내부마찰각 불확실성 및 지진을 고려한 저수지 비탈면의 안정성 평가

Evaluation of Reservoir Slope Stability Considering Friction Angle Uncertainty and Earthquakes

신승원* · 안성노** · 이승수*** · 정종원****

Shin, Seungwon*, Ahn, Seongnoh**, Lee, Sungsu***, and Jung, Jongwon****

Abstract

Approximately 76% of the reservoirs built in Korea are facilities that are more than 50 years old. The risk of disasters has increased because of reservoir aging and the deepening polarization of drought and floods caused by abnormal weather conditions. In addition, the number of earthquakes has been gradually increasing in Korea, and anxiety has increased significantly because of the recent series of large earthquakes since the earthquakes in Pohang and Gyeongju. Accordingly, risk assessment and preparation are required through the stability evaluation of earthquakes in old reservoirs. The stability evaluation method, based on the limit equilibrium method, depends highly on the soil strength parameters; hence, it is essential to identify the soil strength parameters accurately. However, even though the soil strength parameters are of the same layer, they have different values because of the heterogeneity of the ground. It is difficult to select the representative value of the soil strength parameters because of the time and economic constraints of the ground survey. Therefore, in this study, the probability of failure of an old reservoir owing to seismic events was calculated, and the stability was evaluated. The water level and the uncertainty of the strength constant of the reservoir were considered. The analysis showed that the probability of collapse has increased because of the increase in the water level and the coefficient of variation of the friction angle, and the stability of the reservoir, considering the seismic events, was found to not satisfy the minimum factor of safety for slope activities.

Key words : Slope Stability Analysis, Old Reservoirs, Peak Seismic Ground Acceleration, Factor of Safety, Probability of Failure

요 지

국내 축조된 저수지 중 50년 이상 지난 시설물이 약 76%를 차지하며, 시설물의 노후화 및 이상기후로 인한 가뭄과 홍수의 양극화 현상 심화로 인해 재해위험도가 가중되고 있다. 또한, 국내 지진 발생이 점진적으로 증가하는 추세이며, 최근 포항과 경주에서 국내 지진관측 이래로 규모가 가장 큰 지진이 잇따라 발생해 국내 지진에 대한 불안감이 크게 증대되었다. 이에 따라 노후저수지의 지진에 대한 안정성 검토를 통한 위험성 평가와 대비가 요구되는 실정이다. 기존의 한계평형법에 근거한 안정성 평가 방법은 지반강도정수 의존성이 크기 때문에 정확한 지반강도정수의 파악이 필수적이다. 하지만 지반강도정수는 같은 층임에도 불구하고 지반의 불균질성으로 인해 위치에 따라 다른 값을 가지며, 지반조사의 시간과 경제적 제약으로 인해 지반강도정수의 대푯값 선택에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 저수지의 수위와 강도정수의 불확실성을 고려하여 노후저수지의 지진에 대한 붕괴확률을 산정하고, 이를 통해 안정성을 평가하였다. 해석 결과, 수위의 증가와 내부마찰각의 변동계수 증가에 따라 붕괴확률이 증가하였고, 지진에 대한 안정성 평가 결과, 해석 대상 저수지에 대한 안정성은 사면 활동에 대한 최소 안전율을 만족하지 못하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 사면안정해석, 노후저수지, 최대지반가속도, 안전율, 붕괴확률

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: tmddnjs1884@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**정회원, 충북대학교 토목공학과 석사(E-mail: copoi2212@chungbuk.ac.kr)

Member, Master, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

***정회원, 충북대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-43-261-3344, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: sungsolee@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 농업용 수리 시설물 중 저수지는 전국에 총 17,314개소이며, 국내 저수지는 한국농어촌공사와 시·군 지방자치단체에서 관리하는 것으로 구분된다. 한국농어촌공사에서 3,404개소의 저수지를 관리하며, 시·군 지방자치단체에서 13,910개소의 저수지를 관리하고 있다. 국내에 축조된 저수지 중 약 51%가 1945년 이전, 약 25%가 1945-1965년 사이, 약 20%가 1965-1985년 사이에 축조되었으며, 최근 30년 이내에 축조된 저수지는 전체 저수지의 약 4%에 불과하다(KRC, 2018). 국내에 축조된 전체 저수지 중, 설치경과 연수가 50년 이상이 된 시설이 약 76%를 차지하며, 시설물의 노후화로 인해 본래의 기능을 수행하지 못하는 저수지가 전국에 산재해 있다. 축조된 저수지에 대한 지속적인 관리에도 불구하고 풍화, 지진 및 호우 등의 자연적 요인에 의해서 노후화가 진행되고 있다. 또한, 국내 농업용 저수지의 약 93%가 유효저수량이 300,000 m³ 이하로 용수공급의 안정성이 떨어질 뿐만 아니라 최근 이상기후로 인한 가뭄과 홍수의 양극화 현상의 심화로 인해 누수, 홍수 배제능력 부족 등 재해위험도가 가중되고 있어 이에 대한 대처방법이 필요한 실정이다(Lee and Lee, 2017). 국내 저수지(댐)의 붕괴원인으로는 파이핑으로 인한 붕괴가 39%, 월류로 인한 붕괴가 36% 누수 및 지진 등 기타 요인으로 인한 붕괴가 25%를 차지하며, 이 중 지진으로 인한 붕괴가 6.25%를 차지한다(MOIS, 2018). 또한, 국제대담회(ICOLD)에서는 미국, 캐나다, 일본 등 주요국가별 댐의 손상 원인으로 월류로 인한 손상 30.8%, 침투로 인한 손상 7.7%, 누수로 인한 손상 10.3%, 침식으로 인한 손상 8.1%, 활동으로 인한 손상 19.8%, 지진으로 인한 손상 12.7%, 여수로 손상으로 인한 손상 1.7%, 기타 손상 8.9%를 발표하였다(ICOLD, 2005). 노후저수지의 붕괴는 인접 지역 시설물 및 도로에 피해를 유발하며, 농업용수 유출 등 재산 및 인명 피해가 예상된다. 따라서, 노후저수지 대한 안정성 검토가 필요하고, 이를 통해 노후저수지의 결함 요인에 대한 보수 및 보강이 요구된다.

지진은 저수지 붕괴에 영향을 주는 한 요소이다(MOIS, 2018). 국내 역사적 지진 발생 추이에 의하면 서기 2년부터 1904년까지 약 1,800회의 유감지진이 발생했으며, 그중 40회 이상이 인명과 재산에 피해를 발생시켰다(MOIS, 2017). 근래 국내에서 아날로그 관측시대(1978년~1998년)에 계측된 지진은 연평균 19.2회, 디지털 관측시대(1999년~2018년)에 계측된 지진은 연평균 69.9회로 분석되었다(KMA, 2018). 국내 지진 발생은 점진적으로 증가하는 추세이며, 최근 포항과 경주에서 국내 지진관측 이래로 규모가 가장 큰 지진이 잇따라 발생해 국내 지진에 불안감이 크게 증대되었다. 이에 따라 앞서 언급한 저수지의 붕괴원인과 댐의 손상 원인에서 대부분을 차지하는 월류, 파이핑 및 활동에 의한 붕괴요인 뿐만 아니라 지진에 대한 안정성 검토가 요구되는 실정이다.

2. 연구 동향

기존의 저수지에 대한 안정성 검토는 Geo-Slope사의 Seep/w 및 Slope/w 프로그램을 활용하였다. Seep/w를 활용한 침투해석을 통해 파이핑과 침투유량에 대한 안정성을 평가하고, Slope/w를 활용한 사면안정해석을 통해 활동파괴에 대한 안전율을 산정한다. 수치해석에 사용되는 저수지의 지반 및 제체 등 저수지 구조물의 물성치는 주변 인근 시추공 자료 또는 문헌을 통해 선정하였다.

지반의 물성치는 같은 층임에도 불구하고 지반의 불균질성으로 인해 위치에 따라 상이한 값을 갖는다(Cho, 2011). 또한, 물성치 측정을 위한 채취 과정에서 시료의 교란, 기상 상황에 따른 오차, 실내시험 및 현장시험 과정에서의 오차 등으로 인해 다양한 불확실성이 존재하기 때문에 저수지 안정성 평가를 통한 위험도 평가의 한계가 존재한다(Lee and Jung, 2019).

확률론적 해석은 이러한 불확실성을 고려하기 위해, 붕괴 확률을 통해 위험도를 평가하는 기법이다(Jeong et al., 2011). 지반의 물성치는 현장의 특성이나 주변 환경에 따라 불확실성과 가변성이 존재하기 때문에 대푯값 선택에 어려움이 있다. 따라서 대푯값을 활용한 결정론적 해석 방법은 사면안정 해석에 정확도에 신뢰성을 저하시킨다(Tabba, 1984). 따라서 성공적이고 효율적인 안정성 평가를 위해서는 다양한 현장 특성이나 주변 환경에 따라 분포하는 불연속성의 특성을 파악하고 정량화하는 확률론적 해석기법이 요구된다(Feng and Lajtai, 1998; Park and West, 2001). 몬테카를로 시뮬레이션 기법(Monte Carlo Simulation, MCS)은 확률론적 해석기법의 하나로써 주요 강도 특성을 확률변수로 정의하여 확률밀도함수를 결정하고, 반복 과정을 통해 파괴확률을 산정하는 방법이다(Sung, 2007).

Major et al. (1978)은 확률론적 해석기법을 적용하여 암반 사면에 대한 안정성 해석을 수행하였다. Sung (2007)은 암반 사면의 구간별 확률 해석을 통해 불연속면의 연속성을 고려하여 실제와 근접한 안정해석을 수행하였다. Jeong (1998)은 지반정수의 변동성이 사면에 미치는 영향에 대해 파악하기 위해 신뢰성 해석을 수행하고, 민감도 분석을 통해 붕괴확률에 영향을 미치는 매개변수를 연구하였다. Jeon et al. (2013)은 화강풍화토의 불포화 지반정수에 대해 확률특성을 파악하고, 몬테카를로 시뮬레이션 기법으로 확률론적 사면안정 해석을 수행하였다. Choi et al. (2012)은 지반정수가 사면에 미치는 영향을 분석하기 위해 철도 표준 사면에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. Choi (2016)는 지반강도정수에 대해 확률론적 접근을 통한 신뢰성 분석을 토대로 지반강도정수가 갖는 변동성이 붕괴확률에 미치는 영향에 대해 검토하고, 이를 통해 결정론적 사면안정해석 및 신뢰성 해석을 종합적으로 수행하였다. Cho (2018)는 몬테카를로 시뮬레이션 기법으로 강우로 인한 사면의 붕괴에 대한 확률론적 사면안정

해석을 수행하였다. Lee and Jung (2019)는 노후저수지에 대해 지반강도정수와 수위의 변화에 따른 붕괴확률을 평가하였으며, 이를 통해 수위와 지반강도정수의 변동성에 따른 노후저수지의 붕괴확률을 분석하였다.

현재까지 확률론적 해석기법을 활용하여 암반 및 사면안정에 관한 연구는 많이 수행되었으나, 저수지의 안정성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 지진 및 호우를 고려한 저수지의 안정성 평가는 이뤄지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 해석 대상 저수지에 대하여 국내에서 발생한 지진을 고려하여, 확률론적 해석을 통한 노후저수지의 안정성을 평가하였다. 또한, 저수지 상류 사면의 수위와 지반강도정수의 변동성이 저수지 붕괴에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

3. 수치해석을 활용한 저수지 안정성 평가

3.1 수치해석 대상 저수지 형상 및 물성치

본 연구에서는 경북 경주시에 위치한 □□저수지를 대상으로 지진활동에 대한 침투해석 및 사면안정해석을 수행하고 확률론적 해석을 통해 붕괴확률을 산정하였다. 해석 대상 저수지의 단면 형상, 기본 제원, 댐마루(Crest of Dam), 평수위(Normal Water Level, N.W.L), 만수위(High Water Level, H.W.L), 상부 지반(Upper Layer) 및 하부 지반(Bottom Layer)은 Fig. 1과 같다. 인근 시추공 자료 및 국가건설기준을 활용하여 해석 대상 저수지에 대한 구조 및 지반 물성치를 산정하였으며, 저수지 정밀안전진단 보고서를 활용하여 수위 조건을 산정하였다. 해석 대상 저수지의 수치해석 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 1. Sectional Shape and Specification of Dam

Table 1. Numerical Analysis Condition

Classification	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Coefficient of Permeability (cm/s)
Riprap	20	0	40	1.8
Levee	19	15	35	1e-3
Upper Layer	19	0	35	1e-2
Bottom Layer	19	30	30	4e-4
Core	18	50	15	1e-7

3.2 침투해석 및 사면안정해석 이론

상류와 하류 사면의 수두차로 인해 하류 사면 방향으로 침투가 발생하고 침윤선이 형성된다. 이때, 침윤선은 제체의 다짐, 형상 및 축조 재료에 따라 달라진다. 침윤선을 통과한 침투수는 전단강도 저하와 파이프링 현상을 유발하고, 저수지의 유지관리와 내구성에 큰 영향을 준다. 본 연구에서는 Geo-slope사의 Seep/w를 활용하여 저수지의 침투해석을 수행하였다. Seep/w는 정상류와 부정류 조건 및 불포화토에 대한 해석이 가능한 지반 공학 해석 프로그램으로 Slope/w를 활용한 사면안정해석과 연계가 가능하다(Geo-Slope International Ltd., 2015a).

사면안정해석은 한계평형 이론을 토대로 사면에 발생한 전단응력과 사면의 전단강도의 비로 정의된 안전율에 근거한 해석법으로, 사면의 활동면을 따라 붕괴 가능성을 해석하는 방법이다. 본 연구에서는 Geo-slope사의 Seep/w를 통한 침투해석을 수행한 뒤, Slope/w와 연계하여 저수지의 사면안정해석을 수행하였다(Geo-Slope International Ltd., 2015b).

3.3 수치해석 대상 저수지 최대지반가속도

최근 포항에서 규모 5.4, 경주에서 규모 5.8의 지진관측 이래로 규모가 가장 큰 지진이 잇따라 발생해 국내 지진에 불안감이 크게 증대되었다.

지진이 발생하면 진원으로부터 지진파가 방사되어 지반을 따라 전파되면서 서로 다른 특성의 불연속면을 만나 반사 또는 굴절이 발생한다. 지진파의 전파속도는 지반의 강성에 의해 결정되며, 일반적으로 지반의 하부층에서 상부층으로 올라갈수록 강성이 저하되어 지진파의 전파속도는 느려진다. 이는, 동일한 지진이라 하더라도 해당 지역 지반의 특성 및 강성에 따라 지반가속도가 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 수치해석 대상 저수지의 신뢰성 높은 안정성 평가를 위해 저수지 인근 시추공 자료를 활용하여 지반의 깊이에 따른 특성을 분석하였으며, Illinois 대학교에서 개발한 DEEPSOIL 프로그램을 활용해 최근 발생한 포항과 경주 지진에 대한 수치해석 대상 저수지 지표면에서의 최대지반가속도를 산정하였다(Hashash et al., 2017). 그리고 저수지의 높이와 저수용량을 통해 내진 특등급 댐과 내진 1등급 댐으로 분류하고, 해당 저수지의 내진 등급에 따른 위험도 계수 1.4 (ME, 2019), 행정구역에 따른 지진구역

계수 0.11 g, 지반의 전단파속도에 따른 지반증폭계수 1.4, 균일형 흙댐 활중계수 1.2를 통해 설계지반가속도를 산정하였다(MOLIT, 2018). 포항과 경주 지진의 최대지반가속도와 설계지반가속도는 Table 2와 같다.

Table 2. Peak Seismic Ground Acceleration

Classification	Design	Pohang	Gyeongju
Horizontality (g)	0.258	0.2085	0.251
Verticality (g)	0.129	0.10425	0.1255

3.4 붕괴확률

확률론적 해석에 의한 붕괴확률이란 반복계산을 통해 산정한 안전율의 확률밀도함수로써, 안전율이 1보다 낮을 가능성을 확률로 나타낸 것이다(Bae and Park, 2002). 본 연구에서는 붕괴확률을 산정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용한 확률론적 해석을 수행하였다.

3.4.1 확률론적 해석

확률론적 해석을 위해서는 지반강도정수의 변동성을 고려하여 평균, 표준편차 및 분산계수 등을 결정한다. 평균은 확률분포곡선에서 확률변수 값의 평균을 말하며, 표준편차와 분산계수는 확률변수가 갖는 불확실성을 의미한다. 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 정밀확률기법으로 확률론적 해석에서 가장 많이 사용되는 해석 방법 중 하나이며, 이론상 결정론적 해석으로 표현 가능한 모든 모델에 활용 가능하다. 지반강도정수들의 근사적인 확률 분포를 산정한 후 0에서 1까지 확률적으로 등분포하는 임의의 수를 발생시킨다. 충분한 횟수만큼 단순 반복계산을 수행하고, 안전율의 확률밀도함수를 통해 붕괴확률을 산정한다. 본 연구에서는 확률론적 해석을 통해 해석 대상 저수지 입력변수의 변동계수 내에서 지진에 대한 붕괴확률을 산정하였으며, 해석 과정은 다음과 같다.

- (1) 해석모델의 상태함수인 사면안정해석 이론을 선택하고 입력변수의 확률특성인 평균, 표준편차 및 확률밀도함수를 입력한다.
- (2) 반복계산 시행 횟수를 입력하고 입력변수의 변동계수 내에서 무작위 난수를 생성하여 5,000회 반복계산을 수행한다.
- (3) 반복계산 통해 안전율의 확률밀도함수를 산정하고, 1보다 작은 안전율의 개수와 전체 안전율 개수의 비율을 통해 붕괴확률(Probability of Failure, P_f)을 산정한다. 붕괴확률은 Eq. (1)과 같이 표현되며 여기서, M은 1보다 작은 안전율의 개수, N은 전체 안전율의 개수를 나타낸다.

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

사면안정해석은 Bishop의 간편법을 사용하였다. 일반적으로 가장 폭넓게 사용되며, Bishop의 간편법은 Eq. (2)를 활용하여 안전율을 산정한다.

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

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

여기서, W는 각 절편의 중량, α 는 경사각, ϕ 는 내부마찰각, b는 절편의 폭, c는 점착력을 나타낸다. 본 연구에서는 저수지의 내부마찰각을 확률변수로 선택하여 수치해석에 적용하였다. 상류 사면의 수위 변화에 따라 지진이 붕괴확률에 미치는 영향을 파악하기 위해 평수위와 만수위에 대한 안정성 검토 수행하여 붕괴확률을 산정하였다.

3.4.2 변동계수

지반은 비균질·이방성 재료로써 물성치가 일정하지 않은 경우가 많다. 지반의 물성치는 응력분포, 수위변화, 시간 등의 환경요인에 의한 변화, 시험 과정에 따른 인위적인 오차, 사면안정해석 모델이 갖는 불확실성 등 다양한 요인들에 의한 불확실성이 존재한다. 지반강도정수의 불확실성은 3가지 주요 원인으로 나눌 수 있다. 첫째, 측정오차(Measurement Error), 둘째, 지반의 고유 변동성(Inherent Variability) 그리고 설계모델의 불확실성(Transformation Uncertainty)이다. 고유 변동성은 지반의 자연적, 화학적, 지질학적 생성과정에서 발생하며, 측정오차는 실내시험과 현장시험 시료의 교란, 시험절차, 시험종류 및 시험장비 등에 영향을 받는다. 이 두 가지 주요 원인들은 물성치의 분산으로 표현된다. 이러한 불확실성은 시험횟수를 증가시켜 최소화할 수 있지만, 시험횟수에 제한사항이 있을 경우 측정오차 범주 안에 포함된다(Kulhawy, 1992). 설계모델의 불확실성은 사면안정해석 프로그램을 활용한 모델링과 실제 현장조건과의 차이에 의한 한계성 오차라고 정의한다. 측정된 지반강도정수의 불확실성을 평가하기 위해서는 세 가지 불확실성 원인의 독립적인 분석이 필요하며, 이를 통해 특정지반의 고유변동성을 알 수 있다.

지반강도정수의 변동계수(Coefficient of Variation, COV)는 평균 또는 경향성으로부터의 불확실한 변동의 크기를 나타내며, 설계지반변수의 표준편차를 평균값으로 정규화시킨 값을 나타낸 것으로, Eq. (3)과 같이 표현된다.

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

여기서, μ 는 평균값, σ 는 확률변수의 표준편차를 나타낸다. 해석 대상 저수지에 대한 붕괴확률 평가를 위해 국내·외 문헌 및 사례를 통해 제시된 내부마찰각의 변동계수를 정리하였으며, Table 3과 같다.

4. 결과 분석

4.1 침투해석 및 사면안정해석 결과

Fig. 2는 평수위 조건에서 침투해석 및 사면안정해석 대표 결과를 나타낸다. 평수위와 만수위 조건에 대한 침투해석 및 사면안정해석을 수행했으며, 침투해석 결과 평수위와 만수위 모두 제체에 침윤선이 형성되고 투수성이 낮은 코어를 통과하면서 급격히 낮아진다. 또한, 침윤선 아래 위치한 제체와 상부지반을 통해 대부분의 유체가 침투하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 사면안정해석과 연계하여 안전율을 산정한다.

하류 사면에 대한 사면안정해석결과 평수위와 만수위 조건에서 안전율은 각각 1.94, 1.83로 나타났으며, 하류 사면 활동에 대한 최소 안전율인 1.20을 만족하는 것으로 나타났다. 상류 사면의 사면안정해석 결과 평수위와 만수위 조건에서 안전율은 각각 2.87, 3.15로 나타났으며, 상류 사면 또한 상류 사면 활동에 대한 최소 안전율인 1.20을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2 지진을 고려한 사면안정해석 결과

Fig. 3은 지진을 고려한 저수지의 사면안정해석 대표 결과를 나타낸다. 평수위와 만수위에 대해 지진을 고려한 사면안정해석을 수행하였다. 설계지반가속도를 고려하여 수평지반가속도 0.258 g, 수직지반가속도 0.129 g을 적용하면 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.15, 만수위일 때 1.09이다. 포항 지진을 고려하여 수평지반가속도 0.2085 g, 수직지반가속도 0.10425 g을 적용하면 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.24, 만수위일 때 1.18이다. 경주 지진을 고려하여 수평지반가속도 0.251 g, 수직지반가속도 0.1255 g을 적용하면 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.16, 만수위일 때 1.10이다.

Fig. 3. Slope Stability Analysis Considering Seismic at Each Water Level Condition

Table 3. COV of Inherent Soil Variability for Friction Angle

Distribution	Soil type	COV (%)	Reference
Normal	Sand	5-11	Jones et al. (2002)
	Clay & Silt	10-56	
	Clay	11-30	Onyejekwe (2012)
	Clay & Sand	5-15	Uzielli et al. (2006)
	Clay & Sand	6-21	Phoon and Kulhawy (1999)
	Silty Clay	26	Meyerhof (1970)
	Weathered soil	8	Kim et al. (2009)

Fig. 2. Seepage and Slope Stability Analysis

해석 대상 저수지의 지진을 고려한 사면안정해석 결과, 포항 지진을 제외하고, 평수위 시 하루 사면 활동에 대한 최소 안전율인 1.20을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

4.3 내부마찰각 변동에 따른 안전율의 확률분포

Fig. 4는 평수위와 만수위 조건에서 내부마찰각 변동계수 변화에 따른 하루 사면 안전율의 확률분포 대표 결과를 나타낸다. 변동계수가 증가함에 따라 최대 안전율은 증가하지만, 최소 안전율은 감소하게 된다. 또한, 평수위의 경우 설계지반가속도와 경주 지진 지반가속도에 대한 1보다 작은 안전율 값이 변동계수 8% 이상에서 나타나고, 만수위의 경우 설계지반가속도와 경주 지진 지반가속도에 대한 1보다 작은 안전율 값이 변동계수 4% 이상에서 나타난다. 이는 만수위의 경우 붕괴확률이 증가할 수 있음을 시사한다.

4.4 내부마찰각 변동에 따른 붕괴확률

Fig. 5는 평수위와 만수위 조건에서 내부마찰각 변동계수 변화에 따른 저수지의 붕괴확률을 나타낸다. 지진을 고려하

지 않은 경우 평수위와 만수위 모두 내부마찰각 변동계수 변화에 따른 저수지의 붕괴확률은 0%이다. 설계지반가속도를 고려한 경우, 평수위는 내부마찰각의 변동계수 5%까지 붕괴확률은 0%이고, 변동계수가 8% 및 10%일 때 붕괴확률은 각각 0.2% 및 0.48%이다. 만수위의 경우 내부마찰각의 변동계수 3%까지 붕괴확률은 0%이고, 변동계수가 4%~10%로 증가할 때, 붕괴확률은 0.06%~4.08%로 증가한다. 포항 지진 지반가속도를 고려한 경우, 평수위에서 내부마찰각의 변동계수 8%까지 붕괴확률은 0%이고, 변동계수 10%에서 붕괴확률은 0.08%이다. 만수위의 경우 내부마찰각의 변동계수 5%까지 붕괴확률은 0%이고, 변동계수 8%에서 붕괴확률 0.14%, 변동계수 10%에서 0.24%의 붕괴확률이 나타났다. 경주 지진 지반가속도를 고려했을 때, 평수위의 경우 내부마찰각의 변동계수 5%까지 붕괴확률은 0%이며, 변동계수 8%에서 붕괴확률 0.18%, 변동계수 10%에서 붕괴확률 0.28%로 나타났다. 만수위의 경우 내부마찰각의 변동계수 3%까지 붕괴확률은 0%이고, 변동계수 4~10%로 증가할 때 붕괴확률은 0.02~2.74%로 증가하였다.

(a) Distribution of $F \cdot S$ according to friction angle COV variation at normal water level condition (Design)

(b) Distribution of $F \cdot S$ according to friction angle COV variation at high water level condition (Design)

Fig. 4. $F \cdot S$ Distribution According to Friction Angle COV Variation at Each Water Level and Peak Seismic Ground Acceleration

(a) Probability of failure due to seismic (N.W.L)

(b) Probability of failure due to seismic (H.W.L)

Fig. 5. Comparison of Probability of Failure According to Change of COV Variation of Friction Angle

5. 결 론

본 연구에서는 침투해석과 사면안정해석을 통해 저수지의 지진에 대한 안정성을 평가하였다. 또한, 지반강도정수의 불확실성과 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 통해 지진으로 인한 노후저수지의 붕괴확률을 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 한계평형해석법에 의한 사면안정해석 결과, 해석 대상 저수지 하류 사면에 대한 안전율은 평수위일 때 1.94, 만수위일 때 1.83으로 수위가 증가함에 따라 안전율이 감소함을 보였다.
- (2) 지진 설계의 기준인 설계지반가속도 및 실 지진파인 포항 및 경주 지진을 고려하여 저수지의 안정성을 검토하였다. 설계지반가속도를 고려했을 때, 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.15, 만수위일 때 1.09를 나타냈다. 포항 지진 지반가속도를 고려한 경우에 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.24, 만수위일 때 1.18를 나타냈고, 경주 지진 지반가속도를 고려했을 때, 하류 사면의 안전율은 평수위일 때 1.16, 만수위일 때 1.10을 나타냈다. 평수위 시 포항 지진 지반가속도에 대한 하류 사면의 안전율을 제외하고, 하류 사면 활동에 대한 최소 안전율인 1.20을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 지진을 고려한 경우 현 상태의 저수지가 안정하지 않기 때문에 보수 및 보강이 필요함을 나타낸다.
- (3) 평수위와 만수위 조건에서 내부마찰각 변동계수 변화에 따른 하류 사면의 붕괴확률 산정 결과, 변동계수가 증가함에 따라 최소안전율이 감소하기 때문에 붕괴확률이 증가하였다. 또한, 평수위 조건에 비해 만수위 조건에서 붕괴확률이 더욱 크게 나타났다.
- (4) 해석 대상 저수지에 대한 안정성과 붕괴확률에 대한 종합적인 해석결과, 지진을 고려한 대상 저수지에 대한 안정성은 사면 활동에 대한 최소 안전율을 만족하지 못하며, 변동계수 증가에 따른 붕괴확률이 산정되었다. 이에 따라, 지진 발생 시 노후저수지에 대한 안정성 평가와 이를 토대로, 보수·보강이 요구된다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

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.
- Choi, E.J. (2016). *Slope stability analysis with statistical consideration of variability of soil strength parameters*. Master's thesis, Korea University.
- 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. (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.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., et al. (2017). *DEEPSOIL 7.0, user manual*. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
- International Commission on Large Dam (ICOLD). (2005). *Risk assessment in dam safety management*. Bulletin 130.
- 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.
- Jones, A.L., Kramer, S.L., and Arduino, P. (2002). *Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering*. 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 Meteorological Administration (KMA). (2018). *Domestic earthquake occurrence trend*.
- 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 (GPS 31)* (pp. 95-115). New York, NY, USA: American Society of Civil Engineering.
- 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.
- Lee, Y.H., and Lee, D.W. (2017). Effective method for remodeling of deteriorated agricultural reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, No. 4, pp. 43-52.
- 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, USA, pp. 45-56.
- Meyerhof, G.G. (1970). Safety factors in soil mechanics. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 349-355.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *KDS 54 17 00: Seismic design of dam*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). *KDS 17 10 00: General seismic design*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Earthquake 9.12*. pp. 25-27.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2018). *Evaluation technology of reservoirs maintenance priority based on risk analysis*.
- 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.
- Sung, S.K. (2007). *Probability analysis of rock slope using discontinuities persistence and zoning*. Master's thesis, Kangwon National University.
- Tabba, M.M. (1984). Deterministic versus risk analysis of slope stability. *Proceedings of 4th International Symposium on Landslides*, pp. 491-498.
- 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, Two volume set* (pp. 1653-1752). Taylor & Francis.

Received	June 3, 2020
Revised	June 3, 2020
Accepted	June 11, 2020