

사면의 구역 및 절리의 연장성을 고려한 암반사면의 안정성 확률해석

장보안* · 성숙경 · 장현식

강원대학교 지구물리학과

Probability Analysis of Rock Slope Stability using Zoning and Discontinuity Persistence as Parameters

Bo-An Jang*, Suk-Kyung Sung, and Hyun-Sic Jang

Department of Geophysics, Kangwon National University

사면의 안정성 분석에 결정론적인 방법이 최근까지 많이 사용되어 왔으나, 암반의 불확실성과 가변성을 고려하는 확률론적인 방법이 더욱 효과적인 것으로 알려지면서 확률론적인 방법의 사용이 점차 증가하는 추세이다. 그러나 현재까지의 방법들은 절리의 특성이나 암반의 풍화 특성 등과 같은 암반의 특성이 사면 전체에서 균질한 것으로 가정하고 있으며, 암반 사면의 파괴에 가장 결정적인 변수인 절리의 연장성을 고려하지 않은 상태에서 안전율 혹은 파괴확률을 계산하여 사면의 안정성을 분석하고 있어서 정확한 사면 안정성 분석에 한계를 보이고 있는 실정이다. 이 연구에서는 모델 사면을 설정한 후, 사면이 균질하다고 가정한 경우와 사면을 암반 및 절리의 상태에 따라 구역으로 분할한 경우의 파괴확률을 계산하여 비교하였고, 또한 위의 각각의 경우에 절리의 연장성을 변수로 고려한 파괴확률을 계산하였다. 또한 강원도 홍천군에 위치한 사면을 구역으로 분할한 후 절리의 연장성을 고려한 파괴확률을 계산하여 모델 분석의 적용성을 검증하였다.

주요어 : 모델 사면, 사면의 안정성, 구역화, 연장성, 파괴확률

In analysis of slope stability, deterministic analysis which yields a factor of safety has been used until recently. However, probability of failure is considered as a more efficient method because it deals with the uncertainty and variability of rock mass. In both methods, a factor of safety or a probability of failure is calculated for a slope although characteristics of rock mass, such as characteristics of joints, weathering degree of rock and so on, are not uniform throughout the slope. In this paper, we divided a model slope into several zones depending on conditions of rock mass and joints, and probabilities of failure in each zone are calculated and compared with that calculated in whole slope. The persistence of joint was also used as a parameter in calculation of probability of failure. A rock slope located in Hongcheon, Gangwondo was selected and the probability of failure using zoning and persistence as parameter was calculated to confirm the applicability of model analysis.

Key word : model slope, slope stability, zoning, persistence, probability of failure.

서 론

최근 인구의 증가와 급격한 산업발달로 철도, 터널, 택지개발 등 각종 건설공사가 활발히 진행되고 있으며, 국가 기반시설에 대한 투자 확충으로 신설도로가 급격히 증가하고 기존의 도로 또한 확장되고 있다. 국토의 대부분이 산악지대인 우리나라는 건설공사나 도로건설 시 사면을

절취하는 경우가 빈번히 발생하고 있으며, 절취사면의 붕괴로 인한 인적, 물질적 손실이 매년 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 절취사면의 유지관리에 대한 중요성이 대두되고 있으며 합리적인 사면의 안정성 분석이 요구됨에 따라 그에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

일반적으로 암반 사면의 안정성을 분석하기 위해서는

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

암반내의 각종 지질적인 요소들을 조사, 분석 하여야 한다. 지질적인 요소란 불연속면의 연장성과 방향성 등을 포함하는 불연속면의 물리적, 역학적 특성을 말하는 것으로 사면의 안정성을 좌우하는 중요한 요소이다. 이러한 지질적인 요소를 이용하여 사면의 안정성을 파악하는 방법은 크게 경험적 방법과 운동학적(kinematic) 방법, 동역학적(kinetic) 방법 및 수치 해석적 방법으로 나눌 수 있다.

운동학적으로 사면의 안정성을 파악하는 방법으로는 평사투영법이 주로 사용된다. 평사 투영법은 불연속면과 사면의 상대적 방향성에 따라 기하학적인 파괴가능성 및 파괴형태를 판단하는 기초적인 방법으로, 사면의 안정성을 판단하기 위해서 우선적으로 수행되어야 한다. 평사투영법은 1959년부터 많은 학자들에 의해 여러 차례 제안되었으며, 특히 Hoek and Bray(1981)는 대원 투영법을 이용하여 암반사면의 안전성 해석 방법을 제시하였고, Richarts et al.(1978)은 현재 널리 이용되고 있는 극점 투영법을 제시하였다.

평사투영 결과, 사면이 붕괴 가능성을 내포하고 있으면 동역학적 해석이 수행된다. 동역학적 해석은 일반적으로 한계평형법(limit equilibrium)이 사용되며, 결정론적 방법(deterministic method)뿐만 아니라 확률론적 방법(probabilistic method)에도 적용 가능하다. 한계평형 해석은 파괴면에서 파괴를 일으키는 힘(driving force)과 파괴에 저항하는 힘(resisting force)의 관계를 비교하여 안전율로 표현함으로써 지반의 안정성을 평가하는 방법으로, 이 두 힘의 결정에 가장 중요한 요인은 불연속면의 전단강도 특성이다. 이러한 전단강도 특성은 그 중요성이 계속 강조되어 왔으며(Patton, 1966; Goodman, 1970; Barton, 1973), 전단강도 특성을 결정하는 모델의 적용에 따라 다른 해석 결과를 야기할 수 있으므로 다양한 강도 특성 모델의 적용에 따른 해석결과의 차이를 연구 할 필요가 있다. 대부분의 전단강도 특성은 모아-쿨롱(Mohr-Coulomb)의 선형적 전단강도 특성을 이용하는데 그치고 있으며(Low, 1997; Feng and Lajtai, 1998; 배규진과 박혁진, 2002), Barton and Choubey (1977)의 비선형 전단강도가 사면 안정에 미치는 영향을 연구한 예는 많지 않다(윤우현과 천병식, 2003). 또한 암반사면의 안정성 평가는 일반적으로 전단강도 특성을 하나의 대표 값으로 규정하여 해석하므로 많은 문제점들을 내포하고 있다. 즉, 대표 값이 현장 특성이나 환경의 가변성(variability)과 불확실성(uncertainty)을 고려하기 힘들뿐만 아니라, 구조물의 안정성을 파악할 때 자료들 중에서 상대적으로 중요한 역할을 담당하

는 대표 값을 선택하는데 어려움이 있다. 따라서 고정된 대표 값을 사용하는 결정론적 해석 방법은 사면안정 해석에 성공적으로 적용될 수 없으므로(Tabba, 1984), 다양한 생성환경에 따라 불규칙하게 분포하는 불연속면의 특성을 정량화하고 보다 효율적으로 안정성을 평가하기 위해서는 확률론적 안정 해석이 요구된다(Feng and Lajtai, 1998; Park and West, 2001; 배규진과 박혁진, 2002). 확률론적 안정해석에 일반적으로 사용되는 몬테 카를로 모사(Monte Carlo Simulation) 기법은 주요 강도 특성을 확률변수(random variable)로 정의하여 확률 밀도함수(probability density function)를 결정하고 안전율(factor of safety)을 구하는 과정을 여러 차례 반복하여 파괴확률(probability of failure)을 구하는 방법이다. 암반사면에서는 1978년에 안정성을 해석하는 방법으로 처음 사용되기 시작했으며(Major et al., 1978; Kim and Major, 1978), 그 이후로 많은 연구가 이루어지고 있다(Kulatilake et al., 1985; Muralha, 1991; Muralha and Trunk, 1993; Nilsen, 2000; Park and West, 2001; 배규진과 박혁진, 2002; 윤우현과 천병식, 2003).

이러한 확률론적 안정해석을 수행하기 위해서는 먼저 확률밀도함수를 알아야 한다. 확률밀도함수는 특정 구간에서의 확률 변수가 믿을 수 있는 값을 가질 수 있는 관계를 설명하는 함수로, 불연속면의 특성은 주로 음지수 분포(Hudson and Priest, 1979; Wallis and King, 1980; Baecher, 1983; Priest, 1993), 대수정규분포(Narr and Suppe, 1991) 등을 따르는 것으로 보고되었다. 특히 내부 마찰각에 대한 확률분포특성에 대해 진행된 여러 연구 결과, 현재 가장 광범위하게 적용되는 내부마찰각의 확률 분포함수는 끝을 절삭한 정규분포이다(Mostyn and Li, 1993; Hoek, 2000; Nilsen, 2000; Pathak and Nilsen, 2004). 또한 국외에서는 암반사면의 안정성 해석에 매우 중요한 불연속면의 연장성을 확률분포에 의존하여 불연속면의 평균 연장이나 통계량을 획득하는 연구 방법(Crudon, 1977; Baecher, 1983; Preist and Hudson, 1981; Villaescusa and Brown, 1992)과 분포 독립적(distribution free) 접근을 통해 통계량을 획득하려는 연구들(Pahl, 1981; Kulatilake and Wu., 1984; Mauldon, 1998; Mauldon et al., 2001)이 수행되어 왔다. 그러나 우리나라에서는 아직 암반사면의 안정 해석을 수행할 때 불연속면의 연장성(persistence)을 고려하고 있지 않은 실정이다.

이 연구에서는 결정론적 방법에 의해 단일 안전율을 구하거나 하나의 사면에 동일한 입력 변수를 사용하던 기존의 연구방법과 달리 암반사면의 안정성을 효과적으로 해석

하기위한 방법을 모색하였다. 기존의 연구는 사면 전체에 대한 통합적인 해석으로, 풍화 정도에 따른 강도 변화 또는 절취면의 상태 변화에 따른 위험성의 차이를 고려하지 않은 해석이었다. 그러나 이 연구에서는 사면 내에 존재하는 다양한 풍화특성과 절리특성을 고려하여 전체 사면을 지반 특성에 따라 구간을 나누었으며, 각각의 구간별 안전율과 파괴확률을 계산하였다. 먼저 가상 사면의 모델링을 통하여 안정해석을 수행하였으며, 실제 암반사면의 사례 연구를 통하여 모델링의 적용성과 합리성을 검증하였다. 실제의 사면에 대해서는 평사투영을 통하여 일차적으로 안정성을 확인하여 운동역학적으로 불안정할 가능성을 미리 고려해 주었으며, 파괴의 가능성을 내포하는 면에 대해서 안정해석을 수행하였다. 사면의 확률론적 안정해석을 위해서 전단강도 특성 인자를 확률변수로 설정하였으며, 모아-쿨롱 파괴기준과 바튼-쥬베이(Barton-Choubey) 파괴기준을 이용하여 몬테카를로 모사 기법을 통해 안전율과 파괴 확률을 획득하였다. 또한 아직 우리나라에서는 실제 사면의 안정성 해석에 매우 중요한 요소인 불연속면의 연장성을 고려하지 않고 있어서, 이 연구에서는 불연속면의 연장성을 고려한 현실적인 파괴확률을 도출하고자하였다.

몬테 카를로 모사

몬테카를로 모사는 확률 해석방법에서 가장 많이 사용되는 방법으로서, 획득된 표본으로부터 모집단의 통계량에 가까운 다수의 표본을 산출한 후, 반복적인 계산을 통하여 확률을 계산한다. 즉, 입력변수의 근사적인 확률분포를 파악한 뒤 0에서 1까지 확률적으로 등분포(uniform)하는 임의의 수를 컴퓨터상에서 발생시킨 후, 이를 확률 변환을 통해 확률누적함수(cumulative density function)로 변환하면 실제로 발생할 수 있는 상황의 통계적인 분포를 재현할 수 있다. 몬테카를로 모사 방법은 시간적 제약 또는 다양한 요인에 의한 제한으로 현장조사나 실내실험이 충분히 이루어지지 못하여 객관성 있는 입력자료의 산출이 곤란할 경우 대표성 있는 설계 값을 산출하는데 유용하게 사용될 수 있는 방법이다.

몬테카를로 모사를 이용한 암반사면의 안정해석은 반복 계산을 통해서 도출된 다수의 안전율로부터 파괴확률을 계산하는 것이다. 반복적인 계산을 수행하기 위해서는 먼저 현장조사와 실내시험 등을 통하여 입력변수의 확률분포 특성을 파악한 후, 앞서 언급한 바와 같이 난수발생과 확률누적함수로의 변환과정을 거쳐서 각 입력변수의 확률분포특성과 동일한 분포를 갖는 다수의 자료들을 만들어야

한다. 이렇게 만들어진 입력자료들을 이용하여 충분한 횟수만큼 안전율을 반복적으로 계산한 후 안전율 분포함수로부터 안전율이 1보다 낮은 확률을 계산하여 파괴확률을 산정하게 된다(Tobutt, 1982). Fig. 1은 몬테카를로 모사를 이용하여 사면의 파괴확률을 계산하는 과정을 나타낸 것이다.

모델 사면에 대한 연구방법

모델 설정

높이가 25 m, 경사가 60°이고, 사면 내에는 사면과 주향이 유사하고 경사가 40°인 절리가 관통하고 있어서 평면 파괴의 가능성이 있는 건조한 암반사면을 모델로 설정하였다(Fig. 2).

한계평형해석

사면의 안전율은 파괴 블록의 미끄러짐을 유발시키는 힘(D)에 대한 미끄러짐에 저항하는 힘(R)으로 계산되어 $F_s = R/D$ 이 된다. 여기서 $R = \tau_f A$ 이고 τ_f 는 절리면의 전

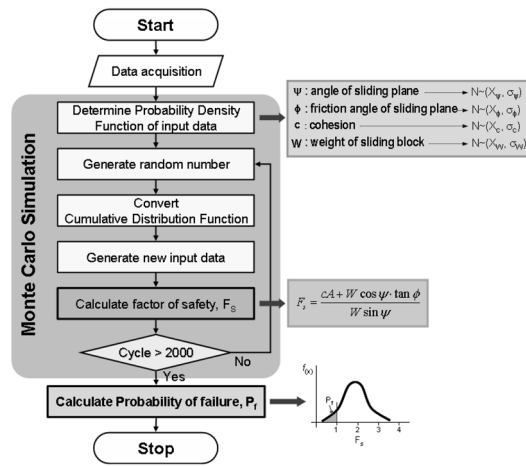


Fig. 1. Flowchart for Monte Carlo Simulation.

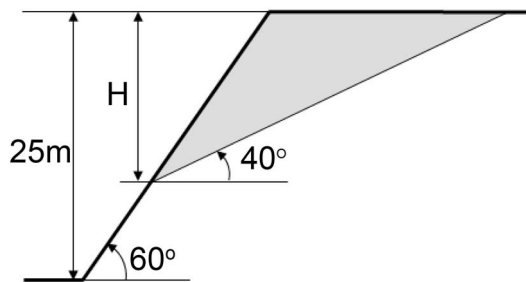


Fig. 2. Model slope.

단강도, A는 절리면의 면적이다. 절리면의 전단강도에 모아-쿨롱 파괴기준(Mohr-Coulomb failure criterion, 이하 M-C 기준)을 사용하면 안전율은 식 (1)과 같고, 바톤-췌베 이 파괴기준(Barton-Choubey failure criterion, 이하 B-C 기준)을 사용하면 안전율은 식(2)와 같이 표현된다.

$$F_s = \frac{cA + W \cos \psi_p \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (1)$$

- c : 절리면의 점착력
- A : 절리면의 면적
- W : 블록의 무게
- ψ_p : 절리면의 경사각
- ϕ : 절리면의 내부 마찰각

$$F_s = \frac{\sigma_n \tan \left(JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right)}{W \sin \psi_p} \quad (2)$$

- σ_n : 절리면에 작용하는 수직응력(= $\frac{W \cos \psi_p}{A}$)
- JRC : 절리 거칠기 계수
- JCS : 절리 일축압축강도
- ϕ_b : 기본마찰각

지반강도 정수의 결정

위에서 기술한 안전율의 계산에는 점착력, 최대 마찰각, 기본마찰각, 절리거칠기 계수(JRC) 및 절리면 압축강도(JCS)의 입력변수가 필요하다. 일반적으로 지반공학 문제들의 입력변수들은 정규분포를 따른다고 보고된 바 있으므로(Mostyn and Li, 1993; Hoek, 2000), 점착력(c)은 평균이 0.026 MPa이고 표준편차가 0.01 MPa, 최대 마찰각(ϕ)은 평균이 36.9°이고 표준편차가 4.78°, 기본마찰각(ϕ_b)은 평균이 25.7°이고 표준편차가 3.70°인 정규분포를 따르는 것으로 가정하였고, JRC는 최소 5.5에서 최대 8.5, JCS는 55 MPa~105 MPa 범위에서 일정한 값을 가지는 균등분포(Uniform distribution)로 가정하였다(Fig. 3).

안전율 및 파괴확률의 계산

안전율은 파괴가 발생하는 절리면의 위치 및 입력변수 값에 따라 변하므로 2000회의 몬테카를로 모사를 통하여 안전율을 계산하였다. 안전율의 분포곡선을 그리면 Fig. 4와 같으며, 분포곡선 혹은 분포 히스토그램에서 안전율이 1.0 이하인 부분의 백분율을 구하면 사면의 파괴 확률이 된다.

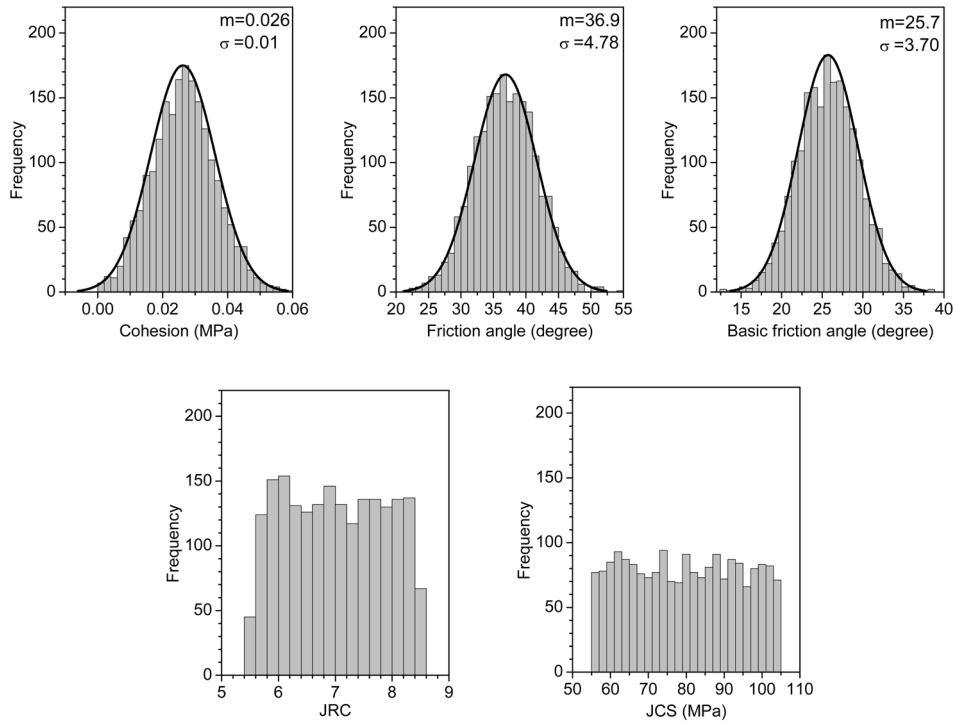


Fig. 3. Distributions of input parameters. m and σ represent mean and standard deviation.

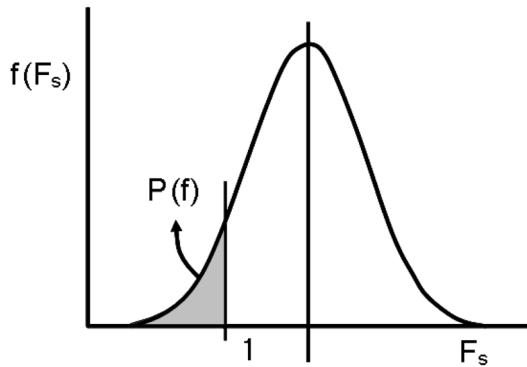


Fig. 4. Calculation of failure probability. $f(F_s)$ is frequency of safety factor and $P(f)$ is probability of failure.

구간별 안전율 및 파괴확률의 계산

절리면의 위치는 안전율에 매우 큰 영향을 미치므로, 절리면이 사면에 노출되는 위치(daylight point)를 사면을 높이에 따라 10개의 구간으로 나누어, 절리가 각 구간에만 분포할 때 사면의 안전율과 파괴확률을 계산하였다 (Fig. 5).

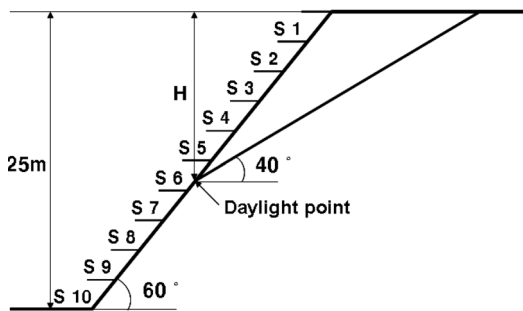


Fig. 5. Sectional division of model slope.

불연속면의 연장성을 고려한 파괴확률 계산

위의 파괴확률 계산은 절리가 사면의 전체를 관통하는 것으로 가정하여 절리가 사면의 하부에 분포하고 있을 때에는 매우 긴 절리가 발달하여야 사면의 파괴가 발생한다. 그러나 절리의 연장성은 음지수분포($f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$)를 보이는 것이 일반적이므로(Priest and Hudson, 1981), 매우 긴 절리가 발달할 확률은 매우 낮으며, 또한 사면의 파괴확률 역시 매우 낮아진다. 그러므로 사면의 정확한 파괴확률을 계산하기 위해서는 절리의 연장성을 고려하여야 한다. 절리의 연장성 분포는 (1) $\lambda = 0.3814$ 일 경우(95%의 절리 연장성이 7.9m 이하, 즉 사면의 상부에서 아래로 4.8m 지점까지만 관통하는 절리가 존재), (2) $\lambda = 0.1144$ 일 경우 (95%의 절리 연장성이 26.2m 이하, 즉 사면의 상부에서 아래로 16.7m 지점까지만 관통하는 절리가 존재) (3) $\lambda = 0.0763$ 인 경우 (95%의 절리의 연장성이 39.3m 이하, 즉 사면의 모든 지점에 관통하는 절리가 존재)의 3가지 경우를 가정하였다 (Fig. 6). 절리면의 연장성을 고려한 파괴확률은 절리의 연장성을 고려하지 않은 파괴확률에 파괴면의 길이보다 긴 불연속면이 사면에 분포할 확률의 곱으로 계산되며, 식 (3)과 같다. 몬테카를로 모사에서 파괴면의 위치는 임의의 위치에 발생하도록 설정되었으므로, 파괴면의 길이는 일정하지 않고 파괴면의 위치에 따라 다르게 되고, 따라서 모든 파괴면의 길이의 평균을 파괴면의 길이로 사용하였다.

$$P_{fp} = P_f \times P_p \tag{3}$$

여기서,

P_{fp} : 절리면의 연장성을 고려한 파괴확률

P_f : 절리의 연장성을 고려하지 않은 파괴확률

P_p : 파괴면의 평균길이 보다 긴 불연속면이 사면에 분포할 확률

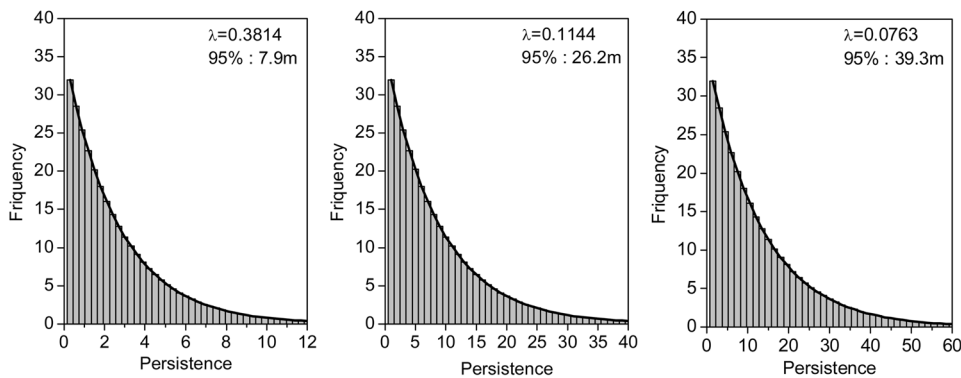


Fig. 6. Histograms of discontinuity persistence.

모델사면의 안정성 해석

전체 사면의 안정성 해석

전체 사면에 대하여 몬테카를로 모사를 실행하여 약 2000개의 안전율과 파괴확률을 계산하였다(Fig. 7). 전단 강도에 M-C 기준을 적용하였을 때 안전율은 0.65부터 42.7까지 매우 넓은 범위에서 감마분포와 유사한 분포를 보이며, 0.8에서 8.0의 범위에서 대부분의 안전율이 분포하였다(Fig. 7(a)). 평균값은 2.30이고, 최빈값은 1.2~1.4로 건조한 사면을 대상으로 계산한 안전율로서는 낮은 값을 보여 우기 시에는 안전에 문제가 있을 것으로 판단된다. 파괴확률 또한 5.86%로 Priest and Brown(1983)이 안전한 사면으로 제시한 파괴확률 1%를 상회하므로 불안정성을 상당히 내포하고 있다고 판단된다.

B-C 기준을 적용하면 안전율은 0.74에서 3.31의 상당히 좁은 범위로 분포하며 대수정규분포와 매우 유사하다(Fig. 7(b)). 평균은 약 1.40이고, 최빈값은 1.2~1.4로 건조

한 사면을 대상으로 계산한 안전율로서는 낮은 값을 보여 우기 시에는 안전에 문제가 있을 것으로 판단된다. 파괴확률은 4.24%로 M-C 기준을 사용하였을 때 보다는 낮으나 1%를 상회하므로 파괴될 범주에 해당한다(Table 1).

구간별 안정성 해석

사면을 높이에 따라 10개의 구간으로 나누어 최상부로

Table 1. Mean and mode of factors of safety and probability of failure in the model slope.

	Mean F_s	Mode F_s	(%)
M-C criterion	2.30	1.2~1.4	5.86
B-C criterion	1.40	1.2~1.4	4.24

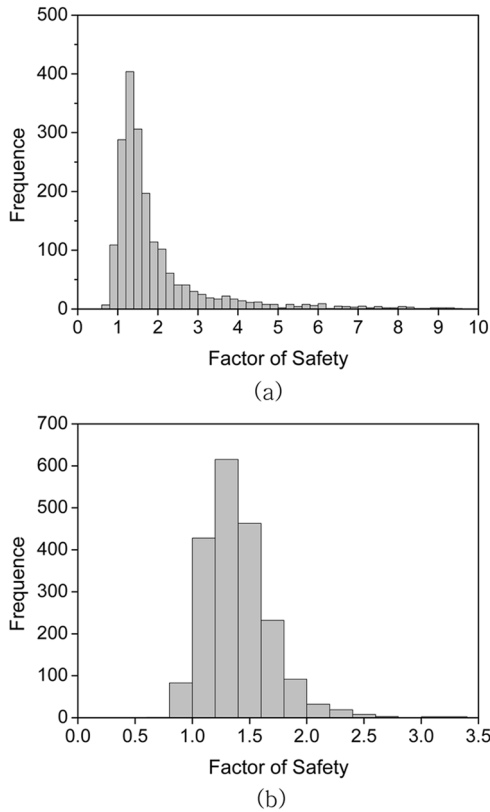


Fig. 7. Histograms of safety factors. (a) Mohr-Coulomb failure criterion is used. (b) Barton-Choubey failure criterion is used.

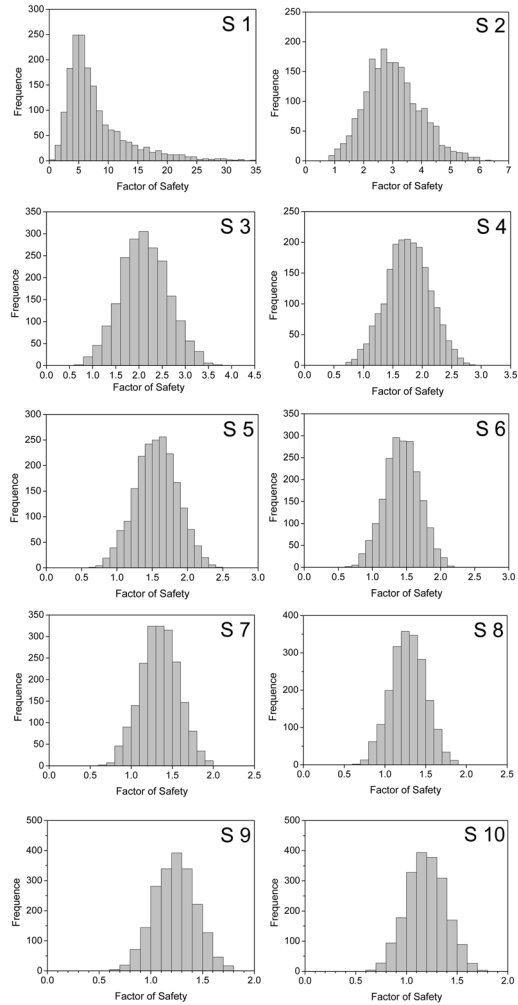


Fig. 8. Distribution of safety factor in each section when Mohr-Coulomb failure criterion is used.

Table 2. Mean and mode of safety factors and probability of failure in each section of the model slope.

Section	M-C criterion			B-C criterion		
	Mean F_s	Mode F_s	F_s (%)	Mean F_s	Mode F_s	F_s (%)
S 1	7.94	4.0~6.0	0.12	1.75	1.4~1.8	0.06
S 2	3.02	2.2~3.4	0.45	1.54	1.4~1.5	0.80
S 3	2.12	1.8~2.4	1.10	1.45	1.3~1.4	1.85
S 4	1.76	1.5~2.1	2.05	1.40	1.3~1.4	2.55
S 5	1.56	1.4~1.7	3.15	1.36	1.3~1.4	3.75
S 6	1.43	1.3~1.6	4.95	1.33	1.2~1.3	4.70
S 7	1.35	1.2~1.5	7.25	1.31	1.2~1.3	5.70
S 8	1.28	1.2~1.4	9.25	1.29	1.2~1.3	6.75
S 9	1.23	1.2~1.3	11.90	1.27	1.2~1.3	7.70
S10	1.20	1.1~1.3	15.15	1.26	1.2~1.3	8.85

부터 구간 1에서 구간 10으로 설정하였으며(Fig. 5), 절리면의 위치를 각 구간 내로 한정하고 몬테카를로 모사법으로 2000회의 구간별 안전율과 파괴확률을 계산하였다.

전단강도에 M-C 기준을 사용하면 각 구간별 안전율의 분포는 Fig. 8과 같다. 상부의 구간 1의 경우는 안전율의 분포가 감마분포의 형태를 보이나 구간 2 이하에서는 정규분포를 따르는 안전율의 분포를 보여준다. 안전율의 평균은 구간 1에서 7.94로 최대이나 구간 2에서는 3.02로 급격히 감소하였고, 이후 구간에서는 점차적으로 감소하여 구간 10에서는 1.2로 최소값을 나타낸다. 안전율의 최빈값 범위 역시 구간 1에서 가장 높은 4.0~6.0의 범위를 보이다가 구간 2에서 2.2~3.4로 급격히 감소한 후 구간 10까지 점차적으로 감소하는 양상을 보인다(Table 2). 파괴확률은 구간 1에서 0.12%, 구간 2에서 0.45%로 안전성 판정기준 1% 이하이나 구간 3에서부터 1%를 상회하여 구간 10에서는 15.15%의 매우 높은 파괴확률을 보인다.

전단강도에 B-C 기준을 사용하면 모든 구간에서 안전율의 분포는 정규분포를 따른다(Fig. 9). 안전율의 평균은 구간 1에서 1.75이고 하부로 갈수록 매우 점진적으로 감소하여 구간 10에서는 1.26의 값을 보이며, 안전율의 최빈값 역시 구간 1에서 1.4~1.8 범위로 최대를 보이다가 하부로 갈수록 점진적으로 감소하여 구간 6부터 10까지는 1.2~1.3 범위를 보여 M-C 기준을 사용하였을 때 보다 안전율의 변화가 매우 적다(Table 2). 파괴확률은 구간 1에서 0.06%, 구간 2에서 0.80%로 안전성 판정기준 1% 이하이나, 구간 3에서부터 1%를 상회하여 구간 10에서는 최대 8.85%의 파괴확률을 보여 M-C 기준과 비교할 때 파괴확률의 값은 낮으나 유사한 증가 형태를 보인다.

M-C 기준과 B-C 기준을 이용하여 계산된 각 구간의

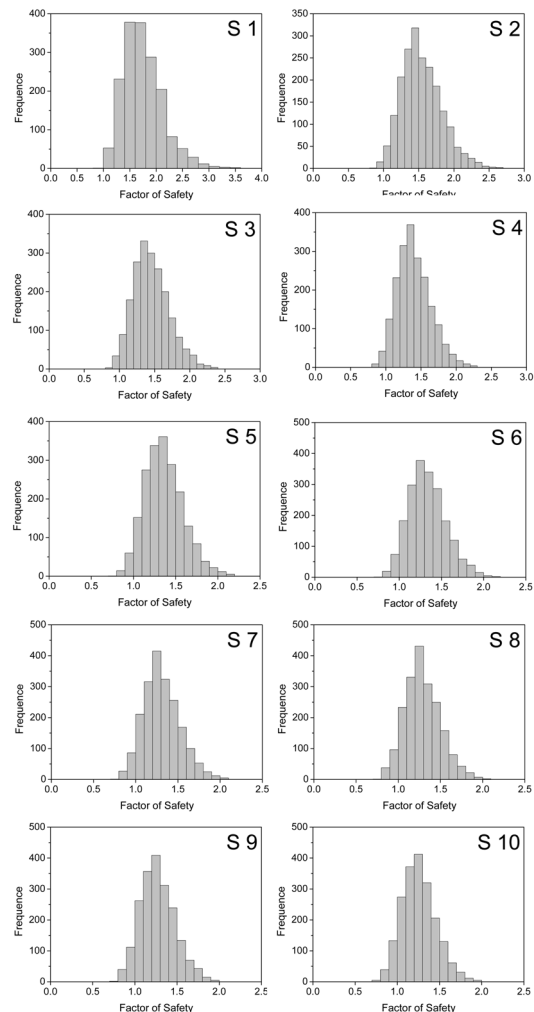


Fig. 9. Distribution of safety factor in each section when Barton-Choubey failure criterion is used.

안전율은 상부구간에서는 매우 큰 차이를 보이는 반면에 하부구간에서는 비슷한 양상을 보인다. M-C 기준을 사용한 경우 미끄러지는 블록의 크기가 가장 작은 구간 1의 평균 안전율은 7.94, 구간 2에서는 3.02로 매우 큰 안전율을 보인다. 이 구간들에서는 블록의 크기가 매우 작아서 절리면에 작용하는 수직응력이 매우 작기 때문에, 점착력이 전단강도에 상대적으로 큰 영향을 미쳐서 큰 안전율이 계산된 것으로 판단된다. 그러나 구간 3 이하에서는 블록의 크기가 충분히 커져서 점착력의 영향력이 감소하여 안전율 또한 점이적으로 감소하는 형태를 보인다. 반면에 B-C 기준을 사용한 경우 구간 1 및 구간 2의 평균 안전율은 1.75와 1.54로 구간 3 이하의 평균 안전율과 큰 차이를

Table 3. Probabilities of failure with and without using persistence as input parameter when Mohr-Coulomb failure criterion is used.

	Probability of failure (%)				
	without using persistence	using persistence			
		$\lambda=0.3814$	$\lambda=0.1144$	$\lambda=0.0763$	
whole slope	5.86	0.00	0.63	1.33	
section	1	0.12	0.06	0.09	0.10
	2	0.45	0.05	0.23	0.29
	3	1.10	0.03	0.36	0.52
	4	2.05	0.01	0.43	0.73
	5	3.15	0.00	0.43	0.83
	6	4.95	0.00	0.43	0.97
	7	7.25	0.00	0.40	1.05
	8	9.25	0.00	0.33	1.00
	9	11.90	0.00	0.27	0.96
	10	15.15	0.00	0.22	0.90

Table 4. Probabilities of failure with and without using persistence as input parameter when Barton-Choubey failure criterion is used.

	Probability of failure (%)				
	without using persistence	using persistence			
		$\lambda=0.3814$	$\lambda=0.1144$	$\lambda=0.0763$	
whole slope	4.24	0.00	0.46	0.96	
section	1	0.06	0.03	0.05	0.05
	2	0.80	0.09	0.41	0.51
	3	1.85	0.05	0.61	0.88
	4	2.55	0.01	0.54	0.90
	5	3.75	0.00	0.51	0.99
	6	4.70	0.00	0.41	0.92
	7	5.70	0.00	0.32	0.83
	8	6.75	0.00	0.24	0.73
	9	7.70	0.00	0.18	0.62
	10	8.85	0.00	0.13	0.53

보이지 않는다. B-C 기준에는 점착력 요소가 분포하지 않기 때문에 블록의 크기가 작은 경우에도 비교적 정확한 안전율을 계산할 수 있는 것으로 판단되고, 따라서 미끄러지는 블록의 크기가 작은 경우 B-C 기준을 사용하는 것이 M-C 기준을 사용하는 것보다 더 현실적이고 정확한 안전율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 구간 6 이하와 같이 미끄러지는 블록의 크기가 큰 경우에는 M-C 기준에 의한 안전율과 B-C 기준에 의한 안전율이 유사하여, 안정해석 여건에 따라 적절한 선택이 이루어진다면 M-C 기준과 B-C 기준 모두에서 신뢰성 있는 결과를 얻을

수 있을 것으로 판단된다.

절리의 연장성을 고려한 모델 사면의 파괴확률

Table 3, Table 4는 절리의 연장성을 고려한 모델사면의 파괴확률을 보여준다. 절리면의 전단강도에 M-C 기준을 사용한 경우 전체사면의 파괴확률은 5.86%로 분석되었으나, 절리의 연장성을 확률변수로 사용한 경우 절리의 연장성에 따라 파괴확률은 각각 0.00%, 0.63% 및 1.33%로 절리의 연장성이 매우 좋은 경우에만 1% 이상으로 해석되었다(Table 3). 각 구간별 파괴확률은 0.12%~15.15%이며 하부로 갈수록 증가하는 반면에 절리의 연장성을 확률변수로 사용한 경우 각각 0.00%~0.06%, 0.09%~0.43% 및 0.1%~1.05%로 감소하였고, 파괴확률 또한 구간 4 혹은 구간 7에서 가장 큰 값을 보이고 있다.

전단강도에 B-C 기준을 사용하면 전체사면의 파괴확률은 4.24%에서 0.00%~0.96%로 감소하였고, 구간별 파괴확률 또한 0.06%~8.85%의 범위에서 각각 0.00%~0.09%, 0.05%~0.61%, 0.05%~0.99%로 감소하였다(Table 4). 절리의 연장성을 고려하지 않은 경우에는 하부로 갈수록 파괴확률이 증가하며 상부의 1 및 2구간을 제외한 모든 구간에서 파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었으나, 절리의 연장성을 확률변수로 사용한 경우에는 일부 구간에서만 1%에 근접한 파괴확률을 보이며 구간 3 혹은 5에서 최대의 파괴확률을 나타내어 차이를 보인다.



Fig. 10. Picture of slope.

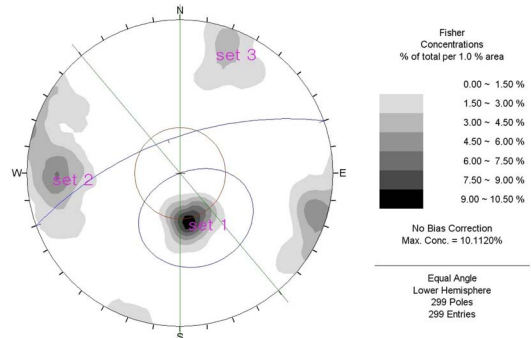


Fig. 11. Kinematic analysis of slope.

Table 5. Properties of discontinuities in slope.

	set 1	set 2	set 3
Orientation	39/350	78/088	81/200
Spacing (m)	0.1~2.5	0.3~2.5	1~2.5
persistence (m)	0.05~5.5	0.04~3	0.07~8
Roughness (JRC)	3~8	3~8	3~8
aperture (mm)	0~10	0~15	0~10
filing material	void/soil	void/soil	void/soil

암반사면의 안정해석 적용 사례

사면의 개요

사면은 국도 70번 도로에서 조금 벗어난 지역으로 행정 구역상 강원도 홍천군 서면 팔봉리에 위치하며, 춘천계 춘성층군 동산층에 해당하는 편마암 내지 편암으로 구성되어 있다(Fig. 10). 길이는 80 m, 높이는 22 m이고 사면의 경사방향은 340°이며 경사는 상부가 58°, 하부가 70°로 평균 64°이고, 39/350(절리군 1), 78/088(절리군 2)와 81/200(절리군 3)의 3개의 절리군이 분포하고 있다. 사면 내에 분포하는 불연속면의 특성은 Table 5와 같으며, Fig. 11은 각 절리군에 대한 평사투영 결과로, 절리군 1이 평면파괴

의 조건을 만족하므로 절리군 1에 대하여 확률해석을 통한 사면의 안정성 해석을 실시하였다.

지반강도 정수 결정

사면에서 11개의 절리면 시료를 채취하여 절리면 전단 시험을 실시하였다. 점착력은 평균 0.02 MPa, 표준편차 0.012 MPa인 정규분포를 보이고 있으나, 최대 마찰각은 33.2°~39.4°, 기본마찰각은 21.4°~28.8°, JRC는 6.6~8.8의 범위에서 균등하게 분포하고 있으며, JCS는 평균이 81.2 MPa, 표준편차가 35.34 MPa인 정규분포를 보인다(Fig. 12).

사면의 안전율 및 파괴확률 분석

풍화도와 암반 상태를 고려하여 사면을 상부, 중부, 하부의 세 구간으로 나누어 확률해석에 의한 안전성 평가를 수행하였다. 전단강도에 M-C기준을 사용하였을 때 전체 사면과 각 구간의 안전율 분포는 Fig. 13과 같다. 전체 사면의 안전율은 0.87에서 25.9 범위의 감마분포 형태를 보이나, 대부분의 안전율은 0.87~5.0 사이에 분포하며 평균은 2.0, 최빈값은 1.2~1.4이다. 파괴확률은 2.13%로 파괴 가능성이 높다고 판단된다. 상부구간의 안전율 분포는 0.99~28.27 범위에서 전체사면과 유사한 형태를 보

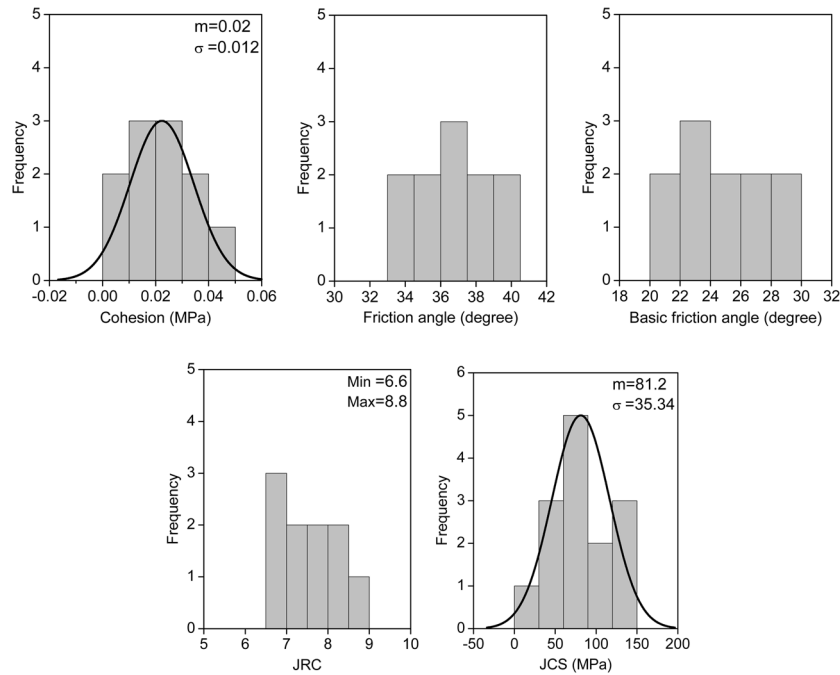


Fig. 12. Distribution of input parameters. m and represent mean and standard deviation, respectively.

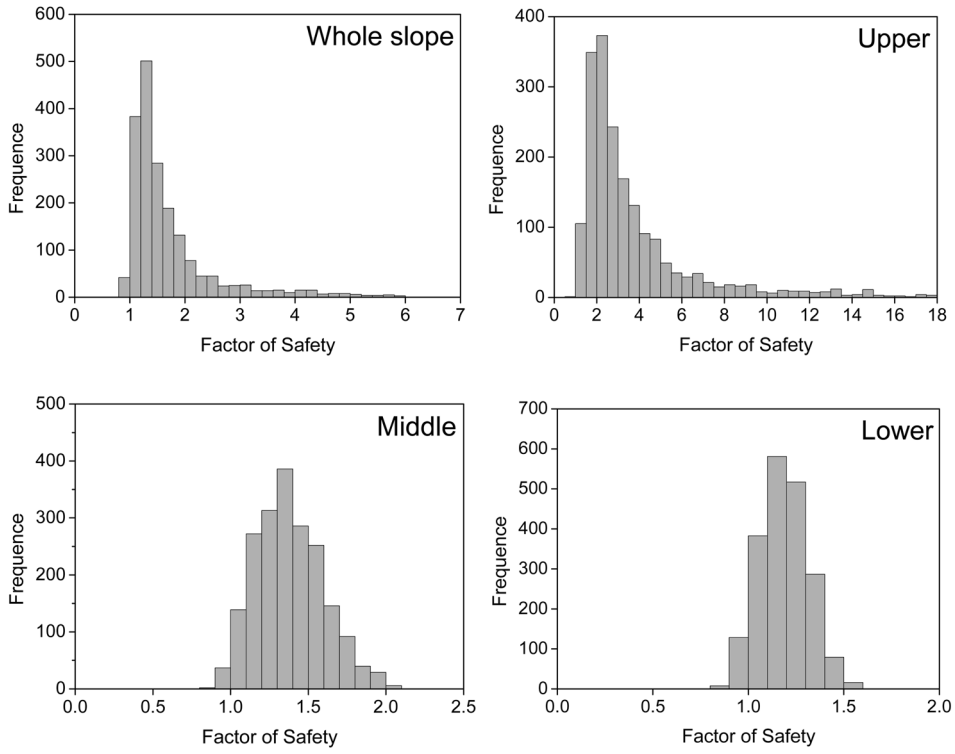


Fig. 13. Distribution of safety factors for whole slope and each section using M-C criterion.

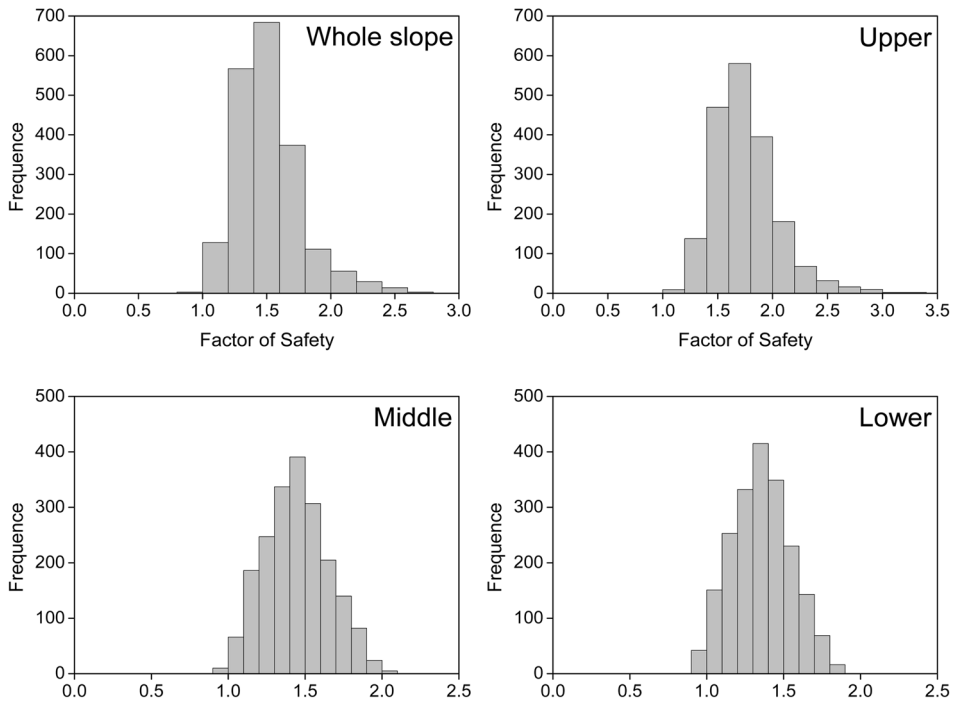


Fig. 14. Distribution of safety factors for whole slope and each section using B-C criterion.

이고, 평균은 3.91, 최빈값은 2.0~2.5이고, 파괴확률은 0.05%로 안전한 것으로 판단된다. 중부 구간 및 하부 구간의 안전율은 각각 0.88~2.08의 범위 및 0.86~1.57의 범위에서 정규분포의 형태를 따르고 있으며, 평균은 각각 1.38과 1.19이고 파괴확률은 1.95%와 6.85%로 파괴될 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

B-C 기준을 사용한 전체사면의 안전율은 0.92~2.96의 범위에서 정규분포와 거의 유사하게 분포하고 있으며, 평균은 1.52이고 파괴확률은 0.15%로 안전한 것으로 분석되었다(Fig. 14). 각 구간의 안전율은 상부로부터 1.05~3.31의 범위, 0.95~2.08의 범위 및 0.90~1.89의 범위에서 정규분포의 형태로 분포한다. 안전율의 평균은 1.75, 1.44, 1.36으로 상부구간은 안전하나 중부 및 하부구간은 불안정한 것으로 분석되었고, 파괴확률은 0%, 0.5%, 2.1%로 하부구간에서만 파괴될 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

연장성을 고려한 사면의 파괴확률 분석

사면에서 측정된 절리 연장성은 길이가 길어질수록 분포가 미약해지는 음지수분포의 형태를 보이고 있으며 ($\lambda=0.6845$), 95% 이상의 절리의 연장성이 4.4 m 이하이다(Fig. 15). 앞에서 설명한 바와 같이 절리의 연장성을 고려한 사면의 파괴확률은 절리의 연장성을 고려하지 않은 파괴확률에 파괴면의 평균길이보다 긴 불연속면이 사면

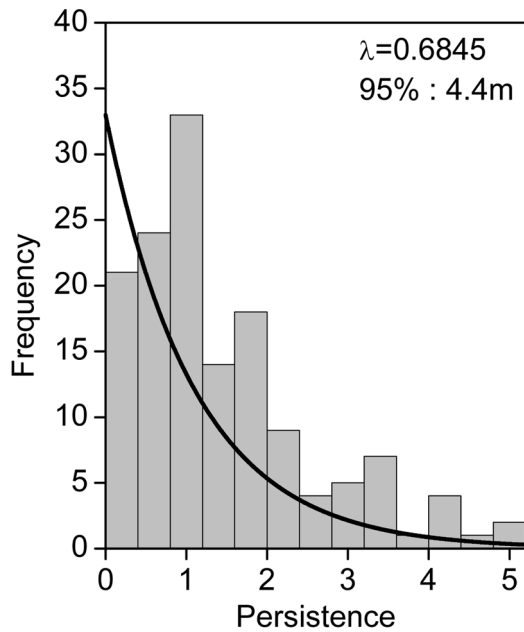


Fig. 15. Distribution of persistence measured in the slope.

Table 6. Probabilities of failure with and without using persistence as input parameter in slope.

		Probability of failure (%)	
		without using persistence	using persistence
Mohr-Coulomb criterion	whole slope	2.13	0.000
	upper	0.05	0.001
	middle	1.95	0.000
	lower	6.85	0.000
Barton-Choubey criterion	whole slope	0.15	0.000
	upper	0.00	0.000
	middle	0.50	0.000
	lower	2.10	0.000

에 분포할 확률의 곱으로 계산된다. 사면의 높이는 20m, 경사는 평균 64°, 절리의 경사각은 39°이므로 사면의 중앙을 관통하는 절리의 길이는 약 17m로 계산되어, 이러한 연장성을 가진 절리의 분포확률은 0.001% 정도이다. M-C 기준을 사용하여 계산된 연장성을 고려하지 않은 전체 사면의 파괴확률 2.13%와 절리의 분포확률의 곱은 거의 0%에 가까운 값을 보인다. 각 구간별 파괴확률은 상부로부터 0.05%, 1.95% 및 6.85%이고, 각 구간의 중앙을 관통하는 절리의 연장성은 5.7 m, 17.1 m, 28.5 m로 연장성을 고려한 각 구간별 사면의 파괴확률 또한 거의 0%에 가깝다. B-C 기준을 사용하여 계산된 연장성을 고려한 사면 파괴확률 또한 위의 모든 경우에 거의 0.0%에 가까운 값을 보여 사면은 안전한 것으로 판단된다(Table 6).

이 연구에서 분석된 사면은 형성된 후 10년 이상이 경과하였으나 현재까지 붕괴된 이력이 없으며 현재도 어떠한 파괴 징후도 보이지 않고 있다. 그러나 절리의 연장성을 고려하지 않고 실시한 안정성 분석은 파괴확률이 높은 것으로 분석되어서 현실과는 약간의 차이를 보이고 있으며, 연장성을 고려한 안정성 분석은 파괴확률이 거의 영(zero)에 가까워 현재 사면의 안정성을 정확하게 반영하고 있다고 판단된다.

결론 및 고찰

현재 사용되고 있는 확률론적 사면 안정해석은 사면의 지반강도 특성이 사면전체에서 균질한 것으로 간주하여 하나의 확률변수를 이용한 하나의 파괴확률로 사면의 안정성을 분석하고 있으며, 확률해석에서 고려된 절리는 사면을 관통하고 있는 것으로 가정하고 있다. 그러나 사면의 지반강도 특성은 암반의 풍화 상태, 지질적인 불균질성, 지질

구조적인 특성 등으로 인하여 사면전체가 균질하지 않은 경우가 많으며, 사면을 관통하는 매우 연장성이 좋은 절리가 발달할 확률 또한 낮은 것이 사실이다. 이 연구에서는 모델 사면을 설정한 후, 사면이 균질하다고 가정할 경우와 사면을 암반 및 절리의 상태에 따라 구역으로 분할한 경우의 파괴확률을 계산하여 비교하였고, 또한 위의 각각의 경우에 절리의 연장성을 변수로 고려한 파괴확률을 계산하였다. 또한 강원도 홍천군에 위치한 사면을 구역으로 분할한 후 절리의 연장성을 고려한 파괴확률을 계산하여 모델 분석의 적용성을 검증하였다.

모델사면의 확률해석은 몬테카를로 모사법을 이용하였으며, 절리면의 전단강도에는 M-C 기준과 B-C 기준을 적용하여 파괴확률을 계산하였다. 절리면의 전단강도에 M-C 기준을 적용한 경우, 전체사면의 파괴확률은 5.86%이고 각 구역의 파괴확률은 0.12%~15.15%로서 1구간 및 2구간을 제외한 모든 구간에서 파괴가능성이 있는 확률을 보인다. 파괴확률은 사면의 아래로 갈수록 증가하며 연장성이 매우 좋은 절리의 분포가 요구된다. 절리의 연장성을 입력변수로 사용하면 연장성이 매우 좋은 절리가 사면에 분포하고 있는 경우에 전체사면과 2개의 구간에서만 파괴확률이 1%를 초과하여 파괴의 가능성이 있으나 그 외에는 모든 구간에서 안정한 것으로 분석되어, 보다 현실적인 파괴확률을 제시하는 것으로 판단된다. B-C 기준을 사용한 경우도 M-C 기준을 사용한 경우와 유사하나, 전체사면 및 각 구간의 파괴확률이 M-C 기준을 사용하였을 때 보다 낮은 값을 보인다.

모델사면에서의 확률해석 방법을 강원도 홍천군 팔봉리에 위치한 사면에 적용하였다. 사면에 분포하는 절리의 연장성을 변수로 사용하지 않는 경우, 절리면의 전단강도 특성에 M-C 기준을 사용하면 전체사면 및 중부와 하부 구간에서 파괴가능성이 있는 것으로 분석되었고, B-C 기준을 사용하면 하부 구간에서만 파괴가능성이 있는 것으로 분석되었다. 그러나 사면에 분포하는 절리의 연장성을 변수로 사용하면 모든 구간에서 파괴확률은 영(zero)에 가까운 값으로 분석되었으며, 연구사면이 형성된 후 10년 이상 경과하였으나 현재까지 붕괴된 이력이 없으며 현재도 불안정한 징후가 발견되지 않아서 절리의 연장성을 변수로 사용하여 분석한 파괴확률이 보다 현실적인 것으로 판단된다.

연장성을 고려한 사면의 파괴확률 분석은 불연속면의 발달특성을 통계적으로 충분히 조사할 수 있으나 사면의 예상 파괴지점(또는 파괴면)을 확인하지 못하였을 때 가장 유효하게 사용될 수 있다. 그러나 파괴면의 위치나 특성을 충분히 확인할 수 있을 경우에는 연장성에 대한 고려가 불필

요하므로, 연장성을 고려한 확률적 안정해석은 사면의 조건에 따라 선택적으로 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 인장균열과 지하수위의 위치 변화, 불연속면간의 연결성에 대한 고려 및 다양한 현장상황에 대한 적용성 문제에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 배규진, 박혁진, 2002, 불연속면의 확률특성을 고려한 암반사면의 평면파괴확률 산정, 한국지반공학회지, 18, 97-105.
- 윤우현, 천병식, 2003, 불연속면의 비선형 전단강도를 이용한 암반사면 쉐기파괴 확률 해석, 한국지반공학회지, 19, 151-160.
- Baecher, G. B., 1983, Statistical analysis of rock mass fracturing, J. Math. Geol., 15, 329-348.
- Barton, N. R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Eng. Geol., 7, 287-332.
- Barton, N. R. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech., 10, 1-54.
- Cruden, D. M., 1977, Describing the size of discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, 133-137.
- Feng, P. and Lajtai, E. Z., 1998, Probabilistic treatment of the sliding wedge with EZSlide, Eng. Geol., 50, 153-163.
- Goodman, R. E., 1970, The deformability of joints, in determination of the in-situ modulus of deformation of rock, Amer. Soc. Testing and Mat. Special Tech. Pub., 477, 174-196.
- Hoek, E., 2000, Rock engineering; Course notes by E. Hoek [Online], Available: <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>.
- Hoek, E. and Bray, J., 1981, Rock slope engineering, Inst. Min. Metal., London, 358p.
- Hudson, J. A. and Priest, S. D., 1979, Discontinuities and rock mass geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 339-362.
- Kim, H. and Major, G., 1978, Application of Monte Carlo techniques to slope stability analysis, Proc. 19th U. S. Symp. Rock Mech., Reno, Nevada, 28-39.
- Kulatilake, P. H. S. W., Finley, R. E., and Ghosh, A., 1985, Effect of variability of joint orientation and strength on factor of safety of wedge stability, Proc. Int. Symp. Fund. Rock Joints, Bjorkliden, Lapland, Sweden, 25-34.
- Kulatilake, P. H. S. W. and Wu, T. H., 1984, Estimation of mean trace length of discontinuities, Rock Mech. Rock Eng., 17, 215-232.
- Low, B. K., 1997, Reliability analysis of rock wedges, J. Geotech. Geoenv. Eng., 123, 498-505.
- Lumb, P., 1966, The variability of natural soils, Can. Geotech. J., 3, 74-97.
- Major, G., Ross-Brown, D., and Kim, H., 1978, A general probability analysis for three dimensional wedge failure, Proc. 19th U. S. Symp. Rock Mech., Reno, Nevada, 45-56.
- Mauldon, M., 1998, Estimating mean fracture trace length

- and density from observation in convex windows, *Rock Mech. Rock Eng.*, 31, 201-216.
- Mauldon, M., Dunne, W. M., and Rohrbaugh, M. B., 2001, Circular scanlines and circular windows; new tools for characterizing the geometry of fracture traces, *J. Struc. Geol.*, 23, 247-258.
- Mostyn, G. R. and Li, K. S., 1993, Probabilistic slope analysis-state of play, *Proc. Conf. Prob. Methods in Geotech. Eng.*, Canberra, Australia, 89-109.
- Muralha, J., 1991, A probabilistic approach to the stability of rock slope, 7th Cong. ISRM, Aachen, Germany, 921-927.
- Muralha, J. and Trunk, U., 1993, Stability of rock blocks-Evaluation of failure probabilities by the Monte Carlo and first order reliability methods, *Int. Symp. Assess. Prev. Failure Phenom. in Rock Eng.*, Istanbul, Turkey, 759-765.
- Narr, W. and Suppe, J., 1991, Joint spacing in sedimentary rocks, *J. Struc. Geol.*, 13, 1037-1048.
- Nilsen, B., 2000, New trends in rock slope stability analyses, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 58, 173-178.
- Pahl, P. H., 1981, Estimating the mean length of discontinuity traces, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 221-228.
- Park, H. J. and West, T. R., 2001, Development of a probabilistic approach for rock wedge failure, *Eng. Geol.*, 59, 233-251.
- Pathak, S. and Nilen, B., 2004, Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 63, 25-32.
- Patton, F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Int. Congr. of Rock Mech.*, Lisbon, 1, 509-513.
- Priest, S. D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall, New York, 473p.
- Priest, S. D. and Brown, E. T., 1983, Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, *Trans. Inst. Min. & Metall.*, 92p.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace lengths using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 183-197.
- Richarts, L. R., Leg, G. M. M. and Whittle, R. A., 1978, Appraisal of stability conditions in rock slopes, In *Found. Eng. in Diff. Ground*, ed. by Bell, F. G., Newnes-Butterworths, London, 192-228.
- Tabba, M. M., 1984, Deterministic versus risk analysis of slope stability, *Proc. 4th Int. Symp. Landslides*, 491-498.
- Tobutt, D. C., 1982, Monte Carlo simulation for slope stability, *Comp. Geosci.*, 8, 199-209.
- Villaescusa, E. and Brown, E. T., 1992, Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurement, *Rock Mech. Rock Eng.*, 25, 67-87.
- Wallis, P. F. and King, M. S., 1980, Discontinuity spacings in a crystalline rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 63-66.

2010년 4월 7일 원고접수, 2010년 5월 27일 게재승인

장보안

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자동 192
Tel : 033-250-8583
Fax : 033-244-8580
E-mai : bajang@kangwon.ac.kr

성숙경

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자동 192
Tel : 033-244-9275
Fax : 033-244-9276
E-mai : spriview@geomech.co.kr

장현식

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자동 192
Tel : 033-244-9275
Fax : 033-244-9276
E-mai : whitennull@kangwon.ac.kr