

FracSys와 UDEC을 이용한 사면 파괴 양상 분석 통계적 절리망 생성 기법 및 Monte Carlo Simulation을 통한 사면 안정성 해석

김태희, 최재원²⁾, 윤운상²⁾, 김춘식⁴⁾

¹⁾ 주식회사 넥스지오 기술연구소, R&D Center, NexGeo Inc.

²⁾ 주식회사 넥스지오, NexGeo Inc.

³⁾ 서울대학교 지구환경과학부, Graduate Course in SEES, Seoul National University

⁴⁾ 건설기술연구원, Senior Researcher , Korea Institute of Construction Technology

개요(SYNOPSIS) : In general, the most important problem in slope stability analysis is that there is no definite way to describe the natural three-dimensional Joint network. Therefore, the many approaches were tried to analyze the slope stability. Numerical modeling approach is one of the branch to resolve the complexity of natural system. UDEC, FLAC, and SWEDGE are widely used commercial code for the purpose on stability analysis. For the purpose on the more appropriate application of these kind of code, however, three-dimensional distribution of joint network must be identified in more explicit way. Remaining problem is to definitely describe the three dimensional network of joint and bedding, but it is almost impossible in practical sense. Three dimensional joint generation method with random number generation and the results of generation to UDEC have been applied to settle the referred problems in field site. However, this approach also has a important problem, and it is that joint network is generated only once. This problem lead to the limitation on the application to field case, in practical sense. To get rid of this limitation, Monte Carlo Simulation is proposed in this study. 1) statistical analysis of input values and definition of the applied system with statistical parameter, 2) instead of the consideration of generated network as a real system, generated system is just taken as one reliable system, 3) present the design parameters, through the statistical analysis of output values

Results of this study are not only the probability of failure, but also area of failure block, shear strength, normal strength and failure pattern, and all of these results are described in statistical parameters. The results of this study, shear strength, failure area, pattern etc, can provide the direct basement on the design, cutoff angle, support pattern, support strength and etc.

주요어 (key word) : slope stability, UDEC, FracSys, Monte Carlo Simulation

1. 개 요

일반적으로 사면을 해석하는 방법은 여러 가지가 있다. 현장 자료를 이용하여 가장 일반적으로 사용되는 방법은 평사투영법을 활용한 방법이 가장 널리 사용된다. 이는 분포하는 절리의 방향과 사면의 방향

을 스테레오 네트에 투영하여 안정 영역 도시 여부를 확인하므로써 사면의 안정성을 평가하는 방법이 다. 하지만 최근 들어서는 수치모델링을 활용하여 사면의 안정성을 해석하는 방법이 널리 적용되고 있다. 이 경우 흔히 많이 사용되는 것이 FLAC, SWEGDE, UDEC 등이 활용된다. 이 중 최근 들어서 UDEC과 같은 불연속 안정성 해석 모델의 활용빈도가 점차 많아지고 있다. 하지만, UDEC은 그 모델의 특성상 절리의 현실적 묘사에 몇가지 제약점을 가지게 되는데, 현실적으로 명확한 절리망의 묘사가 불가능하다는 점은 우선 지적될 수 있을 것이다. 즉, UDEC의 현실적 적용을 위해서는 절리망의 묘사 방법이 명확히 규명되어야 한다. 이를 위한 시도로서 최근 난수 발생을 통한 통계적 절리망 생성 기법에 대한 논의가 진행되고 있으며, 실제 통계적으로 생성된 절리망이 UDEC을 활용한 사면의 안정성 해석에 적용된 예가 있다. 하지만, 이 역시 중요한 문제가 있는데, 하나의 대표 단면으로 해당 사면을 묘사하고자 한다는 점이다. 이 경우 가장 중요한 문제는 대표 사면이 실제 존재하는 사면인가 하는 점이며, 이 보다 앞서 보다 중요한 것은 대표 단면의 적용이 그 개념적인 면에서 중요한 혼선을 빚고 있다는 점이다. 즉, 대표 단면이란 해당 사면의 절리망을 규정하는 통계량들에 근거해 단지 통계적으로 동일하다고 인정할 수 있는 하나의 사면을 만든 것을 실제 사면의 형상으로 대체하고 있다는 것이다. 따라서 이에 대해 보다 명료한 해석을 위해서는 처음부터 끝까지 일관된 통계적 관점을 유지하는 것이 문제 해결에 중요한 단서를 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사면 안정성 해석을 위해 아래 그림 1에 제시된 바와 같은 작업 흐름을 제시하고자 한다. 본 연구를 위해 FracSys (통계적 3차원 절리 생성 프로그램) 와 UDEC이 활용되었다.

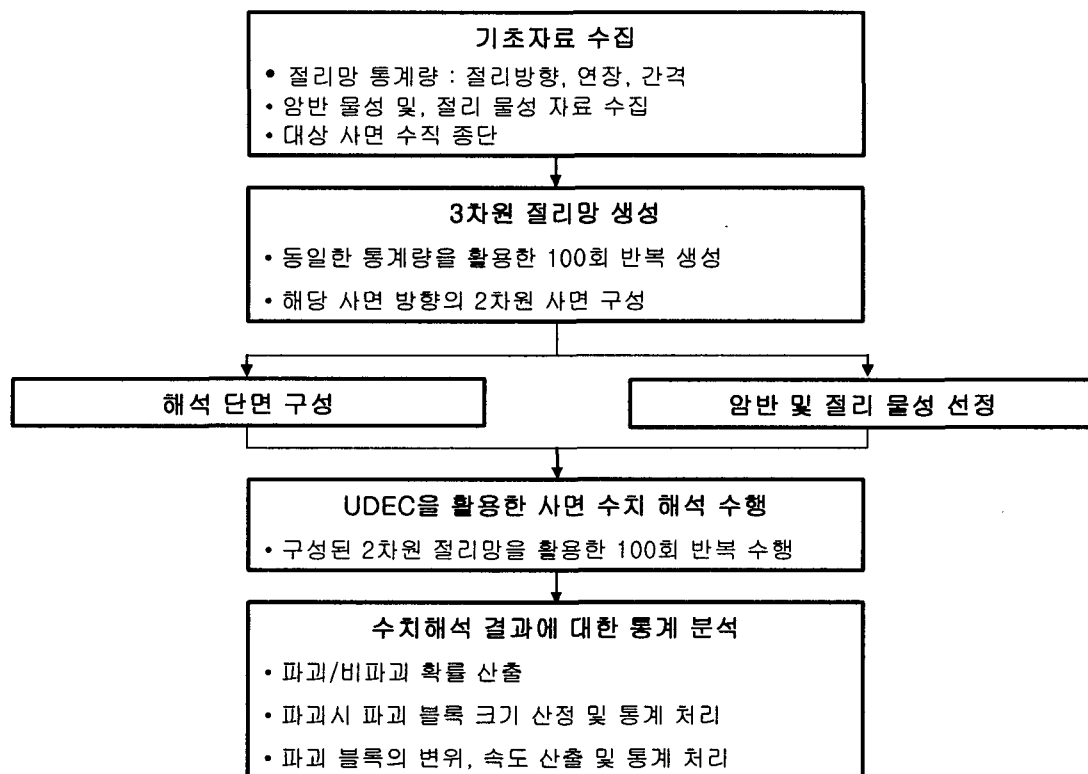


그림 1 사면 안정성 해석을 위한 FracSys와 UDEC을 활용한 Monte Carlo Simulation의 연구 흐름도

2. 통계적 절리망 생성

FracSys를 활용한 통계적 절리망 생성을 위해서 적용된 절리망의 통계량은 아래 표 1에 제시된 바와 같다. 표 1에 제시된 통계량을 이용하여 100회의 3차원상의 절리망을 반복 생성하였으며, 생성된 절리망을 해당 사면 방향에 따라 2차원의 단면을 생성하였다 (그림 2).

표 1 절리망 생성을 위해 적용된 통계량

	절리 방향 분포		절리 연장		절리 간격	
	Dip/Dip Direction	Fisher 상수	평균(m)	적용 분포	평균	적용 분포
set1	35/296	58	1.34	지수분포	3.02	지수분포
set2	77/105	91	2.33	지수분포	3.27	지수분포
set3	67/223	68	2.06	지수분포	2.76	지수분포

3. 사면안정성 해석 : Monte Carlo Simulation

FracSys를 이용하여 반복 생성된 절리망을 UDEC을 이용한 안정성 해석을 위하여 입력 자료로 활용하였다. 이를 UDEC에 입력한 후 형성된 암반블록의 분포는 그림 3에 제시된 바와 같다. 그림 4에 제시된 것은 모델링 결과 중 사면이 붕괴된 경우와 붕괴되지 않은 대표적이 두가지 경우에 대한 것이다. 본 연구에 적용된 절리 모델의 경우 80 %의 파괴 확률을 보이고 있다. 하지만 각각의 경우에서 파괴의 정도

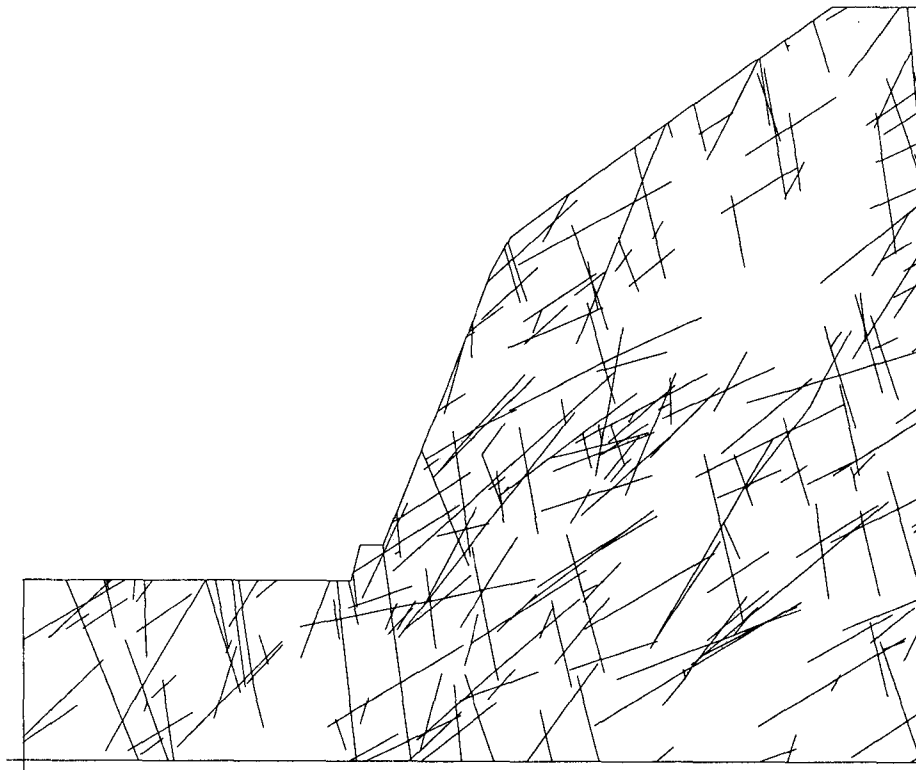
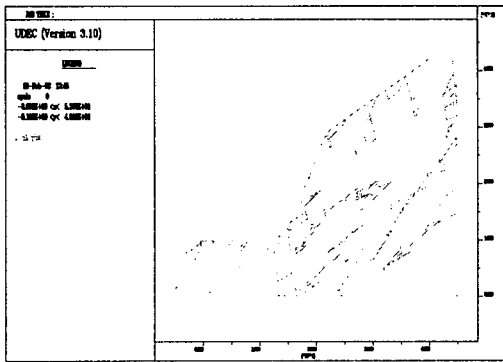


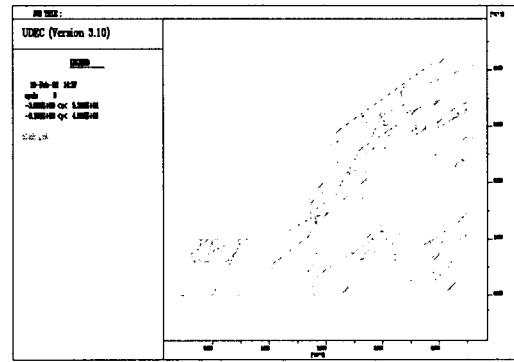
그림 2 해석 사면 단면

표 2 UDEC 모델링에 적용된 물성 및 모델링 관련 parameter

UDEC 모델링 계수	round	0.05 (m)
	cycle	10000 회
암반 물성	Density	2500 (kg/m ³)
	Bulk Modulus	1.5×10 ⁹ (Pa)
	Shear Modulus	6×10 ⁸ (Pa)
절리 물성	Joint Normal Stiffness	1.0×10 ⁹ (Pa/m)
	Joint Shear Stiffness	1.0×10 ⁹ (Pa/m)
	Joint Friction Angle	30°

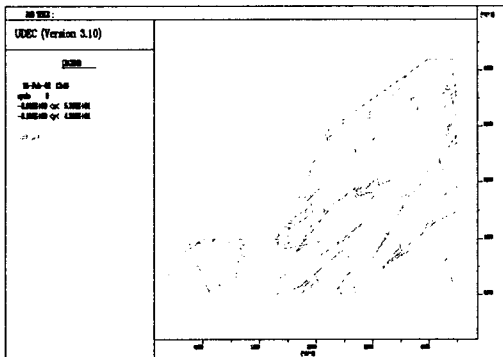


(a)

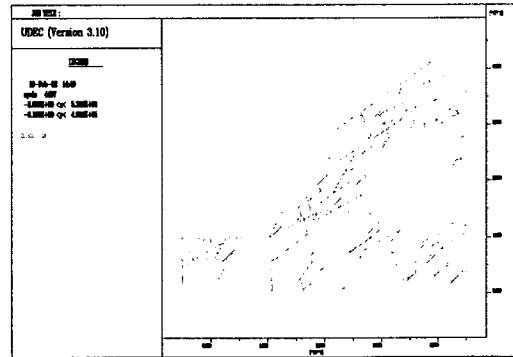


(b)

그림 3 생성된 절리망을 이용하여 구성된 암반의 블록 분포



(a)



(b)

그림 4 UDEC 해석 결과 ; (a) 비파괴 사면, (b) 파괴 사면

는 약간씩 다르게 나타난다. 반복 수행과정에서 나타난 파괴 정도를 분석하기 위해 파괴된 경우에 한하여 파괴 블록의 면적, 변위, 변위 속도, 및 전단강도/전단응력에 대해 통계 분석하였고 그 결과는 아래 표 3, 4, 5, 6, 7, 그리고 그림 5에 제시된 바와 같다.

표 3 파괴 면적 분포

	평균	표준편차
파괴면적 (m ²)	5.42	9.43
파괴면적 (log)	0.14	0.75

표 4 전체 경계면 변위 분포

	경계면 변위분포(Mpa)			경계면 변위분포 (Log; Pa)		
	개수	평균	표준편차	개수	평균	표준편차
x변위 (m)	2941	2.92E-03	3.36E-05	2941	-3.65E+00	2.45E-04
y변위 (m)	2941	1.38E-02	8.20E-05	2941	-3.19E+00	2.95E-04
전체변위 (m)	2941	1.47E-02	8.86E-05	2941	-2.99E+00	2.47E-04

표 5 파괴면 변위 분포

	경계면 변위분포(Mpa)			경계면 변위분포 (Log; Pa)		
	개수	평균	표준편차	개수	평균	표준편차
x변위속도(m/s)	41	3.27E-01	5.58E-01	41	-8.42E-01	4.79E+00
y변위속도(m/s)	41	4.79E-01	9.64E-01	41	-8.56E-01	5.53E+00
변위속도(m/s)	41	6.19E-01	1.09E+00	41	-5.05E-01	3.10E+00

표 6 전체 응력 분포 (tension 제외)

	경계면 응력분포(Mpa)			경계면 응력분포 (Log; Pa)		
	개수	평균	표준편차	개수	평균	표준편차
normal stress	1739	58.50	1.07E+02	1739	3.92	1.08E+00
shear stress	1593	31.62	5.74E+01	1593	3.64	1.10E+00

표 7 파괴 발생면 응력 분포 (tension 제외)

	경계면 응력분포(Mpa)			경계면 응력분포 (Log; Pa)		
	개수	평균	표준편차	개수	평균	표준편차
normal stress	28	16.06	41.68	28	3.49	3.34
shear stress	28	8.68	23.01	28	3.25	3.31

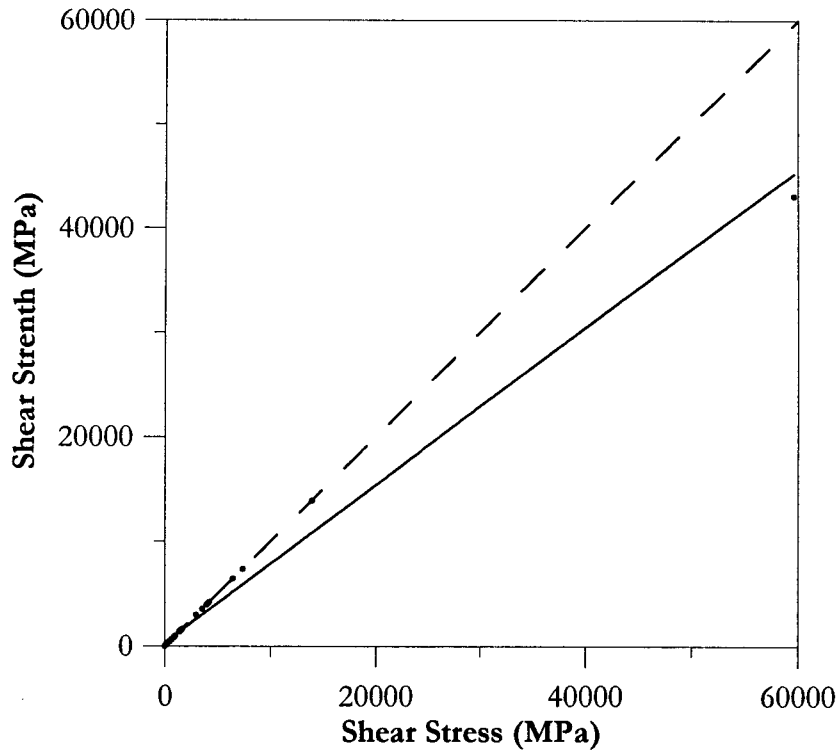


그림 1에서 보는 바와 같이 주어진 시스템에서는 각 각 경계면에 작용하는 전단 응력이 전단 강도 보다 강하게 나타난다. 그리고 실제 simulation의 결과에서도 이와 부합하는 경향을 보여 주고 있다 (파괴 확률 80%).

4. discussion

본 연구에서는 불연속 모델을 이용하여 사면의 안정성 해석에 Monte Carlo Simulation의 개념을 도입하여 일반적인 모델링 기법 활용의 한계를 두가지 관점에서 보완하고자 하였다. 첫 번째는 불연속 모델의 구성 방법에 대한 것으로 절리망 구성 방법의 현실화, 그리고 절리망 생성을 FracSys를 활용하여 반복 수행하여 실제 시스템을 통계적으로 보다 명확히 묘사하고자 하였다. 두 번째, 생성된 절리망을 UDEC 모델에 적용하여 사면의 안정성 해석에 역시 통계적 기법을 적용, 그 해석 과정에 이르기까지 일관된 관점을 견지하고자 하였다. 주어진 시스템은 역학적으로 불안정하여 사면의 붕괴가 예상되는 시스템으로 실제 계산 결과 역시 80%의 파괴 확률을 보여 주고 있다. 하지만, 여기서 주목할 점은 20%의 비파괴 사면이다. 이를 역으로 해석한다면, 역학적으로 안정된 사면이라 하더라도 실제 내부적인 절리망의 분포에 따라 파괴가 일어날 수 있음을 지시해 준다. 실제 수치 모델링 기법은 절리망의 분포에 대한 현실적 묘사에 많은 한계를 가지므로, 그 현실적 적용에서는 많은 한계를 가지고 있다. 하지만, 본 연구에서 적용한 절리망 생성 및 UDEC 모델링 과정에 Monte Carlo Simulation을 적용함으로써, 현실적인 상황에 대해 사면의 안정성 해석 상의 적용에 유용한 방법을 제시하였다는 점에서 명백한 의의를 갖는다.