

확률적 방법을 이용한 지하구조물 안정성 해석

나상민 · 문현구¹⁾

1. 서론

지하구조물의 안정성 해석을 수행하는 일반적인 방법은 실험실 및 현장실험을 통한 암반 물성값의 대표치를 입력값으로 이용하는 결정론적(deterministic) 해석방법이다. 그러나 결정론적 방법은 암반이 가지고 있는 물리적, 구조적 불확실성으로 인하여 해석에 필요한 입력 자료의 불확실성이 나타나며, 이러한 입력자료의 불확실성은 구조응답의 불확실성을 유발하게 된다. 암반물성의 공간적 분포특성은 암반 거동의 불확실성을 유발하는 가장 큰 요소중 하나이다. 기존의 해석은 대부분 이러한 암반의 불확실성을 반영하기 위하여 안전율 개념을 사용하였다. 하지만 이러한 안전율 개념은 전체적 물성을 대표하는 수치를 이용하여 안정성을 검토한 것이어서, 실제 발생 가능한 위험정도를 평가하기는 어렵다는 문제점이 있다. 또한 경험적으로 사용하는 안전율 개념이 특수한 불확실성이 존재하는 곳(물성의 분산특성이 큰 곳 등)에서는 위험한 오판을 야기 시킬 수 있다.

불확실성에 대처할 수 있는 가장 일반적 방법은 확률개념을 도입하는 것이다. 물성 등의 입력자료가 분포특성을 갖는 랜덤변수로 표현된다면 해석결과 또한 확률적 개념을 갖는 분포를 띄게 된다. 이렇게 확률적 개념을 도입하여 암반의 불확실성을 합리적으로 표현하고, 해석에 접목시키는 방법은 암반공학이 가지는 자료획득의 한계성을 극복할 수 있는 대안적 개념을 가지고 있다. 본 연구에서는 확률이론을 암반공학에 접목하여 보다 합리적인 지하구조물 안정성 검토를 하고자 한다.

2. 본론

2.1 기존의 연구

확률이론이 암반공학 분야에 적용된 연구 사례를 살펴보면 초기에 Baecher와 Ingra(1981)가 지반침하문제에 FOSM(first order second moment) 해석기법을 도입하였다. Quek과 Leung (1995)은 전단강도 변수인 c 와 ϕ 의 공간 변화와 불확실성, 절리면의 분산성질 등을 고려한 암반사면의 파괴확률을 구하기 위하여 몬테카를로 모의분석법과 FORM(first order reliability method)을 이용하였다. Shin과 Okubo(1999)는 weakest link theory에 기초한 확률적 접근방법을 이용하여 hydro-fracturing breakdown이 breakdown pressure와 crack azimuth에 미치는 영향 분석하였다. Nguyen과 Chowdhury(1984)는 노천광에서의 사면안정 문제에 Rosenblueth의 간편법을 이용한 분석을 도입하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 암반공학 분야에서는 주로 사면안정성의 해석에 확률이론이 도입되어 있다. 이는 암반사면의 안정성 해석이 이론적으로 잘 규명되어 있고, 안전율 계산에 필요한 변수들을 쉽게 랜덤변수화 하여 적용할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 지하구조물 해석에 있어서 확률이론의 적용은 아직까지는 미미한 실정이고 나경웅(1999)이 지하구조물 굴착시 변위와 소성영역에 대한 확률적 특성을 분석한 바 있다.

주요어: 랜덤변수, 확률이론, 불확실성

1) 한양대학교 지구환경시스템공학과(smna@hrg.hanyang.ac.kr, hkmoon@hanyang.ac.kr)

2.2 FOSM 분석법

FOSM은 한계상태 방정식과 랜덤변수의 2차 모멘트 값을 이용하는 방법이다. 분석은 정규분포를 따르는 랜덤변수로 표현되는 변수값(X_i)을 식 (1)을 이용하여 표준정규분포를 따르는 변수값(Y_i)로 변환시킨다.

$$Y_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (1)$$

여기서 μ_{X_i} 는 랜덤변수 X_i 의 평균이고, σ_{X_i} 는 랜덤변수 X_i 의 표준편차이다. 만약 랜덤변수 X_i 가 정규분포를 따르지 않을 경우 정규분포를 따르는 새로운 변수로의 변환의 단계가 필요하다. 이때 정의된 한계상태 방정식도 Y 영역으로 변환시킨다.

Y 영역에서 원점과 한계상태 방정식의 최소거리가 safety index(β)가 되며, 파괴확률(p_f)은 다음과 같이 정의된다.

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

여기서 Φ 는 표준정규분포 함수이다.

3. 전산 해석

3.1 유한요소 해석

파괴율과 파괴확률을 비교해 보기 위하여 직경 10m 원형공동 굴착에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 사용한 프로그램은 상용 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-2D이다. 해석영역은 50×50 m 영역으로 하였고, 경계조건은 좌우경계는 수평방향 변위를 고정하였으며, 상하경계는 수직방향 변위를 고정하였으며, 모서리점 4개는 고정시켰다. 파괴조건식은 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 사용하였고, 입력물성은 단위중량 2.5 t/m^3 , 점착력(c) 40 t/m^2 , 내부마찰각(ϕ) 40° , 인장강도(T) 30 t/m^2 를 사용하였고, 축압계수(K) 1, 상재하중으로 25 t/m^2 를 사용하였다. 해석에 사용한 요소망은 그림 1과 같다.

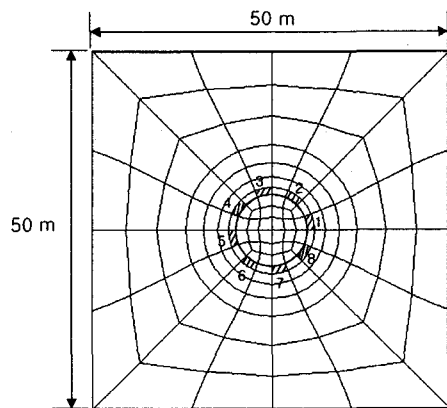


그림 1 해석에 사용된 유한요소망

PENTAGON에서 사용하는 파괴율(failure rate)에 대한 정의를 살펴보면 다음과 같다.

$$\text{파괴율}(r) = \frac{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2]^{1/2}}{c \cdot \cos \phi - \frac{(\sigma_x + \sigma_y) \sin \phi}{2}} \quad (3)$$

이는 현재 응력원의 반지름을 파괴포락선에 접하는 응력원의 반지름으로 나누어준 값이다. 파괴율이 1이상이 되면 파괴가 일어나 소성영역으로 되고, 1 이하일 경우 탄성영역이다. 해석 결과는 FOSM 해석결과와 비교하였다.

3.2 FOSM을 이용한 파괴확률 해석

본 연구에서 사용한 확률적 해석방법 FOSM은 랜덤변수로 표현되는 변수값을 평균과 표준편차를 이용하여 정의하고 파괴조건식을 이용하여 파괴확률을 구하는 방법이다. 본 해석에서도 유한요소 해석에서 사용한 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 동일하게 이용하였고 조건식은 다음과 같다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4)$$

본 해석에서 랜덤변수로 표현하는 점착력과 내부마찰각이 정규분포를 따른다고 가정하고 COV(coefficients of variations)를 10%에서 40%까지 변화시켜 가면서 위 3.1의 유한요소 해석결과로 나온 응력상태를 이용하여 FOSM 해석을 수행하였다. 표 1은 그림 1에서 표시한 1~8 요소에 대한 파괴율 및 FOSM 해석 결과를 나타내고 있다.

표 1에 나타난바와 같이 COV 값이 작을 경우 파괴확률은 낮은값을 보이고 COV 값이 커질수록 파괴확률 값이 급격히 커지고 있다. Pariseau(1973)는 실험실에서의 암석물성 측정치의 COV는 30%가 보통이며, 현장에서는 보통 이보다 크다고 밝혔다.

표 1. 파괴율과 파괴확률의 결과 비교

요소번호	파괴율	COV 10%		COV 20%		COV 30%		COV 40%	
		β	p_f	β	p_f	β	p_f	β	p_f
1	0.846	3.34	0.00042	1.61	0.054	1.11	0.134	0.84	0.201
2	0.812	3.96	0.00039	1.98	0.024	1.32	0.093	0.99	0.161
3	0.798	4.10	0.00002	2.05	0.020	1.37	0.085	1.03	0.152
4	0.831	3.62	0.00015	1.81	0.035	1.21	0.113	0.90	0.184
5	0.853	3.21	0.00066	1.61	0.054	1.07	0.142	0.80	0.212
6	0.847	3.33	0.00043	1.66	0.048	1.11	0.134	0.83	0.203
7	0.845	3.37	0.00038	1.69	0.046	1.12	0.131	0.84	0.201
8	0.852	3.24	0.00060	1.62	0.053	1.08	0.140	0.81	0.209

한편 확률이론을 적용한 구조물의 파괴확률을 구할 경우, 계산에 의해 구해진 파괴확률이 가지는 의미에 대한 분석 또한 중요하다. 사면문제에서는 도시지역 사면의 경우 0.01%보다 낮은 파괴확률이 필요하다는 자료가 제시(Tobutt and Richards, 1979)되어 있으며, 노천광에서 사면의 파괴확률은 10% 정도를 허용할 수 있다고 한다. 페루의 open pit mine에서

Priest와 Brown의 조사에 의하면 전체적인 확률은 0.3% 이하로, 개별 벤치의 확률은 10%까지 허용할 수 있다(Nguyen and Chowdhury, 1984)고 한다. 하지만 다양한 지하구조물의 파괴확률이 어떤 기준치를 만족해야 하는지에 대한 연구는 미진한 상태이다.

4. 결 론

본 연구에서 수행한 해석을 통하여 파괴율과 파괴확률과의 관계를 살펴보았다. 파괴율이 낮아질수록 파괴확률도 낮아지는 경향은 파악할 수 있었으나 선형적인 관계를 보이지는 않았다. COV 40%일 때 최고 파괴확률이 5번요소(파괴율 0.853)에서 0.212가 나왔다. COV 10%와 COV 40%일 때를 비교해 보면 파괴확률이 보통 수백배의 차이가 생기며 약 1000배 차이가 나는 경우도 있었다. 따라서 암반물성의 공간 분산성이 파괴확률에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다. 파괴확률에 대한 분석을 통하여 신뢰도에 기반한 설계(reliability-based design)로의 발전을 기대할 수 있을 것이다.

지하구조물 해석에서 한 요소의 파괴여부로 전체 구조물의 파괴를 규정지을 수는 없다. 또한 아직까지는 파괴확률이 어느 정도의 수준을 만족해야 하는가에 대한 연구도 부족한 상태이다. 본 연구에서 수행한 개별 요소에 대한 파괴확률이 전체 구조물의 파괴확률로 확장되기 위해서는 구조물의 파괴에 대한 정의가 필요하다. 구조물의 파괴를 어떻게 정의할 것인가에 대한 연구가 앞으로 수행되어야 할 과제이다.

5. 참고문헌

- Glaser, S.D. and Doolin, D.M., 2000, "New directions in rock mechanics - report on a forum sponsored by the American Rock Mechanics Association", *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 683-698
- Nguyen, V. U. and Chowdhury, R. N., 1984, "Probabilistic study of spoil pile stability in strip coal mines - two techniques compared", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 21, No. 6, pp.303-312
- Melchers, R. E., 1999, *Structural reliability analysis and prediction*, John Wiley & Sons, p.437
- Okubo, S. and Nishimatsu, Y., 1986, "Computer modelling of stochastic rock failure during uniaxial loading", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 23, No. 5, pp.363-370
- Pariseau, W. G., 1973, "Influence of rock properties variability on mine opening stability analysis", *9th Canadian symposium on rock mechanics*
- Quek, S. T. and Leung, C. F., 1995, "Reliability based stability analysis of rock excavations", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 32, No. 6, pp. 617-620
- Shin, K. and Okubo, S., 1999, "Probabilistic approach to hydrofracturing breakdown", *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 231-236
- Tobutt and Richards, 1979, "The reliability of earth slopes", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.* 3, 323-354
- 나경웅, 1999, 지하구조체의 확률유한요소해석을 위한 응답면을 이용한 적응적 중요표본추출 기법, Ph. D., 연세대학교 대학원, p.168