

원심모형시험기를 활용한 통관기초형식에 대한 제방의 안전성 검토

Stability evaluation of levee to foundation type of drainage construction in Using Geo-centrifuge

임은상¹⁾, Eun-Sang Im, 신동훈²⁾, Dong-Hoon Snin, 김재홍¹⁾, Jea-Hong Kim, 조성은¹⁾, Sung-Eun Cho

¹⁾ 한국수자원공사 K-water연구원, 선임연구원, S. Researcher, Korea Institute of Water and Environment

²⁾ 한국수자원공사 K-water연구원, 팀장, P. Researcher, Korea Institute of Water and Environment

SYNOPSIS : In recent days, the safety of the levee has been an issue because the levee has become bigger according to the Four-river Restoration Project and so on. The greater part of the levee damage has occurred in the interface between soils and the structures. Specially, the drainage construction crosses the levee keeps its settlement down in order to secure a grade of drainage. However, when the settlement isn't generated by using foundation such as pile, the levee is more likely to have leakage at the interface because the construction doesn't behave with soils.

In our study, therefor, testing of the behavior of the levee having the drainage construction was carried out to clarify the effects of the foundation type of drainage construction.

Keywords : levee, drainage-structure, centrifuge test, foundation type

1. 서론

최근 4대강 살리기사업 등에 의하여 제방이 대형화되는 경향을 보이고 있기 때문에 제방의 안전성이 중요한 이슈가 되어지고 있다. 제방의 안전성을 검토하는데 있어서는 제방자체에 대한 안전성평가 뿐만 아니라 부속구조물 및 그 접촉부의 안전성을 평가하는 것일 것이며, 그 중에 제방 피해사례의 대다수를 차지하는 배수구조물과 제방의 접촉부에 대한 안전성을 평가하는 것이 주요한 분야일 것이다.

특히, 제방을 가로지르는 배수구조물인 경우에는 배수구배를 확보하여야 하기 때문에 배수구조물의 침하를 최대한 억제할 필요가 있으나 흙으로 이루어진 제방과 연동을 하기 않게 되면 접촉면에서 상이한 변위가 발생하기 때문에 접촉면을 따라서 누수가 발생하여 제방이 붕괴되는 피해가 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 제방을 통과하는 배수구조물의 기초형식에 대한 안전성을 파악하기 위해서 원심모형시험을 수행하였다. 이 시험을 통해서 제방의 내부거동과 어느 정도 연동이 허락한 직접기초를 설치한 배수구조물과 연동을 억제하도록 말뚝기초를 설치한 배수구조물의 거동을 비교·분석함으로써 배수구조물의 기초형식에 대한 제방을 안전성을 검토하고자 하였다.

2. 원심모형시험

2.1 원심모형시험기

본 연구에서 원심모형시험을 위하여 사용되는 가속장치는 Beam 형태의 원심모형시험기로서, 회전반경 5.0m, 유효반경 4.5m 크기의 시험기로서, 최대 2,400kg의 모형하중을 100g까지 가속이 가능하므로 최

대 용량은 240g-tons이다.

시험 모형이 놓이는 플랫폼은 회전팔의 끝단에 위치하며 지반모형은 컨테이너 형태의 상자에 담긴다. 본 시험기의 플랫폼 크기는 1.2m×1.2m×1.2m로 넓은 시험공간을 확보하고 있다. 본 시험기의 계측 시스템은 계측용 컴퓨터를 원심모형시험기의 중앙부에 설치하여 장비와 함께 회전하도록 설치하고 있으며, Fiber Optic Rotary Joint(FORJ)를 이용한 컴퓨터 통신을 활용함으로써 고전적인 slip-ring을 이용하는 방식보다 노이즈에 강하고 효과적인 계측을 수행할 수 있다. 또한, 원심모형시험기 하단 6채널의 Fluid Rotary Joint가 설치되어 원심가속 중에 시험에 필요한 용수, 공압, 유압 등을 시험 토조로 공급할 수 있다.



그림 1. 원심모형 시험기

표 1. 원심모형시험기 주요 제원

항 목	내 용
제작사	ACTIDYN SYSTEMES SA, France
모델명	C72-2
회전반경	5.0m
최대 용량	240g-tons
최대가속도	130g
최대 모델 중량	2,400kg (up to 100 g)
Payload 크기	1.2m(L) × 1.2m(W) × 1.2m(H)
Fluid rotary joint	Total 10 lines (air, water, oil)
Electrical slip ring	Total 42 lines (power, signal, video)
Fiber optic rotary joint	Data acquisition and video signal

2.2 실험조건

- ◆ 제체 높이 : 10 m
- ◆ 가속도 : 40g
- ◆ 제내지사면경사 : 2.0, 제외지사면경사 : 2.0
- ◆ 축조재료의 최대 입자크기 및 다짐건조중량 : 10mm, 1.9 t/m³
- ◆ 배수암거 설치조건에 따른 거동 특성 검토
 - 제방내에 배수암거가 설치 조건 (그림 2)
 - 제방내 배수암거가 말뚝위에 설치된 조건 (그림 3)

2.3 실험 Case (총 2 단면)

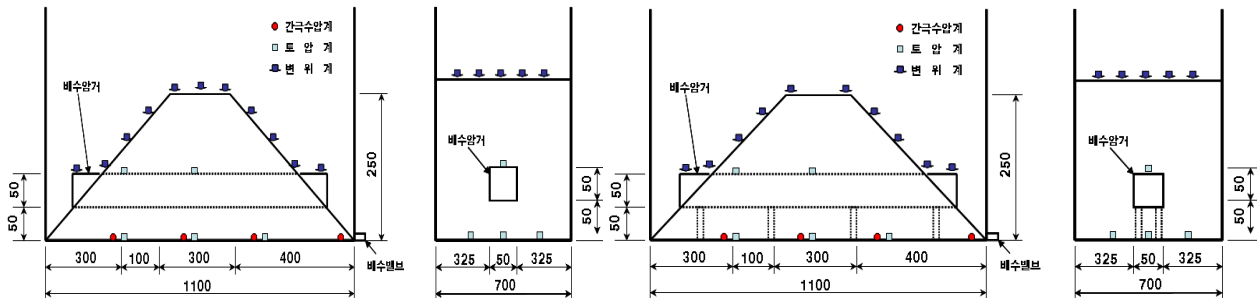


그림 2. 내부에 배수암거가 설치되어 있는 제방 (Case I)

그림 3. 내부에 말뚝기초 배수암거가 설치되어 있는 제방 (Case II)

2.4 시료 준비 및 모형제작

① 축조재료 준비 (그림 4)

; 축조재료의 최대입경은 축조단면의 모형을 고려하여 19mm 이하로 조성함.

② 모형 제방 축조 (그림 5)

; 모형 제방은 5층의 다짐용 틀을 이용하여 모형용기 내의 공간을 채운 후 비어있는 나머지 공간에 시료를 채워 다지는 방법으로 제작하였다. 원활한 다짐을 위해 함수비는 3%로 유지하였으며 각 구역마다 빈 공간의 부피와 목표 다짐밀도로부터 무게를 계산하여 각 다짐층별 단위중량을 일치시키도록 고려함.



그림 4. 모형제방 축조재료

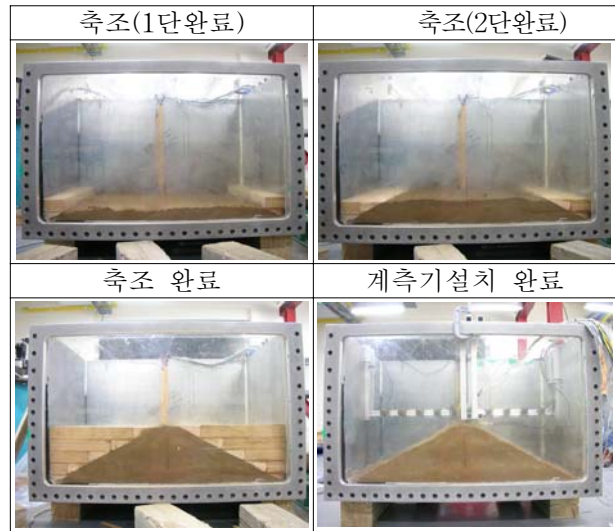


그림 5. 모형제방 축조 과정



그림 6. 배수암거 매설 및 토압계 설치 광경



그림 7. Case I 축조 완료 전경

③ CASE I 축조 : 배수 암거 매설 및 토압계 설치 (그림 6)

; 1단 다짐이 완료한 후에 암거(50×50mm)를 설치하고 암거높이까지 2단 다짐을 수행함.

④ CASE I 축조 완료후 (그림 7)

; 나머지 3~5단까지 층별 다짐을 수행하여 모형제방의 축조를 완료함.

⑤ CASE II : 말뚝지지 배수암거 모형 (그림 8)

; Case II의 경우에는 암거기초형식에 따른 거동 특성을 알아보기 위하여 암거가 제방과 연동하여 거동하지 않도록 말뚝지지 암거를 설치함.

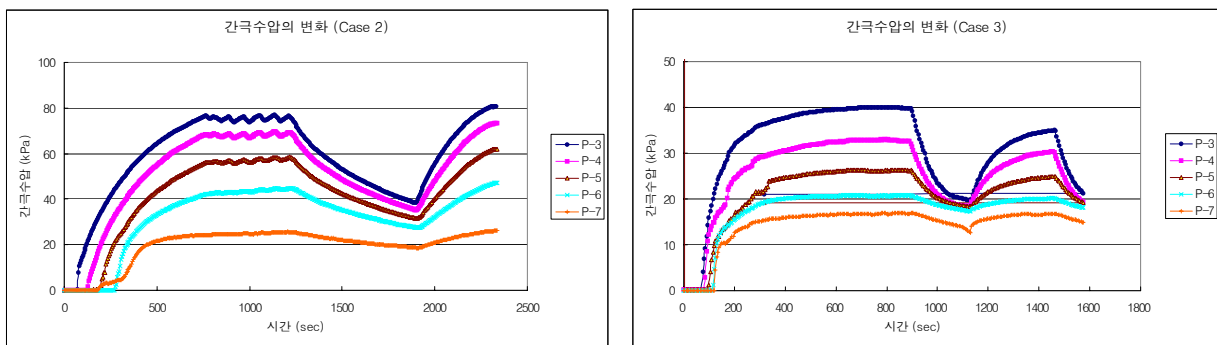


그림 8. Case II의 말뚝지지 배수 암거

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 간극수압

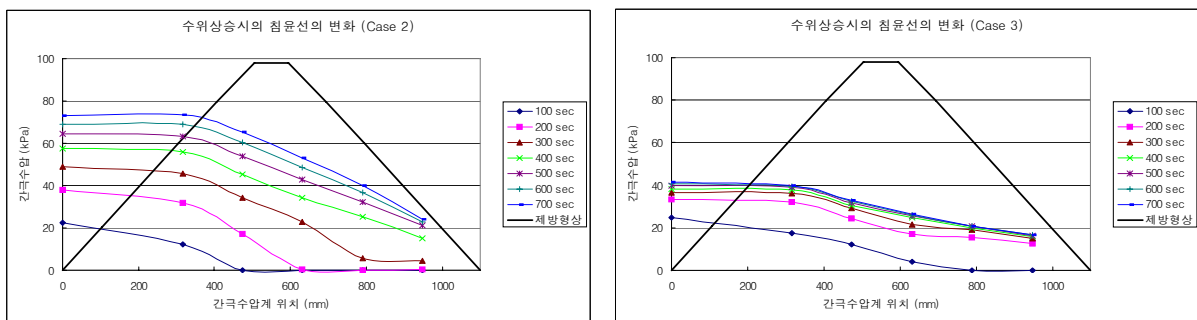
배수암거가 제방내부에 설치된 Case I과 II에 대한 간극수압계의 경시변화를 각각 그림 9에 나타냈다. 이 두 Case 모두 간극수압과 저수위가 잘 연동하고 있으며, Case I의 경우에는 침투수가 상류부터 하류로 진행하고, 간극수압계 P-7을 제외하고는 동일한 시간간격으로 간극수압이 발현하고 있는 반면에 Case II의 경우에는 배수암거 하부에 말뚝기초가 설치되어 제방과 함께 거동을 하지 않기 때문에 배수암거 하부접촉부에 공동이 발생하여 저수위가 제방의 상부까지 상승하지 못하고 그림에서와 같이 제방의 하부를 따라서 배수되어지고 있다.



(a) Case I

(b) Case II

그림 9. 각 간극수압계별 간극수압 경시변화



(a) Case I

(b) Case II

그림 10. 저수위 상승시의 침윤선 변화 추이

또한, 시간대별 간극수압 분포인 침윤선을 그림 10에 나타냈다. Case I에서는 비록 제방내부에 배수암거가 설치되어 있더라도 배수암거의 변위가 제방과 동일하게 거동하기 때문에 간극수압의 경향 즉 침윤선의 발현이 일반적인 제방과 동일한 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 비록 제방내부에 배수암거 등의 구조물을 설치하여야 하는 경우에라도 제방의 변위거동과 일체로 움직이도록 설계한다면

제방의 목표 성능을 충분히 발휘할 수 있다는 것을 의미하다. 반면에 Case II와 같이 기초에 고정되어 있는 배수암거가 설치하는 경우에는 제방의 변형과 배수암거의 변형이 일체화되어 발생하기 않기 때문에 제방으로서의 성능을 충분히 수행하지 못할 가능성이 높기 때문에 이러한 설계는 바람직하지 않으며 어쩔 수 없이 수행해야 할 경우에는 충분히 검토 및 대책방안을 강구하여야 할 것이다.

3.2 토 압

모형제방에서의 토압에 대한 경시변화를 그림 11에 나타냈다. 이 그림에서 보는 바와 같이 토압의 계측결과, 측정결과가 양호한 모든 토압계에서 토압이 갑자기 급격한 상승했다 감소하는 경향을 발견할 수 있으며 이 급격한 상승은 토압계 중 가장 상류측에 있는 E-5에서 가장 빠르게 나타나고 제방 중심에 있는 E-1과 2에서 그 다음으로 나타나고 제방 중심의 중간부에 설치한 토압계 E-4에서 가장 느리게 나타나고 있는데 이는 상기의 간극수압에 대한 설명에서 언급한 침투수의 흐름경향과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 침투수가 진행함에 따라서 토압이 급격히 상승하는 현상은 침투수가 침투하면서 제방을 구성하고 있는 토입자간의 배열을 파괴하고 이 순간적인 입자배열의 파괴가 급격한 토압상승을 유발시킨 후 침투후의 응력조건에 맞는 입자배열로 재배열되면서 토압이 다시 감소한다고 추론할 수 있다. 또한, 이러한 현상은 입자재배열이 발생하는 초기 답수에 의하여서만 발생하며, 이미 입자 배열이 완료한 저수위 재상승시에는 나타나지 않는 것으로 그림 11에서 확인할 수 있다.

또한, Case II에서는 E-6의 토압의 급격한 상승이 제방의 중앙 중간부에 설치된 E-4보다 빨리 발생하고 있는데, 이는 상기에서 언급한 것과 같이 배수암거가 설치된 경우에는 배수암거접촉부를 따라서 침투가 빨리 이루어진다는 것 확인할 수 있다.

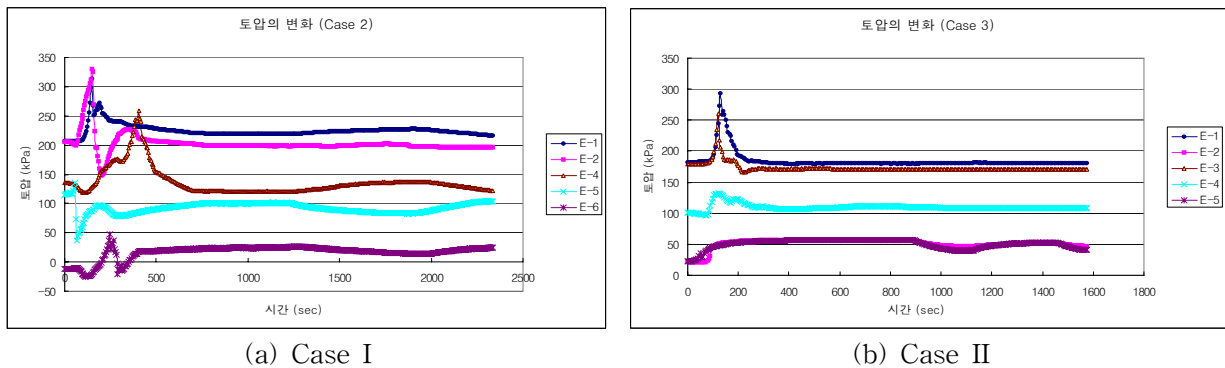


그림 11. 토압의 경시변화

Case I의 경우 역시 토압이 갑자기 급격한 상승했다 감소하는 경향이 확인되었으나 배수암거 하부에 설치한 E-2와 5의 경우에는 이러한 현상이 발생하지 않았다. 이는 배수암거의 상부지반 및 암거의 하중이 암거 하부에 전달되지 않는 구조이기 때문에 Case I과 같이 급격한 입자배열의 파괴가 발생하지 않았기 때문이며, E-1과 3은 배수암거에서 떨어진 곳에 설치되었기 때문에 입자배열의 파괴현상에 의하여 토압의 급격한 상승현상이 발생하였다. 또한 배수암거 상부에 설치된 토압계 E-4의 경우에는 침투수의 상승이 충분히 이루어지지 않아서 입자배열의 파괴가 미미하게 발생하였기 때문에 그림에서와 같이 비교적 적은 상승이 발생한 것으로 사료된다.

3.3 변 위

Case I 제방에 대한 상·류사면의 수직변위를 5배 확대한 저수위 상승→하강→재상승시의 제방단면에 대한 그래프를 그림 12에 나타냈다.

이 수직변위에 대한 그림으로부터 상류사면의 경우에는 수직변위가 동일한 시점에서 발생하여 상부로 갈수록 수직변위가 커지고 변위의 기울기가 완만해지는데 반하여 하류사면의 경우에는 수변변위 순차적으로 발생하는 것을 확인 할 수 있었고, 재상승시에는 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

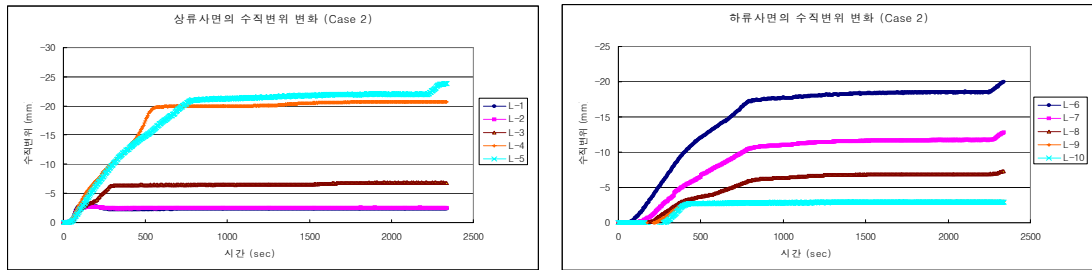


그림 12. 수직변위의 경시변화

따라서 상기에서 언급한 것처럼 초기 담수시 침윤선의 생성에 의한 수침의 영향으로 입자의 재배열이 발생함에 따라서 수직변위가 크게 발생한 것으로 판단된다. 이러한 현상을 좀 더 상세히 살펴보기 위하여 수직변위를 5배 확대한 저수위 상승→하강→재상승시의 제방단면에 대한 수직변위 거동 그래프를 그림 13에 나타냈으며 상기에서 설명한 사항을 보다 쉽게 알 수 있다. 즉, 저수위 상승시 상류사면의 저부는 수직변위가 빠르게 발생한 후 큰 변화가 없으나 상류사면의 상부 및 하류사면의 경우에는 시간경과와 더불어 수직변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 저수위 재상승시에는 제방 전체적으로 수직변위가 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 100mm이하에서는 배수암거가 설치되어 있기 때문에 하류의 900mm이상 지점의 변위가 거의 발생하기 않기 때문으로 판단된다.

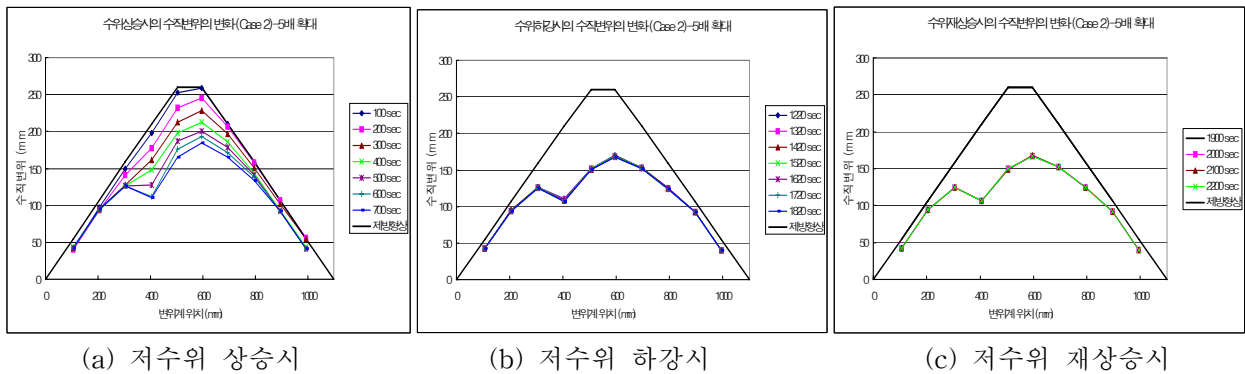


그림 13. 제방단면에 대한 수직변위의 변화 추이

4. 결론

본 연구에서는 지반과 연동되도록 설치된 배수암거와 연동하지 않도록 pile기초를 설치한 배수암거에 대한 거동분석을 수행하여 배수암거와 연동하지 않은 기초형식으로 배수암거를 설치할 경우에는 그 접촉부에서의 누수가능성이 커지기 때문에 주의가 필요하나 수위재상승시에 변위가 거의 발생하지 않는 결과로부터 물다짐 등의 다짐관리를 철저히 하면 그 피해를 방지할 수 있을 것으로 사료된다.