

# 하천제방의 세굴에 대한 안정성 연구

The Stability Evaluation of River Embankment for a Piping Phenomenon

이 승\*                      박 형 규\*\*  
Lee, Song                  Park, Hyung-Kyu

## Abstract

In this research, a seepage test is carried out for three kinds of soil using a upward seepage equipment. Reliability about the existing method of piping investigation were verified making an estimate of the critical velocity, the critical hydraulic gradient, and hydraulic conductivity and so on. Also, sensitive analyses were carried out using Plaxis that is FEM Program about design factors of scour. The height of core had a big influence on the hydraulic gradient of the embankment's lower part in the result of sensitive analysis. Also, second only to the height of core, and the slope of embankment, the width of crest had influence on scour. However, the change of hydraulic gradient in the effluent gateway had a little influence on the crest width of core. Using these results of sensitive analysis on designing, hydraulic gradient in the effluence gateway turned out to be reducing by altering design factors that change of sensitiveness is big, in case of the hydraulic gradient bigger than the standard hydraulic gradient.

## 요 지

본 논문에서는 상향 침투시험기를 이용하여 3가지 시료에 대하여 상향 투수시험을 수행하였고, 이를 통하여 한계속도, 한계동수경사, 투수계수 등을 산정하여 기존의 세굴 검토 방법에 대한 신뢰성을 파악하였다. 또한 세굴 설계인자에 대하여 FEM Program인 Plaxis를 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과 제방 하부의 출구부 동수 경사에 가장 영향을 많이 미치는 인자는 중심코어의 높이로 나타났다. 또한 제방의 구배와 뜯마루 폭이 중심코어의 높이 다음으로 세굴에 영향성이 큰 것으로 나타났다. 그러나 중심코어의 뜯마루폭은 출구부의 동수경사 변화에 영향이 적은 것으로 나타났다. 이러한 민감도 분석결과를 이용하여 설계시 동수경사가 기준 동수경사보다 크게 나타날 경우 민감도 변화가 큰 설계인자를 변경하여 경제적이고 보다 손쉬운 출구부 동수경사 저감이 가능하리라 판단된다.

**Keywords :** Embankment, Piping, Critical hydraulic gradient, Sensitivity analysis

**핵심 용어 :** 민감도 분석

\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수,  
\*\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사수료,

E-mail : pparkhg@sidae.uos.ac.kr, 02-2210-2515

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

세굴 현상은 흙담이나 제방 등의 누수현상 또는 그 발생메커니즘으로 침투과피에 관한 가장 대표적인 개념이다. “세굴”이라는 용어는 20세기 초 댐 엔지니어들이 석조댐에서 자주 발생하는 큰 누출을 설명하기 위하여 처음 사용하였다. 제체나 지반은 완전히 균일한 매체로 구성되어 있지 않으며 흐름 또한 일정하지 않으므로 작은 양의 침투가 일어난다 하더라도 침투수의 집중이 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 침투의 집중현상은 제체의 하류쪽으로 갈수록 흙입자에 대한 침식력이 커져 결국 연속적인 침식으로 세굴 현상을 일으키게 된다. 세굴 현상이 발생하게 되면 침투압과 유속이 제체의 하류측에 집중하여 제체를 급속한 속도로 파괴하게 되므로 큰 재난을 불러일으키게 된다. 또한 제방이나 댐 뿐만 아니라 강우시 도로의 기초지반이 누수로 인한 세굴 현상으로 지반침하와 더불어 도로면의 균열이나 파괴도 일으킬 수 있다.

세굴에 의한 제방의 붕괴를 결정하는 중요인자로서는 크게 세가지 부분으로 나눌 수 있다. 우선 제체를 구성하고 있는 지반의 세굴에 대한 저항성과 둘째, 제체, 기초 그리고 중심코어를 구성하는 지반의 투수계수가 있으며, 마지막으로 제방의 높이, 똑마루 폭, 그리고 중심코어의 높이와 같은 제방의 기하학적 요인이 지배한다고 할 수 있다. 이에 우선 지반의 세굴에 대한 저항성을 판별하는 여러 가지 해석방안 중 현장 지반에 가장 부합하는 세굴 저항성 해석방안을 선정하고자 한다. 또한 위에서 선정한 세굴 저항성 해석방안을 이용하여 위에서 언급한 설계인자의 민감도 분석을 수행하고자 한다. 이를 통해 설계시 세굴에 영향을 주는 주요인자를 파악하여 설계시 해석상의 중심인자를 제시하고자 한다.

## 2. 세굴 현상

### 2.1 세굴의 정의

일반적으로 제방은 어느 정도의 투수성을 가진 흙을 기초지반 위에 축조하는 만큼 외수위의 상승에 의한 기초침투 및 누수는 필연적인 현상이다. 그럼에도 불

구하고 제체 기초부를 굳이 완전히 차수하지 않는 것은 일부 누수가 발생되더라도 지하수리학의 측면에서 세굴이나 히빙 현상이 일어나지 않으면 제체의 안전에는 문제가 없기 때문이다.

토체내에서 물이 통과할 때 분사현상으로 인해 세립 토사가 유수에 의해 씻겨져 나간다면 유로가 좁아지기 때문에 동수경사가 커져서 물이 흐르는 방향으로 통로가 만들어진다. 이와 같이 지반내에 유로가 형성에 의한 토사의 이송현상이 발생하게 되며 이를 세굴이라 한다. 제방에 있어서의 세굴 현상은 유선망이 촘촘한 제방의 제내측 비탈끝단에서 주로 발생이 된다.

### 2.2 세굴 영향 인자

#### 2.2.1 제체내 균열

건조균열, 부등침하로 인한 균열, 콘크리트 댐과 측면지반의 부등침하로 인한 균열, 수압합렬로 인한 균열 등 제체나 기초지반에 균열이 존재하면 이러한 부분으로 침투가 집중되어 세굴을 야기할 수 있다.

#### 2.2.2 제체내에 기타 취약부가 있을 경우

제체나 기초지반의 균열 이외에 여러 가지 취약부가 있을 경우에도 누수를 유발시켜 세굴을 발생시킬 수 있는데, 나무뿌리 또는 나무토막들이 부식되어 제방의 기초에 공동을 형성한 경우, 댐이나 제방의 배수로나 기타 부대시설과의 접합부에서 다짐이 불충분할 경우, 입도가 균질한 사질토지반의 경우에 발생 될 수 있다.

#### 2.2.3 수리구조물이 분산성 흙을 함유하고 있을 경우

수리구조물을 이루고 있는 흙의 공학적 성질은 세굴이나 침식에 큰 영향을 미친다. 만일, 분산성 흙을 많이 함유하고 있는 구조물이라면 강우나 침투 등으로 인해 쉽게 파괴가 될 수 있다. 분산성 흙을 함유한 구조물은 Montmorillonite와 같은 분산성이 큰 흙을 함유하고 있을 경우 침투수로 인해 침식이 용이해져 지반이나 제체, 사면등의 내부 또는 표면에서 세굴 현상이 발생할 수 있으며, 분산성 흙의 전형적인 파괴형태는 작은 누출로 시작해서 수시간 내에 파이핑 현상과 같이 터널을 형성하여 파괴에 이르게 된다.

### 2.2.4 기타조건

기타사항으로 지반이나 체체를 포화 또는 침식을 유발시킬 수 있는 충분한 물, 급격한 수위상승 등으로 침윤선이 체체 배면에 생성되고 노출면의 흩입자를 움직일 수 있을 정도로 침출유속이 클 경우 세굴 현상이 발생할 수 있다.

### 2.3 세굴 검토에 대한 연구

#### 2.3.1 Terzaghi의 이론식

Terzaghi(1948) 실험에 의하면, Boiling이 생기는 쪽은 근입장의 1/2이라고 하므로, 이 쪽에 대한 균형을 적용한다. 이렇게 침투가 상향으로 발생할 때, 세굴에 대한 검토를 하려면, 어느 평면에 대하여 상향의 침투력과 하향의 흙의 무게를 비교해야 한다.

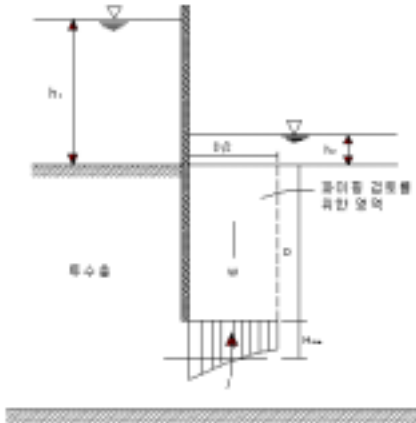


Fig. 1 Sheet Pile 구조에서의 세굴 파괴

이때 세굴에 대한 안전율은

$$F_s = \frac{W}{J} = \frac{\frac{1}{2} r_{su} D^2}{\frac{1}{2} r_w D H_{ave}} = \frac{D r_{su}}{H_{ave} r_w}$$

#### 2.3.2 한계동수경사에 의한 방법

A점에서 유효응력을 구하면,  $\bar{p}_A = r_{su} \cdot z - i r_w z$   
 유효응력이 0 ( $\bar{p} = 0$ )일 때의 동수경사를 한계 동수경사( $i_{cri}$ )로 하면,  $\bar{p} = r_{su} \cdot z - i r_w z = 0$

$i_{cri} = \frac{r_{su}}{r_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$  가 된다. 이러한 개념은 유효응력이 0일 때 사면의 세굴이 발생한다는 개념에서 시작한 것으로, 사질토 지반에 주로 적용된다.

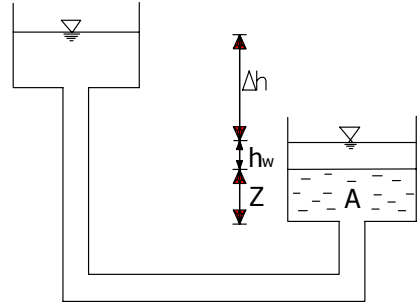


Fig. 2 한계 동수경사 시험

#### 2.3.3 가중크리프비에 의한 방법

1935년 Lane은 가중크리프비를 기준으로 하여, 세굴에 대한 안전율을 검토하는 경험적인 방법을 제안하였다.

가중 크리프비 :  $CR = \frac{i_w}{h_1 - h_2}$

가중 크리프 거리 :  $l_w = \frac{\sum l h}{3} + \sum l v$

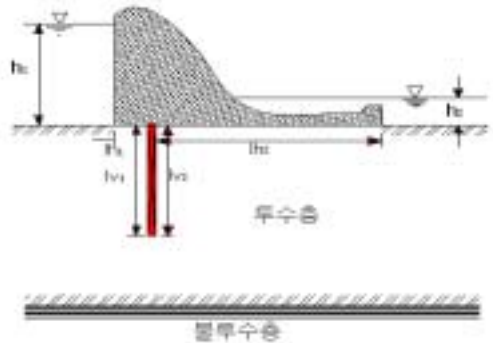


Fig. 4 가중크리프 거리계산

Fig. 3 가중크리프 거리계산

#### 2.3.4 침투유속에 의한 방법

(1) 투수계수와 관련한 한계유속

1981년 Kovacs는 실내실험을 통하여 침투수에 의한 흩입자의 거동을 다음과 같이 정의하였다.

① 제1한계유속 : 세립자의 이동시작

$$V_{cr} = 9.33 \times 10^{-2} \sqrt[3]{K} \text{ (m/ sec)}$$

② 제2한계유속 : 침투공간에 미소 channel 발달

$$V_{cr} = \frac{1}{3} \left(1 \pm \frac{1}{3}\right) \sqrt[3]{K} \text{ (m/ sec)}$$

③ 허용한계유속 : 우물로 물이 스며들 때 우물이 붕괴될 정도의 침투유속

$$V_{cr} = (3 \pm 1) \sqrt[3]{K} \text{ (m/ sec)}$$

(2) 흡입자의 입경과 관련한 한계유속

1932년 Justin에 의해 제안되었으나, 여러 연구자들이 실험을 통해 검증한 결과 과대 평가됨이 나타났다.

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{3} (G_s - 1) dg}$$

### 2.3.5 기타 최근 연구동향

- ① Anulnandan(1983): SAR과 ESP를 침투 발생을 위한 전단응력  $\tau_c$  개념과 연관시켜 필터 설계기준 제시
- ② 정형식(1989): 파이핑에 대한 실험연구 수행
- ③ 한성길(1992): 침투유속을 통한 파이핑 해석 수행

## 3. 수치해석 방법 및 모델

### 3.1 지배방정식

본 해석에 사용되는 PLAXIS는 Darcy의 법칙을 따르는 포화-비포화흐름에 근거를 둔 해석법을 사용한다. Darcy의 법칙을 본래 포화된 흙에 대해 적용한 흐름법칙이지만 투수계수를 함수비의 함수로 적용함으로써 불포화 흐름까지 확장할 수 있다.(Richards, 1981) 비정상, 비포화 흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \rho_w g m_2^w \frac{\partial h}{\partial t}$$

Table 1 Piping 검토에 사용된 토층별 투수계수

구분	투수계수(cm/sec)
제체부(성토부)	$4.3 \times 10^{-3}$
원지반(암반층*)	$1.0 \times 10^{-8}$

\* Engineering in Rock Mass(Bell, 1992, pp. 62) 인용

여기서,  $k_{xx} = k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha$

$$k_{yy} = k_{yx} = k_1 \sin^2 \alpha + k_2 \cos^2 \alpha$$

$h$  = 전수두

$m_2^w$  = 비포화시 함수비 - 간극수압의 기울기

## 3.2 모델 산정

본 해석에서 사용된 단면 및 수위조건은 제체의 홍수위선 조건과 동일한 조건으로 해석을 실시하였으며, 성토제에 대해서는 변수위 투수시험을 시행하였다. 원지반의 투수계수는 주상도를 면밀히 관찰하여 암반층으로 판단되어 경험치를 사용하여 해석에 사용하였다. 본 Piping 검토에 적용된 토질은 성토층과 원지반(암반층) 그리고 배수층으로 대별할 수 있으며 검토에 사용된 투수계수는 Table 1과 같으며 제체의 표준단면은 Fig. 4와 같다.

## 4. 결과 분석

### 4.1 세굴 검토 방법에 대한 검증 결과

다음 Table 2의 시료의 Piping 저항 강도를 파악하기 위하여 Fig. 5와 같은 상향 침투시험기를 이용하여 시험을 수행하였다. Fig. 5에서 시료가 들어있는 실린더의 직경은 72 mm로 하였다.

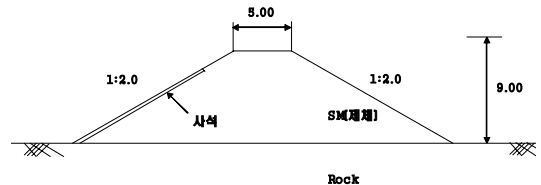


Fig. 4 제체의 표준 단면도

Table 2 상향 침투시험 대상 시료

시료	n	e	Gs	USCS
1	0.311	0.451	2.62	SP
2	0.321	0.473	2.63	SW
3	0.300	0.429	2.67	SM

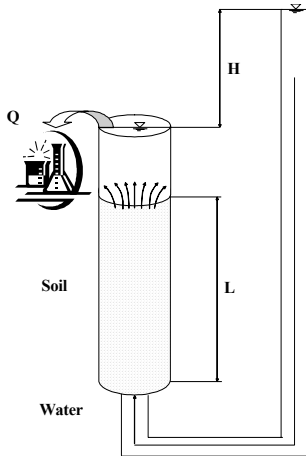


Fig. 5 상향 침투 시험기 개략도

상향 침투시험기에서 수두를 증가시켜 가면서 시료가 Piping 현상이 일어날 경우 그때의 동수경사와 유량을 기록한다. 그 결과 Fig. 6과 같은 계산 방법에 따라서 그 시료의 한계 유속과 투수계수를 산정 할 수 있으며, 그 시험결과는 Table 3, Fig. 7과 같이 표현 할 수 있다.

위 Fig. 7과 같이 기존에 제안된 투수계수에 관련한 한계유속 산정방법은  $V_{cr}$ 을 과대산정하는 경향이 매우 큰 것으로 파악되었다. 또한 입경에 관련한 한계 유속 산정에서 Justin이 제안한 식은 여러 연구자들이 실험을 통해 검증한 결과 실제보다 과대평가되고 있다. 또 혼합 입경 시료의 한계유속으로서 Koslova가 제안한 실험식이 있지만 어떤 실험을 통해 얻어진 식인지 불분명하고 이 식 역시 실제보다 과대 평가하는 경향이 나타난다. 이에 흙의 투수계수에 관련한 한계유속 방법과 입경에 관한 한계유속법의 신뢰성이 떨어짐을 알 수 있다.

이에 한계동수경사법과 상향 침투시험 결과와의 비교 결과 Table 4와 같이 나타났다.

Table 3 상향 침투시험 결과

시료	e	USCS	k (cm/sec)	$i_{crit}$	$V_{cr}$
1	0.451	SP	0.063	1.121	0.071
2	0.473	SW	0.025	1.220	0.031
3	0.429	SM	0.0043	1.310	0.006

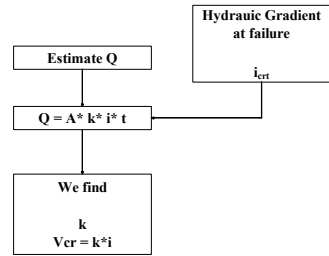


Fig. 6 한계유속, 투수계수 산정법

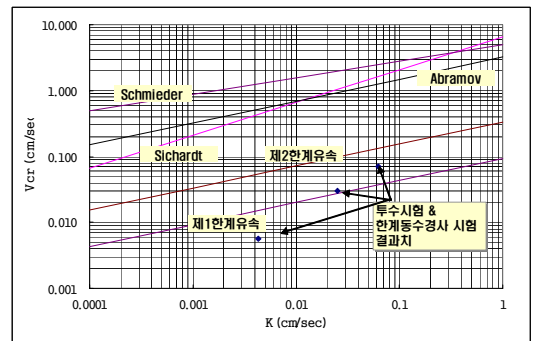


Fig. 7 상향 침투시험 결과 값과 한계유속

이 결과에 의하면 한계유속 개념에 비하여 한계 동수경사를 이용하여 보다 정확한 지반의 액상화 저항 정도를 파악할 수 있게 되었다. 이에 추후 시행될 설계 인자에 대한 민감도 검토시 한계 동수경사의 사용이 합당하리라 사료된다.

#### 4.2 설계인자에 대한 민감도 검토 결과

본 절에서는 위에서 3.2절에서 제안된 제체의 표준 단면도에서 제방의 구배, 뚝마루폭, 중심코어의 높이, 중심코어의 구배, 중심코어의 뚝마루폭, 중심코어의 투수계수 등의 6가지 설계인자에 대한 민감도를 파악하였다.

Table 4 상향 침투시험결과와 한계동수 경사 기준

시료	USCS	k (cm/sec)	상향침투 시험 결과	한계동수경사 공식을 이용한 값	
			icrt	icrt	오차(%)
1	SP	0.063	1.121	1.116	0.42
2	SW	0.025	1.220	1.111	9.28
3	SM	0.0043	1.310	1.169	10.76

여기서 민감도 분석은 동수경사에 영향을 미치는 설계인자를 변화시켜 동수경사의 변화양상을 살펴보기 위하여 수행하였고, 이러한 민감도 분석을 통해 동수경사에 가장 영향을 미치는 주요인자를 파악할 수 있었다.

#### 4.2.1 중심코어의 높이에 대한 민감도 검토

Table 5와 같은 설계인자를 가진 제방의 중심코어의 높이를 달리하여 해석을 수행하였고, 그 결과는 Table 6과 같다. 즉, 중심코어의 높이에 따른 동수경사를 구한 결과 높이가 3m인 경우의 민감도가 1이라고 할 때 5, 7m의 민감도가 1.183, 0.593으로 나타나 중심코어의 높이에 따라 동수경사의 변화가 극심함이 나타났다. 또한 중심코어의 높이가 7m인 경우를 제외하고 세굴에 대하여 불안한 것으로 나타났다.

또한 Fig. 8과 같이 일반적으로 동수경사와 침투속도는 하류부의 제방 하단부가 가장 큰 것으로 나타났다. 이에 동수경사가 최대인 점의 동수경사를 기준으로 민감도 분석을 수행하였다.

Table 5 중심코어의 높이에 대한 민감도 분석시 제방의 설계인자

제방의 구배	뚝마루 폭	중심코어 높이	중심코어 구배	중심코어 뚝마루폭	제체의 투수계수	중심코어의 투수계수
1 : 20	5 m	3 m	1 : 2.0	2 m	3.71 (m/day)	0.000864 (m/day)
		5 m				
		7 m				

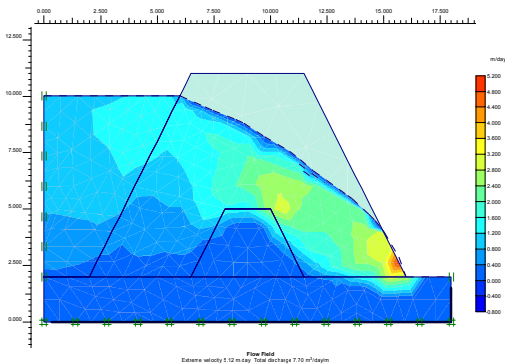


Fig. 8 중심코어의 높이가 3m일 때 동수경사

#### 4.2.2 설계인자의 변화를 통한 민감도 분석결과

6개 설계인자에 대한 민감도 분석결과를 정리하면 Fig. 9와 같다. 결과에 의하면 중심코어의 높이가 출구부의 동수경사에 가장 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다. 또한 제방의 구배와 뚝마루폭이 중심코어의 높이에 다음으로 영향성이 큰 것으로 나타났다. 그러나 중심코어부의 뚝마루 폭 변화는 출구부의 투수계수에 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 이에 중심코어가 존재하는 제체의 세굴 방지를 위하여, 우선 설계 인자 중 중심코어의 높이와 제방의 구배, 뚝마루 폭의 적절한 선택이 선행되어야 될 것으로 나타났다.

### 5. 결론

제방의 세굴에 대한 안정성 검토는 제방내의 사면안정과 더불어 가장 중요한 평가 항목에 하나이다. 그러나 제방에 대한 안정성 해석에 사용되는 여러 가지 이론식과 경험식 등에서 제안되는 값들의 범위가 일관성이 없고 그 분산정도가 크게 나타나 본 논문에서 세굴 검토 방법에 대한 검토와 설계 인자에 대한 민감도를 분석하였고 그 결과는 다음과 같다.

Table 6 중심코어의 높이에 대한 민감도 분석결과

중심코어 의 높이	Extreme Velocity (m/day)	동수경사	민감도 분석결과	한계동수 경사	세굴에 대한 안정성
3 m	5.12	1.380	1.000	1.310	N.G
5 m	6.06	1.633	1.183		N.G
7 m	2.20	0.593	0.430		O.K

여기서, 민감도는 중심코어의 높이가 3m 일때의 동수경사를 1로 정규화 할 경우 동수경사의 변화를 보여주는 것이다.

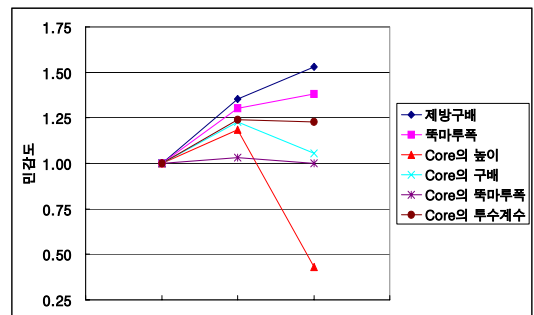


Fig. 9 설계인자에 대한 민감도 분석 결과

- 1) 상향 침투시험을 통하여 3가지 시료에 대한 세굴 저항강도 시험을 수행하였고, 이를 통하여 한계동수경사, 한계속도에 의한 세굴 해석방법의 적용성을 파악하였다. 그 결과 한계동수경사를 이용한 세굴 해석방법이 합리적인 것으로 나타났다.
- 2) 제방의 높이를 제외한 6개의 설계 인자에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 대부분의 경우 제방 하부의 출구부 동수경사가 가장 큰 것으로 나타났다.
- 3) 민감도 분석결과 중심코어의 높이가 출구부의 동수경사에 가장 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다. 또한 제방의 구배와 뚝마루폭이 중심코어의 높이 다음으로 세굴에 대한 민감도가 높은 큰 것으로 나타났다.
- 4) 중심코어의 뚝마루폭 변화는 출구부의 동수경사 변화에 영향이 적은 것으로 나타났다.

한계동수경사를 통한 지반의 세굴 검토법은 1단계 연구과제로 흙입자의 형상, 입도분포, 점착력 등이 고려되지 않은 방법이므로, 2단계 연구과제시에는 점성토에 대한 검토가 필요하다 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 서울시립대학교 학술연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 정형식(1989), "토질체계의 Piping 파괴에 대한 실험적 연구", 대한토목공학회지, 제5권, 제4호, pp 17-26.
2. 한성길(1992), "침투유속에 관한 제방의 파이핑 해석", 동국대학교.
3. Arulanandan, K(1983), "Erosion in Relation to Filter Design Criteria in Earth Dams", J. of Geotech. Engg. Vol. 109, pp 682-698.
4. Casagrande, A.(1976). "Seepage through Dams". New England Water Works Association, Vol. 1, No 2, pp. 131~170.
5. Head, K. H(1982), "Manual of Soil Laboratory Testing", Vol 2, Pentech Press, pp 458-464.
6. Kovacs, G. (1981), "Seepage Hydraulics", Elsevier Scientific Publishing Co. pp 349~362.
7. Lane, E. W(1935). "Security from Under-Seepage, Masonry Dams on Earth Foundation, Trans. ASCE, Vol. 100, p. 1235.
8. Richards, L. A(1931). "Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums, Physics, Vol. 1.
9. Terzaghi, K. and B. Peck(1948). "Soil Mechanics in Engineering Practice (2rd edition)", John Wiley and Sons, Inc. pp 169~172.
10. 杉井俊夫, 佐藤 健, 宇野尚雄, 山田謹吾, "浸透破壊の發生プロセスと 土の非均質性" 土と基礎, 1989. 6, pp 17-22.

(접수일자 : 2002년 11월 21일)