

## 단계축조에 의해 시공된 CFRD의 거동해석

### Analysis of CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam) Constructed by Stages

조성은<sup>1)</sup>, Sung-Eun Cho, 신동훈<sup>2)</sup>, Dong-Hoon Shin, 전제성<sup>2)</sup>, Je-Sung Jeon, 김기영<sup>1)</sup>, Ki-Young Kim

<sup>1)</sup> 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment

<sup>2)</sup> 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment

**SYNOPSIS :** In this study, a concrete faced rockfill dam constructed by stages was numerically analyzed, and the numerical results were compared with in situ measurements. The simple incremental elastic and isotropic hyperbolic model was employed to characterize the nonlinear deformation behavior of rockfill material and computational procedure followed construction sequence. A series of large triaxial tests for rockfill material were carried out to obtain mechanical input parameters. According to the analysis results, relative great additional deformation was introduced at the surface of stage-I dam body due to the loading by stage-II construction. The results reveal that numerical analysis can effectively simulate the construction processes, and some meaningful insights about the behavior of CFRD during construction were gained.

**Key words :** CFRD, hyperbolic model, face slab, rockfill, staged construction

## 1. 서 론

댐은 건설시의 여러 가지 인위적인 요인과 환경적인 요인이 복합되어 매우 복잡한 거동양상을 보인다. 따라서 모든 요인을 고려한 정확한 해석은 불가능하다. 현재의 댐 거동 해석은 주로 2차원 평면 변형조건을 기초로 이루어지고 있으며, 간혹 3차원 해석이 시도되기도 하나 아직 보편적으로 적용되고 있지는 않다. 다양한 지반재료로 축조되는 댐의 경우 그 거동특성이 매우 복잡하므로 수치해석 방법만을 이용하여 대상 댐의 거동을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 수치해석 방법은 설계단계에서의 안정성 평가 및 거동 예측, 계측된 자료를 통해 관측된 댐 거동 특성의 확인 및 규명, 현재 대상 댐의 상태 평가 및 차후 거동 예측을 위해 유용하게 사용될 수 있다.

시간을 두고 단계적으로 시공되는 댐의 경우, 기존 1단계 댐체는 2단계의 축조에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구는 시간을 두고 단계적으로 시공된 ○○댐의 2단계 축조에 의한 댐체의 거동양상 및 특징을 분석함으로써 축조과정 중 댐체의 안정성을 충분히 확보할 수 있는 기술적 검토자료를 제공하는 것을 목적으로 하였으며, 계측의 제한성을 보완하여 축조에 따른 복잡한 댐체의 거동을 보다 합리적으로 파악하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다.

대상 댐은 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)으로서, 1단계 댐의 높이는 80m(EL.225m), 길이는 410m이다. 1단계 축조 후, 저수용량의 추가 확보를 위한 2단계 축조공사가 진행되었다. 2단계 축조공사는 기존 1단계 댐 높이(80m)에 45m를 추가 축조하도록 계획되었으며, 1단계 댐체 하류사면에 대한 보강축조를 시작으로, 전단면 및 후단면으로 구분하여 2단계 축조가 진행되었다.

2단계 축조 시공중에 설치된 매설기기는 크게 상류사면 변위를 자동으로 측정할 수 있는 자동측량장

치, 댐체 내부의 침하거동을 파악할 수 있는 수직침하계와 연속침하계의 3종류이다. 이중 자동측량장치는 1단계 댐체의 콘크리트 차수벽(Face Slab)과 2단계 축조부 사면 숏크리트에 프리즘을 설치하여 주기적으로 각 측정점에 수평변위와 침하량을 측정하였으며, 수직 및 연속 침하계는 각 EL.별로 침하셀을 설치한 후 일정 시간간격으로 수직 침하량을 측정하였다.

## 2. 입력변수 및 해석 모델링

댐체의 침하는 댐의 사용성에 영향을 끼치며 과다한 변위는 장기적인 유지관리에 문제를 야기할 수 있다. 특히 1단계 완료 후 2단계를 축조한 댐체의 접합부 부분은 취약부가 될 수 있으며 이러한 경우에는 유한요소해석과 같은 수치해석이 필요하다. 특히 설정한 댐체의 구성모델과 적합한 물성치를 어떻게 파악하는지가 해석결과에 핵심적인 역할을 한다.

쌍곡선 모델(Hyperbolic Model)은 댐 재료에 대한 삼축시험에서 나타나는 전반적인 비선형성과 강도를 잘 표현할 수 있으므로 댐의 안정성 검토를 목적으로 하거나 댐 및 주변부의 변위에 따른 유지관리를 위한 유한요소해석에 적합하다. 본 연구에서는 쌍곡선 모델을 이용하여 ○○댐의 축조에 따른 거동을 해석하였다.

수자원연구원에서는 ○○댐 축조재료를 대상으로 대형 삼축압축시험을 수행한 바 있으며, 이로부터 해석에 필요한 쌍곡선모델의 변수값을 결정하였다(신동훈, 2003). 시험시와 시공시의 입도 및 다짐방법의 차이와 그에 따라 전달되는 에너지의 차이 때문에 시공밀도가 시험밀도보다 크게 나타나는 것이 일반적이며 현장밀도 측정 결과로부터도 대부분이  $2.1 t/m^3$  이상의 고밀도로 축조되었으므로 고밀도의 실험결과를 해석에 사용하였으며 사용된 변수 값들은 표 1과 같다.

표 1. 해석에 사용된 물성치

	$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	$\phi$	$E_i$ ( $kg/cm^2$ )	$K_L$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\nu$	$c$ ( $kg/cm^2$ )
Bedding	2.24	38.4	1,370	1,385	-0.10	0.76	1,246	-0.53	0.40	1.654
Transition	2.18	40.2	1,087	881	0.10	0.79	598	-0.29	0.38	1.007
Graded rockfill	2.15	39.7	714	368	0.34	0.75	187	0.27	0.30	0.521
Rockfill	2.15	39.7	746	424	0.29	0.73	210	0.21	0.29	0.437
Concrete face			2.63E6						0.30	

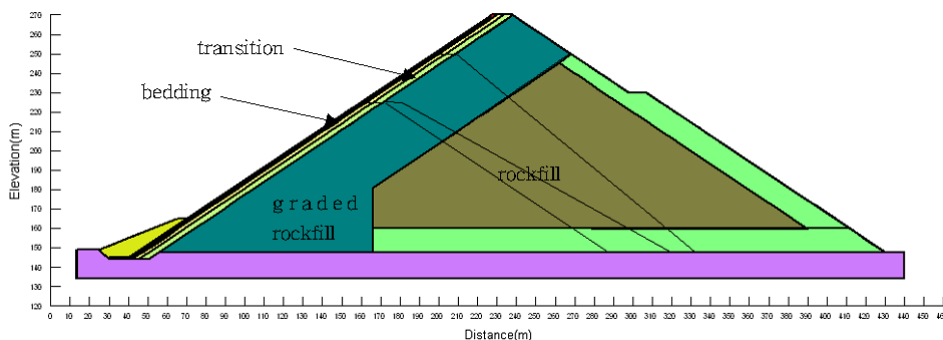


그림 1. ○○댐의 해석영역 및 재료구성

그림 1은 ○○댐의 해석영역, 재료구성 및 축조단계를 나타내며 크게 나누어 bedding zone, transition zone, graded rockfill 및 rockfill로 구분할 수 있다. 해석은 시공단계에 따라 자중을 가함으

로써 수행되었으며 요소망은 1859개의 절점과 1881개의 4절점 요소로 이루어졌다. 축조단계는 47 단계로 나누어 시공단계를 구현하였으며 해석은 EL.260m까지 축조한 상태까지 수행하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 변형형상

댐의 정확한 변위해석을 위해서는 변형특성을 실험에서 바르게 구하는 것이 필요하다. 그러나 실내시험의 경우 최대입경의 제한으로 인하여 상사입도가 사용되고, 다짐의 경우에도 중기에 의한 현장다짐에 비하면 실내시험의 다짐에너지는 작기 때문에 공시체의 거동과 실제 댐체의 거동 격차가 큰 것이 사실이다.

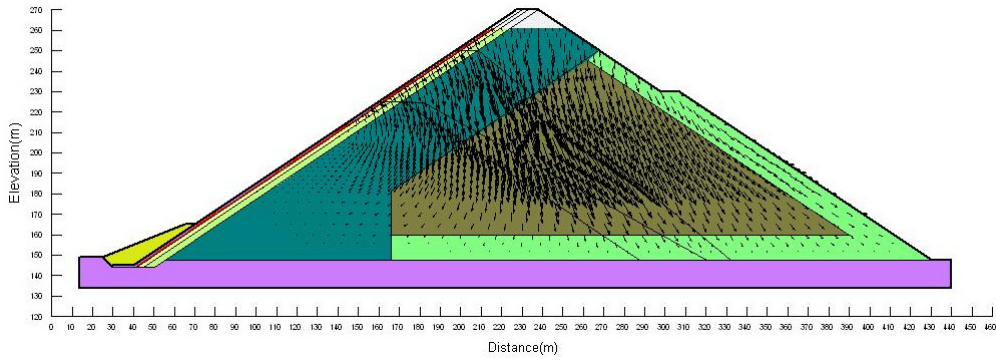


그림 2. 변위 벡터

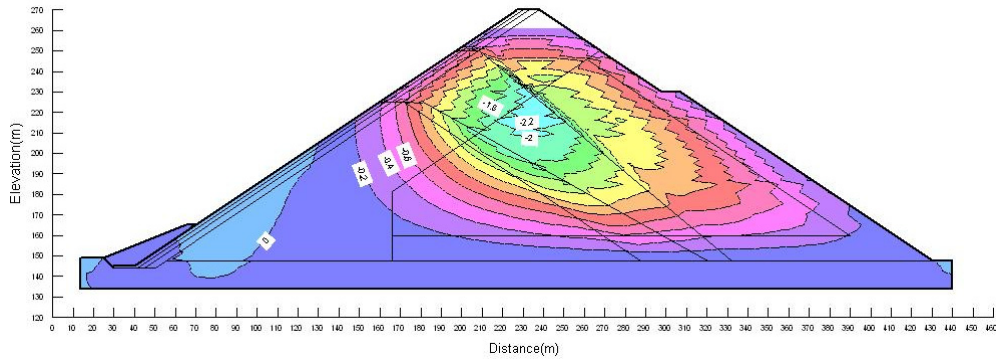


그림 3. 연직변위 Contour

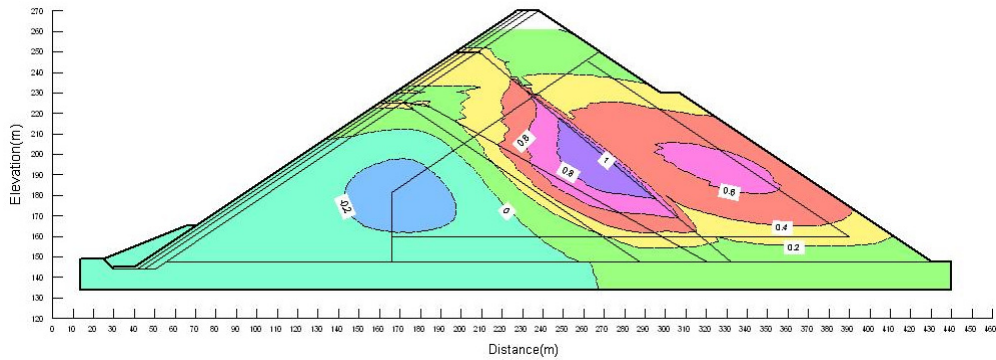


그림 4. 수평변위 Contour

축조에 의한 댐체의 거동을 구하기 위해 시공단계를 고려한 증분해석을 실시하였으며 1단계 축조 후 변위를 0으로 초기화한 후 이후의 축조과정에 의한 변위를 계산하였다.

그림 2는 축조에 의한 변위벡터, 그림 3은 연직변위 contour 그리고 그림 4는 수평변위 contour를 각각 나타내고 있다. 최대변위는 2.29m로 그림 3에서 알 수 있듯이 EL.220에서 EL.230 사이의 댐 중앙부에서 발생하였다. 2단계 축조에 의해 1단계 축조 댐체에 추가 변위가 발생하였으며 rockfill부에서 큰 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 응력분포

그림 5는 연직응력의 분포를 나타낸 것으로 응력분포는 연직상의 재료의 중량에 비례하는 모습을 나타내며 같은 높이에서 댐체 중앙부에 큰 응력이 발생하는 일반적인 경향을 나타낸다.

그림 6은 전단응력의 분포를 나타낸 것이다. bedding zone, transition zone 및 rock zone의 강성 차이 때문에 재료의 경계면에서 큰 응력 경사가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 응력의 크기는 변형계수의 크기에는 크게 영향을 받지 않지만 단위중량에 큰 영향을 받으므로 정확한 현장시공 단위중량을 구하는 것이 중요하다.

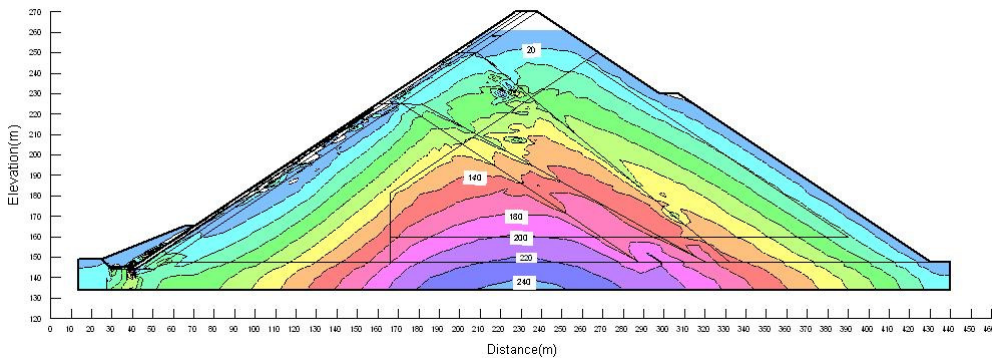


그림 5. 연직응력 Contour

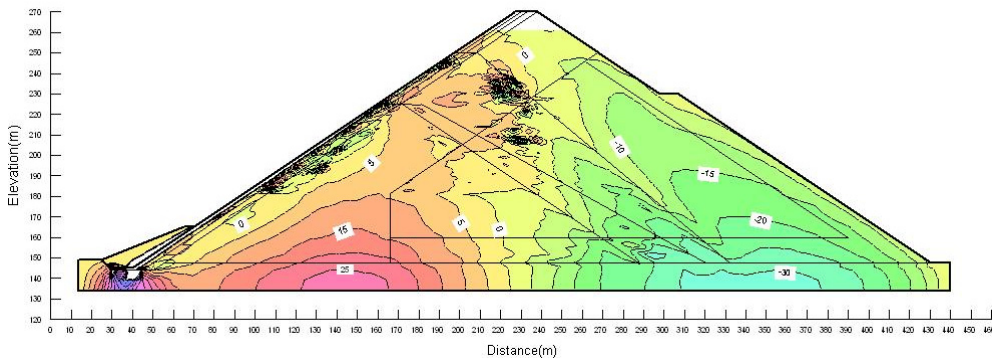


그림 6. 전단응력 Contour

### 3.3 계측값과의 비교

#### 3.3.1 댐체 내부침하

그림 7은 EL.185m에서 계측과 해석의 침하량을 비교한 것으로 상재하중이 큰 중앙부에서 큰 변위가

발생하고 상재하중이 작은 사면부로 갈수록 그 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 해석치와 계측치의 절대값은 차이가 있지만 침하의 경향은 대체로 유사한 것으로 판단된다. 그림 8은 EL.205m에서의 연직 침하를 비교한 것으로 계측과 해석이 다른 경향을 나타내고 있어 계측 값의 검토가 요구된다. 통상적인 침하경향을 고려하여 볼 때 계측값과 계측기의 위치가 바뀌었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

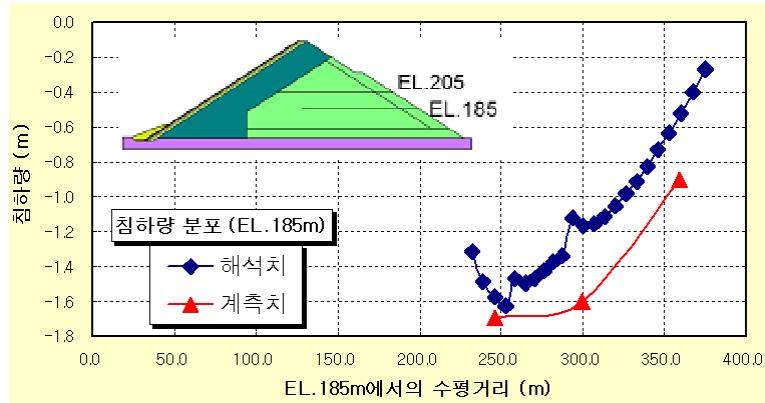


그림 7. EL.185m에서의 연직침하 비교

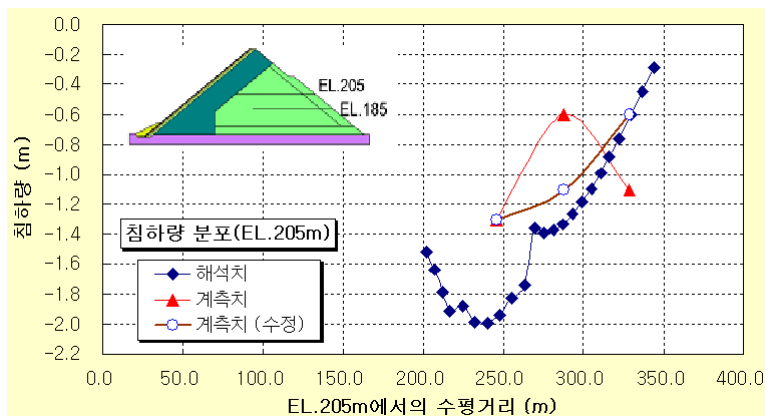


그림 8. EL.205m에서의 연직침하 비교

### 3.3.2 상류사면변위

그림 9는 상류사면에서의 수평변위를 나타낸 것으로 + 값은 상류방향, - 값은 하류방향 변위를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 일정 위치를 전후해서 변위의 방향이 바뀌고 있음을 알 수 있으며 기존 face slab에서 계측값의 거동이 본 연구에서 수행된 해석 값보다 더 강성이 큰 거동을 보임을 알 수 있다. EL.225m까지는 1차축조에 의해 사면부에 콘크리트가 타설되어 있는 상태이고 그 위는 숯크리트로 사면보호 처리만 한 상태이므로 EL.225m까지는 변형이 어느 정도 구속되는 상태여서 변위 값이 작게 발생하지만 EL.225m 상부는 변위에 대한 구속이 작은 상태이므로 상대적으로 큰 변위가 발생함을 알 수 있다.

그림 10은 상류사면에서의 연직변위를 나타낸 것으로 +는 융기, -는 침하를 나타낸다. 수평변위와 마찬가지로 일정 위치를 기준으로 축조에 의해 융기가 발생하는 부분과 침하가 발생하는 부분이 구분됨을 알 수 있다. 사면에서의 변위 양상은 절대값은 다르지만 그 경향은 유사한 것으로 판단된다.

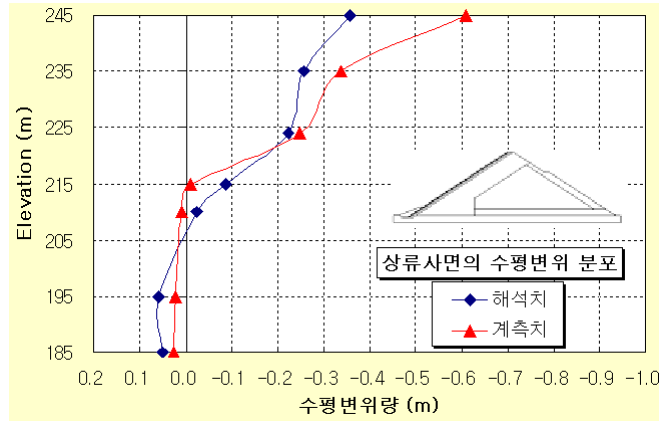


그림 9. 상류사면에서의 수평변위 비교(+ :상류방향, -:하류방향)

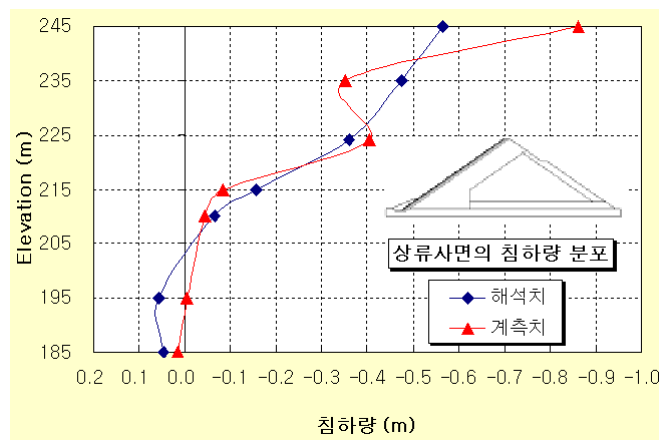


그림 10. 상류사면부에서의 연직변위 비교(+ :용기, -:침하)

#### 4. 결론

본 연구에서는 ○○댐 2차 축조공사에 의한 댐체의 거동을 파악하기 위하여 대형 삼축압축실험 결과와 쌍곡선 모델을 이용한 유한요소 해석을 수행하였으며 해석결과를 계측치와 비교 검토하였다.

해석 결과에 의하면 2단계 축조에 의하여 기존 1단계 댐체에 비교적 큰 추가적인 변형이 발생하였으며 이는 계측결과와도 비교적 잘 일치하였다. 계측값과 해석값을 비교 검토한 결과, 축조에 의한 댐체의 거동은 복잡한 시공단계에 따라 일반적인 댐 축조의 경우보다 훨씬 복잡한 거동을 나타냈으며, 품질관리의 어려움 등에도 불구하고 실측치와 계산치는 대략 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 신동훈(2003), “필댐 수치해석을 위한 댐재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구(I)”, 한국수자원공사 수자원연구원 WRII-DRC-03-4, pp.56~78.