

필터재의 입도범위와 작용수압에 따른 성토재의 유실 특성

Characteristics of Volume Loss for Base Materials with Different Hydraulic Pressures and Filter Grain Size

인 현 식* · 송 창 섭**

In, Hyun Sik · Song, Chang Seob

Abstract

The objective of this study is to evaluate the stability of the design criteria recommended by Betram and Terzaghi as compared with the experimental result. A series of NEF tests was conducted to determine the loss of volume in base soils. The three kinds of base soils classified as CL, SC and SM are used for the NEF tests with various hydraulic pressures and filters following upper and lower bond of the criteria.

Volume loss characteristics of the base soils was examined closely by the results of the test successfully. Firstly, it was found that the loss of base soils was mostly eroded at the first stage of seepage. Secondly, the amount of loss volume was ranked CL > SM > SC in order of their amounts for upper criteria, and SM > CL > SC orderly for lower criteria. Thirdly, the volume loss of all soils was increased with increasing the hydraulic pressures. And lastly, the needs of the new design criteria was proved for the control of seepage and piping.

Keywords : Filter, Piping, Volume loss

I. 서 론

수자원 확보를 위하여 농업용 저수지 및 방조제가 수년간 축조되었고, 현재도 건설되고 있으나 그에 따른 다양한 문제점도 발생하고 있다. 축제용으

로 사용되는 성토재는 주로 사질성분을 다소 많이 함유하고 있는 재료를 사용하여 수압에 대응하는 전단강도를 견디게 설계하는 것이 보통이다. 또한 제체의 과도한 누수를 방지하기 위하여 점성을 가지며 세립질로 구성되어 투수계수가 낮은 코어를 중간부분에 배치하게 된다. 하류측 사면에는 누수 또는 침투에 의한 침투수의 신속한 배제를 위하여 드레인을 설치한다. 이 때 간극이 큰 자갈이나 모래를 드레인 재료로 사용하면 누수의 신속한 배제라는 측면에서는 본래의 목적을 달성하나 그에 수

* 충북대학교 대학원
** 충북대학교 농과대학
** Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2578
fax: +82-43-271-5922
E-mail address: cssong@chungbuk.ac.kr

반되는 부작용으로 성토재의 유실이 발생하게 된다. 이러한 성토재의 유실을 방지하고 배수를 목적으로 설치하는 것이 필터이다. 그러나, 지금까지 필터는 드레인과 성토재의 중간에 위치하며 양자의 기능을 동시에 만족시키는 중요한 역할을 하면서도, 성토재의 입도에 의해서 간단히 정의되는 것으로 여겨왔다. 이러한 필터재의 중요성을 간과하는 과정에서 많은 재해가 야기된다. 일반적으로 필댐의 사고는 제체의 월류, 파이핑, 성토 및 기초 지반의 전단강도 부족, 간극수압 등이 직접적인 원인이 되는 경우가 많다.

필터재에 관한 연구는 Kenney와 Sherard(1984)의 컨벤셔널 시험과 Kenney(1984)의 슬러리 시험을 통하여 성토재의 유실되는 양을 측정하였고, Sherard(1984)는 슬롯 시험을 통하여 유실량을 측정하였다.¹¹⁾ 그 이후 Kenney와 Lau(1985)는 댐의 침투에 대한 안정성을 평가하기 위해 Kenney's

Gradation방법을 사용하기도 하였으며,⁴⁾ Sherard와 Dunnigan(1989)은 NEF 시험을 통하여 침식되지 않는 경계를 제시하였다. 이 기준은 미개척국과 미농무부의 설계기준으로 채택되기도 하였다.¹⁴⁾

본 연구에서는 Sherard와 Dunnigan의 NEF 시험을 수정하여 Terzaghi와 Betram(1940)¹¹⁾에 의해 발표된 이래 지금까지 우리 나라에서 사용되고 있는 필터재에 관한 설계기준을 하 한계치와 상 한계치에서 제작한 필터재로서 수압과 흙 종류별로 성토재의 유실량을 측정하여 안정적으로 설계할 수 있는 필터재의 범위를 연구하고자 하였다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

시험에 사용된 흙은 관개개선 및 생활용수의 확

Table 1 Physical properties of soil samples

Samples	LL (%)	PI (%)	Gs	Grain size distribution (%)						γ_{dmax} (tf/m ³)	OMC (%)	U.S.C.S.
				D ₈₅	D ₆₀	D ₅₀	D ₁₅	D ₁₀	No.200			
Chungju	26.4	7.0	2.66	0.84	0.34	0.23	0.02	0.005	27.3	1.91	11.2	SC
Goesan	44.4	22.2	2.77	0.2	0.062	0.03	0.00033	0.00014	62.4	1.54	25.6	CL
Cheongju	30.3	7.8	2.64	1.0	0.38	0.2	0.025	0.009	32.6	1.79	15.5	SM

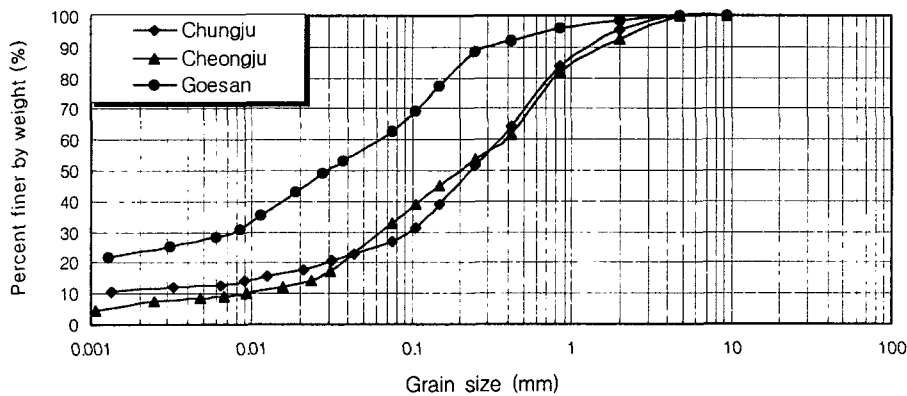


Fig. 1 Grain size distribution curves of soils

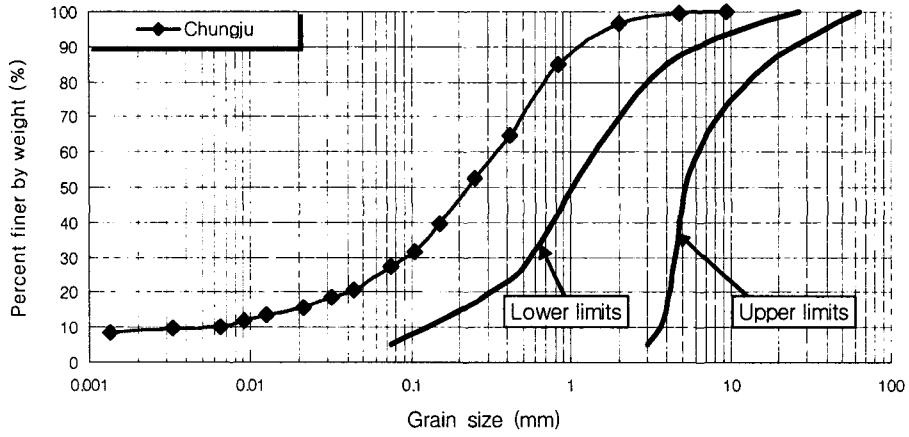


Fig. 2 Designed grain size distribution of filter (Chungju)

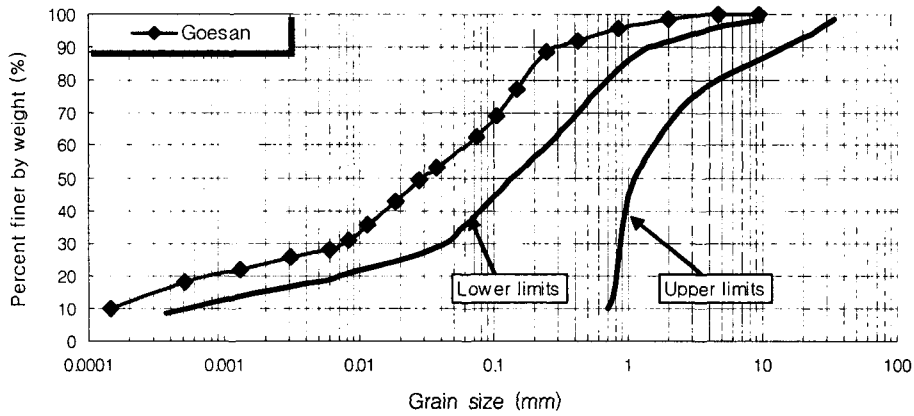


Fig. 3 Designed grain size distribution of filter (Goesan)

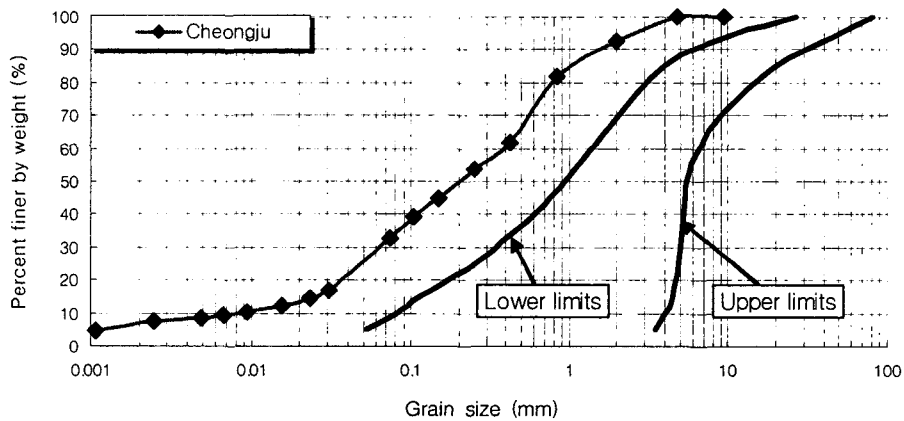


Fig. 4 Designed grain size distribution of filter (Cheongju)

보를 목적으로 축조된 충청북도 지역의 농업용 저수지의 제체에 사용된 것을 선정하였다. 또한 흙의 종류에 따른 유실 특성을 분석하기 위하여 서로 다른 종류의 흙을 채취하였다. 사용된 흙의 물리적 성질은 Table 1과 같이 나타났고, 입도 분포곡선은 Fig. 1과 같다.

충주시료와 청주시료는 저소성의 모래질 흙으로 일반적으로 축조재료로 많이 사용되는 흙인 반면, 괴산시료는 점성분이 많고 불투수성 흙으로 배수가 원활하지 못하고 토공재료로서 약간 안정적이지 못한 특성을 지니고 있으므로 주의를 기울여야 하는 시료이다.

2. 실험방법

가. 필터재의 조제 및 범위

필터재로 쓰인 모래는 충청북도 청주시 무심천 상류에서 채취하여 #200체로 수세하고 노건조시킨 후 각 체별로 분류하여 사용하였다. Betram 및 Terzaghi 설계기준의 식 (1) 및 식 (2)와 미공병단 설계기준의 식 (3) 및 식 (4)를 동시에 만족하는 상한 입도와 하한 입도의 범위에서 설계하였다. Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4는 각각의 흙의 종류에 따른 필터재의 설계범위를 나타내고 있다.

$$D_{15}(f) / D_{85}(s) < 4 \sim 5 \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{15}(f) / D_{15}(s) \geq 4 \sim 5 \dots\dots\dots (2)$$

$$D_{15}(f) / D_{85}(s) \leq 5 \dots\dots\dots (3)$$

$$D_{50}(f) / D_{50}(s) \leq 25 \dots\dots\dots (4)$$

나. 공시체의 제작 및 방법

성토재(base material)는 일반적으로 제방의 다짐에 적용하는 A-type 다짐에 의하여 자연건조시킨 후 최적 함수비로 조제하였다. 다짐에너지는 KS F 2312에 명시된 표준 다짐에너지를 환산하여

정압을 사용하였으며, 다짐회수는 3층 각 층은 23회씩 다져 공시체를 만들었다.

처음 직경 1 mm의 구멍을 만들어 실험한 결과 초기에 유실되는 굵은 입자가 구멍을 막아서 유실량을 측정하기에 적합하지 않았다. 직경을 확대시켜 유실공이 막히지 않고 측정할 수 있는 크기가 직경 5 mm 정도였다. 따라서, 성토재의 다짐시 5 mm 붓을 중앙에 삽입하고 다짐 후에 뽑아내 직경 5 mm의 구멍을 만들었다. 공시체의 구성은 Fig. 5와 같이 성토재의 상단에 굵은 자갈을 사용하여 채우고, 하단에는 앞서 구한 필터를 적용하였다.

시험기구는 Sherad와 Dunnigan(1989)에 의해 개발된 NEF(No Erosion Filter) 시험에 근거를 두고 제작하였고,¹⁴⁾ 시험기구의 모식도는 Fig. 6과 같다. 시험기구는 두 개의 D다짐 몰드를 연결하여 높이 350 mm, 내경 150 mm로 하고 밀판은 CBR 시험시 사용하는 밀판을 사용하였다. 또, 시험기구의 위쪽에는 공기를 배출시킬 수 있도록 배기구(air vent)를 설치하고, 상부에 내경 8 mm인 PE관을 압력조절기(pressure regulator)와 연결하여 일정한 수압이 유지되도록 하였다. 침전조는 안쪽과 바깥쪽 두개를 설치하여 유실되는 조립질 시료는 안쪽의 침전조에, 세립질은 바깥쪽 침전조에 침

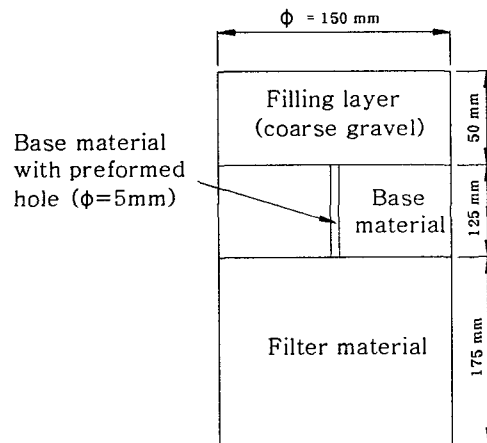


Fig. 5 Composition layer of sample used

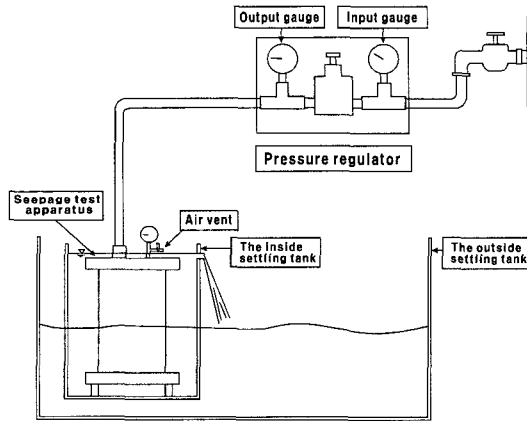


Fig. 6 Schematic diagram of the NEF test

전되도록 제작하였다.

유실공의 포화를 위하여 예비시험을 실시하여 3 일간의 수침시간을 결정하고 공시체를 포화시킨 후, 상부에 정해진 수압을 가하여 약 15분간 유출 시험 실시하고, 유실된 흙은 2~3일간 침전시킨 후 침전물은 노건조를 시키고 나머지는 필터페이퍼 로 여과하여 건조무게를 측정하였다.

상부에 가해지는 수압은 1.0 kgf/cm^2 , 1.5 kgf/cm^2 , 2.0 kgf/cm^2 , 2.5 kgf/cm^2 및 3.0 kgf/cm^2 등 5종으로 나누어 수압에 따른 영향을 고려 하도록 배려하여 시험하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출시간에 따른 유실량

유출시험의 시험시간을 검토하기 위하여 괴산시료를 표본으로 하여 만들어진 공시체를 3일간 수침킨 후에 1.0 kgf/cm^2 의 수압을 가하여 시간에 따른 유실량을 침전시켜 노건조한 시료무게를 측정하여 도시하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 정해진 수압하에서 유실되는 무게는 초기 약 3분간 거의 유실되고 시간의 경과에 따라 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 초기 3분 동안 유실량이 약 66% 정도임을 알 수 있다.

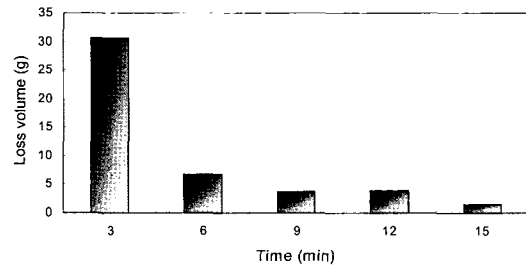


Fig. 7 The amount of loss for elapsed time (Goesan, 1.0 kgf/cm^2)

2. 수압에 따른 유실특성

각 시료의 필터재 상한 및 하한 입도에서 발생한 유실량을 가해진 수압에 따라 도시하면 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. Fig. 8은 충주시료의 상한 및 하한 필터재 입도에서의 유실량을 도시한 것이고, Fig. 9는 괴산시료, Fig. 10은 청주시료에 대하여 도시한 것이다.

각각의 시료는 상한의 필터범위에서의 유실량이 하한입도에서의 유실량보다 월등하게 많은 것을 볼 수 있다. 또한, 수압이 증가함에 따라 상한이나 하한의 입도에서의 유실량이 증가하는 경향을 보이는데, 하한의 필터범위에서는 수압의 영향이 미소하나 상한의 입도에서의 유실량이 수압에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 특히, 괴산시료의 경우는 상한 및 하한의 필터재의 입도에 따라 유실량의 차이가 다른 시료에 비해 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 괴산시료는 주로 세립질의 흙으로 구성되어 있기 때문이다.

동일한 재료를 축제용으로 사용하더라도 적용되는 필터재의 입도가 상한 또는 하한에 위치함에 따라, 적용되는 수압에 따라 성토재의 유실되는 양이 달라지므로 그에 따른 대비책을 마련하여야 한다. 즉, 축제물이나 제방 등에 적용된 필터재의 역할은 가능한 빨리 체체 속의 과잉수를 배제하는 것이 목적이나 성토재의 유실 또한 그만큼 많아지게 되므

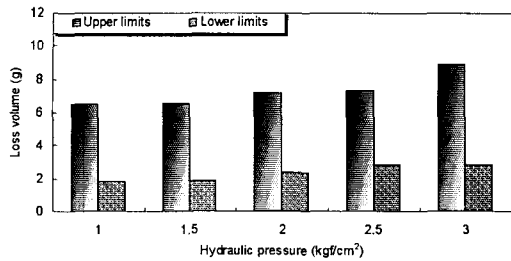


Fig. 8 Relationship for loss volume with hydraulic pressure (Chungju)

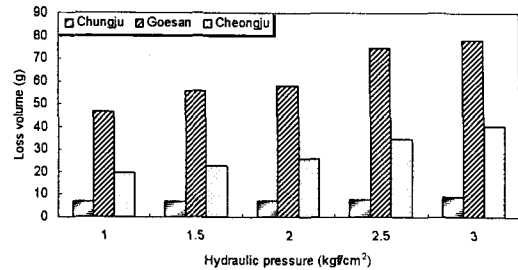


Fig. 11 Relationship for loss volume with hydraulic pressure (Upper limits)

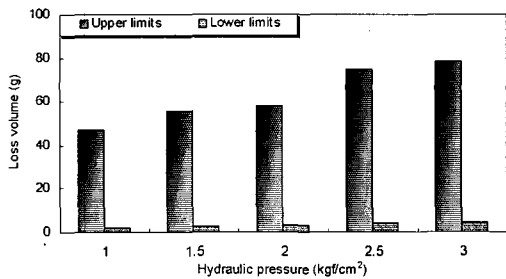


Fig. 9 Relationship for loss volume with hydraulic pressure (Goesan)

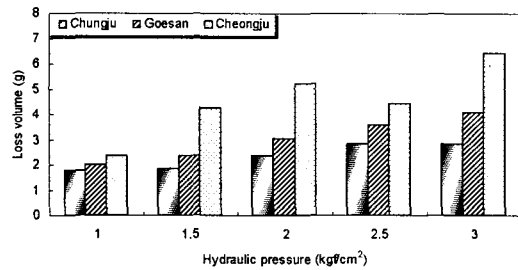


Fig. 12 Relationship for loss volume with hydraulic pressure (Lower limits)

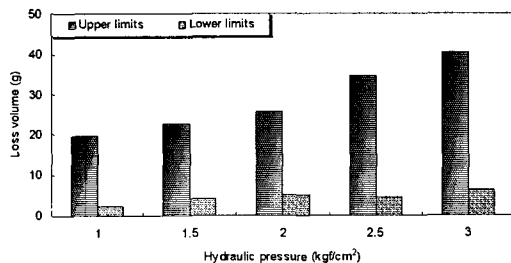


Fig. 10 Relationship for loss volume with hydraulic pressure (Cheongju)

로 주의하여야 한다. 이런 관점에서 필터재의 입도에 따른 유실량의 측정은 매우 중요한 의미를 가지게 된다.

따라서, 앞으로 축제용 제체나 제방 등을 설계 또는 축조하는 경우에서 반드시 적용되는 성토재의 종류, 특성 및 입도와 수위 등을 고려하여 필터재의 입도를 선정하여야 할 것으로 판단된다.

3. 성토재의 종류에 따른 유실 특성

축제용으로 사용되는 성토재는 주로 사질성분을 다소 많이 함유하고 있는 재료를 사용하여 수압에 대응하는 전단강도를 견디게 설계하는 것이 보통이다. 또 필터재는 이러한 성토재의 입도를 바탕으로 범위를 정하게 된다. 이 때 간극이 큰 재료를 필터재로 사용하면 침투수의 배제라는 측면에서는 우수한 재료이나 그에 수반되는 성토재의 유실 또한 많아지게 되므로 성토재의 특성을 고려하여 필터재를 선정하여야 한다. 그러나, 최근 공사의 대형화에 따라 양호한 성토재의 다량 확보가 어려워지자 점차로 불량 재료를 개량하여 사용하게 되면서 필터재 또한 그에 맞도록 수정하여야 할 필요성이 요구되는데, 이러한 측면에서 성토재의 종류에 따른 유실 특성을 검토하기 위하여 흙의 종류 및 수압의 크기에 따라 유실량을 도시하면 Fig. 11 및 Fig. 12와

같다. Fig. 11은 필터재를 상한 입도 근처의 기준에 맞도록 적용한 결과이며, Fig. 12는 하한 입도의 필터재에 대하여 유실량을 수압의 크기에 따라 도시한 것이다.

수압에 따라 전체적인 유실량은 증가하며, 상한에서의 유실량은 하한보다 월등하게 많다. 또, 상한 입도를 가지는 필터재에서 유실되는 양은 CL > SM > SC순으로 나타났으며, 하한의 입도에서는 SM > CL > SC의 순으로 유실량이 측정되었다. 이는 사용되는 성토재의 종류가 동일하더라도 적용되는 필터재의 입도에 따라 유실량의 차이가 있다는 것을 입증하는 것이다. 즉, SC 또는 SM계통의 흙을 축제재료로 사용하는 경우에는 다른 종류의 흙보다 유실량은 적으며, 특히 하한 근처의 입도로 조정된 필터재보다는 상한 근처의 입도를 가지는 필터재를 적용하는 것이 훨씬 유리하며, CL인 경우는 하한 근처의 입도를 가지는 필터재를 적용하는 것이 상한의 입도보다 유리하다는 것을 알 수 있다.

또한, 전체적으로 보아 SC계통의 흙은 상한 및 하한의 입도에서 다른 종류의 흙보다 유실되는 양이 적은 반면, SM 및 CL계통의 흙은 SC계통의 흙보다 유실되는 양이 많으므로 이러한 종류의 흙으로 저수지를 축조하는 경우에는 제체의 파이핑에 의한 누수, 제체의 안정 등에 주의해야 한다. 특히, 하한 근처의 필터 입도에서는 SC계통의 흙보다 약 2배이내의 유실 차이를 보이고 있으나, 상한에서는 4~8배의 큰 유실차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서, 이러한 흙을 제방이나 저수지의 축제재료로 사용하는 경우에 반드시 성토재의 종류에 따라 필터의 입도범위를 선정하여야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

제체나 제방의 침투수를 유출면에서 흙 입자의 유실을 막으면서 가능한 빨리 물만 안전하게 배제하기 위하여 적용되는 투수성 재료인 필터재는 댐

의 안정에 있어서 중요한 역할을 한다. 이러한 필터재의 입도 범위와 작용하는 수압을 달리하고, 여러 종류의 성토재의 유실 특성을 규명하기 위하여 NEF 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Seepage 시험 결과, 대부분의 성토재 유실은 필터재의 입도 및 작용수압에 관계없이 초반의 약 15분간에 거의 발생하는 것으로 나타났다. 이는 제체에 파이핑 현상이 발생하면 초기에 대부분의 제체 유실이 일어나므로 평소에 충분히 제체의 결함 상태를 관측하여 안정성을 확보하여야 한다는 것을 의미한다.

2. 작용수압에 따른 유실량은 흙 종류와 무관하게 수압이 올라갈수록 많은 유실량을 보였지만, 일부 고수압에서 적어지는 현상을 보이기도 했다. 특히, 하한보다는 상한 근처의 입도를 가지는 필터재를 적용하는 경우에는 고수압에서 급격한 유실량의 증가를 보였다.

3. 성토재의 종류에 따른 유실량은 상한 근처의 입도를 가지는 필터를 적용하면 CL > SM > SC 순으로 측정되었고, 하한 근처의 입도에서는 SM > CL > SC 순으로 유실량이 측정되어 전체적으로 본 연구의 시험조건 범위내에서는 SC계통의 흙이 유실측면에서는 유리한 것으로 나타났다.

4. 적용되는 필터재의 입도에 따른 유실량은 수압에 따라 다소 차이는 있으나, 상한 근처의 입도를 적용하면 하한 근처의 필터재를 통과하는 유실량보다 CL계통의 흙은 95%, SC계통의 흙은 62% ~ 72% 그리고 SM계통은 80% ~ 88% 정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

5. 필터재는 제체의 안전에 가장 중요한 설계요소이므로 지금까지는 단순히 성토재의 입도만을 고려하여 범위를 정하였지만, 앞으로는 작용수압, 성토재의 종류 등을 고려하여 필터재의 범위를 정하여야 할 것으로 판단된다. 특히, 성토재의 입자가 비교적 굵고 세립분이 적은 경우에는 상한 근처의 입도를 적용하되 트랜지션 재를 설치하여 과도한 유실을 방지하고, 세립분이 많은 경우에는 하한 쪽

의 필터를 적용하는 것이 유리하지만 이 때에는 체체의 간극수압 등을 검토하여야 할 것이다.

References

1. Bertram, G. E. 1940. An Experimental Investigation of Protective Filters. *Soil Mechanics Series No. 7* : 1-21. Harvard University.
2. Harry, R. Cedergren. 1967. Seepage, Drainage, and Flow Nets. *John Wiley & Sons, Inc.* : 4-57. New York, London, Sydney.
3. Jin, B. I. and Kim, J. H. 1985. Experiment on seepage in varied section of core wall for fill dam design. *Journal of the Korea Society for Civil Engineer* 5(1) : 55-64. (in Korean)
4. Kenny, T. C. and D. Lau. 1985. Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechn. J.*, 22(2) : 215-225.
5. Kenny, T. C. and D. Lau. 1986. Internal stability of granular filters: Reply. *Canadian Geotechn. J.*, 23(3) : 420-423.
6. Kyong, G. H. 2000. The stability evaluation of river embankment for a piping phenomenon. M. S. Thesis. Cheongju, Prov. : Chungbuk National University. (in Korean)
7. Kwon, M. N. and Kang, Y. M. 1983. Comparison studies on seepage flow analysis of dam body. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineer* 25(1) : 45-66. (in Korean)
8. Lafleur, J., J. Mlynarek and A. L. Rollin. 1989. Filtration of broadly graded cohesionless soils. *J. Geotechn. Eng., ASCE*, 115(12) : 1753-1768.
9. Lee, J. T., 1987. Destructive cause of dams and prediction of a maximum flood. *Journal of the Korea Society for Civil Engineer* 35(1) : 59-68. (in Korean)
10. Lee, J.W., Lee, K.S. 1998. *Design of Dam and Construction Handbook*. Seoul : Singisul. (in Korean)
11. Lilja, H. M., M. Rother and O. T. Ravaska. 1998. Filter material study for an earth dam project. *Dam Safety*. Berga. L. Vol. 2: 825-832. Rotterdam. A. A. Balkema.
12. Ministry Construction. 1993. Design criteria of dam. : 344-345. (in Korean)
13. Ripley, C. F. 1986. Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechn. J.*, Vol. 23. : 255-258.
14. Sherard, J. L. and L.P. Dunnigan. 1989. Critical filters for impervious soils. *J. Geotechn. Eng. ASCE*. 115(7) : 927-947.
15. Sin, B. W. 1980. A study of the seepage through sand-constructed medel dams. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineer* 22(2) : 64-82. (in Korean)
16. Sin, B. W. and Choi, G. B. 1985. Analysis of slope stability through sand constructed model levee. *Journal of the Korea Society for Civil Engineer* 5(4) : 15-22. (in Korean)