

점추정법을 이용한 암반사면의 파괴확률 산정

박혁진¹⁾, 장범수²⁾, 민경덕³⁾

1. 서론

최근 사면의 안정해석분야에서 자주 사용되고 있는 확률론적 해석 방법은 현장에서 획득되는 자료들의 분산이 심하고 충분한 양의 자료가 획득되지 못할 경우 자료 내에 포함되는 불확실성과 가변성을 효과적으로 다룰 수 있는 방법 중의 하나로 인식되어 왔다. 그러나 대개 확률론적 해석 방법에서 이용되는 몬테카를로 시뮬레이션기법(Monte Carlo simulation method)은 파괴확률을 산정하기 위하여 수 많은 반복적인 계산과정이 요구되며 따라서 많은 시간과 노력이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 특히 파괴확률이 작은 경우 필요한 반복 계산의 수가 기하급수적으로 증가하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위한 방법의 하나로 점추정법(point estimate method)을 제안하여 적용하였다.

2. 점추정법

점추정법은 Rosenblueth(1975)에 의해 제안되었으며 Harr(1981)에 의해 공학적인 문제에 활용되었다. 이 방법은 확률변수(random variable)의 통계적 moments, 즉 평균, 표준편차, skewness를 이용하여 계산하고자 하는 함수의 확률을 평균과 표준편차로 표현해 내는 방법으로 Monte Carlo 방법이 확률변수의 정확한 정보(확률분포함수, 평균, 표준편차 등)를 기초로 하여 계산하고자 하는 함수의 정확한 확률을 계산해내는 과정인 반면 점추정법은 간단한 계산식과 통계적 moment 정보만을 이용하여 함수의 확률을 추정하는 과정이다. 따라서 Monte Carlo 방법이 반복적인 연산을 수행함으로써 많은 계산시간을 필요로 하는 반면 점추정법은 확률변수의 moment만을 사용하여 간단한 연산을 수행함으로써 빠른 시간 내에 값을 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 반면 점추정법은 각 확률변수의 moment만을 사용하여 함수의 moment만을 획득하고 이로부터 파괴확률을 추정하기 때문에 근사값만이 획득가능하다는 단점을 가지고 있다.

3. 불연속면의 확률특성

3.1 불연속면의 방향성

불연속면의 방향성은 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이며 특히 운동학적(kinematic) 해석에 중요한 영향을 미친다. 이는 현장으로부터 획득된 불연속면

주요어 : 점추정법, 불확실성, 암반사면, 확률론적 해석 방법

- 1) 한국시설안전기술공단 기술개발실 (hjpark@kistec.or.kr)
- 2) 한국시설안전기술공단 기술개발실 기초지반팀장 (orpheus@kistec.or.kr)
- 3) 연세대학교 지구시스템과학과

의 방향성은 매우 분산이 심하며 불확실성이 개입되었기 때문이다. 그러나 결정론적 해석에서는 이렇게 분산이 심한 방향성으로부터 단 한가지의 값을 이용하여 분석을 수행하므로 방향성내에 포함되어 있는 불확실성을 충분히 고려하기 힘들다는 문제점을 가지고 있다. 그림 1은 현장으로부터 측정된 방향성 자료의 평사투영 및 rose diagram의 결과이다. 현장 측정결과를 기초로 하여 Mahtab and Yegulalp (1984)이 제안한 알고리즘을 이용하여 절리군을 구분하였으며 표1은 절리군을 구분한 결과이다. 방향성의 확률밀도함수로는 Fisher(1953)에 의해 제안된 Fisher 함수를 이용하였다.

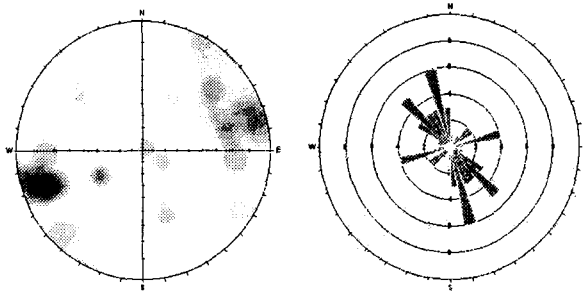


그림 1. 불연속면의 방향성 분포

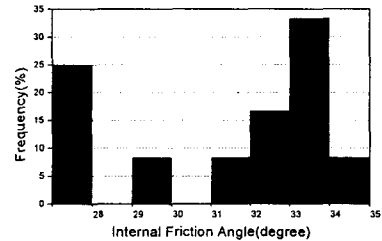


그림 2. 불연속면의 마찰각 분포

3.2 전단강도 특성

예상 파괴면의 전단강도 역시 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 전단강도는 현장시험이나 실내시험을 통해 획득되어야 하므로 정확한 값을 얻기 위한 충분한 양의 자료를 획득하기 어려운 현장여건이나 자료 수의 한계로 인해 불확실성이 쉽게 포함된다. 전단강도의 작은 차이는 사면의 안정성에 미치는 영향이 매우 크므로 적절한 전단강도의 결정은 사면의 안정성 해석에 매우 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 총 15개의 코어 샘플에 대하여 직접전단강도 시험을 수행하였으며 그 결과 획득된 마찰각의 범위는 27도에서 35.2도로 평균 32.2도와 표준편차 3.0도를 보이고 있다. 또한 0.07MPa의 점착력 값을 보였으나 Hoek(1997)의 제안에 따라 고려하지 않았다. 그림 2는 직접전단시험을 통해 획득된 불연속면 마찰각의 히스토그램이다. 그림에서 알 수 있듯이 뚜렷한 분포곡선을 보이지 않으며 따라서 본 연구에서는 저자의 이전 연구 결과(Park and West, 2001)에 따라 정규분포곡선을 이용하여 마찰각의 분포곡선으로 활용하였다.

4. 결정론적 해석 방법의 결과

점추정법에 의한 해석 결과와의 비교를 목적으로 기존의 결정론적 해석방법을 이용하여 암반사면의 안정성을 분석해 보았다. 결정론적 해석에서는 확률론적 해석 방법에서 사용된 동일한 공식과 자료를 이용하였다. 특히 결정론적 해석방법이 자료의 분산을 분석할 수 없음을 고려하여 평균값을 자료의 대푯값으로 선정하여 분석에 사용하였다. 표 1은 분석에 사용한 불연속면 입력자료이며 표 1의 내용 중 Fisher constant는 Fisher 함수에서 자료의 분산정도를 의미하는 상수이다.

표 1. 불연속면의 방향성

Joint set	Mean dip dir/ dip	Fisher const.
J1	078/80	53
J2	270/28	280
J3	255/64	58
J4	115/18	23

안정성 해석을 위해 먼저 표 1의 자료를 이용하여 각 불연속면 군에 대한 운동학적 분석(kinematic analysis)을 수행하였다. 운동학적 해석 결과 절리군 3에서만 운동학적 파괴 가능성이 인지되었으며 따라서 절리군 3에 대하여 한계평형해석기법을 이용한 운동역학적 분석을 수행하였으며 결정론적 해석방법의 결과는 표 2와 같다. 본 연구에서는 암반사면 내의 지하수위가 전체 사면 높이의 0%에서 50%까지 변동하는 것으로 가정하여 분석에 이용하였다. 분석 결과 건기시의 안전율도 0.36을 보이고 있어 매우 불안정한 것으로 파악되었다.

5. 점추정법에 의한 결과

불연속면의 특성에 포함되어 있는 불확실성을 고려하기 위한 방법으로 사용되는 기법이 확률론적 해석 방법이다. 불연속면의 확률특성(random properties)을 고려한 결과 운동학적인 분석에서는 결정론적 해석 결과와는 달리 절리군 2(12.0%)와 3(68.4%)에서 운동학적인 파괴 가능성이 인지되었다. 앞서 밝힌 바와 같이 이러한 결과는 결정론적 해석 결과와는 차이를 보이는 것으로 이는 절리군 2에 포함되어 있는 불연속면 중 약 12%가 운동학적으로 불안정 영역 내에 포함되어 있음을 의미한다. 그러나 결정론적 해석에서는 분산이 고려되지 않으므로 그러한 점이 인지되지 못했다. 운동학적으로 불안정성을 보이는 절리군 2와 3에 대하여 운동역학적 분석을 수행하였다. 해석 결과 절리군 2의 평균 안전율 값이 1.19에서 0.79까지의 분포를 보였으며(표 3), 특히 건조시에는 안정한 상태를 보이고 있으나 지하수위가 70%에 이르렀을 때 평균 안전율이 1이하로 떨어지면서 불안정한 결과를 보이고 있다. 반면에 점추정법에 의한 해석결과에 의하면 건조 시에 8.5%의 파괴확률을 보이고 있다. 이러한 결과는 Priest and Brown(1982)에 의해 제안된 영구사면과 임시사면의 허용 파괴확률이 각각 1%와 10%인 점을 감안 할 때 건조 시에도 영구적인 시설물로는

표 2. 결정론적 해석법의 결과

Height of water table	Factor of safety
0%	0.36
10%	0.35
20%	0.31
30%	0.23
40%	0.13
50%	0

표 3. 점추정법에 의한 해석 결과

Height of water table	Set 2			Set 3		
	Mean FS	STD FS	Probability of kinetic instability	Mean FS	STD FS	Probability of kinetic instability
0%	1.19	0.138	0.085	0.365	0.042	1.0
10%	1.18	0.137	0.088	0.351	0.041	1.0
20%	1.17	0.136	0.102	0.306	0.036	1.0
30%	1.15	0.134	0.125	0.232	0.027	1.0
40%	1.13	0.131	0.168	0.128	0.015	1.0
50%	1.09	0.126	0.237	0	0	1.0
60%	1.05	0.122	0.351			
70%	0.99	0.115	0.517			
80%	0.94	0.109	0.724			
90%	0.87	0.100	0.905			
100%	0.79	0.092	0.988			

적절하지 않음을 보여주고 있다. 한편 지하수위가 20%이상으로 상승할 경우 파괴확률이 10.2%로 증가하여 조사대상 사면은 임시사면으로서도 사용하기에는 매우 불안정한 상태임을 보여주며 지하수위가 100%에 이르렀을 때는 파괴확률이 98.8%로 증가하여 매우 불안정한 상태임을 보여주고 있다. 그러나 이러한 결과는 안전한 상태임을 지시하는 결정론적 해석결과는 매우 다른 것으로 불연속면의 불확실성을 고려하지 않을 경우 매우 상이한 결과가 발생할 수 있음을 의미한다. 절리군 3의 경우 건조 시에도 100%의 파괴확률을 보이고 있으며 이러한 결과는 결정론적인 해석 결과와 일치한다.

6. 결론

암반사면의 안정해석에는 불확실성이 개입하게 되며 이러한 불확실성을 효과적으로 다루기 위해 확률론적인 해석 방법이 이용된다. 대표적인 해석방법으로는 Monte Carlo simulation 기법이 있으나 이 방법은 파괴확률의 계산을 위해 수 많은 반복적인 계산과 계산시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 점추정법을 이용하여 파괴확률을 획득하는 기법을 제안하였으며 해석결과를 결정론적인 해석결과와 비교해 보았다.

Reference

- Rosenbluth, E. (1975) Point estimate for probability moments, Proc. Nat. Acad. 72.
- Harr, M.E. (1987) Reliability Based on Design in Civil Engineering, McGraw-Hill.
- Hoek, E. (1997) Rock Engineering Course Note, through internet.
- Mahatab, M.A. & Yegulalp, T.M. (1982) A rejection criterion for definition of clusters in orientation data. Proc. of 22nd Symp. Rock Mechanics.
- Priest, S.D. & Brown, E.T. (1983) Probabilistic atability analysis of variable rock slope. Trans. Inst. Min.
- Park H.J. & West, T.R. (2001) Development of probabilistic approach for rock wedge failure, Engineering Geology, 59.