

# 국내 중소규모 흙댐의 지진 시 파괴확률 산정 도표 제안

## A Proposal of Seismic Failure Probability Estimation Chart of the Korean Small and Medium Sized Earthfill Dams

하 익 수<sup>†</sup> · 이 수 권<sup>1)</sup> · 김 남 룡<sup>2)</sup> · 임 정 열<sup>2)</sup>

Iksoo Ha · Soogwun Lee · Namryong Kim · Jeongyeul Lim

Received: January 25<sup>th</sup>, 2017; Revised: February 10<sup>th</sup>, 2017; Accepted: February 21<sup>st</sup>, 2017

**ABSTRACT** : The purpose of this study is to propose a chart that can easily estimate the seismic failure probability of small and medium sized earthfill dams with little geotechnical information. By considering the existing method and procedure for estimating the seismic failure probability of a dam, the zero seismic failure probability curve, on which the seismic probability is zero regardless of the geotechnical properties of the dam, was determined in the form of hyperbola in the dam height and freeboard ratio plane. It was confirmed that the dam height-freeboard ratio distribution pattern of the Korean small and medium sized dams was shaped like a hyperbola like the zero seismic failure probability curve. Therefore, a estimation chart was constructed in which a number of seismic failure probability contours are represented by a number of hyperbolas at regular intervals in the dam height-freeboard ratio plane. The proposed chart was applied to the calculation of the seismic failure probability of two small and midium sized dams with relatively well-managed geotechnical properties and the validity of the chart was confirmed by comparison with the results obtained by the existing procedures and methods. In the future, the proposed chart is expected to be useful in considering investment priorities for maintenance and reinforcement of small and medium sized dams in preparation for earthquakes.

**Keywords** : Earthquake, Seismic failure, Probability, Small and Medium sized Dam, Freeboard

**요 지** : 본 연구의 목적은 지반공학적 물성정보가 거의 없는 국내 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 간편하게 산정할 수 있는 도표를 제시하는 것이다. 기존의 댐의 지진 시 파괴확률을 산정하는 방법 및 절차를 검토하여, 댐의 지반공학적 물성정보와는 상관 없이 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영국선을 댐높이-여유고울 평면에서 쌍곡선의 형태로 결정하였다. 국내 중소규모 댐들의 댐높이-여유고울 분포형태가 지진파괴확률 영국선과 같이 쌍곡선의 형태를 이루는 것을 확인하여, 다수의 등파괴확률 곡선 (seismic failure probability contour)이 댐높이-여유고울 평면에서 일정한 간격의 다수의 쌍곡선들로 표시되는 지진파괴확률 산정 도표를 작성하였다. 작성된 도표는 비교적 관리가 잘 되고, 지반공학적인 정보를 충분히 가진 2개의 중소규모 댐들의 지진 시 파괴 확률 산정에 적용하여, 기존 절차와 방법으로 산정된 결과와 비교하여 적용 타당성을 확인하였다. 향후, 제안된 도표는 중소규모 댐의 지진대비 보수보강의 투자 우선순위 등을 고려할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 지진, 지진파괴, 확률, 중소규모 댐, 여유고

## 1. 서 론

2016년 9월 12일 경북 경주시 남남서쪽 11.6km 지점에서 규모 5.8의 지진이 발생하였다. 이 지진은 기상청 관측 이래 국내에서 발생한 가장 큰 지진으로서, 9월 19일 규모 4.5의 여진을 비롯하여 500회 이상의 여진이 3개월여 지속되었다. 국민안전처의 보도 자료에 의하면 이번 지진으로 인하여, 총 23명의 부상자와 전통한옥의 기와 파손, 불국사 다보탑 난간 탈락, 첨성대 기움 등 총 9,368건의 크고 작은 피해가 발생하였으며, 피해액도 110억 원이 넘는 것으로 집계되었다.

계되었다.

여타 기간시설물들과 마찬가지로, 중소규모 댐도 시설물의 규모와 하류 상황에 따라서는 지진 시 붕괴로 인한 피해가 발생할 수 있어서, 지진화산재해대책법 상 내진성능평가와 내진보강 등이 이루어지도록 법제화되어 있는 구조물 중 하나이다. 그럼에도 불구하고, 그 수가 매우 많고, 각 댐들의 축조시기가 오래되어 댐에 대한 정보, 특히, 지진 안정성 평가에 필수적인 지반공학적인 정보는 보존되지 않았거나 전무한 상태이다. 2016년을 기점으로 국민안전처가 지정한 285개 재해위험 저수지에 대하여, 정밀안전진단보고서를 확

† Department of Civil Engineering, Kyungnam University (Corresponding Author : [geotech@kyungnam.ac.kr](mailto:geotech@kyungnam.ac.kr))

1) Department of Civil Engineering, Kyungnam University

2) K-water Institute

보할 수 있는 댐은 96개이며, 이 중 지진 시 파괴확률을 산정하는 데 필수적인 최소한의 지반공학적인 정보를 가지고 있는 것은 단 7개 댐뿐이었다는 점에서 그 실태를 여실히 알 수 있다(Ha et al., 2016). 그러나 이러한 물성정보가 어려운 중소규모 댐들에 대해서도 향후 지진대비 성능평가, 보수보강에 있어 투자 우선순위 등을 결정하기 위해서는 최소한의 정보를 이용한 지진 시 위험도를 파악할 수 있는 방안이 반드시 필요하다.

댐의 지진 안전도를 평가함에 있어서, 미국, 호주, 유럽 등 선진국에서는 2000년대 이후로, 공학적 안정성 평가기준(안전율, 허용변형량 등)에 의하여 판단하는 기본적인 안정성 분석방법에서 더 나아가 파괴모드, 파괴확률, 관련피해도, 다양한 하중조건 등을 통합한 위험도 해석 방법을 일반적으로 적용하고 있는 추세이다(Yegian et al., 1991; Pace et al., 2008; Hepler et al., 2009; Engemoen et al., 2015).

국내에서도 최근에 사건수 분석 기법(ETA, Event Tree Analysis)을 이용한 필댐의 내부 침식 위험도에 대한 지반공학적인 시스템 응답확률을 산정한 연구(Noh et al., 2014)가 수행된 바 있으며, Kwater(한국수자원공사)는 D-SMART라는 위험도기반 댐안전 평가 도구(tool)를 개발하여 활용하고 있다. 2016년에 Ha et al.(2016)은 사건수 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(USBR & USACE, 2015)을 이용하여 지반공학적인 물성정보를 가지고 있는 국내 7개 중소규모 댐에 대한 지진 시 시스템 파괴확률을 산정하고, 댐높이와 댐여유고만을 이용하여 댐의 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고율(=여유고/댐높이) 임계곡선 산정에 관한 기초 연구를 수행한 바 있다.

지진에 의한 중소규모 댐의 주요 파괴모드는, (1) 지진 시 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴; (2) 지진 시 댐 정상부의 침하와 발생된 횡방향 균열을 통한 상부 침식에 의한 침식파괴, 2가지로 구분된다(USBR & USACE, 2015)(Fig. 1).

국내 중소규모 댐의 기초지반은 퇴적층의 강바닥이 아닌, 산지 원지반을 기초로 하고 있으며, 댐 축조 중에 대부분의 침하가 이루어지고 다짐되어 있는 지반이거나, 암 내지는 풍화암을 기초지반으로 하고 있어 액상화의 가능성은 희박하다. 아울러, 축조재료의 경우에는 점착력을 가지는 화강 풍화토 등을 축조재료로 하고 있어 제체의 액상화 역시 그 가능성이 낮은데, 이러한 사실은 기존의 연구(Ha et al., 2016)에서 제시된, 지반공학적인 물성자료가 확보된 전체 7개 저수지에 대한 입도분포곡선이 모두 액상화 가능성이 매우 낮은 범위에 분포한다는 사실이 이를 더 뒷받침하고 있다.

액상화 발생 가능성이 낮은 댐의 지진 시 댐 정상부의 침하량은 일반적으로 지진 시 비액상화 댐의 실제 관측기록을 바탕으로 만들어진 Swaisgood의 경험식(Swaisgood, 2003)으로 산정될 수 있는데, 해당 경험식을 이용하여 산정된 댐 정상부의 침하량은 댐 높이의 1%를 초과하지 못한다. 이러한 사실과 함께 국내 중소규모 댐의 여유고는 일반적으로 댐 높이의 최소 8% 이상(Fig. 6 & Fig. 9)이기 때문에 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴는 국내에서는 크게 고려할 필요가 없는 파괴모드인 것으로 판단되고 있다(Ha et al., 2016). 그러므로 국내 중소규모 댐에서의 지진 시 파괴모드는 지진 시 정상부 침하와 발생된 횡균열을 통한 상부 침식에 의한 파괴(Fig. 1(b))를 파괴모드로 설정하더라도 큰 무리가 없는 것으로 여겨진다.

본 연구의 목적은 지반공학적인 물성정보가 거의 없는 국내 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 간편하게 산정할 수 있는 도표를 제시하는 것이다. 기존의 지진 시 댐 파괴확률을 산정하는 방법 및 절차를 검토하여, 댐의 지반공학적인 물성정보에 상관없이 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선(zero seismic failure probability curve)을 댐 높이-여유고율 평면에서 쌍곡선의 형태로 결정하였다. 국내 96개 중소규모 댐들의 댐높이-여유고율 분포형태가 지진파괴확률 영곡선과 같이 쌍곡선의 형태를 이루는 것을 확인하여, 다수의 등파괴확률 곡선(seismic failure probability contour)이 댐높이-여유고율 평면에서 일정한 간격의 다수의 쌍곡선으로 표시되는 지진파괴확률 산정 도표를 작성하였다.

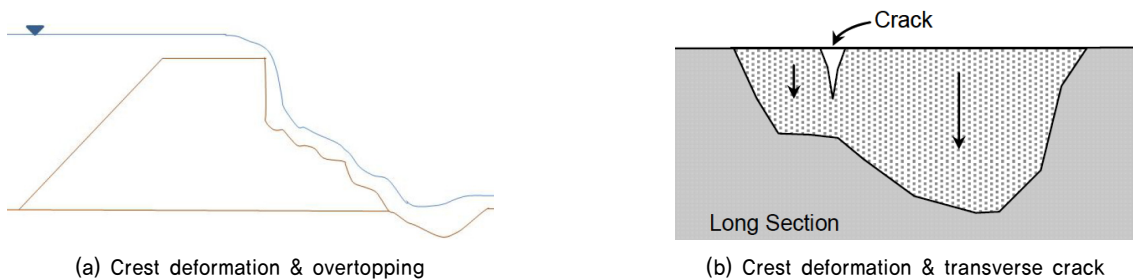


Fig. 1. Main potential failure modes of embankment by earthquake loads

즉, 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 댐높이와 여유고율 정보만으로 추정할 수 있는 도표를 작성하였다. 작성된 도표는 비교적 관리가 잘 되고, 지반공학적인 정보를 충분히 가진 2개의 중소규모 댐들의 지진 시 파괴확률 산정에 적용하여, 기존 절차와 방법으로 산정된 결과와 비교하여 제안된 도표의 적용성을 확인하고자 하였다.

## 2. 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률 산정 방법 및 절차

2016년에 Ha et al.(2016)은 사건수(event tree) 분석기법을 기본틀로, Swaisgood의 경험식(Swaisgood, 2003), 미개척국과 미공병단의 지진 시 횡방향 균열깊이 산정법(USBR & USACE, 2015)과 미공병단의 내부침식 평가도구(internal erosion toolbox)(USACE, 2009)를 이용하여, 1,000년 재현주기 지진(2011년 국내 댐설계기준(MLTM, 2011) 상 내진 특등급 댐에 해당되는 재현주기 지진) 시 국내 저수지의 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하였다. 단, 제시된 방법과 절차는 대상 댐에 대한 충분한 지반공학적인 정보가 확보된 경우에 한해 가능하며, 댐 기초 및 제체의 액상화가 발생하지 않는 경우에 국한된 것이다. 해당 방법 및 절차를

요약하면 다음과 같다.

- (1) 상시만수위를 해석 시 저수위 조건으로 선정한다.
- (2) 대상 댐 위치정보와 국가지진위험지도(NEMA, 2013)를 이용하여 1,000년 재현주기(100년에 초과 확률 10%)에서의 지표면최대가속도, PGA(Peak Ground Acceleration)를 산정한다. 재현주기별 PGA 값의 발생확률은 n 년에 초과확률  $P_e(\%)$ 일 때 연 초과확률, AEP(Annual Exceedance Probability)를  $AEP=1-(1-P_e/100)^{1/n}$ 으로 산정한다.
- (3) 지진 시 댐 정상부의 침하량을 해당 PGA와 규모,  $M_s$ (국내의 경우, 6.5 적용)를 대입한 Swaisgood의 경험식(Fig. 2 & Fig. 3)을 이용하여 산정한다.
- (4) 지진규모(국내의 경우, 6.5 적용)와 PGA 값을 이용하여 Fig. 4로부터 댐 지진 위험등급을 결정한다.
- (5) 댐 위험등급으로부터 Table 1과 Table 2를 이용하여 횡균열 발생확률,  $P_{flaw}$ 과 균열깊이를 산정하고, (3)단계에서 산정한 정상부의 침하량을 합하여 지진 후 균열깊이 최하단의 해발높이(elevation, 이후 EL)를 결정한다. Table 2에서 균열폭에 대한 균열깊이를 나타내는 경향선의 식은  $y=0.0878x+0.7012(R^2=0.9976)$  (여기서, x는 균열폭(단위는 mm)이고, y는 균열깊이



Fig. 2. Crest settlement definition (Swaisgood, 2003)

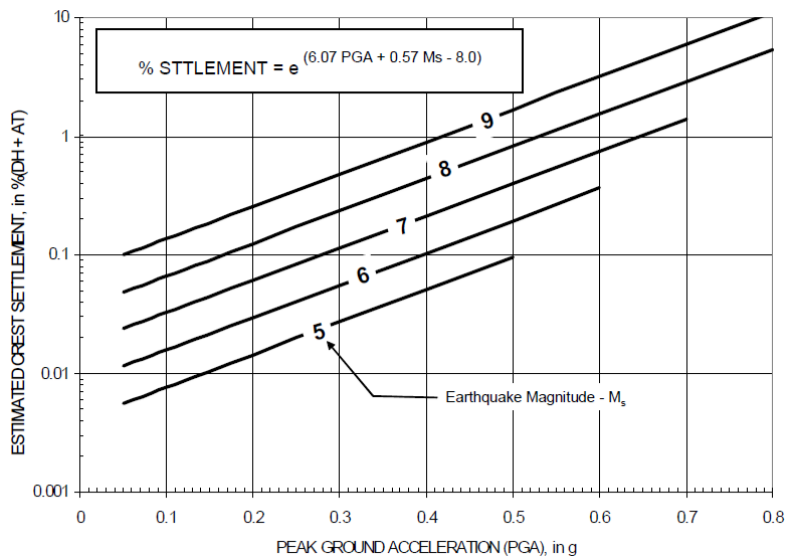


Fig. 3. Estimated crest settlement (Swaisgood, 2003)

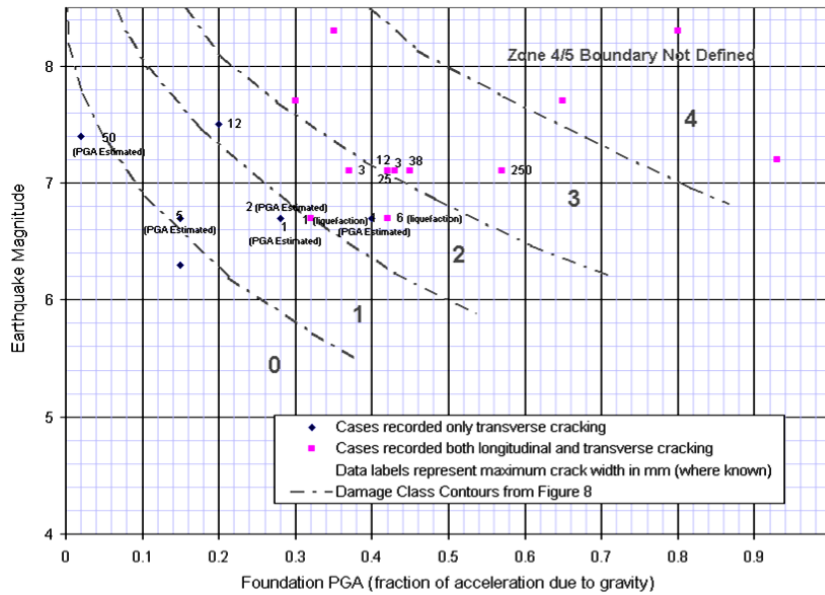


Fig. 4. Incidence of transverse cracking versus seismic intensity and damage class contours for earthfill dams (Pell & Fell, 2003)

Table 1. Probability of transverse cracking and maximum likely crack width at the top of the crest due to an earthquake (USACE, 2009)

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 2. Maximum likely depth of cracking from the top of the crest for transverse cracking in the embankment (USACE, 2009)

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

(단위는 m))이고, 이 식에 의해 Damage class ‘0’일 때 균열폭 5mm에 해당되는 균열깊이는 1.14m로 산정된다.

(6) 체체에 존재하고 있던 잠재적 결함(flaw)으로 인해 내부 침식이 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 이 후 단계의 평가에 상관없이 ‘0’이 된다.

- (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 확장시켜 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)을 선정하여 브리칭 파괴 확률,  $P_b$ 를 산정한다.
- (10) (1)~(9)단계를 거쳐 PGA 수준에서의 시스템 응답확률( $P_{SRP}$ )을  $P_{flaw} \times P_i \times P_c \times P_p \times P_b = P_{SRP}$ 로 산정한다.
- (11) (1)~(10) 단계를 거쳐 산정한 PGA 수준에서의 응답확률( $P_{SRP}$ )에 해당 PGA 연 초과확률 AEP를 곱하여, 연간 시스템 파괴확률,  $P_f$ 를 산정한다.

### 3. 지진파괴확률 영곡선(zero seismic failure probability curve) 결정

댐의 지진 시 파괴확률 산정 절차 중, 앞선 2.장의 (6) 단계 기술 내용에 주목할 필요가 있다. 2.장의 (3) 단계에서 Swaisgood 경험식으로 구한 지진동으로 인한 댐 정상부 침하량,  $\Delta H$ 와 미공병단과 미개척국의 방법을 따르는 2.장의 (4), (5) 단계에서 구한 균열깊이의 합이 여유고(freeboard)

보다 작으면(Fig. 5), 평균열을 통한 저수의 침식이 발생하지 않아 결과적으로는 2.장의 (6) 단계에서의  $P_1$ 는 '0'이 되며 이후 단계에 상관없이 댐의 파괴확률은 '0'이 되게 된다. 즉 댐의 물성과 상관없이 지진규모와 PGA와 같은 지진하중 특성값과 여유고와 댐높이(Swaisgood 경험식에서 침하량,  $\Delta H$ 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 있다는 실마리를 제공한다.

Fig. 2의 Swaisgood의 추정식에서 % STTLMT는 침하량(settlement)의 댐높이에 대한 백분율을 나타낸 것으로서 댐 기초지반이 댐 체체에 비해 상대적으로 비압축성인 국내 중소규모 댐의 기초지반의 특성을 감안하여, Fig. 2의 식에서 압축성 기초지반의 두께,  $AT=0$ 으로 간주할 수 있다(Ha et al., 2016). 그러므로 Fig. 5의 지진 시 침하량,  $\Delta H$ 는 Eq. (1)과 같이 표시된다.

$$\Delta H = \frac{H}{100} e^{6.07 PGA + 0.57 M_s - 8.0} \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 댐높이, PGA(Peak Ground Acceleration)는 지표면 최대가속도(단위는 중력가속도의 비율, g),  $M_s$ 는 지진규모이다.

국내의 경우 지진규모  $M_s$ 는 6.5로 간주되고 국내 댐은 1,000년 재현주기에서 지진 시 지표면 최대가속도, PGA가 보통암 기초지반 기준 0.14g를 초과하지 않기 때문에 Fig. 4에서 위험도 그룹(damage class) '0'에 속하므로 예상 최대 균열깊이는 앞선 2.장의 (5) 단계에서 계산한 바와 같이 1.14m로 상수가 되게 된다. 그러므로 Fig. 5를 참고하고, Eq. (2)의 조건을 만족하면 댐의 지진 시 파괴확률은 '0'이 된다.

$$\Delta H + 1.14 < \text{여유고} \quad (\Delta H \text{와 여유고의 단위는 모두 m}) \quad (2)$$

여유고율  $f$ 를  $f = \text{여유고} / \text{댐높이}(H)$ 로 정의하면 여유고 =  $f \cdot H$ 가 되고 이를 Eq. (2)에 대입하고, Eq. (1)을 Eq. (2)에

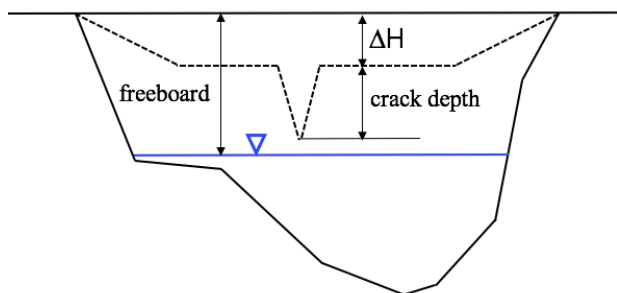


Fig. 5. Elevation of crack bottom and reservoir water level

대입하여 정리하면 다음과 같은 Eq. (3)이 된다.

$$\frac{e^{6.07 PGA + 0.57 M_s - 8.0}}{100} + \frac{1.14}{H} < f \quad (3)$$

Eq. (3)에서  $M_s$ 에는 6.5를 대입하고, PGA에는 0.14(보통암 기준 1,000년 재현주기 설계지진가속도 최댓값, 0.14g)를 대입하면 Eq. (4)와 같이 1,000년 재현주기 이하 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선(zero seismic failure probability curve)을 얻을 수 있게 된다.

$$0.00031898 + \frac{1.14}{H} < f \quad (4)$$

Fig. 6은 1,000년 재현주기 지진에 대한 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선을 도시하고, 여기에 96개 국내 중소형 댐의 댐높이에 대한 여유고율 분포를 함께 나타낸 것이다. Fig. 6에서 7개의 댐(가시리, 미촌, 회령, 산재, 성내, 축내, 용강 저수지)은 96개 댐 중 유일하게 지진 시 파괴확률을 산정하는 데 필요한 지반공학적 자료가 있는 댐들로서 앞선 2.장에서 기술한 방법에 의해 기존 연구결과(Ha et al., 2016)에서 산정한 지진 시 파괴확률을 함께 나타낸 것이다.

Fig. 6으로부터 96개 재해위험 저수지 중 약 78%(75개 저수지)가 영곡선 위쪽에 도시되어, 지진에 대한 파괴확률은 '0'임을 확인할 수 있다.

#### 4. 중소규모 흙댐의 지진 시 파괴확률 산정도표

앞선 3.장에서는 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률이 '0'

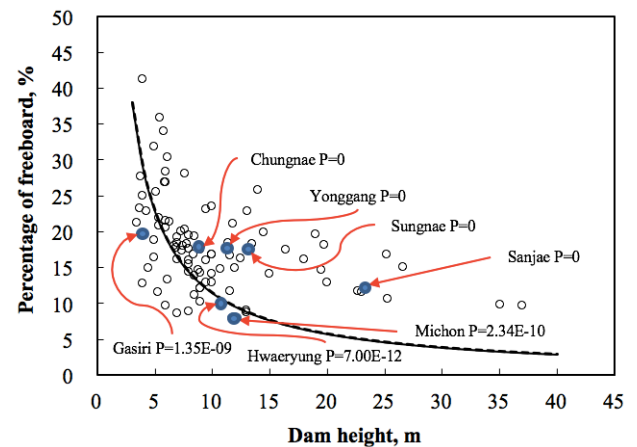


Fig. 6. Comparison of freeboard percentage of 96 earthfill dams with zero seismic failure probability curve against the earthquake with 1,000 year recurrence period



인지 아닌지를 간편하게 추정할 수 있는 지진 파괴확률 영곡선을 제시하였다. 아울러 파괴확률이 '0'이 아닐 것으로 예상되는 댐에 대해서도 지진에 의한 댐 붕괴에 의한 피해 정도를 예측하여 위험도를 관리하고, 그에 따른 보수보강의 우선순위 등을 결정할 목적으로 최소한의 정보로부터 지진 시의 파괴확률을 추정할 필요가 있다.

Fig. 6에서 지진 시 파괴확률 영곡선 외에 주목해야 할 또 하나의 중요한 사항은 댐들의 댐높이와 여유고율 분포가 영곡선과 마찬가지로 쌍곡선의 분포 형태를 이룬다는 것이다. 이러한 사실은 파괴확률이 '0'이 되는 영곡선과 함께 등파괴확률곡선(seismic failure probability contour)의 형태를 영곡선과 마찬가지로 쌍곡선의 형태로 가정할 수 있음을 보여준다. 이에 따라, 파괴확률 영곡선을 포함한 등파괴확률곡선은 Eq. (5)와 같이 가정될 수 있다.

$$0.031898 + \frac{k}{H} = 100f = y \quad (5)$$

여기서 y는 여유고율, f에 100을 곱한 여유고율 백분율(%)을 나타낸 것이다. Eq. (5)는 Eq. (4)에 100을 곱하여 백분율로 나타낸 식이므로 파괴확률 영곡선의 경우, Eq. (4)와 비교하여 k는 114가 된다.

Fig. 6에 도시된 2.장의 절차와 방법에 의해 기존 연구(Ha et al., 2016)에서 지진 시 파괴확률이 직접 산정된 가시리, 미촌, 회령 저수지의 댐높이-여유고율(%) 점들(points)을 Eq. (5)의 쌍곡선이 각각 지날 수 있도록 k값을 산정하였다(Fig. 7).

Fig. 8은 3개 댐들에 대하여 산정된 파괴확률들과 Fig. 7에서 산정한 k 값들과의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 8로부터 산정된 k값은 각 저수지의 파괴확률의 로그값과 선

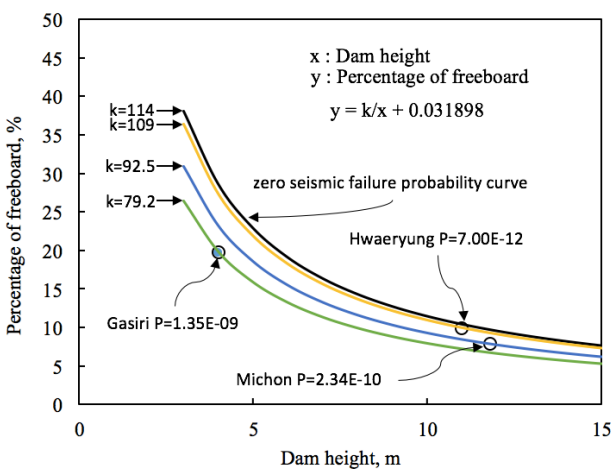


Fig. 7. Determination of hyperbola coefficient, k of seismic failure probability contour

형 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 산정된 경향선 식  $y=0.0023e^{-0.178x}$ 를 이용하여 파괴확률 구간별 k를 역산하여 댐높이-여유고율에 따른 1,000년 재현주기 지진에 대한 지진파괴확률을 산정할 수 있는 도표인 Fig. 9를 작성하였다.

Fig. 9에서 검토대상 96개 댐 중 78%는 지진에 대한 파괴확률이 '0'인 것으로 평가되었고 나머지 22%의 저수지도 파괴확률이  $1 \times 10^{-6}$  이하로 매우 미미할 것으로 추정해 볼 수 있다.

본 연구에서 제시한 산정 도표의 적용성을 확인하고자 지반정보가 부족한 연구대상 재해위험 중소댐들과는 달리 지반공학적 정보가 충분한 Kwater(한국수자원공사)가 관리하는 용수전용댐 중 비교적 규모가 작은 흙댐인 안계댐(높이 32.5m)과 선암댐(높이 22m)을 선정하여 앞서 제시한 절차와 방법에 의한 1,000년 재현주기 지진에 대한 지진파괴

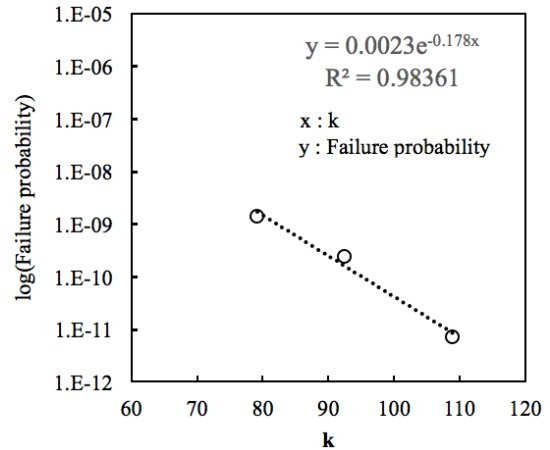


Fig. 8. Correlation between seismic failure probability and hyperbolic coefficient, k

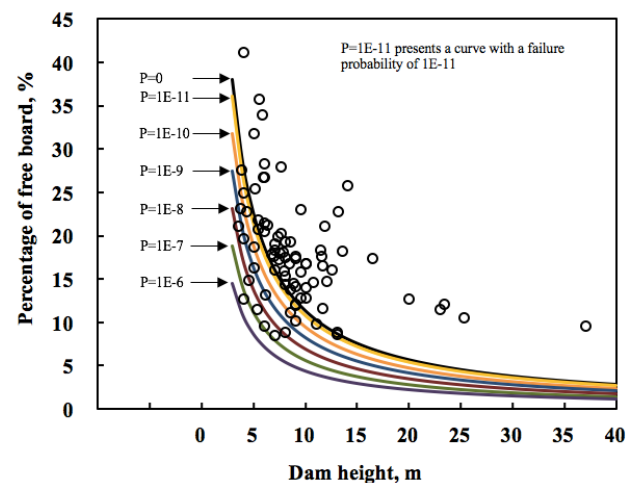


Fig. 9. Evaluation chart of seismic failure probability of small and medium sized earthfill dams and evaluation case of 96 disaster risk fill dams

Table 3. Basic information of the target fill dams to evaluate seismic failure probability

Dam	Location	Type	Height (m)	Crest EL (m)	Full water level EL (m)	Core zone Classification (USCS)
Sunam	Ulsan	Earthfill	22	32	30	SM
Aangye	Gyeongju	Earthfill	32.5	46.9	43.9	CL

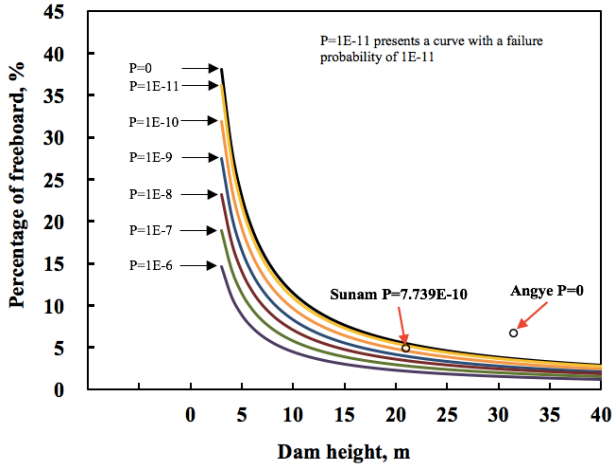


Fig. 10. Comparison between the probabilities computed by UASCE & USBR method and those estimated by the chart for evaluating seismic failure probability proposed by this study

확률을 산정해 보았고, 그 결과를 제시한 도표로 산정한 결과와 비교해 보았다. Table 3은 적용성 확인 대상으로 선정된 선암댐과 안계댐에 대한 기본 정보를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 선암댐과 안계댐의 댐높이와 여유고 정보로부터 본 연구에서 제시하는 산정 도표를 이용하여 지진파괴 확률을 산정하는 과정과 미공병단의 툴박스(toolbox) 등을 이용한 기존 절차와 방법(2장의 절차 (3)-(11) 참조)으로부터 산정한 각각의 댐 지진파괴확률을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 선암댐의 경우 1,000년 재현주기 지진 시 파괴확률은 툴박스 등을 이용한 기존 방법으로 산정한 결과는  $7.74 \times 10^{-10}$ 이고, 제안한 도표로 산정한 결과는  $2.8 \times 10^{-10}$ 으로 약  $5 \times 10^{-10}$  정도의 차이를 보여 비교적 잘 추정할 수 있음을 확인하였고, 안계댐의 경우도 기존 방법에 의해 산정된 확률은 '0'이고 도표에 의해서도 지진파괴확률 영곡선 상부에 위치에 '0'으로 같게 추정되었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시하는 산정 도표를 이용하면 향후 지반공학적인 정보가 극히 부족한 재해위험 저수지를 포함한 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 간편하게 추정할 수 있어서 댐 및 저수지의 지진대비 보수보강의 투자 우선순위를 결정함에 있어 기초적이며 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 최소한의 댐 정보로부터 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 산정할 수 있는 방안을 도출하고자 기존의 댐 지진 시 파괴확률을 산정하는 방법, 절차, 산정 결과들을 검토하고, 국내 96개 중소규모 댐의 정보를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존의 댐 지진 시 파괴확률을 산정하는 방법 및 절차를 검토하여, 댐의 지반공학적인 물성정보와는 상관없이 지진 시 파괴확률이 '0'이 되는 지진파괴확률 영곡선을 댐높이-여유고율 평면에서 쌍곡선의 형태로 제안하였다.
- (2) 국내 중소규모 댐들의 댐높이-여유고율 분포형태가 지진파괴확률 영곡선과 동일한 쌍곡선의 형태를 이루는 것을 확인하였다.
- (3) 지반공학적인 물성정보가 거의 없는 국내 중소규모 댐에 대하여 댐높이와 여유고 정보만을 이용하여 지진 시 파괴확률을 간편하게 산정할 수 있는 도표를 제안하였다.
- (4) 기존 방법과 절차로 지반공학적인 물성정보가 충분한 2개의 댐에 대해 산정된 파괴확률과 본 연구에서 제안한 도표를 이용하여 동일한 댐에 대해 산정한 파괴확률을 비교해 본 결과 제안된 산정 도표는 충분한 타당성을 가지는 것을 확인하였다.
- (5) 본 연구에서 제안하는 산정 도표를 이용하면 향후 지반공학적인 정보가 극히 부족한 재해위험 저수지를 포함한 중소규모 댐의 지진 시 파괴확률을 간편하게 추정할 수 있어서 향후 중소규모 댐의 지진대비 보수보강의 투자 우선순위 등을 고려할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 연구에서 제안한 산정 도표는 기초지반 및 제체가 지진 시 액상화가 발생하지 않는 국내 중소규모 댐에 제한적으로 적용되는 것이 타당하다.

## 감사의 글

본 연구는 2015년 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전 기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다[MPSS-자연-2015-78].

## References

1. Engemoen, W., Fiedler, W. and Osmun, D. (2015), The role of empiricism in quantitative risk analysis, Proc. of 35th Annual USSD Conference, USSD, Louisville, pp. 73~83.
2. Ha, I. S., Lee, S. G., Lim, J. Y. and Jung, Y. H. (2016), Seismic failure probability of the Korean disaster risk fill dams estimated by considering freeboard only, Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 36, No. 3, June, pp. 451~461 (in Korean).
3. Hepler, T., Fiedler, B. and LaBoon, J. (2009), Risk analysis for Shasta dam raise, Proc. 29th Annual USSD Conference, USSD, Nashville, pp. 1167~1179.
4. Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011), Dam design criterion, MLTM, pp. 223~224 (in Korean).
5. Korea National Emergency Management (NEMA) (2013), Nation Earthquake Hazard Map, NEMA announcement No. 2013-179, pp. 1~10 (in Korean).
6. Noh, K. L., Lim, J. Y., Mok, Y. J. and Jung, Y. H. (2014), Estimating geotechnical system response probability of internal erosion risk in fill dam using event tree analysis, Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 34, No. 6, December, pp. 1815~1829 (in Korean).
7. Pace, T. G., Schaefer, J. A., O'Leary, T. M. and Rauch, A. F. (2008), Simplified estimation of seismic deformation for risk analysis, Proc. 28th Annual USSD Conference, USSD, Portland, pp. 521~532.
8. Pell, S. and Fell, R. (2003), Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping, Proc. 21st Internal Congress on Large Dams, Montreal. ICOLD, Paris Q83-R17, International Commission on Large Dams, Paris.
9. Swaisgood, J. R. (2003), Embankment dam deformations caused by earthquakes, Proc. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, pp. 1~8.
10. US Army Corps of Engineers (USACE) (2009), Internal erosion toolbox.
11. US Bureau of Reclamation (USBR) and US Army Corps of Engineers (USACE) (2015), Best practices in dam and levee safety risk analysis-methods to evaluate seismic risks for embankments, Ver.4.0, July.
12. Yegian, M. K., Marciano, E. A. and Ghaharman, V. G. (1991), Seismic risk analysis for earth dams, J. Geotech. Engrg., Vol. 117, No. 1, January, pp. 18~34.