

필댐 기초지반에서 유한요소 모델을 이용한 그라우트 커텐의 적정심도 연구

김진회¹⁾ · 윤정환²⁾

1. 서 론

댐(dam)의 기초지반에 시공되는 그라우트 커텐(grout curtain)은 댐 축조 후 기초지반을 통한 침투류를 차단하기 위하여 시행되며, 콘크리트 댐, 흙 댐, 사력 댐 등의 공학적 차이에 따라서 그 시공 위치 및 심도, 폭 등이 다르게 적용된다.

그라우트 커텐(grout curtain)의 설계·시공 요소는 기초지반의 투수성, 댐 내의 수심, 제체 성토재료의 투수성, 그라우트 커텐의 투수성 등에 의하여 결정되며, 설계·시공 요소들은 그라우팅 커텐의 깊이, 폭, 투수도 등이다. 그 중에서도 그라우팅 커텐의 깊이는 기초지반을 통한 침투량 및 침투압, 그리고 제체 하류부 지반의 유출동수구배(exit gradient)의 변화에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 인식되고 있다(Weaver, 1991; 장의웅, 2001).

본 연구에서는 복잡한 댐 기초지반 침투류 시험 조건의 구현이 가능하고 신뢰성이 있는 수치해석 기법인 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 그라우트 커텐이 설치된 필댐의 기초지반을 통한 침투류 해석을 시도하였으며, 커텐 그라우팅 심도에 따른 침투량, 침투압 및 수리역학적 안정성 해석에 연구의 중점을 두었다.

2. 연구방법

우리나라에서 건설되어 관리되고 있는 댐의 대부분은 필댐 형식의 농업용 저수지이며, 2000년말 기준 17,913개소의 농업용저수지중 신뢰도 있는 댐 제원이 확보된 농업기반공사 관리저수지 3,273개소의 자료에 의하면 제체 형식면에서는 필댐이 3,268개소로 전체의 99.8%에 이른 것으로 조사되었다(농림부, 2001).

본 연구에서는 수치해석 기법인 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 기초지반을 통한 침투류 해석을 시도하였으며, 기초지반의 균질 또는 불균질 조건 및 등방 또는 이방성 투수조건을 고려하여 그라우트 커텐이 설치됨에 따라 달라지는 침투수량 및 침투압, 수리적안정성 등을 정량적으로 검토하므로써 그라우트 커텐의 침투류 차단 효과를 증명하고 효율적인 설계방법 및 설계요소를 제시하고자 한다.

필댐의 기초지반 중앙부나 상류부에 설치되는 그라우트 커텐(grout curtain)은 설치 심도 결정이 설계·시공의 핵심요소로서 허용 누수량 이내로 침투수량을 감소시키면서 최저의 시공 비용만을 지출토록하는 주 변수이나, 그라우트 커텐의 심도는 기초지반의 투수성과 저수지 내부의 수심에 따라 비선형적인 변화를 보이게 되어 확일적으로 설정될 수 없으며, 특히 기초지반의 불균질한 지질 특성 및 투수 조건 등에 따라 각기 다르게 적용되는데, 이러한 경우에 그라우트 커텐의 설계요소에 대한 합리적 검토 기준이 요구되는 것이다.

현재까지 기초지반을 통한 침투류해석 방법은 이론적 방법이나 도해적 방법 및 실험적 방법 등이 이용되어 왔으나 불규칙한 물성 및 자연 조건을 수용하지 못하여 제한적인 조건내에서 이용되어 왔으며, 전산분야의 발달과 함께 수치해석기법의 활용 폭이 커지면서 자유로운 변형 단면의 영역 설정이 가능한 유한요소법이 주로 댐의 침투류 해석에 이용되고 있다.

본 연구에서는 댐 침투류 해석의 적용성이 높은 유한요소해석 모델을 이용하여 필댐 기초지반의 균질·불균질 조건, 등방·이방성 투수조건, 댐 내부의 수심, 기초지반의 투수계수 및 그라우트 심도 등 그라우트 커텐의 설계 요소들의 변화에 따른 침투류 변화를 분석하고자 한다.

침투류 수치모델을 분석하는 방법은 필댐 기초지반을 통한 침투수량, 제체에 미치는 침투수압 및 제체 하류부에서의 수리적안정성 검토 등이며, 각 특성별 분석방법을 통하여 그라우트 커텐의 설계요소와 침투류 차단효과와의 관계를 정량적으로 분석하므로써 궁극적으로 필댐 기초지반의 물성에 따른 그라우트 커텐의 효율적인 설계를 위한 자료로 활용되도록하고자 한다.

3. 본 론

3.1) 침투류이론 및 영향요소

필댐에서의 이론적인 침투류 해석은 투수성에 영향을 미치는 여러 요소를 현실 조건과 유사하게 가정하므로써 결과를 해석할 수 있으며, 저수위나 경계조건 등의 변화에 따라서 정상침투류와 비정상침투류로 구분되고, 필댐 제체 및 기초지반의 침투류에 대한 수치해석은 침투류의 수두, 유속분포, 유량, 침투수압분포 등을 구하여 누수량 및 댐의 안정성을 검토하는데 이용되며 유한요소법이 일반적으로 이용된다.

필댐 내 침투류의 유한요소해석은 두가지 방법이 있다. 하나는 자유수면 취급 방법에 따라 포화영역만을 계산 대상으로 하여 자유수면이 변화하면 해석 영역도 변화하는 포화 침투류 해석방법이고, 다른 하나는 포화 영역 뿐만아니라 불포화 영역도 계산 대상에 포함시킨 포화·불포화 침투류 해석방법이다.

제체 및 댐 기초지반의 침투류 해석은 제체 침윤선 하부의 포화구간에 대한 영역을 대상으로 해석하므로 포화 침투류 해석 방법을 적용하며 2차원 침투류방정식을 각 경계조건별 표현하면 다음과 같다(과학기술, 1998; 건설부, 1993).

- ① 제체 내의 자유수면상 : $h = Z(x,y,t)$
- ② 저수지 수면하의 제체사면상 : $h = h(t)$
- ③ 제체 기초 경계면상 : $kx \frac{\partial h}{\partial x} lx + ky \frac{\partial h}{\partial y} ly = q$, q : unit flux across the side of an element
 lx, ly : vertical line in boundary surface

필댐의 기초지반 중앙부나 상류부에 설치되는 그라우트 커텐의 효율을 결정하는 요소는 기초지반의 투수성(permeability), 댐 내의 수심, 제체 성토부의 투수계수, 그라우트 커텐 심도, 투수계수, 폭 등이며, 이 중 댐 내의 수심, 기초지반의 투수계수와 그라우트 커텐 심도는 그라우트 커텐의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요한 변수들로 인식되며, 주어진 자연 조건에서 인위적으로 결정되어진 최종 요소는 그라우트 커텐 심도가 된다.

필댐을 축조할 경우, 댐 부지의 기초지반의 처리는 누수차단, 지반안정성, 변형방지를 목적으로 시행되며 투수성 기초지반의 처리방법은 차수 트렌치(cutoff trench), 차수벽(cutoff wall) 형태로 시공된다. 이들 차수체들은 댐 하부를 통과하는 침투수의 유로를 연장하여 그 흐름을 효과적으로 억제되도록 설계된다(Fig. 1).

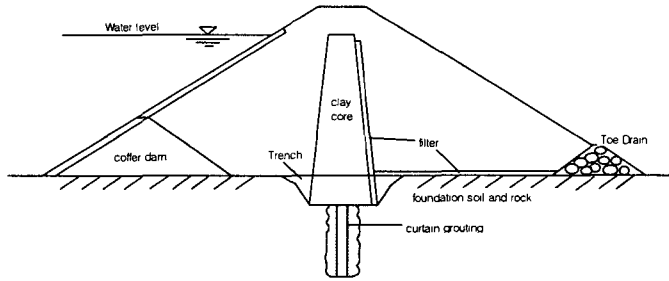


Fig. 1. Typical cross section of fill dam curtain grouting

3.2) 침투류 유한요소 수치모델 구축

우리나라 농업용 땔댐 기초지반의 차수는 대부분 Cutoff trench와 Grout curtain이 결합된 형태로 설계·시공되고 있으며, 이러한 설계 목적은 제체 및 점토코어의 저면과 기초의 접촉부분을 통한 누수량을 감소시켜 저수지의 저류안정성을 높이고 하류측 지반의 간극수압을 감소시켜 수리적 안정성을 높이는 데 있다.

유한요소법에 의한 침투류해석은 복잡한 해석영역의 초기조건 및 경계조건에도 비교적 용이하게 적용이 가능하므로 제체나 기초지반의 침투류해석에 광범위하게 적용된다. 본 연구에서 적용한 땔체의 기하학적 요소를 결정하는 땔 제원과 제체 및 기초지반의 투수계수는 해석 프로그램 자체에서 제공하는 각 토질별 정수값(Table 1)을 이용하였으며, 전산 해석에 이용된 프로그램은 캐나다 Geo-Slope International Ltd사의 SEEP/W DEFINE(ver 5.12)으로 정상상태 및 비정상상태의 침투류 해석, 2차원 축대칭해석 및 평면해석이 가능한 프로그램이다.

Table 1. Hydraulic conductivity of each materials adopted in model

| Constitution of dam | Materials | Hydraulic conductivity (cm/sec) |
|---------------------|-------------------|--|
| clay core cutoff | well graded clay | 7.00×10^{-8} |
| embankment | sandy clayey silt | 1.50×10^{-5} |
| filter | fine sand | 4.30×10^{-1} |
| toe drain | gravel | 4.22×10^{-1} |
| foundation ground | soil and rock | $8.00 \times 10^{-5} \sim 1.00 \times 10^{-3}$ |
| under ground cutoff | grout curtain | 1.00×10^{-5} |

해석 모형은 땔댐의 구조물 형태가 실제로는 3차원이지만 단면이 일정하고 길이가 긴 형태를 한 경우가 대부분이므로 근사적인 2차원 해석을 시도하였으며 경계조건과 초기 수위조건을 단순화하여 땔축 중간의 최대 단면에 대한 횡단면 해석을 실시하였다. 경계조건에서 좌측사면은 전수두 (total pressure) 조건, 우측사면 하부는 절점유량조건과 전수두 조건, 기초지반하부는 불투수조건으로 처리하였다.

구성된 땔댐 기초지반 침투류의 수치 모형에서의 경계조건은 Fig. 2과 같으며 구성 모델이 실제로 땔 제체 및 기초지반을 통한 침투류 해석을 위하여 적절히 기능을 발휘하는지 모델 적정성을 증명하기 위하여 수치모델 시행결과를 도해적 침투류 해석방법인 유선망(flow net) 해석 결과와 비교하여 검증하였다.

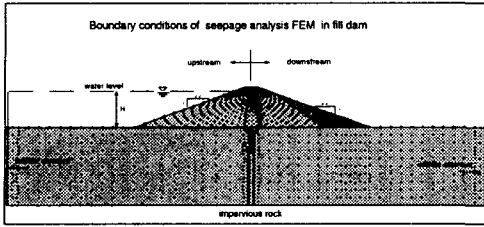


Fig. 2. Boundary conditions of FEM model

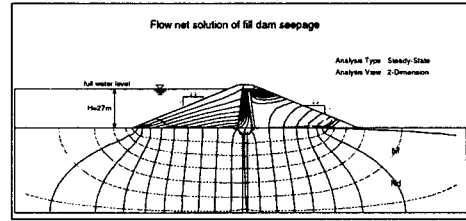


Fig. 3. Flow net solution of seepage in fill dam

3.3) 그라우트 커텐 적정 심도 해석

필댐 기초지반의 대표적인 지반 조건을 균질 등방의 투수조건에서 댐 수심 27 m, 그라우트 커텐 폭 3 m, 그라우트 커텐의 투수계수를 1×10^{-5} cm/sec로 가정하고, 기초지반의 투수계수별로 그라우트 커텐의 심도를 변화시켜 가면서 기초지반을 통하여 제체 하류부로 유입되는 침투수량을 비교하므로써 최소로 침투수량이 감소하는 최적 그라우트 커텐 심도를 분석하였다.

침투수량 분석방법은 기초지반을 통하여 흐르는 침투수중 제체 하류부에 설치된 필터와 토우드 레인 등 배수시설 안쪽으로 유입되어 제체에 악영향을 미치는 침투수량을 고려하였다. 참고로 제체를 통한 침투수량은 평균적으로 기초지반을 통한 침투수량의 약 100배 미만으로 미미한 양으로 분석되었다.

댐 기초지반의 투수계수를 7단계($k = 8.0 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/sec)로 변화시키고, 각 단계별로 그라우트 커텐의 심도(D)를 10단계(0 ~ 36.6 m)로 변화시켜가면서 제체 하류부중 토우 드레인 안쪽으로 유입되는 침투수량을 분석한 내용을 정리하면 다음과 같다.

기초지반의 k-ratio (k_v/k_h)가 1.0인 등방투수성 조건에서 기초지반 투수계수가 1×10^{-3} cm/sec 이하에서는 그라우트 커텐이 설치되더라도 침투수량은 감소되지 않았으며, 3×10^{-3} cm/sec 이상에서는 투수도가 높아질수록 침투수량이 최소로 감소하는 그라우트 커텐 심도는 깊어지는 경향을 보인다.

특이한 점은 그라우트 커텐 설치 심도가 5.4 ~ 10.2 m로 짧은 경우에는 그라우트 커텐이 설치되기전보다 오히려 제체로 유입되는 침투수량이 증가하는 결과를 보이는데, 이는 기초지반 투수성이 균질 등방인 조건에서 그라우트 커텐이 설치된 후 하류부 직하부의 기초지반내 압력수두를 감소시켜 침투류의 상승을 유도한 것으로 해석된다. 이 때의 그라우트 커텐 심도는 댐 수심 27 m의 약 1/3정도에 해당된다.

그라우트 커텐 설치전과 설치후의 침투수량 감소 효과는 기초지반 투수계수가 3×10^{-4} cm/sec보다 클 때에만 나타났으며, 감소 효과가 나타난 그라우트 심도는 13.8~27 m, 감소된 침투수량은 그라우트 설치 전 침투수량의 62~76 %에 이르는 것으로 분석되었다.

기초지반 투수계수별로 최적으로 침투수량이 감소하는 그라우트 심도를 추출하여 기초지반 투수계수(k)와 댐 수심(H)을 독립변수로 놓고 그라우트 커텐 심도(D)를 종속변수로 하는 다중회귀식은 다음 식과 같다.

$$D = 6,940k + 0.82H - 6.8 \quad (R^2 = 0.89)$$

주요어 : 그라우트 커텐(Grout curtain), 침투수량(Seepage discharges), 유출동수구배(Exit gradients)

- 1) 농업기반공사 전라남도본부 (kjh00174@hanmail.net)
- 2) 전남대학교 건설지구환경공학부 교수