

차수벽에 균열이 발생한 표면차수벽형사력댐의 침투거동 연구

Study on Seepage Behavior of Concrete Faced Gravel-Fill Dam with Cracked Face Slab

조성은¹⁾, Sung-Eun Cho, 박한규²⁾, Han-Gyu Park, 임은상¹⁾, Eun-Sang Im, 김기영¹⁾, Ki-Young Kim

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

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 연구위원, Senior Head 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.

Keywords : CFGD, Face Slab, Seepage, Unsaturated soil

1. 서론

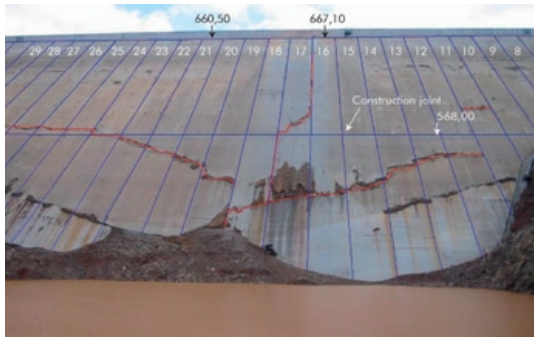
최근 전 세계적으로 대부분의 댐이 CFRD(Concrete Faced Rock-fill Dam) 형식으로 축조되지만, 댐사이트에 분포하는 하상 모래, 자갈을 축조재료로 사용하는 CFGD(Concrete Faced Gravel-fill Dam)는, 석산개발을 적게 하여 환경훼손을 최소화하고, 인근에 분포되어 있는 재료를 사용하여 경제적이란 측면에서 매우 유리한 댐 형식으로 주목 받고 있다. 최근 국내에서도 사력재를 댐의 주축조재로 이용하도록 댐이 설계된 바 있다. CFGD의 차수벽에 균열이 발생한 경우 균열부위를 통과하는 침투수가 어떤 거동 특성을 보이는지에 대한 연구는 그 중요성에 비해 현재까지 매우 미진한 상태이다. 특히 차수벽을 지난 침투수가 어떤 경로를 통해 진행하는지는 설계에 있어 매우 귀중한 통찰력을 제시해 줄 수 있다. 본 연구에서는 포화-불포화 흐름을 고려할 수 있는 상업용 유한요소 해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 차수벽에 균열이 발생한 경우에 CFGD의 침투거동을 연구하였다.

2. 차수벽의 손상사례

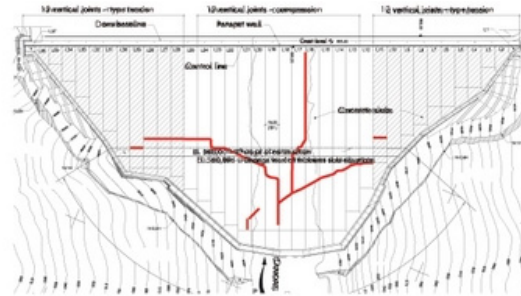
콘크리트 차수벽의 손상은 주로 댐체의 과도한 변형이나 부등침하 등이 발생하는 경우에 차수벽에 휨 응력이나 압축응력 등이 발생하면서 일어나게 된다. 이러한 댐체의 변형은 댐축조재료의 특성에 따른 시간의존적 변형일 수도 있고 지진과 같은 하중에 의한 것일 수도 있다.

Campos Novos Dam(브라질)은 2005년 준공된 높이 125m, 길이 592m의 댐으로 2005년 10월에 담수

가 시작되었다. 담수에 의해 수압이 작용하면서 계곡형상, 댐높이, 재료특성 등의 복합적 요인에 의한 댐의 Abut에서 중앙으로의 변형이 발생하였고 댐 길이방향의 압축응력이 발생하여 콘크리트 차수벽이 파괴되었다(그림 1).



파괴 분포



파괴 분포



Abutment 부근의 파괴



전단된 철근

그림 1. Campos Novos Dam의 차수벽 손상 사례

2005년 10월 Campos Novos 댐, 2006년 9월 Barra Grande 댐, 2006년 2월 Mohale 댐 등에서 비슷한 시기에 비슷한 양상의 차수벽 손상이 관찰되면서 이러한 경험을 나누기 위한 심포지움이 2007년 브라질에서 개최되었다. 이들 손상은 모두 댐체의 변형에 의한 댐 중앙부 차수벽 콘크리트의 압축으로 인하여 연직 이음부의 파괴가 발생하고 이로 인해 차수벽이 약해지면서 수평 이음부의 파괴가 이어서 발생하였다. 이러한 사례로 볼 때 차수벽 균열을 통한 침투거동 파악에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

3. 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 연구자들

이다. 후에, 포화-불포화 흐름 이론을 이용한 2차원 침투해석이 저수지의 담수해석과 수위변동의 해석을 위해 사용되었다 (Lam 등 1978; Ng과 Small 1995; Chen 등 2005).

3.1 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 불포화 토의 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; θ_w 는 체적함수비; t 는 시간이다.

두개의 독립적인 응력상태변수 (stress state variable), 즉 순수직응력 ($\sigma - u_a$, σ 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 γ_w 는 물의 단위중량이다. 식(4)에 의하면 해석을 위해 함수특성곡선 (θ_w 와 ψ 의 관계)과 투수계수함수가 필요하다.

3.2 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 해석단면 및 해석에 사용된 유한요소망은 그림 2와 같다(14279개의 절점과 14172개의 요소로 구성). 해석에 사용된 각 재료의 포화투수계수는 표 1과 같다. 기초암반부는 제체에 비해 투수계수가 작으므로 불투수

영역으로 가정하여 해석하였다.

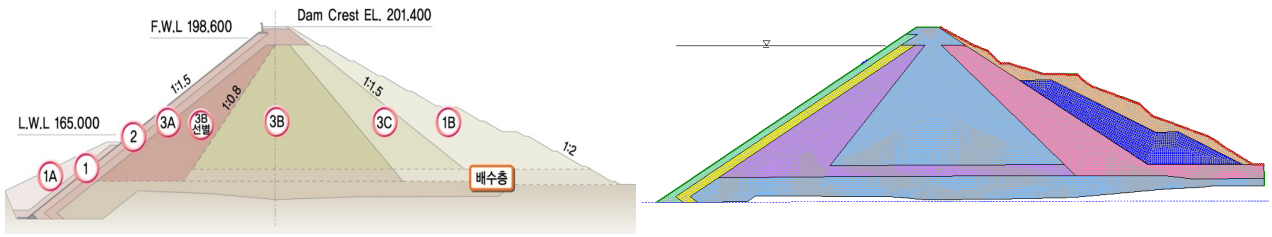


그림 2. 해석단면 및 유한요소망

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 3)으로부터 곡선을 예측하는 방법을 사용하였다 (그림 4).

불포화지반에서의 투수계수는 상수값이 아니며 체적함수비 (θ_w)의 영향을 받는다. 이때 체적함수비는 모관흡수력과 관련이 있으므로 투수계수는 모관흡수력의 영향을 받는다고 할 수 있다. 본 해석에서는 그림 5와 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 경계조건으로는 수위가 상시만수위 (EL. 195m)를 유지할 때 차수벽에 균열이 발생하여 침투가 발생하는 경우를 가정하였다. 균열이 발생하는 경우에 차수벽과 bedding zone이 밀착해 있으면 영향을 받는 영역이 균열의 폭으로 한정되어 좁지만, 댐체의 변형으로 인하여 차수벽과 bedding zone 사이에 틈이 발생한 상태라면 침투에 의한 수두경계조건이 주어지는 영역이 틈이 발생한 영역으로 넓어진다. 본 연구에서는 균열 발생에 의한 영향 범위는 연직 1m 범위라고 가정하여 이 영역에 포함되는 사면표면에 총수두를 상시만수위가 되도록 경계조건으로 설정하였으며 하류사면 표면의 간극수압은 0보다 크지 않도록 review 경계조건을 설정하였다. 침투거동을 파악하기 위하여 침투에 영향을 미치는 변수(배수층의 투수계수, 균열의 위치, bedding zone의 투수계수)에 대한 값을 변화시키면서 해석을 수행하였다.

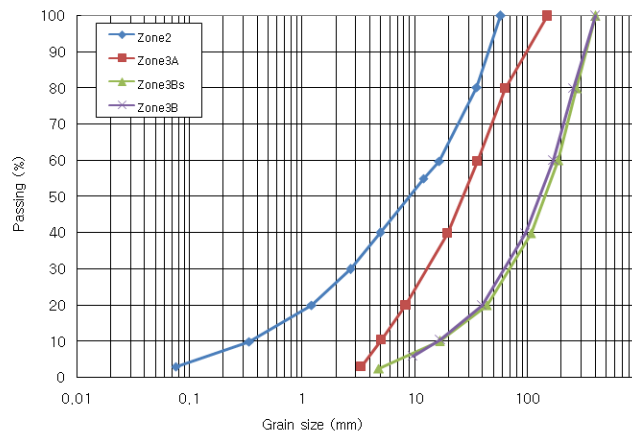


그림 3. 축조재료의 입도분포곡선

표 1. 영역별 포화투수계수

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

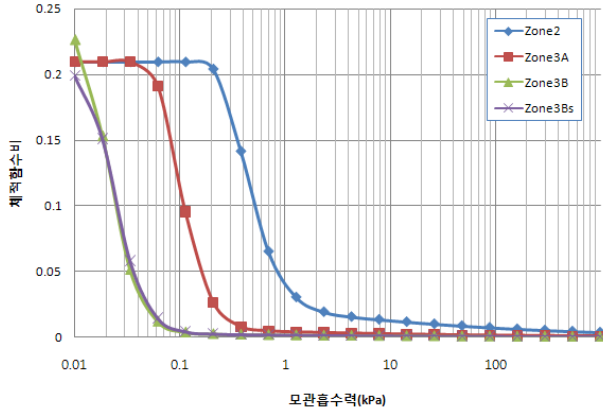


그림 4. 예측된 함수특성곡선

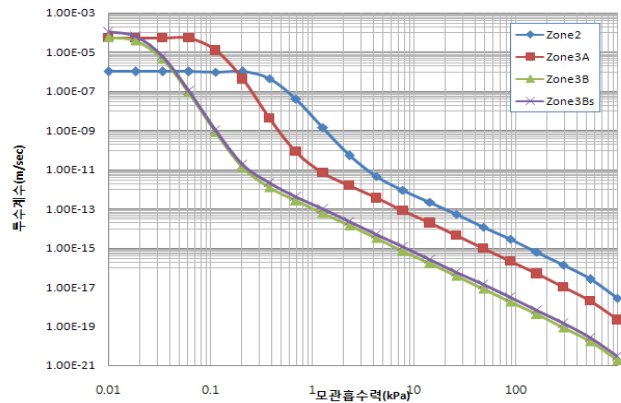


그림 5. 예측된 투수계수 함수

4. 해석결과

4.1 배수층이 설치되지 않은 경우

그림 6은 Zone 3Bs를 설치하지 않고 Zone 3B의 재료로 균일하게 축조한 경우의 해석결과이다. 그림 6(b)에서 알 수 있듯이 침투의 초기에 침윤면이 Zone 3A를 지나 Zone 3Bs에 도달하면 Zone 3Bs는 불포화 상태로 존재하므로 투수계수가 작아 침투의 지체가 발생하게 되고 따라서, 침투수는 Zone 3A와 Zone 3Bs의 경계를 따라 흐르게 된다. 시간이 흐름에 따라 Zone 3Bs에 포화영역이 점차적으로 진전하게 되면 포화상태의 Zone 3A와 Zone 3Bs의 투수계수가 비슷하기 때문에 중력에 의한 아래방향의 흐름이 지배적인 흐름이 된다. 침윤면은 점차적으로 아래방향으로 퍼져나가고 침투수가 댐바닥에 도달하면 상·하류면으로 퍼지며 이동한다. 상류쪽으로는 흐름의 통로가 차수벽에 의해 막혀 있으므로 댐체내 수위는 점차 상승하게 되고 간극수압이 증가하게 된다. 하류쪽으로는 침투수가 사석재인 Zone 3C에 도달하게 되면 그림 6(f)와 같이 배수가 이루어지게 되므로 더 이상의 수위 증가는 발생하지 않는다. 그림 8은 시간에 따른 침윤선의 변화를 나타낸 것으로 침투에 의해 발생하는 포화영역을 보여주고 있다.

4.2 배수층이 설치된 경우

그림 7은 Zone 3Bs의 투수계수가 Zone 3B의 투수계수의 100배로 배수층의 역할을 충분히 수행하도록 설계된 경우를 해석한 것이다. 그림 7(a)에서 침윤면이 Zone 3A를 지나 Zone 3Bs에 도달한 이후에도 Zone 3Bs가 충분한 배수능력을 가지므로 흐름의 지체가 발생하지 않고 있음을 볼 수 있다. 그러나 침투수가 그림 7(b)와 같이 상대적으로 투수계수가 작은 Zone 3B에 도달하게 되면 흐름의 지체가 발생하게 되고 Zone 3B와 Zone 3Bs의 접촉면을 따라 침투수가 이동하게 된다. 시간이 지남에 따라 점차적으로 Zone 3B의 모관흡수력도 감소하지만 배수층을 통하여 원활한 배수가 일어나므로 Zone 3B 하부의 극히 일부분을 제외한 Zone 3B의 대부분의 영역이 불포화 상태로 남아있는 것을 볼 수 있다(그림 9). 상부에 균열이 발생한 경우 침투수는 연직흐름→왼쪽 수평 성분 흐름→오른쪽 수평 성분 흐름의 경로를 따라 물이 댐 밖으로 배출된다.

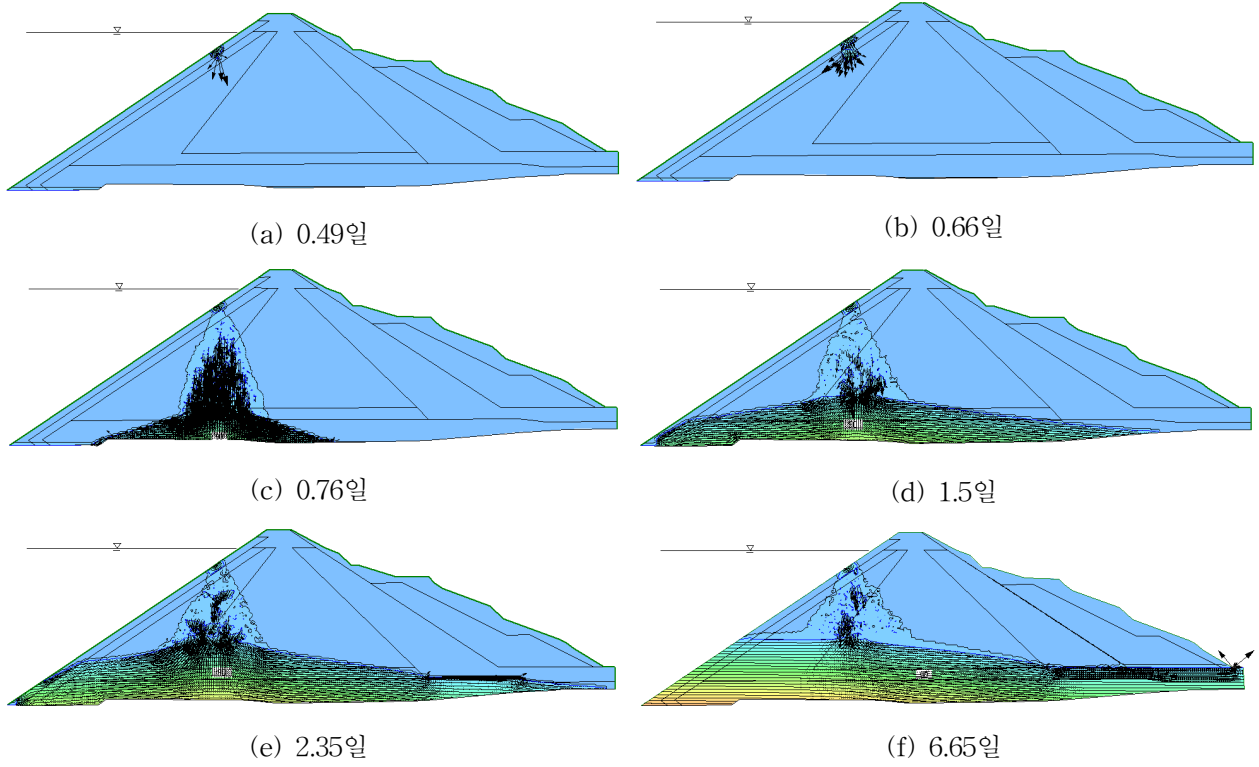


그림 6. 시간에 따른 침투거동(배수층이 설치되지 않은 경우)

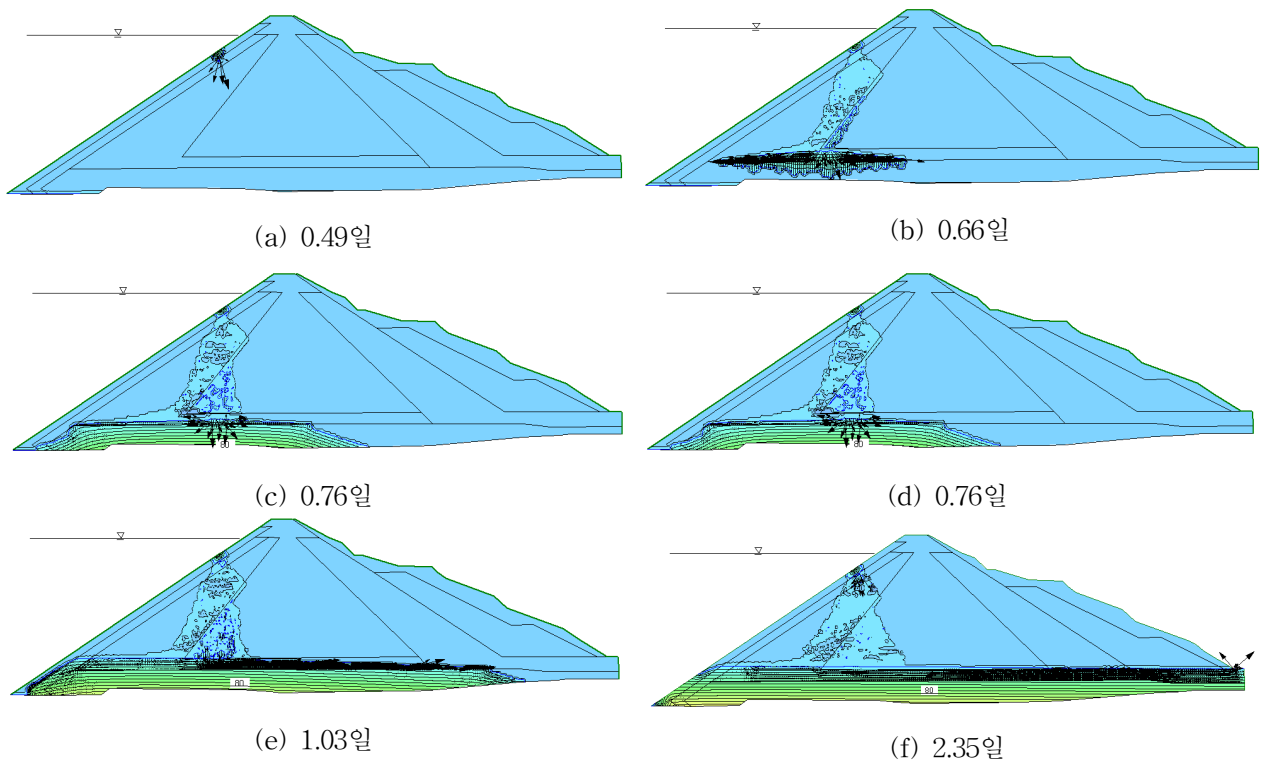


그림 7. 시간에 따른 침투거동(배수층이 설치된 경우)

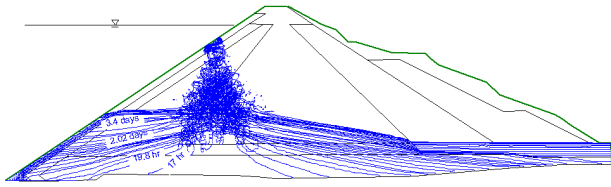


그림 8. 시간에 따른 침윤선의 분포
(배수층이 설치되지 않은 경우)

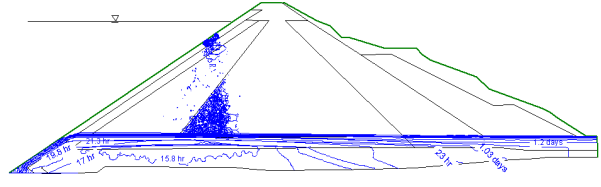


그림 9. 시간에 따른 침윤선의 분포
(배수층이 설치된 경우)

4.3 침투량의 산정

그림 10과 그림 11은 각각 배수층이 설치된 경우에 대하여, 차수벽에서의 균열 위치에 따른 침투율의 변화와 총침투량의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 균열의 위치가 아래쪽에 위치할수록 많은 유량이 담체로 침투하는 것을 알 수 있다.

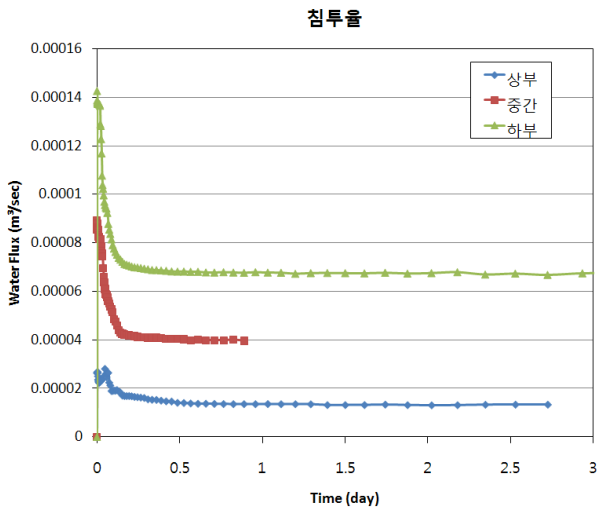


그림 10. 균열의 위치에 따른 침투율의 변화

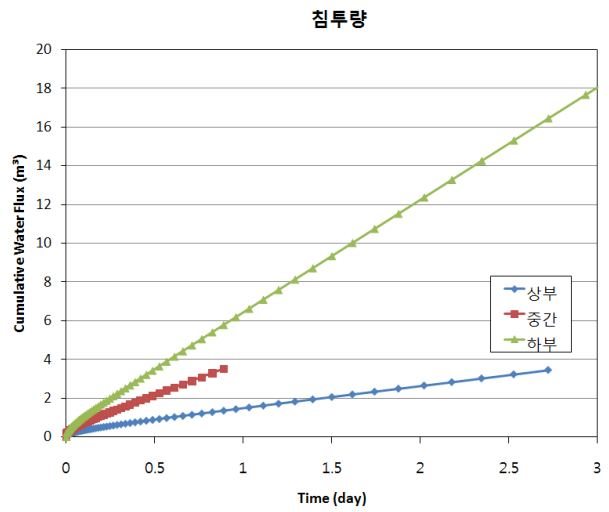


그림 11. 균열의 위치에 따른 침투량의 변화

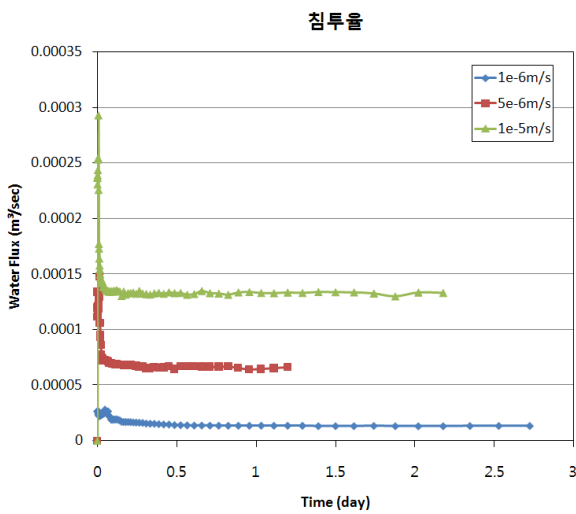


그림 12. Zone 2의 투수성에 따른 침투율의 변화

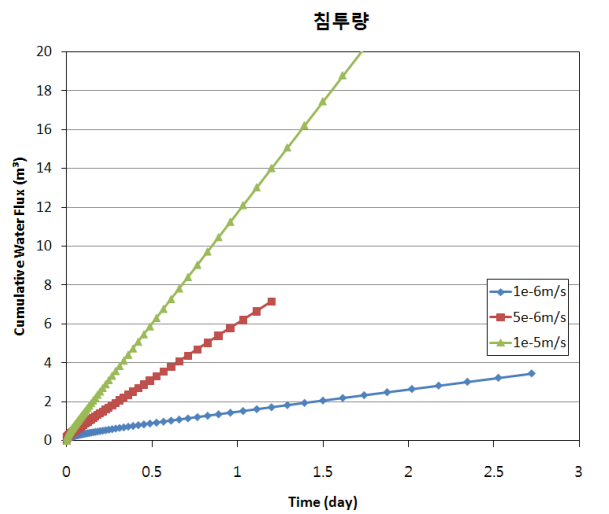


그림 13. Zone 2의 투수성에 따른 침투량의 변화

그림 12와 13은 Zone 2의 투수성에 따른 침투율과 침투량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 균열을 통한 댐체로의 침투는 차수벽 바로 아래에서 침투수를 제어하는 Zone 2의 투수특성에 크게 좌우되며 Zone 2의 투수계수가 큰 경우에는 많은 물이 침투하게 되므로 시공시에 설계값에 해당하는 투수계수를 확보하도록 주의할 기울여야 한다.

5. 결론

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 균열을 통한 침투량이 컸지만 상부에 균열이 발생한 경우가 댐체 단면의 기하학적 형상으로 인하여 주축조 영역인 Zone 3B에 더 넓은 포화영역을 발생시켰다.
- 2) 수치해석을 통한 매개변수 연구에 의하면 차수벽에 균열이 발생한 경우에 CFGD의 침투량은 투수계수가 가장 작은 차수벽 바로 아래의 재료인 Zone 2에 의해서 결정된다. 따라서 댐체로 침투하는 침투량을 조절하기 위해서는 Zone 2의 투수계수를 조절하여야 한다.
 댐체로 침투한 물의 배수는 댐체 축조에 사용된 재료의 수리적특성 및 재료영역의 배치 등에 따라 결정되며, 원활한 배수의 여부에 따라 댐체 내부의 수위 및 간극수압의 크기 등이 결정된다. 축조에 사용되는 사력재의 투수계수가 충분히 커서 침투수를 배수시킬 수 있는 경우는 특별한 배수시설의 설치가 필요없지만 사력재의 투수계수가 작은 경우에는 적절한 배수층을 설치하여 배수를 유도해야 댐체에 발생하는 간극수압을 방지하여 댐체의 안정성을 확보할 수 있다.
- 3) CFGD의 배수단면 설계는 균열을 통해 침투되는 물의 흐름을 지체시키지 않고 흘러 보내 댐체에 간극수압이 발생하지 않도록 유도해야 한다. 특히 주축조 영역 및 하류사면 부분에 간극수압이 발생하는 경우는 댐체의 안전에 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로 피하도록 해야 한다. 적절한 배수단면이 설계되었다할지라도 하상재료를 사용하여 축조하는 현장여건 특성상 댐체의 공간적 위치에 따라 불균질한 시공이 이루어 질 수 있다. 물의 흐름은 투수계수가 상대적으로 작은 영역을 만나면 흐름의 지체가 발생하고 간극수압이 발생하는 동시에 흐름에 대한 저항이 작은 경로를 찾으려는 특성이 있으므로 예측하지 못했던 상황이 발생할 수 있다. 따라서 가능한 각 Zone에서의 수리적 특성이 동일하도록 재료수급 및 시공을 하는 것이 중요하다.

참고문헌

1. 표면차수벽형사력댐(CFGD)의 침투 및 거동특성 연구 (2009), KIWE-GSRC-08-01, 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.