한국지반공학회논문집 제23권 10호 2007년 10월 pp. 109 ~ 119

초기 담수시 CFRD 거동 모사를 위한 원심모형실험

Centrifuge Test for Simulating Behavior of CFRD During Initial Impoundment

서 민 우[1] Seo, Min-Woo
김 용 성[2] Kim, Yong-Seong

Abstract

As the number of CFRD constructions increases, the necessity of an accurate assessment on its behavior also has been increasing. The performance of concrete faced rockfill dam (CFRD) under different water levels is a great concern of dam engineers and designers in the world. However, domestic research on CFRD design and construction has not been performed sufficiently. This study deals with three centrifuge model tests, mainly investigates quantitatively the deformation of the concrete faced slabs and settlements on the crest with different face slab stiffness. The prototype of a centrifugal model dam is half size of domestic CFRD dam. Detailed material preparation, model design, model set-up, model instrumentation and testing procedures are presented. In order to simulate the prototype concrete faced slab, three kinds of thin fiberglass plates with different thickness were adopted in three model tests. Finally, the centrifuge test results were compared with field measurements of domestic dams, which showed that the centrifuge tests were performed successfully.

요 지

CFRD 형식의 댐 건설이 증가함에 따라 CFRD 거동에 대한 보다 정확한 분석 및 평가가 필요하게 되었다. 수위변화에 따른 댐 거동은 댐 설계자와 관리자의 주요 관심사이지만, 국내의 경우 관련 연구가 충분히 진행되지 않아 아직도 많은 경우 국외 사례에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 콘크리트 차수벽 강성이 서로 다른 세 가지 원심모형실험을 통해 수위변화에 따른 CFRD 거동을 정량적으로 평가하였다. 원심모형실험은 국내에서 운영 중인 D댐의 1/2 크기의 원형으로 수행되었으며, 모형 준비, 설계, 모형 구축, 계측기 설치, 실험 절차를 상세히 제시하였다. 콘크리트 차수벽은 3 종류의 유리섬유판을 통해 모사하였으며, 비행 중 수위조절을 위한 특별히 장치를 고안하였다. 국내·외 댐 계측사례를 수집 정리하여 본 원심모형실험 결과와 비교하였으며, 그 결과 본 원심모형실험은 실제 댐 거동을 비교적 높은 정확도로 모사하였음을 확인하였다.

Keywords : Centrifuge test, CFRD, Field measurement, Initial impoundment, Water level change

1. 서 론

최근 국내에 시공되는 대부분의 댐은 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(concrete faced rockfill dam, 이하 'CFRD'라 한다) 형식이지만 국내에서는 아직도 관련분야의 역사가 오래되지 않아 CFRD의 설계 및 시공시 외국의

1 정회원, 일리노이대학 박사후 연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA) ; 전, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation)
2 정회원, 소방방재청 방재대책팀 시설사무관 (Member, Deputy Director, Disaster Countermeasures Team, National Emergency Management Agency, nakisuna@nema.go.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

사례에 의존하는 경우가 빈번하다. 이러한 CFRD의 거동 특성을 파악하기 위해서 전통적으로 수치 해석, 모형 실험, 현장 계측 등을 수행하고 있으며, 국외에서는 지난 수십년 간 축소된 댐 모형에 현장의 실 응력상태를 구현할 수 있는 원심모형실험을 통해 댐 관련 연구를 다양하게 수행해왔다(Mikasa 등, 1981; Koushige 등, 1995). 최근 전세계 댐 건설의 절반 이상을 차지하고 있는 중국에서도 원심모형실험을 통해 댐 구조물의 거동 예측, 공법의 검증이 이루어지고 있으며(Zhang과 Hu, 1994; Hou 등, 2004; Hou, 2006; Xu 등, 2006), 국내에서도 최근 들어 원심모형실험을 통한 댐 관련 연구가 조금씩 이루어지고 있다(임은상 등, 2005; 하익수 등, 2006).

한편 CFRD는 댐체 축조 및 초기 담수시 비교적 큰 변형이 발생하고 그 이후에는 비교적 안정적으로 거동하므로(Materon, 1985; Pinto와 Marques, 1998; Wu 등, 2000), 댐 축조시와 초기 담수시 CFRD 거동에 보다 세심한 주의를 기울여야 한다고 알려져 있다(김용성 등, 2006). 이 기간 동안 댐의 안전한 관리를 위하여 Fitzpatrick 등(1985)은 초기 담수시 발생하는 콘크리트 표면 차수벽(face slab, 이하 '차수벽'이라 한다)의 변형량을 예측하는 경험식을 제시하여 초기 담수시 댐 운영 관리에 참고할 수 있도록 하였으며, Hunter와 Fell(2003)은 댐 축조 방식과 높이에 따른 초기 담수시 댐 정부 침하량 범위를 제안하기도 하였다.

CFRD의 담수 후 변형 특성을 나타내는 주요한 인자는 정부침하량(crest settlement)과 차수벽의 처짐(face settlement)이다. CFRD의 정부침하량과 차수벽의 처짐량을 정확하게 예측하는 것은 댐 설계자의 주된 관심사인데, 이는 시공시 뿐만 아니라 정상 운영시나 지진과 같은 특수한 환경을 겪을 때, 댐의 거동특성을 대표적으로 손쉽게 표현할 수 있는 항목이기 때문이다. 따라서, CFRD의 정부침하량을 예측하는 다양한 식들이 현재까지 연구되어 왔으나(Soydemir와 Kjaernsli, 1979; Clements, 1984; Liu 등, 1993; 김용성 등, 2006), 정확하게 침하량을 예측하는 데에는 많은 어려움이 있으며, 이러한 어려움은 댐체의 침하에 직·간접적으로 영향을 미치는 다양한 영향인자들에 기인한다(Hunter and Fell, 2003).

본 연구에서는 초기 담수시 CFRD 거동을 파악하기 위하여 원심모형실험을 수행하고, 이를 국내·외 댐 현장에서 계측된 결과와 비교하였다. 또한 CFRD 축소 모형 설계, 실험 절차, 재료 특성 평가, 실험 결과 분석 등 CFRD 원심모형실험 전 과정을 자세히 제시하였으며, 실험 결과 중 CFRD의 거동 특성을 대표적으로 나타내는 정상부 침하와 차수벽의 처짐 변형 결과를 기존 계측 결과와 비교하여 실험 결과의 적용성을 검토하였다.

2. CFRD 원심모형실험 개요 및 절차

2.1 원심모형실험 개요

일반적으로 알려진 바와 같이 지반 구조물의 거동은 가해진 응력에 매우 큰 영향을 받기 때문에 그 거동을 정확히 파악하기 위해서는 현장의 응력 상태를 실제와 유사하게 구현하는 것은 매우 중요하다(김명모, 1991). 원심모형실험에서는 실제 구조물을 1/N(N : 축소비)로 축소시킨 모형에 N배의 가속도를 구현시켜 실제 응력 상태에서의 해당 구조물 거동을 모사하기 때문에 이러한 응력 불일치로 인한 실험적 한계를 극복할 수 있다. 원심모형실험을 위한 모형 설계시 실제 구조물과 축소 모형 사이의 상관관계, 즉 상사비가 적용되는데 대상 지반 구조물의 특성에 따라 다양한 상사비가 적용된다(유남재 등, 2005; 김성렬 등, 2006; 배우석 등, 2006). 이중에서 댐 모형에 적용되는 상사비는 임은상 등(2005) 및 하익수 등(2006)의 연구결과에 자세히 제시되어 있다.

본 원심모형실험은 중국 수리수전연구소(IWHR) 대형 원심모형시험기(반경: 5m, 용량: 450g·ton)를 이용하여 수행되었으며, 축소 모형은 시험기 규모의 한계로 부득이 국내에서 운영 중인 D 댐의 1/2 크기를 원형으로 하여 댐 단면 및 수위 조건을 설계하였다. 본 실험에서는 차수벽 강성이 다른 3개 모형 댐에 대하여 단계적으로 수위를 변화시키면서 수위 변화에 따른 CFRD 거동 변화를 관찰하였다.

2.2 모형 설계 및 적용 상사관계

축소 모형 설계는 현재 국내에서 운영 중인 CFRD 형식의 D댐을 대상으로 이루어졌다. 앞서 기술한 바와 같이 실제 댐 높이 52m의 1/2인 26m를 원형 댐 높이로 하여 모형 단면을 설계하였다. 상사비(N)는 70을 적용하여 CFRD 모형 높이는 370mm로 결정하였으며, 이 때 가해진 가속도는 70g였다. 댐 모형에서 상류측 구배는 실제 댐과 동일하게 1 : 1.4, 하류측 경사 구배는 1 : 1.8로 설계하였으며(그림 1), 모형 실험시 상승되는 최대 수위는 계획 홍수위인 350mm(원형 : 24.5m)로 설정하

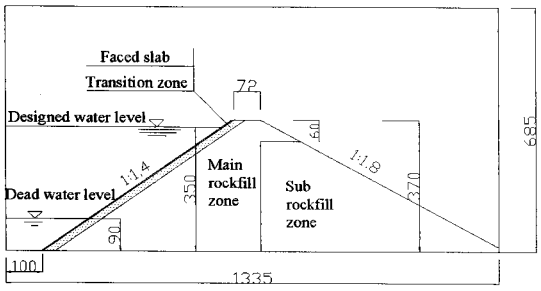


그림 1. CFRD 모형의 개요도(단위 : mm)

였다. 원심모형시험기가 회전(spinning)하면서 이루어지는 수위 상승은 5단계, 즉 90mm(1단계), 155mm(2단계), 220mm(3단계), 285mm(4단계), 350mm(5단계)로 나누어 이루어졌으며, 최고 수위 도달 이후에는 일정 시간 동안 수위를 유지시킨 후 다시 수위를 저수위로 하강시켰다. 즉, 수위 변화는 총 3단계, 수위 상승, 수위 유지, 수위 하강 순으로 이루어졌다.

본 실험에 사용된 실험용기(container)의 크기(길이×폭×높이)는 1335×740×685mm 였다. 시험용기의 일부분은 수위 저하를 위한 물 저류 공간으로 사용되었으며, 나머지 폭(400mm)은 CFRD 모형 축조를 위한 공간으로 이용되었다. CFRD에서 차수 기능을 담당하는 차수벽은 유리섬유판(fiberglass)으로 모사하였으며, 이 때 적용된 휨강성(EI)은 원형과 N^3(N : 상사비)의 상사 관계를 가진다. 모형 제작에 사용된 유리섬유판의 휨강성은 아래 식에 의해 계산하였다(임은상 등, 2005).

$$E_m^c I_m^c = \frac{(EI)_p}{N^3} \quad (1)$$

$$E_m^f I_m^f = E_m^c I_m^c \quad (2)$$

여기서, E : 탄성계수, I : inertia, EI : 휨강성, N : 상사비, m : 모형, p : 원형, c : 차수벽, f : 차수벽 모사 유리섬유판, E_m^c = 28GPa, E_m^f = 19GPa

원형 차수벽의 휨강성(EI)은 618.75tm^2/m였으며, 여기에 모형 설계시 적용된 상사비(N=70)를 적용하면 모형 차수벽의 강성은 180kgcm^2/cm로 계산된다(표 1 Model 2). 본 시험에서는 CFRD 거동 관찰과 동시에 차수벽의 강성 차이 효과를 알아보기 위해 두께가 다른 3 종류의 모형 차수벽을 적용하였으며, 적용된 모형 차수벽의 강성과 유리섬유 두께 및 강성은 표 1과 같다.

차수벽 모사를 위해 사용된 유리섬유판은 여러 장의 에폭시 유리섬유로 구성되어 있으며, 모형 차수벽 제작 시 기성 제작품을 사용하였다. 유리섬유판은 기존에 모형시험에서 널리 이용되어 왔던 알루미늄판에 비하여 모형 준비와 계측기 설치 시 쉽게 가공하여 이용할 수 있다는 장점이 있어 최근에 널리 사용되고 있다. 사용된 유리섬유판의 밀도는 16.7~18.7kPa, 인장강도는 245~343MPa, 탄성계수(E)는 17~21GPa이다. 모형 차수벽은 두개의 모형 슬래브 판을 수평으로 연결하여 최종 단면을 구성하였으며, 이 때 사용된 한 개의 유리섬유판의 폭은 200mm였다. 이 폭은 실물에서 14m에 해당하는 넓이이다.

한편 휨강성의 영향과 관련하여 하익수 등(2006)은 원심모형실험 결과에 대한 수치해석을 통해 CFRD 차수벽의 변위 및 최대 변위 발생 위치는 차수벽의 휨강성(EI)에는 영향이 거의 없고, 오히려 지지존의 강성이 증가할수록 발생변위가 지수 함수적으로 감소한다고 보고한 바 있다.

2.3 축조재료의 특성

모형 CFRD의 단면은 일반적으로 시공되는 CFRD와 동일하게 주암석재료 축조영역(이하 'main rockfill zone'이라 한다), 보조암석재료 축조영역(이하 'sub rockfill zone'이라 한다), 그리고 차수벽 지지영역 및 선택 영역(이하 'transition zone'이라 한다)으로 구성하였다. 사용된 각 축조재료의 입도 분포는 그림 2와 같다. 축조 재료의 입도 분포는 실제 D 댐에 적용된 입도 분포를 기초로 하여 결정되었으며, 댐 모형 축조재료는 중국 내 댐 현장에서 사용되는 암석 재료를 이용하였다.

표 1. 모형 차수벽의 강성

No.	Model	$E_p I_p$ (tm^2/m)	$E_m^c I_m^c$ (kgcm^2/cm)	$E_m^f I_m^f$ (kgcm^2/cm)	모형 차수벽 두께 (mm)
1	Model 1	858	250	250	2.6
2	Model 2	617	180	180	2.0
3	Model 3	343	100	100	1.5

※ EI : 휨강성, p : 원형, m : 모형, c : 콘크리트, f : 유리섬유

표 2. CFRD 모형 축조 재료의 전단강도 특성

재 료	시험 종류	건조 밀도(kN/m^3)	C(kPa)	ϕ_0(°)	$\Delta\phi$(°)
Main rockfill	CD 시험	21.1	0	57.0	13.1
Sub rockfill		21.1	0	52.8	9.6

재 료	시험 종류	건조 밀도(kN/m^3)	C'(kPa)	ϕ_0'(°)	C_{cu}(kPa)	ϕ_{cu}(°)
Transition	CU시험	21.1	5.7	42.1	9.5	40.5

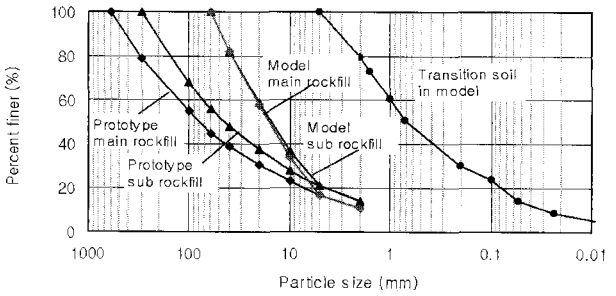


그림 2. CFRD 모형 댐 축조 재료의 입도 분포

일반적으로 원심모형실험 수행 시에는 실제 현장에 사용되는 재료를 이용하여 실험을 수행하나, 댐 축조에 사용되는 재료의 크기는 매우 크기 때문에 본 댐 모형 실험에서는 원입도를 그대로 사용할 수 없었다. 즉 원입도 대신에 축소입도가 적용되었으며, 최대 입도를 시험기 규모를 고려하여 축소시키되 일정 크기 이하의 세립분 양은 원형과 동일하게 유지시키는 일정양치환법(equal quantity replacing method, 이하 'EQRM'이라 한다)에 따라 실험 입도를 결정하였다. EQRM은 일반적으로 적용되는 상사입도법에서는 세립분의 지나친 증가로 인해 재료의 투수성이 바뀔 수 있다는 점을 보완해 줄 수 있는 방법으로서, 이에 따라 main rockfill(최대입자크기 600mm)과 sub rockfill(최대입자크기 300mm)의 최대 입자크기는 시험용기(container) 폭(40cm)의 약 1/7(통상적으로 6~10)인 60mm로 축소시켰다. 그리고, 5mm 이하 비율은 재료의 투수 특성이 변하지 않도록 원재료와 동일하게 유지시켜(Hou 등, 2004) 실험 입도를 구성하였다.

댐 모형의 main rockfill과 sub rockfill은 건조밀도 21.1kN/m^{3}로 다졌으며, 축조 재료의 강도 및 변형 특성을 파악하기 위하여 대형 삼축시험(지름 300mm, 높이 700mm)을 수행하였다. 삼축시험은 압밀 후 배수(CD) 조건으로 수행되었으며, 가해진 구속압은 0.4, 0.8, 1.2, 1.6MPa였다. 전단 속도는 1mm/min로서 최대 변형율은 15%였다. 실험 결과 내부마찰각은 구속압이 증가할수록 감소하는 모습을 보였으며, 각 구속압에서의 내부마찰각을 산정하기 위하여 다음의 식(Xing 등, 2006)을 적용하였다.

$$\phi_d = \phi_0 - \Delta\phi\log(\frac{\sigma_3}{P_a}) \quad (3)$$

여기서, ϕ_d 는 배수 조건에서의 내부마찰각, ϕ_0은 초기 내부마찰각, $\Delta\phi$는 구속압 변화에 따른 내부마찰각 차이, P_a는 대기압

한편 transition zone은 단위중량 21.1kN/m^{3}로 조성되었으며, 일반 삼축시험기(직경 38mm, 높이 80mm)를 이용하여 강도 특성을 평가하였다. Transition zone 재료는 대형 삼축시험과 다르게 압밀 비배수(CU) 조건에서 시험을 수행하였다. 사용된 3종류 재료의 강도 특성은 표 2와 같다.

2.4 수위 조절 장치

본 실험에 사용된 수위 조절장치(그림 3)는 두 개의 솔레노이드 밸브(solenoid valve, YCDK11-ZW-160-15, 10kg/cm^2)와 파이프, 두 개의 수조, 유량계(flow meter), 조정 시스템으로 구성되었다. 본 실험 장치는 70g 상태에서 성공적으로 작동하였으며, 회전(spinning) 시 용기 내 수위는 모형 내에 설치된 간극수압을 확인하면서 조정하였다. 용기 안에 설치된 배출구는 저수위와 동일한 높이에 설치되었다(높이 90mm).

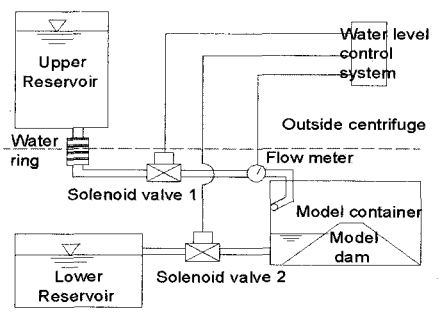


그림 3. 수위 조절 장치 개요도

2.5 계측기 설치

본 연구에서는 상류측 차수벽의 거동을 중점적으로 계측하였다. 설치된 계측기는 토압계, 변위계(LVDT), 변형율계(strain gage), 정부 침하 및 사면 상단부의 침하를 측정하기 위한 레이저 센서, 간극수압계 등이다. 그림 4는 Model 1에 적용된 계측기 현황과 설치 위치를 보여주고 있다. 3종류의 실험(Model 1, Model 2, Model 3)에 동일한 계측기가 설치되었으며, 단 Model 2에서는 예외적으로 하류사면에 한 개의 LVDT(LVDT 3)가 설치되었다.

내부의 수위 변화를 확인하기 위해 바닥에 간극수압계(PPT)를 설치하였으며. 댐체 내부와 transition zone에서의 토압을 측정하기 위해 각각 댐체 내부에 2개와 모형 차수벽 뒤편에 6개의 토압계를 설치하였다. 또한 모형 차수벽 후면에는 각각 5개의 변형율계를 부착시켜 수위 상승에 따라 모형 차수벽의 각 위치에서 발생되는 응력을 측정하였다. 실험 과정을 촬영하는 카메라는 실험 중 수위 변화를 관찰할 수 있도록 상류측에 설치하였다.

2.6 모형 축조 및 담수

정확한 모형 축조를 위하여 4층의 다짐용 틀을 제작하였으며 각 층은 다짐틀을 고정시킨 후 축조 재료를 그 내부에 채운 후 소요 밀도까지 다졌다. 첫 번째 층을 다진 후에 토압계를 내부에 설치하였으며, main rockfill zone 및 sub rockfill zone을 조성한 후 마지막으로 두께 10mm의 transition zone을 상류측 사면에 다져서 구성하였다. 하지만 transition zone의 두께가 매우 얇아 내부에 토압계 설치가 불가능하였으며, 따라서 모형 유리섬유판 후면에 토압계를 부착하여 transition zone에서 발생하는 토압을 측정하였다.

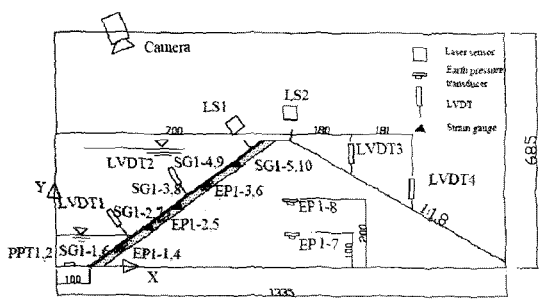
CFRD 모형 실험시 차수벽 상류측에 직접 물을 공급하는 것은 용기 벽면과 유리섬유판 사이, 그리고 2개의 모형 차수벽 연결부위를 통해 댐체 내부로 누수 가능성이 높기 때문에, 본 실험에서는 고무 멤브레인으로 제작된 물저장 용기(이하 'water bag'이라 한다)를 이용하여 내부로의 침투를 막고자 하였다. 즉 담수가 이루어지는 부분을 water bag으로 둘러쌓은 후, 그 내부에 물을 채워 누수를 방지하면서 모형 차수벽에 수위로 인한 하중이 가해지도록 하였다. 또한 water bag 하부에는 배출구를 만들어 수위 저하가 가능하도록 하였으며, 이 때 사용된 멤브레인의 두께는 1.5mm였다.

초기 모형은 1g 상태에서 제작되기 때문에 일반적으로 많은 변형 및 불균질성을 수반하게 되므로 모형댐의 안정을 위하여 70g 상태로 가속시킨 후, 약 4분 동안 70g 상태를 지속시켰다. 이 후 각 실험에서 수위를 5단계로 나누어 증가시켰으며, 각 수위 단계별로 5분 동안 수위를 유지시켰다. 물은 4.3 ℓ/min의 속도로 공급되었으며, 수위 변화의 마지막 단계 즉 수위 저하시에는 17.3 ℓ/min 속도로 물이 배수되었다.

3. 원심모형실험 결과 및 분석

3.1 차수벽 변형

3개 모형에서 측정된 변형 자료를 이용하여 수위 상승에 따른 차수벽의 변형 양상을 분석하였다(그림 5, 표 3). 그림 5를 보면 대부분 수위가 상승함에 따라 차수벽의 변형량은 증가하였으며, 최종 단계에서의 차수벽 변형량의 경우 Model 2와 Model 3이 유사하게 나타났다. 한편 Model 1에서 최종 수위 단계에서의 차수벽 변형 양상은 Model 2 및 Model 3과는 다소 상이하게 나타났다. 즉 Model 1에서의 상대적으로 큰 차수벽의 강성으



(a) 모형실험 개략도(단위: mm)

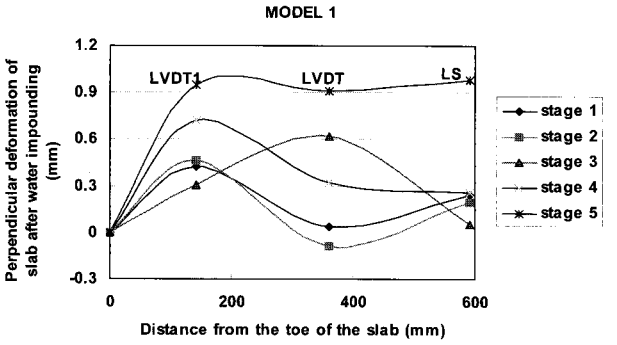
Transducers	Coordinate	
	X(mm)	Y(mm)
LVDT1	215	82
LVDT2	394	210
LVDT3	880	269
LVDT4	1061	169
Laser sensor 1	581	343
Laser sensor 2	700	369
EP1-1,4	188	60
EP1-2,5	317	152
EP1-3,6	447	245
EP1-7	700	100
EP1-8	700	200
SG1-1,6	188	60
SG1-2,7	274	122
SG1-3,8	361	183
SG1-4,9	447	245
SG1-5,10	534	306

(b) 계측기 설치 좌표

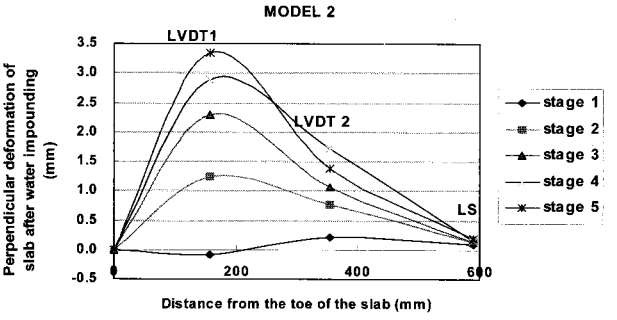
그림 4. 계측기 설치 단면 및 위치

로 인해 최종 수위 단계 시 차수벽의 전체 단면에 걸쳐 비교적 일정한 약 1mm의 침하가 측정되었으며, Model 2와 Model 3에서는 Model 1과 다르게 차수벽 하부에서 훨씬 큰 침하량이 측정되었다.

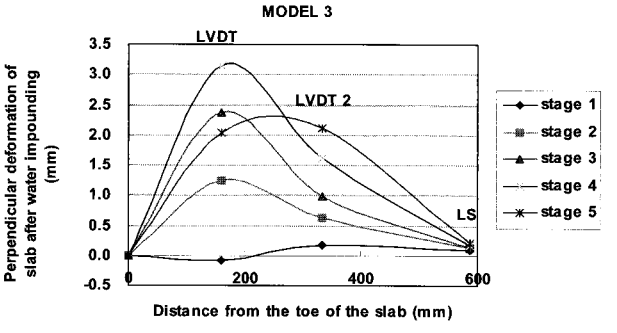
Model 1에서 보이는 경향은 일반적인 거동과는 약간 상이한 것으로 상대적으로 큰 차수벽 강성이 주요한 원인으로 작용한 것으로 보이나, 차수벽의 강성이 다른 Model 2와 Model 3에서는 유사한 거동을 보이고 있음을 고려하면, Model 1의 차수벽의 변형은 차수벽 강성 이외에도 댐 축조의 불균질성, 계측 결과의 오차 등에서도 일부 영향을 받은 것으로 판단된다. 이러한 오차 요인을 보다 정확히 확인하기 위해서는 원심모형실험 결과를 수치 해석 및 현장 계측 결과와 비교하여 실험 결과의 신뢰성을 확보하는 것이 필요한데 본 연구에서는 원심모형실험 결과를 현장 계측 및 기존에 발표된 자료와 비교하여 본 원심모형실험 결과를 검증하였다. 한편 측정된 차수벽의 최대 변형(δ/H, %)은 실제 댐 구조물의 강성을 모사한 Model 2에서 0.90H%(H : 댐높이)로 나타났다.



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

그림 5. 수위 상승에 따른 차수벽의 변형

3.2 차수벽 응력

모형 차수벽(유리섬유판)의 후면에 변형율계(strain gage)를 부착하여 차수벽 변형으로 인해 유발되는 응력을 측정하였다. 고속 회전으로 인해 모든 변형율계로부터 정확한 계측 자료를 취득하는 것이 쉽지 않았지만(Model 1의 경우 모든 계측치 불안정), 분석 가능한 계측 자료로부터 응력 분포를 분석해 보면 대체로 '+ 변형율'을 보였다. 이는 차수벽 후면은 대부분 인장응력을 받고 있음을 의미하는 것으로, 일반적으로 차수벽 변형이 하류 방향으로 발생하는 경향과 일치함을 알 수 있다.

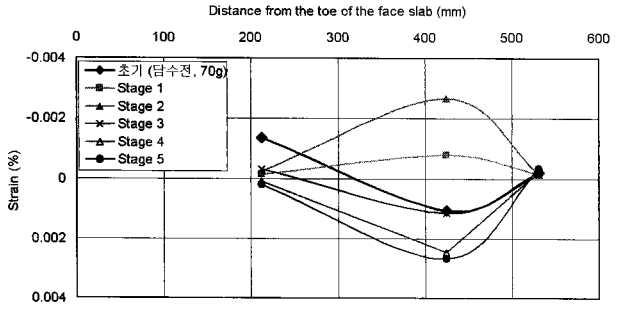
그림 6은 Model 2와 Model 3에서 수위 상승으로 인해 모형 차수벽에 유발된 응력 분포를 나타내고 있다. 원심모형실험에서는 응력은 원형과의 상사비 N이 '1'이기 때문에 모형실험에서 측정된 변형율로부터 산정된 응력은 원형과 동일하다고 할 수 있다. 그림 6은 계측된 차수벽의 인장응력 크기와 분포 양상이 모형에 따라, 즉 차수벽 강성이 변함에 따라 각기 다르게 나타남을 보여주고 있다. 원형을 모사한 Model 2에서는 담수 완료시 최대 인장응력이 차수벽의 상단부에 위치하지만, 이보다 차수벽의 강성이 작은 Model 3에서는 최종

표 3. 차수벽에 발생한 최대 변형

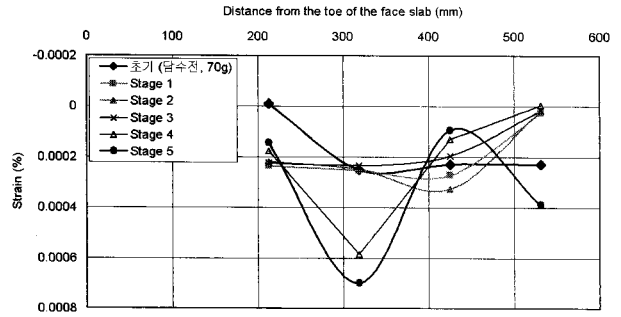
Model	최대 변형량		차수벽 처짐량 δ/H(%)	최대값 발생위치
	모형(model)	원형(prototype)		
Model 1	0.98mm	6.86cm	0.26	전단면 일정
Model 2	3.34mm	23.4cm	0.90	하단
Model 3	3.15mm	22.1cm	0.85	하단

※ 참고, δ : 처짐량, H : 댐 높이(m)

수위 시 최대 인장응력이 차수벽의 중간 지점에서 나타나고 상단으로 갈수록 인장응력은 감소하였다. 이러한 차이는 주로 모형 차수벽의 강성 차이에서 기인한 것으로 보이지만, 두 경우의 결과로부터 강성 차이에 따른 인장응력 분포를 일반화하기에는 무리가 따르며 향후 현장 계측과 수치해석을 통해 자료를 축적하면 좀 더 일반적인 경향을 찾을 수 있을 것으로 기대된다. 원심모형실험에서는 모형 자체도 매우 작을 뿐만 아니라 고속 회전 중 정교한 계측이 이루어지기 때문에 응력과 같은 정밀한 측정은 쉽지 않다고 알려져 있으며, 향후 이러한 부분을 보다 정확하게 측정할 수 있는 기법이 개발되면 좀 더 신뢰성 있는 자료 축적이 가능할 것이다.



(a) Model 2



(b) Model 3

그림 6. 차수벽에서 측정된 변형율(+ : 인장, - : 압축)

표 4. 모형에 유발된 최대 인장응력

항 목	Model 2	Model 3
최대 변형율(%)	0.0026	0.0007
최대 인장응력(MPa)	0.49	0.13

모형 차수벽 탄성계수, E_m^f = 19,000MPa

Model 2와 Model 3에서 계측된 변형율과 모형 차수벽의 탄성계수를 이용하여 최대 인장응력을 계산하였다(표 4). 그 결과 Model 2에서는 최대 인장응력이 0.49MPa, Model 3에서는 0.13MPa로 산정되었다. 일반적으로 콘크리트 허용 압축강도는 21.0MPa 내외, 그리고 콘크리트의 허용 인장강도를 압축강도의 0.1로 가정하면 차수벽의 허용 최대 인장력은 2.1MPa 내외 정도로 볼 수 있다. 이를 본 실험 결과와 비교해보면, 실제 댐의 1/2 축소모형을 원형으로 하는 원심모형실험과 실제보다 강성이 조금 작은 경우 모두 인장응력 자체는 허용치 이내로 나타났다. 하지만 이러한 원심모형실험 결과가 직접적으로 차수벽이 인장응력에 안전함을 보여준다고는 할 수 없으며, 단지 실제 콘크리트의 허용 인장응력과의 비교를 통해 본 원심모형실험으로 산정한 허용 인장응력이 실제 거동을 유사하게 모사하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 산정된 인장응력은 이승호(2007)가 실제 댐 현장에서 변형율계(strain gage)를 통해 측정한 0~2MPa 범위의 인장응력 분포와 유사한 경향을 나타내고 있다.

3.3 정부 및 하류 사면 침하

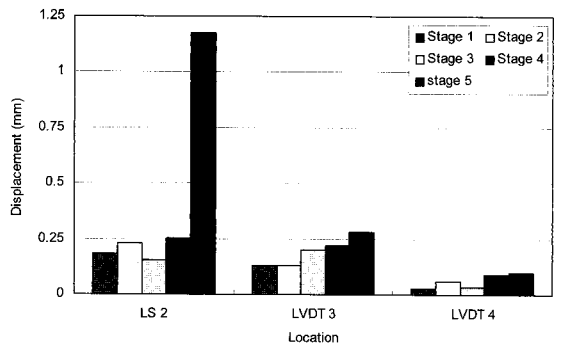
LVDT를 통해 수위 상승에 따른 댐 정상부 및 하류 사면의 침하 계측 결과(그림 7, 표 5), 최종 수위시 댐 정부에서는 0.6~1.2mm의 침하가, 하류 사면은 최대

표 5. 수위 변화에 따른 정부 침하량

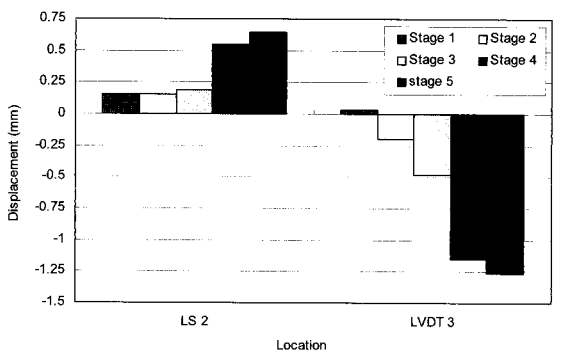
모형에서의 수위 (원형기준)	침하량(Model 1)		정부 침하량 s/H(%)	침하량(Model 2)		정부 침하량 s/H(%)	침하량(Model 3)		정부 침하량 s/H(%)
	모형(mm)	원형(mm)		모형(mm)	원형(mm)		모형(mm)	원형(mm)	
90mm (0.24H)	0.18	12.7	0.05	0.16	11.0	0.04	0.49	34.4	0.13
155mm (0.42H)	0.23	16.1	0.06	0.16	11.0	0.04	0.56	39.5	0.15
220mm (0.59H)	0.16	11.0	0.04	0.18	12.9	0.05	0.71	49.4	0.19
285mm (0.77H)	0.26	17.9	0.07	0.55	38.2	0.15	0.74	52.0	0.20
350mm (0.95H)	1.18	82.4	0.32	0.64	44.9	0.17	0.83	58.3	0.22

※ s : 침하량, H : 댐 높이(m)

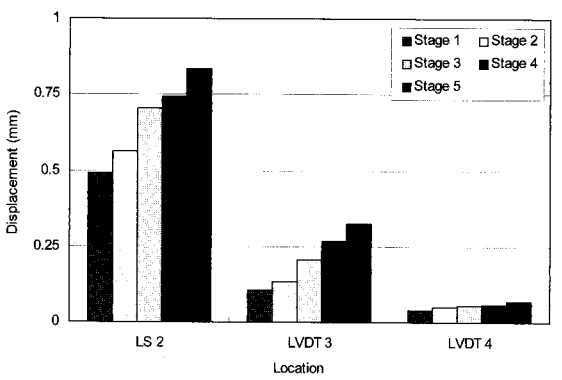
0.3mm의 침하가 계측되었다. Model 1에서 최종 수위시 침하가 이상적으로 증가한 부분을 제외하면, 거의 대부분의 경우에서 수위 상승에 따른 댐 정부 침하량이 차수벽 강성이 작아질수록 증가하는 모습을 보였다. 이는 차수벽 강성이 댐체 거동에 영향을 미치고 있음을 보여주는 결과로서 향후 차수벽 강성이 다른 현장에서의 계측값과 수치해석을 통해 보완적인 연구가 이루어진다면, 본 연구 결과는 경제적이고 안전한 차수벽 단면 설계에 좋은 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 한편 실제 댐에서의 차수벽 두께를 모사한 Model 2에서는 최종 수위시 침하량(s/H, %)이 0.17H%(H: 댐 높이) 이었다.



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

그림 7. 수위 상승에 따른 댐 정부 및 하류사면 침하(LS 2 : 정상부, LVDT : 하류사면)

하류 사면의 경우(LVDT 3, LVDT 4), 수위 상승에 따라 침하량이 증가하는 모습을 보였으나, 차수벽 두께 차이로 인한 일관된 경향을 찾기는 어려웠다. 또한, Model 2에서는 다른 경우와 다르게 수위 상승에 따라 swelling 현상이 발생하기도 하였다.

3.4 토압

본 실험에서는 모형 차수벽 하부 transition zone과 댐체 내부에 토압계를 설치하여, 차수벽 강성에 따라 각 지점에서의 토압 변화 양상을 파악하고자 하였다. 하지만 토압계 설치 위치의 안정화 곤란, 토압계에 비해 상대적으로 큰 조립재, 토압계 설치 후 상부에 누적되는 다짐 영향 등으로 인해 고속 회전 중 각 위치에서의 신뢰할만한 토압 계측이 쉽지 않았다.

즉 transition zone에서의 토압을 측정하기 위해 차수벽 하부에 토압계를 설치한 경우(EP 1~EP 6), 거의 모든 model에서 의미 있거나 일관된 토압을 측정할 수 없었으며, 댐체 내부에 설치된 2개의 토압계(EP 7, EP 8)에서도 역시 정확한 토압을 계측할 수 없었다. 특히 댐체 하부에 설치된 토압계(EP 7)의 경우, 계측기 설치 후 상부에 계속적으로 재료가 누적되어 다져짐으로 처음부터 신뢰성 있는 자료를 취득할 수 없었다. 따라서 향후 댐체 내부 토압 혹은 내부 응력을 측정하기 위해서는 계측기의 기능 보완 또는 새로운 형태의 계측기 개발이 요구된다.

4. 현장계측 자료와의 비교 분석

4.1 국내·외 계측 결과 사례

본 연구에서 호주, 중국, 브라질 등 국내·외 25개소에서 측정된 CFRD의 계측자료(김용성 등, 2006)를 이용하여 분석에 사용하였다. 그림 8은 이를 자료로부터 구한 담수 후 경과시간에 따른 CFRD의 최대 정부침하량을 나타낸 것이다.

그림 8에서 경과시간에 비례하여 정부침하량의 증가량이 점차 줄어드는 양상을 볼 수 있으나 일부 댐에서는 계측 시간이 다른 댐의 경우보다 짧음에도 불구하고 정부침하량이 오히려 많은 경우도 볼 수 있다. 이러한 양상은 담수 후 댐체의 거동은 제체의 축조 규모, rockfill 재료의 물성 및 축조방법 등에 따라 영향을 받기 때문이

다. Hunter와 Fell(2003)은 초기 담수에 의한 정부침하량을 매우 높은 강도의 다짐식 락필(rockfill)은 0.02H%~0.05H%, 중간, 혹은 높은 강도의 다짐식 락필은 댐높이(H)로 정규화된 침하량이 0.1H%~0.15H% 정도임을 보고한 바 있다. 담수 후 3년 이후부터 침하량 증가가 급격히 둔화되는 특성(Fitzpatric 등, 1985)을 감안하고 그림 8의 전체적인 경향을 보면 정부침하량은 평균 0.194H%(A선)이며 대부분 0.35H%(B선)이하임을 알 수 있다. 다만, Xingo(0.621), Buan(0.408), Tianshenqiao(0.596) 등은 댐 설계기준(2005)의 설계단계에서의 장기침하량 예측기준인 0.1H%~0.35H%를 훨씬 초과하고 있으며 이는 각각 축조재료의 낮은 강도(Xingo; Ev=32MPa, Buan; Ev=25MPa)와 다른 댐에 비해 훨씬 더 높은 댐 형상(Tiashenqiao; H=178m)에 기인한다. 따라서 CFRD 설계시 정부침하량을 추정함에 있어 댐 설계기준의 일반적 적용보다는 설계대상 댐 축조재료의 특성 및 제체의 형상을 고려한 적용이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 9는 담수 후 경과시간에 따른 CFRD의 차수벽 처짐량을 댐 높이로 정규화하여 퍼센트(%)로 나타낸 것이다. 국내에서는 CFRD의 차수벽 처짐에 대한 연구가 미미하나, 호주, 브라질, 중국 등 외국에서는 활발한 편으로, 호주의 CFRD에 대한 계측자료 분석 결과 차수벽의 처짐량은 정부침하량의 0.6배에 해당하며, CFRD의 담수 후 3년차부터 10년차까지의 평균 처짐속도는 3mm/년 정도임이 보고된 바 있다(Fitzpatric 등, 1985). Pinto와 Marques(1998)는 차수벽에 직각으로 발생하는 최대 처짐을 추정하는 접근법으로 락필의 변형계수를 도입하였으며, Liu 등(1993)은 축조재료의 수평압축계수를 이용한 차수벽의 최대연직변위 추정식을 제안하였다. 계측된 처짐량 분포 형상과 관련하여서는 Foz do Areia댐과 같이 차수벽 중앙에서 최대치를 나타내는 D자형 분포(Li, 1993)와 Cetana댐과 같이 차수벽 중앙부에서 최대치를 나타내지만 댐 정상부에서도 많은 처짐량을 나타내는 B자형 분포(Fitzpatrick 등, 1985; Wu 등, 2000)로 나뉘어 지고 있다.

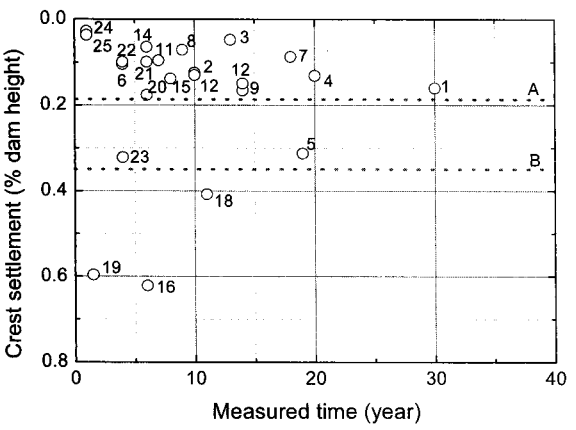


그림 8. 담수 후 경과시간에 따른 CFRD의 최대정부침하량 분포

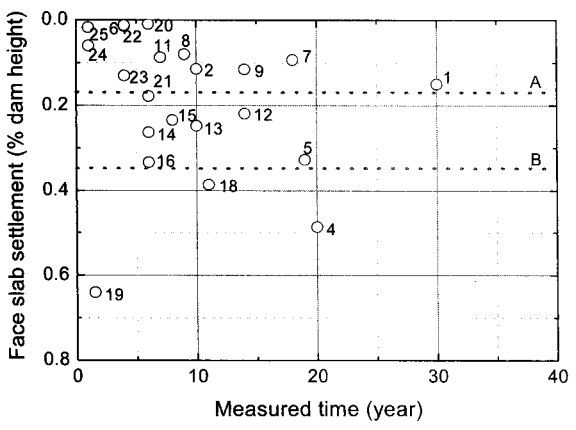


그림 9. 담수 후 시간경과에 따른 CFRD의 차수벽 처짐량 분포

그림 9에서 경과시간에 따른 차수벽의 처짐은 평균 0.184H%(A선)이고 대부분 0.35H%(B선)이하이나, Tianshenqiao(0.64), Foz Do Areia(0.486), Buan(0.386) 등에서 비교적 큰 값을 보이는 것은 각각 다른 댐에 비해 훨씬 더 높은 댐 형상(Tiashenqiao; H=178m) 및 축조재료의 낮은 강도(Foz Do Areia; Ev=32MPa, Buan; Ev=25MPa)에 기인한다. 따라서 CFRD 설계시 차수벽의 처짐량을 추정함에 있어 설계대상 댐 축조재료의 특성 및 제체의 형상과 밀접한 관련이 있음을 주지해야 할 것으로 판단된다.

그림 8과 그림 9의 측정자료로부터 정부침하량과 차수벽 처짐량의 관계를 구해보면, 차수벽 처짐량은 정부침하량의 약 0.8배정도인 것을 알 수 있다.

$$\text{차수벽 처짐량} = 0.809 \times \text{정부 침하량} \qquad (4)$$

이는 Fitzpatrick 등(1985)이 주장한 0.6배와는 다소 차이를 나타내는 것으로 추후 CFRD 설계시 차수벽 처짐량을 과소 평가해서는 안될 것이며, 이에 대한 충분한 보완책이 필요할 것으로 판단된다.

4.2 현장계측 자료와의 비교 분석

분석 대상 계측 자료 중 비교적 초기 담수기간(6년 이하) 동안 국내 댐에서 측정된 자료와 원심모형실험 결과를 비교하였다. 표 6은 원심모형실험 결과와 분석 대

표 6. 실험 결과 및 계측자료에 의한 정부침하량 및 차수벽 처짐량 비교

구 분		정부침하량 s/H(%)	차수벽처짐량 δ/H(%)	단위중량 (kN/m³)
원심모형 실험 결과	Model 1(250)*	0.07	0.26	21.1
	Model 2(180)*	0.17	0.90	21.1
	Model 3(100)*	0.22	0.85	21.1
현장계측 자료	Yongdam	0.18	0.01	19.6
	Miryang	0.10	0.18	21.3
	Sancheong(L)	0.10	0.01	20.4
	Sancheong(U)	0.32	0.01	20.4
	Jangheung	0.03	0.06	20.2
	Daegok	0.04	0.02	21.1
	평 균	0.13	0.05	20.5

* : ()는 표 1에서 모형의 차수벽 휨강성

상 자료 중 우리나라 CFRD의 정부침하량 및 차수벽 처짐량을 나타낸 것이다.

비교 결과 전체적으로 원심모형실험을 통해 계측된 정부침하량 및 차수벽의 처짐량이 현장 계측 자료보다 높게 나타났다. 원심모형실험에서 측정된 정부침하량(s/H)을 현장 계측 자료와 비교하면, 원형을 모사한 Model 2의 결과 0.17H%는 계측 결과의 평균값 0.13H%와 매우 유사한 값임을 알 수 있다. 이는 원심모형실험을 통해 수위 변화에 따른 댐 정상부의 침하량을 비교적 실제와 유사하게 예측할 수 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 하지만, 차수벽 처짐량(δ/H)의 경우, 계측치의 평균값이 0.05H%인데 반하여 원형을 모사한 Model 2에서는 0.90H%로 나타났다. 즉 현장 계측 자료에 비해 원심모형실험에서 차수벽 변형이 매우 크게 측정되었다.

차수벽 변형에 있어서 원심모형실험과 현장 계측 결과 차이의 원인으로는 모형 차수벽 하단 구속 상태, 모형 차수벽과 transition zone의 interface 처리 한계, 콘크리트 차수벽 설치 과정 모사 한계, 원심모형실험 시 water bag 및 계측기의 댐 거동 간섭 효과 등을 들 수 있으며, 이러한 요인이 복합적으로 작용하여 차수벽의 변형이 실제보다 과도하게 측정된 것으로 판단된다.

하지만 이러한 차수벽 변형의 차이와 일부 불완전한 계측치에도 불구하고, 정부 침하량 및 차수벽 처짐량 비교 결과를 종합적으로 판단해보면, 댐의 축소 모형을 대상으로 수행한 원심모형실험을 통해 실제 구조물의 거동을 비교적 높은 정확도로 모사하였다고 판단되며, 이러한 검증을 거친 원심모형실험 결과는 수치해석의 비교 자료와 극한상태에서의 댐 거동 모사의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 원심모형 시험을 통해 실제 CFRD의 거동을 충분히 정량적으로 유사하게 모사할 수 있음을 확인하였으며 향후 보다 다양한 조건에서 원심모형실험을 수행하여 댐 거동을 파악하고자 할 때 좋은 참고자료가 될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 초기 담수시 CFRD 거동을 파악하기 위하여 원심모형실험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다. 특히 원심모형실험 결과 중 CFRD의 거동 특성을 대표적으로 나타내는 정부 침하와 차수벽의 처짐 변형 결과는 국내 댐 현장 계측 결과와 비교하여 원심모형실험 결과의 적정성을 검토하였으며, 본 연구의 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 수위 상승에 따른 CFRD의 거동을 측정한 결과, 대부분의 경우 수위가 상승함에 따라 차수벽의 변형량은 증가하였으며, 최종 단계에서의 차수벽 변형량의 경우 Model 2와 Model 3이 유사하게 나타났다. 하지만 강성이 상대적으로 큰 Model 1에서는 상이한 모습을 보였으며, 이러한 차수벽 강성에 따른 차수벽 거동 차이는 일차적으로 차수벽 강성의 차이에서 기인하나 이외에도 댐 축조의 불균질성, 계측기의 오차 등도 일부 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 측정된 차수벽의 최대 변형은 실제 댐 구조물의 강성을 모사한 Model 2에서 0.90H%(H : 댐높이)로 나타났다.

(2) 모형 차수벽의 후면에 변형율계를 부착하여 차수벽 변형으로 인해 유발되는 응력을 측정한 결과, 대부분 인장응력을 의미하는 '+ 변형율'을 보였으며, Model 2에서는 최대 인장응력이 0.49MPa, Model 3에서는 0.13MPa로 산정되었고, 유발된 인장응력은 허용치 이내의 값을 나타내었다.

(3) LVDT를 통해 수위 상승 따른 댐 정상부 및 하류 사면의 침하 계측 결과, 최종 수위시 댐 정부에서는 0.6~1.2mm의 침하가, 하류 사면은 최대 0.3mm의 침하가 계측되었으며, 대부분의 경우 수위 상승에 따른 댐 정부 침하량이 차수벽 강성이 작아질수록 증가하는 모습을 보였다. 한편 실제 댐에서의 차수벽 두께를 모사한 Model 2에서는 최종 수위시 댐높이로 정규화한 침하량(s/H)이 0.17H%를 나타냈다.

(4) 초기 담수시 CFRD의 일반적인 거동을 파악하고 원

심모형실험 결과와의 비교를 위해 국내·외 25개소 CFRD의 계측자료를 수집 정리한 결과, 담수 후 3년 이후부터 침하량 증가가 급격히 둔화되는 특성을 확인하였으며, 초기 담수시 댐높이로 정규화한 최대 정부침하량(s/H)은 평균 0.194H%정도로서 일부 큰 침하를 보인 경우도 있었지만, 대부분 0.35H% 이내의 값을 나타내었다. 또한 차수벽 처짐량은 정부침하량의 약 0.8배 정도인 것으로 확인되었다.

(5) 수집된 CFRD 계측 자료 중 국내 댐 자료와 본 원심모형실험 결과를 비교한 결과 전체적으로 원심모형실험을 통해 계측된 정부침하량 및 차수벽의 처짐량이 현장 계측 자료보다 높게 나타났으며, 정부침하량(s/H)의 경우, 국내 댐 계측 결과의 평균값(0.13H%)은 원형을 모사한 Model 2의 결과(0.17H%)와 매우 유사한 값을 보였다. 이로부터 일부 차수벽 변형의 차이와 불완전한 계측치에도 불구하고, 댐의 축소모형을 대상으로 수행한 원심모형실험을 통해 실제 댐 구조물의 거동을 비교적 높은 정도의 정확도로 모사할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 김명모 (1991), "사면안정(XI)", *대한토질공학회지*, 제7권, 제2호, pp.87-91.
2. 김성렬, Ko, H. Y., 김명모 (2006), "원심모형실험을 이용한 액상화 모래지반의 과잉간극수압 소산거동 분석", *한국지반공학회논문집*, 제22권, 1호, pp.53-61.
3. 김용성, 김범주, 신동훈, 박한규 (2006), "CFRD의 담수 후 침하거동 예측", *대한토목학회논문집*, 제26권, 제3C호, pp.209-218.
4. 배우석, 오세욱, 신방웅 (2006), "모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험 -응력집중을 중심으로-", *대한토목학회논문집*, 제26권, 제1C호, pp.19-24.
5. 유남재, 이종호, 정길수, 박병수 (2005), "준설매립지반의 압밀거동에 관한 원심모형실험과 수치해석", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제4C호, pp.241-247.
6. 이승호 (2007), "댐 거동 분석에서의 strain gauge를 이용한 단일계측에 관한 연구", *한국지반환경공학회 논문집*, 제8권, 제1호, pp.5-11.
7. 임은상, 서민우, 하익수, 김우구 (2005), "원심모형시험기를 이용한 댐수위 변화에 따른 댐체의 거동 모사", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제2C호, pp.95-102.
8. 하익수, 서민우, 김형수 (2006), "CFRD 차수벽지지존 강성이 콘크리트차수벽 거동에 미치는 영향", *대한토목학회논문집*, 제26권 제5C호, pp.351-358.
9. Clements, R. P. (1984), "Post-Construction Deformation of Rockfill Dams", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.110, No.7, pp.821-840.
10. Fitzpatrick, M. D., Cole, B. A., Kinstler, F. L., and Knoop, B. P. (1985), "Design of Concrete-Faced Rockfill Dams", *Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance*, J. B. Cooke and J. L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.410-434.
11. Hou, Y. J. (2006), "Study of Underwater Density After Riprap Construction with Geo-centrifuge", *Physical Modeling in Geotechnics-6th ICPMG '06*, Ng, Zhang & Wang (eds), Taylor & Francis Group, London, pp.425-429.
12. Hou, Y. J., Xu, Z. P., and Liang, J. H. (2004), "Centrifuge Modeling of Cutoff Wall for CFRD Built in Deep Overburden", *Proc. of Int. Conf. of Hydropower*, Yichan, China, pp.86-92.
13. Hunter, G., and Fell, R. (2003), "Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, Vol.129, No.10, pp.909-917.
14. Koushige, N., Okumura, T., Narita, K., and Murase, Y. (1995), "Centrifuge Model Tests on Hydraulic Fracturing in Fill-type Dams", *Proceedings of annual conference of the JSCE*, Vol.50, pp.834-835.
15. Li, Z. (1993), "Deformation Observation on Longxi Concrete Face Rockfill Dam", *Proc. of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams*, Beijing, Vol.2, pp.514-521.
16. Liu, F., Chen, Y., Liu, J., and Ni, Y. (1993), "Construction Materials Selection and Characteristics of Wan An Xi Concrete Faced Rockfill Dam", *Proc. of International Symposium on High Earth-Rockfill Dams*, Beijing, Vol.1, pp.272-285.
17. Materon, B. (1985), "Alto Anchicaya Dam - Ten Years Performance", *Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance*, J. B. Cooke and J. L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.73-86.
18. Mikasa, M, Mochizuki, A., and Matumoto, T. (1981), "Stability Tests of a Rockfill Dam by Centrifuge", *Proceedings of 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.3, pp.475-478.
19. Pinto, N. L. S., and Marques F. P. (1998), "Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs", *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol.5, Issue 6, pp.28-31.
20. Soydemir, C., and Kjaernsli, B. (1979), "Deformation of Membraine -Faced Rockfill Dams", *Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3.
21. Wu, H., Wu, J., Wang, S., Wu, Q., and Cao, K. (2000), "Ten Years Surveilance of Chengbing Concrete Face Rockfill Dam", *Proc. of International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, Beijing, pp.595-605.
22. Xing, H. F., Gong, X. N., Zhou, X. G., and Fu, H. F. (2006), "Construction of Concrete Faced Rockfill Dams with Weak Rocks", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.132, No.6, pp.778-785.
23. Xu, Z., Hou, Y. J., Liang, J., and Han, L. (2006), "Centrifuge Modeling of Concrete Faced Rockfill Dam Built on Deep Alluvium", *Physical Modeling in Geotechnics-6th ICPMG '06*, Ng, Zhang & Wang (eds), Taylor & Francis Group, London, pp.435-440.
24. Zhang, L., and Hu, T. (1994), "Evaluation of the Cut-off Structures of Rockfill Dam", *Centrifuge 94*, Leung, Lee & Tan (eds), Balkema, Rotterdam, pp.593-598.

(접수일자 2007. 4. 18, 심사완료일 2007. 8. 10)