J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 20, No. 6 (Dec. 2020), pp.167~175
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.6.167

ISSN 1738-2424(Print)
ISSN 2287-6723(Online)
www.kosham.or.kr

시설물방재

저수지 제체 및 지반 물성치의 공간적 불균질성을 고려한 사면 안정성 평가

Evaluation of Slope Stability of Reservoir Considering Heterogeneous Soil Properties

신승원* · 이상빈 · 이승수*** · 정종원*****

Shin, Seungwon*, Lee, Sangbeen, Lee, Sungsu***, and Jung, Jongwon*****

Abstract

The slope stability evaluation of reservoirs is required because of the aging of reservoirs. Reservoir levees are designed to achieve homogeneous construction, but the spatial heterogeneity of the material properties of reservoirs is unavoidable. Because the existing method for evaluating reservoir stability is limited in terms of considering the spatial heterogeneity of material properties, the stability evaluation was conducted in this study, in which the spatial heterogeneity and uncertainty of the material properties of the reservoir levee were considered. In addition, the results for the existing and proposed methods were compared and analyzed, and the variability of the entire material properties of the reservoir levee, instead of spatial heterogeneity, was reflected. The evaluation results confirmed that the probability of failure obtained using the proposed method was lower than that for the existing stability evaluation method, considering the variations in material properties because the levee did not reach the critical state, owing to changes in local properties. Therefore, the proposed method is useful for the cost-effect repair and reinforcement of reservoir slopes, compared to the existing slope stability evaluation method.

Key words : Slope Stability Analysis, Spatial Variability, Coefficient of Variation, Factor of Safety, Probability of Failure

요 지

국내 저수지의 노후화로 인해 안정성 검토가 요구되는 실정이다. 저수지 제체는 균질한 시공을 목표하고 있지만, 제체 및 저수지 하부 지반 물성치의 공간적 불균질성 및 불확실성을 피할 수 없는 상황이다. 기존의 저수지 안정성 평가는 이러한 물성치의 공간적 불균질성을 고려하는데 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 저수지 제체 및 지반 물성치의 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 안정성 평가를 수행하였다. 또한, 공간적 불균질성이 아닌 물성치의 변동성을 고려한 기존의 연구 결과와 비교 및 분석을 수행하였다. 그 결과, 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 경우 국부적인 물성의 변동으로 인해 제체가 한계상태에 도달하지 않기 때문에 물성치의 변동성만을 고려한 기존의 안정성 평가법에 비해 사면의 붕괴확률이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 결과를 활용하여 기존의 안정성 평가에 비해 경제적인 저수지 사면의 보수 및 보강이 가능하다.

핵심용어 : 사면안정해석, 공간적 변동성, 변동계수, 안전율, 붕괴확률

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: tmddnjs1884@naver.com)
Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
**충북대학교 토목공학과 학사과정(E-mail: tkdqls63021884@naver.com)
Undergraduate's Course, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
***정회원, 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail: sungsulee@chungbuk.ac.kr)
Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
*****교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

국내에 축조된 약 17,000여 개의 저수지 중, 설치 후 50년 이상 경과된 시설이 약 76%를 차지하며(KRC, 2018), 노후화가 진행되어 본래의 기능을 적절히 수행하지 못 하는 저수지가 전국에 산재해 있다. 축조 후 지속적인 관리에도 불구하고 호우, 풍화, 침식 및 지진 등의 자연적 요인에 노후화가 진행된다. 이로 인해 시설물의 기능 저하, 홍수 조절능력 저하, 제방의 누수, 침식 및 균열 등의 문제가 발생하여 안정성이 감소하게 된다. 또한, 국내 계절별 특징인 홍수와 가뭄의 양극화 현상으로 인해 재해위험도가 가중되고 있다. 저수지 붕괴 시 저수된 물과 제방 및 축조 재료가 방류되어 인접 지역의 인명과 주민시설, 도로 및 재산 등에 피해를 초래한다. 따라서 저수지에 대한 구조적 안정성을 평가하여 이를 바탕으로 적절한 보수 및 보강 대책이 필요한 실정이다.

지반은 생성단계에서부터 고유한 성질인 공간적 불균질성 및 변동성을 가지며 측정오차, 실험오차, 해석모델의 오차 등으로 인해 불확실성이 가중된다(Christian, 2004). 특히, 지반의 공간적 불균질성 및 변동성은 퇴적조건, 지질학적 불균질성, 응력이력 등의 원인으로 인해 발생하며, 지반의 불확실성 을 유발하는 원인이 된다(Elkateb et al., 2002). 따라서, 확률론적 해석을 수행함에 있어 지반 물성의 불확실성 및 불균질성을 정량적으로 반영해야 한다.

기존 저수지에 대한 안정성 평가는 Geo-Slope사의 Seep/w 및 Slope/w 프로그램을 활용한다(GEO-SLOPE International Ltd., 2015). Seep/w을 활용하여 침투해석을 수행한 뒤, Slope/w를 활용한 사면안정해석을 통해 사면 활동파괴에 대한 안전율을 산정한다. 이와 같은 방법은 한계평형이론에 근거한 것으로, 산정된 안전율이 사면 활동에 대한 최소안전율 기준을 만족하면 현재 상태는 공학적으로 안정한 것으로 판단한다. Slope/w를 활용한 붕괴확률 산정 기법은 저수지 제체의 물성치 전체를 동일한 값으로 가정하고 변동성을 고려하여 안정성을 평가하는 기법이기 때문에, 지반 물성치의 공간적 불균질성을 고려하기에 한계를 나타낸다.

따라서, 본 연구에서는 실제 저수지에 대한 형상 및 물성을 산정하고, Rocscience사의 Slide2 프로그램을 활용하여 지반의 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 저수지 사면에 대한 안정성 평가를 수행하였다. 또한, 기존 지반 물성의 변동성만을 고려한 저수지 안정성 평가 결과(Lee and Jung, 2019)와 비교 및 분석을 수행하여 저수지 사면에 대한 합리적인 위험도 평가를 수행하였다.

2. 연구 동향

같은 지층임에도 불구하고 지반의 물성은 불균질성으로 인해 위치에 따라 불확실성을 갖는다(Cho, 2011). 또한, 물성치 측정을 위한 시료의 채취 과정에서의 오차, 실내시험 및 현장시험 과정에서의 오차, 기상 상황에 따른 오차, 시료의 교란 등으로 인한 불확실성이 존재하기 때문에 위험도 평가의 한계가 존재한다(Lee and Jung, 2019).

확률론적 해석은 이러한 불확실성을 고려하기 위해, 붕괴확률을 통해 위험도를 평가하는 기법이다(Jeong et al., 2011). 따라서, 신뢰성 있는 안정성 평가를 위해서는 주변 환경이나 다양한 현장 특성에 따라 분포하는 불균질성 및 불연속성의 특성을 파악하고 정량화하는 확률론적 해석기법이 요구된다(Feng and Lajtai, 1998; Park and West, 2001).

Lumb (1966, 1968, 1975)는 비배수전단강도, 간극비와 같은 지반물성치에 대한 공간 상관구조의 기본적인 모형을 제안하였다. Agterberg (1970)는 자기상관함수를 도입하여 공간적 불균질성을 표현하였다. Díaz Padilla and Vanmarcke (1974)는 지반 물성의 불균질성을 표현하기 위해 상관 거리를 사용하였으며, Baecher (1982)는 지반 물성의 공간적 불균질성을 무작위 성분과 추세 성분의 조합으로 나타내는 기법을 제안하였다. 특히, Vanmarcke (1983)는 공간적 불균질성을 고려한 확률론적 해석의 기초를 마련하였으며, 지반 물성을 확률값으로 표현하는데 평균, 분산, 변동자와 같은 매개변수가 필요하다고 설명하였다. Major et al. (1978)은 확률론적 해석기법을 통한 암반 사면에 대한 안정성 해석을 수행하였다. Sung (2007)은 암반 사면의 구간별 확률론적 해석을 통해 불연속면의 연속성을 고려한 사면안정해석을 수행하였다. Cho and Park (2008, 2009), Cho (2012)는 투수계수 및 일반 사면에 대해 공간적 불균질성을 고려한 침투해석 및 사면안정해석을 수행하였다. Jeon et al. (2013)은 화강풍화토의 불포화 지반정수에 대한 확률특성을 파악하고 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용해 사면안정해석을 수행하였다. Choi (2016)는 지반 물성에 대한 확률론적 접근을 통해 지반 물성이 갖는 불균질성이 붕괴확률에 미치는 영향에 대해 검토하고, 사면안정해석 및 확률론적 해석을 통한 신뢰성 해석을 종합적으로 수행하였다. Cho (2018)는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용해 강우 영향으로 인한 사면 붕괴에 대해 확률론적 사면안정해석을 수행하였다. Lee and Jung (2019)은 노후저수지에 대해 물성치의 변동성을 고려하여 수위 변화에 따른 사면안정해석 및 확률론적 해석을 수행하였다. 하지만, Lee and Jung (2019)은 공간적 불균질성이 아닌 저수지 전체 물성치가 균질하게 바뀌는 변동성만을로 바뀌는 변동성만을 고려하였다.

이처럼, 일반 사면 및 암반 사면 등을 대상으로 일반적인 사면안정해석 및 확률론적 해석이 수행되어 왔으나, 저수지 물성치의 불균질성 및 불확실성을 고려한 안정성 평가에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 저수지 사면에 대한 안정성 평가를 수행하였으며, 합리적이고 신뢰성 있는 위험도를 평가하기 위해 Lee and Jung (2019)의 확률론적 해석 결과와 비교 및 분석을 수행하였다.

3. 수치해석을 활용한 저수지 안정성 평가

3.1 수치해석 대상 저수지 제원 및 물성치

본 연구에서는 수치해석 결과의 정확한 비교를 위해 Lee and Jung (2019)과 동일하게 경북 경주시에 위치한 ∞저수지를 대상으로 물성치의 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 확률론적 해석을 수행하였다. 해당 저수지의 정밀안전진단보고서를 통해 산정된 해석 대상 저수지의 기본 제원, 단면 형상, 댐마루(Crest of dam), 만수위(High Water Level, H.W.L), 홍수위(Flood Water Level, F.W.L), 하부 지반(Bottom layer) 및 상부 지반(Upper layer)은 Fig. 1에 나타난다. 또한, 필댐 설계기준을 통해 저수지 물성치를 산정하고, 국토지반정보 포털시스템에서 얻은 인근 시추공 자료를 활용하여 해석 대상 저수지의 지반 물성을 산정하였다. 해석 대상 저수지의 수치해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다.

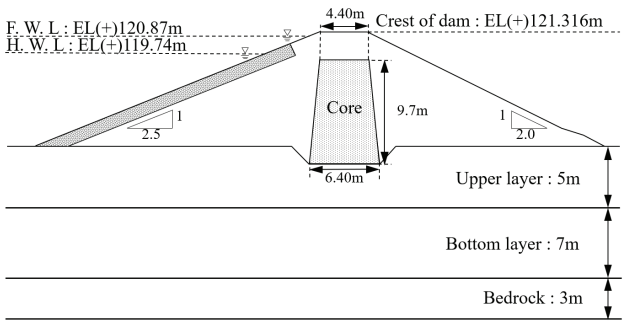


Fig. 1. Shape and Specification of a Reservoir

Table 1. Material Properties of a Reservoir

Classification	Unit weight (kN/m³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Coefficient of Permeability (cm/s)
Levee	19	5	25	1e-3
Upper layer	19	0	35	1e-3
Bottom layer	19	30	30	4e-4
Riprap	20	0	40	1.8
Core	18	50	15	1e-7

3.2 공간적 불균질성을 고려한 사면안정해석

Rocscience사의 Slide2 프로그램은 사면의 원형 또는 비원형 파괴 대한 안전율과 붕괴확률을 평가하기 위한 2D 사면안정해석 프로그램으로 물성의 공간적 불균질성, 변수에 대한 자기상관거리, 필드 생성을 위한 세 가지 공분산 함수 옵션 등의 기능이 추가되어 저수지의 물성의 공간적 불균질성을 고려한 안정성 평가가 가능하다.

사면안정해석은 일반적으로 가장 폭넓게 사용되는 Bishop의 간편법을 활용하여 안전율을 산정하였으며, Bishop의 간편법은 Eq. (1)과 같다.

$$M(\alpha)=\cos(\alpha)\left(1+\tan(\alpha)\frac{\tan(\phi)}{F_s}\right) \tag{1}$$

$$F_s=\frac{\sum(cb+(W+ub)\tan(\phi))/M(\alpha)}{\sum W\sin(\alpha)}$$

여기서, b는 절편의 폭(m), u는 수압(kN/m^2), c는 점착력(kPa), W는 각 절편의 중량(kN/m^3), ϕ는 내부마찰각(°), α는 경사각(°)을 나타낸다.

3.3 공간적 불균질성

자연재료인 지반은 깊이와 위치에 따라 특성 및 물성에 불균질성을 갖는다. 이러한 특성은 지반의 조성 성분, 응력이력, 퇴적상황 등을 원인으로 발생하며, 지반의 불확실성을 유발하는 본질적인 원인이 된다(Lacasse and Nadim, 1996). 지반의 공간적 불균질성은 무작위적인 특성을 갖지는 않으며 공간에서의 깊이 및 위치에 영향을 받는다. 따라서, 지반의 특성을 공간적인 범위로 표현하는 상관성을 나타내기 위하여 자기상관거리(Autocorrelation distance)와 변동자(Scale of fluctuation; Vanmarcke, 1983) 두 가지 지표를 사용하였다. 자기상관거리는 자기상관함수(Autocorrelation function) 값이 1/e로 감소하는 거리로 정의되며(DeGroot and Baecher, 1993), 변동자 δ는 지반이 갖는 유사성 및 상관관계를 거리로 나타낸다. 둘의 관계는 Eq. (2)와 같다.

$$\delta=\int_{-\infty}^{\infty}\rho(\eta)d\eta \tag{2}$$

여기서, $\rho(\eta)$는 자기상관함수, η는 공간상 두 점간의 거리를 나타낸다.

자기상관거리가 감소할수록 지반의 변동폭이 공간적 범위 내에서 크게 나타나는 것을 의미한다. 반대로, 자기상관거리의 증가는 지반 물성이 넓은 공간적 범위에 걸쳐 유사성을 나타내는 것을 의미한다. 자연 지반의 지질학적 형성과정으로 인해 연직 방향의 자기상관거리가 수평 방향의 자기상관거리에 비해 작은 경우, 이 값의 비가 약 10 이상이된다(Baecher and Christian, 2003). 그렇지 않은 경우에는 등방상관구조(Isotropic correlation)가 사용된다. El-Ramly et al. (2003)의 문헌연구 결과에 따르면 연직 방향의 자기상관거리는 1~3 m의 범위를 나타내고, 수평 방향의 자기상관거리는 10~40 m의 범위를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 해석 대상 저수지의 높이 및 사면의 길이를 고려하여 연직 방향 자기상관거리에 2 m를, 수평 방향 자기상관거리에 10 m를 적용하였다.

3.4 변동계수

지반 물성의 불확실성은 3가지 주요 원인으로 인해 발생한

다. 첫째, 측정오차, 둘째, 지반의 고유변동성 셋째, 설계모델의 불확실성이다. 고유변동성은 지반의 지질학적, 화학적 생성과정에서 발생하며, 측정오차는 실내 및 현장시험 시료의 교란, 시험장비, 시험절차 및 시험종류 등에 영향을 받는다. 시험횟수를 증가시켜 이러한 불확실성을 최소화할 수 있지만, 경제적 또는 환경적 제한사항이 있을 경우 측정오차 범주 안에 포함할 수 있다(Kulhawy, 1992). 또한, 설계모델의 불확실성은 실제 현장조건과 사면안정해석 프로그램을 활용한 현장조건 모델링의 차이에 의해 발생한 한계성 오차라고 정의한다. 측정된 지반 물성의 불확실성을 평가하기 위해서는 앞서 설명한 세 가지 불확실성 원인들의 독립적인 분석이 필요하며, 이를 통해 해당 지반의 고유변동성을 알 수 있다.

지반 물성의 변동계수(Coefficient of variation, COV)는 경향성 또는 평균의 불확실한 변동성을 나타내며, 평균값으로 설계지반변수의 표준편차를 정규화시킨 값을 백분율로 나타낸 것으로 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \times (100\%) \tag{3}$$

여기서, μ는 평균값, σ는 표준편차를 나타낸다. 해석 대상 저수지의 지반 물성에 대한 변동성 평가를 위해 국내・외 문헌을 통해 제시된 내부마찰각과 점착력의 변동계수를 정리하였으며, Table 2와 같다.

본 연구에서는 문헌값을 바탕으로 Lee and Jung (2019)과 동일한 변동계수 범위인 점착력 10~40%, 내부마찰각 5~20% 내에서 수치해석을 수행하였다.

Table 2. COV of Inherent Soil Variability

Classification	Friction angle (COV. %)	Cohesion (COV. %)
Phoon and Kulhawy (1999)	Clay & Sand	Clay
	6-21	7-38
Meyerhof (1970)	Silty Clay	Silty Clay
	26	35.9
Jones et al. (2002)	Clay & Silt	Clay
	10-56	18-42
Uzielli et al. (2006)	Clay & Sand	Clay & Sand
	5-15	10-55
Kim et al. (2009)	Weathered soil	Weathered soil
	8	20
Onyejekwe (2012)	Clay	Clay
	11-30	51-58

3.5 확률론적 해석

본 연구에서는 붕괴확률을 산정하기 위해 확률론적 해석을 수행하였다. 이를 통해 안전율의 확률밀도함수를 얻고 최종적으로 1보다 작은 안전율의 면적과 총면적의 비로 붕괴확률을 산정한다(Bae and Park, 2002). 붕괴확률은 Eq. (4)와 같이 표현된다.

$$P_f = \frac{M}{N} \times (100\%) \tag{4}$$

여기서, N은 전체 안전율의 개수를 M은 1보다 작은 안전율의 개수를 나타낸다. 본 연구에서는 민감도 분석을 통해 안전율이 수렴하는 500회 반복계산을 수행하여 붕괴확률을 산정하였다.

3.5.1 샘플링 기법

랜덤 샘플링은 모집단 전체의 경향을 표본들이 정확하게 나타낼 수 있도록 확률분포로부터 무작위로 추출하는 방법이다. 샘플이 충분히 많은 경우 적용이 쉽다는 장점이 있으나 모델을 평가하는데 비용과 시간이 많이 소요되는 경우 적용에 문제가 있을 수 있다. Latin hypercube 샘플링 기법은 동등한 확률간격으로 누적확률분포를 나누고 각 확률간격에서 무작위로 확률변수(Random variable)를 추출하는 계층화 랜덤 샘플링 기법으로 적은 수의 샘플링으로 확률분포의 넓은 영역을 포함할 수 있는 효율적인 샘플링 기법으로 발생 가능한 변수를 균등한 확률로 산정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 랜덤변수들 사이의 상관성을 고려할 수 있는 Latin hypercube 샘플링 기법을 사용하였다 (Stein, 1987).

4. 결과 분석

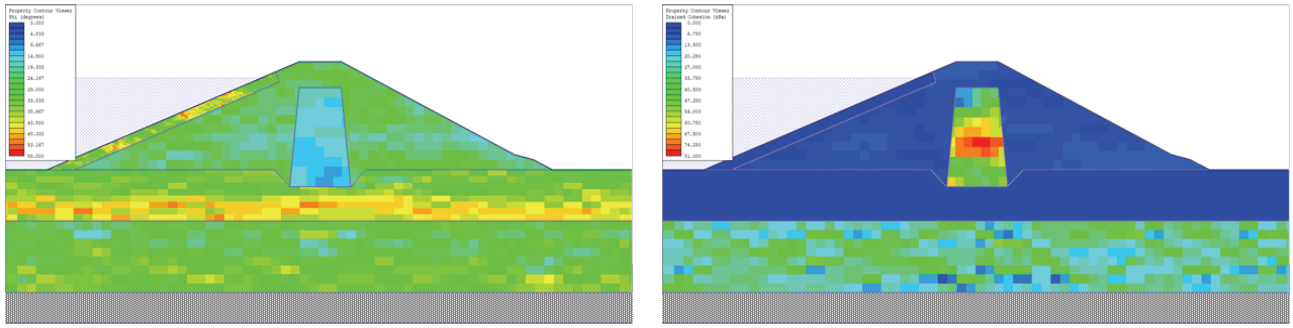
4.1 공간적 불균질성을 고려한 사면안정해석

Fig. 2는 랜덤변수 내에서 해석 대상 저수지의 물성에 대한 공간적 불균질성을 고려한 사면안정해석 결과 중 일부를 나타낸다.

내부마찰각과 점착력에 대해 Table 2의 문헌값과 Lee and Jung (2019)의 변동계수 내에서 해석 대상 저수지의 높이 및 사면의 길이를 고려하여 연직 방향 자기상관거리 2 m, 수직 방향 자기상관거리 10 m를 적용하여 사면안정해석을 수행하였다.

4.2 공간적 불균질성을 고려한 안전율의 확률분포

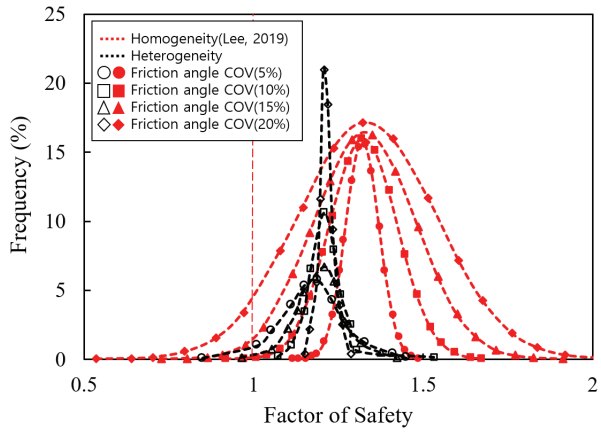
Fig. 3은 만수위와 홍수위 조건에서 내부마찰각과 점착력의 변동계수 변화에 따른 하류 사면 안전율의 확률분포를 나타낸다. 만수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수가 5~20%로 증가함에 따라 하류 사면의 최소안전율이 1.15에서 0.85로 감소하고, 최대안전율은 1.29에서 1.45로 증가하였다. 점착력의 변동계수가 10~40%로 증가함에 따라 하류 사면의



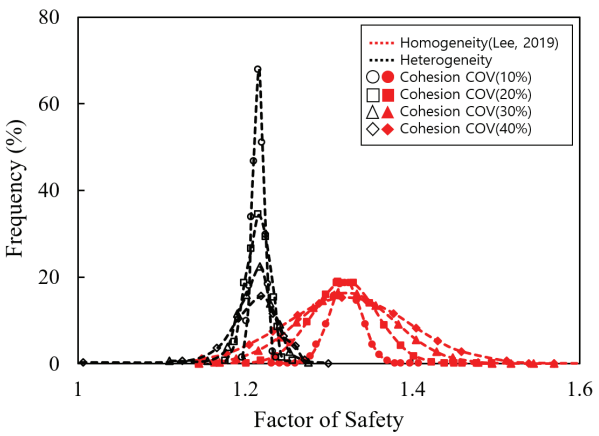
(a) Slope stability analysis considering heterogeneous friction angle of soils

(b) Slope stability analysis considering heterogeneous cohesion of soils

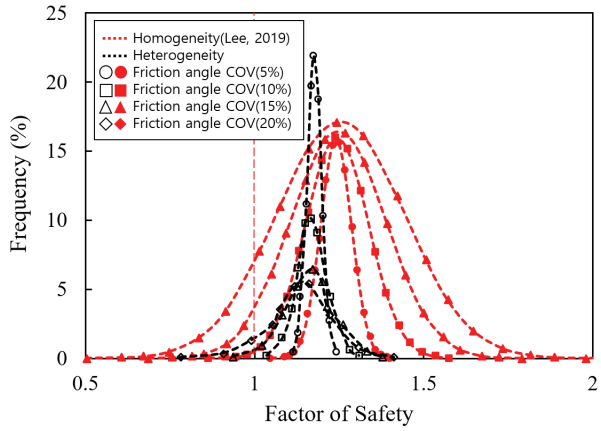
Fig. 2. Slope Stability Analysis Considering Spatial Heterogeneous Soil Properties using Slide2



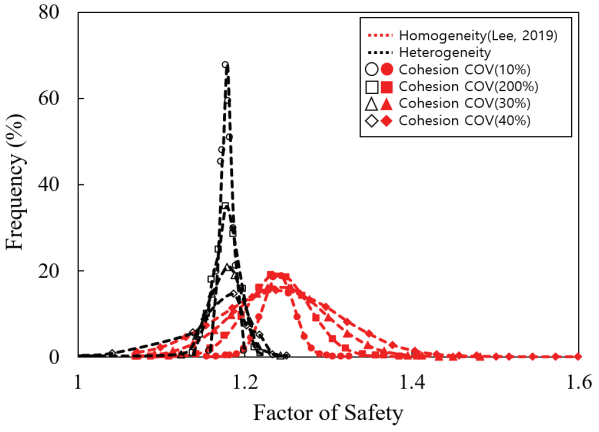
(a) F・S distribution according to variation of friction angle COV at H.W.L condition



(b) F・S distribution according to variation of cohesion COV at H.W.L condition



(c) F・S distribution according to variation of friction angle COV at F.W.L condition



(d) F・S distribution according to variation of cohesion COV at F.W.L condition

Fig. 3. F・S Distribution According to COV Variation

최소안전율이 1.20에서 0.90으로 감소하고, 최대안전율은 1.24에서 1.30으로 증가하였다. 또한, 홍수위 조건에서 내부 마찰각의 변동계수가 5~20%로 증가함에 따라 하류 사면의 최소안전율이 1.11에서 0.77로 감소하고, 최대안전율은 1.25에서 1.40으로 증가하였다. 점착력의 변동계수가 10~40%로 증가함에 따라 하류 사면의 최소안전율이 1.16에서 0.77로 감소하고, 최대안전율은 1.20에서 1.26으로 증가하였다. Fig. 3에서 저수지 전체 물성치의 변동성을 고려한 하류 사면 안전율에 대한 확률분포(Lee and Jung, 2019)와의 비교 결과, 물성치의 공간적 불균질성을 고려한 경우 평균안전율은

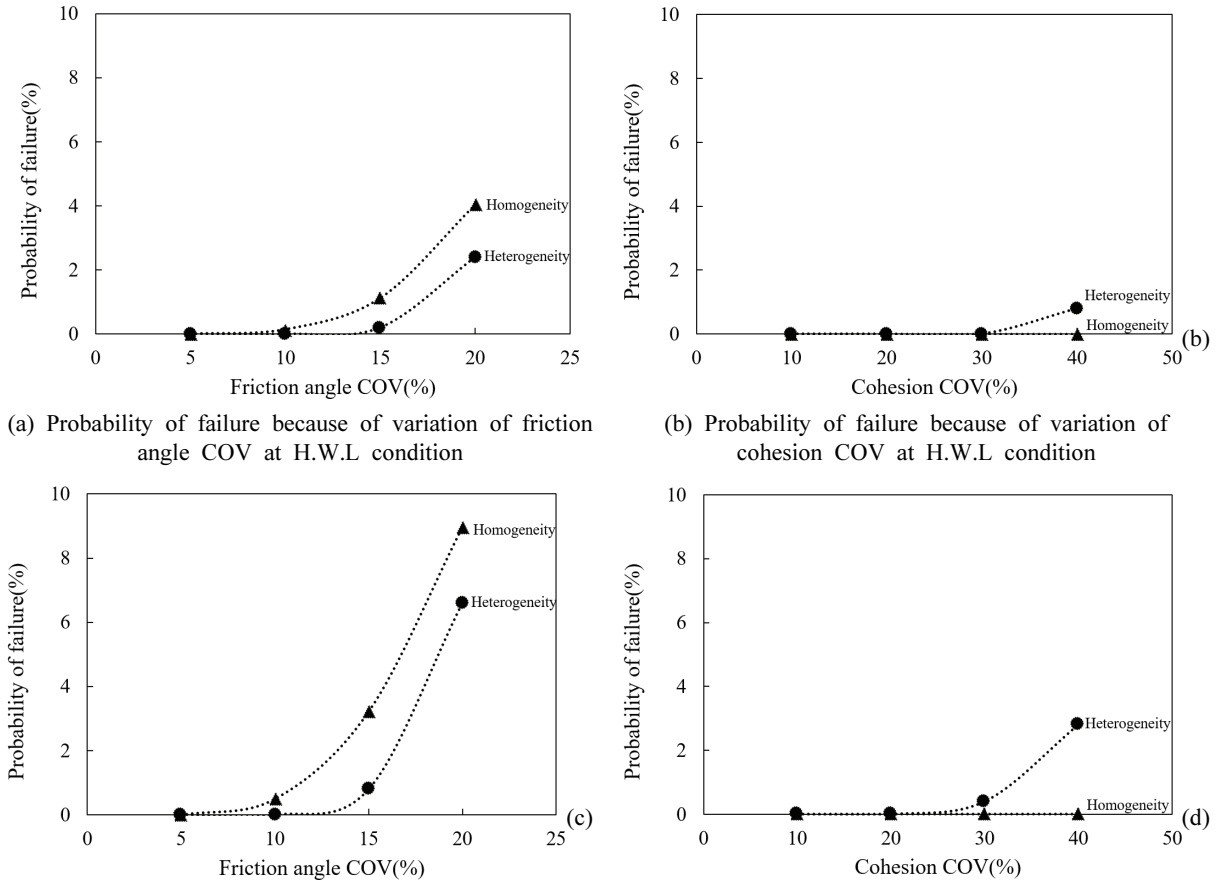
더 낮게 산정되었다. 하지만, 확률분포에서 최소안전율은 더 높게, 최대안전율은 더 낮게 나타내는 경향을 보였으며, 이로 인해 1보다 낮은 안전율이 적게 산정되었다.

4.3 공간적 불균질성을 고려한 붕괴확률

Fig. 4는 만수위와 홍수위 조건에서 내부마찰각과 점착력의 변동계수 변화에 따른 Lee and Jung (2019)과의 붕괴확률 비교 결과를 나타낸다. 만수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수가 5~20%로 증가함에 따라 붕괴확률이 0%에서 최대 2.4%까지 증가하였으며, 점착력의 변동계수가 10~40%로 증가함에 따라 붕괴확률은 0%에서 최대 0.8%까지 증가하였다. 또한, 홍수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수가 5~20%로 증가함에 따라 붕괴확률이 0%에서 최대 6.6%까지 증가하였으며, 점착력의 변동계수가 10~40%로 증가함에 따라 붕괴확률은 0%에서 최대 0.8%까지 증가하였다. 본 연구의 붕괴확률 산정 결과, 내부마찰각이 점착력에 비해 붕괴확률에 크게 영향을 미치는 것으로 파악되고 이는 기존의 연구결과와 동일하게 나타난다(Lee, 2020). 저수지 전체 물성치의 변동계수 변화에 따른 붕괴확률(Lee and Jung, 2019)과의 비교 결과, 공간적 불균질성을 고려한 경우 만수위 시 점착력의 변동계수 40%와 홍수위 시 점착력의 변동계수 30% 및 40%의 경우를 제외하고 1보다 낮은 안전율이 더 적게 산정되어 붕괴확률이 더 낮게 나타나는 경향을 보였다.

4.4 공간적 불균질성을 고려한 내부마찰각과 점착력의 복합적 변화에 따른 붕괴확률

Fig. 5는 내부마찰각과 점착력의 변동성을 동시에 고려한 경우 만수위와 홍수위에서의 붕괴확률을 나타낸다. 만수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수를 5%로 고정하고 점착력의 변동계수를 10%에서 40%까지 증가시킬 경우 붕괴확률은 0%에서 0.8%까지 나타났으며, 내부마찰각의 변동계수를 최대 20%까지 고정하고 점착력의 변동계수를 10%에서 40%까지 증가시킬 경우 붕괴확률은 최대 5.2%까지 나타났다. 또한, 홍수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수를 5%로 고정하고 점착력의 변동계수를 10%에서 40%까지 증가시킬 경우 붕괴확률은 0%에서 2.8%까지 나타났으며, 내부마찰각의 변동계수를 최대 20%까지 고정하고 점착력의 변동계수를 10%에서 40%까지 증가시킬 경우 붕괴확률은 최대 11.8%까지 나타났다. 만수위 조건에 비해홍수위 조건에서 붕괴확률이 더욱 크게 나타났으며, Lee and Jung (2019)과의 비교



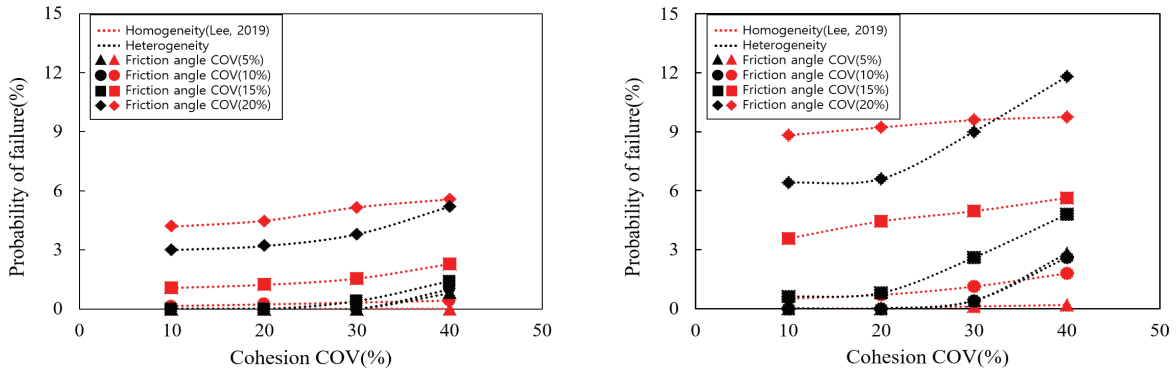
(a) Probability of failure because of variation of friction angle COV at H.W.L condition

(b) Probability of failure because of variation of cohesion COV at H.W.L condition

(c) Probability of failure because of variation of friction angle COV at F.W.L condition

(d) Probability of failure because of variation of cohesion COV at F.W.L condition

Fig. 4. Probability of Failure Because of the Variation of COV



(a) Probability of failure when both friction angle and cohesion are considered (H.W.L)

(b) Probability of failure when both friction angle and cohesion are considered (F.W.L)

Fig. 5. Probability of Failure When Changing COV of Friction Angle and Cohesion at the Same Time

결과, 공간적 불균질성을 고려한 경우 전반적으로 붕괴확률이 더 낮게 산정되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 저수지 사면에 대한 합리적인 위험도 평가를 위해 물성치의 공간적 불균질성 및 불확실성을 고려한 확률론적 해석을 통해 안정성 평가를 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 물성치의 공간적 불균질성을 고려한 내부마찰각과 점착력의 변화에 따른 안전율의 확률분포 산정 결과, 변동계수가 증가함에 따라 최소안전율은 감소하고 최대안전율은 증가하였다. 이는 기존의 안전성 평가 결과에 비해 최소안전율은 더 높게 산정되고, 최대안전율은 더 낮게 평가되었다. 지반 전체의 물성을 변동시키는 해석 방법과 달리 공간적 변동성을 고려한 경우 연직 및 수평 방향의 자기상관거리를 고려하여 지반의 물성을 국부적으로 변동시키기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인해 1보다 낮은 안전율의 분포는 더 적게 평가되었다.

(2) 공간적 불균질성을 고려한 내부마찰각과 점착력의 변동계수 변화에 따른 붕괴확률 산정 결과, 점착력에 비해 내부마찰각이 붕괴확률에 미치는 영향이 비교적 큰 것으로 나타났다.

(3) 공간적 불균질성을 고려한 내부마찰각과 점착력의 복합적 변화에 따른 붕괴확률 산정 결과, 변동계수가 증가함에 따라 붕괴확률이 크게 증가하였으며, 점착력에 비해 내부마찰각의 변동계수 변화에 따른 붕괴확률 변동성이 크게 나타났다. 또한, 기존의 붕괴확률 산정 결과에 비해 붕괴확률이 전반적으로 낮게 산정되었다.

(4) 기존 연구의 경우, 파괴면에 걸쳐 동일한 물성이 적용되어 1보다 작은 안전율의 샘플링 횟수가 많아져 사면의 붕괴확률이 과대평가 될 수 있다. 그러나 물성치의 공간적 불균질성을 고려한 사면안정해석은 붕괴확률이 감소한다. 따라서, 공간적 불균질성을 고려한 저수지에 대한 안정성 평가를 바탕으로 합리적인 붕괴확률을 산정하고 이를 토대로 저수지에 대한 보수 및 보강이 요구된다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009) 및 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호: 20CTAP-C153021-02)으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

Agterberg, F.P. (1970). Autocorrelation function in geology. In D.F. Merriam (Ed.), *Geostatistics: Proceeding of a Colloquium on Geostatistics* (pp. 113-141). Boston, MA, USA: Springer.

Bae, G.J., and Park, H.J. (2002). Evaluation of planar failure probability for rock slope based on random properties of discontinuities. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 97-105.

Baecher, G.B. (1982). Simplified geotechnical data analysis. *Proc., NATO Advanced Study Institute on Reliability Theory and Its Application in Struct. and Soil Mech.*, Martinus Nijhoff (Publ. 1983), Bornholm, Denmark, pp. 257-277.

Baecher, G.B., and Christian, J.T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Chichester, England: John Wiley & Sons.

Cho, S.E. (2011). Probabilistic seepage analysis by the finite element method considering spatial variability of soil permeability. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 10, pp. 93-104.

Cho, S.E. (2012). Probabilistic seepage analysis considering the spatial variability of permeability for layered soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 12, pp. 65-76.

Cho, S.E. (2018). Probabilistic stability analysis of unsaturated soil slope under rainfall infiltration. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 5, pp. 37-51.

Cho, S.E., and Park, H.C. (2008). A study on the probabilistic analysis method considering spatial variability of soil properties. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 8, pp. 111-123.

Cho, S.E., and Park, H.C. (2009). Probabilistic stability analysis of slopes by the limit equilibrium method considering spatial variability of soil property. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 12, pp. 13-25.

Choi, E.J. (2016). *Slope stability analysis with statistical consideration of variability of soil strength parameters*. Master's thesis, Korea University.

Christian, J.T. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 10, pp. 985-1003.

DeGroot, D.J., and Baecher, G.B. (1993). Estimating autocovariance of in-situ soil properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 1, pp. 147-166.

Díaz Padilla, J., and Vanmarcke, E.H. (1974). *Settlement of structure on shallow foundation*. Research Report R74-9, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA, USA.

Elkateb, T., Chalaturnyk, R., and Robertson, P.K. (2002). An overview of soil heterogeneity: Quantification and implications on geothchnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-15.

El-Ramly, H., Morgenstern, N.R., and Cruden, D.M. (2003). Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-shale. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 192-208.

Feng, P., and Lajtai, E.Z. (1998). Probabilistic treatment of the sliding wedge with EzSlide. *Engineering Geology*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 153-163.

GEO-SLOPE International Ltd. (2015). *Stability modeling with SLOPE/W*. An Engineering Methodology June 2015 Edition.

Jeon, K.H., Lee, S.R., Yoon, S., and Kim, Y.T. (2013). Slope stability analysis based on probabilistic characteristics of unsaturated soil properties of weathered granite soil. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 1, pp. 161-168.

Jeong, N.S., You, K.H., and Park, H.J. (2011). Stability analysis of landslides using a probabilistic analysis method in the Boeun area. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, No. 3, pp. 247-257.

Jones, A.L., Kramer, S.L., and Arduino, P. (2002). Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering. PEER Report 2002/16, Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Kim, D.H., An, S.W., Kim, J.J., and Lee, W.J. (2009). Characterization of soil variability of Songdo area in Incheon. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 6, pp. 73-88.

Korea Rural Community Corporation (KRC). (2018). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*.

Kulhawy, F.H. (1992). On the evaluation of static soil properties. In R.B. Seed, and R.W. Boulanger (Eds.), *Stability and performance of slopes and embankments II* (pp. 95-115). Geotechnical Special Publication (GSP) 31, New York, NY, USA: American Society of Civil Engineering.

Lacasse, S. and Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterizing soil properties. In C.D. Shackleford, P.P. Nelson, and M.J.S. Roth (Eds.), *Uncertainty in the Geologic Environment: From theory to practice*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 58, pp. 49-75.

Lee, H.W. (2020). *Stability assessment of reservoir using probabilistic analysis method*. Master's thesis, Chungbuk National University.

Lee, H.W., and Jung, J.W. (2019). Evaluation of failure probability of old reservoirs considering changes of strength and water level. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 209-216.

Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 74-97.

Lumb, P. (1968). Statistical aspects of soil measurements.

Proceedings of 4th Australian Road Research Conference, pp. 1761-1770.

Lumb, P. (1975). Spatial variability of soil properties. *Proceedings of. 2nd International. Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering*, Aachen, Germany, pp. 397-421.

Major, G., Ross-Brown, D., and Kim, H. (1978). A general probability analysis for three dimensional wedge failure. *Proceeding of 19th U. S. Symposium on Rock Mechanics*, Nevada, pp. 45-56.

Meyerhof, G.G. (1970). Safety factors in soil mechanics. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 349-355.

Onyejekwe, S. (2012). *Characterization of soil variability for reliability-based design*. Ph.D. dissertations, Missouri University of Science and Technology.

Park, H.J., and West, T.R. (2001). Development of a probabilistic approach for rock wedge failure. *Engineering Geology*, Vol. 59, No. 3-4, pp. 233-251.

Phoon, K.K., and Kulhawy, F.H. (1999). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 625-639.

Stein, M.L. (1987). Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling. *Technometrics*, Vol. 29, No. 2, pp. 143-151.

Sung, S.K. (2007). *Probability analysis of rock slope using discontinuities persistence and zoning*. Master's thesis, Kangwon National University.

Uzielli, M., Lacasse, S., Nadim, F., and Phoon, K.K. (2006). Soil variability analysis for geotechnical practice. In T.S. Tan, K.K. Phoon, D.W. Hight, and S. Leroueil (Eds.), *Characterisation and engineering properties of natural soils* (Vol. 3-4, pp. 1653-1752). London, England: Taylor & Francis.

Vanmarcke, E.H. (1983). *Random fields: Analysis and synthesis*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press.

Received	October 16, 2020
Revised	October 19, 2020
Accepted	October 27, 2020