

확률론을 이용한 암반사면의 운동학적 및 동역학적 안정 해석

박혁진, 배규진, 구호본
한국건설기술연구원 토목연구부

1. 서론

확률론적 해석방법 혹은 신뢰성 이론은 암반공학이나 지반공학의 대상 지반매체의 특성상 개입되는 불확실성(uncertainty)을 정량화하여 설계나 안정해석에 고려할 수 있는 방법 중의 하나로 제안되었다. 지반공학이나 암반공학의 대상물질인 흙과 암반은 자연상태에서 생성된 물질로 그 구성물질이나 생성과정이 다양하고 복잡하여 특성을 정확하게 판단하기 힘들며 강도특성이나 설계정수 등을 파악하기 위한 시료의 채취나 실내 실험 등의 제한 등으로 인해 불확실성이 필연적으로 개입하게 된다. 불확실성은 대개 지반매체 자체의 내재적인 분산성이나 현장의 자료가 충분하지 않거나 해석모델의 오류에 의해 발생된다. 따라서, 이러한 불확실성은 지반공학이나 암반공학이 다른 어떠한 공학분야와 차이를 보이는 특징적인 면이다. 이러한 이유로 지반공학과 암반공학에서는 불확실성을 다루기 위한 공학자의 주관적 판단이나 observation method(Peck, 1969)와 같은 방법들이 제시되었으며 확률론적 방법도 이들 중 하나이다. 확률론적 해석방법은 전통적인 결정론적 해석방법(deterministic approach)에 의해 구해지는 안정계수를 좀 더 정량적인 수치인 파괴확률(probability of failure)으로써 표현함으로써 해석 근거를 객관화시켜주는 장점을 가지고 있다 (한국지반공학회, 1997).

암반사면의 해석에서도 불확실성은 불연속면 방향성의 분산, 불연속면의 기하학적 특성 및 실내 실험자료의 분산이라는 형태로 나타나며 따라서 결정론적 방법을 이용한 암반사면 안정해석 시 분산이 심한 자료로부터 하나의 대표값을 선택해야만 하는 문제점이 발생된다. 따라서 많은 공학자들에 의해 현장자료들과 분석 결과 내에 내재되어 있는 불확실성을 효과적으로 다룰 수 있는 방법들이 시도되었으며 확률론적 해석방법도 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나 연구자에 따라 파괴확률을 산정하기 위한 계산과정이나 알고리즘에 차이를 보이고 있으며 이러한 이유로 동일한 조건하에서 계산된 파괴확률이 차이를 보이고 있다. 이것은 대개 암반사면의 안정해석상 특성이 고려되지 않았기 때문으로 즉, 암반사면의 안정해석은 운동학적인(kinematic) 분석과 함께 동역학(kinetic) 분석이 필수적으로 수행되어야 하나 이러한 과정이 무시되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 암반사면의 특성을 고려한 붕괴확률 계산방법을 제안하였으며 이를 현장에 적용하여 결과를 검토해 보았다.

2. 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 특성을 고려하는 동역학적인(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.

2.1 운동학적인 조건

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

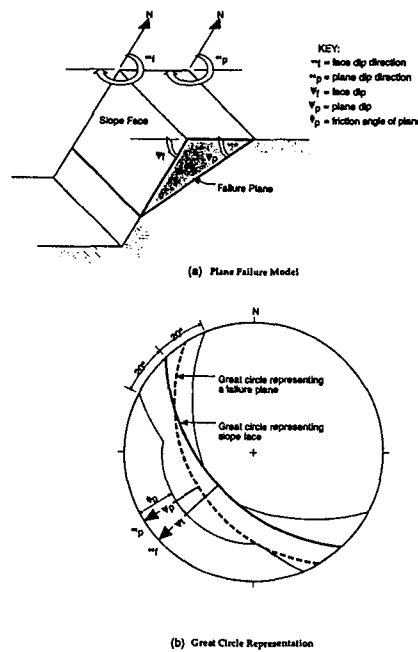


그림 1 평면파괴의 운동학적인 조건(Norrish and Wiley, 1996)

2.2 동역학적(kinetic) 조건

암반사면 해석에서 동역학적 조건은 한계평형해석에 의한 안전율로 계산한다. 한계평형해석법은 경사면 아래로 미끄러지려는 힘이 미끄러짐을 저항하는 힘과 정확하게 같을 때 암반에서 미끄러짐이 일어나려는 순간인 한계평형(limit equilibrium)상태에 있게 된다는 가정을 기초로 한다. 따라서 아래로 미끄러지려는 힘과 저항하려는 힘의 비율로서 안전율(factor of safety)을 계산하게 된다. 평면파괴에서 안전율은 간단한 계산식을 이용하여 계산하며 안전율이 1보다 클 때 안전한 것으로 판단한다.

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

이때, 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

2.3 결정론적 해석방법

결정론적 해석방법에서는 운동학적 분석과 동역학적 분석 모두 분석에 사용되는 불연속면의 파라미터들로부터 대표값만을 선택하여 수행하여야 한다. 운동학적인 분석에서는 각 절리군의 방향성 자료 중 평균 방향만을 선택하여 분석에 사용하며 동역학적 분석에서는 불연속면의 강도 정수들의 평균값을 선택하여 안정성 해석에 사용한다. 전통적으로 결정론적 해석 방법에서 사용되는 사면의 안정성 검토는 허용안전율(allowable factor of safety)을 기본으로 판단되어지며 안전율은 분산이 심한 입력 변수 중 대표값만을 이용하여 계산된다. 그러나 사면의 안전율 계산에 사용되는 입력 변수(불연속면의 전단강도, 방향성, 연장, 간격 등)의 대부분은 현장 측정이나 실내 실험 등을 통해 그 참값을 판단하기 어려우며 따라서 불확실성이 개입하게 된다. 결국 대부분의 입력변수들은 내재하고 있는 불확실성을 고려하여 확률변수(random variable)로 취급되어야 하며 이렇게 불확실성이 내재한 입력변수들의 조합으로부터 계산되어진 안전율 역시 불확실성이 개입되며 따라서 확률변수로 취급되어야 한다. 그러나 전통적인 해석방법에서는 입력변수와 안전율 내에 내재된 불확실성을 고려하지 않고 하나의 값만을 선택하여 사용함으로써 현장의 여건이나 입력변수의 특성을 충분히 고려하지 못하는 단점이 발생한다.

2.4 확률론적 해석 방법

앞 서 설명된 바와 같이 결정론적 해석 방법은 그 계산의 단순함과 명료함에도 불구하고 안전율과 입력변수 내의 불확실성을 고려하지 못함으로써 안정성 해석에서 현장의 여건을 충분히 반영하지 못하는 오류를 발생시킬 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 해석방법이 확률론적 해석방법이다. 확률론적 해석방법에서는 입력변수와 안전율 내의 불확실성을 정량화하여 계산에 반영함으로써 안전율을 확률변수로 취급하고 안전율을 대신하여 파괴확률(probability of failure)로 사면의 안전성을 평가한다. 보통 확률론적 해석방법은 두 가지의 과정을 거치게 되는데 첫 번째 과정은 현장이나 실내실험을 통해 획득한 자료들의 확률특성을 파악하는 것이다. 이 과정에서는 각 확률변수들의 평균값이나 확률분포곡선, 표준오차 등과 같은 파라미터 등을 결정하여 확률특성을 획득하고 이를 이용하여 다음 과정의 분석에서 사용되는 자료로 사용한다. 두 번째 과정에서는 이전의 과정에서 획득한 자료들을 이용, 분석을 수행한다. 이 과정의 분석에서 주로 사용되는 방법으로는 몬테카를로 모사기법(Monte Carlo Simulation Method)과 1계2차 모멘트법(First Order Second Moment Method)이 주로 사용된다. 몬테카를로 분석은 고려대상인 불연속면의 파라미터와 동일한 확률특성을 갖는 확률변수를 이용하여 수 없이 많은 임의의 값을 생성시키고 이를 계산에 사용, 모사(simulation)를 통하여 확률 값을 획득하는 방법이다.

3. 암반사면에서 확률론적 해석방법의 응용

앞 서 기술된 바와 같이 암반사면의 해석에서는 불연속면의 방향성과 사면과의 상대적인 위치에 따라 안정성을 파악하는 운동학적인(kinematic) 해석과 불연속면의 강도특성을 고려하여 동역학적(kinetic) 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 불안정성의 확률(probability of kinematic instability)과 동역학적 불안정성의 확률(probability of kinetic instability)을 계산하였으며 이를 곱하여 파괴확률을 산정했다.

3.1 운동학적 분석

운동학적인 불안정의 조건은 2.1절과 같다. 운동학적인 분석은 기하학적으로 사면의 파괴가 가능한가를 판단하는 것이다. 즉, 불연속면과 사면과의 상대적인 위치를 고려하여 일정 형태의 파괴가 발생할 것인가 하는 것을 판단하는 것으로 Markland(1972)에 의해 제안되었다. 이러한 운동학적인 분석은 사면에 존재하는 외력이 중력 이외에는 존재하지 않는다는 가정 하에서 평사투영망을 이용하여 수행되어진다. 그러나 평사투영망을 이용한 운동학적인 분석은 반복적인 계산을 수행해야 하는 확률론적 해석 방법, 특히 몬테카를로 분석(Monte Carlo Method)에서는 적절하지 못한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 2.1절에 제시된 운동학적 불안정 조건을 이용하여 몬테카를로 분석에서 임의로 생성된 불연속면의 운동학적 불안정 가능성을 평가할 수 있는 알고리즘을 개발, 사용하였다. 이 알고리즘은 각 파라미터들의 확률특성으로부터 생성된 임의의 값을 계산하고 평가하여 운동학적으로 불안정한가 하는 것을 판단할 수 있다. 따라서, 많은 수의 반복계산이 수행된 후 운동학적으로 불안정한 반복계산횟수를 전체 계산한 횟수와 비교하여 운동학적 불안정의 확률을 산정해 냈다. 즉,

$$P_{km} = \frac{N_m}{N_T} \quad (2)$$

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

3.2 동역학적 분석

만일 운동학적인 분석을 통해 암반 내 불연속면의 기하학적 특성이 불안정한 것으로 판단되면 동역학적 분석을 통해 안정성이 분석되어야 한다. 앞서 기술한 바와 같이 동역학적 분석은 한계 평형법을 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. 이러한 분석 방법은 Hoek and Bray(1981)에 의해 제안되었으며 현재 가장 폭넓게 사용되고 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.

$$P_{kn} = \frac{N_f}{N_m} \quad (3)$$

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

3.3 파괴확률의 산정

파괴확률을 산정하기 위하여 몬테카를로법이나 1계2차 모멘트법과 같은 여러 방법들이 사용되고 있으나 본 연구에서는 몬테카를로법(Monte Carlo Simulation Method)을 사용하였다. 몬테카를로법(Monte Carlo Simulation Method)은 각 입력변수들의 확률특성 즉, 확률분포곡선(probability density distribution)과 평균을 이용하여 분석하고자 하는 상태함수(state function)에 반복적으로 수치를 입력하여 상태함수 값을 계산해내고 이를 상태함수 값의 분포곡선으로 표현, 파괴확률을 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 운동학적 분석과 동역학적 분석 모두 몬테카를로 해석법을 사용하였으며 각각의 분석으로부터 운동학적 불안정확률과 동역학적 불안정확률을 획득했다.

이렇게 획득된 운동학적 불안정확률과 동역학적 불안정확률은 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,

$$P_f = \frac{N_m}{N_T} \times \frac{N_f}{N_m} \quad (4)$$

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 받는가를 판단할 수 있다(Park and West, 2001).

4. 현장 적용

현장적용을 위해 선택된 현장은 높이 약 45m의 암반 절취사면으로 절개면의 방향은 210/75이다. 현장으로부터 6개의 절리군이 파악되었으며 각각의 확률특성은 표 1과 같다. 본 연구에서는 절리군의 방향성에 대한 확률분포곡선으로 Fisher 분포 함수를 사용하였으며 Fisher 분포함수의 분산정도를 나타내는 Fisher 상수를 구하였다. 각 불연속면에 대한 실내 직접전단시험을 통해 전단강도정수를 구하였으며 10여 차례의 실험을 거쳐 내부마찰각의 평균값과 표준편차를 구하였다. 표 1의 입력변수의 확률특성과 앞서 제시한 계산식에 의해 계산한 각 절리군의 파괴확률은 표 2와 같다.

결정론적 해석에 의하면 J4와 J5 절리군이 불안정한 것으로 평가되었으나 파괴확률이 계산된 절리군은 J1, J4와 J5 절리군이었다. J1 절리군은 34.5%의 운동학적 불안정 확률을 보이고 있으나 동역학적 불안정 확률이 1.8%로 매우 작아 전체적인 파괴확률은 0.72%로 계산되었다. 그러나 이 절리군은 운동학적인 불안정확률이 매우 높아 풍화 등과 같이 절리면의 전단강도의 약화가 발생할 경우 쉽게 파괴가 일어날 것으로 보인다. 또한 이 경우 결정론적 분석에서 절리군의 평균값으로 평가했을 때 운동학적 불안정 가능성은 없는 것으로 판단되었으나 방향성의 분산을 고려한 확률론적 해석에서는 34.5%의 높은 불안정 가능성을 보이고 있어 결정론적 분석이 오차를 일으킬

가능성이 높음을 보여 주고 있다.

J4 절리군은 안전율이 0.29로 매우 작은 값을 보이고 있으나 파괴확률이 0.87%로 붕괴가 발생할 가능성은 매우 작은 것으로 평가된다. 이 경우 역시 운동학적 불안정확률이 62.1%로 매우 높아 전단강도의 저하가 발생할 경우 매우 불안정해질 가능성이 높은 것으로 보인다. J4 절리군의 경우 결정론적 해석에서는 절리군의 평균 방향성이 운동학적 불안정 조건 내에 포함되어 불안정한 것으로 판단되었고 안전율 값도 0.29로 매우 불안정한 것으로 파악되었다. 그러나 확률론적 분석에서는 동역학적인 불안정 확률이 매우 작아 전체적인 파괴확률도 작은 것으로 평가되어 결정론적인 분석과는 상반된 분석 결과가 제시되었다. J5 절리군은 안전율도 0.69로 매우 작은 값을 보이며 파괴확률도 50.9%로 매우 위험한 것으로 평가되어 결정론적 해석과 확률론적 해석이 일치되고 있음을 보여주고 있다.

한편, J4 절리군과 J5 절리군의 경우 결정론적 해석에서는 안전율이 낮은 J4 절리군이 더 불안정한 것으로 평가되었으나 확률론적 해석에서는 J5 절리군이 더 높은 파괴확률을 보여 주고 있다. 이러한 결과는 전단강도의 평균값에 의한 안전율의 계산에서는 J4 절리군이 더 낮은 값을 보여 주고 있으나 전단강도의 분산을 고려하였을 경우 안전율이 1보다 작을 가능성이 J5 절리군에서 더 높음을 알 수 있다.

표 1 절리군의 입력변수 및 확률 특성

Set I.D.	Mean Orientation	Fisher Constant	Mean Friction Angle	STD of Friction Angle
J1	217/77	42	30	3
J2	183/5	53	30	3
J3	163/63	29	30	3
J4	196/56	119	30	3
J5	227/37	36	30	3
J6	061/66	106	30	3

표 2 평면파괴의 결정론적 분석 및 확률론적 해석 결과

Set I.D.	Factor of Safety	Probability of Failure		
		Kinematic	Kinetic	Total
J1	Stable	0.345	0.018	0.0062
J2	Stable	0	0	0
J3	Stable	0	0	0
J4	Stable	0.621	0.014	0.0087
J5	Stable	0.759	0.671	0.509
J6	Stable	0	0	0

5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 해석 방법의 하나로 암반사면의 해석 특성을 고려한 분석방법을 제안하였다. 이 방법은 암반사면의 안정성이 불연속면의 전단강도뿐만 아니라 불연속면의 방향성에 의해서도 크게 좌우된다는 점에서 착안하여 암반사면의 파괴확률을 운동학적인 불안정 확률과 동역학적 불안정 확률로 구분하여 계산하였다. 이 방법은 기존의 확률론적 해석방법들이 명확한 구분 없이 운동학적 분석과 동역학적 분석을 수행하여 파괴확률의 계산이 복잡하고 암반사면의 해석 특성이 고려되지 않은 단점을 보완하였고 운동학적인 조건과 동역학적인 조건 중 어떤 조건에 의해 파괴가 주로 발생하는 지를 판단할 수 있다. 따라서 이러한 판단을 근거로 불안정한 현장에 대하여 어떠한 대책공법이 적절하게 적용할 수 있는 지 판단할 수 있을 것으로 보인다.

결정론적인 해석결과와 확률론적인 해석 결과를 비교한 결과, 일부의 절리군에서 서로 다른 결과가 도출되었다. 이는 결정론적 해석 방법이 분산되어 있는 자료 중 대표값만을 선택하여 계산에 이용함으로써 분산이 심한 실제 현장 상황이 정확하게 반영되지 못했기 때문으로 사료된다. 따라서 안정성을 판단해야 하는 대상 사면이 붕괴 시 발생할 수 있는 피해의 규모가 매우 큰 경우나 현장 자료의 분산이 매우 심한 경우 확률론적 해석 방법에 의한 안정성 해석이 반드시 수행되어야 하며 최근 유럽과 미국의 설계기준에서도 입력자료의 분산을 고려한 안정성 해석을 수행하도록 요구하고 있다. 따라서 확률론적 해석방법은 결정론적 해석 방법을 보완할 수 있는 방법으로써 사용가능하며 경우에 따라서는 결정론적 방법을 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국지반공학회(1997) 사면안정, 지반공학 시리즈
2. Hoek, E and Bray, J.W. (1981) Rock Slope Engineering, Institute of Mining and Metallurgy, London.
3. Markland, J.T. (1972) A useful technique for estimating the stability of rock slope when rigid wedge sliding type of failure is expected, Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19.
4. Norrish, N.I. and Wiley, D.C. (1996) Rock slope stability analysis, Landslides; Investigation and Mitigation, Report 247. National Research Council.
5. Park, H.J. and West, T.R. (2001) Development of a probabilistic approach for rock wedge failure, *Engineering Geology* 59, pp. 233-251.
6. Peck, R.B. (1969) Advantages of limitations of the observational method in applied soil mechanics, *Geotechnique*, 19(2), 171-187