

지상라이더를 이용한 암반사면 불연속면거칠기에 대한 확률특성 분석

박성욱 · 박혁진*

세종대학교 지구정보공학과

Analysis of Random Properties for JRC using Terrestrial LiDAR

Sung Wook Park and Hyuck Jin Park*

Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

불연속면의 거칠기는 암반사면의 안정성 해석에서 고려되어야 하는 중요한 인자 중 하나로 특히 암반사면에 대한 확률론적 안정성 해석에서는 파괴확률의 결정에 지대한 영향을 미치는 확률변수이다. 확률변수로서의 거칠기의 특성을 파악하기 위해서는 다수의 거칠기 자료가 요구되나 기존의 육안조사는 조사위치나 시간적인 제약으로 인해 충분한 자료의 획득이 어려운 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 기존 육안조사가 가지는 조사위치 및 조사수량의 한계점을 극복하기 위하여 지상라이더를 활용하여 거칠기의 자료를 획득하고 분석을 수행하였다. 또한 절리면거칠기의 정량적인 산정을 위하여 지상라이더로부터 얻어진 수치자료에 대해 통계파라미터를 이용한 변환과정을 거쳐 절리면거칠기를 얻었다. 불연속면의 거칠기에 대한 확률특성인 평균, 표준편차, 분포함수에 대한 정보를 획득하였으며, 기존 육안검사방법에 비해 정량적인 많은 자료를 얻는데 있어 지상라이더가 유용한 것으로 판단되었다.

주요어 : 지상라이더, 절리면거칠기, 수치표면모델

Joint roughness is one of the most important parameters in analysis of rock slope stability. Especially in probabilistic analysis, the random properties of joint roughness influence the probability of slope failure. Therefore, a large dataset on joint roughness is required for the probabilistic analysis but the traditional direct measurement of roughness in the field has some limitations. Terrestrial LiDAR has advantages over traditional direct measurement in terms of cost and time. JRC (Joint Roughness Coefficient) was calculated from statistical parameters which are known from quantitative methods of converting the roughness of the material surface into JRC. The mean, standard deviation and distribution function of JRC were obtained, and we found that LiDAR is useful in obtaining large dataset for random variables.

Key words : Terrestrial LiDAR, Joint roughness coefficient, Digital surface model

서 론

불연속면을 포함하는 암반사면에 있어 절리면의 거칠기는 안정성을 지배하는 주요인자이다. 불연속면을 포함하는 암반사면의 확률론적 안정해석을 수행하고자 하는 경우, 해석결과의 신뢰성은 확률변수인 절리면거칠기(Joint Roughness of Coefficient, JRC)의 확률특성을 얼마나 정확히 산정할 수 있는가에 크게 좌우된다. 기존 방법에 의한 현장작업시 조사자는 제한된 위치에서, 한정된 수의 절리면 프로파일을 얻을 수 있다. 얻어진 절리면 프로파일에

대해서는 표준 JRC (Barton and Choubey, 1977)와의 비교과정을 거쳐 JRC를 산정하나, 이 과정에서 조사자의 주관개입으로 조사자간 JRC값 산정에 차이를 보이는 문제를 안고 있다. 따라서 이러한 주관개입의 문제를 해결하고자 JRC 정량화 기법이 활발히 연구되어 지고 있다(천병식과 김대영, 2001). 본 연구에서는 확률론적 안정해석에 활용되는 확률변수인 JRC의 확률특성을 얻기 위해 지상라이더를 현장조사에 활용하였다. 지상라이더를 이용하여 2개 사면에 대한 점군자료를 얻었으며, 이로부터 수치표면모델(digital surface model, DSM)을 생성하였다. 이렇게

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

얻어진 수치표면모델로부터 신뢰성 있는 확률특성 산정에 필요한 충분한 량의 절리면 프로파일을 추출하였으며 digital data로 수치화된 프로파일에 대해서는 통계적인 파라미터 기법을 이용하여 JRC로 변환하였다. 현장 별로 얻어진 JRC에 대해서는 평균, 표준편차, 분포함수를 구하였으며, 정규분포(normal distribution)에 부합하는지의 여부를 판단하기 위해 적합도검증(Goodness of fit test)을 실시하였다.

연구방법

현장 지질조사 및 지상라이다를 이용한 실험으로부터 얻어진 수치표면모델로부터 JRC (Joint Roughness Coefficient)에 대한 확률특성 정보를 추출하고자 하였다. slope1, 2 현장별 100개의 절리면 프로파일을 수치표면모델로부터 추출하고 이를 Autocad 및 스프레드시트 프로그램을 이용하여 통계파라미터 적용을 위한 수치자료를 획득하였다. JRC 확률특성 추출을 위해, 통계적인 파라미터에 의한 방법중에 JRC와의 상관성이 우수하다고 알려진 Z2 파라미터와 Patton (1996)의 거침각의 의미에 가장 충실한 Ai 파라미터 방법을 채택하여 분석을 수행하였다(김열, 2005). 산출된 확률변수 JRC에 대해서는 평균 및 표준편차, 범위, 변동계수 등의 통계특성을 분석하였으며, 개략적인 분포양상을 파악하기 위해 히스토그램으로 도시하였다. 실험 현장 slope1,2별, 적용된 통계파라미터 방법별 각각의 확률변수에 대한 분포함수 특성을 파악하기 위해, 정규분포를 따르는지에 대한 여부를 Goodness of fit test를 통해 분석하였다.

현장실험

실험장비

현장조사 장비는 지상라이다와 거치장치, 전원공급장치,

노트북, 구동프로그램 등으로 구성되어있다(Table 1). 조사에 사용된 지상라이다는 오스트리아 Rieg사의 LMS-z360i 이며 구동프로그램은 Riscan Pro이다(Fig. 1). 조사에 사용된 LMS-z360i는 TOF 방식을 사용하며, 초당 12,000포인트의 점군자료를 취득할 수 있다. 반사율 10%의 대상물에 대해서는 100 m 거리까지 측정이 가능하며, 근적외선 계열의 레이저펄스를 사용한다. 측정각도는 좌우 수평방향(frame scan)으로는 0~360° 까지이며, 상하 수직방향(line scan)으로는 0~80° 까지 측정가능하며, 반복 정밀도(precision)는 최대 ±2 mm이다. 현장 조사장비의 상세 구성은 다음 Table 1과 같다.

점군자료 획득

지상라이다를 이용한 점군자료의 획득과정은 크게 CP (Control Point) 설치, 스캐닝, 병합의 순서로 이루어진다. 이때 획득하려는 점군자료의 해상도를 높이려면 라이다를 사면에 접근시켜야 하나, 이럴 경우 암반사면의 불규칙한 표면굴곡에 의해 시야가 가려지는 음영부분이 발생된다. 이를 보완하기 위해 여러 위치에서의 점군자료를 취득하여 이를 병합(alignment)하게 된다. 따라서 이

Table 1. Equipment used in fieldwork.

item	specification	ea
LiDAR	LMS-Z360i	1
Schmidt hammer	Proceq L-type	1
clinocompass	sowasoki	
HW Laptop	Parasonic TOUGHBOOK	2
power generator	SHX1000 Digi wave generator	1
camera	Cannon EOS 20D	1
control point	Bireflex-target	30
SW	Data Processing Program	Riscan-Pro Processing Rapidform XOR3

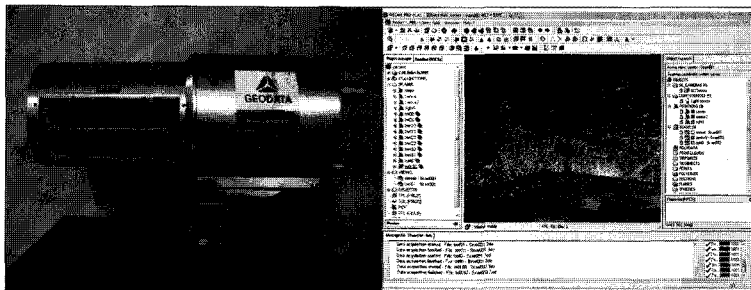


Fig. 1. Terrestrial LiDAR.

러한 병합을 위해 현장에 스캐닝작업 전에 CP를 설치한다(Fig. 2).

스캐닝에 적당한 위치를 선정하고 인접 스캐닝위치와의 중첩부에 최소 4개 이상의 CP가 설치되도록 한다. 설치 작업 이후, 각 위치별로 position scan, fine scan과 surface scan으로 구성된 스캐닝 작업을 순차적으로 실시한다. 만약 공사 설계도면작성시 사용하는 global 좌표계로 점군 자료를 얻고 싶다면 각 CP에 대한 TM좌표를 미리 측정해서 시스템에 입력해 놓는다. Positioning scan은 현장에 설치된 CP를 높은 반사율에 의해 자동 인식하고 이를 입력해놓은 좌표리스트와 비교함으로써, 각 CP를 인식하는 과정이다. 이후 fine scan 과정에서는 각 CP별로 수천번의 레이저 펄스를 집중 조사(照査)하여 얻은 반사강도 영상에서 CP의 정밀 중심좌표를 취득한다. 이러한 fine scan 과정은 확률론에 근거한 것으로, 무작위 추출되어

얻어진 CP의 중심좌표 측정값이 참값을 중심으로 정규 분포를 따른다는 가정을 응용한 예라 하겠다(Fig. 3). 마지막 surface scan 과정은 정해진 해상도에 따라 본격적인 표면의 점군자료를 취득한다. 이렇게 위치별로 스캐닝 과정을 반복수행하고 취득된 점군자료에 대해서는, 미리 입력된 CP의 좌표값 및 좌표체계에 따라, 각 위치별 스캐닝 자료를 단일 좌표체계로 통합하는 변환행렬 구성작업을 실시한다. 최종 각 위치별 점군자료는 통일된 좌표 체계에 의한 하나의 점군자료로 병합된다(Fig. 4).

지상라이다로 부터 얻어진 자료의 정밀도를 유지시키기 위해서는 취득 점군자료의 밀도를 일정하게 확보하여야 하며, 이때 거리가 증가할 수 점군자료의 수가 거리에 제곱의 비율로 증가하게 된다. 점군자료 수의 증가는 현장작업 소요시간과 직결되는 사항으로서 지상라이다의 적정 총 작업소요시간을 1~2시간으로 상정할 때, 자료

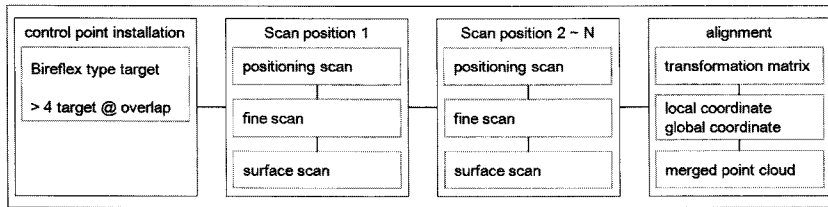


Fig. 2. Point cloud acquisition process.

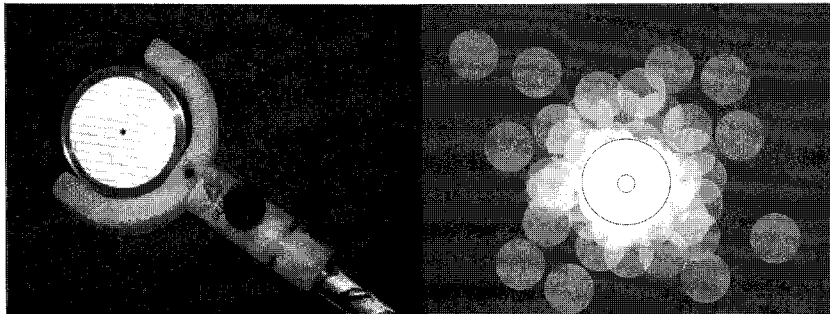


Fig. 3. Bireflex-type target and fine scan process.

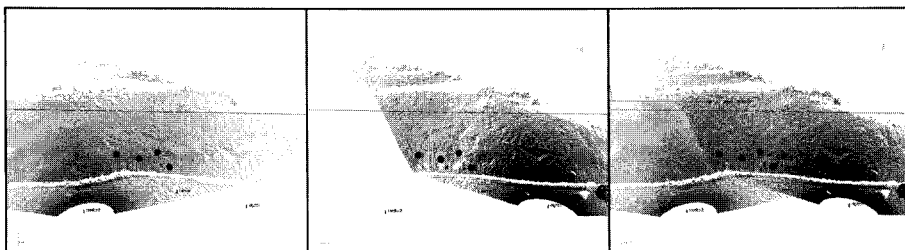


Fig. 4. Point cloud alignment.

의 신뢰성을 일정수준으로(점군자료의 점간 거리 2 mm 이하) 유지하기 위한 적정 측정거리는 일반적으로 50 m 범위 이내이다.

인천계양구 사면(slope1) 현장실험

본 절취사면은 인천시 계양구 계양1동 주변 00방수로 공사현장에 위치하며, 호상편마암으로 구성된 암반사면이다. 사면의 높이 및 연장이 각각 19 m, 50 m에 이르며 경사 및 경사방향은 54/175(dip/dip direction)를 이룬다. 사면방향과 유사한 대규모 단층에 의해 평면파괴가 발생되었다(Fig. 5). 사면굴곡에 의한 음영지역이 최소화 될 수 있도록 좌우, 중앙 3개의 위치에서 스캐닝을 실시하였다. 스캐닝에 소요된 시간은 위치에 따라 25~35분 정도가 소요되었다. 조사 대상사면과 장비와의 거리가 비교적 일정하게 유지하는 조건으로 균일한 해상도로 점군자료를 취득하였다(Table 2). 점군자료를 구성하는 포인트간의 간격은 평균 2 mm를 유지하였다.

강원도 정선군 사면(slope2) 현장실험

본 절취사면은 강원도 정선군 남면 무릉리에 국도 38호선 공사현장에 위치하며 기반암이 변성퇴적암류로 구성된

암반사면이다. 사면의 높이 및 연장이 각각 46 m, 100 m에 이르며 경사 및 경사방향은 60/223(dip/dip direction)을 이룬다(Fig. 6).

일부구간에서 대규모 단층 및 엽리구조에 의해 발생된 평면파괴로 인해, 현장접근이 어려운 상황에서, 비접촉식 조사기법에 의해 사면에 대한 3차원 점군자료 취득을 목적으로 조사를 수행하였다(Table 3).

수치표면모델 및 절리면 프로파일 생성

수치표면모델 생성

병합된 점군데이터는 불연속적인 자료로써 점과 점 사이에 대한 정보를 포함하고 있지 않다. 따라서 임의의 위

Table 2. Slope1 point cloud.

item	ea	time (min)	resolution (deg)	points (million)	position
control point	12	60	NA	NA	bench of slope
pos.1	1	30	0.02	1.1	opp. side of slope
scanning pos.2	1	25	0.02	1.4	opp. side of slope
pos.3	1	35	0.02	1.2	opp. side of slope



Fig. 5. Photograph of slope2 and point cloud.

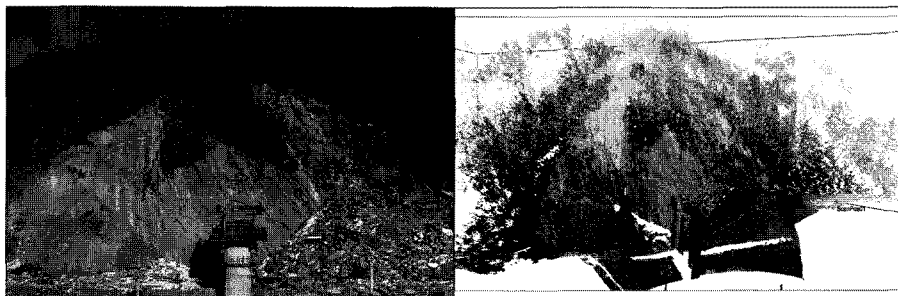


Fig. 6. Photograph of slope2 and point cloud.

Table 3. Slope2 point cloud.

item	ea	time (min)	resolution (deg)	points (million)	position
control point	14	40	NA	NA	bench of slope
scanning	pos.1	1	25	0.01	opp. side of slope
	pos.2	1	15	0.02	right side of slope
	pos.3	1	20	0.02	middle of slope
	pos.4	1	15	0.02	left side of slope

치나 방향에 대해서도 정보를 추출할 수 있는 연속적 자료형태인 수치표면모델로 점군자료를 변환해야 한다. 따라서 본 연구에서는 최종 수치표면모델을 얻기 위하여 4단계의 자료처리과정을 수행하였다(Fig. 7). 최종 점군에는 조사자나 전선 등, 관심대상물 외의 노이즈가 포함되며 또한 바닥에 물이 있고, 레이저의 입사각이 커서 전반사를 일으키는 경우 고스트(ghost) 현상에 의한 노이즈가 발생된다(Rieger, 2010). 또한 여러 위치의 점군에 대한, 병합과

정에서 발생된 중첩부의 중복자료(redundancy)에 의해, 다음 tessellation 단계에서 불규칙적이며, 과도하게 날카로운 모양의 삼각망이 구성되는 문제가 발생되므로 이를 제거하였다(Fig. 8).

다음은 tessellation 단계로서 필터링 과정으로 정리된 점군자료를 이용하여 불규칙삼각망(triangular irregular network, TIN)을 구성하였다. 3차원 공간상에 분포하는 점군자료의 특성상 TIN 생성과정에서 단일 표면이 아닌 중첩되거나, 뒤집히거나, 꼬인면이 발생되며 이를 fix abnormal face 과정을 거쳐 제거하였다. 이상까지 진행된 불규칙삼각망에는 tessellation 과정에서의 구멍이 분포하며, 이를 적절히 메꾸주기 위해 fill hole 단계를 거쳐 최종 수치표면모델을 획득하였다.

Slope1 수치표면모델 및 절리면 프로파일 생성

수치표면모델 생성과정시 Fig. 9와 같이 여러 위치의 점군자료에 대한 병합과정에서 중첩부에 점군의 분포밀도가 높아지며 불필요한 redundancy가 증가한다(Fig. 9(a), (b)). 따라서 이를 적절한 필터링 과정에서 제거해야만(Fig. 9(c))

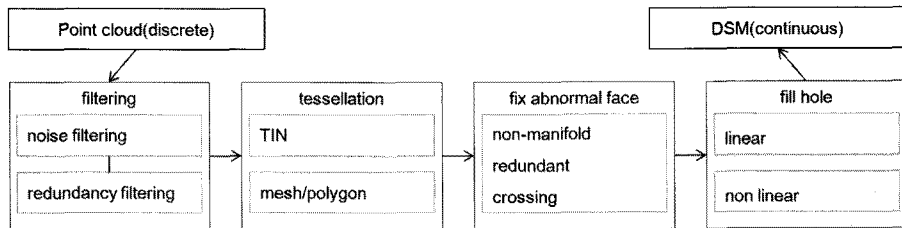


Fig. 7. DSM generation process.



Fig. 8. Noise and redundancy filtering.

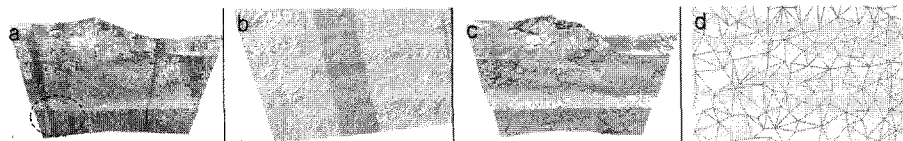


Fig. 9. Slope1 DSM generation process.

불규칙삼각망 생성시 Fig. 9의 (d)와 같이 균일한 매쉬분포를 가진다. 활동면의 절리면거칠기(JRC) 산정을 위한 프로파일을 추출하기 위해 사면 시점부 부터 종점부까지, 1소단과 도로사이 부분에 대해 50개의 단면을 설정하였다(Fig. 10). 총 50개 단면에 의해 추출된 프로파일 중, 활동면에 해당하는 부분외의 나머지부분은 제거하였으며, 형상이 비정상적인 부분도 제거함으로써 향후 정량적인 JRC 산정에 활용하였다.

Slope2 수치표면모델 및 절리면 프로파일 생성

측정된 4개 지점에서의 점군자료에 대해서는 개별 점군자료내의 14개 CP를 이용하여 병합작업을 수행하였다. 병합된 점군자료에 대해서는, main body에서 일정거리가 이격된 불필요한 점을 제거하는 노이즈필터링, 병합과정의 중첩부분에서의 불필요하게 많은 점을 제거하는 redundancy filtering을 수행하였다. 이후 tessellation과정을 거쳐 불규칙삼각망을 형성함으로써 polygon model이 구성된다.

얻어진 polygon model에는 꼬인 면, 뒤집힌 면 등의 많은 abnormal face가 존재하며, 이를 보정하는 작업을 수행한다. 이후 polygon model에 분포하는 hole을 모두 제거함으로써 최종 수치표면모델이 얻어진다(Fig. 11). 불연속면의 프로파일 추출을 위한 단면선을 설정하였다.

설정간격은 사면 지점부터 종점까지 등간격으로 총 50개의 단면선 설정 후, 30 cm 길이의 프로파일을 추출하였다.

절리면거칠기(JRC)에 대한 확률특성 분석

Goodness of fit test(K-S test)

일반적으로 임의의 확률변수가 정규분포를 따르는 정도인 normality(정규성)는 그 수준에 따라 exact normality, approximate normality, assumed normality로 구분한다(Filliben, 1975). Exact normality는 수학적인 정규분포와 동일한 경우를 의미한다. Approximate normality는 극한 중심정리(central limit theorem)로 설명되는 즉, 충분히 많은 시행횟수에 의해 원래 이산적인 분포가 정규화되는 경우를 말한다. Assumed normality는 측정오차를 포함하는 관측값이 다른 확률분포함수에 비해 정규분포와 유사한 경우 사용되며, 이때 normality에 대한 검증(test)이 요구된다. Goodness of fit test는 다음 Fig. 12와 같이 분류되며, visual tests, empirical distribution function tests, moment tests로 구분된다.

Visual test의 일종인 probability paper test의 경우 확률변수의 분위수(quantile)를 누적분포함수(CDF) 그래프상에 표시하고 그래프가 선형적인 관계성을 가지는지의 여부

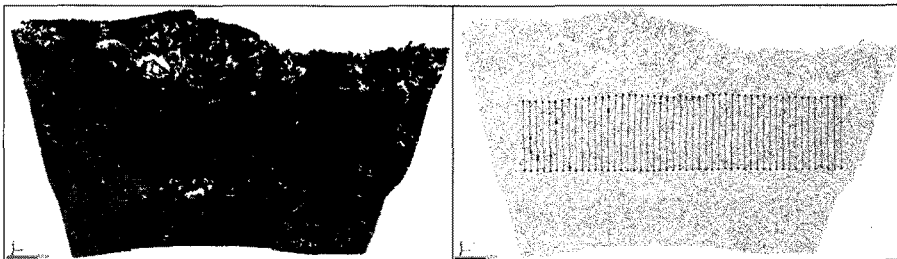


Fig. 10. Slope1 DSM and section profile.

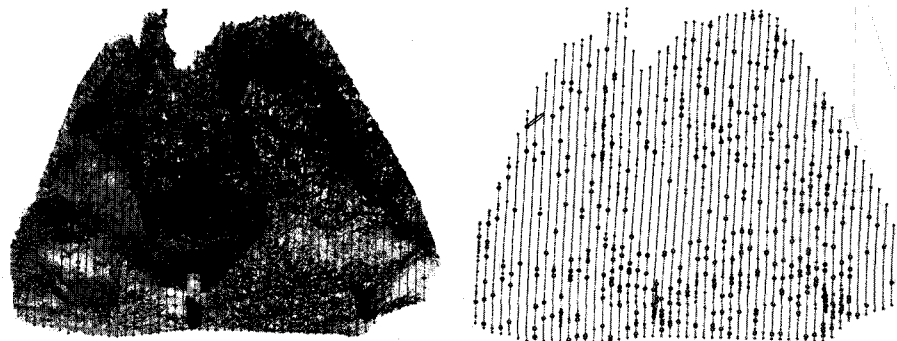


Fig. 11. Slope2 DSM and section profile.

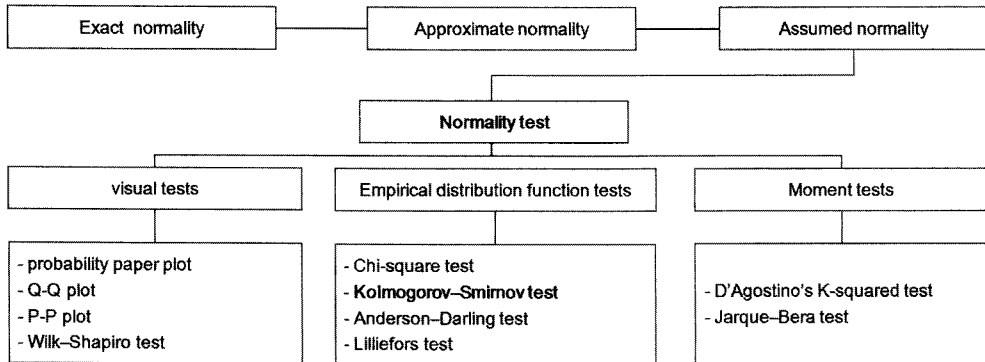


Fig. 12. Goodness of fit test.

에 따라 normality를 판단하는 방법이다(Haldar and Mahadevan, 2000). 이 방법은 판단과정에서 주관성이 개입될 소지가 크고, normal probability paper와 lognormal probability paper상에 모두 직선으로 표시될 경우 두 분포 사이에 애매한 판단이 유발되는 한계를 가진다. 따라서 통계적인 검증방법이 사용되는데, 이중 Chi-square(χ^2) test와 Kolmogorov-Smirnov test(K-S test)가 널리 사용되며, 이들 방법은 원래 두 표본에 대한 유사성을 판단하기 위한 개발되었다. 본 논문에서는 χ^2 test와는 달리 간격(interval)을 정하지 않아도 되는 장점이 있는 K-S test를 normality 검증방법으로 채택하였다.

Goodness of fit test는 산정된(observed) 자료(JRC, JCS)와 이상적인(theoretical) 정규분포자료에 대해 귀무가설(null hypothesis : 두 표본이 동일하다는 가설)을 도입하고, 이 두 자료의 P-value(1종 오류 발생확률)를 1종 오류(type I error : 귀무가설이 참임에도 불구하고 대립가설을 채택한 확률) 발생 한계값인 유의수준(significance level : 일반적으로 0.05 사용)과 비교하여 귀무가설의 채택(P-value > α)이나 기각을 결정하는 통계적 검증방법을 사용하였다. K-S test 분석절차는, Fig. 13과 같이 주어진 자료에 대한 평균과 표준편차로부터 유도된 정규분포 누적분포함수 그래프와 주어진 자료에 대한 누적분포함수를 그래프에 도시한다. 최대 이격값인 D_n 을 구하고, 이를 주어진 샘플갯수($n = 100$)와 유의수준($\alpha = 0.05$)을 이용하여 식 3으로부터 얻어진 D_n^{α} 과 비교하여 D_n 이 D_n^{α} 이하일 경우 유의수준에서 정규분포를 따른다고 판단한다(Haldar and Mahadevan, 2000).

$$D_n = \max |F_X(x_i) - S_n(x_i)| \quad (1)$$

where, $F_X(x_i)$: theoretical CDF of assumed distribution
 $S_n(x_i)$: CDF of observed ordered samples

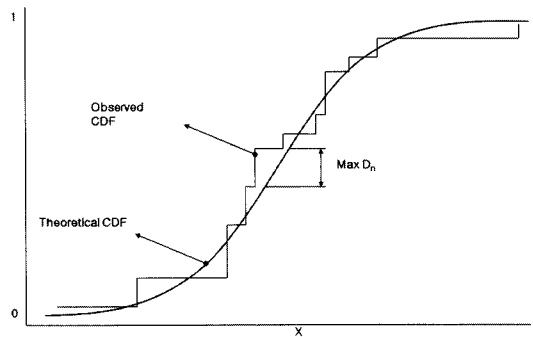


Fig. 13. K-S test (Haldar and Mahadevan, 2000).

$$S_n(x_i) = \begin{cases} 0, & x < x_i \\ \frac{m}{n}, & x_m \leq x \leq x_{m+1} \\ 1, & x \geq x_n \end{cases} \quad (2)$$

where, m : ranking no. of ordered samples,
 n : sample size

$$D_n^{\alpha} (@\alpha = 0.05) : D_n^{0.05} = \frac{1.36}{\sqrt{n}} \Rightarrow D_{100}^{0.05} = \frac{1.36}{\sqrt{100}} = 0.136 \quad (3)$$

where, D_n^{α} : tabulated value @ α ,
 α : significance level

Z2, Ai 파라미터를 이용한 절리면거칠기 정량화 거칠기면의 높이나 미소굴기 값에 대한 평균이나 표준편차를 이용하여 거칠기를 정량화 하는 대표적인 방법으로 Z2와 Ai 통계파라미터가 있다(식 5, 식 6).

Myers (1962)는 금속표면에 대한 거칠기 정량화 연구에서 중심선에 대한 프로파일의 평방평균(Root Mean Square, RMS)인 Z2가 마찰과 관계있음을 밝혔다. 이후 Tse and Cruden (1979)은 거칠기 미소기울기의 평방평균인 Z2와 JRC사이에 식 7과 같은 관계식을, 또한 미소거침 각인 Ai와 JRC사이에 식 8과 같은 관계식을 제안하였다. Kulatilake와 그의 동료(1995)는 여러 통계적인 파라미터 중에 Z2의 상관성이 가장 우수하다고 언급하였다.

평방평균은 마무리된 금속표면의 연마상태를 표현하기 위해 도입되었으며, 기준선을 중심으로 거칠기의 높낮이에 대한 표준편차를 의미한다(Fig 14, 식 4).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Z2 파라미터는 미소 기울기 값에 대한 표준편차를 의미한다(Meyers, 1962).

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2} \quad (5)$$

Ai 파라미터는 미소요소 거칠기 각도(angle)의 평균값을 의미한다.

$$A_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \quad (6)$$

$$JRC = 33.2 + 32.471 \log Z_2 \quad (7)$$

where, JRC : Joint Roughness Coefficient

Z2 : 미소기울기의 RMS

$$JRC = 1.61(A_i) - 2.49 \quad (8)$$

where, Ai : average micro i angle

김열(2005)은 Barton이 제시한 표준프로파일을 수치화(digitizing)하여 식 4와 5에 적용하고 상관성을 분석하였다. Z2 파라미터에 의한 방법은 상관계수가 0.989이며, Ai 파라미터에 의한 방법은 0.953으로 두 방법 모두 높은 상관성을 보이고 있으며 Ai에 비해 Z2가 약간 높다고 보고한 바 있다(Fig. 15). 따라서 본 연구에서는 절리면 거칠기를 표현하는 여러 통계적인 파라미터 중에 상관성이 높다고 보고된 Z2 및 Ai 파라미터에 의한 방법을 JRC 정량화에

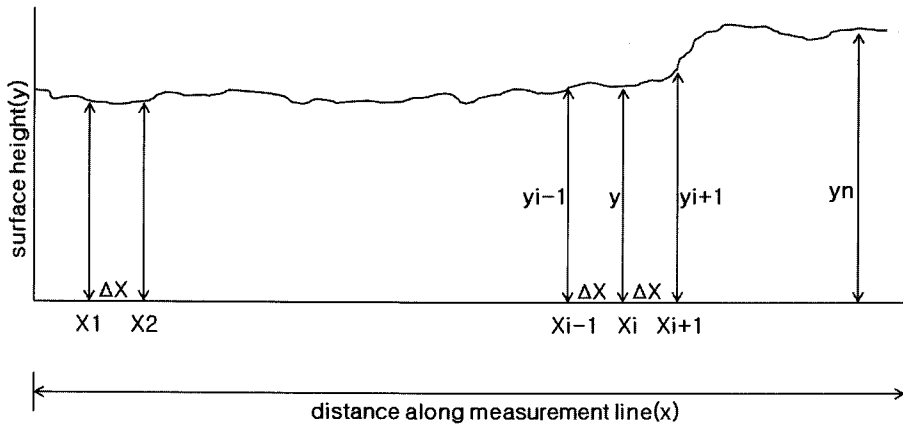


Fig. 14. Statistical parameters.

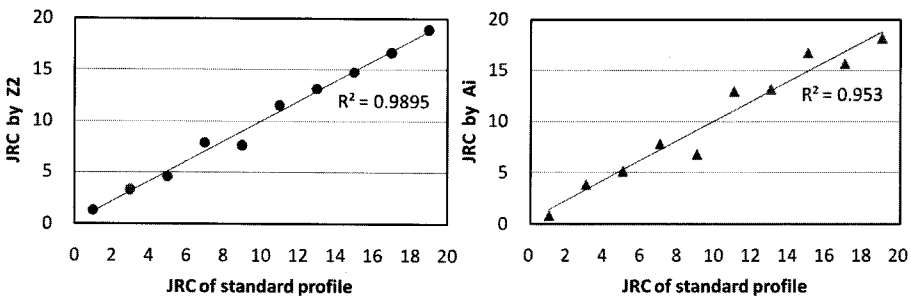


Fig. 15. Z2 and Ai vs. standard JRC(Kim, 2005).

도입하여 확률론적 안정해석의 확률변수로 활용하였다.

채택된 통계파라미터 변환식을 이용하여 JRC를 추출하기 위한 과정으로, 지상라이더를 이용한 현장조사 과정을 통해 얻어진 수치표면모델로부터 붕괴활동면에 대한 프로파일을 소요개수만큼 설정하고, 이를 오토캐드 프로그램에서 폴리라인(polyline)으로 로딩하였다(Fig. 16). 로딩된 폴리라인들은, 프로파일 설정당시 수치표면모델의 구멍이나 역전된(undercut) face 등의 비정상 폴리곤에 의해, 절리면거칠기(JRC)변환에 사용할 수 없는 폴리라인이 존재한다. 따라서 이러한 비정상적인 폴리라인과 활동면 이외의 부분에서 얻어진 폴리라인은 JRC 변환과정에서 배제시켰다. 이후, 오토캐드의 외부실행 프로그램 기능인 lsp를 이용하여 폴리라인의 각 절점에 대한 좌표를 텍스트 파일로 출력하였다(Fig. 17). 각 절점의 x, y, z 좌표값이 텍스트 형태로 출력된 파일을 엑셀에 로드하여 해당 식 5 식 6에 의해 Z2와 Ai 파라미터값 산출한 후 식 7과 식 8를 활용하여 JRC(Z2)나 JRC(Ai)값을 추출한다. 이러한 과정을 거쳐 얻어진 JRC값들에 대해서는 이후 확률특성 분석과정을 통해 통계적인 특성값 추출에 활용하였다.

Slope1의 절리면거칠기 분석

Slope1의 수치표면모델로부터 약 217개의 프로파일을 추출하였으며, 이들 중 비정상적인 프로파일을 제외한 100개에 대해서는 Z2 및 Ai 파라미터의 경험식(식 7, 식 8)을 이용하여 절리면거칠기(JRC) 값으로 환산하였다. Slope1에서 도출된 100개의 JRC값에 대해서 확률 특성을 파악하기 위해 히스토그램을 작성하였다.

Slope1의 Z2 파라미터에 의한 JRC(Z2)의 경우 평균이 5.40, 표준편차가 1.45, 최소값 1.25, 최대값 9.09, range 7.84, 변동계수 0.27로 분석되었다. 히스토그램 분포형태는 평균값을 꼭지점으로 하는 비대칭 삼각형 양상을 보이고 있다(Fig. 18). Slope1의 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)의 경우 평균이 6.30, 표준편차가 1.93, 최소값 1.99, 최대값 11.14, range 9.15, 변동계수 0.31로 분석되었다(Fig. 19). 전반적으로 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 높은 값을 가지는 것으로 파악되며, 이는 같은 절리면 프로파일에 대해 Z2 파라미터에 비해 Ai 파라미터가 보다 높은 JRC값을 도출하는데 따른 결과로 판단된다.

Z2파라미터에 의한 JRC(Z2)와 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)를 비교분석하면, 분포값의 분산정도를 나타내는

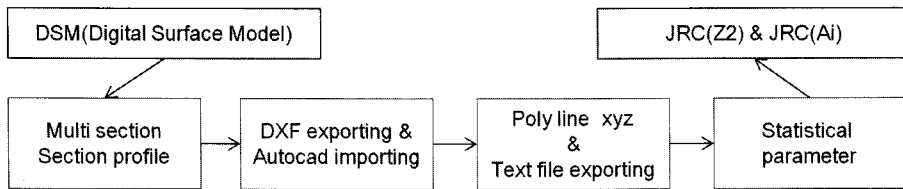


Fig. 16. JRC(Z2) and JRC(Ai) extraction over the section profile using statistical parameters.

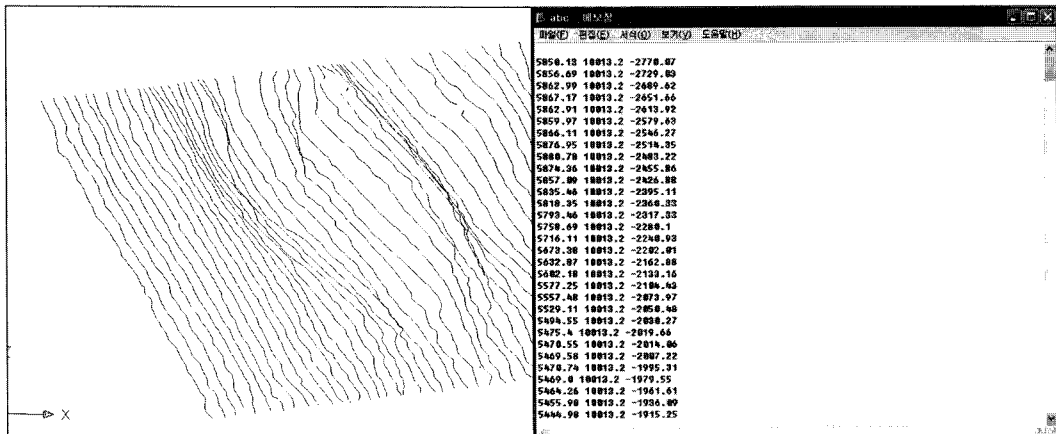


Fig. 17. Profile analysis using Autocad data exporting.

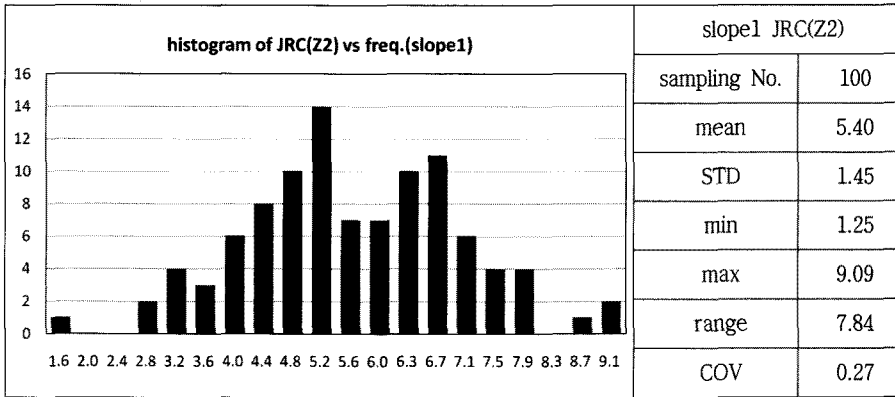


Fig. 18. Slope1 JRC(Z2) histogram.

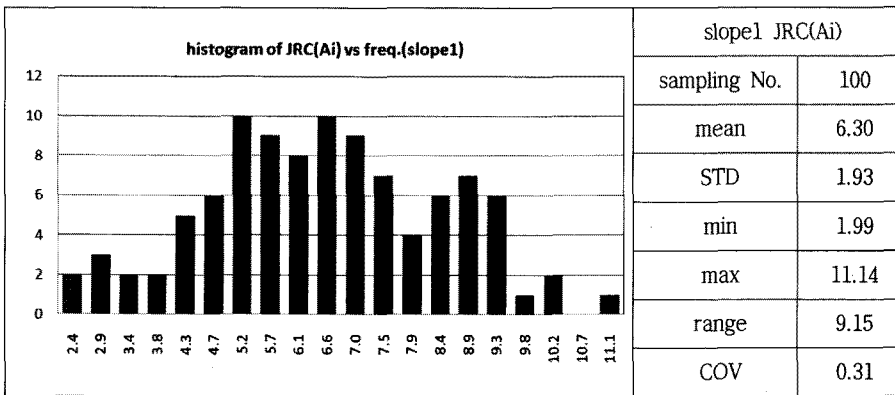


Fig. 19. Slope1 JRC(Ai) histogram.

산포도(degree of scattering, 분산도)에 있어, JRC(Z2)의 표준편차가 1.45, range가 7.84이며, JRC(Ai)의 표준편차가 1.93, range가 9.15로써 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 약간 더 분산된 것으로 파악된다. 변동계수에 있어서도 JRC(Z2)가 0.27, JRC(Ai)가 0.31로써 정규화된(normalization) 분산정도도 JRC(Ai)가 보다 높은 것으로 분석되었다. 따라서 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 높은 값을 도출하여 거칠기를 과대평가하였으며, 분산정도도 높은 결과를 도출하였다.

Slope2의 질리먼거칠기 분석

Slope2에서 도출된 100개의 JRC값에 대해서 확률특성을 파악하기 위해 히스토그램을 작성하였다. slope2의 Z2 파라미터에 의한 JRC(Z2)의 경우 평균이 7.21, 표준편차가 1.51, 최소값 3.13, 최대값 10.89, range 7.76, 변동계수 0.21로 분석되었다(Fig. 20). 히스토그램 분포형

태는 평균값을 꼭지점으로 하는 비대칭 삼각형 양상을 보이고 있다. slope2의 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)의 경우 평균이 7.9, 표준편차가 1.99, 최소값 3.25, 최대값 13.55, range 10.3, 변동계수 0.25로 분석되었다(Fig. 21). 히스토그램 분포형태는 평균값을 꼭지점으로 하는 삼각형 양상을 보이고 있다. 전반적으로 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 약간 높은 값을 가지는 것으로 파악되며, 이는 동일한 절리면 프로파일에 대해 Z2 파라미터에 비해 Ai 파라미터가 보다 높은 JRC값을 도출하는데 따른 결과로 판단된다.

Z2파라미터에 의한 JRC(Z2)와 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)를 비교분석하면, 분포값의 분산정도를 나타내는 산포도(degree of scattering, 분산도)에 있어, JRC(Z2)의 표준편차가 1.51, range가 7.76이며, JRC(Ai)의 표준편차가 1.99, range가 10.3으로써 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 더 분산된 것으로 파악된다. 변동계수에 있어서도 JRC(Z2)가

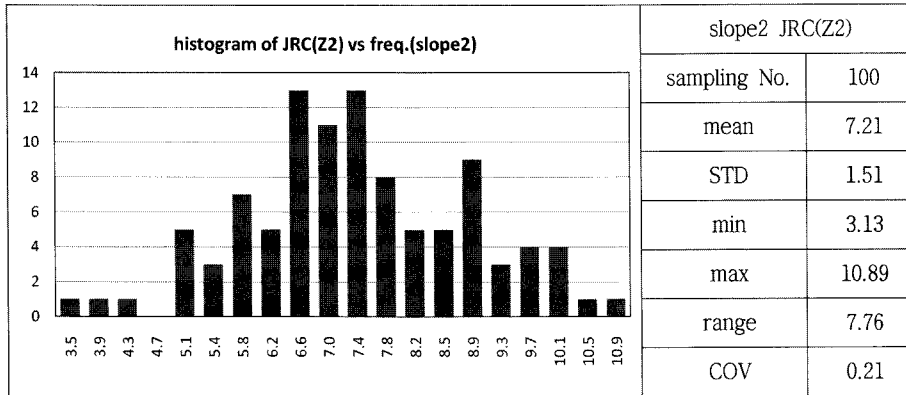


Fig. 20. Slope2 JRC(Z2) histogram.

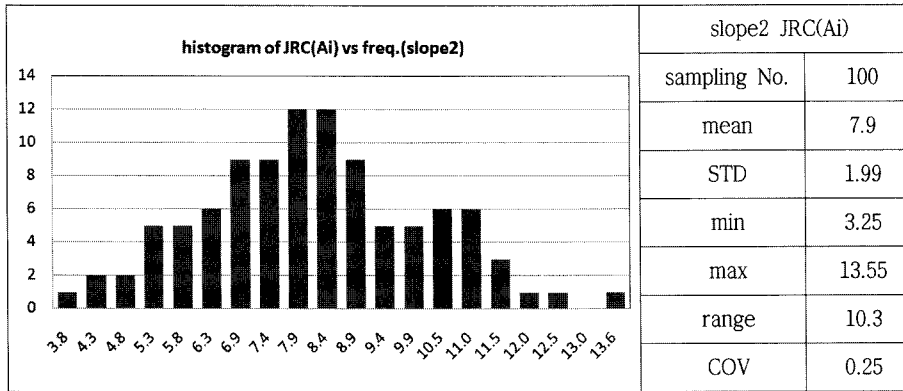


Fig. 21. Slope2 JRC(Ai) histogram.

0.21, JRC(Ai)가 0.25로써 정규화된(normalization) 분산정도도 JRC(Ai)가 보다 높은 것으로 분석되었다.

Slope1의 JRC 분석결과와 같이, slope2의 분석결과에서도 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 높은 값을 도출하여 거칠기를 과대평가하였으며, 분산정도도 높은 결과를 도출하였다. 따라서 Ai 파라미터가 Z2 파라미터에 비해, 동일한 프로파일에 대해서, 거칠기를 상대적으로 과대평가하는 경향을 보이며, 변환된 JRC값의 산포도에 있어서도 Z2에 비해 Ai 방법이 상대적으로 보다 분산된 경향을 가지는 것으로 평가된다.

Slope1,2 절리면거칠기의 Goodness of fit test

앞서 분석된 JRC값이 정규분포를 따르는지 여부를 분석하기 위해 K-S test를 통한 normality 분석을 실시하였다. 분석결과 slope1,2 모두 유의수준인 0.05에서의 (0.136)값 보다 낮은 값이 산정되었으며, 산정된 JRC 값이

정규분포를 따르는 것으로 판단된다. 또한 probability paper 상에 각 산출된 절리면거칠기(JRC)값과 주어진 값에 의해 이론적으로 추정된 분위수(percentile)를 누적분포함수그래프 상에 표시하여 보았다. slope1,2 현장별 Z2, Ai 방법에 의한 총 4개의 그래프 모두 관측된 누적분포곡선과 이론적으로 추정된 누적분포함수 곡선이 유사하게 나타나고 있어 앞서 언급한 K-S test에 의한 검정과 동일한 결과를 보이고 있다(Fig. 22, 23, 24 25).

결 론

Slope1과 slope2에 대해 지상라이더를 이용한 현장조사결과를 바탕으로, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행을 위한 사전작업으로, 상태함수에 활용되는 확률변수에 대한 확률특성 및 분포함수 분석작업을 실시하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

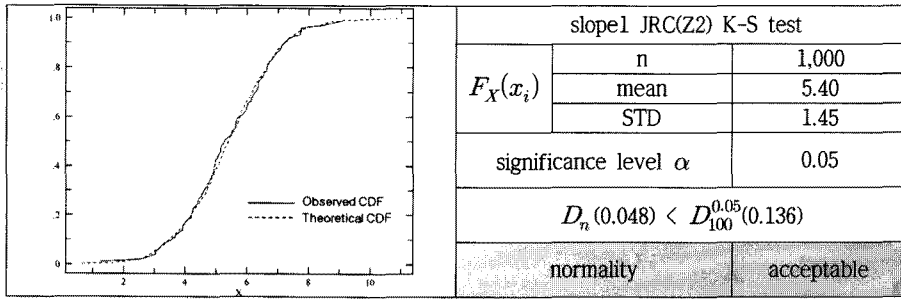


Fig. 22. Slope1 JRC(Z2) K-S test.

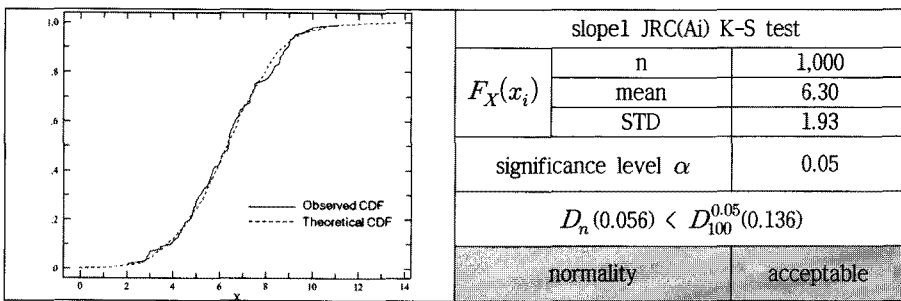


Fig. 23. Slope1 JRC(Z2) K-S test.

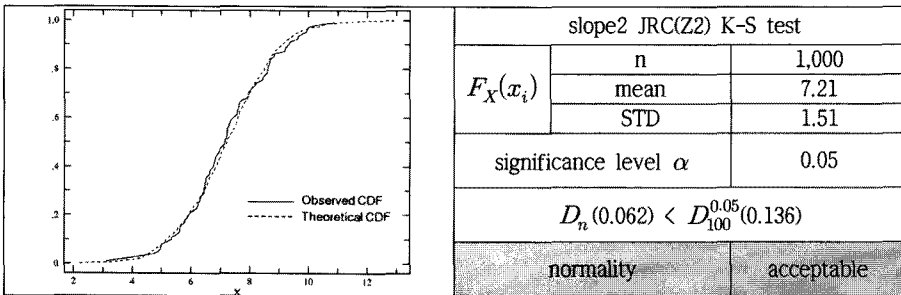


Fig. 24. Slope2 JRC(Z2) K-S test.

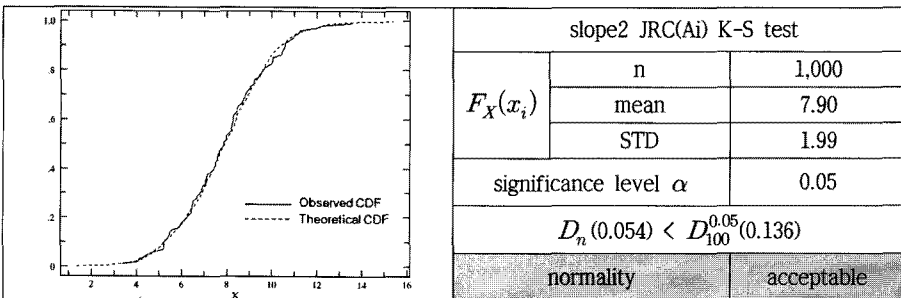


Fig. 25. Slope2 JRC(Ai) K-S test.

1. Z2 및 Ai를 이용한 통계적인 파라미터를 이용하여, slope1,2에 대한 붕괴면 수치표면모델로부터 얻어진 100개

의 프로파일에 대한 절리면저절기(JRC) 추출작업을 수행하였다.

2. Slope1의 Z2파라미터에 의한 JRC(Z2)와 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)를 비교분석하면, 전반적으로 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 높은 값을 가지는 것으로 파악되며, 산포도를 나타내는 표준편차, range, 변동계수에 있어서 JRC(Z2)에 비해 JRC(Ai)가 약간 더 분산된 것으로 파악된다.

3. Slope2의 Z2 파라미터에 의한 JRC(Z2)의 경우 평균이 7.21, 표준편차가 1.51, 최소값 3.13, 최대값 10.89, range 7.76, 변동계수 0.21로 분석되었다. slope2의 Ai 파라미터에 의한 JRC(Ai)의 경우 평균이 7.9, 표준편차가 1.99, 최소값 3.25, 최대값 13.55, range 10.3, 변동계수 0.25로 분석되었다.

4. Slope1의 JRC 분석결과와 같이, slope2의 분석결과에서도 JRC(Ai)가 JRC(Z2)에 비해 높은 값을 도출하여 거칠기를 과대평가하였으며, 분산정도도 높은 결과를 도출하였다. 따라서 Ai 파라미터가 Z2 파라미터에 비해, 동일한 프로파일에 대해서, 거칠기를 상대적으로 과대평가하는 경향을 보이며, 변환된 JRC값의 산포도에 있어서도 Z2에 비해 Ai 방법이 상대적으로 보다 분산된 경향을 가지는 것으로 평가된다. 이러한 결과는 Z2 및 Ai와 JRC와의 변환 경험식에 기인한 결과로 산출된 각각의 JRC 값을 이용하여 확률론적 안정해석시 파괴확률 산정에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5. JRC에 대한 slope1,2의 비교분석결과, slope1에 비해 slope2의 붕괴면 거칠기가 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 이들 붕괴면이 모두 단층면인 관계로 10이하의 낮은 값이 도출되었다고 판단된다.

6. 산정된 JRC가 정규분포형태를 따르는지의 여부를 판단하기 위해, 통계적인 검정기법인 K-S test를 이용하여 normality를 분석하였다. 분석결과 모든 경우에서 유의수준인 0.05에서의 (0.136)값 보다 낮은 값이 산정되어 정규분포를 따르는 것으로 판단하였다.

7. 기존 육안조사에 의한 방법이 제한된 위치에서, 한정된 수의 JRC자료만을 얻을 수 있는데 반해 지상라이다를 이용함으로써 자료수집에 소요되는 인력과 시간을 절감하고 많은 양의 정량적인 자료를 얻는데 도움이 된다고 판단된다.

사 사

이 연구는 지식경제부의 ETI 사업의 일환인 '비재래 유전의 최적생산을 위한 특성화 및 모니터링 시스템 개

발'과 2010년 한국연구재단의 지원(No. 2010-0021314)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 김열, 2005, 절리면 거칠기 정량화에 대한 연구, 석사논문, 강원대학교, 9-39.
- 천병식, 김대영, 2001, 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구, 한국지반공학회 논문집, 17(1), 85-97.
- Barton, N.R. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, J. of Rock Mech, 10, 1-54.
- Filliben, J.J., 1975, The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality, Technometrics, American Society for Quality, 17(1), 111-117.
- Haldar, A. and S. Mahadevan, 2000, Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley and Sons, 112-117.
- Kulatilake, P.H.S.W., G. Shou, T.H. Huang and R.M. Morgan, 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Elsevier Science Ltd., 32(7), 673-697.
- Myers, N.O., 1962, Characteristics of surface roughness, Wear 5, 182-189.
- Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st conf. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon 1, 509-513.
- Rieger, P., A. Ullrich, and R. Reichert, 2010, Laser scanners with echo digitization for full waveform analysis, RIEGL LMS GmbH, 3-4.
- Tse, R. and D.M. Cruden, 1979, Estimating joint roughness coefficients. Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. Geomech. 16, 303-304.

2010년 11월 22일 원고접수, 2011년 3월 5일 게재승인

박성욱

세종대학교 지구정보공학과
143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
Tel: 070-7094-4614
Fax: 042-828-6966
E-mail: wook@nexgeo.com

박혁진

세종대학교 지구정보공학과
143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
Tel: 02-3408-3965
Fax: 02-3408-4341
E-mail: hjpark@sejong.ac.kr