



노후화된 농업용 저수지의 효율적인 리모델링 방법

Effective Method for Remodeling of Deteriorated Agricultural Reservoirs

이영학* · 이달원**,†

Lee, Young Hak · Lee, Dal Won

Abstract

This study analyzed pore water pressure, earth pressure and settlement through laboratory model tests in order to suggest the effective remodeling method in the case of reinforcing the upstream and downstream slope of deteriorated reservoirs that has no cores and filters or is not functional. The method of remodeling the upstream slope using dredge soil is first prevent seepage by installing the core, and the leakage water can be rapidly discharged through a filter installed on the downstream slope. Therefore, it is considered a highly efficient method of remodeling that reduces piping phenomena and increasing the storage capacity of the reservoir. The variation of earth pressure without the core and filter was greater than with it, while the change largely showed in the upstream slope, the downstream slope did not show any significant changes. The remodeling method of the downstream slope with the core appeared differently pore water pressure depending on the presence of the vertical and horizontal filters. In the upstream slope, the pore water pressure rises sharply, the base and middle gradually increased, and the downstream slope appeared small. The pore water pressure of embankment with a vertical and horizontal filter will be smaller than without it. The remodeling of deteriorated reservoir that does not have the function of the filter, the vertical filter must be installed in a position that is higher than the expected seepage line by removing portions of the downstream slopes. Since the horizontal filter is an important structure that provides stable drainage during an earthquake or concentrated leak, it is necessary to examine any change in the seepage characteristics depending on the filter intervals via three-dimensional finite element analysis, and it should be connected to the tow-drain to reduce the possibility of the collapse of the reservoir.

Keywords: Deteriorated reservoir, Pore water pressure, Earth pressure, Remodeling method, Core, Filter, Laboratory model tests

1. 서론

우리나라 농업용 저수지는 93%가 유효저수량이 30만 m³ 미만으로 안전한 용수공급이 어려울 뿐만 아니라 가뭄과 홍수의 양극화 현상이 심화되고 최근의 강우 특성과 더불어 시설물의 사용연한을 고려할 때 홍수 배제능력 부족, 누수 등 재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다.

저수지는 시간이 경과함에 따라 노후화되기 때문에 저수지 리모델링 목적은 재해를 예방하고 공공의 안전을 위하여 저수지 관리자가 관련법령에 따라 정밀안전진단, 보수·보강, 유지관리 등을 실시하고, 위험을 식별한 후 예상피해상황을 분석하여 그에 적합한 최선의 대응방안을 마련하는 것이다.

노후화된 중·소규모 저수지의 붕괴는 상류사면 붕괴, 하류사면 붕괴, 여수토 방수로 붕괴 등의 저수지 자체 붕괴와 이로 인한 하류지역의 인명과 재산 피해로 나타나고, 저수지 하류부에 생활하고 있는 사람들의 안전은 저수지 자체의 구조적인 안정성에 크게 의존할 수밖에 없기 때문에 항상 실시간 모니터링을 통하여 최적화 모델을 결정하고 위험저감 매뉴얼에 따라 행동하여야 한다.

현재 농업용 저수지 뚝 높이기 사업은 총 110개소가 장래 물 부족에 대비하여 농업용수를 보충하여 안정적인 영농기반을 마련하고 농촌지역의 생활, 공업용수, 축산, 원예 등 농촌용수 다양화 및 미래 영농환경 변화에 대비하기 위한 목적으로 완공되었다(KRC, MLTM, 2011). 특히, 뚝 높이기 사업을 추진하면서 획득한 설계방법, 시공기술의 노하우는 앞으로 노후화된 많은 저수지를 어떻게 진단하고, 어떻게 효율적으로 리모델링하며, 어떻게 장기적으로 유지관리하여 하류부의 위험을 저감할 수 있을 것인가? 에 대한 문제점을 해결하는데 많은 기술적인 설계지침을 제시하였다.

그동안 많은 연구결과가 발표되었지만(Noh and Lee, 2014; Chapuis and Aubertin, 2011; Foster et al., 2000), 국내 저수지 관리는 아직까지도 제도적인 측면, 조직 및 운영적 측면,

* Post doc., Institute of Agricultural Science, Chungnam National University

** Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-5793 Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

Received: July 5, 2017

Revised: July 13, 2017

Accepted: July 13, 2017

제정적 측면, 정보관리 및 전달체계 측면에서 많은 문제점이 나타나고 있다.

최근 붕괴된 산대저수지와 같이 이상강우에 의한 저수지 붕괴가 빈번하게 발생되고 있어 앞으로 노후화된 저수지의 정밀안전진단이 절실하게 필요한 실정이다(KRC, 2011). 한국농어촌공사에서는 19년간 4,081 지구의 농업용저수지에 대하여 정밀안전진단을 실시한 결과, 보수·보강이 필요한 C 등급이상 저수지가 3,862개로 조사 저수지의 94.6 %에 달한다고 분석하였다(Lee and Noh, 2014). 농림축산식품부에서는 소규모 저수지의 안전관리를 강화하기 위해 의무정밀안전진단 대상 저수지를 현행 총저수량 50만 m³ 이상에서 30만 m³ 이상으로 확대하는 농어촌정비법을 개정하였기 때문에 앞으로 더 많은 저수지가 정밀안전진단대상이 되어 정밀한 안전관리를 받게 된다. 또한 저수지 붕괴는 30만 m³ 미만의 소규모 저수지가 붕괴의 대부분을 차지하고 있기 때문에 이에 대한 대처계획을 수립하여야 한다.

완공된 농업용 저수지 뚝 높이기 사업은 제체 덧쌓기, 후면 덧쌓기, 이설 쌓기 등을 기본으로 일률적으로 3가지 방법에 의해 설계 시공되었는데 현장조사 결과, 일부 저수지는 현장 상황에 맞지 않는 기형적인 형태로 시공되었다(Lee and Lee, 2016).

그 중에서도 가장 많이 시공된 제체 덧쌓기 방법은 기존 제체내의 코어, 수직필터, 수평필터가 정상적이라는 판단 하에 댐마루 및 하류사면을 성토하고 있지만 대부분의 저수지가 50년 이상 경과되어 차수 및 배수기능 상실하였고 설계도가 없어 확인할 방법도 없다. 또한 리모델링은 저수지 제체 일부를 보수보강하기 때문에 새롭게 신설하는 저수지와는 다르게 코어, 수직 및 수평필터 설치 위치 및 방법을 변경하여 시공할 수밖에 없다.

따라서 기본설계방법을 변경하여 뚝 높임시 부지폭의 제한으로 하류사면을 확장할 수 없는 경우에는 제체 중심축을 현장 여건에 맞게 상부로 이동하고 그에 따라 코어, 수직 및 수평필터 위치도 변경하여 현장상황에 적합한 뚝 높임 방법을 제시할 필요가 있다. 일반적으로 제체의 침투류 해석은 2-D 해석에 의해 안정성을 판단하고 있지만, 현장에서 수평필터의 간격은 10~40 m로 시공되기 때문에 제체 전체에 포설된

것으로 가정된 2-D 해석에서의 침윤선은 실제보다도 급격하게 감소하여 안정한 것으로 잘못 판단할 수 있다(MAFRA, 2002; MLTM, 2011). 따라서 파이핑이 발생되지 않은 기준 안전율을 3-D 해석으로 구하여야 실제와 근접되는 결과를 얻을 수 있다(Chen and Zhang, 2006).

저수지 뚝 높임시 성토 및 코어재료는 저수지 부근에서 취득하기가 어렵기 때문에 계획적인 시공공정이 진행되고 앉아 공사기간이 늘어나고, 저수지 뚝 높임을 해도 저수지내에 퇴적된 흙으로 인해 저수용량을 감소되어 기대효과가 반감되며, 수몰로 인한 보상비용이 증가하여 경제적 손실을 초래하고 있다. 따라서 저수지내의 준설토를 리모델링 재료로 활용하여 사력토는 안정에 필요한 강도를 만족하는 성토재료로 이용하고, 실트 및 점토재료는 차수성을 만족하는 코어재료로 이용할 필요가 있다.

저수지 준설토를 활용하여 하류사면은 준설모래로 수직 및 수평필터를 설치하는 방안과 상류사면은 하류부를 확장할 수 없는 경우에 필터, 코어를 상류부에 설치하는 방안을 고려할 필요가 있다. 이러한 리모델링 방법은 준설토를 준설하여 운반하고 사토하는데 소요되는 환경적인 문제뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 매우 효과적인 리모델링 방법이 될 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 노후화된 농업용저수지의 효율적인 리모델링 방법을 제시하기 위하여 코어와 필터가 없거나 노후화 되어 기능을 하지 못하는 균일형 저수지의 상류사면과 하류사면을 보강하였을 경우에 실내모형실험을 통하여 공극수압과 토압 거동을 비교분석한 후 현장 실용화 방안을 마련하고자 한다.

II. 재료 및 분석방법

1. 사용시료

실험에 사용된 시료는 코어, 성토, 필터를 사용하였고, 물리적 성질, 역학적 성질 및 입도곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

Table 1 Geotechnical properties of materials used

Sample	G_s	PI (%)	k_v (m/s)	W_{opt} (%)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ°	USCS
Embankment	2.55	9.3	1.01E-07	16.3	15.88	27.0	33	SC
Core	2.69	15.5	3.11E-08	23.0	15.78	34.3	9	CL
Filter	2.62	N.P	5.40E-05	-	16.95	0	33	SP

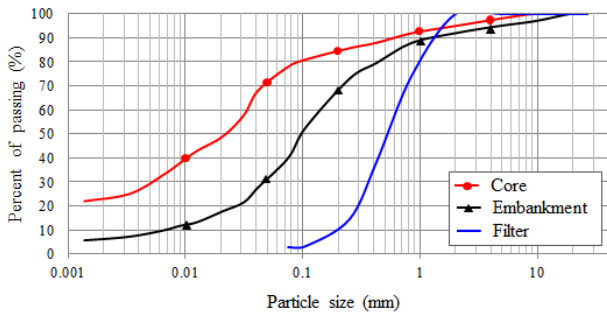


Fig. 1 Grain size distribution

2. 저수지 제체 모형 축소

실내모형실험은 Fig. 2와 같이 길이 (L) 300 cm × 폭 (W) 300 cm × 높이 (H) 60 cm로 철판 및 아크릴로 제작하였고, 토 조 내부에는 흙과 아크릴과의 이방성으로 인한 기초바닥면의 누수현상을 방지하기 위하여 기초지반 (h=8 cm)을 형성한 후, 기초지반의 상부에 Bentonite mat (2 cm)를 포설하였다. 또한, 코어의 기초지반층은 불투수층을 모사하기 위하여 흙과 Bentonite (15%)를 적용하여 차수성능을 강화시키고자 하였다. 비탈면 경사는 1 : 2.5으로 모형을 제작하였고, 모형 저수지의 상류부는 만수위 상태로 측정이 완료될 때까지 일정한 수위를 유지하였다.

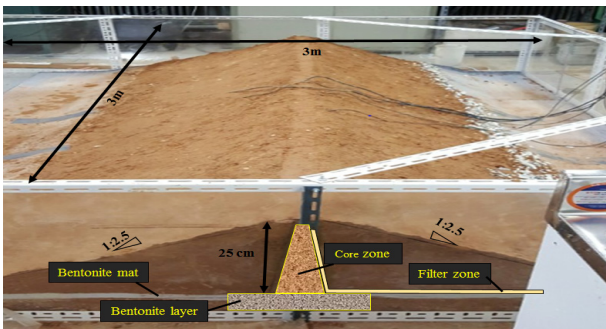


Fig. 2 Cross section of laboratory model tests

모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 4.75 mm 체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적 수비로 조절하여 최대 건조밀도의 95% 이상으로 층별 다짐을 실시하고 밀도를 측정하여 확인한 결과, 성토의 평균 건조 밀도는 15.39 kN/m³로 나타났고, 코어의 건조밀도는 15.09 kN/m³로 나타났다. 또한, 필터의 간격조정이 용이하도록 계룡저수지 제체 길이 (300 m)의 1/100로 축소하여 제작하였다. 하류사면의 수평필터 간격은 3차원 침투해석에 의해 파이프이 발생하지 않는 안전율 2.0 이상을 기준으로 25 cm로 간격으로 총 10개를 설치하고 하류사면 선단에 Riprap을 설치한 후 유출량을 측정하였다.

3. 저수지 리모델링 방법

저수지의 효율적인 리모델링 방법을 위하여 적용한 실험 방법은 Fig. 3과 같이 7가지를 구분하였다.

- ① Case 1 : 코어와 필터가 없거나 노후화로 인하여 코어와 필터가 전혀 기능을 하지 못하는 조건
- ② Case 2 : 코어와 필터가 없고 하류사면을 필터로 보강한 조건
- ③ Case 3 : 중심코어가 없어 저수지 준설토를 이용하여 상류사면에 코어, 필터를 설치하고, 하류사면을 필터로 보강한 조건
- ④ Case 4 : 코어만 있고 수직 및 수평필터가 기능을 하지 못하는 조건
- ⑤ Case 5 : 코어만 있고 하류사면에 필터로 보강한 조건
- ⑥ Case 6 : 코어와 수직필터가 있고 수평필터가 기능을 하지 못하는 조건
- ⑦ Case 7 : 코어와 수직필터가 있고 하류사면에 필터로 보강한 조건

4. 계측기 매설

제체를 구성하는 성토, 코어, 필터 내부에 작용하는 공극수압과 토압을 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 공극수압계 (P)와

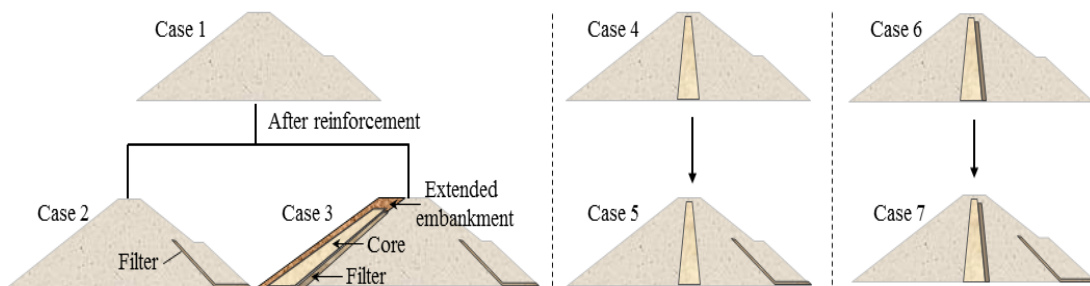


Fig. 3 Remodeling methods of reservoir

토압계 (E)를 각각의 위치에 매설하였다. 매설위치는 P1, E1 (상류사면), P2, E2 (성토 또는 코어하부), P3 (성토 또는 코어 중부), P4, E3 (하류사면)에 매설하였다. 매설깊이는 사면의 높이와 경사를 고려하여 공극수압과 토압 측정시 비교분석이 용이하도록 제체 하부로부터 10 cm 떨어진 지점에 매설하였다.

제체 덧쌓기 후 댐마루 중앙에 침하계 (S)를 설치 (LVDT)

하여 침하량을 측정하였고, 계측기는 모형 토조내 적용할 수 있는 초소형 크기의 공극수압계 (정격용량: 50 kPa)와 토압계 (정격용량: 200 kPa)를 사용하였다. 각각의 측정값은 Data Logger와 Computer에 의해 자동적으로 저장하도록 하였다. 공극수압은 상류측에 담수한 물이 제대로 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단될 때 측정하였다.

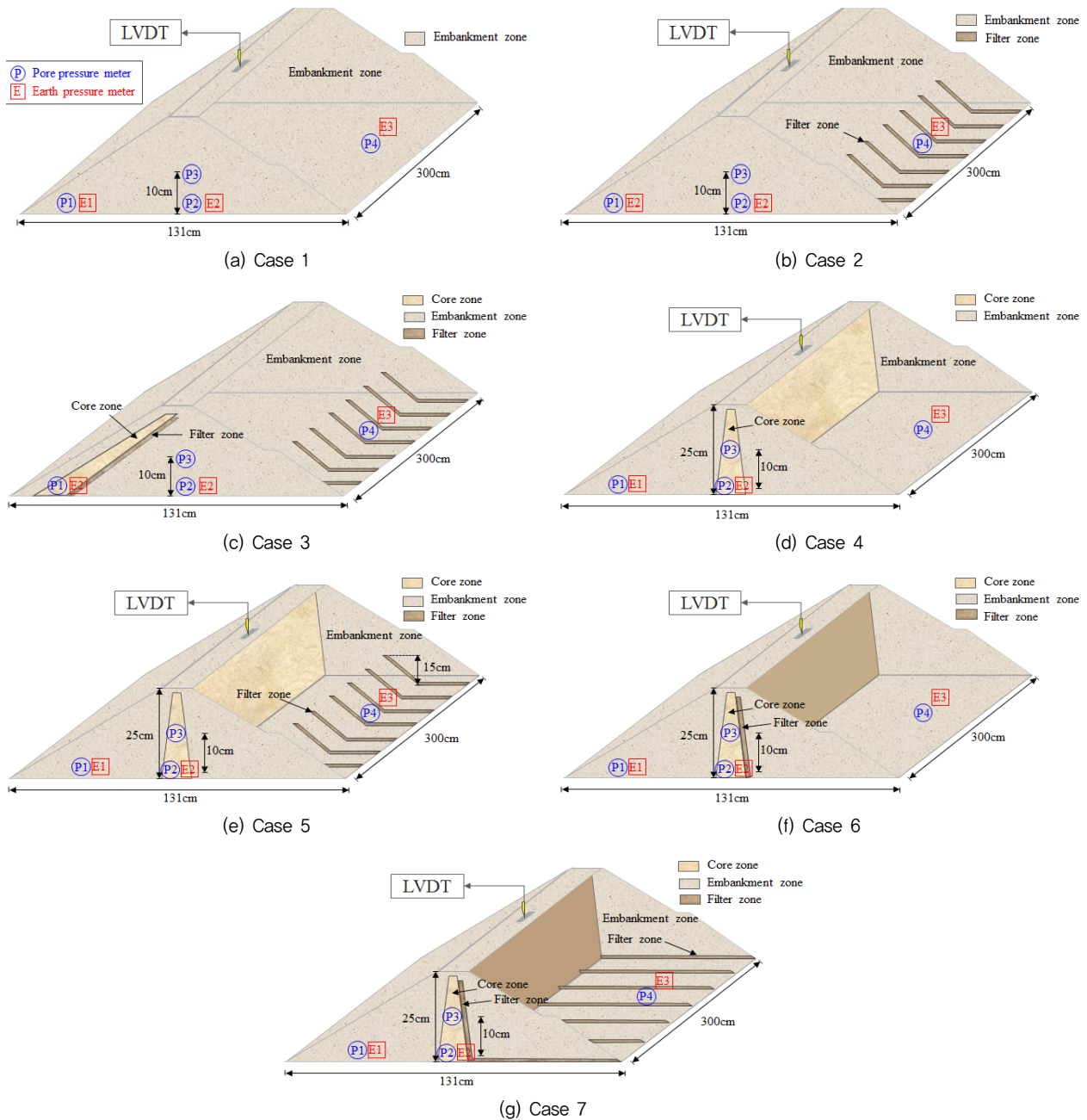


Fig. 4 Laboratory model test and location of monitoring

III. 결과 및 고찰

1. 상류사면의 리모델링 방법

상류사면을 리모델링 하는 방법은 하류측에 용지를 확보할 수 없거나 제한되는 경우, 저수지 바닥을 준설하여 기존 상류사면에 코어, 필터, 성토를 시공하는 것이다.

이 방법은 기존 제체가 코어와 필터가 없거나 기존 제체의 코어와 필터가 차수성과 투수성을 기대할 수 없어 상류사면에 차수를 위한 코어존과 제체보강을 위한 신설 성토존을 축조하고, 기존제체의 침투안정을 고려하여 하류사면에 필터를 설치하는 방법으로 주로 중·소규모의 저수지에 적용할 수 있다.

일반적으로 저수지 상류의 퇴적토는 사력토가 많이 존재하고, 하류부는 유출에 의해 실트나 점토가 퇴적되어 있다 (FEMA, 2011). 이 형식은 차수를 위한 코어의 강도가 작아 사면안정상 기술기를 완만하게 해야 하므로 대량의 점토가 필요하다. 또한 굴착한 고함수비의 불량토가 발생되므로 이를 운반처분하거나 쇄석을 이용하여 입도 조정된 후 성토재료로 사용하거나 고화제를 첨가하여 성토재료 재사용해야 하는 등의 경제적인 문제가 발생된다.

대규모 저수지에 적용되는 방법은 기존제체의 전면에서 차수성과 안정성을 갖춘 새로운 제체를 신설하는 것으로 후면 덧쌓기와 반대의 경우다. 이 방법은 담수위의 상승으로 인한 기초지반에 작용하는 침투수압이 크기 때문에 지수 트렌치와 그라우팅을 고려하여야 한다.

Fig. 5는 제체에 코어와 필터가 없거나 노후화로 인하여 코어와 필터가 전혀 기능을 하지 못하는 균일형 단면에서의 공극수압을 비교분석한 것이다 (Case 1). 상류사면의 공극수압 (P1)은 침투가 시작되면서 급격하게 증가하고 만수위 상태에서는 일정하게 나타났다. 성토 중앙 하부 (P2), 중부 (P3), 하류사면 (P4)에서 공극수압은 동시에 급격하게 증가하고 크게

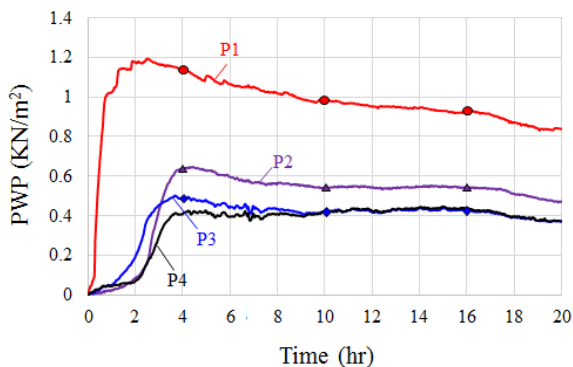


Fig. 5 Variation of pore water pressure (Case 1)

나타났는데 이는 침투수가 유출되지 않고 정체된다는 것을 의미하기 때문에 제체가 불안정한 상태로 판단된다.

Fig. 6은 코어와 필터가 없는 균일형 제체의 하류사면에 필터를 설치하여 보강하였을 경우의 공극수압 변화를 나타낸 것이다 (Case 2).

성토중앙 하부 (P2), 중부 (P3), 하류사면 (P4)에서 공극수압은 코어와 필터가 없는 경우 (Case-1)보다 완만하게 상승하고 작게 나타났는데 이는 하류사면의 필터 영향으로 침투수가 원활하게 유출된다는 것을 의미하기 때문에 저수지 리모델링시 하류사면을 일부 절취하여 필터를 설치하는 것만으로도 침윤선을 저하시켜 파이핑을 방지할 수 있는 매우 효과적인 방법이라고 판단된다.

Fig. 7은 코어와 필터가 없거나 기존 제체가 너무 노후화되어 점토와 필터가 완전히 기능을 잃어버린 균일형 제체의 상류사면에 저수지 준설토를 활용하여 코어, 필터, 성토를 신설하고, 하류사면을 필터로 보강한 경우의 공극수압 변화를 나타낸 것이다 (Case 3).

상류사면의 코어 하부 (P1)에서 공극수압은 침투가 시작되면서 급격하게 증가하고 만수위 상태에서는 일정하게 나타났다. 성토 중앙 하부 (P2)와 중부 (P3)에서는 공극수압의

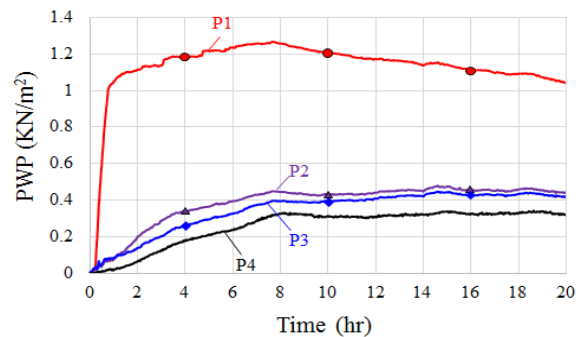


Fig. 6 Variation of pore water pressure (Case 2)

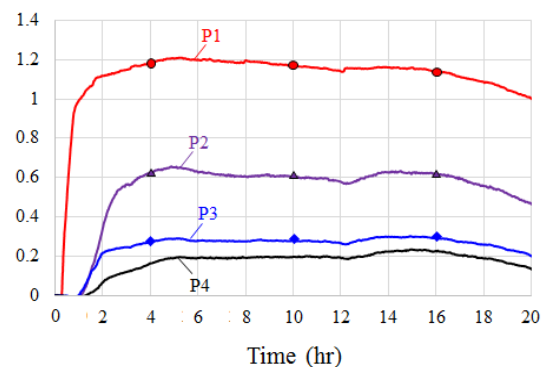


Fig. 7 Variation of pore water pressure (Case 3)

반응속도가 약간 느리고 작게 나타났는데 이는 성토 중심부에서 침윤선이 상승하지 않고 원활하게 유출된다는 것을 의미한다.

하류사면(P4)은 제체중앙에 코어가 없는 상태에서 상류사면에 코어와 필터를 설치하였지만 침투수가 발생하여 하류사면에 파이핑 현상을 유발시킬 수 있다. 따라서 파이핑이 발생되지 않도록 필터간격을 3-D 침투류 해석으로 구하여 25 cm 간격으로 총 10개를 설치하였다. 공극수압은 매우 작게 나타났는데 이는 필터가 제 기능을 발휘하여 침투수가 정체되지 않고 신속하게 유출되기 때문으로 판단되고, 제체를 통해서 침투된 유출량은 약 4.5 L/day로 나타났다.

이와 같이 코어와 필터가 없거나, 코어와 필터가 노후화되어 차수기능과 침투기능을 하지 못하는 현장저수지를 리모델링할 경우, 준설토를 이용하여 상류사면에서 1차적으로 침투수를 차단하고 누수된 침투수는 하류사면에 필터를 설치함으로써 침윤선을 저하시켜 파이핑 현상에 대하여 안정성을 높이고, 아울러 저수지의 내용적을 증가시키는 효과적인 리모델링 방법이라고 판단된다.

Fig. 8은 코어와 필터가 없는 균일형 제체, 하류측에 필터를 보강한 경우, 상류사면을 준설토로 리모델링한 경우에 하류사면(P4)에서의 공극수압을 비교한 것이다.

하류사면에서의 공극수압을 비교해보면 어떠한 리모델링 방법이 침투수를 원활하게 유출시키는지 알 수 있다. 코어와 필터가 없는 균일형 제체(Case-1)에서는 급격히 상승하였고, 필터를 보강한 경우(Case-2)는 반응속도가 느리고 약간씩 증가하였으며, 상류사면을 리모델링 한 경우(Case-3)는 매우 느리고 작은 값을 나타냈다. 이와 같이 하류사면에 필터를 설치함으로써 침투수를 신속하게 배출시켜 파이핑에 대한 안정성을 증가시킬 수 있고, 상류사면에 코어, 필터를 설치함으로써 저수지의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 코어와 필터가 없는 균일형 제체(Case-1)와 상류사면을 준설토로 리모델링한 경우(Case-3)의 토압 변화를 비

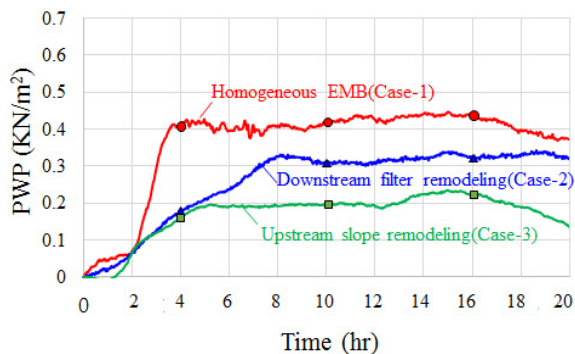


Fig. 8 Variation of pore water pressure in downstream slope (P4)

교분석한 것이다.

상류사면의 토압(E1)은 수위가 증가함에 따라 급격하게 증가하고 만수위 상태에서는 일정한 상태를 나타냈고, Case-3의 경우가 Case-1보다 약간 더 크게 나타났다. 성토 중앙부에서의 토압(E2)도 만수위 상태까지 급격하게 상승하다가 일정하게 나타났고, 하류사면(E3)에서는 모든 경우에서 큰 변화 없이 유사한 값을 나타냈다.

전체적으로 토압은 Case-3의 경우가 Case-1보다 약간 크게 나타났는데 이는 상류사면에 코어를 설치한 위치에서 측정하였기 때문으로 판단된다. 상류사면의 토압이 성토 중앙부에서 측정한 값보다 크고 하류사면의 토압은 작기 때문에 이차현상은 발생되지 않았으며, 상류사면의 공극수압은 같은 위치의 토압보다 약간 작거나 유사하게 나타나 수압할렬의 가능성이 없는 것으로 나타났다.

만수위 상태에서 시간에 따른 최종침하량은 0.134 mm로 큰 변화를 나타내지 않고 매우 작게 나타났는데 이는 기존의 독 높이기 방법과의 다르게 상류사면의 보강으로 인하여 제정폭이 넓어 제체가 기존의 방법보다는 안정하였기 때문으로 판단된다.

2. 하류사면의 리모델링 방법

농업용 저수지를 리모델링할 경우에 제체 덧쌓기에 의해 시공하고 있는데 이는 제체의 코어, 필터가 정상적이란 판단하에 설계된 것이지만 실제 제체의 코어와 필터는 너무 오랜 기간이 경과되어 본래의 기능을 할 수 없는 상태가 대부분이다. 따라서 독 높이기하면서 코어나 필터가 있는지의 여부를 확인하여야 하고 없을 경우는 재설치를 하여야 한다. 그러나 저수지의 본래의 기능을 유지하면서 담수 상태에서 코어와 필터를 재설치 하는 것은 저수지를 신설하는 것과 마찬가지로 경제적 비용과 안전성에도 심각한 영향을 미치게 된다.

하류사면을 리모델링 하는 방법은 첫 번째로 기존 제체를

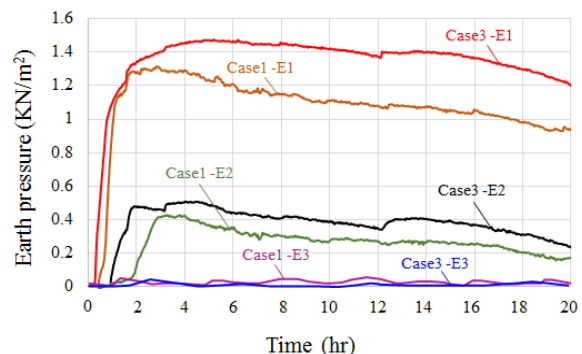


Fig. 9 Variation of earth pressure (Case-1, Case-3)

임시 물막이로 사용하고 제체의 후면에 코어와 필터를 새롭게 신설하는 방법으로 독 높이기 사업에서 후면 덧쌓기란 방법으로 28개 저수지가 시공되었고, 주로 대규모 저수지 리모델링시에 적용하며 침투수압과 안정성이 우수한 방법이다. 이 방법은 신규제체와의 경계면에 Transition 존이 존재하기 때문에 두 재료간의 변형이 발생하지 않도록 중간 정도의 지반특성을 가진 재료로 시공하여야 한다 (JICE, 2012).

두 번째로 코어가 존재하여 충분한 차수성을 가지고 있는 경우에 신설코어를 경사형 또는 수직형으로 기존 제체의 코어에 연결하고 하류사면을 절취하여 필터를 설치한 후 성토하는 방법이다 (USACE, 2004). 독 높이기 사업에서 제체 덧쌓기란 방법으로 66개 저수지가 시공되었고, 상류사면의 큰 보강 없이 담수한 상태에서 덧쌓기가 가능한 방법이지만 저수용량의 크게 확대할 수 없기 때문에 소·중규모 저수지의 리모델링시 적합한 방법이다.

세 번째는 기존제체에 코어와 필터가 설치되지 않았거나 기능을 못할 경우에 적용하는 방법으로 기존제체의 하류사면에 코어, 필터를 설치하고 성토 시공하는 방법이다. 이 방법은 하류부의 용지매수가 필수적이라 지장물이 있거나 부지확보가 불가능할 경우에는 토목섬유와 같은 보강토 공법을 이용

하거나 제체 중심축을 상류측으로 이동하는 방법으로 전환해야 한다.

Fig. 10은 코어만 있고 수직 및 수평필터가 기능을 하지 못하는 조건 (Case 4)이고, Fig. 11은 코어가 있고 하류사면을 수평필터로 보강한 경우의 공극수압 변화를 나타낸 것이다 (Case 5).

상류사면에서의 공극수압(P1)은 수위가 증가하면서 급격하게 증가하였고 만수위 상태에서는 일정하게 나타났다. 코어만 있는 경우 (Case-4)는 코어 하부, 중부, 하류사면 모두에서 점차적으로 증가하고 있고, 하류사면을 수평필터로 보강한 경우 (Case-5)는 모든 위치에서 일정한 상태를 유지하고 있고 작은 값을 나타냈다.

특히, 하류사면 (P4)에서의 공극수압을 비교하면 Fig. 12와 같이 수평필터를 보강한 경우 (Case-5)는 매우 작은 공극수압이 측정되었는데 이는 제체 중앙을 통과한 침투수가 수평필터의 영향으로 하류사면에서 신속하게 유출되어 파이프링을 방지할 수 있기 때문에 리모델링시 효율적인 방법이라고 판단된다.

Fig. 13은 코어와 수직필터가 있고 수평필터가 없는 경우 (Case 6)이고, Fig. 14는 코어와 수직필터가 있고 수평필터를 보강한 경우의 공극수압 변화를 나타낸 것이다 (Case 7). 상류사면에서의 공극수압 (P1)은 수위가 증가하면서 급격하게 증가하였고 만수위 상태에서는 일정하게 나타났다. 코어와 수직필터만 있는 경우 (Case-6)는 코어 하부, 중부, 하류사면 모두에서 점차적으로 증가하고 있고, 하류사면을 수평필터로 보강한 경우 (Case-7)는 모든 위치에서 약간씩 증가하다가 감소하고 Case-6보다는 작은 값을 나타냈다.

Fig. 15는 하류사면에서의 공극수압을 비교한 것이다. 수평필터가 설치되지 않은 경우 (Case-6)는 공극수가 원활하게 유출되지 않아 담수초기부터 공극수압이 상승하였고 침투수가 하류사면에 집중되면서 필터가 설치된 경우의 코어중부보

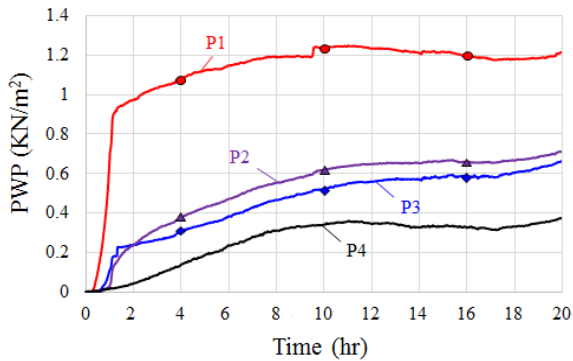


Fig. 10 Variation of pore water pressure (Case 4)

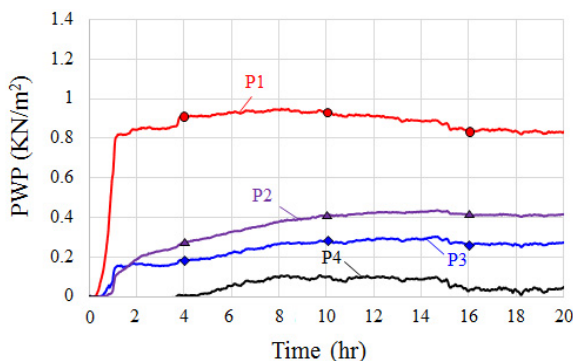


Fig. 11 Variation of pore water pressure (Case 5)

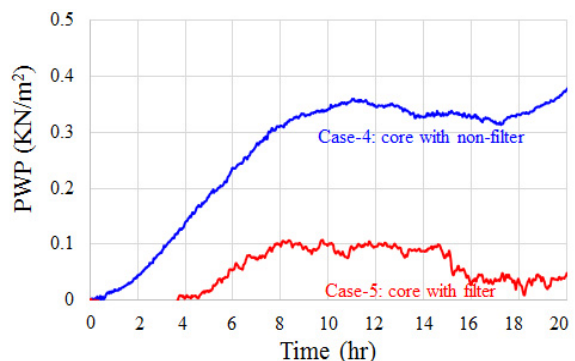


Fig. 12 Variation of pore water pressure in downstream slope (P4)

다 더 큰 공극수압을 나타내면서 증가하는 현상을 나타냈다. 필터가 설치되었을 경우(Case-7)는 공극수압의 반응도 느리고 작은 값을 나타냈다. 이 방법은(Case-7) 현재 독 높이기 시 공시에 가장 이상적인 방법으로 코어가 차수역할을 하고 통과된 침투수는 수평필터가 신속하게 배출시키기 때문에 리모델링시 가장 효율적인 방법이라고 판단된다.

이상과 같은 결과로부터 필터의 기능이 소멸된 노후화된 저수지는 리모델링시 하류사면의 일부를 절취하여 예상되는

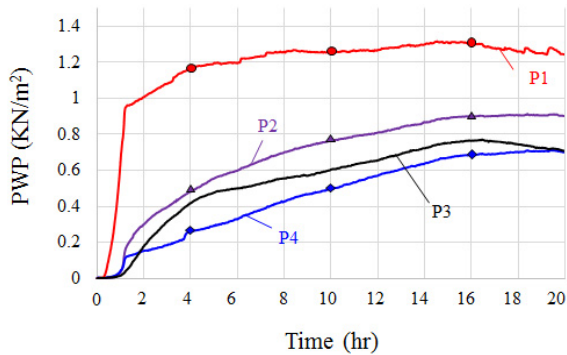


Fig. 13 Variation of pore water pressure (Case 6)

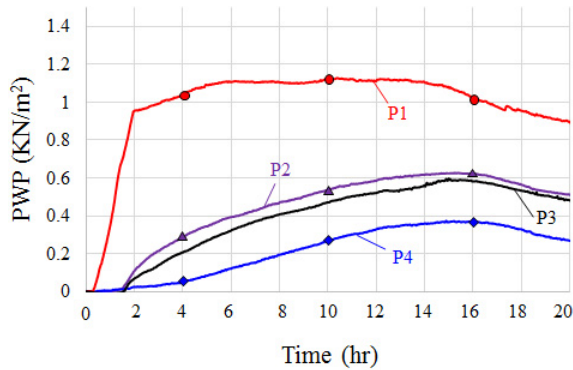


Fig. 14 Variation of pore water pressure (Case 7)

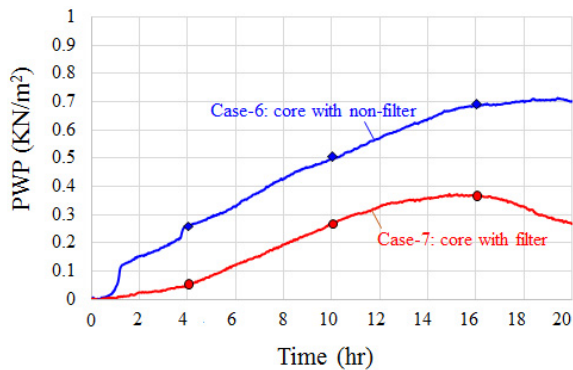


Fig. 15 Variation of pore water pressure in downstream slope (P4)

침윤선보다 높은 위치에 반드시 수직필터를 설치하고, 수평 필터는 파이핑이 발생되지 않도록 안전율 2.0 이상의 수평간격을 3-D 침투해석으로 구한 후 최종적으로 토우 드레인에 연결하여야 파이핑 현상을 방지할 수 있다.

Fig. 16은 기존 제체에 코어만 존재하고 수직 및 수평필터가 없거나 기능을 상실하였을 경우(Case-4)에 하류사면을 일부 절취하고 수평필터를 설치한 경우(Case-5)의 토압 변화를 비교분석한 것이다.

상류사면에서의 토압(E1)은 필터가 설치되지 않은 경우는 필터를 설치한 경우보다 더 큰 값을 나타냈고, 수위가 증가하면서 점차적으로 증가하였다. 코어 하부(E2)에서 필터가 설치되어 있지 않은 경우는 필터가 설치된 경우보다 완만하게 증가하고 값도 크게 나타났고, 필터가 설치된 경우는 수위가 증가함에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 하류사면(E3)에서는 필터 설치여부와 관계없이 침투수의 영향을 받지 않아 작고 큰 변화를 나타내지 않았다.

토압은 시공기간 동안 증가하다가 완공 직후부터는 담수의 영향을 받는다. 현장에서 코어 상, 하류에 필터를 설치할 경우 필터와 코어의 강성차로 인하여 아칭현상이 발생하여 응력이 전이되기 때문에 코어의 상, 하류측에 매설된 토압은 코어중앙에 비하여 상당히 크게 발생할 수 있다. 토압은 공극수압 및 저수위와 직접 관계되므로 담수 초기에 일시적으로 공극수압이 토압보다 높게 나타나면 수압할렬의 가능성이 있는 것으로 판단할 수 있다 (Costa and Alonso, 2009).

전체적으로 필터를 설치하지 않은 경우(Case-4)는 필터를 설치한 경우(Case-5)보다 더 크게 나타났고, 상류 및 하류측 모두에서 중앙의 코어보다 크지 않아 아칭현상이 발생하지 않았으며, 하류측 공극수압이 토압보다 약간 크게 나타나 수압할렬의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한 현장에서 급격한 성토시공으로 인하여 상·하류부의 응력차이가 발생되면 결국 부등침하를 일으키게 되어 불안정한 상태가 되므로

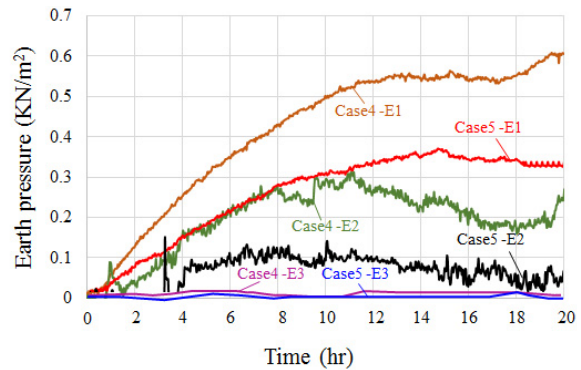


Fig. 16 Variation of earth pressure (Case-4, Case-5)

시공시 고려해야 할 것으로 판단된다.

시간에 따른 침하량은 큰 변화를 나타내지 않았고 매우 작게 나타났는데 이는 실내모형토조의 성토 높이가 작고 제체 축조시 다짐의 영향이 큰 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 노후화된 농업용저수지의 효율적인 리모델링 방법을 제시하기 위하여 코어와 필터가 없거나 노후화 되어 기능을 하지 못하는 균일형 저수지의 상류사면과 하류사면을 보강하였을 경우에 실내모형실험을 통하여 공극수압과 토압 거동을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 코어와 필터가 없는 균일형 제체 (Case-1)에서의 공극수압은 만수위 상태까지 급격히 상승하였고, 필터를 보강한 경우(Case-2)는 반응속도가 느리고 약간씩 증가하였으며, 상류사면을 보강한 경우 (Case-3)는 매우 느리고 작은 값을 나타냈다.
2. 준설토를 이용한 상류사면의 리모델링 방법은 코어와 필터가 노후화되어 차수기능과 침투기능을 하지 못하기 때문에 1차적으로 코어를 설치하여 침투수를 차단하고, 누수된 침투수는 하류사면의 필터를 통하여 신속하게 배출시켜 파이핑 현상에 대한 안정성을 높일 수 있고 아울러 저수지의 내용적을 증가시키는 매우 효율적인 리모델링 방법이라고 판단된다.
3. 코어와 필터가 없는 균일형 제체 (Case-1)의 상류사면을 준설토로 리모델링한 경우 (Case-3)에 상류사면 토압과 성토 중앙부의 토압은 수위가 증가함에 따라 급격하게 증가하고 일정한 상태를 나타냈다. Case-3의 경우가 Case-1보다 약간 더 크게 나타났고, 하류사면에서는 모든 경우에서 큰 변화 없이 유사한 값을 나타냈다. 상류사면의 토압이 성토 중앙부에서 측정된 값보다 크고 하류사면의 토압은 작기 때문에 아칭현상은 발생되지 않았으며, 상류사면의 공극수압은 같은 위치의 토압보다 약간 작거나 유사하게 나타나 수압할렬의 가능성이 없는 것으로 나타났다.
4. 코어만 있고 수직 및 수평필터가 기능을 하지 못하는 조건 (Case 4)에서의 공극수압은 코어 하부, 중부, 하류사면 모두에서 점차적으로 증가하고 있고, 하류사면을 수평필터로 보강한 경우(Case-5)는 모든 위치에서 일정하고 작게 측정되어 코어를 통과한 침투수가 수평필터로 신속하게 배출됨을 알 수 있었다.
5. 코어와 수직필터만 있는 경우 (Case 6)의 공극수압은 상

류사면에서 수위 상승에 따라 급격하게 증가하였고 코어 하부와 중부에서 점차적으로 증가하였다. 하류사면을 수평필터로 보강한 경우 (Case-7)는 공극수압의 반응속도도 느리고 Case-6보다 작은 값을 나타냈다. 이 방법은 (Case-7) 가장 이상적인 방법으로 코어가 차수역할을 하고 통과된 침투수는 수평필터가 신속하게 배출시키기 때문에 리모델링시 가장 효율적인 방법이라고 판단된다.

6. 코어만 있는 경우 (Case-4)의 토압은 수평필터를 설치한 경우 (Case-5)보다 상류사면과 코어에서 더 크게 나타났고, 하류사면에서는 필터 설치여부와 관계없이 침투수의 영향을 받지 않아 작고 큰 변화를 나타내지 않았다. 하류사면의 토압은 공극수압보다 약간 작게 나타나 수압할렬의 가능성이 있는 것으로 나타났고 아칭현상은 발생하지 않았다.
7. 앞으로 필터 기능이 소멸된 노후화된 저수지를 리모델링할 경우에는 하류사면의 일부를 절취하여 예상되는 침윤선보다 높은 위치에 수직필터를 설치하고, 수평필터의 간격은 파이핑이 발생되지 않도록 3-D 침투해석으로 구한 후 토우 드레인에 연결하여야 저수지의 붕괴가능성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 2016년도 충남대학교 학술연구비 및 2016년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: 2016R1C1B2013181).

REFERENCES

1. Chapuis, R. P. and M. Aubertin, 2001. A simplified method to estimate saturated and unsaturated seepage through dikes under steady state conditions. *Canadian Geotechnical Journal* 38: 1321-1328.
2. Chen, Q. and L. M. Zhang, 2006. Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated unsaturated seepage theory. *Canadian Geotechnical Journal* 43(5): 449-461.
3. Costa, L. M. and E. E. Alonso, 2009. Predicting the behavior of an earth and rockfill dam under construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(7): 851-862.
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2011. Filter for embankment dams: Best practice for design and construction. U.S. Department of Homeland Security.

5. Foster, M. A., R. Fell, and M. Spannagle, 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37(5): 1000-1024.
6. Japan Institute of Construction Engineering (JICE), 2012. Guide for structure investigation of river embankments.
7. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011. The project of raising embankment of agricultural reservoir. <http://www.ekr.or.kr> (in Korean).
8. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011. Guidelines for reservoirs precision safety inspections (in Korean).
9. Lee, D. W. and J. J. Noh, 2014. Behavior of failure agricultural reservoirs embankment reinforced by geotextile under overtopping condition. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 59-64 (in Korean).
10. Lee, D. W. and Y. H. Lee, 2016. Improvement of condition assessment criteria and embankment transformation of agricultural reservoirs after raising embankment. *Korean Journal of Agricultural Science* 43(2): 258-274 (in Korean).
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. The 4 major rivers restoration. <http://4rivers.go.kr> (in Korean).
12. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2002. Agricultural infrastructure fill dam design standards (in Korean).
13. Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. Guidelines for dam design (in Korean).
14. Noh, J. J. and D. W. Lee, 2014. Behavior of failure for embankment and spillway transitional zone of agriculture reservoirs due to overtopping. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 56(1): 71-79 (in Korean).
15. United States Army Corps of Engineers (USACE), 2004. General design and construction considerations for earth and rock-fill dams. Appendix B. Filter design.