3DEC을 이용한 일정수직하중 조건에서의 전단강도에 관한 연구

노영목, 문홍주, 김기호, 장원일*

A Study on Shear Strength under Constant Normal Load
Conditions by Using 3DEC

Young-Mok Noh, Hong-Ju Mun, Ki-Ho Kim, Won-Yil Jang*

Abstract Direct shear tests have been initiated to understand the characteristics of joints which crucially affect the stability of rock mass. In this research, numerical approach in direct shear tests has been initiated using 3DEC on the basis of 3D distinct element method. Normal loads were altered in four different levels on artificial joint tests depending on the sawtooth angle and strengths on constant normal stress conditions, measuring the peak shear strength according to the direct shear tests under laboratory condition. Also results obtained from mechanical properties through laboratory test were used to perform numerical modeling, and shear strength obtained from the modeling was used to compare with laboratory direct shear test. As a result numerical analysis from distinct element method can simulate well on the shear behavior of rockmass.

Key words Direct shear test, Shear strength, Numerical analysis, Distinct element method, 3DEC

초 록 암반 구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미치는 절리의 특성을 파악하기 위해서는 일반적으로 직접전단 시험을 통한 연구가 수행되고 있으나, 본 연구에서는 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC을 사용하여 직접전단시험을 수치해석적으로 수행하였다. 톱니각과 강도가 상이한 인공 절리시험편에 대해 수직하중을 4단계로 변화시켜가며 일정수직하중 조건에서 실험실 직접전단시험으로 최대전단강도를 측정하였다. 그리고 실내시험을 통해 얻은 시험편의 역학적 물성으로 수치해석 모델링을 수행하였고, 획득한 전단강도를 실험실 직접전단시험으로 수행한 전단강도와 비교·분석하였다. 그 결과 개별요소법에 의한 수치해석은 암반의 전단거동을 잘 묘사할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심어 직접전단시험, 전단강도, 수치해석, 개별요소법, 3DEC

1. 서 론

지하비축기지, 폐기물 처리장과 같은 지하공간의 이용이 증가하고, 암반사면 개착, 도로 건설, 대규모 댐 등과 같은 암반을 대상으로 하는 구조물들의 활용범위가 넓어짐에 따라, 암반 구조물의 역학적 안정성과 암반의

역학적 거동 파악이 강조되고 있다. 암반 내에는 자연적으로 형성된 수 많은 불연속면들이 발달되어 있고, 특히 단층이나 절리는 암반 구조물의 안정성에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 암석절리면의 변형거동 및 파괴특성은 현장에서 다양한 응력과 절리의 기하학적 조건에 따라 실험하기가 어렵기 때문에 실험실 직접전단시험을 통해 연구되고 있으나, 시료성형이 복잡하며 같은 절리 단면에 대해 수직응력을 달리하여 실험하는 과정의 어려운 점 등 꾸준히 문제가 제기되고 있다(You & Park, 1999).

국내외에서는 인공절리 시료와 자연절리 시료에 대하여 일정수직하중 조건의 전단거동에 관한 연구를 많이 진행하였으며 거칠기에 의한 절리면 전단거동에 관한

Received: Dec. 11, 2013

Revised: Jan. 21, 2014

Accepted: Jan. 21, 2014

*Corresponding Author: Won-Yil Jang

Tel) +82514104438, Fax) +82514034680

E-Mail) jwy@kmou.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime Ocean University, Busan, Korea

Table 1. Property value of artificial sample from the laboratory test

Property \ Type	Low strength sample	High strength sample
Uniaxial compressive strength(MPa)	28	38.11
Brazilian Tensile Strength(MPa)	2.34	2.82
Porosity(%)	6.90	5.42
Density(kg/m ³)	1955	2021
Poisson's ratio	0.25	0.23
Friction angle(°)	17.6~22.4	23.6~30.4

Fig. 1. Artificial sample diagram **Fig. 2.** A view of artificial sample

연구도 진행되었다(Patton, 1966; Barton & Choubey, 1977; Kim & Lee, 1993; Kim, 2001; Lee, et al., 2007). 또한 Johnston et al.(1987) 은 규칙적인 삼각톱니 시료의 전단거동을 일정수직강성조건의 직접전단시험과 수치해석에 대한 연구를 수행하였고, You and Park(1999) 은 PFC2D를 이용하여 직접전단시험을 모델링하였다.

본 연구에서는 3차원적 분포를 이루는 절리면의 역학적 거동 특성을 평가하기 위해 개별요소법에 근거한 3차원 수치해석 프로그램인 3DEC으로 절리면 전단거동을 분석하고자 하였다. 직접전단시험을 통해 얻은 시료의 강도와 거칠기 및 수직하중의 변화에 따른 최대전단강도를 수치해석으로 직접전단시험을 모델링하였을 때와 비교·분석함으로써 개별요소법에 의한 암반구조물 거동분석의 적합성을 검토할 수 있다.

2. 직접전단시험

2.1 시료의 특성

본 연구에서 사용된 재료는 인공 모의 암체로서 시멘트 모르타르를 사용하였다. 시멘트 모르타르를 사용하여 인공적으로 제작된 이등변 톱니 모양의 인공절리 시

험편을 일축압축시험을 통해 저강도와 고강도로 나누어 제작하였다. 시멘트 모르타르는 1종 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며, 저강도의 시험편은 시멘트와 물의 중량혼합비를 1 : 0.4, 습윤양생을 3일로 하였다. 고강도의 시험편은 시멘트와 물, 급결제의 중량혼합비를 1 : 0.35 : 0.1, 습윤양생을 7일로 하여 기초물성을 측정하였으며 결과는 Table 1과 같다.

전단시험편은 Fig. 1과 같이 상부·하부로 나누어져 있고 각 시험편은 지름이 50 mm, 높이 51 mm, 톱니 높이 2 mm이며 10°, 15°, 20°의 3종류의 톱니각을 가진다. 제작된 시험편은 Fig. 2와 같다.

2.2 직접전단시험 결과

각각의 강도에 따라 같은 배합비로 제작된 시험편에 대해 초기 수직응력을 1.273 MPa, 2.546 MPa, 3.820 MPa, 5.093 MPa로 변화를 주면서 전단강도를 측정하였다. 전단변위가 발생하는 속도는 0.2 mm/min이며 최대전단변위가 12 mm가 되었을 때 시험을 정지하였다.

본 연구에서 저강도와 고강도 시험편을 각 48개, 36개를 사용하여 직접전단시험을 수행하였으며 결과를 Table 2에 나타내었다. 그리고 톱니각의 변화에 따른

Fig. 3. Shear displacement verse shear stress curve for low strength sample of sawtooth angle

직접전단시험에서 얻어진 대표적인 전단응력-전단변위 곡선을 시험편의 강도에 따라 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다.

저강도와 고강도 시험편 모두 수직응력이 1.273 MPa 일 경우, 톱니의 파괴보다는 톱니면을 따라 미끄러지는 현상에 의해 최대전단강도가 발생하는 전단변위가 크게 나타났다. Fig. 5에 시험편이 강도 및 수직응력, 톱니 각이 증가함에 따라 전단강도도 증가하는 경향을 도시하였다.

Fig. 4. Shear displacement verse shear stress curve for high strength sample of sawtooth angle

기존의 대표적인 전단강도식은 Barton의 전단강도식과 Patton의 이중선형강도식이 있다. Patton (1966)은 규칙적인 톱니 모양의 거칠기를 갖는 시험편에 대해 전단시험을 수행하여 식 (1), 식 (2)와 같은 이중선형 (bilinear) 관계식을 제시하였다.

$$\tau_p = \sigma \tan(\phi_b + i) \quad \sigma < \sigma_T \quad (1)$$

$$\tau_p = c_J + \sigma \tan \phi_r \quad \sigma \geq \sigma_T \quad (2)$$

Fig. 5. Variation of Average peak shear stress with normal stress for high and low strength samples

Table 2. Result of direct shear test

$i(^{\circ})$	Normal stress (MPa)	Average peak shear stress(MPa)	
		Low strength sample	High strength sample
10	1.273	3.027	3.270
	2.546	3.524	3.748
	3.820	3.984	4.497
	5.093	4.223	4.977
15	1.273	3.147	4.032
	2.546	3.951	4.510
	3.820	4.164	5.273
	5.093	4.515	5.690
20	1.273	3.494	4.886
	2.546	4.378	5.337
	3.820	4.834	5.815
	5.093	5.088	6.185

Table 3. Comparison of shear strength between Patton's model and Laboratory results

$i(^{\circ})$	Normal stress (MPa)	Low strength sample		High strength sample	
		Peak shear stress of lab test (MPa)	Peak shear stress of Patton's model (MPa)	Peak shear stress of lab test (MPa)	Peak shear stress of Patton's model (MPa)
10	1.273	3.027	3.081	3.270	3.403
	2.546	3.524	3.485	3.748	4.150
	3.820	3.984	3.889	4.497	4.898
	5.093	4.223	4.293	4.977	5.645
15	1.273	3.147	3.295	4.032	4.172
	2.546	3.951	3.726	4.510	4.903
	3.820	4.164	4.158	5.273	5.634
	5.093	4.515	4.588	5.690	6.365
20	1.273	3.494	3.663	4.886	5.019
	2.546	4.378	4.368	5.337	5.576
	3.820	4.834	4.893	5.815	6.133
	5.093	5.088	5.418	6.185	6.690

여기서 전이응력 $\sigma_T = c_f / (\tan(\phi_b + i) - \tan\phi_r)$ 이고, ϕ_b 는 절리면의 기본마찰각, i 는 톱니면의 경사각이다. 본 연구에서 사용된 시험편은 규칙적인 톱니 i 를 가진 시험편이며, 저강도와 고강도 시험편이 각각 다른 마찰각과 점착력을 가지고 있기 때문에, Patton의 식과 직접

전단시험 결과를 비교하여 직접전단시험의 신뢰성을 확인하는 방법을 사용했다. Patton의 식을 이용하여 계산한 전단강도와 실제 실험을 통해 얻은 전단강도를 비교한 결과는 Table 3과 같다. 저강도 시험편을 사용했을 때, 직접전단시험과 Patton의 이중선형강도식의 최

Fig. 6. The Mohr-Coulomb failure criterion

Fig. 7. Shear box and sawtooth sample modeling

Table 4. Input parameters from laboratory tests

Property \ Type	Low strength sample	High strength sample
ρ (block mass density)	1955 kg/m ³	2021 kg/m ³
K (bulk modulus of block)	22.43 GPa	31.03 GPa
G (shear modulus of block)	13.46 GPa	20.43 GPa
K_n (joint normal stiffness)	33.64 GPa	50.28 GPa

Table 5. Shear strength of Mohr-Coulomb model from direct shear test

$i(^{\circ})$	Normal stress (MPa)	Cohesion (MPa)		Friction angle ($^{\circ}$)		Joint shear stiffness (K_s , GPa/mm)	
		Low strength sample	High strength sample	Low strength sample	High strength sample	Low strength sample	High strength sample
10	1.273	2.677	2.656	17.6	30.4	7.628	9.342
	2.546					15.592	17.036
	3.820					21.490	21.414
	5.093					24.817	25.625
15	1.273	2.865	3.442	18.7	29.8	14.255	16.128
	2.546					23.696	23.736
	3.820					26.048	27.753
	5.093					33.386	37.933
20	1.273	3.139	4.463	22.4	23.6	19.055	19.844
	2.546					26.650	28.089
	3.820					33.807	36.343
	5.093					35.177	38.656

대전단강도의 오차 범위는 0.006 MPa~0.225 MPa이며, 고강도의 시험편의 오차범위는 0.133 MPa~0.688 MPa이다.

3. 수치해석 모델링

3.1 수치해석 프로그램 및 지배방정식

본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램인 3DEC(3 Dimensional Distinct Element Code)은 불연속체 모델링을 위한 개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램으로 static 혹은 dynamic 하중에 놓여있는 절리 압반과 같은 불연속 매질의 반응에 따른 시뮬레이션이 가능하다. 각 요소들은 미리 결정된 선형 혹은 비선형의 응력-변형률 관계 법칙에 의하여 반응하게 되며, 불연속면들의 상대적 운동은 수직과 전단 방향의 운동에 대한 선형 혹은 비선형 한변위법칙에 의해 지배되며 “Lagrangian” 계산법에 기초한다(Itasca consulting, 2007).

개별요소 수치해석을 수행하기 위해서는 무결합의 압반 및 암석 블록의 응력-변형에 따른 거동을 결정하는 블록의 방정식과 블록간의 경계요소로 작용하는 절리의 거동을 결정하는 절리의 지배방정식이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서 해석 시 사용된 Mohr-Coulomb 모델은 압축응력 상태의 가장 일반적인 파괴형태인 전단파괴 조건식으로 이를 블록과 절리의 지배방정식으로 사용하였다. Fig. 6는 Mohr-Coulomb 모델의 파괴기준이다(Goodman, 1976).

3.2 모델링 개요

개별요소법에 기초한 3차원 수치해석 프로그램 3DEC을 이용하여 일정수직하중 조건의 직접전단시험을 모델링하였다. 실험실 직접전단시험과 동일한 조건에서 실시하기 위해 Fig. 7과 같이 상부 전단상자와 하부 전단상자를 모델링하고 전단 시험편을 설계하였다.

상부 및 하부 전단상자는 rigid body로 모델링하여 변형이 발생하지 않으며, 하부 전단상자는 구속되어 있고 상부 전단상자가 전단응력을 받아 이동하면서 전단력을 시험편에 가하도록 모델링하였다. 전단시험편은 실내 전단시험과 동일한 톱니형상과 시료의 크기로 모델링 하였으며, deformable body로 제작하여 전단력이 가했을 때 톱니의 변형과 파괴가 가능하도록 모델링하였다.

3.3 수치해석의 물성

본 연구의 수치해석 모델링에 사용된 물성값은 실험실 기초물성 측정 및 일축압축강도, 압열인장강도 등을

이용하여 구하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 그리고 Table 5는 절리의 전단강성, 점착력, 마찰각을 수직응력과 톱니각에 따른 실험실 직접전단시험 결과를 Mohr-Coulomb 모델로 산정한 값이다.

Fig. 8. Shear displacement verse shear stress curve for low strength sample of numerical analysis results

3.4 해석 결과

수치해석을 이용하여 강도와 수직응력, 톱니각에 따른 직접전단시험 모델링 결과를 정리하면 다음과 같다. Fig. 8와 Fig. 9은 각각 저강도와 고강도 시험편의 물성을 수치해석으로 모델링을 수행하였을 때, 4단계의 수

직응력에서 톱니각에 따른 전단응력-전단강도 곡선을 나타낸 것이다.

저강도와 고강도 시험편의 물성으로 수치해석을 수행했을 때, 각각의 톱니각과 수직응력이 높아질수록 최대 전단강도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 직접전단시험 결과와 동일하였다.

그리고 저강도 시험편에서 직접전단시험과 수치해석 모델링을 통한 전단시험 결과 값의 오차 범위는 0.047 MPa~0.48 MPa, 오차율은 4% 이내로 나타났다. 고강도 시험편의 최대전단강도의 오차 범위는 0.017 MPa~0.222 MPa, 오차율은 0.3%~4.46%로, 수치해석모델링과 직접전단시험의 결과 값이 비교적 일치한다고 사료된다.

그러나 저강도 시험편은 톱니각이 높아질수록 잔류전단강도가 불규칙하게 나타나는 모습을 보인다. 이는 Fig. 10과 같이 낮은 강도물성으로 시험편이 파괴되었고, 톱니각이 높아지면서 같은 절리단면에 상대적으로 많이 포함된 톱니 수로 인해 발생한 파괴 블록들이 잔류전단강도의 교란을 일으켰기 때문이라고 추측된다. 고강도 시험편은 상대적으로 높은 강도물성을 가지고 있는 시험이기 때문에, 돌기의 파괴보다는 절리면의 기본마찰력과 톱니 형상면을 따른 기하구조적인 변위가 일어났으며 잔류전단강도가 일정하게 발현되지 않았다.

따라서 낮은 강도의 시험편에서는 최대전단강도에 도

Fig. 9. Shear displacement verse shear stress curve for high strength sample of of numerical analysis results

Fig. 10. After numerical shear test

Fig. 11. Shear stress between numerical modelling and shear direct test results for low strength sample

달한 후에 시험편 톱니의 압축강도와 톱니면의 파괴면 적의 대소에 따라 잔류전단강도에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 저강도와 고강도의 시험편으로 수행한 직접전단시험과 수치해석 모델링의 최대전단강도 값을 비교하였다. 그 결과, 최대전단강도 값이 비교적 잘 일치한 결과를 보임에 따라 규칙적인 톱니 절리면에 대해서 3DEC을 이용한 수치해석 모델을 활용하는 것은 적합한 방법이라고 사료된다. 그러나 암석 절리면은 톱니형의 거칠기를 갖지 않으므로 실제 암석 절리면의 거칠기에 대한 전단거동의 적용 방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 12. Shear stress between numerical modelling and shear direct test results for high strength sample

4. 결 론

본 연구에서는 실내 직접전단시험을 실시하여 역학적 전단거동을 파악하고 이를 3차원 개별요소법에 근거한 3DEC을 사용하여 수치해석적으로 직접전단시험을 수행한 결과와 비교·검토하였고 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

1. 직접전단시험 결과와 Patton의 이중선형강도식을 이용한 결과는 최대전단강도 차이가 0.03 MPa~0.688 MPa로 나타났다.
2. 저강도 시험편에서 수치해석 모델링 결과와 직접전단시험 결과의 오차율은 4%이내의 결과를 보였으며, 잔류전단강도는 톱니의 파괴에 의해 불규칙한

모습을 보이는 것으로 나타났다.

3. 고강도 시험편에서는 수치해석 모델링 결과와 직접 전단시험 결과의 오차율이 0.3%~4.46% 이내로 최대전단강도가 상당히 일치하는 경향을 보였다. 그리고 높은 강도로 인해 톱니의 블록이 파괴되지 않고 잔류전단강도가 일정하게 나타났다.
4. 3차원 수치해석 프로그램인 3DEC은 효과적으로 톱니 절리면의 거칠기를 기하학적으로 모사할 수 있으나, 실제 암석 절리면의 거칠기에 대한 전단거동의 적용 방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

References

1. You, K. H., Park, Y. J., 1999, Direct shear test modelling for rock joints using numerical analysis, Theses collection of SuWon Univ, Vol. 17, pp. 273-283.
2. Patton F. D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Congr. ISRM, Lisbon, Vol. 1, pp. 509-513.
3. Barton, N. R. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54.
4. Kim, Y. G. and Lee, H. K., 1993, Deformation Characteristics of Artificially Fractured Joints of Granite under Normal and Shear Loading, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 3, No. 2, pp. 142-151.
5. Kim, D. Y., 2001, Roughness effects on the shear behavior of rock joints, A doctoral dissertation, HanYang Univ.
6. Lee, M. H., Kim, J. W. and Chang, K. T., 2007, The roughness and normal stress on shear behavior, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 186-196.
7. Johnston, I.W., T.S.K. Lam, and A.F. Williams, 1987, Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock, Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp 83-89
8. Itasca Consulting Group, INC., 2007. 3DEC-Theory and Background. Version 4.1, Minneapolis:ICG.
9. Goodman, R.E., 1976, Methods of geological engineering in discontinuous rocks. West Publishing Company.

노 영 목

2012년 2월 한국해양대학교 에너지 자원공학과 공학사

Tel: 051-410-4886
E-mail: ymnoh@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

김 기 호

2013년 2월 한국해양대학교 에너지 자원공학과 공학사

Tel: 051-410-4886
E-mail: khkim@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

문 흥 주

2013년 2월 한국해양대학교 에너지 자원공학과 공학사

Tel: 051-410-4843
E-mail: hj_0210@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

장 원 일

1977년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1980년 서울대학교대학원 자원공학과 공학석사
2008년 전남대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 051-410-4438
E-mail: jwy@kmou.ac.kr
현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수