

TECHNICAL NOTES

암석코어시편의 절리면 직접전단시험을 위한 겉보기 면적 계산방법

강 훈¹, 박정욱², 박 찬³, 오태민⁴, 조정우^{5*}

¹한국표준과학연구원 기술원, ²한국지질자원연구원 선임연구원, ³한국지질자원연구원 책임연구원, ⁴부산대학교 조교수, ⁵한국생산기술연구원 수석연구원

Calculation Method for Nominal Area of Rock Core Specimen During Direct Shear Test

Hoon Kang¹, Jung-Wook Park², Chan Park³, Tae-Min Oh⁴, and Jung-Woo Cho^{5*}

¹Engineer, Korea Research Institute of Standards and Science

²Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁴Assistant Professor, Pusan National University

⁵Principal researcher, Korea Institute of Industrial Technology

*Corresponding author: chojw1665@kitech.re.kr

Received: December 8, 2020

Revised: December 21, 2020

Accepted: December 21, 2020

ABSTRACT

This note presents the calculation of nominal area for rock core specimen under direct shear testing condition. The initial nominal area was assumed as ellipsoid, and the equations for calculating the nominal area are derived. The normalized shear displacement and normalized nominal area have an identical relationship regardless of the ellipsoid shape. New testing constants and the generalized method were suggested to calculate the decrease of the nominal area. The method was applied to calculate the direct shear testing data and the changes of result were discussed.

Keywords: Rock core specimen, joint, direct shear test, nominal area, nominal stress

초록

기존 시험법은 암석시편의 절리면 직접전단시험시 겉보기 면적의 변화를 고려해야 한다고 명시하고 있다. 본 기술보고는 암석코어 시편의 절리면 직접전단시험시 겉보기 면적 계산방법을 제시하였다. 암석코어 시편의 초기 절리면을 타원으로 가정하고, 타원의 중첩면적 감소를 계산하는 수식을 정리하였다. 전단변위와 겉보기 면적을 정규화하면 타원형상에 관계없이 일정한 변화 비율을 가지는 것을 확인하였다. 암석코어 시편 전단시험을 위한 정규화 실험상수를 제안하여 일반화된 계산방법을 제안하였다. 그 방법을 실제 전단시험의 데이터에 적용하여 결과 변화값을 확인하고, 정확도에 대해 간략히 토의하였다.

핵심어: 암석코어 시편, 절리면, 직접전단시험, 겉보기 면적, 겉보기 응력

1. 서론

암석 불연속면의 전단거동을 분석하기 위한 절리면 직접전단시험은 국제암반공학회에서 시험법이 제안된 바 있다(Muralha et



al., 2014). 국내에서도 이를 참고하여 표준시험법으로 공표되어 이에 따라 시험이 수행되고 있다(한국암반공학회, 2009). 이들 시험법은 시험편의 겉보기 면적(nominal area)의 변화를 고려해야 한다고 명시하고 있는데, 기존 방법에서는 박스형태의 사각단면의 예시만 기술하고 있다(Barton and Choubey, 1977). 박스형태의 전단시료의 겉보기 면적 변화는 전단변위로부터 간단히 계산할 수 있다. 하지만 암석코어 시편의 겉보기 면적변화 계산방법은 표준화된 방법이 아직 제안된 바 없다. 대부분의 절리면 직접전단시험이 암석코어 시편에 대해 수행되는 점을 감안하면, 코어시편의 겉보기 면적변화 계산방법을 제안하고 공표하는 절차가 필요하다.

암석코어 시편에 대해 직접전단시험을 수행하게 되면, 초기 접촉면은 원형, 타원형, 직사각형으로 형성된다. 코어의 중심축과 절리면이 이루는 각도가 직각이면 원형, 예각이면 타원형, 평행이면 직사각형이 된다. 절리면이 대부분 코어 시추방향에 대해 경사를 가지고 있고, 원형은 타원에 포함되기 때문에 중첩면적을 타원형으로 가정할 수 있다. 본 기술보고에서는 코어시편의 접촉면인 타원의 겉보기 면적변화를 계산하는 방법을 제시하고, 그에 따른 면적변화의 정규화 과정과 실제 직접 전단시험적용 사례를 소개한다.

2. 암석코어 시편 겉보기면적 계산방법

2.1 초기 접촉면, 중첩면 정의

암석코어 시편의 수평단면과 절리면의 경사각을 α 로 정의하면 절리면의 접촉면적을 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 조건에서 접촉면은 항상 타원으로 형성된다. 여기서, R 은 암석코어 시편의 반경, a 는 전단면 장축 반경, b 는 단축 반경이고, $a = R / \cos(\alpha)$, $b = R$ 의 관계를 가진다. 그러므로 초기 접촉면의 면적(initial contact area)은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

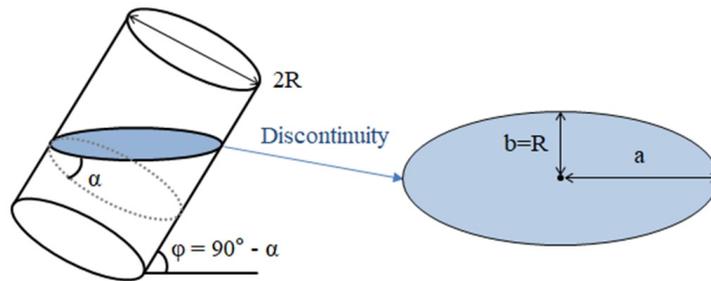


Fig. 1. Definition of the initial contact area of a core sample

$$A_i = ab\pi = \frac{\pi R^2}{\cos\alpha} \tag{1}$$

원주형 시편의 불연속면은 초기에 타원형 혹은 원형의 중첩면적을 가지다가(completely overlapped), 전단변위(δ_s)가 증가하면 부분 중첩 상태가 되어(partially overlapped) 겉보기면적이 지속적으로 감소한다(Fig. 2). 전단변위에 따른 겉보기 면적변화를 정확히 계산해야 전단면에 작용하는 정확한 전단응력과 수직응력을 도출할 수 있다.

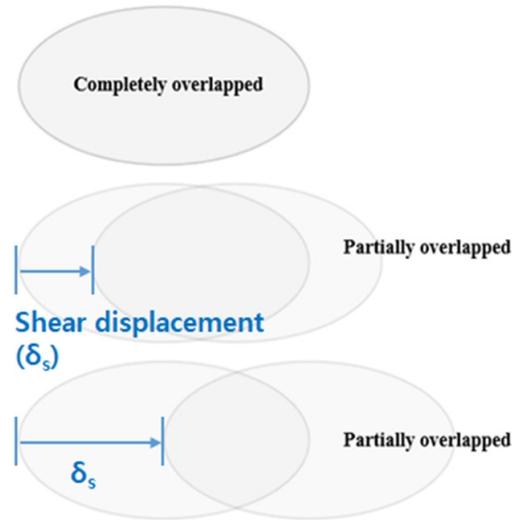


Fig. 2. Decrease of the nominal area resulting from increasing the shear displacement

2.2 부분 중첩면적 계산방법

전단시험이 개시되어 부분중첩이 된 상황에서 전단면의 면적 계산방법은 Fig. 3과 같다. 여기서 중첩된 영역의 전단방향(장축) 길이를 t 라고 하면, Fig. 4와 같이 중첩면적을 표시할 수 있다. 이때, 타원의 장축길이($2a$)와 t 는 전단변위(δ_s)와 식 (2)의 관계를 가진다. 전체 중첩면적(A_0)은 4개의 대칭면적(A_s)으로 구성된다(식 (3)). 즉, 중첩면적은 대칭면적의 4배가 된다. 대칭면적(A_s)은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 타원의 곡선 일부 구간을 적분하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$2a = \delta_s + 2t, \quad t = \frac{2a - \delta_s}{2} \quad (2)$$

$$A_0 = 4A_s \quad (3)$$

$$A_s = \int_{\frac{\delta_s}{2}}^a b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx \quad (4)$$

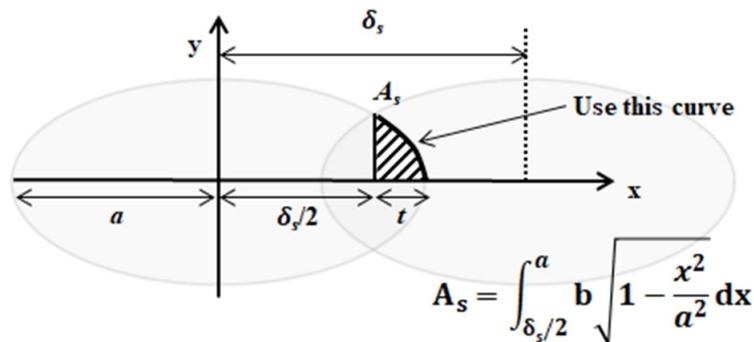


Fig. 3. Curve used in the calculation of nominal area

적분의 편의를 위하여 미소영역에서 $x = asin(\theta)$ ($0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$)로 치환될 수 있다. 여기서, $dx = acos(\theta) d\theta$ 로 대입하고 $x = asin(\theta) = \frac{\delta_s}{2}$ ($0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$)로부터 적분이 시작되는 각도를 $\sin^{-1}(\frac{\delta_s}{2a})$ 로 정의할 수 있다. 그러면 대칭면적(A_s)은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$A_s = \int_{\sin^{-1}(\frac{\delta_s}{2a})}^{\frac{\pi}{2}} b\sqrt{1 - \sin^2(\theta)} \cdot a \cdot \cos(\theta) d\theta = ab \int_{\sin^{-1}(\frac{\delta_s}{2a})}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2(\theta) d\theta \tag{5}$$

중첩면적은 대칭면적의 4배이므로, 식 (5)에 4를 곱해 일반식으로 중첩면적(A_o)을 표현하면 최종 계산식으로 식 (6)을 획득할 수 있다. 여기서, 실험변수는 장축의 길이($2a$), 단축의 길이($2b$), 그리고 전단변위(δ_s) 3개이고, 장축과 단축의 길이는 상수이다. 따라서, 식 (6)을 사용하면, 직접전단시험시 전단변위(δ_s) 증가에 따른 겉보기 면적(A_o)의 감소량을 실시간으로 연산하여 응력계산에 반영할 수 있다.

$$A_o = 4A_s = 4ab \int_{\sin^{-1}(\frac{\delta_s}{2a})}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2(\theta) d\theta = -\frac{b \left(4 \cdot \sin^{-1}(\frac{\delta_s}{2a})a^2 - 2\pi a^2 + \sqrt{4a^2 - \delta_s^2} \delta_s \right)}{2a} \tag{6}$$

3. 정규화 계산법

위의 식 (6)은 다소 복잡해서 매번 실시간으로 계산하기에 번거로움이 있다. 따라서 정규화된 방법을 제안하여 계산과정을 보다 단순화하고자 한다. 이를 위하여, 전단변위를 전단변위와 장축길이의 비율(n_s : normalized shear displacement)로 정규화하고(식 (7)), 겉보기면적을 초기 타원면적으로 나눈 면적비율(n_A : normalized nominal area)로 정규화하였다(식 (8)). 코어시편 겉보기 면적 형상이 정규화된 변수에 미치는 영향을 파악하기 위해, 코어시편 장축과 단축의 비(a/b ratio)에 따른 정규화된 변수 간의 관계를 조사하였다(Fig. 4). 그 결과 코어시편 장축(a), 단축(b) 길이 비에 관계없이 정규화된 변수 간에 일정한 관계가 도출되었다. 따라서, 장축과 단축비율(a/b ratio)은 상수로 가정할 수 있으므로, 전단변위와 장축길이의 비율(n_s)이 유일한 실험변수가 된다. 수식적으로도 초기 타원형상에 관계 없이 겉보기면적 변화비(n_A)는 전단변위 비율(n_s)과 일정한 관계를 가진다. 식 (1)과 식 (6)을 이용하여 계산하면 겉보기면적 변화비는 식 (9)와 같다.

$$n_s = \frac{\delta_s}{2a} \tag{7}$$

$$n_A = \frac{A_0}{A_i} \tag{8}$$

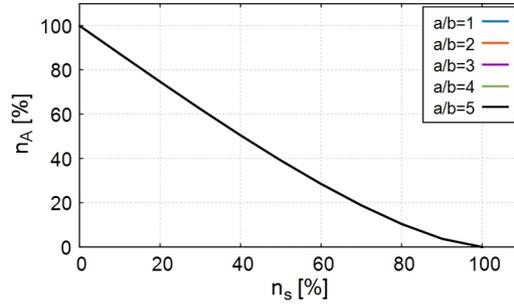


Fig. 4. Change of the normalized nominal area according the normalized shear displacement

$$n_A = \frac{A_0}{A_i} = \left[\frac{4}{\pi} \left(-\frac{n_s \sqrt{-n_s^2 + 1}}{2} - \frac{\sin^{-1}(n_s)}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (9)$$

(where, $0 \leq n_s \leq 1$ and, $n_s = \delta_s/2a$)

최종적으로, 전단시험 시 겉보기면적이 고려된 겉보기 응력(nominal stress)은 식 (10)과 같이 계산된다. 여기서, N 은 수직하중, S 는 전단하중이다.

$$\sigma_N = \frac{N}{A_o} = \frac{N}{n_A A_i}, \quad \sigma_S = \frac{S}{A_o} = \frac{S}{n_A A_i} \quad (10)$$

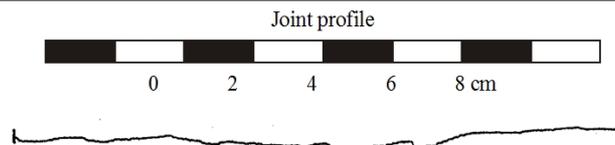
국제암반공학회는 시편 전단방향 길이의 5-10% 이내로 시험을 진행하라고 명시하고 있다(Muralha et al., 2014). 전단변위가 10%일 때 겉보기면적이 약 13% 감소하므로, 초기 면적을 그대로 사용하여 응력을 계산하면 13%만큼 응력이 감소하게 된다. 그러므로 오차를 줄려면 겉보기 응력을 사용하여 재계산하는 과정이 필요하다.

4. 절리면 직접전단시험 적용사례

절리면 직접전단시험 수행사례에 제한한 계산방법을 적용하였다. 이때, 겉보기 면적이 고려될 때의 응력변화량을 조사하고, 점착력과 마찰각에 미치는 영향을 간략히 살펴보았다. 대상 암석코어 시편의 세부정보는 Fig. 5, Table 1과 같다.

Table 1. Information of the rock core used in direct shear test

Joint No.	Area (A_i , cm ²)	Length of major axis (2a) [mm]	Length of minor axis (2b) [mm]	JRC value	JCS [MPa]
11	36.2	87	53	8~10	32



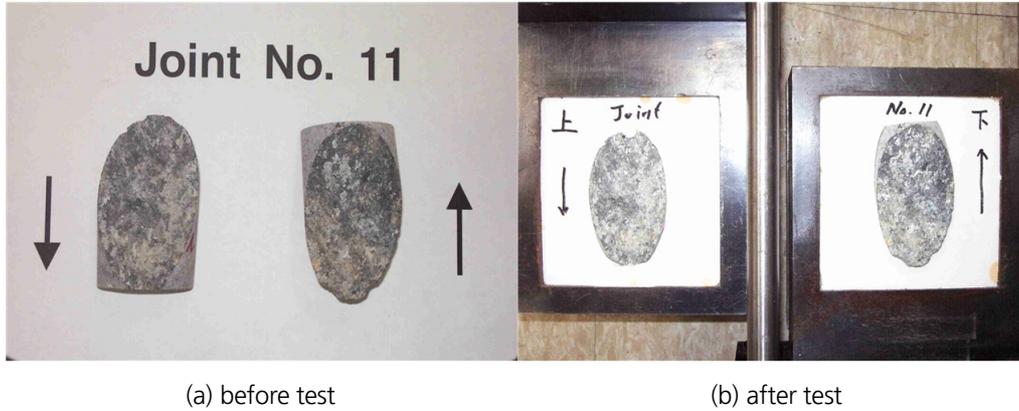


Fig. 5. Joints of rock core specimen for direct shear test

4.1 전단변위-전단응력

Fig. 6은 절리면 직접전단시험에서의 전단변위에 따른 전단응력 결과 그래프이다. 오른쪽의 y축은 전단변위에 따른 겉보기면적의 비율(n_A)을 보여주고 있다. 겉보기면적이 감소함에 따라 면적변화를 고려하지 않는 기존응력 값(σ_{s-o})과 겉보기응력 값(σ_{s-n})의 차이가 발생함을 알 수 있다. 전단변위비율(n_A)이 3.1%까지 진행되었을 때, 면적변화는 4.0%까지 진행되었다. 따라서 다단 전단시험(multi-stage shear test)시 면적변화를 고려해야 정확한 응력 값을 도출할 수 있음을 확인하였다.

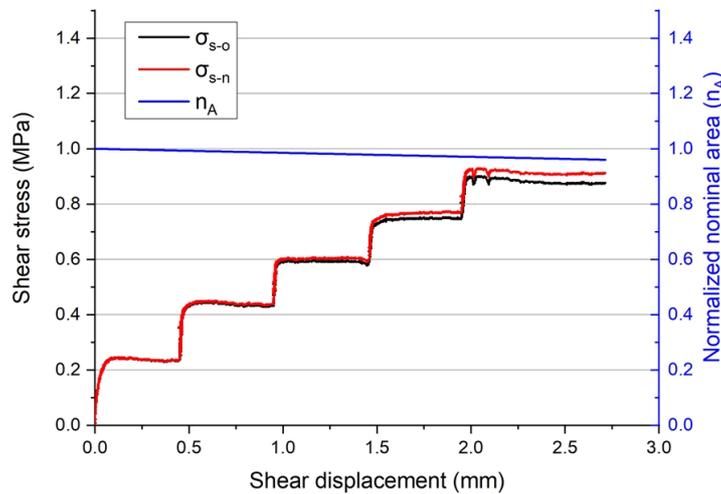


Fig. 6. Shear stress and nominal area ratio according to the shear displacement

4.2 수직응력-전단응력

Fig. 7, 8은 각각 수직응력대비 최대전단응력과 잔류전단응력 포락선을 보여주고 있다. 수직응력이 증가함에 따라 기존응력과 겉보기 응력차이가 커짐을 알 수 있다. 다단 전단시험의 경우, 전단변위가 많이 발생한 시점에서 높은 수직응력이 가해진다. 이 때문에 높은 수직응력에서 전단응력을 과소평가할 수 있다. Mohr-Coulomb 모델의 주요 상수를 구하기 위해 Fig. 7, 8을 선형회귀하였

고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 높은 수직응력에서 2%정도 전단응력이 증가한 결과, 마찰각은 일정하게 0.3-0.8% 정도씩 증가하였고, 점착력은 0.3-0.7% 정도 증가한 결과가 나타났다. 따라서 제안시험법과 마찬가지로 타원의 겉보기 면적을 고려해야 보다 정확한 시험결과를 획득할 수 있음을 재확인하였다.

Table 2. Results of the direct shear test applying the nominal area

Parameters	Peak shear stress	Nominal peak shear stress	Relative difference	Residual shear stress	Nominal residual shear stress	Relative difference
	σ_{sp-o}	σ_{sp-n}		σ_{sr-o}	σ_{sr-n}	
unit	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%
c	0.085	0.085	0.3	0.067	0.058	0.8
Φ	31.6	31.7	0.3	31.4	31.7	0.7

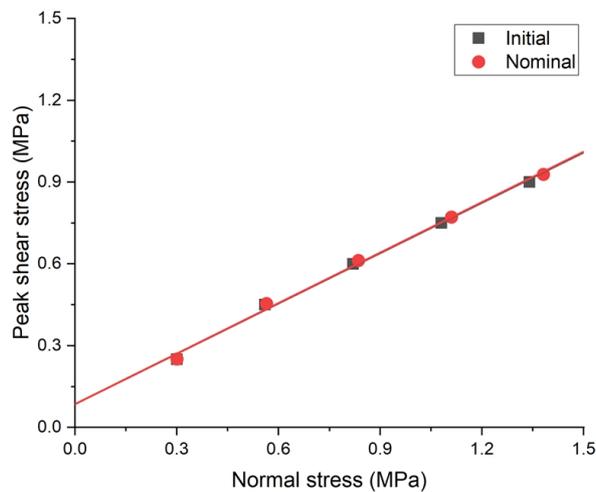


Fig. 7. Peak shear stress v.s. normal stress

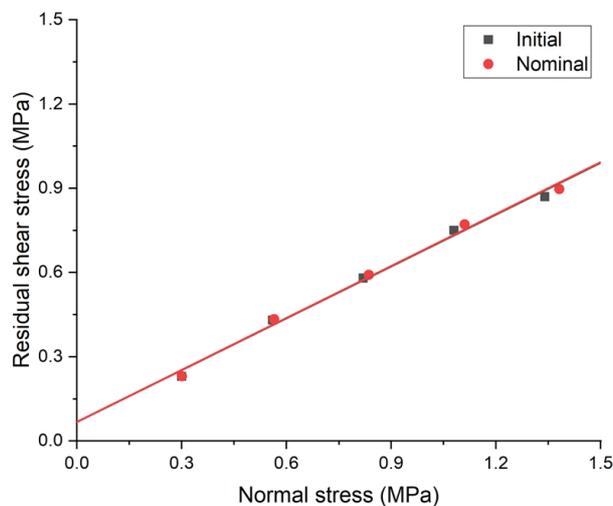


Fig. 8. Residual shear stress v.s. normal stress

5. 결론

본 기술보고는 국제암반공학회의 제안시험의 권고사항에 따라 암석코어 시편의 절리면 직접전단시험 시 겹보기 면적을 계산하는 방법을 제안하였다. 암석코어 시편 절리면 시편의 겹보기 면적을 계산하는 방법과 그 적용사례를 설명하였다. 그 결론을 아래와 같이 요약하였다.

- 1) 암석코어 시편의 초기접촉면을 타원으로 정의하였으며, 전단변위에 따라 감소하는 중첩면적의 계산방법을 제시하였다.
- 2) 전단변위와 겹보기면적을 초기값과의 비율로 정규화하여 새로운 변수를 정의하였다. 이때 타원의 형상에 관계없이 전단변위 비율에 따라 감소하는 겹보기면적의 비가 일정함을 발견하였다.
- 3) 암석코어 시편의 전단시험시 겹보기면적 변화와 실시간 겹보기 응력을 계산할 수 있는 계산식을 제안하였다. 이를 실제 전단 시험 수행사례에 적용하여 차이를 정리하였다. 그 결과, 겹보기 중첩면적을 고려하면 보다 정확한 데이터를 획득할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 기술보고는 한국암반공학회 시험분과위원회에서 토의된 결과물입니다. 한국생산기술연구원의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barton, N.R. and V. Choubey, 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10(1-2).
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B. et al., 2014, ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. *Rock Mech. Rock Eng.* 47, 291-302.
- 한국암반공학회, 2009. 암석의 직접전단강도 결정을 위한 실내 표준시험법. *터널과 지하공간*, 19(4), 269-272.