80.5	63.4		
$E_D$ — 5			84.9	60.0		

(2) 上下面이 平行한 경우

Table-2. Types of Model (Parallel Section)

Experiment Sign	$B_1$ (cm)	$B_2$ (cm)	$\theta^\circ$	$\beta^\circ$	H(cm)	Model
$E_E$ — 1	40	40	24.8	155.2	60	
$E_E$ — 2			26.6	153.4		
$E_E$ — 3			28.6	151.4		
$E_E$ — 4			30.0	150.0		
$E_E$ — 5			31.0	149.0		
$E_E$ — 6			33.7	146.3		
$E_E$ — 7			36.9	143.1		
$E_E$ — 8			40.6	139.4		
$E_E$ — 9			45.0	135.0		
$E_E$ — 10			50.2	129.8		
$E_E$ — 11			56.3	123.7		
$E_E$ — 12			60.0	120.0		
$E_E$ — 13			63.4	116.6		
$E_E$ — 14			71.5	108.4		
$E_E$ — 15			80.5	99.5		
$E_F$ — 1	40	40	99.5	80.5	60	
$E_F$ — 2			108.4	71.6		
$E_F$ — 3			116.6	63.4		
$E_F$ — 4			120.0	60.0		
$E_F$ — 5			123.7	56.3		
$E_F$ — 6			129.8	50.2		
$E_F$ — 7			135.0	45.0		
$E_F$ — 8			139.4	40.6		
$E_F$ — 9			143.1	36.9		
$E_F$ — 10			146.3	33.7		
$E_F$ — 11			149.0	31.0		
$E_F$ — 12			150.0	30.0		
$E_F$ — 13			151.4	28.6		
$E_F$ — 14			153.4	26.6		
$E_F$ — 15	155.2	24.8				
$E_G$ — 1	40	40	90.0	90.0	60	



(3) Filter를 設置한 경우

Table-3. Types of Model (Filter)

Experiment Sign	$B_1$ (cm)	$B_2$ (cm)	$\theta^\circ$	$\beta^\circ$	$H$ (cm)	Model
$E_H - 1$	60	20	71.6	71.6	60	
$E_H - 2$	60	20	71.6	71.6	60	
$E_H - 3$	60	20	71.6	71.6	60	
$E_I - 1$	60	20	90	56.3	60	
$E_I - 2$	60	20	90	56.3	60	
$E_I - 3$	60	20	90	56.3	60	
$E_J - 1$	60	20	56.3	90	60	
$E_J - 2$	60	20	56.3	90	60	
$E_J - 3$	60	20	56.3	90	60	

$E_C$  2種,  $E_D$  5種과 上下流面이 平行한 模型  $E_B$ ,  $E_F$  各 15種, 直四角形(矩形)인  $E_G$  1種 등 모두 66種의 模型으로 實驗하였다.

各 模型의 크기는 同一한 體積으로서 水槽에 築造가 可能한 한 角度를 變化시켜 가면서 各 模型의 特性을 같은 條件으로서 比較 分析할 수 있도록 하였다.

다. 實驗材料<sup>(27)</sup>

모든 心壁型은 同質의 材料로서 그 粒度 分布는 Fig. 3-1와 같다. 定水位透水試驗에 依한 透水係數는  $k=5.31 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이었다. Filter用 자갈은 10 mm에 通過하고 No. 4체에 殘留하는 것으로 하였다.

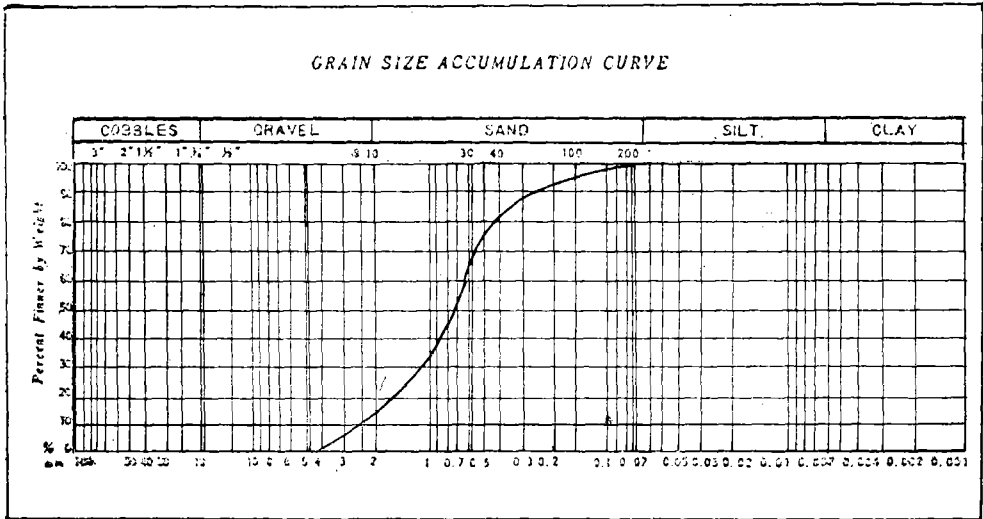


Fig. 3-1. Grain size accumulation curve of soil used in model test.

2. 分析方法

浸潤線의 分析은 上流水位別 浸潤線傾斜에 對한 關係流入點과 流出點 附近에서의 浸潤線 形狀 및 流出點의 位置를 究明하며 相似模型에 있어서의 浸潤線의 形狀을 比較하고 또한 filter를 設置한 경우에 對해서도 水平, 鉛直 및 傾斜 Filter의 各各에 對한 浸潤線 形狀을 相互 比較하고자 하였다.

浸透流量은 上流面 傾斜角  $\theta$ 를 달리하는 各 模型에 對해서 浸透流量을 計測하여 上流水位, 浸潤線 傾斜, 上流面 傾斜角 등과의 關係를 分析하고, 이에 關聯있는 上流面 傾斜角( $\theta$ ), 上流水位( $h$ ) 등 變數間의 相關關係로서  $f(q, \theta, h) = 0$ 의 關係式<sup>(28)</sup>을 算出하여 最小自乘法<sup>(24)(29)</sup>에 依한 그 誤差가 가장 작은 값을 갖는 式을 찾도록 한다. 그리고 filter를 設置한 경우에서도 上流水位에 따른 浸透流量의 變化를 水平, 鉛直, 傾斜 Filter에 對하여 分析한 것이다.

Filter를 設置한 경우 그 filter의 配置에 따른 浸潤線 및 浸透流量의 相關關係를 究明하기 위해서 이

에 影響을 줄 수 있는 것은 設置하는 filter의 形態에 따라 다르다. 또 水平 filter의 경우 그 filter 길이에 따른 影響을 받는다고 볼 수 있다. 따라서  $a_0$ <sup>(3)</sup> (水平 filter의 流出길이)가 特히 浸潤線長, 浸潤線의 傾斜度에 크게 影響을 준다는 것이 밝혀지고 있으므로 이를 注意깊게 觀測하여 그 影響을 究明하였다.

IV. 實驗結果

1. 浸潤線

가. 上流水位와 浸潤線 傾斜와의 關係

上流水位의 變化에 따른 下流水位別로 流入點에서 流出點까지의 距離( $d_1$ ) 및 浸潤線 傾斜( $I_1$ )를 觀測한 結果는 Table-4.과 같으며 이들의 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-1.이다.

浸潤線傾斜( $I_1$ )는 流入點 位置의 水位( $h$ )와 流出點의 位置( $h_1$ )의 差를 流入點과 流出點間의 距離( $d_1$ )로 나눈 것이다.

下流水位가 0cm, 5cm, 10cm로 變化시킬 경우 上

流水位及浸潤線 傾斜와의 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-1이다.

Table-5. 및 6. 은 堤體의 上下流面 傾斜가 平行 하지 않은 경우와 平行한 경우에 있어서 그 堤體

自體가 下流 및 上流로 傾斜시킨 경우와 中央形인 각 경우에 上流水位에 다른 浸潤線 傾斜를 堤體模 型形態別로 그 特性을 찾고자 實驗觀測한 것이며 이때에는 堤體 下流水位가 없는 경우를 對象으로

Table-4. Exit Point and Slope of Seepage line for different downstream water levels

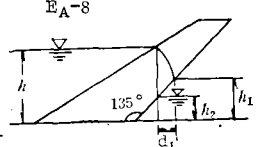
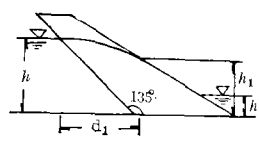
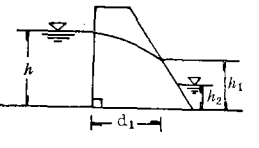
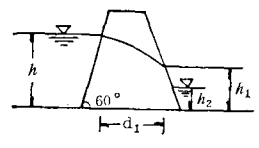
Model	$h$ (cm)	$h$ (cm)	$h_1$ (cm)	$d_1$ (cm)	$I_1$ (cm)
	50	0	36.2	13.0	1.06
		5	36.8	13.7	0.96
		10	37.1	14.4	0.89
	40	0	24.7	18.0	0.85
		5	25.5	19.0	0.76
		10	26.0	20.0	0.66
	30	0	14.3	24.3	0.65
		5	14.6	24.5	0.63
		10	15.1	25.8	0.58
	50	0	32.5	55.0	0.32
		5	34.4	52.7	0.30
		10	36.9	49.0	0.27
	40	0	23.4	62.5	0.27
		5	25.7	58.0	0.25
		10	26.7	55.0	0.24
	30	0	13.2	68.0	0.25
		5	15.1	65.5	0.23
		10	15.9	62.0	0.23
	50	0	19.8	47.0	0.64
		5	21.5	45.5	0.63
		10	22.3	45.1	0.57
	40	0	14.5	50.0	0.51
		5	15.9	49.7	0.49
		10	16.4	49.0	0.48
	30	0	9.9	53.5	0.38
		5	10.1	53.2	0.37
		10	10.4	53.0	0.37
	50	0	28.1	31.3	0.70
		5	29.5	31.0	0.66
		10	30.5	30.7	0.64
	40	0	17.9	38.5	0.57
		5	19.0	38.0	0.55
		10	19.9	37.0	0.54
	30	0	12.0	43.5	0.41
		5	13.4	43.0	0.39
		10	14.1	42.7	0.37

Table-5. Exit Point and Slope of Seepage line for Zero downstream water level (non-parallel section)

experiment Sign	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$h$ (cm)	$h_1$ (cm)	$d_1$ (cm)	$I_1$	$q$ ( $\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm}$ )
$E_A$ — 8	31	50	36.2	13.0	1.06	3.44
		40	24.7	18.0	0.85	2.47
		30	14.3	24.3	0.65	1.67
		20	6.5	33.0	0.41	0.99
$E_A$ — 13	45	50	32.5	20.8	0.84	3.05
		40	22.0	27.0	0.67	2.19
		30	12.5	34.0	0.51	1.28
		20	6.0	41.5	0.34	0.69
$E_B$ — 4	120	50	31.0	50.0	0.38	2.11
		40	22.5	54.5	0.32	0.95
		30	12.5	62.0	0.28	0.43
		20	6.5	64.0	0.21	0.28
$E_B$ — 7	135	50	32.5	55.0	0.32	1.84
		40	23.4	62.5	0.27	0.90
		30	13.2	68.0	0.25	0.40
		20	7.0	68.5	0.19	0.25

모래로 築造된 堤 模型의 浸透에 關한 研究(I)

$E_B$	—	13	150	50	34.0	66.0	0.24	1.31
				40	25.0	70.0	0.21	0.76
				30	15.5	74.5	0.19	0.34
				20	8.0	76.0	0.16	0.21
$E_C$	—	1	53.3	50	30.0	26.5	0.75	2.77
				40	20.5	32.0	60.1	1.92
				30	11.5	40.0	0.46	1.13
				20	5.5	46.5	0.31	0.56
$E_C$	—	2	90	50	19.8	47.0	0.64	2.31
				40	14.5	50.0	0.51	1.26
				30	9.9	53.5	0.38	0.62
				20	5.0	56.5	0.27	0.33
$E_D$	—	1	60	50	28.1	31.3	0.70	2.68
				40	17.9	38.5	0.57	1.59
				30	12.0	43.5	0.41	0.90
				20	5.5	48.0	0.30	0.55
$E_D$	—	3	71.6	50	27.0	34.5	0.67	2.54
				40	17.0	43.0	0.53	1.57
				30	11.5	46.0	0.40	0.84
				20	5.5	51.0	0.28	0.43

※  $I_1 = \frac{h-h_1}{d_1}$ ,  $h_2=0\text{cm}$

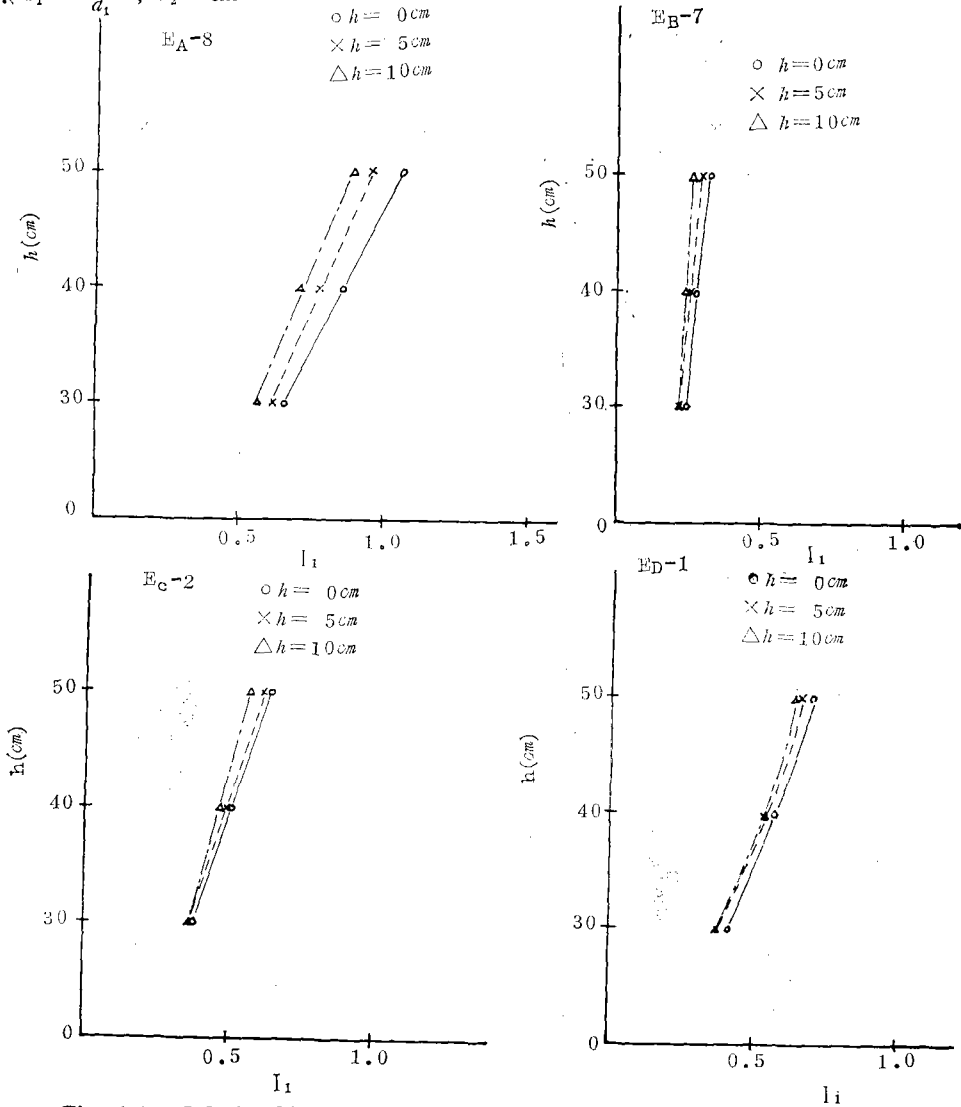


Fig. 4-1. Relationship between slope of seepage line and upstream water levels.

Table-6. Exit point and slope of seepage line for zero downstream water level (parallel section)

Experiment Sign	$\theta$ (°)	$h$ (cm)	$h_1$ (cm)	$d_1$ (cm)	$I_1$	$(\text{cm}^3/\text{sec} \cdot \text{cm})$
$E_E$ — 12	60	50	29.0	27.0	0.78	2.97
		40	20.0	28.5	0.70	2.00
		30	13.0	30.5	0.56	1.23
		20	7.0	32.0	0.41	0.57
$E_E$ — 14	71.6	50	28.0	32.0	0.69	2.78
		40	19.5	33.0	0.62	1.77
		30	12.0	34.0	0.53	1.05
		20	6.5	36.0	0.38	0.50
$E_F$ — 4	120	50	32.0	51.0	0.35	2.28
		40	23.5	50.0	0.33	1.20
		30	15.0	50.0	0.30	0.60
		20	8.0	49.0	0.24	0.32
$E_F$ — 7	135	50	35.5	54.5	0.27	2.18
		40	26.5	54.0	0.25	1.18
		30	17.0	53.5	0.24	0.55
		20	8.5	54.0	0.21	0.29
$E_F$ — 12	150	50	36.0	65.0	0.22	1.42
		40	26.5	64.5	0.21	0.76
		30	17.0	64.5	0.20	0.36
		20	9.5	63.5	0.17	0.22
$E_G$ — 1	90	50	31.0	40.0	0.48	2.58
		40	23.0	40.0	0.43	1.53
		30	15.0	40.0	0.38	0.89
		20	8.0	40.0	0.30	0.43

※  $I_1 = \frac{h-h_1}{d_1}$ ,  $h_2=0\text{cm}$

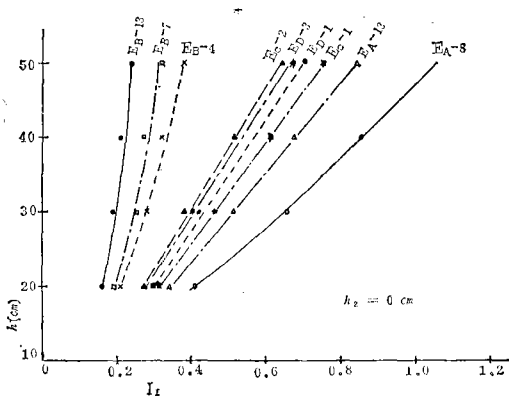


Fig. 4-2. Relationship between slope of seepage line and water level (non-parallel section)

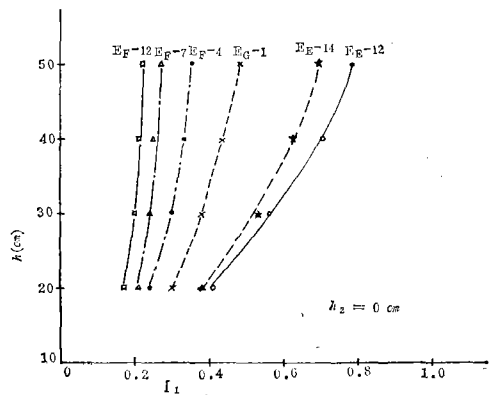


Fig. 4-3. Relationship between slope of seepage line and water level (parallel section)

하였다. 이들 關係를 上流水位에 따른 浸潤線 傾斜의 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-2 및 4-3이다.

나. 流入點과 流出點

(1) 流出點에서의 浸潤線 形狀

上流面 傾斜의 變化에 따른 流入點 附近에서의 浸潤線을 追跡하여 圖示한 것이 Fig. 4-4이며 埧體 下流面에서 浸潤線이 下流傾斜面을 橫斷 流出할 경우 流出點 附近의 浸潤線을 追跡한 것이 Fig. 4-5이다

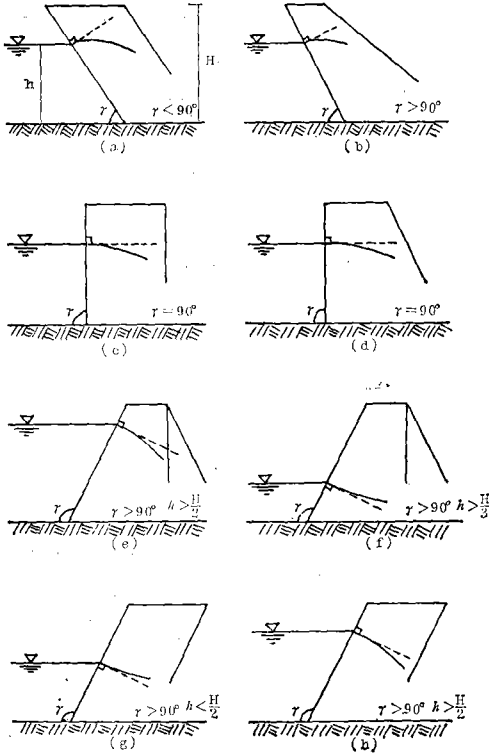


Fig. 4-4. Shape of seepage line at entrance.

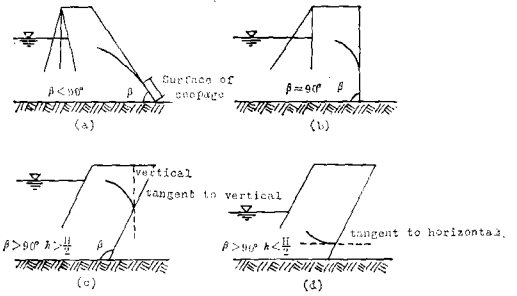


Fig. 4-5. Shape of seepage line at exit point.

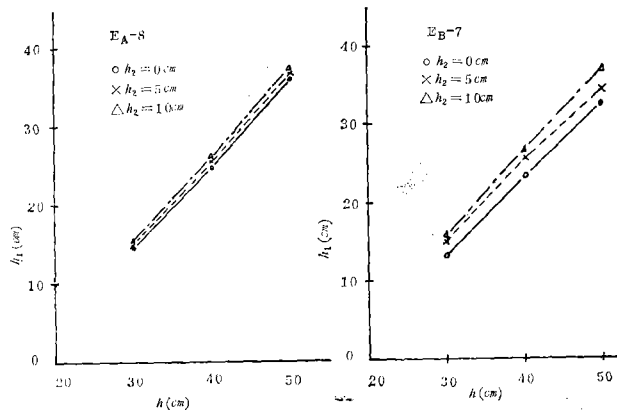
(2) 流出點 位置

Table-4.에 依해서 上流水位의 變化에 따른 流出點의 位置를 나타낸 것이 Fig. 4-6이다. 또 上流水位  $h$ 와 流入點과 流出點間의 距離  $d_1$ 은 密接한 關係가 있으며 이 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-7이다.

그리고 外部的로 주어진 條件下에서 動水傾斜  $I_2$ 가 下流水位에 對한 流出點의 相對的인 位置에 미치는 影響을 考察하기 위하여 下流水位와 流出點의 差(a)와 上下流水位差(b)의 比를 求하여 浸潤線 傾斜  $I_1$ 과 動水傾斜  $I_2$ 에 對하여 分析하였다(Table-5-1, Fig. 5-1, 5-2, 5-3, 5-4). 여기서  $I_2$ 는 上流水位( $h$ )와 下流水位( $h_2$ )의 差를 流入點과 流出點間의 距離( $d_2$ )로 나눈 값이다.

다. 幾何學的인 相似模型과 浸潤線 形狀

同一模型이 上流로 기울어져 있는 경우와 下流로 기울어져 있는 경우에는 各各 流入側이 달라지므로 그 浸潤線 形狀도 相異할 것이다. 여기서 幾何學的인 相似模型으로 볼수 있는 模型으로 上下流面이 平行하지 않은 模型에서는  $E_A-13$  ( $\theta=45^\circ$ ,  $\beta=$



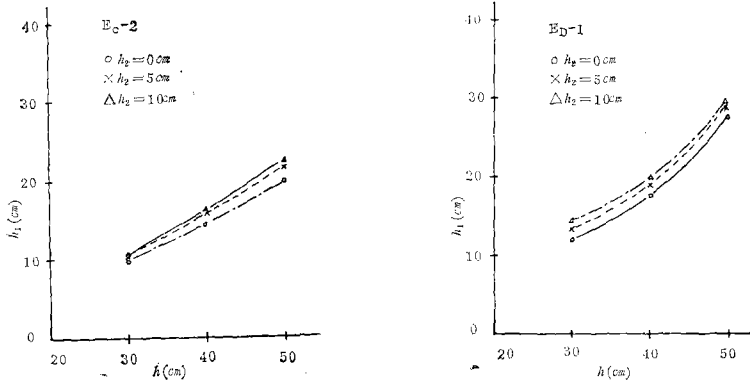


Fig. 4-6. Relationship between upstream water level and exit point.

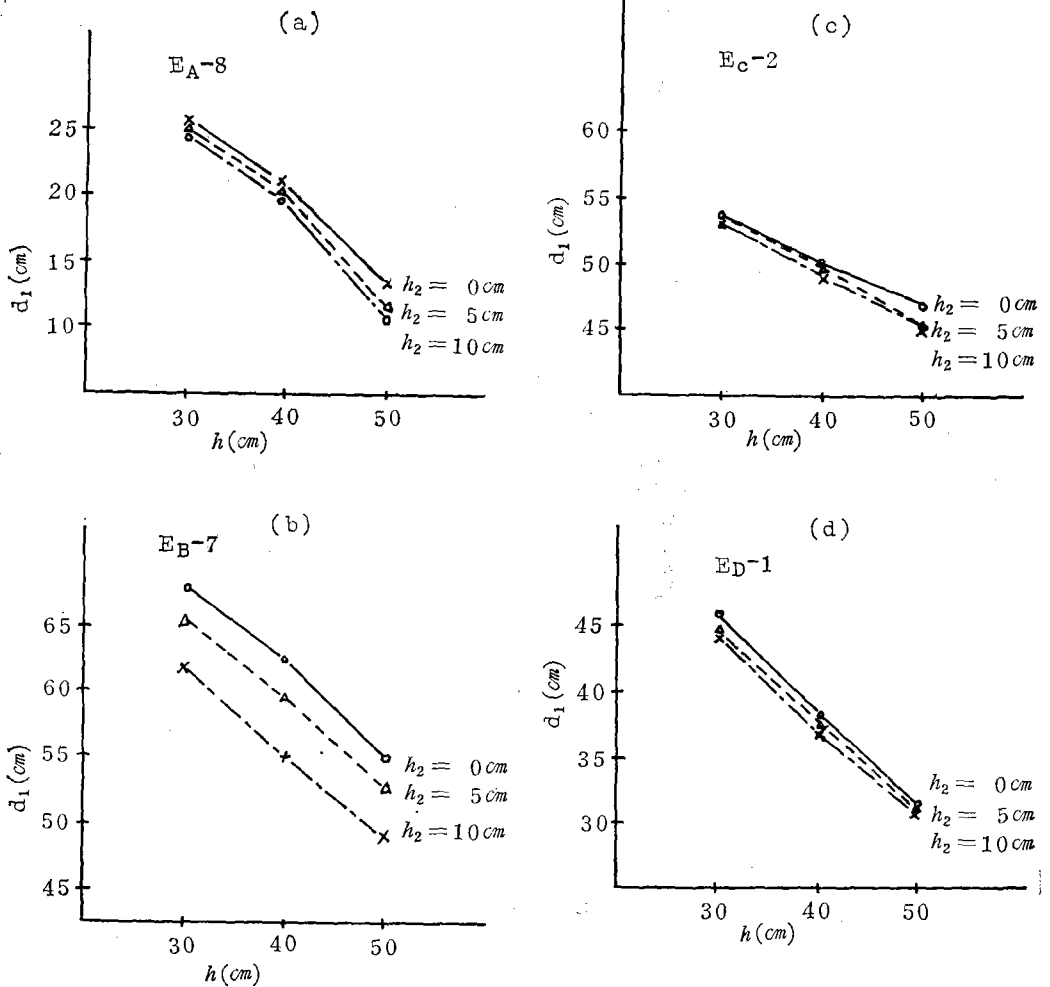


Fig. 4-7. Relationship between upstream water level and length with entrance and exit point.

108.4°)과  $E_B-2(\theta=108.4^\circ, \beta=45^\circ)$ , 그리고 上下  
 流面이 平行한 模型에서는  $E_B-9(\theta=45^\circ, \beta=135^\circ)$   
 와  $E_F-7(\theta=135^\circ, \beta=45^\circ)$ 을 使用하여 各 上流水  
 位別, 즉  $h=50\text{cm}, 40\text{cm}, 30\text{cm}, 20\text{cm}$ 일때의 浸潤

線 形狀을 相互 比較하여 그림으로 나타낸 것이 Fig.  
 4-8, 4-9이다.

라. Filter를 設置한 경우

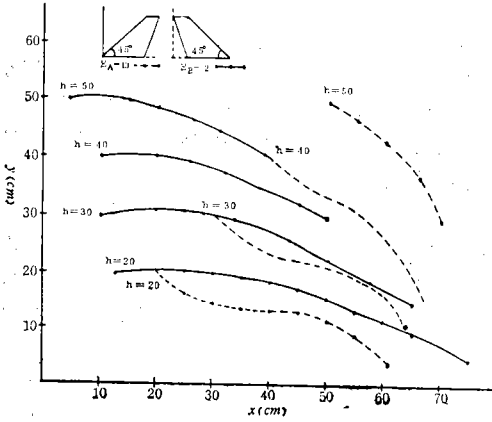


Fig. 4-8. Comparison of seepage lines between models  $E_A-13$  &  $E_B-2$ .

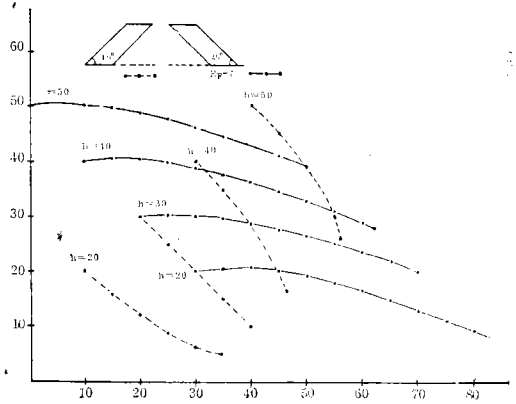


Fig. 4-9. Comparison of seepage lines between models  $E_A-9$  &  $E_F-7$

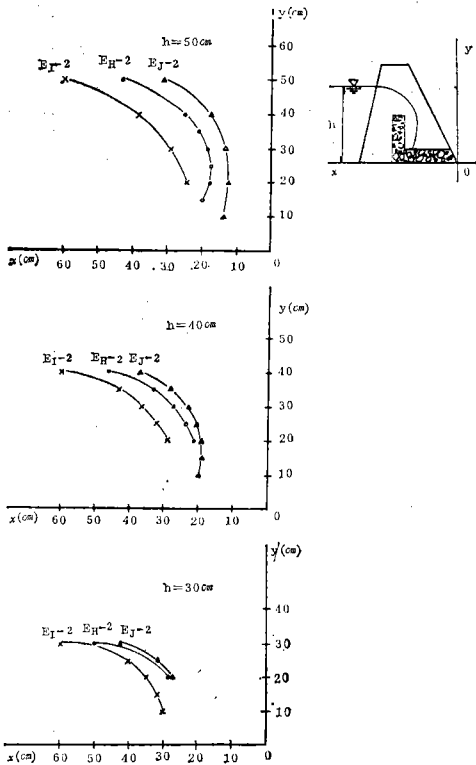


Fig. 4-10. Comparison of seepage lines among models with horizontal filter.

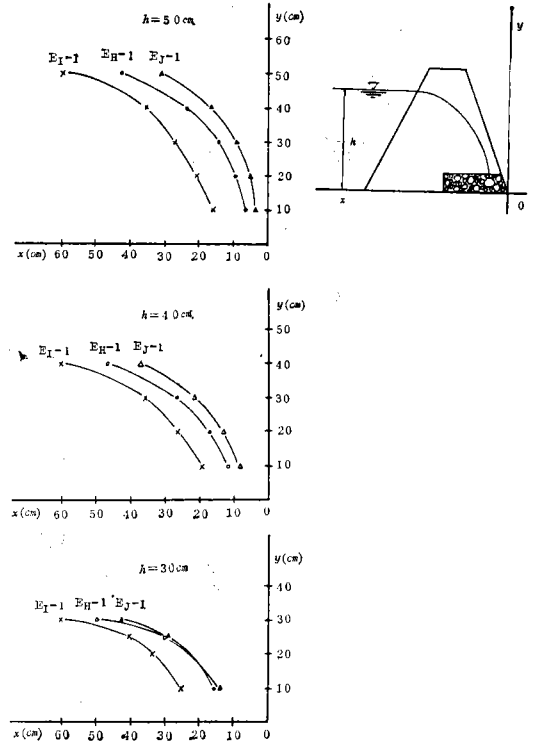


Fig. 4-11. Comparison of seepage lines among models with vertical filter.



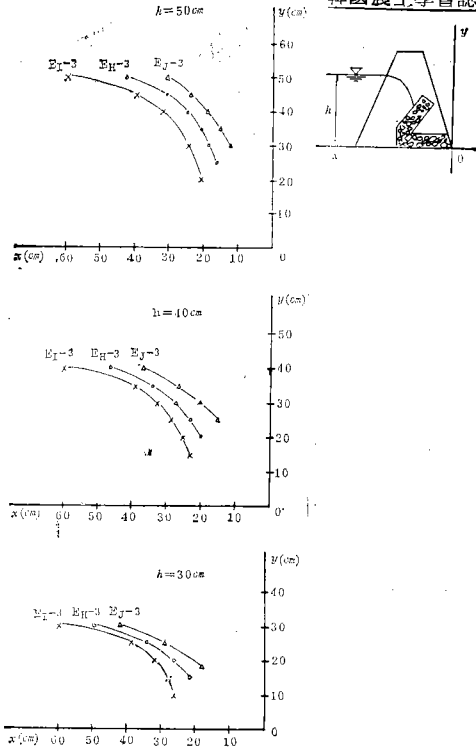


Fig. 4-12. Comparison of seepage lines among models with inclined filter.

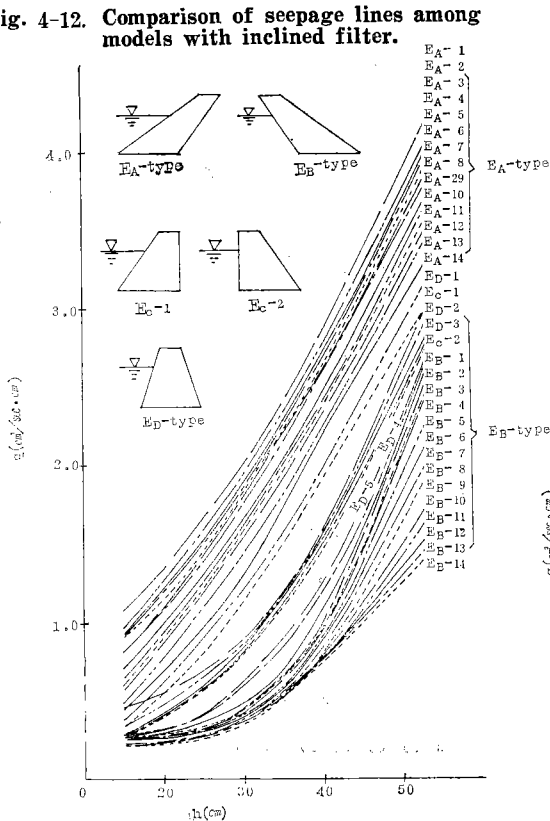


Fig. 4-13. Relation between water level and seepage quantity (non-parallel section)

Fig. 4-10, 4-11, 4-12는 堤體模型에 對한 各種 filter에서의 浸潤線을 上流水位別로 追跡한 것을 圖示한 것이다. 여기서 各 曲線의 下端部는 浸潤線이 各種 filter에 流入되는 位置를 나타낸다.

2. 浸透流量

가. 上流水位와 浸透流量과의 關係

各 堤體模型別로 實測한 것을 圖示한 것이 Fig. 4-13, 4-14이다. Fig. 4-13은 堤體 上下流面이 平行하지 않은 경우이며, Fig. 4-14는 平行한 경우를 圖示한 것이다.

나. 浸潤線 傾斜와 浸透流量과의 關係

浸透流量은 上下流水位 및 堤體 模型에 따라 다른 것이다. 堤體 模型에 따라서 上下流水位에 따른 浸透流量과의 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-15, 4-16이다.

Fig. 4-15는 堤體 模型의 上下流面이 平行하지 않은 경우이며 Fig. 4-16은 平行한 경우이다. 여기서  $I_1$ 은 上流水位와 浸潤線이 堤體 下流傾斜角에 流出하는 點과 差를 그 두 點간의 水平距離로 나눈것으로서 浸潤線 傾斜이다.

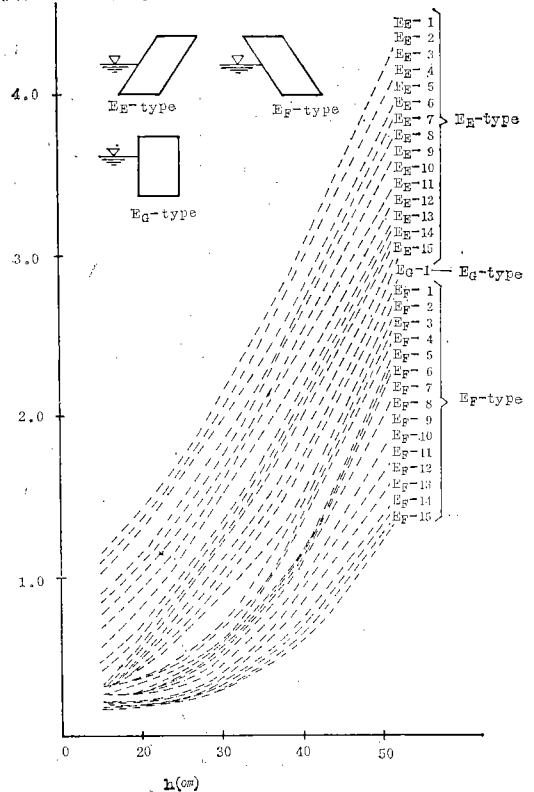


Fig. 4-14. Relationship between upstream water level and seepage quantity (parallel section)

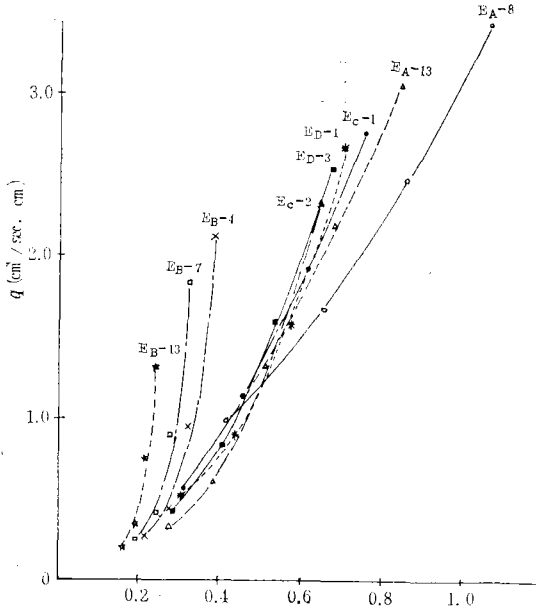


Fig. 4-15. Relationship between slope of seepage line and seepage quantity (non-parallel section)

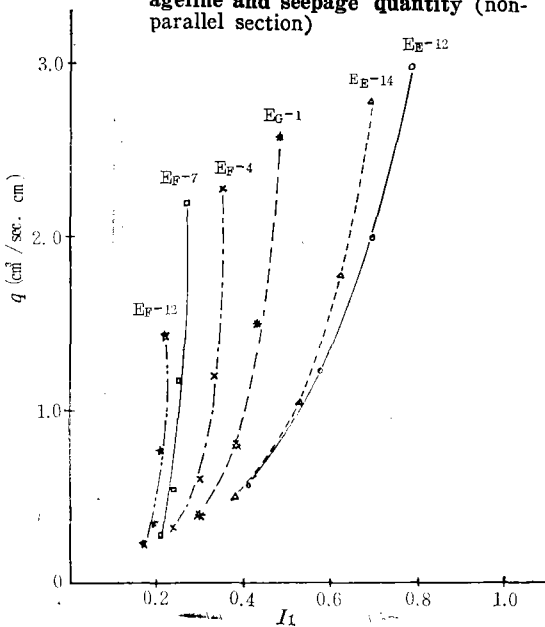


Fig. 4-16. Relationship between slope of seepage line and seepage quantity (parallel section)

다. 上流面傾斜角과 浸透流量과의 關係

上流面傾斜角  $\theta$ 는 堤의 形態를 決定하는 重要한 要素가 될수 있다. 또 이의 必要條件으로는 浸透流量을 들수 있다. 同一한 容積을 가지는 模型에 있어서 各 上流水位別로 이들 關係를 圖示한 것이 Fig. 4-17, 4-18이다.

라. Filter를 設置한 경우

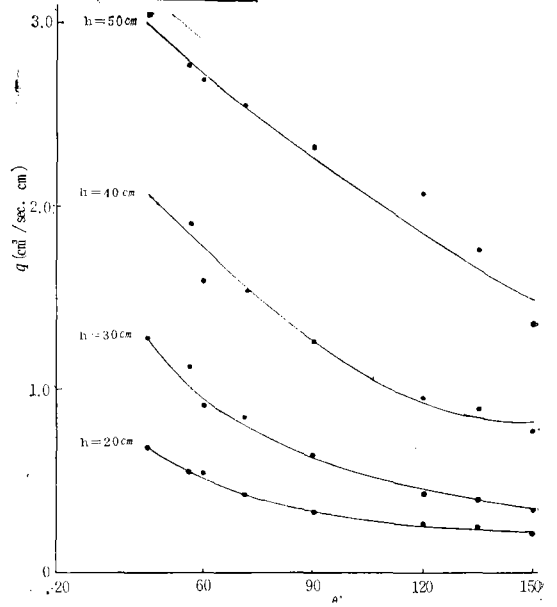


Fig. 4-17. Relationship between inside angle of upstream slope and seepage quantity (non-parallel section)

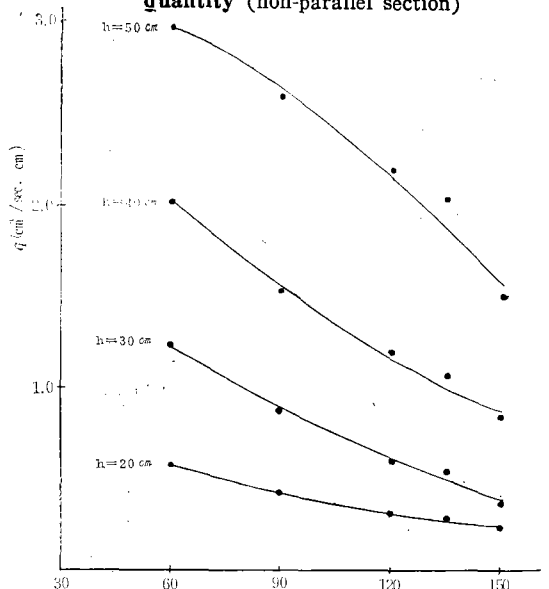
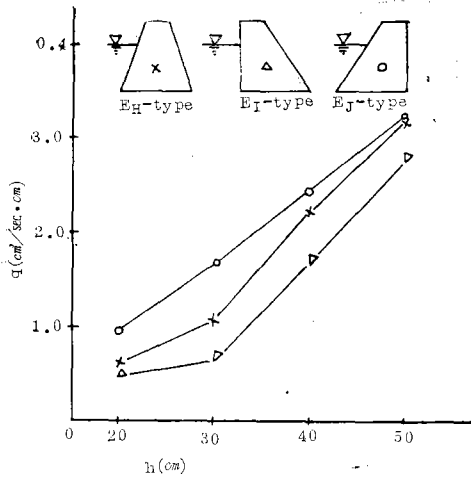
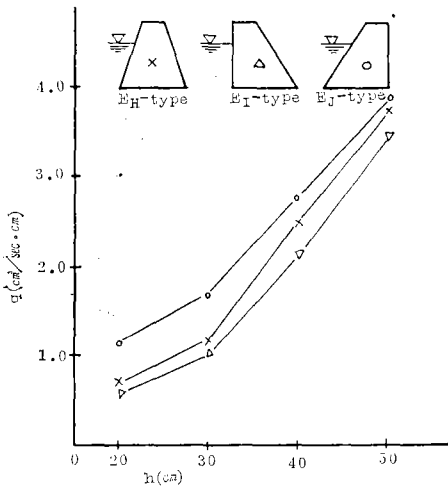
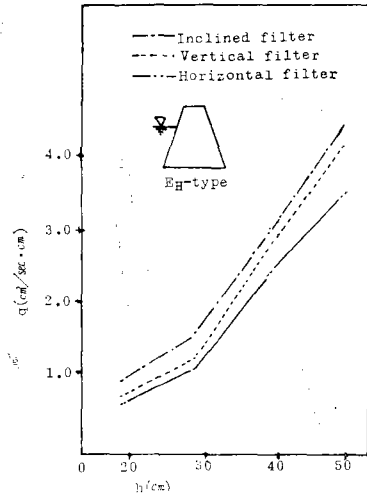


Fig. 4-18. Relationship between inside angle of upstream slope and seepage quantity (parallel section.)

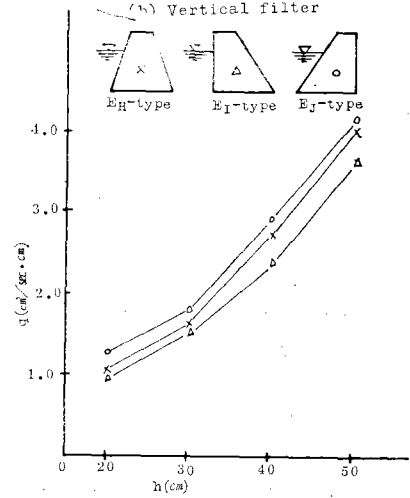
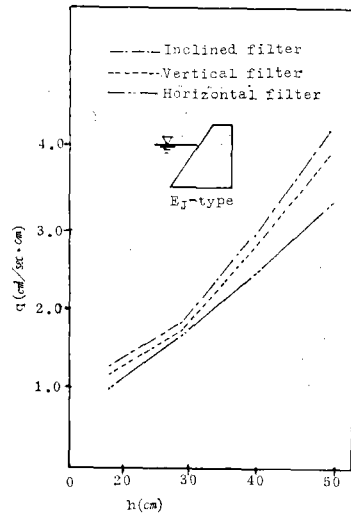
filter를 設置한 경우는 堤體模型이 中央型인  $E_I$ 型과 中間型으로 上流面傾斜角이  $90^\circ$ 인  $E_J$ 型 및 上流面傾斜角이 銳角인  $E_L$ 型에서 上流水位를 달리하는 경우의 浸透流量을 實測한 結果를 圖示한 것이 Fig. 4-19, Fig. 4-20이며 여기서 (a), (b), (c)는 각각 水平, L形 및 傾斜 L形 Filter를 設置한 경우를 圖示한 것이다.



(a) Horizontal filter



(b) Vertical filter



(c) Inclined filter

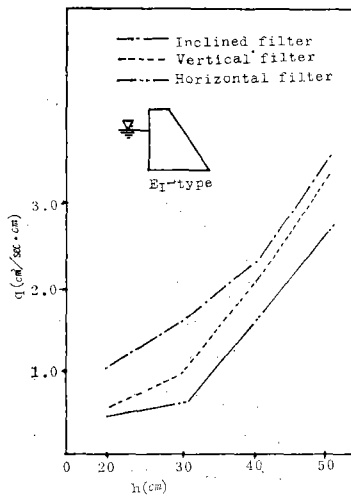


Fig. 4.19. Relationship between upstream water level and seepage quantity.

Fig. 4-20. Relationship between upstream water level and seepage quantity.