

감압정에 의한 필 댐 및 제방 기초지반의 간극수압 저감효과 수치해석

Numerical Analysis on Pore Water Pressure Reduction at Embankment Foundation of Fill Dam and Levee by Relief Well

장재훈¹⁾ · 유찬호²⁾ · 백승철[†]

Jaehoon Chang · Chanho Yoo · Seungcheol Baek

Received: December 19th, 2021; Revised: December 29th, 2021; Accepted: January 25th, 2022

ABSTRACT : In this study, seepage control effect of relief well was evaluated quantitatively on embankment of small fill dam and levee. Seepage analysis of dam and levee were carried out according to the permeability of fill material and foundation and to analyze behaviour characteristics of seepage. The up-lift pressure at toe of embankment was analyzed which is generated by seepage according to relief well installation condition. The relief well could reduce pore water pressure which is to cause piping or up-lift pressure at foundation ground of embankment and it does not be influenced on geometric condition such as dam height and slope incline. In case of relative low permeable ground, the pore water pressure reduction effect of relief well was decreased compare with high permeable ground but it shows pore water pressure reduction effect compare with no relief well condition. The reduction effect of relief well shows relative gap according to diameter and penetration length of relief well and the installation length of relief well is the most effective factor for seepage control.

Keywords : Pore water pressure, Relief well, Embankment, Seepage control, Up-lift pressure

요지 : 본 연구에서는 감압정의 침투수 처리 효과를 정량적으로 분석하여 소규모 필댐과 하천제방에서 제체를 통과하는 침투수의 처리 효과를 확인하였다. 이를 위해 댐과 제방에서의 제체와 기초지반의 투수 특성에 따른 침투해석을 수행하여 침투수의 거동특성을 파악하여 댐 제체 선단에 작용하는 양압력을 분석하였다. 또한 감압정의 설치 조건을 변수로 분석하여 댐 또는 제방의 제체 선단에 작용하는 양압력의 감소 효과를 분석함으로써 침투수 처리 효과를 분석하였다. 감압정은 파이핑 현상 또는 양압력을 유발하는 제체의 선단 하부 기초지반에서의 작용 간극수압을 감소시키는 효과가 있는 것으로 평가되었으며, 제체의 높이 및 비탈면 기울기와 같은 기하학적 조건에 크게 영향을 받지 않고 간극수압을 관리할 수 있는 것으로 확인되었다. 투수성이 상대적으로 큰 조립토 지반에 비해 세립토 지반에서 감압정의 간극수압 저감 효과는 상대적으로 저하되지만 감압정이 설치되지 않은 조건에 비해서 간극수압 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 확인되었다. 감압정의 직경, 설치 깊이에 따라서 감압정의 저감 효과는 상대적으로 차이가 발생하지만 감압정의 설치 깊이가 침투수 관리에 가장 효과적인 것으로 확인되었다.

주요어 : 간극수압, 감압정, 제방, 침투수 처리, 양압력

1. 서론

국제대담회의 국가별 댐 손상원인에 따르면 침투수 또는 누수로 인해 발생하는 댐 붕괴는 미국에서 발생한 댐 붕괴의 약 38.9%에 해당되는 등 침투수의 관리는 제체의 안정성을 확보하기 위한 중요한 요인으로 관리되고 있다. 댐 구조물에서 침투수 관리에 효과적으로 알려진 감압정은 국내에서의 적용성은 미비하지만 기초지반이 퇴적으로 구성되어 있는 중동 및 동남아시아에서는 기초지반의 양압력을 저감시키는 효과로 널리 이용되고 있다. 감압정은 국외에서 소규모 댐부터 발전용 댐까지 침투수 처리에 효과가 있다고

보고되고 있지만 국내에서는 감압정의 적용사례를 찾아보기 어렵고 그 효과에 대한 정량적인 연구는 매우 드문 현실이다. 이러한 이유로 최근에는 감압정의 효과를 정량적으로 확인하거나, 실제 현장에서 감압정의 효과를 검증하고자 하는 노력이 시도되고 있지만 국토해양부(2011) 댐설계기준 또는 건설교통부(2002) 하천설계기준에서 감압정에 대한 소개만 이루어지고 있으며 감압정에 대한 설계기준은 전무한 실정이다.

본 연구에서는 소규모 필댐 또는 하천 제방의 제체 그리고 기초지반의 조건에 따른 침투해석을 수행하여 침투수의 거동특성을 파악하여 댐 제체 선단에 작용하는 양압력을 분

1) Vice President, Korea Engineering Research Co., Ltd.

2) President, Asin Civil Engineering & Technology Co., Ltd.

† Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : civilb@anu.ac.kr)

석하였고 감압정의 형태에 따라 댐 제체 선단에 작용하는 양압력의 감소 효과를 분석함으로써 침투수 처리 효과를 분석하였다. 성토재료와 기초지반 조건 그리고 제체의 기하학적 조건에 따라 설치되는 감압정의 침투수 처리효과 분석 및 최적의 설치조건을 제시하기 위하여 성토재료와 기초지반의 투수특성, 제체의 높이 및 기울기 그리고 감압정의 설치여부를 변수로 설정하여 각각의 침투수 처리효과를 정량적으로 비교함으로써 감압정의 간극수압 저감효과를 확인하였다.

2. 감압정의 원리 및 설계방법

2.1 감압정의 정의 및 적용

감압정이란 지반 내에서 간극수압과 같은 지하수에 의해 발생하는 압력을 해소 또는 저하하기 위하여 수직으로 설치되어 보호용 스크린이 포함된 일종의 우물 관정을 말하며, 감압정을 둘러싸고 있는 지반의 토사 유출을 예방하기 위해 필터재료가 스크린을 둘러싸고 있는 형태로 구성된다. 일반적인 감압정의 구성은 직경은 6~18 inch로 설치되며, 침투수가 원활하게 배출되고 유출된 침투수를 유도할 수 있도록 v-notch와 함께 상부의 보호시설로 구성된다(Fig. 1).

감압정은 필 댐 및 하천 제방 제체의 침투에 대한 안정성

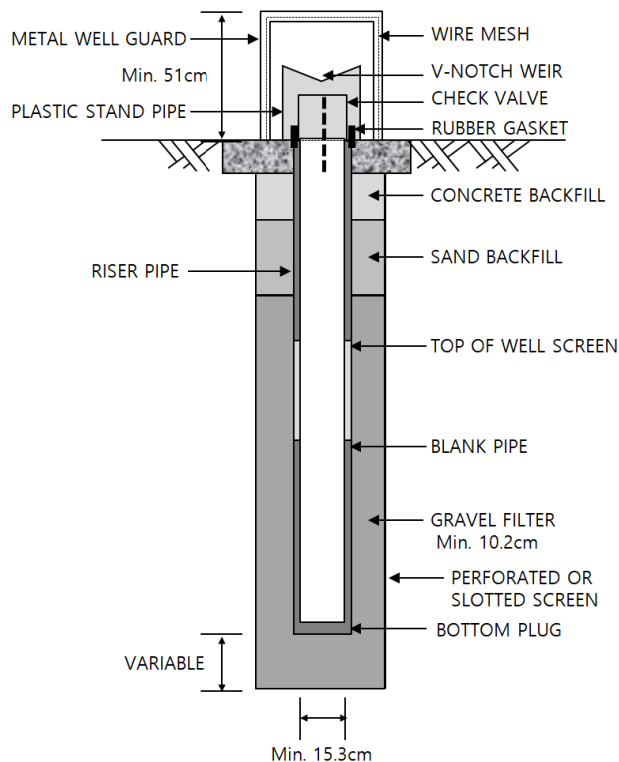


Fig. 1. Typical relief well (U.S. Army Corps of Engineers, 1942)

을 확보하기 위해 1942년부터 적용된 침투수 처리방법으로, 1942년부터 1943년에 몬타나주에 있는 Fort Peck 댐에 21개를 설치한 것이 최초의 감압정 공법의 적용사례이다(Jang et al., 2021). 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers, 1992)은 1943년 6월 미시시피주에 있는 Arkabutla 댐을 대상으로 25 ft의 간격으로 하류부 제체 선단을 따라 계획하는 최초의 감압정 설계를 수행하였고, Middlebrooks & Jervis(1947)는 ‘댐 및 제방을 위한 감압정’ 연구를 통해 감압정의 설계기준을 제안하였다. Cunny et al.(1989)는 수치해석 기법을 이용하여 제체의 형상, 기초지반 조건, 감압정의 설치조건 등을 변수로 설정하여 분석함으로써 선행연구로 제안한 감압정의 설계기법에 대한 효과를 검증하였고, Salmasi et al.(2015)는 수치해석 연구를 통해서 균질형 흙 필댐에서 감압정의 양압력 감소 효과를 분석하였다. Heidarzadeh et al.(2015)은 이란의 Karkkeh 댐의 제체 선단에 감압정을 설치하고 관측공을 통해 댐의 수위변화와 함께 지반 내 지하수위의 변화를 확인함과 동시에 수치해석을 수행함으로써 감압정의 효과를 실증적으로 검증하였다. 최근에는 감압정의 침투수 처리효과를 국내로 적용하기 위한 시도가 시행되고 있으며, Ryu et al.(2020)은 감압정의 효과를 정량적으로 검증하기 위해서는 감압정의 설치간격이 중요한 요인으로 제안하며 농업용 저수지 댐 제체를 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행함으로써 감압정의 효과를 제시하였다. 또한 Jang et al.(2020)은 감압정의 간극수압저감 효과를 분석하기 위한 수치해석 연구를 통해 기초지반과 성토재료의 투수특성에 따라 간극수압저감 효과를 확인하였다.

2.2 감압정 설계의 기본사항 및 허용수두

2.2.1 설계 기본사항

U.S. Army Corps of Engineers(1992)에 따르면 감압정 공법의 설계를 위해서는 5가지의 기본사항이 필요한데 이는 기초지반의 조사, 기초지반의 투수특성, 이방성, 지하수의 화학적 특성, 침투해석이다. 기초지반 조사는 충분한 보링 조사를 통해 침투수의 유입 유출부의 지층조건 그리고 지층의 심도 및 두께와 함께 물리적 특성을 파악하도록 권장하고 있다. 기초지반의 투수특성은 지반조사와 함께 실내투수 시험 또는 입자에 따른 투수특성을 파악하도록 권장하고 있지만 가장 정확한 방법은 현장에서 양수시험을 통해 대수층에서의 투수특성을 파악하는 것이 감압정 설계에 도움이 되기 때문에 추천하고 있다. 필 댐에 저수되는 수자원은 강의 퇴적물과 화학물질이 용해되어 있기 때문에 감압정은 시간이 경과함에 따라 지하수에 용해되어 있는 화학물질에 의하여 클로킹 현상과 침투수 배출 효과가 감소될 수 있다. 따라

서 감압정 설계에는 지하수 시료를 채취하여 성분 분석을 하도록 권장하고 있다(Huibregtse & Moser, 1976). 감압정 설계를 위해서는 침투해석을 통해 감압정 시스템을 결정하도록 권장하고 있는데 침투해석은 대상 구조물의 홍수조건에서 수행하는 것을 원칙으로 한다.

2.2.2 허용수두

U.S. Army Corps of Engineers(1992)에서는 필 댐과 같은 구조물 하부에 투수성 지반이 퇴적되어 있는 경우에는 균등한 간극수압 분포가 형성되지 못할 수 있으며, 침투수가 투수성 지반으로 유출되어 지중압력을 생성시켜 제체 하류부에서는 히빙에 의한 파괴 또는 파이핑을 발생시킬 수 있다고 보고 하였다. 감압정은 바로 이러한 현상을 방지하기 위하여 적용되고 있으며 적절한 안전율을 두어 양압력과 히빙에 의한 파괴를 예방하는데 제체 하류부의 최상단 지층에서 작용하는 수두를 허용수두(h_a)라고 정의하여 다음과 같이 나타낸다.

$$F_s = \frac{i_o}{i_c} = \frac{\frac{\gamma'}{\gamma_w}}{\frac{h_a}{Z_t}} = \frac{\gamma' Z_t}{\gamma_w h_a} \quad (1)$$

여기서 i_o : 동수경사, 흙의 수중단위중량(γ')과 물의 단위중량(γ_w)의 비
 i_c : 한계동수경사
 Z_t : 침투수가 흐르는 최상단 지층의 두께

파이핑과 양압력에 대한 안전율은 최소 1.5 이상으로 하면, 허용수두(h_a)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_a = \frac{i_c}{F_s} Z_t \quad (2)$$

2.3 감압정의 설계방법

2.3.1 단일 감압정(Single well)의 설계

(1) 설계 가정사항

감압정은 기본적으로 지중에 설치되는 우물과 같으며 분석을 위한 설계과정은 지하수가 흐르는 지반에 설치된 우물의 기본이론을 따라 분석된다. 따라서 감압정의 설계는 지반 내의 지하수는 흐르고 있으며, 지하수의 흐름은 층류조건으로 Darcy의 법칙이 적용될 수 있다. 또한 지하수의 흐름은 정상류 상태이며 침투수의 양이나 수두저하는 평형상태에 도달했다고 가정하여 시간에 의존적이지 않는다.

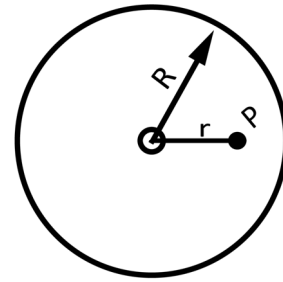


Fig. 2. Influence radius of single well under circular source (U.S. Army Corps of Engineers 1992)

(2) 원형 공급조건(Circular Source)에서 단일 감압정의 수두

특정 지질학적 또는 지형조건에서 침투가 발생하는 원형 공급으로 발생한다고 가정하면 임의 지점에서 예상되는 지하수 수두(h_p)와 양수되는 우물에서의 수두(h_w)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 2 참조).

$$h_p = H - \frac{Q_w}{2\pi k D} \ln \frac{R}{r} \quad (3)$$

$$h_w = H - \frac{Q_w}{2\pi k D} \ln \frac{R}{r_w} \quad (4)$$

여기서 h_p : 양수되는 우물과 지하수가 유출되는 지반 사이 임의의 지점에서의 수두
 h_w : 우물에서의 수두, r_w : 우물의 반경
 H : 지하수가 유출되는 지반의 수두
 k : 지하수가 유출되는 지반의 투수계수
 D : 투수층 두께, Q_w : 우물에서의 양수량
 R : 영향반경

(3) 비원형 공급조건(Non-circular Source)에서 단일 감압정의 수두

지질학적 또는 지형조건이 비원형에서 침투가 발생하는 공급이 비원형 공급조건으로 나타나는 침투수가 유입되는 영향반경 R 대신에 외부 경계조건에서부터 우물 중심까지의 거리로 정의되는 평균 유효거리 A_C 로 대체하여 Eq. (3) 과 (4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_p = H - \frac{Q_w}{2\pi k D} \ln \frac{A_C}{r} \quad (5)$$

$$h_w = H - \frac{Q_w}{2\pi k D} \ln \frac{A_C}{r_w} \quad (6)$$

여기서 A_C : 평균 유효거리

비원형 공급조건이 사각형의 경계를 갖는 경우에는 경계의 측면 2a, 2b를 이용하여 평균 유효거리 A_c 는 다음 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_c = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}} \quad (7)$$

(4) 무한 선형 공급조건(Infinite Line Source)에서 단일 감압정의 수두

하천 제방이나 저수지의 수로 또는 제체와 같이 우물로 유입되는 조건에서는 침투수가 선형으로 무한 공급되는 조건이 될 수 있다. Muskat(1946), Todd(1980)는 이러한 경우를 Fig. 3과 같이 표현하며 임의 지점에서 예상되는 지하수 수두(h_p)와 양수되는 우물에서의 수두(h_w)는 Eq. (8) 및 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다고 제안하였다.

$$h_p = H - \frac{Q_w}{2\pi kD} \ln \frac{r'}{r} \quad (8)$$

$$h_w = H - \frac{Q_w}{2\pi kD} \ln \frac{S}{r_w} \quad (9)$$

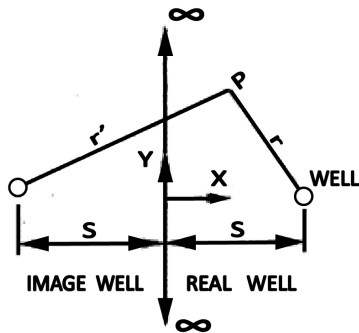


Fig. 3. Influence distance of single well under infinite line source (U.S. Army Corps of Engineers 1992)

여기서 r' : 임의의 지점 p에서 가상의 우물까지의 거리
 r : 임의의 지점 p에서 실제 우물까지의 거리
 S : 실제 우물에서 선형 공급원까지의 거리

Eq. (8)을 Fig. 3에 나타낸 x, y좌표계로 나타내면 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_p = H - \frac{Q_w}{2\pi kD} \ln \left(\frac{y^2 + (x+S)^2}{y^2 + (x-S)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

2.3.2 다중 감압정(Multiple well)의 설계

지중에 다중 감압정이 설치되었을 때 인근에서의 수두 변화 역시 단일 우물이 설치되었을 때 지하수의 변화를 계산하는 방법과 동일하게 계산할 수 있다. 다중 우물 시스템은 Forchheimer(1914)가 제시하고 Dachler(1936)가 수정하여 임의의 지점 예상되는 지하수 수두(h_p)와 양수되는 우물에서의 수두(h_w)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_p = H_1 - \frac{1}{2\pi kD} \left(Q_{w1} \ln \frac{R_1}{r_1} + Q_{w2} \ln \frac{R_2}{r_2} + \dots + Q_{wn} \ln \frac{R_n}{r_n} \right) \quad (11)$$

또는

$$h_p = H_1 - \frac{1}{2\pi kD} \left(\sum_{i=1}^{i=n} Q_{wi} \ln \frac{R_i}{r_i} \right) \quad (12)$$

여기서 H : 시스템에서의 총 수두, n : 우물의 개수
 Q_{wi} : i번째 우물에서의 유출량
 R_i : i번째 우물의 반경
 r_i : 수두 측정지점과 i번째 우물의 거리

지하수가 원형으로 공급되는 경우 다중 감압정이 설치되어 각각의 감압정에서 발생하는 지하수의 유출로 인해 발생하는 수두 강하의 모식도는 Fig. 4에 나타내었다.

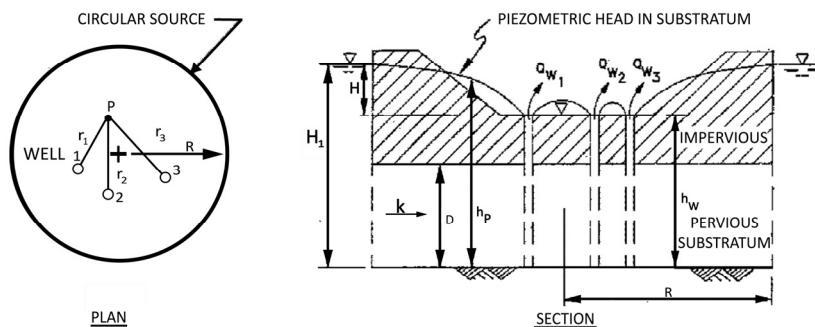


Fig. 4. Piezometric head drawdown of multiple well under circular source (U.S. Army Corps of Engineers 1992)

만약 다중 우물의 직경이 모두 같고 우물이 설치된 표고 (hw)가 모두 동일하다면 우물로 배출되는 지하수의 양은 다음 Eq. (13)을 통해 계산된다.

$$Q_w = \frac{2\pi kD(H_1 - h_w)}{n \sum_{n=1}^{n=n} \ln \frac{R}{r_w}} \quad (13)$$

3. 수치해석

3.1 개요

본 연구에서는 필 댐 또는 하천 제방 제체의 침투수 관리를 위해 설치되는 감압정의 수두강하에 따른 간극수압 저감으로 인한 양압력 감소효과를 정량적으로 확인하기 위하여 수치해석을 통해 감압정의 설치조건에 따른 간극수압 저감 효과를 정량적으로 분석하였다. 침투수 저감을 위한 감압정의 설계는 별도의 설계기준이 없이 전술한 우물에서의 양수로 인한 수위강하 이론을 활용하고 있으며, 관정의 크기에 따라 침투수가 정량적으로 저하되는 해석기법도 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 필댐의 침투해석에 범용적으로 사용되는 Geo-Slope사의 Seep/W 프로그램을 이용하여 감압정의 효과를 확인하고자 하였다.

수치해석에서 수직으로 설치된 관정에서 지하수를 양수할 때의 수위의 변화는 관정을 통해 지하수의 양이 유출되는 방식을 모델링하는 것으로 권장하고 있다. 그러나 이러한 방법은 축대칭 모델링에서는 유효하지만 필댐과 같이 평면변형률 조건에서는 이론식과 같이 해석되지 못하는 문제가 있다. 펌프를 통해 양수하는 관정에서의 수위변화를 예측하는 방법과는 달리 감압정은 수두차에 의해 자연 배수하는 메카니즘이다. 따라서 본 연구에서는 Eq. (14)에서 제안하는 감압정의 침투수 배출량에 따라 감압정의 수위변화를

예측하여 위치수두로 작용하는 방법을 수치해석으로 수행하였다. Eq. (14)에서 우물에서 배출되는 유출량은 지중에 설치된 감압정을 통해 자연 배수되는 유출량으로 가정한다면 Darcy의 법칙을 따라 Eq. (14)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} h_p &= H - \frac{Q_w}{2\pi kD} \ln \frac{R}{r} = H - \frac{kiA}{2\pi kD} \ln \frac{R}{r} \\ &= H - \frac{i2\pi rl}{2\pi D} \ln \frac{R}{r} = H - \frac{irl}{D} \ln \frac{R}{r} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 A : 감압정의 면적, l : 감압정의 길이

감압정의 효과를 위한 수치해석은 Eq. (14)를 이용하여 감압정에서의 수위를 예측하여 수치해석으로 효과를 확인하는 방법으로 수행하였다. 또한 감압정의 정량적인 효과를 확인하기 위하여 필댐의 높이, 경사, 축조재료 그리고 원지반의 투수특성을 변수로 하여 분석함으로써 감압정의 정량적인 침투수 저감 효과를 확인하였다.

3.2 수치해석 조건

본 연구에서의 수치해석은 Jang et al.(2020)이 보고한 수치해석 조건과 동일하게 모형지반을 조성하였으며, 기하학적 조건과 지반의 투수특성 조건을 변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 모형지반은 Fig. 5에 나타내었으며 균질형 제체로 가정하였고, 하부 기초지반도 단일 지층으로 가정하였다. 수치해석은 감압정이 없는 제체와 감압정이 설치된 제체에 대하여 각각 수치해석을 수행함으로써 감압정의 효과를 정량적으로 분석하였다. 수치해석이 수행된 해석 조건은 Table 1에 나타내었다.

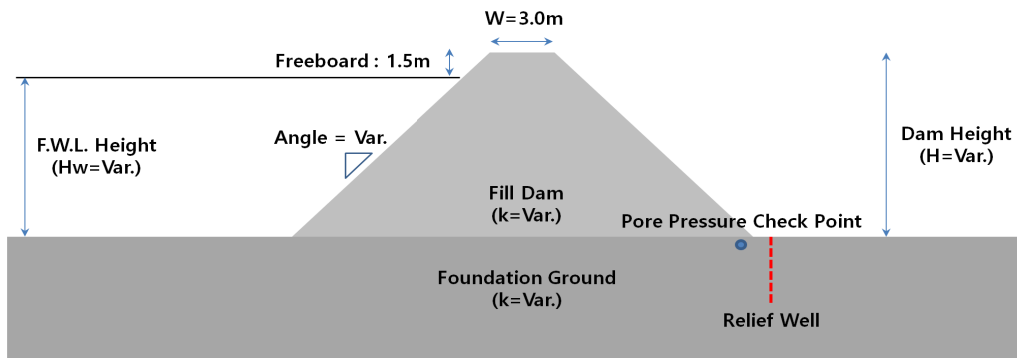


Fig. 5. Numerical analysis model of dam embankment (Jang et al., 2020)

Table 1. Numerical analysis condition

Classification	Homogeneous earth fill dam	Homogeneous earth fill dam with relief well	
Dam height	10m, 20m, 30m	10m, 20m, 30m	
Dam angle	1:2, 1:3, 1:4, 1:5	1:2, 1:3, 1:4, 1:5	
Fill material (Permeability, k=m/sec)	1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	
Foundation material (Permeability, k=m/sec)	1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6} , 1.0×10^{-7} , 1.0×10^{-8}	
Relief well	No	Yes	
		Diameter	150mm, 300mm
		Lenth	0.15H, 0.30H, 1.0H

3.3 수치해석 결과

3.3.1 감압정의 간극수압 저감효과

본 연구에서는 침투수 관리를 위해 설치되는 감압정의 기초지반에 작용하는 간극수압 저감효과를 분석하기 위한 침투해석 모델과 해석결과는 Fig. 6에 나타내었다. 제체의 기하학적 조건과 투수특성에 따른 간극수압의 변화를 중점적으로 분석하였다. 제체의 기하학적 조건이나 투수특성별로 다르게 평가되는 간극수압을 정량적으로 분석하기 위하여 감압정이 설치되지 않은 조건을 기준으로 감압정이 설치되는 조건을 정규화함으로써 감압정의 간극수압 저감비를 산출하였다. 산출된 간극수압 저감비는 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 결과를 이용하여 간극수압 저감비를 기초지반의 투수특성과 제체를 구성하는 성토재의 투수특성 별로 도시하여 Fig. 7에 나타내었다. 간극수압 저감비는 감압정의 간극수압 저감효과를 정량적으로 비교하기 위하여 감압정이 설치되지 않은 조건을 기준으로 설정하고 감압정이 설치된 경우의 간극수압을 비율로 산정하는 정규화 방식으로 산정하였다.

Fig. 7 및 Table 2의 결과를 살펴보면 간극수압저감 효과는 지반의 투수계수가 $1.0E-05m/sec$ 보다 큰 투수성 지반에

서는 감압정으로 인한 간극수압 저감계수는 약 0.615로 비교적 일정하게 나타나나, $1.0E-05m/sec$ 보다 작은 지반에서는 간극수압 저감효과는 변동하는 것으로 나타났다. 제체의 높이가 30m, 20m 그리고 10m로 구성되는 경우 모두에서 감압정으로 인한 간극수압 저감효과는 0.556~0.615의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 제체의 기하학적 조건인 제체의 기울기에는 크게 영향을 받지 않고 감압정의 간극수압 저감효과는 기초지반의 투수특성 그리고 세립질의 기초지반에서는 축조재료의 투수계수가 간극수압 저감효과에 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 7 및 Table 2의 결과를 종합하여 침투수 저감을 위해 설치되는 감압정으로 인해 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효율을 분석하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 감압정으로 인해 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효율을 제체의 기하학적 조건에는 크게 영향을 받지 않으나 기초지반의 투수특성에 영향을 받을 수 있는 것으로 나타났다. 기초지반의 투수계수 $1.0E-5m/sec$ 보다 큰 조립질 지반이거나 투수계수 $1.0E-9m/sec$ 보다 작은 불투수 지반에서는 감압정의 설치여부에 따라 간극수압의 저감효과가 결정되며, 간극수압 저감효과는 일정하게 기대할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 기초지반의 투수계수가 $1.0E-9m/sec \sim 1.0E-5m/sec$ 의 범위를 갖는 경우에는 감압정의 간극수압

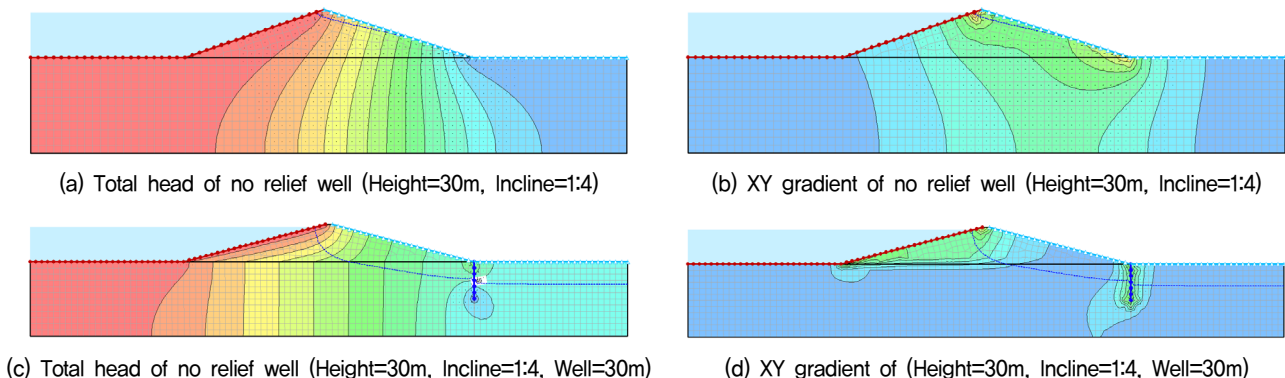


Fig. 6. Numerical analysis result

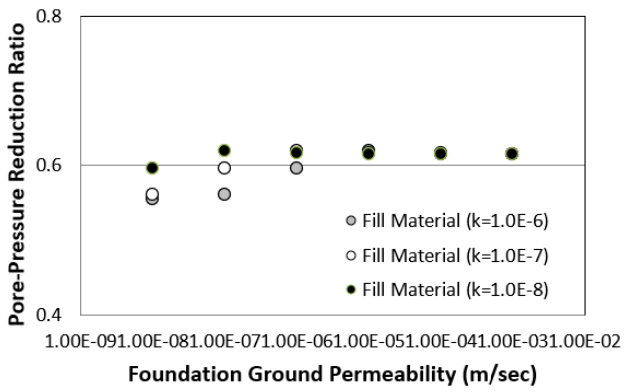
Table 2. Numerical analysis results (Pore-pressure at downstream foundation ground of earth fill dam without relief well)

Classification	Dam condition	Height = 30m, Incline = 1:5.0						Height = 30m, Incline = 1:4.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.556	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596
Classification	Dam condition	Height = 30m, Incline = 1:3.0						Height = 30m, Incline = 1:2.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.556	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596
Classification	Dam condition	Height = 20m, Incline = 1:5.0						Height = 20m, Incline = 1:4.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.556	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596
Classification	Dam condition	Height = 20m, Incline = 1:3.0						Height = 20m, Incline = 1:2.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.556	0.615	0.617	0.619	0.596	0.560	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.560	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596	0.560
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596
Classification	Dam condition	Height = 10m, Incline = 1:5.0						Height = 10m, Incline = 1:4.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.556	0.615	0.617	0.619	0.596	0.561	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.561	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596	0.561
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.617	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596
Classification	Dam condition	Height = 10m, Incline = 1:3.0						Height = 10m, Incline = 1:2.0					
	Dam mat. (k, m/sec)	Dam foundation material (k, m/sec)						Dam foundation material (k, m/sec)					
		1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-03	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08
Pore water pressure reduction Factor	1.0E-06.	0.615	0.616	0.620	0.596	0.561	0.556	0.615	0.617	0.619	0.596	0.561	0.556
	1.0E-07	0.615	0.615	0.616	0.620	0.596	0.561	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596	0.561
	1.0E-08	0.615	0.615	0.615	0.616	0.620	0.596	0.615	0.615	0.615	0.617	0.619	0.596

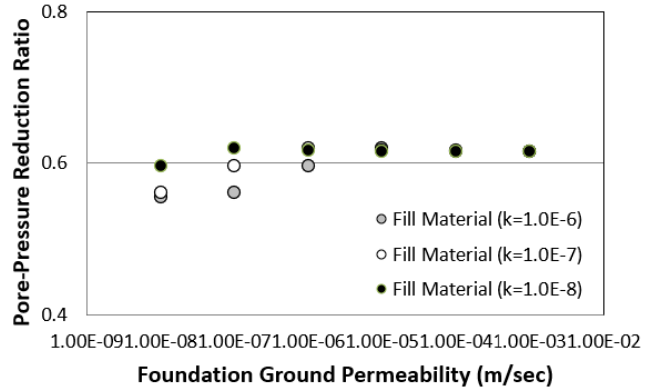
저감효과는 기초지반의 투수특성과 상호작용으로 인해 그 효과가 변동되는 것으로 분석되었다. 따라서 기초지반의 투수계수가 1.0E-9m/sec~1.0E-5m/sec의 범위를 갖는 지반에서는 기초지반의 투수특성과 감압정과의 상호작용을 고려한 감압정의 설계가 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2 제체의 기하학적 조건에 따른 감압정의 간극수압 저감효과

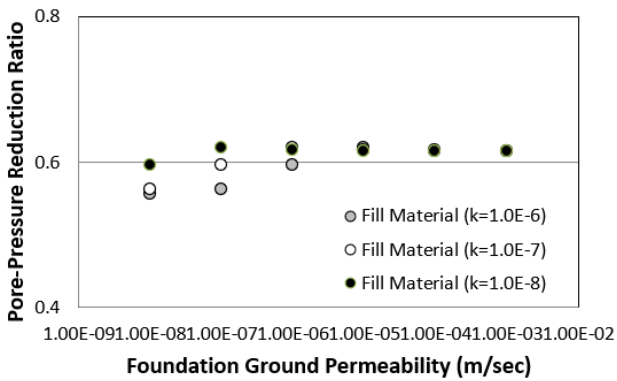
제체의 높이 및 기울기와 같은 기하학적 조건에 따른 감압정의 간극수압 저감효과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 내용을 살펴보면 기초지반 및 성토재료의 투수특성 별로 제체의 높이 및 기울기에 대한 간극수압 저감비는 제체의



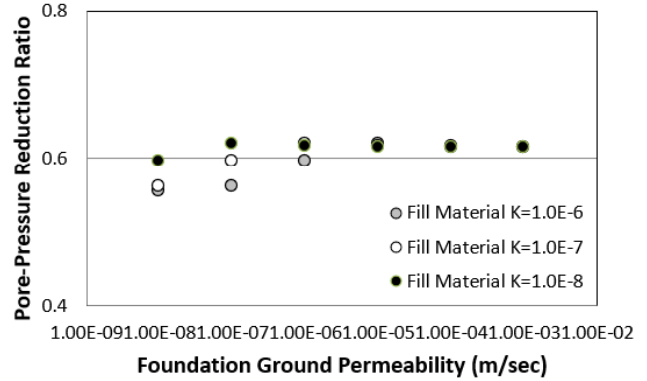
(a) Pore pressure reduction factor (Height=30m, Incline=1:5)



(b) Pore pressure reduction factor (Height=30m, Incline=1:2)



(c) Pore pressure reduction factor (Height=10m, Incline=1:5)



(d) Pore pressure reduction factor (Height=10m, Incline=1:2)

Fig. 7. Pore pressure reduction factor results

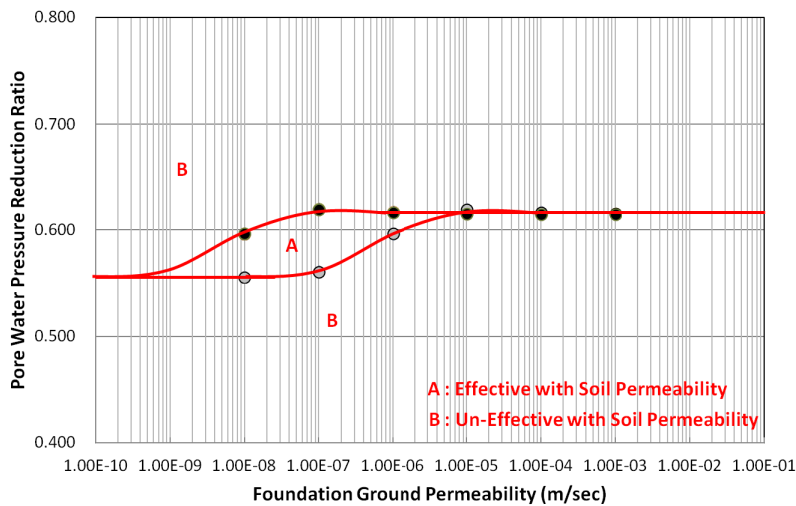
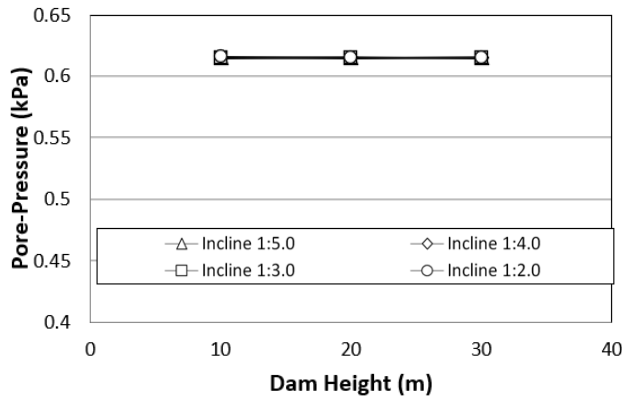


Fig. 8. Pore pressure reduction factor according to foundation ground permeability

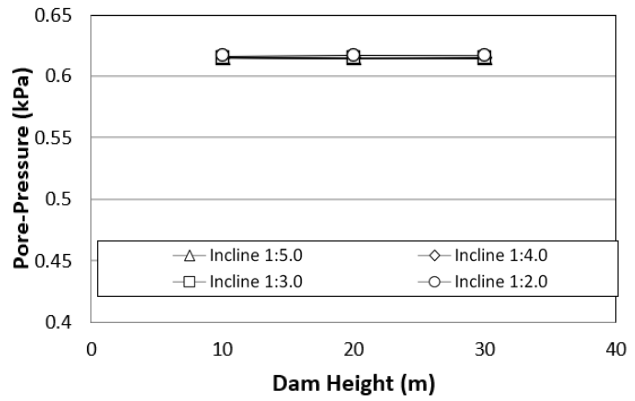
높이에 관계없이 일정하게 평가되었다. 제체의 기울기에 따라 간극수압 저감비는 미세하게 차이를 보이지만 그 차이는 극히 미미한 것으로 확인되었다. 감압정의 간극수압 저감효과는 침투에 영향을 주는 제체의 높이 및 기울기와 같은 기하학적 변수에 따라 일부 차이는 있지만 간극수압의 저감효과 자체에는 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 확인되었다.

3.3.3 지반조건 및 감압정 설치조건에 따른 간극수압 저감효과

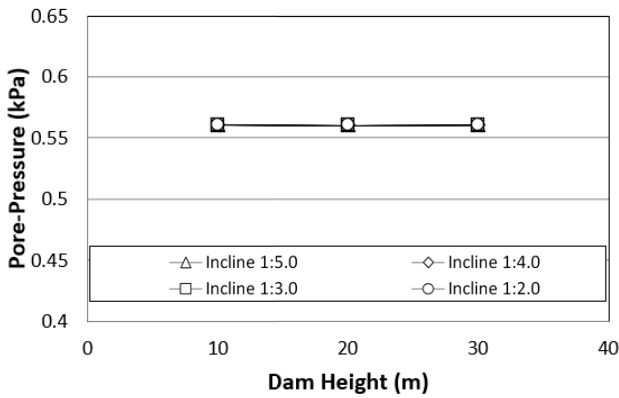
감압정의 설치에 따른 제체의 침투수 처리 효과를 분석한 결과 제체의 높이나 기울기와 같은 기하학적 조건이 침투수 처리효과에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 확인되었고, 감압정의 효율은 기초지반의 투수특성에 따라 부분적으로 영향을 받을 수 있는 것으로 확인되었다. 이와 같이 필 댐이나



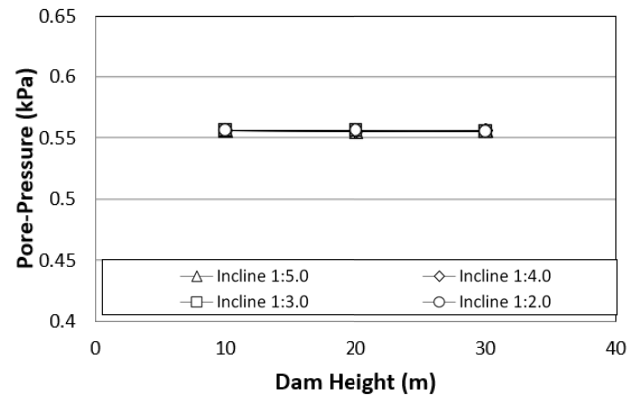
(a) Pore pressure reduction factor (Foundation soil $k=1.0E-3$ m/s)



(b) Pore pressure reduction factor (Foundation soil $k=1.0E-4$ m/s)



(c) Pore pressure reduction factor (Foundation soil $k=1.0E-7$ m/s)



(d) Pore pressure reduction factor (Foundation soil $k=1.0E-8$ m/s)

Fig. 9. Pore pressure reduction factor according to embankment geometric condition (Fill material $k=1.0E-6$ m/s)

제방을 구성하는 기하학적 또는 투수특성 조건 이외에 감압정의 설치조건에 따라 침투수 처리효과가 어떤 영향을 주어 기초지반에 작용하는 간극수압의 변화를 확인하고자 감압정의 설치 조건에 따른 간극수압 저감 효과를 확인하였다.

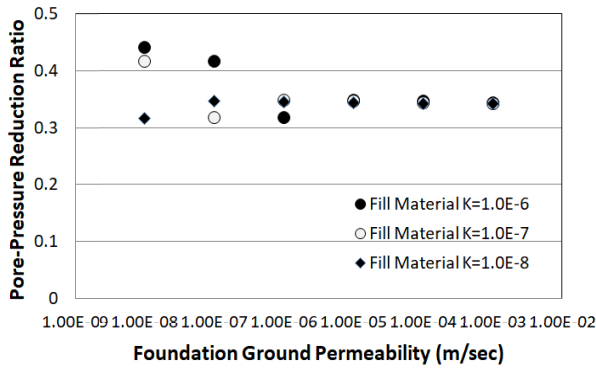
본 연구에서는 제체의 높이, 감압정의 설치 깊이 및 직경 등에 따른 간극수압 저감효과를 확인함으로써 감압정의 설치효과를 확인하였다. 감압정 설치 깊이 및 직경 이외에도 침투수 처리 효과에 영향을 줄 수 있는 감압정의 설치변수는 설치간격이 있을 수 있다. 그러나 감압정의 설치 간격의 경우 평면변형을 해석조건에서는 유효단면적으로 고려할 수밖에 없는 문제가 있어 직경의 변화와 동일하게 해석에 적용될 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 감압정의 직경변화를 변수로 설정하여 분석하였다.

감압정만을 변수로 설정하기 위해 제체의 높이는 30m로 고정하였고, 감압정의 길이는 제체 높이(H)의 0.15H, 0.3H 그리고 1H로 설정하였으며 감압정의 직경은 0.15m 및 0.3m로 설정하여 감압정의 효과를 분석하였다. 감압정이 설치되지 않은 조건의 간극수압을 기준으로 하여 감압정이 설치되어 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과를 중점적으로 분석하였다.

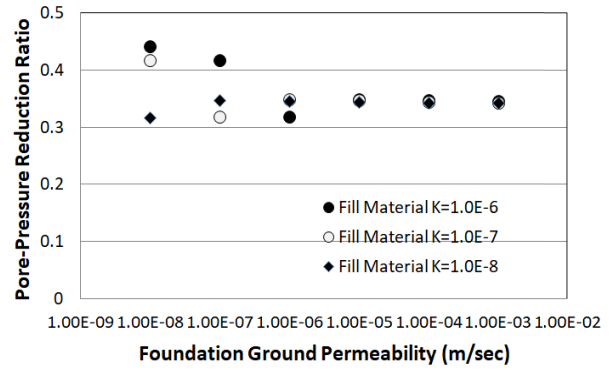
Fig. 10의 결과를 살펴보면 동일한 조건에서 감압정의 길이가 증가하는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면에 단순히 감압정의 직경만이 증가하는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 분석되었다. 감압정의 깊이가 제방의 높이에 비해 작게 부분 관통하여 설치되는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 크게 저하되지만 기초지반의 투수계수가 $1.0E-7$ m/sec 이하로 불투수 지반으로 형성되는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 다시 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과로부터 기초지반이 점성토로 구성되어 있는 등의 불투수 기초지반에서는 감압정의 길이를 부분 관통으로 설치하는 것도 기초지반에 작용하는 간극수압을 저감시키는 효과가 충분할 것으로 생각된다.

3.3.4 평면변형을 조건에서 감압정의 간극수압 저감비 제안

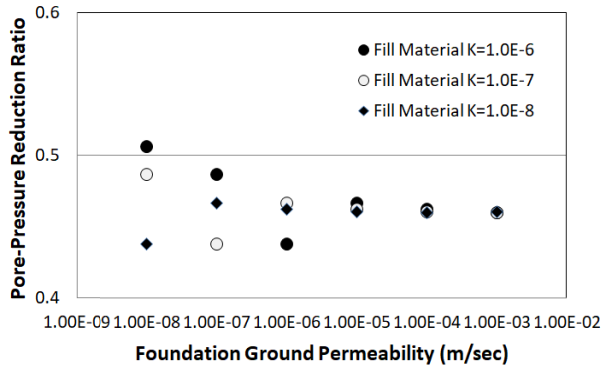
본 연구에서는 감압정의 설치깊이에 따른 제체 비탈면 선단 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감비를 정량적으로 확인하고자 수치해석 기법을 이용하여 간극수압 저감비를 확인하였고, 감압정 설치깊이에 따른 간극수압 저감비를



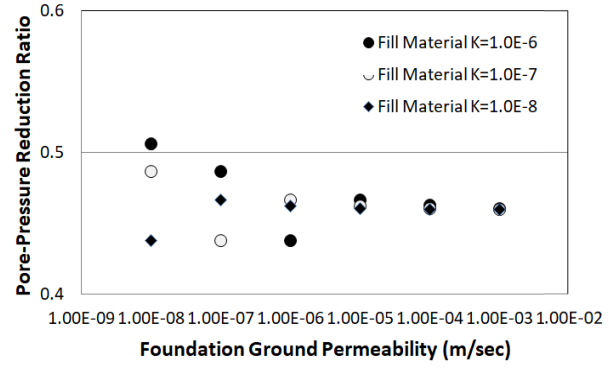
(a) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.15m, H=0.15H)



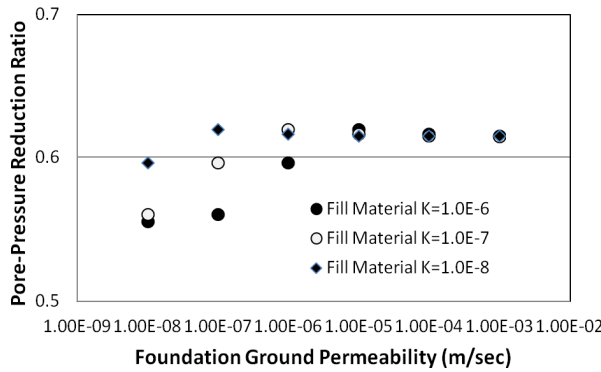
(b) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.30m, H=0.15H)



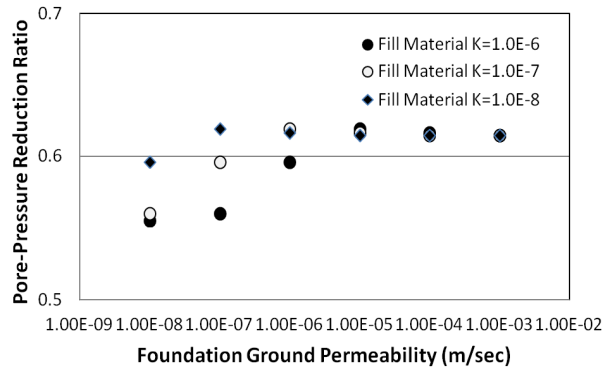
(c) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.15m, H=0.30H)



(d) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.30m, H=0.30H)



(e) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.15m, H=1.0H)



(f) Pore pressure reduction factor (Well Dia.=0.30m, H=1.0H)

Fig. 10. Pore pressure reduction factor according to relief well installation condition

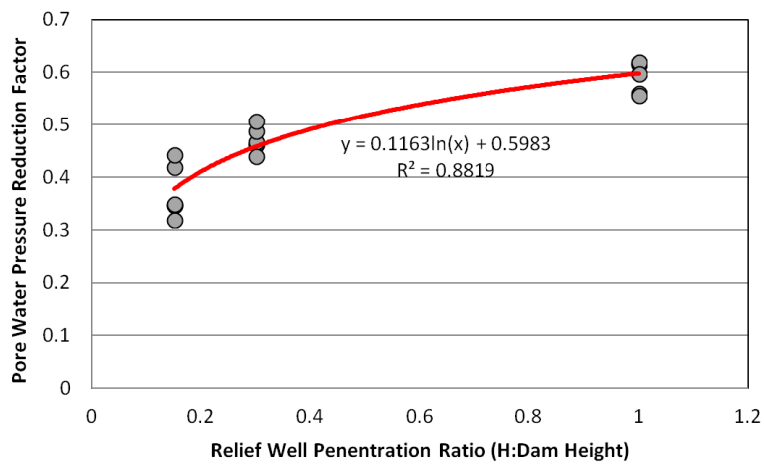


Fig. 11. Pore pressure reduction factor according to relief well penetrate depth

Fig. 11과 같이 제안하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 제체에 감압정을 설치하는 경우 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 기대되며 감압정의 설치깊이에 따라서 간극수압 저감효과는 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 감압정의 설치깊이가 비교적 얇은 부분관통 조건에서는 감압정의 설치에 따른 간극수압 저감효과의 변동이 크게 나타나며, 이는 기초지반, 성토재료의 투수특성과 감압정의 침투수 배출성능 등이 상호 작용하게 되는 것으로 확인하였다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 소규모 필댐 또는 하천 제방에 침투수 관리를 위해 설치되는 감압정의 간극수압 저감효과를 분석하였으며 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 감압정의 설치로 인한 간극수압저감 효과는 지반의 투수계수가 $1.0E-05m/sec$ 보다 큰 투수성 지반에서는 감압정으로 인한 간극수압 저감계수는 약 0.615로 비교적 일정하게 나타나나, $1.0E-05m/sec$ 보다 작은 지반에서는 간극수압 저감효과는 변동하는 것으로 나타났다. 제체의 기하학적 조건인 제체의 기울기에는 크게 영향을 받지 않고 감압정의 간극수압 저감효과는 기초지반의 투수특성 그리고 세립질의 기초지반에서는 축조 재료의 투수계수가 함께 간극수압 저감효과에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (2) 기초지반의 투수계수 $1.0E-5m/sec$ 보다 큰 조립질 지반이거나 투수계수 $1.0E-9m/sec$ 보다 작은 불투수 지반에서는 감압정의 설치여부에 따라 간극수압의 저감효과가 결정되며, 간극수압 저감효과는 일정하게 기대할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 기초지반의 투수계수가 $1.0E-9m/sec \sim 1.0E-5m/sec$ 의 범위를 갖는 경우에는 감압정의 간극수압 저감효과는 기초지반의 투수특성과 상호 작용으로 인해 그 효과가 변동되는 것으로 분석되었다. 따라서 기초지반의 투수계수가 $1.0E-9m/sec \sim 1.0E-5m/sec$ 의 범위를 갖는 지반에서는 기초지반의 투수특성과 감압정과의 상호작용을 고려한 감압정의 설계가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 제체의 높이 및 기울기와 같은 기하학적 조건에 따른 감압정의 간극수압 저감효과는 기초지반 및 성토재료의 투수 특성 별로 제체의 높이 및 기울기에 대한 간극수압 저감비는 제체 높이와 관계없이 일정하게 평가되었다. 따라서 감압정의 간극수압 저감효과는 침투에 영향을

주는 제체의 높이 및 기울기와 같은 기하학적 변수에 따라 일부 차이는 있지만 간극수압의 저감효과 자체에는 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 확인되었다.

- (4) 제체를 구성하는 기하학적 조건이나 지반의 투수특성 등이 동일한 조건에서 감압정의 깊이가 증가하는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면에 단순히 감압정의 직경만이 증가하는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 분석되었다. 감압정의 깊이가 제방의 높이에 비해 작게 부분 관통하여 설치되는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 크게 저하되지만 기초지반의 투수계수가 $1.0E-7m/sec$ 이하로 불투수 지반으로 형성되는 경우에는 기초지반에 작용하는 간극수압의 저감효과가 다시 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 기초지반이 점성토로 구성되어 있는 등의 불투수 기초지반에서는 감압정의 깊이를 부분 관통으로 설치하는 것도 기초지반에 작용하는 간극수압을 저감시키는 효과가 충분할 것으로 생각된다.
- (5) 본 연구에서는 균질형 필 댐 또는 하천제방의 제체에 설치되는 감압정의 효과를 정량적으로 파악하고자 수치 해석 기법을 이용하여 감압정의 침투수 처리 효과를 확인하였다. 그러나 연구에 적용된 수치해석 기법이 2차원 조건인 평면변형률 조건이며, 감압정의 설계를 위한 가정사항으로 시간 의존적이지 않은 정상류 조건에서 수행한 결과로 실제 감압정은 직경이나 설치간격에 의해 침투수의 거동이 상이할 수 있으므로 실규모의 현장 시험 및 계측 그리고 3차원적인 거동특성 분석이 후속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 안동대학교 학술연구조성비(연구교수)에 의하여 연구되었음.

References

1. 건설교통부(2002), 하천설계기준, 861 p.
2. 국토해양부(2011), 댐설계기준, 231 p.
3. Cunny, Robert W., Agostinelli, Victor M. and Taylor, Hugh M. (1989), Levee underseepage software user manual and validation, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 334 p.
4. Dachler, R. (1936), Grundwasserströmung, Wien Verlag Von

- Julius Springer, Vienna, 141 p.
5. Heidarzadeh, M., Mirghasemi, A. A. and Niroomand, H. (2015), Construction of relief wells under artesian flow conditions at dam toes: engineering experiences from karkheh earth dam, *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 73~80.
 6. Forcheimer, P. H. (1914), *Hydraulik*, Leipzig Und Berlin, Teubner, 174 p.
 7. Huibregtse, K. R. and Moser, J. H. (1976), *Handbook for sampling and sample preservation of water and wastewater*, EPA-600/4-76-049, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 258 p.
 8. Jang, J. H., Baek, S. C., Yoo, C. H. and Kim, W. I. (2021), A study on effect of relief well for seepage control on the levee, Korea Geo-Environmental Society Conference, Korean Geo-Environmental Society, pp. 103~104 (In Korean).
 9. Jang, J. H., Yoo, C. H. and Baek, S. C. (2020), Numerical analysis of relief well effect for seepage control of small fill dam, *Journal of Korean Geo-Environmental Society, KGES*, Vol 21, No. 2, pp. 5~13 (In Korean).
 10. Middlebrooks, T. A. and Jervis, W. H. (1947), Relief wells for dams and levees, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 112, Issue 1, pp. 1321~1338.
 11. Muskat, M. (1946), *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, J. W. Edwards, Ann Arbor, MI., 760 p.
 12. Ryu, J. Y., Heo, J. and Chang, Y. C. (2020), Evaluation on the effect of relief wells by 3D numerical analysis on the embankment of an agricultural reservoir, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, KSAE*, Vol. 62, No. 6, pp. 119~129 (In Korean)
 13. Salmasi, F., Mansuri, B. and Raoufi, A. (2015), Use of numerical simulation to measure the effect of relief wells for decreasing uplift in a homogeneous earth dam, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 48, No. 1, pp. 35~45.
 14. Todd, D. K. (1980), *Groundwater hydrology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 552 p.
 15. U.S. Army Corps of Engineers (1992), *Design, Construction and Maintenance of Relief Wells*. EM 1110-2-1914, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, pp. 2-1~2-4.