차수매트 포설 범위에 따른 저수지 월류시 거동 특성

Characteristics of Reservoir Behavior According to Establishment Range of Waterproof Mat During Overflow

김영익* · 이익상** · 최돈환*** · 임은상**** · 김용성****,†

Kim, Young Ik* · Lee, Ik Sang** · Choi, Don Hwan*** · Im, Eun Sang**** · Kim, Yong Seong****,†

ABSTRACT

This study was performed to develop the embankment protection method that can reduce damage by prevention of embankment loss and collapse from overflow due to heavy rain and flood. For overflow test, model dam was prepared and embankment behaviors were monitored with the established piezometer and strain meter during overflow. As a result of overflow test for model dam, in case of embankment without waterproof mat, the lower end of embankment was collapsed within 40 seconds after beginning of overflow. On the other hand, in case of embankment with waterproof mat, embankment collapse didn't occurred during overflow. Accordingly, establishment of waterproof mat for embankment showed that be absolutely effective for the embankment protection during overflow in reservoir. Also, it showed that the minimum establishment range of waterproof mat to prevent embankment collapse in reservoir is from maximum storage level to the lower end of embankment.

Keywords: Reservoir; Overflow; Waterproof mat; Model dam; Embankment behavior

1. 서 론

우리나라의 자치단체 소관 저수지 총 14,328개소 중 87.9%에 해당하는 저수지가 70년대 이전 개발 성장기에 건설되어 노후가 심하거나 내구성이 취약하며, 축조된 지 60년 이상 경과된 노후 저수지가 전체의 56.5%를 차지하고, 시간이 경과할수록 노후화로 인한 붕괴위험, 토사 축적에 따른 유효저수량 감소 등 안전 및 기능상 문제점을 안고 있다 (Kim, 2006).

자치단체 소관 저수지의 제체 구조는 전체 14,328개소 중 14,087개소 (98.3 %)가 월류시 붕괴위험이 높은 흙댐 구조로 되어 있고, 241개소 (1.7 %)가 콘크리트 구조로 되어 있으며, 홍수조절방식도 95 % 이상이 여수토를 통한 자연월류식으로 되어 있어 홍수기를 대비한 제한수위 운영이 불가능하며 다음 해의 생활용수 및 농업용수 확보를 위해 저수위를 일정 부분까

지 유지하려는 저수지 관리기관의 관습과 더불어 최근의 범지구적인 이상기후 현상에 의한 집중호우로 월류에 의한 저수지 붕괴위험이 높아 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다.

또한, 집중호우 등으로 자치단체 소관 저수지의 제체가 붕괴되는 경우 하류지역의 주민 11만여 가구 26만여 명, 건물 5만 8천여 동, 농지 9만5천여 ha가 침수되거나 유실되는 피해를 유발하게 될 것으로 조사된 바 있다 (Kim, 2006). 따라서, 이상기후, 노후화 진행, 유지보수 소홀 등 저수지 관리 여건에 비추어 재해취약 저수지에 대하여 수해에 강할 수 있도록 하는 구조적 개선과 관리체계의 혁신이 시급히 요청되고 있다.

본 연구는 흙댐 구조의 저수지에서 집중호우 및 홍수로 인하여 월류 발생시 차수매트 포설 범위에 따른 제체의 거동 특성에 대해 연구하고자 한다.

이와 유사한 연구로서는 국외의 경우 월류시 저수지 침식에 대한 거동 평가 (Powledge and Dodge, 1985; Toledo, 1997; Hanson and Temple, 2001; Chinnarasri et al., 2004; Lemperiere et al., 2006), 흙댐 월류시 원심모델링 (Dunn et al., 1984), 월류시 사력댐 파괴의 초기 상태에 대한 실험적 고찰 (Powledge and Dodge, 1985; Toledo et al., 2006) 등의 연구가 수행된 바 있다.

저수지의 붕괴 메커니즘은 여러 연구자들에 의해 연구되었는데, Hanson and Temple (2001)은 월류에 의한 제체에서의

* 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목학과

** (주)한울플러스

*** 한국농어촌공사 강릉지사

**** 한국수자원공사 수자원연구원

***** 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6463

Fax: +82-33-251-6463

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr

2010년 2월 10일 투고

2010년 3월 17일 심사완료

2010년 3월 18일 게재확정

침식은 일정하지 않으며, 계단모양의 세굴공이 발달하여 매우 난류적 상황 속에서 상류로 확산되고 하류로도 세굴되는 것으로 보고하였다.

Toledo et al. (2006)은 월류에 의한 필댐의 붕괴 프로세스는 초기상태 및 붕괴상태로 구분할 수 있는데 붕괴에 이르는 과정인 초기상태에 초점을 맞춰 홍수량과 세굴 깊이, 세굴 범위, 사면 길이 등과의 관계에서 파괴경로 (failure path), 붕괴 진전도 (degree of breach advance) 등에 대하여 정의하고 침식의 초기상태의 중요성에 대해 지적하였다.

Lemperiere et al. (2006)은 제정에서의 월류의 유속은 대개 $2\sqrt{h}$ (여기서, h 는 월류 깊이)로서 $h < 0.5$ m이면 유속은 1 m/s정도가 되며 이때에는 침식에 대한 위험성은 매우 적게 되고 월류 깊이가 클 때 침식은 제정이 아닌 사면이나 사면선단에서 발생하게 된다고 주장하였다.

또한, 식생의 활착 및 강한 뿌리 구조는 댐의 기능을 유지하고 침식의 피해를 저감하는데 도움이 되며, 식생은 표면 저항 제공, 유속의 저감, 식생 뿌리 구조에 의한 표층토의 강도 증진 등의 역할을 수행한다 (Hughes and Hoskins, 1994).

Hanson and Temple (2001)은 실험을 통해 제체의 사면에 식생이 있을 경우 매우 적은 침식이 발생했으나, 식생이 없는 경우에는 제정 근처에서 거의 수직 세굴공으로 발전되는 최대 침식이 관찰되었다고 보고하고 식생의 중요성을 강조하였다.

Fread (1977)는 붕괴 상단의 폭 B 와 댐 높이 H 와의 관계는 $H \leq B \leq 3H$ 범위에 있다고 하였고, Singh (1982)는 $2H \leq B \leq 5H$ 의 범위에 있으며, MacDonald (1984)는 댐 붕괴에 관한 자료들을 정리한 결과 B 의 값은 $H \leq B \leq 5H$ 의 범위에 있는 것으로 판단하였다.

한편, 저수지의 월류에 대한 경험적 평가 (Hughes and Hoskins, 1994), 균일형 사질댐에 대한 월류량 추정 (Coleman et al., 2002) 등의 연구가 수행한 바 있으나 실험에 의한 월류시 제체보호기법 개발 연구는 매우 적은 편이다.

국내에서도 이러한 경향은 유사하며, 저수지 설계 및 저수량에 관한 연구 (Chung et al., 1998; Jang et al., 2005; Ahn et al., 2007), 하천 제방의 붕괴 연구 (Lee and Lee, 2001), 하천 제방 재해 예방을 위한 축조 재료 연구 (Jeong and Kim, 2006) 등 저수량 설계 및 하천 제방과 관련한 연구 등은 활발하게 진행되고 있지만 저수지 월류시 제체보호기법에 관한 연구는 찾기 힘든 실정이다.

본 연구는 집중호우로 인해 불가피하게 저수지가 월류하는 조건이 형성되는 경우 차수매트를 이용, 제체를 보호하여 저수지가 붕괴되는 상황을 막도록 하는 제체보호기법을 개발하기 위한 기초적 연구로서 저수지 월류시 차수매트 포설 범위에 따른 제체의 거동 특성에 대해 연구하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 축조 재료

저수지 모형 제작 시 대상 저수지는 실험규모, 실험내용과 환경 조건 및 실험 재료 등을 고려하여 가능한 저수지 모형 제작 및 실험 시 상사의 법칙을 만족시킬 수 있는 적절한 저수지를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 상기와 같은 연구 내용을 구현할 수 있도록 흙댐 구조로서 강릉에 위치한 장현저수지를 대상 저수지로 선정하였다.

저수지 모형실험에 사용된 코어재료 및 사력재료는 장현저수지 건설 당시 토취장이었던 강원도 강릉시 장현저수지 우안의 산지에서 채취하여 사용하였으며 축조재료의 물성치는 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Size curves of materials for fill dam construction

Table 1 Physical properties of the fill dam materials

Fill dam type	Specific gravity (Gs)	Water content (%)	Unit weight		Liquid limits (%)	Plastic index	USCS	Hydraulic conductivity (cm/sec)
			(γ_d)	(γ_t)				
Core	2.672	24.7	1.634	1.936	37	12	SC	2.96×10^{-7}
Shell	2.669	16.1	1.880	2.062	N.P.	N.P.	SW	6.11×10^{-6}

2. 저수지 모형 설계 및 축조

가. 저수지 모형 설계

장현저수지의 1/60 축척을 적용하여 저수지 제체 모형의 높이와 제체 경사 및 폭을 결정하였으며, 상사 재료에 준하여 모형의 중심 코어는 점토를 활용한 불투수성 존으로 하였고, 제체는 밀도 일정 조건을 만족할 수 있도록 설계하였다. 또한, 홍수량 유입 시 월류심에 따른 제체의 거동 특성을 분석하기 위한 충분한 여유고를 확보할 수 있도록 축벽의 높이를 결정하

Fig. 2 Design section of model dam

였으며, 저수지 모형의 설계 단면은 Fig. 2와 같다.

저수지 모형은 축조 후 하중을 충분히 견딜 수 있고 월류시 제체를 통과하는 유황을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 모든 외형을 강성 아크릴 판으로 제작하였으며, 아크릴판의 부재와 부재는 아크릴 접착에 사용되는 특수 접착제를 사용하여 수압 및 하중을 지지할 수 있도록 제작하였고, 물의 침투 및 누수를 방지하기 위하여 접착면을 모두 실링 처리하였다. 또한, 저수지 모형실험 시 수위의 상승 및 월류, 제체의 거동을 모형과 동일한 높이에서 육안으로 쉽게 식별할 수 있도록 모형 지지대를 설치하였다.

나. 저수지 모형 축조

중심 코어는 불투수성 존으로 점토를 사용하였으며, 축조 시 변형 및 붕괴가 발생하지 않도록 코어 축조용 거푸집을 제작하였고, 일정한 밀도를 유지할 수 있도록 10단계로 분할하여 충분한 층 다짐을 실시하여 축조하였다.

한편, 사력재료는 중심 코어를 한 단계 축조 후 제체용 측벽 거푸집을 이용하여 양쪽에서 동시에 축조하였으며, 동일한 다짐 밀도를 나타낼 수 있도록 층별 소요 재료량을 산출하여 함수비를 일정한 수준으로 유지하여 다짐을 실시하였다. 또한, 모형에 대한 월류 시험시 물이 제체의 측면에 침투되지 않도록 측면 다짐에 각별한 주의를 하였다.

3. 계측기 매설

본 연구에 사용된 계측기는 간극수압계 및 변위계로 구성되며, 각각의 계측 장비로부터 실시간으로 수압 및 제체의 거동 변위를 분석할 수 있도록 동적변형 데이터로거를 설치하였다.

간극수압계는 월류시 제체 상류 사면에서의 수압의 변화를 측정하고, 월류에 따른 제체 하류사면의 유효응력을 산출하기 위하여 제체의 하류사면에 제체 축조와 함께 매설하였으며, 변위계는 월류시 차수매트 설치 및 포설 규모에 따른 제체의 거동을 분석하기 위하여 제체 축조 완성 후 제체의 하류사면에 설치하였다. Fig. 3은 간극수압계 및 변위계의 설치 위치를 나

Fig. 3 Establishment point of piezometer and strain meter

(a) Dynamic data logger

(b) Maximum storage level view

Photo 1 Dynamic data logger and maximum storage level view in model dam

타낸다.

4. 월류 시험

월류시 제체 사면에 차수매트 설치 방법에 따른 제체의 거동 및 붕괴 특성을 분석하기 위하여 차수매트 설치 범위를 총 4 Case로 구분하여 월류시험을 실시하였다. 차수매트를 설치하지 않은 Case 1, 차수매트를 제체의 만수위 지점부터 제정(crest)까지 설치한 Case 2, 차수매트를 제체의 만수위 지점부터 하류사면의 1/3지점까지 설치한 Case 3 및 차수매트를 제체의

만수위 지점부터 제체 하류사면 전체에 설치한 Case 4로 구분하여 시험을 실시하였다.

모형실험에서 유량이 지속적으로 제체를 월류하여 하류사면을 통과할 수 있도록 유량을 $2,800 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 설계하였으며, 유량공급조절장치를 통하여 공급하였다. 또한, 저수지 모형 완성 후 월류 시험 전에 유량을 공급하여 만수위 상태를 유지하여 제체에 충분한 침투가 이루어져 실제 저수지의 침투조건과 유사한 경향을 나타내도록 하였다. Photo 1은 데이터로거 및 댐 모형에서 만수위 모습을 보여준다.

III. 결과 및 고찰

저수지 월류 시 제체 거동 및 붕괴 특성을 분석하기 위하여 유량공급조절장치를 통하여 지속적으로 $2,800 \text{ cm}^3/\text{s}$ 의 유량을 공급하였으며, 유량 공급 개시 후 5초 만에 만수위에서 저수지 제정에 도달하였고, 모든 시험에서 월류고는 2 cm를 나타내었다. 간극수압은 간극수압계의 측정가능 범위에 비해 실제 월류량이 미미하여 초기 상태와 실험 후의 값이 거의 일정하게 나타나 분석 대상에서 제외하였다.

1. 차수매트 미설치 시

차수매트 미설치 시에 대한 시험에서, 월류가 계속적으로 지속되면서 월류 시작 후 10초가 경과한 시점에서 제체의 하류사면 중간 부분에서 붕괴가 발생되기 시작하였으며, 20초가 경과한 시점에서는 제체의 하류사면 하단에서 붕괴가 진행되기 시작하였다. 월류 시작 후 30초가 경과한 시점에서 제정 부분에서 붕괴가 시작되었으며, 제정의 붕괴가 시작된 시점으로부터 2~3초가 경과하면서 중심 코어가 노출되기 시작하였다. 차수매트 미설치시 월류가 시작된 이후 빠른 시간 내에 제체의 붕괴가 진행되는 것으로 나타났으며, 중심 코어가 노출되면서 제체의 붕괴가 급속히 빠르게 진행될 뿐만 아니라 월류가 지속되면서 제체의 하류사면이 전체적으로 모두 붕괴되는 경향을 나타내었다. Photo 2는 댐 모형에서 월류 모습 및 지속적인 월류에 따른 제체의 붕괴 모습을 보여준다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 월류가 지속되면서 제체 하류사면의 1/3지점 및 2/3지점에서 변위는 30 mm 및 35 mm까지 측정된 후 측정범위를 벗어나 실제로는 이보다 더 큰 변위가 발생될 것으로 판단된다. 1/60 스케일을 감안한다면 약 2 m 이상의 침식이 발생된 것으로 볼 수 있고, 제정에서의 측정기록은 45초 이후부터 측정 한계를 벗어나 기록되지 않았으며 시험 후의 관찰로 판단해 본다면 제체 높이의 절반이 유실된 것을 알 수 있었다.

Fig. 4 Strain of embankment with overflow time in case 1

(a) Overflow view

(b) Embankment collapse view by overflow

Photo 2 Overflow test view in case 1

2. 만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시

만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시에 대한 시험에서, 월류가 계속적으로 지속되더라도 불구하고 월류 시작 후 50초가 경과한 시점까지는 제체 하류사면의 위치 및 차수매트 포설에 관계없이 제체의 침식 또는 붕괴가 발생하지 않았으며,

월류 시간이 60초를 경과하면서 차수매트를 포설한 제체 상부 부분을 제외한 다른 제체 하류사면의 선단부분에서부터 붕괴가 발생되기 시작하였다. 월류 시작 후 1분 40초가 경과하면서 차수매트가 설치된 제정 상부를 제외한 제체 하류사면의 선단부분부터 붕괴가 상류쪽으로 점차 확장되었으며, 중심 코어는 제

Fig. 5 Strain of embankment with overflow time in case 2

(a) Overflow view

(b) Embankment collapse view by overflow

Photo 3 Overflow test view in case 2

체 상부에 설치된 차수매트의 영향으로 침식 및 붕괴가 발생되지 않았다. Photo 3은 댐 모형에서 월류 모습 및 지속적인 월류에 따른 제체의 붕괴 모습을 보여준다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 만수위 지점부터 제정까지 차수매트 설치 시 월류에 따라 차수매트를 포설하지 않은 제체 2/3지점 및 1/3지점에서 각각 40 mm 및 28 mm의 변위가 계측되었으며 이후 계측한계를 벗어나 실제 변위는 이보다 더 클 것으로 판단되고 Photo 3에서 보는 바와 같이 제체 중간부분에서 붕괴된 토사가 월류와 함께 제체 하류사면의 하단에 퇴적되었다. 반면에 차수매트를 포설한 제체 상부는 월류의 지속 시간과 관계없이 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 차수매트의 포설이 월류시 유수에 의한 침식을 억제함으로써 제체 붕괴방지에 탁월한 효과를 가지는 것으로 나타났다.

차수매트 미설치 시 제체 하류사면의 붕괴와 함께 제체 중심 코어가 붕괴되어 제체가 유실되는 것에 비하여 차수매트를 제정에만 설치하더라도 제체 중심 코어의 붕괴 방지 및 저수량을 확보할 수 있는 것으로 나타나 우기 시 제체의 상부에 대한 관리만 잘 하더라도 제체가 완전히 붕괴하여 저수량이 홍수량으로 되어 저수지 하류에 막대한 피해를 입히는 일은 없을 것으로 판단된다.

3. 만수위 지점부터 제체 1/3지점까지 차수매트 설치 시

만수위 지점부터 제체 1/3지점까지 차수매트 설치 시에 대한 시험에서, 월류가 계속적으로 지속되면서 월류 시작 후 10초가 경과한 시점에서 차수매트를 포설하지 않은 제체 하류사면의 선단에서 침식 및 붕괴가 발생하기 시작하였으며, 차수매트를 포설한 제정으로부터 제체 1/3지점까지는 침식 및 붕괴가 발생되지 않았다. Photo 4는 댐 모형에서 월류 모습 및 지속적인 월류에 따른 제체의 붕괴 모습을 보여준다.

Fig. 6 Strain of embankment with overflow time in case 3

(a) Overflow view

(b) Embankment collapse view by overflow

Photo 4 Overflow test view in case 3

월류가 계속됨에 따라 월류 시작 시점으로부터 15초가 경과 하면서 차수매트를 포설하지 않은 제체 하류사면의 선단에서 제체의 붕괴가 급속하게 진전되는 것으로 나타났으며, 제체 하류사면의 선단을 제외한 나머지 제체 하류사면이 원래 형태를 그대로 유지하였다. 월류 후 20초가 경과하면서 차수매트를 포설하지 않은 제체 하류사면의 하단은 완전히 붕괴되었으며, 계측 한계도 초과하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 계측기록이 일정한 값에서 고정되어 있는 것을 볼 수 있다.

제체 1/3지점까지 차수매트 설치 시 월류에 따라 제체 1/3지점에서 약 42 mm의 변위가 계측되었으며 이후 계측한계를 벗어나 실제 변위는 이보다 더 클 것으로 판단된다. 반면에 차수매트를 포설한 제체 제정으로부터 제체 1/3지점에 약간 못 미치는 지점까지는 월류의 지속시간과 관계없이 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 나타나 차수매트 설치 유무에 따라 월류에 대한 영향이 전혀 다른 양상으로 전개됨을 알 수 있다.

4. 만수위 지점부터 하류사면 전체에 차수매트 설치 시
만수위 지점부터 하류사면 전체에 차수매트 설치 시에 대한

Fig. 7 Strain of embankment with overflow time in case 4

(a) Overflow view

(b) Embankment collapse view by overflow

Photo 5 Overflow test view in case 4

시험에서 월류가 계속적으로 지속됨에도 불구하고 제체 하류사면에 어떠한 침식 및 붕괴도 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 월류 시작 후 2분이 경과한 시점에서 차수매트를 포설한 제체 하류사면에서 월류 초기 시점과 마찬가지로 침식 및 붕괴가 전혀 발생되지 않는 것으로 나타나 차수매트를 설치하지 않았을

경우 월류 시작 후 40초 이내에 제체의 하류사면이 거의 붕괴된 것과 비교할 때 차수매트를 포설할 경우 월류시 제체 보호에 탁월한 효과가 있는 것으로 나타났다. Photo 5는 댐 모형에서 월류 모습 및 지속적인 월류 후 제체의 최종 모습을 보여준다.

한편, 차수매트를 포설하지 않은 제체의 하류사면은 월류가 4분 동안 진행되는 경우 완전한 붕괴에 도달하는 반면에 차수매트를 제체 하류사면 전체에 설치한 경우에는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 어떠한 제체 변화도 없는 것으로 나타나 집중호우 및 태풍 등에 의한 월류시 차수 구조에 의한 제체보호를 통하여 피해 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

월류로 인한 제방붕괴 양상에 영향을 미치는 인자로서는 다짐도, 축조재료, 마루폭, 비탈경사 순으로 크며, 붕괴지속시간을 지연시키고 침투월류량을 저감시키기 위해서는 마루폭을 넓히고 비탈경사를 완화하는 것도 중요하지만 내침식성과 차수성이 양호한 축조재료의 선택과 아울러 충분한 다짐으로 축조하는 것이 가장 효과적이다 (Lee and Lee, 2001).

흙댐에서 홍수류의 힘이 사력재료의 저항하는 힘보다 크게 될 때 침식이 발생되며, 붕괴 면적은 댐을 월류하는 시간과 월류량, 불투수성 요소의 위치, 댐의 형상, 축조재료의 다짐도, 축조재료의 물성, 식생 등에 의존한다 (Hanson and Temple, 2001).

필댐의 붕괴지속시간 (T)은 축조재료의 침식성에 크게 좌우되며, 비교적 견고하게 축조된 흙댐의 경우 $0.5 \leq T \leq 3.0$ 시간, 일반 흙댐의 경우 $0.1 \leq T \leq 0.5$ 시간 범위로 알려져 있다 (Fread, 1977; Singh, 1982; MacDonald, 1984).

Ralston (1987)은 사면경사가 1:2 또는 1:3정도의 점성토로 축조된 제체에서 월류는 결과적으로 표면의 침식, 불연속면의 형성, 세굴공의 발달을 야기하며, 세굴공의 깊이와 넓이는 점차 더 깊어지고 넓어지면서 점진적으로 상류방향으로 진행해가고, 제체의 붕괴는 그 세굴공이 제정을 거쳐 상류사면으로 이동할 때 발생하며, 사질토로 축조된 제체의 경우 침식은 일정하지만 점차적으로 완만한 경사를 이루게 된다고 주장하였다.

이상의 문헌 고찰과 월류 실험 결과들을 종합하면, 일반 흙댐의 경우 월류하는 상황에서 0.5시간 등의 짧은 시간 내에서는 제체가 붕괴되지 않고 견딜 수 있으나, 월류가 지속되면 하류사면의 선단부분에서 침식이 발생하게 되고, 세굴공이 형성되어 상류사면 쪽으로 점차 진전되면서 제정까지 확대되면 제체는 붕괴에 이르게 된다.

저수지 월류시 제체를 보호하기 위해서는 상하류 사면에 식생의 도입이 매우 중요하며 활착된 식생은 어느 정도 침식의 피해를 저감할 수 있는 것으로 판단된다.

저수지 월류시험에서 차수매트를 설치함으로써 침식 또는 붕

괴 피해를 막을 수 있었으며 저수지 붕괴를 막을 수 있는 최소한의 포설 범위는 만수위 지점부터 제정 (하류 비탈머리 부근)까지인 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 흙댐 구조의 저수지에서 집중호우 및 홍수로 인하여 월류 발생시 차수매트 포설 범위에 따른 제체의 거동 특성에 대해 구명하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 저수지 월류시 홍수류에 의한 월류가 지속되면 저수지 하류사면의 선단부분에서 침식이 발생하게 되고, 세굴공이 형성되어 상류사면 쪽으로 점차 진전되면서 제정까지 확대되는 양상으로 붕괴되는 것으로 판단된다.

2. 저수지 월류 모형실험에서 제체 1/3지점까지 차수매트 설치 시 월류의 영향으로 제체 1/3지점에서 상당한 변위가 발생하였으나, 차수매트가 포설된 제체 제정으로부터 제체 1/3지점에 약간 못 미치는 지점까지는 월류의 지속시간과 관계없이 변위가 거의 발생하지 않아 차수매트에 대한 저수지 월류시 제체 보호공법으로의 활용 가능성이 확인되었다.

3. 저수지 월류 모형실험에서 저수지 월류시 차수매트를 설치하지 않았을 경우 월류 시작 후 수 십초 이내에 제체의 하류사면이 거의 붕괴되거나 차수매트를 포설한 경우 침식이 전혀 발생하지 않는 것으로 나타나 차수매트는 저수지 월류시 제체 보호에 효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 저수지 월류 모형실험에서 저수지 월류시 차수매트를 설치함으로써 붕괴 피해를 막을 수 있는 것으로 나타났으며 저수지 붕괴를 막을 수 있는 최소한의 차수매트 포설 범위는 만수위 지점부터 제정 (하류 비탈머리 부근)까지 인 것으로 판단된다.

본 연구는 원심모형실험을 이용하여 저수지 월류시 제체의 거동 특성을 분석하기 전 단계에서 1G 조건하에서의 저수지 월류시 제체의 거동 특성을 분석하고 이를 토대로 원심력장에 필요한 제반 물성 및 실험 수행 조건 등을 결정하도록 하기 위한 예비적 시험 연구이다. 앞으로 후속 연구를 통해 60G 조건의 원심력장에서의 저수지 월류시 제체의 거동 특성을 분석하여 저수지 월류시 제체보호기법을 개발하고자 하며, 이러한 제체보호기법은 저수지가 붕괴될 경우 저수량이 홍수량으로 바뀔 수도 있는 상황에서 저수지의 붕괴를 막아 홍수로 인한 하류의 인명과 재산피해를 줄이는데 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2009년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2009-0068155) 및 강원대학교 농업생명과학연구원의 기자재 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Ahn, S. R., M. J. Park, G. A. Park, and S. J. Kim, 2007. The effect of meteorological factors on the temporal variation of agricultural reservoir storage, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 49(4): 3-12 (in Korean).
2. Chinnarasri, C., T. Tingsanchali, and S. Wongwises, 2004. A laboratory study of peak discharge and erosion profile during embankment overtopping, *Dam Engineering* 14(4): 233-256.
3. Chung, H. W., T. S. Park, and J. Y. Choi, 1998. Development of the optimal reservoir storage determination model for supplying rural water, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 40(2): 69-80 (in Korean).
4. Coleman, S. E., D. P. Andrews, and M. G. Webby, 2002. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankment, *Journal of Hydraulic Engineering* 128(9): 829-837.
5. Dunn, R. J., E. Simantob, and H. Y. Ko, 1984. Centrifuge modeling of earth dam overtopping, *Proc. of 5th Engineering Mechanics Division Specialty Conference* 1320-1323, Laramie, Wyoming: ASCE.
6. Fread, D. L., 1977. The development and testing of a dam-break flood forecasting mode, *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council*.
7. Hanson, G. J. and D. M. Temple, 2001. Evaluating mechanics of embankment erosion during overtopping, *Proc. of 7th Federal Interagency Sedimentation Conference* 24-30, Reno, Nevada St.
8. Hughes, A. K., and C. G. Hoskins, 1994. A practical appraisal of the overtopping of embankment dams, *Reservoir Safety and Environment* 260-270. Thomas Telford, London.
9. Jang, J. S., J. H. Chung, and S. S. Bae, 2005. Application of PMF on reinforcement design of agricultural reservoirs against disaster, *Proc. of the 2005 KSAE Annual Conference* 324-329, KSAE (in Korean).
10. Jeong, W. S., and Y. S. Kim, 2006. Characterization of cemented sand for building of levee, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 6(4): 29-36 (in Korean).
11. Kim, Y. S., 2006. Problems and improvement method of safety management of reservoir, *Disaster Prevention Review* 8(1): 55-64 (in Korean).
12. Lee, J. T., and S. T. Lee, 2001. An experimental study on the collapse phase of a river levees(II), *Journal of Korea Water Resources Association* 34(2): 155-167 (in Korean).
13. Lemperiere, F., J. R. Courivaud, and J. J. Fry, 2006. A new analysis of embankment dam failures by overtopping, *Transactions of the International Congress on Large Dams* 1053-1066, Barcelona: International Commission on Large Dams.
14. MacDonald, T. C., and J. Langridge-Monopolis, 1984. Breaching characteristics of dam failures, *Journal of Hyd. Div.* 110(5): 567-585.
15. Powledge, G. R., and R. A. Dodge, 1985. Overtopping of small dams - an alternative for dam safety, *Proc. of the Special Conference, Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age* 1071-1076: ASCE.
16. Ralston, D. C., 1987. Mechanics of embankment erosion during overflow. *Proc. of the 1987 National Conference of Hydraulic Engineering* 751-757, ASCE.
17. Singh, K. P., 1982. *Dam safety program*, Univ. of Illinois, Champaign, Illinois.
18. Toledo, M. A., 1997. Embankment dams slip failure due to overtopping, *Transactions of the International Congress on Large Dams* 317-330, Florence: International Commission on Large Dams.
19. Toledo, M. A., M. B. Pisfil, and A. Die Moran, 2006. Initiation phase of rockfill dams breaching by overtopping, *Transactions of the International Congress on Large Dams* 507-518, Barcelona: International Commission on Large Dams.