

저수지 제체 내 배수통관의 누수로 인한 파이핑 분석

김한일* · 양학영** · 김영목***

Kim, Han Il*, Yang, Hak Young**, Kim, Young Muk***

Piping Analysis of Reservoir Embankment due to Leakage of Buried Box Culvert

ABSTRACT

Although the long-term leakage between the box culvert and the soil contact surface is one of the main causes of the failure in the embankment of the reservoir, there is a little studies on this matter. If a leakage occurs by the structure such as the buried box culvert of reservoir embankment is partially damaged, it is difficult to observe and there is a possibility of damage caused by piping. For these reasons, more research is necessary. In this study, the embankment type of the reservoir is divided into the core type and the homogeneous type when the damaged box culvert passing through the embankment of the reservoir is leaked due to the differential behavior of materials like differential settlement. In view of the condition, the seepage analysis of 2D was performed according to the water level change. The result of the study shows that the possibility of piping increases at the upper part rather than the bottom part of the box culvert when the leakage occurs to the box culvert passing through the embankment of the reservoir. Particularly, it is considered that the presence of the core helps to maintain the seepage stability of the embankment in case where the leakage occurs at the downstream side of the embankment. Also, if there is a drastic decrease on the internal pore water pressure in the embankment of reservoir, it is necessary to consider the possibility of piping.

Key words : Embankment, Piping, Seepage analysis, Leakage, Box culvert

초 록

저수지 제체 내 수로 구조물과 흙 접촉면의 장기적인 누수가 제체 파괴의 주원인 중의 하나임에도 불구하고 이에 대한 연구는 미미한 실정이다. 배수통관과 같은 구조물이 부분 파손되어 누수가 발생하는 경우 외형적으로 관측하기 곤란하고 파이핑 등에 의한 제체 손상 우려가 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 저수지 제체를 관통하는 배수 통관이 부등침하 등으로 인해 통관 일부가 파손되어 누수가 발생하는 경우 저수지의 제체 형태를 코어형 단면과 균일형 단면으로 구분하여 수위변화에 따른 2차원 침투해석을 수행하였다. 연구결과 저수지 등의 제체를 관통하는 배수 통관으로의 누수가 발생 할 경우 통관 하부보다는 상부가 파손되어 누수가 되는 경우가 파이핑 발생 가능성이 크며, 특히 제체 하류측에서 누수가 발생하는 경우 제체 중심 코어부의 존재는 제체 안정 유지에 도움을 주고 있다고 판단된다. 또한 저수지 제체 내부 간극수압의 급격한 감소가 관측되면 파이핑 발생 우려에 대한 심도 있는 고려가 필요할 것으로 사료된다.

검색어 : 제체, 파이핑, 침투 해석, 누수, 배수 통관

* 에스알이엔씨 (SR ENC · saykimanil@naver.com)

** 정회원 · 교신저자 · 한밭대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Corresponding Author · Hanbat National University · nayhyl@naver.com)

*** 종신회원 · 한밭대학교 건설환경공학과 교수 (Hanbat National University · kym@hanbat.ac.kr)

Received April 18, 2017/ revised June 3, 2017/ accepted July 26, 2017

1. 서론

흙을 주재료로 사용하는 하천 제방이나 저수지 제체의 파괴와 관련하여, 주목해야 할 사항 중 하나는 제체와 구조물과의 접합부에서 발생하는 파이핑에 의한 제체 불안정에 대한 것이다. 한국건설기술연구원(KICT, 2005)에 의하면 2002년 제방 구조물과 관련된 피해 중 2/3 이상이 하천구조물 접합부에서 발생하였으며, 제방을 관통하여 용수를 공급하는 수로 주변, 즉 수로 구조물과 흙 접촉면의 장기적인 누수가 주원인인 것으로 밝히고 있다.

우리나라의 17,505개소 저수지 중에서 17,383개소(99.3%)가 흙으로 만들어진 필댐으로 이루어져 있으며, 최근 30년 이내에 건설된 저수지는 약 5% 정도로 대부분 오래 전에 건설된 것이다(한국농어촌공사(KRCC), 2012). 과거 제방의 붕괴에 대한 여러 사례를 보면 Kim et al. (1992)의 한강 하류의 일산 제방 붕괴, Han et al. (2002)의 낙동강 제방 붕괴 등 하천제방 붕괴뿐만 아니라 Canyon Lake 댐 붕괴(한국시설안전공단(KISTEC), 2013), New Orleans의 제방 붕괴로 인한 도시 침수(Adams, 2011), 제체 누수로 인해 붕괴된 미국 이이다호주의 Teton Dam (Wayne et al., 2008), 2002년 여수도 접속부 새굴로부터 진행되어 붕괴에 이른 장현저수지, 동막저수지(Kim et al., 2011) 그리고 산대저수지(Choi, 2015) 등이 있다.

이러한 자료를 근거하여 볼 때 보통과 같은 통관 구조물과 여수도 등 제방 제체를 관통하여 매립되어 있거나 제체와 접하고 있는 구조물과 흙 접촉면의 장기간 누수에 의해 piping으로 인한 제체 붕괴 가능성이 존재할 수 있다(Kim, 2017).

제체 붕괴의 주원인에 대하여 우리나라 대다수 농업용 저수지와 같은 필댐에서 108개의 붕괴사례 자료를 이용하여 분석한 결과 파이핑(piping)이 45건으로 전체 붕괴의 41.7%, 월류(overflow)가 40.7%인 44건으로 파이핑과 월류가 필댐의 붕괴 원인 중 가장 많은 부분을 차지하고 있다(Sim, 2011).

제체 붕괴와 관련하여 월류 및 파이핑 등에 관한 연구는 국내에서도 다수 수행된 사례(Kim et al., 2011; Lee, 2011; Park, 2015)가 있으나 제체를 관통하는 통관 구조물의 파손에 따른 누수발생시 제체에 미치는 영향을 연구한 경우는 상대적으로 미미한 실정이다.

과거 균질한 재료에 의해 건설된 제체에 비해 최근에 건설된 다수의 저수지 제체들은 중심코어부가 설치되어 보다 안정적인 침투 거동을 보이고 있는데, 이 경우 중심 코어부의 재료가 본제체의 재료와는 다른 이질 재료로 시공됨에 따라 제체를 관통하는 배수통관과 같은 구조물이 부등 침하 등으로 인해 파손이 발생할 우려가 있다. 또한, 이러한 구조물들이 부분적으로 파손되어 누수가 발생하는 경우 외형적으로 관측하기가 곤란하고 장기적으로 보면 파이핑 등에 의한 제체 손상 우려가 있어 이에 대해서 연구가 필요하다.

본 연구에서는 파이핑에 의해 제체 일부가 붕괴되었던 이력을 갖고 있는 저수지의 제체 단면을 참고로 하여 균일형 단면인 기본 모델을 구성하였고, 제체 통관 구조물의 일부가 파손되어 통관 내로 누수가 발생하는 경우 균일형 단면과 중심 코어부를 설치한 코어형 단면으로 나누어 2차원 수치해석을 수행하고 그 결과를 비교하여 파이핑 발생 가능성을 분석하였다.

2. 모델 및 해석

2.1 모델

본 연구를 위한 해석 모델은 2013년 보통 주변 파이핑이 제체 붕괴로 이어진 이력을 갖고 있는 경주지역 OO저수지의 단면을 참고로 하여 구성하였다. OO저수지는 제체 높이(H) 12.5m, 제체 길이(L) 210m로서 1964년 축조되어 2013년 붕괴 당시 50년 이상 경과된 노후시설로서 총 저수량은 246,000m³이며, 붕괴전 단면 제원은 Fig. 1(b)와 같은 균일형 필댐 형식이다(한국농어촌공사(KRCC), 2014). 제체 통관 구조물에서의 누수로 인한 파이핑 가능성을 분석하기 위해 붕괴전 형태의 균일형 필댐 형식과 제체 중심 코어부 존재가 파이핑의 안정성에 기여하는 바를 분석하기 위해 Fig. 1(a)과 같이 댐설계기준(국토해양부(MLTMA), 2011)을 참고하여 중심 코어부를 설치한 코어형 필댐 형식을 구성하였다(Kim, 2017).

본 연구 대상 모델은 2,877개의 요소와 3,553개의 절점으로 구성되었으며, 각 요소의 크기는 제체 높이의 약 1/30로서 0.4m 이하로 하였다. 해석시 코어형 단면과 균일형 단면은 동일조건을 유지시켰다.

2.2 해석 조건

저수지 제체를 관통하는 통관 구조물 구간 중 본 제체와 중심 코어부의 경계 지점에서 제체 단면의 중심으로부터 상류측인 저수지측(이하 상류측)과 제체 하류측(이하 하류측)에 각각 누수 위치를 정하였다. 시공 시 본 제체와 중심 코어부는 각각 토질이 다른 재료로 성토되며, 이로 인해 기본적으로 이질적인 성토체의 거동을 보이게 된다. 즉, 시공 이후 시간경과에 따른 침하 거동이 다르게 되므로 제체에 매설되는 통관 구조물의 부분적인 파손이나 이격이 우려될 수 있다(Kim, 2017).

Fig. 2와 Fig. 3은 모델해석 요소망 및 누수 발생 위치를 나타낸 것으로 중심 코어부의 설치 유무에 따른 제체의 침투거동에 의한 안정성 여부를 비교 검토하기 위해 코어형 제체와 균일형 제체의 동일한 위치에서 누수가 발생하는 것으로 하였다. 이때 누수 발생 위치를 상류측 위치 A (구조물 상부: A1, 구조물 하부: A2), 하류측 위치 B (구조물 상부: B1, 구조물 하부: B2)로 구분하였다.

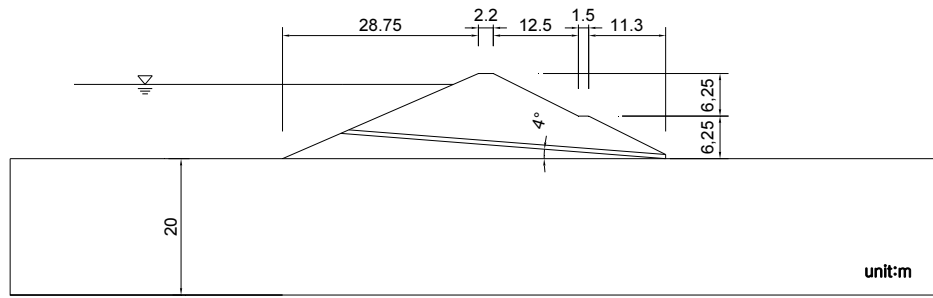
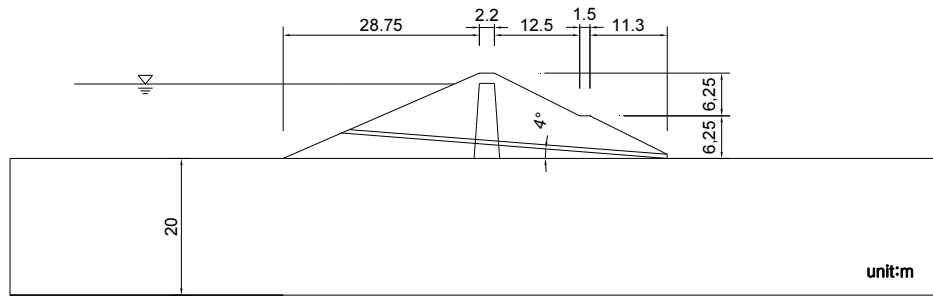


Fig. 1. Cross Section of Numerical Analysis (Kim, 2017)

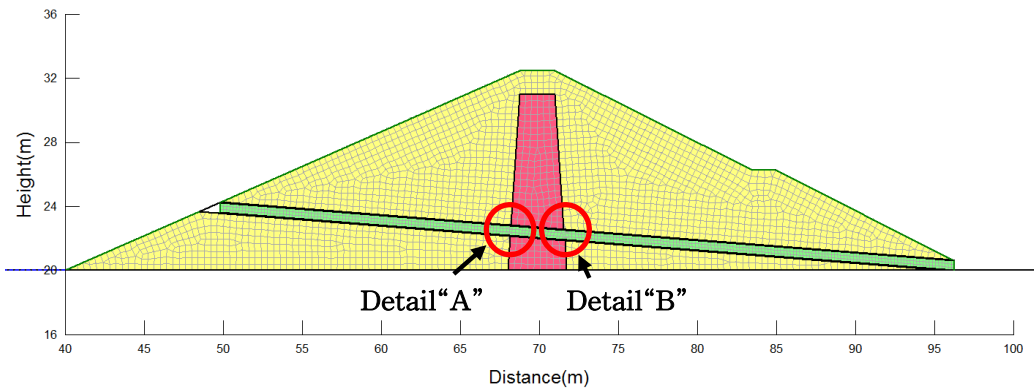


Fig. 2. Location of Leakage Occurs

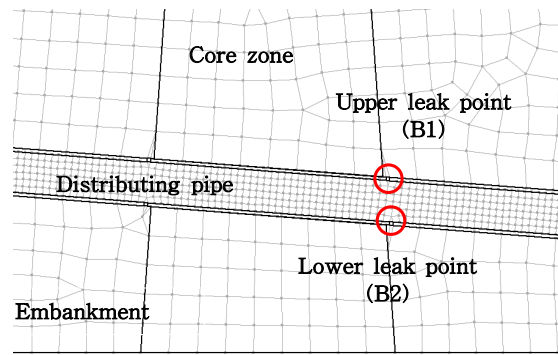
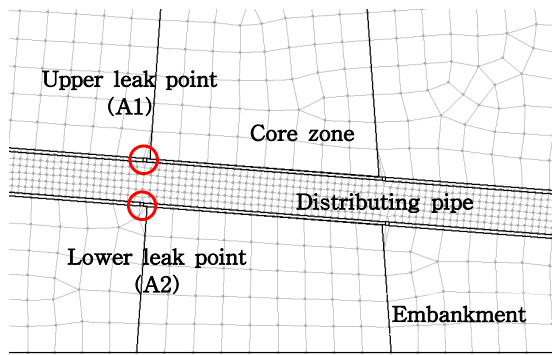


Fig. 3. Detail of Leakage Location

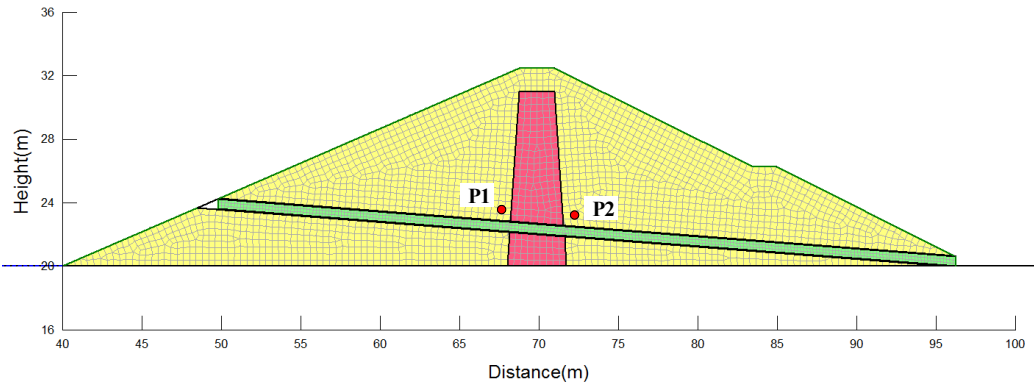


Fig. 4. Analysis Location of Pore Water Pressure

Table 1. Soil Properties (KRCC, 2014; Ryu, 2000; Kim, 2017)

| Material \ Item | Dry unit weight γ_d (kN/m ³) | Permeability coefficient k (m/day) | Specific gravity G_s | Effective grain size D_{10} (m) | Void ratio e | Water content w (%) |
|-----------------|---|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------|
| Embankment | 16.58 | 2.04 | 2.61 | 0.3×10^{-4} | 0.54 | 0.12 |
| Core zone | 15.76 | 0.0165 | 2.68 | 0.25×10^{-5} | 0.67 | 0.24 |

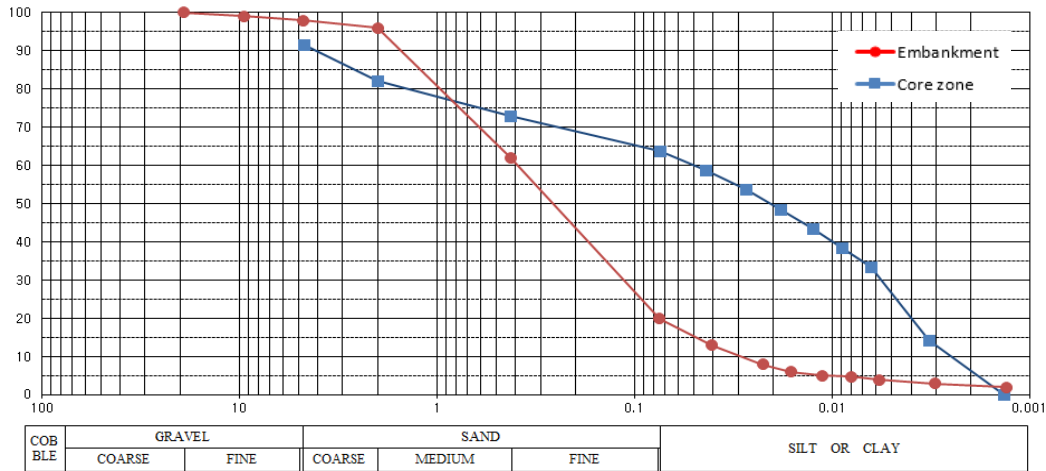


Fig. 5. Grain Size Distribution Curve of Soils (KRCC, 2014; Ryu, 2000; Kim, 2017)

일반적으로 통관 구조물에는 수문이 설치되어 있으며, 평상시에는 저수를 위해 통관 수문을 닫게 되므로 본 해석에서는 저수지와 접하여 수문이 위치하고 있고, 수위 상승 시 통관 수문은 닫혀 있어 통관 내부는 비어 있는 것으로 가정하였으며, 배수를 위해 수문을 열게 되는 경우는 고려하지 않았다. 이때 통관 내부 요소망은 0.1m의 조밀한 메시로 구성하였으며, 통관 내부 및 누수 발생 위치의 절점은 주변 토질재료보다 극단적으로 큰 투수계수($k=10^8$ m/day)를 입력하여 파손부로의 침투수가 유입되는 누수 발생 현상이나 통관내부에서 물의 흐름에 최대한 제약이 되지 않도록 모사하였다.

배수통관을 구성하는 외부 두께 부분은 불투수층으로 설정하고

누수발생위치 모델링은 Fig. 3의 A1, A2, B1, B2 위치에 폭 0.05m의 요소를 구성하여 통관 내부와 같은 투수계수를 적용하였다.

Fig. 4는 누수 발생에 따른 간극수압 변화에 대한 분석 위치를 나타낸 것으로 P1 및 P2는 A1과 B1에서 각각 임의로 x축으로 0.5m, y축으로 0.5m 거리를 두고 정한 것으로 이는 분석 위치가 누수 발생 위치와 지나치게 근접하게 되면 통관 내부로의 침투수 유출로 인한 직접적인 영향을 받게 되므로 이를 고려하여 정하였다.

본 연구의 모델 제체 하부의 기초는 불투수층으로 이루어져 있으며, 본 해석에 사용된 제체의 토질 조건 및 제체 구성 재료의 토질 특성은 Table 1과 같다. Fig. 5는 본 제체부와 코어부 성토재료

의 입도분포를 나타낸 것이다(Kim, 2017).

불포화 함수특성과 관련하여 체적함수비와 부간극수압(negative pore water pressure)의 관계는 기존 자료를 활용하였다. 즉, 본 체체의 성토재료는 일반적인 성토재료로 많이 사용하고 있는 화강 풍화토로서 Ryu (1997)의 성환 화강풍화토 자료를 활용하였으며, 중심 코어 재료는 점성토 자료(GeoStudio, 2007)를 환산하여 적용하였다. 불포화 투수계수와 부간극수압의 관계는 실제와의 일치도가 비교적 높다고 알려져 있어 여러 연구에서 사용되고 있는 Fredlund and Xing (1994)의 식을 적용하여 체적함수비와 부간극수압의 관계로부터 구하였다(Kim, 2017).

해석 시 수위는 저수지 체체가 붕괴하기 전 조사된 수위 자료(Son and Lee, 2013)를 고려한 것으로 저수위에서 3일간 10.7m로 상승하고 고수위 상태에서 17일간 상승된 상태를 유지하였다가 이후

2일간 고수위보다 약간 더 상승하는 것으로 하였다. 시간에 따른 저수지의 수위 변화는 Fig. 6과 같다(Kim, 2017). 본 연구에서 수치해석은 2차원 해석으로 SEEP/W (2007)를 활용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 침윤선의 변화

Fig. 7은 배수통관 손상부로의 누수가 발생하지 않을 경우 체체의 수위 변화에 따른 전형적인 침윤선의 변화를 보여주고 있다. 한편, 상류측 위치 A에서 누수 발생 시 수위 변화에 따른 침윤선의 변화는 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)의 코어형 단면의 경우 수위가 상승하는 과정에서 통관 누수의 영향을 받아 침윤선이 집중하는 것을 알 수 있으며, 수위 상승 후에는 누수가 발생하지 않는 Fig. 7(a)에 비해 약간 저하하는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)의 균일형 단면의 경우에는 누수가 발생하지 않을 경우의 침윤선(Fig. 7(b))에 비해 보다 체체 하부쪽에 위치하고 있는 것을 알 수 있으며, 누수 위치를 지나 완만하게 형성되고 있는 것으로 보아 누수의 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 특히, 균일형 단면에 비해 코어형 단면에서의 누수에 의한 침윤선의 변화는 적게 나타나고 있는데, 이는 투수성이 상대적으로 작은 코어부의 침투 지체로 인한 영향으로 판단된다. 즉, 본체체 재료의 투수성에 비해 세립토로 구성된 코어부는 투수성이 1/100 이하로 작아 침투 지체가 일어나기 때문으로 보인다.

Fig. 9는 하류측 위치 B에서 누수 발생 시 침윤선 변화를 나타낸 것으로 Fig. 9(a)의 코어형 단면에서는 중심 코어부에서의 침윤선이

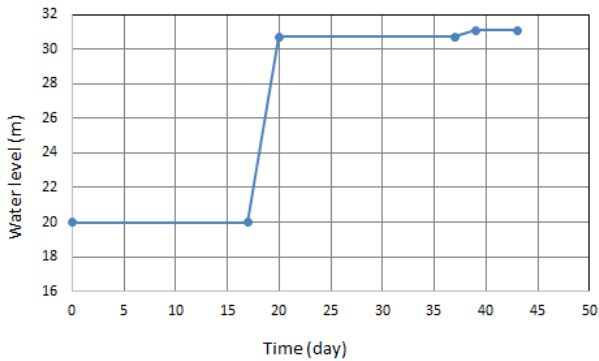


Fig. 6. Water Level at Numerical Analysis (Kim, 2017)

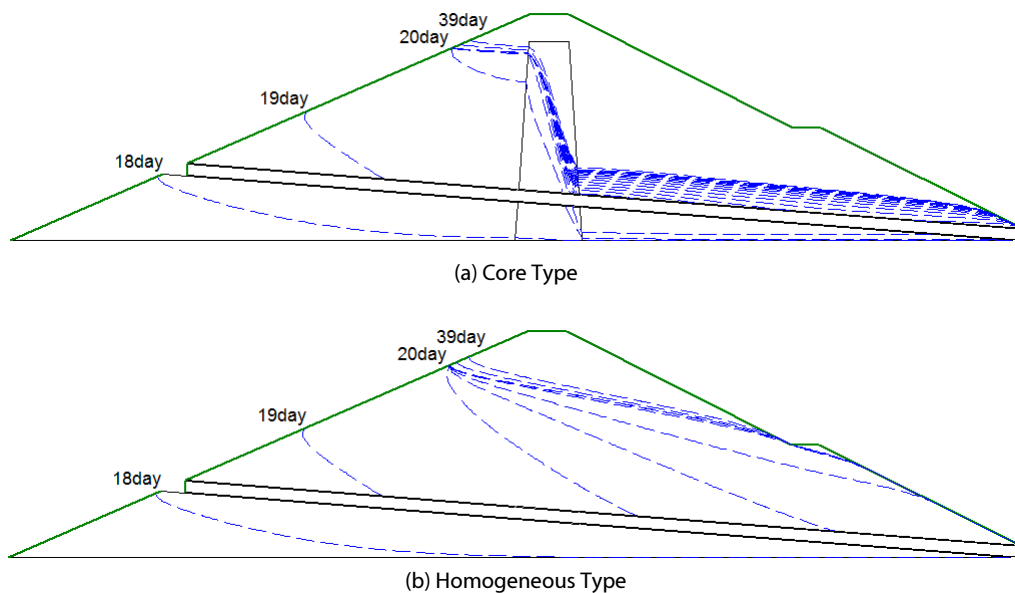


Fig. 7. Change of Phreatic Line when No Leakage

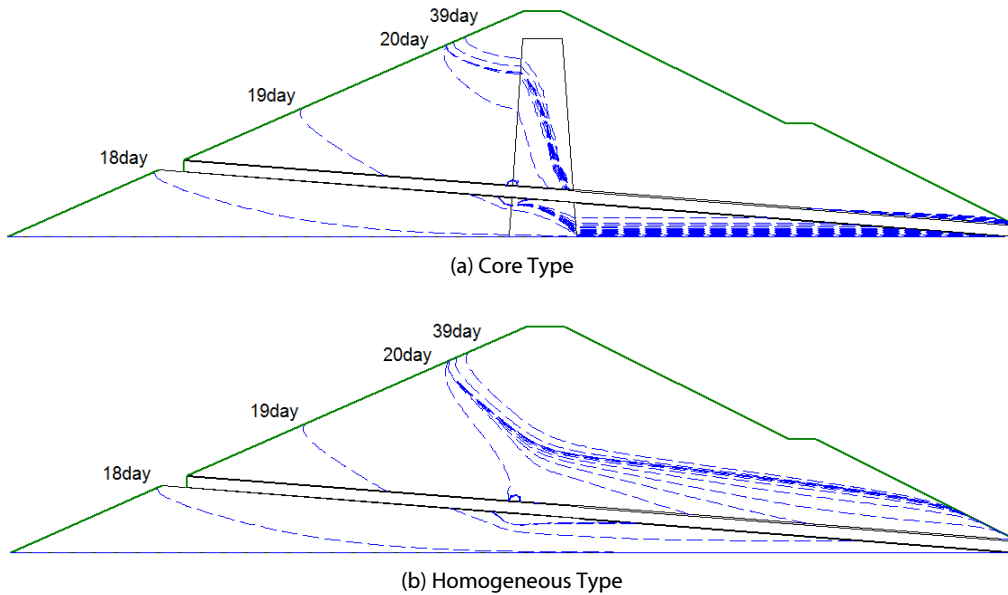


Fig. 8. Change of Phreatic Line when Leakage Occurs on the Upstream Side

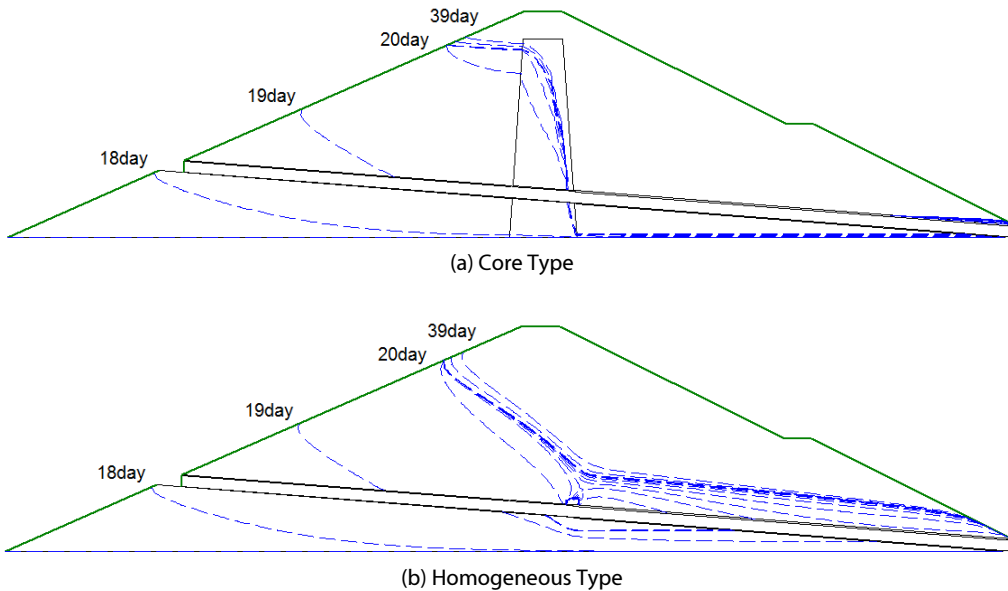


Fig. 9. Change of Phreatic Line when Leakage Occurs on the Downstream Side

통관 구조물 근처까지 하강하고 있으며, 전반적으로 침윤선이 누수 위치의 전면에서 형성되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(b)의 균일형 단면의 경우 침윤선이 누수 위치까지 하강하다가 누수 위치를 지나 완만하게 형성되고 있으며, 누수가 발생하지 않는 경우의 정상적인 침윤선 위치에 비해 제체 하류측으로 낮게 형성되고 있는 것을 알 수 있다.

누수로 인한 제체 내부의 파손 여부를 외형적으로 판단하기가 어렵기 때문에 단순히 보면 침윤선이 낮게 형성되는 것은 제체를

보다 안정적인 것으로 추측할 수도 있어 주의할 필요가 있다. 즉, 배수 통문 수문이 닫혀 있는 상태에서 제체 하류측으로의 침윤선이 누수가 없는 정상적인 상태의 침윤선보다 낮게 관측되면 통관 구조물 파손이나 누수가 발생할 수 있는 것을 추측할 수 있으며, 이로 인한 파이핑 발생 우려를 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 유출속도

3.2.1 상류측 누수

Fig. 10은 상류측 누수가 발생하는 경우의 통관 내부로의 침투수 유출속도 변화를 나타낸 것이고 Table 2는 유출속도에 대한 해석 결과 및 Justin의 한계유속(한국수자원학회(KWRA), 2009)을 참고로 하여 한계유속 산정 결과를 나타낸 것이다. 한계유속은 본 제체 재료에 대한 것으로 이는 누수 위치가 상류측 본 제체와 코어부의 경계부에 위치하고 있고, 제체 침투수가 대부분 본 제체를 통과하여 흐르기 때문이다.

전반적으로 수위가 상승함에 따라 침투선이 누수 발생 위치에 다다르게 되면 침투수의 유출속도는 급격하게 증가하고, 수위가 고수위 상태로 일정 수위를 유지하게 됨에 따라 침투시간차 만큼의 시간 간격 이후 유출속도도 일정한 상태를 유지한다. 수위 상승 초기 누수 발생 위치가 통관하부인 경우 유출속도 상승이 통관상부보다 먼저 시작하는데, 이후 20일경부터 통관하부의 누수 유출속도는 거의 변화가 없는 반면에 통관상부는 지속적으로 증가하여 약 2~3일 더 시간 경과 이후부터 일정한 유출속도를 유지하고 있다. 통관상부의 최대유출속도는 통관하부의 유출속도에 비해 코어형 단면 약 1.7배, 균일형 단면 약 2.5배 정도 크게

나타나고 있다. 통관 상부에서의 유출속도는 균일형 단면이 코어형 단면보다 약간 크고, 통관 하부는 코어형 단면이 균일형 단면보다 약간 큰 것으로 나타났다.

Table 2에서 보는 바와 같이 상류측에서 누수가 발생할 경우 최대유출속도는 배수통관 내부로 누수가 발생하지 않을 때보다 균일형 단면의 A1 위치에서 대략 40배 정도 큰 유속을 나타내고 있고, 코어형 단면의 A1에서의 경우에도 Justin의 한계유속과 큰 차이를 보이지 않고 있다.

따라서 통관에 파손 및 이격 등의 손상이 발생하여 제체에 파이핑이 발생할 경우 상대적으로 통관 하부보다 통관 상부에서 발생할 가능성이 클 것으로 예상된다.

누수로 인한 유출속도와 한계유속과의 비교를 통한 파이핑 발생 여부의 판단은 적용되는 조건 및 이론적인 요소뿐만 아니라 실제 적용 사례에 대한 연구, 경험적 요소, 그리고 적용 안전율에 대한 판단 등 다양한 관점에서의 신중한 판단이 필요할 것이다. 실용적인 관점에서 보면 계산된 한계유속에 안전율을 고려하는 점을 감안할 때 침투유속이 한계유속과 유사한 크기를 갖고 있다는 것은 파이핑 발생 가능성이 있으며, 이는 제체 안정성이 훼손될 우려가 있음을 의미한다(Kim, 2017).

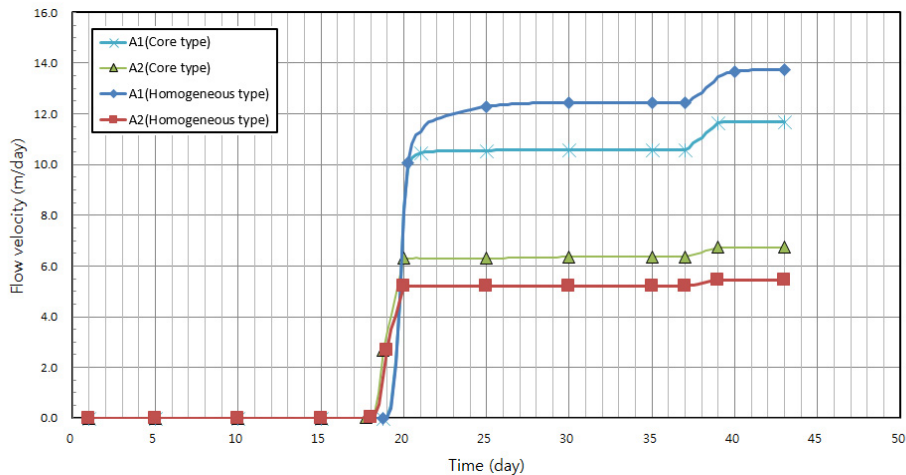


Fig. 10. Change of Flow Velocity when Leakage Occurs on the Upstream Side (Location A)

Table 2. Critical Velocity (Location A)

| Location \ Item | Permeability coefficient k (m/day) | Effective grain size D_{10} (m) | Max. flow velocity V_{max} (m/day) | | Justin's critical velocity V_{cr} (m/day) |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|---|
| | | | Leakage occurs on the upstream side | No leakage | |
| A1 (Core type) | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 11.70 | 0.36 | 15.35 |
| A2 (Core type) | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 6.73 | - | 15.35 |
| A1 (Homogeneous type) | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 13.75 | 0.36 | 15.35 |
| A2 (Homogeneous type) | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 5.45 | - | 15.35 |

3.2.2 하류측 누수

Fig. 11은 하류측 누수 발생 경우의 침투수 유출속도 변화를 나타낸 것이고, Table 3은 해석 결과 및 한계유속 산정 결과를 나타낸 것이다. 한계유속 산정 시 코어형 단면은 누수 발생 위치가 중심 코어부의 영향을 받기 때문에 코어부의 구성 토질 특성을 적용하였으며, 균일형 단면은 본 제체 재료의 토질 특성을 적용하였다(Kim, 2017).

코어형 단면의 경우 침투경로 관점에서 누수 발생 위치가 코어부의 후면 경계 지점에 위치하고 있고 침투수량이 적어 저수지 수위가 고수위까지 상승하여도 침투수 유출속도는 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다. 반면에 균일형 단면은 수위가 상승함에 따라 침윤선이 누수 발생 위치에 다다르게 되면 침투수의 유출속도는 급격하게 증가하고 일정 수위를 유지하면 침투시간차 만큼의 시간 간격 이후 유출속도도 일정한 상태를 유지하는데, 이는 누수 위치가 상류측에 더 가까운 균일형단면의 위치 A에서 누수가 발생할 경우와 유사한 경향을 보인다.

하류측에서 통관 내부로 누수가 발생할 경우 최대유출속도는 누수가 발생하지 않을 때 보다 균일형 단면의 B1 위치에서 보면 대략 30배 정도 큰 유속을 나타내고 있다. 즉, 상류측에서 누수가

발생하는 경우와 같이 배수통관 내부로 누수가 없을 때보다 큰 유속을 동반한 누수의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 제체구성 재료의 입자크기, 배수통관 손상부의 폭, 유출속도 크기 등의 상황에 따라 파이핑에 취약할 수 있다.

Justin의 한계유속과 비교해 보면, 코어형 단면의 경우 위치 B1은 한계유속 대비 약 31%, 위치 B2는 약 7%이며, 코어부가 없는 균일형 단면의 경우 B1은 약 75%, B2는 약 26%를 보이고 있다. 즉, 균일형 단면의 상부 B1에서의 누수는 파이핑 발생 우려를 크게 할 것으로 보이며, 특히 유출속도를 단순히 비교해 보면 하류측 배수 통관 누수 발생 시 본 해석 조건의 경우 통관 상부에서 코어형 단면은 균일형 단면에 비해 1/8 정도로 감소하였으며, 통관 하부에서는 1/13 정도로 감소하고 있어 코어부의 존재가 파이핑 발생 가능성으로부터 제체안정에 기여하고 있는 것으로 판단된다.

3.3 동수경사

3.3.1 상류측 누수

Fig. 12는 상류측 누수 위치 A에서의 저수지 수위상승에 따른 동수경사 변화 양상을 나타낸 것이며, Table 4는 지반공학적 관점 및 하천설계기준-해설(한국수자원학회(KWRA), 2009)를 참고로

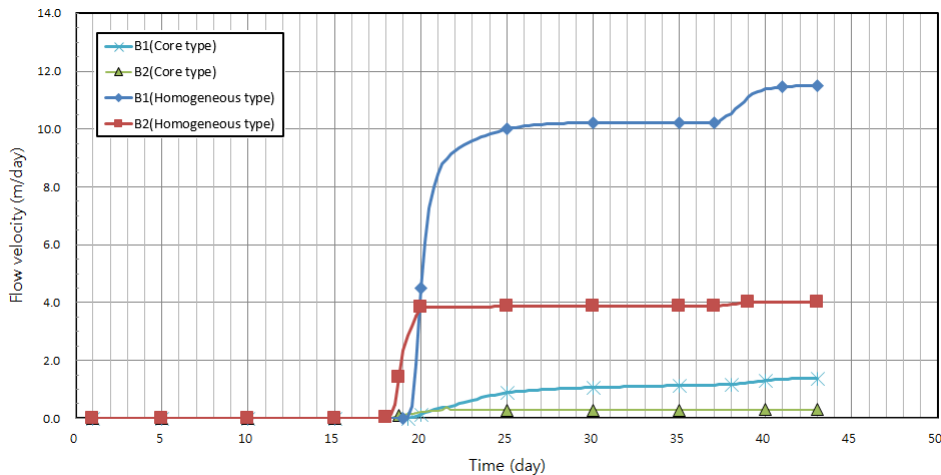


Fig. 11. Change of Flow Velocity when Leakage Occurs on the Downstream Side (Location B)

Table 3. Critical Velocity (Location B)

| Location | Item | Permeability coefficient k (m/day) | Effective grain size D_{10} (m) | Max. flow velocity V_{max} (m/day) | | Justin's critical velocity V_{cr} (m/day) |
|-----------------------|------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------|---|
| | | | | Leakage occurs on the downstream side | No leakage | |
| B1 (Core type) | | 0.0165 | 0.25×10^{-5} | 1.39 | 0.04 | 4.53 |
| B2 (Core type) | | 0.0165 | 0.25×10^{-5} | 0.30 | - | 4.53 |
| B1 (Homogeneous type) | | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 11.50 | 0.41 | 15.35 |
| B2 (Homogeneous type) | | 2.04 | 0.3×10^{-4} | 4.01 | - | 15.35 |

하여 한계동수경사 산정 결과를 나타낸 것이다.

누수 위치 A에서의 동수경사 변화를 보면 수위가 상승하여 침윤선이 누수 발생 위치에 이르게 되면 동수경사는 급격하게 증가하고 고수위로 일정한 수위를 유지하게 되면 침투시간차 만큼의 시간 간격 이후 동수경사도 일정한 값을 유지한다.

수위 상승 초기에는 통관 하부의 동수경사 상승이 통관 상부보다 먼저 발생하는데 이는 침투수가 통관 하부에 먼저 도달하여 나타나는 현상이다. 이후 20일경부터 통관 하부의 동수경사는 거의 변화가 없는 반면에 통관 상부의 동수경사는 지속적으로 증가하여 1~2일 이후부터 비교적 일정한 크기를 유지한다. 통관 상부의 동수경사는 코어형 단면과 균일형 단면 모두 약 2.8배 정도 통관 하부의 동수경사에 비해 크게 나타나고 있는데 이 역시 유출속도 분석 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

Table 4에서 보는 바와 같이 한계동수경사와 비교해 보면 코어형 단면 및 균일형 단면 통관 상부 누수 위치 A1에서의 동수경사는 한계동수경사의 7배 이상으로 나타나고 있어 파이핑에 의한 체체 불안정 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 또한, 코어형 단면과 균일형 단면의 통관 하부 누수 위치 A2의 경우에도 한계동수경사 대비 2배 이상의 최대동수경사를 나타나고 있어 체체의 파이핑 발생 우려가 있음을 알 수 있다.

통관 상부 누수 위치가 통관 하부 누수 위치보다 약 3배 정도 큰 동수경사를 나타내고 있어 체체 상류측에서 통관 내부로 누수가 발생하는 경우 통관 상부를 통한 파이핑 발생 우려가 높으며, 시간이 흐름에 따라 전반적으로 파이핑에 취약하게 될 수 있어 결과적으로 체체를 불안정하게 할 우려가 높을 것으로 판단된다.

한편, 배수통관 내부로 누수가 발생하지 않을 경우 코어형 단면의 최대동수경사는 0.29이고, 균일형 단면의 최대동수경사는 0.18을 보이고 있다.

3.3.2 하류측 누수

Fig. 13 및 Table 5는 체체 하류측 누수 위치인 B에서의 동수경사 변화 및 하류측으로 누수가 발생하는 경우 한계동수경사 산정 결과를 나타낸 것이다.

코어형 단면의 경우 침투경로 관점에서 누수 발생 위치가 코어부 경계 후면에 위치하고 있고 침투수량이 적어 저수지 수위가 고수위까지 상승하여도 동수경사는 균일형 단면 대비 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 통관 상부에서는 고수위 유지 시 동수경사가 한계동수경사 이상으로 증대되고 있어 파이핑 발생 우려가 있을 수 있으나 침투수의 흐름이 투수성이 작은 세립토로 구성된 코어부를 통하여 유출되는 만큼 이를 고려해서 판단하여야 할

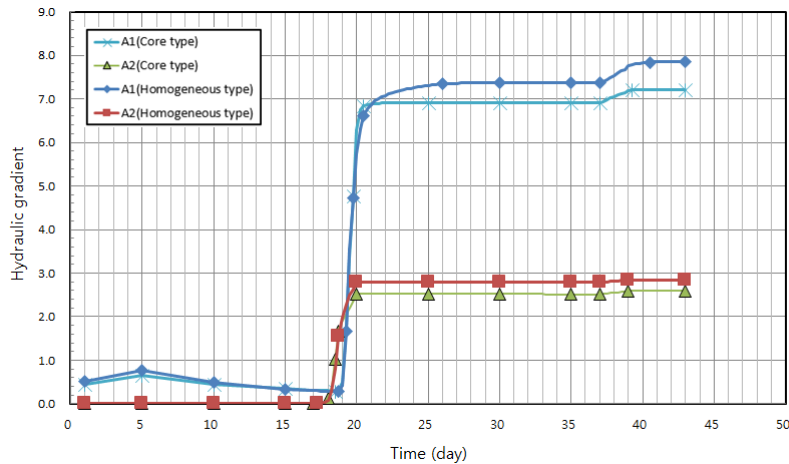


Fig. 12. Change of Hydraulic Gradient when Leakage Occurs on the Upstream Side (Location A)

Table 4. Critical Hydraulic Gradient (Location A)

| Location \ Item | Specific gravity G_s | Void ratio e | Max. hydraulic gradient i_{max} | | Critical hydraulic gradient i_c |
|-----------------------|------------------------|----------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| | | | Leakage occurs on the upstream side | No leakage | |
| A1 (Core type) | 2.61 | 0.54 | 7.20 | 0.29 | 1.05 |
| A2 (Core type) | 2.61 | 0.54 | 2.59 | - | 1.05 |
| A1 (Homogeneous type) | 2.61 | 0.54 | 7.86 | 0.18 | 1.05 |
| A2 (Homogeneous type) | 2.61 | 0.54 | 2.85 | - | 1.05 |

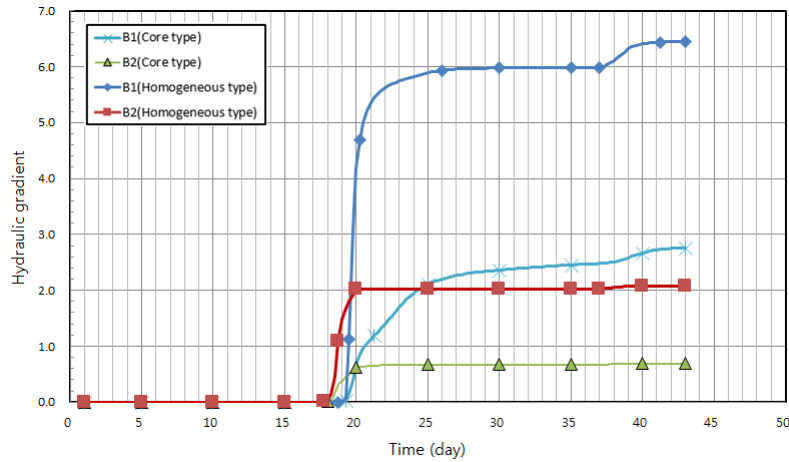


Fig. 13. Change of Hydraulic Gradient when Leakage Occurs on the Downstream Side (Location B)

Table 5. Critical Hydraulic Gradient (Location B)

| Location | Item | Specific gravity G_s | Void ratio e | Max. hydraulic gradient i_{max} | | Critical hydraulic gradient i_c |
|-----------------------|------|------------------------|----------------|---------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| | | | | Leakage occurs on the downstream side | No leakage | |
| B1 (Core type) | | 2.68 | 0.67 | 2.76 | 0.25 | 1.01 |
| B2 (Core type) | | 2.68 | 0.67 | 0.69 | - | 1.01 |
| B1 (Homogeneous type) | | 2.61 | 0.54 | 6.45 | 0.20 | 1.05 |
| B2 (Homogeneous type) | | 2.61 | 0.54 | 2.08 | - | 1.05 |

것으로 보인다.

한편, 균일형 단면에서는 수위가 상승함에 따라 침윤선이 누수 발생 위치에 이르게 되면 동수경사가 급격하게 증가하고 고수위 상태로 일정 수위를 유지하게 되면 침투시간차 만큼의 시간 간격 이후 동수경사도 일정한 상태를 유지하는데, 누수 위치가 상류측보다 가까운 곳에 위치하는 위치 A의 균일형 단면의 누수 발생 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 전반적으로 상류측 누수의 경우와 같이 코어형 단면에 비해 파이핑 우려가 크게 나타나고 있다.

Fig. 13, Table 5에서 보는 바와 같이 한계동수경사와 비교해 보면 코어형 단면과 균일형 단면 통관 상부 누수 위치 B1은 약 3~6배, 하부 누수 위치 B2는 각각 0.7배 및 2.0배의 최대동수경사를 나타내고 있어 전반적으로 제체의 파이핑 발생 우려가 있음을 알 수 있다. 다만, 통관 상부 누수 위치가 하부 누수 위치보다 약 3배 이상 큰 동수경사를 나타내어 통관 상부로의 누수가 제체의 파이핑 발생 우려를 크게 할 것으로 사료된다.

3.4 간극수압

Fig. 4의 간극수압의 분석 위치 P1과 P2에서 배수통관 내부로의 누수가 발생할 경우와 누수가 발생하지 않을 때 수위 변화에 따른

간극수압을 비교한 결과 Fig. 14 및 Fig. 15와 같다.

이미 지적한 바와 같이 배수통관 내부로 누수가 발생할 경우 통관상부는 하부보다 유출속도 및 동수경사가 크게 나타났으며 파이핑 발생 가능성이 높으므로 상부위치에 대하여 간극수압을 분석하였다. Fig. 14의 상류측 누수가 발생할 경우 코어형 단면 및 균일형 단면의 P1은 거의 유사한 변화를 보이고 있는데, 누수가 발생하지 않는 경우 대비 20~30% 이하로 감소하고 있어 누수가 발생하면 급속하게 간극수압이 감소될 수 있는 것을 알 수 있다. 다만, 코어형 단면에서 간극수압이 균일형 단면에 비해 약간 크게 나타나는 것은 코어부에 의한 침투 지체 효과 때문으로 보인다.

Fig. 15는 하류측 누수 발생 여부에 따른 P2의 간극수압 변화를 나타낸 것으로 균일형 단면에서는 누수가 발생하면 간극수압은 급속하게 감소하는 경향을 보인 반면, 코어형 단면에서는 정의 간극수압을 보이지 않고 있어 하류측 누수 발생 시 중심 코어부의 존재가 제체의 침투 안정에 중요한 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다.

이와 같이 배수통관 내부로의 누수 발생은 누수가 발생하지 않을 때보다 간극수압을 감소시키는 결과를 가져오게 되므로 정상적인 수위에 비해 간극수압의 급격한 감소가 관측된다면 누수 발생을 우려할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 간극수압의 감소가 한계평형해석을 이용한 비탈면 안정해석에서 안전율을 높일 수

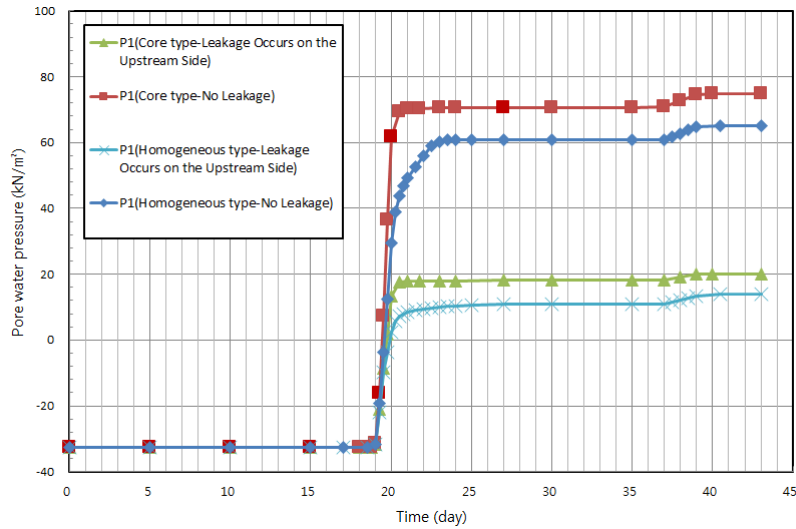


Fig. 14. Change of Pore Water Pressure at Location P1

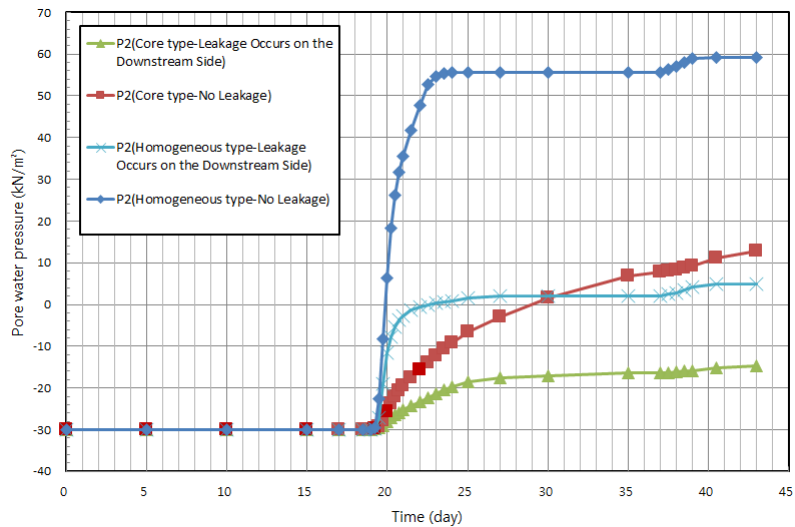


Fig. 15. Change of Pore Water Pressure at Location P2

있어 제체안정에 유리한 것처럼 보일 수 있으나 이미 언급한 바와 같이 파이핑 발생우려를 높일 수 있으므로 이에 대한 문제를 간과해서는 안 될 것으로 사료된다.

3.5 유출량

배수통관 파손부인 위치 A(상류측)와 B(하류측)로 발생하는 유출량은 수치해석상 Fig. 16과 같다. 수위 상승에 따른 유출량 변화를 보면 코어형 단면보다 균일형 단면에서 보다 크게 나타나고 있다.

해석 43일 경과 후 상류측과 하류측 유출량을 비교해 보면 코어형 단면의 경우 약 13배 정도 상류측 침투유량이 큰 반면 균일형 단면에서는 약 1.2배 정도의 차이를 보이고 있다. 이는

지극히 당연한 현상으로 투수성이 작은 중심 코어부가 침투거동에 중요한 영향을 미치고 있음을 보여주는 한 예가 될 것이다.

한편 본 해석결과를 본 연구의 모델 저수지인 OO저수지의 총 저수량 246,000m³을 참고하여 유출량을 검토해 보면 균일형 단면의 A에서의 유출량 약 12m³는 총 저수량의 약 0.005%정도로서 이는 한국농어촌공사의 정밀안전지단지침(한국농어촌공사(KRCC), 2005)에서 제시한 1일 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 123m³의 1/10 수준으로 통관 구조물의 파손으로 인한 제체 침투수의 유출은 단순하게 누수량의 크기로 판단하기에는 곤란할 것으로 보이며, 보다 구체적으로 파이핑 발생 우려에 대해 조사할 필요가 있을 것으로 사료된다.

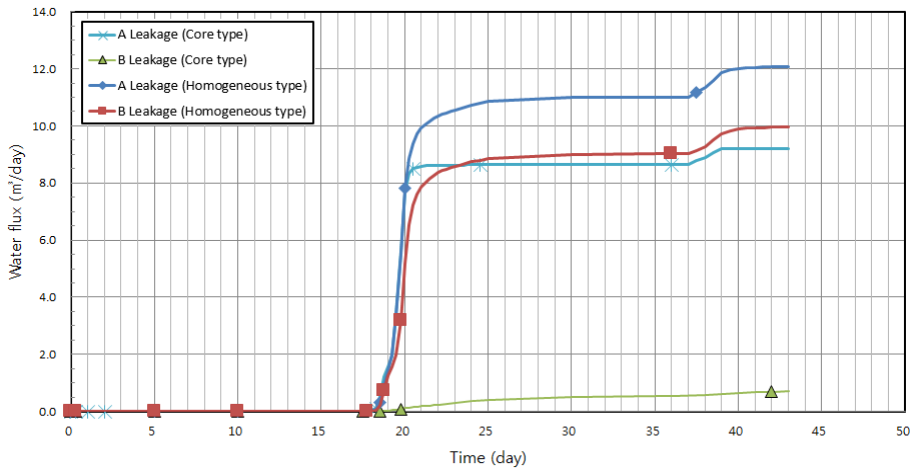


Fig. 16. Change of Water Flux

4. 결론

저수지 제체를 관통하는 배수 통관(복통) 구조물이 부등침하 등으로 인해 통관 구조물 일부가 파손되어 누수가 발생하는 경우 이로 인한 파이핑 발생 여부 및 제체 침투거동에 대한 안정성을 판단하기 위해 저수지의 제체 구성 형태를 코어형 단면과 균일형 단면으로 구분하여 수위 변화에 따른 2차원 침투해석을 행하고 해석 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 제체 상류측에서 통관 내부로 유출발생 시 통관 상부에서의 최대유출속도는 Justin의 한계유속에 가까운 크기를 보였고 코어형 단면 및 균일형 단면에서 통관 하부에 비해 약 1.7배 이상 통관 상부가 큰 것으로 나타났으며, 통관 상부 유출 시 통관 하부로의 유출시 보다 약 3배 정도 큰 동수경사를 나타냈다.
- (2) 제체 상류측 통관 상부에서 통관 내부로 유출이 발생하는 경우 코어형 단면 및 균일형 단면에서 최대동수경사는 한계동수경사의 7배 이상이었으며, 통관 하부로의 유출이 발생하는 경우에도 한계동수경사의 2배 이상 최대동수경사를 나타내고 있어 제체의 파이핑 발생 우려가 크게 존재할 수 있는 것을 알 수 있었다.
- (3) 제체 하류측에서 통관 내부로 유출이 발생하는 경우 코어형 단면에서 균일형 단면에 비해 상대적으로 파이핑에 대한 발생 우려가 크게 감소되는 것으로 보인다. 제체 하류측에서 유출이 발생하는 경우 유출속도는 통관 상부에서 코어형 단면이 균일형 단면에 비해 1/8 정도로 감소하였으며, 통관 하부에서는 1/13 정도로 감소하고 있어 코어부의 존재가 통관내로의 유출로 인한 파이핑 발생 가능성으로부터 제체안정에 기여하고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 배수 통관 내부로의 침투수 유출이 발생하면 정상적인 경우에

비해 간극수압을 감소시키는 결과를 가져오게 되므로 정상적인 수위에 비해 간극수압의 급격한 감소가 관측된다면 유출 발생을 우려할 수 있을 것이다. 또한, 간극수압의 감소가 한계평형해석을 이용한 비탈면 안정해석에서 안전율을 높일 수 있어 제체안정에 유리한 것처럼 보일 수 있으나 이미 언급한 바와 같이 파이핑 발생우려를 높일 수 있으므로 이에 대한 문제를 간과해서는 안 될 것으로 사료된다.

- (5) 배수 통관 구조물의 파손 등으로 인한 제체내의 유출 시 단순히 유출량의 크기로 안정성 여부를 판단하기는 곤란할 것으로 사료되며, 유출량의 크기가 작다고 하더라도 간극수압의 급격한 감소가 관측되는 등 정상적인 수치와의 차이가 관측되면 파이핑 발생 우려에 대한 심도 있는 고려가 필요할 것으로 판단된다.

다만, 본 논문의 결과 분석은 2차원 해석을 바탕으로 수행된 것으로 저수지 제체를 관통하는 배수 통관의 누수와 관련하여 해석 조건을 실제와 일치시키기 어렵고 그 결과 역시 실제와는 차이가 있을 것으로 보이며, 보다 실제 조건과 일치시키기 위해서는 3차원 해석이 필요할 것으로 판단된다.

References

Adams, T. E. (2011). *Stability of levees and flood/walls supported by deep-mixed shear walls : Five case studies in the New Orleans Area*, Dissertation of Ph. D., Virginia Polytechnic Institute and University.

Choi, B. H. (2015). *Disaster risk analysis and management improvement plans of agricultural reservoirs*, Dissertation of M.S., Kyungpook National University (in Korean).

Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31,

- pp. 521-532.
- GeoStudio (2007). "SEEP/W manual." GEO-SLOPE International Ltd.
- Han, K. Y., Kim, J. Y. and Choi, H. J. (2002). "Flood inundation analysis resulting from levee failure in nakdong river." *Korean Society of Civil Engineers Conference*, pp. 1839-1842 (in Korean).
- Kim, H. I. (2017). *Analysis of levee stability due to leakage of buried box culverts*, Dissertation of M.S., Hanbat National University (in Korean).
- Kim, S. G., Sin, S. M., Seo, H. S. and Han, S. G. (1992). "Piping analysis of levee by seepage velocity : case study." *Korean Society of Civil Engineers Conference Symposium*, Vol. 1 (in Korean).
- Kim, Y. I., Yeon, K. S., Kim, K.S., Jeong, J. W. and Kim, Y. S. (2011). "An experimental study of reservoir failure phenomena according to transitional zone : spillway scour during overflow." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 53, No. 2, pp. 27-33 (in Korea).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2005). "Development of advanced design and maintenance technologies for culvert in levee." pp. 1-5 (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation(KISTEC) (2013). "Canyon Lake dam collapse." *Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation : Case Number HF-007* (in Korean).
- Korea Rural Community Corporation (KRCC) (2005). *Guidelines for precision safety inspections of dam* (in Korean).
- Korea Rural Community Corporation(KRCC) (2012). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture* (in Korean).
- Korea Rural Community Corporation(KRCC) (2014). *The report of safety inspection for agricultural infrastructures (Sandae reservoir)* (in Korean).
- Korea Water Resources Association(KWRA) (2009). *River design criteria-commentary* (in Korean).
- Lee, K. J. (2011). *A case study on the piping failure of seongam reservoir*, Dissertation of M.S., Mokpo National University (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). *Dam design criteria* (in Korean).
- Park, G. C. (2015). *A study on piping failure of levee using centrifuge model test*, Dissertation of M.S., Konkuk University (in Korean).
- Ryu, C. H. (1997). *Characteristics of permeability and shear strength of unsaturated weathered granite soils*, Ph.D. Dissertation, Dongguk University, Seoul, Korea. (in Korean).
- SEEP/W (2007). *Seepage modeling*, GEO-SLOPE International Ltd.
- Sim, J. K. (2011). "A study on establishment of E.A.P for agricultural reservoir." *Rural Resources*, Vol. 53, No. 4, pp. 2-13 (in Korean).
- Son, M. H. and Lee, K. H. (2013). "Collapse of Sandae reservoir and the corresponding inundation in Gyeongju, Gyeongbuk." *Journal of Industrial and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 9-15 (in Korean).
- Wayne, J. and Graham, P.E. (2008). *The teton dam failure-an effective warning and evacuation*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center, Denver, Colorado.