

지진파괴확률 영곡선 활용 국내 식수전용 흙댐의 지진 위험도 분류 사례 연구

A Case Study on the Seismic Hazard Classification of Domestic Drinking Water Earthfill Dams Using Zero Seismic Failure Probability Curve

하익수^{1)*}

Ha, Ik-soo^{1)*}

¹⁾경남대학교 건설시스템공학과 교수

¹⁾Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

/ A B S T R A C T /

Most of the drinking water dams managed by the local governments in Korea are earthfill dams, and these dams have almost no geotechnical property information necessary for seismic performance evaluation. Nevertheless, in the rough planning stage for improving seismic safety for these dams, it is necessary to classify their relative seismic hazard against earthquakes and conduct an additional ground investigation. The zero seismic failure probability curve is a curve suggested in this study in which the probability of failure due to an earthquake becomes '0' regardless of the geotechnical properties of the earthfill dam. By examining the method and procedure for calculating failure probability due to an earthquake suggested in previous researches, the zero seismic failure probability curves for an earthquake in 1,000-year and 2,400-year return periods in Korea were presented in the form of a hyperbola on the plane of the dam height versus freeboard ratio (ratio of freeboard to dam height), respectively. The distribution characteristics of the dam height and the freeboard ratio of 81 Korean earthfill dams were presented. The two proposed zero seismic failure probability curves are shown on the plane of the dam height versus freeboard ratio, and the relative seismic hazard of 81 dams can be classified into three groups using these curves as boundaries. This study presented the method of classifying the relative seismic hazard and the classification result.

Key words: Drinking water dam, Earthfill dam, Seismic hazard, Zero seismic failure probability curve, Freeboard

1. 서론

2019년 11월 기준 국내 환경부소관 지방자치단체에서 관리하고 있는 식수전용댐은 약 97개인데, 이 중 콘크리트댐은 6개, 필댐은 91개이다. 아울러, 필댐 91개 중 락필댐은 10개, 흙댐은 81개로서 대부분의 식수전용댐은 흙댐이라고 할 수 있다. 여타 기간시설물들과 마찬가지로, 식수전용댐은 지진으로 인한 피해 발생 시, 원활한 식수 공급의 어려움뿐만 아니라 인근 농경지와 주택 등에 인적 및 물적 피해가 발생할 수 있으므로, 지진화산재해 대책법 상 내진성능평가와 내진보강 등이 시행되도록 법제화되어 있다[1]. 2016년 경주지진(규모 5.8)과 2017년 포항지진(규모 5.4)으로 상수도 계통 시설에 대한 내진성능 점검 및 보강의 필요성이 대두되고 있으나, 지자체

에서 설치·운영하는 식수전용댐의 경우, 내진설계 미반영, 심각한 노후도, 주거 밀집지역내 위치 등으로 지진재난에 취약한 상황이다.

지진에 의한 중소규모 흙댐의 주요 파괴모드는, (1) 지진 시 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴; (2) 지진 시 댐 정상부의 침하와 발생된 횡방향(상하류방향) 균열을 통한 상부 침식에 의한 침식파괴, 2가지로 구분될 수 있다[2]. 국내 식수전용 흙댐의 기초지반은 퇴적층의 강바닥이 아닌, 산지 원지반을 기초로 하고 있으며, 댐 축조 중에 대부분의 침하가 이루어지고 다짐이 되어 있는 지반이거나, 암 내지는 풍화암을 기초지반으로 하고 있어 액상화의 가능성은 희박하다. 아울러, 축조재료의 경우에도 점착력을 가지는 화강풍화토 등을 축조재료로 하고 있어 제체의 액상화 역시 그 가능성이 낮다[3]. 액상화 발생 가능성이 낮은 댐의 지진 시 댐 정상부의 침하량은 일반적으로 지진 시 액상화가 발생되지 않았던 댐의 실제 관측 기록을 근간으로 댐 정상부의 침하량은 댐 높이의 1%를 초과하지 못하는 것으로 알려져 있다[4](Fig. 1 참조). Fig. 1의 그래프에서 y축 제목의 NCS

*Corresponding author: Ha, Ik-soo

E-mail: geotech@kyungnam.ac.kr

(Received April 4, 2022; Revised April 27, 2022; Accepted April 28, 2022)

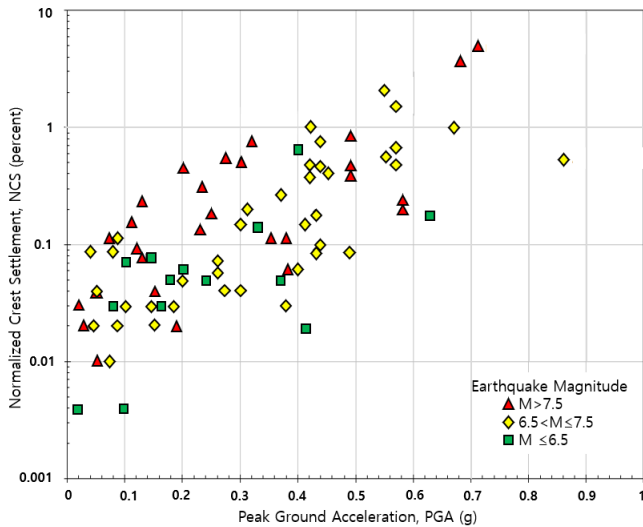


Fig. 1. Settlements for embankment dams during earthquake excluding liquefaction settlement [4]

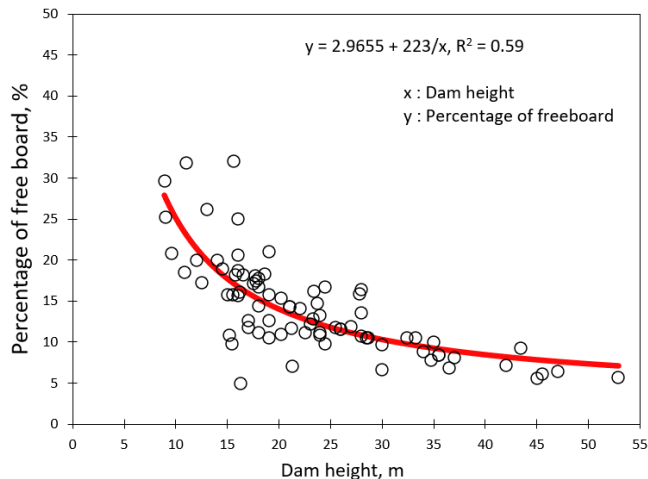


Fig. 2. Distribution characteristics of percentage of freeboard against dam height for 81 earthfill dams

(Normalized Crest Settlement)는 침하량의 댐높이에 대한 백분율을 의미한다. 이러한 사실과 함께 국내 식수전용 흙댐의 여유고는 댐 높이의 최소 5% 이상(Fig. 2와 Table 1 참조)이기 때문에 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴는 국내에서는 크게 고려할 필요가 없는 파괴모드로 판단된다. 그러므로 국내 식수전용 흙댐에서의 지진 시 파괴모드는 지진 시 정상부 침하와 발생된 평균열을 통한 상부 침식에 의한 파괴를 파괴모드로 설정하더라도 큰 무리가 없을 것으로 여겨진다.

2000년대 이후, 댐의 지진 안전도를 평가하는 방법으로 파괴모드, 파괴 확률, 관련 피해도, 다양한 하중조건 등을 통합한 위험도 해석 방법을 일반적으로 적용하는 추세이다[5-8]. 국내에서도 최근 사건수(event tree) 분석 기법을 근간으로 미개척국(USBR, US Bureau of Reclamation)과 미공병단(USACE, US Army Corps of Engineers)에서 개발 적용하고 있는 댐과 제방의 지진위험도분석 절차와 방법[2]을 이용하여 지반공학적인 물성정보를 가지고 있는 국내 7개 중소규모 흙댐에 대한 지진 시 시스템 파괴확률을 산정하고, 댐높이와 댐여유고만을 이용하여 댐의 지진 시 파괴확률이

‘0’이 되는 댐높이-여유고율(댐여유고/댐높이) 임계곡선 산정에 관한 기초 연구를 수행한 바 있다[3].

식수전용댐의 관리주체인 지방자치단체에서 지진에 대한 댐의 안전성을 강화하기 위한 계획을 수립하고자 하는 경우, 각 댐에 대한 내진성능평가를 수행하고 평가 결과에 따라 지진에 대한 상대적인 위험도를 구분하는 것이 하나의 방법일 수 있다. 그러나 정밀안전진단 및 점검보고서, 설계도서 등을 검토한 결과 81개 대상 식수전용 흙댐 중 21개 댐에 대해서만 등가정적사면안정해석과 같은 개략적인 해석법에 의한 내진성능평가가 수행되는 등, 국내의 통상적인 내진성능평가 지침에 따라 성능평가를 수행하고자 하는 경우, 성능평가를 위한 입력값으로 필수적인 지반공학적인 물성정보는 거의 없는 상태이다. 그럼에도 불구하고, 개략적인 계획수립 단계에서 추가적인 지반조사 등을 수행하는 것 없이 최소한의 댐 정보만으로 댐의 지진에 대한 상대적인 위험도를 분류할 필요성은 있다.

본 연구의 목적은 지반공학적인 물성 정보가 거의 없는 국내 81개 식수전용 흙댐을 댐높이와 여유고만을 이용하여 상대적인 지진위험도를 분류하는데 있으며, 이와 관련된 방법과 분류 결과를 제시하는 것이다. 이를 위하여, 기존의 연구 결과에서 제시하는 지진 시 흙댐의 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 검토하여, 국내의 1,000년과 2,400년 재현주기 수준 크기의 지진에 대한 지진파괴확률 영곡선을 댐높이-여유고율(댐여유고/댐높이) 평면에 각각 쌍곡선의 형태로 제시하였다. 국내 81개 식수전용 흙댐의 댐높이-여유고율 분포특성을 보이고, 제시한 2개의 지진파괴확률 영곡선을 댐높이-여유고율 평면에 나타내어, 이러한 곡선들을 경계로 한 81개 식수전용 흙댐의 상대적인 지진위험도를 분류하였다. 지진파괴확률 영곡선이란 기존의 연구[3]에서 제시하는 지진 시 파괴확률이 ‘0’이 되는 댐높이-여유고율 임계곡선과 같은 개념으로 댐의 지반공학적인 물성정보와 상관없이 지진에 대한 파괴확률이 ‘0’이 되는 본 연구에서 제시하는 곡선이다. 본 연구는 이러한 곡선의 의미와 이를 작성하는 기본적인 절차를 다룬 선행 연구결과[3]를 바탕으로 하되, 해당 곡선 작성을 위해 필요한 입력자료를 최신화하여 개선하였으며, 이 곡선을 국내 댐내진설계기준(KDS 54 17 00 : 2019 댐 내진설계)[9]에서 제시하는 지진재현주기별 수준의 지진에 대해 별도로 작성하여 위험도분류 경계곡선으로 활용하는 상대적 지진위험도 분류 방법을 제시한다.

2. 대상댐 특성 분석

Table 1은 연구대상으로 하는 81개 식수전용 흙댐들에 대한 제원, 용량, 안전도 평가 결과, 일부 댐들에 대해서는 내진성능평가(seismic analysis) 결과 등을 정리하여 나타낸 것이다. 대상댐 모두는 중심코어형 흙댐인데, 중심코어형 흙댐의 경우, 여유고는 엄격히는 댐 정상부가 아닌 제체 내부 코어콘 상단에서 저수위까지의 높이로 정의되나 대상댐들의 정상부에서 코어콘 상단까지의 높이가 명확히 제시되지 않았고, 그 높이가 일반적으로 크지 않기 때문에 본 연구에서 여유고는 댐 정상부에서 저수위까지의 높이로 가정하여 정의하였고 Table 1에 제시된 여유고는 이러한 가정으로 정의된 것이다. Table 1에서 안전도등급(safety level)은 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침[10]에 정의된 시설물에 대한 상태평가와 안정성평가로부터 시설물을 5개(A: 우수, B: 양호, C: 보통, D: 미흡, E: 불량)로 구분한

Table 1. Overview and characteristics of the target drinking water earthfill dams

No	Dam	Height (m)	Free board (m)	Capacity ($\times 10^3$ m ³)	Safety level	Seismic analysis ¹⁾ (Dynamic ²⁾)	No	Dam	Height (m)	Free board (m)	Capacity ($\times 10^3$ m ³)	Safety level	Seismic analysis (Dynamic)
1	GWNGR	18.6	3.4	2,973	B	-	42	ODNJ	16.3	0.8	522	B	
2	GWNBR	34.7	2.7	1,240	C	NG (OK)	43	YUCNJ	18.0	3.0	474	B	-
3	SODR	24.5	2.4	232	-	-	44	JUCKYJ	26.0	3.0	486	A	-
4	NANEJ	15.4	1.5	-	-	-	45	HATJ	20.2	2.2	226	B	-
5	DOMJ	35.5	3.0	80	-	-	46	HANSNJ	16.2	2.6	340	B	-
6	BONGSJ	23.3	3.0	200	-	-	47	DOOMR	28.0	3.0	440	A	-
7	SANGJJ	10.8	2.0	50	-	-	48	KOOSJ	22.0	3.1	1,486	-	-
8	ODJ	45.5	2.8	316	-	-	49	DAESNJ	16.0	3.3	826	-	-
9	OKCJ	35.5	3.0	-	-	-	50	BOKRNJ	18.0	3.2	550	-	-
10	UHJ	21.3	1.5	130	-	-	51	YUNAJ	35.0	3.5	3,480	-	-
11	JIJJ	9.6	2.0	130	-	-	52	JUCKRMJ	11.0	3.5	730	-	-
12	HANGDJ	26.0	3.0	101	-	-	53	KUMSNJ	28.5	3.0	2,200	A	OK
13	SUNWJ	52.9	3.0	-	-	-	54	DAEGKJ	23.0	2.8	99	B	OK
14	MYUNGSR	25.5	3.0	476	B	-	55	JANGSNJ	16.5	3.0	574	B	OK
15	UKR	37.0	3.0	900	B	-	56	HACKYN	30.0	2.9	1,584	-	NG
16	SANGWR	17.0	2.0	520	B	-	57	KUKHWJ	18.0	2.6	210	-	-
17	YOKJD	24.0	2.6	87	B	-	58	NYUPDJ	34.0	3.0	120	B	-
18	CHUNGR	27.8	4.4	292	-	-	59	DAEYAJ	45.0	2.5	1,907	B	-
19	JUNGSGR	15.2	1.6	123	-	-	60	MIRAJ	20.2	3.1	340	B	-
20	DAENR	42.0	3.0	799	-	-	61	BOKLJ	17.7	3.2	420	B	-
21	DONGRS	19.0	3.0	120	-	-	62	YONGCLJ	28.6	3.0	120	B	-
22	HWAEDSS	32.4	3.4	610	B	-	63	YUCKSNJ	16.0	2.5	164	C	-
23	WANGSR	27.0	3.2	1,876	-	-	64	CHUKCJ	22.5	2.5	220	B	-
24	JACR	21.0	3.0	300	-	-	65	HAEDNJ	36.5	2.5	1,000	C	-
25	BYUBGD	21.2	2.5	1,507	B	OK	66	KWANMJ	17.0	2.2	48	B	OK
26	HOMKJ	15.0	2.4	401	C	OK	67	KUKKJ	24.0	3.2	1,200	C	NG
27	KANGDJ	23.4	3.8	1,307	B	-	68	NAMDNGJ	19.0	2.4	265	C	OK
28	SINHJ	13.0	3.4	100	B	-	69	DOLMKJ	15.5	2.4	65	B	OK
29	YUNGNJ	17.8	3.1	460	A	-	70	DONGGCJ	8.9	2.6	40	B	OK
30	YENJ	33.2	3.5	617	B	-	71	SERGCJ	12.5	2.2	29	B	OK
31	OOCJ	28.0	3.8	816	B	-	72	YUKDJ	15.8	2.9	405	A	OK
32	HOHNJ	19.0	2.0	200	B	-	73	HWAEDNJ	24.0	2.7	861	C	NG
33	HOCNJ	14.0	2.8	195	-	-	74	SONGJNJ	19.0	4.0	700	-	-
34	YUMGJ	18.0	2.0	100	B	OK	75	WIDOHSS	17.5	3.0	374	-	-
35	HAKJNJ	30.0	2.0	370	B	OK	76	CHILENR	23.7	3.5	271	-	-
36	SANDNR	47.0	3.0	530	B	OK	77	KUNGCND	43.4	4.0	860	B	-
37	SHINGJ	21.0	3.0	1,165	-	OK	78	4SWR	24.5	4.1	1,909	C	OK (OK)
38	DONYLJ	15.6	5.0	384	B	-	79	NULTR	16.0	4.0	850	-	-
39	WARNS	12.0	2.4	287	B	-	80	JINJNR	28.0	4.6	1,500	-	-
40	BUDNJ	16.0	3.0	473	A	-	81	SUNGJS	14.5	2.7	414	B	OK
41	EENJ	9.0	2.3	127	B	-						-	-

¹⁾ pseudo-static slope stability analysis result ; ²⁾ dynamic analysis result

등급을 나타낸다.

Table 1에서 정밀안전 진단 및 점검을 통해 안전도평가를 수행한 댐은 50개인데, 이 중 A등급은 6개, B등급은 36개, C등급은 8개이다. 또한, Table 1에서 정밀안전 진단과 점검을 통해 안전도등급이 구분되고 동시에 내진성능평가가 수행된 댐은 20개이다. 20개 댐 중 안전도등급 A등급을 받은 2개 댐과 B등급을 받은 11개 댐은 내진성능평가의 개략평가 방법인 등가정적사면안정해석에서는 모두 안전한 것으로 평가되었으나, C등급을 받은 6개 댐 중 3개 댐은 등가정적사면안정해석 결과 안전한 것으로 평가된 반면, 나머지 3개 댐은 불안정한 것으로 평가되었다. 아울러, C등급이면서 불안정하게 평가된 3개 댐 중 1개소에 대해서는 정밀평가인 동적해석이 수행되었는데, 그 결과 안전한 것으로 제시되어 있다. 이러한 점들을 감안할 때, 대상댐 전체에 대한 안전도평가가 수행되지 않았을 뿐 아니라, 수행된 안전도평가에 의한 등급과 내진성능평가에 의한 성능만족 여부와의 관련성에 일관성이 전혀 나타나지 않아, 안전도등급 평가로 지진에 대한 위험도를 분류하는 것은 불가한 것으로 판단할 수 있다.

국내 댐내진설계기준(KDS 54 17 00 : 2019 댐 내진설계)[9]에서는 댐의 내진등급을 내진특등급과 내진등급으로 구분한다. 국내에서는 댐의 등급을 중요도와 규모 위주로 구분하므로 지진에 의한 위험도와 직접적인 관련을 짓기는 어렵다. 관련을 짓는다고 하더라도, 댐의 등급을 나누는 경계 기준으로 댐높이 45 m, 총저수용량 5,000만톤이 제시되고 있어[9], Table 1에 제시된 대상댐 전체는 내진등급에 속해 위험도 그룹화는 불가하다고 할 수 있다.

기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령[11]에서는 내진성능 상세평가의 우선순위를 정하는 예비평가 방법을 제시하고 있어, 이 방법을 상대적 지진 위험도 평가에 적용해 볼 수도 있다. 그러나 해당 방법은 기본적으로 높이 30m 이상인 흙댐에 적용하는 것으로 한정하고 있으며, 설명 해당 방법을 높이 제한 없이 적용한다고 하더라도, 이 방법을 적용하기 위해서는 제체 구성재료의 상대다짐 또는 상대밀도를 구분할 수 있어야 하나, 이를 추정할 수 있는 자료는 거의 없어서 그 적용이 어렵다.

상기에 기술한 바와 같이 현재 대상 식수전용 흙댐의 지진에 대한 상대적 위험도를 분류하기 위한 기존의 여러 방법은 대상 댐들에 대한 기본정보, 특히 지반공학적인 물성정보의 부족으로 인해 그 적용은 어려움이 있는 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 댐 물성정보에 상관없이 지진규모와 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration, 이하PGA로 표기)와 같은 외부조건인 지진하중과 여유고와 댐높이와 같은 댐의 기하학적인 제원 특성값만을 이용하여 댐의 상대적 지진위험도를 분류할 수 있는 방법을 모색하게 되었다.

81개 대상 식수전용 흙댐에 대한 기하학적인 제원 특성값을 분석한 결

과, 각 댐의 제원 중 댐높이와 여유고율이 그 경향성을 나타내는 것을 확인하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 댐높이와 상시만수위를 기준으로 한 여유고율의 관계는 댐높이가 커질수록 여유고율은 쌍곡선의 형태로 감소하는 경향을 보였는데, 이는 기존의 연구 결과에서 96개 재해위험저수지에서 보여지는 경향과도 유사하였다[3, 12]. 식수전용 흙댐 대부분은 높이가 15 m~30 m이며, 여기에 해당되는 여유고율은 5%~32%의 범위인 것으로 나타났다.

3. 식수전용 흙댐 지진파괴확률 영곡선 도출 및 상대적 지진위험도 분류

3.1 기존 흙댐의 지진시 파괴확률 산정 방법 및 검토

2016년에 하익수 등[3]은 사건수(event tree) 분석기법을 기본틀로, Swaisgood의 경험식[13], 미개척국과 미공병단의 지진시 횡방향 균열깊이 산정법[2]과 미공병단의 내부침식 평가도구(internal erosion toolbox)[14]를 이용하여, 1,000년 재현주기 지진(2011년 국내 댐설계기준[15] 상 내진특등급 댐에 해당되는 재현주기 지진)시 국내 저수지의 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하였다. 제시된 방법과 절차는 대상 댐에 대한 충분한 지반공학적인 정보가 확보된 경우에 한 해 가능하며, 댐 기초 및 제체의 액상화가 발생하지 않는 경우에 국한된 것이다. 본 연구에서는PGA에 따른 비액상화시 댐 정상부의 침하량을 산정하는 식인 Swaisgood의 경험식[13]을 최신 경험식[4]으로 업데이트하였고, 1,000년 재현주기 지진 외 2,400년 재현주기 지진에 대한 재현주기별 국내 식수전용 흙댐의 파괴확률을 산정하는 데 적용할 수 있는 방법과 절차를 보완하였다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 상시만수위를 해석 시 저수위 조건으로 선정한다.
- (2) 대상댐 위치정보와 국가지진위험지도[16]를 이용하여 목표 재현주기에서의 PGA를 산정한다. 재현주기별 PGA값의 발생확률은 n년에 초과확률 P_c (%) 일 때 연 초과확률, AEP(Annual Exceedance Probability)를 $AEP=1-(1-P_c/100)^{1/n}$ 로 산정한다.
- (3) 지진 시 댐 정상부의 침하량을 해당PGA와 규모, M_w (국내의 경우, 6.5 적용)를 대입한 Swaisgood의 경험식(Fig. 4를 참조하되, NCS의 정의는 Fig. 3을 참조)을 이용하여 산정한다. Fig. 3과 Fig. 4에서 NCS는 Fig. 1에서와 마찬가지로, 침하량의 댐높이에 대한 백분율을 나타낸 것이다. Fig. 3은 NCS의 정의를 도식적으로 보이고, 이를 산정하는 식을 제시한 것이다. Fig. 3에서 댐 기초지반이 댐 제체에 비해 상대적으로

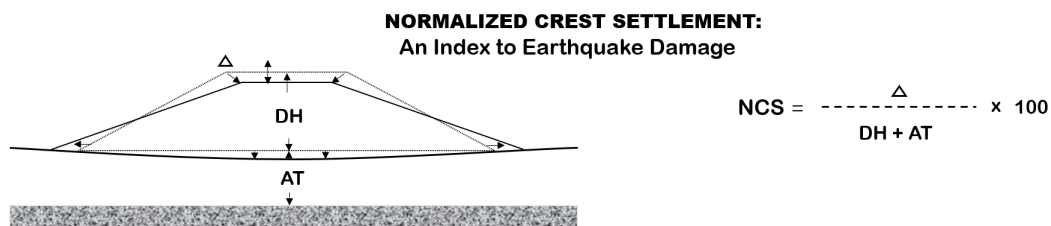


Fig. 3. Definition of normalized crest settlement [4]

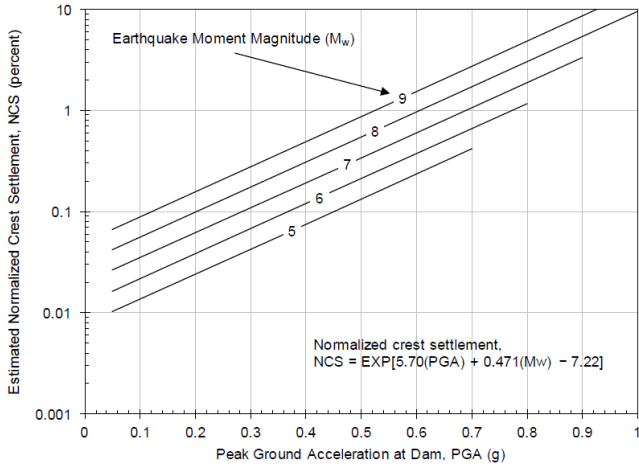


Fig. 4. Estimated normalized crest settlements of dams [4]

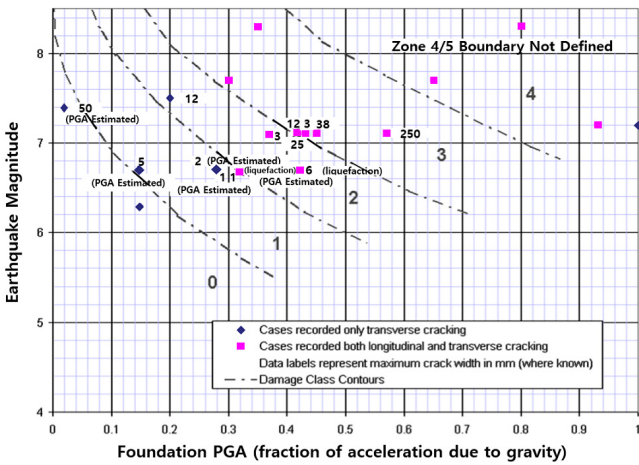


Fig. 5. Incidence of transverse cracking versus seismic intensity and damage class contours for earthfill dams [17]

- 비압축성인 경우, NCS를 정의하는 해당식에서 압축성 기초지반의 두께, $AT=0$ 으로 간주할 수 있다. 서론에 전술한 국내 식수전용 흙댐의 기초지반 특성을 감안하고, 기초지반에 대한 지반공학적인 정보를 대부분 확보하는 것이 곤란한 점을 감안한다면, 식수전용 흙댐의 분석을 위한 $AT=0$ 의 가정은 가능하다고 판단된다. Fig. 1이 실제 지진으로 인해 발생되어 관측된 댐 정상부 침하량을 Fig. 3의 식에서 정의한 NCS로 환산하여 발생지진의 PGA에 따라 나타낸 것이라면, Fig. 4는 Fig. 1의 결과를 지진규모별로 분류하여 반대수(semi-lognormal) 평면에 직선으로 근사화하여 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타낸 NCS 산정식은 이러한 근사화된 직선을 수식으로 표현한 것으로, 발생 지진의 PGA와 규모로부터 NCS를 근사적으로 산정해 볼 수 있는 근사식이라 할 수 있다.
- (4) 지진 규모(국내의 경우, 6.5 적용)와 지진 재현주기별 PGA값을 이용하여 Fig. 5로부터 댐 지진 위험등급을 재현주기별 지진에 따라 각각 결정한다. 1,000년 재현주기 지진에서 PGA값이 보통압 기초지반 기준 0.154 g를 초과하지 않기 때문에 그림으로부터 댐의 위험등급은 '0', 2,400년 재현주기 지진에서는 0.22 g를 초과하지 않기 때문에 그림으로부터 댐의 위험등급은 '1'에 해당된다.
 - (5) 댐 위험등급으로부터 Table 2와 Table 3을 이용하여 횡균열 발생확률,

Table 2. Probability of transverse cracking and maximum likely crack width at the top of the crest due to an earthquake [14]

Damage class	Probability of transverse cracking	Maximum likely crack width, mm
0	0.001	5
1	0.01	20
2	0.05	50
3	0.2	100
4	0.5	150

Table 3. Maximum likely depth of cracking from the top of the crest for transverse cracking in the embankment [14]

Maximum likely crack width at the top of the crest (or core), mm	Maximum likely crack depth from the top of the crest (or core), m
10	1.5
25	3
50	4.5
75	7.5
100	30
250	75

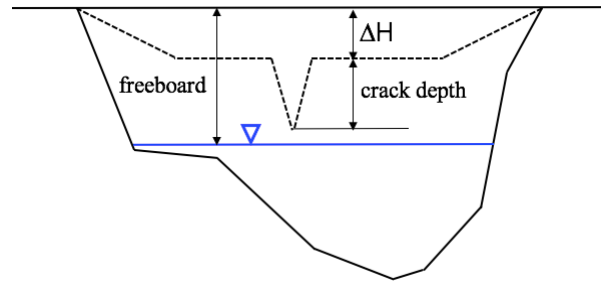


Fig. 6. Elevation of crack bottom and reservoir water level [12]

- P_{flaw} 와 균열깊이를 산정하고, (3)단계에서 산정한 정상부의 침하량을 합하여, 지진 후 균열깊이 최하단의 해발높이(elevation, 이후EL)를 결정한다(Fig. 6 참조). Table 3에서 균열폭에 대한 균열깊이를 나타내는 경향선의 식은 $y=0.0878x+0.7012(R^2=0.9976)$ (여기서, x는 균열폭(단위는 mm)이고, y는 균열깊이(단위는 m)이고, 이 식에 의해 위험등급 '0'일 때 균열폭 5 mm에 해당되는 균열깊이는 1.14 m로, 위험등급 '1'일 때 균열폭 20 mm에 해당되는 균열깊이는 2.46 m로 산정된다.
- (6) 제체에 존재하고 있던 잠재적 결함(flaw)으로 인해 내부침식이 시작될 확률, 침식 개시(initiation) 확률, P_i 를 산정한다. 단, 본 단계에서 균열깊이 하단의 EL이 상시만수위 EL보다 높은 경우에는 해당 PGA 수준에서의 침식에 의한 파괴확률은 이후 단계의 평가에 상관없이 '0'이 된다(Fig. 6 참조).
 - (7) 개시된 내부침식이 제체와 필터재의 입도분포에 의해 멈출 수 없는 상황이 발생하여 침식이 지속 진행될 확률, 침식 진행(continuation) 확률, P_c 를 산정한다.
 - (8) 침식된 흙에서 작용하는 전단응력이 누수가 발생하는 파이핑 경로를 확

장시켜 내부침식이 급진전될 확률, 침식 급진전(progression) 확률, P_p 를 산정한다.

(9) 댐 형식에 따라 발생 가능한 브리칭(breach) 파괴의 종류(싱크홀이 유발될 정도로 큰 파이핑 경로의 확대, 하류사면의 파괴, 또는 댐마루 침하로 인한 월류 등)를 선정하여 브리칭 파괴 확률, P_b 를 산정한다.

(10) (1)~(9)단계를 거쳐PGA 수준에서의 시스템응답확률(System Response Probability), P_{SRP} 를 $P_{flow} \times P_i \times P_C \times P_p \times P_b = P_{SRP}$ 로 산정한다.

(11) (1)~(10) 단계를 거쳐 산정한PGA 수준에서의 응답확률(P_{SRP})에 해당PGA 연 초과확률 AEP를 곱하여, 연간 시스템 파괴확률, P_f 를 산정한다.

3.2 식수전용 흙댐 지진위험도 분류 지진파괴확률 영곡선 도출

3.1 절의 (3) 단계에서 Swaisgood 경험식으로 구한 지진동으로 인한 댐 정상부 침하량, ΔH 와 미공병단과 미개척국의 방법을 따르는 3.1 절의 (4), (5) 단계에서 구한 균열깊이의 합이 여유고(freeboard)보다 작으면(Fig. 6 참조), 평균열을 통한 저수의 침식이 발생하지 않아, 결과적으로는 3.1 절의 (6) 단계에서의 P_f 는 '0'이 되며, 이후 단계에 상관없이 댐의 파괴확률은 '0'이 되게 된다. 즉, 댐의 물성과 상관없이, 지진 규모와 PGA와 같은 지진하중 특성값과, 여유고와 댐높이(Swaisgood 경험식에서 침하량, ΔH 는 댐높이에 대한 비율(침하율)로 계산되기 때문에 댐높이와 관련을 갖는다)와 같은 댐 외부의 기하적 특성값만으로도 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 조건을 찾을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3의 식에서 전술한 내용에 근거하여 식수전용 흙댐의 경우, 압축성 기초지반의 두께, $AT=0$ 으로 간주할 수 있으므로, Fig. 6의 지진 시 침하량, ΔH 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta H = \frac{H}{100} e^{5.70 PGA + 0.471 M_w - 7.22} \quad (1)$$

여기서, H 는 댐높이, PGA(Peak Ground Acceleration)는 최대지반가속도(단위는 중력가속도의 비율, g), M_w 는 지진 규모이다.

국내의 경우 지진 규모 M_w 는 6.5로 간주되고 국내 댐은 1,000년 재현주기에서 지진 시 최대지반가속도, PGA가 보통암 기초지반 기준 0.154 g를 초과하지 않기 때문에, Fig. 5에서 위험도등급(damage class) '0'에 속하므로 예상 최대 균열깊이는 3.1 절의 (5) 단계에서 계산한 바와 같이 1.14 m로 상수가 된다. 마찬가지로, 2,400년 재현주기에서 지진 시 PGA가 보통암 기초지반 기준 0.22 g를 초과하지 않기 때문에, Fig. 5에서 위험도등급 '1'에 속하므로 예상 최대 균열깊이는 3.1 절의 (5) 단계에서 계산한 바와 같이 2.46 m로 상수가 된다. 그러므로 Fig. 6을 참고하고, 아래 식(2)와 식(3)의 조건을 만족하면 댐의 재현주기 1,000년과 2,400년 지진 시 파괴확률은 각각 '0'이 된다.

$$\Delta H + 1.14 < \text{여유고} \quad (2)$$

(1000년 재현주기, ΔH 와 여유고의 단위는 모두 m)

$$\Delta H + 2.46 < \text{여유고} \quad (3)$$

(2400년 재현주기, ΔH 와 여유고의 단위는 모두 m)

여유고율, f 를 $f = \text{여유고} / \text{댐높이}(H)$ 로 정의하면, 여유고= $f \cdot H$ 가 되고 이를 식(2)와 식(3)에 각각 대입하고, 식(1)을 식(2)와 식(3)에 각각 대입하여 정리하면 다음과 같은 식(4)와 식(5)가 된다.

$$\frac{e^{5.70 PGA + 0.471 M_w - 7.22}}{100} + \frac{1.14}{H} < f \quad (1,000\text{년 재현주기}) \quad (4)$$

$$\frac{e^{5.70 PGA + 0.471 M_w - 7.22}}{100} + \frac{2.46}{H} < f \quad (2,400\text{년 재현주기}) \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 M_w 에는 6.5를 대입하고, PGA에는 각각 0.154(보통암 기준 1000년 재현주기 설계지진가속도 최댓값, 0.154 g)와 0.22(보통암 기준 2400년 재현주기 설계지진가속도 최댓값, 0.22 g)를 대입하면, 식(6)과 식(7)과 같이, 1,000년 재현주기와 2,400년 재현주기 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선(zero seismic failure probability curve)을 각각 도출할 수 있게 된다.

$$0.00037602 + \frac{1.14}{H} < f \quad (6)$$

(1,000년 재현주기 지진에 대한 지진파괴확률 영곡선)

$$0.00054776 + \frac{2.46}{H} < f \quad (7)$$

(2,400년 재현주기 지진에 대한 지진파괴확률 영곡선)

3.3 식수전용 흙댐의 상대적 지진위험도 분류

Fig. 7은 3.2절의 식(6)과 식(7)로 제시된 1,000년과 2,400년 재현주기 지진에 대한 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선을 댐높이와 여유고율을 각각 x축과 y축으로 하는 평면에 도시하고, 여기에 81개 국내 식수전용 흙댐의 댐높이에 대한 여유고율 분포(Fig. 2 참조)를 함께 나타

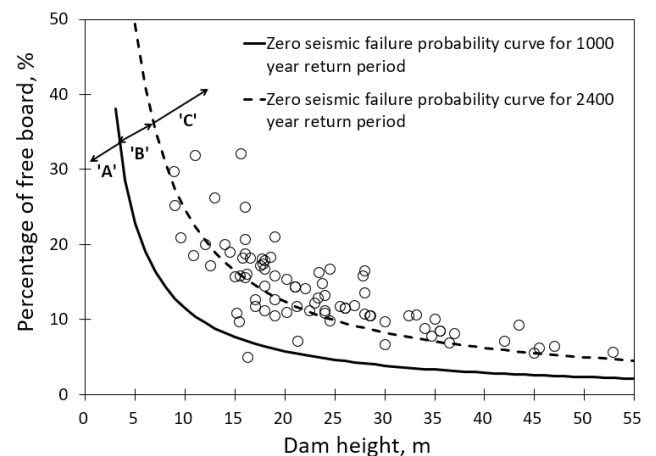


Fig. 7. Seismic hazard classification of 81 drinking water earthfill dams using zero seismic failure probability curves

낸 것이다.

Fig. 7에서 2개의 지진파괴확률 영곡선이 쌍곡선의 형태라는 것 외에 주목해야 할 또 하나의 중요한 사항은 대상댐들의 댐높이와 여유고율 분포가 영곡선과 마찬가지로 쌍곡선의 형태(Fig. 2 참조)를 보인다는 것이다. 이러한 사실은 파괴확률이 '0'이 되는 영곡선 2개를 경계로 81개 식수전용 흙댐의 댐높이에 따른 여유고율의 도시 위치를 읽음으로써 댐의 지진 시 상대적인 위험도 등급의 분류가 가능함을 시사한다.

본 연구에서는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 81개의 식수전용 흙댐을 A(고위험군), B(위험군), C(안전군)의 3개의 지진에 대한 상대적 위험군으로 분류하였다. 검토대상 81개 댐 중 76.5%인 62개 댐은 1,000년 재현주기 지진에 대해서 파괴확률이 '0'인 '안전군'으로, 35.3%인 18개 댐은 2,400년 재현주기 지진에 대해서는 파괴확률이 '0'이나 1,000년 재현주기 지진에 대해서는 파괴가능성을 가지는(파괴확률이 있는) '위험군'으로, 1.2%으로 유일하게 1개의 댐만이 '고위험군'으로 분류되었다.

4. 결론

본 연구에서는 지반공학적 물성정보가 거의 없는 국내 식수전용 흙댐에 대하여 추가적인 지반조사 없이 최소한의 댐 정보로부터 댐의 상대적인 지진위험도를 분류하는 방안을 도출하고자, 기존의 흙댐 지진 시 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 검토하고, 국내 81개 식수전용 흙댐의 정보를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존의 댐 지진 시 파괴확률을 산정하는 방법 및 절차를 검토하여, 식수전용 흙댐의 지반공학적 물성정보와는 상관없이 국내 재현주기 1,000년과 2,400년 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선을 각각 댐높이-여유고율 평면에서 쌍곡선의 형태로 제시하였다.
- (2) 국내 식수전용 흙댐들의 댐높이-여유고율 분포 형태가 지진파괴확률 영곡선들과 유사한 쌍곡선의 형태를 이루는 것을 확인하였다.
- (3) 재현주기 1,000년과 2,400년 지진 시 파괴확률 영곡선을 댐높이와 여유고율을 각각 x축과 y축으로 하는 평면에 도시하고, 여기에 지반공학 적 물성정보가 거의 없는 국내 식수전용 흙댐의 댐높이에 대한 여유고율 분포를 함께 나타낸 후, 영곡선 2개를 경계로 대상 흙댐의 댐높이에 따른 여유고율이 도시되는 위치를 읽음으로써 댐의 지진 시 상대적인 위험도 등급을 분류할 수 있는 방법을 제시하였다.
- (4) 본 연구에서 제시한 방법에 의해 81개 식수전용 흙댐의 상대적 지진위험도는 3개의 위험도 등급 그룹으로 구분되었는데, 1.2%(1개)는 고위험군, 35.3%(18개)는 위험군, 76.5%(62개)는 안전군으로 구분되었다.
- (5) 본 연구에서 제안하는 상대적 지진위험도 구분 방법을 이용하면, 향후 식수전용 흙댐뿐만 아니라 지반공학적인 정보가 극히 부족한 중소규모 흙댐의 지진대비 보강계획 수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 제안한 산정 도표는 기초지반 및 제체가 지진 시 액상화가 발생하지 않는 국내 중소규모 흙댐에 제한적으로 적용되는 것이 타당하다. 아울러, 본 연구에서 제안한 방법과 구분 결과는 준공 당시에 조사한 댐시설 제형 등 제한된 정보를 이용하여 평가한 결과로 댐 노후화에 따른 위험 증가요인 등은 전혀 반영되지 않았으므로, 보다 정

확한 평가를 위해서는 개별 댐에 대한 지반조사 등의 결과를 이용한 상세 내진성능평가가 수행되어야 한다.

/ 감사의 글 /

이 연구 결과물은 2020학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임

/ REFERENCES /

1. Ministry of the Interior and Safety (MIS). Act on the preparation for earthquakes and volcanic eruptions, Act No.15297, Enforcement Date 27 Jun, 2018, National Law Information Center.
2. US Bureau of Reclamation (USBR) and US Army Corps of Engineers (USACE). Best practices in dam and levee safety risk analysis—methods to evaluate seismic risks for embankments, Ver.4.0, c2015.
3. Ha IS, Lee SG, Lim JY, Jung YH. Seismic failure probability of the Korean disaster risk fill dams estimated by considering freeboard only. Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2016 Jun; 36(3):451–461.
4. Swaisgood JR. Behavior of embankment dams during earthquake. The Journal of Dam Safety. Association of State Dam Safety Officials, 2014;12(2):35–44.
5. Yegian MK, Marciano EA, Ghaharman VG. Seismic risk analysis for earth dams. J Geotech, Engrg. 1991 Jan;117(1):18–34.
6. Pace TG, Schaefer JA, O'Leary TM, Rauch AF. Simplified estimation of seismic deformation for risk analysis. Proceedings of the 28th Annual USSD Conference. USSD, 2008; Portland; c2008; p. 521–532.
7. Hepler T, Fiedler B, LaBoon J. Risk analysis for Shasta dam raise. Proceedings of the 29th Annual USSD Conference. USSD, 2009; Nashville; c2009; p. 1167–1179.
8. Engemoen W, Fiedler W, Osmun D. The role of empiricism in quantitative risk analysis. Proceedings of 35th Annual USSD Conference. USSD, 2015; Louisville; c2015; p. 73–83.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT). Seismic design code for dams (KDS 54 17 00), c2019.
10. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC). Detailed guidelines for safety and maintenance of facilities, c2019.
11. Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC). Guidelines for seismic performance evaluation and retrofit of the existing dams, c2004.
12. Ha IS, Lee SG, Kim NR, Lim JE. A proposal of seismic failure probability estimation chart of the Korean small and medium sized earthfill dams. Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 2017 Mar;18(3):31–38.
13. Swaisgood JR. Embankment dam deformations caused by earthquakes. Proceedings of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering. Washington, Seattle; c2003; p. 1–8.

14. US Army Corps of Engineers (USACE). Internal erosion toolbox, c2009.
15. Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). Dam design criterion, c2011; p. 223–224.
16. Korea National Emergency Management (NEMA), Nation Earthquake Hazard Map, NEMA announcement No. 2013–179, c2013; p. 1–10.
17. Pell S, Fell R. Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping. Proceedings of 21st Internal Congress on Large Dams, ICOLD, 2003; Paris; c2003.