

댐 월류 수리실험을 통한 사면붕괴지연 성능인자 도출

이성우¹ · 김동현² · 이승오^{3*}

¹성균관대학교 건설환경공학과 석박통합, ²홍익대학교 건설환경공학과 연구교수, ³홍익대학교 건설환경공학과 교수

Performance Factors for Delaying Slope Failure through Hydraulic Experiments of Dam Overtopping

Sung Woo Lee¹, Dong Hyun Kim², and Seung Oh Lee^{3*}

¹M.S. & Ph.D. Combine Student, Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

²Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

요약

국내 저수지의 대부분 흙댐으로 되어있다. 흙댐은 건설비용이 저렴하고, 용이한 시공성을 가지고 있기 때문이다. 그러나 흙댐은 침투나 월류에 매우 취약하기 때문에, 과도한 홍수량이 발생하였을 경우 급격한 붕괴 가능성이 매우 높다. 급격한 붕괴는 급격한 홍수량 증가로 이어져, 하류 하천 또는 민가에 매우 큰 피해를 발생시킬 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 흙댐 사면에 포설한 사석의 흙댐 붕괴 지연효과에 대해 실험연구를 수행하였다. 붕괴시간이 지연되면, 대피시간을 확보하여 인명 피해를 크게 줄일 수 있기 때문에 재난 대응 관점에서 큰 의미가 있다고 판단된다. 수리실험은 직선형 개수로에서 수행하였으며, 보호공 사석의 크기를 2가지로 결정하였다. 기존 선행 실험과는 달리 실험을 부정류로 수행하였으며 이를 통해 댐 내부의 수위 상승 변화 효과를 반영하였다. 대상댐은 도수터널에 설치된 가물막이 댐으로 결정하였다. 실험결과 수행한 실험조건에서 사석보호공이 있는 경우 사면의 붕괴를 방지할 수 있었고, 사석보호공이 없는 경우 사석의 입경 증가에 따라 붕괴 시간 지연 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 침투 유출량 감소로 댐 하류부의 피해를 감소시키는 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 저수지 붕괴에 대한 비상대처계획(EAP) 수립 시 주요 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어: 저수지, 호소, 수리실험, 사면 보호공, 수영향 평가

ABSTRACT

Most reservoirs in South Korea are earthen dams, mainly because they are cost-effective and easy to construct. However, earthen dams are highly vulnerable to seepage and overtopping, making them prone to sudden failure during excessive flooding. Such sudden failures can lead to a rapid increase in flood discharge, causing significant damage to downstream rivers and inhabited areas. This study investigates the effect of riprap placement on the slopes of earthen dams in delaying dam failure. Delaying the failure time is crucial as it allows more time for evacuation, significantly reducing potential casualties, which is essential from a disaster response perspective. Hydraulic experiments were conducted in a straight channel, using two different sizes of riprap for protection. Unlike previous studies, these experiments were performed under unsteady flow conditions to reflect the impact of rising water levels inside the dam. The target dam for the study was a cofferdam installed in a diversion tunnel. Experimental results indicated that the presence of riprap protection effectively prevented slope failure under the tested conditions. Without riprap protection, increasing the size of the riprap delayed the failure time.

*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1726-3694>

Received: 7 June 2024, Revised: 15 June 2024, Accepted: 17 June 2024



This delay can reduce peak discharge, mitigating damage downstream of the dam. Furthermore, these findings can serve as critical reference material for establishing emergency action plans (EAP) for reservoir failure.

Keywords: Reservoir, Lake, Hydraulic experiment, Slope protection, Hydraulic impact assessment

1. 서론

국내에는 17,649개의 농업용 저수지가 있으며, 이 중 95.3%가 준공된 지 30년 이상 경과된 노후화된 댐이다(KRC, 2008). 국가수자원관리정보시스템(WAMIS)에서는 국내에 건설된 저수지의 사면보강공법을 조사한 결과 57%에 해당하는 저수지 사면이 인공적인 보강재가 없이 건설되었기 때문에, 월류로 인한 침식에 매우 취약할 것으로 판단된다. 국내에 설치된 저수지의 대부분이 농업용저수지이며, 수문으로 인한 배수가 아닌 자연월류식 배수를 하고 있기 때문에, 설계빈도를 초과한 홍수가 발생하였을 경우 저수지를 월류할 가능성이 있다. 대표적인 피해 사례로 2002년 태풍 루사로 인해 발생한 집중호우로 강원도 강릉 장현, 동막 저수지가 설계 홍수량을 초과하는 유입 유량으로 인해 월류되어 붕괴되었다(NEMA, 2002). 최근에는 정읍의 노은저수지가 월류로 인해 붕괴되어 하류부에 큰 피해를 주기도 하였다. 이처럼 저수지의 붕괴는 그 시기를 정확히 예측하기 어려우며, 한번 월류가 시작되면 급격한 붕괴로 이어지기 때문에, 하류 하천 주변의 인명피해가 발생할 가능성이 매우 크다. 일부 댐에서는 비상대처계획(emergency action plan, EAP)이 수립되어 있으나, 급작스럽게 붕괴되는 월류형 붕괴의 피해를 크게 줄이기란 쉽지 않다. 결국 붕괴 시간의 지연을 통해 EAP의 효율성을 극대화하여, 인명과 재산 피해를 줄일 수 있다면, 재난 대응관점에서 큰 의미가 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 흙댐의 경사면에 사석배치를 통해서 월류를 통한 붕괴 시간 지연에 대한 연구를 수행하였다.

댐의 붕괴와 관련된 기존의 연구들을 살펴보면 Han(1986)은 흙댐의 붕괴로 발생하는 유출수문곡선을 산정하고, 임의 댐 붕괴 높이와 지속시간 변화에 따른 침투유출량 및 유출수문곡선에 관한 식을 제시하였다. 저수지 붕괴 실험에 대한 연구사례 보다는 붕괴형태가 유사한 하천 제방과 관련된 실험연구는 다수 조사되었다. Lee and Lee(2001)는 기존 하천제방 단면들을 기준으로 폭과 경사도 등 기하학적 특성들을 변화시켜 각 특성치들이 실험결과에 주는 영향을 분석하였으며, Kim(2001)은 월류에 의한 제방붕괴 해석을 통해 발생한 제방의 붕괴폭과 지속시간에 관한 연구를 수행하였다. Lee and Noh(2012)는 월류에 의한 저수지 제체 붕괴 거동에 관해서 연구하여 월류시 붕괴거동과 침투 해석, 사면 안정에 관한 연구를 수행하였다.

국외의 연구로는 Cristofano(1965)가 최초로 흙댐 붕괴 양상에 관한 연구를 수행하였으며, MacDonald and Langridge-Monopolis(1984)는 댐 붕괴의 일반적 특성에 대한 연구를 수행하여, 붕괴 단면의 형상, 규모, 발달시간, 침투 유출량에 대해 연구하였다. Coleman et al.(2002)는 제체 월류 흐름에 대한 제체 붕괴 형상 발달과정에 대해 연구하였고, Chinnarasri et al.(2003)은 제체 붕괴 양상을 경사, 유량 변화 등에 대해 실험하였다. 이러한 연구들은 사면 붕괴 시간보다는 제체의 붕괴 과정과 메커니즘에 관한 연구이다. 현재까지 이와 관련한 연구로는 Joo et al.(2013)의 사례가 있으나, 이는 특수한 형태의 보호공을 사면에 설치하여 붕괴속도의 감소 효과에 대해 연구한 것이며, 본 연구가 제시하고 있는 사석에 의한 붕괴 지연효과에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 국내 댐 가물막이를 대상으로 하여, 실험을 통해 흙댐 사면에 사석을 포설하고, 사석으로 인한 붕괴 지연효과에 대한 연구를 수행하였다. 실제 월류 현상과 가깝게 실험을 재현하기 위하여, 부정류로 유량을 공급하여, 수위 변화를 재현하였으며, 고성능 카메라를 통해 붕괴 양상을 분석하였다. 본 연구 결과를 실무에 적용한다면, EAP를 통해 얻을 수 있는 인명, 재산 피해는 크게 경감될 수 있을 것이라 판단된다.

2. 댐 붕괴 매커니즘

2.1 댐 붕괴 시간

흙댐 붕괴시간에 대한 연구는 유사의 거동 특성이 매우 복잡하기 때문에, 수치적으로 해결하기에는 한계가 있으며, 대부분 실험을 통해 결과를 도출하였다. MacDonald and Langridge-Monopolis(1984)는 댐의 붕괴 시 붕괴된 제체의 부피를 이용하여 붕괴에 걸리는 시간을 산정하는 식 (1)을 제안하였다.

$$t_f = 0.0179 (\nabla_{eroded})^{0.364} \quad (1)$$

여기서, ∇_{eroded} 는 댐 붕괴로 인해 침식된 제체 부피(m^3), t_f 는 댐 붕괴에 걸리는 시간(hr)이다. 그러나 댐 붕괴로 인하여 침식된 제체의 부피를 측정하는 것은 쉽지 않으며, 흙의 종류에 따른 영향을 많이 받는다. Froehlich(1995)는 댐 붕괴에 걸리는 시간을 다음과 같이 식 (2)로 산정하였다.

$$t_f = 0.00254 \nabla_w^{0.53} h_b^{-0.90} \quad (2)$$

여기서, ∇_w 는 담수용적(m^3), h_b 는 댐 붕괴지면의 높이(m)이다. 본 연구는 지속적으로 유량을 공급하기 때문에, 정지 상태에서 측정되는 담수용적과는 성격이 다르다. Von Thun and Gillette(1990)는 균질하지 않은 물질들이 댐 붕괴 지연 효과가 있음을 파악하고, 침식 저항력이 있는 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 붕괴시간에 관한 식 (3)과 식 (4)를 제안하였다.

$$t_f = 0.02h_w + 0.25 \text{ (erosion resistant)} \quad (3)$$

$$t_f = 0.015h_w \text{ (easily erodible)} \quad (4)$$

여기서, h_w 는 댐 월류시 수위고(m)를 의미한다.

본 연구는 부정류 실험으로써 월류고가 수시로 변화한다. 현재까지 연구된 붕괴시간에 대한 연구들은 시시각각 변하는 저수지내 상황을 정확히 반영하였다고 보기 어려운 부분이 있으며, 또한 본 연구와 같이 제체 표면에 사석을 포설하여 붕괴시간을 지연시키는 연구에 적용하는 것은 한계가 있어 보인다. 이에 개수로에 흙댐을 Froude 상사법칙에 맞게 재현하고, 사석이 없는 경우와 있는 경우를 비교하여, 사석의 붕괴 지연효과에 대해 분석하였다.

3. 수리실험

3.1 수리모형실험 설계

모형축척은 실험에서 관찰하고자 하는 내용과 실험조건, 상사법칙의 효율성을 보장할 수 있는 규모, 그리고 유량공급능력, 실험장의 크기 등과 같은 실험시설의 규모 등을 종합적으로 고려하여 결정한다. 축척은 가능한 한 작게 하여 모형을 크게 제작하는 것이 유리하지만, 실제 실험에 있어서는 실험설비의 규모(모형수조의 면적, 급배수설비의 능력 등), 필요한 정확도 및 수리현상의 수리학적 상사를 고려하여 축척을 결정해야 한다.

본 실험의 대상인 댐 표면에서의 흐름은 관성력과 중력이 지배력이 되며, 이 때 상사법칙은 Froude 상사법칙을 적용할 수 있다. 상사법칙이란 원형에서 흐름을 지배하는 지배력의 영향을 모형에서 그대로 적용시키는 것이므로 모형에서도 원형과 같은 지배력이 흐름을 지배해야 한다. Froude 상사법칙은 V/\sqrt{gh} 로 $Q_r = L_r^{5/2}$ 를 만족하여야 한다. 본 실험에서는 위 사항을 고려하여 모형축척 1:50으로 결정하였다. 그러나 상사법칙을 적용할 수 없는 제체 재료를 사용하여 실험을 수행하였기 때문에 결과값을 무차원하여 분석하였다.

실험 분석에 사용된 무차원수는 차원해석을 통해 도출하였다. 사석이 제체의 표면에 포설되어 있다고 가정할 경우, 사석 이탈로 인한 제체의 붕괴 시간에 영향을 주는 주요인자는 제체높이, 사석직경, 제체를 구성하는 흙의 입경, 제체의 밀도, 제체 표면을 흐르는 유속, 중력가속도로 생각할 수 있다. 이에 대해 Buckingham- π 방법을 사용할 경우 변수들을 사석 입경과 제체 구성의 흙의 입경의 비와 Froude 수로 도출할 수 있다.

3.2 수리모형실험 제원

본 연구에서는 흙댐 월류에 의한 사석의 붕괴 지연 효과를 확인하기 위해 폭 0.8 m, 길이 20 m의 직선 개수로에서 실험을 수행하였다. 흐름의 안정을 위해 수조로부터 12.0 m 지점에 흙댐 모형을 설치하였다. 유량은 고수조에서 밸브를 통하여 조절이 가능하며, 수로 상류부에 설치된 삼각위어를 통해 확인하였다. 본 실험이 부정류 실험이므로 밸브에 자동 유량 조절장치인 액츄에이터를 설치하여, 시간에 따른 유량 변화를 가능하게 하였다. 정류장치를 통해 고낙차 흐름에 의한 표면파를 최소화하였으며, 실험에 사용된 물은 저수조와 펌프를 통해 다시 고수조에 공급된다. Fig. 1은 실험수로 개념도이다.

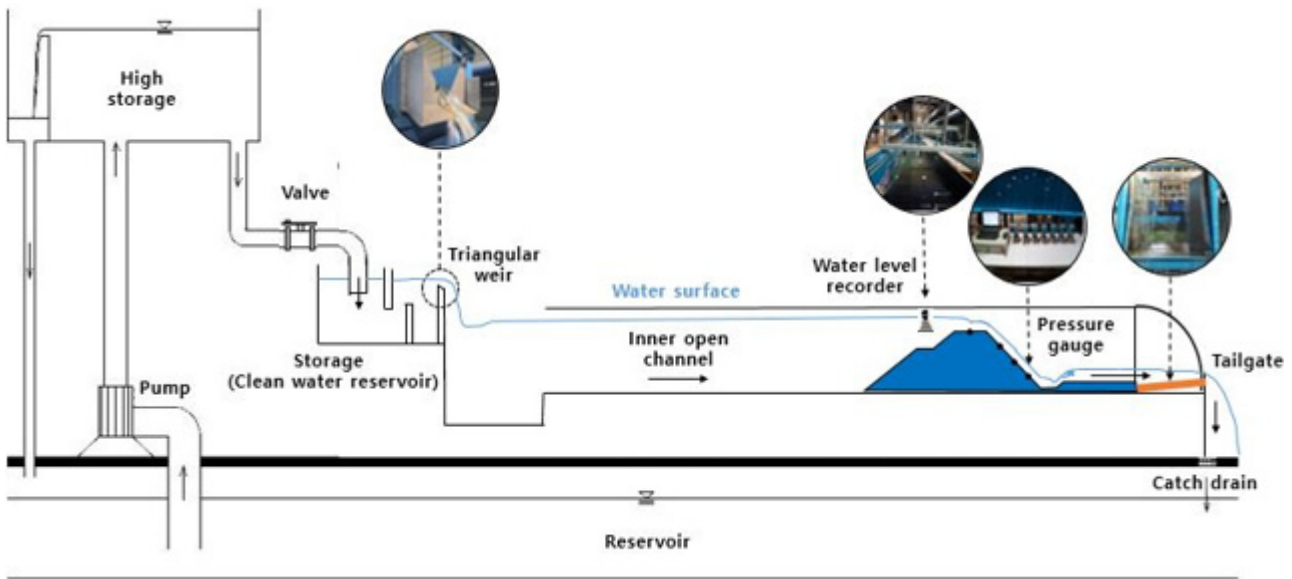


Fig. 1. Experiment concept diagram

모형은 댐 가배수터널 공사를 위한 가물막이 댐을 대상으로 하였다. 흙댐으로써 점성력 및 다짐 등을 최대한 유사하게 재현하기 위해 점성이 있는 마사토(weathered granite)를 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 제체의 모습이다.

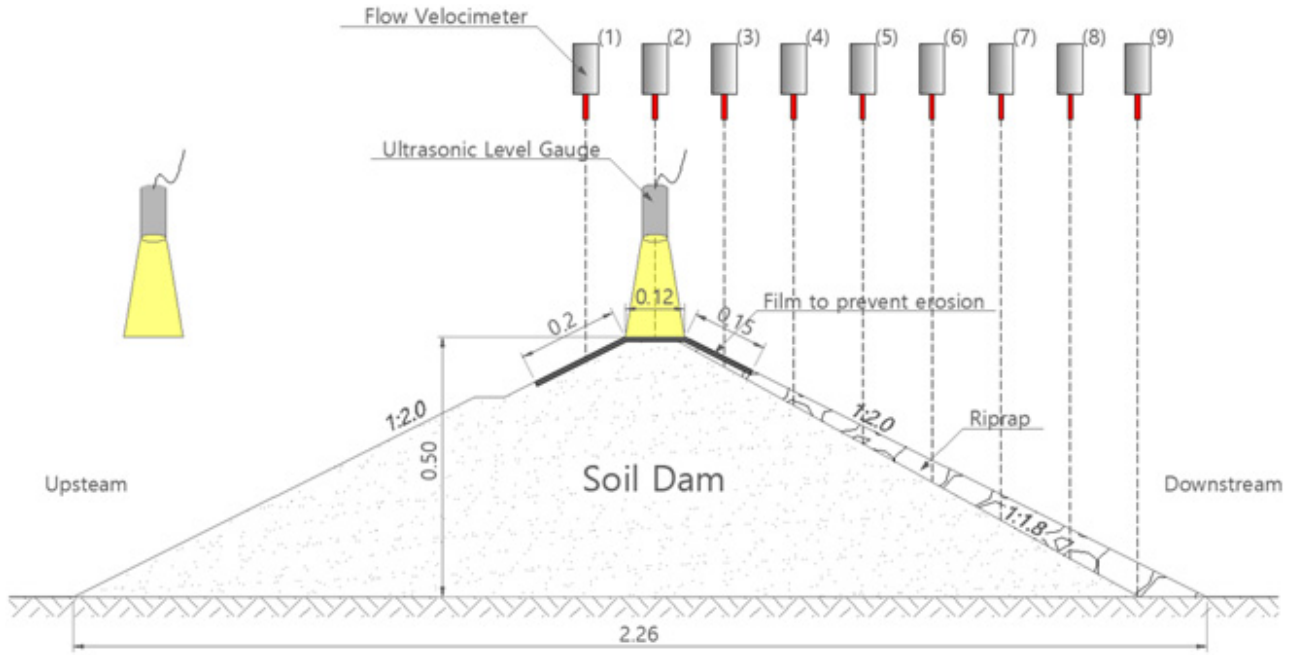


Fig. 2. The specification of experimental dam (pressure location (2)~(9))

월류부로부터 유도된 침식이 사면에 주는 영향을 방지하기 위하여 월류부에는 침식 방지막을 설치하였으며, 월류심 및 상류 수위변화를 관측하기 위해 초음파 수위계(MI-WS16, 정확도 ± 0.1 mm)를 그림과 같이 설치하였다.

3.3 수리실험 재료: 사석의 크기 결정

사석의 크기 결정은 여러 가지 방법이 있으며, 본 연구에서는 흐름의 소류력에 의해 결정하였다. 소류력은 유속의 함수이며, 많은 선행연구들이 이와 관련된 실험식들을 제시하고 있다. 본 연구에서는 Thornton et al.(2012)과 Khan and Ahmad(2011)가 제시한 식 (5)와 식 (6), Shield's parameter를 이용한 식 (7)을 토대로 사석의 크기를 결정하였다.

$$D_{50} = 0.57 S_t^{0.2} C_u^{-0.28} q_a^{0.21} t^{0.62} [1.16 / (SG - 1)^{0.3}] \quad (5)$$

$$D_{50} = 0.66 S_t^{0.22} C_u^{-0.45} q_a^{0.22} t^{0.58} \quad (6)$$

$$D_{50} = (SF \times d \times S_0) / (F \times (SG - 1)) \quad (7)$$

여기서, D_{50} 는 사석 중앙입경(mm), S_t 는 사면경사, SG 는 사석의 비중량, C_u 는 균등계수, t 는 사석의 두께(m) q_a 는 설계유량(cms)이다. F 는 Shield의 무차원수, SF 는 사면안전성의 안전율, d 는 수로 최대 수심이다. 실험에 사용되는 D_{50} 산정을 위해 부정류 실험 조건에서 발생하는 최대유속이 필요하다. 이를 위해 사석을 포설하는 이동상 실험 전 고정상 실험을 통해 유속을 측정하였다. 유속은 9지점에서 측정하였으며, 2차원 전자식 유속계(ACM2-RS, 정확도 $\pm 2.00\%$)를 사용하였다. Fig. 3은 유속측점이며, Fig. 4는 각 측정점별 최대 유속을 정리한 것이다.

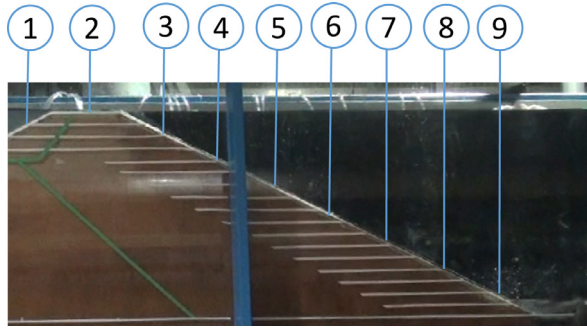


Fig. 3. Measuring points

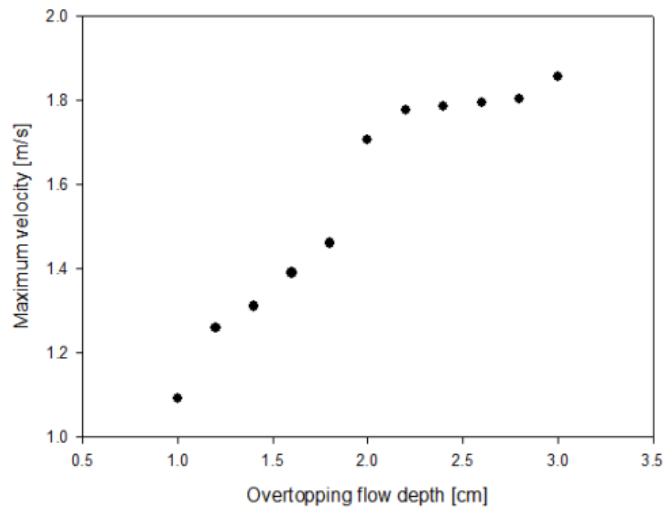


Fig. 4. Maximum velocity according to overflow water level

분석결과 최대 유속은 1.857 m/s로 나타났으며, 이때 소류력은 1.119 N으로 나타났다. 이를 이용하여 결정된 사석의 크기 Table 1에 정리하였다. 사석의 범위는 기존 3가지 공식에서 11.4~14.3 mm로 나타났으며, 이 결과와 실험의 용이성을 고려하여, 사석의 크기를 10 mm와 20 mm의 2종류로 결정하였다.

Table 1. Riprap design by tractive force method

Method	Shield's equation	Thornoton et al.'s equation	Khan and Ahmad's equation
d_{50} (mm)	11.4	14.0	14.3

3.4 실험 방법 및 조건

본 실험은 호 내에 설치된 가물막이에 대한 부정류 실험이다. 실험실 규모의 댐 붕괴실험이 실제와 다른 이유 중 하나는 실제 붕괴는 붕괴 즉시 호 내의 수위가 크게 변하지 않지만, 수리실험의 경우, 붕괴 즉시 내측의 수위가 크게 감소한다. 이에 본 실험에서는 부정류 조건을 유량이 아닌 수위로 맞추어 실험을 진행하였다. 초음파 수위계와 액추에이터를 이용하여 실시간 일정수위를 유지하도록 실험 수로를 설계하였다. Fig. 5는 모형에서의 수위 변화를 도시한 것이다. 모의 시간은 원형에서 수문곡선에서 침투시간을 고려하여 180분으로 결정하였으며, 상사를 고려하여 모형실험에서는 약 25분간 진행되었다. 붕괴가 지속되어도 침식방지판이 제체의 마루부에 설치되었기 때문에, 월류부는 높이를 유지할 수 있었다.

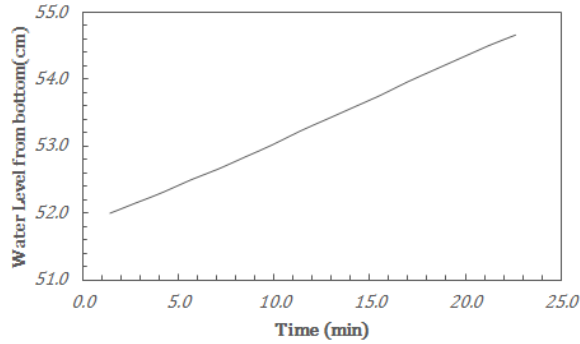


Fig. 5. Unsteady condition - Water level from bottom

제체는 점성이 있는 흙을 사용하였다. 흙의 중앙입경(D_{50})은 체가름 시험을 통하여 0.95 mm로 나타났다. 흙의 다짐은 일정한 다짐을 주기 위해 다짐봉을 사용하였다. 다짐은 KS F 2312(KSA, 2001)에 제시된 다짐 방법으로 수행하였다. 다짐 시험 기의 압력과 다짐봉의 압력을 최대한 일치시키기 위하여 다짐봉의 밑판 재원을 28 cm × 28 cm로 결정하였다. 또한 다짐봉의 낙하높이 및 횡수를 각각 30 cm, 55회로 하여, KS 규정을 준수하고자 하였다. 다짐을 수행하면서 최대강도를 위하여 제체가 최적함수비가 되도록 적정량의 수분을 공급하면서 다짐을 수행하였다. 고해상도 디지털카메라를 이용하여, 실시간으로 촬영하였으며, 이를 분석하여 사석의 이탈 및 붕괴 시작 시간을 파악하였다.

Table 2는 이동상 실험에 대한 실험조건을 나타낸 것이다. Case 1~2는 사석 보호를 위한 보강재 없이 사석 입경을 각각 20 mm와 10 mm로 실험을 수행한 것이며, Case 3은 사석 입경 10 mm에 사석 보호를 위한 보강재를 설치한 후 실험을 수행한 것이다.

Table 2. Experimental conditions in movable bed

	Overtopping water depth (cm)	Downstream condition	D_{50} (mm)	Measurement		Remark
				Water depth	Pressure	
Case 1	Unsteady	Outflow	20	○	○	
Case 2	Unsteady	Outflow	10	○	○	
Case 3	Unsteady	Outflow	10	○	○	Protection

4. 실험 결과 분석

4.1 사면 붕괴면적을 분석

수리실험 조건에 따른 사면의 붕괴면적을 분석하였다. 사면의 사석의 이탈률을 캠코더 영상을 통해 분석하였다. 사석입경을 20 mm로 수행한 Case 1의 경우 사석이 이탈한 사면의 면적율은 36.5%로 나타났다(Fig. 6(a) and (b)). 이 때 사면 상단의 파란색 사석의 경우 이탈률이 99.5%로 대부분 이탈하였으며, 회색 사석의 경우는 약 52.7%의 이탈률을 나타내었다. 사석 입경을 10 mm로 실험을 수행한 Case 2의 경우 전체 사면 대비 붕괴면적율은 55%로 나타났다. Fig. 6(c) and (d)에 나타난 것처럼 실험 종료($t = 1,500$ sec) 시에는 사면의 형상을 알아볼 수 없을 정도로 사면붕괴가 발생하였다. 사면의 가장 상단인 파란색 사석의 경우에는 모든 면적의 사면이 붕괴되는 결과가 나타났고, 중층에 존재하는 회색 사석의 경우에는 대략 66.7%의 사석 이탈이 발생하는 것을 확인하였다. 직경이 상대적으로 작은 Case 2가 Case 1보다 사석 이탈률이 약 50% 증가하는 것으로 나타났다. Case 3의 경우 철망형식의 사석보호공을 설치한 것으로 이탈률이 크게 나타났던 10 mm 사석을 대상으로 실험을 수행하였다(Fig. 6(e) and (f)). Table 3에 나타났던 것처럼 Case 3은 사면 붕괴를 100%로 방지하는 것으로 나타났다.

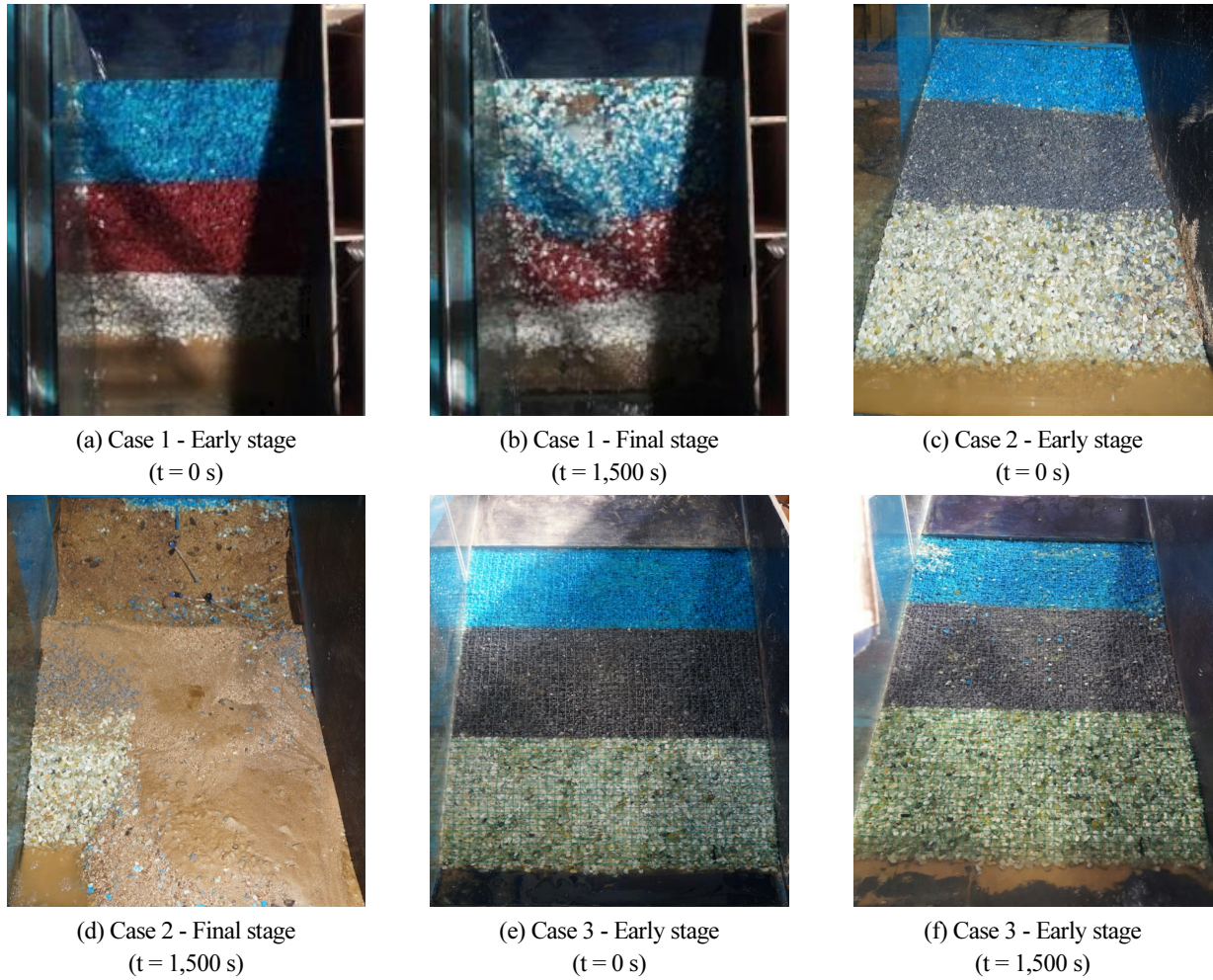


Fig. 6. Pattern of failure by riprap

Table 3. Erosion ratio of riprap

Case	Erosion ratio of riprap (%)		
	Total	Blue	Gray
Case 1	36.5	99.5	52.7
Case 2	55.0	100.0	66.7
Case 3	0.0	0.0	0.0

4.2 사면 붕괴지연 성능인자분석

일반적으로 흙댐의 경우 월류에 의해 제체의 붕괴가 발생할 가능성이 높다. 이 때 사면에 위치한 흙이나 사석의 이탈 매커니즘을 분석하는 것과 붕괴를 지연시키는 성능인자의 도출은 제체 붕괴 대응에 있어 매우 중요한 부분이다. 제체 붕괴 지연에 대한 성능인자 분석을 위해 압력계로 측정된 사면의 압력과 영상을 통한 시간에 따른 이탈률을 확인하였다.

상대적으로 동일시간 대비 이탈률이 작은 Case 1에 대하여 시간에 따른 사석 이탈률을 확인하였다. 직경이 동일한 사면의 사석을 상단부, 중단부, 하단부로 구분하기 위해 색을 입혀 실험을 수행하였고, 시간에 따라 촬영된 영상으로 사석의 이탈 매커니즘을 확인하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 월류가 발생하였을 경우 초기 지점인 파란색 사석의 상단부가 중단부의 빨간색 사석 이탈보다 진행이 더 빠르게 이루어진다. 또한 상단부의 파란사석의 이탈됨에 따라 중단부의 빨간색 사석에 영향을

미치는 것으로 판단된다. 초기 시간에는 거의 유사한 이탈길이를 나타내다가 900초 이후부터는 이탈된 파란색 사석에 의해 중단부 빨간색 사석의 이탈은 감소하는 것으로 보이며, 상단부 사석만 이탈길이가 증가하는 것을 이탈길이를 통해 확인하였다(Fig. 8).

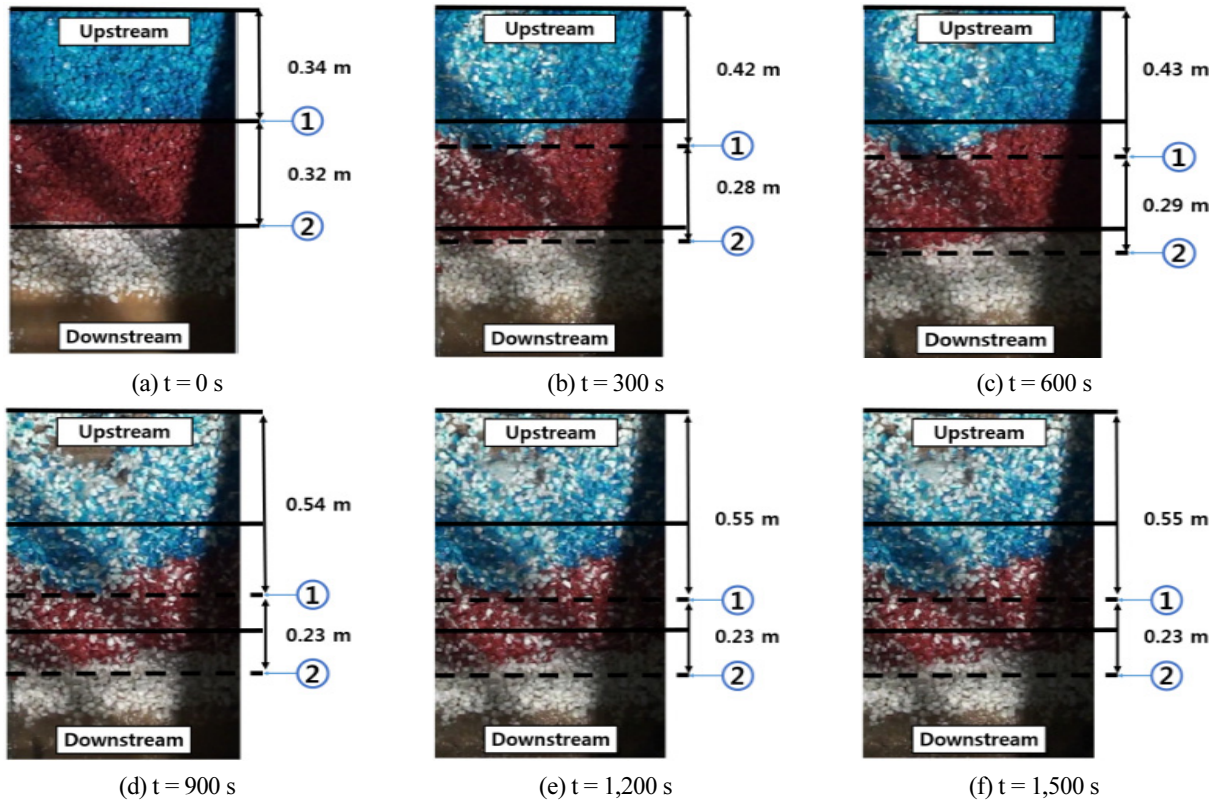


Fig. 7. Sliding of the riprap protection layer (Case 1)

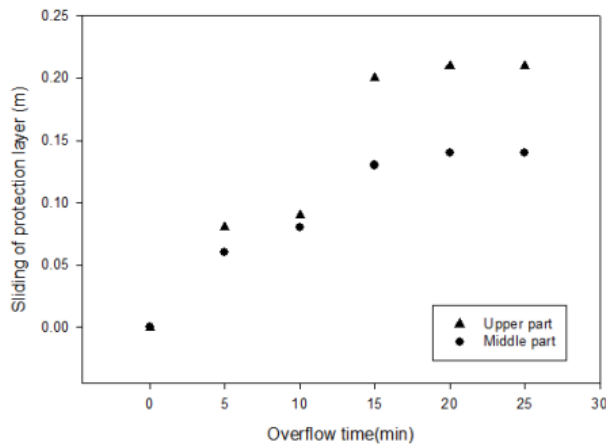


Fig. 8. Graph of sliding distance according to overflow time

그러나 실제로 사석의 이탈은 중단부에서 활발히 이루어지는 것을 Fig. 7을 통해 알 수 있다. 초기 이탈된 파란색 사석은 중단부에 위치하게 되고 중단부에 위치한 파란색 사석과 빨간색 사석은 모두 이탈이 지속적으로 발생한다. 이는 압력계 측정 결과를 통해 확인할 수 있다. Fig. 9는 사면에 일정간격으로 설치한 압력계 결과를 나타낸 것이다. 월류고에 따라 압력분포를

분석한 것인데, 3.43 m에 위치한 압력계에서 급격하게 부압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 2.9 m 지점은 사면이 시작되는 부분이고, 3.4 m이 중층부 사석의 정중앙의 위치이다. 즉 부압(negative pressure)이 발생하는 위치인 3.43 m는 중층부 사석의 중앙보다 아래에 위치하는 지점이라 할 수 있다. 앞서 영상 분석에 나타난 것처럼 지속적으로 사석 이탈이 발생하는 곳에서 부압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 사석 붕괴지연을 위해서는 사석의 입경을 고려해야하며, 경제성 및 시공성 등을 고려하여 사면의 중층부에 부압 발생을 방지하는 방안을 고려해야한다.

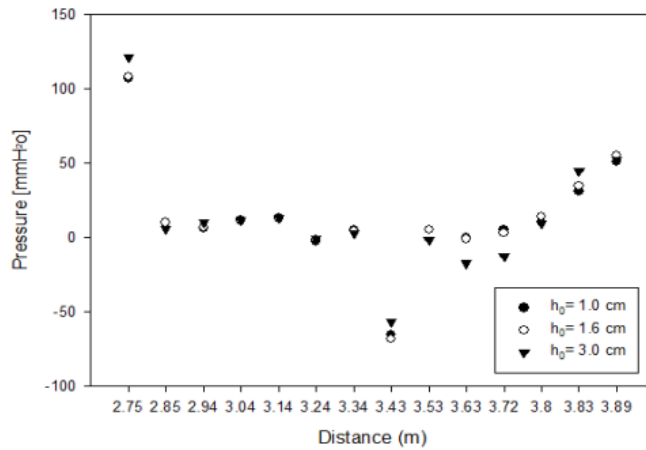


Fig. 9. Negative pressure (hydraulic experiment)

5. 결론

국내 저수지는 월류와 누수 등으로 인해 붕괴 위험이 증가하고 있어 흙댐의 월류 시 붕괴를 지연시키는 방안을 국내외에서 다양한 방법으로 제안해왔다. 공법별 사면지연 효과에 대해서는 붕괴여부를 통해 많은 연구에서 분석해왔으나, 붕괴 지연을 위한 성능인자에 대한 정량화는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 수리실험을 통해 사면 붕괴 지연을 위한 성능인자를 도출하고, 그 영향에 대해서 정량적인 분석을 실시하였다. 수리실험은 사면 붕괴를 방지하기 위해 제안된 다양한 방법 중 사면 보강을 위해 사석을 사용하는 방법과 사석의 이탈을 방지하는 망 형식의 사석보호공에 대한 방안에 대하여 수행되었다.

사석 보호공의 경우 사석 입경을 계산하여 사면을 보호하기 위하여 시공하게 되는데 이는 월류에 대한 저항력이 크지 않고 사석 붕괴는 주로 사석의 침식, 이탈 등으로 나타난다. 이를 확인하기 위해 사석의 입경에 따라 제체 월류 시 발생하는 붕괴양상을 붕괴면적을 통해 분석하였다. 그 결과 사석 입경이 10 mm 인 경우 20 mm보다 붕괴면적율이 약 50% 증가하는 것을 확인하였다. 또한 사석의 이탈률을 사면의 상단부, 중단부, 하단부로 구분하여 영상분석을 통해 분석한 결과 사석의 이탈률은 월류가 시작되는 상단부부터 중단부로 점차 사석의 이탈률은 증가하였으며, 전체 실험시간인 1,500초에서 대략 900초 이후부터 이탈길이가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

사면에 일정간격으로 설치한 압력계의 결과를 분석하였을 때 영상 분석 시 이탈이 활발하게 발생하는 중층부 중간 지점에서 부압이 발생하는 것을 확인하였다. 이처럼 사석을 활용한 사면 보호공의 경우 중층부 중간 지점에서 발생하는 부압의 방지와 사석의 입경 크기를 고려한다면 사면 붕괴를 지연시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 부가적으로 철망 형식의 보호공을 설치하였을 경우 10 mm 입경의 사석일 경우에도 사면 붕괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

따라서, 월류에 의한 사면의 수리학적 특성의 변화에도 적절한 보호공을 통해 사면 붕괴를 지연시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 압력과 더불어 유속 등 추가적인 수리학적 특성을 고려하고, 수리학적 상사를 이용하여 성능인자들을 실제 현장에서 사용할 수 있도록 정량화한다면 경제적이고 효율적인 사면보호공을 설계 및 시공할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Chinnarasri, C., T. Tingsanchali, S. Weesakul, and S. Wongwiset. (2003). Flow Patterns and Damage of Dike Overtopping. *International Journal of Sediment Research*. 18(4): 301-309.
- Coleman, S. E., D. P. Andrews, and M. G. Webby. (2002). Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(9): 829-838.
- Cristofano, E. A. (1965). Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earthfill Dams. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA. 1-14.
- Froehlich, D. C. (1995). Embankment Dam Breach Parameters Revisited. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Resources Engineering*, ASCE, New York. 887-891.
- Han, Geon-Yeon. (1986). Forecasting Model for the Floodwave Propagation Resulting from Fill Dam-Break. Doctoral Dissertation. Yonsei University Graduate School.
- Joo, Yo Han, Chang-geon Yeo, and Seung Oh Lee. (2013). Retardation Effect on the Breach of the Earth Filled Embankment Using the Stiffener During Overtopping. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*. 33(4): 1377-1387.
- Khan, D. and Z. Ahmad. (2011). Stabilization of Angular-Shaped Riprap under Overtopping Flows. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 59: 1153-1157.
- Kim, Jin Hong. (2001). Analysis on Embankment Failure due to Overflow. *Chung-Ang Journal of Environmental Science*, Institute of Environmental Science and Construction Chung-Ang University. 12(2): 97-107.
- Korea Standards Association. (2001). Test Method for Soil Compaction Using a Rammer (KS F 2312). Seoul: KSA.
- Lee, Dal-Won and Jae-Jin Noh. (2012). Behavior of Failure of Agricultural Reservoir Embankment due to Overtopping. *CNU Journal of Agricultural Science*. 39(3): 427-439.
- Lee, Sang Tae and Jong Tae Lee. (2001). An Experimental Study on the Collapse Phase of a River Levees (I) - Effects of the Geometric Characteristics of Cross Section. *Journal of Korea Water Resources Association*. 34(2): 141-154.
- MacDonald, T. C. and J. Langridge-Monopolis. (1984). Breaching Characteristics of Dam Failures. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(5): 567-586.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (2008). Statistical Yearbook of Land and Water Development for Agriculture. Uiwang: KRC.
- National Emergency Management Agency. (2002) Typhoon Rusa Site Damage Investigation Report. Ulsan: NEMA.
- Thornton, C. I., S. R. Abt, C. Clopper, B. N. Scholl, and A. L. Cox. (2012). Rock Stability Testing in Overtopping Flow - 2012. *Hydraulics Laboratory Technical Report No. 2012-1*. Engineering Research Center, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA. 15p.
- Von Thun, J. L. and D. R. Gillette. (1990). Guidance on Breach Parameters. Unpublished Internal Document. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, USA. 17p.

Korean References Translated from the English

- 국립방재연구소 (2002). 2002 태풍루사 현장 피해조사보고서. 울산: 국립방재연구소.
- 김진홍 (2001). 월류에 의한 제방붕괴 해석. *환경과학연구지*. 12(2): 97-107.
- 농림축산식품부 (2008). 농업생산기반정비사업통계연보, 의왕: 한국농촌공사.
- 이달원, 노재진 (2012). 월류에 의한 저수지 제체의 붕괴 거동. *농업과학연구*. 39(3): 427-439.
- 이상태, 이종태 (2001). 하천제방 붕괴 양상의 실험적 연구 (I) - 단면의 기하학적 특성치의 영향. *한국수자원학회 논문집*. 34(2): 141-154.
- 주요한, 여창건, 이승오 (2013). 흙댐 제체의 보강재 설치에 따른 월류붕괴 지연효과. *대한토목학회 논문집*. 33(4): 1377-1387.
- 한건연 (1986). Fill Dam의 파괴에 따른 홍수파 예측모형의 개발. 박사학위논문. 연세대학교 대학원.
- 한국표준협회 (2001). 흙의 다짐 시험 방법 (KS F 2312). 서울: 한국표준협회.