

하천 보축제체의 배수통문 구조물 측면부 침투 특성

Seepage Behaviors on the Box Culvert Side of Enlarged Levee

양 학 영[†] · 김 영 목¹⁾

Hakyoung Yang · Youngmuk Kim

Received: December 13th, 2019; Revised: January 8th, 2020; Accepted: March 10th, 2020

ABSTRACT : This numerical study is to investigate the seepage characteristics of the side of the structure in the event of leakage from the structural connection part of the drainage structure installed through the enlarged levee, and to analyze the effect of piping on the stabilization of the levee by the lateral penetration behavior. To take into account lateral seepage behavior, 2D and 3D numerical analyses were performed on the same model, and the effect of lateral seepage was analyzed to assess the validity of the numerical analysis. As a result, when leakage occurs and a lateral seepage is considered with the gate located on the riverside land, the maximum pore water pressure near the leakage point of the structure has been reduced by half compared to the normal seepage state where no leakage occurred. Excessive variation in the pore pressure was shown at the lower part of the structure, especially if lateral seepage is not considered. As a water level rises to the high water level, it shows the hydraulic gradient was larger than the critical hydraulic gradient, which will be vulnerable to long-term piping. If a gate is located in the inland and side seepage is not considered, the effect of the seepage water such as hydraulic gradient and seepage velocity is underestimated compared with the case of considering side seepage. The maximum hydraulic gradient is relatively small when lateral seepage is neglected if a gate is located in the riverside land and there was might be a risk of piping or loss of material. In addition, the period exceeding the critical hydraulic gradient was interpreted as a short time zone. As a result, it is considered that the possibility of piping can be underestimated if side seepage is ignored.

Keywords : Levee, Piping, Seepage analysis, Leakage, Box culvert

요 지 : 본 연구는 하천 보축제체 내부를 관통하여 설치되는 배수통문 구조물 연결부에서 누수가 발생하는 경우 구조물 측면의 침투 특성을 파악하고 이러한 측면 침투 거동에 따른 파이핑 등이 제체 안정에 미치는 영향을 분석한 수치해석적 연구이다. 측면 침투 거동을 고려하기 위해 동일한 모델에 대해 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 그리고 측면 침투의 영향을 분석하고 수치 해석의 타당성을 평가하고자 하였다. 연구 결과, 제외지에 수문이 위치한 조건에서 누수가 발생하고 측면 침투를 고려하는 경우 구조물 누수지점 인근의 최대간극수압은 누수가 발생하지 않는 정상적인 침투 상태에 비해 절반 정도로 감소하였다. 특히 측면 침투를 고려하지 않는 경우 구조물 하부에서 과도한 간극수압 변화를 보였다. 구조물 상부와 하부의 동수경사는 고수위로 수위가 상승하면서 한계동수경사보다 큰 동수경사를 나타내고 있어 장기간 파이핑에 취약할 것으로 판단된다. 제내지에 수문이 위치하고 측면침투를 고려하지 않는 경우 동수경사와 침투유속 등 침투수의 영향은 측면침투를 고려하는 경우에 비해 과소하게 해석되었다. 수문이 제외지에 위치하고 누수가 발생하여 파이핑 발생 또는 제체 재료 유실이 우려되는 경우 측면 침투를 무시하게 되면 최대 동수경사는 상대적으로 작게 나타났다. 그리고 한계동수경사를 초과하는 기간도 짧은 시간대로 해석되었다. 결과적으로 측면 침투를 무시하게 되면 파이핑 발생 가능성을 과소하게 평가할 수 있어 주의해야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 하천제방, 파이핑, 침투해석, 누수, 배수통문

1. 서 론

우리나라의 하천 하류지역은 일반적으로 오랜 세월 세립 토의 퇴적으로 인해 두꺼운 충적층이 형성되어 있으며, 이러한 하천 충적층이 연약지반으로 구성되어 있는 경우를 흔히 볼 수 있다(MLTMA, 2010). 하천 제체는 대부분 배수통문 등과 같이 제체를 관통하여 여러 구조물들이 설치되어

있으며, 연약지반상에 설치된 하천 제체에 침하가 발생하게 되면 이에 따라 구조물의 변위를 수반하게 된다. 특히 제방을 보강하기 위해 설치되는 보축제체의 경우 본 제체와 보축부의 설치시기가 다르게 됨에 따라 침하거동도 다르게 나타나게 되며, 이러한 이질적인 침하에 수반되어 구조물의 변형이 발생할 수 있다. 배수통문 구조물의 연결부에서 균열, 이격 또는 파손 등의 손상이 발생하게 되면 이로 인한

[†] President, Taesung E&C co., Ltd. (Corresponding Author : nayhy1@naver.com)

¹⁾ Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

파이핑 가능성이 높게 되고 배수통문 손상부로의 제체를 구성하는 토립자가 유출되게 되면 결과적으로 제체의 안정성을 저해시키는 취약부로 발달할 수 있다.

한국수자원공사에서 운영하는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에 의하면 2019년 현재 우리나라의 국가하천, 지방1급 하천 및 지방2급 하천 등급 이상의 하천에 설치된 수문과 통문 등의 소규모치수시설물은 전국적으로 36,879개가 설치되어 있다고 보고하고 있다.

하천 제방의 안정성을 증대하기 위해 보축을 실시한 예는 주변에서 쉽게 볼 수 있다. 이러한 보축 제체에서 배수통문과 같은 구조물에서의 파손이나 변형 등에 의해 누수가 발생한다면 제체의 안정 및 관리에 중요한 문제가 될 수 있다. 그러므로 누수 또는 파이핑 등에 의한 제체 불안정 조건을 보다 용이하게 판단하거나 예측할 수 있다면 실용적인 관점에서 제체 안정 관리 및 방재에 기여하는 바를 기대할 수 있을 것이다.

2002년 홍수 시 낙동강에서 발생한 제방 파괴 사례를 보면 유실지점이 배수통문 주위에서 발생하였다고 보고하고 있다(KICT, 2005). 한국건설기술연구원(KICT, 2005)의 여러 실제 사례에서 볼 수 있는 바와 같이 배수통문 구조물과 지반과의 상대적인 침하 차이에 의한 공동 발생 또는 파이핑 촉진 등이 제체 파괴의 원인이 될 수 있어 배수통문 구조물의 잔류침하량 제한 등 재해 방지 차원에서 장기적이고 구체적인 관리가 필요하다.

하천 제체의 침투 특성 및 안정성에 관련된 연구를 살펴보면 원형 크기의 실험 모형을 제작하여 실험을 행하기도 하며(Van et al., 2009), 원심모형실험을 행하거나 수치해석 기법을 사용한다(Jin, 2013; Yang, 2019). 수치해석 기법은 실용적인 관점에서 많이 사용하고 있는데, 일반적으로 사용하고 있는 기법은 주로 2차원 해석으로 3차원 해석에 비해 정확성이나 실제 사례를 재현하는 데 제한적인 경우가 있음에도 불구하고 기존의 연구나 실제 적용 사례 등에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 용이하게 적용할 수 있다(Kim et al., 2006; Yang & Kim, 2018).

한편으로는 구조물이 설치된 제체의 침투 해석 시 2차원 해석 결과가 3차원 해석 결과와 유사한 결과를 나타내고 있어 실제 적용에 큰 무리가 없다면 실용적으로 사용할 수 있을 것이다. 그런데 2차원 해석 결과가 제체내의 침투 거동을 정확하게 평가하는 데 문제가 된다면 이에 대한 적용 및 결과 분석 시 주의가 필요할 것이다.

2차원 수치 해석에서는 경계조건 설정 시 제체내에 설치된 배수통문과 같은 구조물이 불투수층으로 간주되므로 구조물 측면으로의 침투는 고려하기 곤란하며, 구조물 측면으

로의 침투 거동을 고려하기 위해서는 3차원 수치해석이 요구된다. 또한, 3차원 해석이 필요한 경우보다 용이한 적용 및 분석 방안의 제시도 필요하며, 이에 대한 다양한 조건에 대한 연구도 필요할 것이다.

본 연구는 하천 제체 내부를 관통하여 설치되는 배수통문 구조물에서의 누수 발생 시 구조물 측면으로의 침투 특성을 파악하고 이러한 측면 침투 거동이 파이핑 등에 의한 제체 안정에 미치는 영향에 관련한 수치해석적 연구이다. 즉, 누수 발생 시 이로 인한 파이핑 등의 제체 불안정 조건을 분석하기 위한 것으로 지반 압밀 등으로 인한 지반 변위 과정은 고려하지 않았으며, 수치해석을 통한 침투해석에 국한하여 연구한 것이다.

본 연구에서는 측면 침투 거동을 고려하기 위해 동일한 모델에 대해 2차원 및 3차원 수치해석을 행하였으며, 비교 분석을 통하여 측면 침투의 영향을 분석하고 수치해석의 타당성을 평가하고자 하였다. 이를 통하여 실용적으로 수치해석 적용 시 주의해야 할 사항을 지적하여 실제 적용에 도움을 주고자 하는 것이다.

보축제체의 사례를 모델로 하여 기존 제체에 위치한 배수통문 구조물과 신설부, 즉 보축부에 위치한 배수통문 구조물과의 연결부에서 누수가 발생할 경우 파이핑 발생으로 인한 제체 손상이나 안정성 손상에 대한 예측, 판단 등에 도움이 될 수 있는 내용에 주안점을 두고 간극수압 및 동수경사의 변화 등을 분석하였다.

2. 해석 모델

2.1 단면 및 지반조건

본 해석 모델은 금강하류 지역에 위치하고 있는 기존제체에 제외지층으로 보축이 이루어진 전형적인 보축제체로서 배수통문 구조물은 제체를 횡단하여 설치되어 있으며, 기존제체 구간으로부터 직접 연결하여 보축 구간까지 연장 설치되었다. 기존제체는 1:2.0 기울기로 축조되어 있었으나 보축 시 1:3.0으로 시공되었으며, 제체 높이는 최대 10m이고, 기초지반은 약 10m 두께의 연약점토층으로 구성되어 있다. 고수위(H.W.L)는 제체 독마루 아래 2m에 위치하며, EL.25.0m이다(MLTMA, 2012; Yang & Kim, 2018).

본 수치해석에 적용된 배수통문 관통 구간의 제체 횡단면은 Fig. 1과 같으며, 제체를 구성하는 제체 재료 및 지반 특성을 정리하면 Fig. 2 및 Table 1과 같다. 본 자료는 제체 보축 시공에 따른 준공 도서를 참고하였다(MLTMA, 2012; Yang & Kim, 2018).

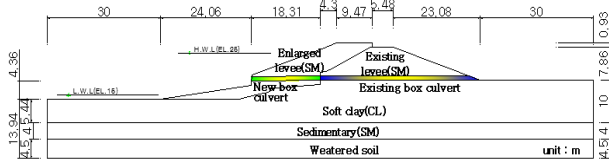


Fig. 1. Cross section of the site (MLTMA, 2012; Yang & Kim, 2018)

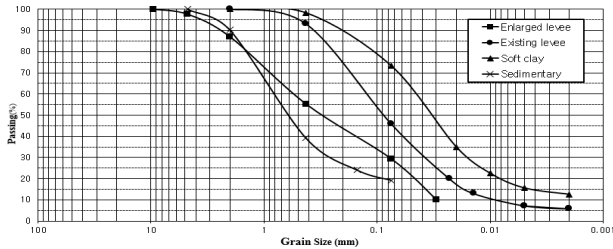


Fig. 2. Grain size distribution curve of soils (MLTMA, 2012; Yang & Kim, 2018)

Table 1. Soil properties (MLTMA, 2012; Yang & Kim, 2018)

Property (USCS)	Enlarged levee (SM)	Existing levee (SM)	Soft clay (CL)	Sedimentary (SM)
Total unit weight (γ_s , kN/m ³)	18.5	17.5	18.7	18.0
Cohesion (c , kN/m ²)	15	10	30	0
Internal friction angle (ϕ)	25	23	0	27
Specific gravity (Gs)	2.67	2.66	2.68	2.65
Void ratio (e)	0.653	0.706	0.847	0.627
Hydraulic conductivity (K_{sat} , m/day)	0.691	4.910	0.017	2.195

측면 침투 특성을 분석하기 위한 침투해석 시 지반 및 제체를 구성하고 있는 재료의 체적함수비와 부간극수압 관계 등 불포화 함수특성은 기존 자료를 활용하였다. 제체 구성 재료의 입도 등의 물리적 특성, 투수시험 결과 및 기존 자료 등을 참고하여 유사한 특성을 갖고 있다고 판단되는 흙의 불포화 특성을 활용하였다.

본 연구 대상 모델의 제체를 구성하고 있는 성토재료는 통일분류법상 실트질모래(SM)로 분류되며, 일반적인 성토 재료로 활용되는 화강풍화토로서 흙의 입도, 투수계수 등 물리적, 공학적 특성이 유사한 것으로 판단되는 성환 풍화토의 자료(Ryu, 1997; Yang & Kim, 2018)를 적용하였으며, 연약점토로 구성된 기초지반은 입도분포곡선과 투수계수 등을 참고하여 기 발표된 점성토 자료(GEOSLOPE, 2012)를 환산하여 적용하였다.

불포화 투수계수와 부간극수압에 대한 특성에 관련하여 Mualem(1976), VanGenuchten(1980) 등은 함수특성곡선에서 투수계수를 추정하는 경험식을 제안한 바 있으며, 투수

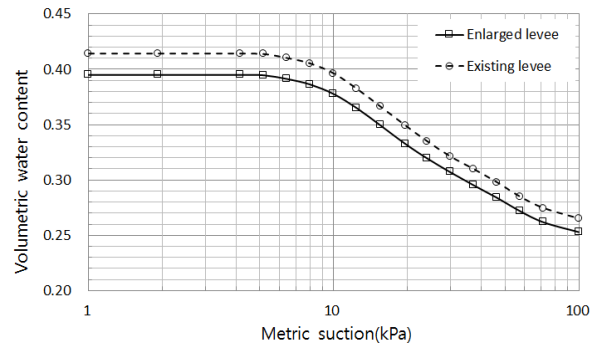


Fig. 3. Soil water retention curve of the materials (Yang & Kim, 2018; Yang, 2019)

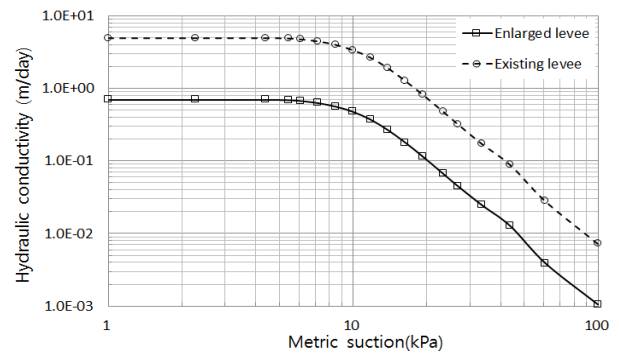


Fig. 4. Unsaturated hydraulic conductivity of the materials (Yang & Kim, 2018; Yang, 2019)

시험결과와 불포화 투수곡선 추정과 관련하여 Kim et al. (2010)의 기존 연구 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 연구 등을 참고하여 실험결과와 일치도가 높다고 평가되고 있는 Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선을 활용하여 체적함수비와 부간극수압의 관계로부터 구하였다(Yang & Kim, 2018; Yang, 2019).

Fig. 3과 Fig. 4는 수치해석에 적용된 제체 재료의 불포화 함수특성을 나타내고 있다.

2.2 해석 조건 및 유한 요소 모델

Fig. 1의 배수통문을 포함하는 보축제체에 대한 비정상류의 측면 침투 특성을 분석하기 위해 3차원 수치해석을 행하였다. 이때 3차원 유한요소망은 Fig. 5와 같으며, 누수지점에 대한 상세는 Fig. 6과 같이 모델링 하였다. 이때 사용된 수치해석방법은 FEM(Finite Element Method)으로 MAIDAS GTS NX(MAIDAS IT, 2016)를 사용하였다.

수치해석 모델에서 제체 내부에 설치되어 있는 배수통문 구조물을 모델링하는 방법은 제체 본체와 달리 구조물은 제체에 비해 크기도 작고 구조물 구성 두께는 더욱 작다. 또한 제체와 다른 이질적인 재료로 구성되어 있어 보다 세분화된 유한 요소의 적용이 필요하다. 그리고 배수통문 구조물의

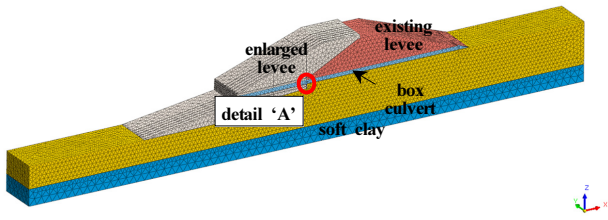


Fig. 5. FEM meshes for numerical analysis

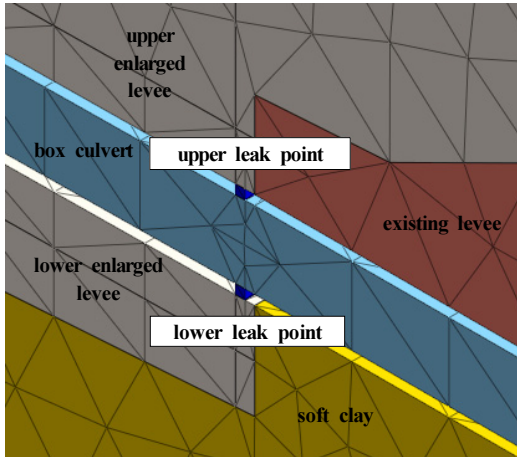


Fig. 6. Location of leakage occurs (detail 'A')

요소 분할이 복잡하여 해석 결과에 대한 분석 위치 추적이 용이하지 않다. 본 연구에서는 보다 실용적인 적용성을 높이기 위해 배수통문 중심축을 기준으로 제체가 좌우 대칭임을 감안하여 3차원으로 모델링하는 방법을 적용하였다. 이에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

해석 모델의 실제 구성은 제체 내부에 배수통문 구조물이 설치되어 있는 형상이다. 즉, 배수통문은 중심축을 기준으로 제체가 좌우 대칭 형태를 보이고 있으며, 이를 감안하여 배수통문 횡단면 중심축을 기준으로 폭 10m의 반단면 제체를 모델링 하였다. 이때 배수통문 구조물의 횡단면 중심축의 표면, 즉 횡방향 X축과 높이 Z축의 XZ면은 Fig. 1의 횡단면이 되며, 제체 길이방향 Y축으로 3차원 해석 모델을 구성하게 된다. 이를 나타내면 Fig. 5와 같은 반단면 제체가 구성된다.

본 해석에서 중요한 조건으로 제시되는 실제 배수통문 크기는 1m×1m의 사각단면으로서 높이 1m는 유지하고 폭은 횡단면 중심축을 기준으로하기 위하여 0.5m로 설정하였다. 경계조건 설정 시 배수통문 구조물은 철근콘크리트 구조물이므로 일정한 두께를 갖게 된다. 이 두께에 해당되는 부분과 닫힌 수문을 모사하기 위한 수문 문짝은 불투수층으로 구성하였는데 이는 해석 모델 설정 시 요소망을 구성하지 않는 방법으로 구현하였다.

배수통문 누수부는 본제체와 증축제체 사이의 경계부로

서 박스 구조물 상부 및 하부에 0.05m 이격을 두고 이 이격부에 유한요소 및 투수 경계조건을 설정하였다. 즉, 배수통문 구조물의 외부는 불투수층으로 조건을 설정하고 누수부는 투수조건으로 경계조건을 설정시켜 누수부로의 침투수 유출입이 가능하도록 하였다.

해석 모델의 요소 크기는 침투 영역의 크기 등 외형적인 조건과 침투 거동 시의 역할, 중요도 등의 내적인 조건 등을 고려하여 배수통문 내부, 누수 발생부, 누수 위치 주변 및 보축제체는 0.5m 및 1m, 기존제체와 하부의 연약점토층은 1m, 그리고 그 이하 원지반은 2m로 설정하였다. 전반적으로 수치해석을 위한 분할요소의 크기는 구조물기초 설계기준 해설(KGS, 2009)에서 제안하는 제체 높이(H)의 1/10 이하가 되도록 설정하였다. 간극수압, 동수경사 및 침투유속을 분석하였으며, 이때 분석 값은 분석위치를 중심으로 분석위치 절점에 접한 요소들의 평균값으로 하였다.

배수통문 측면부의 흐름을 분석하기 위해서 요소분할은 배수통문 구조물 폭 크기인 D=1m를 기준으로 하여 분할하였다. 즉, 구조물과 제체 구성 흔과의 접촉부는 중심축으로부터 0.5D에 위치하고 있으며, 구조물 측면으로부터 요소 분할 시 임의의 위치에서의 흐름 특성을 분석하고 해석 결과 추적의 용이성을 위해 요소의 횡방향 크기를 1m로 일정하게 하였다.

배수통문 내부 및 누수 발생 위치의 절점은 주변 토질재료보다 극단적으로 큰 투수계수($k=10^5 \text{ m/day}$)를 입력하여 파손부로의 침투수가 유입되는 누수 발생 현상이나 통문내부에서 물의 흐름에 최대한 제약이 되지 않도록 모사하였다.

홍수나 폭우 등으로 인해 하천 수위가 상승하게 되면 하천수가 제내지로 역류되는 것을 방지하기 위해 제체를 관통하여 설치된 배수통문의 수문을 닫게 된다. 이때 배수통문에 설치된 수문은 제외지에 위치하는 경우도 있고 제내지에 위치한 경우도 있어 수문의 위치에 따라 제체 침투 특성은 다르게 나타나게 되므로 이를 고려하여 해석 조건을 설정하였다. 또한, 제체를 관통하는 배수통문에 의한 누수가 발생하지 않는 경우를 비교 조건으로 하여 해석을 하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다.

본 연구에서 비교분석을 위해 Yang & Kim(2018)의 2차원 해석 모델을 참고하고, 3차원 모델의 배수통문 구조물의 중심부 단면을 모델로 하여 2차원 해석도 행하였다. 2차원 해석에서는 제체내 배수통문 구조물의 외부, 즉 구조물 상부가 콘크리트의 불투수 조건이 되기 때문에 불투수 경계조건으로 설정된다. 그러므로 구조물 측면부를 통하여 구조물 하부쪽에서의 흐름을 고려할 수 없게 된다.

본제체와 보축제체간의 이질적인 침하가 발생하고 배수

통문과 같이 제체를 횡단하여 설치되는 구조물의 손상이 발생하면 이로 인한 누수는 구조물 상부 및 하부뿐만 아니라 구조물 측면 파손부에서도 발생할 수 있다. 본 연구 조건에서는 구조물 측면부에서의 누수는 고려하지 않고 Fig. 6에서 보는 바와 같이 구조물 상부와 하부에서의 누수를 고려하고 있는데, 이는 구조물 측면으로의 침투 특성을 고려할 수 없는 2차원 침투 해석 조건과 동일한 조건을 설정하기 위한 것이다.

Table 2는 위에서 설명한 해석 조건을 반영하여 수행한 해석케이스를 정리한 것이다.

Table 2. Case of numerical analyses

Item	Analysis part		Central part of structure		Side part of structure	
	3D	2D	3D	2D	2D	3D
Pore water pressure	○	○	○	○	X	○
Hydraulic gradient	○	○	○	○	X	○
Seepage velocity	○	○	○	○	X	○

2.3 수위 조건 및 분석 위치

하천 수위 변화를 고려하기 위해 제체 수위 조건은 0~30일까지 저수위 유지, 4일간(30~34일) 고수위 도달, 5일간(34~39일) 고수위 유지, 그리고 2일간(39~41일) 저수위로 수위 저하, 그 이후 저수위 유지의 조건으로 이는 Fig. 7과 같다(MLTMA, 2012; Yang, 2019). 이때 배수통문 구조물은 제외지역에서 보면 수위가 상승하기 시작하여 31day와 32day 사이에 위치하고 있으며, 수위 하강 시에는 40day와 40.5day 사이에 위치하게 된다.

제체의 침투 거동 및 파이프 등에 의한 제체 안정 분석을 위해 누수발생 위치인 구조물 중앙부 상부 A와 구조물 하부 B 등 2개 위치를 설정하여 분석하였다. 이때 각각의 분석 위치는 구조물로부터 0.5m 떨어진 위치로서 이는 누수 발생 시 누수로 인한 침투 거동을 보다 명확하게 분석하기 위한 것으로 분석 위치가 누수 발생 위치와 지나치게 근접하게 되면 배수통문 구조물 내부로의 침투수 유출 및 구조

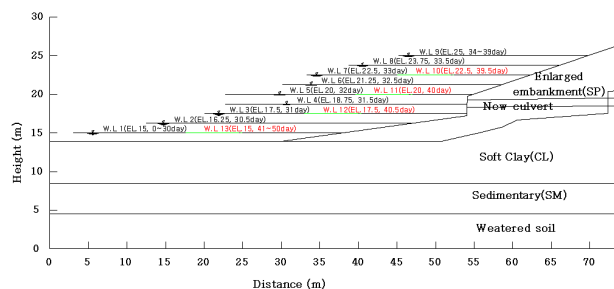


Fig. 7. Variations of water level (MLTMA, 2012; Yang, 2019)

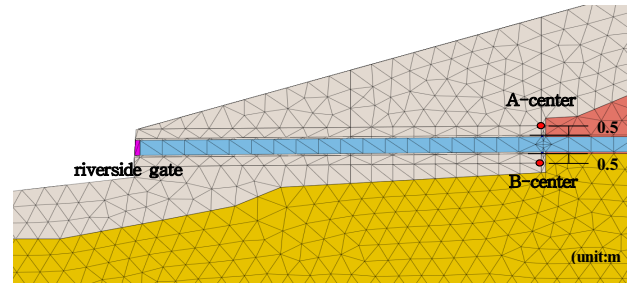


Fig. 8. Analysis location

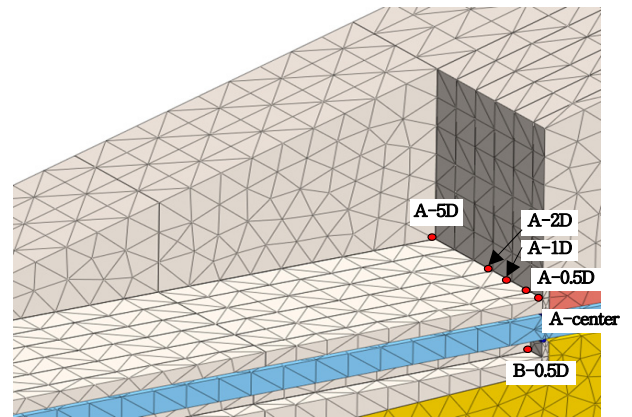


Fig. 9. Analysis location of the sidewall on the structure

물의 경계조건에 따른 직접적인 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 정한 것으로 Fig. 8과 같다. 여기서 분석위치의 설정은 Jin(2013), Yang(2019)의 원심모형실험 및 기존 연구 등을 통해 간극수압 등 누수 발생 시 침투 거동의 변화가 가장 심하게 영향을 받는다고 판단되는 누수부 인근으로 설정하였다.

측면부의 침투 거동을 분석하기 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 본 연구에서는 배수통문 구조물 측면부를 통한 제체 내부의 흐름 영향을 분석하기 위해 구조물 누수부로부터 제체 내부 쪽으로 구조물 측면부, 그리고 인접부의 제체 위치를 정하여 침투 분석을 수행하였다. 즉, 구조물로부터 제체내의 침투거동을 분석하기 위해 A지점과 B지점에서의 분석위치는 배수통문 구조물의 중심부로부터 구조물의 폭(D)을 기준으로 측면외부 접촉부인 0.5D 및 구조물로부터 1D, 2D, 및 5D를 정하였으며, 이는 Fig. 9와 같다.

3. 결과 및 분석

3.1 구조물 중앙부의 흐름 특성

3.1.1 간극수압

누수가 발생하는 경우 간극수압의 변화를 비교 분석하기

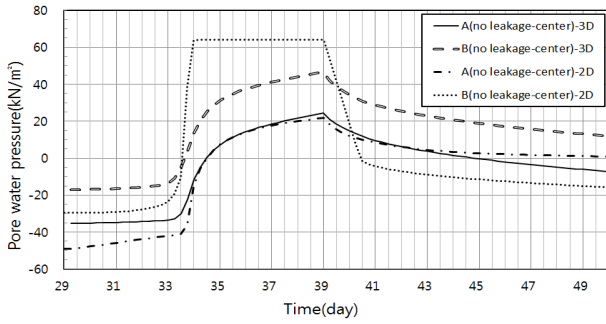


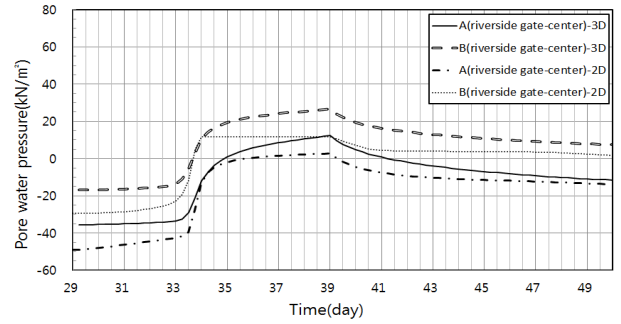
Fig. 10. Change of pore water pressure (no leakage)

위해 누수가 발생하지 않는 정상적인 제체 침투 시 구조물 중앙부 제체내 간극수압의 변화를 나타내면 Fig. 10과 같다. 수위상승이 시작되어 2day가 지난 32day가 되면서 제외지 측 수위가 배수통문 구조물의 하단부 인근에 도달하게 되고 포화영역이 확대됨에 따라 간극수압도 급격하게 증가하게 된다. 구조물 측면부의 흐름이 고려되는 3차원 해석 결과와 측면부의 흐름을 고려할 수 없는 2차원 해석결과와 비교해 보면 배수통문 상부에 위치하는 A는 최대 24.5kPa로서 측면 흐름의 여부에 큰 영향 없이 거의 유사한 크기와 양상의 간극수압 변화를 보이고 있다.

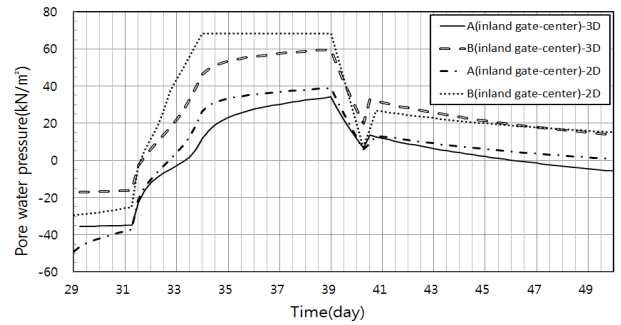
배수통문 하부 B에서의 간극수압은 상부와는 달리 차이를 보이고 있다. 즉, 수위 상승 후 고수위를 유지하는 동안 최대간극수압은 측면부 흐름을 고려하지 않는 2차원 해석 결과에서는 64.1kPa로 일정하게 유지하고 있는 반면, 측면부 흐름을 고려하는 3차원 해석 결과에서는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 지속적으로 상승하는 경향을 보이고 있으며 수위 하강 전 최대 간극수압은 46.5kPa를 보이고 있다. 이러한 차이는 2차원 해석에서는 구조물이 불투수층으로 간주되어 구조물 하부 B에서의 간극수압은 단순하게 제체 하부로부터 정수압 형태로 나타나기 때문으로 보이며, 이는 실제보다 과대하게 해석되는 값으로 판단된다.

누수가 발생하게 되면 이에 따라 간극수압의 분포도 다른 경향을 보이게 된다. Fig. 11은 누수가 발생하는 경우의 간극수압 분포를 나타낸 것이다. 누수부 인근의 구조물 상부 A와 구조물 하부 B의 간극수압은 고수위 유지기간 동안 누수가 발생하지 않는 경우에 비해 큰 폭의 변화가 나타나게 된다.

수문이 제외지에 위치하는 경우 Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 누수 발생 전 Fig. 10에 비해 큰 폭의 감소가 나타나고 있는데, 전반적으로는 측면 흐름을 고려하고 있는 3차원 해석에서 측면 흐름을 고려하지 않은 2차원 해석 결과보다 큰 간극수압의 크기를 보이고 있다. 구체적으로 보면 제외지에 수문이 위치한 경우 누수발생 시 구조물 상부의 경우 간극수압 감소현상의 경향은 누수 전의 Fig. 10과 유사



(a) Riverside gate



(b) Inland gate

Fig. 11. Change of pore water pressure (leakage)

한 변화를 보이고 있다. 누수 발생 시 구조물 상부 A의 최대 간극수압은 12.3kPa로서 누수 전의 약 50%의 크기를 보이고 있으며, 하부 B의 경우 26.5kPa로서 누수 전의 약 57%로 감소하고 있어 구조물 상부와 거의 유사하게 누수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 제외지에 수문이 위치하는 경우 구조물로부터 누수가 발생하게 되면서 간극수압은 대략 50% 정도 감소하였으며, 이러한 간극수압의 감소 현상을 참고해보면 제체내부의 파이핑 등에 의한 제체 안정 손실을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

제외지에 수문이 위치하는 조건에서 구조물 측면 침투를 무시하는 경우 누수 전 구조물 상부 A의 간극수압은 측면 침투를 고려하는 경우와 유사한 21.7kPa를 보였으나 누수 발생 시 2.7kPa로 감소하였고, 하부 B에서는 누수 전 64.1kPa가 11.7kPa로 감소하여 결과적으로 누수 발생 시 대략 80% 이상 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 누수 발생 시 측면 침투가 무시되는 경우 지나치게 큰 변화를 보이고 있어 해석 결과 분석 시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

제내지에 수문이 위치하는 경우 구조물에 누수가 발생하면 수위 증가 시 급속하게 구조물로 유입된 하천수가 수압을 크게 증가시키게 되는 데 전반적으로 측면 흐름을 고려한 경우가 측면 흐름을 무시한 경우에 비해 간극수압이 작게 분포되고 있다. 즉, 제외지에 수문이 위치한 경우와는 달리 수문이 제내지에 위치하는 경우 측면 침투로 인해 오히려

려 측면 침투를 무시하는 경우에 비해 간극수압의 증가가 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 측면 침투 흐름이 누수 발생 시 제체 간극수압의 변화에 영향을 주기 때문으로 판단되며, 구조물 측면 침투를 고려하지 않는 경우 누수 시 간극수압의 변화가 과하게 평가될 수 있음을 알 수 있다.

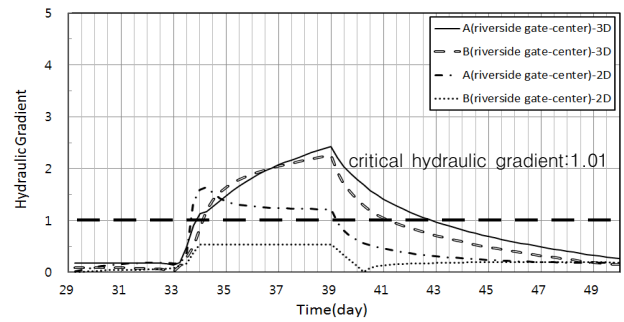
Fig. 11(b)의 제내지에 수문이 위치하고 측면 흐름이 고려되는 경우 고수위로 상승하고 고수위가 유지됨으로 인해 구조물 상부 누수지점 A에서의 간극수압은 최대 34.1kPa를 보이고 있다. 누수가 발생하지 않는 정상적인 침투 시 최대 24.5kPa와 비교하여 보면 약 140% 이상 증가한 값이며, 제체 하부 누수지점 B의 경우에도 약 59.8kPa로서 누수가 발생하지 않는 경우의 46.5kPa와 비교하여 약 130%의 증가를 보이고 있다. 이는 파이핑에 의한 제체 손실이 우려되는 제외지에 수문이 위치한 경우와 달리 구조물 내부로부터 제체로 하천수가 침투하여 간극수압이 증가하게 되는 것으로 이러한 간극수압 증가로 인해 제외지측의 제체 사면 안정성이 감소할 우려가 있다.

제내지에 수문이 위치하고 구조물 측면의 흐름을 무시하는 경우 측면 흐름을 고려하는 경우에 비해 상대적으로 간극수압이 크게 나타나고 있다. Fig. 11(b)에서 알 수 있는 바와 같이 구조물 하부 B의 경우 최대 간극수압은 68.2kPa로서 측면 흐름을 고려한 경우에 비해 약 10% 정도 크게 해석되고 있으며, 상부 A에서도 유사한 결과를 보였다.

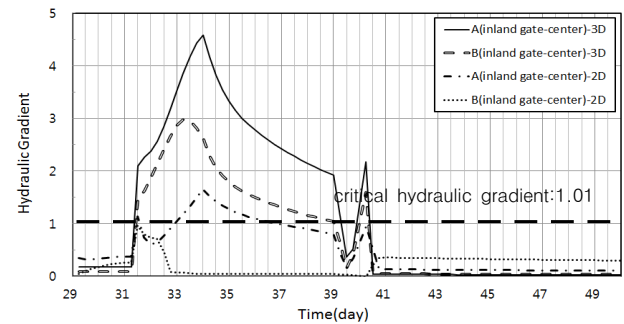
3.1.2 동수경사

누수 발생 시 동수경사의 변화는 파이핑 등에 의한 제체 재료 유실 및 안정성 판단에 대단히 중요하다. Fig. 12는 누수가 발생하는 경우 배수통문 구조물 누수 위치 상부 A와 하부 B에서의 동수경사 변화를 나타낸 것이다. 제외지에 수문이 위치하는 경우 Fig. 12(a)에서 보면 구조물 측면 침투를 고려하면 구조물 상부 A 및 하부 B의 동수경사는 거의 유사한 크기와 경향으로 고수위로 수위가 상승하게 됨에 따라 본 연구조건인 한계동수경사 $i_c = 1.01$ 보다 2배 이상으로 크게 증가하고 있으며, 고수위를 유지하는 동안에도 지속적으로 상승하고 있어 구조물 상부 및 하부 누수지점 양측에서 파이핑이 지속적으로 발생할 수 있을 것으로 보인다. 수위가 고수위로부터 저수위로 하강한 이후 동수경사도 점차 감소하고 있지만 한계동수경사 이상의 동수경사를 한동안 지속적으로 보이고 있어 장기간 파이핑에 의한 제체 재료의 유실 등 제체 안정성을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12(a)에 의하면 측면 침투를 무시하는 경우 구조물



(a) Riverside gate



(b) Inland gate

Fig. 12. Comparison of 3D hydraulic gradient and 2D hydraulic gradient

상부에서는 고수위 기간 동안 파이핑 발생 우려가 나타나고 있으나, 구조물 하부에서는 한계동수경사보다 작게 나타나고 있어 측면 침투를 고려한 경우와 비교해 보면 차이를 보이고 있다. 또한 동수경사가 한계동수경사를 초과하는 기간을 보면 측면 침투를 고려한 해석 결과에서는 저수위로 수위 저하 후에도 한동안 지속되고 있는 데 비해 측면 침투를 무시한 2차원 해석에서는 구조물 상부에서만 고수위 기간에 거의 국한되고 있어 상대적으로 짧은 기간으로 해석되고 있다.

이와 같은 결과 차이를 보이는 주된 이유는 제외지에 수문이 위치하고 고수위가 오래 유지되는 본 해석 조건과 같은 경우 측면침투를 고려하는 3차원 해석에서는 배수통문 구조물의 하부 지반 및 배수통문 누수부로부터 침투수 유출뿐만 아니라 침투 가능 면적이 크고 제체 하부지반에 비해 투수성이 큰 제체부로부터의 장기간에 걸친 침투수가 배수통문 하부에 지속적으로 영향을 주기 때문으로 생각된다.

결과적으로 제외지에 수문이 위치한 경우 누수가 발생하게 되면 고수위로 수위가 상승하면서 침투수가 누수부에도 달하게 됨에 따라 누수와 더불어 고수위 유지 및 수위 하강 이후에 이르기까지 지속적으로 파이핑 현상에 의한 제체 재료의 유실 현상이 발생하여 이로 인한 제체 불안정이 우려되는 것이다. 또한 이러한 현상은 제체 누수부 상부와 하부에서 거의 동시에 유사하게 나타나게 되며 지속시간도 길게

나타날 우려가 있다. 한편, 구조물 측면 침투를 고려하지 않는 경우 누수로 인한 파이핑 우려를 낮게 평가할 수 있고, 특히 구조물 하부 누수의 경우 실제와 다른 판단을 할 수 있어 주의가 요망된다.

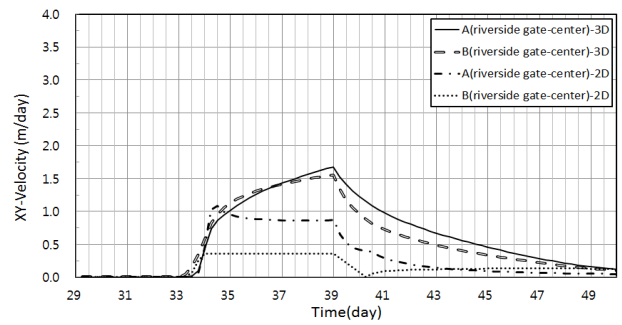
제내지에 수문이 위치한 경우의 동수경사 변화는 Fig. 12(b)와 같다. 수위가 고수위로 상승하게 되면 급속하게 배수통문 내부로 유입된 하천수는 상부 및 하부 누수부를 통하여 제체내로 침투하게 되면서 A 및 B의 동수경사도 급속하게 증가되고, 고수위에 도달하게 되면 최대 크기를 보이게 된다. 고수위를 유지하는 동안 제외지로부터의 침투수가 누수부를 향하여 흐르게 됨에 따라 동수경사는 감소하는 현상을 보이게 되는데 동수경사가 한계동수경사보다 큰 값을 보이고 있으나 침투수의 벡터 방향이 누수부로부터 제체부를 향하기 때문에 제체의 파이핑 발생 우려보다는 앞에서 기술한 바와 같이 큰 동수경사에 의해 제체 포화영역이 확대됨에 따라 제외지측의 사면 안정성에는 부정적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 한편, 수위 하강 후 일시적으로 동수경사가 크게 나타나는데, 이때 제체 침투수가 구조물 내부로 유출되는 현상을 보이는 것으로 동시에 제체 재료의 유실이 우려된다.

구조물 측면으로의 침투 흐름을 무시하는 경우에는 측면 침투를 고려하는 경우에 비해 상대적으로 작은 동수경사를 보이고 있으며, 수위 변화에 따른 변화 경향도 다르게 나타나고 있어 해석 시 주의가 요망된다.

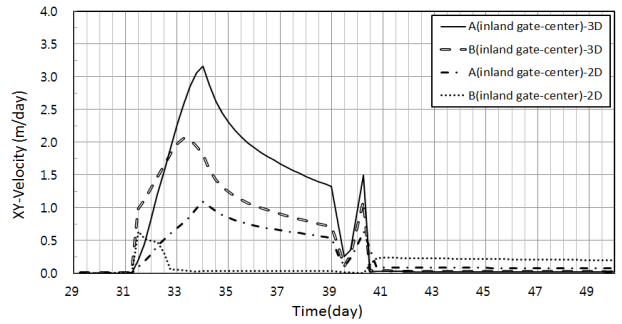
3.1.3 침투유속

Fig. 13은 누수가 발생하게 되는 경우 배수통문 구조물 누수 위치 상부 A와 하부 B에서의 침투유속을 나타낸 것이다. 제외지에 수문이 위치한 경우 전반적으로 누수가 발생하게 되면 동수경사 변화와 유사하게 고수위로 수위 상승 시 침투유속이 급격하게 증가하게 되고, 고수위를 유지하는 동안 지속적인 침투유속의 상승이 나타나고 있다. 수위 하강 시 침투유속의 감소 현상은 수위 하강속도와는 달리 서서히 발생하고 있는데, 이는 제체 내부의 침투수 흐름 영향 때문으로 판단된다.

구조물 측면 침투를 고려하게 되면 이를 무시한 경우보다 상대적으로 누수부의 침투유속이 증가하였으며, 결과적으로 구조물의 측면 침투 흐름이 파이핑 발생 우려에 상대적으로 기여하고 있는 것으로 보인다. 최대 침투유속은 A에서는 고수위에서 수위 하강 전으로 측면 침투를 고려하는 경우 1.7m/day이고, B에서는 1.6m/day로서 유사한 크기를 보였다. 그러나 측면 침투를 무시한 2차원 해석 결과에서는 A에서 1.1m/day를 나타냈으며, B에서는 0.4m/day로서 측면 침투를 고려하는 경우와는 다른 결과를 보여주고 있다.



(a) Riverside gate



(b) Inland gate

Fig. 13. Change of flow velocity

이는 해석 시 측면으로 발생하는 침투수 영향을 고려하지 못하는 경우 파이핑 등의 우려에 대해 과소평가될 수 있음을 주의할 필요가 있다.

Fig. 13(b)는 제내지에 수문이 위치한 경우의 누수 발생 시 침투유속 변화를 나타낸 것이다. 제내지에 수문이 위치한 경우 고수위에 도달하는 34day에서 최대 침투유속을 보이게 되는데, 이때 상부 누수 위치 A에서는 3.2m/day를 보이고 있으며, 하부 누수 위치 B에서는 고수위에 도달하기 전에 최대 침투유속이 2.1m/day를 보이고 있어 상부 누수 위치 A에 비해 대략 2/3 정도의 크기를 보이고 있다.

최대 침투유속을 나타낸 이후 고수위 유지기간 동안 침투유속은 감소하게 되며 고수위로부터 수위 하강이 시작되는 39day에서는 A의 경우 1.3m/day로서 최대 침투유속의 절반 이하를 나타내고 있는데 이는 제외지로부터 침투한 침투수의 영향으로 구조물 누수부를 통하여 제체내로 침투한 침투수의 속도벡터가 감소하기 때문으로 판단된다.

구조물 측면부로부터의 침투수 흐름을 무시한 경우 Fig. 13(b)에서 보는 바와 같이 상부 누수부 A에서의 최대 침투유속은 측면부 흐름을 고려한 경우의 1/3 수준으로 낮게 평가되고 있으며, 하부 누수부 B의 경우에는 더욱 큰 차이를 보이고 있어 구조물 측면 침투를 무시한 경우 실제와는 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 제내지에 수문이 위치하는 경우는 측면침투를 고려하지 않는 해석은 결과적으로 지나치게 낮게 해석하는 경향이 있었다.

3.2 구조물 측면부의 흐름 특성

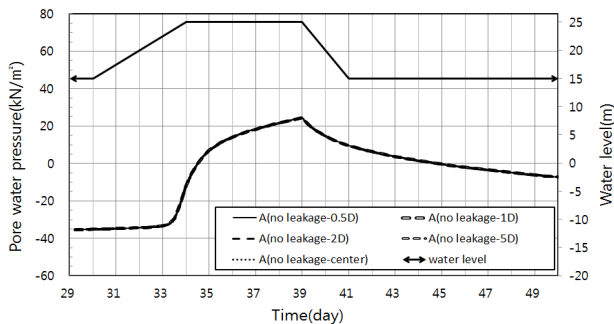
3.2.1 간극수압

누수 발생으로 인한 구조물 측면부의 흐름 특성을 이해 하기 위해 누수가 발생하지 않는 경우의 간극수압 변화를 분석하였다. Fig. 9에서 제시된 바와 같이 배수통문 구조물로부터 측면 접촉부, 그리고 구조물로부터 5D에 이르는 제체내 침투수의 간극수압의 변화를 분석위치 A 및 B에 대해 나타내면 Fig. 14와 같다.

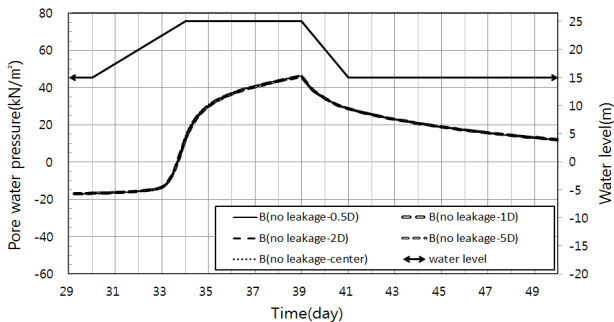
Fig. 14에 의하면 누수가 발생하지 않는 경우 간극수압은 수위 상승 및 고수위 유지, 그리고 수위 하강기간 동안 수위 변화에 따라 구조물에서의 위치에 상관없이 동일한 크기를 보이고 있다. 즉, 이는 누수가 발생하지 않는 경우 간극수압은 구조물의 영향을 받지 않고 측정위치가 구조물로부터 거리 차는 있으나 동일한 높이를 갖는 위치로써 같은 크기의 간극수압 변화를 보이는 것이다.

제외지측에 수문이 위치하고 있고 누수가 발생하는 경우 배수통문 구조물 상부 및 하부 누수위치 A, B에서 구조물 측면부의 간극수압 변화는 다음의 Fig. 15와 같다.

Fig. 15(a)는 구조물 상부 A에서의 누수발생 시 간극수압 변화를 나타낸 것으로 구조물 상부 중심축과 제체와 구조물의 접촉부인 0.5D에서의 간극수압은 거의 유사한 변화 모습을 보이고 있으며, 구조물로부터 멀어짐에 따라 누수로 인한 간극수압 감소현상은 줄어드는 현상을 보이고 있다.



(a) Location A



(b) Location B

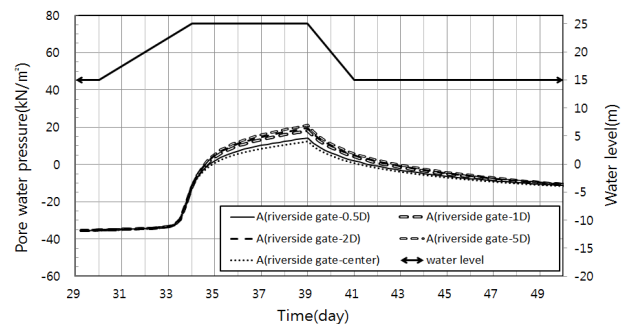
Fig. 14. Change of pore water pressure at the wallside on the structure (no leakage)

한편, 구조물 하부 누수위치 B에서의 간극수압 변화는 Fig. 15(b)와 같으며, 누수 발생 전의 Fig. 14와 비교해 보면 구조물 측면으로부터 5D 정도 떨어지게 되면 누수 영향이 미미한 것을 알 수 있다.

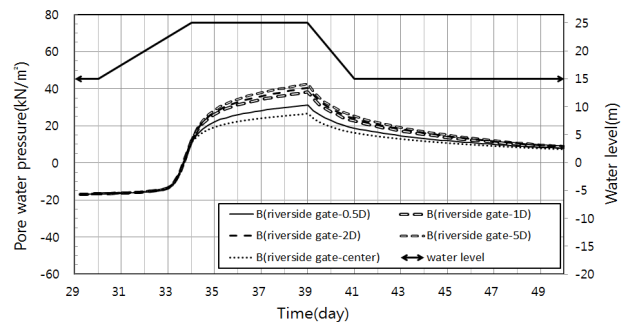
제내지에 수문이 위치하는 경우 누수가 발생하게 되면 제체내 간극수압의 변화를 보면 Fig. 16과 같다. 박스 구조물로 유입된 물이 누수가 발생되면서 제체내로 침투하게 됨에 따라 누수가 발생하지 않는 Fig. 14에 비해 급격하게 간극수압이 증가하게 되며, 구조물로부터 점차 거리가 멀어지면서 누수부 침투수의 영향이 작게 되어 5D에서는 약간 증가하는 현상을 보이고 있다.

한편, 제내지에 수문이 위치하는 경우 배수통문 구조물 하부 B에서의 간극수압 변화를 보면 상부 A에 비해 상대적으로 간극수압의 증가가 크게 나타나고 있으나, 구조물에서 멀리 떨어진 위치 5D에서의 간극수압은 누수 전에 비해 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

제내지에 수문이 위치하는 경우 누수로 인해 간극수압의 증가가 구조물 주변에 크게 나타나고 있고 이러한 간극수압의 증가는 제체 안정성에 불리하게 작용하게 되므로 주의가 필요하다. 특히, 구조물과 제체와의 접촉부의 경우 강도 정수가 제체부에 비해 상대적으로 작을 수 있고, 간극수압의 증가는 구조물 중심부와 유사하게 크게 나타나고 있어 제체 안정성 관점에서 취약부로 발전할 수 있을 것으로 우

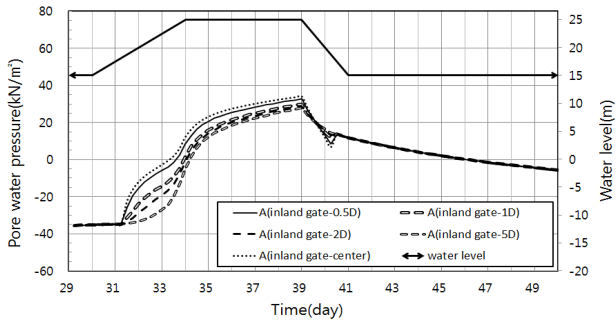


(a) Location A

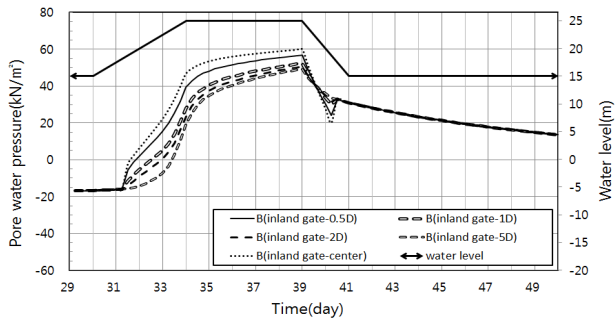


(b) Location B

Fig. 15. Change of pore water pressure at the wallside on the structure (riverside gate)



(a) Location A



(b) Location B

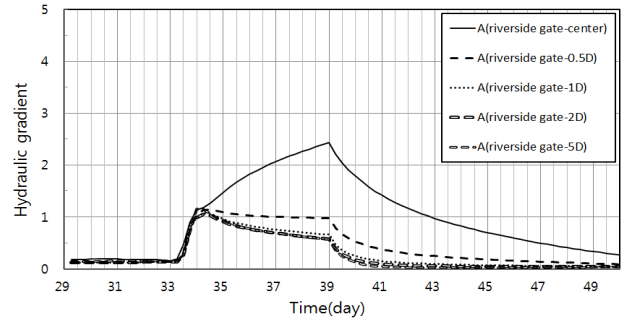
Fig. 16. Change of pore water pressure at the wallside on the structure (inland gate)

려된다. 그러므로 이에 대한 고려가 필요가 있을 것으로 판단된다.

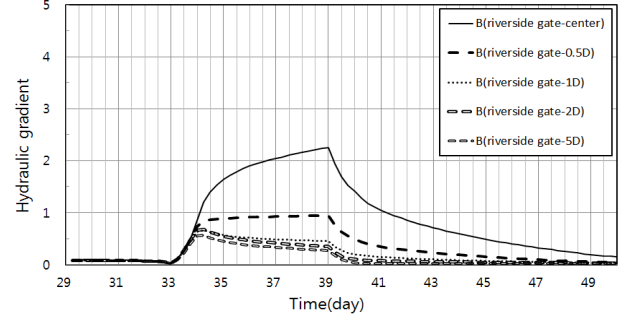
3.2.2 동수경사

Fig. 17은 제외지에 수문이 있는 경우 누수가 발생 시 구조물 측면부의 동수경사 변화를 나타낸 것으로 고수위로 수위 상승 후 고수위 유지기간 동안 구조물 상부 및 하부의 누수위치에서는 지속적으로 동수경사의 상승이 나타나고 있는 반면, 구조물 측면부에서의 동수경사는 고수위 상승 직후 최대 크기를 보이다가 고수위 유지기간 동안 거의 일정한 상태를 유지하고 있다. 구조물 측면부의 구조물과 제체와의 접촉부에서 보면 최대동수경사는 상부 누수부의 40% 정도를 나타내고 있다. 구조물 측면부 제체와의 접촉부로부터 떨어진 위치에서의 동수경사는 고수위가 유지되면서 약간의 하향 경사를 보이고 있으며, 1D에서는 누수의 영향을 약간 받고 있는 것으로 보이나 2D 이상 구조물과 떨어진 위치에서는 거의 유사한 크기와 경향을 보이고 있으며 점차 멀어짐에 따라 누수가 발생하지 않는 경우와 유사한 동수경사의 변화를 보이고 있다.

제내지에 수문이 위치하는 경우 누수발생 시 동수경사의 변화는 Fig. 18에서 보는 바와 같이 구조물 측면부로부터 떨어진 위치에서는 구조물 상부 및 하부의 누수위치의 동수경사 변화에 비해 급격하게 작은 값을 보이고 있다.

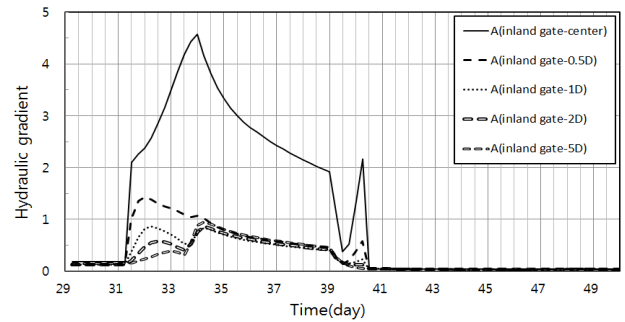


(a) Location A

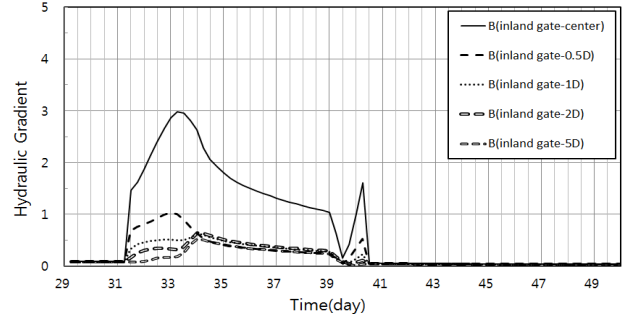


(b) Location B

Fig. 17. Change of hydraulic gradient at the wallside on the structure (riverside gate)



(a) Location A



(b) Location B

Fig. 18. Change of hydraulic gradient at the wallside on the structure (inland gate)

이는 누수부를 통하여 급속하게 제체내로 유입됨에 따라 측면부의 흐름 영향이 작게 나타나기 때문으로 보인다.

고수위 유지기간 동안 동수경사가 점차 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 전반적인 경향과 구조물 측면부에서

의 고수위 유지기간 초기에 일부 변화하는 모습을 보이는 것은 제체 외부에서의 침투수 영향에 기인한 것으로 보인다. 구조물 하부 B에서의 변화는 Fig. 18(b)에서 보는 바와 같이 구조물 상부 A에서의 변화와 유사한 모습을 보인다.

3.2.3 침투유속

수문이 제외지에 위치하고 있고 누수가 발생하는 경우 침투유속의 변화는 Fig. 19와 같다. 구조물 측면부에서의 침투유속은 중앙 누수부의 1/2 이하로 작게 나타나고 있으며, 대략적으로 고수위 유지기간 동안 일정하게 유지되거나 구조물로부터 떨어진 위치에서는 점차 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

전반적으로 누수부 상부와 하부에서 유사한 경향을 보이고 있으며, 대략 구조물 측면부로부터 5D 떨어진 위치에서는 누수 발생이 없는 경우와 유사하게 나타나고 있다.

본 해석 결과를 보면 구조물 측면부 제체와의 접촉부에서의 침투유속은 누수가 없는 경우에 비해 크게 나타나고 있어 해석 시 이를 고려하는 것이 중요하다. 2차원 수치해석에서는 구조물 측면부로의 침투 영향을 고려할 수 없으므로 실제와는 다를 수 있음을 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 20은 제내지에 수문이 위치하고 있고 구조물에서의 누수가 발생하는 경우 침투수의 침투유속 변화를 나타낸 것이다. 구조물 측면부 및 구조물로부터 떨어지는 위치에서는

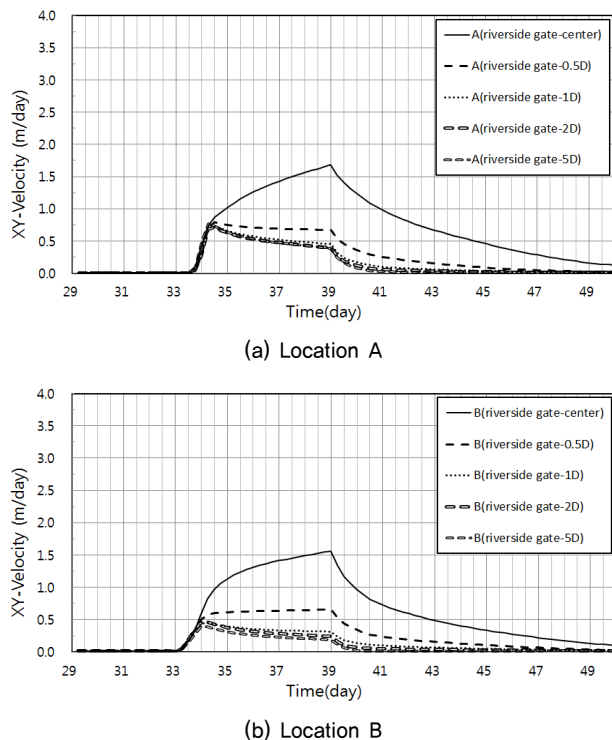


Fig. 19. Change of flow velocity at the wall side on the structure (riverside gate)

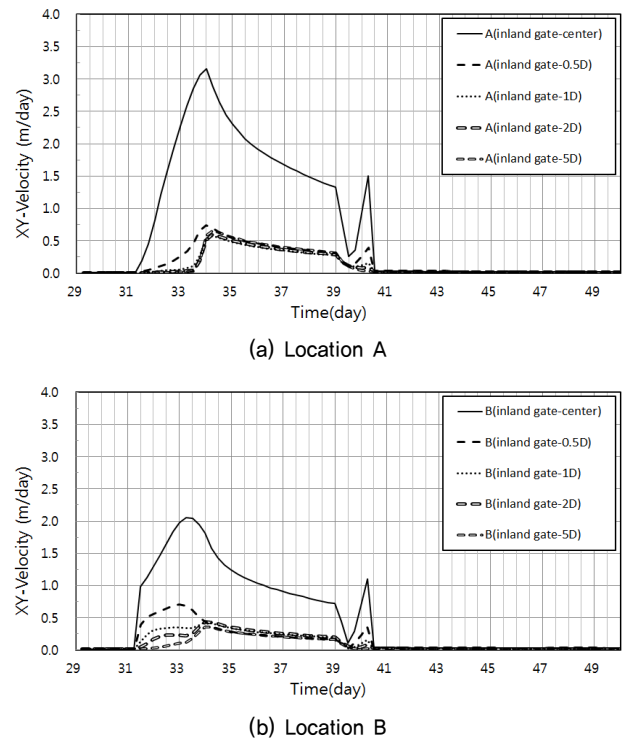


Fig. 20. Change of flow velocity at the wall side on the structure (inland gate)

침투수의 영향이 초기 침투 시를 제외하고는 별로 없어 결과적으로 누수부의 상부 제체로의 침투수 영향이 집중되고 있음을 알 수 있다.

구조물 하부 B에서의 침투유속 변화를 보면 고수위로 수위가 상승하면서 구조물 측면부로의 침투유속도 증가하고 있으나 구조물 중심부에 비하면 상대적으로 작은 크기를 보이고 있다. 제체 외부 하천으로부터의 침투수가 도달하게 됨에 따라 구조물 중심부의 침투유속도 감소하게 되며, 구조물 측면부의 침투유속 역시 감소하게 되어 누수가 발생하지 않는 경우와 거의 크기의 침투유속을 보임에 따라 누수부로부터의 침투수에 대한 영향은 제체 외부 침투수가 도달되기 전에는 받고 있으나 그 후에는 그 영향이 미미한 것으로 보인다.

4. 결 론

하천 보축제체의 배수통문 구조물 연결부에서 누수가 발생하는 경우 이로 인한 제체 침투거동에 관련하여 수치해석을 행하였다. 분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 제외지에 수문이 위치한 조건에서 누수 발생 시 측면 침투를 고려하는 경우 구조물 누수지점 인근의 최대간

극수압은 누수가 발생하지 않는 상태에 비해 절반 정도로 감소하였다. 이러한 간극수압의 감소 현상은 구조물의 누수 및 제체내부의 파이핑 등에 의한 제체 안정 손실을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

- (2) 제외지에 수문이 위치하는 경우 구조물 하부에서의 간극수압은 구조물 침투를 고려하지 않게 되면 누수 전에는 과도하게 평가하고 있으며, 누수발생 후에는 과소하게 평가되었다.
- (3) 제외지에 수문이 위치하고 있고 누수가 발생하게 되면 구조물 측면 침투를 고려하는 경우 고수위로부터 저수위로 하강한 이후 한계동수경사보다 큰 값을 한동안 지속적으로 보이고 있어 장기간 파이핑에 취약할 수 있는 것으로 판단된다.
- (4) 제내지에 수문이 위치한 조건에서 측면침투를 고려하지 않는 경우 동수경사와 침투유속 등 침투수의 영향은 측면침투를 고려하는 경우에 비해 과소하게 해석되었다.
- (5) 제내지에 수문이 위치한 조건에서 누수 발생 시 구조물 측면 접촉부의 간극수압은 구조물 중심부와 유사하게 크게 나타나고 있어 구조물과 제체와의 접촉부의 강도정수가 제체부에 비해 상대적으로 작은 경우 제체 안정성 관점에서 취약부로 발전할 수 있을 것으로 우려된다.
- (6) 누수 발생 시 배수통문 구조물 측면부의 누수 영향은 구조물 중심부에서 폭의 약 5배 정도 떨어진 위치에서는 작게 나타났다.
- (7) 제외지에 수문이 위치한 경우 구조물과 제체와의 접촉부에서의 동수경사는 구조물 상하 누수부 최대동수경사의 약 절반 이하의 크기를 보였다.
- (8) 누수 발생 시 파이핑 또는 제체 재료 유실이 우려되는 수문이 제외지에 위치한 경우 최대 동수경사는 구조물 측면 침투를 무시하게 되면 상대적으로 작게 나타나고 있으며, 한계동수경사를 초과하는 기간도 짧은 시간대로 해석하고 있어 결과적으로 측면 침투를 무시하게 되면 파이핑 발생 가능성을 과소하게 평가할 수 있어 주의해야 할 것으로 판단된다.

References

1. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
2. GEOSLOPE (2012), SEEP Manual, GEO-SLOPE International.
3. Jin, S. W. (2013), Evaluation of levee stability considering foundation soil conditions using centrifuge and numerical modeling, Ph. D. Dissertation, KAIST.
4. Kim, J. M., Choi, B. H., Oh, S. Y. and Kim, K. M. (2006), "Numerical studies for the safety estimation of box-culvert in levee", Journal of Korean Water Resource Association, Vol. 39, No. 6, pp. 479~486 (In Korean).
5. Kim, Y. K., Choi, K. L., Lee, S. J., Lee, S. R. and Kwon, H. S. (2010), "Estimation of unsaturated permeability function from water retention characteristics for Korean weathered soils", Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 10, pp. 49~60 (In Korean).
6. Korean Geotechnical Society (KGS) (2009), Explanation of Structure Foundation Design Code, Goomibook, pp. 628 (In Korean).
7. Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2005), Development of Advanced Design and Maintenance Technology for Culvert in Levee, Construction and Transportation R&D Report, Ministry of Construction & Transportation (In Korean).
8. MAIDAS IT (2016), GTS NX Analysis reference (In Korean).
9. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", Water Resources Research, Vol. 12, pp. 513~522.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2013), National Road Construction Design Practice Tips (In Korean).
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009), River Design Standard·Explanation, Korea Water Resources Association (In Korean).
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010), Development and Operation of Sluice Gate Management System-V in 2010 (In Korean).
13. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2012), The Revitalizing Project of Geum River Lot No.5 (Buyeo), Report of Soil Exploration (In Korean).
14. Ryu, C. H. (1997), Characteristics of permeability and shear strength of unsaturated weathered granite soils, Ph. D. Dissertation, Dongguk University (In Korean).
15. Van Genuchten, M. Th. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science, Society of American Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 892~898.
16. Van, M. A., Zwanenburg, C., Koelewijn, A. R. and Van Lottum, H. (2009), "Evaluation of Full Scale Levee Stability Tests at Booneschans and Corresponding Centrifuge Tests", Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 2048~2051.
17. Yang, H. Y. (2019), Seepage characteristics due to leakage of levee buried box culvert using centrifuge and numerical modeling, Ph. D. Dissertation, Hanbat National University (In Korean).
18. Yang, H. Y. and Kim, Y. M. (2018), "Seepage behaviors of enlargement levee containing box culvert constructed on soft ground", Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol. 34, No. 3, pp. 29~41 (In Korean).