

불연속면의 확률특성을 고려한 암반사면의 평면파괴확률 산정

Evaluation of Planar Failure Probability for Rock Slope Based on Random Properties of Discontinuities

배 규 진*¹ Bae, Guy-Jin

박 혁 진*² Park, Hyuck-Jin

Abstract

Random properties of discontinuities were attributed to the limitation of test methods and lack of obtained data. Therefore, the uncertainties are pervasive and inevitable in rock slope engineering as well as other geotechnical engineering fields. The probabilistic analysis has been proposed to deal properly with the uncertainty. However, previous probabilistic approaches do not take account of the condition of kinematic instability but consider only kinetic instability. In this study, in order to overcome the limitation of the previous studies, the geometric characteristics as well as the shear strength characteristics in discontinuities are taken account into the probabilistic analysis. Then, the new approach to evaluate the probability of failure is suggested. The results of the deterministic analysis which was carried out to compare with the result of the probabilistic analysis, are somewhat different from those of the probabilistic approach. This is because the selected and used data in the deterministic approach do not take account of the random properties of discontinuities.

요 지

불연속면의 확률특성은 불연속면의 생성이 자연적인 현상에 의해 이루어 졌으며 불연속면의 특성을 파악하기 위한 시험이나 자료 획득의 기술적인 제약, 획득 가능한 자료 양의 제약에 기인한다. 따라서 다른 지반공학분야와 마찬가지로 암반사면해석에서도 불확실성이 필연적으로 개입되며 이러한 불확실성을 효과적으로 다루기 위한 방법으로 확률론적 해석방법이 제안되었다. 그러나 현재까지 제안된 암반사면의 확률론적 해석기법은 대개 운동학적인 분석이 제외된 상태에서 동역학적인 분석 즉, 불연속면의 방향성이 가지는 분산을 고려하지 않고 전단강도의 분산 상태만 고려한 분석이 수행되어왔다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있도록 불연속면의 기하학적인 특성과 전단강도 특성 모두의 확률특성을 고려하여 운동학적인 파괴 가능성과 동역학적인 파괴 가능성으로 구분하여 파괴 확률을 산정하였다. 확률론적 해석 방법과의 비교를 위해 획득한 결정론적인 해석에 의한 결과는 일부 확률론적인 해석결과와 차이를 보이고 있으며 이는 결정론적인 해석을 위해 선택된 자료의 대표값들이 자료들의 분산에 의해 대표성을 보이지 못하고 있기 때문인 것으로 보인다. 따라서 결정론적 해석 기법을 이용하여 사면의 안정성을 분석하기 위하여서는 자료의 대표값 선정에 신중을 기해야 하며 확률론적 해석기법을 보완적으로 사용하는 것이 오류를 줄일 수 있는 방법 중의 하나로 판단된다.

Keywords : Discontinuity, Kinematic instability, Kinetic instability, Probability of failure, Random property

*1 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 부장 (Member, Director, Civil Engrg. Research Division, KICT)

*2 정회원, 시설안전기술공단 (Member, Korea Infrastructure and Technology Corporation, hjpark@kistec.or.kr)

1. 서론

대부분의 지반공학적인 문제에는 쉽게 예측할 수 없는 불확실성과 가변성이 내재한다. 이러한 불확실성과 가변성은 대개 불충분한 현장자료와 붕괴메카니즘에 대한 이해 부족에서 기인하며 암반사면에서 불확실성과 가변성은 불연속면의 방향성과 기하학적 특성의 분산이나 불연속면의 전단강도 측정을 위한 실내실험 결과의 분산 형태로 나타난다. 따라서 암반사면에서 안정성평가를 위해 분산이 심한 자료들로부터 설계나 안정 해석에 사용할 대표값을 선정한다는 것은 쉽지 않은 작업이며 공학자에 따라서는 다른 값을 대표값으로 선정할 가능성도 존재한다. 따라서 많은 공학자들과 연구자들에 의해 현장이나 실내실험으로부터 획득한 자료들 내에 포함되어 있는 불확실성을 효과적으로 다루고 정량화하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다. 확률론적 해석방법은 이러한 방법 중의 하나로 제안되었다. 확률론적 해석 방법의 이용은 지반공학적인 문제에서 흔히 접하게 되는 불확실성과 가변성을 정량화하여 문제의 분석이나 해석에 고려할 수 있는 효과적인 방법으로 인식되어 왔다. 따라서 여러 가지 확률론적 해석 기법이 암반사면분야에서 제안되었으나 대개 이론적인 수준에 그칠 뿐 현장의 실제적인 문제에 적용되어 안정 해석에 사용되었던 사례는 매우 드물다. 최근 터키 설계에서 몇 차례 확률론적 해석방법을 이용한 신뢰성 이론(reliability theory)이 적용되어 사면의 안정성이 검토되었으나 신뢰성 이론을 적용하는 과정에서의 자료의 통계적 처리 및 확률론적 분석에 대한 과정이 정확하게 기술되지 않을 뿐만 아니라 암반사면이 가지는 해석 특성에 관한 충분한 검토없이 적용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 암반사면을 중심으로 현장으로부터 획득한 자료의 분석과정에서 확률론적 해석 알고리즘의 제시, 파괴확률의 산정까지의 과정을 제시하였으며 특히 암반사면의 해석 특성을 고려한 확률론적 해석 방법을 제안하였다. 이를 위하여 경기도 남양주시 일대의 절취예상 사면을 대상으로 획득한 현장조사 및 실내실험자료를 이용하여 현장 적용성을 검토해 보았다. 또한 이러한 결과를 결정론적(deterministic) 해석 방법을 통해 얻어진 결과와 비교해 보았다.

2. 해석방법

2.1 결정론적 해석 방법

결정론적 해석방법은 해석에 사용되는 모델의 여러 입력변수들에 고정된 하나의 값을 입력하며 한계평형해석이론(limit equilibrium theory)에 근거한 안전율(factor of safety)에 의해 사면의 안전성을 판단한다. 그러나 실제 사면은 공학적으로 불균질할 뿐만 아니라 지반정수 산정을 위해 사용되는 실험의 경우 수량 및 실험의 제약과 현장자료의 불충분함 등으로 인해 해석에 사용되는 입력변수(지반정수, 불연속면의 기하학적 특성)에 불확실성이 개입하게 된다. 그러나 전통적인 결정론적 해석에서는 입력변수 내에 존재하는 불확실성에 대한 충분한 고려 없이 고정된 하나의 값을 사용한다. 대개의 경우 고정된 값에는 자료들의 평균이 주로 사용되거나 공학자에 따라 자료들 내에 존재하는 불확실성을 고려하여 평균보다 작거나 큰 값을 사용하기도 하며 이로 인해 같은 지역에 대한 안정성 해석에서도 서로 다른 안전율을 획득하기도 한다. 따라서, Tabba(1984)가 지적한 바와 같이, 결정론적 해석 방법은 현장 특성이나 환경의 가변성을 고려하기 힘들다는 점과 전체적인 구조물의 안정성을 파악할 때 어떤 자료들이 상대적인 중요한 역할을 하는가 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

2.2 확률론적 해석방법

결정론적 해석방법의 단점을 보완하기 위해 제안된 확률론적 해석방법은 입력변수와 해석모델 내에 포함되어 있는 불확실성을 정량화하여 해석에 반영할 수 있는 효과적인 방법으로 제안되었다. 이 해석방법에서는 안전율을 확률변수로 고려하여 구조물의 안정성을 표현할 수 있는 방법으로 안전율 대신 파괴확률을 사용한다. 파괴확률이란 반복계산을 통하거나 확률론적 분석을 통해 획득한 안전율의 확률분포곡선으로부터 안전율이 1보다 작을 가능성을 확률로 정의한 것이다.

대부분의 확률론적 해석은 두 가지 과정을 통해 진행되어 지는 데 첫 번째 과정은 현장이나 실내실험을 통해 획득한 자료들의 통계파라미터(즉, 평균과 표준편차, 확률분포곡선)를 결정하는 것이다. 이러한 통계파라미터는 각 지반 정수들의 확률특성을 추정하고 이를 이용하여 분석에 사용할 수 있도록 한다. 평균(mean)은 확률분포곡

선의 확률변수 값들 중 가장 발생가능성이 높은 추정치이며 표준편차(standard deviation)나 분산계수(coefficient of variation)는 확률변수가 내재하고 있는 불확실성을 의미한다.

확률론적 해석의 두 번째 과정에서는 이러한 통계적 분석과정을 통해 획득된 통계파라미터를 이용하여 분석대상인 상태함수에 대한 확률론적 해석을 수행한다. 이러한 분석을 위해서 대개 Monte Carlo simulation이나 First Order Second Moment method와 같은 방법이 사용되며 본 연구에서는 Monte Carlo simulation 방법이 사용되었다. Monte Carlo simulation은 상태함수 내에 포함되어있는 여러 변수들에 대한 확률분포곡선이 파악되어야 사용 가능하며 이러한 자료를 바탕으로 각 변수의 확률분포곡선으로부터 임의의 값을 발생시키고 그 값들을 이용하여 안전율 값을 얻는다. 이러한 과정을 여러 차례 반복하여 안전율의 값이 1보다 작은 계산과 총 계산 횟수의 비로 파괴확률을 획득한다.

3. 암반사면의 안정해석

암반사면의 안정해석은 토사면과 달리 암반 내에 포함되어 있는 불연속면의 방향과 강도 특성에 의해 주로 좌우되어진다. 따라서 암반사면의 안정성 해석에서는 불연속면의 방향성과 사면의 상대적인 위치에 따라 안정성을 파악하는 운동학적인(kinematic) 해석과 불연속면의 전단강도 특성과 암반에 작용하는 힘을 고려하는 동역학적(kinetic) 해석이 필수적으로 함께 수행되어야 한다. 이러한 과정은 결정론적 분석에서뿐만 아니라 확률론적 해석에서도 고려되어야 하며 본 연구에서는 확률론적 해석과정에서 두 가지 조건을 어떻게 고려할 것인가 하는 점에 대하여 논의하였다.

본 연구에서는 암반사면의 붕괴유형 중 평면파괴에 대하여 확률론적 해석방법을 적용해 보았으며 평면파괴가 발생할 수 있는 운동학적인 조건과 동역학적인 조건은 다음과 같다.

3.1 운동학적인(kinematic) 조건

운동학적인 분석은 현존하는 또는 예상되는 사면에 대해 기하학적으로 사면붕괴가 발생할 것인가를 판단하는 것이다. 즉, 불연속면의 내부마찰각과 함께 사면의 방향성과 불연속면의 방향성의 상대적인 위치를 고려

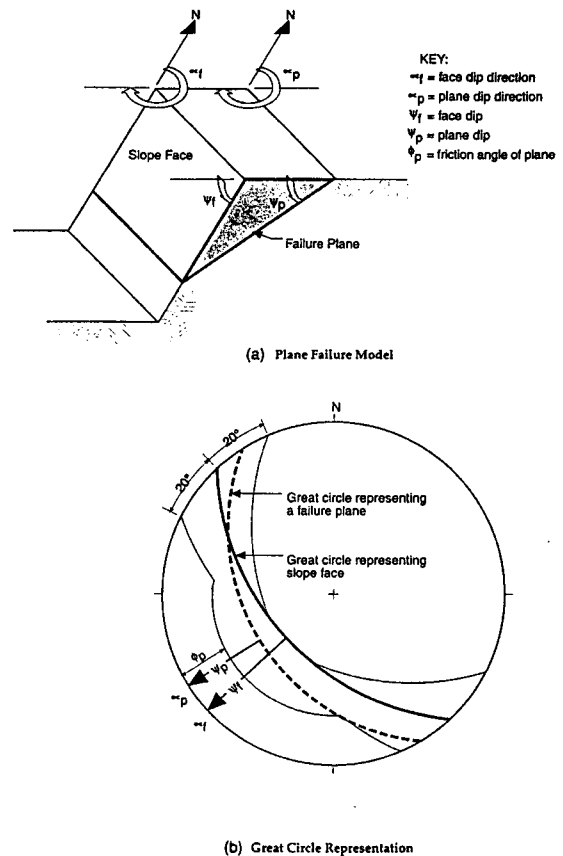


그림 1. 평면파괴의 운동학적인 조건(Norrish and Wiley, 1996)

하여 사면붕괴가 일어날 것인가 하는 것을 판단하는 것이다. 이 분석은 주로 평사투영법을 이용하여 평사투영망상에 사면의 방향과 불연속면의 방향을 도시하고 상대적인 위치에 따라 분석한다.

평면파괴의 운동학적 조건은 다음과 같다(Norrish and Wiley, 1996).

- 미끄러지는 불연속면의 경사방향이 절개면의 경사방향과 20도 내로 거의 평행한 방향성을 가진다(그림 1).
- 불연속면의 경사각이 사면의 경사각보다 작다.
- 불연속면의 경사각은 그 불연속면의 마찰각보다 더 커야한다.
- 미끄러짐에 대하여 저항력을 거의 갖지 못하는 이완면이 미끄러짐의 측면 경계부로서 암반 내에 존재하여야 한다.

3.2 동역학적(kinetic) 조건

암반사면 해석에서 동역학적 조건은 한계평형해석에 의한 안전율로 계산한다. 한계평형해석법은 경사면 아

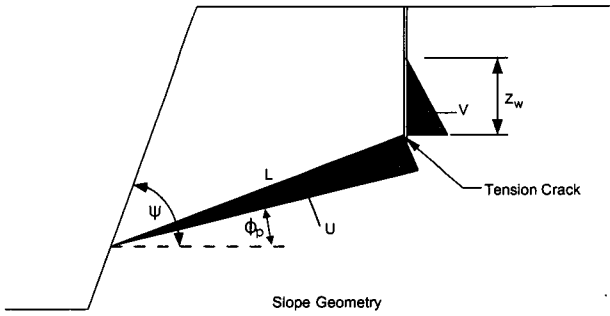


그림 2. 평면 파괴 시 작용하는 수압

래로 미끄러지려는 힘이 미끄러짐을 저항하는 힘과 정확하게 같을 때 암블릭에서 미끄러짐이 일어나려는 순간인 한계평형(limit equilibrium)상태에 있게 된다는 가정을 기초로 한다. 따라서 아래로 미끄러지려는 힘과 저항하려는 힘의 비율로서 안전율을 계산하게 된다. 평면 파괴에서 안전율은 다음의 계산식을 이용하여 계산하며 안전율이 1보다 클 때 안전한 것으로 판단한다. 이 경우 암반에 작용하는 유일한 힘은 중력으로 가정한다.

$$F = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad (1)$$

여기서, c : 절리면 점착력

A : 슬라이딩면의 면적($(H - z) \operatorname{cosec} \phi_p$)

W : 암괴의 자중

ϕ_p : 슬라이딩면의 경사각

U : 파괴면에 작용하는 수압

V : 인장균열에 작용하는 수압

ϕ : 불연속면의 내부 마찰각이다.

식 (1)은 사면의 후방에 인장균열이 존재하고 지하수가 인장균열을 채우고 있어 지하수에 의한 슬라이딩면상의 부양력(U)과 인장균열에서 수평방향으로 작용하는 수압(V)이 존재하는 상태의 안전율을 계산하는 식으로 인장균열이 존재하지 않거나 수압이 작용하지 않을 경우 간단한 식을 사용한다(그림 2).

4. 연구 대상 사면 및 불연속면의 확률 특성 분석

4.1 연구대상 절취 사면

본 연구대상 지역은 경기도 남양주시의 덕소-양수간 중양선 복선 전철 건설공사 예정지역으로 한강변을 따라 발달한 저구릉지대이다. 본 지역은 기본지질도인

1:50,000축척의 독섬 도폭에 해당하며 기반암체는 시생대에서 원생대의 퇴적기원인 호상편마암과 이를 관입한 규장질 편마암으로 구성되어 있다.

대상연구지역은 NS에서 N30E방향의 경강단층이 지나고 있고 소규모 단층이 많이 발달한 지역이며 이 지역에 넓게 분포하고 있는 호상편마암 내에 263/47 방향의 엽리구조를 보이고 있다. 예상절취사면은 경사방향 245°와 절취구배 1:0.5(65°)로 예정되어 있으며 예상 높이는 약 35m이다.

4.2 불연속면의 확률특성 분석

확률론적 안정성 해석을 위하여서는 불연속면의 확률 특성 분석이 선행되어야 한다. 이러한 분석을 위하여서는 먼저 통계적인 기법이 사용되는 데 이러한 기법을 통계적인 추정법(statistical inference)이라 한다. 통계적 추정법은 현장 조사나 실내실험과 같은 방법에 의해 획득된 일부의 샘플 자료로부터 모집단의 확률특성을 추정하는 방법으로 이 과정은 정확한 해석결과를 획득하기 위하여 거쳐야 매우 중요한 과정이다. 이는 Kulatilake 등(1985)에 의해 지적된 바와 같이 각 입력변수에 어떠한 확률특성이 결정되었는가에 따라 매우 다른 해석결과를 초래할 수 있기 때문이다.

또 한가지 해석에 앞서 검토해야 할 것은 여러 입력 변수 중 어떤 입력 변수를 확률변수(random variable)로 고려하여 해석에 사용할 것인가 하는 점이다. 이에 대해서는 여러 공학자들의 의견이 제시되고 있으나 본 연구에서는 가장 기본적인 불연속면의 방향성과 전단강도 정수를 확률변수로 선정하여 분석하였다.

4.3 불연속면의 방향성

불연속면의 방향성은 암반사면의 운동학적인 조건을 좌우하는 중요한 요소이다. 반면, 현장에서 통계적인 처리를 위해 선형조사선 기법(scanline method)에 의해 획득된 방향성 자료들은 분산이 매우 심한 편이다. 기존의 결정론적 해석 방법에서는 이렇게 분산이 심한 방향성 자료로부터 임의의 한 고정값을 대표적인 방향성으로 고려하여 분석에 사용하였으며 그 외의 방향성에 대하여서는 해석에서 제외하였다. 확률론적 해석 방법에서는 분산이 심한 방향성자료들을 일정한 분포를 보이는 함수로 보고 함수 내의 모든 자료를 분석에 사용한다.

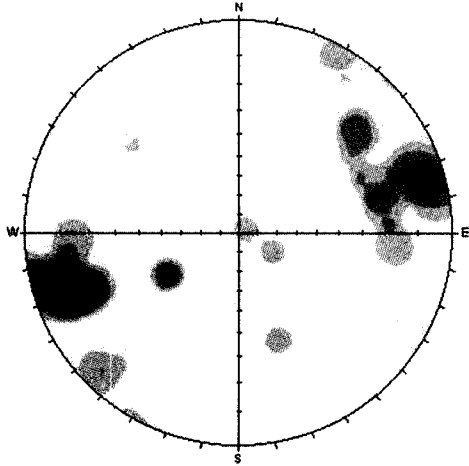


그림 3. 현장 지표지질조사에 의해 획득된 불연속면 방향성의 평사투영 결과

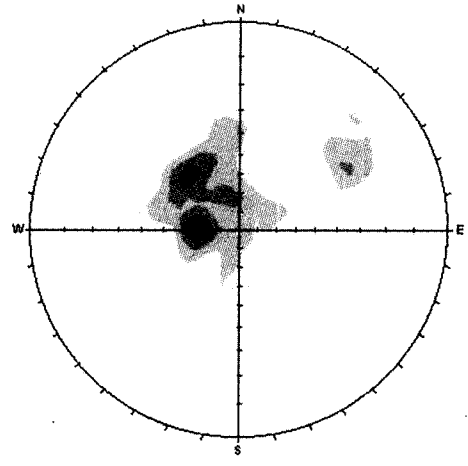
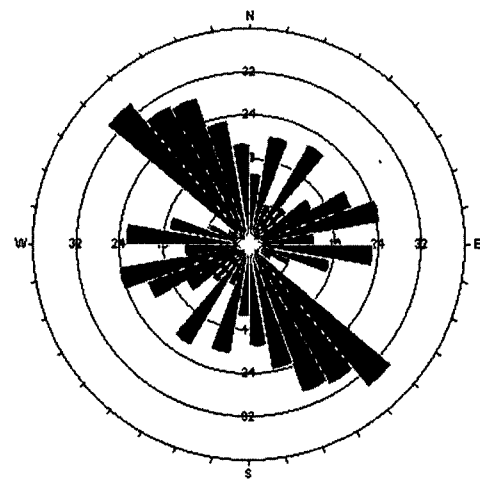
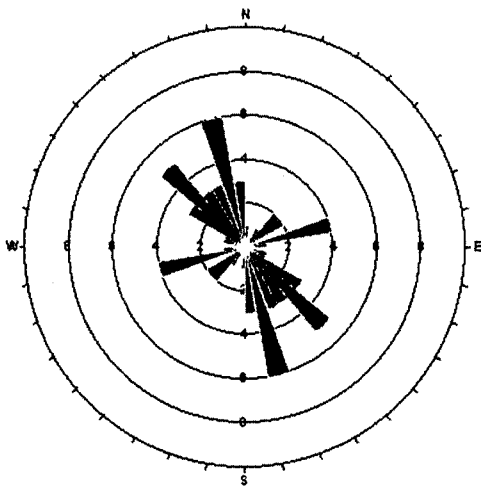


그림 5. BIPS에 획득된 불연속면 방향성의 평사투영 결과



따라서, 결정론적 해석방법에서처럼 하나의 고정된 값만을 사용하는 것이 아닌 그 밖의 방향성 분포에 대하여서도 분석에 포함시키는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Fisher(1953)에 의해 제안된 Fisher 함수를 방향성의 확률분포함수로 선정하였다.

수를 방향성의 확률분포함수로 선정하였다. Fisher 함수는 참값을 중심으로 방향자료들이 분산을 보이는 형태의 함수로 불연속면의 방향성 분포 형태와 유사함을 보이고 있어 불연속면의 방향성 분포를 나타내는 함수로 주로 사용되고 있다. Fisher 함수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P(\theta) = \frac{k \sin \theta}{e^k - e^{-k}} e^{k \cos \theta} d\theta \quad (2)$$

여기서 k는 Fisher 정수(Fisher constant)로 Fisher 함수에서 사용되는 변수로 자료들의 분산정도를 나타내며 θ 는 참값 또는 평균값으로부터 각 지점까지의 각도를 나타낸다.

현장으로부터 획득한 불연속면의 방향성을 등면적 투영망과 로즈다이어그램에 도시한 결과는 그림 3과 같다. 그림 4는 각 절리군의 Fisher 확률밀도함수를 θ 에

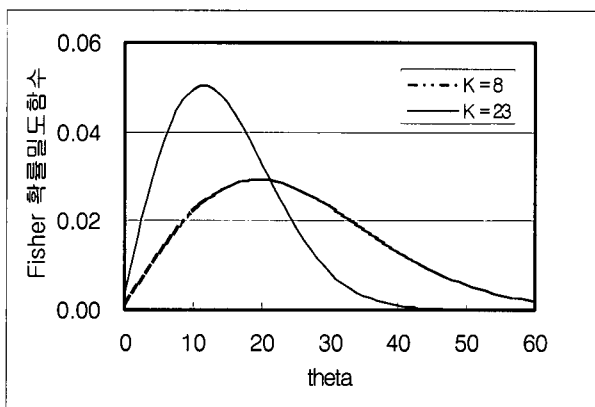


그림 4. Fisher 확률밀도함수곡선

표 1. 불연속면의 방향성 자료

Joint Set	Mean Dip Dir / Dip	Fisher Const
J1	078/80	53
J2	270/28	280
J3	255/66	58
J4	115/18	23

대한 함수로 표현 것으로 k값에 따라 분산정도와 밀도 함수 값이 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 현장의 지표지질조사로부터 획득한 결과로 BIPS에 의해 획득한 자료(그림 5)와는 차이를 보이고 있다. 이는 박혁진(2000)에 의해 지적된 바와 같이 자료를 획득하기 위해 사용한 축선의 방향이 다르기 때문에 수직 축선으로부터 획득한 자료에서는 경사도가 저각인 절리군이, 수평축선으로부터 획득한 자료에서는 고각인 절리군이 선택적으로 나타나고 있다. 따라서, 두 결과를 함께 고려하여 표 1과 같은 불연속면의 방향성 특성을 획득하였다.

4.4 불연속면의 전단강도 특성

불연속면의 전단강도는 암반사면 붕괴의 동역학적인 조건을 검토하는 데 중요한 입력변수이다. 따라서 현장 여건을 반영할 수 있는 정확하고 충분한 자료가 필요하나 대개 현장 여건의 제약이나 시료 채취의 어려움 등으로 충분한 자료의 획득이 어려운 실정이다. 이러한 이유로 불연속면의 전단강도정수는 확률변수로 취급되며 본 연구에서도 확률변수로 취급하여 파괴확률을 계산하였다.

불연속면 전단강도정수의 획득을 위해 불연속면 직접전단시험이 실시하였으며 이로부터 15개의 내부마찰

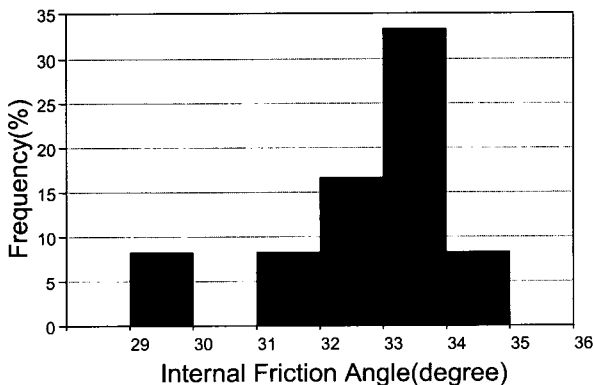


그림 6. 내부 마찰각의 분포곡선

각과 점착력 값을 획득하였다. 직접전단시험으로부터 획득된 내부마찰각은 27.0°에서 35.3°까지의 분포를 보이며 평균은 32.2°, 표준편차는 3.0을 보이고 있다. 한편, 점착력의 경우, 평균 0.07MPa의 값을 보이고 있으나 Hoek(1997)이 지적한 바와 같이 암반사면에서 점착력은 표면의 거칠기와 연관된 수학적인 값이므로 본 연구에서는 0으로 고려하였다.

그림 6은 시험에 의해 획득된 불연속면의 내부마찰각 분포곡선을 나타낸 것이다. 그러나, 이 그림에서는 뚜렷한 확률밀도곡선의 형태를 보이고 있지 않았으며 따라서 내부마찰각의 확률밀도분포곡선은 이전의 연구결과(Mostyn and Li, 1993)를 참고로 하여 정규분포곡선으로 선택하였다.

5. 평면파괴에 대한 파괴확률 산정

암반사면의 해석에서는 불연속면의 방향성과 사면과의 상대적인 위치에 따라 안정성을 파악하는 운동학적 해석과 불연속면의 강도특성을 고려하여 동역학적 해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 이러한 해석방법은 불연속면의 특성 조사나 해석에 개입되는 불확실성을 정량화하여 안정해석에 이용할 수 있도록 하는 확률론적 해석방법에도 동일하게 적용되어야 한다. 그러나 대부분 이전의 연구들은 확률론적 해석방법을 적용하면서 동역학적 분석에만 적용하여 동역학적 불안정성의 확률을 계산하여 이를 파괴확률로 취급하였다. 이러한 접근은 암반사면 안정성 해석의 특성을 고려하지 않은 것으로 암반사면에서는 불연속면과 사면과의 상대적인 위치에 의해 분석하는 운동학적인 해석이 선행되어야 한다는 점이 무시된 것이다. 따라서 본 연구에서는 암반사면의 해석 특성을 고려하여 운동학적인 분석과 동역학적인 분석을 구분하여 운동학적인 불안정확률(probability of kinematic instability)과 동역학적 불안정확률(probability of kinetic instability)을 계산하였으며 이를 곱하여 파괴확률을 산정했다.

본 연구에서는 평면파괴의 안정성 해석을 위해 사용되는 여러 입력 변수 중 불연속면의 방향성과 전단강도를 확률변수로 고려하였으며 사면의 기하학적특성, 즉 사면의 방향, 높이, 연장 등과 암석의 밀도는 결정론적인 변수, 즉 고정된 값을 사용하여 분석을 수행하였다. 또한, 분석의 용이성을 위하여 불연속면의 연장은 평면파괴를 일으킬 수 있을 만큼 충분히 긴 것으로 추정하였

으며 사면의 후방에 인장 균열은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 따라서, 평면파괴의 안전율 계산식인 식 (1)에서 인장균열 내에 존재하는 수압에 의해 작용하는 힘 V 은 0으로 고려되었다. 사면 내에 존재하는 지하수에 의한 영향을 고려하기 위해 지하수위가 사면 전체 높이의 1/2까지 상승할 수 있으며 지하수위는 최소 0에서 최대 사면높이의 1/2까지 변동할 수 있는 확률변수로 고려하였다.

본 연구의 수행을 위해 결과의 정밀도가 높은 Monte Carlo method를 사용하였으며 Monte Carlo method에서 요구되는 반복적인 계산을 위해 Microsoft Excel과 Visual Basic 프로그램 환경을 이용하여 알고리즘을 작성하고 계산을 수행하였다. Visual Basic 환경은 Monte Carlo simulation method에서 필요한 무작위 확률변수의 생성이 용이하고 확률론적 해석에서 필요한 다양한 확률밀도곡선을 간단한 함수에 의해 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

5.1 운동학적 분석

운동학적인 불안정의 조건은 3.1절에서 제시한 바와 같다. 운동학적인 분석은 기하학적으로 사면의 파괴가 가능한 가를 판단하는 것으로 불연속면과 사면과의 상대적인 위치를 고려하여 일정 형태의 파괴가 발생할 것인가 하는 것을 판단하는 것이다. 따라서 운동학적 불안정확률은 많은 수의 반복계산을 수행한 후 운동학적으로 불안정한 반복계산횟수를 전체 계산한 횟수와 비교하여 산정한 것이다. 즉,

$$P_{km} = \frac{N_m}{N_T} \quad (3)$$

이때, N_m 은 운동학적으로 불안정한 것으로 판단된 반복 계산의 횟수, N_T 는 전체 반복계산의 횟수이다.

5.2 동역학적 분석

만일 운동학적인 분석을 통해 암반 내 불연속면의 기하학적 특성이 불안정한 것으로 판단되면 동역학적 분석을 통해 안정성이 분석되어야 한다. 동역학적 분석은 한계평형법을 기초로 한 식 (1)에 의해 수행되며 이 분석에서는 불연속면상의 암반에 작용하는 힘들, 즉 미끄러짐을 일으키려는 힘과 미끄러짐을 막으려는 힘들의

크기와 방향을 비교함으로써 안정성을 파악할 수 있다.

확률론적 해석에서는 확률변수로 취급되는 입력변수들로부터 임의로 생성되는 값들을 이용하여 안전율을 여러 차례 반복계산에 의해 획득한 후 이들 분포를 안전율의 확률분포곡선(probability density distribution)으로 표현하고 이로부터 동역학적 불안정의 확률(probability of kinetic instability)을 산정한다. 이러한 절차를 거쳐 계산된 동역학적 불안정의 확률은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{km} = \frac{N_f}{N_m} \quad (4)$$

이때 N_f 는 각 입력변수에 몬테카를로 해석법에 의해 임의로 생성된 수치를 얻은 안전율이 1보다 작은 반복계산의 횟수를, N_m 은 운동학적으로 불안정하여 동역학적으로 안정성이 검토된 반복계산의 횟수를 의미한다.

5.3 파괴확률의 산정

앞 서 획득된 운동학적 불안정확률과 동역학적 불안정확률로부터 합성 개념(composite concept)을 이용하여 파괴확률을 계산했다. 합성 개념(composite concept)은 Marek and Savely(1978)에 의해 제시된 것으로 암반사면의 파괴확률을 산정 시 사면의 안정성에 영향을 미치는 모든 요소에 대하여 그 요소가 발생할 수 있는 가능성을 확률로 표현하여 파괴확률을 계산하는 방법이다. 따라서, 본 연구에서는 운동학적 불안정확률과 동역학적 파괴확률을 곱하여 파괴확률을 계산했다. 즉,

$$P_f = \frac{N_m}{N_T} \times \frac{N_f}{N_m} \quad (5)$$

제안된 계산식은 운동학적으로 불안정한 경우에만 동역학적인 분석이 수행된다는 조건을 만족시키는 것으로 운동학적인 조건과 동역학적인 조건을 분리하여 계산함으로써 파괴확률의 계산을 쉽게 수행할 수 있고 분석에 있어서도 어느 조건에 의해 암반사면의 파괴가 주로 영향을 받는 가를 판단할 수 있다(Park and West, 2001).

6. 확률론적 해석의 결과

확률론적 안정성 해석을 위하여 사용될 각 입력변수

표 2. 결정론적 및 확률론적 안정성 해석 결과

Joint Set	Factor of Safety	Probability of Instability		Probability of Failure
		Kinematic	Kinetic	
Set 1(078/80)	Stable	0	0	0
Set 2(270/28)	Stable	0.12	0.849	0.102
Set 3(255/60)	0.361	0.684	0.883	0.604
Set 4(115/18)	Stable	0	0	0

의 확률특성분석이 수행되었으며 결과는 표 2와 같다. 본 연구에서는 약 2,000회의 반복 계산을 기본으로 파괴 확률이 수렴되지 않는 경우 반복회수를 증가시켜가며 정밀한 값을 획득하였다. 또한, 확률론적 해석 결과와 기존의 결정론적 해석 결과를 비교하기 위해 동일한 입력변수의 값을 사용하여 안전율을 획득하여 비교해 보았으며 분석 결과는 표 2와 같다. 표 2의 결정론적 해석 결과에서 Stable은 불연속면의 기하학적인 특성으로 분석해 본 결과 운동학적으로 안전함을 의미한다. 즉, 운동학적으로 안전하므로 사면의 파괴가 일어날 수 있는 가능성 없음을 의미한다.

표 2의 결과를 보면 절리군 1과 4는 결정론적인 해석 결과와 확률론적인 해석 결과가 일치함을 알 수 있다. 즉, 불연속면의 기하학적 특성과 전단강도정수의 분산이 있음에도 불구하고 대표값을 이용한 결정론적인 해석 결과가 확률론적 해석 결과와 일치하고 있어 결정론적 해석 방법에서 이용한 자료들의 대표성에 문제가 없는 것으로 보인다. 반면 Set 2의 경우, 절리군 대표방향의 경사방향이 270°로 사면의 경사방향과 25°의 차이를 보이고 있으며 경사도 28°로 불연속면의 내부마찰각인 32.2°보다 작은 값을 보이고 있어 결정론적인 분석에서 운동학적으로 안전함을 보이고 있다. 그러나 확률론적 해석의 결과는 운동학적인 파괴 확률이 0.12, 동역학

적 파괴 확률이 0.849를 보이고 있고 사면의 파괴 확률은 0.102로 파괴가 일어날 가능성이 존재하고 있음을 알 수 있다(그림 7). 이는 결정론적 해석 방법에서 사용한 절리군의 대표 방향성이 절리군 전체의 안정성을 대표하기에는 문제가 있음을 보여 주고 있다. 즉, 결정론적인 해석에서 사용된 Set 3의 대표 방향성은 평면 파괴의 안정영역 내에 포함되고 있으나 자료의 분산을 고려한 확률론적 해석에서는 운동학적인 분석의 경우 절리군 내의 방향자료 중 약 10%의 방향자료들이 불안정영역 내에 분포하고 있다. 사면의 파괴 확률 0.102는 이 전의 여러 학자들에 의해 제시된 영구 사면의 허용 확률이 0.1이었음을 고려할 때 매우 큰 수치로 이 절리군에 의한 사면의 파괴가능성이 높음을 알 수 있다. Set 3의 경우, 결정론적인 분석에서 안전율이 0.361로 매우 불안정함을 보여 주고 있으며 확률론적인 분석에서 역시 파괴 확률이 0.684로 매우 높은 수치를 보여주고 있으며 두 안정 해석의 결과가 일치하고 있음을 알 수 있다(그림 8). 또한, Set 2와 3의 확률론적 해석 결과를 보면 동역학적인 파괴 확률이 운동학적인 파괴 확률보다 높아 이 두 절리군의 경우 사면의 안정성에 영향을 미치는 여러 입력 변수 중 전단 강도에 의한 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 따라서, 사면의 전단강도를 증가시킬 수 있는 여러 안정화공법들이 효과적인 것으로 판단된다.

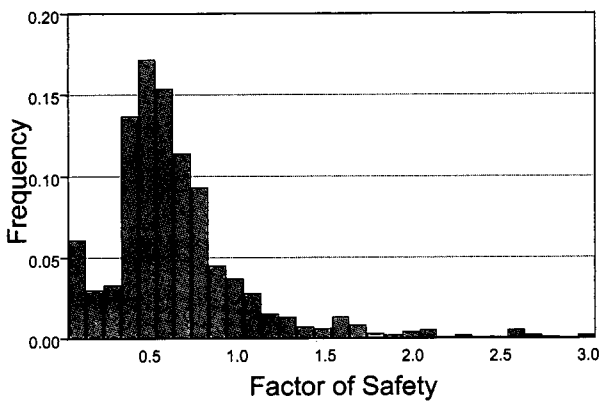


그림 7. Set 2의 안전율 분포 곡선

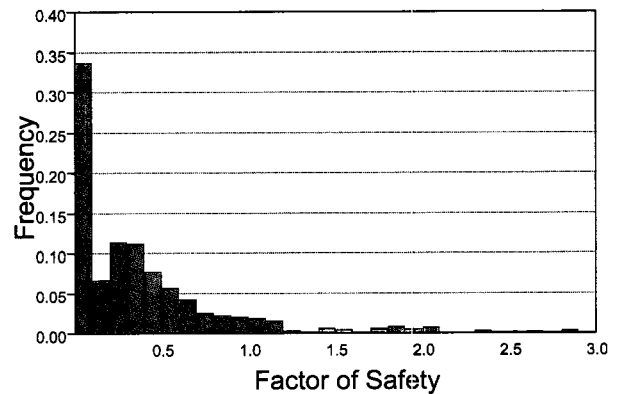


그림 8. Set 3의 안전율 분포 곡선

7. 결 론

암반사면의 안정성은 불연속면의 확률특성에 의해 주로 좌우되며 따라서 이러한 확률특성을 효과적으로 다루기 위한 방법으로 확률론적 해석방법이 제안되었다. 그러나 현재까지 제안된 암반사면의 확률론적 해석 기법은 대개 불연속면의 방향성이 가지는 분산을 고려하지 않고 전단강도의 분산 상태만 고려한 분석이 수행되어왔다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있도록 불연속면의 기하학적인 특성과 전단강도 특성 모두의 확률특성을 고려하여 운동학적인 파괴 가능성과 동역학적인 파괴 가능성으로 구분하여 파괴 확률을 산정하였다. 본 연구를 통해 제안된 기법은 실제 현장에 적용하여 그 적용성을 검토해 보았다. 결정론적 해석에 의한 결과는 일부 확률론적 해석결과와 차이를 보이고 있으며 이는 결정론적인 해석을 위해 선택된 자료의 대표값들이 자료들의 분산에 의해 대표성을 보이지 못하고 있기 때문인 것으로 보인다. 이러한 경향은 자료의 분산이 심한 경우 더욱 가중될 것으로 보이며 따라서 불연속면의 방향성과 전단강도 정수의 분산이 심한 경우 결정론적 해석방법은 심각한 오류를 초래할 수 있을 것으로 보인다. 결국 결정론적인 해석 방법은 그 계산이 단순하고 용이하여 폭 넓게 사용되고 있으나 자료의 분산에 의해 해석의 오류를 초래할 가능성이 높다. 반면 확률론적 해석방법은 자료에 대한 확률특성 파악을 위한 과정이 복잡하고 자료의 확률특성을 확인할 수 있을 정도의 자료양을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 결정론적 해석 기법을 이용하여 사면의 안정성을 분석하기 위하여서는 자료의 대표값 선정에 신중을 기해야 하며 확률론적 해석기법을 보완적으로 사용하는 것이 오류를 줄일 수 있는 방법 중의 하나로 보인다.

감사의 글

본 연구를 위하여 현장자료의 사용을 허락해 주신 삼보기술단과 희송지오택 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박혁진(2000), "Sampling Bias of Discontinuity Orientation Measurements for Rock Slope Design in Linear Sampling Technique", 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp.145~155
2. Fisher, R.A.(1953), "Dispersion on a Sphere", *Proceedings of the Royal Society of London*, U.K. pp.295~305
3. Hoek, E.(1997), *Rock Engineering: Course Notes by Evert Hoek* [Online], Available: <http://www.rockeng.utoronto.ca/Hoekcorner.htm>
4. Kulatilake, P.H.S.W., Finely, R.E., and Gosh, A.(1985), "Effect of Variability of Joint Orientation and Strength on Factor of Safety of Wedge Stability", *Proceedings of International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, pp.25~33
5. Marek, J.M. and Savely, J.P.(1978), "Probabilistic Analysis of the Plane Shear Failure Mode", *Proceedings of 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, University of Nevada, pp.295~305
6. Mostyn, G.R. and Li, K.S.(1993), "Probabilistic Slope Analysis-state of Play", *Proceedings of Conference on Probabilistic Method in Geotechnical Engineering*, pp.89~109
7. Norrish, N.I. and Wiley, D.C.(1996), "Rock Slope Stability and Analysis", *Landslides: Investigation and Mitigation*, National Science Council, p.673
8. Park, H.J. and West, T.R.(2001), "Development of a Probabilistic Approach for Rock Wedge Failure", *Engineering Geology*, Vol.59, pp.233~251
9. Tabba, M.M.(1984), "Deterministic Versus Risk Analysis of Slope Stability", *Proceedings of 4th International Symposium on Landslides*, pp.491~498

(접수일자 2002. 1. 10, 심사완료일 2002. 4. 2)