

보강제체사면의 침투거동평가

신방웅[†] · 안병철

충북대학교 공과대학 토목공학과
(1999. 12. 7. 접수 / 2000. 2. 26. 채택)

Evaluation of The Seepage Behavior for Reinforced Embankment

Bang-Woong Shin[†] · Byung-Chul Ahn

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
(Received December 7, 1999 / Accepted February 26, 2000)

Abstract : To estimate the behavior of reinforced and unreinforced embankment constructed on a impermeable foundation ground, a laboratory model test was performed for two types of soils and water level increasing velocity of a flood period. The experiment models were constructed with slopes of water level is 1.25cm/min, 2.5cm/min each. From model test results, as the slope of reinforced and unreinforced embankment was the slower, the more seepage line rised. In the unreinforced embankment, the rising velocity of water level was the faster, the larger the embankment failure was. And the reinforced embankment with geotextile was the more safe than the unreinforced embankment for seepage force.

1. 서론

현재 우리나라의 강우는 대부분 여름철에 집중하는 형태로서 특히 단기간에 많은 양의 강우를 보이고 있다. 강우로 인해 유출된 물은 주로 하천으로 집중되어 하천수위는 급상승하게 된다. 제체에 침투하는 물은 제체 내에서 함수비 및 포화도를 증가시키고 포화영역을 상승시켜 제체내에 간극수압의 증가로 제체의 안정성이 감소하게 된다.

국내에서는 평행흐름에 의한 제체의 비 정상 침투¹⁾, 침투력을 고려한 제체사면의 안정해석²⁾ 등 침투거동에 관한 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 수위상승속도에 따른 제체의 파괴거동³⁾과 침윤선변화⁴⁻⁶⁾를 관찰하고 보강재를 사용하였을 때 침윤선형성과 제체파괴에 어떠한 영향을 미치는지를 실내모형실험을 통해 비교·검토하였다.

2. 침투에 관한 이론식

2.1. 침투류 해석의 기초식

제체내의 침투류가 Darcy의 법칙에 따른다고

하면, 정상침투시 기초방정식은 식(1)과 같다.⁷⁾

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + q = 0 \quad (1)$$

H : 상류면의 수위

k_x : x 방향의 투수계수

k_y : y 방향의 투수계수

q : 요소내에 발생하는 수량

2.2. 자유수면을 갖는 비정상침투류의 해석

(1) 이론해에 의한 방법

Fig. 1과 같이 수위 급상승 시 연직상류면에서의 제체의 비정상침투류를 구하는 해는 다음과 같다.

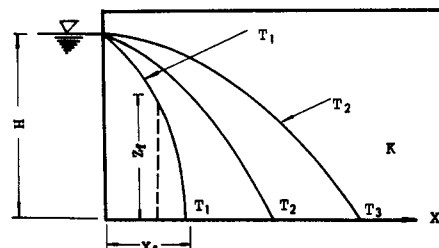


Fig. 1. Variation of seepage line

[†]To whom correspondence should be addressed.
bwshin@cubucc.chungbuk.ac.kr

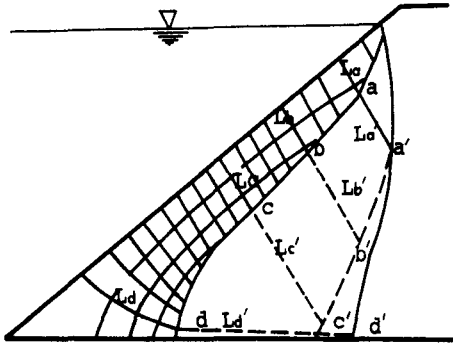


Fig. 2. Graphical method

수평 1차원 해는 식 (2)와 같이 구한다.

$$\frac{z_f}{H} = 1 - \frac{n_e}{2kH} \cdot \frac{x_f^2}{t} \quad (2)$$

여기서,

H : 상류면의 수위(cm) z_f : 제체내의 수위(cm)

t : 경과시간(sec) k : 투수계수 (cm/sec)

n_e : 유효공극률 x_f : 도달거리(cm)

(2) 도해법에 의한 방법

Cedergren의 도해법은 Fig. 2와 같이 침투가 시작된 초기의 임의의 시간 t 에 있어서의 침윤선을 적당히 결정하고 유선망으로부터 침윤선상의 몇 개의 점 a, b, c, \dots 의 동수구배 i_a, i_b, i_c, \dots 에 도달하는 유선길이를 각각 L_a, L_b, L_c, \dots 로 하면 $\frac{L_a}{i_a}, \frac{L_b}{i_b}, \frac{L_c}{i_c}, \dots$ 가 거의 같게 되도록 하며, 이 값의 차가 있을 때에는 침윤선의 모양을 바꾸고 같은 유선망을 그려 값을 일치시킨다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 연구를 위한 모형 실험장치는 Fig. 3과 같이 수조의 길이 120cm, 폭 30cm, 높이 50cm, 두께가 3mm인 강재수조로 제체내부의 침윤선의 변화를 관측하기 위하여, 수조 하단부에 $\phi=5mm$ 의 구멍을 20cm 간격으로 뚫어 고무관을 연결하여 Stand Pipe를 설치함으로써 수위 상승에 따른 제체내의 수두변화를 관측할 수 있도록 하였다.

수조의 좌측상단에 물 공급용 탱크를 설치하

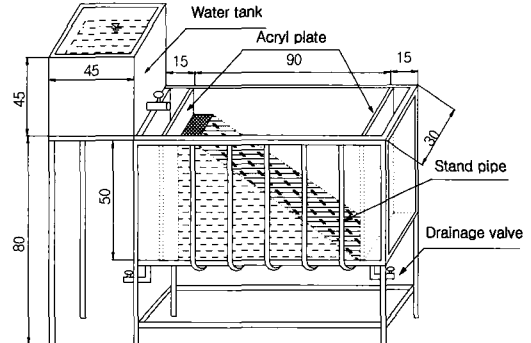


Fig. 3. Schematic sketch of experimental equipment (unit : cm)

여 실험도중 유입수를 자유로이 조절할 수 있게 하였다. 모형수조 양끝에서는 각각 15cm의 공간을 두어 2cm 간격으로 $\phi=2mm$ 의 미세한 구멍을 낸 아크릴판을 설치하여 제체에 미치는 물의 영향(난류 또는 진동)을 최소화시키고자 하였다.

3.2. 실험방법

제체의 모형은 Fig. 4와 같은 상류측의 사면이 직립사면인 제체를 모델로 하였다. 제체의 높이는 40cm, 상단폭은 15cm, 사면경사는 1:1.5, 1:2.0 수위는 15cm, 25cm, 35cm로 변화시켜 가며 상승 속도에 따른 침윤선변화와 파괴거동을 관찰하고자 하였다.

수위상승속도는 급상승일 경우 2.5cm/min, 완상승일 경우 1.25cm/min로 각각 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 부직포를 사면저면부터 5cm 간격으로 4개의 층으로 나누어 매설하여 수위 상승에 따른 보강제체와 무보강제체의 파괴양상과 침윤선의 변화를 비교하고자 하였다. 본 연구에 사용된 시료는 No.10을 통과하고 No.200에 잔류



Fig. 4. Reinforced embankment with geotextile (unit : cm)

한 자연상태의 모래와 풍화토를 사용하였다. 시료의 함수비는 자연함수비 근처로 약 8~10% 정도로 유지하였다.

지반의 상대다짐도를 40%, 80%로 각각 조성하였으며, 특히 사면의 다짐은 제체 모델 축조의 각 층 다짐 폭을 10cm 증가시켜 층 다짐 완료 후, 제체 축조 모델의 크기에 맞게 증가폭을 절취하는 방법을 택하였다.⁸⁾

본 연구에서 수행한 제체재료의 물성치와 모형실험의 세부사항은 Table 1, 2, 3과 같다.

Table 1. Physical properties of sand and granite soil

재료의 특성		실험값	
		모래	풍화토
비중		2.6	2.67
균등계수		3.25	8.5
자연함수비(%)		8~10	8~10
최대건조밀도(t/m^3)		1.735	1.91
투수계수 (cm/sec)	R.C=40%	2.4×10^{-4}	4.5×10^{-4}
	R.C=80%	2.1×10^{-3}	1.7×10^{-3}

Table 2. Physical properties of Geotextile

재료의 특성	Geotextile (Nonwoven)
단위면적당 중량(g/m ²)	300
극한인장강도(kg/in)	90
두께(mm)	1.5
파괴시 변형률(%)	74.7
투수계수(cm/sec)	1.5×10^{-1}

Table 3. Details of model tests

Slope (1:m)	Sand				Granite soil			
	Relative Compaction(%)	Rising water level (cm)	Rising Velocity (cm/sec)	Reinforced/ Unreinforced	Relative Compaction(%)	Rising water level (cm)	Rising Velocity (cm/sec)	Reinforced/ Unreinforced
1.5	40	15 25 35	Fast	Reinforced	40	15 25 35	Fast	Reinforced
				Unreinforced				Unreinforced
	80	Slow		80	Slow			
2.0	40	15 25 35	Fast	Reinforced	40	15 25 35	Fast	Reinforced
				Unreinforced				Unreinforced
	80	Slow		80	Slow			

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 무보강제체의 침윤선변화

1) 모래로 축조된 경우

Table 4는 사면경사가 1:1.5인 제체의 상대다짐도 변화와 수위상승속도에 따른 침윤선값을 나타내고 있다. 동일한 다짐도의 지반일 경우에는 수위상승속도가 느릴수록 침윤선의 높이는 상승하였으며, 또한 같은 수위상승속도일 경우 상대다짐도가 증가할수록 침윤선의 높이는 하강하는 것으로 나타났다. 사면경사가 1:2.0인 제체의 경우에서도 수위상승속도와 다짐도에 따른 침윤선변화가 1:1.5인 제체의 경우와 비슷한 경향을 나타냈다.

2) 풍화토로 축조된 경우

Table 5는 사면경사가 1:1.5이고 화강토로 축조된 제체의 침윤선 변화를 나타내고 있다. 모래의 경우와는 달리 수위상승시 제체상부까지 수위가 급상승한 경우에도 제체 하류측으로 포화 영역이 확대되지 않는 것으로 나타났다. 이것은 모래보다 풍화토의 투수계수가 작기 때문에 수평거리가 증가할수록 침윤선이 낮게 형성된 것으로 판단된다.

경사가 1:2.0인 제체의 경우에도 동일한 경향을 나타냈으며, 다짐도가 80%인 지반일 경우에도 40%지반과 동일하게 사면경사가 완만할수록 침윤선이 더 높게 형성되었다.

4.2 보강제체의 침윤선변화

1) 모래로 축조된 경우

Fig. 6에 나타난 바와 같이 경사 1:2.0, 다짐도

Table 4. Seepage line according to relative compaction and rising velocity in sand(unit : cm)

수평 거리 (cm)	R.C. = 40%						R.C. = 80%					
	15cm		25cm		35cm		15cm		25cm		35cm	
	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow
4	15	14.6	25	24.5	35	34.6	15	15	24.5	25	34.5	35
24	11	12	20	21.5	24	25	4.5	6	15	18	24.5	26
44	4	4.5	12	13.5	16	18.5	0	1	11	13	15	18
64	0	0	5	0	8	0	0	0	0	0	0	0

(R.C.) 40%인 제체의 경우 수평거리가 증가할수록, 즉 보강재가 매설되어 있는 위치로 점점 가까워질수록 침윤선이 급격히 낮아지는 경향을 보였다. 낮은 수위보다는 수위가 높게 상승할수록 보강제체의 침윤선 높이가 무보강제체보다 더 낮게 형성되는 것으로 나타났다.

사면경사가 1:1.5인 경우에도 1:2.0경사의 제체와 비슷한 경향을 보였으며, 또한 다짐도가 80%인 지반에서도 40%의 지반과 동일하게 사면경사가 완만할수록 침윤선이 더 높게 형성되었다.

2) 풍화토로 축조된 경우

Fig. 8에 나타난 것처럼 모래지반의 경우와 마찬가지로 보강재가 매설되어 있는 위치로 점점 가까워질수록 침윤선이 급격히 낮아지는 경향을 보였다.

사면경사가 1:1.5인 경우에도 1:2.0경사의 제체와 비슷한 경향을 보였다. 또한 다짐도가 80%인 지반에서도 보강재를 사용하였을 때 침윤선이 낮게 형성되었다.

제체내 침윤선변화에 대한 실험결과 모래의 투수계수가 풍화토보다 더 크기 때문에 보강유무와 수위상승속도에 관계없이 제체내 수위는

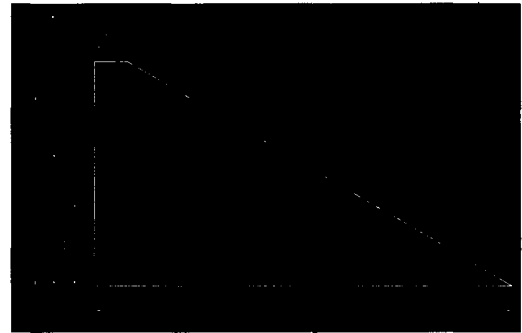


Fig. 5. Seepage line of unreinforced embankment in sand (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

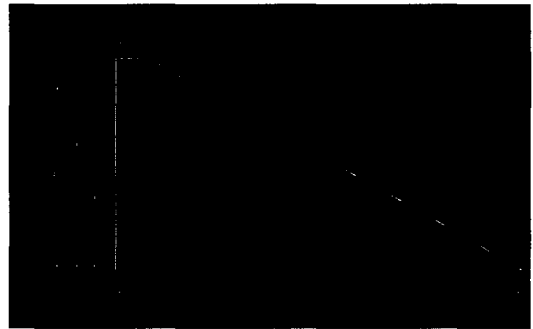


Fig. 6. Seepage line of reinforced embankment in sand (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

Table 5. Seepage line in granite soil for 1:1.5, R.C.=40% (unit : cm)

수평 거리 (cm)	Dr = 40%					파괴발생
	15cm		25cm		35cm	
	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	
4	14.1	14.6	23.5	24.0		
24	6.5	8.9	15.4	18.0		
44	0.0	2.0	3.0	5.0		
64	0.0	0.0	1.0	1.0		

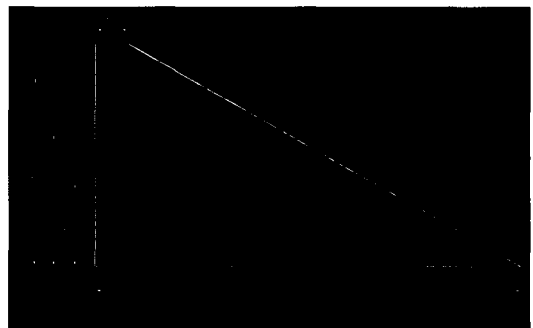


Fig. 7. Seepage line of unreinforced embankment in granite soil (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

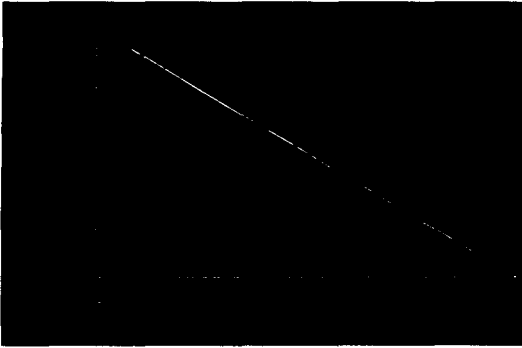


Fig. 8. Seepage line of reinforced embankment in granite soil (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

모래지반이 풍화토지반보다 더 크게 상승하는 것으로 나타났다.

4.3. 제체의 파괴거동

본 실험결과 무보강제체가 보강제체의 경우보다 다소 커다란 붕괴를 나타냈는데, 사면경사가 높고(1:1.5), 지반의 상대다짐도가 낮으며(R.C.=40%), 수위가 급상승할 때 붕괴가 가장 크게 발생하였다.

1) 모래로 축조된 경우

(1) 보강전

Fig. 9와 10은 수위급상시 파괴된 제체의 모습을 보이고 있다. 1:1.5경사일 경우 제체하단부에서 점점 유출점이 형성되면서 토사가 이동하기 시작하였으며 그 결과 제체는 수위가 35cm로 증

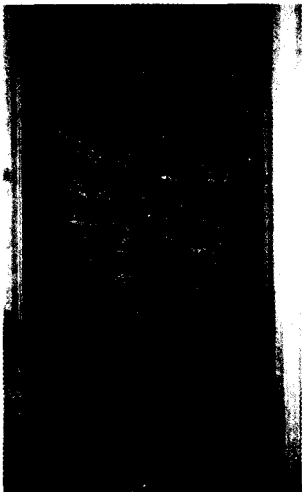


Fig. 9. Unreinforced embankment failure in sand (R.C.=40%, 1:1.5 Fast rising)



Fig. 10. Unreinforced embankment failure in sand (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

가하였을 때 파괴되었다.

1:2.0경사에서도 동일한 파괴거동을 보였으나 1:1.5경사보다는 파괴가 다소 작게 발생하였다.

다짐도가 80%인 상태에서는 사면 끝단부에 국부적인 파괴가 발생되었을 뿐 전체적인 파괴 양상은 보이지 않았다.

(2) 보강후

보강전의 지반상태와 동일하게 조성하면서제체의 하단부로부터 25cm 길이의 부직포를 5cm 마다 4층으로 나누어 설치하였다. 그 결과 Fig. 11, 12와 같은 제체의 파괴가 발생하였는데 다짐도가 작고(R.C=40%), 사면경사가 급경사이며 제체내 수위가 급상승할 때 붕괴가 가장 크게 발생하였으나 보강 전보다는 파괴가 작게 발생했다.

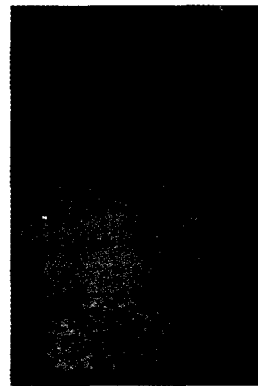


Fig. 11. Reinforced embankment failure in sand (R.C.=40%, 1:1.5 Fast rising)

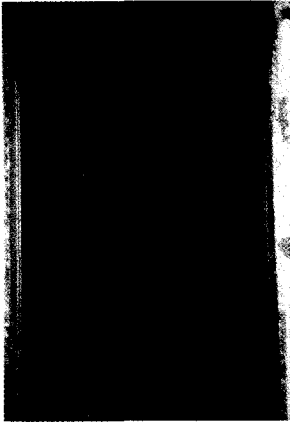


Fig. 12. Reinforced embankment failure in sand (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

다짐도가 80%인 상태에서는 사면 끝단부에 약간의 토사유실이 발생하였을 뿐 대체적으로 안정한 상태를 나타냈다.

2) 풍화토로 축조된 경우

(1) 보강전

Fig. 13과 14는 무보강제체의 파괴모습을 나타내고 있는데, 25cm에서 35cm로 수위를 상승시키는 동안 상단부가 침하되면서 사면쪽으로 토사의 이동이 발생함에 따라 제체가 파괴에 이르렀다. 유출점(Runoff point)은 수위상승동안 명확하게 들어나지 않았지만 제체가 최종적으로 파괴가 일어나기 직전 유로가 명확히 형성되었다. 다짐도가 80%인 상태에서는 부분적인 토사유출이 발생되었을 뿐 제체는 안정한 상태였다.



Fig. 13. Unreinforced embankment failure in granite soil (R.C.=40%, 1:1.5 Fast rising)

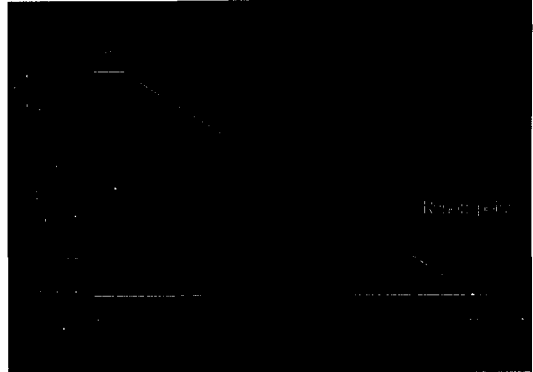


Fig. 14. Unreinforced embankment failure in granite soil (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

(2) 보강후

Fig. 15와 16은 보강제체의 파괴거동을 보여주고 있다. 보강제체의 경우 35cm 수위상승이 이루어진 후 약 2시간정도 시간이 경과되었을 때

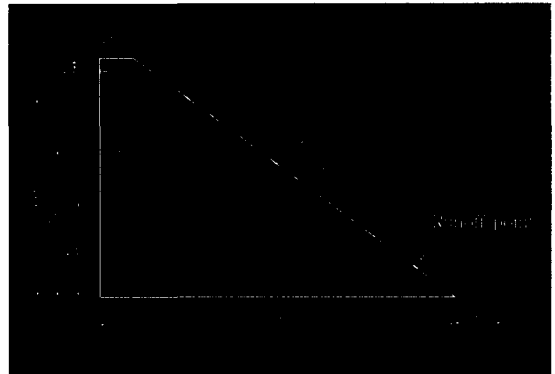


Fig. 15. Reinforced embankment failure in granite soil (R.C.=40%, 1:1.5 Fast rising)

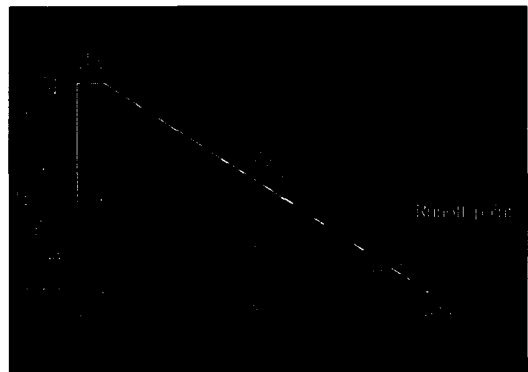


Fig. 16. Reinforced embankment failure in granite soil (R.C.=40%, 1:2.0 Fast rising)

상단부가 미소하게 침하되면서 사면파괴가 국부적으로 발생하였다.

다짐도가 80%인 상태에서는 토사유출이 거의 발생되지 않아 체체는 안정한 상태를 보였다.

실험에 대한 분석결과 모래지반의 경우 전단강도를 발휘시키기 위해서는 상대적으로 풍화토 지반에 비해 커다란 변형이 필요하다는 것을 실험결과를 통해서 알 수 있었으며, 파괴양상과 변형의 크기가 서로 다르게 나타난 이유는 모래와 풍화토의 응력-변형률의 차이로 인한 것으로 분석된다.

부직포의 보강효과는 더 작은 최종침하의 결과로 나타났으며, 완상승과 급상승 모두 부직포로 보강된 체체의 최종침하량은 동일한 체체의 침하량보다 더 작게 나타났다.

5. 결론

보강체체의 침투거동을 평가하기 위하여 체체의 단면조건 및 지반조건 그리고 수위상승속도에 따른 모형침투실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 보강체체와 무보강체체 모두에서 동일한 수위상승속도시 사면경사가 완만할수록 침윤선의 높이는 상승하였으며, 사면경사가 동일할 경우에는 수위상승 시간이 느릴수록 침윤선의 높이가 상승하였다. 그리고 지반조건에 따라 파괴양상과 변형의 크기가 서로 다르게 나타난 이유는 모래와 풍화토의 응력-변형률의 차이로 인한 것으로 분석된다.

2) 보강체체의 경우 사면경사에 상관없이 보강재의 영향으로 유출점이 무보강체체보다 낮게 형성되는 것으로 나타났다. 따라서 부직포를 이

용한 체체의 보강이 비교적 물의 침투력에 대해 안정한 것으로 나타났다.

3) 모래의 경우보다 풍화토로 조성된 체체가 보강여부에 관계없이 낮은 침윤선을 보이며 침투가 발생하였는데, 이것은 투수계수의 영향때문인 것으로 생각된다.

4) 동일한 상대다짐도로 조성되었을 경우 모래지반으로 조성된 체체의 경우에는 유출점을 따라 토사가 이동함으로써 천천히 파괴가 일어나는 반면, 풍화토의 경우에는 낮은 투수계수의 영향으로 인해 급작스러운 파괴가 발생하면서 불안정한 침투거동을 보였다.

참고문헌

- 1) 신방응, 체체의 평행흐름에 대한 비정상침투의 연구, 대한토목학회논문집 Vol. 8, No. 3, pp. 101~110, 1988.
- 2) 최기봉, 침투력을 고려한 체체사면의 안정해석, 박사학위논문, 충북대학교, 1990.
- 3) Casagrand, A., Seepage through Dams, New England Water Works Association, Vol. 1, No. 2, pp. 131~170, 1976.
- 4) K. R. Rushton and S. C. Redshaw, Seepage and Ground-water Flow, John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- 5) J. L. Sherard, R. J. Woodward, S. F. Gizienski, W. A. Clevenger, Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- 6) P. Novak and J. Cabelka, Models in Hydraulic Engineering physical Principles and Design Applications, Pitman, 1981.
- 7) Harr M. E., Ground Water and Seepage, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 43~57, 1962.
- 8) 신윤섭, 불포화 흐름을 고려한 체체내 침투거동 석사학위논문, 대전산업대학교, 1998.