홍수로 인한 저수지 월류 시 제체보호기법

Embankment Protection Method Against Overflow by Flood in Reservoir

장동수* · 김용성** · 추연욱*** · 임은상****

Chang, Dong Su · Kim, Yong Seong · Choo, Yun Wook · Im, Eun Sang

Abstract

In this study, the failure behavior of a levee under overflow conditions was investigated by conducting centrifuge tests on a small scale model for the Janghyun levee in Kangrung, Kangwon-do, and based on the test results a levee protection method using waterproof mat was proposed. The model levees were constructed by scaling down the prototype levee to 1:50, where LVDT and pore-pressure sensors were installed to monitor the behavior of the levees during overflow. Overflow tests were carried out in three different conditions depending on where the waterproof mat was installed; 1) no waterproof mat, 2) installed in upper slope and crest of the levee, 3) installed in the entire levee. The centrifuge test results indicated that the application of the waterproof mat reduced erosion and soil loss in the levee. Especially, it was found that under overflow, the levee breach could be avoided with the waterproof mat installed in upper slope and crest only, although soil loss occurred in downstream slope inevitably. It is expected that levee failures occurred frequently in rainy season may be effectively prevented by using waterproof mat if overflow of levee due to heavy rains is well predicted in advance.

Key words : Embankment, Overflow, Reservoir, Dam, Centrifuge modeling

요 지

본 연구에서는 원심모형실험기를 이용하여 강원도 강릉시 소재 장현 저수지의 축소 모형에 대하여 월류 시 제체의 붕괴 거동 특성을 파악하고, 제체보호공법을 고찰하였다. 원심모형실험 시 모형 단면은 1/50로 축소하여 축조하였고 LVDT, 간극수압계를 설치한 후 월류시험을 수행하였다. 월류시험은 차수매트 보강방법에 따라 미설치 시, 상류사면 및 제정부근 설치 시, 상하류 사면 전체 설치 시 등으로 나누어 수행되었다. 원심모형실험 결과 차수매트 설치 시 제체의 세굴과 토사의 유출을 방지할 수 있다는 것을 확인하였으며, 특히 차수매트의 보강을 최소한으로 한 상류사면 및 제정부근 설치 시에 하류사면의 유실은 불가피하게 발생하지만 상·하류방향으로 발생하는 제체의 절단은 막을 수 있는 것으로 나타났다. 앞으로 자치단체 소관 소규모 저수지에서 집중호우로 인한 월류 상황 발생을 사전에 예측하여 제체보호공법을 적용한다면 우기 시 빈번하게 발생하던 저수지 붕괴 사고는 막을 수 있을 것이라 사료된다.

핵심용어 : 제방, 월류, 저수지, 댐, 원심모형실험

1. 서 론

우리나라의 자치단체 소관 저수지 총 14,328개소 중 87.9%에 해당하는 저수지가 70년대 이전 개발 성장기에 건설되어 노후가 심하거나 내구성이 취약한 경우가 많다. 또한, 축조된 지 60년 이상 경과된 노후 저수지가 전체의 56.5%를 차지하고, 시간이 경과할수록 노후화로 인한 붕괴위험, 토사 축적에 따른 유효저수량 감소 등 안전 및 기능상 문제점

을 안고 있다. 자치단체 소관 저수지의 제체 구조는 전체 14,328개소 중 14,087개소(98.3%)가 월류시 붕괴위험이 높은 흙댐 구조로 되어 있고, 241개소(1.7%)가 콘크리트 구조로 되어 있으며, 홍수조절방식도 95% 이상이 여수토를 통한 자연 월류식으로 되어 있어 홍수기를 대비한 제한수위 운영이 불가능하며 다음 해의 생활용수 및 농업용수 확보를 위해 만수위를 유지하려는 저수지 관리기관의 관습과 더불어 최근의 범지구적인 이상기후 현상에 의한 집중호우로 월류에 의한

*정회원. 강원대학교 대학원 지역건설공학과 석사과정(E-mail: woogawa@naver.com)

Member. Master Course Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

**교신저자. 정회원 강원대학교 지역건설공학과 부교수(Tel: +82-33-250-6463, Fax: +82-33-251-6440, E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

***한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

****한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

Senior Researcher, Infrastructure Research Center, K-water Institute, K-water

저수지 붕괴위험이 높아 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다(Kim, 2006).

지반공학 분야에서는 댐의 월류 문제 보다는 주로 침투 문제를 다루는 것이 보편적이지만 최근 지구온난화로 인한 강수량 증가 패턴에 따라 월류 시 제체의 거동 문제는 방재적 관점에서 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고 있다.

외국의 경우, 원심모형실험기를 이용하여 침투 및 월류 시 제체의 거동 특성 등 댐 관련 연구를 많이 수행하여 왔는데, Mikasa et al.(1981)은 댐 core 형태가 댐의 변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 총 11개의 댐 모형을 대상으로 시험을 수행하였으며, Dunn et al.(1984)은 2종류의 지반으로 구성된 댐 모형에 대하여 각각 3회씩 총 6회에 걸쳐 월류시험을 실시하여 파괴형상과 월류 흐름, 월류에 의한 파괴 깊이 관계식을 유도하였다. Rechard and Sutherland(1984)는 3종류의 모델, 즉 각기 다른 가속도장(90 g, 125 g, 150 g)에 대하여 tailings 댐에 형성되는 침윤선의 변화를 관찰한 후, 그 결과를 해석해와 비교하여 정확성을 확인한 바 있다.

Narita et al.(2008)은 발전용 및 관개용 저수지의 수위 급강하에 따른 제체 내의 침투거동을 원심모형실험 및 FEM 포화-불포화침투해석을 통해 간극수압의 축적·소산과정의 시간적·공간적변동이 사면활동 파괴 및 침투파괴에 어떤 관련성이 있는지 고찰하였으며, Kohgo et al.(2010)은 사력댐에 대한 원심모형실험과 수치해석을 통해 수위 변동 싸이클에 따른 제체의 거동을 고찰한 바 있다.

국내에서는 Im et al.(2005)이 저수위 상승 및 하강과 수위 변화 속도에 따른 댐체의 거동에 대하여 원심모형실험을 통해 구명한 바 있으며, Choo et al.(2012)이 댐체 취약부 발생을 파악할 수 있는 모니터링 시스템 개발을 위해 간극수압, 온도, 전기저항 등 3가지 물리량에 대한 적용 가능성에 대하여 고찰한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 주로 저수지 수위 변동에 따른 제체의 침투 거동 특성을 구명하고자 하는 연구가 대부분으로 홍수 시 저수지 월류 조건을 고려하고 있지 못하고 있다. 또한, 2002년 강원 강릉의 장현저수지 및 동막저수지, 2007년 전남 보성의 춘정저수지 및 전남 고흥의 대사저수지 등의 피해 사례와 같이 월류에 의한 저수지 붕괴를 막기 위한 연구 및 대책공법 개발이 필요하다는 목소리가 높아져 가고 있는 실정이다.

본 연구는 집중호우로 인해 불가피하게 저수지가 월류하는 조건이 형성되는 경우 제체 보호재를 사전에 적용하여 저수지가 붕괴되는 상황을 막도록 하는 제체보호공법을 개발하기 위한 기초적 연구로서 원심모형실험을 이용하여 저수지 월류 시 차수매트 포설 범위에 따른 제체의 거동 특성에 대해 고찰하고자 한다.

2. 원심모형실험

2.1 원심모형실험 장비

토목분야에 많이 사용되는 재료는 흙, 강재 혹은 콘크리트 등이며, 이 중 흙은 다른 재료에 비해 응력상태나 응력경로

에 크게 의존적인 재료이다. 따라서 지반이 받는 실제의 응력상태와 응력경로를 재현하지 못하는 경우, 다른 결론에 도달할 가능성이 있다. 특히 모형 내 응력장이 정확히 모델링이 되지 않으면, 모사된 낮은 구속응력으로 인하여 흙의 압축성 거동 대신 팽창성 거동이 나타나, 1g 상태에서 행해지는 작은 규모의 지반 모형시험은 잘못된 결과를 초래할 수 있어, 지반의 응력장을 효과적으로 구현하기 위한 방법으로 원심모형실험이 개발되어 지난 수십 년 동안 활용되어 왔다(Sharma and Bolton, 1996a; Sharma and Bolton, 1996b; Sharma and Bolton, 2001; Choo et al., 2012).

모형과 실물의 상사성은 모형과 실물에서 일어나는 현상에 포함되어진 변수전체가 상사 관계에 있다는 것을 의미한다. 그러므로 1g 상태에서 수행되어지는 모형시험에서는 실물의 응력조건을 구현할 수 없게 되고 응력상태나 응력경로에 크게 의존적인 재료인 흙의 경우에는 정확한 시뮬레이션이 불가능하게 된다. 따라서 실물의 크기를 n 배로 축소한 모형이 현장 조건과 같은 응력수준을 유지하려면 중력가속도의 n 배에 해당하는 원심가속도가 필요하게 된다. 그러나 단순히 모형과 실물의 비례관계를 중력가속도의 비례인자인 n 으로만 정의할 수 있다면 문제는 간단하지만 응력 이외에도 모형의 경계조건에 따라 반응특성들이 상이한 경우가 많기 때문에 비례법칙은 더욱 복잡한 형태가 된다. 그러므로 상사성이란 다른 분야에서와 마찬가지로 토질 및 기초공학 분야에서도 필요한 범위에서 필요한 정도로 현상을 예측하는데 필요한 것 이라고 할 수 있다(Im et al., 2005).

본 연구에서는 중형의 원심모형실험기(Fig. 1 참조)를 이용하였으며 가속장치는 Beam 형태의 회전반경 5.0 m, 유효반경 4.5 m 크기의 실험기로서, 최대 2,400 kg의 모형하중을 100 g까지 가속이 가능하며 최대용량은 240 g-ton이 된다. 본 실험장비는 kreonet을 이용하는 KOCED시설 중 지오센트리퓨지 실험센터에 설치되어 있다. 모형이 놓이는 플랫폼은 회전팔의 끝단에 위치하며, 플랫폼 크기는 이고, 모형 수조 크기는 이다. 원심모형실험 장비의 자세한 제원은 Kim et al.(2013)에 나타난 바와 같다.

본 실험기의 계측시스템은 계측용 컴퓨터를 원심모형실험기의 중앙부에 설치하여 장비와 함께 회전하도록 설치하고 있으며, Fiber Optic Rotary Joint(FORJ)를 이용한 컴퓨터

Fig. 1. Centrifuge model testing apparatus

통신을 활용함으로써 효과적인 계측을 수행할 수 있고, 실험기 하단에 Fluid Rotary Joint가 설치되어 원심가속 중에 실험에 필요한 용수, 공압, 유압 등을 실험 수조로 공급할 수 있다.

2.2 저수지 모형 제작

장현저수지의 1/50 축척을 적용하여 저수지 제체 모형의 높이와 제체 경사 및 폭을 결정하였으며, 상사 재료에 준하는 투수특성을 구현하기 위해 중심 코어는 점토 90%와 벤토 나이트 10%를 혼합하여 사용하였다(Fig. 2 참조). 축조 시 변형 및 붕괴가 발생하지 않도록 코어 축조용 거푸집을 제작하여 활용하였고, 일정한 밀도를 유지할 수 있도록 10단계로 분할하여 층분한 층 다짐을 실시하여 축조하였다.

한편, 사력재료는 중심 코어를 한 단계 축조 후 제체용 측벽 거푸집을 이용하여 양쪽에서 동시에 축조를 실시하였으며, 동일한 다짐 밀도를 나타낼 수 있도록 층별 소요 재료량을 산출하여 함수비를 일정한 수준으로 유지하여 다짐을 실시하였다. 또한, 모형에 대한 월류 시험 시 물이 제체의 측면에 침투되지 않도록 측면 다짐에 각별한 주의를 하였다. 본 연구에 사용된 재료의 물성치는 Table 1과 같으며, 저수지 단면 및 계측기 설치 위치는 Fig. 3과 같다.

2.3 실험 절차

원심모형실험은 『① 원심모형실험을 위한 제방 및 기초지반 모델링 ② 실험체의 50g에서 압밀 및 안정화 ③ 제체용 측벽 거푸집 제거 후 사면 다짐 ④ 극한상태(저수지 월류)에서 무 보강, 제정 등 일부 보강, 전체 보강에 따른 저수지의 거동 특성 고찰』 등과 같이 총 4단계로 수행하였다.

Fig. 2. Particle size distribution of core and shell materials

Fig. 3. The cross section of the dam model

Table 2. Test condition of centrifuge model testing

Case	Acceleration	Speed of water level control		Remarks
		Prototype, cm/h	Model, mm/s	
1	50 g	4.54	0.63	Water level control test
2		2.23	0.31	
3		0.72	0.10	
4		4.54	0.63	Overflow test
5				
6				

제체용 측벽 거푸집을 제거 하지 않은 상태에서 30분간 50 g 조건에서 가속시켜 제체의 침하를 유도 안정화 시킨 다음 제체용 측벽 거푸집을 제거 후 사면 다짐을 실시하였다. 수위상승 및 하강 모사는 원심 가속 중에 솔레노이드 밸브를 제어하여 상류측에 홍수위 까지 물을 공급한 후 스페이서(spacer)의 상승 및 하강속도를 각각 0.63 mm/sec, 0.31 mm/sec, 0.10 mm/sec로 제어하도록 하였다. 월류 모사는 수위상승 및 하강 모사와 마찬가지로 원심 가속 중에 솔레노이드 밸브를 제어하여 상류측에 홍수위 까지 물을 공급한 후 스페이서를 물 속에 침수시키는 방법으로 수위 상승속도를 0.63 mm/sec로 하여 월류를 발생시키도록 하였다. 본 연구의 원심모형 실험 조건은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

월류 시 제체 사면에 차수매트 설치 방법에 따른 제체의 거동 및 붕괴 특성을 분석하기 위하여 차수매트 설치 범위에 따라 총 6 Case로 구분하여 수위상승 및 하강시험과 월류시험을 실시하였다. 저수위 상승 및 하강 시험은 상승 및 하강

Table 1. Physical properties of core and shell materials

Fill dam type	Specific gravity (G_s)	Water content (%)	Unit weight		Liquid limits (%)	Plastic index	USCS	Hydraulic conductivity (cm/sec)
			r_d	r_t				
Core	2.672	24.7	1.634	1.936	37	12	SC	2.96×10^{-7}
Shell	2.669	16.1	1.880	2.062	N.P	N.P	SW	6.11×10^{-6}

속도의 조절이 가능한 모터를 시험상자 위에 설치하고 체적이 6000 cm³인 스페이서를 상승·하강 시키면서 수위를 조절하여 수행하였다. 스페이서를 이용하여 수위 상승 및 하강속도를 0.63 mm/sec로 빠르게 한 Case 1, 수위 상승 및 하강속도를 0.31 mm/sec로 중간정도로 한 Case 2, 수위 상승 및 하강속도를 0.10 mm/sec로 느리게 한 Case 3 등으로 하여 수위 상승·하강시험을 실시하였다.

율류시험에서는 차수매트를 설치하지 않은 Case 4, 차수매트를 제체의 만수위 지점부터 제정(crest)까지 설치한 Case 5, 차수매트를 제체의 만수위 지점부터 제체 하류사면 전체에 설치한 Case 6으로 구분하여 시험을 실시하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 LVDT는 댐 정상부에 1개, 댐 하류부에

2개 설치하였고 간극수압계는 댐 상류측 저면에 3개, 댐 하류측 저면에 2개 설치하였다.

3.1 수위 상승 및 하강 반복 실험

수위 변화에 따른 댐체의 침하 양상을 파악하기 위해 Fig. 3에서 보는 바와 같이 댐 정상부, 하류사면 상단부, 하류사면 하단부 등에 LVDT 3개를 설치하여 댐 정상부 및 하류사면의 침하를 측정하였다. 이 중 제체 하류사면 하단에 설치한 LVDT03은 실험 후 분석 결과 계측 오류가 발생한 것으로 나타나 고찰에서 제외하였으며, 나머지 2개의 LVDT에서 측정된 침하량을 Fig. 4(a)~Fig. 6(a)에 도시하였다. 또한 간극수압계를 Fig. 3에서 보는 바와 같이 상류사면측 저면에 3개,

(a) Vertical displacement vs. time

(b) pore water pressure vs. time

Fig. 4. Vertical displacement and pore water pressure vs. time of Case 1

(a) Vertical displacement vs. time

(b) pore water pressure vs. time

Fig. 5. Vertical displacement and pore water pressure vs. time of Case 2

(a) Vertical displacement vs. time

(b) pore water pressure vs. time

Fig. 6. Vertical displacement and pore water pressure vs. time of Case 3

하류사면 저면에 2개 설치하고 간극수압계에서 측정된 간극수압을 Fig. 4(b)~Fig. 6(b)에 도시하였다. Fig. 4는 0.63 mm/sec의 빠른 수위 상승 및 하강 속도, Fig. 5는 0.31 mm/sec의 중간 수위 상승 및 하강 속도, Fig. 6은 0.10 mm/sec의 느린 수위 상승 및 하강 속도에 따른 계측 결과를 나타낸다.

Fig. 4(a)~Fig. 6(a)의 측정 결과로부터 모든 경우 저수위가 상승함에 따라 침하가 증가하고, 저수위가 계획홍수위를 유지하는 동안은 침하가 증가하는 양이 줄어들다가 저수위가 하강과 동시에 침하가 또다시 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이러한 수위 상승시 침하 증가의 원인을 살펴보면, 코어의 투수계수가 작기 때문에 Fig. 4(a) LVDT01과 같이 수위가 급격히 상승하는 경우 수위의 대부분이 하중으로 작용하여 상대적으로 침하가 크게 발생하는 반면, 수위 변화 속도가 느린 Fig. 6(a) LVDT01의 경우에는 상승한 수위의 많은 부분이 간극수압으로 작용하게 되어 변형에 영향을 미치는 유효응력이 작아져서 침하가 상대적으로 작게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 4(a)~Fig. 6(a)에서 일차적으로 피크치에 도달한 후 감소하다가 다시 상승하는 현상, 즉 수위 하강 시 침하 발생은, 첫째 저항력으로 작용하던 수압이 제거되고, 둘째 코어나 사면에서의 간극수압이 저수위의 하강속도보다 느리게 저하하여 상대적으로 유효응력이 감소하여 강도가 약해지고, 마지막으로 수위 변화보다 느리게 변화하는 댐체 내부 수위가 하강하면서 저수지 쪽으로 침투류를 형성하여 침투압이 작용하는 등 복합적인 원인으로 인해 수위 하강에 의해 침하가 증가한 것으로 판단된다.

또한 댐체 정상부에서는 계획홍수위 유지시 수위 상승 및 하강 속도가 빠를수록 침하가 미세하게 감소하는 현상, 즉 지반 용기를 관찰할 수 있는데, 이는 시간이 흐름에 따라 내부로 물이 침투하여 함수비가 증가하게 되어 swelling 현상이 발생하고, 또한 하중으로 작용을 했던 수압이 시간이 지남에 따라서 간극수압화되어 전체적으로 유효응력이 감소하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 다만 댐체 하류사면에서는 이러한 현상은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

일반적으로 수위 상승 속도가 증가할수록 댐 코어와 rockfill 축조재 사이의 수압할렬 가능성이 증가하며, 급속 수위 저하시에는 댐체가 순간적으로 비압밀-비배수 상태가 되어 사면파괴에 대한 안전율이 감소한다(Shin, 2003). 본 연구에서도 댐체에 설치된 계측기를 통해 측정한 간극수압을 분석하여, 수위 변화에 따른 간극수압의 변화 특성을 분석하였다. Fig. 4(b)~Fig. 6(b)는 급상승 및 급하강의 각 위치에서의 간극수압 변화를 나타낸 것으로 전체적으로 저수위가 상승함에 따라서 간극수압이 상승하고 수위가 일정하게 유지되면 간극수압도 일정하게 유지되며 저수위가 하강하면 간극수압도 하강하는 경향을 보이고 있다. 또한 상류사면측의 투수성이 높은 사질토의 간극수압이 하류사면측 사질토의 간극수압 보다 수위변화에 더 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 특히 수위 상승 및 하강 속도가 느릴 경우 Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)의 PWP04, PWP05와 같이 수위 상승 및 하강이 하류사면측 사질토의 간극수압에 미치는 영향은 미미함을

알 수 있다.

3.2 월류시험

3.2.1 차수매트 미설치 시 (Case 4)

Fig. 7은 차수매트를 설치하지 않았을 경우에 대한 월류 시험 모식도를 나타낸다. 월류시험은 월류조건을 만족하도록 하는 수위 공급 장치가 없기 때문에 스페이서를 이용하여 수위를 월류심 2cm를 유지하도록 하다가 저수량이 부족하면 스페이서를 상승 후 저수량이 확보되면 다시 하강시켜 월류심을 유지하도록 반복하는 방법을 적용하였다.

Fig. 8(a)는 월류에 따른 제체 및 사면 변형의 계측 기록으로서 LVDT01은 댐 정상부, LVDT02는 하류사면 2/3지점, LVDT03은 하류사면 1/3지점에 설치한 변위계의 계측 기록을 나타낸다. 수위상승이 시작되고 140초 후 월류가 진행됨에 따라 제체의 유실이 진행되고 20초 후에는 급격한 제체의 붕괴가 발생되었다. 제체의 붕괴는 제정에서 가장 컸고, 하류사면으로 갈수록 제체의 유실량은 적었으며, 제체의 유실은 일정 규모를 유지한 채 댐 축방향으로 더 이상 진전되지는 않았다. 댐 제정부의 유실량은 LVDT의 측정치 한계를 벗어난 것을 알 수 있으며, 하류사면에서는 각각 14.92 mm와 11.39 mm를 기록하였다.

Fig. 8(b)는 수위상승으로 인해 발생한 간극수압을 나타낸 것이다. PWP01은 최상류측 저면에 설치된 간극수압계의 계측 기록으로서 홍수류 모사를 위해 로터리 조인트로부터 유입되는 유량이 일정치 않음으로 인한 불규칙한 수위의 영향을 받아 간극수압이 상승 및 하강을 반복하는 결과를 나타내고 있다. PWP02 및 PWP03은 상류측에 설치된 간극수압계의 계측 결과를 나타낸 것으로 홍수량 공급으로 수위가 상승된 결과를 볼 수 있다. PWP04 및 PWP05는 월류로 인한 수압 작용으로 간극수압이 상승하고 있으며, 시간이 지남에 따라 제체의 유실로 인해 홍수량 증가에 따른 간극수압의 상승을 나타내고 있다.

월류시험 결과 홍수류에 의한 월류가 지속되면서 저수지 하류사면의 선단부분에서 침식이 발생하게 되고, 세굴공이 형성되어 상류사면 쪽으로 점차 진전되면서 제정까지 확대되는 양상과 더불어 제정측에서 세굴공이 형성되어 하류측으로 진전되는 양상이 혼재한 형태로 붕괴되었다. Fig. 9와 같이 상

Fig. 7. Dam model without waterproof mat

(a) Vertical displacement-time relationships of Case 4

(b) Pore water pressure-time relationships of Case 4

Fig. 8. Vertical displacement and pore water pressure vs. time relationships of Case 4

Fig. 9. Flood overtopping failure of case 4

단을 중심으로 U자 형태의 홈이 파이고 사면의 상단에서는 모델 기준으로 깊이 12 cm, 폭 17 cm 정도의 체제 유실 파괴가 발생하였다.

3.2.2 만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시 (Case 5)

Fig. 10은 상류사면 만수위 지점 및 제정부에 차수매트를 포설한 경우를 나타낸다. 월류시험은 상류사면 만수위 지점 및 제정부에 차수매트를 포설한 후 ‘차수매트 미설치 시’와 동일한 방법으로 스페이서를 이용하여 수위를 월류심 2 cm를

Fig. 10. Dam model installed waterproof mat in upper slope and crest of the levee

(a) Time-vertical displacement relationships of Case 5

(b) Time-pore water pressure ratio relationships of Case 5

Fig. 11. Vertical displacement and pore water pressure vs. time relationships of Case 5

유지하도록 하다가 저수량이 부족하면 스페이서를 상승 후 저수량이 확보되면 다시 하강 시켜 월류심을 유지하도록 반복하는 방법을 적용하였다.

Fig. 11(a)는 만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시의 월류에 따른 체제 및 사면의 변형을 나타낸 것으로 3개 소의 LVDT 모두 3 mm이하의 변형량을 기록하여 10 cm 이상의 변형량을 기록한 차수매트 미설치 시의 경우에 비하여 변형이 작은 것을 알 수 있다. 초기에는 하류 사면 1/3지점에 설치된 LVDT03에서 침하량이 크게 나타나다가 점차 하

류 사면 2/3지점에 설치된 LVDT02에서 변형량이 더 크게 발생하는 것으로 보아 세굴공이 제정측으로 점차 진전되는 형태를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 11(b)는 만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시의 수위상승으로 인해 발생한 간극수압을 나타낸 것이다. 상류측에 설치한 PWP03의 경우 차수매트 설치로 인하여 간극수압의 분포가 차수매트 미설치 시의 경우보다 약간 감소된 경향을 나타냈으나 전반적으로 차수매트 미설치 시의 경우와 유사한 양상을 나타내고 있다.

월류 시작 후 하류사면에 토사의 유실이 발생하였으나 제체의 붕괴에는 이르지 않았다. 차수매트 미설치 시에 비하여 제정측의 유실이 발생되지 않음으로서 홍수량이 상대적으로 많지 않아 제정측에서 세굴공이 형성되어 하류측으로 전개되는 붕괴 양상은 발생되지 않았다. 다만 하류측에서 세굴공이 형성되어 제정 측으로 점차 진전되는 양상은 나타났으나 사면의 붕괴에 까지 이르게 하지는 못하는 것으로 판단된다.

3.2.3 만수위 지점부터 하류사면 전체에 차수매트 설치 시 (Case 6)

Fig. 12는 만수위 지점부터 하류사면 전체에 차수매트 설치 시의 경우를 개략도로 표현한 것이다. 월류시험은 만수위 지점부터 하류사면 전체에 차수매트를 포설한 후 ‘차수매트 미설치 시’와 동일한 방법으로 스페이서를 이용하여 수위를 월류심 2cm를 유지하도록 하다가 저수량이 부족하면 스페이서를 상승 후 저수량이 확보되면 다시 하강시켜 월류심을 유지하도록 반복하는 방법을 적용하였다.

Fig. 13(a)는 월류에 따른 제체 및 사면의 변형 양상을 나타낸 것으로 0.05 mm이하의 미세한 변형이 기록되었으나 제체의 유실로 인한 침하가 아닌 수압에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 13(b)는 수위상승으로 인해 발생한 간극수압을 나타낸 것이다. 상류측에 설치한 PWP01~PWP03의 경우 홍수량 모의로 인한 수위 상승을 잘 나타내고 있으며 반면, 하류측에 설치한 PWP04 및 PWP05의 경우 월류로 인한 간극수압의 증가가 거의 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 차수매트에 의하여 월류수가 하류사면을 통하여 하류사면 저부

(a) Time-vertical displacement relationships of Case 6

(b) Time-pore water pressure ratio relationships of Case 6

Fig. 13. Vertical displacement and pore water pressure vs. time relationships of Case 6

로 침투하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

월류 시작 후 제정부에 미세하게 변형이 기록되었지만 수압에 의한 영향으로 판단되며, Fig. 13에서 알 수 있듯이 실험 종료 후의 육안관찰 결과 사면의 유실 및 붕괴는 발생하지 않았다. 따라서 현장에서 집중호우로 인한 저수지 월류 상황을 대비하여 차수매트와 유사한 공법, 즉 식생 CSG공법 등과 같은 홍수류의 제체 침투 및 유실을 억제할 공법을 사전에 적용한다면 저수지의 붕괴를 억제하는데 일정 정도 역할을 담당할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심모형실험을 이용하여 수위 상승·하강의 속도변화 및 저수지 월류 시 차수매트 포설 범위에 따른 제체의 거동 특성에 대해 고찰하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 수위 상승 및 하강시험 결과 수위 상승 및 하강 속도가 빠를수록 댐 정상부의 침하량이 더 크게 발생하였으며 실제 조건으로 시간당 4.54 cm로 수위 상승이 빠른 경우 댐 높이의 약 0.3%, 시간당 0.72 cm로 수위 상승이 느린 경우 댐 높이의 약 0.12%정도 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 원심모형실험을 이용한 월류시험 결과 제정까지 차수매

Fig. 12. Dam model installed waterproof mat in the entire levee

트 설치 시 월류의 영향으로 하류사면에서 상당한 변위가 발생하였으나, 차수매트가 포설된 제체 제정까지는 월류의 지속시간과 관계없이 변위가 거의 발생하지 않아 차수매트는 저수지 월류 시 제체보호공법으로 활용 가능한 것으로 사료된다.

- 3) 원심모형실험에서 저수지 월류 시 차수매트를 설치하지 않았을 경우 제체의 하류사면이 거의 붕괴되나 차수매트를 포설한 경우 침식이 발생하지 않는 것으로 나타나 차수매트는 저수지 월류시 제체 보호에 효과가 있는 것으로 판단된다.
- 4) 원심모형실험 결과 저수지 월류시 차수매트를 설치함으로써 붕괴 피해를 막을 수 있는 것으로 나타났으며 저수지 붕괴를 막을 수 있는 최소한의 차수매트 포설 범위는 만수위 지점부터 제정 (하류 비탈머리 부근)까지 인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 재난안전기술기반구축사업 (NEMA-기반-2011-4)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Choo, Y.W., Cho, S.E., and Shin, D.H. (2012) Monitoring of fill dams for internal defect via centrifuge model tests. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 2C, pp. 37-47.

Dunn, R., Simantob, E. and Ko, H. (1984) Centrifuge Modeling of Earth Dam Overtopping. *Proc. of 5th Engineering Mechanics Division Specialty Conference*, pp. 1320-1323, Laramie, Wyoming.: ASCE.

Im, E.S., Seo, M.W., Ha, I.K., and Kim, W.G. (2005) Simulation of Earth-fill Dam Behavior Subjected to Water Level Variation Using Geotechnical Centrifuge. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No.2C, pp. 95-102.

Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W., and Cho, G.C. (2013) A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84.

Kim, Y.S., 2006, Problems and improvement method of safety management of reservoir. *Disaster Prevention Review*, Vol. 8, No. 1, pp. 55-64.

Kohgo, Y., Takahashi, A., and Suzuki, T. (2010) Centrifuge Model Tests of a Rockfill Dam and Simulation Using Consolidation Analysis Method. *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 2, pp. 227-244.

Narita, K., Kimura, K., and Okumura, T. (2008) Seepage Behavior and Safety Evaluation in Embankment Dam during Rapid Drawdown. *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, Vol. 18, No. 1, pp. 10-20.

Sharma, J.S., and Bolton, M. D. (1996) Centrifuge Modelling of an Embankments on Soft Clay Reinforced with a Geogrid. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 14, pp. 1-17.

Sharma, J.S., and Bolton, M. D. (1996) Finite Element Analysis of Centrifuge Tests on Reinforced Embankments on Soft Clay. *Computers and Geotechnics*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-22.

Sharma, J.S., and Bolton, M. D. (2001) Centrifugal and Numerical Modelling of Reinforced Embankments on Soft Clay Installed with Wick Drains. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 19, pp. 23-44.

Shin, J.H. (2003) A Study on the Behavior of an Earth and Rockfill Dam Due to Reservoir Water. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No. 6, pp. 61-70.

◎ 논문접수일 : 2013년 01월 16일
 ◎ 심사회의일 : 2013년 01월 16일
 ◎ 심사완료일 : 2013년 02월 12일