J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 19, No. 5 (Oct. 2019), pp.209~216
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.5.209

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

지반방재

노후저수지 강도정수 및 수위 변화를 고려한 붕괴 확률 평가

Evaluation of Failure Probability of Old Reservoirs Considering Changes of Strength and Water Level

이현우* · 정종원**

Lee, Hyunwoo*, and Jung, Jongwon**

Abstract

Old reservoirs denote the structures older than 50 years after their complete construction. These reservoirs suffer from both the decrease in stability and the high failure possibility by a hazard. Recently, heavy rain and earthquake have increased the failure possibility of old reservoirs. Thus, it is necessary to prevent the risks by proactively examining the stability of old reservoirs. The limit equilibrium method highly depends upon the soil-strength parameters, and the accurate estimation of soil-strength parameters at the site is essential. However, both economic and time-related limitations cause the uncertainty of soil parameters, thereby making difficult the accurate stability assessment of old reservoirs. Therefore, this study evaluated the stability of old reservoirs and assessed the quantitative probability of failure by using the probabilistic analysis, considering the variation in soil-strength parameters and various uncertainties. As a result of the analysis, it was observed that the probability of failure increases with the coefficient of variation (COV) of both the cohesion and the friction angle. Furthermore, it was confirmed that the COV of the friction angle had a greater influence on the probability of failure than that of the COV of cohesion.

Key words : Old Reservoirs, Seepage Analysis, Slope Stability Analysis, Coefficient of Variation, Probability of Failure

요 지

국내의 노후저수지는 축조된 지 약 50년 이상이 지난 시설물로써 노후화로 인한 안정성 저하 및 재해 취약성이 예상되고, 최근 들어 집중호우 및 지진 발생 등으로 인해 노후저수지의 붕괴 발생 가능성이 증가하고 있다. 이에 따라 노후저수지에 대한 안정성 검토를 통해 위험성 평가 및 사전 대비가 필요하다. 한계평형법에 근거한 기존의 저수지 안정성 평가 결과는 지반강도정수의 의존도가 크기 때문에, 현장에서의 정확한 지반강도정수 파악이 필수적이다. 하지만, 지반조사의 경제 및 시간적 제약은 지반강도정수의 불확실성을 유발하고, 시간이 흐름에 따라 변화하는 강성 및 수위의 변화에 대한 고려가 부족하여 한계평형법을 활용한 저수지의 안정성에 대한 정확한 평가가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 저수지 강도정수 및 수위의 불확실성과 변동성을 고려한 붕괴 확률 해석을 통해 노후저수지의 안정성을 평가하였다. 해석 결과 점착력 및 내부마찰각의 변동계수가 증가함에 따라 붕괴 확률이 증가하고, 점착력에 비해 내부마찰각의 변동계수 변화가 붕괴 확률에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 노후저수지, 침투해석, 사면안정해석, 불확실성, 변동계수, 붕괴 확률

1. 서 론

국내에 축조된 농업수리시설물 중 저수지는 전국에 총 17,313개소가 있으며, 이 중 3,404개소는 한국농어촌공사에서 관리하며, 13,910개소는 각 종 시군 등 지자체에서 관리하고 있다. 이들 중 전체 저수지의 약 25%는 축조된 지 50년이 지난 상태로써(KRC, 2018), 시설물의 노후화에 따른 안정성 저하 문제 및 재해 취약성이 증가하고 있다. 또한, 태풍을

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: lhw0101@hanmail.net)
Member, Master's coarse, Member, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
**교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 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

동반한 집중호우는 노후저수지의 붕괴를 유발하는 직접적인 원인으로써 호우의 지반 침투로 인한 제체의 단위중량 증가, 수위 상승으로 인한 저수지 제체 내 지반누수 및 전단강도 저하로 인한 붕괴를 유발하고 있다(Lee and Noh, 2012). 노후저수지의 붕괴는 농업용수 유출, 토석류로 인한 하류부 농경지, 도로 및 기타 인접 지역의 시설물 피해를 유발하며, 이에 따라 크고 작은 인명 및 재산 피해가 예상된다. 따라서 붕괴로 인한 피해의 예방 및 방지를 위해 기존에 설치된 노후저수지에 대한 안정성 검토를 통해 사전에 결함 요인을 파악하여 보수 및 보강이 요구되는 실정이다.

기존의 안전성 검토는 침투해석을 통해 제체 및 지반의 침투유량 및 파이핑에 대한 안정성을 해석한다. 그리고 사면안정해석을 통해 제체 및 지반의 전단강도를 파악하고, 활동파괴 및 안정성을 해석한 뒤, 최소안전율을 산정한다. 안정성 검토 시 사용되는 지반 물성치는 실내 및 현장시험을 통해 얻어지는 값을 사용하거나 문헌을 참고하여 적용하게 된다. 하지만 지반강도정수는 동일한 구성을 가진 지층 내에서도 위치에 따라 값이 상이한 지반의 불균질성을 나타내고 있다(Cho, 2011). 또한 지반강도정수 측정을 위한 시료의 채취 과정에서 교란, 실내 및 현장시험 과정에서 발생하는 오차, 기상상황에 따른 오차, 수치해석 수행 시 해석 모델을 프로그램 상에서 재현하는 과정에서 단순화 및 적용 과정의 오차 등으로 인한 다양한 불확실성이 존재한다. 한계평형법은 안전율 산정이 가능하지만, 저수지 및 사면이 내포하는 불확실성으로 인한 위험도를 표현하기에 있어 한계가 존재한다.

확률 해석기법은 안전율을 대신하여 붕괴 확률을 사용하여 위험도를 평가하며 현재까지 제안된 해석 기법 중에서 불확실성을 가장 효과적으로 고려할 수 있는 기법으로 평가되고 있다(Jeong et al., 2011). 확률 해석기법을 활용한 기존의 안정성 평가 적용 사례는 다음과 같다. Choi et al. (2012)는 철도 표준 사면을 대상으로 신뢰성 해석을 통해, 각 지반정수들이 사면안정에 미치는 영향을 분석하였다. Jeong (1998)은 신뢰성해석을 통해 토질정수의 변동성이 사면에 미치는 영향을 파악하였으며, 민감도분석을 수행하여 각 매개변수가 붕괴 확률에 미치는 영향을 파악하였다. Jeon et al. (2013)은 국내 화강풍화토의 불포화 지반정수에 대한 확률특성을 파악하고, 이를 바탕으로 불포화 화강풍화토 사면에 대해서 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 통한 확률론적 사면안정해석을 수행하였다. Cho (2018)은 강우로 인한 사면 파괴의 예측을 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 통한 확률론적 해석을 수행하였으며, 강우강도와 기반암의 깊이에 따른 붕괴 영향을 분석하였다. You et al. (2014)는 한계상태설계를 위한 목표신뢰도지수의 결정을 위해 쇄석다짐말뚝이 시공된 사례에서 일계신뢰성해석법(FORM)을 활용하여 극한지지력의 이론식별 신뢰도 수준을 평가하였다. Kim et al. (2016)은 하중저항계수설계법과 유로코드의 부분안전계수설계법을 활용하여 풍화토지반 얕은기초의 대표단면에 대해 지지력에 대한 안정성 검토 및 안전여유 산정 결과를 비교 및 분석하였으며, 풍화토지반 얕은기초에 대해 목표신뢰도지수 및 저항계수를 제안하였다. Kim et al. (2015)는 기초구조물에 대한 LRFD code 개발을 위해 항타말뚝 재하시험 결과를 활용하여 일차신뢰도법 및 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 통해 신뢰성 분석을 수행하였으며, 광양지역에 대한 항타강과날뚝의 목표신뢰도지수를 제안하였다.

확률 해석기법의 적용 연구가 많이 수행되었지만, 저수지에 대한 안정성 평가는 현재까지 이뤄지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 확률 해석 기법을 활용하여 해석 대상 저수지의 안정성을 검토하였다. 또한 호우가 붕괴 확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 상류 사면의 수위 변화에 따른 특성을 분석하고 지반강도정수가 붕괴 확률에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석 조건 및 지반 정수

2.1 해석 대상 저수지 및 수치해석 조건

본 연구에서는 경상북도 경주시 건천읍 모량리에 위치한 ○○저수지를 대상으로 침투해석 및 사면안정해석을 통한 붕괴 확률을 산정하였다. ○○저수지는 1945년에 준공되어 노후저수지로 분류된다. 해석 대상 노후저수지의 기본 제원, 단면 형상, 댐마루(Dam crest), 사석(Riprap), 상시만수위(High Water Level, HWL) 및 홍수위(Flood Water Level, FWL)는 Fig. 1과 같다. 수치해석 수행을 위한 저수지 제체 및 지반 물성치 산정은 국가건설기준 및 인근 시추공 자료를 활용하여 산정하였으며, 수치해석 조건은 Table 1과 같다.

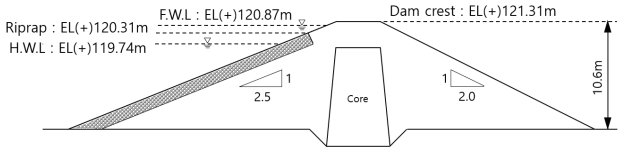


Fig. 1. Specification and Sectional Shape of Reservoir

Table 1. Condition of Numerical Analysis

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

2.2 침투해석

상하류 사면의 수두차로 인해 유체가 상류 사면에서 하류 사면측으로 침투가 발생하여 침윤선이 형성된다. 이때 침윤선은 제체의 형상, 축조 재료 및 제체의 다짐 정도에 따라 달라지게 되며, 침윤선이 제체 하부의 지반을 통과할 때 발생 가능한 파이핑 현상에 대한 안정성 검토 및 대책 방안이 요구된다. 본 연구에서는 저수지 제체의 침투해석 수행 시 Geo-slope사의 Seep/w 프로그램을 활용하여 수치해석을 수행하였다. Seep/w는 지반공학 해석 프로그램 중 하나로써, 불포화토, 정상류와 부정류 조건에서의 해석 및 사면안정해석 프로그램과 연계가 가능하다(Geo-slope International Ltd., 2015a).

2.3 사면안정해석

사면안정해석은 한계평형이론에 의해 사면에 발생하는 전단응력과 사면이 갖는 전단강도의 비로써 정의되는 안전율에 근거한 해석법으로, 한계평형이론은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 토체의 안정성을 해석하는 방법이다. 본 연구에서는 사면안정해석 수행 시 Geo-slope사의 Slope/w 프로그램을 활용하여 수치해석을 수행하였다. Slope/w는 Seep/w을 통해 침투해석을 수행한 뒤, 이와 연계하여 활용이 가능하다(Geo-slope International Ltd., 2015b).

3. 붕괴 확률 평가

3.1 확률 해석

확률 해석기법은 안전율을 확률변수로 고려하여 구조물의 안정성을 표현하는 방법으로써 안전율 대신 붕괴 확률이라 표현한다. 붕괴 확률이란 반복계산이나 신뢰성 분석을 통해 획득한 안전율의 확률밀도함수로써, 입력값들을 변화시켜가면서 구조물의 안정성을 평가하여 안전율을 산정한 뒤, 안전율이 1보다 작은 가능성을 산정한다(Bae and Park, 2002). 확률 해석을 위해서는 지반강도정수 및 기타 요인의 확률 특성 분석이 수행되어야 한다. 지반강도정수들은 동일한 지층에서도 위치에 따라 그 값이 다른 불균질성을 나타내고 있으며, 현장 및 실내시험을 위한 시료의 채취 과정에서의 교란 발생, 측정 오차 등으로 인한 수많은 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성은 불교란 시료 채취, 실내 및 현장시험 횟수 증가 등으로 인해 오차를 최소화할 수 있지만, 이에 따른 한계도 존재한다. 따라서 이러한 불균질성 및 불확실성을 고려하여 노후저수의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 확률 해석기법을 통해 해석 대상 저수지의 붕괴 확률을 평가하였으며, 해석 과정은 다음과 같다.

(1) 해석모델의 상태함수인 사면안정해석 이론식을 결정하고 입력변수의 확률특성인 확률밀도함수, 평균 및 표준편차를 입력한다.
(2) 반복계산 시행 횟수를 설정한 뒤, 입력변수의 확률특성 내에서 난수를 생성하여 해석모델의 사면안정해석 이론식에 대입하여 반복계산을 수행한다.
(3) 반복계산을 통해 산정된 안전율의 확률밀도함수를 활용하여, 전체 안전율의 개수와 1보다 작은 안전율 개수의 비를 통해 Eq. (1)과 같이 붕괴 확률(Probability of failure, P_f)을 계산한다. 여기서 N은 계산된 전체 안전율의 개수를 나타내며, M은 1보다 작은 안전율의 개수를 나타낸다.

$$P_f = \frac{M}{N} \times (100\%) \tag{1}$$

사면안정해석 이론식은 일반적으로 가장 널리 사용되는 Bishop의 간편법을 활용하였다. Bishop의 간편법에 따른 사면안정해석의 원리는 다음의 Eq. (2)와 같다.

$$M(\alpha) = \cos(\alpha)\left(1 + \tan(\alpha)\frac{\tan(\phi)}{F_s}\right) \tag{2}$$

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

여기서, W는 각 절편의 중량을 나타내며, c는 점착력, ϕ는 내부마찰각, α는 경사각, b는 절편의 폭을 나타낸다. 각 항에는 안전율이 포함되어있기 때문에 해석의 결과를 얻기 위해서는 시행착오법을 활용하여 문제를 해결해야 한다.

본 연구에서는 지반강도정수 중 점착력 및 내부마찰각을 확률변수로 취급하여 각각의 확률 특성을 수치해석 과정에 적용하였다. 상류 사면의 수위 변화가 붕괴 확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 상시만수위, 홍수위에 대한 기본 안정성 검토 수행 후, 점착력 및 내부마찰각의 변동계수 변화에 따른 수치해석을 수행하였으며, 점착력 및 변동계수를 복합적으로 고려하였을 때 붕괴 확률에 미치는 영향을 파악하기 위하여 연구를 수행하였다.

3.2 확률 특성

지반강도정수는 불확실성으로 인해 정확한 값을 획득하기가 어렵고 고정된 수치가 아닌 특정 범위를 갖는 변수로 표현되는 확률변수로써 확률밀도함수를 활용하여 표현된다. 확률밀도함수란 확률변수의 분포 형태를 나타내는 함수로써, 현장에서 획득한 자료의 분산 정도나 히스토그램을 활용하여 결정한다(Lee, 2012). 지반강도정수들의 확률밀도함수는 정규분포함수, 대수정규분포함수, 베타함수 및 삼각함수 등이 있으며, 일반적으로 안정성 검토 시 활용되는

지반강도정수 중 점착력, 내부마찰각 및 단위중량은 정규분포함수로 알려져 있다(Uzielli et al., 2007). 이 밖에 확률특성에는 평균, 표준편차 및 변동계수가 있으며, 평균 및 표준편차는 확률변수를 나타내는 확률특성 중 하나로써, 평균값은 획득한 데이터의 산술평균으로 구할 수 있으며, 표본 집단의 기댓값을 나타낸다.

표준편차는 표본 집단 내에서 각각의 데이터들의 분산정도를 나타내는 수치로써, 현장 및 실내실험을 통해 획득한 데이터들의 표준편차가 클수록 평균값에서 멀어지며 데이터들의 분산이 심함을 나타낸다.

변동계수(Coefficient of variation, COV)는 지반강도정수들이 갖는 불확실성을 나타내는 수치로써, 모집단 및 측정단위가 서로 다른 각각의 확률변수를 비교하고자 할 때 쓰이며, 각 확률변수의 상대적인 분산의 정도를 나타낸다. 변동계수는 확률변수의 표준편차를 평균으로 나누어 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다. 여기서 σ는 확률변수의 표준편차, μ는 평균값을 나타낸다.

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

노후저수지의 붕괴 확률 평가를 위해 국외 사례 및 문헌조사를 통하여 지반강도정수의 변동계수를 파악하였으며, Table 2와 같다.

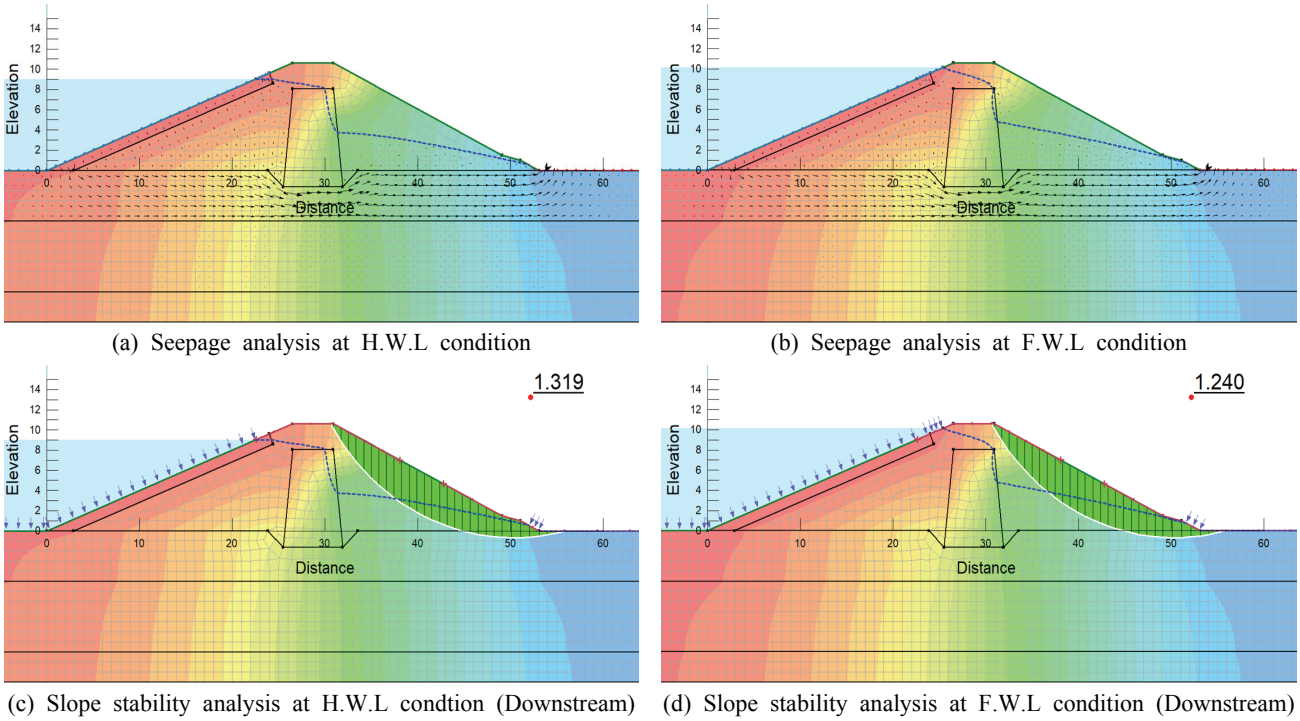
Table 2. COV and Probability Distribution of Soil Strength Parameters

Soil Property	Soil type	COV (%)	Distribution	Reference
Cohesion	Clay	10~40	Normal	Phoon et al. (2006)
Friction angle	Clay & Sand	5~20	Normal	Phoon et al. (2006)

4. 결 과

4.1 침투해석 및 사면안정해석 결과

Fig. 2는 해석 대상 저수지의 침투해석 및 사면안정해석 결과를 나타낸다. 침투해석 결과 상시만수위 및 홍수위 조건 모두 제체에 형성된 침윤선이 제체 중앙부의 코어를 통과하면서 급격히 낮아지는 모습을 볼 수 있고, 대부분의 유체가 제체 하부의 지반을 통과하여 흐르는 것으로 나타났다. 하류 사면의 사면안정해석 결과 상시만수위 및 홍수위 조건에서의 안전율은 각각 1.32, 1.24으로 나타났으며, 이는 홍수위 및 상시만수위 조건에서 제체 사면에 대한 최소 안전율 기준인 1.20를 만족하는 것으로 나타났다. 상류 사면의 사면안정해석 결과 상시만수위 및 홍수위 조건에서의 안전율은 각각 2.47 및 2.56로 나타났으며, 하류 사면과 마찬가지로 최소 안전율 기준을 만족하여 안정한 것으로 나타났다. 상류 사면의 경우 일반적으로 하류 사면에 비해 안정성이 크며, 이에 따라 추가적인 해석 및 붕괴 확률에 대한 평가는 수행하지 않았다.



(a) Seepage analysis at H.W.L condition

(b) Seepage analysis at F.W.L condition

(c) Slope stability analysis at H.W.L condtion (Downstream)

(d) Slope stability analysis at F.W.L condition (Downstream)

Fig. 2. Seepage Anaysis and Slope Stability Anaysis Result

4.2 점착력 및 내부마찰각 변화에 따른 확률 빈도

Fig. 3은 상시만수위 및 홍수위 조건에서 점착력과 내부마찰각의 변동계수 변화에 따라 하류 사면에서 안전율의 확률분포를 나타내고 있다. 상시만수위 조건에서 점착력의 변동계수가 각각 10%, 20%, 30%, 40%로 증가함에 따라 최소안전율은 1.23에서 1.13으로 감소하였으며, 최대안전율은 1.41에서 1.70으로 증가하였다. 각각의 확률밀도함수에서 표준편차는 초기 0.019에서 0.074로 증가하였지만, 붕괴 확률로 나타나지는 않았다.

홍수위 조건에서 점착력의 변동계수가 증가함에 따라 최소안전율은 1.15에서 1.06으로 감소하였고, 최대안전율은 1.33에서 1.61로 증가하였다. 표준편차는 0.019에서 0.073으로 증가하였으며, 상시만수위 조건과 동일하게 붕괴 확률은 나타나지 않았다.

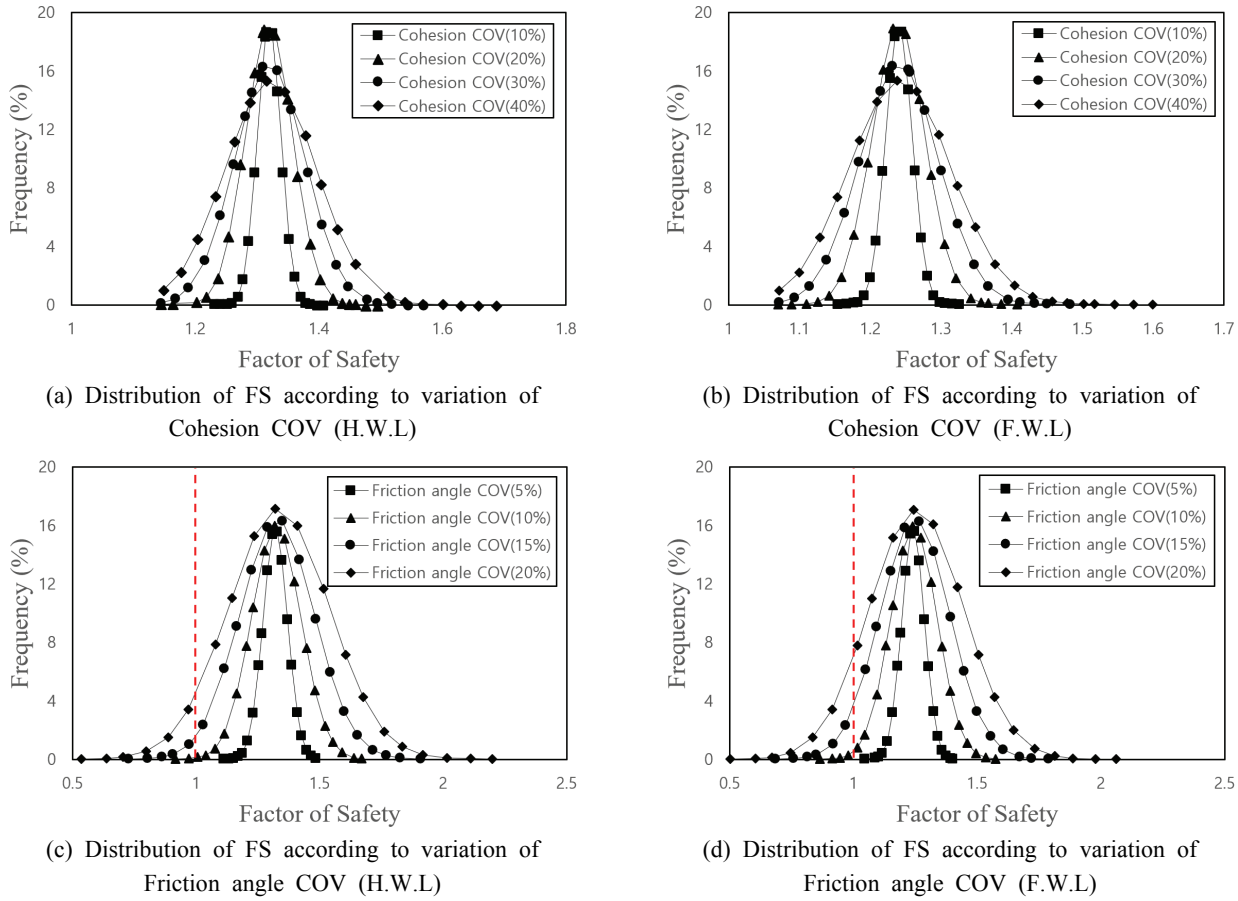
상시만수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수가 5%, 10%, 15%, 20%로 증가함에 따라 최소안전율은 1.10에서 0.49로 감소하였으며, 최대안전율은 1.50에서 2.24로 증가하였다. 표준편차는 0.05에서 0.203으로 증가하였으며, 초기 내부마찰각의 변동계수가 5%일 때를 제외하고, 10%, 15%, 20%에서의 붕괴 확률은 각각 0.14%, 1.12%, 4.04%로 증가하였다.

홍수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수가 각각 5%, 10%, 15%, 20%로 증가함에 따라 최소안전율은 1.07에서 0.46으로 감소하였고, 최대안전율은 1.40에서 2.10으로 증가하였다. 표준편차는 0.046에서 0.19로 증가하였으며, 붕괴 확률은 초기 0%에서 변동계수가 증가함에 따라 최대 8.96%까지 증가하였다.

4.3 점착력 및 내부마찰각 변화에 따른 붕괴 확률

Fig. 4는 상시만수위와 홍수위 조건에서 점착력 및 내부마찰각의 변동계수 변화에 따른 붕괴 확률을 나타낸다. 상시만수위 조건에서 점착력의 경우 변동계수가 증가함에도 불구하고 붕괴 확률은 나타나지 않은 반면, 내부마찰각의 경우 초기 0%에서 변동계수가 증가함에 따라 최대 4.04%까지 증가하였다.

홍수위 조건에서는 상시만수위 조건과 동일하게 점착력의 경우 변동계수 증가에 대한 영향은 나타나지 않았으며, 내부마찰각의 경우 초기 붕괴 확률 0%에서 최대 8.96%까지 증가하였다. 홍수위 조건의 경우 상시만수위에 비해 사면안정해석 결과의 안정성이 저하되었기 때문에 전체적으로 붕괴 확률이 크게 나타난 것으로 판단된다.



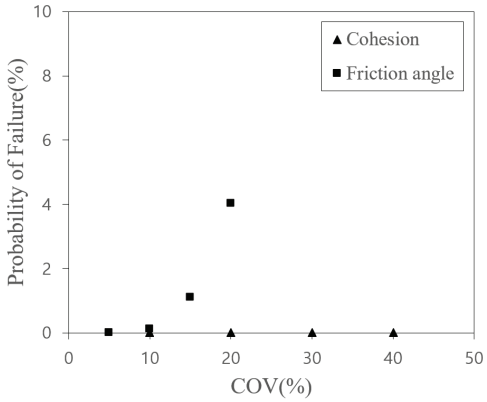
(a) Distribution of FS according to variation of Cohesion COV (H.W.L)

(b) Distribution of FS according to variation of Cohesion COV (F.W.L)

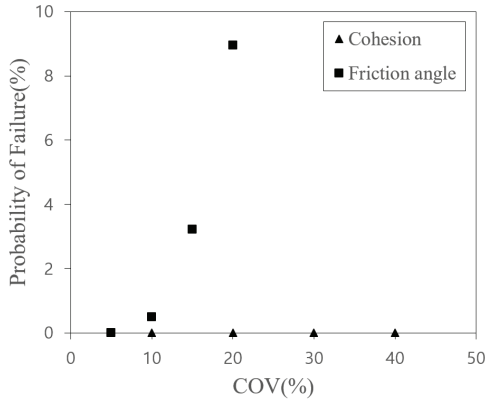
(c) Distribution of FS according to variation of Friction angle COV (H.W.L)

(d) Distribution of FS according to variation of Friction angle COV (F.W.L)

Fig. 3. Factor of Safety Distribution According to Variation of COV of Each Parameter

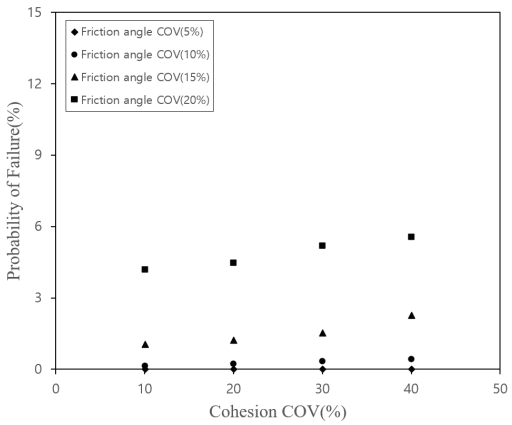


(a) Probability of failure due to changes in COV (H.W.L)

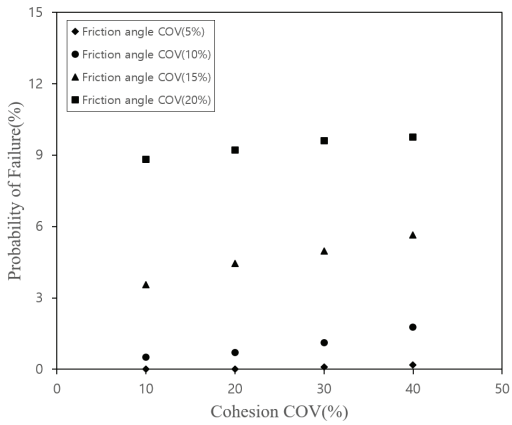


(b) Probability of failure due to change in COV (F.W.L)

Fig. 4. The Probability of Failure Due to the Change of COV for Each Cohesion and Friction Angle



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



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

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

4.4 점착력과 내부마찰각의 복합적 고려에 따른 붕괴 확률

Fig. 5는 점착력과 내부마찰각의 변동성을 동시에 고려하였을 때, 상시만수위와 홍수위에서의 붕괴 확률을 나타낸다. 상시만수위 조건에서 내부마찰각의 변동계수를 5%로 고정한 뒤, 점착력의 변동계수를 증가시킬 경우 붕괴 확률은 나타나지 않았다. 내부마찰각의 변동계수를 10%일 경우, 점착력의 변동계수가 증가함에 따라 붕괴 확률 또한 증가하였으며, 이후 내부마찰각의 변동계수가 증가할 경우 붕괴 확률의 경향은 전체적으로 상향되었다.

홍수위 조건에서의 해석 결과 또한 상시만수위 조건과 유사하게 초기 내부마찰각의 변동계수가 5%일 때, 점착력의 변동계수 변화에 대한 영향은 미비하였지만 이후 점착력 및 내부마찰각의 변동계수가 증가함에 따라 붕괴 확률이 증가하였으며, 상시만수위 조건에 비해 전체적으로 붕괴 확률은 더욱 크게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 침투해석 및 사면안정해석을 통해 노후저수지에 대한 안정성을 검토하였다. 또한 지반강도정수의 변동성 및 불확실성을 고려한 확률 해석기법을 활용하여 노후저수지의 정량적인 붕괴 확률을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 한계평형해석법에 의해 침투해석 및 사면안정해석 결과 하류 사면에서 상시만수위 및 홍수위 조건의 경우 안전율은 각각 1.32 및 1.24이며, 동일한 조건에서 상류 사면의 안전율은 2.47, 2.56이다. 모든 안전율이 설계기준의 최소안전율을 만족하여 현재 저수지 상태는 안정한 것으로 분석되었다.

(2) 점착력 및 내부마찰각의 변동계수가 증가함에 따라 최소안전율은 감소하고, 최대안전율은 증가하는 것

으로 나타났다. 이는 지반강도정수의 변동성이 심해짐에 따라 안전율의 분산의 정도가 심해진 것으로 파악된다.

(3) 상시만수위 및 홍수위 조건에서 점착력의 변동계수가 증가함에도 불구하고 붕괴 확률은 나타나지 않았다. 하지만, 내부마찰각의 경우 변동계수가 증가함에 따라 붕괴 확률이 증가하였으며, 상시만수위에 비해 홍수위 조건의 경우 붕괴 확률은 더욱 크게 나타났다. 이는 점착력에 비해 내부마찰각의 변동성이 붕괴 확률에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(4) 점착력의 변동계수를 변화시킬 때, 붕괴확률은 '0'임에도 불구하고, 점착력과 내부마찰각의 변동계수를 동시에 변화시킬 경우, 붕괴확률은 크게 증가하였다. 점착력 단독으로 붕괴 확률에 크게 영향을 끼치지 못하지만, 내부마찰각과 함께 고려시 그 영향이 나타남을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009) 및 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: 19CTAP-C152100-01).

References

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.

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

Choi, C.Y., Kim, J.Y., and Eum, K.Y. (2012). A comparative and parametric study of slope stability using a probability-based method in railway slope. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 11, No. 4, pp. 17-25.

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

GEO-SLOPE International Ltd. (2015b). *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.

Jeong, W.G. (1998). *Reliability design of slope stability and sensitivity analysis of soil parameters*. Master's thesis, Chonnam National University.

Kim, D.G., Hwang, H.S., and Yoo, N.J. (2016). Comparison of safety margin of shallow foundation on weathered soil layer according to design methods. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 12, pp. 55-64.

Kim, H.T., Kim, D.H., Lim. J.C., Park, K.H., and Lee, I.H. (2015). Resistance factor and target reliability index calculation of static design methods for driven steel pipe pile in Gwangyang. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 12, pp. 8128-8139.

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

Lee, D.W., and Noh, J.J. (2012). Safety evaluation of agricultural reservoir embankment according to backside extension. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 97-110.

Lee, H.W. (2012). *Analysis of landslide susceptibility using probabilistic method and GIS*. Master's thesis, Sejong University.

Phoon, K., Nadim, F., Uzielli, M., and Lacasse, S. (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, UK: CRC Press.

You, Y.K., Lim, H.D., and Park, J.M. (2014). Target reliability index of single gravel compaction piles for limit state design. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 5-15.

Received	August 21, 2019
Revised	August 22, 2019
Accepted	August 29, 2019