

Small Dam의 斜面安定 解析

최기봉[†] · 배우석* · 안병철*

충청대학 산업안전과 · *충북대학교 토목공학과
(2003. 12. 11. 접수 / 2004. 5. 21. 채택)

The Analysis of the Slope Stability for the Small Dam

Ki-Bong Choi[†] · Woo-Soek Bac* · Byung-Chul Ahn*

Department of Safety Engineering, Chung Cheong University

*Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received December 11, 2003 / Accepted May 21, 2004)

Abstract : The paper describes a procedure for the evaluation of the effect of seepage force on stability of slopes. The stability of an embankment impounding a water reservoir is highly depend upon the location of seepage line with the embankment. To evaluate the accurate safety factor of an embankment, it is important to illustrate the seepage phenomenon.

Of particular interest is the stability following a rapid change of reservoir level. Seepage forces in embankments are easily determined if frictional forces are expressed in relation to hydraulic gradient I . If a piezometer is inserted into a body of embankment, the level to which free water rises is a measure of the energy at that point.

Key Words : small dam, seepage force, rising velocity, model test

1. 서 론

1.1. 연구 목적

본 연구는 양수발전 등을 목적으로 축조한 소형 Dam의 수위가 상승할 경우 제체에 미치는 영향을 Bishop's simplified method를 사용하여 Seepage Force (침투력)의 항을 중심으로 분석한 것이다.

특히 침투력의 항은 제체의 사면경사가 급할 경우 및 수위의 상승속도에 따라 제체의 안전성에 많은 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 제체의 안전을 해석시 내측면의 수위가 상승할 경우 침투력을 고려하여 수위상승 시간과 제체의 경사도에 따라 침투력의 영역이 안전율에 미치는 영향에 대하여 분석함으로써 현장조건에 접근할 수 있는 안전율을 구하고자 하는데 그 목적이 있다.

또한 제체의 사면경사가 변화함에 따라 침투력의

영역은 안전율에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 경향을 고찰하기 위하여 모형실험을 통해 구한 침윤선의 위치를 이용하여 침투력의 영역이 안전율에 미치는 영향을 분석하였다.

1.2. 연구 방법

사면안정 해석에는 여러방법이 있는데 이들 방법 중에서 Bishop간편법은 다른 방법보다 계산과정이 간단하고 정도가 높아 본 연구의 이론식 유도에 이용하였으며, 침투력영역이 사면의 안전성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 다음과 같은 방법으로 실험을 하였다.

먼저 제체내측면의 Upstream 경우 안전성을 분석하기 위해 수위의 상승시간을 변화시켜 각 수위별 침윤선의 높이를 구했고, 이 침윤선의 높이를 이용하여 침투력영역이 사면안전성에 미치는 영향을 분석했다. 그리고 제체의 사면경사를 실험 모형별(사면 경사각 : 21.8°, 26.6°, 33.7°)로 변화시킴으로서 침투력 영역의 값 변화를 분석하여 안전율에 미치는 영향을 고찰하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
cdb41@ok.ac.kr

1.3. 연구사

일반적으로 사면안정에 관한 연구는 1776년 Coulomb이 전단강도식을 만들어 냄으로써 시작되었으며, 1850년대 Collins가 사면파괴 형상을 곡선으로 표현하기 시작했다. 1866년 Culmann은 유한사면에서 파괴면을 직선으로 보고 사면의 안전성을 해석했으나 이는 암반사면에는 적합하나 일반사면에는 적용하기 곤란하다.

그 이후 1900년대 초 Fellenius(1918)가 내부마찰각이 없는($\phi = 0$) 경우 절편법을 처음 개발했다.

절편법은 1955년 Bishop³⁻⁶⁾이 절편에 발생하는 모멘트의 평형과 힘의 평형이 같아져야 정확한 안전율을 구할 수 있다는 원리를 발표함으로써 보편화되었다. 특히 1956년에는 Janbu와 Kenne 등에 의하여 이론적인 측면이 많이 발표되었으며, 1965년에 Low, Morgenstern⁷⁾과 Price, 1967년에는 Spencer⁸⁾와 Bailey 등에 의해 사면안정에 대한 많은 연구가 이루어졌다.

1950년대와 1960년대에 발달한 이론적인 내용을 바탕으로 1970년대와 1980년대에서는 1975년 Chen, 1976년 Krahn, Chowdhury, 1980년 Duncan과 Wright, 1984년 Wright와 Roecker, Graham, 1986년에는 Bromhead, 1987년에는 Eigenbrod와 Locker, 1988년에는 Chugh와 Davidson등에 의해 컴퓨터를 이용한 사면안정 해석상의 실용화단계에 들어섰다.

2. 사면안정 이론식

2.1. 침투력의 이론적 해석

침투력이란 침윤선이 형성됨에 따라 흙 입자간을 물이 통과할 때 점성마찰에 의해 흙과 물사이에서 생기는 하나의 에너지의 향으로 생각할 수 있다. 여기서 발생하는 에너지의 손실은 손실수두의 향으로 나타낼 수 있으며, 이러한 에너지 변환에 따른 힘을 침투력이라 한다. 흙속에서 발생하는 침투의 단위체적당 활동력을 고려한다면 흙입자 사이를 통과하는 단위체적당 유체 정역학적 힘(Hydrostatic Forces)은 식 (1)과 같이 표시된다.

$$grad P = \gamma_w(-i) - j\gamma_w \quad (1)$$

$$D = \gamma_w i = -(grad P + j\gamma_w) \quad (2)$$

$D = \gamma_w i$ (침투력) = 동수경사×물의 단위중량

$grad P$: 임의점에서의 압력

$j\gamma_w$: 단위벡터를 고려한 물의 단위중량

$$D = \gamma_w i = R - \gamma_{sub} \quad (3)$$

$i\gamma_w$: 단위 체적당 침투력의 향

R : 공극수내에 작용하는 단위체적당 합력

γ_{sub} : 수중단위중량

2.2. Bishop의 간편법을 기초로 한 침투력 수정식

침투력은 분사현상이나 침투가 일어나는 흙 구조물의 안정해석에 매우 중요한 영향을 미친다. 이상과 같은 침투력의 개념을 고려한 사면안정이론을 전개하면 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{\sum (W_1 + W_2) \sin \alpha} \sum C_i b + \tan \phi_i ((W_1 + W_2) - Ub - Db \tan \alpha / F) \frac{1}{m_a} \quad (4)$$

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi_i}{F} \right) \quad (5)$$

2.3. Bishop 간편법의 이론 해석

제체에 작용하는 압축이나 인장에 대한 외력 해석은 1955년 Bishop에 의해 연구되었고, 사면의 활동면이 지나가는 부분을 경계로 활동 토체를 일정 간격의 절편으로 나누어 다음과 같은 평형방정식을 정립했다.

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum C_i b + \tan \phi_i (W - ub) \frac{1}{m_a} \quad (6)$$

3. 침투실험 및 결과

3.1. 실험 장치 및 방법

본 연구에 이용된 실험장치는 길이 450cm×폭 30cm×높이 50cm 이고 두께 3mm의 강재 수조로 제체 내부의 침윤선의 변화를 관측하기 위하여, 수조 후면의 하단부에 $\phi = 5mm$ 의 구멍을 10cm간격으로 뚫어 고무관을 연결하여 Stand Pipe를 설치함으로써, 수위상승에 따른 제체내의 수두변화를 관측할 수 있도록 하였다. 또한 제체내부의 경계층을 구분하기 위해 가로 30cm×세로 45cm, 가로 30cm×세로 60cm

의 강재 틀을 각각 2개씩 만들어 #30, #20망을 부착하여 제체내부의 각 경계층 사이에 설치하였으며 하단부에는 수위조절을 위하여 급수 및 배수관을 부착하였다.

제체의 축조 형태는 Table 1과 같고, 사용된 시료의 제원은 Table 2와 같다. Fig. 1은 입경가적곡선을 나타낸 것이며, Fig. 2는 본 연구의 실험장치도를 나타낸 것이다.

Table 1. Experimental Conditions

Slope (1:m)	B ₁ (cm)	B ₂ (cm)	H ₁ (cm)	Model
m = 1.5	10	115	35	
m = 2.0	10	150	35	
m = 2.5	10	185	35	

Table 2. Properties of Materials

Properties	Value
Void Ratio	0.65
Specific Gravity	2.61
Porosity	39.4%
Unit Weight	1.92 g/cm ³
Angle of Internal Friction	36°
Natural Moisture Content	24.5%
Coefficient of Permeability (cm/sec)	$K_1 = 6.2 \times 10^{-1}$ $K_2 = 4.6 \times 10^{-1}$ $K_3 = 9.4 \times 10^{-2}$

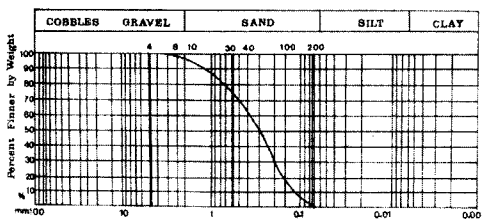


Fig. 1. Grain size accumulation curve

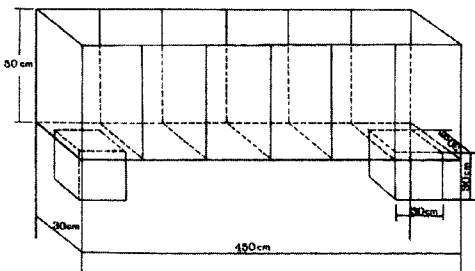


Fig. 2. Schematic sketch experimental equipment

Table 3. Relationship between the water level and time

Slope 1 : m	Rising water level (cm)	Rising time (sec)	
		1'20"	2'40"
m = 1.5	15	33"	59"
	20	46"	1'29"
	25	1'03"	2'01"
	30	1'21"	2'37"
m = 2.0	15	24"	53"
	20	39"	1'22"
	25	55"	1'56"
	30	1'14"	2'33"
m = 2.5	15	29"	55"
	20	46"	1'27"
	25	1'07"	2'03"
	30	1'29"	2'44"

3.2. 분석 방법

실험에 사용한 제체의 형태는 제체높이 35cm, 상부 폭을 10cm로 하였고, 제체경사는 각각 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5로 하였다. 그리고 수위의 상승시간과 사면경사와의 관계는 Table 3과 같다.

여기서 얻은 총 270개의 측정값을 각 시간별, 수위별(수위상승 90개, 수위하강 90개)로 분류하여 그 중 247개의 측정값을 분석하였다. 결과의 분석 및 고찰에서 사용한 침윤선의 값은 수위 30cm에 대한 값을 사용했다.

4. 결과의 분석 및 고찰

4.1. 제체내측면의 사면경사별 침투력의 영향 분석

안전율 산정시 제체내측면 침투력의 영역은 사면경사의 변화에 따라 안전율에 영향을 준다. 따라서 사면경사가 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5인 경우, 수위가 30 cm일 때 침투력영역과 안전율과의 관계는 다음과 같다.

침투력의 영역을 고려하여 구한 안전율 값은 사면경사 1:1.5에서 안전율이 1.4179일 때 침투력 영역 값은 0.299이고, 사면경사 1:2.0에서 안전율이 1.7737일 때 침투력 영역 값은 0.125이고, 사면경사 1:2.5에서 안전율이 2.4048일 때 침투력영역 값은 0.079이다. 그러나 침투력영역을 무시한 안전율값은 사면경사 1:1.5에서 1.7169이고, 사면경사 1:2.0에서 1.8987이고, 사면경사 1:2.5에서 2.4838값을 갖는다.

이상에서 알 수 있는바와 같이 사면경사 1:1.5에서 침투력영역을 고려한 안전율이 21.1%, 사면경사 1:2.0에서 침투력 영역을 고려한 안전율이 7.1%, 사

면경사 1:2.5에서 침투력 영역을 고려한 안전율이 3.3% 작은 값을 갖는다. 따라서 사면경사가 1:1.5일 때보다 1:2.0일때 안전율의 차이값은 14.1%, 사면경사 1:2.0일때보다 1:2.5일 때 안전율의 차이값은 3.8%를 갖는데 여기서 알수있는 바와같이 사면경사가 완만해 질수록 침투력영역의 값은 3.8%~14.1%까지의 작은 값을 갖는다.

Table 4는 사면경사별 침투력영역 값을 나타낸 것이고, Fig. 3은 제체의 사면경사별 침투력영역이 안전율에 미치는 영향을 도시한 것이다.

이상을 종합해 보면 제체내측면의 Upstream의 경우 사면경사가 급할수록 침투력을 고려한 안전율값은 침투력을 고려하지 않은 값보다 안전율이 큰 값을 갖으므로 제체는 침투력의 영향으로 안전해진다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Relationship between slope ratio and influence domain subjected to seepage force(Upstream) (H = 30 cm)

Slope S. F. Data	1 : 1.5	1 : 2.0	1 : 2.5
Dbtan α /F = 0 C = 1.5 ϕ = 36	1.4179	1.7737	2.4048
Dbtan α /F \neq 0 C = 1.5 ϕ = 36	1.7169	1.8987	2.4838
Influenced domain subjected to seepage force	0.299	0.125	0.079

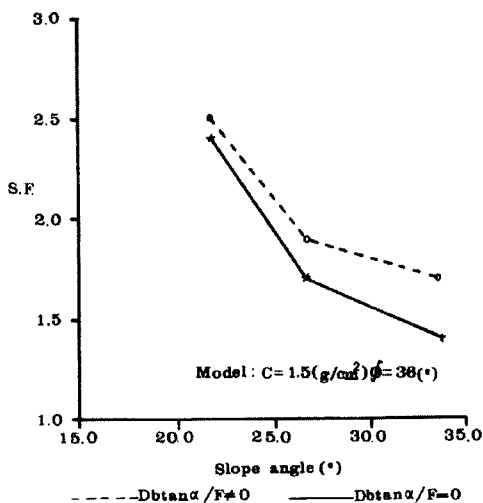


Fig. 3. Relationship between slope angle and safety factor

4.2. 점착력 변화에 따른 침투력영역 분석

수위가 30cm에 도달했을 때 제체의 내측면 Upstream의 경우 점착력이 침투력영역에 미치는 영향에 대해 분석했다. 침투력영역을 고려한 안전율값은 점착력 0일때 1.2352, 점착력 1.5일때 1.4179, 점착력 3일 때 1.6005, 점착력 6일때 1.9658의 값을 갖는다. 또한 침투력영역을 고려하지 않은 안전율 값은 점착력 0일 때 1.5342, 점착력 1.5일 때 1.7169, 점착력 3일 때 1.8995, 점착력 6일 때 2.2648 값을 갖는다.

이상의 내용은 다음의 두 가지 측면에서 분석할 수 있다.

우선 침투력영역을 고려하고, 고려치 않은 안전율 차이값은 점착력이 0일때 24.2%, 점착력이 1.5일 때 21.1%, 점착력이 3일 때 18.7%, 점착력이 6일 때 15.2%의 차이를 갖는다. 이 분석내용에서 알수 있듯이 점착력영역이 증가할 수록 안전율은 증가함을

Table 5. Relationship between cohesion and influenced domain subjected to seepage force(Upstream) (H=30cm)

Slope S. F. Data	0	1.5	3	6
Dbtan α /F = 0 C = 1.5 ϕ = 36	1.2352	1.4179	1.6005	1.9658
Dbtan α /F \neq 0 C = 1.5 ϕ = 36	1.5342	1.7169	1.8995	2.2648
Influenced domain subjected to seepage force	0.299	0.299	0.299	0.299

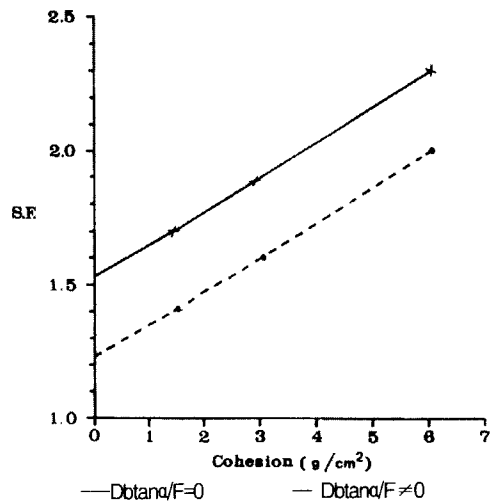


Fig. 4. Relationship between cohesion and safety factor

알 수 있고, 침투력영역을 고려한 안전율 값과 점착력을 고려하지 않은 안전율 값과의 차이가 작아짐을 알 수 있다.

특히 유의 깊게 분석해야 할 사항은 점착력이 0, 1, 5, 3, 6으로 증가할 때 침투력영역 값은 Table 5에서 알 수 있듯이 동일한 0.299 값을 갖는다. 이 결과는 점착력이 침투력영역에 미치는 영향이 전혀 없음을 알 수 있다. Table 5은 점착력의 변화에 따른 안전율 값을 나타낸 것이고, Fig. 4는 점착력의 변화에 따른 안전율의 변화 관계를 도시한 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 침투력이 작용할 경우 체체의 보다 실제적인 안전율을 계산하기 위하여 기존의 Bishop 간편법에 침투력의 영역을 고려한 이론식을 이용하여 침투력의 영역이 체체의 안전성에 미치는 영향에 대해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 체체내측면의 경우 사면경사가 급할수록 침투력을 고려한 안전율값은 침투력을 고려하지 않은 값보다 안전율이 큰 값을 갖으므로 체체는 침투력의 영향으로 안전해진다는 것을 알 수 있다.

2) 점착력영역이 증가할 수록 안전율은 증가함을 알 수 있고, 침투력영역을 고려한 안전율 값과 점착력을 고려하지 않은 안전율 값과의 차이가 작아짐을 알 수 있다.

3) 점착력이 0, 1, 5, 3, 6으로 증가할 때 침투력영역 값은 동일한 값을 갖는다. 이 결과는 점착력이 침투력영역에 미치는 영향이 전혀 없음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에 있어서 침투력이 작용할 경우 1) 비정상 침투시 침투선 형성에 따른 체체의 안전성 분석, 2) 사면의 장기안정 해석을 하는데 매우 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글 : 본 연구는 충청대학 산학협력처 교내연구비의 지원연구로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 최기봉, "침투력을 고려한 사면안정의 이론적 해석", 산업안전학회지, 제11권, 제4호, pp. 151~155, 1996.
- 2) Darcy, H, "Les fontaines publiques dela ville de dijon dalmont paris", 1856.
- 3) Bishop, A.W., "The use of slip circles in the stability analysis of earth slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp. 7~17, 1955.
- 4) Bishop, A.W., "The stability of earth dams", Ph. D. Thesis, University of London, pp. 94~117, 1952.
- 5) Bishop, A.W., & Morgenstern, V., "Stability coefficients for earth slopes", Geotechnique, Vol. 10, pp. 129~150, 1966.
- 6) Bishop, A.W., "The influence of progressive failure on the method of stability analysis", Geotechnique, Vol. 21, pp. 168~172, 1971.
- 7) Morgenstern, N.R. and Price, V.E., "The analysis of the stability of general slip surfaces", Geotechnique, Vol. 15, pp. 79~93, 1965.
- 8) Spencer, E., "A method of analysis for stability of embankments using parallel inter-slice forces", Geotechnique, pp. 11~26, 1967.