

3D Laser Scanner를 이용한 대규모 불연속면의 굴곡도 측정 연구

김 용¹ · 이수곤^{2*} · 김치환³

¹대한콘설탄트

²서울시립대학교 토목공학 교수

³우석대학교 토목공학 교수

A study on Waviness of Large Discontinuity using 3D Laser Scanner

Yong Kim¹, Su-Gon Lee^{2*}, and Chee-Hwan Kim³

¹Manager, Dept. of Geotechnical Eng, DAE HAN consultants co.,LTD.

²Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

³Professor, Dept. of civil Engineering, Woosuk University

Received 30 January 2017; received in revised form 19 June 2017; accepted 22 June 2017

대규모 불연속면의 굴곡도는 암반의 안정성을 판단하는 중요한 요소 중 하나이다. 그러나, 주로 실시하는 불연속면의 굴곡도 측정시험은 대형암반의 작은 코어를 채취하여 채취한 작은 코어의 굴곡도에 계수를 사용하여 대형 암반의 굴곡도를 환산하고 있다. 이러한 점을 보완하고자 3D Laser Scanner를 사용하여 대규모 불연속면의 굴곡도를 직접 측정하는 방안에 대해 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 3D Laser Scanner를 이용하여 실제 X,Y,Z의 좌표를 가지는 3D 모델을 구축하였고, CAD 프로그램을 사용하여 대규모 불연속면의 굴곡도를 산정한 데이터와 현장에서 Disc-Clinometer로 측정된 Data 결과를 비교 분석 하였다. 그 결과 Mean Dip과 Mean I 측정결과 모두 1° 이내로서 측정 장비의 기계오차 1~2° 사이에 속 하기 때문에 3D Laser Scanner를 이용한 데이터 취득 및 분석은 기존의 조사법을 보완할 수 있는 효율적이고 신뢰성 있는 조사법이라고 분석되었다.

주요어: 3D 레이저 스캐너, 대규모 불연속면의 굴곡도, 절리면 현장조사, 원형 클리노미터

The waviness of Large Discontinuity rock is the one of important elements that judges the stability of rock slope. When the waviness of large discontinuity is measured in the field, there are many limitations Therefore this research was carried out to measure waviness of large rock discontinuities using 3D laser scanner to supplement this problem. This research established one 3D model that actual X, Y and Z coordinates through the integrated data gained from one that calculates waviness of base lock using CAD program was compared and analyzed to that of disc-clinometer. As its results, the high reliability of results could be recognized as it belongs to mechanical tolerance 1~2° and the results belong to the measured values of Mean DIP and Mean are all within 1°. So, the investigation method of waviness of large discontinuity rock face using 3D laser scanner was verified as more prompt, effective and reliable method than conventional direct site measuring method.

Keywords: 3D Laser Scanner, Large joint waviness, Investigation of rock joint, Disc-Clinometer. Automatic joint measurement

*Corresponding author: sglee@uos.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

국토의 약 70%가 산지인 우리나라는 오늘날 급격한 산업의 발달에 따라 도로, 철도, 부지조성 등의 토목공사가 빈번하게 이뤄지며, 이 과정에서 불가피하게 암반사면으로 이루어진 지반을 절취하는 경우가 많다(Jo, 2010). 이러한 과정에서 굴착사면이 증가하며, 굴착사면의 규모도 점점 커지는 추세이다. 그 중 암반 내에 존재하는 불연속면은 암반의 강도, 변형 및 수리특성 등에 영향을 미친다(Kim, 2005). 암반은 불연속면에 의하여 불연속성 및 이방성 등의 특성을 지니고 있으며, 이에 따른 강도 및 변형 특성의 변화는 암반의 역학적 거동에 대한 평가를 어렵게 하고 있다. 따라서 암반의 역학적 및 수리적 특성을 고찰함에 있어 불연속면에 대한 확고한 이해는 매우 중요하다. 불연속면의 전단강도와 불연속면의 거칠기는 절리성 암반의 역학적 특성을 규명하는데 있어서 가장 중요한 요소 중 하나이며(Barton and Bandis, 1990), 불연속면의 전단강도를 추정하기 위해서는 불연속면의 기하학적 및 역학적 특성에 대한 정밀한 기재가 필요하다. 현재까지 많은 학자들이(Barton and Choubey, 1977), (Tse and Cruden, 1979) 거칠기를 정량화시키려고 많은 노력을 기울여 왔으나, 현재 암반 내의 불연속면의 특성을 파악할 경우, 현장에서 실제 암반의 불연속면과 유사한 절리면을 포함한 암석을 채취하여 실내에서 암석 실내시험을 실시하여 ISRM에 제시된 Barton and Coubey (1977)의 절리 거칠기 계수표에 의존하고 있다. 그러나, 이러한 실내시험은 실제 붕괴 사면의 작은 시추공 하나에서 채취한 것이므로 이 시료가 실제 붕괴사면의 전체 암반특성을 대변하기는 어렵다고 판단 된다(Hencher and Lichards, 1989). 따라서, 대형불연속면의 거칠기를 조사하기 위해선 Fecker and Rengers (1971)가 제시한 Roughness 보정법을 사용한 실측치(ISRM, 1978), (Goodman, 1989)와 대규모 스캔이 가능한 3D Laser Scanner 장비를 활용하여 대규모 굴곡도를 측정치와 비교 분석하고자 한다.

측정 장비와 연구 방법

3D Laser Scanner

3D Laser Scanner는 지상 레이저 시스템의 한가지로 대상체의 표면으로부터 3차원(x, y, z)공간 좌표를 Point Data로 기록하므로 기존의 Total Station과 같은 1점 만을 측량할 수 밖에 없었던 것에 비해 더욱 발전된 장비이다((RIEGL Laser Measurement Systems, 2014). Total Station과 비교해 3차원적으로 도면을 작성할 수 있으며, 우연오차나 데이터 손실을 최소화 할 수 있다.

3D Laser Scanner는 짧은 시간에 대상 물체에 레이저를 동시 다발적으로 발사하고 수신 하여 3차원적으로 실물을 측정하고(RIEGL Laser Measurement Systems, 2014), 데이터를 점집합(Point-Cloud)으로 변환 시킨 후 CAD 모델에서 3 차원으로 형상을 구성한다.

따라서 3D Laser Scanner는 신속하고 정확히 3차원 모형을 사용하는 자동차, 항공, 문화재, 및 터널 등 많은 곳에서 활용되고 있다(Pack, et al., 2015), (Cynthia and Hwang, 2001). 그 외에도 신성모(2005)는 3D Laser Scanner와 현장측정을 통하여 절리방향, 거칠기 등을 비교 분석 하였으며, 3D Laser Scanner를 사용하여 암반의 안정성 연구가 이루어지고 있다(Kveldsvik et al., 2008).

측정방법으로는 시간화 방식과 삼각측량 방식이 있다. 따라서 본 연구에 사용된 측정 장비는 미국 RIEGL 사의 RIEGL VZ-1000을 사용하였다. 이 장비의 제원은 아래 Table 1과 같으며 높은 해상도와 플래시 메모리를 내장하고 있으며 GPS, 기울기센서, 레이저 구심, 디지털 나침반 등이 통합되어 있다.

연구 방법

본 연구는 울산 혁신도시 O O 지구 내 북측 인접 사면 상부에 인장 균열이 발생한 대상사면에 대한 안정성 검토에 대해 현장 측정 굴곡도와 3D Laser Scanner를 사용한 굴

Table 1. Specification of 3D laser scanner.

Division	Specifications
Max MeasurementRange	1400 m (90% Reflectivity Standard)
Scanning Speed	122,000 nts / sec
Accuracy	5~8 mm
Field of View	100° : vertical / 360° : horizontal
Laserpulse Repetition Rate	100 khz
Effective Measurement Rate	42,000 meas/sec
Metrology Method	Time of Flight
Laser class	Eye safe operation at Laser Class 1
Dimensions	200 mm (L) × 203 mm (W) × 308 mm (H)
Operating Temperature	0°C - 40°C

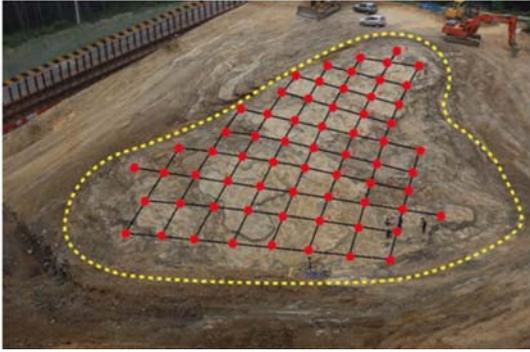


Fig. 1. Location of discontinuity waviness survey.

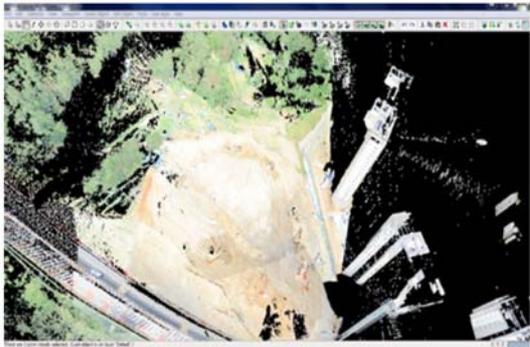


Fig. 2. Scanned result of field site using 3D Laser Scanner.

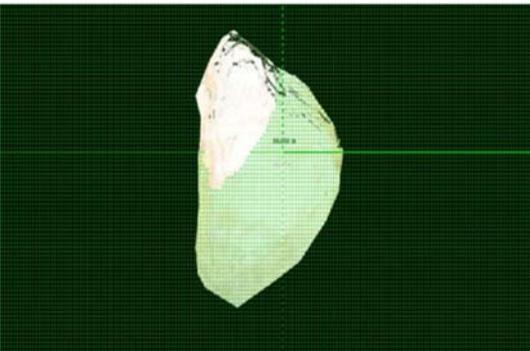


Fig. 3. 3D Model using 3D Laser Scanner.

곡도를 비교 분석 하였다.

첫 번째로, 3D Laser Scanner와 현장 Disc-Clinomete 측정결과와의 비교를 위해 현장에서 직접 10~40 cm 크기 별 Disc-Clinometer를 가지고, 굴착공사 중에 길이 45 m 폭 55 m인 대규모로 노출된 불연속면의 굴곡도를 격자형식으로(가로, 세로) 총 61곳을 각기 다른 크기(10, 20, 30, 40 (cm))의 Disc-Clinometer로 측정하였다(Fig. 1).

두 번째, 3D Laser Scanner를 가지고 연구대상 Data (Point Clouds)를 획득하였다(Fig. 2).

세 번째, 획득한 Point Clouds를 병합(Merge), 필터링(Filter Noise) 등의 과정을 통하여 실제 암반의 형상을 가

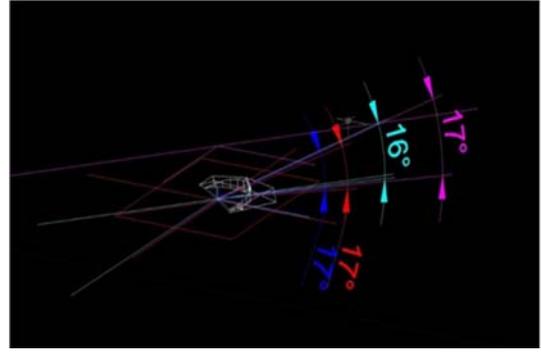


Fig. 4. A waviness road measurements using a CAD Program.

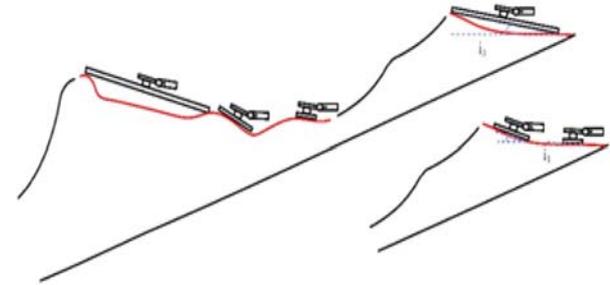


Fig. 5. Schematic feature of Disc-Clinometer measuring method.

지는 3D 모델을 생성하였다(Fig. 3).

네 번째, 생성된 3D 생성 모델을 Auto CAD(3D 모델링)에 불러와 실제 Disc-Clinometer 같은 원판을 생성하여 굴곡도를 측정하였다(Fig. 4).

다섯 번째, 추출된 굴곡도와 현장에서 실측한 Data를 비교 분석 하였다.

Fig. 5는 Disc-Clinometer로 측정한 개념도를 보여주는데, 현장에서 직접 대규모 암반사면의 표면 굴곡도를 여러 크기(10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm)의 Disk-Clinometer로 측정하는 경우에, 크기가 작은 Disk-Clinometer로 측정하는 경우엔 불연속면의 작은 굴곡도에 큰 영향을 받지만, 이에 비하여 크기가 큰 Disk-Clinometer로 측정하는 경우엔 불연속면의 작은 굴곡도에 영향이 비교적 적다는 것을 보여준다. 따라서 대형 불연속면의 굴곡도를 측정 할 시 다른 크기의(10~40 cm) Disc-Clinometer를 사용하여 불연속면의 굴곡도를 측정하여야 한다(Lee and Hencher, 2013; Rasouli and Harrison, 2004).

자료 조사 결과 및 비교 분석

현장암반 직접 측정 조사 결과

현장에서 직접 대규모 암반사면의 표면 굴곡도를 측정한 총 61 곳의 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm Disk-Clinometer로 조사 결과를 평사투영한 결과 Fig. 6와 같았고, Table 2

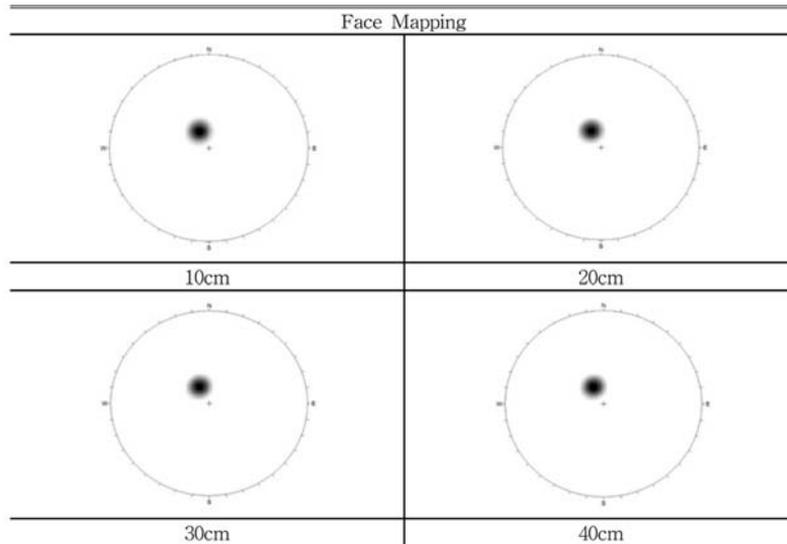


Fig. 6. As a result of the stereographic projection face mapping (10 cm~40 cm).

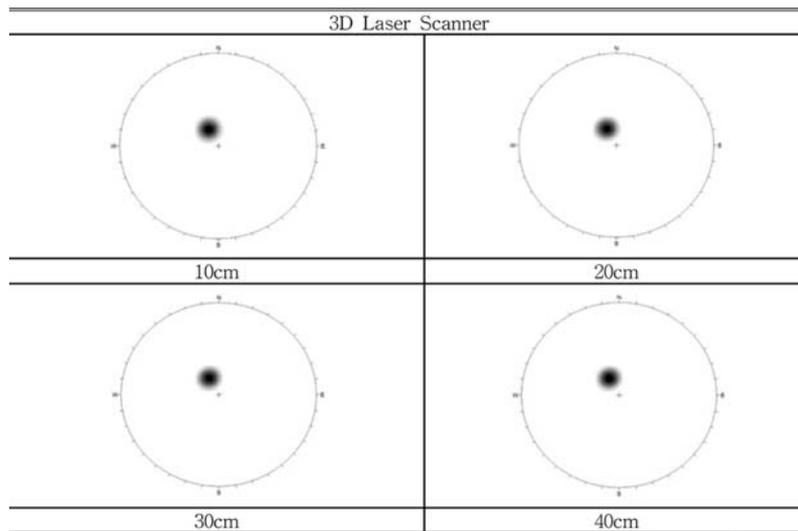


Fig. 7. As a result of the stereographic projection 3D Laser Scanner (10 cm~40 cm).

에서 ‘Mean Dip’는 실제로 클리노미터로 측정된 평균경사를 의미하고, ‘Mean i’는 평균경사와 각각의 경사 측정값 간의 차이들의 평균 값인 평균 편차를 나타내었다.

Fig. 6와 같이 평사투영 결과 Disc-Clinometer 판의 크기가 변하였지만 평균경사(Mean Dip)의 크기가 1° 내외로 크지 않아 폴의 위치가 비슷한곳에 선정되어 평사투영으로는 변화를 쉽게 확인할수 없었지만, Table 2에서 Mean i 값은 판의 크기가 커질수록 점차 줄어드는 경향을 보였으며, 이는 판의 크기가 커질수록 점차 경사의 편차가 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

3D Laser Scanner의 암반 굴곡도 조사측정 결과

3D Laser Scanner 로 대규모 암반사면의 표면 굴곡도를

Table 2. Dip / Dip Direction of measurement using Disc-Clinometer field.

Face mapping	Mean Dip	Mean i
10 cm	16.70492°	2.076322°
20 cm	16.81967°	1.655469°
30 cm	16.83607°	1.559796°
40 cm	16.96082°	1.343187°

10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm 원으로 측정된 결과의 평사투영한 내용은 Fig. 7와 같고, ‘Mean Dip’는 3D Laser Scanner로 측정된 평균경사를 의미하고, ‘Mean i’는 평균경사와 각각의 경사 측정값 간의 차이들의 평균 값인 평균 편차를 나타내었다.

Table 3. Dip / Dip Direction of the final results using 3D laser scanner.

3D Laser Scanner	Mean dip	Mean i
10 cm	15.86885°	2.64025°
20 cm	15.90164°	2.37839°
30 cm	15.91803°	2.25530°
40 cm	15.95082°	1.95646°

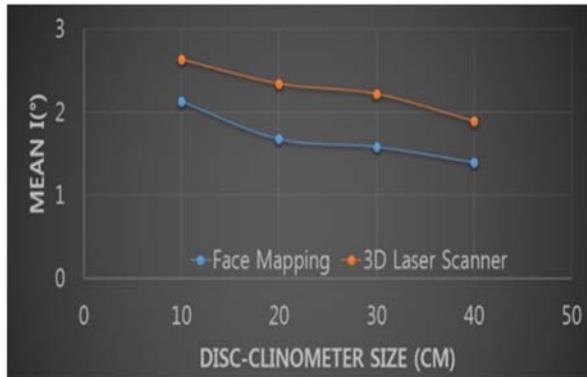
**Fig 8.** Comparison graph of Face Mapping and 3D Laser Scanner.

Fig. 7과 같이 평사투영 결과 Disc-Clinometer 판의 크기가 변하였지만 평균경사(Mean Dip)의 크기가 1° 내외로 크지 않아 폴의 위치가 비슷한 곳에 선정되어 평사투영으로는 변화를 쉽게 확인 할 수 없었지만. Table 3에서 Mean i 값은 판의 크기가 커질수록 점차 줄어드는 경향을 보였으며, 이는 판의 크기가 커질수록 점차 경사의 편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다.

현장 암반 직접 측정조사 결과와 3D Laser Scanner 조사 측정 결과 비교 분석

Fig. 8는 3D Laser Scanner조사 결과의 신뢰도를 분석하기 위하여 현장암반에서 직접측정한 결과 Table 2와 3D Laser Scanner로 측정하여 얻은 굴곡도 결과 Table 3을 비교한 그래프이다.

Fig. 8과 같이 Face Mapping와 3D Laser Scanner 비교한 결과에 따르면, 약 0.8~1° 가량 차이를 볼 수 있었다. 이러한 이유는 직접 Disc-Clinometer 로 측정할 시 측정자의 객관적인 요소가 포함될 수 있기 때문이라고 판단된다.

그리고 Ewan and West (1981)는 클리노미터의 조사자에 따른 경사의 측정오차는 $\pm 5^\circ$, 측정 장비의 기계오차 $\pm 1 \sim 2^\circ$ 가 발생할 수 있다고 하였다. 따라서, 평균값의 약 1°의 오차는 신뢰성이 있다고 판단된다. 그리고 Fig. 8에서 판의 크기가 커질수록 Mean i 값은 점차 내려가는 것을 볼 수 있었다. 이는 판의 크기가 커지면서 작은 굴곡들은 무시되어 Fecker and Rengers (1971)가 제시한 Roughness 보정법과 동일하게 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

결론

본 연구에서는 기존 대형 암반사면 굴곡도 조사 방법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 측정방법을 제안하기 위하여 3D Laser Scanner를 이용하여 울산에 위치한 대형암반사면에 대한 굴곡도를 측정하였으며, 직접 측정한 61 개소에 대해 굴곡도를 3D Laser Scanner를 이용하여 대형암반의 굴곡도를 측정된 결과는 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

(1) Face Mapping한 Disc-Clinometer의 크기를 10 cm~40 cm로 변경시켜 가면서 측정한 결과 평균편차(Mean i)값이 2.0763, 1.65546, 1.5597, 1.3431로 점차 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그래서 Disc-Clinometer 의 크기를 크게 할수록 작은 굴곡도는 무시되어 편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다.

(2) 3D Laser Scanner를 사용한 원의 크기를 10 cm~40 cm 로 변경시켜 가면서 측정한 결과 평균편차(Mean i) 값이 2.6402, 2.3783, 2.2553, 1.9564로 점차 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그래서 원의 크기를 크게 할수록 작은 굴곡도는 무시되어 편차가 줄어드는 것을 알 수 있었다.

(3) Face Mapping과 3D Laser Scanner 측정결과 에서는 경사/경사방향의 차이가 10 cm에서는 0.8360°/0.5639°, 20 cm에서는 0.9180°/0.7229° 30 cm에서는 0.9180°/0.6955, 40 cm에서는 1.0100°/ 0.6132°의 차이가 나는걸 알 수 있었으며, 0.9179°/0.5948의 평균 차가 나는 걸 알 수 있었으며 Ewan and West (1981)가 제시한 $\pm 5^\circ$ 의 오차 범위 안에 속하므로 신뢰할만한 수준의 자료로 판단된다.

(4) 현장 암반의 굴곡도를 직접 측정시 보다 3D Laser Scanner로 측정시 3배 이상의 처리속도를 확인 할 수 있었으며(Kim, Y. 2016), 조사자가 직접 암반 위를 돌아다니지 않는 편리함과 급경사지, 위험지역에 노출되지 않을 수 있어 안정성을 확보 할 수 있었다.

(5) 측정된 자료는 컴퓨터로 저장되어 있으며 3D Laser Printer를 사용하여 실제사면을 축소된 모형의 사면으로 제작 가능하여 사후 사면관리에 용이하기 때문에(Kim, Y. 2016) 정확한 대안을 강구하는 자료로 활용 할 수 있다고 판단된다.

결론적으로, 본 연구를 통하여 기존의 Disc-Clinometer와 3D Laser Scanner 의 측정 결과를 비교 하여 신뢰성을 얻을 수 있었으며, 3D Laser Scanner를 사용하여 대규모 암반의 굴곡도를 측정 하는 것이 신속성, 안정성, 주관적인 평가 및 차후관리에 더 효율성이 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 대규모 암반의 굴곡도를 측정 시 일정간격의 격자형식을 이루어 준다면 원하는 임의의 위치의 굴곡도를 측정할 수 있을 것이라고 판단되며, 좀더 가까운 거리에서 3D Laser Scanner를 측정하고, 측정간격을 좁히면 좀 더 정확한 측정결과가 나올 것 이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문을 위해서 검토해주시고 유익한 조언을 해 주신
익명의 심사위원님들께 진심으로 감사드립니다.

References

- Fecker, E. and Rengers, N., 1971, Measurement of large scale roughnesses of rock planes by means of profilograph and geological compass, *Rock Fracture, Proc. Of Int. Symp. Rock Mech. Nancy, Vol. I*, pp.18.
- Jo, H. K., 2010, An Analysis of the Weathering Intensity of Rock Surface using 3D Terrestrial Laser Scanner, Thesis, University of Seoul, pp.1-15. (in Korean with English abstract).
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities, in *Rock Characterization Testing and Monitoring, Geomechanical, 1*, 6-37.
- Cynthia, L. I. and Hwang, S. J., 2001, 3D body scanning systems with application to the apparel industry, *Journal of Fashion Marketing and Management, 5(2)*, 120-132.
- Barton, N. and Bandis, S., 1990, Review of predictive capabilities of JRC- JCS model in engineering practice, *Rock Joint, No.4*, pp.603-610.
- Barton, N. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics and Rock Engineering, 10(1-2)*, 121-140.
- Goodman, R. E., 1989, "Rock Mechanics Second Edition", 2nd Ed., Wiley, New York, 5, 164-169.
- RIEGL Laser Measurement Systems, 2014, System Configuration Riegl VZ-1000 Manual, Retrieved from www.riegl.com.
- Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech, Abstr. 16*, 303-307.
- Hencher, S. R. and Richards, L. R., 1989, Laboratory direct shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scale, *Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(3)*, 883-897.
- Lee, S. G. and Hencher, S. R., 2013, Assessing the stability of a geologically complex slope where storm dykes locally ACT as reinforcement, *Rock Mechanics and Rock Engineering, 46*, 1339-1351.
- Lee, S. G., Hencher, S., Kim, C. H., Jo, K. H., Woo, J. K., Kang, H. S., Jo, C. S., Huh, I. S., Kim, Y. S., Kang, D. L., Lim, B. M., Kim, H. G., Kim, J. W., Yu, Y. J., Lee, T. H., Kim, K. S., Kim, Y., Pack, S. H., Lee, Y. S., and Yu, J. W., 2016, Academic research service to identify cause of collapse of slope C-1BL Ulsan Innovation City Final Report.
- Pack, S. H., Lee, S. G., Lee, B. K., and Kim, C. H., 2015, A study on reliability of joint orientation measurements in rock slope using 3D laser scanner, *Tunnel and Underground Space, 25(1)*, 97-106.
- Sin, S. M., 2005, Study on the analysis of discontinuity in the rock-mass by 3D laser scanner, Thesis, Pai Chai University, pp.47-624. (in Korean with English abstract).
- Ewan, V. J. and West, G., 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, *Transport and Road Research Laboratory supplementary report 702, 18P, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, Vol. 19, Issue 4, 1982*, pp.94.
- Kveldsvik, V., Nilsen, B., Einstein, H. H., and Nadim, F., 2008, Alternative approaches for analyses of a 100,000 m³ rock slide based on Barton-Bandis shear strength criterion, *Landslides, 5*, 161-176.
- Rasouli, V. and Harrison, J. P., 2004, A comparison of linear profiling and an in-plane method for the analysis of rock surface geometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41(3)*, 161-176.
- Kim, Y., 2016, A Study on Waviness of Large Discontinuity Using 3D Laser Scanner, University Of Seoul, pp.54-76.
- Kim, Y. K., 2005, Studies on the characteristics and safety evaluation of rock slope and dam structure by terrestrial laser scanning system, Thesis, Pai Chai University, pp.4-9. (in Korean with English abstract).

김 용

대한콘설탄트

서울특별시 중로구 필운대로 9

Tel: 010-6557-9205

E-mail: iii114444@naver.com

이수곤

서울시립대학교

서울특별시 동대문구 서울시립대로 163 건설공학과 3110호

Tel: 02-6490-2429

E-mail: sglee@uos.ac.kr

김치환

우석대학교

전라북도 완주군 삼례읍 삼례로 443 건설시스템공학과

Tel: 630-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com