

수위 상승에 따른 CFRD(콘크리트 표면차수벽형 석괴댐)의 거동 모사 원심모형시험

Centrifuge tests for simulating the behavior of CFRD with increasing water level

서민우¹⁾, Min-Woo Seo, 임은상¹⁾, Eun-Sang Im, 김용성²⁾, Yong-Seong Kim, 하익수¹⁾, Ik-Soo Ha

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

²⁾ 소방방재청 재해경감대책팀 토목사무관, Deputy Director, Disaster Mitigation Measures Team, National Emergency Management Agency

SYNOPSIS : As the number of CFRD constructions increases, the necessity of an accurate assessment on its behavior also has been increasing accordingly. The performance of concrete faced rockfill dam (CFRD) under different water levels is greatly concerned by dam engineers and designers in the world. However, domestic research on CFRD design and construction has yet been insignificant. This study deals with three centrifuge model tests, mainly investigates the deformation of the concrete faced slabs with different face slab stiffness under different water levels. 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 was adopted in the three model tests. The water level control facility was specially designed for this experiment to control the water level rise and drawdown during centrifuge flight. Although most of the results from the three model tests are satisfactory, it is also required that the centrifuge test results should be compared with those of numerical analysis and field measurements to analyze the centrifuge test results more in detail.

Key words : CFRD, Dam behavior, Centrifuge, Stiffness of the face slab, Water level of reservoir

1. 서 론

최근 들어 국내에서 설계 및 시공되는 대부분의 댐이 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete Faced Rockfill Dam, 이하 'CFRD'라 약칭함)이나 국내에서는 관련분야 역사가 오래되지 않아 많은 자료가 축적되지 못하였으며, 따라서 CFRD의 설계 및 시공시 외국의 사례에 의존하는 경우가 대부분이다. 일반적으로 CFRD 관련 연구는 현장 계측, 수치 해석, 모형 시험 등을 통해 수행되는데, 국내에서 수행된 현장 계측 자료의 경우 체계적인 연구를 위해서는 현재까지의 축적된 자료로는 부족한 편이며, 수치해석 역시 현장 계측 및 실내 시험 결과와의 비교를 통해 보완되어야 할 부분이 아직 많이 남아 있다. 또한 1G 상태에서 이루어지는 댐 모형시험은 댐 거동에 큰 영향을 미치는 댐 체체의 응력 조건을 제대로 구현할 수 없기 때문에 시험 결과에 많은 한계를 지니게 된다. 이에 외국에서는 축소된 댐 모형을 대상으로 실 응력상태를 구현할 수 있는 원심모형시험을 통해 댐 관련 연구를 수년간 수행해왔으며, 그 결과로부터 안전하고 경제적인 댐의 설계 및 시공에 기여해왔다(Koushige 등, 1995; Mikasa 등, 1981;

Zhang과 Hu, 1994). 댐 연구에 있어서 이러한 한계를 극복하고자 한국수자원공사에서는 국내에서 운영 중인 최대 규모의 댐 크기까지 모형화 할 수 있는 대형 원심모형시험기(팔길이 반경 8m)를 구축 중에 있으며, 2006년 말에 운영을 시작할 예정이다.

본 연구에서는 대형 원심모형시험기의 본격적인 설치 및 운영에 앞서 댐 관련 원심모형시험 수행 실적이 많은 중국 수리수전연구소(IWHR) 대형 원심모형시험기를 이용하여 CFRD 원심모형시험을 수행하였다. 본 시험은 국내 운영 중인 D 댐의 1/2 크기를 원형으로 하여 댐 단면 및 수위 조건을 설계하였으며, face slab 강성이 다른 3개 모형 댐에 대하여 단계적 수위 상승 및 하강이 CFRD의 거동에 미치는 영향을 관찰하였다. 본 연구에 사용된 중국 수리수전연구소(IWHR) 원심모형시험기 현황은 그림 1과 같다.

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| Max. acceleration | : 300 g (259 rpm) |
| Effective payload | : 1.5 ton |
| Effective capacity | : 450 g-ton |
| Maximum radius | : 5.03 m |
| Size of the swing basket | : L×W×H = 1.5m×1.0m×1.2m |
| DC motor power | : 700 kW |
| Time to reach 300g | : 15~20 min |
| Continuous rotation time | : 24h |
| Electric slip rings | : 14 (power), 100 (signal) |
| Weight of the centrifuge | : 58t |

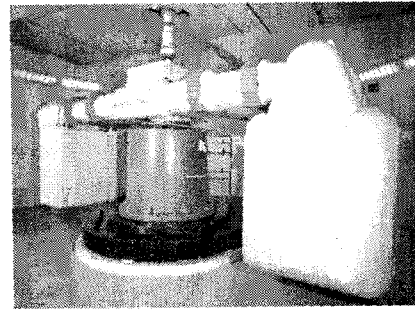


그림 1. 시험에 사용된 원심모형시험기 사양 및 사진

2. 시험 개요 및 모형 제작

2.1 모형 설계

원심모형시험은 현재 국내에서 운영 중인 D댐(CFRD)을 대상으로 이루어졌으며, 실제 댐 높이 52m의 1/2인 26m를 원형 댐 높이로 하여 모형 단면을 설계하였다. 상사비(N) 70을 적용하여 CFRD 모형의 높이는 370mm로 결정되었으며, 따라서 가해진 가속도는 70G였다. 댐 모형에서 상류측 구배는 실제 댐과 동일하게 1 : 1.4, 하류측 경사 구배는 1 : 1.8로 설계하였으며, 모형 시험시 상승되는 최대 수위는 계획 홍수 위인 350mm(원형 : 24.5m)로 설정하였다. 원심모형시험기가 회전(spinning)하면서 이루어지는 수위 상승은 5단계, 즉 90mm(Stage 1), 155mm(Stage 2), 220mm(Stage 3), 285mm(Stage 4), 350mm(Stage 5)로 나누어 이루어졌다. 최고 수위 도달 이후에는 일정 시간 동안 수위를 유지시킨 후 다시 수위를 저수위로 하강시켜, 총 시험 단계를 수위 상승, 수위 유지, 수위 하강으로 구분하여 시험을 수행하였다. 이러한 과정에 따라 시험을 수행하여 수위 변화에 따른 댐체 및 face slab의 거동 양상을 관찰하였다.

본 시험에 사용된 시험용기(container)의 크기(L×W×H)는 1335×740×685mm였으며, 시험용기의 일부는 수위 저하를 위한 water tank 공간으로 사용되었다. 그리고, 나머지 폭 400mm 부분은 CFRD 모형 축조를 위한 공간으로 이용하였다. CFRD 댐의 concrete face slab는 fiberglass 판으로 모사하였으며, 이때 사용된 환산식은 다음과 같다.

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

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

여기서, E : elastic module, I : inertia, EI : the bending stiffness, N : scale, m : model, p : prototype, c : concrete faced slab, f : fiberglass plate, $E_m^c = 28$ GPa, $E_m^f = 19$ GPa

초기 계획에 의하면 원형 concrete face slab의 stiffness는 618.75 t^m/m였다. 여기에 모형 설계시 적용된 상사비 N=70을 적용하면 모형 concrete face slab의 stiffness는 180 kg^{cm}/cm로 계산된다. 본 시험에 사용된 모형 slab의 강성과 fiberglass의 두께 및 강성은 표 1과 같다.

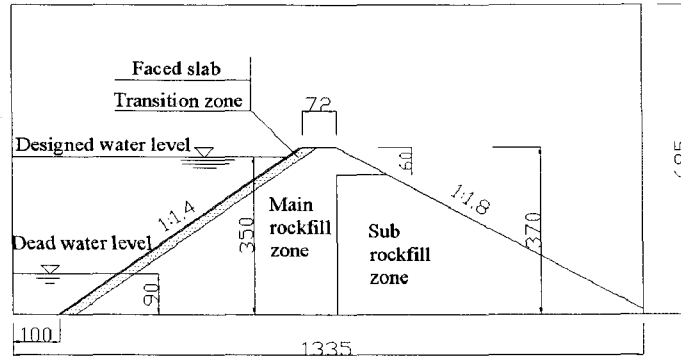


그림 2. 실험 대상 CFRD 모형의 개요도

표 1. Stiffness of model slab

| No. | Model | $E_m^c I_m^c$ (kg ^{cm} /cm) | $E_m^f I_m^f$ (kg ^{cm} /cm) | Model slab thickness (mm) | | 측정치(적용치) | |
|-----|---------|---|---|---------------------------|------|---|------------|
| | | | | Calculated | Used | $E_m^f I_m^f$ (kg ^{cm} /cm) | E (GPa) |
| 1 | Model 1 | 250 | 250 | 2.5 | 2.6 | 350.5 | 24.0 |
| 2 | Model 2 | 180 | 180 | 2.2 | 2.0 | 157.2 | 23.1 |
| 3 | Model 3 | 100 | 100 | 1.8 | 1.5 | 65.5 | 24.3 |

Face slab 모사를 위해 사용된 fiberglass 판은 여러 장의 epoxy fiberglass로 구성되어 있으며, 각 장의 두께는 약 0.1mm이다. Fiberglass 판은 기존에 모형시험에서 널리 이용되어 왔던 aluminum 판에 비하여 모형 준비와 계측기 설치 시 쉽게 가공하여 이용할 수 있다는 장점이 있다. 제조 공장에서 제출한 자료에 의하면, 밀도는 1.70~1.90g/cm³, 인장강도는 245~343MPa, 탄성 modulus(E)는 17~21GPa이다. 본 시험에는 두개의 모형 slab를 연결하여 slab 거동을 모사하였으며, 각 fiberglass slab의 폭은 200mm였다. 이 폭은 실물에서 14m에 해당하는 넓이이다.

2.2 축조재료의 특성

2.2.1 모형 재료 simulation

모형 댐의 rockfill 부분은 main rockfill, sub-rockfill, transition 부분으로 구성되며, 각기 다른 재료로 축조되었다. 3 종류의 축조재료의 입도 분포는 그림 3과 같다. 축조 재료의 입도 분포는 실제 댐에 적용된 입도 분포를 기초로 하여 결정되었으며, 댐 모형 축조에는 실제 중국 내 댐 현장에서 사용되는 골재를 이용하였다.

일반적으로 모형 조성 시에는 현장의 재료를 그대로 사용하여야 하나, 댐 축조재료의 경우 실제 축조재료의 크기가 매우 커 원입도를 그대로 사용할 수 없었다. 따라서 모형시험시 적용되는 여러 가지 축소방법 중, EQR(Equal Quantity Replacing Method) 방법을 따라 모형 축조 재료의 입도를 결정하였다. 대형 삼축 시험에서 적용되는 입자 축소 방법은 앞서 언급한 Equal Quantity Replacing Method(EQR)와 Similar Particle Distribution Method(SPDM)가 있으며, SPDM은 실제 입도 분포를 동일한 Cu와 Cc

를 갖도록 이동시키는 것으로 이 경우 세립자의 증가로 재료의 투수성이 바뀔 수 있다. 본 연구에서는 rockfill 재료의 최대 입자크기를 EQRM 방법을 따라 시험용기(container)의 폭 40cm의 약 1/7(통상적으로 6~10)인 60mm로 결정하여, 원입도분포의 최대 입자크기 600mm, 300mm을 모두 동일하게 60mm로 축소시켰다. 그리고, 5mm 이하 비율은 재료의 투수 특성이 변하지 않도록 원재료와 동일하도록 유지시켰다(Hou 등, 2004). 원입도와 모형 재료의 입도 분포 및 재료 사진은 그림 3 및 그림 4와 같다.

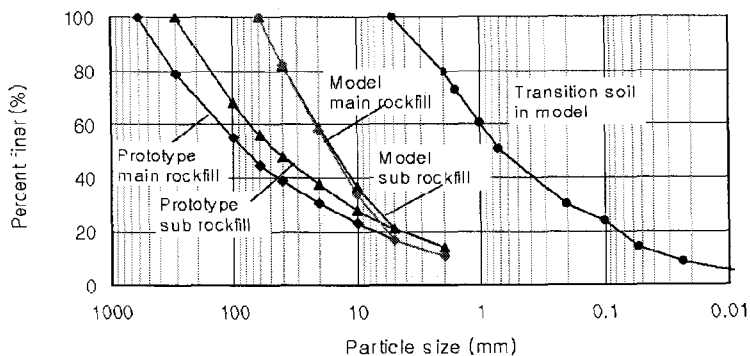
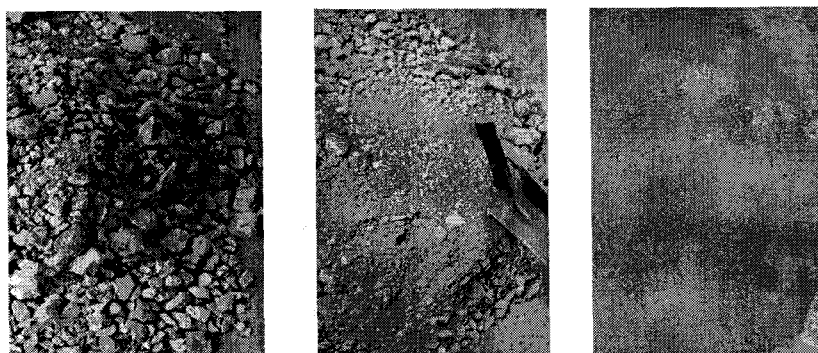


그림 3. CFRD 모형 댐 축조 재료의 입도 분포



(a) Main rockfill (b) Sub-rockfill (c) Transition material

그림 4. 댐 모형 축조 재료 사진

2.2.2 모형 축조 재료의 특성

댐 모형의 main rockfill과 sub-rockfill의 건조밀도는 2.15g/cm³로 다졌으며, 모두 동일한 골재원에서 재료를 취득하였다. 축조 재료의 강도 및 변형 특성을 파악하기 위하여, 두 종류의 삼축시험을 수행하였다. 우선 main rockfill 재료의 특성은 지름 300mm, 높이 700mm의 SJ-70 대형 삼축시험기(중국 수리수전연구소 소재)를 이용하여 측정하였고, 시료 제작시 5층 다짐으로 소요 밀도를 맞추었다. 모든 시료는 압밀 후 배수 상태에서 전단되었으며, 가해진 구속압은 0.4, 0.8, 1.2, 1.6MPa였다. 전단 속도는 1mm/min였으며, 최대 변형율 15%까지 시험을 수행하였다. 마찰각은 구속압이 증가할수록 감소하는 모습을 보였으며, 따라서 각 구속압에서의 마찰각을 산정하기 위하여 다음의 식을 적용하였다.

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

여기서, ϕ_d 는 배수 조건에서의 마찰각, ϕ_0 는 초기 마찰각, $\Delta\phi$ 는 구속압 변화에 따른 마찰각 차이, P_a 는 대기압

초기 transition zone의 밀도는 2.20g/cm³로 계획되었으나, 모형 제작시 경사면에서 계획 밀도로 다지는 것이 쉽지 않아 계획 밀도를 2.15g/cm³ 제조정하였다. 본 시료에 대하여는 일반 삼축시험기를 이용하여 강도 특성을 평가하였다. 사용된 삼축시험기의 직경은 38mm이고, 높이는 80mm이다. 전단에 앞서 시료는 포화되었으며, 압밀 비배수 상태에서 전단이 이루어졌다. 사용된 재료의 강도 특성은 표 2와 같다.

표 2. CFRD 모형 축조 재료의 전단 강도 특성

| 재 료 | 건조 밀도 (g/cm ³) | C (kPa) | ϕ_0 (°) | $\Delta\phi$ (°) | |
|--------------------|----------------------------|----------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Main rockfill zone | 2.15 | 0 | 57.0 | 13.1 | |
| Sub rockfill zone | 2.15 | 0 | 52.8 | 9.6 | |
| 재 료 | 건조 밀도 (g/cm ³) | C' (kPa) | ϕ_0' (°) | C _{cu} (kPa) | ϕ_{cu} (°) |
| Transition zone | 2.15 | 5.7 | 42.1 | 9.5 | 40.5 |

2.3 Water level control 시험 장치

본 시험에 사용된 수위 조절장치는 두 개의 solenoid 밸브와 파이프, 두 개의 수조, flow meter, 조정 시스템으로 구성된다. 수위 조절 장치 개요는 그림 5와 같으며, 본 시험에 앞서 수행된 solenoid 밸브 비교 시험을 통해 최종적으로 Yongchuang Solenoid Valve(Type : YCDK11-ZW-160-15, Max. Pressure : 10kg/cm²)를 선정하였다. 본 시험 장치는 70g 상태에서 성공적으로 작동하였으며, 회전 (spinning) 시 용기 내 수위는 모형 내에 설치된 간극 수압 값을 확인하면서 조정하였다. 용기 안에 설치된 outlet mouth는 저수위와 동일한 높이에 설치되었다(높이 90mm).

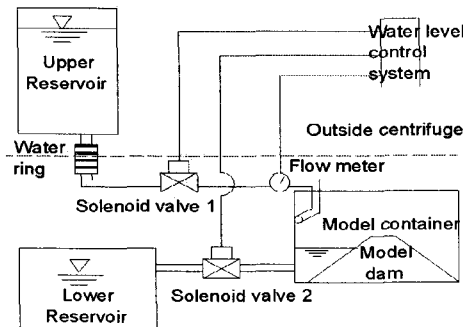


그림 5. 수위 조절 장치

2.4 계측기기 설치 (Instrumentation)

본 연구에서 주요한 관찰 부분이 상류측 slab이기 때문에 모든 계측기기는 주로 상류측에 설치되었으며, 특별히 몇몇 계측기는 face slab 뒤쪽 표면에 부착되었다. 최초에는 7개의 토압계, 5개의 LVDT, 5개의 변형율계(strain gage)를 설치하고, 수위는 90mm에서 350mm까지 상승시키는 것으로 계획하였다. 하지만 상세 실험 설계 시 변형 거동을 보다 정확하게 관측하기 위하여 몇몇 계측기기를 추가로 설치하였다. 정상부 침하와 상류 사면 상단부의 침하를 측정하기 위하여 레이저 센서를 추가하였으며, 고수위 아래 두 곳에 사면에 수직이 되도록 LVDT(LVDT 1, LVDT 2)를 설치하여 slab 변형을 측정하였다. LVDT 끝 부분이 고무 membrane을 관통하지 못하도록 플라스틱 판 위에 위치시켰으며, 또한 추가로 하류 사면에도 LVDT를 설치하여 하류측 사면 변형을 측정하였다.

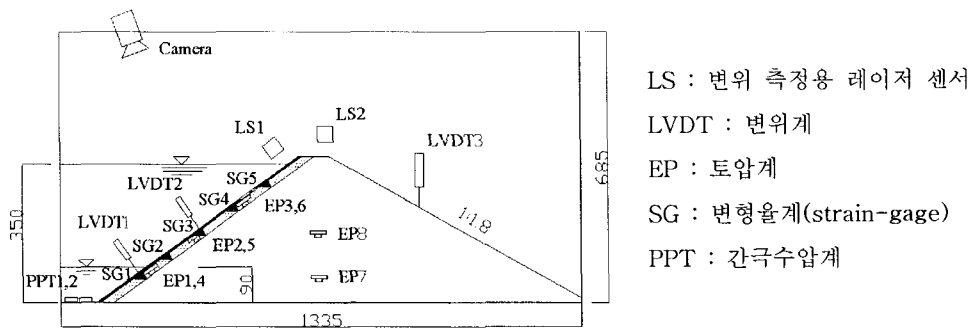


그림 6. CFRD 원심모형시험 계측기 배치도

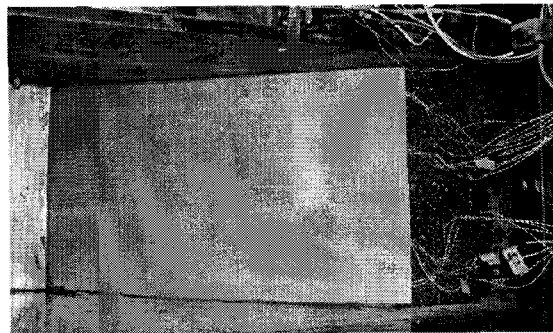
두 개의 간극수압계(PPT)를 모형조 바닥에 설치하여 내부의 수위 변화를 확인하였으며, 댐 내부에 높이를 달리하여 두 개의 토압계를 설치하였다. 두 개의 fiberglass 모형 slab가 상류측 사면에 설치되었으며, 토압계는 모형 slab 뒤편에 부착시켰다. 또한 두 개의 모형 slab(plate 1, plate 2) 뒤편에는 줄을 맞추어 각각 5개의 변형율계를 부착시켜 모형 slab에 구현되는 응력을 측정하도록 하였다. Fiberglass 판은 변형율계를 부착하기 이전에 부착이 용이하도록 에탄올 용액으로 깨끗하여 표면을 처리하였으며, 부착위치를 표시하였다. 변형율계 부착은 판 길이방향과 일치하도록 하였으며, 이 때 위치는 최대한 오차를 줄이도록 주의를 기울였다. 카메라는 시험 중 수위 변화를 관찰할 수 있도록 상류측 방향으로 설치하였으며, 모든 계측기는 시험 시작 전 보정을 실시하였다.

2.5 모형 축조 및 저수

동일한 단면에 대하여 총 3개 모형(Model 1, Model 2, Model 3) 시험을 실시하였다. 정확한 모형 축조를 위하여 4층의 다짐용 frame을 제작하였다. 각 층을 frame을 고정시킨 후, 축조 재료를 그 내부에 채워 소요 밀도(2.15kg/cm³)까지 다지는 식으로 댐 모형을 제작하였다. Main rockfill과 sub-rockfill 구역은 얇은 fiberglass 판으로 구분을 한 후, 재료를 채워 넣어 다짐을 실시하였고, 다짐시에는 약 10kg의 hammer를 이용하였다. 첫 번째 층 다짐을 실시한 후, 토압계를 내부에 위치시켰다. 토압계는 접촉 면적을 최대화하기 위하여 가는 모래로 채워진 주머니 내부에 토압계를 넣어 모형 안에 설치하였다. 내부 설치 토압계는 설치 시 최대한 수평이 유지되도록 주의를 기울였으나, 상부 다짐 등의 영향으로 인해 계속적으로 수평을 유지하는 것이 쉽지 않았다. 마지막으로 두께 10mm transition zone을 상류측 사면에 다져서 구성하였다. 하지만 층 두께가 얇아서 내부에 토압계 설치가 불가능하여, 이 부분에 설치하기로 하였던 토압계는 모두 모형 fiberglass plate 후면에 부착하였다.



(a) 모형 축조 다짐 frame



(b) 모형 fiberglass slab 설치

그림 7. 모형 축조 장면

CFRD 모사 시험시 slab에 접촉하여 직접 물을 공급하는 것은 용기 벽면과 fiberglass 사이 및 모형 slab 연결부위를 통해 댐체 내부로 누수 가능성이 높기 때문에, 본 시험에서는 고무 멤브레인으로 제작된 water bag 내부에 물을 채워 누수를 방지하면서 모형 slab에 수위로 인한 하중이 가해지도록 하였다. 또한 water bag 하부에는 배출구를 만들어, 수위 저하가 가능하도록 하였다. 사용된 멤브레인의 두께는 1.5mm였다.

3. 시험 절차 및 결과

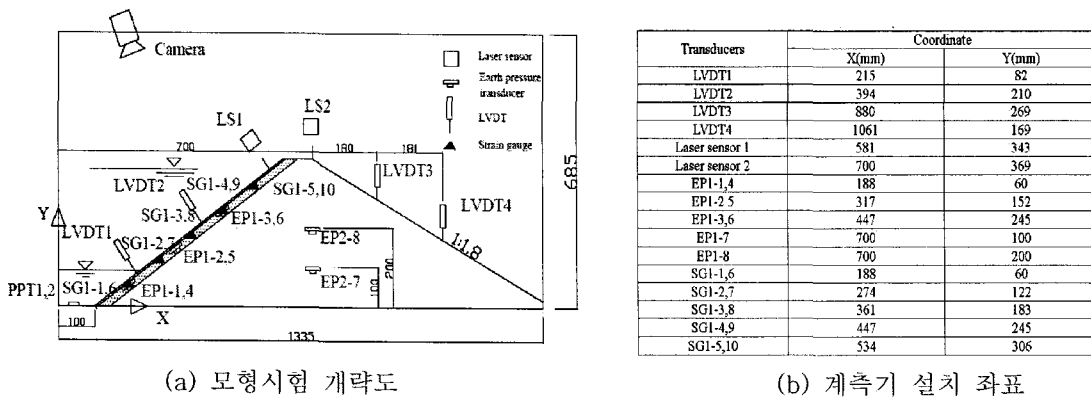
3.1 시험 절차

모형 준비와 counter weight 계산이 완료된 후, 시험 용기를 swing basket에 설치하였다. 계측기에서 나온 선들을 자료 취득장치에 연결하였으며, 자료 취득을 위해 총 64개 channel이 제공되었다. 계측된 자료는 시험기 측 근처에 놓인 컴퓨터에 저장되었으며, 무선 인터넷을 통해 주조정실로 전송되었다.

초기 모형은 1g 상태에서 제작되기 때문에 일반적으로 많은 변형 및 불균질성을 수반하게 된다. 따라서 모형체의 안정을 위하여 본 시험에 앞서 10분 동안 70g 상태로 가속시킨 후, 압밀을 위해 약 4분 동안 70g 상태를 지속시켰다. 이 후 각 모형 시험에서 수위는 5단계로 나누어 증가시켰으며, 각 단계별로 5분 동안 유지시켰다. 물은 평균 4.3ℓ/min의 속도로 공급되었으며, 마지막 단계 즉 수위 저하시에서 17.3ℓ/min 속도로 물이 배수되었다.

3.2 Model 1 시험 결과

Model 1 시험의 모형 단면 및 계측기 위치는 그림 8과 같다.

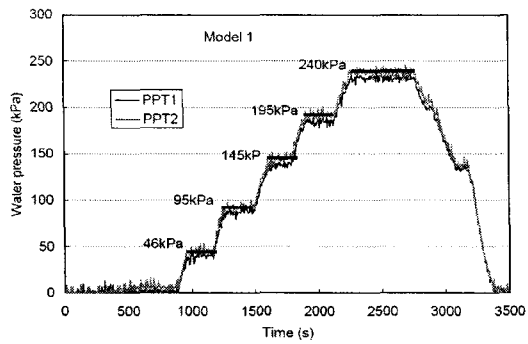


(a) 모형시험 개략도

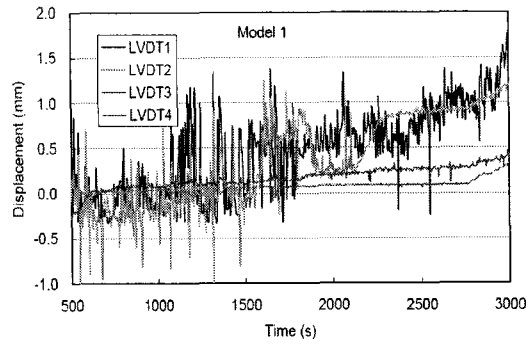
(b) 계측기 설치 좌표

그림 8. Model 1 시험 단면

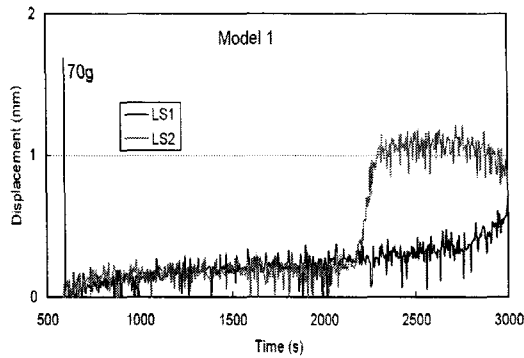
Model 1에 대하여 수행된 원심모형 시험결과는 그림 9와 같으며, 여기서 PPT1과 PPT2는 수위 상승 단계를 보여주고 있다. 상류 사면, 댐 정상, 하류 사면의 변위는 4개의 LVDT와 두 개의 레이저 센서를 이용하여 측정하였으며, 시험 결과 수위가 상승함에 따라 상류측 사면에서 변형이 발생함이 관찰되었다. 토압계는 앞서 언급한 바와 같이 정확한 설치가 어려워 정상적인 값을 내지 못하는 센서가 많았으며, 변형율계 역시 plate 1과 plate 2 사이에 상이한 결과를 보였다. Slab에는 총 10개의 변형율계가 설치되어 slab의 변형을 측정하였으며, 시험 결과에서 +는 인장을, -는 압축을 의미한다. 표 1에 제시한 바와 같이 stiffness가 다른 Model 2, Model 3의 경우도 동일한 절차를 따라 시험을 수행하였다.



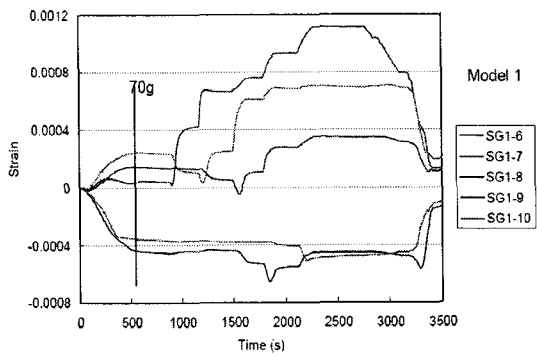
(a) 간극수압



(b) 변위계 (LVDT, 70g 가속 이후)



(c) 변위계 (레이저 센서, 70g 이후)



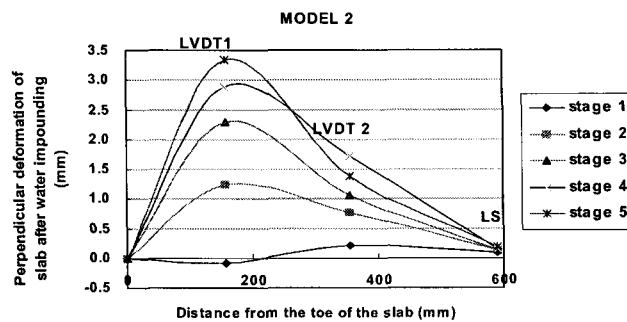
(c) 변형율계

그림 9. Model 1 시험에서 계측기 측정 결과

3.3 수위 변화 및 slab 강성이 CFRD 거동에 미치는 영향

3.3.1 수위 상승에 따른 face slab 거동

3개 모형 시험에서 측정된 자료를 바탕으로 수위 상승에 따른 fiberglass face slab의 변형을 분석하였다. 대부분 수위가 상승함에 따라 face slab의 변형량은 증가하였으나, Model 1은 Model 2 및 Model 3와는 다소 상이한 경향을 보였다. Model 1의 경우, 최종 수위시 face slab 전단면에서 비교적 일정한 1.0mm 침하가 측정되었으나, Model 2와 Model 3에서는 아래쪽에 위치한 LVDT 1에서 약 3.0mm 침하가 발생하였고, 댐 상단부에서는 상대적으로 침하가 작게 측정되었다. 그림 10은 3개의 모형 중 model 2에서 측정된 결과를 보여주고 있다.

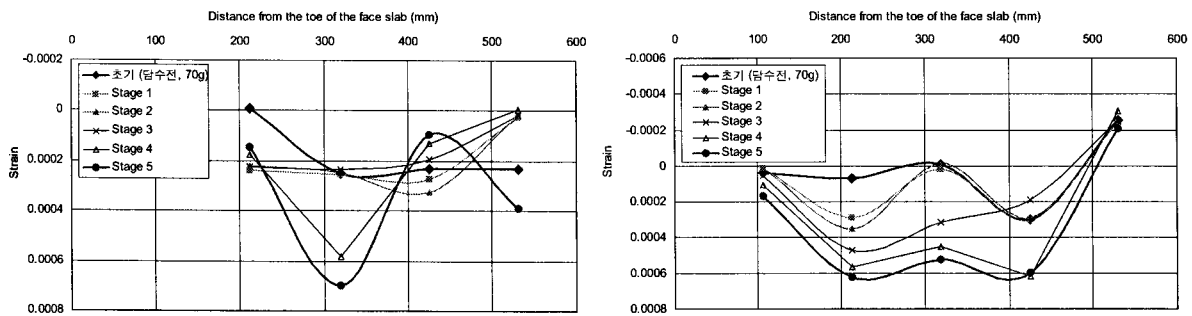


(원형 기준 수위, stage 1 : 4.5m, stage 2 : 9.0m, stage 3 : 14.5m, stage 4 : 19.0m, stage 5 : 22.0m)

그림 10. 수위 상승에 따른 face slab의 변형 (Model 2)

3.3.2 수위 상승에 따른 face slab 응력 변화

계측의 어려움으로 인하여 모든 시험에서 일반적인 경향을 찾기가 어려웠지만 대체로 ‘+’ 변형율, 즉 대부분 인장 응력을 받는 것으로 나타났다. 이는 수위 상승으로 인한 하중 증가가 face slab에 처짐을 유발시키고, 이로부터 face slab에 인장력이 유발된 것이다. 하지만 각 case 별로 크기와 유형에 차이를 보여 향후 심도 있는 분석이 필요하다.



(a) Plate 1 (SG1~SG5, + 인장, - 압축) (b) Plate 2 (SG6~SG10, + 인장, - 압축)
 (원형 기준 수위, stage 1 : 4.5m, stage 2 : 9.5m, stage 3 : 14.5m, stage 4 : 19.3m, stage 5 : 23.7m)

그림 11. Fiberglass face slab 변형율 측정 결과 (Model 2)

3.3.3 수위 상승에 따른 댐체 침하 및 토압

계측 결과, 댐 정상부에서는 최종적으로 0.3-0.9mm의 침하가 관측되었으며, 대체로 slab 강성이 증가할수록 침하가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 관계에 대해서는 향후 심도있는 고찰이 필요하다. 또한, 하류 사면에는 최대 0.3mm 침하가 계측되었으나, 일부 swelling 발생한 경우(Model 2)도 있었다.

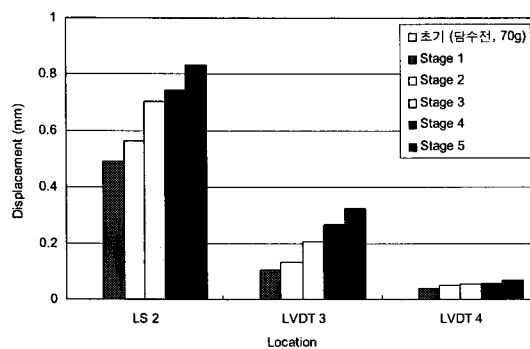


그림 12. 수위 상승에 따른 댐 정상 및 하류사면 침하 (Model 3, LS : 정상부, LVDT : 하류사면)

댐체 내부 2곳(EP 7 : 댐체 내측 하부, EP 8 : 댐체 내측 중심)에서 토압을 측정하였다. 그러나 댐체 내측 하부에 설치된 토압계(EP 7)의 경우, 댐체 축조 시 계측기 설치 후 상부에 계속적으로 재료가 누적되어 다져짐으로 정확한 값을 얻기가 어려웠으며, 그 외에 위치에서도 전반적으로 정확한 값을 얻는데 한계가 있었다. 향후 댐체 내부 토압을 측정의 경우, 보다 정교한 방법을 적용하거나 새로운 기법을 적용해야 할 것이다.

4. 결론

중국 수리수전연구소(IWHR)의 대형원심모형시험기를 이용하여 face slab 강성이 다른 3개의 CFRD 모형에 대하여 원심모형시험을 수행하였다. 시험이 진행되는 동안 수위는 5단계로 나누어 상승시켰으며, 수위 상승 및 저하는 본 시험을 위해 특별히 고안된 장치를 이용하여 이루어졌다. 채워진 물이 댐체 내부로 침투하는 것을 방지하기 위해서 reservoir 구역을 고무 membrane을 이용하여 분리시켜, 차수 상태는 유지하면서 수위 변화에 따른 하중이 face slab에 가해지도록 하였다. 모형 댐 축조에 사용된 암석 재료는 중국에서 댐 축조시 널리 사용되는 재료로, 최대 입자 크기는 시험 용기의 폭을 고려하여 60mm로 결정하였다. 그리고, 5mm 이하 비율은 재료의 투수 특성이 변하지 않도록 원재료와 동일하도록 유지시켰다. Rockfill 재료와 transition층에 사용된 재료의 강도 특성은 삼축시험을 통해 산정하였다. 또한 강성이 다른 3가지 concrete face slab는 상사비를 적용하여 각기 다른 두께를 가지는 fiberglass plate로 모사하였다.

CFRD 원심모형시험을 통해 댐체에 대한 원심모형시험에서 단기간 내에 정확한 값을 얻는 것이 결코 쉽지 않음 경험하였다. 일반적으로 원심모형시험에는 항상 불확실성과 미지의 영향이 포함되며, 본 연구에서와 같이 댐을 대상으로 하는 시험 역시 토압과 변형을 측정에 있어서 많은 어려움이 있었다. 그러나, 대체적인 경향에 있어서는 일반적인 CFRD 거동 특성과 일치하는 결과들을 얻을 수 있었으며, 향후 본 시험결과를 수치해석 및 현장 계측치와 비교하여 보다 심도있는 분석을 할 예정이다.

참고 문헌

1. 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.
2. 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
3. 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
4. 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