

## 표면차수벽형사력댐의 침투거동에 관한 연구

### Study on Seepage Behavior of Concrete Faced Gravel-Fill Dam

조성은<sup>1)</sup>, Sung-Eun Cho, 김기영<sup>1)</sup>, Ki-Young Kim, 박한규<sup>2)</sup>, Han-Gyu Park, 하익수<sup>3)</sup>, Ik-Soo Ha

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

<sup>2)</sup>한국수자원공사 수자원연구원 연구위원, Senior Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

<sup>3)</sup>한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**SYNOPSIS** : CFRD (Concrete Faced Rockfill Dam) has been world-widely constructed due to a lot of advantages compared with rockfill dam and recently, sand/gravel materials, instead of crushed rock materials, are also utilized as a main rockfill material to overcome geological and environmental problems. In this paper, the process of water infiltration into the originally unsaturated sand/gravel-fill dam is studied using two-dimensional saturated-unsaturated seepage theory. According to the results of seepage analysis, if the effective drainage zone is installed in the dam, the reservoir water infiltrate into the dam along a downward flow path towards the lower drainage area. The main body constructed with sand/gravel materials, therefore, remains unsaturated.

**Key words** : CFGD, Face Slab, Seepage, Unsaturated soil

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 대부분의 댐이 표면차수벽형석괴댐 (CFRD, Concrete Faced Rock-fill Dam) 형식으로 축조되지만, 댐사이트에 분포하는 하상 모래, 자갈을 축조재료로 사용하는 표면차수벽형사력댐 (CFGD, Concrete Faced Gravel-fill Dam)은, 석산개발을 적게 하여 환경훼손을 최소화하고, 인근에 분포되어 있는 재료를 사용하여 경제적이란 측면에서 매우 유리한 댐 형식으로 주목 받고 있다. 최근 국내에서도 사력재를 댐의 주축조재로 이용하도록 댐이 설계된 바 있다. CFRD는 콘크리트 차수벽 및 차수벽 지지층의 차수효과로 인해 댐체 내부에 간극수압이 발생하지 않아 시공이 용이하며, 매우 안정하나 주축조 재료로 빈입도의 하상 사력재료를 사용하는 경우 적절한 배수시스템이 설치되지 않으면 체에 간극수압이 발생할 수 있으므로 배수존의 설치에 댐체의 안전에 매우 크게 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 CFGD의 침투해석을 통하여 차수벽에 균열이 발생된 경우 댐체의 침투 거동을 검토함으로써 적절한 배수방법을 도출하고자 하였다.

## 2. 침투해석

CFRD의 차수벽에 균열이 발생한 경우 균열부위를 통과하는 침투수가 어떤 거동특성을 보이는지에

대한 연구는 그 중요성에 비해 현재까지 매우 미진한 상태이다. 특히 차수벽을 지난 침투수가 bedding zone과 filter zone에서 어떤 궤적을 그릴지는 설계에 있어 매우 귀중한 통찰력을 제시해 줄 수 있다. 따라서 실제 관측은 어렵지만, 수치해석적 접근을 통하여 침투거동을 살펴보고자 한다. 본 해석에 사용한 프로그램은 포화-불포화 흐름을 고려할 수 있는 상업용 유한요소 해석 프로그램인 SEEP/W이다. 침투해석은 댐에서의 침투 파괴에 대한 민감도를 평가하고 댐사면의 안정성을 검토하기 위한 수리학적 조건을 연구하기 위한 중요한 도구이다. 예전의 비정상류 침투해석은 포화흐름이론에 바탕을 두었으며, 자유수면의 위치를 결정하는 것이 중요한 요소였으며 유한요소법, 유한차분법 및 경계요소법이 사용되었다. Freeze (1971)와 Neuman (1972)은 비정상류해석을 위해 불포화 흐름을 고려한 최초의 연구자들이다. 후에, 포화-불포화 흐름 이론을 이용한 2차원 침투해석이 저수지의 담수해석과 수위변동의 해석을 위해 사용되었다 (Lam 등 1978; Ng과 Small 1995; Chen등 2005).

## 2.1 포화-불포화 침투이론

Darcy의 법칙은 포화토와 불포화토에서 모두 유효하다고 여겨진다 (Frelund와 Rahardjo 1993). 포화 흐름과 불포화 흐름의 차이점은 투수계수가 상수가 아니라 포화도 혹은 모관흡수력의 함수이고 불포화토의 체적함수비가 시간에 따라 변화할 수 있다는 것이다. 불포화토를 통한 물의 흐름에 대한 지배방정식은 연속방정식에 Darcy의 법칙을 도입하여 나타낼 수 있다. 흙의 수리적 특성이 직교이방성일 경우 2차원 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = - \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $k_x$ ,  $k_y$ 는  $x$ ,  $y$ 방향의 투수계수;  $h$ 는 총수두;  $\theta_w$ 는 체적함수비;  $t$ 는 시간이다.

두개의 독립적인 응력상태변수 (stress state variable), 즉 순수직응력 ( $\sigma - u_a$ ,  $\sigma$ 는 총수직응력이고  $u_a$ 는 간극공기압)과 모관흡수력 ( $u_a - u_w$ ,  $u_w$ 는 간극수압)이 응력상태와 체적변화를 나타내기 위해 사용되면 등방의 불포화토의 물의 상(phase)에 대한 간략화 된 구성관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Lam 등 1987).

$$d\theta_w = \frac{\partial \theta_w}{\partial (\sigma - u_a)} d(\sigma - u_a) + \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} d(u_a - u_w) \quad (2)$$

만약 비정상 침투과정 중에 순수직응력과 흙구조의 변형이 무시되고 흙에서의 공기가 연속적인 상태에 있다고 가정하면 체적함수비의 시간에 대한 변화율은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = - \frac{\partial \theta_w}{\partial \psi} \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (3)$$

여기서,  $\psi = u_a - u_w$ 는 모관흡수력이다. 식(1)과 식(3)을 조합하고 간극수압을 총수두의 항으로 표현하면 2차원 비정상 흐름에 대한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \gamma_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

여기서  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량이다. 식(4)에 의하면 해석을 위해 함수특성곡선 ( $\theta_w$ 와  $\psi$ 의 관계)과 투수계

수함수가 필요하다.

## 2.2 입력변수 및 모델링

해석대상인 ○○댐은 높이 64m, 길이 472m의 CFGD로 주축조 영역에 하상의 사력재를 사용하고 투수성이 양호한 선별재료를 상류쪽에 배치하여 배수를 유도하도록 설계되었다. 각 존에 대한 축조재료와 해석단면의 유한요소망은 그림 1과 같다. 해석에 사용된 각 재료의 포화투수계수는 표 1과 같다. 기초암 반부는 제체에 비해 투수계수가 작으므로 불투수영역으로 가정하여 해석하였다.

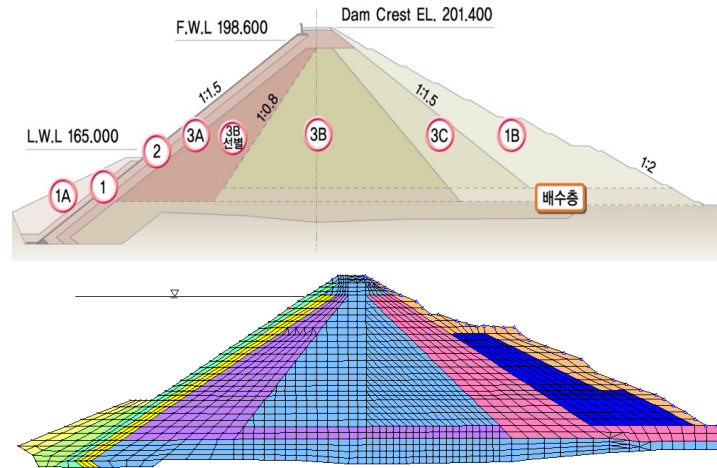


그림 1. 해석단면 및 유한요소망

함수특성곡선은 흔히 함수저장곡선 (water retention curve)이라고도 하며 불포화지반 거동을 이해하는데 매우 중요한 역할을 한다. 함수특성곡선은 불포화 지반 내 체적함수비 변화에 따른 모관흡수력의 변화관계를 나타낸다. 이러한 불포화 지반의 함수특성곡선은 실내실험을 통해 얻을 수 있으나 ○○댐의 경우 입자가 큰 조립재료로 이루어진 재료의 특성상 실내실험을 통하여 곡선을 얻는 것이 사실상 어려우므로 본 해석에서는 축조재료의 입도분포곡선 (그림 2)으로부터 곡선을 예측하는 방법을 사용하였다 (그림 3).

불포화지반에서의 투수계수는 상수값이 아니며 체적함수비 ( $\theta_w$ )의 영향을 받는다. 이때 체적함수비는 모관흡수력과 관련이 있으므로 투수계수는 모관흡수력의 영향을 받는다고 할 수 있다. 본 해석에서는 그림 4와 같이 함수특성곡선을 이용해 예측한 투수계수 변화를 설정하였으며 완전포화상태의 투수계수는 실내실험 및 문헌으로부터 구한 설계값을 적용하였다.

본 연구에서는 상업용 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 이용하여 침투해석을 수행하였으며 수위가 상시만수위 (EL. 195m)를 유지할 때 차수벽에 균열이 발생하여 침투가 발생하는 경우를 가정하였다. 경계조건으로 균열이 발생한 지점에 수두가 상시만수위가 되도록 설정하였으며 하류사면 표면의 간극수압이 0보다 크지 않도록 review 경계조건을 설정하였다.

표 1. 영역별 포화투수계수

	Zone 1	Zone 1A, 1B	Zone 2	Zone 3A	Zone 3B	Zone 3Bs	Zone 3C
투수계수 (m/s)	$5.0 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$5.29 \times 10^{-5}$	$5.65 \times 10^{-5}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$7.0 \times 10^{-3}$

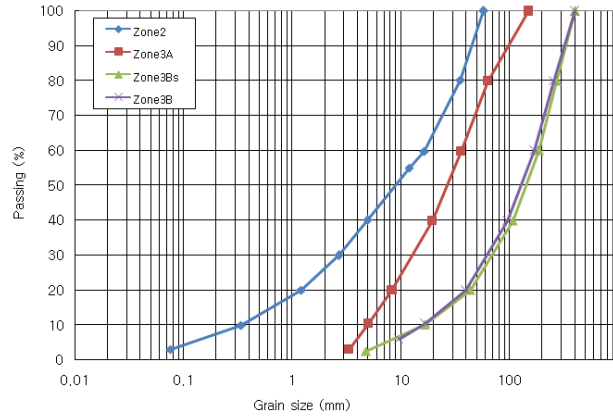


그림 2. 축조재료의 입도분포곡선

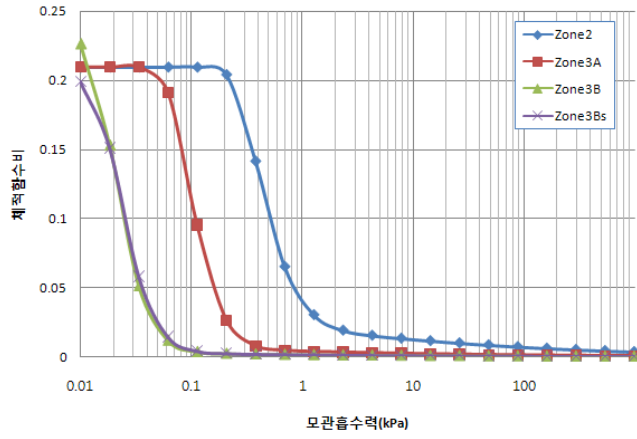


그림 3. 예측된 함수특성곡선

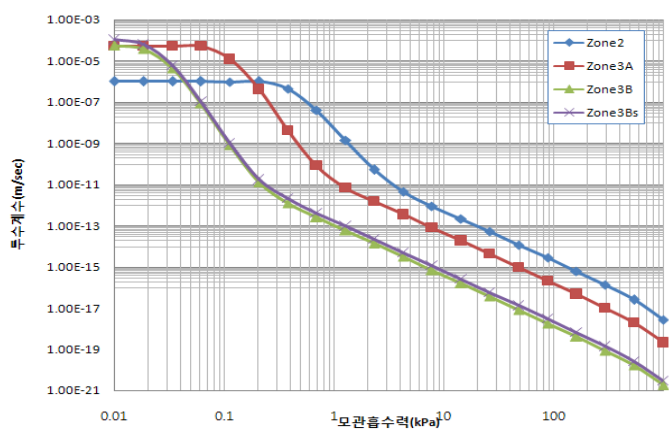


그림 4. 예측된 투수계수 함수

### 3. 해석결과

그림 5는 차수벽의 상부 (EL. 193m)에 균열이 있는 경우 정상상태 해석의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 침투수는 Zone 3Bs를 지나 하부 배수층을 통해 배수되고 있으나 Zone 3B와

Zone 3Bs의 투수계수 차이가 크지 않기 때문에 주축조 영역인 Zone 3B에 포화영역이 넓게 발달하는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 차수벽의 하부 (EL. 162m)에 균열이 있는 경우의 해석결과를 나타낸 것으로 상부에 균열이 있는 경우보다 수위가 높게 올라가고 침투유량도 훨씬 많이 발생하지만 주축조 영역인 Zone 3B의 대부분은 불포화 상태를 유지하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 그림 5의 해석에서 Zone 3Bs의 투수계수가 Zone 3B의 투수계수의 10배인 경우를 해석한 것이다. 여전히 침투수는 하부 방향으로 이동하여 배수가 되고 있으나 Zone 3Bs와 Zone 3B 경계면을 제외한 Zone 3B의 영역이 불포화 상태로 남아있는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 Zone 3Bs를 설치하지 않고 Zone 3B의 재료로 축조한 경우의 해석결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 Zone 3A 영역이 배수층의 역할을 하며 배수를 유도하고 있으나 투수계수가 충분히 크지 않아 Zone 3B 영역에 포화 영역이 넓게 발달하고 있음을 알 수 있다. 포화투수계수의 크기가 Zone 3B의 경우와 비슷한 Zone 3A가 배수층의 역할을 할 수 있는 것은 그림 4의 투수계수함수곡선에서 알 수 있듯이 포화투수계수의 크기는 거의 동일하지만 불포화 영역에서 물을 흘려보낼 수 있는 능력이 Zone 3B의 경우보다 훨씬 크기 때문이다. 이러한 현상은 Zone 3B 재료가 Zone 3A 재료보다 작은 입자를 덜 포함하고 있어 물을 보유하는 능력이 떨어지고 불포화 영역에서는 급격하게 투수계수가 감소하기 때문이다. (즉, 물은 흡입자 사이의 공극의 물로 연결된 통로를 통해서 흐를 수 있기 때문에 Zone 3A가 더 많은 물을 통과 시킬 수 있다).

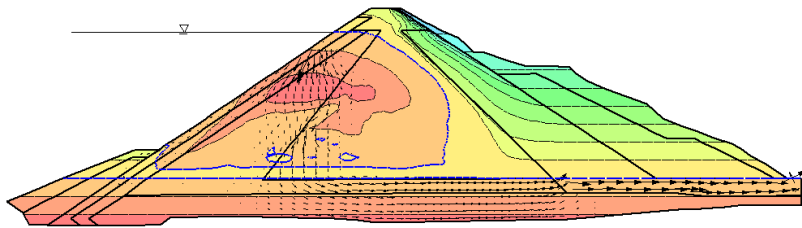


그림 5. 상부 (EL. 193m)에 균열이 있는 경우

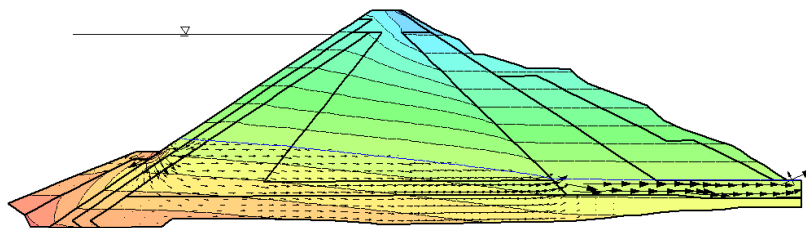


그림 6. 하부 (EL. 162m)에 균열이 있는 경우

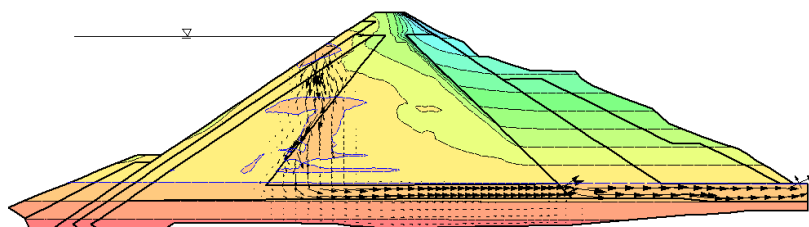


그림 7. 하부 (EL. 162m)에 균열이 있는 경우 ( $k_{3Bs} = 10k_{3B}$ )

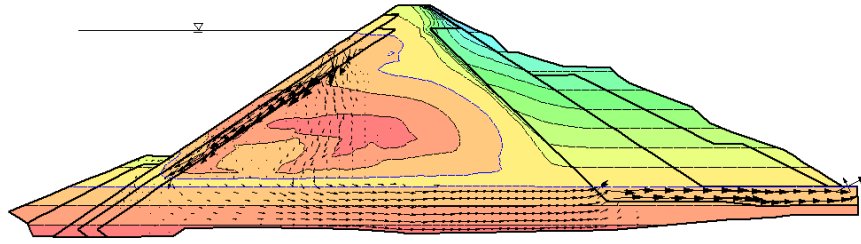


그림 8. 하부 (EL. 162m)에 균열이 있는 경우 (배수층이 없는 경우)

## 4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 차수벽에 균열이 발생한 경우의 표면차수벽형사력댐의 침투거동을 연구하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 차수벽의 하부에 균열이 발생한 경우가 상부에 발생한 경우보다 침투수를 많이 발생시키지만 상부에 균열이 발생한 경우가 주축조 영역인 Zone 3B에 더 넓은 포화영역을 발생시켰다.
- 2) 배수를 위해 설치하는 Zone 3Bs의 투수능력이 클수록 주축조 영역인 Zone 3B의 포화영역이 감소하고 불포화 상태를 유지하게 된다.
- 3) 축조재료의 투수능력은 포화상태의 투수계수 뿐만 아니라 불포화 상태에서의 투수계수에 의해서도 영향을 받으며 이러한 경향에 따라 댐의 침투거동이 나타남을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. CFRD 초기 담수에 따른 댐체 거동 연구(1차년도, 2005), KIWE-DRC-05-07, 한국수자원공사, 수자원연구원.
2. 콘크리트 표면차수벽형 석피댐의 거동특성에 관한 연구 (1990), 한국수자원공사, 수자원연구소.
3. Zhang, L. M., Chen, Qun (2006), "Seepage failure mechanism of the Gouhou rockfill dam during reservoir water infiltration", *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 5, pp.557~568.
4. Chen, Qun, Zhang, L. M. (2006), "Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated-unsaturated seepage theory", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, pp.449~461.