

# 土質堤體의 Piping 파괴에 대한 實驗的 研究

An Experimental Study on Piping Failure of Earth Embankment

鄭 亨 植\*  
Chung, Hyung - Sik  
柳 在 逸\*\*  
Ryu, Jae - Il  
安 相 魯\*\*\*  
An, Sang-Ro

---

---

## Abstract

The creep ratio, which has been applied as a measure to prevent piping failure in designing embankments, has been originally proposed for the protection of masonry or concrete dam from piping along the boundary surface between the foundation soil and the bottom of the structure.

In this study, it has been investigated whether this creep ratio could be applied for the earth embankment through the model test and we reevaluated the required creep ratio in the present design criteria.

Based on this research, it was concluded that a piping failure would always occur within the embankment body and not through the boundary surface between the embankment and foundation.

Therefore it could be said that the present design criteria are illogical to determine the design creep ratio according to less permeable soil no matter whether the soil forms embankment or foundation.

## 要 旨

土質堤體 設計時 piping에 대한 대책으로 현재에 적용되고 있는 creep比는 원래 Masonry 또는 콘크리트 댐의 底面과 基礎地盤土質과의 接觸面에 따른 浸透에 의한 piping의 방지를 위한 기준이었다.

---

\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學, 教授  
\*\* 正會員, 大田工業大學 土木工學科, 講師  
\*\*\* 正會員, 漢陽大學校 大學院, 博士課程

본 연구에서는 이 creep 비가 土質로 형성된 堤體에서도 적용될 수 있는지의 여부를 模型實驗을 통하여 究明하고 현행 creep 비기준을 재평가 하였다.

연구결과 土質堤體에서 발생하는 piping 과피는 土質堤體와 基礎地盤과의 接觸面에서는 발생하지 않았으며 土質種類에 관계없이 堤體內에서만 발생하였다. 따라서 堤體를 형성하는 土質과 基礎地盤土質중 透水係數가 적은 土質을 기준으로 creep 비를 정하는 현재의 設計基準은 불합리함을 알 수 있었다.

## 1. 序 論

최근 서남해안의 개발이 본격화됨에 따라 防潮堤의 築造가 많아지는 추세에 있으며 이와 더불어 堤體의 안정성문제가 대두되고 있다.

浸透水を 堤體의 下流法面に 浸出케 하는 浸透壓과 流速이 堤體의 土粒子를 流下시킬 정도로 증대되면 파이핑이 발생하게 되는데, 堤體의 流線이 집중되는 下流法面 끝부분에서 流速이 커지게 되어 파이핑은 이 부분에서 발생하게 되며<sup>1, 2, 3)</sup> 이는 浸透路長과 깊은 관계가 있다.

그리고 堤體斷面은 파이핑에 대한 安全性을 고려하여 결정하는데, 堤防이 파이핑에 대해 안전하기 위해서는 浸透路長과 水頭差의 비인 creep 비<sup>4)</sup>가 충분히 고려되어야 하며 creep 비는 안전성과 경제성을 고려하여 결정하여야 한다.

그러나 堤體斷面の 構造改善을 위한 많은 研究가 진행되어 왔으나 파이핑의 安定性에 대하여는 현재까지 별로 연구되지 않았으며 따라서 이에 대한 技術發展의 계기가 없었다고 할 수 있다.

현재 堤體設計에 적용되고 있는 기준은 원래 Masonry 또는 콘크리트 堤의 底面과 基礎地盤의 接觸面을 따른 浸透에 의한 파이핑을 방지하기 위한 기준으로<sup>5, 6, 7, 8)</sup> 이를 土質로 형성된 堤體에 적용하는 것은 여러가지 문제점을 안고 있다.

현재의 土質堤體에 대한 설계기준<sup>12)</sup>에는 土質堤體와 基礎地盤중 투수계수가 적은 토질을 기준으로 일정한 creep 비를 확보하도록 하였는데, 이 기준은 土質堤體와 基礎地盤의 接觸面에 따른 浸透에 대한 것인지 또는 土質堤體와 基礎

地盤土質에서 파이핑가능성이 같이 있다고 가정 한 것인지 명확치 않다.

本 研究에서는 현재 적용되고 있는 설계기준의 근거를 명확히 究明하고 그 타당성을 검토하고자 堤體를 통한 파이핑, 堤體와 基礎地盤의 接觸面에 따른 파이핑 및 基礎地盤을 통한 파이핑의 발생 가능성을 模型實驗을 통하여 검토하였다. 模型實驗에서는 실제로 防潮堤에 사용되는 토질로서 模型堤體를 만들어 인위적으로 파이핑을 유발하여 파이핑위치를 관찰하고 이때의 creep 비를 계산하여 현재 적용되는 설계기준과 비교분석하였다.

## 2. 理論的 考察

### 2.1 浸潤線

土質堤體에서 파이핑이 발생하는 위치는 주로 浸潤線의 浸出點부근으로 이론적인 침윤선 결정 방법을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

梯形斷面인 경우 浸潤線을 결정하는 방법은 Casagrande와 Kozeny에 의해서<sup>9)</sup> 다음과 같이 제안되었다.

Fig. 1은 浸潤線形狀을 나타낸 것으로서 그 作圖方法은 基本拋物線의 성질에 따라 焦點C를 原點으로 하고 焦點距離  $CK = S$ 라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$\sqrt{X^2+Z^2} = X+S$$

$$X = \frac{Z^2-S^2}{2S}$$

$$\text{즉, } S = \sqrt{d^2-h^2}-d$$

$$CD = \frac{1}{2}S$$

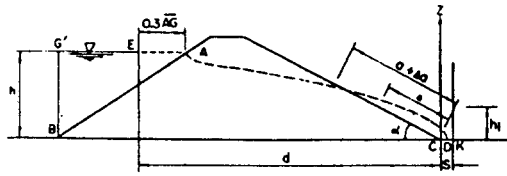


Fig. 1 Seepage line shape of trapezoidal section

基礎地盤이不透水性일때 堤體를 통한 透水流  
量  $q$  및 浸透되는 반대쪽 비탈면에 나타나는  
露出面  $a$ 의 결정<sup>10~12)</sup>은 다음과 같다.

(1) Schaffernak 方法

$$q = ky \frac{dy}{dx} = k \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \dots (1)$$

(2) Casagrande 方法

$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

여기서,  $S \doteq \sqrt{h^2 + d^2}$  으로 할 때

$$a = \sqrt{d^2 + h^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \dots (2)$$

2.2 설계기준에 적용되는 creep 比

浸透水を 下流法面に 浸出케 하는 압력과  
流速이 堤體의 土粒子를 流失시킬 정도로 증대  
되면 piping이 발생되는데, 堤體의 流線이 집중  
되는 下流法面 끝부분에서 流速이 커지게 되어  
이 부분에서 piping의 발생위험성이 증대되며  
이는 浸透路長과 깊은 관계가 있다. 故로 堤體의  
有效幅은 piping에 대한 안전율을 고려하여  
결정되어야 한다. 즉, 浸透路長과 水頭差의 比인  
creep 比를 고려한다.

현재 적용되고 있는 土質堤體의 creep 比의  
기준은 Table 1과 같으며 이 기준은 원래  
Masonry 댐의 파이핑을 방지하기 위한 기준에  
서 비롯되었다.

Table 1. Creep ratios

堤體 또는 지반의 토질	Creep 比	비 고
Silt	9.0	堤體 또는 기초지반의
가는 모래	7.5	토질중 透水性이 적은
굵은 모래	6.0	토질을 취한다.

3. 實 驗

본 실험에서는 堤體를 통한 파이핑 및 基礎地  
盤을 통한 파이핑의 발생가능성을 검토하기  
위하여 실제로 防潮堤에 사용되는 土質로 單一  
堤體 및 上, 下층이 다른 토질로 형성된 模型堤  
體를 만들어 인위적으로 파이핑을 유발하여  
파이핑 위치를 측정하였다.

3.1 實驗裝置

본 실험을 위해 실험장치를 다음과 같이 제  
작·사용하였으며 개략적인 立體圖는 Fig. 2  
와 같다.

堤體傾斜面 形成時 수조통과 堤體의 접촉면  
사이의 水位가 접하므로 이로 인한 접촉면의  
붕괴를 방지하기 위하여 filter를 설치하고,  
filter 주변에 치어콜을 사용하여 고정되게 하였  
다. filter는 수조통의 入口에 排水調節을 위하여  
여단이 형식으로 제작하였다. 또한 여단에  
따라 5cm 간격으로 두께 1cm 크기의 糞대를  
부착하여 수위상승을 최대한 억제하였다. 그리  
고 사용된 filter는 粒徑의 크기가 대략 10mm  
크기의 균등한 粒子의 試料를 사용하여 모시망  
으로 遮斷하고 철망으로 이중 接着하였다.

下流水位를 조절하기 위해서 높이 10cm의  
下流水位板을 부착하여 중앙높이 5cm에 20  
mm 관의 排水口를 뚫어 下流水位가 자유로이  
조절되도록 하였다.

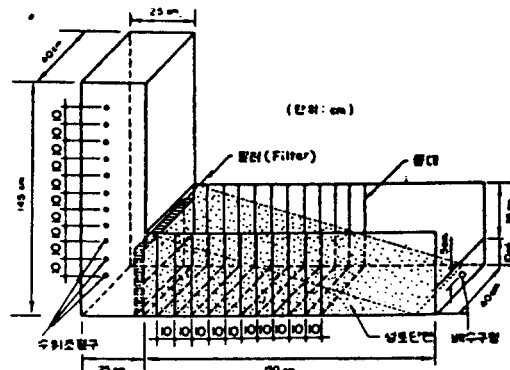


Fig. 2. Embankment model box.

堤體內를 통과하는 물이 실험상자의 內壁과 흙의 접측면을 따라 흐르는 것을 억제시켜(creep path의 유발방지) 堤體의 중앙부쪽으로 물의 흐름을 유도하기 위하여 상자내부의 兩側面과 바닥에 폭 3cm, 두께 1cm의 쥘대를 지그 잭으로 부착하였다. 또한 模型堤體를 통과하는 물의 높이를 측정하기 위해서 바닥면으로 부터 6cm 높이에 10cm 간격으로 11개의 水位測定管을 설치하였다.

### 3.2 實驗方法

吐口部の 土粒子流失에 의한 진행성파이핑과 境界層堤體의 境界面에 따라 일어나는 浸透水에 의한 piping을 측정하기 위해서 실험상자안에 Fig. 3과 같이 模型堤體를 쌓는다. 먼저 漢江砂를 실험상자안에 쌓으면서 다짐을 하고 濕潤密度를 측정하면서 模型堤體를 만들었다.

다짐방법은 시료토를 두께 10cm씩 포설하고 물다짐을 하면서 築堤하였고, 측제직후 시료를 채취하여 습윤밀도를 측정하였으며 채취한 장소는 다시 시료토로 채워서 실험하였다.

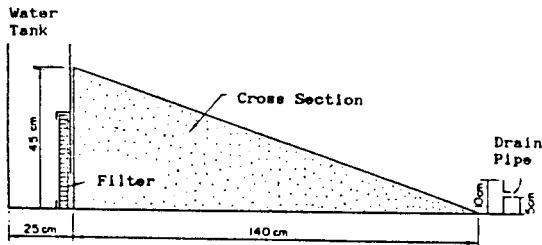


Fig. 3 The cross-section of homogeneous embankment model.

漢江砂로 模型堤體를 형성시킨 후 수조통에 水位를 10cm 높이로 유지하면서 filter를 통과한 물이 堤體內에 浸透하여 下流部の 水位가 5cm 될 때까지 방치해 둔다. 그리하여 下流水位가 5cm로 되었을 때 수조통의 水位를 上昇시키는데 上昇速度는 5cm/hr로 하였다.

수조통의 水位가 상승하여 어느 정도 높이에 올라가면 堤體內의 浸透水에 의하여 堤體斜面表面에 土粒子流失(erosion)이 일어나는데, 이

土粒子流失이 일어나는 지점에서 수조통의 水位를 측정하고 또한 堤體側面에 설치된 수위측정관에서 각 지점의 水頭를 측정하여 측정된 浸透水頭를 浸潤線으로 하였다. 이와 같은 방법으로 堤體斜面을 쌓고 3회반복실험 하여 평균값으로 실제 浸潤線을 作圖하였다.

下流水位變化를 위해서 5cm에서 10cm로 변화시켜 먼저 방법대로 堤體斜面을 형성시키고 수조통의 水位를 상승시키므로써 堤體內의 浸透水에 의하여 堤體斜面表面에 土粒子流失이 일어나는 지점을 알아내고 이때의 浸潤線位置를 측정한다. 또한 單一堤體斜面에서 파이핑발생지점 이상의 높이까지 filter로 피복한 후 파이핑을 관찰하였으며 이 실험을 下流水位 10cm에서 3회 반복하였다.

試料土를 각각 바꾸어서 山土, 중간모래, 굵은 모래, 浚渫砂 등으로 模型堤體를 만들어서 下流水位를 5cm와 10cm로 하여 각각 3회씩 漢江砂와 같은 조건으로 실험하였다.

異質材料로 형성된 堤體의 境界面에서 일어나는 浸透水에 의한 파이핑의 가능성을 확인하기 위하여 서로 다른 두 종류의 試料土를 上·下층으로 구분하여 Fig. 4와 같이 쌓는데, 下層두께를 6cm로 깔고 그 위에 堤體斜面을 쌓고 浸透水에 의한 下流水位를 각각 5cm와 10cm로 유지시켰을 때 堤體斜面의 表面에서 土粒子流失이 일어나는 지점을 알아내고 이때의 浸潤線 위치를 측정하였다.

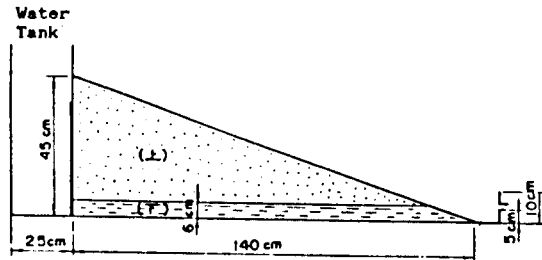


Fig. 4. The cross-section of embankment model which composed with distinctive soils

### 3.3 試料土

본 실험에 사용한 試料土는 漢江砂, 山土,

중간모래, 굵은모래, 浚渫砂, 海成粘土 등으로, 이들 試料土에 대한 物性試驗에 의해 그 성질을 파악하였는데 다음과 같다.

(1) 漢江砂: 漢江의 서울부근에서 채취한 것으로 粒度均等하고 #4 체를 통과하고 #200 체에 남는 試料로서 比重이 약 2.60이며 非塑性인 모래로서 粒度分布曲線은 Fig. 5 A와 같다.

(2) 浚渫砂: 群山港(金江河口)에서 준설된 試料로 土性은 粒度가 均等한 실트질모래로서 粒度分布曲線은 Fig. 5 B와 같다.

(3) 중간모래: 서울근처에서 채취가 곤란하여 벽돌공장에서 사용되고 있는 것으로 土性은 比重이 2.58, 粒度分布가 不良한 非塑性 모래로서 粒度分布曲線은 Fig. 5 C와 같다.

(4) 굵은모래: 중간모래중에서 채분석하여 #4 체에 남는 試料로서 粒度分布曲線은 Fig. 5 C와 같다.

(5) 山土: 태릉의 丘陵地에서 채취한 흙으로 土性은 比重이 2.64이며 壓縮性이 작은 모래질 실트로서 粒度分布曲線은 Fig. 5 D와 같다.

(6) 海性粘土: 大湖地區第1號防潮堤 근처에서 채취한 흙으로 土性은  $G_s=2.67$ ,  $\gamma_t=1.82$  t/m<sup>3</sup>,  $q_u=0.56$  kg/cm<sup>2</sup>,  $C=0.13$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi=24^\circ$ 이다.

#### 4. 實驗結果

堤體斷面으로 통하는 浸透水에 있어서 문제가 되는 것은 浸潤線露出에 의한 土粒子流失이 진행성파이핑으로 발전되는 것과 성토재료와 기초지반 사이로 흐르는 浸透水에 의한 파이핑이다.

이들 각각에 대해서 파이핑이 일어날 때의 水頭差, 初期파이핑발생지점등 측정된 결과를 조건별로 정리하고, 이 결과에 따라 算出한 파이핑파괴시의 creep比는 Table 3과 같으며 이들 중 대표적인 경우(漢江砂)를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 6이다.

#### 5. 實驗結果에 대한 分析 및 考察

堤體內的 浸透水 및 基礎地盤과의 境界面을 따라 흐르는 물에 의해 발생하는 파이핑에 있어서 水頭差와 豫想浸透路長(L)에 의한 creep比(L/H: Casagrande式에 의해 결정) 및 파이핑始發點으로 부터의 거리에 의한 creep比(L'/H: 실험결과로부터 결정)는 Table 3과 같다.

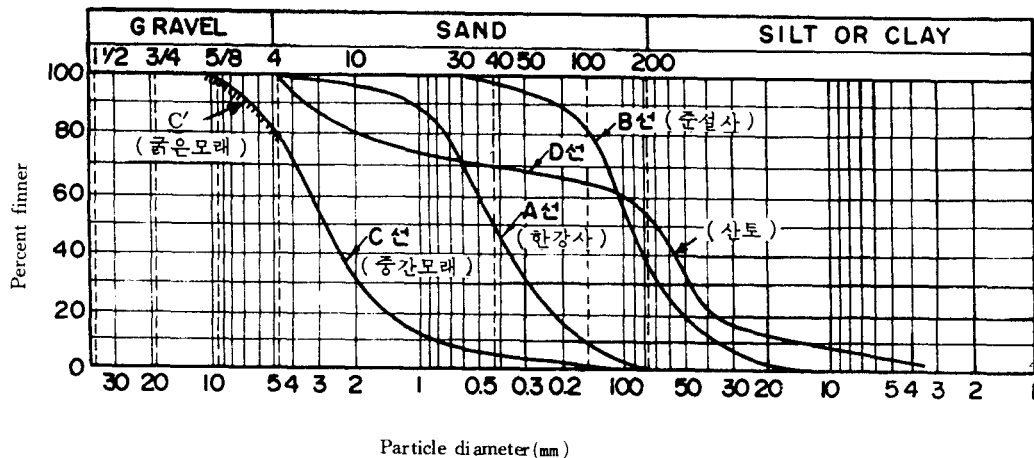


Fig. 5 Particle-size distribution curves of sample soils.

그리고 試料土의 透水係數測定結果는 Table 2와 같다.

##### 5.1 파이핑 파괴시의 水頭差

각 試料의 破壞時水頭差는 單一堤體에서 山土

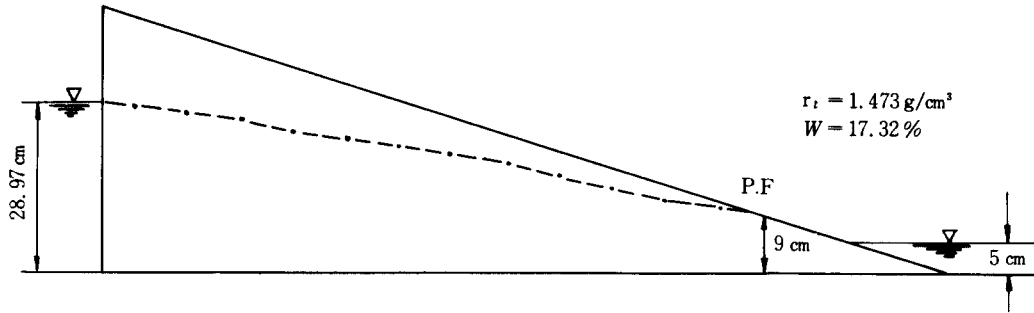
Table 2. The permeability coefficient of sample soils.

測定値 試料	透水係數 (cm / sec)			濕潤密度 (g / cm <sup>3</sup> )			平均透水係數 (cm / sec)	平均 濕潤密度 (g / cm <sup>3</sup> )
	1	2	3	1	2	3		
漢江砂	1.42×10 <sup>-2</sup>	2.03×10 <sup>-2</sup>	1.09×10 <sup>-2</sup>	1.473	1.484	1.491	1.513×10 <sup>-2</sup>	1.482
浚渫砂	2.36×10 <sup>-3</sup>	3.27×10 <sup>-3</sup>	6.42×10 <sup>-3</sup>	1.601	1.595	1.581	4.02×10 <sup>-3</sup>	1.592
중간모래	1.80×10 <sup>-1</sup>	9.30×10 <sup>-2</sup>	8.48×10 <sup>-2</sup>	1.487	1.490	1.510	5.99×10 <sup>-2</sup>	1.496
굵은모래 (왕사)	4.21×10 <sup>-1</sup>	7.43×10 <sup>-2</sup>	8.43×10 <sup>-1</sup>	1.479	1.421	1.408	6.69×10 <sup>-1</sup>	1.436
山土	1.08×10 <sup>-3</sup>	8.93×10 <sup>-2</sup>	2.42×10 <sup>-3</sup>	1.520	1.492	1.502	1.46×10 <sup>-3</sup>	1.505

Table 3 Piping and creep ratio with soils of embankment models.

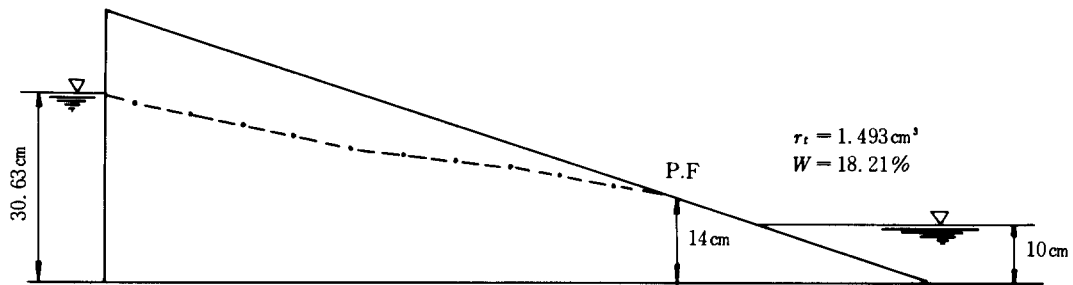
측정 번호	模型堤體의 측조재료	附帶 條件	水 頭 (cm)			파이핑 地點 높 이 (cm)		豫 想 浸 透 路 長 L (cm)	파이핑 始 發 距 離 L (cm)	Creep Ratio	
			수조통 水 頭	下 流 水 位	水頭差 H	실험치	이론치			L/H	L'/H
1	漢江砂	—	28.97	5	23.97	9	10.6	125	111.67	5.2	4.9
2	"	—	30.63	10	20.63	14	12.5	110	96.50	4.9	4.7
3	"	Filter H=18cm	46.27	10	36.27	18	—	110	84.27	—	2.3
4	浚渫砂	—	24.5	5	19.5	6.2	7.3	125	120.30	6.4	6.2
5	"	—	27.83	10	17.83	11.1	9.7	110	105.53	6.2	5.9
6	"	Filter H=16cm	34.80	10	24.80	16.4	16.5	110	87.00	—	3.5
7	중간모래	—	27.27	5	22.27	10.8	9.2	125	100.77	5.6	4.5
8	"	—	31.97	10	21.97	14	13.4	110	95.50	5.0	4.3
9	"	Filter H=19cm	41.23	10	31.23	19.5	27.1	110	77.70	—	2.1
10	굵은모래	—	35.00	10	25.00	—	—	110	—	3.1	—
11	山 土	—	37.47	5	32.47	7.6	20.1	125	116.83	3.9	3.6
12	"	—	40.57	10	30.57	12.1	25.6	110	102.27	3.6	3.3
13	"	Filter H=13cm	49.97	10	39.97	13.1	—	110	98.17	—	2.5
14	漢江砂(上) 山 土(下)	層境界	29.67	10	19.67	11.2	11.2	110	104.7	5.6	5.3
15	山 土(上) 漢江砂(下)	"	40.30	10	30.30	11.7	25.0	110	105.25	3.4	3.5
16	浚渫砂(上) 山 土(下)	"	27.00	10	17.00	10.8	9.0	110	106.30	6.5	6.3
17	漢江砂(上) 海成粘土(下)	"	29.80	10	19.80	12.1	11.3	110	102.85	5.6	5.2
18	山 土(上) 海成粘土(下)	"	38.75	10	28.75	11.9	22.2	110	102.75	3.8	3.6
19	浚渫砂(上) 海成粘土(下)	"	27.20	10	17.20	10.9	9.2	110	106.50	6.4	6.2
20	山 土(上) 漢江砂(下)	"	35.75	5	30.75	6.0	17.4	125	120.40	4.0	3.9
21	漢江砂(上) 山 土(下)	"	27.50	5	22.50	6.9	9.3	125	120.30	5.6	5.3

22	浚渫砂(上) 山土(下)	"	23.75	5	18.75	6.2	6.8	125	120.40	6.7	6.4
23	漢江砂(上) 海成粘土(下)	"	28.50	5	23.50	6.8	10.2	125	119.15	5.3	5.1
24	山土(上) 海成粘土(下)	"	35.50	5	30.50	7.0	17.4	125	119.65	4.1	3.9
25	浚渫砂(上) 海成粘土(下)	"	24.00	5	19.00	6.4	6.9	125	121.00	6.6	6.4



上流水位	地點別浸潤線 높이											파이핑 始發點	備考
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
28.97	28.77	27.20	25.97	24.23	22.83	21.50	20.20	19.13	16.60	14.37	12.47	111.67	3回測定 의平均值

a) 漢江砂의 下流水位 5cm 일때의 浸潤線 (單位: cm)



上流水位	地點別浸潤線 높이											파이핑 始發點	備考
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
30.63	29.30	27.43	25.47	24.23	22.57	21.47	20.40	19.17	17.37	15.70	14.07	96.50	3回測定 의平均值

a) 漢江砂의 下流水位 10cm 일때의 浸潤線 (單位: cm)

Fig. 6 The seepage lines observed during experiment.

인 경우가 가장 크고 漢江砂나 중간모래는 거의 비슷한 破壞水頭를 나타냈으며 浚渫砂인 경우는 가장 낮은 水頭로 안정되지 못한 것으로 나타났다(Table 3참조). 이와 같이 山土가 가장 큰 水頭差에서 파이핑을 일으킨 것은 土性이 모래 질질트 내지 모래질점토로서 透水係數가 작고 粘着力이 있기 때문이며 漢江砂나 중간모래 및 浚渫砂는 그 土性이 透水性이고 粘着力이 없으므로 浸透壓에 대해 脆弱하기 때문으로<sup>13)</sup> 판단된다.

그리고 下流水位變化에 따라 水頭差는 각 試料마다 1~3cm 정도로서 下流水位가 10cm 인 경우가 약간 작게됨을 Table 3에서 알 수 있다.

이상으로부터 알 수 있는 바와 같이 堤體內 파이핑에 대하여 취약한 토질은 浚渫砂, 중간입자의 모래, 山土 順으로, 透水係數가 가장 적은 山土가 가장 안전하였고 실트질모래인 준실사가 취약한 것으로 보아 透水係數가 적으면 파이핑에 대해 취약하다는 종래의 개념과는 相反된 경향을 나타냈다.

上層과 下層이 異質材料로 형성된 境界層堤體에 있어서 水頭差는 下流水位가 境界面보다 높은 경우는 上層土의 土質에 따라 破壞水頭가 차이를 나타내는데 山土(上)-漢江砂(下)인 경우 30.30~30.75cm로서 가장 크고 漢江砂(上)-山土(下)인 경우 19.67~22.50cm로 중간이며 浚渫砂(上)-山土(下)는 17.00~18.75cm로서(Table 3참조) 이는 單一堤體의 破壞時水頭差와 거의 비슷함을 알 수 있다. 그리고 下流水位가 境界面보다 낮은 경우에는 높은 경우보다 破壞水頭가 대략 1~2cm 정도 적은 水頭差를 보였으나 境界層堤體인 경우 파이핑破壞水頭는 上層의 토질에 따라 결정됨을 알 수 있다.

이상으로부터 單一堤體와 境界層堤體를 비교해 보면 境界層堤體인 경우 파이핑水頭는 單一堤體보다 약 1~2cm 정도 작은 값을 보여 큰 차이가 아니므로 파이핑을 上層土에 좌우됨을 알 수 있다. 故로 境界層堤體인 경우 두 토질중 透水係數가 적은 토질을 기준으로 creep比를 결정하고 있는 현행설계기준은 타당하지 않은 것으로 판단된다.

## 5.2 파이핑 발생 위치

單一堤體의 경우 파이핑발생 높이는 Table 3에서 보는 바와 같이 透水性이 큰 漢江砂나 중간모래는 파이핑위치가 높고 山土는 중간정도 그리고 浚渫砂는 가장 낮은 위치에서 파이핑이 발생하며 또한 下流水位變化에 따른 파이핑위치는 水面과 거의 일치함을 알 수 있다.

境界層이 있는 堤體의 境界面에서의 파이핑을 관찰하기 위해 境界層堤體斜면을 쌓는데 6cm 높이로 基礎斜면을 쌓고 그 위에 다른 試料土로 쌓은 다음 下流水位를 10cm로 하여 境界面이 하류수위에 잠기게 되었을 때 수조통의 수위를 상승시켜 浸透水에 의한 堤體斜面表面의 파이핑을 측정하였는데, 파이핑破壞는 境界面에 좌우되지 않고 浸透에 의한 진행성파이핑이 발생됨을 알았다.

그리고 下流水位를 5cm로 하여 境界面이 하류수위보다 위에 있을 경우에 파이핑破壞는 대부분 境界面上에서 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 단지 浸透水에 의해 堤體斜面表面부근의 境界面이 土粒子流失로 취약하게 되기 때문에 파이핑으로 발전된 것으로서 이를 creep 經路에 의한 파이핑으로 보기는 어렵다.

故로, 境界面에서는 파이핑(creep 經路에 의한 파이핑)이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

이상에서와 같이 下流水位보다 약간 높은 지점에서 파이핑이 발생되어 境界面에서의 파이핑은 관측되지 않았으므로 堤體底面길이로 creep比를 算定하는 현행설계기준은 모순이 있음을 알 수 있다.

참고로 filter를 설치하므로써 파이핑방지에 효과가 있는지를 살펴보기 위해 실험을 하여보았다. 그 결과 Table 3에서와 같이 filter를 설치하였을 경우의 파이핑위치는 filter가 설치된 부분에서 安定되고 filter 설치부분을 벗어난 윗 부분에서 파이핑이 발생하였다. 즉, 파이핑에 대한 脆弱部에 filter를 설치하면 파이핑이 발생되지 않고 파이핑을 일으키는 水頭差는 훨씬 커짐을 알 수 있다.

파이핑발생지점 높이에 대해 본 실험에 의한



실험치를 Schaffernak 에 의한((1)式) 理論値와 비교해 보면 다음과 같다.

각각의 조건에서 漢江砂로 형성된 單一堤體의 경우 9.0~10.6, 14.0~12.1(cm)이고 上層土 漢江砂로 형성된 境界層堤體의 경우 6.9~9.3, 6.8~10.2, 11.~11.2, 12.1~11.3(cm)로서 實驗値와 異論値는 거의 비슷한 경향을 보였으며 浚渫砂나 중간모래로 형성된 單一堤體 및 境界層堤體에서도 이론치와 실험치가 거의 비슷한 경향을 보였다. 그러나 山土의 경우 單一堤體에서 7.6~20.1, 12.1~25.6(cm), 境界層堤體에서도 11.70~25.0, 11.9~22.2, 6.0~17.4, 7.0~17.4(cm)로서 實驗値보다 理論値가 매우 큰 경향으로 나타났다(Table 3 참조).

이상에서와 같이 漢江砂, 중간모래, 浚渫砂로 형성된 堤體에서는 파이핑발생지점 높이에 대한 실험치와 Schaffernak 에 의한 理論値가 거의 같으나, 山土로 형성된 堤體에서는 이론치와 실험치에 상당한 차이가 있음을 확인하였다.

그러므로 이와 같이 creep比는 土質의 종류 및 算定方法에 따라 많은 차이를 보일 수 있으므로 설계에 적용되는 creep比에 대한 再定立이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

그리고 Table 3에서 보는 바와 같이 파이핑 발생위치는 上流水位보다 下流水位에 의해 더욱 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

### 5.3 Creep比의 비교

單一堤體인 경우 豫想浸透路長에 대한 creep比는 下流水位가 5cm일때가 10cm일때 보다 0.2~0.6 정도 큰 값을 나타냈으며, 土質에 따른 creep比는 山土인 경우 3.6~3.9로서 가장 작은 값이고, 漢江砂나 중간모래는 거의 비슷한 값으로서 각각 4.9~5.2와 5.0~5.6이며 浚渫砂는 6.2~6.4로서 가장 큰 값을 나타냈다(Table 3 참조).

單一堤體인 경우 파이핑始發地點에 대한 creep比는 豫想浸透路長에 대한 creep比와 마찬가지로 山土인 경우 3.3~3.6으로 가장 작은 값이고, 漢江砂나 중간모래는 각각 4.7~4.9와 4.3~4.5이며 浚渫砂는 5.2~6.9로서 가장 큰 값을 나타내었다(Table 3 참조).

위와 같이 파이핑始發地點에 대한 creep比는 豫想浸透路長에 대한 creep比보다 0.2~0.3 정도 작는데, 山土인 경우에는 가장 작고 浚渫砂인 경우가 가장 큰 값으로 됨을 알 수 있다.

境界層이 있는 경우에 creep比를 비교해 보면 單一堤體에서와 같이 上層土의 土質에 따라 creep比의 값이 달라지는데, 이 때의 豫想浸透路長에 대한 creep比 및 파이핑始發地點에 대한 creep比는 Table 3에서와 같이 單一堤體에서와 거의 같은 값으로 됨을 알 수 있다.

filter를 설치했을 경우 creep比는 filter가 놓인 높이에 따라 차이가 있으나 약 50% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

## 6. 結 論

실제로 防潮堤에 사용하는 土質로 模型堤體를 만들어 인위적으로 파이핑을 유발하여 파이핑 위치를 관찰하고 이 때의 creep比를 계산하여 현재 적용되는 설계기준과 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. piping 발생지점 높이에 대한 Schaffernak 에 의한 理論値와 본 연구실험치의 비교에서 漢江砂, 浚渫砂, 중간모래로 형성된 각 堤體에서는 이론치와 실험치가 거의 비슷했으나, 山土로 형성된 堤體에서는 理論値가 매우 크게 나타났다. 따라서 creep比는 토질의 종류 및 算定方法 등에 따라 많은 차이를 보일 수 있는 것으로 판단된다.

2. 堤體內 파이핑에 대하여 脆弱한 土質은 浚渫砂, 중간모래, 山土의 順으로 透水係數가 가장 적은 山土가 가장 안전하였고, 실트질모래가 가장 脆弱한 것으로 보아 透水係數가 적으면 脆弱하다는 종래의 개념과는 相反된 경향을 나타냈다.

3. 파이핑破壞는 土質堤體와 基礎地盤과의 접촉면에서는 발생하지 않았으며 토질종류에 관계없이 堤體內에서만 발생하였다. 따라서 堤體를 형성하는 土質과 基礎地盤의 토질중 透水係數가 적은 토질을 기준으로 creep比를 정하는 현재의 設計基準은 不合理한 것으로 판단된다.

4. 堤體內에서 파이핑이 발생하는 위치는 下流水面보다 약간 높은 地點이므로 두 토질의 境界面에서 파이핑발생은 관측되지 않았다. 그러므로 堤體底面길이를 creep比를 산정하는 現行設計基準은 모순이 있는 것으로 판단된다.

5. 파이핑에 대한 脆弱部에 filter를 설치하면 파이핑이 발생되지 않음을 알 수 있었는데, 이는 現行設計基準과 같이 filter설치 여부에 관계없이 堤體底面길이만을 가지고 creep比를 산정하는 것은 過度하게 安全側으로 설계하는 결과가 된다.

6. 現行설계기준으로 사용되는 creep比의 값들은 安全率을 고려할 때 중간모래의 값은 적절하나 가는모래의 값은 너무 적고 실트의 값은 너무 크다. 따라서 토질종류에 따라 실제설계에 적합한 값을 정할 필요가 있으며, 아울러 creep比를 산정하는 방법을 再定立해야 할 것으로 사료된다.

#### 參考文獻

1. E.E. Wahlstrom, "Dams, Dam Foundations, and Reservoir Site," Elsevier scientific publishing Co, Amsterdam, New York, 1974, pp.120-124.
2. R.C. Hirschfeld, S.J. Poulos, "Embankment-Dam Engineering," John Wiley and sons, Inc, 1973, pp.21-26.
3. G.F. Sower, "Introductory Soil Mechanics and Foundations : Geotechnical Engineering," Collier Macmilan Publishers, Lodon, 1979, pp.116-119.
4. H.R. Cedergren, "Seepage, Drainage and Flow Nets," John Wiley and sons, Inc., 1967, pp.491-496.
5. United States Department of the interior, "Design of small dams," United states Government printing office, Washington, 1977, pp.221-222, 340-341.
6. M.E. Harr, "Ground water and seepage," pp.124-128.
7. D.W. Taylor, Fundamental of Soil Mechanics, John Wiley sons, Inc., New York, pp.545-553.
8. Terzaghi, R.B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and sons, Inc., New York," 1948, pp.615-618.
9. A. Cassagrand, "Seepage Through Dams," New England Water Works, Association, Vol 2, No 2, 1976, pp.131-170.
10. B.M. Das, "Advanced soil mechanics," McGraw-Hill Book Co. Inc., pp.138-144.
11. 最上武雄, "土質力學" 技報堂, 東京., 1969, pp.125-126.
12. 林 迎春 外, "干拓工學" 韓國農村環境開發研究所, 1982, pp.232-238.
13. 鄭 寅峻, 金 翔圭, "土質力學", 東明社, 1977. pp. 61.

(접수일자 1989. 10. 5)