농업용 저수지 월류시 제체와 여수로 접속부의 붕괴거동

Behavior of Failure for Embankment and Spillway Transitional Zone of Agriculture Reservoirs due to Overtopping

노재진* · 이달원**†

Noh, Jae Jin · Lee, Dal Won

ABSTRACT

In this study, an experiment with large-scale model was performed according to raising the embankment in order to investigate the behavior of failure for embankment and spillway transitional zone due to overtopping. The pore water pressure, earth pressure, settlement and failure pattern by a rapid drawdown and overtopping were compared and analyzed. The pore water pressure and earth pressure at spillway transitional zone by overtopping increased a rapidly with the expansion of seepage erosion, but the crest showed a small change due to effect of the inclined core type. And it is considered an useful data that can accurately estimate the possibility of failure of the reservoirs. A settlement at overtopping decreased a rapidly due to failure of crest. The relative settlement difference due to change of the water level at the upstream and downstream slope cause increase largely crack of crest. The behavior of failure by overtopping was gradually enlarged towards reservoirs crest from the bottom of the spillway transition zone, the inclined core after the raising the embankment was influenced significantly to prevent the seepage erosion.

Keywords: Overtopping; spillway; reservoir; pore water pressure; earth pressure; behavior of failure

1. 서 론

우리나라 농업용 저수지는 대부분 흙댐으로 2012년 기준 총 17,505개소이며 지방자치단체에서 14,133개소 (80.7 %), 한국농어촌공사에서 3,372개소 (19.3 %)를 관리하면서 농경지 474천 ha에 농업용수 공급과 함께 하류하천의 수질개선, 홍수조절, 생태환경에 기여하고 있다 (KSAE, 2013).

그러나 농어촌공사에서 관리하는 저수지의 87 %인 2,934개소가 30년 이상 경과되었고, 50년 이상은 2,235개소로 전체의 66 %를 차지하고 있다. 또한, 지차체 관리 저수지의 57 %인 8,066개소가 60년 이상 경과되어 월류, 파이핑 및 누수로 인한 붕괴 가능성도 증가하므로 지속적인 유지보수관리 방안이 필요하다. 특히, 지차체관리 저수지는 대부분 소규모 2중 시설이고, 중산간지에 위치하며 시군 담당공무원의 전문인력과 예산지원

부족 등으로 항상 상습적인 피해가 발생하고 재해위험이 상존하고 있다.

현재 농업용저수지 뚝 높이기 사업은 총 110개소로 장래 물 부족에 대비하여 농업용수를 보충하여 안정적인 영농기반을 마련하고 농촌지역의 생활, 농업용수, 축산, 원예 등 농촌용수 다양화 및 미래 영농환경 변화에 대비하기 위한 목적으로 2015년까지 추가 저수량 2.4억 m^3 (6.1 → 8.5억 m^3)을 확보할 계획이다 (KRC, 2011).

저수지 뚝 높이기 사업에 가장 많이 시공 되고 있는 제체 덧쌓기는 코어부분의 안정적인 연결을 위해 기설코어의 상부를 일부 굴착한 후 경사형과 수직형으로 코어를 신설하고 있다. 따라서, 뚝 높임시 월류에 의한 붕괴 거동, 수위 급강하로 인한 침윤선의 변화, 코어와 기존 성토재간의 부등침하 발생가능성, 상류 및 하류사면에서의 공극수압 변화 등을 면밀히 검토해야 해야 한다 (Lee and Noh, 2012; Lee and Lee, 2013).

국외에서는 그 동안 댐의 파이핑, 월류 및 사면안정에 관한 연구가 계속해서 진행되어 오고 있다 (Chapuis and Aubertin, 2001; Fell et al., 2003; Costa and Alonso, 2009).

Foster et al. (2000)은 세계의 11,192개 필댐의 사고와 붕괴를 통계적으로 분석하였는데, 붕괴된 136개 댐의 붕괴 유형은 월류 36 %, 여수로 방수로 12 %, 파이핑 46 %, 활동 6 %로 나

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 지역환경토목학과

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

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

2013년 11월 1일 투고

2014년 1월 7일 심사완료

2014년 1월 7일 게재확정

타났다. 국내에서는 저수지 월류실험에 관한 연구는 거의 없고, 주로 하천 제방에 관한 수리모형실험을 통하여 붕괴 형태, 붕괴 지속시간, 월류량, 세굴형태 등의 연구가 진행되어 왔다 (Jung, 1989; Kim, 2001; Im et al., 2005)

국내 댐의 90 % 이상을 차지하는 농업용 저수지는 규모에 따라 100년 빈도나 200년 빈도 설계강우량을 사용하여 여수로 크기를 결정하고 있으나 2002년도 태풍 루사에서는 290개소가 손실되었고, 그 중 여수로 유실이 52.4 %, 댐마루 유실과 사면붕괴 26.7 %, 유입토사에 의한 매몰 12.4 %, 옹벽파손 8.6 %로 나타났다 (KRC, 2011; MLTM, 2011).

농업용 저수지 중에서 99 %를 차지하고 있는 측수로형 여수로는 구조적으로 측수로의 옹벽높이가 댐마루보다 낮게 설계시공 되고 있기 때문에 발생 가능한 최대홍수량 (PMF) 유입시 측수로내의 수위상승뿐만 아니라 초오름 현상이 발생되고 측벽의 월류가 발생되어 옹벽매면부의 붕괴로 인한 여수로의 세굴과파괴에 취약하다.

이에 대한 대책방안으로 이상 홍수조건에 대한 수리모형 실험을 실시하고 보강방법을 강구하여야 한다. 또한 정밀안전진단을 통해 취약한 부분에 대한 정확한 대책을 수립하고, 댐의 안정성, 경제성은 물론이고 이수 및 치수문제까지 고려하여 하류부의 피해를 최소화하기 위하여 체계적인 비상대처계획 (EAP) 수립도 중요하다.

저수지 둑 높이기 사업에서의 대부분은 성토에 따른 안정문제와 기존 저수지를 확장하여 후면에 축조하기 때문에 제방 설치에 따른 안정 해석이 중요하다. 둑높임 후에는 저수량의 급증에 따라 침투수압이 몇 배로 증가하고, 제체를 통한 침투수는 제체 하류부를 포화시켜 과잉공극수압의 증가함에 따라 파이핑 현상이 급진전되므로 제체의 안정성을 평가하여야 한다 (Kim and Lee, 2009; Lee and Lee, 2012).

저수지 제체의 월류로 인해 붕괴 피해는 붕괴단면의 크기 및 형태에 따라 피해규모에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 관한 연구는 미미한 실정이다 (Kim et al., 2011; Lee and Park, 2003). 특히, 대규모로 추진되고 있는 저수지 둑 높이기 사업은 이론적인 연구뿐만 아니라 모형실험 등을 통하여 수위변화에 따른 제체의 침하, 공극수압, 토압 변화 등을 파악하고, 이상강우에 의한 붕괴실험을 바탕으로 보다 정교한 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 저수지 둑 높임 시에 홍수위와 수위급강하에 따른 공극수압 및 토압 변화와 이상 강우에 의해 여수토가 제기능을 발휘하지 못하고 월류되었을 경우를 고려한 대형실내 모형실험 실시하고, 제체 및 여수로 접속부에서의 공극수압, 토압, 침하, 붕괴거동 등을 비교분석하여 제체의 안정성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 사용시료

실험에 사용된 시료는 코어재와 성토재 총 2종의 시료를 사용하였고, 공주시 계룡 저수지 토취장에서 채취하였다. 사용된 시료의 물리적 성질, 역학적 성질 및 입도곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다 (Lee and Lee, 2012).

Table 1 Geotechnical properties of materials used

Sample	G_s	PI (%)	k_r (m/s)	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (KN/m ³)	c (kPa)	ϕ°	USCS
Embankment	2.65	9.2	5.75E-07	14.0	17.25	16.7	24	SC
Core	2.69	15.5	3.11E-08	23.0	15.78	34.3	9	CL

Fig. 1 Grain size accumulation curve

2. 저수지 제체 모형 축조

실내대형모형 토조는 콘크리트와 철제 및 아크릴로 제작하였고, 토조 내부에는 실리콘 및 방수페인트로 처리하여 누수를 방지하였다.

Fig. 2는 저수지 둑 높이기시에 경사형 제체 덧쌓기 모형으로, 현장 저수지의 1/20로 축소하고 코어는 하류 측 방향의 경사형태로 축조하였다. 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. 다짐 시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 1층을 5 cm 가량 포설한 후 나무다짐봉으로 다짐을 한 후 밀도를 측정하여 확인하였다. 제체 덧쌓기 시 성토의 건조밀도는 평균 1.655 gf/cm³로 나타났고, 코어의 건조밀도는 평균 1.585 gf/cm³로 나타났다.

수리모형실험의 축척은 일반적으로 1/15에서 1/50 범위에서 결정되므로 본 연구에서는 상사법칙의 효율성과 실내모형실험규모의 여건 등을 감안하여 1/20으로 결정하였다. 모형은 길이 (L) 126 cm×폭 (W) 540 cm×높이 (H) 95 cm로 콘크리트와 철제

Fig. 2 Model test for overtopping

Table 2 Scale ratio for model test

Definition	Dimension (MLT)	Scale factor (model/prototype)	Scale ratio (1/20)
Length	L	l_m/l_p	0.05
Time	T	t_m/t_p	0.22
Density	ML^{-3}	D_m/D_p	0.95
Force	MLT^{-2}	F_m/F_p	1.19E-04
Stress	$ML^{-1}T^{-2}$	σ_m/σ_p	4.76E-02
Quantity	$L^{-3}T^{-1}$	Q_m/Q_p	5.59E-04

및 아크릴로 제작하였고, 비탈면 경사는 1 : 2.0 (하류사면), 1 : 2.5 (상류사면)으로 모형을 제작하였다.

여수토는 Fig. 3과 같이 모형의 뒤 쪽에 나무 합판 (두께 = 1.5 cm)을 이용하여 현장저수지 표고를 기준으로 1/20로 축소 하고, 방수로 마루표고가 홍수위에서 월류되도록 약 55 cm로 하였고, 방수로 폭은 10 cm로 설치하였다.

월류시 모형저수지의 상류부로 유입되는 유입량과 여수토 방수로를 통하여 하류부로 유출되는 유출량은 미리 측정된 토조에서의 유량검증을 통하여 유입량 1.8 L/sec, 방수로 유출량 0.5 L/sec로 확인하였다. 실험과정의 붕괴양상을 비디오 카메라를 설치하여 전체 붕괴과정을 기록하였다.

실내모형실험은 실물과 상사관계에 있다고 가정하여 상사치를 구한 후 현상을 예측하는데 광범위하게 이용되고 있다. 일반적인 상사치의 가정조건은 실물에 사용된 재료는 하나의 물리적 공학적 특성 (응력, 변형율, 시간 등)을 가지고 있고, 모형의 재료는 실물의 재료와 동일한 물리적 공학적 특성을 가진다는 가정조건이 성립된다는 조건에서 유도된다.

상사법칙을 만족하기 위한 기하학적 조건은 $l_m/l_p = n$ 이다. (l_m, l_p : 모형 및 실물 길이) 운동학적 상사(kinematic similarity)

조건에서 시간, 유속 및 투수계수는 다음과 같다. $t_m/t_p = n^{1/2}$, $v_m/v_p = n^{1/2}$, $k_m/k_p = n^{1/2}$ 이다.

본 모형에서는 Darcy 법칙이 적용되고 실내모형축척이 1/20이며, 모형에서 사용한 흙이 원형과 동일재료로 사용하였으므로 입자크기 변환계수 $N = 1$ 이고 상사법칙을 적용하면 Table 2와 같다. 모형지반의 밀도는 현장에서의 95%를 적용하였다.

3. 계측기 매설

제체를 구성하는 성토재와 점토재 내부에 작용하는 공극수압과 토압을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 공극수압계 (P) 7개와 토압계 (E) 7개를 각각의 위치에 매설하였다. 매설간격은 P11, P12, P15, E2, E3, E4은 여수토와 제체의 접촉부의 상부, 중앙, 하부에 매설했으며, 나머지 계측기들은 제체 중심으로부터 좌·우의 일정한 거리에 위치시켰다.

매설깊이는 사면의 높이와 경사를 고려하여 월류 시 공극수압과 토압 측정 시 비교가 용이하도록 제체 하부로부터 10~59 cm 떨어진 지점 (P9: 30 cm, P10: 30 cm, P11: 50 cm, P12: 30 cm, P13: 55 cm, P14: 20 cm, P15: 20 cm, E2: 50 cm, E3: 25 cm, E4: 15 cm, E5: 30 cm, E6: 10 cm, E7: 50 cm, E8: 30 cm)에 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 상류 측에 담수한 물이 제대로 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단할 때까지 측정하였다. 실험은 홍수위시, 수위급강하시, 월류시로 구분하여 진행하였다.

Fig. 3 Location of piezometers and earth pressure cells

III. 결과 및 고찰

1. 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화

Fig. 4는 상류측에 담수를 시작하여 여수토 방수로 표고 (55 cm)보다 낮은 수위 (54.5 cm)에서 95시간 정도 유지시킨 후 2 시간 동안 수위급강하 하였을 경우의 공극수압의 변화를 나타낸 것이다.

상류사면의 공극수압 (P10)은 담수로 인한 직접적인 영향으로 급격하게 증가한 후 일정하게 유지하여 제체의 정상적인 거동을 나타냈고, 수위급강하 후에는 급격하게 감소하고 사수위에서 일정하게 유지하였다.

제체와 여수토 접촉부 상부 (P11) 및 경사형 코어 증고부 (P13)에서의 공극수압은 수위 증가함에 따라 약간씩 증가한 후 큰 변화 없이 일정하게 유지되었고 수위급강하한 후에는 점차적으로 감소되었다.

특히, 여수토 접촉부는 시공 과정에서 다른 부분보다 다짐이 불균질하게 이루어져 경계부에 누수에 의한 침투현상이 발생할 수 있으므로 신중한 시공관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 신설코어 연결부 (P13)에서는 수위급강하에 따라 공극수압의 소산속도가 상대적으로 늦어 성토사면과의 수두차가 발생되어 침투압이 작용하므로 붕괴위험성을 높게 된다.

여수토 접촉부 중앙 (P12)과 하부 (P15)에서의 공극수압은 큰 변화를 나타내지 않아 누수에 의한 침투현상을 발생하지 않았다. 다른 위치에 매설된 공극수압에서는 큰 변화 없이 작은 값을 타

Fig. 4 Variation of pore water pressure at rapid draw down

나내어 수압의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

일반적으로 초소형 공극수압계에서는 외부적인 민감성, 온도변화에 따른 함수비 변화, 미세한 누수 등 여러 가지 복합적인 요인으로 오차가 발생되므로 이에 대한 보정이 필요하다 (Lee and Lee, 2012).

전체적으로 공극수압은 수위하강속도보다 제체 내의 공극수압의 소산속도가 느리기 때문에 일정시간 경과후에 감소하였고, 수위 급강하시 여수토 접촉부와 신설 코어부에서는 상대적으로 민감한 영향을 받아 제체의 안정성에 영향을 주고 균열을 발생시켜 붕괴 가능성을 초래하는 원인으로 작용할 수 있으므로 신중한 시공관리가 필요하다고 판단된다.

Fig. 5는 홍수위 상태로 95시간 정도 유지시킨 후 2시간 동안 수위급강하 하였을 경우의 토압 변화를 나타낸 것이다.

상류사면의 토압 (E5)은 담수로 인하여 급격하게 증가한 후 일정하게 유지하였고, 수위급강하 후에는 급격하게 감소하였다.

Fig. 5 Variation of earth pressure at rapid draw down

담수초기에 토압이 증가한 것은 담수용량이 많아지면서 수위가 하중으로 작용하게 되어 상대적으로 토압이 증가한 것으로 판단된다. 여수토 접속부 상부 (E2) 및 신설 코어 연결부 (E7)에서의 토압은 담수 직후부터 큰 변화 없이 안정한 상태를 나타냈다.

코어하부에서의 토압 (E6)은 수위증가에 따라 증가한 후 수위 강하 후에는 느리게 소산하는데 이는 수위 강하 후에도 일정시간 동안에는 제체내로 침투했던 공극수의 소산속도가 상대적으로 느리기 때문으로 판단된다.

2. 월류시 공극수압과 토압의 변화

저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 독마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 월류시 제체의 붕괴형태와 붕괴속도 여부를 파악하고, 가장 중요한 댐마루에서 독 높이임시 설치되었던 코어가 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

수위가 상승하면 코어와 성토재 사이에 수압할렬 가능성이 증가하고 비압밀 비배수 상태가 되어 사면의 안전율이 감소하게 된다. 흙댐의 붕괴는 부적절한 여수토 용량으로 발생하는 월류, 파이핑 및 누수에 의한 붕괴가 대부분이다. 월류에 의한 제방 붕괴 속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르고 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 때 발생한다.

Fig. 6은 경사형 제체 덧쌓기에서 여수토가 이상강우로 홍수량을 정상적으로 처리할 수 없어 월류가 발생되었을 경우의 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

상류측에 담수하여 여수토 표고 (55 cm)보다 낮은 수위 (54.5 cm)까지 상승시킨 후 제체내로 충분한 침투가 이루어진 후 댐마루 표고보다 약 1 cm 높은 수위 (80 cm)까지 상승시켜 약 42시간 정도에 월류실험을 시작하여 약 3시간 동안 붕괴상태의 변화를 측정하였고, 실험 종료 이후 약 68시간까지 만수위 상태에서의 공극수압 변화를 측정하였다.

여수토 접속부에서의 공극수압 (P11)은 큰 변화 없이 일정하게 유지하다가 방수로를 통하여 하류사면으로 물이 흐르기 시작

Fig. 6 Variation of pore water pressure at overtopping

하였을 때부터 월류시에 급격하게 상승하였고, 접속부의 붕괴로 공극수압의 일시적인 변동이 발생되었다. 여수토 접속부의 중앙 (P12) 및 하부의 공극수압 (P15)도 일정하게 유지되다가 월류가 시작되면서 급격하게 증가하였고 붕괴후에는 급격하게 감소하였다.

월류시 공극수압이 급격하게 상승된 것은 수위를 제방마루보다 높게 상승시키고 제체사면에 세굴과 붕괴가 발생되면서 변동 폭이 크게 나타난 것으로 판단된다.

코어 증고부 (P13)은 여수토 접속부에서의 공극수압과 마찬가지로 월류되면서 급격하게 증가하였고, 붕괴후에는 일정하게 유지하다가 감소하였으며, 월류시 신설된 코어가 붕괴를 감소시키는 것으로 나타났다.

코어하부 (P14)의 공극수압은 일정하게 유지 되다가 월류시 제체가 붕괴되면서 급격하게 증가하였고, 붕괴후에는 급격히 감소하는 현상을 나타냈다.

전반적으로 제체 월류시 여수토 접속부의 공극수압은 급격하게 상승하는 것으로 나타났고, 붕괴폭이 커질수록 그 영향은 더 크게 나타났다. 또한, 댐마루에서의 공극수압은 제방의 붕괴에 따라 크게 증가하였지만, 경사형으로 시공한 코어가 붕괴 영향을 최소화시키는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 코어형태에 따른 공극수압 및 누수량 변화에 관한 연구 (Lee and Lee, 2012) 결과에서도 경사형 코어가 수직형 코어보다도 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 경사형 제체 덧쌓기에서 월류가 발생되었을 경우의 토압 변화를 나타낸 것이다.

여수토 접속부의 상부 (E2), 중앙 (E3), 하부 (E4)에서의 토압은 초기 담수시에는 큰 변화를 나타내지 않았고, 방수로를 통하여 물이 하류로 흘러가면서 서서히 상승하고 월류시 약간 증가한 후 감소하였다.

신설코어 증고면에서의 토압 (E7)은 초기 담수시에는 큰 변화를 나타내지 않았고, 월류가 진행됨에 따라 증가하였고 붕괴후에는 일정하게 유지하였다. 이는 경사형으로 시공된 코어에 매설되었기 때문에 월류 초기에 큰 변화가 없고, 월류시에도 코어가 세굴로 인한 영향을 감소시켰기 때문에 큰 변화가 나타나지 않

Fig. 7 Variation of earth pressure at overtopping

은 것으로 판단된다.

코어 하부 (E6)에서는 여수로 방수로를 통하여 물이 넘어가는 시점부터 급격하게 증가한 후 붕괴후에 급격히 감소하였다. 월류시 토압이 급격하게 상승하는 것은 독마루를 통해 월류되는 수위도 하중으로 작용한 것으로 판단된다.

하류부 중앙 (E8)에서는 큰 변화 없이 일정하게 증가하면서 월류시에는 약간 증가하고 일정하게 유지하였는데 이는 붕괴후에도 공극수가 일시에 배수되지 못하고 사면에 잠재하고 있기 때문으로 판단된다.

전반적으로 월류시 토압은 독마루 부분과 여수로 접속부에서 세굴이 확대 되면서 급격하게 상승하는 것으로 나타났고, 경사형으로 신설된 코어에서는 세굴 영향을 최소화 시켜 토압 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 공극수압과 토압변화는 월류시 제체의 붕괴 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 침하량의 변화

Fig. 8은 앞에서 언급한 것과 동일한 조건으로 홍수위에서 수위급강하시까지의 침하량과 월류시 침하량의 변화를 나타낸 것이다.

홍수위로 수위가 상승하면서 침하량도 점차적으로 증가하고,

Fig. 8 Variation of settlement between flood water level and overtopping

약 96시간 후 수위급강하시에는 큰 변화 없이 일정하게 유지되다가, 약 163시간 후 월류시에는 이미 제체내로 충분한 침투가 이루어져 있었기 때문에 댐마루 붕괴와 동시에 급격한 침하현상을 나타냈다.

수위가 급격하게 하강하고 상승함에 따라 상대적인 침하가 발생하게 되고, 특히 수위변화에 직접적으로 영향을 미치는 상류측과 하류측은 상대적인 침하량 차이로 인해 결국 부등침하를 유발시켜 댐마루의 균열 가능성을 증대시키게 되고, 잦은 수위 변동으로 인한 반복하중은 댐에 균열을 유발하게 된다.

4. 월류시 제체 사면의 붕괴거동

월류시 저수지 붕괴는 초기월류단계, 월류량 급증단계, 침투월류단계, 월류량 감소단계 등으로 검토해 볼 수 있다. 일반적으로 제 1단계의 지속시간은 긴 반면, 제2단계는 월류량이 증가하면서 붕괴폭이 급격히 발달하는 단계에서는 지속시간이 짧아진다.

농업용 저수지중에서 측수로형 여수로는 수리학적으로 효율적이나 측수로내의 수위가 한계를 초과하면 월류흐름의 복잡한 엉킴현상이 발생하여 수위가 급격하게 상승하게 되는 특성을 가지고 있어 월류에 의한 세굴파괴에 취약하다.

측수로형 여수로의 흐름특성은 평상시에는 웨어를 월류한 물의 흐름이 바닥으로 흘러 하류부로 이동하며 측수로 수위에 영향을 받지 않고 원활한 흐름을 나타낸다. 그러나 설계홍수량을 초과하는 경우 측수로의 수위가 상승하여 월류부의 월류량이 잠류영향을 많이 받는 구조적 문제점을 가지고 있다. 저수지 유입량이 증가하여 측수로 내에 잠류가 발생하면 월류 유속이 감소하면서 급격한 수위 상승이 발생할 수 있다. 잠류가 발생되면 월류한 흐름이 수면위로 흐르게 되어 측벽에서 처오름 현상이 발생하게 되어 세굴에 의한 여수로 파괴에 취약하게 된다.

이상 홍수 발생시 여수로 콘크리트와 원지반 사이에 가장 취약한 양안 옹벽 배면부가 월류에 의한 세굴파괴가 진행되고 급류부의 완전유실이 발생된 후에 점차적으로 여수로가 완파되는 과정을 거치게 된다.

Fig. 9는 월류시 초기, 50분, 100분, 150분 경과 후의 붕괴 형태를 나타낸 것이다.

모형축조 완료 후 월류 시험 전까지 홍수위 상태를 유지시켜 제체에 충분한 침투가 이루어지도록 하여 실제 저수지의 침투조건과 유사하도록 수위를 조정하였다. 유량공급조절장치를 통하여 댐마루 월류량은 1.8 L/sec로 일정하게 유지하고 나머지 0.5 L/sec는 방수로로 방류되도록 하였다.

월류에 의한 제체와 여수로 접속부에서의 붕괴 거동은 하류사면의 토립자가 세굴되면서 점차 하부부터 붕괴가 시작되면서 점차로 커지는 점진적 붕괴 형태를 나타냈다.

Fig. 9 Pattern of failure at overtopping

월류 후 50분 경과 후에는 여수토 접속부의 하부부터 붕괴가 시작되면서 상부쪽으로 점점 확대되는 붕괴형태를 나타냈고, 세굴폭은 21~30 cm, 깊이는 2~8 cm로 나타났다.

100분 경과 후에는 여수토 접속부에서 세굴 폭 23~41 cm, 세굴깊이 8~15 cm로 점차로 증가하였고 댐마루 상부와 하부 중앙쪽으로 폭 25~26 cm, 깊이 2~4 cm로 확대되는 붕괴형태를 나타냈다.

150분 후에는 여수토 접속부의 붕괴폭과 깊이가 증가하였고, 댐마루 상부가 붕괴되면서 하류사면에서도 폭 29~37 cm, 깊이

4~6 cm로 붕괴범위가 확대되는 것으로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 최대 세굴 깊이와 너비는 거의 변화가 없이 2~3개의 세굴방향을 통해 월류량만 증가하는 형태를 나타냈다.

특히, 제체와 여수토 접속부 사이에 시공상의 문제로 불균질하게 다짐되었을 경우에는 누수로 인해 세굴현상이 증가되어 붕괴를 일으키는 요인으로 작용하였다. 또한, 댐마루에서는 성토체만 붕괴가 발생되고 코어부는 거의 붕괴되지 않은 것으로 나타났는데, 뚝 높임시 설치되었던 경사형 코어가 세굴을 최소화시켜 제체의 붕괴 가능성을 줄여주는 매우 중요한 역할을 하는 것으로

나타났다.

제방의 붕괴형태는 삼각형, 직사각형, 사다리꼴 등이 있는데 본 실험에서는 대부분 매우 불규칙한 형태로 나타났다. Fread (1977)는 월댐에서의 붕괴단면은 $H \leq B \leq 3H$ (H: 댐 높이, B: 붕괴부의 평균 폭)으로 나타나고, 붕괴 지속시간(T)은 재료와 침식에 따라 크게 좌우되지만 비교적 견고하게 축조된 흙 댐에서는 $0.5 \leq T \leq 3.0$ hr 범위로 나타난다고 하였다. 그러나 실험에서 붕괴 폭은 제시한 범위보다 작았으며, 붕괴 시간은 제시한 범위내에 포함되었다.

월류가 진행됨에 따라 하류사면 표면으로 흐르던 물이 사면내부로 침투하여 세굴로 인해 붕괴를 발생시키는데, 이와 같은 붕괴는 하류사면 표면에 암석을 이용한 riprap, Geotextile 등과 같은 보강공법으로 세굴을 억제할 수 있을 것으로 판단되며 표면보호공법에 대한 실험검증이 요구된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 저수지 독 높임 시에 홍수위와 수위급강하에 따른 공극수압 및 토압 변화와 이상 경우에 의해 여수토가 제거능을 발휘하지 못하고 월류되었을 경우를 고려한 대형실내모형실험 실시하고, 제체 및 여수로 접속부에서의 공극수압, 토압, 침하, 붕괴거동 등을 비교분석하여 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수위 급강하시 여수로 접속부 상부 (P11)와 신설 코어부 (P13)에서는 매우 민감한 영향을 받아 제체의 안정성에 영향을 주고 균열을 발생시켜 붕괴 가능성을 초래할 수 있으므로 신중한 시공관리가 필요하다고 판단된다. 여수로 접속부 상부 (E2) 및 신설 코어 연결부 (E7)에서의 토압은 담수 직후부터 큰 변화 없이 안정한 상태를 나타냈다.

2. 제체 월류시 여수로 접속부의 공극수압과 토압은 세굴이 확대 되면서 급격하게 상승하는 것으로 나타났고, 붕괴폭이 커질수록 그 영향은 더 크게 나타났다. 또한, 댐마루에서의 공극수압은 제방의 붕괴에 따라 크게 증가하였지만, 경사형으로 시공한 코어가 붕괴 영향을 최소화시켜 공극수압 및 토압 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 여수로 접속부의 상부 (E2), 중앙 (E3), 하부 (E4)에서의 토압은 약간 증가한 후 감소하였다. 따라서 공극수압과 토압변화는 월류시 제체의 붕괴 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 홍수위로 수위가 상승하면서 침하량도 점차적으로 증가하고 수위급강하시에는 큰 변화 없이 일정하게 유지되다가 월류시에는 댐마루 붕괴와 동시에 급격하게 감소되었다. 특히 수위변화에 직접적으로 영향을 미치는 상류측과 하류측은 상대적인 침하량 차이로 인해 결국 부등침하를 유발시켜 댐마루의 균열 가능성을 증대시키므로 이에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 월류에 의한 제체와 여수로 접속부에서의 붕괴 거동은 여수로 접속부의 하부사면부터 토립자가 세굴되면서 상부쪽으로 확대되는 점진적 붕괴형태를 나타냈고, 월류 중기 이후 (100분)부터는 세굴폭과 깊이가 증가하면서 점차적으로 댐마루 상부와 사면전체로 이동되면서 월류량이 증가되었다.

5. 월류시 제체와 여수로 접속부 사이가 불균질하게 다짐되었을 경우에는 누수로 인해 세굴현상이 증가되어 붕괴를 일으키는 요인으로 작용하였고, 독 높임시 설치되었던 경사형 코어가 세굴을 최소화시켜 제체의 붕괴 가능성을 줄여주는 매우 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 향후 이상홍수에 의한 사면붕괴는 여러 가지 하류사면 표면보강방법에 의한 모형실험이 요구되고 적절한 보강공법으로 침투세굴을 억제하여야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 2013년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: NRF-2011-0011920).

REFERENCES

1. Chapuis, R. P., and M. Aubertin, 2001. A simplified method to estimate saturated and unsaturated seepage through dikes under steady state conditions. *Can. Geotech. J.* 38: 1321-1328.
2. Costa, L. M., and E. E. Alonso, 2009. Predicting the behavior of an earth and rockfill dam under construction. *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE* 135(7): 851-862.
3. 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.
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. Fread, D. L., 1977. The development and testing of dam-break flood forecasting model. *Proceeding of the dam-break flood routing workshop water resources council.*
6. Im, E. S., M. W. Seo, I. S. Ha, and W. G. Kim, 2005. Simulation of earth-fill dam behavior subjected to water level variation using geotechnical centrifuge. *The Korean Society of Civil Engineers Journal* 25(2): 95-102 (in

- Korean).
7. Jung, H. S., 1989. An experimental study on piping failure of earth embankment. *Journal of Korean Geotechnical Society* 5(4): 17-26 (in Korean).
8. 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).
9. Kim, J. H., 2001. Analysis on embankment failure due to overflow. *Korea Environmental Industry and Technology Institute* 12(2): 97-107 (in Korean).
10. Kim, Y. I., K. S. Yeon, K. S. Kim, J. W. Jeong, and Y. S. Kim, 2011. An experimental study of reservoir failure phenomena according to transitional zone: spillway scour during overflow. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(2): 27-33 (in Korean).
11. Korean Society of Agricultural Engineers (KSAE), 2013. Rural resources, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 5-50 (in Korean).
12. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2011. The project of raising embankment of agricultural reservoir. <http://www.ekr.or.kr>.
13. Lee, D. W., and Y. H. Lee, 2012. Behavior of pore water pressure of agricultural reservoir according to raising embankment. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 11-17 (in Korean).
14. Lee, D. W., and J. J. Noh, 2012. Behavior of failure of agricultural reservoirs embankment due to overtopping. *CNU Journal of Agricultural Science* 39(3): 427-439 (in Korean).
15. Lee, D. W., and Y. H. Lee, 2013. The safety behavior of agricultural reservoirs due to raising the embankment. *CNU Journal of Agricultural Science* 40(3): 243-252 (in Korean).
16. 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).
17. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. The 4 major rivers restoration. <http://4rivers.go.kr>.