진동대모형실험에 의한 농업용 저수지 제체의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Agricultural Reservoir Embankment through Shaking Table Tests

이영학* · 류정현** · 윤보라*** · 허준**** · 이달원*****

Lee, Younghak*, Ryu, Junghyun**, Yoon, Bora***, Heo, Joon****, and Lee, Dalwon*****

Abstract

In this study, shaking table tests were performed to compare and analyze the acceleration response, displacement behavior, and pore-water pressure behavior of reservoirs with parapets installed to prevent overtopping of deteriorative homogeneous reservoirs. During the shaking table tests, the experimental conditions were divided into four cases considering the range and magnitude of seismic acceleration according to national standards. The vibration-type waveform (Gongen) and shock-type waveform (Minogawa) were applied as input waveforms. The acceleration amplification ratios of both vibration- and shock-wave types were the largest in the dam crest, and the amplification ratio decreased as the design earthquake acceleration increased. In addition, the horizontal displacement was maximum on the upstream slope, owing to the influence of seepage water, and the vertical displacement was maximum on the dam crest, owing to the self-weight effect of the parapet structure. A comparison of the waveform results indicates that the vibration-type waveform may exhibit a more significant effect on the embankment zone displacement than the shock-type waveform. However, when the safety standards for the horizontal displacement, settlement ratio, and excess pore-water pressure ratio were applied, the embankment was stable within the allowable range in both the shock-type and vibration-type waveforms. Therefore, the parapet structure is expected to influence the overflow resistance and stability of embankments positively.

Key words : Seismic Evaluation, Shaking Table Test, Acceleration Response, Displacement, Excess Pore Water Pressure Ratio

요 지

본 연구에서는 노후화된 균일형 저수지의 월류 방지를 위한 방법으로 Parapet 구조물을 댐마루에 설치하고, 가속도 반응, 변위거동, 공극수압 거동을 진동대 모형시험으로 비교분석하였다. 실험 조건은 국내기준과 진도규모에 따른 지진가속도범위를 고려한 설계지진가속도를 4가지 Case별로 분류하였으며, 진동형 파형(Gongen)과 충격형 파형(Minogawa)을 입력파형으로 적용하였다. 설계지진가속도에 따른 가속도 반응은 진동형 파형에서 가속도의 증가율이 최대지진가속도에 도달할 수 있는 것으로 나타나 충격형 파형보다 제체 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 진동형 파형 및 충격파형 모두 가속도 증폭비는 댐마루에서 가장 높았으며, 설계지진가속도가 커질수록 증폭비는 작아지는 특징을 나타내었다. 또한, 수평변위는 침투의 영향으로 상류사면에서 가장 컸고, 수직변위는 댐마루에서 가장 크게 나타났다. 본 연구에서 검토된 파형의 비교결과는 진동형 파형이 충격형 파형보다 제체의 변위에 미치는 영향이 클 수 있음을 제시하였다. 그러나, 수평변위와 침투비, 과잉공극수압비에 대한 안전기준을 적용한 결과, 충격형과 진동형 파형 모두에서 허용범위 이내로 안정한 것으로 평가되었다. 따라서, Parapet 구조물은 월류 저항성과 제체 자체의 안정성에 대하여 긍정적인 효과를 가질 것으로 기대된다.

핵심용어 : 내진성능평가, 진동대 시험, 가속도반응, 변위, 과잉공극수압비

*정회원, 충남대학교 농업생명과학연구소 연구교수(E-mail: fulia_cate@cnu.ac.kr)

Member, Research Professor, Institute of Agricultural Science, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 지역환경토목학과 석사과정(E-mail: ryoujh1155@naver.com)

Member, Master's Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

***충남대학교 지역환경토목학과 석사과정(E-mail: wjsvk5@nate.com)

Master's Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

****한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원(E-mail: jheo01@ekr.or.kr)

Assistant Research Engineer, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

*****교신저자, 정회원, 충남대학교 지역환경토목학과 교수(Tel: +82-42-821-5793, Fax: +82-42-821-8877, E-mail: dwlee@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

1. 서론

국내 농업용 저수지의 형식은 99%가 필댐으로 구성되어 있고, 축조된 지 50년이 경과된 저수지가 82%에 이르고 있어 월류, 파이핑 및 누수로 인한 재해위험도가 더욱 가중되고 있다. 특히, 최근의 집중호우나 홍수에 의한 자연재해가 과거보다 증가되고 있어 월류에 의한 피해가 더욱 확대될 것으로 전망되고 있다(Lee et al., 2019; Lee, Lee, Heo, et al., 2020).

월류는 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 때 발생하며, 월류에 의한 제방의 붕괴속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르다.

월류로 인한 제방의 붕괴는 제체의 다짐도, 축조재료, 둑마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 단기적 및 장기적으로 적합한 보강방법을 적용한다면 붕괴 시간을 지연할 수 있어 제체 안정성을 높일 수 있다(Lee and Noh, 2014; Lee et al., 2018).

국내의 경우 노후화 저수지에 대하여 리모델링 개념으로 보강이 실시되어 왔으며, 이때 설계 시공되는 저수지는 기존 제체내의 코어와 필터가 정상적인 상태로 판단하고 저수지 전체의 독을 높이는 방법이 주로 이용되어 왔다. 그러나 경제적, 제도적 및 기술적인 문제로 순차적으로 진행되고 있어 오랜 시간이 소요되고 있는 실정이다(Lee and Lee, 2017; Lee, Lee, Ryu, et al., 2020).

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Parapet을 댐마루에 설치하여 제체 높이를 증가시키는 방법은 월류로 인한 전체 붕괴를 사전에 예방할 수 있을 뿐만 아니라 단기간 내에 가능하므로 현장에서 매우 유용하다고 판단된다. 그러나 이러한 구조물은 지진에 의한 침하와 액상화로 인한 변형 및 붕괴 피해가 발생할 수 있기 때문에(Paul, 2004), 정적 안정성 평가뿐만 아니라 동적거동에 대한 안정성 검증이 필요하다.

우리나라는 지진발생 가능성이 낮은 지역으로 분류되고 있으나, 1978년~2017까지 발생한 경주지진(2016년 규모 5.8)과 포항지진(2017년 규모 5.4)을 포함한 진도 5.0 이상의 중규모 지진이 10회 정도 발생하였다(KMA, 2020). 이에 따라 내진설계의 중요성이 높아지고 있으며 내진 설계 및 성능평가 대상 시설물의 범위를 확대 적용하고 있다. 또한, 국 필댐의 내진설계에 대하여 내진성능기준 제시, 지진해석방법, 댐 형식별 내진설계 조건, 내진등급별 설계지진 수준, 농업용 필댐설계 기준 등이 정립되었다(MOLIT, 2018; MAFRA, 2019; ME, 2019).

필댐의 실내모형실험 및 수치해석에 대한 선행연구는 진동시 하중의 작용조건에서 토체 내에서의 거동이 파괴상태에 따라 복잡한 응력-변형 관계로 나타나고 있다(Desai, 2001). 또한, 필댐준별 구성요소 및 토질의 종류가 수치해석에 영향을 미치고, 사면경사가 클수록 지반중폭이 큰 것으로

제시된다(Choi, 2015; H.Y. Kim et al., 2020).

지진에 의한 동적거동특성은 제체의 조건에 따라 예측하기 어렵고 상이한 결과들을 나타낼 수 있기 때문에, 새로운 공법 적용 시 동적거동특성분석은 시설물의 내진성능 확보에 필수적이다(Nakazawa et al., 2017; Sawada et al., 2018; Sawada et al., 2019; Jeong et al., 2020; M.J. Lee et al., 2020).

그동안 국내에서는 필댐 설계시 한계상태평형해석법에 기초한 많은 수치해석적 접근과 실내 모형실험이 진행되어 왔지만, 동역학적인 접근은 실지진기록의 이용실적이 적거나 진동대 및 원심모형실험기와 같은 실험장비 확보의 어려움 등으로 연구 사례가 적은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 농업용저수지의 월류 방지를 위한 Parapet을 댐마루에 설치하고 진동대 모형시험을 통하여 지진가속도에 따른 가속도 응답, 변위 및 과잉공극수압 거동을 비교분석하여 내진설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 진동대 모형시험

2.1 모형 축조를 위한 상사법칙

실내모형실험은 원형과 상사관계에 있다고 가정하여 상사치를 구한 후 현상을 예측하는데 광범위하게 이용되고 있다. 모형에서 측정된 결과를 원형에 적용하기 위해서는 상사법칙이 성립되어야 하는데 일반적으로 기하학적 상사(길이비, 면적비, 체적비), 운동학적 상사(시간비, 가속도비, 속도비, 유량비), 동력학적 상사(힘의 비, 질량비)법칙이 적용된다.

상사법칙은 적용한계가 있고 엄밀한 이론적인 측면에서 운동현상을 완전하게 상사법칙으로 구현하기는 불가능하지만, 축척비의 선정이 적합하다면 현장에서 만족할 수 있을 정도의 결과를 재현할 수 있다. 그러나 여러 가지 물리량에 따라 축소모형에서 나타난 결과는 실제와는 다른 거동을 나타내기 때문에 축소모형에서 측정하고자 하는 부분이 현장에서도 적용가능한가를 미리 파악하여야 한다.

Iai (1989)는 1 g 중력장에서 포화된 지반-구조물-유체 모델에 대한 진동대 실험으로 상사법칙을 유도하였다. 흙의 구성법칙으로 이용한 기본방정식은 적절한 축소 요소를 고려한다면 응력-변형 관계는 구속응력에 관계없이 결정할 수 있다. 따라서 상사법칙은 지반-구조물-유체 시스템의 극한 안정 상태보다는 변형에 관심이 있는 모델에 적용할 수 있다.

상사법칙을 만족하기 위한 기하학적 조건은 $l_p/l_m = \lambda$ 이다(l_m, l_p : 모형 및 원형 길이).

운동학적 상사 조건은 시간, 밀도, 가속도, 변위, 응력, 변형률, 공극수압 등에 대한 상사비이다. 밀도와 가속도 상사비는 실제 현장의 중력장이 같아야 하므로 1.0이고, 응력과 공극수압은 기하학적 상사비와 동일하다. 변형률에

대한 상사비는 모형과 원형사이의 변형특성과 반응이 같을 경우($\lambda_c = 1.0$)와 다를 경우($\lambda_c = \lambda^{0.5}$)로 구분되는데, 본 연구에서는 전단파 속도를 측정하지 않았을 경우에 모형과 원형의 질량이 거의 유사하다는 가정 하에서 $\lambda_c = \lambda^{0.5}$ 를 적용하였다.

모형시험에서는 상사법칙의 효율성과 진동대 규모의 여건 등을 고려하여 상사비를 1/80로 적용하였으며 상사법칙에 따른 모형과 원형의 관계는 Table 1과 같다.

2.2 대상저수지 선정 및 사용시료

연구대상 저수지는 공주시 소재 계룡 저수지로 zoned fill-type이다. 계룡저수지는 50년 이상(축조년도: 1964년) 경과된 노후화 저수지이며, 중·소규모 제체의 최대 높이($H \leq 30$ m)에 대하여 평균 높이($H = 17.1$ m)에 근접하므로 표준 단면으로 선정하였다(Lee et al., 2018).

대상지구의 하부지반은 심도가 20 m 이하이며, 세립토의 함유분이 약 30%로 구성되어 있다. 액상화 평가의 실시기준은 세립토의 함유분이 35% 이하인 조건이므로 액상화 평가가 필요한 지반에 포함된다(MOLIT and KISC, 2020). 실험에 사용된 성토시료의 물리적 및 역학적 성질은 Fig. 1 및 Table 2와 같다.

2.3 저수지 모형 축조 및 계측기 위치

진동대 모형토조는 철제 및 투명 특수강화 재질로 제작하였고, 진동대의 구성은 모형토조, 유압서보시스템, 서보컨트롤 장치, 데이터 수집장치 등으로 구성되어 있다. 진동대의 최대시험하중은 49 kN, 최대가속도 1.0 g, 최대주파수 0.1~100 Hz이고 일축방향으로 진동을 발생시킬 수 있다.

Fig. 2는 제체의 축소모형과 계측기 매설 위치로 1/80로 축소된 실험모형을 보여준다. 실험모형단면은 길이(L) 60 cm, 폭(W) 100 cm, 높이(H) 19 cm 이며, 댐마루에 설치된 Parapet은 길이 60 cm, 폭 7 cm, 높이 7 cm 크기의 강화 재질로

Fig. 1. Grain Size Distribution

Fig. 2. Model Embankment and Instrument Location

Table 1. Applied Similarity Law

Similarity Law for Model Tests in 1 g Gravitational Field			
Physical Quantity		Scaling Factors (Prototype/Model)	Converted Value
χ	Length	λ	80
t	Time	$\lambda^{0.75}$	26.75
σ	Total Stress of Soil	λ	80
σ'	Effective Stress of Soil	λ	80
p	Pressure of Pore Water and or External Water	λ	80
u	Displacement of Soil and or Structure	$\lambda^{1.5}$	715.54
$\ddot{u}$	Acceleration of Soil and or Structure	1	1

Table 2. Material Properties of Sample Soil

Sample	G_s	PI (%)	k_v (m/s)	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (KN/m^3)	c (kPa)	ϕ°	USCS
Embankment	2.65	9.2	2.37E-07	8.6	17.75	16.7	24	SC

(a) Gongen Waveform

(b) Minogawa Waveform

(c) Gongen Response Spectrum (0.07 g)

(d) Minogawa Response Spectrum (0.07 g)

Fig. 3. Corrected Time History and Response Spectrum

제작하였다.

계측기는 가속도계(A1-A3) 3개, 공극수압계(P1-P3) 3개, 수직 및 수평변위계가 6개로 상류사면, parapet, 하류사면 소단에 각각 설치되었다.

제체 모형 축조에 사용된 성토재료는 균질한 상태로 포설 하기 위하여 2 mm체를 통과한 시료만 사용하였고, 모형축조는 최적함수비로 기초지반부터 약 5 cm 씩 포설한 후 다짐하였다. 또한, 기초지반의 누수를 방지하기 위하여 차수메트, 방수테이프 및 벤토나이트를 적용하였고, 최대건조밀도의 95% 이상으로 제체를 축조하였다.

모형 제체의 비탈면 경사는 1 : 2.0(하류사면), 1 : 2.5(상류사면)로 적용하였고, 상류사면의 수위는 만수위(HWL = 15 cm)를 유지한 상태로 실험을 실시하였다.

2.4 실지진기록을 활용한 지반운동시간이력

실지진파를 이용한 국내 내진해석은 국내지진발생 빈도가 실질적으로 낮고 국내의 지반특성과 해외의 지반환경이 다르기 때문에 주로 일본에서 실계측된 장주기 Hachinohe (최대가속도: 0.170 g)파와 단주기 Ofunato (최대가속도: 0.161 g)파가 주로 이용되고 있으며, 이를 표준응답설계스펙트럼(KDS 17 10 00)에 맞게 수정하여 사용하고 있다.

일본에서는 이미 대규모 지진 성능조사에서 정회전파와 반전파형을 선정하여 내진성능평가를 수행하고 있고(Inomata et al., 2005), 그 외에도 지진파형을 정현파, 썸기파, 충격형, 진동형으로 분류하여 최대하중 가속도 기록 중 최대하중의 60% 이상이 3회 이상일 경우 진동형, 미만일 경우는 충격형

으로 구분하고 있다. 이처럼 지진파형의 다양한 특성들이 포화사질토 지반에 미치는 영향에 대해서는 일부 연구가 진행된 바 있지만(Ishihara and Perlea, 1984; Choi et al., 2007; J.M. Kim et al., 2000), 국내에서 이와 같이 지진을 분류하거나 파형의 특정 조건에 맞춘 저수지의 동적거동특성 연구는 수행되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일본의 필댐 기초지반에서 관측된 진동형 특성을 가진 Gongen 댐 파형(1995년 효고현 남부지진)과 충격형 특성을 가진 Minogawa 댐 파형(1995년 효고현 남부지진) 데이터를 적용하였다.

Fig 3은 사용된 파형에 대한 시간이력 및 응답스펙트럼을 보여준다. Gongen 댐 파형은 진동형으로 최대가속도에 가까운 진폭의 파고가 약 10초 정도로 비교적 긴 파형으로 1.5 Hz 부근에서 최대주파수를 가진 지진파형이다. Minogawa 댐 파형은 푸리에스펙트럼 분석 결과, 최대가속도 파형이 단시간에 집중적으로 작용되는 충격형으로 0.8-1.8 Hz 부근에서 탁월주기를 가진 지진파형이다(Lee et al., 2014).

보정된 Gongen 파의 경우 탁월주기가 약 0.05초와 약 0.3초에서 형성되고 있으며, Minogawa 파의 경우 약 0.3초에서 형성되고 있다.

본 실험의 전체적인 분석조건은 Table 3에 나타내었다. 설계지반가속도는 국내 내진설계기준(KDS 17 00 00)에서 균일형 필댐이고 S1지반(기반암)일 때, 재현주기 및 국내 지진구역에 따른 위험계수를 고려한 설계가속도 범위 (0.084 g-0.264 g) 및 진도규모를 고려해 Case 1은 0.07 g, Case 2는 0.11 g, Case 3은 0.154 g, Case 4는 0.22 g으로,

Table 3. Design Seismic Acceleration Analysis Conditions

Classification	PGA (g)	MMI, (Acceleration Range (g))	Seismic Zone Coefficient (Z) and Risk Factor (I)	Seismic Classification
Case 1	0.070	6.0-6.5 (0.069-0.108)	Z = 0.07 (Zone 2) I = 1.0 (Recurrence Period: 500 yr)	Grade 2: Total Storage 300,000 m ³ or More
Case 2	0.110	6.5-7.0 (0.108-0.147)	Z = 0.11 (Zone 1) I = 1.0 (Recurrence Period: 500 yr)	Grade 1: Total Storage 20,000,000 m ³ or More
Case 3	0.154	7.0-7.5 (0.147-0.232)	Z = 0.11 (Zone 1) I = 1.4 (Recurrence Period: 1,000 yr)	Grade 1: Total Storage 20,000,000 m ³ or More
Case 4	0.220	7.0-7.5 (0.147-0.232)	Z = 0.11 (Zone 1) I = 2.0 (Recurrence Period: 2,400 yr)	Superior Grade: Over 45 m Height and over 50 Million m ³ of Total Storage

(a) Gongen; Case 1

(b) Minogawa; Case 1

(c) Gongen; Case 2

(d) Minogawa; Case 2

(e) Gongen; Case 3

(f) Minogawa; Case 3

(g) Gongen; Case 4

(h) Minogawa; Case 4

Fig. 4. Time History of Design Ground Acceleration

총 4가지 Case를 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가속도 반응

Fig. 4는 설계지진가속도에 따라 진동형(Gongen)과 충격형(Minogawa)의 가속도반응을 나타낸 것이다.

진동형 파형에서의 가속도 반응은 모든 Case에서 댐마루(A1)쪽으로 갈수록 점차적으로 커지나, 제체하부(A2)와 기초지반(A3)에서는 그림에서도 중복될 정도로 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나, 입력가속도가 높은 단계(Case 4)에서는 가속도 반응이 증가하는 경향을 나타내었다.

충격형 파형에서는 모든 Case에서 댐마루(A1)쪽으로 갈수록 점차적으로 증가하였고, 제체하부(A2)와 기초지반(A3)에서도 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다.

기초지반에서 설계가속도를 비교하면 진동형 파형의 경우 탁월주기가 약 0.05초 및 0.3초로 구조물의 고유주기와 유사하여 공진현상으로 인해 크게 나타난 것으로 간주되며, 충격형 파형의 경우 탁월주기가 약 0.3초에만 형성되어 감소로 인한 영향으로 작게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 5는 진동형 파형과 충격형 파형에서의 증폭비 변화를 나타낸 것이다.

진동형 파형과 충격형 파형에서는 공통적으로 측정지점의 높이가 증가할수록 증폭비는 증가하여 댐마루(A1)에서 가장 크게 나타났다. 또한, 설계지진가속도가 증가할수록 증폭비는 작아지는 결과를 나타내었다.

증폭비에 대한 비교에서는 진동형 파형이 1.1~2.3배였으며, 충격형 파형은 0.8~1.7배 범위로 충격형 파형이 더 작았다.

이와 같은 원인은 충격형 파형의 탁월주기가 진동형보다 더 큰 것에 기인하며, 동일한 조건의 설계지진가속도가 작용될 경우 제체 내부에서 지진 저항력의 상실 정도는 진동형 파형이 충격형 파형보다 클 수 있음을 나타낸다.

또한, 지진 가속도의 크기가 커질수록 진동형 파형은 충격형 파형보다 상대적으로 증폭에 민감해지기 때문에 제체 균열과 같은 위험성의 발생 가능성을 높일 수 있음을 시사한다.

설계지진가속도인 0.154 g (Case 3), 0.22 g (Case 4)의 경우는 지진규모가 7.0~7.5 범위에 해당되고, 내진 1등급 및 특등급 저수지에 해당되므로 중소규모 저수지에 적용하는 것은 과대설계가 될 수 있다. 따라서 저수지의 규모에 따라 적합한 설계지진가속도를 결정하여야 하며, 이러한 조건에서 진동형과 충격형 파형을 적용한 가속도반응은 다양한 동적거동을 예측하는데 있어서 효과적인 기초자료가 될 것으로 판단된다.

3.2 저수지 제체의 변형거동

Figs. 6과 7은 상류사면, 댐마루(Parapet)와 하류사면에서 설계지진가속도에 따른 진동형 파형의 수평 및 수직변위를

Fig. 5. Variation of the Amplification Ratio according to Design Ground Acceleration

나타낸 것이다.

제체높이(h)에 따른 침하비(s/h)는 지진으로 유발된 피해를 추정하는데 중요한 지표로 제방변형에 대한 허용범위기준은 제체높이의 1% (MOLIT and KISC 2005)이며, 지진시 수평허용변위량 30 cm 이하가 기준으로 제시된 바 있다 (MOF, 2019).

그러나 댐마루의 최대변위에 대한 허용범위기준인 1%는 안정성을 평가하는 기준으로서 불합리 할 수 있으며(Choo et al., 2011), 침하비가 0.1~1% 범위이면 최소한의 성능평가 및 보수가 필요하다고 결과도 제시된 바 있다(Toritsu et al., 2009). 이러한 결과들은 저수지 제체의 구성 조건과 지반 조성 환경에 의존될 수 있으므로 전체의 제체에 대하여 특정하기 어려울 수 있으며, 제체의 상태에 따라 적용여부를 판별하는 것이 합리적으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 현행 기준을 중심으로 침하비 1%와 수평허용변위량을 기준으로 댐마루의 상부구조물 적용에 의해 제체의 안정성을 평가하였다.

진동형 파형에서 수평변위는 설계지진가속도가 증가할수록 모든 위치에서 증가하였고, 변위의 크기는 상류사면, 하류사면, 댐마루 순으로 크게 나타났다. Case 4에서는 하류사면이 상류사면보다 크게 나타나는 특징이 있는데 이는 포화-불포화상태에서의 동적거동특성은 큰 차이가 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 상사율을 고려한 수평침하량은 47 mm로 수평허용변위량 기준인 30 cm 이내에 포함되어 안정한 것으로 평가되었다.

수직변위는 설계지진가속도가 증가할수록 상류사면과 하류사면에서 큰 차이를 나타내지 않았으나, 댐마루에서는 Parapet에 의한 자중의 영향으로 지진가속도의 증가에 따라 점차적으로 침하가 증가하는 것으로 나타났다.

상사율을 고려한 침하비(%)는 설계지진가속도가 증가할수록 댐마루에서 크게 나타났고, 원형저수지의 높이(15.2 m)를 고려하여 가장 높은 단계인 Case 4 (0.22 g)에서 평가

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 6. Horizontal Displacement of the Gongen Waveform

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 7. Vertical Displacement of the Gongen Waveform

시 0.22% 이내로 설계기준 1% 보다 작게 나타나 안정한 것으로 평가되었다.

충격형 파형에서의 수평변위는 설계지진가속도가 증가할수록 상류사면에서 매우 크게 증가하였고, 댐마루에 설치

된 Parapet 에서 약간의 변위만 발생하였다. 상사율을 고려한 수평침하량은 40 mm로 수평허용변위량 기준인 30 cm 이내에 포함되어 안정한 것으로 평가되었다.

수직변위는 설계지진가속도가 증가할수록 상류사면과

Fig. 8. Change in Excess Pore Pressure Ratio of the Gongen Waveform

하류사면에서 변화가 미미하였으나, 댐마루에서는 Parapet에 의해 약간씩 침하하는 경향을 나타내었다. 그러나, 진동형 파형보다 현저히 작은 침하를 나타내었다.

상사율을 고려한 침하비(%)는 설계지진가속도가 증가할수록 댐마루에서 크게 나타났고, 원형저수지의 높이(15.2 m)를 고려하여 가장 높은 단계인 Case 4 (0.22 g)에서 평가시 0.06% 이내로 설계기준 1% 보다 작게 나타나 안정한 것으로 평가되었다.

상기의 결과들은 진동형 및 충격형 파형 모두 수평변위에 대하여 상류사면에서 가장 크고, 수직변위에 대하여 댐마루에서 가장 크다는 사실을 보여준다. 상사율을 고려한 수평변위와 침하비는 허용범위 이내에 포함되어 안정한 것으로 평가되었지만, 상류사면, 댐마루, 하류사면에서의 수평 및 수직변위의 발생은 변위가 발생한 각 위치에서 균열가능성이 존재한다는 것을 의미하므로 제체의 취약부위를 분석하는데 중요한 기초데이터가 될 수 있다.

또한 댐마루에 설치된 Parapet은 설계가속도에 따른 변위의 변동폭이 작고 수평 및 수직변위가 허용기준범위내에 있기 때문에 월류 저항성 측면에서 매우 효과적인 방법이 될 것으로 판단된다.

3.3 과잉공극수압 거동

지진시 발생된 과잉공극수압은 액상화를 일으키는 주원인이 되고, 국내의 액상화 평가 기준은 내진설계일반에 제시되어 있다(MOLIT, 2018).

제시된 액상화 평가는 깊이별 액상화 발생 가능성을 진동전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)와 진동저항전단응력

비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)의 비($F_s = CRR/CSR$)로 평가하는 방법이다. 이때, 안전율 1.0 미만 ($F_s < 1.0$)의 지반은 액상화가 발생하는 것으로 판별하고 있다.

댐체 또는 기초지반의 지진 시 작용응력 산정방법은 액상화를 유발하는 깊이별 지진하중으로 깊이별 응력과 깊이별 최대지반가속도(PGA, peak ground acceleration)로 표현된다. 깊이별 응력은 지반조사를 통해 산출되며 최대지반가속도는 실지진기록을 통해 결정될 수 있다. 이때, 실지진기록을 활용한 지반운동 시간이력을 입력지진파로 사용할 경우 표준설계응답스펙트럼에 맞추어 실기록 지진파를 보정한 결과가 입력 지진파로 사용된다(Y.J. Kim et al., 2020).

또한 액상화 평가는 비선형 유효응력해석법으로부터 산정된 최대공극수압으로부터 액상화를 직접적으로 판정하는 방법이 있다. 이때 과잉공극수압비($\Delta u/\sigma'$)가 1.0 이상이면 액상화 가능성이 있다고 평가하고, 액상화 거동특성은 반복된 지진하중에 의해 액상화 상태 전, 초기 액상화 상태, 액상화 후 거동으로 구분한다(Desai and Rigby, 1997; Choi and Kim, 2004; Park et al., 2006).

본 연구에서는 액상화 평가를 비선형 유효응력해석법으로부터 산정된 최대공극수압비로부터 Parapet이 설치된 제체의 액상화를 직접적으로 분석하였다.

Figs. 8과 9는 상류사면, 제체하부, 하류사면에서의 액상화 가능성을 분석하기 위해 설계지진가속도에 따라 진동형 파형과 충격형 파형에서 과잉공극수압비($\Delta u/\sigma'$)를 나타낸 것이다.

과잉공극수압비로부터 액상화 가능성을 평가하기 위한 유효응력은 침투해석을 통해 상류사면은 1.03 kPa, 댐마루는

Fig. 9. Change in Excess Pore Pressure Ratio of the Minogawa Waveform

3.63 kPa, 하류사면은 1.04 kPa로 계산되었다.

진동형 파형에서 과잉공극수압비는 설계지진가속도가 증가할수록 모든 위치에서 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 상류사면과 제체하부에서는 작으나, 하류사면에서는 변화폭이 큰 것으로 나타났다.

충격형 파형에서 과잉공극수압비는 설계지진가속도가 증가함에도 불구하고 큰 변화를 나타내지 않았고, 하류사면에서만 약간씩 변화폭이 증가하였으며, 결과적으로 진동형 파형보다 작은 과잉공극수압비를 나타내었다.

이러한 결과는 균일형 제체 상태에서는 코어가 존재하지 않기 때문에 상류사면을 통하여 침투수가 하류사면으로 빠르게 이동하여 포화영역이 쉽게 형성된 것과 관계있다. 동시에 진동형 파형에서는 지진가속도가 증가함에 따라 탁월주기에 따른 공진으로 인해 공극수압 변화가 더욱 크게 나타난 것으로 판단된다.

최대과잉공극수압비를 기초로 액상화의 안정성을 평가한 결과, 진동형 파형의 경우 약 0.106, 충격형 파형의 경우 약 0.032로 허용안전기준인 1.0 이내를 만족하여 액상화에 대한 영향이 크지 않을 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 농업용저수지의 월류 방지를 위한 Parapet을 댐마루에 설치하여 지진가속도에 따른 가속도 반응, 변위 거동 및 과잉공극수압 거동을 진동대 모형시험으로 비교분석하여 동적내진설계시 기초자료로 제공하고자 하였다.

진동대 실험은 국내기준과 진도규모에 따른 지진가속도

범위를 고려하여 설계가속도를 4가지 Case별로 분류하고, 진동형 파형(Gongen)과 충격형 파형(Minogawa)를 구현하여 균일형 저수지에 작용하는 동적거동특성을 비교분석하고 내진성능을 평가하였다.

1. 설계지반가속도에 따른 가속도 응답은 지진파형의 종류에 따라 저항할 수 있는 한계점이 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 진동형 파형에서는 가속도의 증가율이 최대지진가속도에 도달할 수 있는 것으로 나타났고, 충격형 파형에서는 최대가속도에 도달하지 못하였는데 이는 제방존의 저항력 상실과 함께 가속도가 증폭된 결과로 분석된다. 따라서 진동형 파형이 작용할 경우에는 응력 거동에 따라 상대적으로 제체 균열과 같은 위험성이 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.
2. 설계지진가속도에 따른 가속도 반응은 모든 Case에서 제체의 높이가 높아질수록 증가하였다. 증폭비는 진동형 파형에서 1.1~2.3배 범위이고, 충격형 파형에서는 0.8~1.7배 범위로 나타났다. 증폭비는 댐마루에서 가장 크고 설계지진가속도가 높은 단계(Case 4)로 진행할수록 작아지는 경향을 나타내었다.
3. 수평변위는 진동형 파형과 충격형 파형 모두 상류사면에서 가장 컸고, 수직변위는 Parapet 구조물에 의한 자중의 영향으로 인해 댐마루에서 가장 크게 나타났다. 댐마루에서 설계가속도가 증가할수록 변위도 증가하지만 변동폭이 현저하게 작고 수평변위와 침하비가 허용기준범위내를 만족하였다. Parapet 구조물은 월류 방지 및 월류 저항성을 높일 수 있다는 측면에서 적용성이 우수한 방법이라고 판단된다.

4. 진동형 파형에서 과잉공극수압비는 하류사면에서만 약간씩 변화폭이 증가한 충격형 파형과 다르게 하류사면에서 크게 나타나는 특징이 있다. 그러나, 진동형 파형과 충격형 파형 모두에서 액상화 평가기준인 1.0 이내에 포함되어 매우 안전한 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(과제번호: 2019R1I1A3A01058517 및 2019R1C1C1007100) 및 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발 사업(320002-01)의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- Choi, B.I. (2015). Dynamic analysis of 3 different cross-sectional shapes of a fill dam using 3D FEM Analysis. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 8, pp. 37-43.
- Choi, J.S., and Kim, S.I. (2004). A critical liquefaction resistible characteristic of saturated sands based on the cyclic triaxial test under sinusoidal loadings. *Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 8, pp. 147-158.
- Choi, J.S., Jang, S.Y., and Kim, S.I. (2007). Detailed investigation on the dynamic excess pore water pressure through liquefaction tests using various dynamic loadings. *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 2, pp. 81-94.
- Choo, Y.W., Lee, S.H., Kim, M.K., and Kim, D.S. (2011). A study on the criteria for the earthquake safety evaluation of fill dams. *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 15, No. 6, pp. 19-31.
- Desai, C.S., and Rigby, D.B. (1997). Cyclic interface and joint shear decising including pore pressure effects. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, pp. 568-579.
- Desai, C.S. (2001). *Mechanics of materials and interfaces: The disturbed state concept* (pp. 1-698). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fulid model in 1 g gravitational field. *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
- Inomata, J., Yasuda, S., Kindou, M., Sano, T., Yoshioka, H., Kawasaki, H., et al. (2005). Technical note on seismic performance evaluation of dams against larger earthquake. *National Institute for Land and Infrastructure Management*, No. 244, pp. 1-192.
- Ishihara, K., and Perlea, V. (1984). Liquefaction-associated ground damage during the Vrancea earthquake of march 4, 1977. *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 1, pp. 90-112.
- Jeong, K.B., Shibuya, S., Kawabata, T., Sawada, Y., and Nakazawa, H. (2020). Seismic performance and numerical simulation of earth-fill dam with geosynthetic clay liner in shaking table test. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 48, pp. 190-197.
- Kim, H.Y., Jin, Y., Lee, Y.H., Kim, H.S., and Kim, D.H. (2020). Dynamic response characteristics of embankment model for various slope angles. *Journal of the Korean Geo-synthetics Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 35-46.
- Kim, J.M., Jin, Y.H., and Han, H.S. (2020). Analysis of behavior a river levee based on the earthquake scenario. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 481-487.
- Kim, Y.J., Ko, K.W., Kim, B.M., Park, D.H., Kim, K.S., Han, J.T., and Kim, D.S. (2020). Evaluation of liquefaction triggering for the Pohang area based on SPT and CPT tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 10, pp. 57-711.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2020). *Trends in domestic earthquakes*.
- Lee, M.J., Kim, Y.S., Heo, J., Bark, M.W., Bibek, T., and An, S.S. (2020). Comparing and consideration of static and dynamic stability analysis methods for domestic reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 5, pp. 73-84.
- Lee, D.W., and Noh, J.J. (2014). Behavior of failure on agricultural reservoirs embankment by riprap reinforcement method. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 6, pp. 63-73.
- Lee, Y.H., and Lee, D.W. (2017). Effective method for remodeling of deteriorated agricultural reservoirs. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, pp. 43-52.
- Lee, Y.H., Park, S.Y., Tokida, K.I., and Lee, D.W. (2018). Three-dimensional seepage characteristics of reservoir embankment considering interval of horizontal filter. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 80-86.
- Lee, Y.H., Lee, T.H., and Lee, D.W. (2019). Overtopping model experiments and 3-D seepage characteristics of the embankment of deteriorated homogeneous reservoirs. *Journal of Korean Society of Agricultural*

- Engineers*, Vol. 61, No. 1, pp. 13-23.
- Lee, Y.H., Lee, D.W., Heo, J., and Ryu, J.H. (2020). Model experiments for the reinforcement method of agricultural reservoirs by overtopping. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 47, pp. 163-171.
- Lee, Y.H., Lee, D.W., Ryu, J.H., Kim, C.H., Heo, J., and Shim, J.W. (2020). An evaluation of a crushed stone filter and gabion retaining wall for reducing internal erosion of agricultural reservoirs. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 47, pp. 485-496.
- Lee, Y.H., Tokida, K., Hata, Y., Kawaguchi, J., and Uotani, M. (2014). Basic study on effects of inclined core structure on seepage and dynamic performance of heightened earth dam. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 70, No. 545-559.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). (2019). *Agricultural fill dam design* (KDS 67 10 20).
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Dam seismic design* (KDS 54 17 00).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). *Seismic design general* (KDS 17 10 00).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2019). *Port and fishing port design standards* (KDS 64 17 00).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Korea Infrastructure Safety Corporation (MOLIT and KISC). (2005). *Seismic performance evaluation and improvement of existing embankment*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Korea Infrastructure Safety Corporation (MOLIT and KISC). (2020). *Guidelines for evaluating and improving earthquake resistance of existing facilities (Foundation and ground)*.
- Nakazawa, H., Sawada, Y., Oda, T., Kobayashi, T., Kobayashi, S., Kawabata, T., et al. (2017). Investigation of residual deformation of small earth dams in full-scale shaking tests. *Journal of Japan Society Civil Engineers, Ser. A1*, Vol. 73, No. 4, pp. 815-826.
- Park, I.J., Kim, S.W., Jang, W.H., Kim, H.T., and Yoo, C.H. (2006). Evaluation of a seismic performance for reservoir dams in Korea. *Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 7, No. 6, pp. 89-100.
- Paul, D.K. (2004). Assessment of damage and rehabilitation of small and medium earth dams. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, No. 2160.
- Sawada, Y., Nakazawa, H., Oda, T., Kobayashi, S., Shibuya, S., and Kawabata, T. (2018). Seismic performance of small earth dams with sloping core zone sand geosynthetic clay liners using full-scale shaking table tests. *Soil and Foundations*, Vol. 58, pp. 519-533.
- Sawada, Y., Nakazawa, H., Take, W.A., and Kawabata, T. (2019). Effect of installation geometry on dynamic stability of small earth dams retrofitted with a geosynthetic clay liner. *Soil and Foundations*, Vol. 59, pp. 1830-1844.
- Toritsu, S.S., Sato, J., Towhata, I., and Honda, T. (2009). 1-G model tests and hollow cylindrical torsional shear experiments on seismic residual displacements of fill dams from the viewpoint of seismic performance-based design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 423-437.

Received	March 23, 2021
Revised	March 23, 2021
Accepted	April 7, 2021