

# 연약지반에 설치된 배수통문을 포함하는 하천 보축제체의 수문 위치에 따른 침투 거동

## Seepage Behaviors of Enlargement Levee Containing Box Culvert Constructed on Soft Ground

양 학 영<sup>1</sup> Yang, Hak-Young

김 영 목<sup>2</sup> Kim, Young-Muk

### Abstract

In the case of the enlargement levee on the soft foundation, the existing levee and the enlargement levee connection can be damaged due to heterogeneous subsidence such as differential settlement at the joint of the box culvert passing through the levee. This study selected the downstream region of the Geum River and then confirmed the influence of the piping possibility on the levee by performing a 2D seepage analysis and analyzing the seepage tendency according to the position of the box culvert's gate. As a result, the flow velocity and the hydraulic gradient are larger in the upper breakage than the lower breakage, and the upper leak was more vulnerable to the piping than the lower leak. If leaks occur in the gate located on the riverside land, the risk of piping is increased when the water level rises and is maintained highly. In the case of the gate located on the inland, it could be predicted that the leakage could damage the stability of levee by increasing the water pressure inside the levee. As a result, if leakage occurs at any position in the box culvert, the pore water pressure is increased or decreased compared with the case when no leakage occurs. Therefore, if the pore water pressure is drastically reduced or increased compared with the normal case, leakage may occur. However, the result of this study is based on a 2D seepage analysis, and it is likely to be different from actual cases. Therefore, more detailed analysis by 3D analysis is recommended.

### 요 지

연약지반에 설치된 하천보축제체에서 기존제체와 보축제체 연결부는 부등침하와 같은 이질적인 지반침하에 의해 제체를 관통하는 배수통문 연결부에서 파손 등의 손상이 발생할 수 있다. 본 연구는 금강하류 지역을 선정하여 2차원 침투해석을 수행하고 배수통문 수문의 위치에 따른 침투 경향을 분석하여 파이핑 발생 가능성 등이 제체에 미치는 영향을 확인하였다. 연구 결과 상부 파손부가 하부 파손부보다 침투 유출 속도 및 동수경사가 크게 나타나고 있어 상부측의 누수가 하부측의 누수에 비해 상대적으로 파이핑 발생에 취약함을 알 수 있었다. 제외지측에 수문이 위치하는 경우 누수가 발생하면 수위 상승시 및 고수위 유지시 파이핑 발생 우려가 증가하였으며, 제내지측에 수문이 위치하는 경우 누수로 인해 제체내 수압을 증가시켜 제체의 안정성을 훼손시킬 수 있음을 예측할 수 있었다. 결과적으로 배수통문 구조물 임의의 위치에 누수가 발생하면 이로 인해 누수가 발생하지 않을 때 보다 간극수압을 증감시키는 결과를

1 정회원, 한밭대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Hanbat National Univ., Tel: +82-42-603-4812, Fax: +82-42-603-4892, [nayhy1@naver.com](mailto:nayhy1@naver.com), 교신저자)

2 정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Hanbat National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가져오게 되므로 정상적인 경우에 비해 간극수압의 급격한 감소 또는 증가가 관측된다면 누수 발생을 우려할 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 본 연구 결과 분석은 2차원 침투해석을 바탕으로 수행된 것으로서 실제의 경우와는 차이가 있을 것으로 보인다. 따라서 3차원 해석을 통한 보다 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

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

## 1. 서론

강우의 집중화 및 불규칙성 등 기후의 급격한 변화는 자연재해를 야기 시킬 수 있는 요인을 제공하고 있으며, 이는 결과적으로 하천과 관련된 시설물 계획시 계획 홍수위의 증가와 기존 제체의 보강 필요성을 요구하게 된다. 제체의 보강은 여러 방법이 활용될 수 있다. 그 중 미국의 뉴올리온즈의 경우와 같이 제체에 설치된 구조물을 보강하는 방법도 있으며(Adams, 2011), 주변에서 흔히 볼 수 있는 것으로 단면을 증축시키는 방법, 즉 보축을 하는 방법도 있다(MLTMA, 2010). 이때 제체를 보축하는 경우 기존에 존재하던 배수통문 및 통관, 배수문 등과 같은 하천제체를 횡단하여 설치된 구조물도 연장 시공을 실시하게 된다.

배수통문 구조물이나 매설 관로 등과 같이 지반에 설치되는 구조물들의 거동은 지반 조건의 영향을 받게 된다(Kim et al., 2017; Saadeldin et al., 2015). 일반적으로 우리나라의 하천 하류지역은 오랜 세월 동안 세립토의 퇴적에 의해 넓고 두꺼운 충적층을 형성하고 있으며, 이러한 하천 충적층은 지반침하 가능성이 높은 연약지반으로 구성되어 있는 경우를 쉽게 볼 수 있다(MLTMA, 2010). 연약한 충적층위에 설치되어 있는 하천제체는 침하에 대한 부담을 피할 수 없으며, 특히 기존 제체의 보축은 새로운 상재하중 증가를 수반함에 따라 기존제체 구간과 보축제체 구간의 이질적인 지반침하를 유발시킬 수 있고 이 영향으로 기존 배수통문 구조물과 새로 신설되는 배수통문 구조물의 연결부에서 균열, 파손 및 이격 등의 손상 발생 가능성이 높다. 이와 관련하여 Jin(2013), Jin et al.(2014)은 연약지반 위에 시공된 제체에 대해 보축을 실시할 경우 기존제체와 보축제체 구간의 시간적 차이에 따른 시공으로 인해 기초 연약층에서 부등침하와 같은 이질적인 침하와 배수구조물의 변형이 발생할 수 있음을 원심모형실험을 통해 밝힌 바 있다. 이러한 조건에서 유발될 수 있는 배수통문 구조물의 손상은 제체 침투거리 단축으로 동수경사가 증가하여 파이핑 발생 가능성이 높

고 이때 발생하는 침투는 배수통문 손상부로 토립자 유출을 발생시켜 결과적으로 배수통문 구조물의 손상부가 제체의 안정성을 저해하는 취약부로 발전할 수 있다.

제체의 안정과 관련하여 배수통문의 수문 위치가 제체의 안정성에 미치는 영향에 대해서는 분명하게 규명되지 않고 있다. 즉, 앞에서 예상한 바와 같이 배수통문 구조물의 손상에 의한 제체의 유실이나 파이핑 발생 등 제체의 안정성과 관련하여 수문 위치가 중요한 요소가 될 수 있다. 우리나라의 하천설계기준(MLTMA, 2009)에서는 배수통문 설치 위치를 수층부나 연약지반은 피하고 하상이 안정된 지점을 선정하도록 하고 있으며, 부득이한 경우 연약지반상 구조물의 기초지반은 연약지반처리공법을 적용하고, 말뚝기초 사용을 원칙적으로 금지하고 있다. 그러나 아무리 설계 및 시공을 관련 기준 및 지침에 의거 완벽히 실시하더라도 구조물을 설치할 수 있는 현장 조건은 대부분 제한적일 수밖에 없고, 예상치 못한 불안정 요소는 언제든지 나타날 수 있으며 이와 관련된 다양한 사례가 보고되고 있다(KICT, 2005).

암거를 포함한 수문은 내수 배제, 역류 방지 및 각종 용수의 취수를 위해 하천 또는 제방에 설치되는 구조물로서(MLTMA, 2009) 본 연구는 배수통문의 기존제체 구간과 보축제체 구간 연결부에서 손상 발생시 위치별로 배수통문의 수문이 닫혀 있을 경우에 대하여 수치해석을 통해 2차원 침투 특성을 분석한 것이다. 분석결과로 부터 파이핑 발생 가능성을 예측하고 배수통문의 수문위치가 보축제체의 안정성에 기여하는 바를 평가하여 제체의 유지 관리 및 설계시 합리적인 기준 설정에 도움을 주고자 하는 것이다.

이때 배수통문의 수문은 제외지층에 위치하고 닫혀 있으며 파손부로의 유출이 발생하지 않을 경우(또는 파손이 발생하지 않았을 경우)와 닫혀 있는 수문이 제외지에 위치하는 경우, 제내지에 위치하는 경우, 그리고 제내지 및 제외지 양쪽에 위치하는 경우에서 파손부에서의 누수로 인한 유출이 발생하는 경우 등 4가지 조건으로 구분하였다.

## 2. 모델 해석

### 2.1 단면 및 지반 조건

본 연구의 모델해석을 위한 대상지는 금강하류 지역으로 기존제체에 제외지층으로 보축이 이루어진 전형적인 보축 제체이다. 배수통문은 제체를 횡단하여 설치되어 있으며 기존제체 구간으로부터 직접 연결하여 보축 구간까지 연장 설치되었다.

본 제체가 위치하고 있는 지역은 고수부지가 없어 수위상승시 영향을 직접 받을 가능성이 있으며, 제내지는 독마루에 인접하여 다수의 가옥이 위치해 있어 제체 붕괴시 유무형의 상당한 피해가 예상되는 곳이다. 기존제

체는 제외지 경사가 1:2.0으로 축조되어 있었으나 보축시 1:3.0으로 시공되었다. 제체 높이는 최대 10m 이고, 기초지반은 약 10m두께의 연약점토층으로 구성되어 있다. 고수위(H.W.L)는 제체 독마루 아래 2m에 위치하는 EL. 25.0m이다(MLTMA, 2012).

수치해석에 적용된 제체 단면은 Fig. 1에서 제시하고 있는 바와 같다. 그리고 제체 구성의 지반 특성 및 입도 분포곡선은 Table 1 및 Fig. 2와 같으며, 제체 보축 시공에 따른 준공도서를 참고하였다(MLTMA, 2012).

지반 및 제체를 구성하고 있는 재료의 체적함수비와 부간극수압(metric suction) 관계 등 불포화 함수특성은 기존 자료를 활용하였다. 즉, 본 제체의 성토재료는 일반적인 성토재료로 활용되는 화강풍화토로서 흙의 입

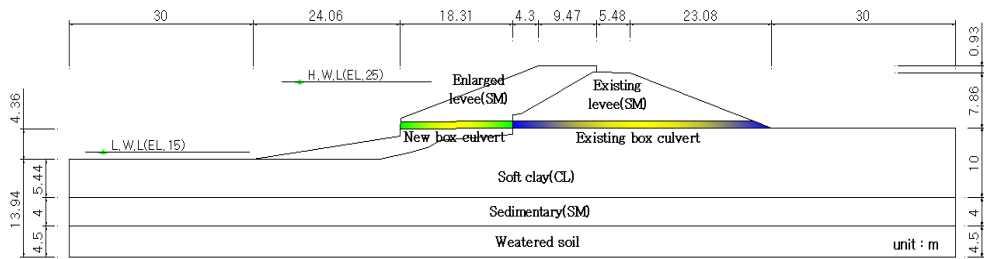


Fig. 1. Cross section of the site

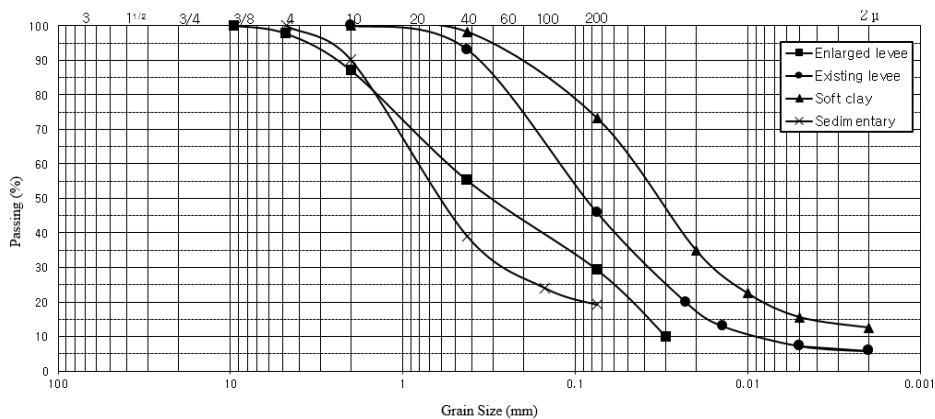


Fig. 2. Grain size distribution curve of soils

Table 1. Soil properties

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

도 등 물리적 특성이 유사한 성환 풍화토의 자료(Ryu, 2000)를 적용하였으며, 연약점토로 구성된 기초지반은 점성토 자료(GeoStudio, 2008)를 환산하여 적용하였다. 불포화 투수계수와 부간극수압(metric suction)에 대한 특성은 실제와의 일치도가 높다고 평가되고 있는 Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선(Kim et al., 2010)을 활용하여 체적함수비와 부간극수압의 관계로부터 구하였다.

## 2.2 배수통문 수문 위치에 따른 해석 조건

기초지반이 연약한 층으로 구성된 보축제체에서 배수통문 구조물의 기존제체와 보축제체 사이의 연결부에 기초지반 이질 침하에 따른 균열 및 파손이 발생할 경우 닫힌 수문의 위치가 제체 안정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 비정상류 침투해석을 실시하였으며, 해석 방법은 FEM(finite element method)으로 SEEP/W(GEO-SLOPE, 2008)를 사용한 2차원 해석을 수행하였다.

Fig. 1의 제체 단면으로부터 수치해석을 위한 유한요소망은 Fig. 3과 같으며, 이때 배수통문 구조물의 파손부는 기존제체와 보축제체의 연결부로서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 배수통문 상부와 하부에 폭 0.1m의 요소를 구성하여 모델링 하였다. 수치해석을 위한 분할요소

크기는 구조물 기초 설계기준 해설(KGS, 2009)에서 제안하는 제체 높이(H)의 1/10이하 또는 한 번의 최소길이가 0.5m이하가 되도록 설정하였으며 배수통문 내부 요소망은 0.2m의 조밀한 메쉬로 구성하였다. 이때 배수통문 내부 및 누수 발생 위치의 절점은 주변 토질재료보다 극단적으로 큰 투수계수( $k=10^3 \text{m/sec}$ )를 입력하여 파손부로의 침투수가 유입되는 누수 발생 현상이나 통관내부에서 물의 흐름에 최대한 제약이 되지 않도록 모사하였다. 또한 배수통문을 구성하는 외부 두께에 해당되는 부분은 불투수층으로 설정하였다.

하천 수위가 상승하게 되면 제내지로의 역류를 방지하기 위해 제체에 설치된 배수통문의 수문을 닫게 된다. 이에 따라 해석 조건은 닫힌 수문이 제외지에 위치한 경우, 제내지에 위치한 경우, 제외지와 제내지에 위치한 경우와 더불어 파손부로 누수로 인한 유출이 발생하지 않을 경우(또는 파손이 발생하지 않았을 경우)에 대해서 배수통문의 수문이 제외지에 설치한 경우 등으로 구분하여 조건을 설정하였다.

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 조건으

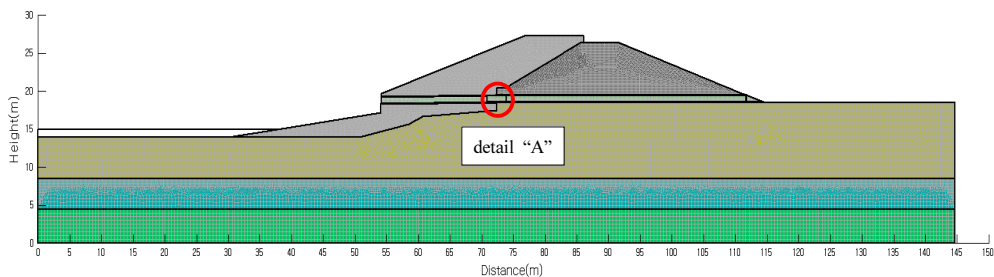


Fig. 3. FEM meshes for numerical analysis

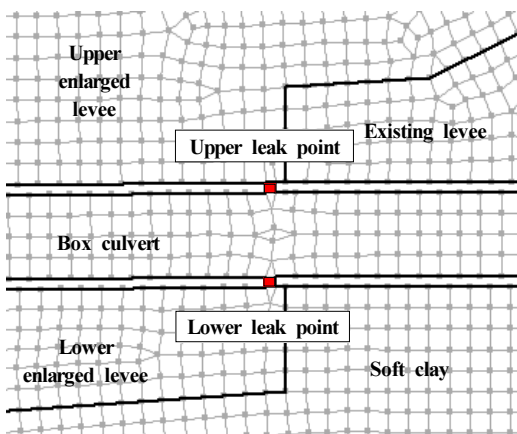


Fig. 4. Location of leakage occurs (detail "A")

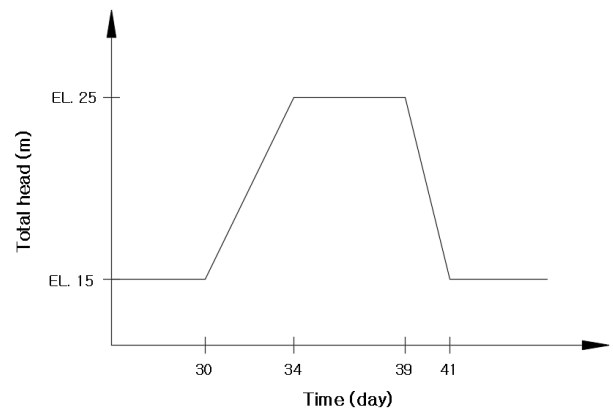


Fig. 5. Variations of water level

로 이는 Fig. 5와 같다.

파이핑에 의한 제체 안정 분석은 침투 유출 속도와 동수경사 및 간극수압 분포를 구하고 이를 분석하여 평가하였다. 이때 침투 유출 속도 및 동수경사 분석위치는 배수통문 파손부에서 각각 0.3m 거리를 둔 상부측 A, 하부측 B를 선정하였는데 이는 분석 위치가 누수 발생 위치와 지나치게 근접하게 되면 배수통문 내부로의 침투수 유출에 따른 직접적인 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 정하였다(Fig. 6(a) 참조). 또한 제내지측 단부 위치 C는 배수통문에서 누수가 발생하지 않는 정상적인 제체일 때 파이핑에 취약한 부위로서 비교분석을 위해 설정하였다(Fig. 6(b) 참조).

또한 수위 변화에 따른 간극수압의 변화를 분석하기 위하여 보축제체구간의 파손부 상부 P1, 파손부 하부 P2, 기존제체구간 P3, P4를 설정하였다. Fig. 7은 간극수압의 분석 위치를 나타낸 것이다.

### 3. 결과 및 분석

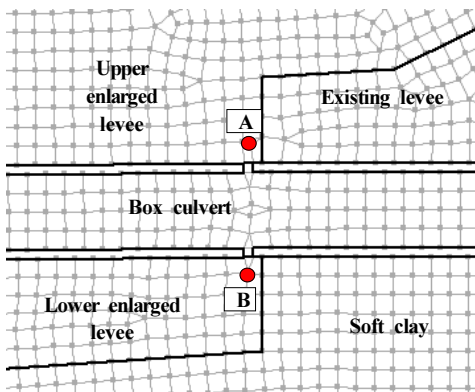
#### 3.1 침윤선의 변화

Fig. 8은 수문 위치 및 파손부 누수 발생 조건에 따른

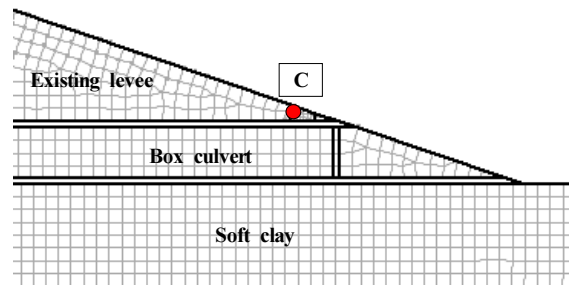
제체내 침윤선의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 제외지측 수문이 닫혀 있고 누수가 발생하지 않는 경우이고, Fig. 8(b)는 제외지측에 수문이 위치한 경우 보축과 기존제체 사이 배수통문 파손부로 유출이 발생하는 상태에서의 수위 변화에 따른 제체내 침윤선의 변화를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 8(c)는 제내지에 수문이 위치한 경우의 누수 발생시 침윤선의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 8(d)는 제외지 및 제내지에 수문이 위치한 경우의 누수 발생시 침윤선 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8(b)를 보면 파손부로의 누수로 인한 유출 영향으로 인해 유출이 발생하지 않을 때인 Fig. 8(a)와 비교하여 수위가 상승함에 따라 배수통문 누수 발생 위치 주변으로 침윤선이 집중되고 있으며, 특히 고수위시 침윤선이 급격한 경사를 가지면서 누수 위치까지 짧은 침투 경로를 형성하고 있음을 알 수 있다. 즉, 고수위로 수위가 상승하고 고수위 상태가 지속되는 동안 침윤선은 누수 지점을 향하여 짧은 침투 경로를 보이고 있으며, 이로 인해 큰 동수경사를 보일 수 있음을 예측할 수 있다. 한편 배수통문 구조물내로의 유출로 인해 제체의 제내지 끝단 쪽으로의 침투수 이동은 별로 나타나지 않는 것으로 보인다.

Fig. 8(c)의 제내지측 수문이 닫혀 있는 경우 수위 상



(c) Around the leakage occurs



(b) Around the inland

Fig. 6. Analysis location of flow velocity and hydraulic gradient

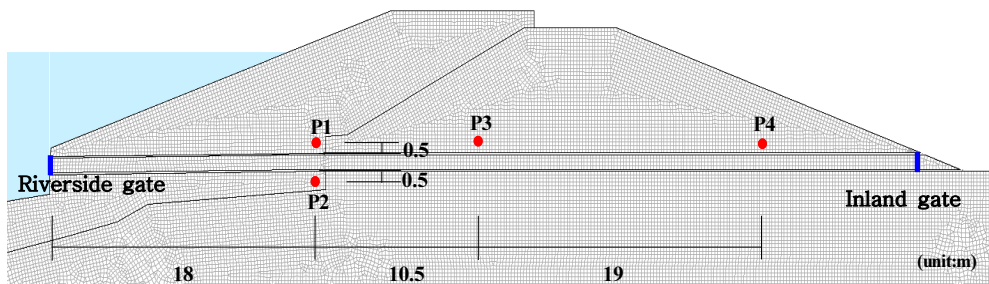


Fig. 7. Analysis location of pore water pressure

승시 물이 통관 구조물 내부로 직접 유입되어 초기에는 하부 누수 위치를 통해 기초지반으로의 침투가 발생하다가 수위가 상승하면서 점차 구조물내로 유입된 물이 상부 파손부를 통해 제체내로 침투됨에 따라 누수가 발생하지 않는 경우에 비해 보다 높게 침윤선의 상승을 보이고 있으며, 이로 인해 제체 끝단으로 길게 침윤선이 형성되고 있다. 수위 하강시에도 한동안 구조물 상부에 길게 포화 영역을 유지하게 되어 제체 끝단으로의 유출이 장기간 계속될 것으로 보인다.

한편, Fig. 8(d)의 제외지 및 제내지측 수문이 모두 닫힌 경우 수위가 상승함에 따라 누수 위치를 통해 구조물 내부로 유입되어 물이 차게 되면 수위가 상승하고 상부 누수 위치를 통해 제체내로 침투가 발생하게 되며 이로 인해 제체 끝단으로의 침투수 흐름이 나타나고 있다. Fig. 8(c)의 제내지에 수문이 위치한 경우에 비해 상대적으로 고수위시 제체내 수위 상승이 약간 작게 나타나고 있는데 이는 수위 상승 초기에는 박스 구조물내로의 유출이 시작되다가 박스에 물이 찬 후에는 제내지에 수

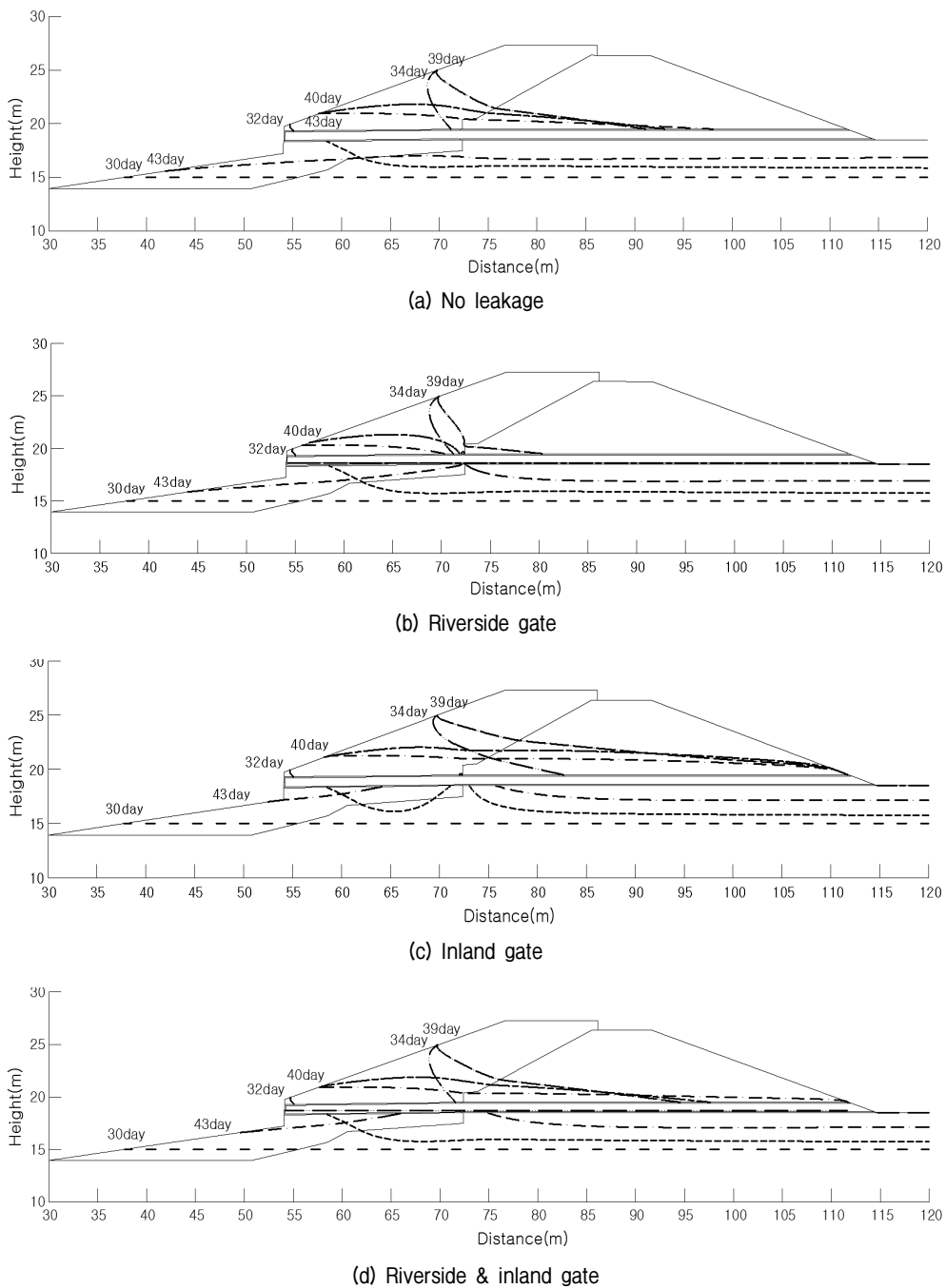


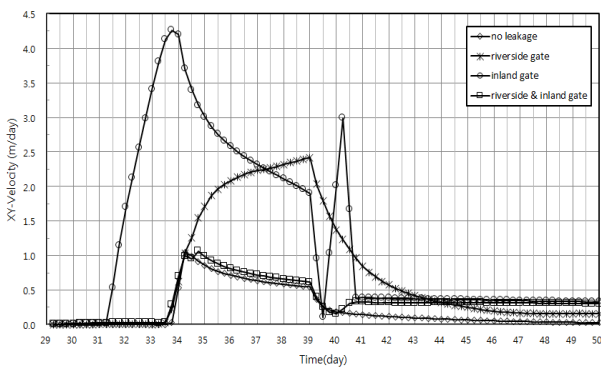
Fig. 8. Change of phreatic line



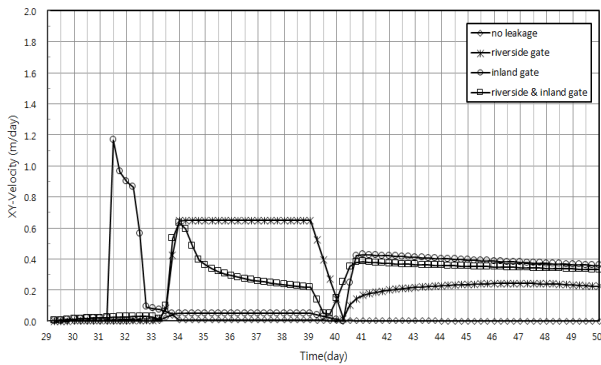
문이 위치한 것처럼 박스 내부의 물이 제체내로 침투되기 때문으로 보인다.

### 3.2 침투 유출 속도

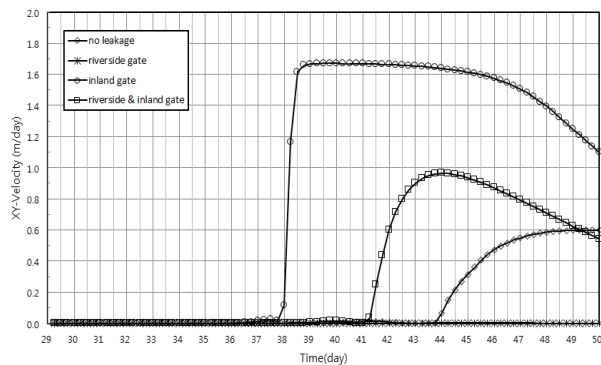
배수통문 파손부에서 상부측 A, 하부측 B 그리고 제내지측 단부 C 위치에 대하여 각 수문 위치에 따른 침투 유출 속도 변화를 분석하고 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 상부 파손부 주변 A위치에서의 침투 유출 속도 변화를 나타낸 것이다. 배수통문 내부로 침투수 유입이 없을 때의 침투 유출 속도 변화를 보면 수위가 상승하고



(a) Location "A"



(b) Location "B"



(c) Location "C"

Fig. 9. Change of flow velocity

고수위에 거의 근접하는 33.5day부터 급격한 증가를 보이기 시작한다. A위치는 수위가 약 32day 일 때와 거의 유사한 높이임을 고려하면 약 1.5day정도의 침투시간차가 있음을 알 수 있다. 고수위에 도달하는 34day 이후 34.25day 때 최고 유출 속도를 나타내고 고수위 유지시간인 39day까지 서서히 저하하는 경향을 보이고 있으며, 그 후 수위가 하강하는 순간 급격한 유출 속도 저하를 보인 후 완만하게 저하된다.

제외지측에 수문이 위치하고 배수통문 파손부로의 침투수 유출이 발생하는 경우 수위가 상승하기 시작하는 30day부터 A지점 높이까지 수위가 도달하는 32day가 지난 후에도 유출 속도는 변화가 없으나 수일 후 침투수가 도달하게 되면 급격하게 유출속도가 상승하는데, 이는 보축제체 투수성의 영향 때문으로 보축제체의 투수성이 크게 되면 보다 빠른 시간에 유출 속도의 변화가 예상된다. 침투수가 파손부에 도달하면서 유출 속도의 급속한 상승이 시작되고 제외지측 수위 상승이 유출 속도에 적극적으로 영향을 주어 보축 제체측에서 침투한 침투수가 파손부에 도달하면서 배수통문 구조물 내부로 유출됨에 따라 급격한 유출 속도의 증가가 나타나고 있으며 이때 제체의 토립자 유출을 동반한 파이핑 발생 가능성이 높을 것으로 판단된다. 이후 고수위를 유지하는 동안에도 위치 A에서 침투수의 유출 속도는 저수위로 수위가 하강하기 전까지 지속적으로 완만하게 증가하게 된다. 이는 시간이 흐르면서 포화영역이 점차 확대되기 때문으로 판단된다.

본 사례의 경우 최대 유출 속도는 누수가 발생하지 않는 경우 약 1.1m/day를 보였으나 누수가 발생하는 경우 이보다 2배 이상 큰 2.4m/day의 유출속도를 보이고 있으며, 고수위가 더 유지된다면 더 큰 유출 속도를 보일 것으로 예상된다.

제내지측에 수문이 위치한 경우의 침투 유출 속도는 수위 상승이 시작되어 배수통문 구조물 내부로 물이 차기 시작하는 시점부터 급속히 증가한다. 즉, 제외지측 수위의 상승 초기에는 배수통문 내부의 수압 증가로 인해 제체내로 침투하는 침투수의 침투압 역시 증가하게 되고 침투 유출 속도 역시 증가된다. 그러나 제외지측 외부수위가 지속적으로 상승하고 고수위가 유지되면서 제외지 경사면으로부터 제체내로 침투한 침투수의 흐름이 A위치에 도달됨에 따라 침투 유출 속도는 점차 감소하는 현상으로 나타나고 있다. 이후 수위가 하강하여 A위치보다 낮은 지점으로 저하되는 순간 급격하게 침

투 유속이 상승하는 현상을 보이고 있는데, 이는 하천 수위의 저하로 인해 배수통문 내부의 물이 입구쪽으로 다시 유출되어 빈 공간을 유지하는 데 비해 제체 침투수는 지속적으로 배수통문 파손부를 통해 내부로 유입되기 때문이며 이때 상향침투에서 하향침투로 침투방향의 바뀜 현상이 일어나기 때문으로 판단된다. 즉, 고수위로 수위가 상승할 때 위치 A에서 보축제체의 투수계수에 근접하는 약 4.3m/day의 침투 유속을 보이나 이는 배수통문 내부에서 제체 속으로 침투되는 것으로 제외지측에 수문이 위치한 경우와 달리 실질적으로 상향의 침투가 발생함에 따라 제체의 파이핑과는 별 관계가 없는 것으로 보인다. 그러나 수위저하가 시작되고 일시적으로 유출 속도가 상승하는 40일 전후 시간대에는 하향 침투가 발생하는 순간으로서 이때 최대 3.0m/day의 유출속도를 보이고 있어 침투수 유출에 의한 파이핑 발생 가능성에 대해서 주의가 필요할 것으로 분석된다.

제내지 및 제외지 양측에 수문이 위치한 경우에는 배수통문 내부로 침투수 유입이 없을 때의 침투 유출 속도 변화와 유사한 경향을 나타내고 있다. 고수위 유지기간 동안에 침투유속은 감소하게 되는데 이는 수위 상승 초기에는 파손부 상하부를 통해 배수통문 내부로 침투수가 유입되어 내부가 침투수로 차게 되면 벡터의 방향이 바뀌면서 상부 파손부를 통해 제체내로 침투가 일어나게 되고 제외지측의 수위 상승과 더불어 침투하는 침투수의 영향을 받게 되면서 침투 유속이 감소하게 되는 현상으로 보인다. 저수위로 저하하기 전의 배수통문 상부 파손부 침투벡터는 상향을 보이다가 수위가 저수위로 낮아지면 배수통문 내부의 압력이 감소되어 저수위가 유지되는 기간에는 제체 침투수의 영향으로 하향의 벡터를 나타낸다.

Fig. 9(b)는 하부 파손부 주변 B위치의 침투 유출 속도를 나타낸 것으로 배수통문 내부로 침투수 유입이 없을 때의 침투 유출 속도 변화는 고수위 도달직전인 33.75 day에서 약간의 유출 속도 변화를 보이며 이후 거의 유속변화 없이 침투수 정체현상이 나타나는데, 이는 인근의 기초지반이 투수계수가 작은 연약점토층 영향 때문으로 판단된다.

제외지측에 수문이 위치하고 배수통문 내부로의 유출이 발생하는 경우는 고수위에 도달할 때 최대 침투 유출 속도를 보이고 있으며, 고수위 동안 일정한 침투 유출 속도를 유지하고 있다. 수위 하강시 B지점의 유출 속도도 급격하게 감소하게 되며, 수위 하강 이후 약간의 유

속 상승을 보이고 있는 것은 제체내의 침투수가 상부 파손부로 유입되고 이것이 다시 하부 파손부로 유출되기 때문으로 보인다. 이때 최대 유출 속도는 누수가 발생하지 않는 경우 상부 A지점의 최대 유출 속도 1.1m/day보다 작은 속도 0.65m/day를 보이고 있다.

제내지측에 수문이 위치한 경우 B지점의 침투 유출 속도 변화는 수위상승 초기의 짧은 시간 동안 유출 속도의 증가 이후 다시 급속한 감소로 나타나는데, 이는 제외지측 배수통문 입구로부터 직접 유입된 물이 배수통문 하부로 침투한 침투수와 만나게 됨에 따라 침투속도의 급격한 감소로 나타나는 것으로 보인다. 이후 저수위로 수위가 감소하게 되면 배수통문 내부가 빈 공간이 됨에 따라 하부 파손부로부터의 침투수에 대한 유출이 활발하게 되어 유출 속도는 약간 상승하게 되며, 침투수의 유출량이 감소됨에 따라 유출 속도도 점차 감소하는 특성을 보인다. 이때 제외지에 수문이 위치하는 경우에 비해 유출속도가 약간 크게 나타나고 있는데, 이는 고수위시 제체내 포화영역이 보다 크게 확대되었기 때문으로 보이며, 본 수문 위치에서 B지점의 경우 침투벡터가 하향을 보이거나 침투유속이 매우 작기 때문에 배수통문 하부 파손부에 공동이나 유출로가 발달되지 않은 상태라면 파이핑 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다.

제내지 및 제외지 양측에 수문이 위치하는 경우는 고수위 도달시에 최대 침투유속을 보이나 그 이후 고수위가 유지되는 동안 침투유속은 점차 감소하게 되며, 수위 하강 후의 변화는 제내지에 수문이 위치하는 경우와 유사한 경향을 보인다. 고수위 기간 동안 침투 유속이 감소하는 것은 제외지측의 침투수의 영향으로 보이며, 이러한 전반적인 현상은 배수통문 내부의 공간 규모, 그리고 지반의 투수성 등에 의해 그 영향이 나타나는 시간은 다를 것으로 예측된다.

제내지 끝단에 위치하고 있는 C지점의 침투 유출 속도는 Fig. 9(c)와 같다. 배수통문 내부로 침투수 유입이 없을 때의 C지점은 약 43.75day 이후 침투 유출 속도 증가를 나타내며 이때가 제외지측의 침투수가 도달하는 시점으로 판단된다.

제외지측에 수문이 위치하고 배수통문 파손부 유출이 발생하는 경우 구조물 파손부로의 유출 영향으로 제체 끝단의 유출 속도는 거의 변화가 없는데 이는 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 침윤선이 제내지 끝단까지 거의 영향이 미치지 않고 있는 것과 같은 의미로 볼 수 있다.



제내지층에 수문이 위치한 경우에는 수위가 고수위로 상승하여 유지하는 기간인 38day 시점에 침투수의 속도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 배수통문으로 직접 유입된 물이 상부 파손부를 통해 제체내로 침투하기 때문에 상대적으로 C지점에서의 침투수 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 이때 유출속도는 1.6m/day 이상을 보이고 있어 누수가 발생하지 않는 경우의 A지점의 유출 속도(1.1m/day)보다 대략 1.5배 이상을 보이고 있고 수위가 저수위로 하강한 이후 점차 작아지고 있으나 한동안 제내지층으로의 침투수 유출이 예상된다. 한편 제외지 및 제내지층에 수문이 위치하는 경우에는 제내지층에 수문이 위치하는 경우에 비해 제체 하단으로의 침투수 영향이 상대적으로 적게 나타나고 있다.

### 3.3 동수경사

Fig. 10은 분석 위치별 동수경사 변화를 나타낸 것으로 Fig. 10(a)의 A지점 동수경사 변화를 보면 제외지층에 수문이 위치하는 경우 고수위로 수위가 상승하기 시작하여 침투수가 누수 지점에 도착하게 되면 동수경사는 급격하게 상승하게 된다. 고수위 유지 및 수위저하 기간은 제체에서 배수통문 내부로 지속적인 하향 침투가 발생하는 시기이다. 즉, 고수위로 수위 상승이 되고 고수위를 유지하고 있는 동안 지속적으로 동수경사가 상승하게 되어 이 시기에 파이핑 발생 우려가 크게 된다. 본 연구 사례의 경우 최대동수경사가 2.55로 보축제체 재료의 한계동수경사가 1.01임을 고려해 보면 2배 이상 큰 최대 동수경사를 보였다. 따라서 고수위로의 수위 상승은 결과적으로 구조물의 파손부를 통하여 침투수가 유출되고, 이때 한계동수경사 이상으로 동수경사가 크게 나타나게 되어 파이핑 발생 가능성 등으로 제체 안정에 불리할 것으로 분석된다. 또한, 수위가 하강하는 동안 동수경사의 하락에도 불구하고 한동안 한계동수경사 이상을 보이고 있어 파이핑 발생이 지속될 수 있음을 예측할 수 있다. 이후 저수위로 수위가 하강하게 되면서 동수경사도 작게 나타나고 있다.

제내지에 수문이 위치하고 파손부 유출이 발생할 경우 고수위로 수위상승시의 최대동수경사는 거의 4.4를 나타내고 있어 제외지층에 수문이 위치하는 경우의 2.55보다 약 1.7배 정도 큰 값을 나타내었으나 이때는 배수통문에서 제체내부로의 침투가 발생하므로 파이핑은 발생하지 않으며, 수위가 저하하는 일부시간대(39.5day ~

40.75day)에서 단기적으로 제체로부터 파손부를 향하여 하향의 유출이 발생하면서 일시적인 토사 유출 가능성을 보인다. 즉, 오랜 세월 이러한 현상이 반복적으로 발생하는 경우 장기적인 제체 안정에 손상을 줄 수도 있을 것이다.

Fig. 10(a)의 A지점 동수경사 변화에서 파손부 유출이 발생하지 않을 때와 가장 유사한 변화를 보이는 경우는 제내·외지층에 수문이 위치하는 경우로서 비교적 낮은 범위의 동수경사 값을 나타내고 있다. 수문이 제외지 및 제내지에 위치하는 경우 수위 상승시 일시적으로 동수경사가 상승하나 이는 배수통문 내부에 침투수가 차

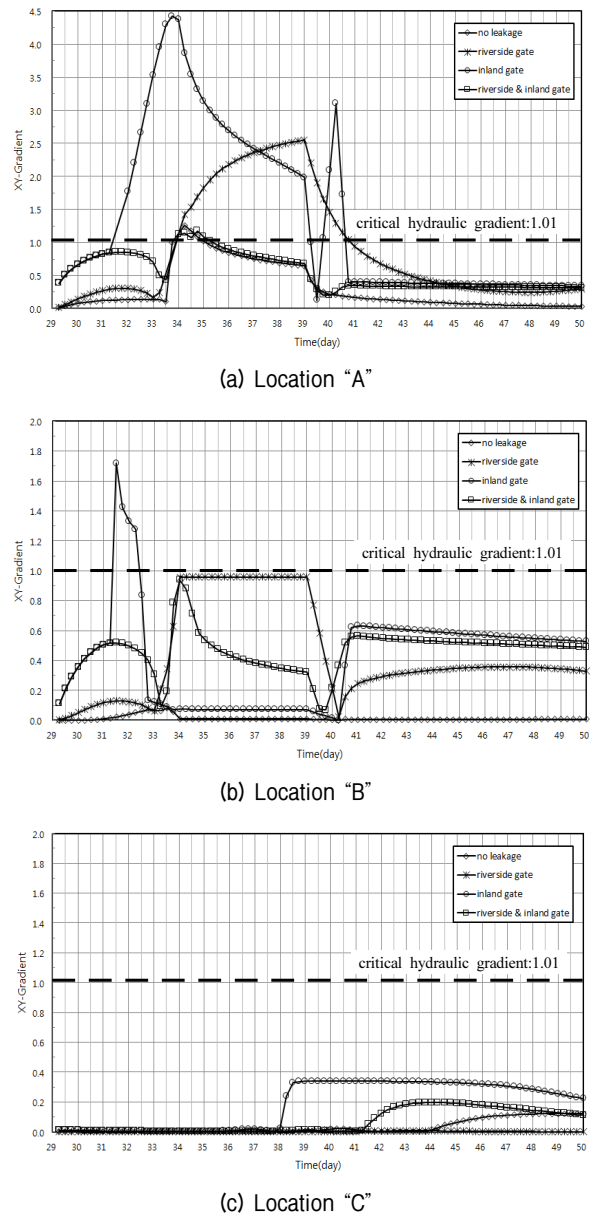


Fig. 10. Change of hydraulic gradient

게 되면서 배수통문 상부 파손부를 통해 제체내로 상향 침투하는 것으로 파이핑 발생과는 관계가 없으며, 이후 고수위시 제체 침투수의 영향으로 동수경사는 서서히 감소하는 현상을 보이게 된다.

Fig. 10(b)의 B지점 동수경사 변화를 보면 파손부 유출이 없을 경우의 동수경사는 0.1 이하로서 상부 파손부 인근 A지점의 1.26과 비교하여 약 1/15 수준의 작은 값의 변화를 보이고 있다. 제외지측에 수문이 위치하여 하부 파손부 유출 발생의 경우 동수경사는 수위가 상승함에 따라 상승하기 시작하여 고수위에 도달하고 유지되는 동안 동수경사도 일정하게 유지하고 있다. 즉, 이때 최대동수경사는 0.96으로서 상부 파손부의 A지점 최대 동수경사 2.55에 비해 약 1/3 수준의 동수경사를 보였으나 동수경사가 거의 한계동수경사에 근접하여 고수위 동안 일정하게 유지하고 있어 파이핑 발생 가능성이 우려된다. 즉, 구조물 기초 지반의 파이핑으로 인한 세굴 우려가 있다. 다만, 하부 지반이 세립토의 연약지반일 경우 그 가능성은 상대적으로 적게 될 것으로 보이므로 이는 하부 지반의 조건에 따라 다를 수 있음을 감안해야 할 것으로 판단된다.

제내지측에 수문이 있고 파손부 유출이 발생할 경우 B지점의 최대동수경사는 제외지측의 수위가 상승하는 기간에 한계동수경사 이상의 동수경사를 나타내기도 한다. 다만 이때는 배수통문 하부에서 제체내부로의 하향 침투현상이 나타나기 때문에 파이핑 발생 가능성은 없을 것으로 분석된다.

제내·외지 양측에 수문이 위치하고 파손부 유출이 발생할 때는 앞에서 설명한 바와 같이 고수위로 수위가 상승하는 동안 동수경사가 상승하였다가 제외지의 제체 사면으로부터 침투한 침투수의 영향으로 동수경사는 점차 작아지게 된다. 즉, 고수위로 수위 상승시 동수경사의 증가는 구조물 내부로의 상향 침투가 발생하기 때문이며, 고수위 기간 동안 제체 사면으로부터의 침투수 영향으로 동수경사는 점차 감소하게 되는 것이다. 본 사례의 경우 제외지측에 수문이 위치하는 경우에 비해 상대적으로 하부 파손부에서의 파이핑 발생 가능성은 낮을 것으로 보인다.

제내지 끝단에 위치하고 있는 C지점의 동수경사는 Fig. 10(c)와 같으며 Fig. 9(c)의 침투 유출 속도 변화와 유사한 경향을 보이고 있다. 제내지측에 수문이 위치한 경우가 배수통문으로 직접 유입된 물이 상부 파손부를 통해 제체내로 유입되어 그 영향으로 인해 C지점의 동

수경사가 가장 크게 나타나고 있는 것으로 분석된다.

### 3.4 간극수압

Fig. 11은 Fig. 7에서 정한 P1~P4에 대한 간극수압 변화를 나타내고 있다. Fig. 11(a)는 배수통문 상부 파손부 주변의 P1지점, Fig. 11(b)는 배수통문 구조물의 하부 파손부 주변인 P2에서의 간극수압 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 수위가 상승하게 되면 간극수압도 더불어 상승하게 되는데 파손부의 유출이 없을 때 제외지로부터 침투한 침투수가 상부 파손부 주변 P1 지점에 도달하여 침윤선을 형성하는 시간은 대략 34.5day로 파악되며 제내·외지측에 수문이 위치하고 파손부 유출이 발생할 때에도 이와 유사한 간극수압 분포를 보이고 있다. 간극수압의 변화가 구체적으로 나타나고 있는 시기가 33.5 day임을 고려하여 볼 때 약 1일 정도는 불포화 흐름으로 나타나고 있음을 추측할 수 있다.

제내지측에 수문이 있고 파손부 유출이 발생하는 경우 파손부 유출이 없을 때 보다 약 2day 앞서서 침투수가 도달하는데 이는 배수통문 내부로 직접 유입된 물이 상부 파손부를 통해 제체 내부로 침투가 먼저 발생하기 때문이다. 또한 고수위 유지기간에도 지속적인 상향의 침투가 발생하여 수위하강 직전의 간극수압은  $39.3\text{kN/m}^2$ 로서 유출이 없을 때의 간극수압  $21.9\text{kN/m}^2$ 보다 약 1.8배 정도 높은 간극수압 분포를 보이고 있다.

이러한 간극수압의 증가는 제체의 안정성에 손상을 줄 수 있다. 즉, 간극수압이 누수가 없는 경우에 비해 1.8배 정도 상승함에 따라 제체의 안정성도 그만큼 불안정하게 될 수 있음을 고려해야 할 것으로 판단된다.

한편 제외지측에 수문이 위치하고 파손부 유출이 발생하는 경우는 다른 경우 대비 상대적으로 낮은 간극수압 분포를 보이고 있다. 즉, 단지 고수위 유지 기간에서 약간의 정(+)의 간극수압을 보이고 있는데 이러한 현상은 제외지 사면으로부터 침투한 물이 상부 파손부를 통해 배수통문 내부로 유출이 발생하고 있기 때문으로 판단된다. 이때 제체를 구성하는 흙 입자를 포함하는 유출 가능성이 큰 까닭에 파이핑 발생 가능성이 높을 것으로 예상된다. 즉, 정상적인 상태의 간극수압 분포에 비해 간극수압의 급격한 감소 분포를 보이게 되면 누수 및 이로 인한 파이핑 우려를 예측할 수 있을 것으로 보인다.

한편, Fig. 11(b)의 하부 파손부 주변 P2 지점의 간극수압 분포를 보면 제내지측에 수문이 위치하는 경우는

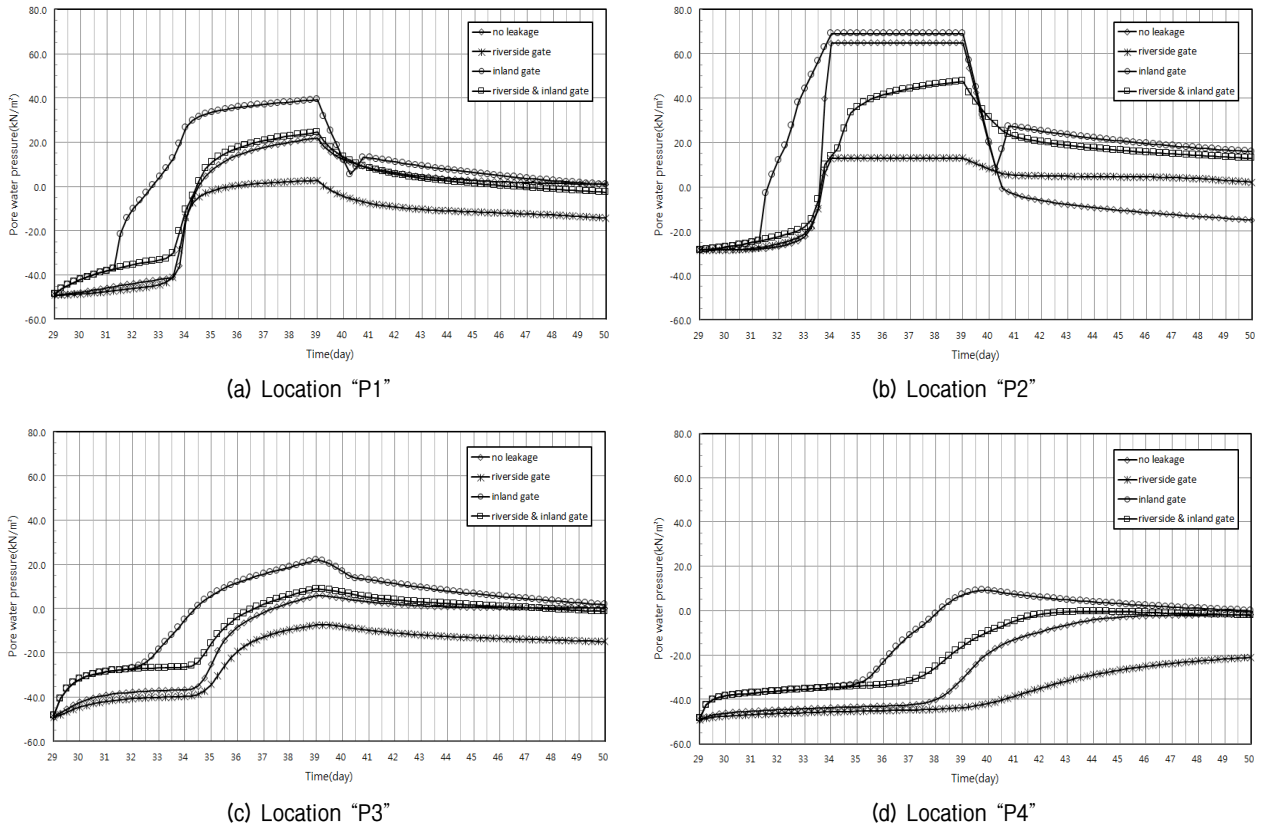


Fig. 11. Change of pore water pressure

누수가 발생하지 않는 경우에 비해 약 2day 정도 빠른 간극수압 변화가 시작되고 있으며, 고수위 상승 및 유지 시 최대의 간극수압을 보이고 있다. 또한 고수위 유지 기간 동안 제외지층에 수문이 있고 파손부 유출이 발생할 경우 간극수압은 약  $13.0\text{kN/m}^2$  으로서 유출이 없을 경우의  $65.0\text{kN/m}^2$  에 비해 20% 수준의 낮은 간극수압 분포를 보이고 있다. 이는 하부 파손부를 통한 배수통문 내부로 유출이 발생하기 때문으로 보이며 앞에서 언급한 바와 같이 이때 지반의 조건에 따라 토립자 유출을 동반한 파이핑 발생 가능성이 있을 것으로 판단된다. 즉, 상부 누수 지점 P1에서와 같이 P2의 간극수압이 누수가 발생하지 않는 정상상태에 비해 상대적으로 낮은 간극수압을 보이는 경우 누수로 인한 유출 영향 가능성을 예측할 수 있다.

기존제체에 위치하는 P3, P4의 간극수압 분포(Fig. 11(c), Fig. 11(d))는 Fig. 8의 침윤선 변화에서 보듯이 제외지층에 가까운 P3지점의 간극수압이 제내지층과 가까운 P4지점의 간극수압보다 전반적으로 높은 값을 나타내는데 제내지층으로 갈수록 침윤선이 낮아지는 것은 당연한 결과로 보인다. 증축된 제체의 중앙부에 위

치하는 P3의 경우 누수지점 근처의 P1 또는 P2에 비해 변화폭이 작으나 누수가 발생하면 누수가 없는 정상 상태에 비해 간극수압이 변화되는 것을 알 수 있다.

본 연구사례의 경우 제외지층에 수문이 위치하고 파손부 유출이 발생하는 경우 침투해석 전 시간대에 걸쳐 대부분 불포화흐름을 보이고 있어 제외지에서 침투한 침투수가 파손부에서 배수통문 내부로 유출이 발생됨에 따라 누수가 없는 경우에 비해 상대적으로 작은 간극수압을 나타내고 있어 누수 발생 가능성을 추측할 수 있을 것으로 보인다. 또한 제내지층에 수문이 위치하여 파손부 유출이 발생할 때는 배수통문 입구를 통한 물의 직접적인 유입 영향으로 파손부 유출이 없을 때보다 상대적으로 높은 간극수압 분포를 나타내는 경향을 보였다.

이와 같이 제체내부의 간극수압 변화만으로 배수통문의 누수발생 여부를 판단하기는 쉽지 않으나 수문 위치에 따라서 제체내부에 설치된 배수통문 구조물 임의의 위치에 누수가 발생하면 이로 인해 누수가 발생하지 않을 때 보다 간극수압을 증감시키는 결과를 가져오게 된다. 간극수압의 감소가 한계평형해석을 이용한 비탈면 안정해석에서 안전율을 높일 수 있어 제체안정에 유

리한 것처럼 보일 수 있으나 배수통문 파손부를 통한 파이핑 발생 우려를 높일 수 있다. 또한 파손부 누수가 발생하지 않을 경우보다 증가된 간극수압의 관측은 제체의 불안정성을 가중시킬 수 있어 이에 대한 문제를 간과해서는 안 될 것으로 사료된다(Kim et al., 2017).

#### 4. 결론

연약지반에 보축된 하천제체에서 기존제체와 보축제체 연결부는 시간적 시공 조건의 차이에 따라 부등침하 등과 같은 이질적인 지반침하가 발생할 수 있다. 제체를 관통하는 배수통문 신규 연결부에서 균열, 파손 및 이격 등의 손상 발생시 배수통문 수문의 위치에 따른 침투 경향을 분석하고 이로 인해 제체의 파이핑 발생 가능성을 확인하였다. 본 연구를 위해 기존제체에 제외지 보축이 이루어지고 기존제체를 관통하는 배수통문을 연결하여 보축구간까지 연장 설치한 곳을 대상으로 선정하여 2차원 침투해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제외지측에 수문이 위치하는 경우 파손부로의 누수로 인한 유출 영향으로 유출이 발생하지 않을 때와 비교하여 누수발생 위치 주변으로 침윤선이 집중되었으며, 고수위 상태가 지속되는 동안 침윤선은 누수 지점을 향하여 짧은 침투 경로를 보여 이로 인해 큰 동수경사를 보일 수 있음을 예측할 수 있었다. 또한, 제내지측 수문이 단혀 있는 경우 고수위시 긴 침투 경로를 형성하며, 누수가 없는 경우에 비해 상대적으로 높은 침윤선의 상승을 보였다.
- (2) 제외지측에 수문이 설치되어 있는 경우 수위 상승 및 고수위 유지 기간 동안에 침투유속 및 동수경사의 증가를 보이고 있어 누수로 인한 파이핑 발생이 우려된다. 즉, 고수위로의 수위 상승은 결과적으로 구조물의 파손부를 통하여 침투수가 유출되고 이때 한계동수경사 이상으로 동수경사가 크게 나타나게 되고 고수위 유지시 지속적으로 동수경사의 증가를 보여주고 있어 파이핑 발생 가능성 등으로 제체 안정에 불리할 것으로 분석된다.
- (3) 수문이 제내지에 위치하는 경우 고수위에서 수위가 저하하는 일부시간대에 제체로부터 파손부를 향하여 하향의 유출이 발생하면서 일시적인 토사 유출 가능성을 보인다. 즉, 오랜 세월 이러한 현상이 반복

적으로 발생하는 경우 장기적인 제체 안정에 손상을 줄 수도 있을 것이다.

- (4) 배수통문 파손부 주변의 동수경사를 비교해 보면 제외지측 수문 위치시 하부 파손부 주변이 상부 파손부 주변의 약 1/3 정도 수준을 보여 파이핑 가능성은 구조물 하부보다는 상부에서 크게 나타나고 있었다.
- (5) 제내지측에 수문이 있고 파손부 유출이 발생할 때가 파손부 유출이 없을 때보다 약 1.8배 정도 높은 간극수압을 보였으며, 제외지측에 수문이 위치하는 경우 유출이 발생하지 않을 때와 비교하여 상대적으로 아주 낮은 간극수압 분포를 보였다. 수문 위치에 따라서 제체내부에 설치된 배수통문 구조물 임의의 위치에 누수가 발생하면 발생하지 않을 때 보다 간극수압을 증감시키는 결과를 가져오게 된다. 따라서 파손부 누수가 발생하지 않을 경우보다 증감된 간극수압의 관측은 누수 발생을 우려할 수 있을 것이다.
- (6) 제체 제내지 끝단에서의 유출은 제내지에 수문이 위치하고 누수가 발생한 경우에 가장 크게 일어났으며, 제외지에 수문이 위치한 경우에는 제내지 끝단에서의 유출은 거의 나타나지 않았는데 이는 박스 구조물의 중간 파손부에서의 누수 영향으로 판단된다.

본 연구 결과 분석은 2차원 침투해석을 바탕으로 수행된 것으로서 보축이 이루어진 하천제체를 관통하는 배수통문의 신규 연결부 파손에 따른 누수와 관련한 해석 조건을 배수통문 측면을 통한 침투수 유입 등과 같은 실제 조건을 반영하는데 제한적이어서 그 결과 역시 실제의 경우와는 차이가 있을 것으로 보인다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 3차원 해석을 통한 보다 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

1. Adams, T. E. (2011), *Stability of Levees and Floodwalls Supported by Deep-Mixed Shear Walls: Five Case Studies in the New Orleans area*. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
2. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 521-532.
3. GEO-SLOPE International, Ltd. (2008), *Seepage Modeling with SEEP/W 2007 (Third Edition)*.

4. Jin, S. W. (2013), *Evaluation of Levee Stability Considering Foundation Soil Conditions using Centrifuge and Numerical Modeling*, Ph. D. Dissertation, KAIST.
5. Jin, S. W., Choo, Y. W., Kim, Y. M., and Kim, D. S. (2014), "Centrifuge Modeling of Differential Settlement and Levee Stability due to Staged Construction of Enlarged Embankment", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.18, No.4, pp.1036-1046.
6. Kim, H. I., Yang, H. Y., and Kim, Y. M. (2017), "Piping Analysis of Reservoir Embankment due to Leakage of Buried Box Culvert", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.37, No.5, pp.787-799 (In Korean).
7. 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).
8. Korean Geotechnical Society (KGS) (2009), *Explanation of Structure Foundation Design Code*, Goomibook, pp.628 (In Korean).
9. 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).
10. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009), *River Design Standard·Explanation*, Korea Water Resources Association, pp.458 (In Korean).
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010), *Development and Operation of Sluice Gate Management System-V in 2010* (In Korean).
12. 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).
13. Ryu, C. H. (2000), "Measurements of Permeability Characteristics for Unsaturated Weathered Soils", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.33, No.1, pp.133-142 (In Korean).
14. Saadeldin, R., Hu, Y., and Henni, A. (2015), "Numerical Analysis of Buried Pipes under Field Geo-environmental Conditions", *International Journal of Geo-Engineering*, Volume 6, Paper No. 6, DOI 10.1186/s40703-015-0005-4.

Received : November 20<sup>th</sup>, 2017

Revised : January 2<sup>nd</sup>, 2018

Accepted : January 28<sup>th</sup>, 2018