

3차원 절리계 모사를 통한 대규모 암반비탈면 파괴블록크기 추정방법

Estimation Method of Key Block Size on a Large Scale Rock Slope by Simulation of 3-D Rock Joint System

김 동 휘 ¹	Kim, Dong-Hee	류 동 우 ²	Ryu, Dong-Woo
정 혁 일 ³	Jung, Hyuk-Il	김 석 기 ⁴	Kim, Seok-Ki
이 우 진 ⁵	Lee, Woo-jin		

Abstract

Accurate evaluation of the slope stability by assuming failure block as the entire slope is considered to be apposite for the small scale slope, whereas it is not the case for the large scale slope. Hence, appropriate estimation of a failure block size is required since the safety factor and the joint strength parameters are the function of the failure block size. In this paper, the size of failure block was investigated by generating 3-dimensional rock joint system based on statistical data of joints obtained from research slope, such as joint orientation, spacing and 3-dimensional joint intensity. The result indicates that 33 potential failure blocks exist in research slope, as large as 1.4 meters at least and 38.7 meters at most, and average block height is 15.2 meters. In addition, the data obtained from 3 dimensional joint system were directly applicable to the probability analysis and 2 and 3 dimensional discontinuity analysis.

요 지

대규모 암반비탈면은 소규모 암반비탈면과 달리 파괴블록의 크기를 사면전체로 가정했을 경우 비합리적인 안정성 평가가 이루어질 가능성이 매우 크다. 즉, 파괴블록의 크기에 따라서 안전율, 절리면 강도정수 등이 변하기 때문에 대규모 비탈면의 경우에는 공학적인 방법으로 파괴 가능 블록크기 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연구대상 부지의 절리조사자료를 이용하여 절리의 방향성(joint orientation) 및 절리간격(joint spacing) 통계분석, 3차원 절리발생 강도(joint intensity) 분석 등의 과정을 거쳐 3차원 절리계를 생성한 후, 이를 이용하여 파괴가능 블록(failure block) 크기를 분석하였다. 분석결과 파괴유발이 우려되는 블록은 33개가 관찰되었으며, 최소크기 1.4m, 최대크기 38.7m, 평균크기 15.2m로 나타났다. 또한, 3차원 절리계 생성과정에서 발생하는 절리자료를 활용하여 확률론적해석, 2, 3차원 불연속체해석 등에 직접적으로 활용할 수 있었다.

Keywords : Joint simulation, Key block, Probabilistic analysis, Rock slope stability

1. 서 론

암반 비탈면의 안정성을 평가하기 위해서는 절리면

의 방향성(joint orientation), 간격(joint spacing), 연장성(persistence) 등의 기하학적 특성과 절리면의 점착력 c , 절리면 마찰각 ϕ 값 등의 절리면 강도특성을 정확하게

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KIGAM, dwryu@kigam.re.kr, 교신저자)

3 정희원, 서영엔지니어링 지반터널설계실 차장 (Member, Senior Manager, Geotechnical Div., Seoyeong Engrg.)

4 정희원, 바우컨설턴트 지반터널부 상무이사 (Member, Executive Director, Geotechnical & Tunnel Div., BAU Consultant)

5 정희원, 고려대학교 건축, 사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

파악해야 한다. 절리면의 방향성, 간격 등의 기하학적 자료를 획득하기 위하여 조사선 조사(scanline survey), 조사창 조사(window survey) 등을 수행하고 있으며, 절리면 강도특성을 평가하기 위하여 절리면 전단시험, 거칠기(JRC) 측정, 절리면 강도(JCS) 측정 등을 수행하고 있다. 이러한 특성을 파악하여 한계평형해석, 확률론적 해석 및 수치해석 등을 통해 평가 대상 암반 비탈면의 안정성을 평가한다(Ladanyi et al., 1970; Hoek et al., 1981; Barton et al., 1985).

일반적인 도로사면의 경우 최근 자연훼손 등의 환경적인 측면을 강조하여 대부분 30m 이하로 설계, 시공되고 있으며, 도로 비탈면의 중요도를 고려해 파괴블록의 크기에 관계없이 비탈면 전체를 파괴블록으로 가정한 후 인장크랙, 수압 등을 고려하여 한계평형해석으로 안정성을 평가하고 있다(Hoek et al., 1981). 이러한 경우 파괴블록의 크기가 크지 않고 실제 현장에서 발생 가능한 정도의 파괴규모로 판단되어 전체사면 높이를 파괴가능블록 높이로 적용하고 있다.

그러나 본 연구대상 암반 비탈면과 같은 최대 높이 약 180m 정도의 대규모 비탈면의 경우, 사면전체를 파괴블록으로 가정할 경우 비합리적인 안정성 평가가 이루어져 비경제적인 설계로 귀결될 가능성이 크다. 따라서 이러한 대규모 비탈면의 경우에는 공학적인 방법으로 파괴 가능 블록크기 평가가 필요하다고 판단되며, 암반에서의 블록크기 평가 방법은 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔다(Sen et al., 1992; Lu et al., 1999; Wang et al., 2003; 조태진 등, 2004). 파괴블록의 크기를 평가하기 위해서는 연구대상 지반의 절리망 생성이 필요하며, 절리망 생성을 위해서는 절리 방향성 통계분석(Grossmann, 1985; Fisher et al., 1993; 류동우 등, 2002), 절리간격 통계분석, 3차원 절리 크기 및 발생강도 분석(Priest et al., 1981; Pahl, 1981; Kulatilake et al., 1984; 류동우 등, 2002) 등의 과정이 필요하다. 또한, 파괴블록의 크기에 따라서 한계평형해석의 안전율(factor of safety), Barton-Bandis 경험식으로 산정한 강도정수(joint strength parameters) c , ϕ 등이 변하기 때문에 대규모 암반비탈면에서의 파괴블록크기 산정은 매우 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 연구대상 부지의 절리조사 자료를 이용하여 절리의 방향성 및 절리간격 통계분석, 3차원 절리발생강도 분석 등의 과정을 거쳐 3차원 절리계를 생성한 후, 이를 이용하여 파괴가능 블록크기를 산정하는 방법과 3차원 절리계 생성과정에서 발생하는 절

리자료를 활용하여 암반비탈면의 안정성을 평가하는 방법을 제시하였다.

2. 파괴블록 크기 추정의 필요성

높이 20m 내외의 일반적인 규모의 암반비탈면과 달리 높이 100m 이상의 대규모 암반비탈면의 경우에 파괴블록(key block) 크기를 어떻게 결정할 것인가는 매우 중요한 문제이며, 파괴블록크기가 안정성 평가에 미치는 영향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫 번째로 파괴블록크기에 따라서 암반 비탈면의 안전율이 상이하게 평가된다. 즉, 파괴블록의 크기에 따라서 파괴면(failure surface)의 면적이 상이하므로 활동력(driving force) 및 전단강도(shear strength)가 변하게 되어 안전율이 파괴블록의 크기에 따라서 다르게 평가된다. 블록높이 변화에 따른 안전율을 검토한 결과 그림 1에서 볼 수 있듯이 파괴블록 크기가 증가 할수록 안전율은 감소하는 것으로 평가되었으며, 대규모 암반비탈면에서 파괴블록의 크기가 비탈면 높이보다 작은 경우 비탈면전체를 파괴대상으로 가정하는 것은 매우 보수적인 설계가 될 수 있음을 알 수 있다.

두 번째로 파괴블록의 크기는 절리면 강도정수(joint strength parameter)에 영향을 미친다. 역사적으로 “암반 역학(rock mechanics)”이라는 주제가 태동했을 때부터 비탈면 활동에 대한 안전율 산정을 위해 사용된 많은 식들은 Mohr Coulomb 파괴기준($\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$)의 강도정수인 점착력(cohesion, c) 및 마찰각(friction angle, ϕ)을 사용하였다. 1970년대부터는 Barton(1973, 1976)에 의해서 제안된 식(Barton Bandis 경험식)과 같은 비선형적인 식들이 절리면의 전단강도(shear strength)와 법선

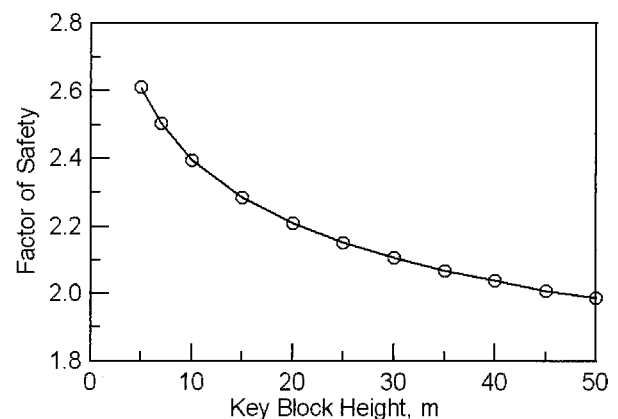


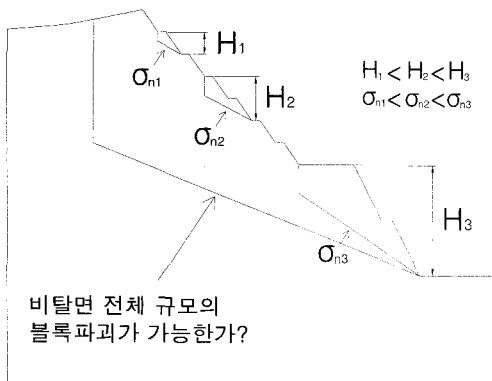
그림 1. 파괴블록 높이에 따른 안전율 변화

응력(normal stress)의 관계를 더 잘 표현한다는 것을 인지하기 시작했다. 그러나 Mohr Coulomb 모델의 강도정수 c , ϕ 를 기본으로 한 식들을 사용하여 안전율을 산정하기 위해서는 Barton(1973) 등이 제시한 비선형적인 관계식들로부터 등가(equivalent)의 점착력 c 및 마찰각 ϕ 를 추정해야 한다.

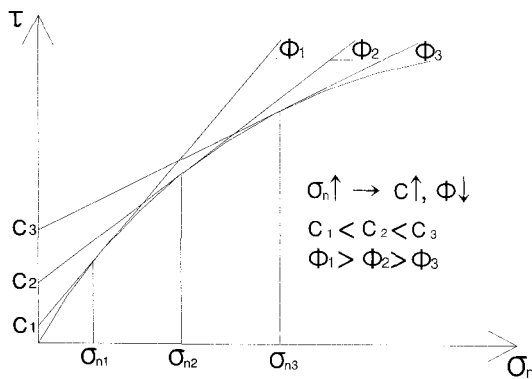
비선형의 관계식들 중 Barton(1973)이 제시한 경험식은 절리의 거동을 잘 표현하는 것으로 알려졌으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \times \log_{10} (\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_b] \quad (1)$$

여기서, ϕ_b =basic friction angle, JRC=joint roughness coefficient, JCS=joint wall compressive strength, σ_n =normal stress 이다. 앞에서 언급하였듯이 대부분의 비탈면 안전율 산정방법들은 Mohr Coulomb 파괴기준의 강도정수 c , ϕ 를 필요로 하기 때문에, 위의 Barton-Bandis 경험식을 이용하여 등가(equivalent) c , ϕ 를 산정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.



(a) 대규모 비탈면에서의 파괴블록



(b) 응력수준에 따른 절리면 강도의 변화

그림 2. 파괴가능블록 크기에 따른 응력수준과 그에 따른 절리면 강도정수의 변화

$$\text{equivalent cohesion, } c = \tau - \sigma_n \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} \quad (2)$$

$$\text{equivalent friction angle, } \phi = ATAN(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}) \quad (3)$$

여기서, τ =shear strength, σ_n =normal stress이다.

위의 식(2), (3) 및 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 등가(equivalent) c , ϕ 는 법선응력(normal stress, σ_n)에 영향을 받는다. 즉, 비탈면에서 법선응력 σ_n 은 파괴블록의 크기 또는 절리면에 작용하는 응력수준에 따라서 결정되므로 절리면 강도정수 산정시에도 파괴블록크기가 매우 중요한 요소로 작용함을 알 수 있다.

세 번째로 암반 비탈면이 실제로 어느 정도의 규모로 파괴가 발생하는가의 문제이다. 일반적인 규모의 암반 비탈면을 대상으로 안정성을 검토할 경우 사면 전체를 파괴 대상으로 가정한 후 평면 및 췌기파괴에 대한 한계 평형해석을 수행하는데, 사면높이 100m 이상의 대규모 암반비탈면의 경우 그림 2(a)에서와 같이 사면전체를 파괴 대상으로 가정하는 것은 절리 방향성(joint orientation), 간격(joint spacing) 등의 기하학적 요소에 의해 결정되는 절리암반의 파괴특성을 고려하지 않은 불합리한 가정이라고 판단된다. 따라서 대규모 암반 비탈면 안정성 검토시에는 반드시 파괴블록의 크기를 합리적으로 평가한 결과를 이용해야 할 것으로 판단된다.

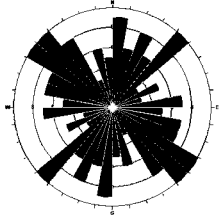
앞에서 살펴본 이러한 이유 때문에 대규모 암반비탈면 안정성 평가시에는 파괴블록의 크기를 합리적이며 공학적으로 평가하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

3. 3차원절리계 모사를 위한 절리자료 수집

연구대상 부지의 절리정보 파악을 위하여 그림 3과 같이 총 6회의 조사선 조사(scanline survey)를 수행하였으며, 이중 영구절취사면이 형성되는 구간에는 총 3회(SS-1, 4, 5)의 조사를 수행하였다. 이중 최대 높이 183m가 형성되는 구간에서 조사된 절리자료(SS-5)는 아래 표 1과 같으며, 이 자료를 이용하여 3차원 절리계(3-D rock joint system)를 모사하였다.

절리자료 SS-5(구조구-3)의 절리는 세 개의 주절리로 구분할 수 있으며, 주절리 모두 79° 이상의 고각을 보이고 있다. 불연속면 거칠기(JRC)는 8.59 이하로 “smooth planar”로 구분되며, 틈새는 매우 좁아 충전물은 없는 것으로 조사되었으며, 조사 결과를 요약하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 조사선 조사(Scanline Survey) 결과

구 분	방향/경사	평균간격 (표준편차), cm	평균연장 (표준편차),cm	선밀도, 개/m	거칠기 (JRC)	Rose Diagram
SET-1	N54W /84NE	24.63(19.01)	142.47(9.80)	4.87	8.30	
SET-2	NS /83E	18.36(24.42)	125.35(9.60)	5.45	8.59	
SET-3	N49E /79NW	19.63(24.80)	128.28(9.18)	5.59	7.63	

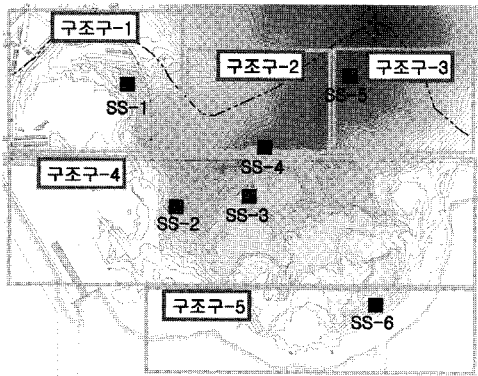


그림 3. 선조사위치 및 구조구 분류 결과

4. 절리방향성 통계분석 및 인공절리자료 생성

3차원 절리계(3-D rock joint system)를 모사하기 위해서는 절리 방향성(joint orientation)을 분석해야하며, 절리방향성 분석결과를 이용하여 인공절리자료를 생성하는 과정을 거치게 된다. 방향성 자료의 통계이론과 관련한 분포모델은 수많은 학자들에 의해 연구되어 왔고, 이들 모델들을 이용하여 절리 방향과 같은 구형 축 자료에 대한 통계 모델링에 적용할 수 있다. 대표적인 분포모델로 균등분포, Fisher 분포, Bingham 분포, 이변량 정규 분포(bivariate normal distribution) 등이 있다. 특히, Grossmann (1985)이 제안한 이변량 정규 분포모델은 절리 방향의 모델링을 목적으로 스칼라 자료에 적용되는 일반적인 이변량 정규분포를 활용할 수 있다는 특징을 가진다. 본 논문에서는 대표적인 회전대칭성(rotational symmetry) 모델인 Fisher 분포와 비대칭성(rotational asymmetry)을 고려할 수 있는 이변량 정규분포를 정의하기 위한 모수 추정법을 이용하였다.

4.1 Fisher 분포

Fisher 분포는 방향성 자료에 적용할 수 있는 대표적

인 회전 대칭성 단봉 분포 모델(rotational symmetric unimodal distribution model)로 일반적인 회전 대칭성 분포 모델의 기본 형태는 다음과 같다.

$$f(\phi, \theta) = A e^{Bg(\theta)} \quad (4)$$

여기서, ϕ 와 θ 는 각각 경도(longitude)와 여위도(colatitude)로서, 대상 절리군에 수직한 법선 벡터의 평균 방향으로 회전대칭 축을 정의하며, $g(\theta)$ 는 여위도인 θ 만의 함수이며, A 와 B 는 상수이다.

일반적으로 사용되고 있는 Fisher 분포 모델은 다음과 같다(Fisher, 1953).

$$f(\phi, \theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp[\kappa(\sin \theta \sin \alpha \cos(\phi - \beta) + \cos \theta \cos \alpha)] \quad (5)$$

여기서, κ 는 분산정도를 나타내는 형상 모수(shape parameter)이고, α 와 β 는 위치 모수(location parameter)로서 평균방향을 정의한다.

인공 절리방향 자료 발생기와 관련하여 Priest(1993)가 제시한 알고리즘의 경우 평균방향을 함께 고려하였기 때문에 회전대칭형 단봉분포 즉, 평균방향에서 최빈값을 보이는 자료를 생성하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 Fisher 분포의 성질을 정확히 반영하기 위해 위치 모수(location parameter)인 평균 방향을 (0, 0)으로 고정하고, 형상 모수인 κ 에 의존하는 인공자료 발생 알고리즘을 이용하였다(Fisher et al., 1993; 류동우 등, 2002).

$$\theta = 2 \arcsin[-\{\ln(U(1-\lambda) + \lambda)\} / 2\kappa]^{-1/2} \quad (6)$$

$$\phi = 2\pi V \quad (7)$$

여기서, $\lambda = \exp(-2\kappa)$ 이며, U 와 V 는 (0, 1)의 균등 분포를 따르는 확률변수이다. 인공 절리 방향 자료의 평

균 방향은 (0,0)이기 때문에, 절리군의 평균방향으로 다시 회전변환하여 최종적인 인공 절리 방향 자료를 생성하였다.

4.2 이변량정규분포

회전 비대칭성을 고려하기 위하여 이변량 정규분포(bivariate normal distribution)를 적용하였다. 일반적으로 이변량 정규분포는 스칼라형 자료에 적용하는 모델이며, 방향성 자료, 특히 구 자료(spherical data)에 적용하기 위해서는 변환과정이 필요하다.

방향성 자료(directional data)에 적용하는 모델들의 공통적인 특징은 단위 구면 상에 존재하는 점들과 평균 방향과의 교각, 교각의 사인 혹은 코사인 함수를 이용한다는 점이며, 이에 반해 Grossmann(1985)이 제시한 이변량 정규분포는 탄젠트 값을 이용하는 특징이 있다.

이변량 정규분포를 적용하기 위해서는 먼저 개별 절리군의 평균방향을 구하고, 이 평균방향에서의 접평면 상에 개별 방향 벡터를 투영한다. 이는 구면 상의 문제를 평면 상의 문제로 변환시킴으로써, 스칼라형 자료의 이변량 정규분포 모델을 적용할 수 있게 한다. 이변량 정규 분포를 정의하기 위해 접평면의 중심평균 방향 외에도 형상 모수인 분산 모수(dispersion parameter), 즉 최대 표준편차 σ_M 와 최소 표준 편차 σ_m 가 필요하다. 이는 각각 타원형 확률 등치선의 두 주축에 해당한다. 또한, 장축과 접평면의 가장 경사가 급한 직선과의 교각을 시계방향으로 측정한 ω_M 도 필요한데, 이는 기준 반구와 관련한 접평면 상의 타원형 확률 등치선의 방향을 그림 4와 같이 정의한다.

리 방향 난수 발생기(random number generator of joint orientation)의 알고리즘을 이용하여 Fisher 및 이변량 정규분포모델(bivariate normal distribution)을 따르는 절리 방향 난수들을 표 2와 같이 생성하였다.

두 분포모델을 이용하여 인공절리자료를 생성한 결과는 그림 6과 같으며, 밀집도에 있어 약간의 차이를 보

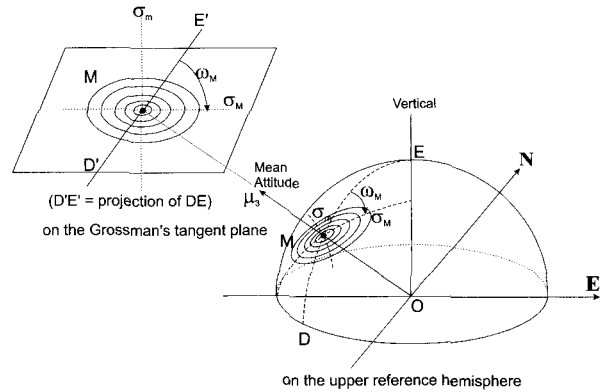
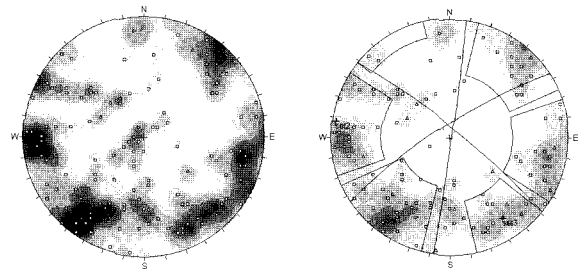
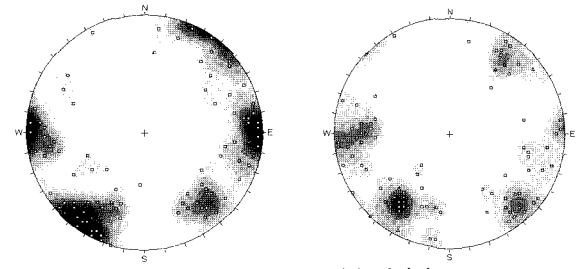


그림 4. 이변량 정규 분포모델을 정의하기 위한 모수의 정의



(a) 원시조사자료 분포 (b) Terzaghi 보정후 분포

그림 5. 조사선 조사 절리자료



(a) Fisher 분포모델 (b) 이변량 정규분포모델

그림 6. 인공절리자료 생성 결과

4.3 주절리군 분류 및 인공절리자료 생성

Terzaghi 보정을 수행한 원시절리자료로부터 Fisher 및 이변량 정규 분포 모델의 모수들을 최대우도추정법을 이용하여 추정하였고, 류동우 등(2002)이 제시한 절

표 2. 주절리군별 방향성 자료 분포 모델에 대한 모수 추정 결과

절리군	통계량	평균 방향 (경사/경사방향)	Fisher 분포	이변량 정규분포			비율(%)
			형상계수	σ_{Max} 방향	SD_{Max}	SD_{Min}	
SET-1		81/33	15	18.1	0.325	0.240	29.8
SET-2		88/92	17	76.3	0.281	0.250	23.8
SET-3		78/321	38	131.4	0.199	0.140	11.2
random joints							35.2

이나 전체적으로는 유사한 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다. 두 통계모델에 대한 검증을 수행하여 대상 암 반질리에 적합한 모델을 선정, 질리계모사에 적용하였다.

4.4 통계모델의 검증

4.4.1 Fisher 분포의 검증 통계량

Fisher 분포에 대한 통계검증을 위하여 여위도 편차의 지수분포성 검증($M_E(D_n)$), 평균 방향에 대한 회전 대칭성 검증($M_U(V_n)$), 그리고 이변량 독립성 검증($M_N(D_n)$)을 수행하였다(Stephens, 1974, Fisher et al. 1993). Fisher 분포의 적합성 검증을 위한 여위도, 경도 그리고 이변량에 대한 검증 통계량의 신뢰수준별 임계값은 표 3과 같다.

연구 대상지역의 조사로부터 얻은 방향성 자료의 질리군별 Fisher 분포 모델의 적합성 검증 결과는 표 4와 같다. 일반적으로 사용하는 유의수준 5% 적용시, 주질리군 SET-1, 3은 회전 대칭성 모델인 Fisher분포를 사용하여 모델링하는 것이 가능하나, 나머지 주질리군 SET-2에 대해서는 대안 모델을 찾아야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

4.4.2 이변량 정규 분포

이변량 정규 분포(bivariate normal distribution)의 경우 회전 대칭성 및 비대칭성 모두를 허용하는 분포이기 때문에 회전 대칭성에 대한 검증은 필요하지 않다. 류동우 등(2002)이 제안한 평균 방향의 접평면 상에 투영된 좌표 (x,y) 의 각 좌표값에 대해 단일 표본 Kolmogorov-Smirnov 적합도 검증을 수행하였다.

표 5에 보이는 바와 같이 일반적으로 적용 가능한 유의수준 5%, 1%를 적용하였을 경우 모든 질리군들이 이변량 정규분포 가정을 채택할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었으며, 이는 대상지역의 질리 방향성 자료가 이변량 정규분포를 따른다는 가설의 타당성을 보여주는 것이므로, 연구대상 암반의 질리계 모사를 위한 방향성 자료는 이변량 정규분포로부터 발생시킨 인공자료를 사용하였다.

5. 질리간격 통계분석

질리 간격(joint spacing)은 질리의 기하학적 속성들 중 중요한 인자이다. 이는 질리의 발생 강도에 대한 정보를 지니고 있으며, 일반적으로 조사선 조사나 시추공

표 3. Fisher 분포의 적합성 검증을 위한 수정 검정 통계량의 임계값(Stephens, 1974, Fisher, 1993)

Statistic	Percentage point (100 α %)		
	10%	5%	1%
$M_E(D_n)$	0.990	1.094	1.308
$M_U(V_n)$	1.138	1.207	1.347
$M_N(D_n)$	0.819	0.895	1.035

표 4. 주 질리군별 Fisher 분포 모델의 적합성 검증

질리군	Fisher 분포 모델에 대한 검증 통계량			적합성 결과		
	여위도 검증통계량 (M_E)	경도 검증통계량 (M_U)	독립성 검증통계량 (M_N)	10%	5%	1%
SET-1	0.449661	1.130654	0.832672	기각	채택	채택
SET-2	1.052250	0.989771	1.148505	기각	기각	기각
SET-3	0.691369	1.084824	0.707274	채택	채택	채택

표 5. 주 질리군별 이변량 정규 분포 모델의 적합성 검증

질리군	이변량 정규 분포 모델에 대한 검증 통계량				적합성 결과		
	x 좌표		y 좌표		10%	5%	1%
	K-S	P-Value	K-S	P-Value			
SET-1	0.0746	0.9475	0.0825	0.8949	채택	채택	채택
SET-2	0.0811	0.9565	0.0977	0.0850	기각	채택	채택
SET-3	0.2205	0.3302	0.1936	0.4877	채택	채택	채택

조사를 통해 손쉽게 얻을 수 있는 자료이다. 절리 간격은 일반적으로 절리군별로 절리와 절리 사이의 간격을 측정하며, 절리 발생에 대한 독립성 가정, 즉 Poisson process에 의해 절리가 발생한다면, 절리 간격을 변량으로 하는 분포는 음지수 분포(negative exponential distribution)를 따른다.

$$f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda x) \quad (8)$$

여기서, λ 는 발생 강도를 나타내는 모수이다.

이와 같이 Poisson process에 의해 절리가 발생한다는 모델은 일반적으로 Enhanced Beacher model에서 채택한 가정이다. 절리군별 절리 간격에 대한 음지수 분포 가설이 통계학적 검증에서 기각된다면, 절리 발생의 독립성 가정, 즉 Poisson process에 의해 절리가 발생한다는 가정은 재고되어야 한다. 따라서, 다른 모델로 절리 발생에 대한 가정을 세워야 한다. 대표적인 대안 모델들은 Box-Cox process, geostatistical model, fractal model, nearest neighbor model 등을 들 수 있다.

대상 암반에서의 절리간격 조사결과는 아래 그림 7과 같으며, 조사된 절리간격에 대한 음지수 분포 적합성을 검증한 결과는 표 6과 같다. 검증결과 절리군 모두 음지수분포를 따르는 것으로 나왔으므로, 연구대상지역의 절리간격에 대한 모델은 음지수분포를 채택하였다.

6. 3차원 절리발생강도 분석

절리 발생 강도(joint intensity)는 조사 차원과 측정치의 차원에 따라 표 7과 같이 분류할 수 있다. 조사 차원이 1차원인 경우, 즉 조사선 조사(scanline survey)로부터 절리의 발생 빈도(frequency)의 결정과 관련된 연구들이 수행되었으며, 2차원 조사 차원의 경우, 즉 조사창 조사법(window survey)에 의한 절리 발생 강도(joint density)의 추정과 관련한 연구들이 이루어졌다(Pahl, 1981; Priest et al., 1981; Kulatilake et al., 1984). 이외에도, 기하확률론에 기초하여 다양한 차원의 절리 발생강도간의 관계에 대해 연구가 진행되었다(Dershowitz et al., 1992).

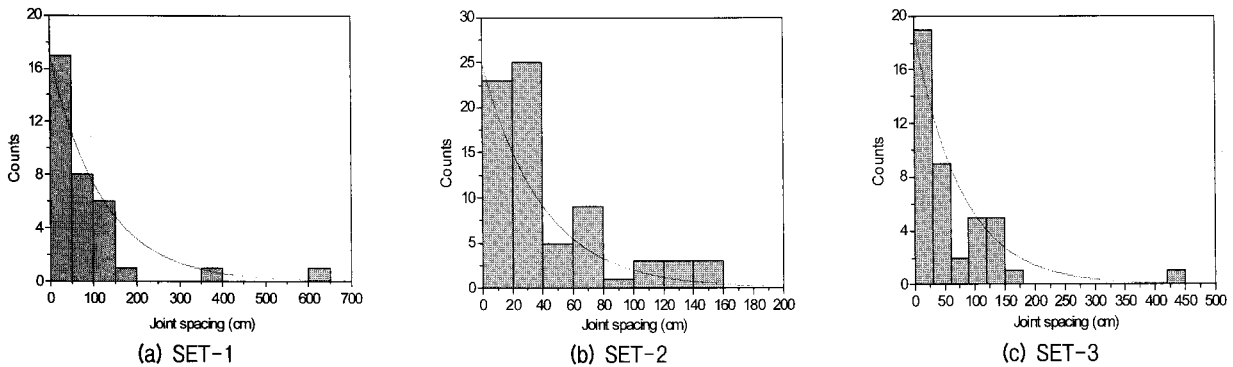


그림 7. 절리간격 조사결과

표 6. 절리간격의 통계량 및 음지수분포의 통계학적 타당성 검토

SET-1		SET-2		SET-3	
평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
41.4	39.5	60.5	77.6	85.0	120.2
K-S value	P-value	K-S value	P-value	K-S value	P-value
0.0859	0.6621	0.1713	0.151	0.1036	0.8226
채택		채택		채택	

표 7. 절리밀집도의 차원별 정의

Measured Parameter	Sampling	L (Scanlines)	L^2 (Rock exposure)	L^3 (Rock masses)
$N^0 [D=0]$		$P_{10} [m^{-1}]$	$P_{20} [m^{-2}]$	$P_{30} [m^{-3}]$
Length [$D=1$]		P_{11}	$P_{21} [m^{-1}]$	$P_{31} [m^{-2}]$
Area [$D=2$]		$P_{12} [m]$	P_{22}	$P_{32} [m^{-1}]$
Volume [$D=3$]		$P_{13} [m^2]$	$P_{23} [m]$	P_{33}

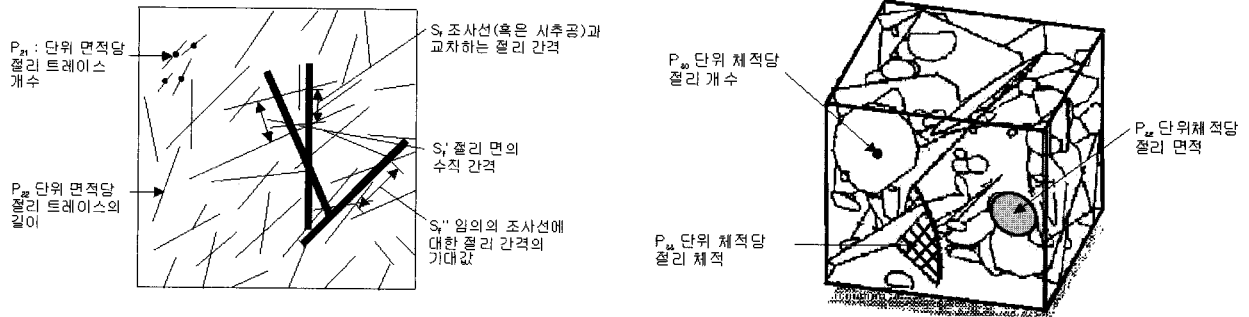


그림 8. 절리밀집도의 차원별 개념

그림 8에 정의된 개념과 같이 관심 영역 내의 절리 개수(P_{30} 혹은 N_f), 면적 강도(P_{32}), 체적비(P_{33})를 이용하여 3차원 절리 발생 강도의 척도로서 활용할 수 있다. 이 중 P_{32} 는 단위 체적당 절리면들의 전체 면적으로서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{32} = A_f / V_t \quad (9)$$

여기서, A_f =절리 전체 면적, V_t =전체 암반 체적이다.

P_{32} 는 $[L^{-1}]$ 차원을 가지지만, 스케일 독립적이다. 즉, 관심 대상 암반의 체적 혹은 절리들의 방향에 영향을 받지 않는다. 반면, 단위 면적당 혹은 단위 체적당 절리 개수와 같은 다른 척도는 스케일 의존적이라 할 수 있다.

체적 강도 P_{33} 은 특정 대수층의 체적에 대한 절리 체적의 비율로서, 수리영역에서 유용하다.

$$P_{33} = V_f / V_t \quad (10)$$

여기서, V_f =전체 절리의 체적, V_t =전체 암반 체적이다.

절리 발생 강도에 대해 가장 선호하는 발생 강도 척도로는 앞서 언급하였던 P_{32} 가 있으며, 이는 절리 크기 분포(joint size distribution)에 대해 불변량이다. 절리 발생 강도는 종종 평균 절리 간격, $E[S_f]$ 로 표현된다. $E[S_f]$ 와 P_{32} 의 관계는 절리 간격 S_f 의 측정에 사용된 조사선에 대한 절리 방향의 분포에 영향을 받으며, 다음과 같이 표현된다.

$$P_{32} = C_p / E[S_f] \quad (11)$$

여기서, C_p =절리 간격 S_f 의 측정에 사용된 조사선에 대한 절리 방향의 분포에 의존하는 상수이다.

암반 절리의 방향이 균등 분포일 때, C_p 는 2.0의 값을 가지며, 대부분 암반 절리들에 있어서, C_p 는 1.0에서 3.0의 값을 가진다. 본 연구에서는 정확한 C_p 의 값을 추정

하기 위해서 3차원 절리계에 대한 시추공 샘플링 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서는 절리 발생 강도에 대한 입력 변수로서, 면적 강도, P_{32} 를 활용하였다. 이는 절리 크기에 대한 통계량을 비교적 정확하게 추정하기 위해서는 조사창 조사법과 같은 절리 트레이스의 편향을 보정할 수 있는 특정 조사법이 적용되어야 하지만, 본 연구에 사용된 자료는 조사선 조사법을 적용하여 획득한 자료이므로 크기에 대한 통계량을 추정하기 어렵기 때문에 절리 크기 분포에 대해 불변량인 면적 강도를 이용하여 3차원 절리망을 구성하였다.

P_{32} 와 절리 간격에 대한 통계량과의 매개변수인 C_p 값은 앞서 언급한 바와 같이 시행착오법에 의해 3차원 절리망을 구성한 후 시추공 샘플링을 수행하여 실제 현장 시추자료와 비교함으로써 C_p 추정치에 대한 타당성을 검토하였다.

7. 통계적 등가 3차원 절리계 모사

앞에서 분석한 절리방향성(joint orientation), 절리간격(joint spacing) 및 절리발생 강도(joint intensity)를 이용하여 연구대상 지역의 통계적 등가 3차원 절리계를 모사하였다. 절리계 모사 범위는 높이(H) 200m, 길이(L) 300m, 폭(B) 100m이며, 3차원 절리계 생성을 위한 입력 변수는 다음 표 8과 같다.

본 연구에서는 표 8을 입력변수로 하였으며, 통계적 등가 3차원 절리계를 모사하기 위한 프로그램으로 FracWorks를 사용하였다.

3차원 절리계 생성을 위해서는 절리발생강도(P_{32})를 입력해야 하는데 절리발생강도(P_{32})는 절리간격분포와 절리 간격에 대한 통계량과의 매개변수인 C_p 값에 따라 결정된다. 앞에서 언급하였듯이 본 연구에서는 시행착

표 8. 3차원 절리계 생성을 위한 입력변수

절리군	3차원 절리계의 기하학적 속성							Termination (%)
	평균 방향		절리 발생 강도(P_{32})	절리 크기				
	경사방향	경사		분포	평균	표준편차	하한절삭	
SET-1	33	81	0.22	로그정규	0.85	13	0.5	0
SET-2	92	88	0.16	로그정규	1.3	8.7	0.5	8
SET-3	321	78	0.12	로그정규	1.2	7.9	0.5	12

오법에 의해 3차원 절리망을 구성한 후 시추공 샘플링 (트레이스 평면 샘플링)을 수행하여 실제 현장 시추자료와 비교함으로써 최종 3차원 절리망에 사용할 절리발생강도(P_{32})를 결정하였다. 또한, 3차원 절리망 생성 결과를 이용하여 원하는 위치에서의 2차원 절리망을 모델링 할 수 있으며, 그 결과는 아래 그림 9와 같다.

8. 파괴블록크기 추정

3차원 절리망을 이루는 절리계(joint system)는 하나의 확률과정으로서 이해할 수 있다. 이 경우, 제한된 조사 정보로부터 3차원 절리망을 통계적 등가매질로 3차원 절리망의 실현(realizations)들을 취득하고, 이로부터 임의의 암반 절개면을 형성시킬 수 있다. 이로부터 얻어

지는 암반 블록의 최대 크기만을 샘플링함으로써 예상 암반 절리면에 나타나는 암반 블록의 최대 크기에 대한 분포를 얻을 수 있다. 따라서 Monte Carlo Simulation에 의해 28개 절리계를 모사, 그 결과를 활용하여 파괴가능블록크기(key block)를 그림 10과 같은 방법으로 도출하였다.

절리계 모사를 통해 얻어진 28개 단면에 대한 파괴가능블록크기 분석결과 파괴 유발이 우려되는 블록은 33개가 관찰되었다. 이들 블록에 대한 크기를 분석한 결과 최소크기 1.4m, 최대크기 38.7m, 평균크기 15.2m로 나타났으며, 이를 히스토그램으로 표시하면 그림 11과 같다. 앞에서 살펴본것과 같이 블록크기가 증가할수록 안전율이 감소하므로, 설계 적용시 절리계 모사에 의해 얻어진 파괴블록의 최대크기를 적용하여 안정검토를 수행하는 것이 안전측 설계라고 판단된다.

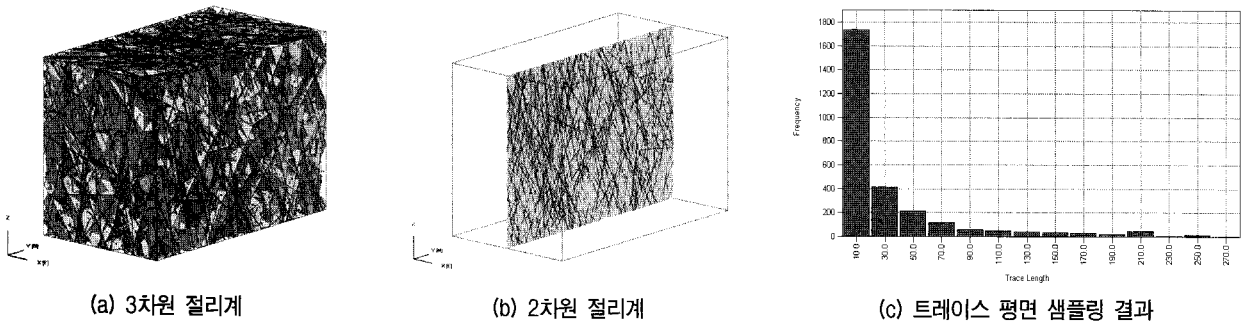


그림 9. 2, 3차원 절리계 생성결과 및 트레이스 평면 샘플링 결과

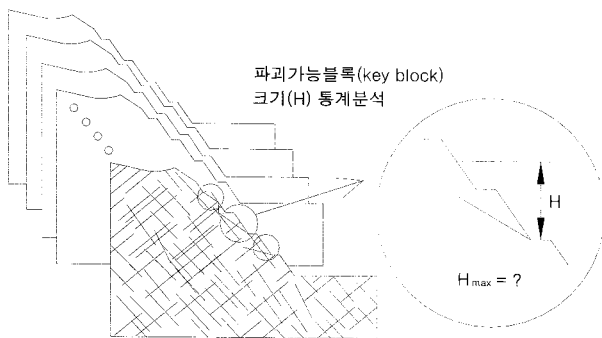


그림 10. 파괴가능블록(Key Block) 크기 분석방법

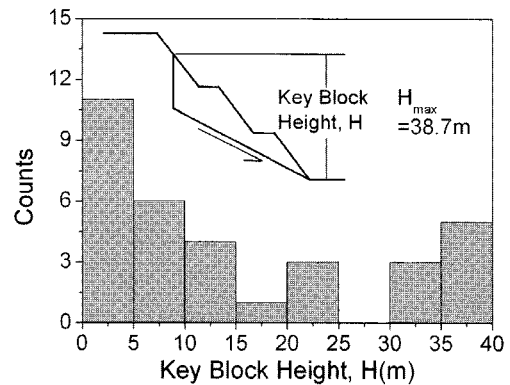
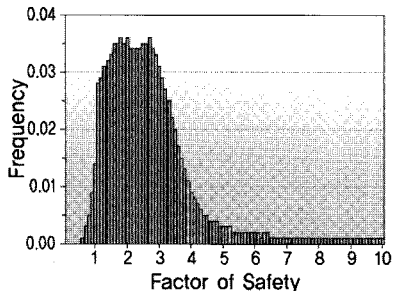


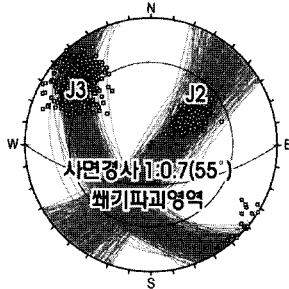
그림 11. 파괴가능 블록 크기의 분포

9. 절리계모사결과의 설계활용

앞에서 언급한 파괴 최대블록크기의 산정 외에도, 2, 3차원 절리계를 모사하기 위한 과정에서 발생하는 다양

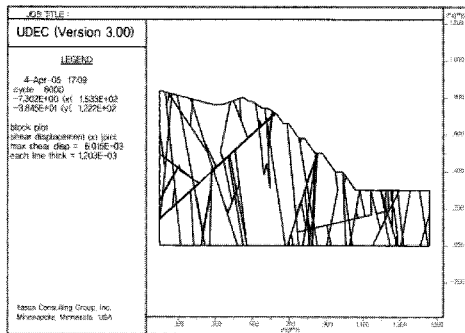


(a) 동역학적 분석방법

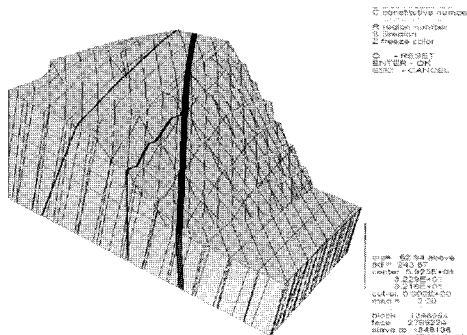


(b) 운동학적 분석방법

그림 12. 절리방향성 통계분석결과를 활용한 확률론적해석



(a) 2차원 불연속체해석(UDC)



(b) 3차원 불연속체해석(3DEC)

그림 13. 절리계모사결과를 활용한 2, 3차원 불연속체해석

한 절리정보를 활용하여 설계비탈면의 안정성 검토에 활용할 수 있다.

첫 번째로 원시자료를 암반비탈면 안정성 검토자료로 활용가능하다. 즉, Terzaghi 보정을 수행한 원시절리 자료는 평사투영해석, SMR, SMR-net, 한계평형해석, 블록이론을 이용한 검토시 활용될 수 있다.

두 번째로 3차원 절리계 모사를 위해서 수행한 절리 방향성 통계분석결과 및 인공절리자료 생성결과를 활용할 수 있다. 즉, Fisher 분포모델 및 이변량 정규분포 (bivariate normal distribution) 모델 분석에 의해 도출된 절리군의 통계모수는 운동학적(kinematic) 및 동역학적(kinetic) 분석 등의 확률론적 안정검토의 입력자료로 적용하여 그림 12와 같이 파괴확률을 산정하는데 활용할 수 있다.

세 번째로는 절리 분석과정의 최종단계에서 얻어진 절리계 모사단면을 파괴가능블록크기 결정 외에, 그림 13과 같이 2, 3차원 불연속체해석으로 직접 적용할 수 있다.

10. 결론

암반비탈면의 파괴블록 크기에 따라서 안전율(safety factor) 및 절리면 강도정수(joint strength parameter)가 상이하므로 대규모 암반비탈면 안정검토시 파괴가능블록의 크기를 합리적이고 공학적으로 산정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 대규모 암반비탈면의 합리적인 안정성 평가를 위해 총 28회의 3차원 절리계모사결과를 이용하여 파괴블록크기 분포를 분석하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

(1) 3차원 절리계모사결과를 이용하여 파괴블록크기 추정 가능하였으며, 분석 결과 파괴가능 최대블록크기(38.7m)는 사면전체 높이 180m에 비하여 작은 것으로 나타났다. 따라서 연구대상 비탈면에 대한 안정성 검토시 사면전체높이를 파괴블록으로 가정하는 것은 합리적이지 못한 것으로 분석되었으며, 본 연구대상 비탈면과 같이 대규모 비탈면 설계시에는 파괴가능블록의 크기를 추정하여 안정성 평가를 수행해야 할 것으로 판단된다.

(2) 본 연구에서는 연구대상 비탈면과 같은 대규모 암반비탈면에서의 파괴블록크기를 설계단계의 절리자료를 이용하여 추정하는 방법을 제시하였으며, 본 연구에서 제시한 동일한 방법을 다른 현장에 적용할

경우 해당 현장사면의 파괴블록크기를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

- (3) 그러나, 본 연구에서는 공사중인 절개면에서 측정된 신뢰성이 높은 절리자료를 이용하여 블록크기를 추정하였으므로 본 연구에서 제시한 방법을 다른 현장에 적용할 경우에는 신뢰성이 높은 절리자료를 이용하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 즉, 현장특성을 정확하게 반영하지 못하는 절리자료를 이용하여 파괴블록 크기를 추정할 경우에는 추정된 파괴블록보다 더 큰 파괴블록이 형성될 수 있으므로 신뢰성 높은 절리자료의 사용은 매우 중요하다고 판단된다.
- (4) 현장에서 측정된 절리자료의 통계분석과정에서 얻어지는 다양한 정보들은 대규모 암반비탈면 설계시 한계평형해석, 평사투영해석, 확률론적 해석, 불연속체 수치해석 등에 직접적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 류동우, 김영민, 이희근 (2002a), “입체해석학적 접근법에 의한 암반 절리 크기 및 밀집도의 통계적 분석에 관한 연구”, *터널과 지하공간*, 12권 1호, pp.10-18.
- 류동우, 김영민, 이희근 (2002b), “암반 절리 방향성 자료의 통계적 분석기법에 관한 연구”, *터널과 지하공간*, 12권 1호, pp.19-30.
- 조태진, 원경식, 이창섭 (2004), “암반 내부에서의 절리분포 예측을 통한 사면해석”, *2004 한국암반공학회추계학술발표회*, pp.23-32.
- Barton, N.R. (1973). “Review of a new shear strength criterion for rock joints”, *Engng Geol.*, 7, pp.287-332.
- Barton, N.R. (1976). “The shear strength of rock and rock joints”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 13(10), pp.1-24.
- Barton, N., Bandis, and Bakhtar, K. (1985). “Strength, deformation and conductivity of rock joints”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 22(3), pp.121-140.
- Dershowitz, W. S. and Herda, H. (1992), “Interpretation of fracture spacing and intensity”, *33rd U.S. Symp. on Rock Mechanics*, Santa Fe, N. Mexico, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.757-766.
- Fisher, N. I., Lewis, T., and Embleton, B. J. J. (1993), *Statistical Analysis of Spherical Data*, Cambridge Univ. Press, pp.329.
- Fisher, R. (1953), “Dispersion on a sphere”, *Proceeding of Royal Society of London*, A217, pp.295-305.
- Grossmann, N. F. (1985), “The bivariate normal distribution on the tangent plane at the mean attitude”, *Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints*, pp.3-11.
- Hoek, E., and Bray, J. W. (1981), *Rock slope engineering*, 3rd Ed., Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Kulatilake, P. H. S., and Wu, T. H. (1984), “The density of discontinuity traces in sampling windows”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, pp.345-347.
- Ladanyi, B., and Archambault, G. (1970). “Simulation of shear behavior of a jointed rock mass”, *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, AIME, New York, pp.105-125.
- Lu, P., and Latham, J. P. (1999), “Developments in the assessment of in-situ block size distribution of rock masses”, *Rock Mech. Rock Engng.*, 32(1), pp.29-49.
- Pahl, P. J. (1981), “Estimating the mean length of discontinuity traces”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.221-228.
- Priest, S. D., and Hudson, J. A. (1981), “Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.183-197.
- Priest, S. D. (1993), *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, pp.473.
- Sen, Z., and Eissa, E. A. (1992), “Rock Quality Charts for Log-normally Distributed Block Sizes”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.29, No.1, pp.1-12.
- Stephens, M. A. (1974), “EDF statistics of goodness of fit and some comparisons”, *J. Amer. Statist. Assoc.*, Vol. 69, pp.730-737.
- Wang, L. G., Yamashita, S., Sugimoto, F., Pan, C., and Tan, G. (2003), “A methodology for predicting the in-situ size and shape distribution of rock blocks”, *Rock Mech. Rock Engng.*, 36(2), pp.121-142.

(접수일자 2007. 4. 16, 심사완료일 2007. 10. 25)