

지속적 수위변동 및 월류에 따른 저수지 제체의 거동 연구

Behavior of Fill Dam Subjected to Continuous Water Level Change and Overflow

이 충 원¹⁾ · 맹 영 수²⁾ · 김 용 성[†]

Chungwon Lee · Youngsu Maeng · Yongseong Kim

Received: February 24th, 2014; Revised: March 5th, 2014; Accepted: May 2nd, 2014

ABSTRACT : In this study, the behavior of fill dam with continuous water level change considering velocity changes via centrifugal model test was investigated. In addition, the collapse of fill dam due to the overflow was also experimentally simulated. The experimental results demonstrate that the pore water pressures and displacements vary in proportion to the water-level-change velocity, and the displacement increment is independent to the water-level-change velocity. Also, it is confirmed that the continuous water level change induces to the progress of fill-dam deformation due to displacement accumulation and the fill-dam stability dramatically degrades owing to the overflow. Hence, the real-time monitoring of pore water pressures and displacements of fill dam, and the control of water level in heavy rain through the countermeasure such as opening sluice gates are needed to ensure the stability of fill dam.

Keywords : Centrifugal model test, Fill dam, Change of water level, Seepage flow, Overflow

요 지 : 본 연구에서는 현장응력상태 및 수위변동을 재현한 원심모형실험을 통하여 속도변화를 고려한 지속적 수위승강에 따른 제체의 거동을 검토하였으며, 기후변화에 따른 기습적 폭우 상황을 상정한 월류 시 제체의 파괴거동을 모사하였다. 실험 결과, 제체 내의 간극수압 및 변위는 수위상승 및 하강속도에 비례하여 증감하며, 제정부 및 제체 하류측 사면부의 변위증분은 수위승강속도에 대하여 독립적임을 알 수 있었다. 또한 반복적이고 지속적인 수위변동은 변위의 누적을 통해 제체의 변형을 진행시키는 요인이 되며, 월류에 의해 저수지 제체의 안정성이 급격히 저하됨을 확인하였다. 따라서 호우 등으로 수위가 급상승하는 경우 간극수압, 변위 등을 실시간으로 감시하고, 이상 발생 시 수문개방 등을 통해 저수지의 수위를 조절하는 조치를 강구할 필요가 있다.

주요어 : 원심모형실험, 저수지 제체, 수위변화, 침투, 월류

1. 서 론

전 세계적 이상기후 현상에 의한 집중호우의 빈도가 최근 들어 급속히 증가하고 있으며, 이로 인해 저수지 제체는 급격한 수위변동을 반복적으로 경험하고 있다. 이러한 가운데 우리나라의 저수지는 대부분 1970년대 이전에 건설되어 내구성이 취약한 실정이며, 반복적이고 지속적인 수위변동은 제체의 변형을 가속화할 가능성이 있다. 따라서 제체의 안정성을 확보하기 위해서는 지속적 수위변동에 따른 제체의 거동을 명확히 할 필요가 있으며, 이를 위한 방법으로서 원심모형실험을 활용할 수 있다.

원심모형실험을 이용한 제체 관련 연구는 이전부터 다수 수행되어 왔다. Sutherland & Rechard(1984)는 각각 다른 가속도장(90 g, 125 g, 150 g)에 대하여 댐에 형성되는 침윤선

의 변화를 관찰한 후 그 결과를 해석해와 비교하여 정확성을 확인하였으며, Yan-ling(1997)은 Rock fill dam의 응력과 변형문제를 고찰하기 위한 원심모형실험을 통해 저수지의 코어와 Rock fill dam의 기초를 진동 다짐하였을 때 그 전단 강도와 안정성이 현저히 상승되는 것을 확인하였다. Yang et al.(2004)은 댐의 내진성능을 확인하기 위한 동적원심모형실험 및 수치해석 결과를 비교하여 수치모델링의 개선방향을 제시하였으며, Narita et al.(2008)은 저수지의 수위 급강하에 따른 제체 내의 간극수압 거동과 제체 파괴의 연관성을 원심모형실험 및 수치해석을 통해 고찰하였다. 또한 Choo et al.(2012)은 댐체 취약부의 파약을 위한 모니터링 시스템 개발을 위해 간극수압, 온도, 전기저항 등 3가지 물리량에 대한 적용 가능성을 고찰하였다.

그러나 이러한 연구들의 목적은 주로 제체의 침투 거동

1) Institute for Advanced Construction Materials, Kangwon National University

2) Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

† Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : yskim2@kangwon.ac.kr)

특성을 구명하는 것이었으며, Lee et al.(2014)이 수위의 상승속도에 따른 저수지 제체의 거동특성에 관한 연구를 수행하였으나 현재까지 저수지 제체에 대해 속도변화를 고려하여 수위의 상승 및 하강을 지속적으로 모사한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 속도변화를 고려한 지속적 수위승강을 모사하고, 이에 따른 제체의 간극수압 및 변위거동을 구체적으로 검토하고자 한다. 이와 함께 기후변화로 인한 기습적 폭우에 따른 월류 시 제체의 파괴거동을 모사하고 그 결과를 고찰하고자 한다.

2. 원심모형실험

2.1 원심모형실험의 상사법칙

원심모형실험은 1/N 크기의 축소모형에 대해 N g의 원심가속도를 적용하여 실규모(Prototype) 지반구조물의 응력 및 변형거동을 고찰하는 실험기법이다. 본 실험은 지반의 사면안정, 굴착 및 가시설, 지반환경, 연약지반에서의 지반개량 및 지반보강, 터널 및 지하구조물, 지진, 지반동역학, 기초 및 기타 토목구조물의 안정성 검토 등에 광범위하게 적용할 수 있다. 원심모형실험의 상사법칙을 Table 1에 나타내었다(Schofield, 1980).

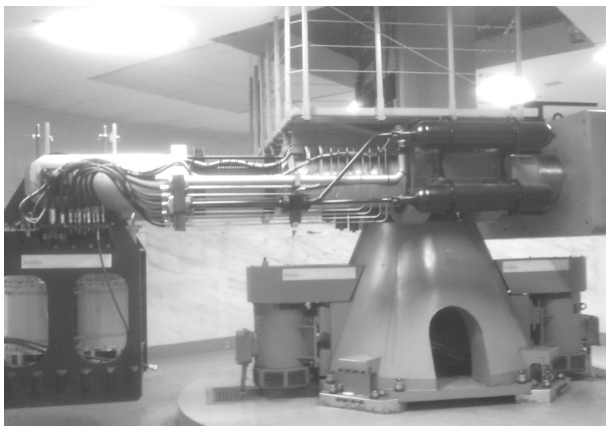


Fig. 1. Centrifugal model test apparatus (KOCED Geocentrifuge center at KAIST)

Table 1. Similarity rules in centrifugal model test

Properties	Size of model	Size of soil particle	Soil density	Stress
Scale factors (model/prototype)	1/N	1	1	1
Properties	Displacement	Strain	Time (Consolidation and infiltration)	
Scale factors (model/prototype)	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 가진다. 본 실험장비는 kreonet을 이용하는 KOCED 시설 중 Geocentrifuge 센터에 설치되어 있으며, 최대 2,400 kg의 모형하중에 대해 100 g까지의 원심재하가 가능하고 실험 최대용량은 240 g-ton이다.

모형은 플랫폼 회전 팔의 단부에 거치하며, 플랫폼 크기는 1.2 m×1.2 m×1.2 m, 모형 토조의 크기는 1.2 m×0.45 m×0.7 m이다. 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. 원심모형실험 장비의 자세한 제원은 Kim et al.(2013)에 나타난 바와 같다.

2.3 원심모형실험 과정

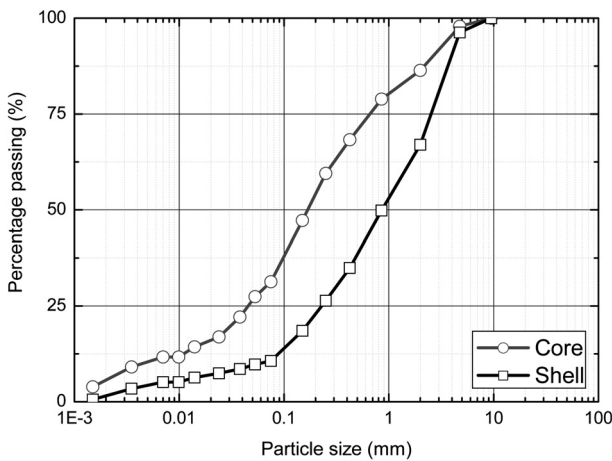
2.3.1 모형제체의 제작

원심모형실험을 위한 저수지 제체의 단면은 한반도 동북부에 위치한 실제 저수지 제체의 설계 단면과 국내 저수지의 현황 및 제원 등을 종합적으로 고려하여 결정하였으며, 제방고 15 m와 사면구배 1:2의 제원을 가진다. 본 실험에서 사용된 제체는 사력재료(shell)와 코어(core)로 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. 2 및 Table 2에 나타내었다.

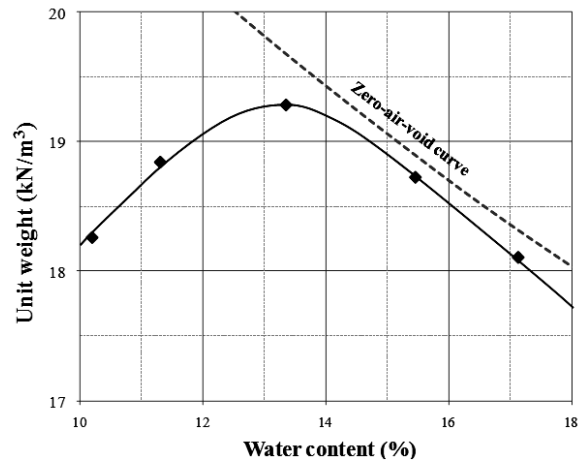
모형 제체의 축조를 위해, 제체를 7층으로 분할하여 다짐에 의한 시공을 실시하였다. 여기서 코어용 거푸집을 이용하여 중심 코어를 1층 축조 후 사력재료용 거푸집을 이용하여 하류측 및 상류측의 제체를 축조하였으며, 이를 7회 반복하였다. 다짐도 및 함수비를 동일하게 관리하기 위하여

각 층별로 요구되는 재료 및 물의 양을 계산하여 조속히 혼합 후 다짐을 실시하였다. 제체의 다짐도는 93 %로 관리하였으며($0.93 \gamma_{dmax}=17.93 \text{ kN/m}^3$), 함수비는 실제의 제체 시공을 고려하여 최적함수비보다 습윤측인 15 %로 설정하였으며, 코어의 함수비는 20 %로 설정하였다. 또한 제체와 토조 벽면의 경계부로의 유로를 차단하기 위하여 토조 벽면에 Silicon grease를 도포하여 지수를 시행하였다. 이후 모형 제체의 원심장에서의 안정성 확보를 위해 50 g의 원심재하에 의한 안정화 작업을 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. 저수지 제체의 단면 및 계측기 설치 위치를 Fig. 3에, 다짐에 의해 조성된 모형제체 및 수위조절용 Steel box를 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Particle size accumulation curve for each material



(b) Compaction curve for shell material

Fig. 2. Particle size accumulation curve and compaction curve

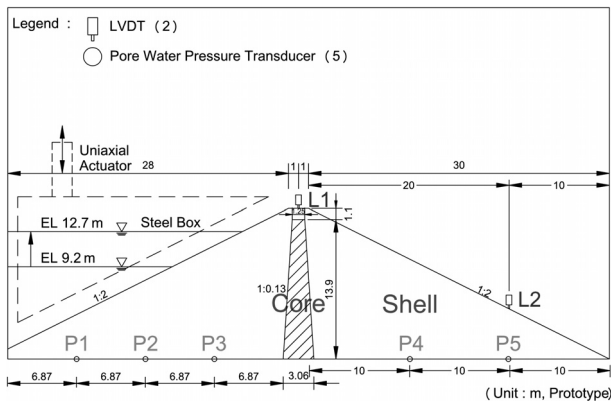


Fig. 3. Model configuration and sensor locations

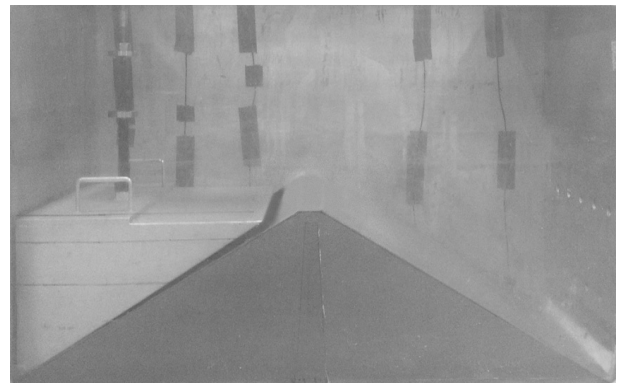


Fig. 4. Example of the constructed model levee

Table 2. Material properties of shell and core

Material	Unit weight (kN/m^3)		Particle content (%)			D_{50} (mm)
	γ_d	γ_t	Sand	Silt	Clay	
Core	16.13	19.36	55.2	25.8	5.5	0.17
Shell	17.93	20.62	56.5	9.5	1.5	0.85

Material	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	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	13.3	19.28	N.P	N.P	SW	2.669	15.0	1.39×10^{-3}

2.3.2 간극유체의 결정

동적원심모형실험의 경우, 침투시간과 동적시간과의 상사법칙을 일치시키기 위해 Silicon oil 또는 Metolose 수용액의 점성을 N g의 원심장에서 실험 시 N배로 조정하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 원심모형실험에서는 동적조건을 고려하지 않으므로 간극유체로서 물을 사용하였으며, 이때의 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 g을 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 조성된 모형 제체에 대하여 속도를 3가지로 변화시켜 평수위(EL. 9.2 m)와 계획홍수위(EL. 12.7 m)간의 수위승강을 실시한 뒤, 계획홍수위(EL. 12.7 m) 도달 후 월류수위(EL. 15.0 m)까지의 수위상승을 통해 월류를 발생시켰다. 여기서 평수위 및 계획홍수위는 실제 설계 단면에 근거하여 설정하였음을 밝혀둔다. 실험조건은 다음과 같다.

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

Table 3. Water-level-change velocity on each state

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

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

로 Steel box를 침수시켜 월류수위(EL. 15.0 m) 도달 및 월류를 발생시킨다.

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 수위승강 과정

1) 간극 수압

수위승강 과정에서는 평수위(EL. 9.2 m)에서 수위상승을 개시하는 시점(62.5시간 이후)부터 계측을 수행하였으며, 1,440시간 동안의 수위승강을 실시하였다. Fig. 5 및 Fig. 6은 모

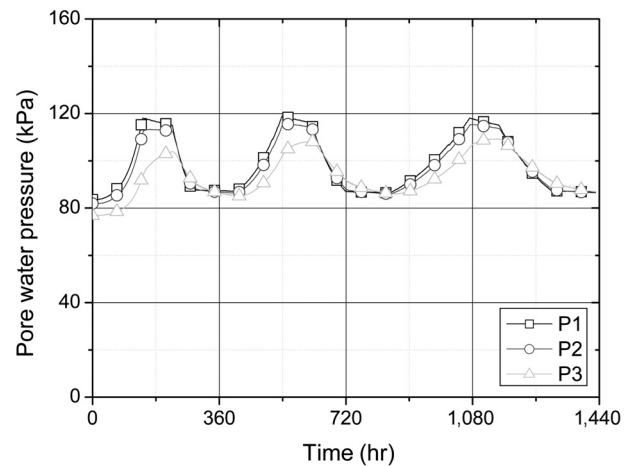


Fig. 5. Time histories of pore water pressure during water-level-change process at upstream slope

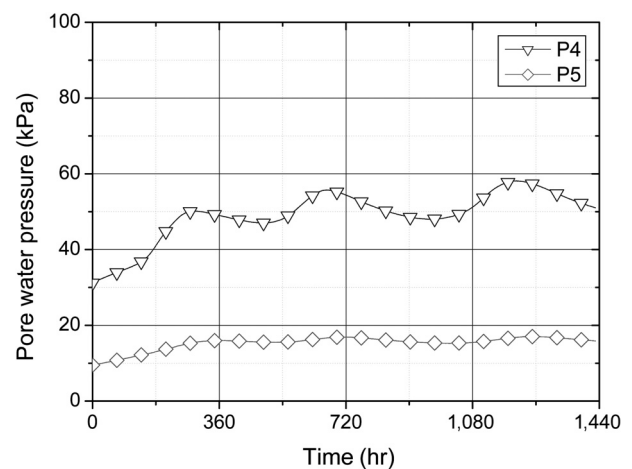


Fig. 6. Time histories of pore water pressure during water-level-change process at downstream slope

형 제체의 상류측 및 하류측에 대한 수위승강 과정 중의 간극수압 경시변화를 나타낸다. 이로부터 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 제체가 수위승강을 경험하기 전($t=0$ 시간)의 간극수압이 수위승강 완료 시($t=1,440$ 시간)의 간극수압보다 작게 나타나고 있음이 확인되며, 이는 불포화 조건인 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.

2) 연직변위

Fig. 7은 제정부(L1) 및 제체 하류측 사면부(L2)의 연직변위 경시변화를 나타내고 있다. 본 결과로부터 제체는 수위상승 시 침하 및 수위하강 시 변위회복의 경향을 보임을 알 수 있다. 여기서 수위상승 시의 침하경향은 제체 상류측의 수압하중 증가 및 침윤에 따른 제체의 체적수축에 기인한 것으로 사료되며, 수위하강 시의 변위회복 경향은 제체 내 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.

제체의 수위승강에 따른 연직변위 거동을 더욱 자세히 고찰하기 위하여, 제정부 및 제체 하류측 사면부의 연직변위에 대한 50점 인접평균선과 속도를 변화시킨 3회의 수위상승

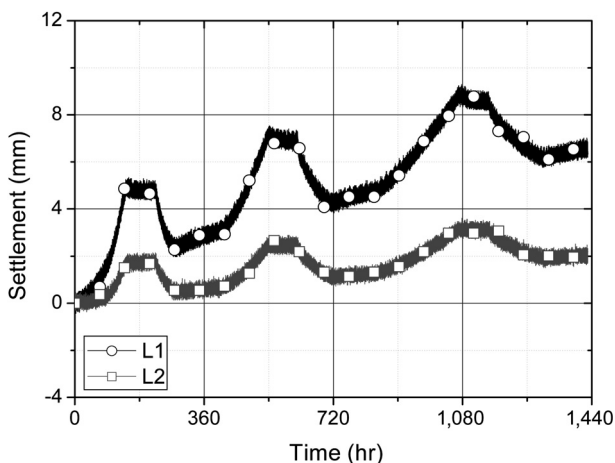


Fig. 7. Time histories of vertical displacements at crest and at downstream slope of fill dam

및 하강에 대한 시점 및 중점에서의 연직변위를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 속도를 변화시킨 3회의 수위승강에 대한 연직변위의 변화량을 Fig. 9에 나타내었다.

분석 결과, 수위 상승 및 하강 시 제정부(L1)가 제체 하류측 사면부(L2)에 비해 침하량 및 변위 회복량의 증분이 크게 나타났다. 여기서 수위의 고속상승 시 제정부의 침하량 증분이 중속 및 저속상승 시에 비해 다소 크게 평가되었다. 그러나 Fig. 5로부터 알 수 있듯이, 수위의 고속상승은 침윤선이 안정화되기 이전에 이루어져 제체의 포화도 변화가 중속 및 저속상승 시에 비해 컸으리라 사료된다. 제체 하류측 사면부는 모든 수위승강속도에서 수위상승에 따른 침하량 증분이 유사하게 나타났으며, 수위하강 시 변위 회복량 또한 수위승강속도에 따른 차이 없이 제정부 및 제체 하류측 사면부에서 유사한 양상을 보였다. 즉 수위승강속도에 관계 없이 제정부 및 제체 하류측 사면부의 변위증분은 유사할 것으로 예상된다.

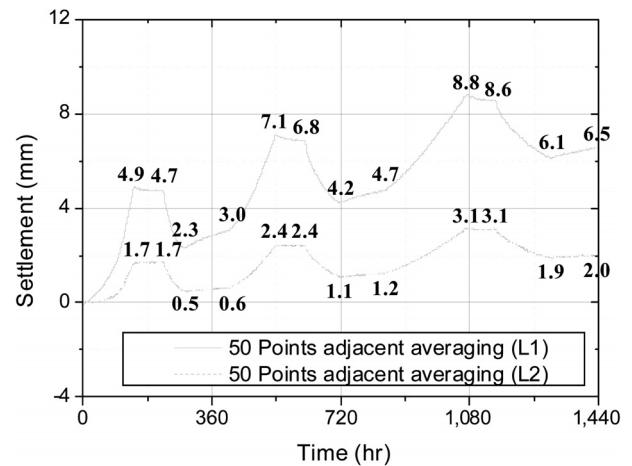


Fig. 8. Time histories of vertical displacements at crest and at downstream slope of fill dam (50 points adjacent averaged)

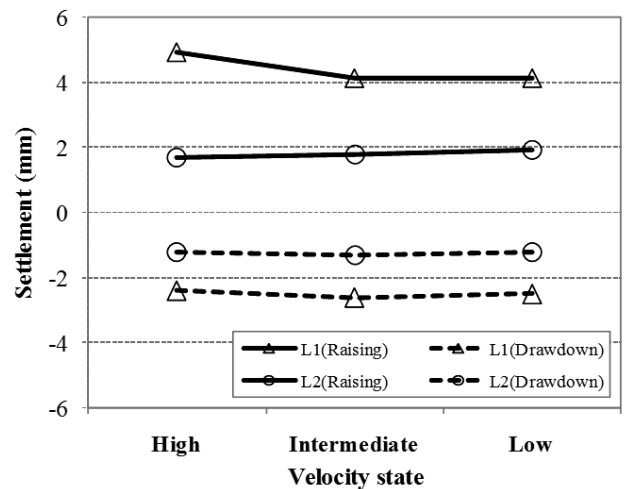


Fig. 9. Change amount of vertical displacement with water-level-change velocity

이와 함께 모든 수위상강속도에 대하여 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 대기 시에 제체 상류측 최심부의 지연된 간극수압 감소에 따른 유효응력의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. 단, 속도를 변화시켜 3회 반복되는 수위하강 후 대기 시의 침하량은 변형의 누적과 함께 지속적으로 감소하는 경향을 보인다.

2.4.2 월류수위 도달과정

Fig. 10 및 Fig. 11은 제체의 상류측 및 하류측의 월류수위 도달과정 중의 간극수압의 경시변화를, Fig. 12는 연직변위의 경시변화를 나타낸다. 본 과정에서는 전술한 바와 같이 평수위(EL. 9.2 m)에서 계획홍수위(EL. 12.7 m)까지 50 g 원심장에서의 물 공급을 통해 수위를 상승시킨 후, 수위승

강과정에서 설정된 고속상태로 Steel box를 수침시켜 월류수위(EL. 15.0 m) 도달 및 월류를 발생시킨다. 여기서 물 공급에 의한 계획홍수위까지의 수위상승에 대하여 제체 상류부 표면에 가장 근접한 P1에서의 간극수압 계측결과를 통해 역산한 수위상승속도는 1.19×10^{-1} m/hr로 평가되었다.

실험결과와 고찰을 위해, Fig. 10~Fig. 12에서 계측 및 수위상승이 시작되는 초기시점을 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-A 구간에 대하여 고찰한다. 본 구간에서는 평수위로부터 수위가 상승하여 계획홍수위에 도달한다. 이때 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-B 구간에 대하여 고찰한다. 본 구간에서는 계획홍수위 도달 후 43.9시간의 방치가 이루어졌다. P3의 증가속도는 O-A 구간보다 감소하였으나 지속적인 간극수압의 상승이 확인된다. 제체 하류측의 P4에서도 미소한 상승이 나타나기 시작하나, P5에는 아직 수위상승의 영향이 나타나지 않고 있다. 또한 본 구간에서의 침하는 L1 및 L2 모두 명확히 확인되지 않고 있다.

B-C 구간의 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 수위상승속도가 O-A 구간의 약 25 % 수준으로, O-A

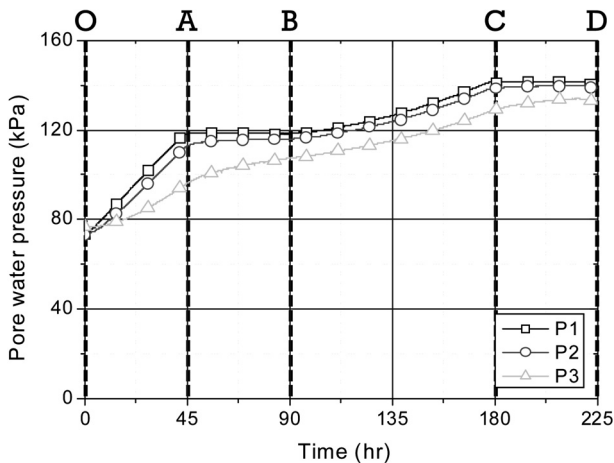


Fig. 10. Time histories of pore water pressure during water-level-raise process at upstream slope

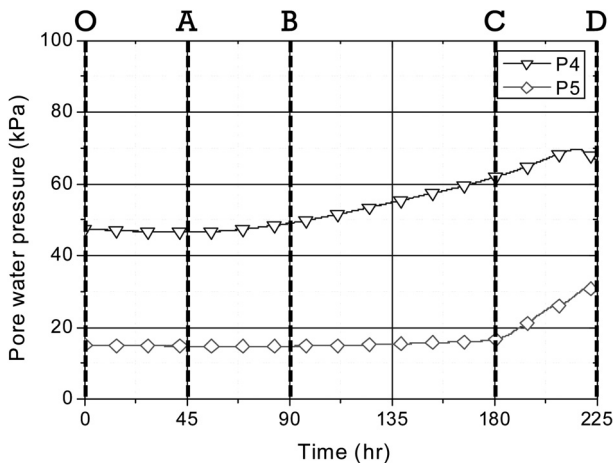


Fig. 11. Time histories of pore water pressure during water-level-raise process at downstream slope

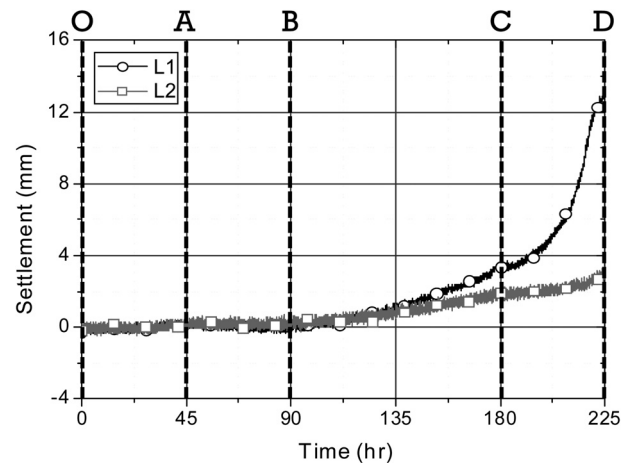


Fig. 12. Time histories of vertical displacement during water-level-raise process

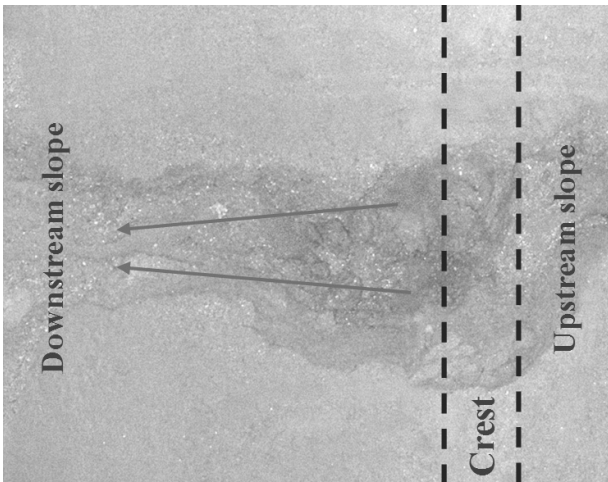


Fig. 13. Collapse of fill dam due to the overflow

구간에 비해 간극수압 상승의 지연 시차가 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 수위 상승과정에서 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-D 구간에서는 월류수위 도달 및 월류가 진행되며, 이로 인해 제정부 및 이에 근접한 제체 상류부 일부와 제체 하류측 사면에 세굴에 의한 파괴가 발생하였다(Fig. 13). 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 월류 시 제체 하류측에 고인 물의 배수 지연으로 인한 역류에 기인한 것으로 보인다.

3. 결 론

본 연구에서는 현장응력상태 및 수위변동을 재현한 원심

모형실험을 통하여 저수지 제체에 대해 속도변화를 고려한 지속적 수위상승을 모사하였으며, 이에 따른 제체의 간극수압 및 변위거동을 구체적으로 검토하였다. 또한 기후변화에 따른 기습적 폭우 상황을 상정한 월류 시 제체의 파괴거동을 모사하고 그 결과를 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 제체 내의 간극수압 및 변위는 수위상승 및 하강속도에 비례하여 증감하였다. 여기서 제체의 수위상승 시 침하 경향은 제체 상류측의 수압하중 증가 및 침윤에 따른 제체의 체적수축에 기인하며, 수위하강 시 변위회복 경향은 제체 내 유효응력증가에 의한 영향보다 수압하중 감소에 의한 영향이 우세하였기 때문으로 판단된다. 연직변위의 절대치는 제체의 하류측 사면보다 제정부에서 더 크게 나타났다.
- (2) 수위상승 및 하강 시 제정부가 제체 하류측 사면부보다 침하량 및 변위 회복량의 증분이 크게 나타났다. 그러나 제정부 및 제체 하류측 사면부의 변위증분은 수위상승 속도에 대하여 독립적인 것으로 판단된다.
- (3) 월류 시에는 제정 및 이에 근접한 제체 상류부 일부와 제체 하류측 사면에 세굴에 의한 파괴가 발생하였으며, 이로 인해 제정부 및 제체 하류측 사면부에 큰 침하량이 발생하였다.
- (4) 반복적이고 지속적인 수위변동은 변위의 누적을 통해 제체의 변형을 진행시키는 요인이 되며, 월류에 의해 저수지 제체의 안정성이 급격히 저하됨을 확인하였다. 따라서 호우 등으로 수위가 급상승하는 경우 간극수압, 변위 등을 실시간으로 감시하고, 이상 발생 시 수문개방 등을 통해 저수지의 수위급증을 방지하는 조치를 강구할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축사업(NEMA-기반-2013-106)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. 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. (in Korean)
2. 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.
3. Lee, C. W. (2012), A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan, p. 86.
 4. Lee, C. W., Chang, D. S., Park, S. Y. and Kim, Y. S. (2014), Evaluation of behavior characteristics of reservoir levee subjected to increasing water levels, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 1, pp. 155~165. (in Korean)
 5. 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.
 6. Schofield, A. N. (1980), Cambridge geotechnical centrifuge operation, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 227~268.
 7. 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.
 8. Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K. and Sharp, M. K. (2004), Earth dam on siquefiable foundation and remediation: Numerical simulation of centrifuge experiments, *J. Engrg. Mech.*, Vol. 130, No. 10, pp. 1168~1176.
 9. 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.