

국내 중소규모 흙댐의 상대적 액상화 파괴위험도 평가 기초 연구

A Basic Study on Relative Liquefaction Failure Risk Assessment of Domestic Small to Medium-Sized Earthfill Dams

박태훈¹⁾ · 하익수^{2)*}

Park, Tae Hoon¹⁾ · Ha, Ik-soo^{2)*}

¹⁾정인종합건설 주식회사 대표이사, ²⁾경남대학교 재난안전건설학과 교수

¹⁾President, Jungin Engineering & Construction Co., Ltd., ²⁾Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

/ A B S T R A C T /

This study aims to present a method to evaluate the relative risk of failure due to liquefaction of domestic small to medium-sized earthfill dams with a height of less than 15 m, which has little information on geotechnical properties. Based on the results of previous researches, a series of methods and procedures for estimating the probability of dam failure due to liquefaction, which calculates the probability of liquefaction occurrence of the dam body, the amount of settlement at the dam crest according to the estimation of the residual strength of the dam after liquefaction, the overtopping depth determined from the amount of settlement at the dam crest, and the probability of failure of the dam due to overtopping was explicitly presented. To this end, representative properties essential for estimating the probability of failure due to the liquefaction of small to medium-sized earthfill dams were presented. Since it is almost impossible to directly determine these representative properties for each of the target dams because it is almost impossible to obtain geotechnical property information, they were estimated and determined from the results of field and laboratory tests conducted on existing small to medium-sized earthfill dams in previous researches. The method and procedure presented in this study were applied to 12 earthfill dams on a trial basis, and the liquefaction failure probability was calculated. The analysis of the calculation results confirmed that the representative properties were reasonable and that the overall evaluation procedure and method were effective.

Key words: Risk, Liquefaction, Small to medium-sized earthfill dam, Geotechnical properties, Liquefaction failure probability

1. 서론

여타 기간시설물들과 마찬가지로 높이 15 m 이하의 중소규모 흙댐도 시설물의 규모와 하류 상황에 따라서는 지진 시 붕괴로 인한 피해가 발생할 수 있어서, 국내 지진화산재해대책법 상 내진성능평가와 내진 보강 등이 이루어지도록 법제화되어 있는 구조물 중 하나이다. 이러한 중소규모 흙댐의 개소수가 매우 많음에도 불구하고, 거의 대부분의 댐들이 축조 시기가 오래되어 저수지에 대한 정보, 특히, 지진 안정성 평가에 필수적인 지반공학적인 정보가 보존되지 않았거나 전무한 상태이다[1]. 2016년을 기준으로 해당 시설을 관리하는 정부 부처(해당 시기에는 국민안전처)가 지정한 285개 재

해위험 댐에 대하여, 정밀안전진단보고서를 확보할 수 있는 댐은 96개이며, 이 중 지진 시 파괴확률을 산정하는 데 필수적인 최소한의 지반공학적인 정보가 보존된 댐은 단 7개이었다는 점이 그 실태를 여실히 보여준다고 할 수 있다[2]. 그러나 이러한 물성 확보가 어려운 중소규모 흙댐들에 대해서도 향후 지진 대비 성능평가, 보수보강에 있어 투자 우선순위 등을 결정하기 위해서는 최소한의 정보를 이용한 지진 시 파괴위험도를 파악할 수 있는 방안 마련이 필요하다.

2017년에 하익수 등[1]은 지반공학적 물성 정보가 거의 없는 국내 중소규모 흙댐의 지진 시 파괴확률을 댐높이와 여유고만으로 간편하게 산정할 수 있는 연구를 수행한 바 있다. 해당 연구에서는 국내 중소규모 흙댐의 기초지반 및 축조재료의 일반적인 특성을 고려하여, 댐 체제에서는 액상화가 발생되지 않는다는 가정 하에 흙댐의 지진에 의한 파괴확률을 산정하였다. 2022년 하익수[3]는 마찬가지로 체제의 액상화가 발생되지 않는다는 가정 하에 댐의 지반공학적 물성정보와 상관없이 지진에 대한 파괴확률이 '0'이

*Corresponding author: Ha, Ik-soo

E-mail: geotech@kyungnam.ac.kr

(Received April 1, 2023; Revised April 4, 2023; Accepted April 4, 2023)

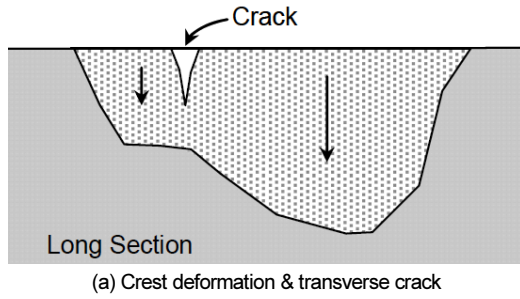


Fig. 1. Main potential failure modes of embankment by earthquake loads [1, 4]

되는 지진파괴확률 영역선을 제시하였고, 이러한 곡선을 이용하여 국내 식수전용 흙댐의 상대적인 지진위험도를 분류한 바 있다. 이상의 연구는 공통적으로 댐 제체에서는 액상화가 발생되지 않는다는 것을 전제로 한 연구 결과로, 중소규모 흙댐의 일반적인 지진 시 파괴위험도를 평가하기 위해서는 제체의 액상화로 유발되는 파괴 위험까지도 고려될 필요가 있다.

지진에 의한 중소규모 흙댐의 주요 파괴모드는, (1) 제체 액상화는 발생되지 않지만 지진 시 댐 정상부의 침하와 발생된 횡방향(상하류방향) 균열을 통한 상부 침식에 의한 침식파괴(제체 비액상화 파괴모드)(Fig. 1(a)); (2) 제체 액상화로 인해 과도한 정상부 침하가 발생하여 여유고 부족에 의한 월류파괴(제체 액상화 파괴모드)(Fig. 1(b)), 2가지로 구분될 수 있다[1, 4]. 상기의 2017년 하익수 등[1]과 2022년 하익수[3]의 연구는 중소규모 흙댐의 파괴모드로 제체 비액상화 파괴모드를 고려한 것이며, 제체에 액상화가 유발될 수 있는 중소규모 흙댐이라면 제체 액상화에 의한 월류 파괴모드도 반드시 고려되어야 한다. 즉, 보다 일반적인 상황에서 지진에 의해 발생할 수 있는 중소규모 흙댐의 파괴확률을 산정하기 위해서는 액상화로 인한 파괴확률까지도 산정할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 다만, 전술한 바와 같이 대부분의 중소규모 흙댐은 액상화로 인한 파괴확률을 산정함에 필수적인 지반공학적인 물성 정보가 거의 없으므로, 절대적인 액상화 파괴확률의 산정은 거의 불가능하나, 산정에 필요한 대표물성의 합리적인 가정 값을 이용한 파괴확률의 산정과 산정 결과의 상대적 비교는 가능하며, 이러한 상대적 비교만으로도 충분한 공학적 의미가 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 지반공학적 물성 정보가 거의 없는 높이 15m 이하의 국내 중소규모 흙댐의 액상화로 인한 상대적 파괴위험도를 평가할 수 있는 방안을 제시하는 데에 있다. 기존의 연구 결과를 활용하여 흙댐 제체의 액상화 발생확률, 액상화 후 제체 잔류강도 추정에 따른 댐 정상부 침하량, 댐 정상부 침하량으로부터 결정되는 월류심도와 이에 따른 제체 액상화 파괴확률을 산정하는 일련의 액상화로 인한 댐 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하였다. 이를 위하여, 중소규모 흙댐의 액상화로 인한 파괴확률을 산정하는데 필수적인 대표 물성들을 제시하였는데, 평가 대상으로 하는 댐 각각에 대한 이러한 대표 물성값들은 지반공학적 물성 정보의 획득이 거의 불가능하여 직접 산정이 불가능하므로, 기존 연구에서 중소규모 흙댐에 대해서 수행되었던 현장시험과 물리특성 시험 사례의 결과로부터 추정하여 산정하였다. 본 연구에서 제시하는 액상화로 인한 중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률 산정 방법과 절차를 12개 중소규모 흙댐에 시범적으로 적용하여 그 값을 산정해 보았고, 산정 결과에 대한 분석으로부터 제안된 산정 방안의 실효성과 개선점을 토의하였다.

2. 중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률 산정 방법과 절차

2.1 댐 제체 액상화 발생확률 산정

제체의 액상화 발생확률, P_L 산정 방법은 현장 N 값을 이용하는 것이 예비평가 방법에 비해 상대적으로 보다 상세하고 검증된 방법으로 여겨진다. 그러므로 본 연구에서는 제체 액상화 의심층에 대해 추정된 대표 N 값을 이용하여, Idriss and Boulanger에 의한 경험적 액상화 발생확률 산정 방법 [5]을 적용하였다. 이 방법은 1차원 반무한 지반에 대해 적용할 수 있는 산정 방법이며, 2차원 또는 3차원의 기하형상을 갖는 댐 제체에 적용하는 것이 다소 모순일 수 있으나, 발생확률의 상대적 비교가 본 연구의 목적이기 때문에 근사적 방법으로서의 채택은 가능한 것으로 판단되었다. 이 방법에서 제시하는 액상화 발생확률 산정식은 식 (1)과 같다.

$$P_L(N_1)_{60cs, CSR_{M=7.5}, \sigma'_v = 1atm} = \Phi \left[-\frac{\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.67 - \ln(CSR_{M=7.5}, \sigma'_v = 1atm)}{0.13} \right]} \right] \quad (1)$$

여기서, Φ 는 누적표준정규분포확률함수(standard cumulative normal distribution)로 0~1 사이의 값을 가지며, $(N_1)_{60cs}$ (equivalent clean sand SPT value, 등가 순수모래 N 값)는 식 (2)로 산정할 수 있다.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (2)$$

$(N_1)_{60}$ 는 해머효율 60%, 상재하중을 보정한 보정 표준관입시험 N 값이다. $\Delta(N_1)_{60}$ 은 세립분의 영향을 고려하기 위한 보정값으로 세립분의 함량의 함수이며 식 (3)으로 산정할 수 있다. 이때, FC 는 세립분 함유량이며 단위는 %이다.

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01} \right)^2 \right) \quad (3)$$

식 (1)에서 $CSR_{M=7.5}, \sigma'_v = 1atm$ 은 식 (4)로 산정할 수 있는데, 국내 액상화 평가 기준에서 고려하는 지진규모 6.5를 고려한 수정이 필요하다. 여기

서, r_d 는 전단응력 감소계수(shear stress reduction factor)로서 지진 규모 $M=6.5$ 인 경우 식(5)와같이 산정할 수 있고, $\alpha(z)$ 는 식(6), $\beta(z)$ 는 식(7)로 산정한다. 이때, z 는 심도이며 단위는 m이다.

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (4)$$

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M] = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \times 6.5] \quad (5)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (6)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (7)$$

식(4)에서 MSF는 규모 조정계수(magnitude scaling factor)로서, 식(8)과같이 산정할 수 있다. 여기서 $M=6.5$ 인 경우 MSF는 1.3으로 산정된다. 식(4)에서 상재하중 보정계수(overburden correction factor), K_σ 는 식(9)로 산정하며, C_σ 는 식(10)으로 산정할 수 있다.

$$MSF = 6.9 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (8)$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (9)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (10)$$

2.2 제체 액상화로 인한 댐 정상부 침하량 산정

2.1 절에서 제시한 방법과 절차로부터 구한 $(N_1)_{60cs}$ 를, 2015년 Idriss와 Boulanger [6]가 제시한 Fig. 2 또는 산정식 식(11)에 적용하여 액상화된 모래의 정규화 잔류강도비, S_r/σ'_{v0} 을 구한 후, 댐바닥에서 댐정상부까지 거리의 중앙위치에서의 유효연직응력, σ'_{v0} 를 곱하여, 잔류전단강도, S_r 을 구한다.

$$\frac{S_r}{\sigma'_{v0}} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{16} + \left(\frac{(N_1)_{60cs} - 16}{21.2}\right)^3 \times (1 + \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{2.4} - 6.6\right))\right) \leq \tan \phi' \quad (11)$$

얻어진 잔류전단강도, S_r 로부터 기존 연구 결과로부터 얻어진 잔류전단강도에 따른 댐정상부 침하량 그래프(Fig. 3)[7] 또는 이에 대한 추세식인 식(12)를 이용하여, 액상화된 저수지의 댐정상부의 침하량을 산정할 수 있다. 2007년 FMSM 엔지니어는 범용 유한차분 해석프로그램인 FLAC2D [8]를 이용하여, 높이 15 m 이하의 중소규모 댐을 대상으로 지진가속도가 작은 경우의 액상화 후 댐정상부의 침하량은 체체의 전단강도를 잔류전단강도로 적용한 정적해석으로부터 침하량을 산정하고, 지진가속도가 큰 경우(최대수평지반가속도, PHA > 1.0 g)에는 동적 전응력해석을 이용하

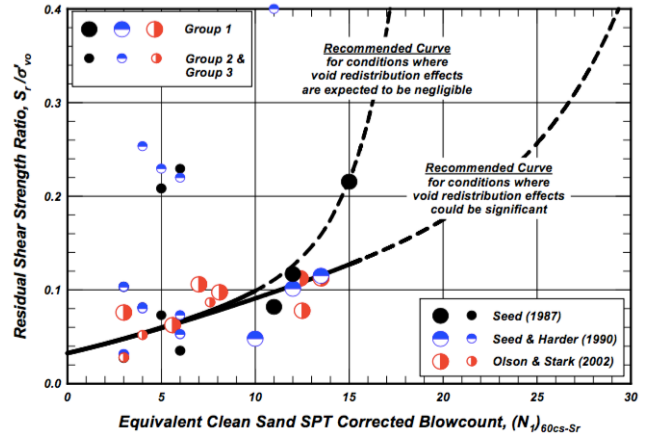


Fig. 2. Normalized residual shear strength ratio of liquefied soils [6]

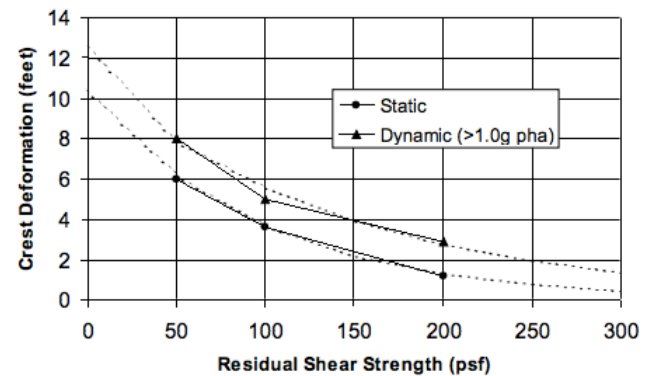


Fig. 3. Dam crest settlement for residual shear strength [7]

여 댐정상부의 침하량을 산정하고, 경험 산정식을 나타내는 경향선을 Fig. 3과 같이 제시하였다[7]. 국내의 경우, 댐 기초에 작용하는 입력가속도의 수준이 1.0 g보다는 클 수 없기 때문에 그림에서 체체의 전단강도를 잔류전단강도로 적용하여 정적해석으로 액상화후 침하량을 산정한 하부 곡선을 이용하되, SI 단위계를 직접 이용할 수 있는 식(12)와 같은 형태의 추세식을 제시하였는데, 식(12)에 잔류전단강도, S_r (식(12)에서 x에 해당)을 kPa의 단위로 입력하면, 정상부침하량(식(12)에서 y에 해당)은 m(미터) 단위로 산정될 수 있다.

$$y = 3.1947 e^{-0.213x} \quad (12)$$

2.3 댐 정상부 침하량과 월류심도를 고려한 흙댐 액상화 파괴확률 산정 방법

월류심도, d_{OT} 는 댐정상부를 월류하는 월류 물높이를 의미하며, 액상화로 인한 댐 정상부 침하량에서 여유고를 뺀 높이로 산정된다. 산정된 d_{OT} 는 필댐에 대한 기존 연구 결과[9]로부터 제안되고 있는 Table 1을 이용하여 월류로 인한 액상화 파괴확률, P_{fL} 을 산정하되, Table에서 직접 제시되지 않은 높이에 대해서는 선형 보간하여 산정한다. 최종적으로 액상화로 인한 댐의 파괴확률은 2.1 절에서 산정한 액상화 발생확률, P_L 과 본 절에서 산정한 액상화 파괴확률, P_{fL} 의 곱으로 산정한다.

Table 1. System failure probability of fill dams due to overtopping according to overtopping depth [9]

Overtopping depth, d_{OT} (m)	Overtopping system response probability
0	0
0.15	0
0.6	0.25
1.0	1

2.4 흙댐 액상화 파괴확률 산정을 위한 데이터 입력 방안 및 산정 절차

대부분의 중소규모 흙댐은 액상화로 인한 파괴확률을 산정함에 필수적인 지반공학적인 물성 정보가 거의 없으므로, 절대적인 파괴확률의 산정은 거의 불가능하다. 그러나 산정에 필요한 대표물성의 합리적인 가정 값을 이용한 파괴확률의 산정과 산정 결과의 상대적 비교는 가능하다. 본 절에서는 흙댐의 액상화 파괴확률 산정에 필요한 입력 물성과 물성 입력 방안, 액상화 파괴확률 산정 절차를 제시한다.

중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률을 산정하기 위해서는 기본적으로 Table 2에서 제시하는 데이터가 입력값(input data)으로 결정되어야 한다. 본 연구에서는 기본 입력 데이터와 이러한 데이터의 입력 방안을 Table 2와 같이 제시하였다.

중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률을 산정하는 방안은 두 가지 방향으로

구분된다. 즉, 대상 댐이 액상화 평가를 위한 대표 물성인 표준관입시험값, N값을 포함한 지층 정보를 확보하고 있는 경우와 그렇지 못한 경우로 구분된다. 본 연구에서는 N값을 포함한 지층 정보가 없는 경우와 있는 경우에 대하여, 적용한 관련 입력 데이터의 형태와 입력 방안을 Table 3과 Table 4와 같이 각각 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률 산정 절차는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 기본 정보 입력

저수지 제원, 저수위 정보, 제체 물성(단위중량, 액상화 세립분함유율), 지진 특성값(지진규모, 정상부가속도 증폭비, 댐 기초 최대지반가속도) 등을 입력한다. 확률산정 대상 댐의 N값 정보 보유 유무에 따라, Table 3과 Table 4에서 제시한 입력 방법에 따라, 액상화 대상층의 N값과 대상층의 중간 심도를 입력한다.

(2) 발생 지진의 연초과확률(AEP, Annual Exceedance Probability) 산정

대상으로 하는 재현주기(본 연구에서는 재현주기 1,000년을 대상으로 함) 지진에 대한 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration) 값의 발생확률은 n년에 초과확률 P_e (%)일 때 연초과확률, AEP를 다음의 식 (13)으로 산정한다. 소방방재청 고시 국가지진위험지도(2013년 12월 13일 공포)[10]에서는 1,000년 재현주기 지진은 100년에 초과확률 10%로

Table 2. Basic input data and data input method for calculating dam liquefaction failure probability

Input data (unit)	Input scheme	Detailed input method
Dam height (m)	Basic specification	Basic specification information
Dam crest elevation (m)		
Full water leve elevation (m)		
Dam Ave. total unit weight (kN/m^3)	Fixed value	assume 17~18
Dam Ave. saturated unit weight (kN/m^3)	Fixed value	assume 18~19
Earthquake magnitude (M)	Fixed value	6.5 (Domestic Max. earthquake magnitude)
Crest acceleration amplification ratio	Fixed value	2.0 (based on Section 3.3)
Fine content (%)	Fixed value	20 (based on Section 3.2)
Dam base PGA (g)	Reading value	Read from NEHM* with 1,000 year return period
Annual exceedance probability	Calculated value	See equation (13) in Section 2.4

* : Nation Earthquake Hazard Map [10]

Table 3. Liquefiable layer input data and data input method when there is no stratum information including SPT N

Input data (unit)	Input scheme	Detailed input method
SPT N value of liquefiable layer (blows)	Fixed value	9 (based on Section 3.1)
Middle depth of liquefiable layer (m)	Calculated value	Distance from dam crest to 1/2 dam height

Table 4. Liquefiable layer input data and data input method when there is stratum information including SPT N

Input data (unit)	Input scheme	Detailed input method
SPT N value of liquefiable layer (blows)	Referenced value	the lowest N in the layers indicated as SM, SP, and landfill layers (If no corresponding layer, follow Table 3)
Middle depth of liquefiable layer (m)	Referenced value	Depth at the center of the layer with the lowest N when there are SM, SP, and landfill layer (If no corresponding layer, follow Table 3)

정의되므로, 식 (13)에 $n=100$, $P_e=10$ 을 입력하여 AEP를 산정한다.

$$AEP = 1 - \left(1 - \frac{P_e}{100}\right)^{1/n} \quad (13)$$

(3) 액상화 발생확률 산정을 위한 지반 특성값 및 지진중폭특성값 산정

액상화 대상층의 심도와 단위중량을 이용하여, 액상화 대상층 중간 심도에서의 전응력과 유효응력을 산정하고, 국가지진위험지도로부터 읽은 댐 기초의 PGA와 정상부기속도 증폭비로부터 액상화 대상층에서의 최대지반가속도를 산정한다.

(4) 액상화 발생확률, P_L 산정

식 (1)을 이용하여 액상화 발생확률, P_L 을 산정한다. 사용되는 확률 영향인자는 SPT N값, 액상화세립분함유율, 지진규모, 액상화 대상층의 심도, 액상화 대상층 심도에서의 최대지반가속도 등이다.

(5) 액상화로 인한 댐 정상부 침하량과 침하에 따른 월류 파괴확률, P_{fL} 산정

2.2절로부터 액상화로 인한 댐 정상부 침하량을 산정하고, 2.3절로부터 액상화로 인한 월류 파괴확률, P_{fL} 을 산정한다. 사용되는 확률 영향인자는 액상화 후 잔류전단강도비, 잔류침하량, 월류심도에 따른 파괴확률이다.

(6) 댐의 액상화로 인한 연파괴확률, P_f 산정

액상화 발생확률, P_L , 액상화 파괴확률, P_{fL} , 발생지진 연초과확률 (AEP)를 곱하여 댐의 액상화 연파괴확률, P_f 를 산정한다($P_f = AEP \times P_L \times P_{fL}$).

3. 액상화 파괴확률 산정에 필요한 중소규모 흙댐의 대표물성 선정

2장에서 제시하는 방법과 절차에 의해 지반공학적 물성정보가 전무한 중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률을 산정하기 위해서는 다음에 제시되는 대표물성에 대한 적절한 가정, 산정방법, 대푯값이 제시되어야 한다.

3.1 제체 표준관입시험값

재해위험저수지 중 정밀안전진단보고서가 보존되어 있고, 해당 보고서에 표준관입시험 결과가 수록된 높이 10 m 이상 15 m 이하의 29개 저수지에 대한, 댐 정상부에서 하부 심도 10 m까지의 N값의 평균값들을 계산하여 나타낸 것은 Fig. 4와 같다[11]. 해당 자료들은 정규분포 상 좌우로 치우쳐진 정도를 나타내는 비대칭도는 1.88로 산정되어 절댓값이 3.00을 초과하지 않으므로 정규분포를 따르는 것으로 판단할 수 있고[12], 평균값은 9.03, 중앙값은 8.63, 최빈값(빈도가 가장 큰 값)은 9.00으로 산정되어(Fig. 5 참조), 분포특성 대푯값을 ‘9’로 선정하였다. 즉, 대표 N값을 9로 산정하였는데, 산정된 값은 상부 성토층과 일부 중심 코어층의 특성이 반영된 값으로,



Fig. 4. Average SPT N values from crest to a depth of 10m (results of 56 boreholes in 29 reservoirs)

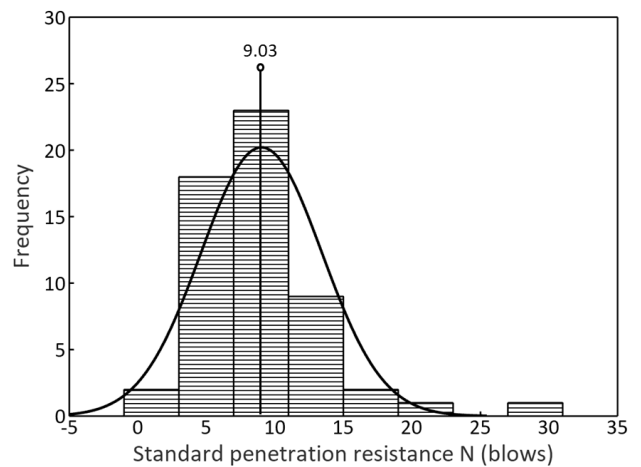


Fig. 5. Histogram and normal distribution curve of SPT N values

개략적 조사값을 적용한 것에 대한 한계성은 내포하나, 실제 조사된 값이며, 준공연도가 오래된 저수지의 경우, 성토재료와 코어재료의 구분이 명확하지 않은 점을 감안하면, 제체 표준관입시험값 대푯값으로의 적용은 어느 정도 타당성이 있다고 판단된다.

3.2 제체 액상화평가를 위한 액상화 세립분함유율

국내 저수지의 물성범위 분석을 위하여 저수지 중 정밀안전진단보고서 내에 지반물성이 포함된 저수지를 대상으로 15 m 이하 저수지 10개소에 대해 세립분함유율이 분석된 것[11]은 Fig. 6과 같다. 분석된 대상 저수지의 제체 구성 흙은 통일분류법상 총 네 가지(SM, SC, ML, CL)이었고, 대상 흙의 세립분함유율은 19~79% 범위이며, 평균은 약 43%로 분석되었다. 이 중 다수 포함된 액상화 가능성이 낮은 SC를 제외한 조사 결과의 세립분함유율 하한값은 약 ‘20’으로 나타나, 본 연구에서는 세립분함유율의 대푯값을 ‘액상화평가세립분함유율’로 칭하고, 20%로 설정하였다. Fig. 6에서 상대깊이(relative depth)는 대상 깊이에 대한 세립분 흙의 분포 위치(심도)를 정규화하여 나타내기 위하여 댐 높이로 대상 토층이 위치한 심도를 나눈 것이다.

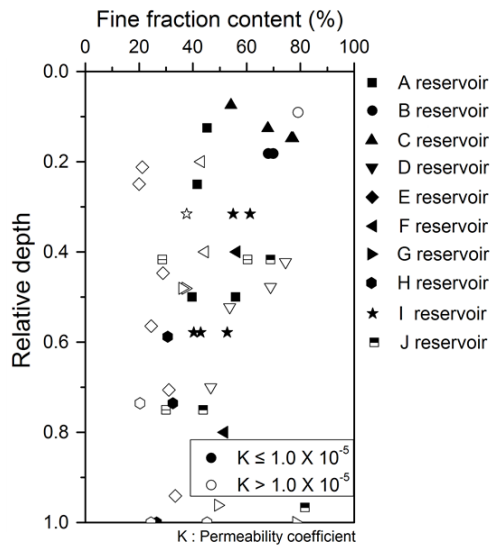


Fig. 6. Fine content of reservoir materials in 10 reservoirs subjected to investigation [11]

3.3 댐 제체를 통한 가속도의 증폭 특성

액상화 발생확률을 산정함에 있어, 액상화 가능층에서 발생하는 최대 가속도를 산정하기 위해서는, 댐 기초에서의 가속도가 정상부에서 어느 정도 증폭되는지에 대한 정보가 필요하다. 이러한 가속도의 증폭비는 댐 제체의 기하학적 형상이나 입력 지진동의 크기 등에 좌우되고 특별한 산정식은 없다. Fig. 7은 높이가 10 m~60 m 범위인 미국, 멕시코, 일본의 필댐 기초와 정상부에서 관측된 주요 지진기록을 분석하여 정리한 것이며, 분석 내용으로 상대적으로 높은 댐은 낮은 댐에 비해 동일한 댐 기초 가속도에 대해 증폭비가 상대적으로 크며, 동일한 댐 높이에 대해 댐 기초 가속도는 커질수록 증폭비는 다소 감소함을 기술하고 있다[13]. 이에 본 연구에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 댐 기초에서의 정상부로의 가속도 증폭은 2배, 즉 가속도 증폭비 대푯값을 '2'로 설정하였다. 그림에서 국내 지진구역과 1,000년 재현주기 지진동에 대한 저수지의 액상화 여부를 평가함에 있어서, 개략적

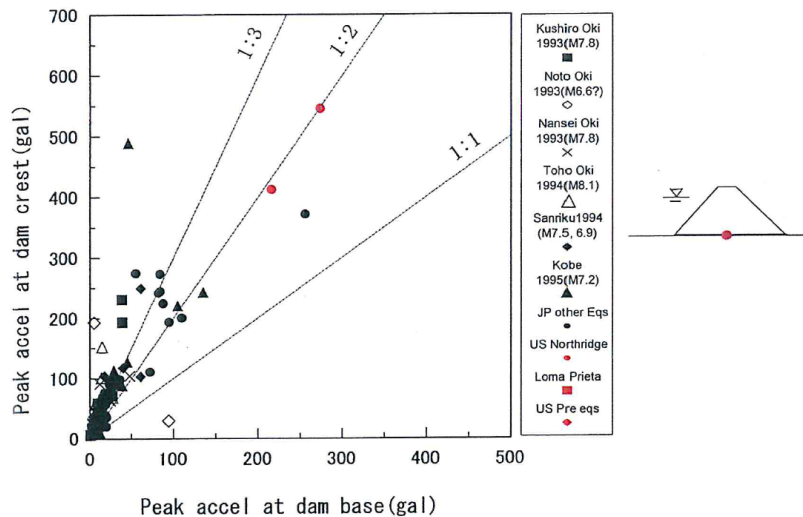


Fig. 7. Acceleration amplification observation records through dam body of earthfill dams (upstream-downstream direction) [13]

기준이 될 수 있는 가속도는 0.1 g(그림에서 약 100 gal(cm/sec^2))~0.25 g(그림에서 약 250 gal) 범위이며, 이 때의 증폭비는 2~3의 범위이나, 연구 범위에 있는 중소규모 흙댐의 경우, 댐 높이가 15 m 이하로 다소 낮은 점을 감안하여 증폭비는 '2'로 설정하였다.

4. 중소규모 흙댐의 상대적 액상화 파괴위험도 시범 평가 및 분석

전술한 본 연구에서 제안하는 액상화 파괴확률 산정 방법과 절차를 N값 정보가 없는 높이가 15 m 이하인 12개 중소규모 흙댐에 시범 적용해 보았다. 12개 흙댐에 대한 정보는 기존의 연구보고서[11]에 제시된 내용을 활용하였다. 대상 댐에 대한 제원과 기본 입력 데이터는 Table 5와 같고, 액상화 파괴확률과 상대적 액상화 파괴위험도 순위 평가 결과는 Table 6과 같다. Table 6에서 연간 액상화 파괴확률이 '0'으로 동일한 경우는 액상화 발생확률을 근거로 파괴위험도 순위를 정하였다.

Fig. 8은 시범 평가 대상 댐의 댐 기초 PGA에 따른 액상화 발생확률과 액상화 파괴확률을 나타낸 것이다. 그림에서 액상화 발생확률과 액상화 파괴확률은 전반적으로 댐 기초 최대지반가속도, PGA가 커질수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 기존의 연구 결과[5]에서 액상화 발생확률의 크기와 액상화 파괴확률의 크기의 증감 경향이 대체로 유사하다는 점을 고려할 때, 본 연구에서 제시하는 평가 방법과 절차는 PGA와 상관성이 있다고 볼 수 있으며, 액상화 발생확률과 파괴확률이 PGA와 상관성이 있다는 점에서 본 연구에서 제시한 평가 방법과 절차는 전반적으로 실효성이 있다고 판단해 볼 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 8과 마찬가지로 시범 평가 대상 댐의 댐 기초 PGA에 따른 액상화 발생확률과 액상화 파괴확률을 나타낸 것이나, 액상화 세립분함유율을 각각 25%와 30%로 다르게 적용하여 추가로 평가한 결과이다. 각각의 결과 모두는 액상화 발생확률 측면에서는 Fig. 8의 결과와 유사한 경향을 보이나, 액상화 파괴확률 측면에서는 Fig. 8의 본 연구에서 적용한 액상화세립분함유율 대푯값 20%인 경우의 결과와는 다르게 뚜렷한

Table 5. Specification and input properties of 12 dams for pilot application

No	Dam	Available SPT, N	Specification			Dam base PGA(g)	Applied SPT, N	Fine content (%)	Liquefiable layer depth from crest (m)
			Height (m)	Crest EL(m)	Water level EL(m)				
1	TS	X	12.0	101.8	100.0	0.135	9	20	6.00
2	SR	X	10.0	82.4	80.8	0.135	9	20	5.00
3	WG	X	8.0	91.1	89.8	0.130	9	20	4.00
4	HC	X	8.5	199.4	197.4	0.120	9	20	4.25
5	BD	X	8.8	102.9	101.7	0.110	9	20	4.40
6	OD	X	10.0	64.0	63.0	0.110	9	20	5.00
7	DG	X	6.7	22.1	20.9	0.105	9	20	3.35
8	DDWMM	X	5.3	270.1	268.0	0.130	9	20	2.65
9	DJG	X	6.1	218.6	217.5	0.130	9	20	3.05
10	DN	X	7.6	179.2	178.1	0.135	9	20	3.80
11	SH	X	7.0	49.3	46.7	0.135	9	20	3.50
12	GD	X	9.8	98.3	97.0	0.125	9	20	4.90

Table 6. Results of relative liquefaction failure probability and failure ranking of 12 pilot-applied dams

No	Dam	AEP ¹⁾	Liquefaction probability	Liquefaction failure probability	Annual liquefaction failure probability ²⁾	Ranking of relative failure risk
1	TS	1.05E-03	6.16E-01	0	0	9
2	SR	1.05E-03	6.03E-01	1.11E-02	7.05E-06	2
3	WG	1.05E-03	4.10E-01	3.16E-02	1.36E-05	1
4	HC	1.05E-03	6.84E-02	3.31E-03	2.39E-07	7
5	BD	1.05E-03	7.42E-02	0	0	12
6	OD	1.05E-03	2.33E-01	0	0	10
7	DG	1.05E-03	6.29E-03	1.86E-03	1.23E-08	8
8	DDWMM	1.05E-03	4.57E-03	8.27E-02	3.98E-07	6
9	DJG	1.05E-03	1.26E-01	0	0	11
10	DN	1.05E-03	5.17E-01	1.87E-02	1.02E-06	5
11	SH	1.05E-03	4.25E-02	5.26E-02	2.36E-06	3
12	GD	1.05E-03	4.49E-01	4.08E-03	1.93E-06	4

¹⁾ : see section 2.4 (2)

²⁾ : see section 2.4 (6)

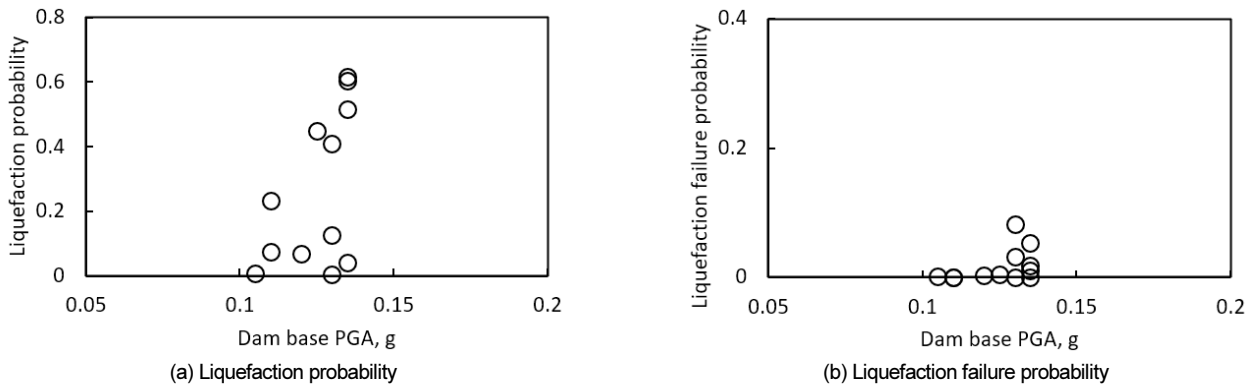


Fig. 8. Liquefaction and liquefaction failure probability according to PGA for pilot evaluation dams (fine content 20%)

상대적 차이나 경향을 보여주지 못하는 것으로 나타났다. 즉, 액상화세립분 함유율을 25%를 초과하여 적용하는 경우에는 액상화 발생확률은 어느 정도 타당성을 보이나, 액상화 파괴확률은 전혀 의미없이 낮은 값을 보이거나

확률이 '0'으로 나타나 상대적 비교가 불가능한 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 토대로, 본 연구의 상대적 액상화 파괴확률을 산정하는 방법에서 제시한 액상화세립분함유율 대푯값 20%는 액상화 발생확률의 전반적 분포

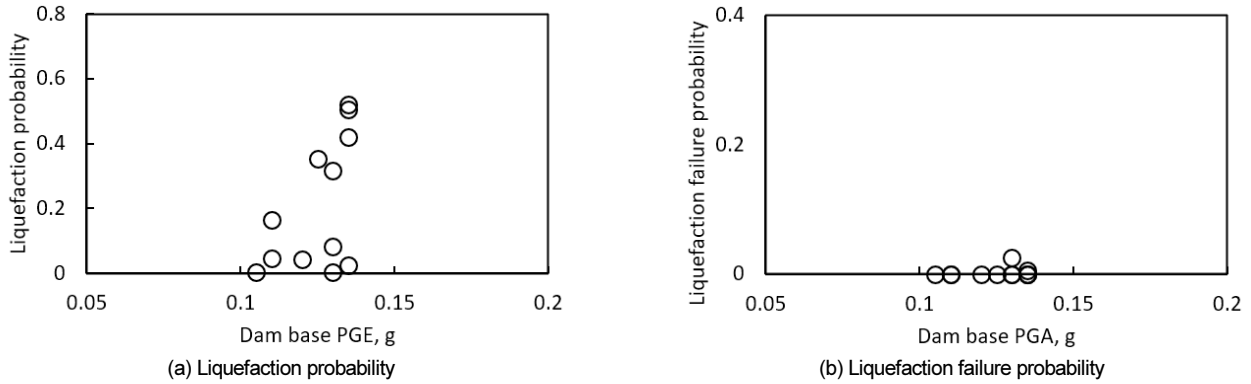


Fig. 9. Liquefaction and liquefaction failure probability according to PGA for pilot evaluation dams (fine content 25%)

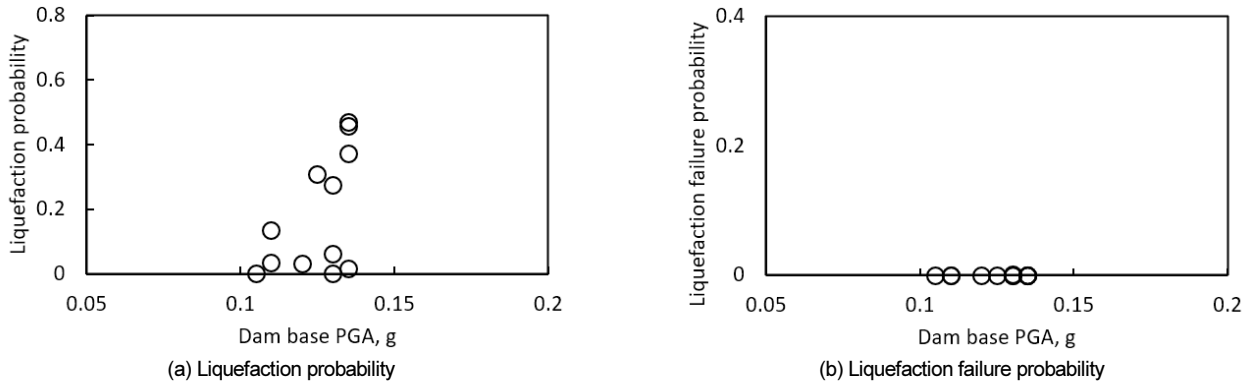


Fig. 10. Liquefaction and liquefaction failure probability according to PGA for pilot evaluation dams (fine content 30%)

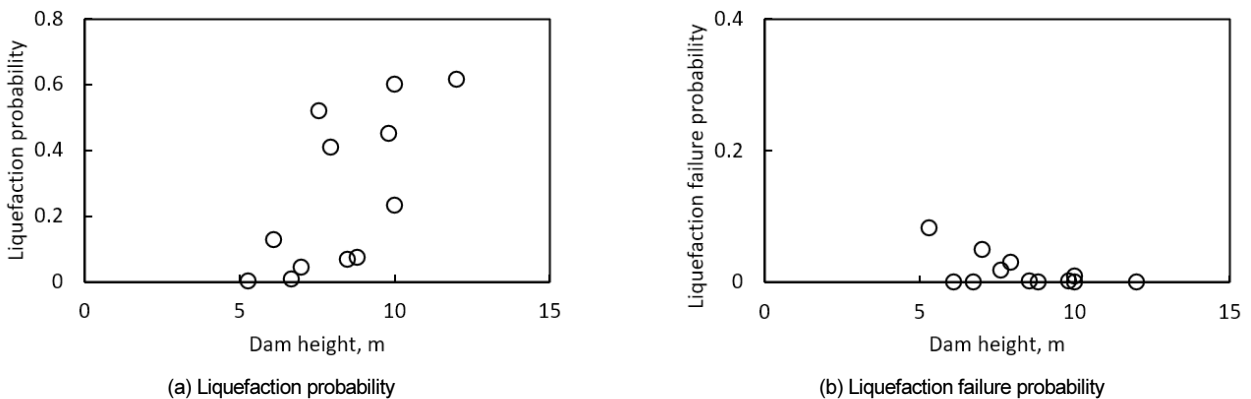


Fig. 11. Liquefaction and liquefaction failure probability according to dam height for pilot evaluation dams (fine content 20%)

가 적절하고, 액상화 파괴확률도 상대적 구분이 가능할 만큼 적절하게 산정된 대푯값임을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 시범 평가 대상 댐의 댐 높이에 따른 액상화 발생확률과 액상화 파괴확률을 나타낸 것이다. 상대적으로 높이가 낮은 댐의 경우, 댐체를 통한 가속도의 증폭이 작을 수 있으나, 본 연구에서 설정한 가속도증폭비 대푯값인 ‘2’를 적용하고, 액상화 대상층의 심도를 댐 높이의 1/2로 설정함으로써, 높이가 높은 댐과 마찬가지로 댐 기초에서의 PGA의 2배인 정상부에서의 가속도에 대해 중간 위치에서의 증폭된 가속도를 선형 보간으로 적용하게 되어, 액상화 반복전단응력의 수준은 댐 높이에 따라 큰 차이가 없게 된다. 반면에 높이가 낮은 댐은 댐 높이의 1/2로 설정한 액상화 대상 심도가 상대적으로 높은 댐에 비해 얇아 상재하중이 작으므로 상재하중 보정계수

[14]는 다소 커서 상재하중이 보정된 $(N_1)_{60}$ 이 커지고, 이로 인해 저항전단 응력이 더 크게 되어 액상화 발생확률은 그 경향이 뚜렷하지는 않으나, Fig. 11(a)와 같이 더 낮은 것으로 나타날 수 있다. 다만, Fig. 11(b)에서 볼 수 있듯이, 액상화 파괴확률의 증감 경향은 액상화 발생확률의 증감 경향과 달라, 댐 높이의 액상화 발생확률 및 파괴확률과의 상관성은 낮다고 판단된다. 이는, Fig. 8~Fig. 10에서 알 수 있듯이, 액상화 발생확률과 파괴확률은 PGA와 상관성이 큰데, Fig. 11(b)에서 높이가 상대적으로 낮은 댐일수록 액상화 파괴확률이 높게 나타난 이유는 댐 높이의 영향이 아니라, Table 5에서 확인할 수 있듯이, 대상댐 기초에서의 PGA의 범위(0.105 g~0.135 g) 중 0.12 g보다 큰 PGA를 갖는 9개 댐 중 6개가 낮은 댐이고, 결국 가속도의 영향으로 낮은 댐에서 액상화 파괴확률이 크게 나타난 것이기 때문이다. 그러

므로 N값 정보가 없는 댐에 대하여 N = 9를 대푯값으로 설정하고, 댐높이의 1/2 심도를 액상화 대상층으로 간주하는 본 연구에서 제시한 방안은 댐의 기하학적인 영향에 크게 영향을 받지 않고 적용이 가능한 값으로 평가될 수 있다.

이상의 분석 결과에도 불구하고, 본 연구에서 제시하는 평가 방안은 다음과 같은 제한사항과 개선사항을 갖는다.

우선적으로 본 방안의 적용은 높이 15 m 이하의 중소규모 흙댐에 적용하는 것이 타당하다. 잔류강도에 따른 댐 정상부침하량을 산정하는 Fig. 3 과 식 (12)는 높이 15 m 이하의 중소규모 댐에 대한 연구 결과이며, 무엇보다 해당 범위의 댐에 대해서 댐 높이를 고려한 침하율이 아니라, 침하량의 절대값을 제시하고 있기 때문이다. 따라서, 지반공학적 정보를 충분히 가지고 있는 중소규모 흙댐들에 대한 결과를 도출하여 댐 높이를 고려한 방법과 절차로 개선하는 것이 필요하다. 아울러 가장 유념해 두어야 할 것은 본 연구에서 제시하고 시범 댐에 적용하여 결과를 도출한 평가 방안은 여러 가정과 설정 대푯값을 이용한 평가이므로, 대상 댐 간 상대적 비교 평가에만 적용하는 것이 타당하며, 절대적인 평가는 극히 제한적이어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 연구 결과를 활용하여 지반공학적 물성 정보가 전무한 높이 15 m 이하의 중소규모 흙댐의 액상화로 인한 댐 파괴확률을 산정하는 방법과 절차를 제시하고자 하였고, 제시한 방법과 절차를 12개의 중소규모 흙댐에 시범 적용하고 그 결과를 분석함으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존의 연구 결과를 분석 활용하여, 지반공학적 물성 정보가 전무한 중소규모 흙댐의 상대적 액상화 파괴위험도를 댐의 기본적인 제원정보(높이, 여유고)와 평가 지진정보(지진가속도, 평가지진의 재현주기)만으로 비교가 가능한 절차와 방법을 구체적으로 제시하였다.
- (2) 중소규모 흙댐의 액상화 파괴확률 산정에 필요한 대표물성으로 제체 표준관입시험값, 액상화 평가 대상층의 세립분함유율, 댐체를 통한 가속도증폭비를 선정하고, 각각의 대푯값을 선정하는 방법과 선정된 대푯값을 제시하였다.
- (3) 본 연구에서 제안하는 액상화 파괴확률을 산정하는 절차와 방법을 12개 흙댐에 시범 적용하고 결과를 분석하였으며, 그 결과 대표물성의 선정 대푯값들은 타당하며, 전반 평가 절차와 방법은 실효성이 있는 것으로 확인되었다.
- (4) 본 연구에서 제시하는 평가 방안은 높이 15 m 이하의 중소규모 흙댐을 대상으로 하는 것이 타당하다. 아울러, 본 방안은 지반공학적 정보가 전무한 흙댐에 대한 평가를 위해, 여러 가정과 설정값을 포함하므로 대상 댐 간 액상화 파괴위험도의 상대적 비교 평가에 적용을 국한하는 것이 타당하며, 절대적 평가에의 적용은 극히 제한적이어야 한다.

/ REFERENCES /

1. Ha IS, Lee SG, Kim NR, Lim JY. 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;18(3):31-38.
2. 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;36(3):451-461.
3. Ha IS. A case study on the seismic hazard classification of domestic drinking water earthfill dams using zero seismic failure probability curve. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2022;26(4):173-180.
4. US Bureau of Reclamation (USBR), 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.
5. Idriss IM, Boulanger RW. SPT-based liquefaction triggering procedures. 2010; No. UCD/CGM-10/02, University of California, Davis, Calif.
6. Idriss IM, Boulanger RW. 2nd Ishihara Lecture: SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015;68:57-68.
7. FMSM Engineers. A simplified tool for assessing the deformation of embankment dams and levees on liquefied soils. Final Report, prepared by FMSM Engineers for the U. S. Army Corps of Engineers, Louisville, Kentucky. c2007.
8. Itasca Consulting Group. FLAC2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions) ver. 8.0, Minnesota, USA. c2018.
9. Bowles DB, Anderson LR. Dam risk assessment engineering considerations. Seminar on Dam Risk Assessment Case Studies, 2012 Sept. 27, RAC Engineerings & Economists.
10. NEMA. Nation Earthquake Hazard Map. NEMA announcement 2013; 2013-179. Korea National Emergency Management. c2013.
11. MOIS. Evaluation technology of reservoirs maintenance priority based on risk analysis. Research Report. Ministry of the Interior and Safety. c2018.
12. Kline TJ. Psychological testing: a practical approach to design and evaluation. Sage Publications. c2015.
13. MAFRA. Revision of seismic design criteria for agricultural production infrastructure. Research Report 11-1543000-001992-01, Ministry of Agriculture, Food and Affairs. c2007.
14. Liao SSC, Whitman RV. Overburden correction factors for SPT in sand. *J Geotech, Engrg*. 1986;112(3):373-377.