

여유고만으로 추정된 국내 재해위험 저수지의 지진시 파괴확률

하익수* · 이수권** · 임정열*** · 정영훈****

Ha, Ik Soo*, Lee, Soo Gwon**, Lim, Jeong Yeul***, Jung, Young Hoon****

Seismic Failure Probability of the Korean Disaster Risk Fill Dams Estimated by Considering Freeboard Only

ABSTRACT

The objective of this study is to illustrate the methods and procedures for estimating the failure probability of small fill dams subjected to earthquake events and to estimate the seismic failure probability of the Korean disaster risk fill dams where geotechnical information is not available. In this study, first of all, seismic failure probabilities of 7 disaster risk small fill dams, where geotechnical information is available, were evaluated using event tree analysis. Also, the methods and procedures for evaluating probabilities are illustrated. The relationship between dam height and freeboard for 84 disaster risk small dams, for which the safety diagnosis reports are available, was examined. This relationship was associated with the failure computation equation contained in the toolbox of US Army corps of engineers. From this association, the dam height-freeboard critical curve, which represents 'zero' failure probability, was derived. The seismic failure probability of the Korean disaster risk fill dams was estimated using the critical curve and the failure probabilities computed for 7 small dams.

Key words : Earthquake, Fill dam, Disaster risk fill dam, Seismic failure probability, Event tree analysis

초 록

본 연구의 목적은 소규모 필댐의 지진시 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하고, 지반공학적 정보가 부족한 국내 재해위험 저수지의 지진시 파괴확률을 추정하는 것이다. 이를 위하여, 국내 재해위험 저수지로 지정된 저수지 중 지반공학적인 정보를 얻을 수 있는 7개 저수지에 대해 사건수 분석 기법을 적용하여 지진에 대한 파괴확률을 평가하였으며, 그 방법 및 절차를 제시하였다. 안전진단보고서를 확보한 84개 재해위험 저수지의 댐높이와 여유고와의 관계를 검토하였고, 미공병단 평가도구로 이용되는 파괴확률 산정식을 이러한 댐높이와 여유고와의 관계에 연관시켰다. 이러한 연관관계로부터, 지진시 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고 임계곡선을 도출하였고, 이러한 임계곡선과 7개 저수지에 대해 산정한 지진시 파괴확률로부터 물성확보가 어려운 국내 재해위험 저수지의 개략적인 지진에 대한 파괴확률을 추정하였다.

검색어 : 지진, 필댐, 재해위험 저수지, 지진 파괴확률, 사건수 분석

1. 서론

재해위험 저수지란 「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률 시행령」(MPSS, 2009)에 따라, 정밀안전진단결과 D등급 또는 E등급을 받은 저수지 및 재해가 우려되는 저수지로 소방방재청장이 정한 저수지를 말한다. 2015년 현재 전국에 약 285개 저수지가 이에 해당된다.

* 중신회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungnam University · geotech@kyungnam.ac.kr)

** 경남대학교 토목공학과 박사과정 (Kyungnam University · lsgsoillab@gmail.com)

*** 정회원 · 한국수자원공사 K-water 연구원, 책임연구원 (K-water Institute · passion@kwater.or.kr)

**** 중신회원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 (Kyung Hee University · jyounghoon@khu.ac.kr)

Received March 4, 2016/ revised March 30, 2016/ accepted April 14, 2016

전통적으로 저수지의 지진안전도는 공학적 안정성 평가기준(안전율, 허용변형량 등)에 의하여 판단되며, 설계지진가속도와 같은 하중조건에 대한 저수지의 안정성을 평가하는데 주력하였다. 특히 소규모 저수지의 경우, 등가정적 사면안정해석을 통한 기준안전율의 만족 여부로부터 지진시 저수지의 안전도가 평가된다. 즉, 저수지의 안정성은 안전측면에서 극한상황을 고려한 보수적인 가정에 근거하여 판단되며, 저수지 파괴를 단순한 재해로 규정하는데 그치고 있다.

미국, 호주, 유럽 등 선진국에서는 2000년대 이후로 기본적인 안정성 분석방법에서 나아가 파괴모드, 파괴확률, 관련피해도, 다양한 하중조건 등을 통합한 위험도 해석을 통해 저수지의 지진안전도를 검토하는 방법이 일반적인 추세이다(Yegian et al., 1991; Pace et al., 2008; Hepler et al., 2009; Engemoen et al., 2015). 반면 국내의 경우, 주로 결정론적 해석방법이 이용되며, 기본적으로 파괴모드, 관련피해도와 같은 위험도를 고려하지 못하고 있다. 그러므로 최근 증가하는 불확실성을 능동적으로 고려하기 위해서 위험도 해석기반의 확률-통계학적 저수지 지진안전도 평가기법을 기반으로 하는 종합적인 위험도 해석방안 수립이 요구된다.

지진위험도 평가는 일반적으로 3단계로 수행된다(Fig. 1 참조). 1단계는 지진위험분석(SHA, Seismic Hazard Analysis)으로서,

다양한 지진원과 지진원으로부터 유발될 수 있는 진동특성치가 파악된다. 이 단계에서는 저수지 부지에서 나타날 수 있는 여러 수준의 지진동 재현성 확률정보를 파악한다. 2단계는 지진성능분석(SPA, Seismic Performance Analysis)으로서, 저수지의 지진 저항성을 파악한다. 3단계는 지진위험도분석(SRA, Seismic Risk Analysis)으로서, 저수지의 전반적인 손상이나 파괴위험을 파악하기 위해서 SHA와 SPA의 결과를 결합하는 단계이다(Yegian et al., 1991).

최근 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)은 다음과 같이 요약된다 : (1) 댐 부지에 적합한 상세한 잠재적 파괴모드들 기술, (2) 잠재적 파괴모드들 평가를 위한 사건수(event tree) 작성, (3) 저수위별 PGA (Peak Ground Acceleration, 지표면최대가속도) 또는 지진규모와 같은 하중조건 수립, (4) 하중조합(저수위와 PGA)과 부지 특성값들을 평가하여 지진에 의한 잠재적 파괴모드들이 중요한 위험인자인지를 결정하는 선별작업(screening)을 수행한다. 파괴모드가 선별될 수 없으면, 가능한 모든 각 지진과 저수위 하중조건에 대하여 다음 절차를 수행한다. (1) 기초지반 또는 체체의 액상화 가능성 추정; (2) 액상화가 발생하

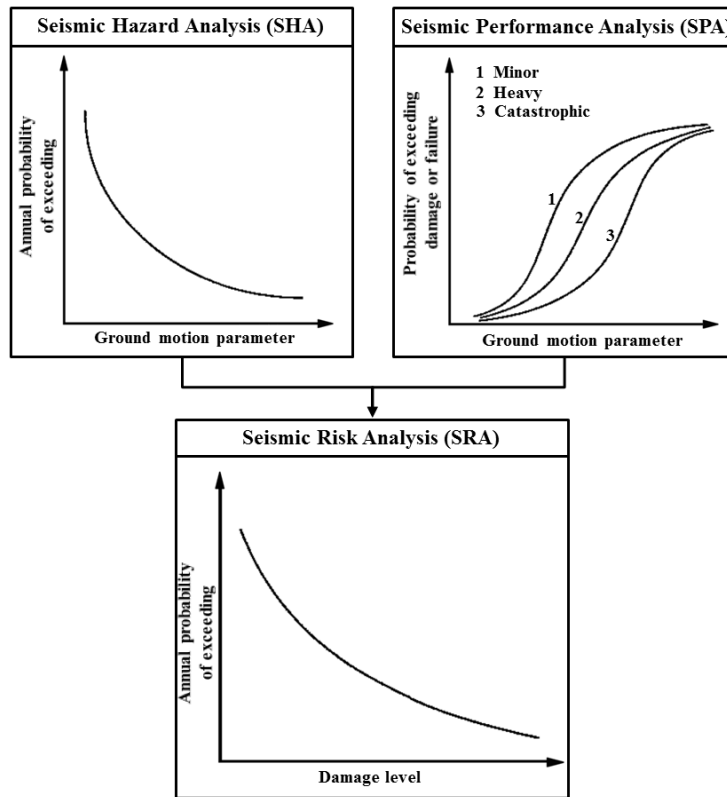


Fig. 1. Steps Involved in Seismic Risk Analysis (Yegian et al., 1991)

지 값을 확률 계산; (3) 액상화 가능성이 있는 제체재료 잔류강도 추정; (4) 잔류강도를 이용한 액상화로 인한 저수지의 변형 추정; (5) 액상화 없이 유발될 수 있는 변형량을 추정한다. 위 방법에서 지진에 의한 주된 잠재적 파괴모드는, 지진동에 의한 제체 및 기초 침하로 여유고(댐머루 표고와 저수지 최고수위와의 높이차) 감소로 인한 댐의 월류파괴와 지진동에 의한 댐 제체의 횡단균열(이하 횡균열)에 의한 내부침식에 의한 댐 파괴이다(Fig. 2 참조).

국내에서도 사건수 분석 기법을 이용한 댐의 내부 침식 위험도에 대한 지반공학적 시스템 응답확률 산정과 같은 연구(Noh et al., 2014)가 수행된 바 있으며, Kwater (한국수자원공사)는 D-SMART라는 위험도기반 댐 안전 평가틀을 개발하여 활용하고 있다. 이상의 국내 연구는 모두 미공병단의 평가도구(Toolbox)를 차용·변용하고 있고, 지반공학적 위험도 평가에 있어, 지진에 대한 위험도보다는 내부침식 등에 대한 평가를 비중있게 다루고 있으며, 그나마 댐 체원과 지반공학적 정보 습득이 비교적 용이한 규모가 큰 대댐에 적용된 연구들이라 할 수 있다.

본 연구의 목적은 소규모 댐의 지진시 시스템 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하고, 지반공학적 정보가 부족한 국내 재해위험 저수지의 지진시 파괴확률을 추정하는 것이다. 이를 위하여, 국내 재해위험 저수지로 지정된 저수지 중 지반공학적인 정보를 얻을 수 있는 7개 저수지에 대해 사건수 분석 기법을 적용하여, 지진에 대한 파괴확률을 평가하였으며, 그 방법 및 절차를 제시하였다. 저수지 댐의 지진에 의한 파괴확률을 산정하기 위한 사건수 분석 방법에 미공병단이 사용하고 있는 평가도구를 이용하였다. 안전진단보고서를 확보한 84개 재해위험 저수지의 댐높이와 여유

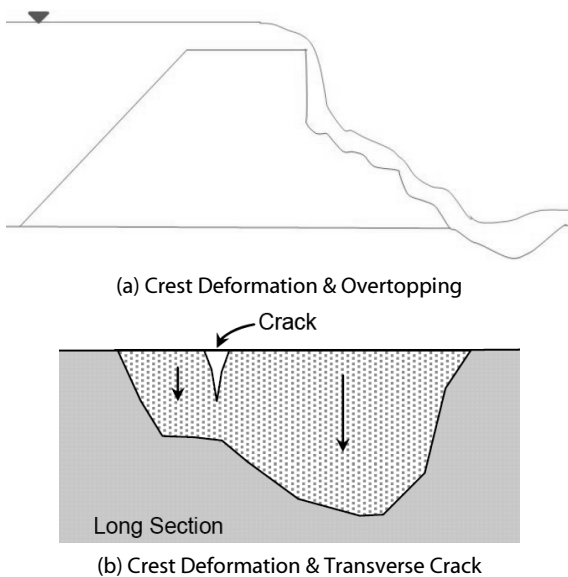


Fig. 2. Main Potential Failure Modes of Embankment by Earthquake Loads

고와의 관계를 검토하였고, 미공병단 평가도구로 이용되는 파괴확률 산정식을, 이러한 댐높이와 여유고와의 관계에 연관시켰다. 이러한 연관관계로부터, 미공병단 평가도구를 적용할 때, 지진시 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고 임계곡선을 도출하였고, 이러한 임계곡선과 7개 저수지에 대해 산정한 지진시 파괴확률 산정 결과를 참고하여, 물성확보가 어려운 국내 재해위험 저수지의 개략적인 지진에 대한 시스템 파괴확률을 추정해 보았다.

2. 저수지 확률론적 위험도 분석 기법

2.1 위험도 분석 기법

위험도 분석(risk analysis)은 시설의 안전성 평가, 취약부에 대한 평가 및 구조물에 적용되는 위험요인을 사전에 예측하고, 검증하기 위해 사건을 모델링하여 위험도를 추정하는 것을 말한다. 정량적인 위험도 분석 기법에는 인지 사고 시나리오를 최상위 사건(top event)으로 놓고 사고발생 영향 파괴모드를 귀납적 트리(tree)로 작성하는 결함수 분석 기법(Fault Tree Analysis, FTA)과 연역적 트리로 작성하는 사건수 분석 기법(Event Tree Analysis, ETA)이 있다. 이러한 방법들은 도식적으로 사건 발생 시나리오를 쉽게 파악할 수 있게 해준다. 특히, ETA 기법은 정량적인 위험도 파악에 유리하여 댐의 위험도 분석에 폭넓게 사용되고 있다(Noh et al., 2014).

2.2 사건수 분석 기법

ETA 기법은 초기사건(initiating event)과 하위사건 간 상호 인과관계를 정확하게 정의하며 시설물의 설계에서 가정된 초기사건들로 야기되는 사건의 평가에 유용하다. 이 기법은 Beim and Hobbs (1997)가 원전의 위험도 분석을 위해 처음 사용하였고 점차 다른 분야로 확대 적용되고 있다.

Fig. 3과 같이 사건수는 발생 가능한 초기사건에서 시스템 파괴

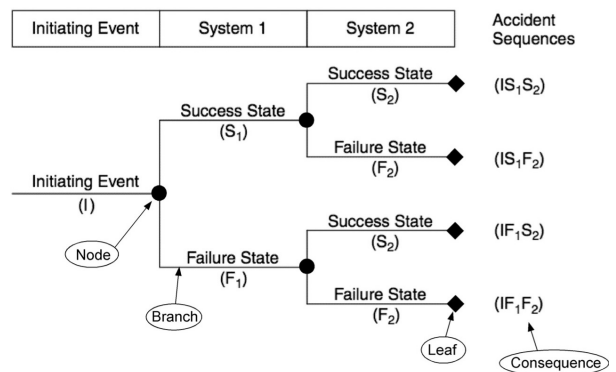


Fig. 3. A Simple, Generic Event Tree (US Nuclear Regulatory Commission, 1975)

(system failure)까지의 과정을 연결해 도식적으로 표현하며, 연결 사건수가 증가할수록 사건수는 나무가지처럼 펼쳐진다. Fig. 3에서 하나의 사건 이후 두 개 이상의 연결사건이 발생하는 경우, 연결사건을 분기(branch) 또는 분기사건(branch event)이라 한다. 각 분기사건은 조건부확률을 가진다. 연속된 사건에 대한 결합확률(joint probability)은 각 사건의 조건부 확률들을 모두 곱하여 구하고, 하나의 초기사건에서 파생된 다수의 연속적인 사건들이 있다면 각각의 결합확률을 모두 더하여 전체 파괴확률(total probability of failure)을 구할 수 있다. 만약 여러 초기사건이 있을 경우 각각의 초기사건에 대한 전체 파괴 확률을 모두 더하여 시스템 파괴확률을 구할 수 있다.

2.3 저수지 확률론적 위험도 평가 방법

저수지 위험도 분석에서 시스템 파괴는 저수지의 기능이 손실되어 더 이상 물을 저류하지 못하는 상태라고 정의할 수 있다. 저수지의 파괴를 유발하는 세 가지 하중 조건은 홍수, 지진, 그리고 심각한 외적 하중이 없는 정상 운영상태이다.

시스템이 파괴되면, 즉 필댐이 더 이상 물을 저류하지 못하면 하류부에 인명 손실 또는 물질적 피해가 발생한다. 그러므로 위험도(risk)를 주어진 기간(일반적으로 1년)에 발생할 예상 피해 규모라고 정의한다면, 주어진 하중 조건에 대한 위험도는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$Risk = P_e \times SRP \times C \quad (1)$$

여기서, P_e 는 연간 하중 발생 확률, SRP는 주어진 하중 조건에 대한 시스템 반응 확률(System Response Probability)이며 C는 피해액(cost of consequence)이다. 주어진 기간에서 시스템 파괴확률을 P_f 는 다음 식과 같다.

$$P_f = P_e \times SRP \quad (2)$$

본 연구에서 다루는 저수지의 지진하중에 대한 시스템 응답 확률은 저수지가 지진에 의해 저류 기능이 손실될 확률을 의미하며, 지진발생 확률 P_e 를 계산된 SRP와 곱하여 저수지의 지진에 의한 파괴확률 P_f 를 구할 수 있다.

3. 저수지 지진에 대한 파괴확률 산정

3.1 파괴확률 산정 대상 저수지 개요

국민안전처가 지정한 285개 재해위험 저수지에 대하여, 정밀한 전진단보고서가 확보된 84개 저수지 중, 지진시 시스템 파괴확률을 산정하는 데 필수적인 최소한의 지반공학적인 정보를 가지고 있는 것은 단 7개 저수지뿐이었다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 7개 저수지를 지진시 파괴확률 산정을 위한 대상 저수지로 정하였고, 해당 저수지들에 대한 기본 정보는 Table 1과 같다.

Fig. 4는 평가 대상 7개 저수지의 입도분포 곡선을 액상화 가능 범위의 입도 범위 곡선과 함께 나타낸 것이다. Fig. 4의 곡선 비교로부터 대상 저수지들은 액상화 가능성이 없는 것으로 우선 간주되었다.

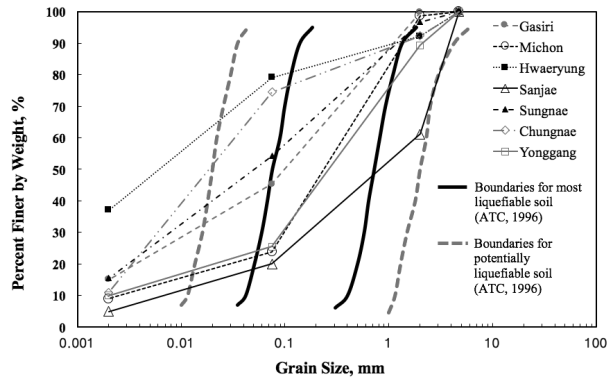


Fig. 4. Gradation Curves of the Target 7 Fill Dams for Evaluating Seismic Failure Probability

Table 1. Basic Information of the Target Fill Dams for Evaluating Seismic Failure Probability

Dam	Location	Type	Height (m)	Crest EL (m)	Full water level EL (m)	Classification(USCS)	
						Fill	Core
Gasiri	Yeoju	CC ¹⁾	4.00	58.49	57.70	SC	CL
Michon	Wonju	CC	11.8	234.89	233.96	SM	CL
Hwaeryung	Boseong	H ²⁾	11.0	66.17	65.08	SM	SM
Sanjae	Hapcheon	PC ³⁾	23.4	294.85	292.00	SM	CL
Sungnae	Seocheon	CC	12.9	42.32	40.00	CL	ML
Chungnae	Boseong	CC	9.00	37.59	36.00	SM	SC
Yonggang	Jangheung	H	11.5	194.85	192.82	SM	SM

¹⁾ CC : central core dam, ²⁾ H : Homogeneous dam, ³⁾ PC : Puddle core dam

3.2 지진시 파괴모드 선정

앞서 기술한 비와 같이 지진에 의한 소규모 댐의 주요 파괴모드는 다음과 같이 2가지로 구분된다(USBR and USACE, 2015)(Fig. 2 참조).

- (1) 지진시 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴
- (2) 지진시 댐 정상부의 침하와 발생된 평균열을 통한 상부 침식에 의한 침식 파괴

액상화 발생 가능성이 없는 저수지의 지진시 댐 정상부의 침하량은 일반적으로 지진시 비액상화 댐의 실관측기록을 바탕으로 만들어진 Swaisgood의 경험식(Swaisgood, 2003)으로 산정될 수 있는데, 해당 경험식을 이용하여 산정된 댐 정상부의 침하량은 댐 높이의 1%를 초과하지 못한다. 이러한 사실로부터, Table 1에서 알 수 있듯이, 7개 대상 저수지의 여유고는 댐 높이의 최소 8% 이상이기 때문에 정상부 침하에 의한 여유고 부족에 의한 월류파괴는 고려할 필요가 없는 모드인 것으로 판단되었다. 즉, 본 연구에서 지진에 의한 저수지 파괴모드는 지진시 정상부 침하와 발생된 평균열을 통한 상부 침식에 의한 파괴를 파괴모드로 설정하였고, 이에 대한 시스템 응답 확률 또는 시스템 파괴확률을 산정하였다.

3.3 파괴확률 산정 방법 및 절차

본 연구에서 지진에 의한 저수지의 시스템 파괴확률은 사건수 분석기법을 기본틀로 하여 산정되었는데, 지진하중에 의한 댐 정상부의 침하량은 비액상화 댐에 적용하는 Swaisgood의 경험식(Swaisgood, 2003)을 이용하였고, 지진시 댐 정상부 평균열의 폭과 균열깊이는 PGA값과 지진규모로 추정하는 미개척국과 미공병단에서 제시하는 방법(USBR & USACE, 2015)을 적용하였다. 위와 같이 산정된 댐정상부의 침하량과 침하된 상태에서의 균열깊이를, 저수지 저수위와 비교하여 댐 정상부 상부 균열을 통한 침투에 의한 파괴확률을 산정하는 미공병단의 내부침식 평가도구(internal erosion toolbox) (USACE, 2009)를 이용하여, 1000년 재현주기 발생 지진(2011년 댐설계기준 상 특등급 댐에 해당되는 재현주기 지진)시 까지의 저수지 파괴확률을 산정하였다.

본 연구에서 수행한 저수지 지진시 시스템 파괴확률 산정 절차 및 방법은 다음과 같다.

3.3.1 해석 저수위 결정

대상 저수지들은 소규모 농업용댐으로서 홍수조절댐에 비해 수위 변화가 상대적으로 작고, 현행 댐설계기준(MLTL, 2011)의 지진시 검토 수위(상시만수위)를 반영하여, 상시만수위를 한 가지로 고정된 상태에서의 시스템 파괴확률을 산정한다.

3.3.2 지진 하중의 수준 및 발생 확률 산정

소방방재청 고시 국가지진위험지도(2013년 12월 13일 공표)를 이용하여, 50년(5년에 초과확률 10%), 100년(10년에 초과확률 10%), 200년(20년에 초과확률 10%), 500년(50년에 초과확률 10%), 1000년(100년에 초과확률 10%) 재현주기에서의 각 저수지의 위치로부터 PGA 값을 산정한다(Fig. 5 참조). 각 재현주기별 PGA값의 발생확률은 n년에 초과확률 $P_e(\%)$ 일 때 연 초과확률, AEP는 $AEP=1-(1-P_e/100)^{1/n}$ 으로 산정한다.

3.3.3 지진시 댐 정상부 침하량 산정

지진시 댐 정상부의 침하량을 각 해당 PGA와 규모, M_s (본 연구에서는 6.5 적용)를 대입한 Swaisgood의 경험식(Figs. 6 and 7 참조)을 이용하여 산정한다.

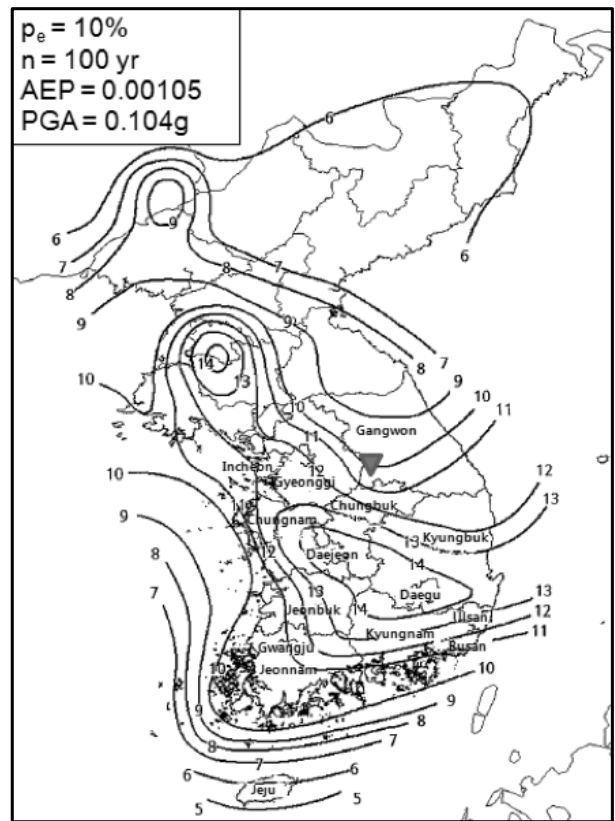


Fig. 5. Determination of PGA at the Michon Dam Site Using National Earthquake Hazard Map (NEMA, 2013)

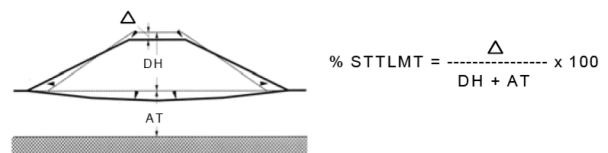


Fig. 6. Crest Settlement Definition (Swaisgood, 2003)

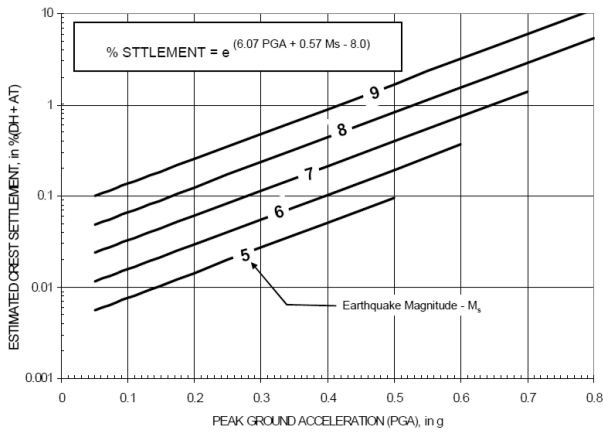


Fig. 7. Estimated Crest Settlement (Swaisgood, 2003)

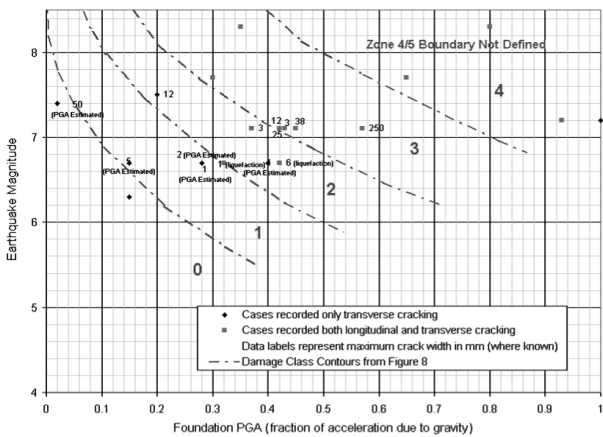


Fig. 8. Incidence of Transverse Cracking Versus Seismic Intensity and Damage Class Contours for Earthfill Dams (Pell and Fell, 2003)

3.3.4 저수지의 위험등급 결정

지진규모(국내 발생 예상 최대 지진규모는 약 6.5)와 각 재현주기 별 PGA값을 이용하여 Fig. 8로부터 저수지 지진 위험등급을 결정한다.

3.3.5 지진에 의한 횡균열의 깊이와 균열 최하단의 해발높이 (elevation, 이후 EL) 결정

저수지 위험등급으로부터 Tables 2 and 3을 이용하여 횡균열 발생확률(P_{flaw})과 균열깊이를 산정하고, (3)단계에서 산정한 정상부의 침하량을 합하여, 지진후 균열깊이 최하단의 EL을 결정한다. Table 3은 균열폭에 따른 균열깊이를 나타낸다. 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 Damage class '0'일 때 균열폭 5mm에 해당되는 균열깊이는 1.14m로 산정되었다.

Table 2. 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 3. 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

3.3.6 균열을 통한 침식 개시(initiation) 확률(P_i) 산정

P_i 는 제체에 존재하고 있던 잠재적 결함(flow)으로 인해 내부 침식이 시작될 확률이다. 균열깊이 하단의 EL과 상시만수위 EL의 차이, 현 수위에서의 동수경사, 제체 토질성분 등의 조건을 고려하여 침식 개시 확률이 산정된다. 단, 본 단계에서 균열깊이 하단의 EL이 상시만수위 EL보다 높은 경우에는 해당 PGA 수준에서의 침식에 의한 파괴확률은 이후 단계의 평가에 상관없이 '0'이 된다.

3.3.7 침식 진행(continuation) 확률(P_c) 산정

P_c 는 개시된 내부침식이 제체와 필터재의 입도분포에 의해 멈출 수 없는 상황이 발생하여 침식이 지속 진행될 확률이다. 코어재료와 필터재료에 대한 입도분포를 근거로 확률이 산정된다.

3.3.8 침식 급진전(progression) 확률(P_p) 산정

P_p 는 침식된 흙에서 작용하는 전단응력이 누수가 발생하는 파이핑 경로를 확장시켜 내부침식이 급진전될 확률이다. 제체의 입도특성에 따라 확률이 산정된다.

3.3.9 브리칭(breach) 파괴 확률(P_b) 산정

댐 형식에 따라 발생 가능한 브리칭 파괴의 종류(싱크홀이 유발될 정도로 큰 파이핑 경로의 확대, 하류사면의 파괴, 또는 댐마루

침하로 인한 율류 등)를 선정하여 브리칭(breach) 파괴 확률을 산정한다.

3.3.10 시스템 응답 확률(SRP), P_{SRP} 산정

(1)~(9)단계를 거쳐 각 PGA 수준에서의 시스템 응답확률을 P_{flaw}×P_i×P_C×P_P×P_b=P_{SRP}로 산정한다.

3.3.11 지진에 의한 시스템 파괴확률(P_f) 산정

(1)~(10) 단계를 거쳐 산정한 각 PGA 수준에서의 응답확률 (P_{SRP})에 해당 PGA 연 초과확률 AEP를 곱하면, 각 PGA 단계에서의 연간 파괴확률이 산정된다.

이상의 절차 중 (1)~(2) 단계는 일반 절차 및 방법, (3) 단계는

비액상화 댐에 대해 정부침하를 경험적으로 산정하는 Swaisgood 경험식을 적용한 것이고, (4) 단계 이후는 미공병단의 내부침식 평가도구의 절차와 방법을 따르고 있다. 그러므로 (4) 단계 이후의 상세한 적용 절차 및 방법은 미공병단(USACE) (2009)의 내부침식 평가도구를 참조하거나 최근에 연구발표된 Noh et al. (2014)의 논문을 참조할 수 있다. 아울러, 본 연구에서는 국내 댐설계기준 (MLTM, 2011)을 참고하여, 저수지의 파괴확률은 1000년 재현주기 발생 지진(내진특등급 댐에 해당되는 재현주기 지진)까지를 고려하여 산정하였다.

3.4 지진시 시스템 파괴확률 산정 결과

Table 4는 3.3 절에 제시된 절차와 방법에 의하여, 미촌 저수지에

Table 4. System Response Probability of the Michon Dam Against Earthquake Events

(a) P_{flaw}

Reservoir EL (m)	PGA (g)	AEP	Vert. Disp. Caused by EQ. (m)	Deformed crest El (m)	Damage class by toolbox	Probability of transverse cracking
						P _{flaw}
233.96	0.026	0.02	0.002	234.888	0	0.001
233.96	0.041	0.01	0.002	234.888	0	0.001
233.96	0.050	0.005	0.002	234.888	0	0.001
233.96	0.079	0.002	0.003	234.887	0	0.001
233.96	0.104	0.001	0.003	234.887	0	0.001

(b) P_i

Max crack width (mm)	Max crack depth (m)	EL of bottom of the crack (m)	Reservoir level stage (m)	Depth of mid-level flow from the crest (m)	Crack width in core for reservoir stage being considered (mm)	Crack length at the mid-level of flow (m)	Average Hydraulic gradient	Prbability of initiation in a crack
C _{max}	D		dp	x	C _{dl}	L _{dl}	i _{avg}	P _i
5	1.14	233.75	0.928	1.03	0.47	8.55	0.025	0.001
5	1.14	233.75	0.928	1.03	0.47	8.55	0.025	0.001
5	1.14	233.75	0.928	1.03	0.47	8.55	0.025	0.001
5	1.14	233.75	0.927	1.03	0.47	8.55	0.025	0.001
5	1.14	233.75	0.927	1.03	0.47	8.55	0.025	0.001

(c) P_C, P_P, P_b, SRP and P_f

Probability of continuation	Probability of progression	Probability of breach			System Response Probability	Failure probability, SRP×AEP
		Sloughing or unraveling of downstream slope	Sinkhole development	Overall probability of breach		
P _C	P _P			P _b	SRP	P _f
0.5	0.35	0.92	0.048	0.924	2.330.E-07	4.659.E-09
0.5	0.35	0.92	0.048	0.924	2.332.E-07	2.332.E-09
0.5	0.35	0.92	0.048	0.924	2.333.E-07	1.167.E-09
0.5	0.35	0.92	0.048	0.924	2.339.E-07	4.677.E-10
0.5	0.35	0.92	0.048	0.924	2.344.E-07	2.344.E-10

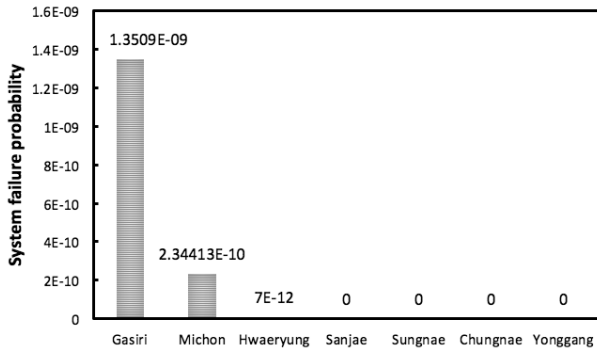


Fig. 9. Failure Probability of Fill Dams Against Earthquake (Recurrence Period: 1000 years)

대해 산정한 재현주기별(PGA 수준별) 시스템 응답확률 결과를 예로써 나타낸 것이다.

Fig. 9는 7개 저수지에 대하여 산정한 1000년 재현주기 지진시 파괴확률을 나타낸 것이다. 그림으로부터, 7개 저수지의 파괴확률이 모두 매우 낮게 계산됨을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 액상화가 발생하지 않은 경우, 지진에 의한 저수지의 침하량은 댐높이의 1% 이하로 계산되며, 특히 소규모 저수지의 경우, 댐 높이가 낮아 정상부 침하량은 작게 계산되지만, 낮은 댐 높이에 비해 상대적으로 여유고는 높아, 즉, 댐 높이에 대한 여유고의 비(=여유고/댐높이, 이하 여유고율)가 커서, 정상부 균열을 통한 침식파괴는 쉽게 발생하지 않기 때문이다. 특히, 산재, 성내, 축내, 용강, 4개 저수지에서 파괴확률은 아예 '0'으로 계산되는데, 이는 지진으로 인한 저수지 정상부의 침하와 침하된 정상부에서의 평균열의 최하단이 저수위 보다 높기 때문에 파괴모드 상 파괴가능성은 전혀 없게 된다.

4. 국내 재해 위험 저수지의 지진에 의한 시스템 파괴확률 추정

4.1 국내 재해위험 저수지의 대표 특성 검토

앞선 장과 절에 기술된 바와 같이, 저수지의 지진에 대한 파괴확률이 산정되기 위해서는 최소한의 지반공학적인 정보가 요구되어진다. 그러나 국민안전처가 지정한 285개 재해위험 저수지 중, 정밀안전진단보고서가 확보될 수 있는 저수지는 84개에 불과하고, 이 중, 최소한의 지반공학적인 정보를 가지고 있는 것은 단 7개 뿐이다. 그러므로 지반공학적인 정보가 아니더라도 최소한의 저수지 정보를 활용한 저수지의 지진 위험도를 추정해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 84개 저수지의 정보 중 그 특징이나 경향성을 보이는 정보를 파악해 보았다. 그 결과, 우선 각 저수지의 제원 중, 댐 높이와 여유고율이 그 경향성을 보이는 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 국민안전처가 지정한 국내 285개 재해위험 저수지 중 정밀진단보고서가 확보된 84개 재해위험 저수지에 대한 자료 중

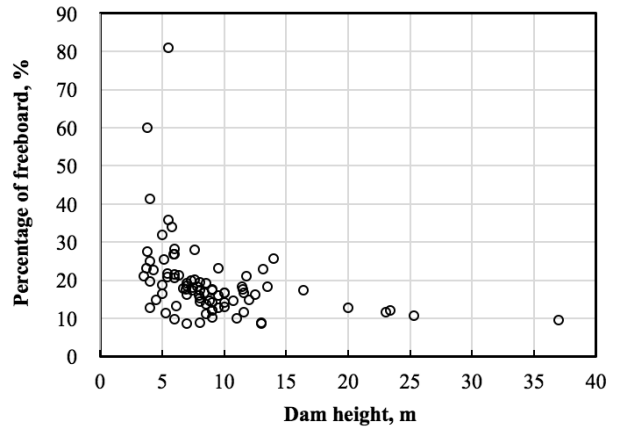


Fig. 10. Freeboard Percentage Versus Dam Height

댐 높이와 상시만수위를 기준으로 한 댐 여유고율의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서, 댐 높이와 댐 여유고율은 쌍곡선 형태의 경향성을 보인다. 즉, 댐 높이가 커질수록 댐 여유고율은 쌍곡선의 형태로 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 동일한 높이를 가지는 댐 중에서 여유고율의 상한값들을 이은 곡선이 쌍곡선의 형태를 더 잘 이루고 있다. 그리고 그림으로부터, 대부분의 저수지 높이는 6~10m이며, 여기에 해당되는 댐의 여유고율 또한 13~22%의 범위에 거의 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

4.2 댐높이-여유고율 임계곡선

4.1절에서 지반공학적 정보를 얻을 수 없는 84개 재해위험 저수지의 댐 높이와 여유고율과의 관계를 검토하였는데, 본 절에서는 이러한 댐 높이와 여유고율과의 관계를 미공병단 평가도구로 이용되고 있는 시스템 파괴확률 계산식과 연관시키고자 하였다.

3.4 절에서 산재, 성내, 축내, 용강, 4개 저수지에서 파괴확률이 '0'으로 계산되는데, 댐높이와 여유고율 평면에서 쌍곡선의 형태로 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고율 임계곡선을 찾고자 하였다.

Table 2에서 Damage class '0'인 경우에 대해 평균열의 폭은 5mm에 해당한다. Table 3에서 균열폭 5mm에 직접 대응되는 균열깊이는 나타나 있지 않기 때문에, 우선 균열폭에 대한 균열깊이를 나타내는 경향선을 $y=0.0878x+0.7012(R^2=0.9976)$ 로 구하고, 이 식을 이용하면, 균열폭 5mm에 해당되는 균열깊이는 1.14m로 구해진다.

국가 지진위험지도 상 500년 재현주기와 1000년 재현주기의 보통암 기준 최대 지반가속도는 각각 0.11g와 0.14g이다.

Fig. 7의 Swaisgood의 추정식에서 % STTLMT는 침하량(settlement)의 댐높이에 대한 백분율을 나타낸 것으로서 댐 기초지반이 댐 체체에 비해 상대적으로 비압축성 지반인 경우, Fig. 6의 식에서 압축성 기초지반의 두께, $AT=0$ 으로 간주할 수 있다. 국내

저수지의 기초지반은 퇴적층의 강바닥이 아닌, 산지 원지반을 기초로 하고 있으며, 댐 축조중에 대부분의 침하가 이루어지고 다짐되어 있는 지반이거나, 암 내지는 풍화암을 기초지반으로 하고 있다. 이러한 점과 기초지반에 대한 지반공학적인 정보가 대부분의 저수지에서 확보하는 것이 거의 불가능하다는 점을 감안하여, 우선은 분석을 단순화하기 위한 방안으로 $AT=0$ 을 가정하였다. 그러므로 Fig. 7의 식에서 백분율이 아닌 침하비는 아래의 식으로 표시될 수 있다.

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{e^{6.07 PGA + 0.57 Ms - 8.0}}{100} \quad (3)$$

여기서, ΔH 는 정상부침하량, H 는 댐높이, PGA (Peak Ground Acceleration)는 지표면 최대가속도(단위는 중력가속도의 비율, g), Ms는 지진규모이다.

Eq. (3)에서 지진시 댐 정상부 침하량, ΔH 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta H = \frac{H}{100} e^{6.07 PGA + 0.57 Ms - 8.0} \quad (4)$$

국내의 경우 지진규모 Ms는 6.5로 간주되고 국내 저수지는 1000년 이내 재현주기에서 지표면최대가속도, PGA가 보통암 기초지반 기준 0.14g를 초과하지 않기 때문에, Fig. 8에서 위험도 그룹(damage class) '0'에 속하므로 예상 최대 균열깊이는 앞서 계산한 바와 같이 1.14m이다. 그러므로 아래 Eq. (5)의 조건을 만족하면 시스템의 응답확률 또는 파괴확률은 '0'이 된다.

$$\Delta H + 1.14 < \text{여유고} \quad (\Delta H \text{와 여유고의 단위는 모두 m}) \quad (5)$$

다음으로 여유고율, f 를 $f = \text{여유고}/\text{댐높이}(H)$ 로 정의하면, 여유고 = $f \cdot H$ 가 되고 이를 Eq. (5)에 대입하고, Eq. (4)를 Eq. (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 Eq. (6)이 된다.

$$\frac{H}{100} e^{6.07 PGA + 0.57 Ms - 8.0} + 1.14 < f H$$

$$\frac{e^{6.07 PGA + 0.57 Ms - 8.0}}{100} + \frac{1.14}{H} < f \quad (6)$$

Eq. (6)에서 Ms에는 6.5을 대입하고, PGA에는 0.11(보통암 기준 국내 500년 재현주기 설계지진가속도 최대값, 0.11g)과 0.14(보통암 기준 1000년 재현주기 설계지진가속도 최대값, 0.14g)를 대입하면, 각각 Eqs. (7) and (8)과 같이, 해당 재현주기이하에서

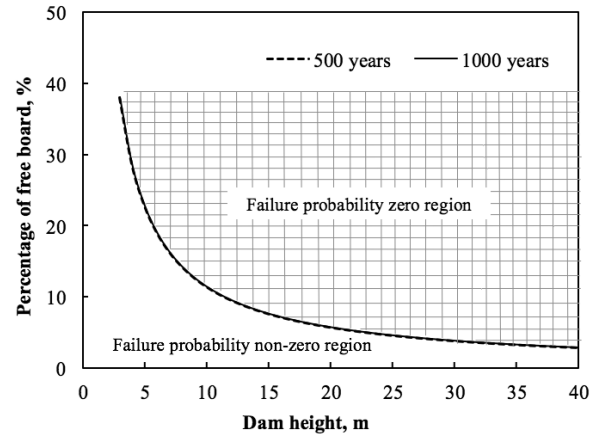


Fig. 11. Failure Probability Zero Curves with Recurrence Periods

파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고율 임계곡선의 식을 얻을 수 있게 된다. Fig. 11은 이러한 두 임계곡선을 댐높이-여유고율 축 평면에 나타낸 것이다. Fig. 11에서 여유고율은 백분율로 표시하였는데 이러한 이유는 이후, Fig. 10과 함께 비교하여 나타내기 위함이다.

$$0.00026588 + \frac{1.14}{H} < f \quad (500\text{년 재현주기}) \quad (7)$$

$$0.00031898 + \frac{1.14}{H} < f \quad (1000\text{년 재현주기}) \quad (8)$$

4.3 국내 재해위험 저수지의 지진에 대한 시스템 파괴확률 추정

본 절에서는 4.2절에서 도출한 댐높이-여유고율 임계곡선과 3장에서 계산한 7개 저수지의 지진시 파괴확률로부터 물성확보가 어려운 국내 재해위험 저수지들의 개략적인 지진에 대한 시스템 파괴확률에 대하여 토의해 보고자 하였다.

Fig. 12는 1000년 재현주기 지진에 대한 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고율 임계곡선, 7개 저수지 및 재해위험 저수지의 댐높이-여유고율 분포를 함께 나타낸 것이다. 그림으로부터 84개 재해위험 저수지 중 약 75% (63개 저수지)가 임계곡선 위쪽에 도시되어, 지진에 대한 파괴확률은 전혀 없음을 확인할 수 있다. 특히, 댐높이가 13m를 초과하는 모든 저수지의 지진시 파괴확률은 '0'인 것으로 추정할 수 있다. 다수의 저수지 제원이 댐높이 6~10m, 여유고율 13~22% 범위를 가지는 것을 확인할 수 있는데, 7개 저수지중 파괴확률이 '0'이 아닌 3개 저수지의 파괴확률과 비교해 보더라도, 대부분의 저수지의 지진시 파괴확률은 매우 낮을 것이라 추정할 수 있다.

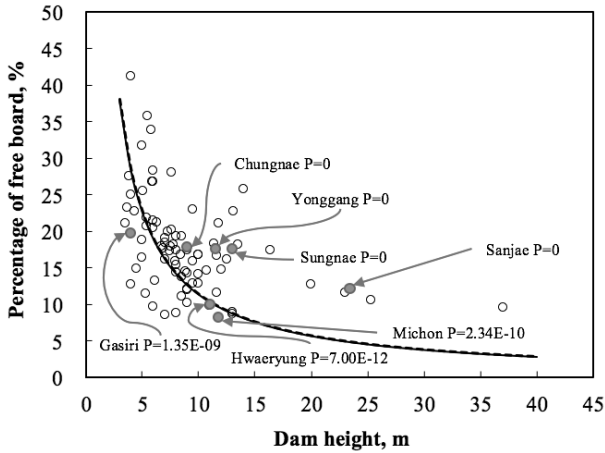


Fig. 12. Comparison of Free Board Percentage of Disaster Risk Fill Dams with Failure Probability Zero Curves Against the Earthquake with 1000 year Recurrence Period

그러므로 액상화가 고려되지 않은 재해위험 저수지 대부분은 지진시 파괴확률이 매우 미미할 것으로 예측된다. 285개 재해위험 저수지 중 84개의 보고서 획득이 가능한 저수지를 제외한 나머지 저수지들도, 외관상 그 높이와 여유고 측정은 가능하므로, 향후 측정 결과를 기초로 전체 저수지의 시스템 파괴확률도 개략적인 추정이 가능할 것으로 여겨진다.

5. 결론

본 연구에서는 재해위험 저수지로 지정된 7개 저수지에 대해 사건수 분석 기법을 적용한 지진에 대한 시스템 파괴확률을 산정하였다. 진단보고서가 확보된 84개 재해위험 저수지의 댐높이와 여유고와의 관계를 검토하고, 미공병단 평가도구로 이용되는 시스템 파괴확률 산정식과 7개 저수지에 대해서 산정된 파괴확률 산정 결과를 이러한 관계에 연관시켜, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 최소한의 지반공학적 정보를 이용하여 소규모 농업용 저수지의 지진에 대한 시스템 파괴확률을 산정하는 방법 및 절차를 제시하였다.
- (2) 지반공학적인 정보를 얻을 수 있었던 7개 재해위험 저수지에 대해 사건수 분석 기법을 적용하여 지진에 대한 시스템 파괴확률을 산정하였다. 대상 저수지의 입도특성은 액상화 가능성이 낮았고, 이러한 저수지들에 대해 미공병단의 평가도구를 적용하면, 댐 높이에 비해 여유고가 상대적으로 높은 해당 저수지들의 특징으로 인해, 댐 침하와 정상부 침식에 의한 파괴가 발생되기 어려워, 파괴확률은 매우 낮은 것으로 나타났다.

- (3) 지반공학적 정보를 가지고 있지 않은 재해위험 저수지들의 최소한의 정보로부터 시스템 파괴확률을 추정하기 위한 절차로 최소한의 기초 자료 경향성을 검토해 보았다. 검토결과, 댐높이가 커질수록 댐 여유고율(=여유고/댐높이)은 쌍곡선의 형태로 감소하는 경향을 보였다.
- (4) 재해위험 저수지에 대해 도출된 댐높이와 여유고율과의 관계를 미공병단 평가 도구에서 사용하는 시스템 파괴확률 계산식과 연관시켜, 댐높이와 여유고율 평면에서 쌍곡선의 형태로 파괴확률이 '0'이 되는 댐높이-여유고율 임계곡선을 도출하였다.
- (5) 댐높이-여유고율 임계곡선, 7개 저수지에 대해 산정된 시스템 파괴확률, 84개 재해위험 저수지 댐높이-여유고율 분포를 함께 비교한 결과, 재해위험 저수지 중 약 75%가 지진에 대한 파괴확률은 전혀 없는 것으로 확인되었고, 액상화가 발생하지 않을 것으로 간주한다면, 나머지 대부분의 저수지들도 지진시 파괴확률은 매우 미미할 것으로 예측되었다.

본 연구결과는 7개의 저수지들의 입도특성만으로 저수지 체체의 액상화 가능성은 없는 것으로 판단하였고, 기초지반의 경우, 체체에 비해 상대적으로 압축성이 작은 것으로 가정하여, 시스템 파괴확률을 산정하여 도출한 결과로서, 현재 진행되고 있는 사범 대상 저수지들에 대한 현장 및 실내시험 결과로부터 체체 및 기초지반 특성을 보다 면밀히 반영한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 그리고 체체 및 기초지반의 액상화를 고려한 파괴모드를 고려하는 경우, 현 연구결과에 비해 보다 큰 시스템 파괴확률이 산정될 것으로 예상되므로, 이에 대한 추가 연구가 또한 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2015년 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해예측 및 저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 “저수지 정량적 위험도 분석 및 보수보강 우선순위 평가기술개발” (MPSS-자연-2015-78) 연구과제 성과입니다.

References

- Applied Technology Council (ATC) (1996). Improved seismic design criteria for California bridges: Provisional Recommendations, ATC-32, California Dep. of Transportation, p. 92.
- Beim, G. K. and Hobbs, B. F. (1997). “Event tree analysis of lock closure risks.” *Journal Water Resour. Plan Manag.*, ASCE, Vol. 123, pp. 137-198.
- Engemoen, W., Fiedler, W. and Osmun, D. (2015). The role of empiricism in quantitative risk analysis, *Proc. 35th Annu USSD Conference*, USSD, Louisville, pp. 73-83.

- Hepler, T., Fiedler, B. and LaBoon, J. (2009). Risk analysis for Shasta dam raise, *Proc. 29th Annul USSD Conference*, USSD, Nashville, pp. 1167-1179.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). Dam design criterion, MLTM, pp. 223-224 (in Korean).
- Korea Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2009). Act for safety management and disaster prevention of reservoirs and dams, Korea Presidential Decree No. 25840.
- Korea National Emergency Management (NEMA) (2013). Nation Earthquake Harzard Map, NEMA announcement No. 2013-179 (in Korean).
- 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).
- 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 Annul USSD Conference*, USSD, Portland, pp. 521-532.
- 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, Paris.
- Swaigood, J. R. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes, *Proc. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2009). Internal erosion toolbox.
- 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.
- US Nuclear Regulatory Commission (1975). Reactor safety study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, U.S.
- Yegian, M. K., Marciano, E. A. and Ghaharman, V. G. (1991). "Seismic risk analysis for earth dams." *Journal Geotech. Engrg.*, Vol. 117, No. 1, January, pp. 18-34.