

원심모형실험을 활용한 투수성이 낮은 기초지반에 위치한 보축 제방에서의 침투 거동

The Evaluation of Seepage Characteristics in Reinforced Embankment Constructed on Low Permeable Clay Layer Through Centrifuge Model Tests

진 석 우¹ Jin, Seok-Woo

추 연 옥² Choo, Yun-Wook

김 영 목³ Kim, Young-Muk

김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

임 은 상⁵ Im, Eun-Sang

Abstract

In this paper, a series of centrifuge tests were performed to evaluate the seepage characteristic of reinforced embankment. The centrifuge models simulated an actual embankment reinforced by enlargement of levee cross-section. The centrifuge models have the same conditions except the locations of enlargement with low permeable material : water-side and land-side. In addition, the prototype embankment is constructed on low permeable clay layer. In the case of water-side reinforcement, the reinforced zone makes water head down and the saturated zone of embankment propagates slowly. In the case of land-side reinforcement embankment, the saturated zone enlarged relatively faster but the amount of exit water at land-side toe was very small because of the land-side reinforcement zone. The low permeable clay foundation layer was being continuously saturated by the inflow from the embankment as well as the uplift flow from the permeable layer induced by the excess pore water pressure.

요 지

본 논문에서는 보편적인 제방 보강공법 중 하나인 보축 공법이 적용된 실제 제방을 대상으로 하여, 원심모형시험을 수행하고 조건에 따른 제방의 침투 거동을 분석하였다. 동일한 단면 조건에서 투수성이 낮은 양질의 재료가 제내지를 보축한 경우와 제외지를 보축한 경우에 대한 원심모형시험을 수행하고 각 경우를 비교하여, 보축 방향에 따른 영향을 분석하였다. 또한, 대상 현장의 제방은 투수성이 낮은 세립토층에 축조되어 있었으며, 이에 대한 영향을 분석하였다. 제외지 보축의 경우, 시간이 흐름에 따라 제내지 보축의 경우에 비해 포화영역의 확산이 적고 느리게 나타났다. 제내지 보축된 경우, 상대적으로 빠르게 포화영역이 확대되었으나, 제내지 보축의 낮은 투수성으로 침투수가 많이 유출되지는 않았다. 낮은 투수성의 하부 기초지반은 포화영역이 확대되었으며, 또한 기초지반 아래에서 배수층에 작용하는 압력으로 인한 과잉간극수압에 의해 보다 빠르게 포화가 진행되었다.

Keywords : Centrifuge, Enlargement, Land-side reinforcement, Levee, Low permeable foundation, Water-side reinforcement

1 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, PhD. Candidate, Dept. of Civil and Environment Engrg., KAIST)

2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor., Dept. of Civil and Environment Engrg.)

3 정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Hanbat National Univ., Tel: +82-42-821-1110, Fax: +82-42-821-1589, kym@hanbat.ac.kr, 교신저자)

4 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., KAIST)

5 정회원, 한국수자원공사 K-water연구원 기반시설연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Infrastructure Research Center, K-water Institute, K-Water)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 전 세계적인 지구 온난화에 따른 이상기후는 국지적인 집중호우와 홍수해의 빈도를 급격히 증가시키고 있으며, 우리나라도 최근 이러한 이상기후에 의해 여름철 태풍 및 집중호우 등 기후에 관련한 재해에 시달리고 있는 실정이다. 이에 대한 방안으로 안정적인 수자원 확보, 그리고 수질개선 및 홍수해 방지 등을 목적으로 우리나라에서는 현재 4대강에 대한 대대적인 정비 사업이 진행 중이다. 주되게는 준설을 통하여 홍수위를 낮추고 저유능력을 증가시켜 수자원 확보와 더불어 홍수 조절 능력을 확보하고, 변화된 기후에 대응하고 집중호우시 수해를 대비하기 위하여 노후 된 제방 및 부족한 단면을 보강하고 있다.

제방을 보강하기 위한 단순하고 실제적인 방안으로 제방 단면을 확대하거나 제방 높이를 증가시키는 방법이 많이 사용된다. 빈번한 집중호우로 인한 홍수위의 변화는 제방의 안정성을 유지하기 위한 제방의 증축을 요구하게 되고, 결과적으로 제방의 단면적을 확대하는 소위 보축공법으로 발전되어 왔다. 보축공법은 크게 제외지 보축과 제내지 보축으로 나뉘게 된다. 제외지 보축의 경우, 제외지 쪽으로 제방을 보축하는 공법이고 제내지 보축은 하천 반대편, 즉 제내지 쪽으로 제방을 보축하는 공법이다.

이러한 보축공법의 결정에는 제방의 통수단면 확보 여부, 현지 상태 및 지형 조건 등 여러 가지 조건들이 고려된다. 실제 현장에서 보축공법을 결정하기 위해서는 다양한 조건에 대한 고려가 우선되어야 한다. 근원적으로는 수문학적, 지형학적 현장조건에 대한 고려가 요구되며, 지반공학적으로는 기존 제체의 물성과 보축 재료의 물성뿐만 아니라 침투 및 응력거동, 그리고 안정성에 영향을 주는 각종 공학적 인자들에 대한 고려가 필요하다. 또한, 기초지반의 침투거동에 관련하여 불포화흐름에 대한 지식도 필수적으로 요구된다(Alonso and Cardoso, 2010). 보축시에는 양질의 재료와 품질관리를 엄격히 행하여 기존 제방과는 이질 조건이 되는 경우도 종종 있다. 특히, 국내 오래된 기존제방의 경우 제체재료가 하천 주변의 모래질흙, 또는 세립토가 혼합된 하천 충적토로 구성되어 있고, 다짐도 등의 시공관리가 현재와 같이 체계적으로 되어 있지 않은 경우가 많아 보축재료 및 보축 시공조건과는 다를 수밖에 없어 쉽게 이질 조건이 될 수 있다(Kim and Shin, 1998; KICT, 2007).

이와 같이 현장의 상황과 조건에 따라 선택되는 보축 공법에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어져

왔다. Kim and Shin(1998)은 제체 증축 재료의 선정을 위한 침투거동 실험을 수행한 바 있으며, Yuck et al. (1999)은 재료적 특성뿐만 아니라 보축된 제방에 대해 급변하는 수위 상황에 따른 침투특성 및 제방 안전성에 대해 수치해석을 수행하였다. 또한, Shin et al.(2001)은 제외지 보축 조건에서 비정상 침투 및 제방 안정성에 관련하여 실험 및 수치해석 연구를 행한 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 기초지반을 고려하지 않은 제방 체에서의 침투만을 고려하여 수행된 연구이다.

침투거동의 관점에서 보면 투수성이 큰 기초지반에 위치하는 제방은 제체 침투거동보다 기초지반에서의 침투거동이 제방의 안전성에 더 큰 영향을 줄 수 있다(Kim et al., 1992; Jin et al., 2011). 반면, 점성토 지반과 같이 투수성이 낮은 기초지반에 위치하는 제방에서는 기초지반에서의 파이핑 가능성이 거의 없어 보이므로 표면적으로는 기초지반에서의 침투거동이 제방 안정에 영향을 줄 가능성 역시 적어 보인다. 그러나 제방이 위치하고 있는 기초지반의 이질적인 조건이 결과적으로 홍수시나 이상수위시 제체 침투거동 및 안정성에 영향을 줄 수 있어 이에 대한 규명이 필요하다. 실제 우리나라의 경우, 하천의 하류부에는 모래, 자갈층과 같은 조립토층 뿐만 아니라 오랜 세월 세립토가 퇴적하여 연약한 세립토층을 구성하고 있고 그 위에 하천 제방이 축조되어 있는 사례를 흔히 볼 수 있다.

현재 보고된 제방 보축 관련 연구사례들은 단순 1-g 실험을 통한 검증이나 모델링을 통한 수치해석이 대부분이다(Shin et al., 2001). 수치해석은 비교적 간단히 모델링을 할 수 있고 시간 및 비용을 절감한다는 장점이 있으나, 실제 지반재료의 특성을 사실적으로 모사하기에는 한계가 있다. 그리고 실험의 경우는 가장 정확한 방법이나 이러한 비교군을 필요로 하는 실험에서는 막대한 비용이 소모되는 단점이 있다. 또한, 축소 1-g 모형실험의 경우는 지반재료의 구속응력 조건 차이 등으로 인해 실제 구조물의 거동과 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 반면, 본 연구에서 수행된 원심모형실험의 경우 축소모형의 경제성과 함께 현장의 응력 상태 및 거동특성을 보다 효과적으로 모사할 수 있다는 장점을 갖는다(Kim et al., 2006). 원심모형실험을 이용한 댐의 연구는 국내에서도 시도되고 있다(Im et al., 2005; Hwang and Lim, 2007).

본 연구는 본 제체에 비해 투수성이 낮은 세립토층의 기초지반에 위치한 보축 제방을 모델로 하여 홍수위 상황

에서의 원심모형실험을 행하고, 그 결과를 분석하여 보축 공법의 효용성 및 침투거동에 관련하여 기초지반의 영향에 대해 연구하였다. 이때 대상 모델은 제외지 보축이 시공된 제방으로 침투특성을 비교하기 위해 동일한 조건에서 제내지 보축 제방에 대해서도 실험을 수행하였다.

2. 단면결정 및 현장조건

2.1 실험 모델의 현장조건

본 실험의 대상 모델은 4대강 사업에 포함되는 지역으로 금강변 OO보 주변의 상류부로서 보 설치로 인한 수위변동의 영향권에 있을 것으로 예상되는 지점에 위치하고 있으며, 기존 제방에 제외지 보축이 이루어진 제방이다. 또한, 고수부지가 작아 홍수위시 수위 변동에 의한 영향을 직접적으로 받을 가능성이 큰 제방이다.

Fig. 1은 본 연구에서 선정한 모델이 되는 지점의 실제

제방의 횡단면도를 나타낸다. 보축공사 전 기존 제방은 제외지 및 제내지의 경사가 1:2.5로 축조되어 있으며, 보축 후에는 제외지 경사가 1:3.0이고 제내지는 1:2.5로 축조되어 있다. 제방높이는 최대 8.7m이고, 제외지의 둔치는 제체사면 안전성 확보를 위하여, 제방 보축시 성토를 수행하여 인위적으로 조성되었다. 계획홍수위는 E.L.E. 23.7m로서 보축 후 제방 둑마루 아래 3m에 위치하고 있으며, 지하수위는 E.L.E. 12.0m로서 갈수위와 일치하는 위치이다.

현장 조건을 보면 제방은 6m 두께의 투수성이 낮은 세립토층 위에 위치하고 있으며, 세립토층 하부에는 투수성이 매우 높은 자갈층이 존재하고 있다. 갈수위 및 제방이 위치하는 기초부의 지하수위는 자갈층과 세립토층의 경계부에 위치하고 있다.

2.2 제외지 보축 및 제내지 보축 단면

제외지 보축 및 제내지 보축 단면의 침투특성을 비교

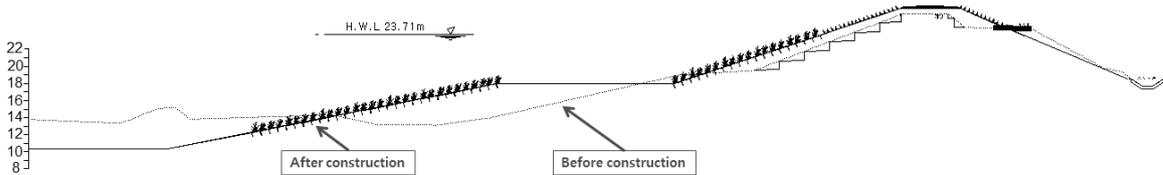
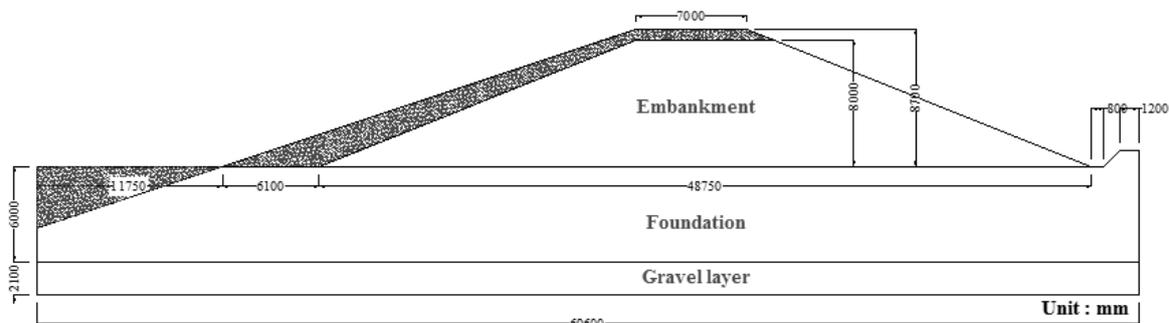
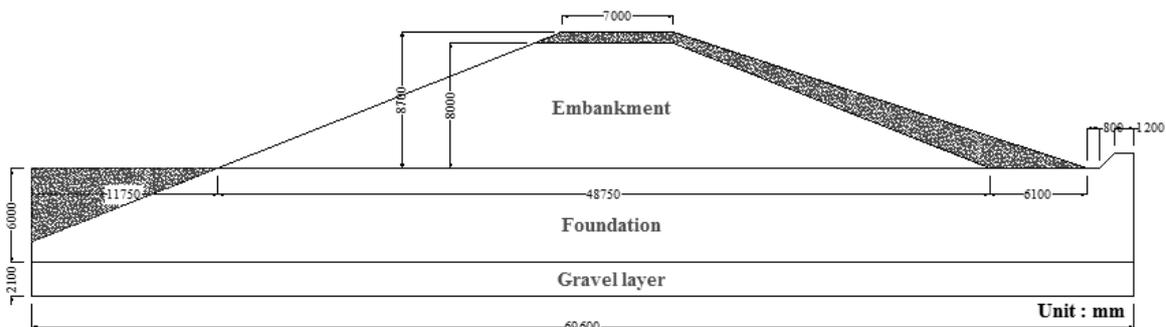


Fig. 1. Cross sectional view of the field



(a) Water-side reinforced levee model



(b) Land-side reinforced levee model

Fig. 2. Simulation sections of centrifuge model test

하기 위하여 Fig. 1과 같이 선정된 실제 현장 횡단면도를 기준으로 하여, 원심 모형 실험단면을 설계하였고 Fig. 2와 같다. 각 제외지 보축과 제내지 보축의 모사 단면은 보축면의 위치를 제외한 나머지 조건은 동일하게 설계하였다.

기존제방의 경우, 현장 조건과 동일하게 제외지와 제내지의 경사를 1:2.5로 결정하였고 보축되는 사면의 경사는 1:3.0으로 모사하였다. 실제 침투에 영향을 미치지 않는 제내지 소단부의 형태는 제외하였으며, 제내지 사면 하단에 인공수로를 모사하여 실험 중 발생할 수 있는 제내지 선단부 유출을 확인할 수 있도록 하였다.

3. 원심모형실험

3.1 KOCED 원심모형실험기

본 연구에서 원심모형실험을 위하여 사용되는 가속장치는 빔 타입의 KOCED 원심모형실험기로서, 회전반경 5.0m, 최대 2,400kg의 모형하중을 100g까지 가속이 가능하며, 최대 용량은 240g-tons이다(Kim et al., 2006).



Fig. 3. KOCED geocentrifuge facility

지반 모형은 제방 실험을 하기 위해 만들어진 컨테이너에 조성되었다. 본 실험에서 사용된 컨테이너의 크기는 1.2m×0.45m×0.7m이다. 본 시험기의 계측시스템은 계측용 컴퓨터를 원심모형실험기의 중앙부에 설치하여 장비와 함께 회전하도록 설치하고 있으며, Fiber Optic Rotary Joint(FORJ)를 이용한 컴퓨터 통신을 활용함으로써 효과적인 계측을 수행할 수 있다. 또한, 실험기 하단에 Fluid Rotary Joint가 설치되어 이를 통하여 원심 가속 중에 실험에 필요한 용수를 공급하여 원심 가속상에서 모형의 제외지측 수위 조절이 가능하다(Jin et al., 2011).

3.2 실험 조건 및 모델 축소

3.2.1 제외지 보축 모델

본 실험에서의 제외지 보축 모델은 앞에서 서술한 바와 같이 현장 단면 조건을 모사하였다. 실험 스케일은 1/60로 설정하고 실험 단면은 Fig. 4와 같이 제외지부터 제내지까지 길이 548mm, 보축을 포함한 높이 145mm로 설정하였다. 원형 크기로 환산했을 경우, 길이 32.9m, 높이는 8.7m이다. 그리고 기초지반의 경우, 길이 1,160mm, 높이 100mm로 원형 크기로 길이 69.6m, 높이 6m에 해당한다.

평상시 지하수위가 기초지반 세립토층과 자갈층의 경계에 위치하고 있기 때문에, 본 연구에서는 이를 반영하여, 토조의 배수구 위치를 토조바닥으로부터 35mm(원형으로 2.1m) 높이에 위치시켰다. 이를 통하여, 수위 상승시에도 기초지반 세립토층과 자갈층 사이에 지하수위가 유지되도록 하였다. 또한, 모형시험을 수행하게 되면 지반 모형과 토조벽이 만나는 경계벽에서는 자유배수 조건이 유지되어야 현실적인 침투 거동의 모사가 가능하기 때문에, 컨테이너 양 벽면에 배수층을 설치하

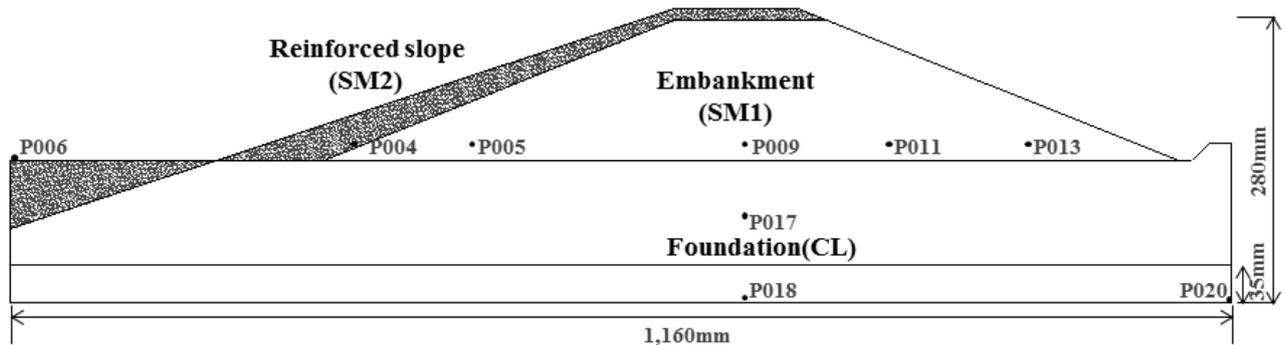


Fig. 4. Arrangement of water-side reinforced levee model for a centrifuge test

였다. 또한, 실제 조건에서는 제외지층의 자갈층은 하천 바닥으로 노출되어 있기 때문에, 강우로 인한 제외지층 수위상승시 자갈층은 상류수위로 인한 수압이 즉각적으로 작용된다. 모형 시험에서 가지는 유한한 경계 문제는 전술한 벽면의 배수층으로 해결되며, 제외지층 수위를 상승하는 순간 배수층을 따라 바닥부터 수압이 작용된다. 그리고 실험 중 높아진 하류측 수위 또한 기존 지하수위 높이로 배수가 된다. 이러한 작용을 하는 배수층은 부직포와 투수계수가 큰 표준사를 이용하여 설치하였다.

원심모형을 통한 침투 실험에는 두 가지 방법을 고려해야 한다. 첫 번째는 원형과 같은 투수계수의 시료를 사용하되 점도가 N배 큰 유체를 사용하는 것이고, 또 하나는 유체로 물을 그대로 사용하되 시료의 투수계수를 1/N배하는 방법이다. 이에 관련하여 Im et al.(2005)과 Kim et al.(2006)은 원심모형실험에서의 모형과 원형의 상사비에 대한 내용을 정리하여 논문에 수록한 바 있다. Hwang and Lim(2007)는 가물막이 댐에 대한 원심모형 실험을 행하면서 메토로즈를 사용하여 점도를 100배 높이는 방법을 사용한 바 있다.

본 연구에서는 점성유체가 아닌 일반 유체인 물을 그대로 사용하되 투수계수를 1/N으로 하여 실험을 행하는 방법을 택하였다. 그런데 이를 정확하게 실행하기 위해서는 사용 재료에 대한 반복적인 실험을 통하여 실험의 재료 조건을 만족시켜야 하는 어려움이 있다. 그러므로 모형실험에 사용되는 재료의 선정이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 실제 단면 조건을 모사하되 현장의 지반 조건에 대한 완벽한 모사보다는 서론에서 언급한 바와 같이 제외지 및 제내지 보축공법의 효율성, 그리고 기초지반의 제체 침투거동에 주는 영향 등 본 연구의 목적에 부합할 수 있는 조건을 최대한 모사할 수 있는데 주안점을 두고 재료를 선정하였다. 이를 위해 기존제방의 제체재료와 보축재료는 실제 제방 현장에서 채취한 것을 사용하는 것을 원칙으로 하되, 사용 재료는 재료의 보편성을 유지할 수 있도록 기존제방에 사용될 실트질 흙(SM1)과 보축에 사용될 실트질 흙(SM2)을 채취하였

다. 여기서 SM1과 SM2로 분류한 것은 양질 성토재로 흔히 사용되는 실트 섞인 모래질흙(SM)을 모사하기 위한 것이다. Table 1의 투수계수는 원심모형시험에서 제작된 상태의 재료에 대한 것으로 실제 조건에서는 상사비로 인해 이보다 투수계수가 N배 높아지고 이에 해당하는 투수계수 영역은 SM에 해당된다. 현장조사 결과를 토대로 하여 기초지반의 경우 풍화토에 벤토나이트를 섞어 모사하였으며, 가장 투수계수가 큰 자갈층은 원활한 배수층의 역할을 해야 하므로 표준사를 이용하여 모사하였다.

모형제방의 축조는 다음과 같다. ① 우선 축조할 모형 단면을 실테이프를 이용하여 표시하고 센서 설치 위치를 토조 안 벽면 위에 표시하였다. 기초 아래의 자갈층을 조성하고, 그 위에 기초지반층을 조성하였다. 각 층은 부피와 목표 단위중량으로부터 무게를 계산하여 원하는 단위중량으로 조성하였다.

본 연구에서는 기초지반층이 세립토층이기 때문에 현실적인 모사를 위하여 충분한 압밀과 포화가 선행되어야 하며, 제방을 축조하기 전 기초지반만 조성된 지반모형을 원심 가속 60g 상태에서 20여분간 안정화하였다. 이때, 현장의 지하수위에 맞게 수위를 채운 상태에서 안정화하여, 기초지반이 포화되도록 하였다. 이후, 모형제방은 직육면체 형태의 다짐용 틀을 사용하여 사면의 경사를 모사하였다(Fig. (5c)).

다짐용 틀을 이용하여 모형 제방 축조후, 다짐용 틀을 유지한 상태로 60g 상태에서 2차 안정화하여, 예상치 못한 제방 사면의 변형과 정상부의 균열을 최소화하였다. 2차 안정화 후, 다짐용 틀을 제거하고, 최종 제방의 형상으로 성형하였다. 투입된 흙의 양과 제거된 흙의 양을 계산하여 최종 단위중량을 계산하였고 이는 실제 제방 모델의 단위중량과 큰 차이가 없음을 확인하였다. 그리고 실험 직전까지 제체 건조에 의한 균열을 방지하기 위해 일정한 모델을 습윤상태로 유지시켰다.

본 실험에서 사용된 간극수압계는 GE Druck사의 PDCR 81 모델로, 총 13개의 간극 수압계가 Fig. 4와 같이 매설되었다. 하천의 홍수위 모사 시 수위상승을 확인하기 위해 제외지 쪽 기초지반 가장자리에 간극수압계 P006을 설치하였다. 자갈층의 배수층 역할을 확인하기 위해 배수층 아래에 P020을 설치하였으며, 기초지반, 자갈층에서의 침투특성 및 포화 단계를 측정하기 위해 P017, P018, P020을 설치하였다. 한편, 제체내의 침투 상황을 알아 볼 수 있도록 제방 제체내에도 간극수압계 P004,

Table 1. Soil properties

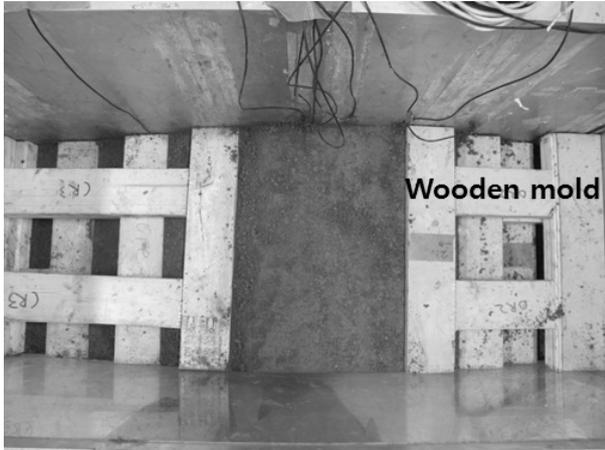
	Water content (%)	Dry density (kN/m ³)	Hydraulic conductivity (m/sec)
SM1	11.0	16.38	7.45e-7
SM2	15.0	16.28	9.3e-8
Foundation	14.8	16.48	1.6e-8

P005, P007, P009, P011, P013을 설치하였다. 더불어 실험 도중 제방 상태와 수위를 알 수 있도록 3대의 비디오

카메라를 이용하여 실시간으로 관찰할 수 있게 하였다.

3.2.2 제내지 보축 모델

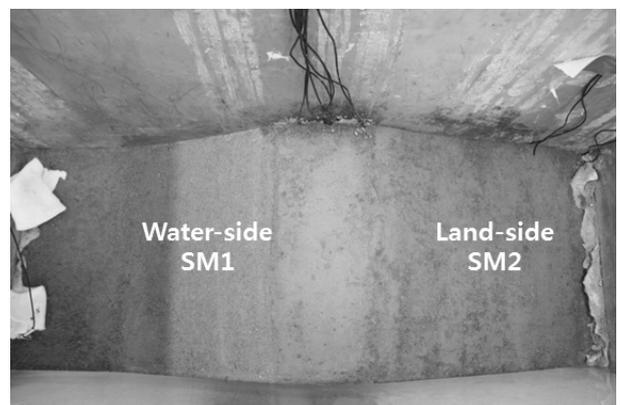
제내지 보축 실험 모델링은 제외지 보축 실험 모델링과 동일하게 진행되었다. Fig. 6과 같은 단면 형상은 제외지 보축 모델과 동일한 자갈층과 기초지반을 가지고 있기 때문에 제외지 보축 실험이 끝난 다음 제체 부분만을 제거하고 제내지 보축된 제체를 조성하였다. 제외지 보축 모델링 방법과 같이 우선 실테이프를 이용하여 단면을 표시하고, 센서 설치 위치를 토조 안 벽면 위에 표시하였다. 선행된 제외지 보축 실험에서 사용된 모형의 기초지반과 자갈층을 재사용하기 때문에 1차 안정화 단계는 생략하였다. 동일한 제방 축조와 2차 안정화 절차



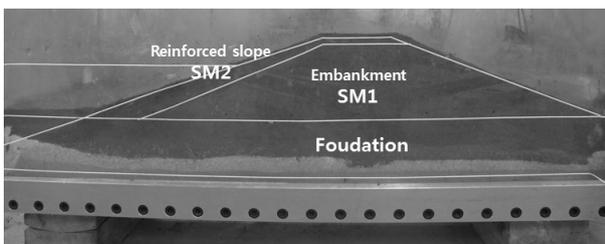
(a) Construction of the embankment using wooden mold



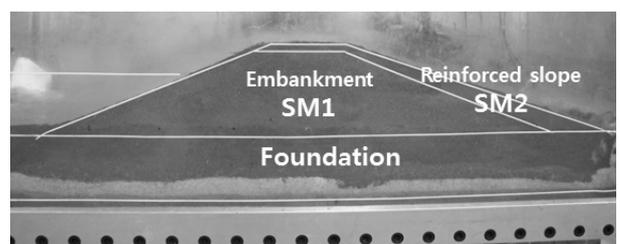
(b) Slope of the land-side reinforced levee model



(a) Slope of the land-side reinforced levee model



(c) Section of the land-side reinforced levee model



(b) Section of the land-side reinforced levee model

Fig. 5. Construction process of the water-side reinforced levee model

Fig. 7. Construction process of the land-side reinforced levee model

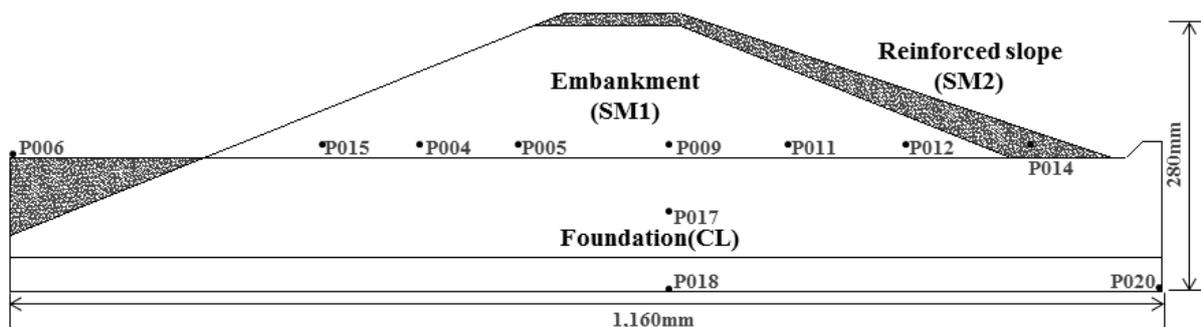


Fig. 6. Arrangement of the land-side reinforced levee model for a centrifuge test

를 거친 다음 다짐용 틀을 제거하고 최종 제방 형상으로 성형하였다. 완성된 모형은 Fig. 6과 같다.

본 실험에서도 제외지 보축 동일하게 13개의 간극수 압계를 사용하였으며, Fig. 6과 같이 침투특성 파악 및 침윤선 도시를 위해 센서를 설치하였다.

3.3 실험 절차

제작된 모델들은 다음과 같이 총 4단계 과정으로 수행하였다. ① 시험체의 60g 조건하에서의 가속 및 안정화 ② 물 공급 및 홍수위 유지 ③ 홍수위를 넘어서는 이상수위 유지 ④ 제내지로의 유출 확인 및 사면 습윤 현상 확인 후 실험을 완료하였다.

60g 조건에서 20분간 시험체를 안정화 시킨 후, 제외지 쪽에 물을 공급하여 수위를 조절하였다. 이때 안정화 단계에서 실제 조건과 동일하게 갈수위시 지하수위를 모사하기 위해 조금씩 물을 투입하여 자갈층이 충분히 포화되도록 하였으며, 아울러 자갈층 위에 위치하고 있는 기초지반인 세립토층에서의 불포화 흐름이 유지될 수 있도록 하였다. 수위는 간극수압계 P006과 설치된 비디오 카메라 영상을 통해 유지 및 조절하였다. 계획된 홍수위로 수위를 유지시켜주면서 시간에 따른 간극수압 변화를 측정하고, 측정된 간극수압의 변화와 비디오 카메라 영상을 통하여 침투 과정을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

본 연구에서 수행한 원심모형실험을 통해 제외지 보축 모형 제방과 제내지 보축 모형 제방에서의 침투특성을 확인하였다. 제외지 수위는 각 실험에서 홍수위에 도

달하는 순간부터 1단계 홍수위 단계, 수위를 상승시켜 이상수위로 올라간 순간부터 2단계 이상홍수위 단계로 설정하였다.

4.1.1 제외지 보축 제방

Fig. 8은 제체 내에 설치되어 있는 간극수압계 측정결과와 수위를 측정한 간극수압계의 측정결과를 전수두로 나타낸 것이다. 수위가 상승함에 따라 제체에 설치된 센서의 결과가 순차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 홍수위 단계에서 제외지 보축부에 설치된 P004는 수위의 변동과 거의 유사하게 반응을 하고 있다. 그러나 홍수위에 도달하고 난 직후에는 센서 결과가 약간의 시간차를 가지고 반응을 하였는데, 이는 보축부의 투수계수가 작기 때문으로 완전 포화되기까지 어느 정도 시간이 걸린다는 것을 알 수 있다. 한편, 보축부가 포화된 후에는 수위 변동과 동일하게 반응하였다.

보축단면을 통과한 침투수는 곧 바로 보축부 인근의 기존제체에 매설된 P005에 도달하게 되는데, 홍수위 단계에서 전수두가 일정해지기까지는 어느 정도의 시간이 걸린 것을 알 수 있다. 이는 상대적으로 투수계수가 작은 보축단면에서 지체된 침투수가 투수계수가 상대적으로 큰 기존제체를 만나면서 빨라진 침투흐름으로 인해 수두가 일정하게 유지되기까지 시간이 걸리는 것으로 판단된다. 그리고 P009, P011, P013의 센서는 홍수위 단계에서 거의 반응하지 않은 것으로 나타났다. 다만 P005가 일정한 수두를 나타내기 시작할 때 P009가 약간 반응을 하였는데, 이는 보축부에 의해 초기 침투가 빠르게 진행되지 않은 상태에서 침투수의 도달에 기인한 것으로만 보기에 무리가 있어 보이며, 부분적으로 기초지반으로의 침투 영향을 받을 수 있는 것으로 보인다. 즉, 구체적으로 Fig. 9에 의하면 P009가 반응을 시작하는 시점에 기초지반에 설치된 P017이 뚜렷이 상승되고

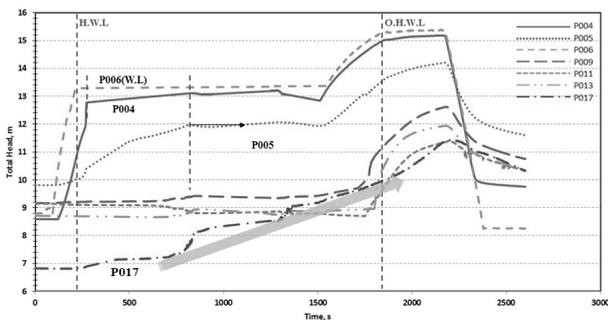


Fig. 8. Results of pore pressure in the water-side reinforced embankment

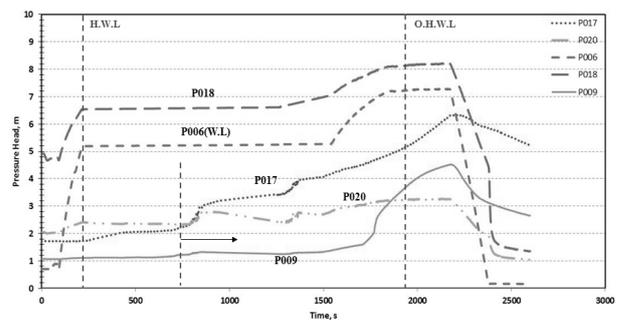


Fig. 9. Results of pore pressure in drainage layer and foundation (water-side reinforced model)

있으며, 이 시점에서 이미 압력수두는 3m를 넘고 있고 P017이 설치된 위치가 기초지반의 중앙부로, 제체 경계까지 거리가 50mm(원형 3m)이고, 이는 압력수두가 기초지반을 지나 기존제체에 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다. 이를 압력으로 표시해보면 30kN/m^2 의 간극수압이 단순한 침투수압으로 구성되어 있는 것은 아닐 수 있으며, 기초지반 아래의 자갈층으로부터의 높은 압력에 기인하여 세립토층의 과잉간극수압으로 나타날 수 있을 것으로도 보인다.

기초지반에 설치된 P017의 경우, 제체와 자갈층에서의 수위 상황과는 관계없이 P009가 반응을 시작할 때부터 꾸준히 수두가 증가하고, 이는 홍수위가 시작되기 전 자갈층의 지하수위에 의한 모관작용으로 인해 포화도가 높은 상태를 유지하던 기초지반이 홍수위로 인해 자갈층에서 발생하는 높은 압력의 영향으로 보다 빠르게 포화되어 부(-)의 압력에서 정(+)의 간극수압이 발현되는 것으로 판단된다. 즉, 낮은 투수성을 갖고 있음에도 불구하고 높은 포화도와 자갈층의 높은 압력에 기인하여 쉽게 포화로 진행되는 것으로 포화도가 높을 때의 불포화에서 포화로 가는 단계의 불포화 흐름의 전형적인 현상을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 세립토층의 작은 투수계수에 의해 홍수위 상황과는 상관없이 지속적으로 수두가 증가하고 있다.

이상수위에서는 홍수위에서 반응하지 않았던 센서들의 수두가 증가하는 것을 알 수 있다. P009, P011, P013의 센서가 이상수위로 올라가는 단계와 이상수위를 유지시키는 단계에서 계속 증가하였다. 그리고 홍수위 단계에서의 P005와는 달리 수위가 증가하면서 빠르게 반응하는 것을 알 수 있다. 이는 홍수위 단계에서 오랜 시간 제체침투로 지속적인 포화가 진행된 기초지반의 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 기초지반층이 제체의 침투거동에 미치는 역할을 구체적으로 분석하기 위해 자갈층과 기초지반층에 설치되어 있는 간극수압계 결과와 수위를 측정된 간극수압계의 결과를 압력수두로 나타낸 것이다. 이때 제외지 수위의 경우, 계획홍수위인 13.8m(E.L.E. 23.7m)를 목표로 실험을 진행하였으며, 이상홍수위 단계에서는 평균수위 15.3m로 진행되었는데 이는 득마루보다 약 1.5m 아래에 수위가 위치하는 것이다. 제외지 수위가 계획홍수위로 증가함에 따라 기초 하단부에 위치하는 자갈층을 통하여 용이하게 침투수가 이동하여 자갈층에 위치한 P018은 수위 상승과 동시에 증가하고 있는

것을 알 수 있다. 제체 끝단 자갈층에 설치된 P020은 거의 수압 변화가 없는 상태인 배수구의 높이 2.1m를 유지하고 있으며, 이상수위로 수위가 상승함에 따라 약간 상승하였는데 이는 P020이 위치한 곳이 제체 끝단의 배수구 근처임에 따라 배수가 용이하게 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다. P018과 P020은 동일한 자갈층에 위치하고 있으나 결과 값은 상이하다. 제체 중간 지점 아래 자갈층에 설치된 P018의 경우, 제외지 부분에서 수위가 그대로 작용한 압력이 그대로 작용하여 기초지반에 설치된 P017보다도 더 큰 수압을 나타내는데 이는 기초지반에 과잉간극수압을 유도시키고 포화를 더 빠르게 진행시키는 역할을 하는 것으로 보인다. 만약 기초지반 세립층이 본 실험의 경우에서보다 확연히 얇게 구성되어 있다면 자갈층에 작용하는 수압으로 인해 파이핑 현상까지 초래할 수 있을 것으로 예상된다.

한편, Fig. 9에서 보는 바와 같이 제외지 수위가 이상수위로 급격히 변하고 있음에도 불구하고 P017 압력 증가 추세는 거의 변화가 없이 일정하게 유지되고 있다. 이는 기초지반층이 불포화 조건에서 포화조건으로 진행된 이후, 하부 자갈층으로부터 가해지는 높은 압력으로 인해 기초지반으로의 흐름이 지속되기 때문으로 보인다. 이는 제체 아래에 있는 기초지반이 낮은 투수성으로 인해 짧은 홍수위 기간 동안 거의 포화되지 않을 것으로 보여 제체 침투거동에는 거의 역할을 하지 않을 것으로 판단할 수 있으나, 본 실험 결과로 볼 때, 실제로는 홍수위시 제체의 침투거동에 직접적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 실험에서 이상수위가 지속되는 동안 기초지반내의 P017의 간극수압은 기초지반 아래 자갈층에 있는 P018의 간극수압에 압력수두로 1m까지 근접하고 있다. 두 지점의 위치가 수직으로 약 5m 이상 차이가 있음을 감안하여 볼 때 이러한 반응이 나타나는 것은 기초지반이 투수성이 낮은 층이기 때문에 오히려 평상시 하부 지하수위로부터 지속적으로 모관 작용의 영향을 받아 거의 포화에 가까운 상태를 유지하고 있고, 더불어 기초지반에서의 과잉간극수압 발생에 기인하는 것으로 보인다.

결과적으로 제방 하부에 자갈층이 근접하여 존재하는 경우 제체안정에 중요한 영향을 줄 수 있다는 기존의 연구(Kim et al., 1992; Jin et al., 2011)와 더불어 제방 하부 지반이 투수성이 낮은 경우에도 제체의 침투거동에 영향을 줄 수 있음을 감안하여 볼 때 제체 안정 평가 및 해석 시 이를 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.1.2 제내지 보축 제방

앞의 실험 결과와 같이 Fig. 10과 Fig. 11은 제내지 보축 실험에서 관측된 간극수압계 측정 결과이다. Fig. 10은 제체에 설치되어 있는 간극수압계 측정 결과와 수위, 그리고 기초지반에 설치된 간극수압계 측정 결과를 나타낸 것이다. 홍수위 단계에서는 상대적으로 투수계수가 큰 기존제체로부터 빠르게 침투가 발생하여 제외지 쪽에 설치된 P015, P004, P005에 침투수가 도달됨에 따라 일정 시간 간격으로 반응하였다. 제외지 쪽에 가까운 P009와 P011 또한, 제외지 보축 실험 결과와는 달리 홍수위 단계에서 반응하여, 수두가 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 제내지 쪽 센서(P012)와 보축면에 설치된 센서(P014)는 홍수위 조건에서 거의 반응하지 않았는데, 이는 기존제체에서 빠르게 수두가 발현됨에도 불구하고 홍수위 상태의 실험 기간이 짧았기 때문이며, 보다 장기간 홍수위가 계속된다면 제내지 쪽으로의 침투거동이 발생할 것이다.

Fig. 11의 기초지반에 설치된 P017의 측정결과를 보면 홍수위에 도달된 이후 서서히 지속적인 수압상승을 보이고 있으며, 이러한 상승은 이상수위시까지 지속되고 있다. 이는 제외지 보축의 경우에서 언급한 바와 같이 투수성이 낮은 기초지반의 모관작용에 의한 높은 포화도 상태에서의 불포화 흐름과 자갈층에서의 높은 압력에 기인하여 기초지반에 나타나는 과잉간극수압 때

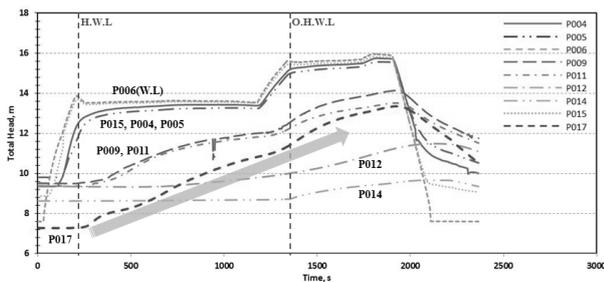


Fig. 10. Results of pore pressure in the land-side reinforced embankment

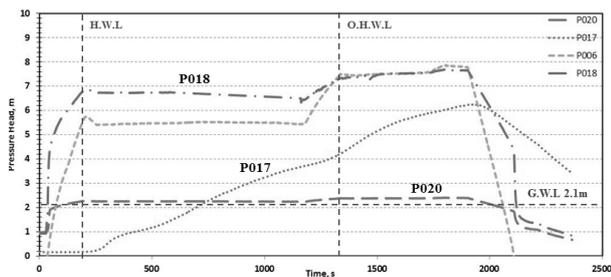


Fig. 11. Results of pore pressure in drainage layer and foundation (land-side reinforced model)

문으로 보인다. 이로 인해 기초지반에서의 흐름이 제체 흐름에 영향을 주게 되어 제체의 침투거동은 시간이 흐름에 따라 제체 제외지로부터의 침투 뿐만 아니라 제체 하부의 기초지반을 통한 침투의 영향을 동시에 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 이상수위가 지속되면서 자갈층의 P018과 기초지반의 P017의 압력수두 차이가 점점 줄어들고 있다.

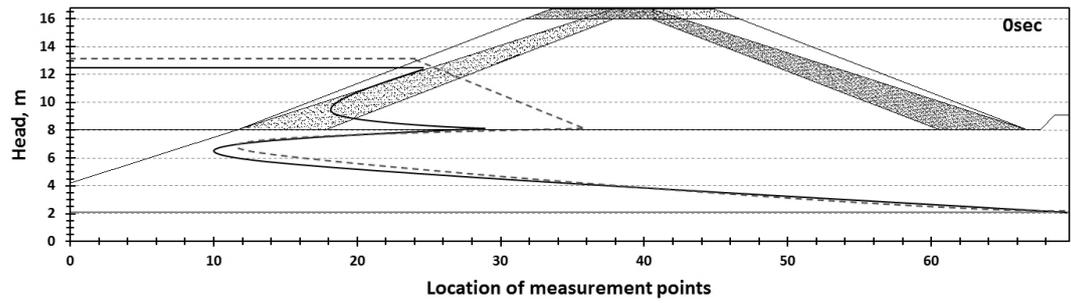
이상수위로 수위가 상승하면서 제내지 쪽에 설치된 센서(P012)와 보축면에 설치된 센서(P014) 또한 반응을 시작하였다. 제내지에 설치된 보축부는 상대적으로 기존제체에 비해 낮은 투수성을 갖고 있어 유출이 제외지 보축에 비해 용이하지 못하기 때문에 늦게 반응을 한 것으로 보이며, 실험 중 제내지로의 유출이 확인되지는 않았으나 이상수위 유지시 제내지 보축부의 습윤영역이 확대되는 것을 목격할 수 있었다.

4.2 포화영역의 변화

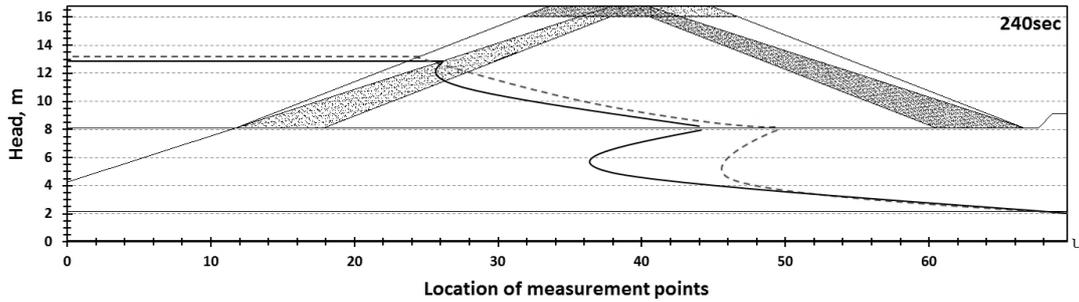
제외지 보축과 제내지 보축시의 실험 결과로부터 단계별로 포화영역을 비교하였다. 실험별로 동일한 상태에서의 비교를 위해 각 정해진 수위에 도달한 후로부터 일정 시간에서의 결과 값들을 사용하였다. 즉, 홍수위에 도달하는 순간부터 매 240초 간격으로 포화영역을 비교하였으며, 이상수위에서는 매 120초 간격으로 비교하였다. 전반적으로 측정자료를 근거로 하여 포화영역을 추정하였다. 즉, 세립토의 기초지반의 경우 제체 측정자료와 자갈층의 측정자료 등 인접 측정자료와 연계하여 포화영역을 표시하였다. 배수층의 경우, 지하수위가 상승할 수 없으므로 최종 제내지 쪽 수위를 2.1m로 결정하였다.

4.2.1 홍수위 상태

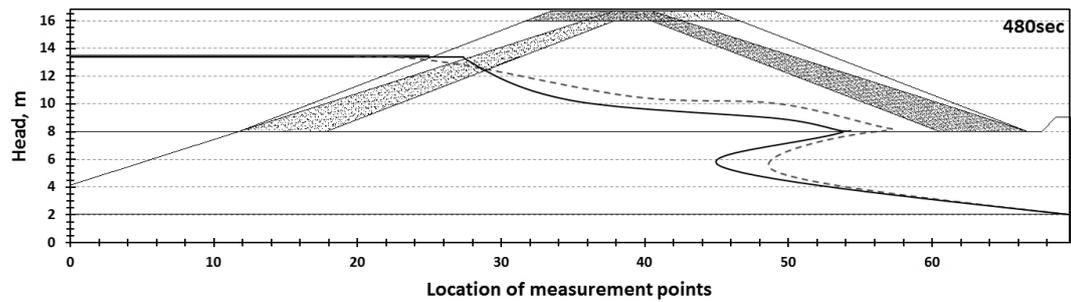
Fig. 12는 홍수위 상태에서의 경과 시간에 따른 포화영역을 나타내고 있다. 제외지 보축의 경우 홍수위에 도달한 순간으로부터 상대적으로 투수계수가 작은 보축부에 의해 빠른 침투가 발생하지 못한 반면, 제내지 보축의 경우 상대적으로 빠르게 포화영역이 빠르게 확산되고 있음을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 전반적으로 제내지 보축의 경우가 제외지 보축의 경우에 비해, 홍수위 초기의 빠른 침투로 인해 포화영역이 보다 높게 형성되었는데, 홍수위 시간이 유지될수록 상대적으로 제체보다 투수성이 낮은 제내지 보축으로 인해 침투수



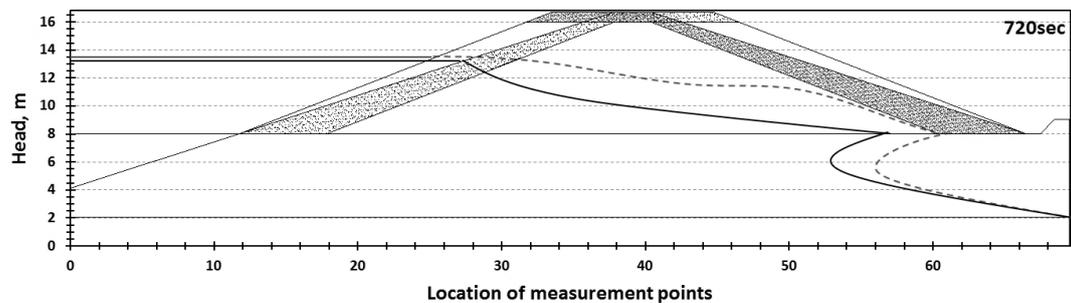
(a) 0 sec



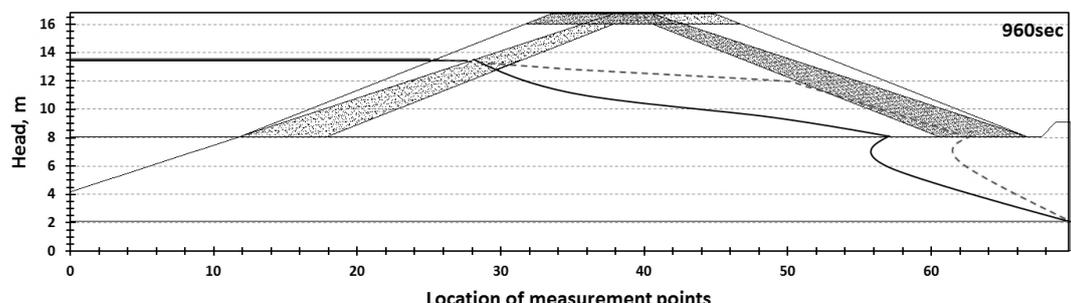
(b) 240 sec



(c) 480 sec



(d) 720 sec



(e) 960 sec

Fig. 12. Changes of the saturation region in accordance with the elapsed time at high water level (a) 0 sec (b) 240 sec (c) 480 sec (d) 720 sec (e) 960 sec

의 배수가 용이하지 못하여 제체 내 포화영역의 상승으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 제외지 보축의 경우 상대적으로 침윤선 위치가 낮고 느리게 포화영역이 확산되고 있어, 제외지 보축이 보다 제체 안정상 유리한 결과를 나타내고 있다. 이러한 침투특성은 기존 연구(Yuck et al., 1999; Shin et al., 2000)의 연구결과와도 유사한 결과이다.

기초지반에 설치된 센서의 측정결과를 이용하여 기초지반 내의 포화영역을 나타내면 Fig. 12에서 보는 바와 같이 홍수위에 도달된 이후 수압이 측정되기 시작하였는데, 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 기초지반이 상대적으로 낮은 투수성을 갖고 있음에도 불구하고 자갈층에 존재하는 지하수위에 의한 모관현상 및 불포화 흐름으로 인해 홍수위 도달 전에 이미 상당한 수준의 포화도를 유지하기 때문으로 판단된다. 그리고 홍수위가 유지되면서 자갈층에서 작용하는 압력은 기초지반층의

과잉간극수압을 유발시키고, 또한 제체에서의 포화영역 확산에 기여하게 되는 것으로 보인다. 이러한 이유로 제외지 보축시보다 제내지 보축시 제체내 포화영역의 확산이 보다 크게 되게 되어 결과적으로 이러한 포화영역의 확산은 제체의 안정에 불리한 영향을 주게 될 것으로 판단된다.

4.2.2 이상수위 상태

Fig. 13은 홍수위 이상으로 수위가 상승하는 경우를 가정하여 이상수위 상태에서의 시간에 따른 침윤선을 나타낸 것이다. 이상수위가 지속됨에 따라 수압변화는 제체내의 포화영역이 크게 확산되었는데, 이러한 현상은 제내지 보축에서 보다 뚜렷하게 나타났다. 반면, 제외지 보축의 경우에는 제내지 보축에 비해 제체내의 포화영역은 상대적으로 적게 나타났으나 오랜 시간 동안 높은 수위 상태가 유지됨에 따라 제내지로의 유출이 관

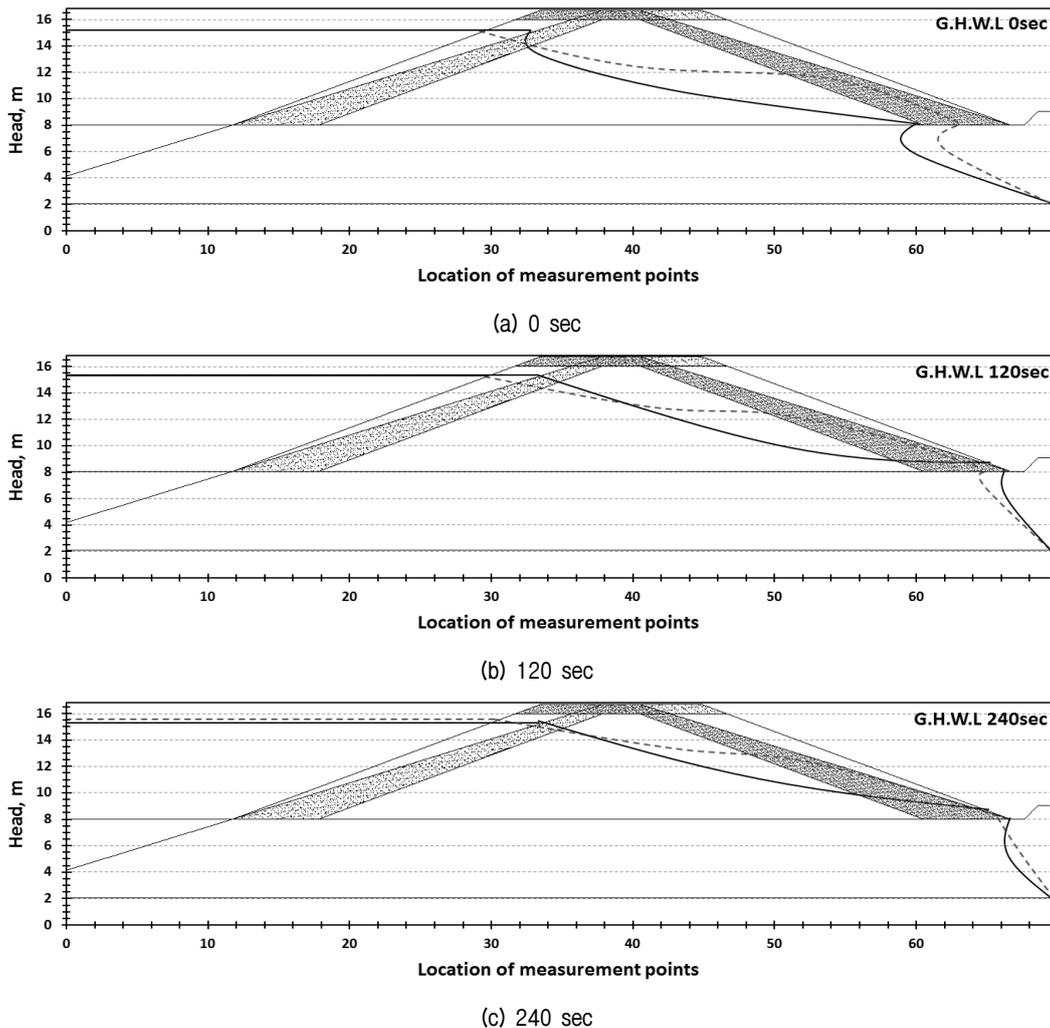


Fig. 13. Changes of the saturation region in accordance with the elapsed time at over high water level (a) 0 sec (b) 120 sec (c) 240 sec

측되었다.

제내지 보축에서는 높은 포화영역의 확산에도 불구하고 시험시 유출은 목격되지 않았는데, 제체 내의 수압이 크게 작용하는 것을 확인하였으며, 시간이 지남에 따라 제내지 측 보축된 사면이 짓어 들어가는 것을 확인하였다. 이는 상대적으로 작은 투수계수를 갖는 보축의 영향 때문으로, 이 경우 실제 제내지로의 유출 확인 여부에 관계없이 제내지 사면의 안정에는 불리할 것으로 판단된다. 기초지반에 설치된 센서의 측정 결과 Fig. 13과 같이 홍수위 상태에서와 마찬가지로 포화가 진행되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구의 목표는 원심모형실험을 통하여 보축 제방에서의 침투특성을 파악하고 투수성이 낮은 기초지반이 제체 침투거동에 주는 영향을 연구하여 최종적으로 제방 안전성 평가에 대한 자료를 제공하고 원심모형실험의 적용성을 확인하는 것이다. 이를 위해 현재 4대강 사업현장에서 제방의 안전성 확보를 위해 시행된 보축 제방을 모델로 하여 원심모형실험을 수행하였고 동일한 단면에 대한 다른 방향으로 보축된 제방에 대한 침투 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

- (1) 투수성이 낮은 양질재료로 제외지를 보축하는 경우 시간이 흐름에 따라 제내지 보축의 경우에 비해 포화영역의 확산이 적고 느리게 나타나 상대적으로 제체 안정상 유리한 것을 확인하였다. 이에 비하여 제내지 보축의 경우에는 기존제체의 큰 투수성으로 인해 보다 빠르게 포화영역이 확대되었으며, 제내지 보축의 낮은 투수성으로 인해 침투수의 유출이 방해되어 간극수압이 증가하고 포화영역이 제체 상부를 향하여 확산됨에 따라 제내지 사면의 안정성에 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다. 홍수위 이상의 이상수위의 경우, 이러한 현상은 보다 뚜렷하게 나타났다.
- (2) 제방 하부 기초지반이 투수성이 낮은 세립토층인 경우, 투수성이 낮음에도 불구하고 불포화 흐름으로 인해 빠르게 포화영역이 확대되었는데, 이는 평상시 지하수위로부터 모관작용에 높은 포화 상태를 유지하고 있는 때문으로 보이며, 또한 기초지반 아

래에서 작용하는 압력으로 인한 과잉간극수압에 의해 보다 빠르게 포화가 진행되는 것으로 보인다.

- (3) 제체 내의 침윤선 및 포화영역의 확대는 제외지로부터의 침투뿐만 아니라 상대적으로 투수성이 낮은 기초지반으로의 침투에도 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구를 통해 제방의 보축 위치에 따른 각각의 침투특성을 파악하였으며, 기초지반이 본 제방보다 상대적으로 투수계수가 작은 경우에도 제체의 침투거동에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 즉, 이는 기초지반의 상태에 따라 제방 제체에서의 침투 거동이 달라질 수 있음을 나타내는 것으로 제체의 침투거동 및 안정성 판단시 이를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그리고 원심모형실험을 이용하여 제방에 관련된 다양한 실험과 현상을 신뢰성 있게 평가하고 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0000314)과 수자원 공사의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Alonso, E. E., and Cardoso, R. (2010), "Behavior of Materials for Earth and Rockfill Dams: Perspective form Unsaturated Soil Mechanics", *Archit. Civ. Eng. China*, Vol.4, No.1, pp.1-39.
2. Hwang, D. H., and Lim, H. D. (2007), "Behavior Analysis of Cofferdam using Natural Topography by Centrifuge Model Tests", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.27, 6C, pp.413-423.
3. Im, E. S., Seo, M. W., Ha, I. S., and Kim, W. G. (2005), "Simulation of Earth-fill Dam Behavior Subjected to Water Level Variation using Geotechnical Centrifuge", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.25, 2C, pp.95-102.
4. Jin, S. W., Kim, N. R., and Kim, D. S. (2011), "Reproduction of Piping Failure due to the Permeable Layer using Centrifuge Test", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.31, 1C, pp.1-10.
5. KICT (2004), "Development of Advanced Technologies for Levees", 2001 Construction and Transportation Technology Innovation Project Final Report, Ministry of Construction & Transportation.
6. KICT (2007), "Construction Techniques of Levee using bed Sediment and Dredged Material of River", 2005 Construction R&D Project Final Report, Ministry of Construction & Transportation.
7. Kim, D. S., Cho, G. C., and Kim, N. R. (2006), "Development

- of KOCED Geotechnical Centrifuge Facility at KAIST”, *Physical Modeling in Geotechnics*, Hongkong, China, pp.147-150.
8. Kim, S. K., Shin, S. M., and Seo, H. S. (1992), “Analysis of Piping Effect in Levee due to Seepage Velocity (Case Study)”, *Proc. of Korean Society of Civil Engineering*, pp.497-500.
 9. Kim, S. R., Hwang, J. I., and Kim, M. M. (2006), “Comparison of 1-g and Centrifuge Model Tests for Similitude Laws”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.5, pp.59-67.
 10. Kim, Y. M., and Shin, Y. S. (1998), “An Experimental Study on the Seepage Behavior for Enlargement Embankment”, *Journal of Hanbat Univ.*, Vol.15 A, pp.249-264.
 11. Shin, B. W., Bae, W. S., Lee, J. K., and Kang, J. B. (2001), “The Seepage Behaviour and Stability of Extension Embankment by Unsteady State Seepage”, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.2, No.1, pp.57-65.
 12. Taylor, R. N. (1995), “Geotechnical Centrifuge Technology”, *Blackie Academic and Professional*, pp.19-25.
 13. Yuck, C. S., Shin, Y. S., and Kim, Y. M. (1999), “Analysis of Seepage Behavior for Enlargement Embankment”, *Proc. of Korean Society of Civil Engineering*, pp.369-372.

(접수일자 2011. 11. 18, 심사완료일 2012. 5. 8)