원심모형실험을 이용한 증고 저수지 제체의 거동특성 연구

Studies on Behavior Characteristics of Raised Reservoir Levee Using Centrifugal Model Test

이충원* · 맹영수** · 김용성***

Lee, Chung-Won*, Maeng, Young-Su**, and Kim, Yong-Seong***

Abstract

This study aims to investigate the behavior of raised reservoir levee via centrifugal model test. The experimental results demonstrate that the overflow failure occurred at crown, at a part of front side and at rear side of the original reservoir levee, while, the stability of the raised reservoir levee was ensured at the same water level although the subsidence of crown of the raised levee due to the water level raising was larger than that of the original levee. Thus, it is significant to redevelop the superannuated reservoir levee through the levee raising for countermeasure to climate change and storage capacity improvement of reservoir. In addition, the real-time monitoring of pore water pressures and displacements is required to ensure the levee's stability.

Key words : Centrifugal model test, Raised reservoir levee, Variation of water level, Seepage flow, Overflow

요 지

본 연구는 현장응력상태 및 수위변동을 재현한 원심모형실험을 통하여 증고 및 비증고 제체의 거동을 평가하는 것을 그 목적으로 한다. 실험 결과, 제체의 증고시 수위상승에 따른 제정부 침하량이 크게 나타났으나, 비증고 제체의 월류 발생시 제정부 및 이에 근접한 제체 상류부 일부와 제체 하류측 사면에 세굴에 의한 파괴가 발생하는 반면, 동일한 수위에서 증고 제체는 안정성을 확보함을 알 수 있었다. 따라서, 기후변화 대처 및 저수량 증대를 도모하기 위해 증고를 통한 노후 저수지의 재개발이 필요한 것으로 판단되며, 이 경우 호우 등에 따른 급격한 수위 증가시 간극수압 및 변위 계측치를 실시간 모니터링하여 저수지의 안정성을 유지하도록 하여야 한다.

핵심용어 : 원심모형실험, 증고 저수지 제체, 수위변화, 침투, 월류

1. 서 론

최근 범지구적인 이상기후 현상에 의한 집중호우의 빈도가 증가하고 있으며, 특히 태풍이 통과하는 경우 일최다강수량은 400 mm를 초과하는 경우가 빈번한 실정이다. 그러나 국내 중 규모급 저수지의 설계강수량은 이에 미달하는 경우가 대부분이며, 지방자치단체에서 관리하는 저수지는 이보다 훨씬 작을 것으로 예상된다. 또한 우리나라의 저수지는 대부분 1970년대 이전에 건설되어 내구성이 취약함은 물론, 노후화로 인한 붕괴위험과 퇴적토사 축적에 따른 유효저수량 감소 등 안전

및 기능상의 문제점을 안고 있다. 따라서, 기후변화 대처 및 저수량 증대를 도모하기 위해 증고를 통한 노후 저수지의 재개발이 절실한 실정이다. 이를 위하여 저수지의 수위변동에 따른 증고 제체의 거동을 명확히 할 필요가 있으며, 이를 위한 방법으로서 원심모형실험을 활용할 수 있다.

원심모형실험을 이용한 제체 관련 연구는 이전부터 다수 수행되어 왔다. Sutherland and Rechard(1984)는 각각 다른 가속도장(90 g, 125 g, 150 g)에 대하여 댐에 형성되는 침윤선의 변화를 관찰한 후, 그 결과를 해석해와 비교하여 정확성을 확인하였으며, Yan-ling(1997)은 Rock fill dam의 응력과 변형

*정회원. 강원대학교 석재복합건설신소재연구소 연구원(E-mail: kucivil@hanmail.net)
Member. Researcher, Institute for Advanced Construction Materials, Kangwon National University

**강원대학교 지역건설공학과 박사과정
Ph.D. Candidate 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

문제를 고찰하기 위한 원심모형실험을 통해 저수지의 코어와 Rock fill dam의 기초를 진동 다짐하였을 때 그 전단강도와 안정성이 현저히 상승되는 것을 확인하였다. Aydingun *et al.*(2003)은 액상화 발생가능성이 있는 기초지반에 축조된 제방에 대한 수치해석을 수행한 후, 그 결과를 원심모형실험 결과와 비교하여 수치해석 모델을 보정하기 위한 연구를 수행하였으며, Yang *et al.*(2004)은 댐의 내진성능을 확인하기 위한 동적원심모형실험 및 수치해석 결과를 비교하여 수치모델링의 개선방향을 제시하였다. Narita *et al.*(2008)은 저수지의 수위 급강하에 따른 제체 내의 간극수압 거동과 제체 파괴의 연관성을 원심모형실험 및 수치해석을 통해 고찰하였으며, Choo *et al.*(2012)은 댐체 취약부의 파악을 위한 모니터링 시스템 개발을 위해 간극수압, 온도, 전기저항 등 3가지 물리량에 대한 적용 가능성을 고찰하였다.

그러나 이러한 연구들의 목적은 주로 저수지의 수위 변동에 따른 제체의 침투 거동특성을 구명하는 것이었으며, 증고 여부에 따른 제체의 거동 특성에 관한 연구는 현재까지도 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현장응력상태 및 수위변동을 재현한 원심모형실험을 통하여 비증고 및 증고 제체의 거동을 구체적으로 검토하고자 한다.

2. 원심모형실험

2.1 원심모형실험의 원리

원심모형실험을 수행하기 위해서는 대상 구조물의 축소모형을 제작할 필요가 있다. 축소모형의 설계에는 상사법칙이 적용되며, 각 실험의 목적이나 방법에 맞추어 적절한 상사법칙을 선정하여야 한다. 모형과 실물의 상사성은 모형과 실물에서 발생하는 현상에 포함되어진 변수 전체가 상사 관계에 있음을 의미하나, 실물과 모형의 완전한 상사관계를 달성하는 것은 불가능하다. 즉, 실물의 크기를 1/N로 축소한 모형이 현장 조건과 같은 응력수준을 유지하려면 N g의 원심가속도가 필요하게 되나, 단순히 모형과 실물의 비례관계를 원심가속도의 비례인자인 N으로만 정의할 수 없으며, 응력 이외에도 모형의 경계조건에 따라 반응특성들이 상이한 경우가 많기 때문에 비례법칙은 더욱 복잡한 형태가 된다. 그러므로 상사성이란 여타 분야에서도 마찬가지로 지반공학 분야에서도 요구되는 범위 내에서 요구되는 정도의 현상을 예측하는데 필요한 것이라고 할 수 있다(Im *et al.*, 2005; Schofield, 1980).

지반의 역학적 거동은 지반의 응력상태에 따라 크게 변화하기 때문에 실물과 동일한 모형지반의 역학적 특성을 확인하

기 위해서는 실물과 모형지반에 동일한 응력이 작용하여야 한다. 즉, 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력을 σ_m 이라 하고, 실물에서의 자중에 의한 응력을 σ_p 라 할 때 다음의 식 (1)이 성립하여야 한다.

$$\sigma_m = \sigma_p \quad (1)$$

여기서, 중력상태에서의 가속도 a 는 g이고 원심력장에서의 가속도 a 는 rw^2 (r =반지름, w =각속도)이므로 원심력장의 가속도와 중력상태의 가속도의 비 $N(=rw^2/g)$ 을 Scale factor라고 하면, 실물에서의 자중에 의한 응력 σ_p 은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_p = r \cdot h_p = \rho_p \cdot g \cdot h_p \quad (2)$$

또한, 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력 σ_m 은 식 (3)과 같다.

$$\sigma_m = r \cdot h_m = \rho_m \cdot a \cdot h_m = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_m \quad (3)$$

한편, 간극유체가 물인 경우 투수계수 k_w 는 $k_w = K \cdot r_w / \mu$ (여기서, K =절대투수계수, μ =물의 점성계수)와 같이 표현할 수 있으며, 재료정수는 응력이 달라져도 변하지 않으므로 실물과 모형의 상사성은 식 (4)의 관계가 성립한다.

$$\frac{(k_w)_m}{(k_w)_p} = \frac{(k \cdot (k_w)_m) / \mu}{(k \cdot (k_w)_p) / \mu} = N \quad (4)$$

또한 실물과 모형지반의 간극수압의 차, 수두차, Darcy의 법칙을 적용하면 유속은 다음의 식 (5)과 같은 상사성이 성립된다.

$$\frac{(v_w)_m}{(v_w)_p} = \frac{(k_w)_m \cdot (i_w)_m}{(k_w)_p \cdot (i_w)_p} = N \quad (5)$$

그리고, 침투현상에 있어서의 시간 t ($=l/v$)는 아래의 식 (6)과 같은 상사관계를 갖는다.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{l_m(w_w)_m}{l_p(w_w)_p} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} = \frac{1}{N^2} \quad (6)$$

위와 같은 원리가 원심모형실험의 상사법칙으로서 지진, 지반동역학, 기초, 사면안정, 굴착 및 가시설, 지반환경, 터널 및 지하구조물, 연약지반에서의 지반개량 및 지반보강, 기타 토목구조물의 안정성 검토 등에 이용된다. 각 물리량에 대한 상사법칙을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Similarity Rules in Centrifugal Model Test

Properties	Size of model	Size of soil particle	Soil density	Stress	Displacement	Strain	Time (Consolidation and infiltration)
Scale factors (model/prototype)	1/N	1	1	1	1/N	1	1/N ²

2.2 원심모형실험 장비

본 연구에서는 중형의 Beam형 원심모형실험기(한국과학기술원 소재, Fig. 1 참조)를 이용하였으며, 회전반경 5.0 m, 유효반경 4.5 m의 제원을 갖는다. 본 실험장비는 kreonet을 이용하는 KOCED시설 중 Geocentrifuge 센터에 설치되어 있으며, 최대 2,400 kg의 모형하중에 대해 100 g까지의 원심재하가 가능하고 실험 최대용량은 240 g-ton이다. 모형은 플랫폼 회전팔의 단부에 거치하며, 플랫폼 크기는 1.2m×1.2m×1.2m, 모형 토조의 크기는 1.2m×0.45m×0.7m이다. 본 실험기는 계측용 컴퓨터를 원심모형실험기의 중앙부에 설치하여 장비와 함께 회전하도록 구성하였으며, Fiber Optic Rotary Joint (FORJ)를 이용한 컴퓨터 통신을 활용함으로써 효과적인 계측을 수행할 수 있고, 실험기 하단에 Fluid Rotary Joint가 설치되어 원심재하 중에 실험에 필요한 용수, 공압, 유압 등을 모형토조 내로 공급할 수 있다(Fig. 2). 원심모형실험 장비의 자세한 제원은 Kim *et al.*(2013)에 나타난 바와 같다.

Fig. 1. Centrifugal Model Test Apparatus (KOCED Geocentrifuge Center at KAIST).

Fig. 2. Fluid Rotary Joint.

2.3 원심모형실험 과정

2.3.1 모형제체의 제작

원심모형실험을 위한 저수지 제체는 비중고 단면(Case 1) 및 중고 단면(Case 2)의 2가지 Case로 구성하였다. Case 1은 한반도 동북부에 위치한 실제 저수지 제체의 설계단면에 근거하였으며, 제방고 15m와 사면구배 1:2의 제원을 가진다. Case 2는 Case 1의 제체를 코어 직립형으로 증고한 것으로, 제방고는 약 16.7m이며 EL. 10.0 m를 기준으로 하부는 1:2의 사면구배를, 상부는 1:1.5의 사면구배를 가진다. 본 실험에서 사용된 2가지의 제체 모두 사력재료와 코어로 구성된다. 제체의 모형은 50 g의 원심가속도를 상정하여 1/50의 축척으로 설정하였으며, 코어 재료는 실제 제체의 투수성을 모사하기 위해 점토 90%와 Bentonite 10%를 혼합하여 사용하였다. 사력재료 및 코어의 입도분포곡선, 사력재료의 다짐곡선 및 물성치를 각각 Fig. 3, Fig. 4 및 Table 2에 나타내었다.

모형 제체의 축조를 위해, 제체를 7층으로 분할하여 다짐에 의한 시공을 실시하였다(Fig. 5). 여기서, 코어용 거푸집을 이

Fig. 3. Particle Size Accumulation Curve for Each Material.

Fig. 4. Compaction Curve for Shell Material.

Table 2. Material Properties of Shell and Core

Material	LL (%)	PI (%)	USCS	Specific gravity (G_s)	Water content (%)	Permeability (cm/sec)		
Core	37	12	SC	2.672	20.0	2.96×10^{-7}		
Shell	N.P	N.P	SW	2.669	15.0	1.39×10^{-3}		
Material	Density (g/cm ³)		Particle content (%)			D_{50} (mm)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
	ρ_d	ρ_t	Sand	Silt	Clay			
Core	1.613	1.936	55.2	25.8	5.5	0.17	-	-
Shell	1.793	2.062	56.5	9.5	1.5	0.85	13.3	1.928

Fig. 5. Construction of Model Reservoir Levee.

용하여 중심 코어를 1층 축조 후 사력재료용 거푸집을 이용하여 하류측 및 상류측의 제체를 축조하였으며, 이를 7회 반복하였다. 다짐도 및 함수비를 동일하게 관리하기 위하여, 각 층별로 요구되는 재료 및 물의 양을 계산하여 조속히 혼합 후 다짐을 실시하였다. 제체의 다짐도는 93%로 관리하였으며 ($0.93 \rho_{dmax} = 1.793 \text{ g/cm}^3$), 함수비는 실제의 제체 시공을 고려하여 최적함수비보다 습윤측인 15%로 설정하였으며, 코어의 함수비는 20%로 설정하였다. 또한 제체와 토조 벽면의 경계

부로의 유로를 차단하기 위하여, 토조 벽면에 Silicon grease를 도포하여 지수를 시행하였다. 이후, 모형 제체의 원심장에서의 안정성 확보를 위해 50 g의 원심제하에 의한 안정화작업을 30분간 수행한 뒤 거푸집을 모두 제거하여 모형 제체의 시공을 완료하였다.

본 실험에서는 제체의 변위 및 간극수압의 측정을 위하여 제정부 및 제체의 하류측에 각 1개의 변위계(L1, L2)를, 제체 저부에 5개의 간극수압계(P1~P5)를 설치하였다. 여기서, 변위의 측정에는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)가 사용되었으며, LVDT와의 접촉부에 1 cm×1 cm 크기의 얇은 철판을 제체 표면에 설치하였다. 변위 및 간극수압의 계측 Sampling rate는 100 msec로 설정하였다. 비증고 및 증고 저수지 제체의 단면 및 계측기 설치 위치를 Fig. 6에 나타내었다.

2.3.2 간극유체의 결정

동적원심모형실험의 경우, 침투시간과 동적시간과의 상사 법칙을 일치시키기 위해 Silicon oil 또는 Metolose 수용액의 점성을 N g의 원심장에서 실험시 N배로 조정하여 사용하는

Fig. 6. Model Configuration and Sensor Locations (L: LVDT; P: Pore Water Pressure Transducer).

것이 일반적이다. 그러나 본 원심모형실험에서는 동적 조건을 고려하지 않으므로 간극유체로서 물을 사용하였으며, 이 때의 실규모(Prototype)에서의 시간은 Table 1에서 정리한 바와 같이 N^2 배가 된다. 또한, 수위를 가시화하기 위하여 수돗물 150 L에 수공학 분야에서 추적자 조사 등에 사용되는 색소인 우라닌(Uranine : Fluorescein sodium, Yellow No. 202) 12 g 을 희석한 우라닌 수용액을 제조하여 실험에 사용하였으며, 우라닌의 희석이 간극유체의 점성에 미치는 영향은 미소할 것으로 사료되었다(Lee, 2012). 여기서부터 특별한 언급이 없는 한, 모든 물리량은 Prototype으로 기술한다.

2.3.3 실험조건

본 원심모형실험에서는 비중고 제체(Case 1) 및 중고 제체(Case 2)에 대하여 속도를 3가지로 변화시켜 평수위(EL. 9.2 m)와 계획홍수위(EL. 12.7 m)간의 수위승강을 실시한 뒤, Case 1은 계획홍수위(EL. 12.7 m) 도달 후 월류수위(EL. 15.0 m)까지의 수위상승을 통해 월류를 발생시켰으며, Case 2는 Case 1의 월류수위에 해당하는 EL. 15.0 m 도달 후 대기하였다. 여기서 평수위 및 계획홍수위는 실제 설계단면에 근거한 Case 1에서 설정된 높이임을 밝혀둔다. 실험조건의 상세는 다음과 같다.

1) Case 1(비중고 제체)

(1) 50 g의 원심재하 중에 솔레노이드 밸브를 제어하여 제체의 상류측에 평수위(EL. 9.2 m)까지 물을 공급하여 수위를 순시상승시킨다.

(2) 1축 Actuator에 연결한 직각삼각형 형태의 Steel box를 침수 및 인양하여 평수위(EL. 9.2 m)와 계획홍수위(EL. 12.7 m) 사이에서 고속, 중속 및 저속상태로 총 3회 수위를 승강시킨다. 여기서, 수위상승과 하강간에는 83.3시간의 대기시간을 두었으며, 수위하강 완료 후 속도를 변화시켜 재상승시킬 때까지 125.0시간의 대기시간을 두었다.

(3) 이후 계획홍수위(EL. 12.7 m)까지 솔레노이드 밸브를 제어하여 물을 공급한 뒤, (2)항에서 정의된 고속상태로 Steel box를 침수시켜 월류수위(EL. 15.0 m) 도달 및 월류를 발생시킨다.

2) Case 2(중고 제체)

(1) 50 g의 원심재하 중에 솔레노이드 밸브를 제어하여 제체의 상류측에 평수위(EL. 9.2 m)까지 물을 공급하여 수위를 순시상승시킨다.

(2) 1축 Actuator에 연결한 직각삼각형 형태의 Steel box를 침수 및 인양하여 평수위(EL. 9.2 m)와 계획홍수위(EL. 12.7 m) 사이에서 고속, 중속 및 저속상태로 총 3회 수위를 승강시킨다. 여기서, 수위상승과 하강간에는 83.3시간의 대기시간을 두었으며, 수위하강 완료 후 속도를 변화시켜 재상승시킬 때까지 125.0시간의 대기시간을 두었다.

Table 3. Water-level-variation Velocity on Each State

Velocity state	V_{mod} (mm/sec)*	V_{pro} (m/hr)**	Proportion(%)
High velocity	0.4	2.93×10^{-2}	100
Intermediate velocity	0.2	1.46×10^{-2}	50
Low velocity	0.1	7.28×10^{-3}	25

* V_{mod} : velocity in model scale; ** V_{pro} : velocity in prototype scale

(3) 이후, EL. 15.0 m(Case 1에서의 월류수위)까지 솔레노이드 밸브를 제어하여 물을 공급한 뒤 대기한다.

Steel box에 의해 제어된 수위승강속도를 Table 3에 나타내었다. 여기서, model scale 및 50 g 원심장에서의 prototype 환산 scale로 표시된 수위승강속도를 각각 V_{mod} 및 V_{pro} 로 표시하였다. 중속 및 저속상태의 수위승강속도는 고속상태의 약 50%, 25%에 해당한다. 본 연구에서 ‘수위승강속도’로 표현된 것은 수위상승속도 및 수위하강속도가 동일하게 제어되었음에 기인한다.

2.4 원심모형실험 결과

2.4.1 수위승강과정

1) 간극수압

수위승강과정에서는 평수위(EL. 9.2 m)에서 수위상승을 개시하는 시점(62.5시간 이후)부터 계측을 수행하였다. Fig. 7은 비중고 제체(Case 1) 및 중고 제체(Case 2)에 대한 수위승강과정중의 간극수압 경시변화를 나타낸다. 두 Case 모두 간극수압은 수위상승 및 하강속도에 비례하여 증감함을 확인할 수 있으며, 투수성이 낮은 코어의 영향으로 하류측의 간극수압은 절대치가 작으며 상류측에 비해 둔감하게 반응함을 알 수 있다. 여기서, 두 Case 모두 제체가 수위승강을 경험하기 전의 간극수압이 수위승강 완료 후의 간극수압보다 작게 나타나고 있음이 확인되며, 이는 불포화조건인 제체가 수위승강을 경험하기 전까지는 안정적 침윤선 형성을 위한 시간이 충분하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 이후 3회의 수위승강 중 평수위(EL. 9.2 m) 하부에서의 포화도가 지속적으로 증가하여, 수위승강 완료 후의 간극수압이 수위승강을 경험하기 전보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

수위승강을 경험하기 전과 수위승강 완료 후의 간극수압을 수두로 환산하여 Fig. 8에 도시하였다. 제체 상류측의 경우, 두 Case 모두 수위승강 완료시 모든 위치(P1~P3)에서의 수두가 평수위(EL. 9.2 m)와 일치하는 경향을 나타내어 안정적인 침윤선을 형성한 것으로 사료된다. 또한, 하류측은 상류측으로부터의 침투가 지속되어 수두가 다소 높아지는 경향을 확인할 수 있으며, 그 증가량은 코어부에 가까운 P4가 P5에 비해 더 크게 평가되었다. 그러나 하류측의 수두는 상류측에 비해 낮게 나타나며, 이는 투수성이 작은 코어부에서 침윤선이 급격히 저하됨에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 7. Time Histories of Pore Water Pressure During Water-level-variation Process.

Fig. 8. Water Head Evaluated Based on Pore Water Pressure for Each Case (WLV: Water Level Variation).

Fig. 9. Time Histories of Vertical Displacements at Crown and at Rear Side of Levee.

2) 연직변위

Fig. 9는 제정부(L1) 및 제체 하류측 사면부(L2)의 연직변위 경시변화를 나타내고 있다. 두 Case 모두 수위상승시 침하 및 수위하강시 변위회복의 경향을 보임을 알 수 있다. 여기서, 수위상승시의 침하경향은 제체 상류측의 수압하중 증가 및 침윤에 따른 제체의 체적수축에 기인한 것으로 사료되며, 수위하강시의 변위회복 경향은 제체내 유효응력증가에 의한 영향에 비해 수압하중의 감소에 의한 영향이 우세하였기 때문으로 판단된다. 또한 L1, L2 모두 수위상승 및 하강이 빠르게

진행되는 경우 변위속도가 큰, 즉 변위가 급격히 증가 및 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 연직변위는 제체의 하류측 사면보다 제정부에서 더 크게 발생함이 확인되었다.

각 Case에 대한 연직변위 거동을 더욱 자세히 고찰하기 위하여, 제정부 및 제체 하류측 사면부의 연직변위에 대한 50점 인접평균선과 속도를 변화시킨 3회의 수위상승 및 하강에 대한 시점 및 종점에서의 연직변위를 Fig. 10에 나타내었다. 또한, 각 Case에 대하여 속도를 변화시킨 3회의 수위상승에 대한 연직변위의 변화량을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10. Time Histories of Vertical Displacements at Crown and at Rear Side of Levee.

Fig. 11. Change Amount of Vertical Displacement with Water-level-variation Velocity for Each Case.

증고가 이루어진 Case 2가 Case 1에 비해 수위상승에 따른 제정부 침하량 증분이 속도에 관계없이 크게 나타나 누적 침하량이 크게 평가되었으며, 제체 하류측 사면부는 두 Case 모두 침하량 증분이 유사하였다. 또한, 수위하강시 변위 회복량은 수위상승속도와 관계없이 제정부 및 제체 하류측 사면부에서 두 Case가 유사하게 나타났다.

여기서, 두 Case 모두 수위의 고속상승시 제정부의 침하량 증분이 중속 및 저속상승시에 비해 다소 크게 평가되었다. 그러나 Fig. 7로부터 알 수 있듯이, 수위의 고속상승은 침윤선이 안정화되기 이전에 이루어져 제체의 포화도 변화가 중속 및 저속상승시에 비해 컸으리라 사료된다. 따라서, 제정부 침하량 증분은 수위상승속도에 관계없이 유사할 가능성이 있다. 즉, 수위상승속도에 관계없이 제정부 및 제체 하류측 사면부의 변위증분은 유사할 것으로 예상되나 증고 제체가 비증고 제체에 비해 수위상승에 따른 제정부의 침하가 크게 발생할 것으로 예상된다.

이와 함께, 두 Case 모두 수위상승속도에 관계없이 수위상승 후 대기(소요시간: 83.3시간)시에는 거의 모든 위치에서

제정부 및 제체 하류측 사면부의 연직변위 변화량이 미소하였으나, 수위하강 후 대기(소요시간: 125.0시간)시에는 침하가 발생하는 경향이 확인되었다. 이는 수위하강 후 대기시에 제체 상류측 최심부의 지연된 간극수압 감소에 따른 유효응력의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 단, 속도를 변화시켜 3회 반복되는 수위하강 후 대기시의 침하량은 변형의 누적과 함께 지속적으로 감소하는 경향을 보인다.

2.4.2 EL. 15.0 m 도달과정

1) Case 1(비증고 제체)

Fig. 12는 Case 1의 EL. 15.0 m 도달과정중의 간극수압 및 연직변위의 경시변화를 나타낸다. Case 1에서는 전술한 바와 같이 평수위(EL. 9.2 m)에서 계획홍수위(EL. 12.7 m)까지 50 g 원심장에서 물공급을 통해 수위를 상승시킨 후, 수위상강과정에서 설정된 고속상태로 Steel box를 수침시켜 월류수위(EL. 15.0 m) 도달 및 월류를 발생시킨다. 제체 상류부 표면에 가장 근접한 P1에서의 간극수압 계측결과를 통해 역산한 수위상승속도는 계획홍수위 도달시까지 $1.19 \times 10^{-1} \text{ m/hr}$, 월류수

Fig. 12. Time Histories of Pore Water Pressure and Vertical Displacement During Water-level-raising Process (Case 1).

위 도달시까지 $2.63 \times 10^{-2} \text{ m/hr}$ 로 평가되었다. 여기서, 수위승강과정 완료시의 간극수압에 비해 본 과정의 $t=0$ 시간에서의 간극수압이 다소 감소한 것이 확인된다(Fig. 7 참조). 이는 수위승강과정의 계측 데이터 저장 및 부대작업에 의해 model scale로 약 5분이 소요되는 과정에서 제체 내로의 침투 진전에 따른 상류측 수위의 하강 때문으로 판단된다. 실험결과와 고찰을 위해, Fig. 12에서 계측 및 수위상승이 시작되는 초기 시점을 O, 계획홍수위 도달시점을 A, 계획홍수위에서 43.9시간 방치시점을 B로 정의하였다. 또한, 월류수위 도달 및 월류시점을 C, 월류 지속 후 48.4시간 시점을 D로 정의하였다.

먼저, O-A구간에 대하여 고찰한다. 본 구간에서는 평수위로부터 수위가 상승하여 계획홍수위에 도달한다. 이 때, P1 및 P2에서의 간극수압은 수위상승을 빠르게 추종하며, 제체 상류측 최심부의 P3는 간극수압의 상승에 지연이 발생하고 있다. 또한, 제체 하류측의 간극수압(P4 및 P5)에는 변화가 나타나지 않았다. 연직변위의 경우, 제정부(L1) 및 제체 하류측 사면부(L2)에서 계측 후 약 34시간부터 침하 발생경향이 확인되나 그 양은 미소하였다.

다음으로, A-B구간에 대하여 고찰한다. 본 구간에서는 계획홍수위 도달 후 43.9시간의 방치가 이루어졌다. P3의 증가 속도는 O-A구간보다 감소하였으나 지속적인 간극수압의 상승이 확인된다. 제체 하류측의 P4에서도 미소한 상승이 나타나기 시작하나, P5에는 아직 수위상승의 영향이 나타나지 않고 있다. 계획홍수위 도달시 및 43.9시간 방치시에 대한 간극수압을 수두로 환산하여 Fig. 13(a)에 도시하였다. 또한, 본 구간에서의 침하는 L1 및 L2 모두 명확히 확인되지 않고 있다.

B-C구간의 경우, 계획홍수위로부터 수위가 상승하여 월류수위에 도달한다. P1 및 P2에서의 간극수압은 수위상승을 빠르게 추종하며, 제체 상류측 최심부의 P3도 P1 및 P2와 유사한 기울기로 상승함이 확인되었다. 이는 본 구간에서의 수위 상승속도가 O-A구간의 약 22% 수준으로, O-A구간에 비해 간극수압 상승의 지연시차가 적기 때문으로 판단된다. 제체

하류측의 P4도 지속적으로 증가하며, P5에서도 미소한 간극수압 상승이 확인되고 있다. 본 구간에서부터 침하량의 증가가 명시적으로 나타나고 있다. 여기서, 제체 내의 계획홍수위로부터 월류수위까지의 영역은 수위승강과정에서 Suction에 의한 모관상승을 경험하였을 가능성이 있으나 간극유체의 직접적인 침투가 없었던 곳으로, 본 영역으로의 침투 진전 및 포화도 증가에 의한 체적수축과 수압하중의 증가가 침하 발생의 원인으로 판단된다. 또한, 침하량은 제체 하류측 사면부보다는 제정부에서 크게 나타나고 있다.

C-D구간에서는 월류수위 도달 및 월류가 진행되며, 이로 인해 제정부 및 이에 근접한 제체 상류부 일부와 제체 하류측 사면에 세굴에 의한 파괴가 발생하였다(Fig. 13(c)). 그 결과, 제정부의 침하량이 급격히 증가하며 제체 하류측 사면부의 침하량도 지속적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 본 구간에서는 월류수위 이후 수위의 추가적 상승이 불가능하므로 P1과 P2는 동일하게 유지되나 제체 상류측 최심부인 P3는 지속적으로 증가하고 있음이 확인된다. 제체 하류측의 경우 P4는 계측 후 약 214시간에서 다소의 감소가 확인되며, 이는 월류에 의한 제체 하류측 사면부의 파괴에 따른 침투수의 이동에 기인한 것으로 사료된다. 또한 월류 직후로부터 P5의 증가가 확인되는데, 이는 월류시 제체 하류측에 고인 물의 배수 지연으로 인한 역류에 기인한 것으로 보인다. 수위승강과정 직후, 월류 직전 및 월류 후 48.4시간 경과시의 간극수압을 수두로 환산하여 Fig. 13(b)에 도시하였다.

2) Case 2(중고 제체)

Fig. 14는 Case 2의 EL. 15.0m 도달과정중의 간극수압 및 연직변위의 경시변화를 나타낸다. Case 2에서는 전술한 바와 같이 평수위(EL. 9.2 m)에서 EL. 15.0 m(Case 1에서의 월류수위)까지 50 g 원심장에서의 물공급을 통해 수위를 상승시킨 후 대기하였다. 제체 상류부 표면에 가장 근접한 P1에서의 간극수압 계측결과를 통해 역산한 수위상승속도는 EL. 15.0 m

(a) Water head (WL: EL. 12.7m)

(b) Comparison of water head (WL: EL. 9.2m, EL. 15.0m)

(c) Collapse of reservoir levee due to the overflow

Fig. 13. Water Head Evaluated Based on Pore Water Pressure During Water-level-raising Process and Collapse of Reservoir Levee Due to the Overflow (Case 1) (WL: Water Level).

(a) Pore water pressure

(b) Vertical displacement

Fig. 14. Time Histories of Pore Water Pressure and Vertical Displacement During Water-level-raising Process (Case 2).

도달시까지 1.58×10^{-1} m/hr로 평가되었다. 본 Case에서도 수위승강과정 완료시의 간극수압에 비해 본 과정의 $t=0$ 시간에서의 간극수압이 다소 감소한 것이 확인되며(Fig. 7 참조), 이는 Case 1과 동일한 원인에 의한 것으로 판단된다. 본 Case에서도 실험결과의 고찰을 위해, Fig. 14에서 계측 및 수위상승이 시작되는 초기시점을 O, EL. 15.0 m 도달시점을 A, EL. 15.0 m에서 122.5시간 방치시점을 B로 정의하였다.

먼저, O-A구간에 대하여 고찰한다. 본 구간에서는 평수위로부터 수위가 상승하여 EL. 15.0 m에 도달하였다. P1 및 P2에서의 간극수압은 수위상승을 빠르게 추종하며, 제체 상류측 최심부의 P3는 간극수압의 상승에 지연이 발생하고 있다. 또한, 제체 하류측의 간극수압(P4 및 P5)에는 변화가 나타나지 않고 있다. 연직변위의 경우, 제정부(L1) 및 제체 하류측 사면부(L2)에서 계측 후 약 20시간부터 침하가 발생하고 있음이 확인된다. 이는 Case 1과 마찬가지로, 간극유체의 직접적 침

투이력이 없는 제체 내의 계획홍수위로부터 EL. 15.0 m까지의 영역에 대한 침투 진전과 포화도 증가로 인한 체적수축 및 수압하중의 증가가 침하를 유발하기 때문으로 판단된다. 또한, 침하량은 제체 하류측 사면부보다는 제정부에서 크게 나타나고 있다.

A-B구간의 경우, EL. 15.0 m 도달 후 122.5시간의 방치가 이루어졌다. P1 및 P2에서의 간극수압은 제체 내로의 지속적 침투에 의한 수위하강의 영향으로 미소한 감소경향을 나타내며, P3에서는 완만한 증가 후 수렴하는 경향을 보이고 있다. 제체 하류측의 P4는 간극수압의 급증 후 수렴경향을 나타내고 있으며, P5에서도 간극수압의 증가가 확인되었다. EL. 15.0 m 도달시 및 122.5시간 방치시에 대한 간극수압을 수두로 환산하여 Fig. 15(a)에 도시하였다. 또한, 수위승강과정 직후 및 EL. 15.0 m 도달 후 122.5시간 방치시에 대한 간극수압을 수두로 환산하여 Fig. 15(b)에 나타내었다. 본 구간에서 제

(a) Water head (WL: EL. 15.0m)

(b) Comparison of water head (WL: EL. 9.2m, EL. 15.0m)

Fig. 15. Water Head Evaluated Based on Pore Water Pressure During Water-level-raising Process (Case 2) (WL: Water Level; WLV: Water Level Variation).

정부는 O-A구간에 비해 변위속도는 작으나 지속적인 침하가 발생하고 있으며, 제체 하류측 사면부는 변위 회복경향이 확인된다. 이는 제체 하류측의 간극수압 및 포화도 증가에 따른 체적수축에 의해 제체 상부에서는 침하가 유발되며, 이에 따른 횡방향 변형으로 인해 제체 하류측 사면부에 융기가 발생하였기 때문으로 판단된다. 본 제체는 코어 직립형 증고가 이루어져, Case 1에서의 월류수위인 EL. 15.0m에 도달하여도 제체는 파괴 없이 안정성을 확보함을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 현장응력상태 및 수위변동을 재현한 원심모형실험을 통하여 증고 및 비증고 제체의 거동을 평가하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 제체 내의 간극수압 및 변위는 수위상승 및 하강속도에 비례하여 증감하였다. 여기서, 제체의 수위상승시 침하 경향은 제체 상류측의 수압하중 증가 및 침윤에 따른 제체의 체적수축에 기인하며, 수위하강시 변위회복 경향은 제체 내 유효응력증가에 의한 영향보다 수압하중 감소에 의한 영향이 우세하였기 때문으로 판단된다. 연직변위의 절대치는 제체의 하류측 사면보다 제정부에서 더 크게 나타났다.
- 2) 증고 제체가 비증고 제체에 비해 수위상승에 따른 제정부 침하량 증분이 크게 나타났으며, 이로 인해 누적 침하량이 증가하였다. 그러나 수위상승에 따른 제체 하류측 사면부의 침하량 및 수위하강시 각 위치에서의 변위 회복량은 제체의 증고여부와 상관없이 유사한 경향이 나타났다.
- 3) 비증고 제체에서는 월류수위 도달시 월류로 인해 제정 및 이에 근접한 제체 상류부 일부와 제체 하류측 사면에 세굴에 의한 파괴가 발생하였으며, 이로 인해 제정부 및 제체 하류측 사면부의 침하량이 크게 발생하였다. 그러나 증고 제체의 경우, 비증고 제체의 월류수위까지 수위가 상승하여도 안정성을 확보함을 알 수 있었다.
- 4) 따라서, 기후변화 대처 및 저수량 증대를 도모하기 위한 저수지 제체의 증고는 노후 저수지의 유효한 재개발 수단으로 판단된다. 단, 저수지 제체의 증고시 수위상승에

따른 제체의 침하량이 증가할 가능성이 있으므로, 호우 등에 의해 급격히 수위가 증가하는 경우 간극수압 및 변위 계측치의 실시간 모니터링을 실시하여 이상 발생시 수문개방 등을 통해 저수지의 수위급증을 방지하는 조치를 강구할 필요가 있다. 또한, 지중침하계, 간극수압계 등의 계측기 매설개소 및 심도에 따른 매설위치 증가를 통한 제체의 상시적 유지관리체계 수립을 장기적 관점에서 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 강원대학교 전임교원 기본연구비 지원 사업인 ‘불포화 지반조건을 고려한 제체 덧쌓기형 증고저수지의 안전성 평가’ (120140391) 과제의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Aydingun, O. and Korhan A. (2003) Numerical analysis of seismically induced liquefaction in earth embankment foundations, Part I. Benchmark model, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 4, pp. 753-765.
- 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.
- 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.
- Lee, C.W. (2012) *A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests*, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan.
- 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.
- Schofield, A.N. (1980) Cambridge geotechnical centrifuge opera-

tion, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 227-268.

Sutherland, H.J. and Rechard, R.P. (1984) Centrifuge Simulations of a Stable Tailings Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, No. 3, pp. 390-402.

Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K. and Sharp, M.K. (2004) Earth Dam on Liquefiable Foundation and Remediation: Numerical Simulation of Centrifuge Experiments, *J. Engrg. Mech.*, Vol. 130, No. 10, pp. 1168-1176.

Yan-ling, D.U. (1997) Study on the centrifugal model test for earth-rock dam, *Water Resources and Hydropower Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 54-58.

Received ■ March 24, 2014

Revised ■ March 31, 2014

Accepted ■ April 28, 2014