농업용 저수지 뚝 높이기에 따른 제체의 공극수압 거동

Behavior of Pore Water Pressure of Agricultural Reservoir According to Raising Embankment

이달원^{*,†} · 이영학^{**}

Lee, Dal Won · Lee, Young Hak

ABSTRACT

In this study, an experiment with large-scale model was performed according to raising embankment in order to investigate the cause of collapse by a change in water level of reservoir. Also, the settlement and pore water pressure by high water level and a rapid drawdown were compared and analyzed. After raising embankment for inclined core, there was no infiltration by leakage. For the vertical core, the pore water pressure showed a largely change by faster infiltration of pore water than in the inclined core. In a rapid drawdown, inclined core was remained stable but vertical core showed a largely change in pore water pressure. A settlement after a raising embankment showed a larger measure of settlement than before the raising embankment. The leakage quantity before a raising embankment and an inclined extension showed no leakage. Leakage in vertical extension was measured 160 l. From the result, a instrument system that can accurately estimate a change of pore water pressure shall be established for a rational maintenance and stabilization of raising embankment for agricultural reservoir.

Keywords: Agricultural reservoir; raising embankment; rapid drawdown; pore water pressure

1. 서 론

최근 농림수산식품부에서 추진 중인 「농업용저수지 뚝 높이기 사업」의 기본 목표는 이·치수측면에서 농업지역 관개용수의 공급과 함께 하류하천 지역용수의 공급이고, 더불어 재해측면에서 취약한 농업용저수지를 보강하는 것이다 (KRC, 2009).

우리나라 농업용 수리 시설물 중에서 저수지가 다른 수원공에 비하여 많은 비중을 차지하고 있고, 시·군 관리저수지 64 %, 한국농어촌공사 관리저수지 62 %가 설치 이후 경과연수가 50년 이상 되어 최근의 강우 특성과 더불어 시설물의 표준 내용년한에 비추어볼 때 홍수 배제능력 부족, 누수 등 재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다. 또한 저수지의 89 % (5,617개)가 유효저수량이 10만 m³ 미만의 소규모 댐으로 안전한 용수공급이 어려울 뿐만 아니라 가뭄과 강우의 양극화 현상이 심화되고 농업용수의 다양한 용수공급확대가 불가피함을 감안하면 수자원

확보와 재해예방에 대한 대책이 더욱 요구된다.

현재 농림수산식품부와 농어촌공사에서 계획되어 있는 저수지 뚝 높이기 사업 개요와 체계로는 4대강 내 96개소를 2009~2012년까지 4대강 밖은 17개소로 2010~2015년까지 뚝 높이기, 수문 설치 및 물넘이 확장 등을 추진하고 있다.

이와 관련하여 현재 뚝 높이기 대상 (110개소) 중 30년 이상 노후된 저수지가 72개소 (64 %)이고, 안전진단 결과 보수·보강이 필요한 C등급 이상 저수지 85개소 (75 %)로 축조 후 장기간이 지나 노후화된 저수지의 리모델링을 통한 기능회복이 필요한 실정이다 (KRC, 2005, 2009).

제체유형별로는 제체 덧쌓기 66개소로 가장 많고, 후면 덧쌓기 28개소, 이설 쌓기 16개소이며, 높이별로는 5 m 이하가 72개소로 가장 많고, 5-10 m 범위가 20개소, 10-15 m 범위가 5개소, 15-20 m 범위가 6개소, 20 m 이상 7개소이다 (MLTM, 2011).

농업용 저수지는 필댐으로 이루어져 있고, 콘크리트댐에 비하여 재료자체의 공학적 성질이 다양하며 불균질 하여 그 거동을 예측하기가 어렵다. 뚝 높이기 사업으로 시공되는 저수지도 완공 당시에는 양호한 상태로 평가되더라도 이후의 유지관리상태 및 외적요인 등에 의해 잔존해 있는 위험요소가 노출되어 제체의 안전에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 댐 안정도 지침에 의해 저수지의 재해예방과 안전관리를 위해서 공극수압계, 지하수위계, 지중경사계, 토압계 등의 계측기를 매설하여 시설물의 안정성 확보와

* 충남대학교 지역환경토목학과

** 충남대학교 대학원

† Corresponding author Tel.: +82-42-821-5793

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

2012년 2월 3일 투고

2012년 3월 6일 심사완료

2012년 3월 27일 게재확정

효율적인 유지관리를 도모해야 한다 (Fell et al., 2003, 2005).

제체의 붕괴원인으로는 홍수시 급격한 수위상승 및 급강하에 의한 비탈면의 활동, 기초지반의 토질조건, 제방 월류 그리고 수 위변화에 따른 제체 내 지반누수 등의 여러 가지 요인이 작용한다. 이와 같은 원인으로 제체가 붕괴되면 홍수, 침수 및 인명피해 등이 발생할 수 있기 때문에 제방의 안정성 확보에 대한 기준 설정과 평가기법의 필요성이 무엇보다도 중요하다 (Foster et al., 1999, 2000; Lee et al., 2003).

농업용 저수지의 공극수압은 제체 축조 후 담수를 시작하게 되며 침투문제로 인하여 일반적으로 성토와는 전혀 다른 거동을 하기 때문에 성토완료 후 담수시 수위변화에 따른 공극수압을 예측하여야 한다. 담수 후 지반내의 물의 흐름을 파악하기 위하여 매설되는 공극수압계의 변화는 저수지의 안정성을 초기에 판단하는데 매우 효과적인 방법이다 (Kim et al., 2009).

저수지 제체의 안정성에 관한 기존의 연구들은 파이핑 현상의 실내모형실험과 침투해석, 제체의 붕괴원인, 붕괴사례 및 상관관계 분석 등의 연구가 진행되어 왔다 (Jung, 1989; Jeong, 2002; Kwon et al., 2004; Lee et al., 2011).

현재까지 저수지 둑 높이기 사업에 가장 많이 시공 되고 있는 제체 덧쌓기는 코어부분의 안정적인 연결을 위해 기설코어의 상부를 일부 굴착한 후 신설 코어를 축조하는 것으로 계획되어 있다. 이에 따라, 수위변화로 인한 침윤선의 변화와 신설되는 성토의 추가하중으로 인한 코어와 기존 성토재간의 부등 침하 발생 가능성, 코어에서의 침하량, 하류사면에서의 공극수압 변화 등을 고려하여 면밀히 검토해야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 저수지 둑 높임시에 제체의 수위변화에 따른 붕괴원인을 분석하기 위하여 경사형과 수직형 제체 덧쌓기에 대한 대형실내모형 실험을 실시하고 홍수위시, 수위 급강하시에 따른 침하 및 공극수압 등을 비교 분석하여 둑 높이기 전·후에 대한 제체의 안정성을 평가 하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용시료

제체 덧쌓기에 사용된 시료는 성토재와 코어재료로 공주시

Table 1 The physical properties of used material

Sample	Gs	PI (%)	k_v (m/s)	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (gf/cm ³)	c (kPa)	ϕ	USCS
Embankment	2.65	9.2	5.75E-07	14.0	1.76	16.7	24°	SC
Core	2.69	15.5	3.11E-08	23.0	1.61	34.3	9°	CL

Fig. 1 Grain size distribution

○ 저수지 토취장에서 채취하였다. 사용된 시료의 물리적 성질과 입도곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

2. 실내모형실험

실내대형모형 토조는 길이 (L) 126 cm, 폭 (W) 540 cm, 높이 (H) 95 cm 로 콘크리트와 철제 및 아크릴로 제작하였다. 토조 내부에는 실리콘 및 방수페인트로 처리하여 누수를 방지하였으며, 예비실험결과 물 공급 후 누수량이 거의 발생하지 않아 실험수행에 크게 영향이 없는 것으로 확인되었다.

제체 덧쌓기 전과 경사형 및 수직형 제체 덧쌓기의 모형은 1/20로 축소하여 제작하였다.

Fig. 2는 제체 덧쌓기 전의 모형으로 1 : 2.0의 경사를 적용하여 높이를 약 69 cm로 성토하였고, 코어는 기설 제체의 일반적인 형태로서 축조되었다.

Fig. 3은 경사형 제체 덧쌓기 후의 모형으로 덧쌓기 전 모형을 기준으로 약 17 cm를 추가 성토하였고, 코어는 하류측 방향의 경사형태로 축조하였다. Fig. 4는 수직형 제체 덧쌓기 후의 모형으로 덧쌓기 전 모형을 기준으로 약 17 cm를 추가 성토하였고, 코어는 기존코어의 상부를 일부 제거한 후 상부방향으로 수직형태로서 축조하였다.

Fig. 2 Model test before raising embankment

Fig. 3 Model test after raising embankment for inclined core

Fig. 4 Model test after raising embankment for vertical core

제체 덧쌓기 전·후의 모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 12 mm 체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적 함수비로 조절하여 최대 건조밀도의 95 %로 층별 다짐을 실시하였다. 다짐시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 5 cm 가량 포설한 후 나무다짐봉으로 다짐을 한 후 밀도를 측정하여 확인하였다. 제체 덧쌓기시 성토의 건조밀도는 평균 1.655 g/cm^3 로 나타났고, 코어의 건조밀도는 평균 1.585 g/cm^3 로 나타났다.

3. 계측기 매설

가. 제체 덧쌓기 전의 계측기 매설

제체를 구성하는 성토재와 점토재 내부에 작용하는 공극수압을 측정하기 위해 각 지점에 따라 공극수압계 (㉑)를 매설하였다. 공극수압계의 매설간격은 계측기를 중심으로 좌·우의 일정한 거리에 위치시켰고, 제체의 지점에 따른 매설깊이는 사면의 높이와 경사를 고려하여 공극수압 측정시 비교가 용이하도록 사면상단에서 10~30 cm 떨어진 지점 (P1: 10 cm, P2: 20 cm, P3: 30 cm, P4: 30 cm, P7: 20 cm)에 매설하였다.

제체 덧쌓기 전·후 제체의 상부에 침하계 (㉒)를 매설 (LVDT)하여 침하량을 측정, 비교 분석 하였고 계측기는 모형 토조내 적용할 수 있는 초소형 크기의 공극수압계 (KYOWA 및 SSK社)를

Fig. 5 Location of pore water pressure meter before raising embankment

Fig. 6 Location of pore water pressure after raising embankment for inclined core

Fig. 7 Location of pore water pressure after raising embankment for vertical core

사용하였다. 정격용량은 50 kPa로서 이력현상을 적용시킨 결과 0.5 gf/cm^2 의 오차범위를 가졌다. 각각의 측정값은 Data Logger와 Computer에 의해 자동적으로 저장하도록 하였다. 공극수압은 상류측에 담수한 물이 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단할 때까지 측정하였다.

Fig. 5는 제체 덧쌓기 전의 공극수압계 (㉑)의 위치를 나타낸 것이다.

나. 경사형 덧쌓기시의 계측기 매설

Fig. 6은 경사형 제체 덧쌓기 후의 공극수압계 (㉑)의 위치를 나타낸 것이다. 계측기별 매설간격 및 매설깊이는 제체 덧쌓기 전과 동일하며, 코어의 상부에 공극수압계 (P8)를 추가로 매설하였다.

다. 수직형 덧쌓기시의 계측기 매설

Fig. 7은 수직형 제체 덧쌓기 후의 공극수압계 (㉑)의 위치를 나타낸 것이다. 계측기별 매설간격 및 매설깊이는 제체 덧쌓기 전과 동일하며, 공극수압계는 수직형 코어의 중앙부에 (P5)를 매설하였고, 수직형 코어와 제체 덧쌓기 전의 접합부에 (P8)를 매설하여 수위변화에 따른 공극수압을 측정 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 제체 덧쌓기 전·후의 공극수압 변화

가. 제체 덧쌓기 전에서의 변화

Fig. 8은 제체 덧쌓기 전의 홍수위 (60.8 cm)에서 공극수압변화를 나타낸 것이다. 공극수압은 제체 축조 후 담수초기부터 약 72시간 동안 측정하였다.

상류에서는 수위를 홍수위까지 증가한 후 공극수압 (P7: 20 cm)은 약 $15 \sim 16 \text{ gf/cm}^2$ 을 유지하여 제체의 정상적인 거동을 나타내었다. 온도변화에 의해 수위가 감소됨에 따라 인위적으로 수압을 증가시킴으로써 1 gf/cm^2 정도의 수압 변화폭이 발생되었다.

담수 후 상류의 침투수가 공극수압계의 매설위치까지 충분하게 도달하였다고 판단한 시간에서 공극수압을 측정하였다. 코어에서의 공극수압 (P4)은 대체로 0 gf/cm^2 전후로 나타났으며, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하여 $-1 \sim -2 \text{ gf/cm}^2$ 에서 안정화를 나타냈고, 코어에는 공극수가 침투되지 않는 것으로 판단된다. 하류사면의 공극수압은 대체적으로 0 gf/cm^2 으로 일정하게 유지함에 따라 침투에 의한 누수의 영향은 없는 것으로 나타났다.

Fig. 8 Variation of pore water pressure before raising embankment

Fig. 9 Variation of pore water pressure after raising embankment for inclined core

나. 경사형 제체 덧쌓기에서의 변화

Fig. 9는 경사형 제체 덧쌓기 후의 홍수위 (75 cm)에서 제체의 공극수압변화를 나타낸 것이다. 상류에서는 수위를 홍수위까지 증가후의 공극수압 (P7: 20 cm)은 12 gf/cm^2 에서 일정하게 유지되었다.

덧쌓기 전 코어에서의 공극수압 (P4)은 초기에 큰 변화를 나타내지 않았으나, 시간이 경과함에 따라 공극수압이 서서히 증가하였다. 덧쌓기 후의 코어에서의 공극수압 (P8)은 초기에 급격하게 증가하였고, 상류 수위가 일정하게 유지됨에 따라 점차적으로 일정하게 유지되었으나 높은 공극수압을 나타내었다. 이는 덧쌓기 전 (P4)과 덧쌓기 후의 공극수압 (P8)이 증가함에 따라 공극수가 코어내로 침투된 것으로 판단된다.

하류 중앙의 공극수압 (P2)은 시간이 지남에 따라 서서히 증가하여 $1.5 \sim 1.8 \text{ gf/cm}^2$ 의 범위에서 일정하게 나타났다. 담수 후 상류의 침투수가 공극수압계의 매설위치까지 충분하게 도달하였다고 판단한 시간에서 하류 상부 (P3)의 공극수압은 큰 변화 없이 0 gf/cm^2 정도를 유지하였으며, 수압의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

전체적으로, 저수지 둑 높이기 설계시에 코어를 경사형으로 시공하였을 경우, 코어에서는 공극수가 침투되어 증가하였으나, 하류사면에서는 누수에 의한 침투현상이 나타나지 않아 안정한 것으로 판단된다.

다. 수직형 제체 덧쌓기에서의 변화

Fig. 10은 수직형 제체 덧쌓기 후의 홍수위 (77 cm)에서 제체의 공극수압변화를 나타낸 것이다. 상류에서는 수위를 홍수위까지 올린후의 공극수압 (P7: 20 cm)은 $8 \sim 9 \text{ gf/cm}^2$ 의 범위에서 일정하게 유지되었다.

코어에서의 공극수압 (P4)은 초기에 급격하게 증가하였고, 상류수위가 일정해짐에 따라 $3 \sim 4 \text{ gf/cm}^2$ 의 범위로 일정하게 유지되었다. 덧쌓기 후 상부코어 (P5)와 증고 전·후에 경계에 있는 접합면의 공극수압 (P8)은 초기에 급격하게 증가하고, 약 $3 \sim 4 \text{ gf/cm}^2$ 의 범위로 나타났다.

Fig. 10 Variation of pore water pressure after raising embankment for vertical core

담수 후 상류의 침투수가 공극수압계의 매설위치까지 충분히 도달하였다고 판단한 시간에서 하류 중앙의 공극수압 (P2)은 초기에 부(-)의 공극수압을 나타내었으나 시간이 경과함에 따라 급격히 증가하여 2~3 gf/cm²의 범위로 일정하게 유지되었다. 하류 상부의 공극수압 (P3)은 부(-)의 공극수압을 나타내었으며 -2 gf/cm²에서 유지하였다.

전체적으로, 저수지 뚝 높이기 설계시 코어를 수직형으로 시공하였을 경우 상류의 공극수가 코어에 빠르게 침투되어 경사형보다 수직형이 침투에 대하여 취약하다고 판단된다. 또한 하류사면에서도 침투에 의한 공극수압이 상승하는 것으로 보아 장기간의 거동시에는 누수량이 점차로 증가하여 하류사면의 파이핑을 유발할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

2. 덧쌓기 형태에 따른 코어에서의 공극수압 변화

Fig. 11은 제체 덧쌓기 전 코어와 경사형 및 수직형 코어에서의 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

홍수위는 경사형 제체 덧쌓기 (11~12 gf/cm²)를 기준으로 하였고 제체 덧쌓기 전 코어의 공극수압 (P4)은 뚜렷한 변화 없이 0 gf/cm² 전후로 일정하게 나타났다.

경사형 코어 (P8)와 수직형 코어 (P5) 및 접합부 (P8)의 공극

Fig. 11 Variation of pore water pressure for vertical and inclined core

Fig. 12 Variation of pore water pressure during a drawdown for inclined core

수압은 초기에 증가하다 수위가 안정화됨에 따라 일정하게 유지하였다. 이는 경사형과 수직형 모두 코어내로 공극수가 침투된 것으로 판단된다.

3. 수위 급강하에 따른 공극수압 변화

가. 경사형에서의 변화

Fig. 12는 경사형에서 12시간 경과 후에 15분 동안 수위 급강하시 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

홍수위 (75 cm)에서 사수위로 수위 급강하 후 코어의 공극수압 (P4)은 4~5 gf/cm²의 범위로 일정하게 유지하였으며, 코어 상부에서의 공극수압 (P8)도 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였다. 하류 중앙의 공극수압 (P2)은 큰 변화 없이 일정한 상태를 유지하였으며 사수위 상태에서는 점차적으로 감소하였다. 하류 상부의 공극수압 (P3)은 0 gf/cm²의 전후를 나타내어 수압의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

나. 수직형에서의 변화

Fig. 13은 수직형에서 14 시간 경과 후에 15분 동안 수위 급강하시 공극수압 변화를 나타낸 것이다. 홍수위 (77 cm)에서 사수위로 수위 급강하 후 하부코어 (P4)와 상부코어 (P5) 및 접합부 코어 (P8)의 공극수압은 급격하게 감소하였고, 시간이 경과함에 따라 안정화되었다.

하류 중앙의 공극수압 (P2)은 코어에서와 같이 동일하게, 수위 급강하 후 급격히 감소하였으며 시간이 경과함에 따라 안정화되었다. 하류 상부의 공극수압 (P3)은 초기에 큰 변화가 없었으나 시간이 경과함에 따라 약간씩 증가하였다. 이는 상부사면의 일부가 포화되어 있었기 때문에 수위 급강하시에도 감소하지 않는 것으로 판단된다.

4. 하류사면에서의 공극수압 변화

Fig. 14는 하류사면에서 약 45 시간 동안 경사형 및 수직형 덧쌓기 후의 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 13 Variation of pore water pressure during a drawdown for vertical core

(a) Inclined core

(b) Vertical core

Fig. 14 Variation of pore water pressure for P2 and P3 in downstream

경사형 덧쌓기 (a)에서 중앙의 공극수압 (P2)은 초기에 수압에 의한 영향이 있었으나 시간이 경과함에 따라 감소하였고, 0 gf/cm^2 에서 일정하게 유지하였다. 상부의 공극수압 (P3)은 뚜렷한 변화를 나타내지 않았고 0 gf/cm^2 전후를 유지하며 일정하게 나타났다. 이는 공극수가 경사형 코어에 침투하여 영향이 있었으나 하류측에는 침투되지 않은 것으로 판단된다.

수직형 덧쌓기 (b)에서 하류 중앙의 공극수압 (P2)은 초기에 크게 증가하였으며 수위가 급강하한 후에는 급격히 감소하였다. 이는 코어에 침투된 공극수가 침윤선을 그리며 하류사면으로 흘러들어간 것으로 판단된다. 상부의 공극수압 (P3)은 초기에 큰 변화가 없었으나 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하였다. 이는 시간이 경과함에 따라 하류사면이 상부로 포화가 진행되는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 수직형 제체 덧쌓기가 경사형 제체 덧쌓기보다 침투에 대하여 취약하며 시간이 경과함에 따라 하류사면 포화에 의한 파이핑 현상을 유발할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

5. 제체 덧쌓기 전·후의 침하량 분포

Fig. 15는 제체 덧쌓기 전·후의 시간에 따른 침하량 분포를 나타낸 것이다. 제체 덧쌓기전의 침하량은 서서히 감소하다 시간이 경과함에 따라 완만하게 나타났다. 제체 덧쌓기 후는 시간이 경과함에 따라 급격하게 침하되었으며 이는 수평방향으로 확

Fig. 15 Variation of settlement before and after raising embankment

Fig. 16 Variation of pore water pressure by leakage of downstream

장한 코어와 공극수 침투에 의한 포화로 인하여 침하량이 크게 나타난 것으로 판단된다.

6. 제체 덧쌓기에서의 누수량 변화

Fig. 16은 하류사면에서 제체 덧쌓기 전과 경사형 및 수직형 덧쌓기 후의 공극수압 변화를 나타낸 것이다. 제체 덧쌓기 전에서 하류중앙 (P2)와 상부 (P3)는 대체적으로 0 gf/cm^2 전후로 일정하게 나타났다. 하류사면에서 누수가 발생되지 않은 것으로 보아 수압의 영향이 없는 것으로 판단되며 기설 제체에 대하여 안전함을 나타내었다.

경사형 제체 덧쌓기 후에서 하류중앙의 공극수압 (P2)은 서서히 증가하여 2~3 gf/cm^2 에서 일정하게 유지되었고, 상부 (P3)의 공극수압은 0 gf/cm^2 에서 일정하게 유지하며 변화를 나타내지 않았다. 하류사면에서는 누수량이 측정되지 않았지만, 시간이 경과함에 따라 공극수압이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상으로 보아 장기간 거동시에는 코어침투에 의한 누수량이 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

수직형 제체 덧쌓기 후에서 하류중앙의 공극수압 (P2)은 초기에 크게 증가하여 3~5 gf/cm^2 를 유지하였고, 상부 (P3)의 공극수압은 초기에 큰 변화가 없었으나 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하기 시작하였다. 하류사면에서는 누수가 발생하여 약 72 시간 경과 후에 160 l의 누수량이 측정되었다. 이는 수직형 코어를 통과한 공극수가 하류사면에 침투되어 저면에서 상부로

포화되어 가는 것으로 판단되며 시간이 경과함에 따라 파이프링 현상을 유발할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 저수지 둑 높임시에 제체의 수위변화에 따른 붕괴원인을 분석하기 위하여 제체 덧쌓기에 따른 대형실내모형 실험을 실시하고 홍수위시, 수위 급강하시에 따른 침하 · 공극수압 등을 비교 · 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경사형 제체 덧쌓기 후의 공극수압 변화량은 상류측에서 초기에 급격하게 증가하였고, 점차적으로 일정하게 나타났다. 코어에서는 공극수가 침투되어 공극수압 변화량이 크게 증가하였고, 누수에 의한 침투현상은 나타나지 않아 안정한 것으로 판단된다.

2. 수직형 제체 덧쌓기 후 코어에서의 공극수압 변화량은 경사형보다 빠르게 공극수가 침투되어 큰 변화를 나타내었으며, 하류측에서는 침투에 의해 공극수압이 상승되어 불안정한 상태로 나타났다.

3. 수위 급강하 후 경사형은 코어내의 공극수압의 영향을 받지 않아 수위 급강하시에 일정하게 나타났다. 수직형은 코어내에 침투현상이 발생되어 공극수압의 변화가 있었고, 수위 급강하에 크게 감소되는 것으로 나타났다.

4. 제체 덧쌓기 전 · 후의 침하량은 시간이 경과함에 따라 점차적으로 감소하였고, 경사형 덧쌓기에서는 코어내로 공극수가 침투되어 포화되었기 때문에 덧쌓기 전보다 크게 나타났다.

5. 제체 덧쌓기 전, 경사형 및 수직형 제체 덧쌓기의 누수량 변화를 비교한 결과, 제체 덧쌓기 전과 경사형에서는 누수량이 발생하지 않았다. 수직형에서는 약 72시간 경과 후에 160 l의 누수량이 측정되어 경사형 덧쌓기 보다 침투에 취약함을 나타내었다.

앞으로 농업용저수지 둑 높이기의 합리적인 유지관리 및 안정관리를 위하여 공극수압 변화 등을 정확하게 측정할 수 있는 계측시스템을 구축하고, 모형실험 결과를 반영한 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2012-0002791)

REFERENCES

1. Fell, R., C. F. Wan, J. Cyganiewicz, and M. Foster, 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE 129(4): 307-314.
2. Fell, R., P. Macgregor, D. Stapledon, and G. Bell, 2005. *Geotechnical Engineering of Dam*. A.A. Balkema, pp. 393-439.
3. Foster, M. A., and R. Fell, 1999. A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event three methods. UNICIV Rep. NO. R-377. School of Civil and Environmental Engineering. Univ. of New South Wales, Sydney, Australia.
4. Foster, M. A., R. Fell, and M. Spannagle, 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can. Geotech. J.* 37(5): 1000-1024.
5. Jeong, S. T., 2002. Seepage analysis of sea dike under unsteady state. *Journal of Technological Review* 22: 23-25 (in korean).
6. Jung, H. S., 1989. An experimental study on piping failure of earth embankment. *Journal of Korean Geotechnical Society* 5(4): 17-26 (in korean).
7. Kim, M. H., and D. W. Lee, 2009. Safety evaluation of reservoir embankment by instrument system. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 33-43 (in korean).
8. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2005. Guidelines for precision safety inspections of dam.
9. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2009. Report of monitoring system for disaster prevention of agricultural structure.
10. Kwon, H. M., C. Y. Kim, Y. H. Park, C. K. Chung, and M. M. Kim, 2004. Experimental investigation of seepage properties on weathered residual soils. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(1): 75-82 (in korean).
11. Lee, D. W., K. S. Lee, and Y. H. Lee, 2011. Seepage analysis of agricultural reservoir due to raising embankment. *Journal of Agricultural Science* 38(3): 493-504 (in korean).
12. Lee, S., and H. K. Park, 2003. The stability evaluation of river embankment for a piping phenomenon. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection* 7(3): 175-181 (in korean).
13. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. The 4 major rivers restoration. <http://4rivers.go.kr>.