삼각형 돌출부의 크기 및 경사각이 전단파괴 형상 특성에 미치는 영향

김원근¹ · 최우용² · 박종덕² · 이석원^{3*}

¹비회원, 한국수자원공사

²학생회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

³정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

Effect of size and slope angle of tooth-shaped asperity on shear fracturing characteristics

Won-Keun Kim¹, Woo-Yong Choi², Jong-Deok Park², Seok-Won Lee^{3*}

¹Korea Water Resources Corporation

²Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master Student

³Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Professor

ABSTRACT: Most of previous studies have insufficiently investigated the shear behavior and fracturing characteristics, experimentally in respect to the change of size of tooth-shaped surface asperity such as length and slope angle in a broad range. This study investigates the influence of the length and slope angle of a tooth-shaped surface asperity on the fracturing characteristics and the interface shear strength by using direct shear test apparatus. A total of 36 interface direct shear tests were conducted by changing the three types of slope angle of surface asperity, four type of length, and three types of normal stress. The shape of fractured surface after the test was quantified by using a three-dimensional surface roughness measurement apparatus. Through the experimental test results, the characteristics of fractured shape of surface asperity according to the normal stress were investigated. In addition, fractured length and height were quantified at each slope angle of surface asperity under a certain normal stress condition.

Keywords: Tooth-shaped asperity, Shear behavior, Size effect, Fractured shape, Surface asperity

초 록: 기존의 연구에서 삼각형 돌출부의 크기 즉 돌출부 길이 및 돌출부 경사각 변화에 따른 전단거동 및 파괴 형상 특성에 대한 광범위한 실험적 연구는 부족하였다. 본 연구에서는 직접전단시험기를 사용하여 삼각형 돌출부의 전단거동에 있어서 돌출부의 길이 및 경사각 특성이 표면 돌출부의 파괴 형상 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 위하여 돌출부 길이는 4가지로 변환하였고, 수직응력은 3가지로, 그리고 돌출부 경사각은 3개의 각도로 변환하면서 총 36회의 시험을 수행하였다. 시험을 수행한 시편은 3차원 형상측정기를 사용하여 파괴 형상 특성을 정량적으로 분석하였다. 이러한 시험을 통하여, 수직응력 변화에 따른 돌출부의 파괴 형상 특성을 조사하였다. 또한 각각의 경사각에서 돌출부의 길이를 변화시켜 시험을 수행함으로써, 특정 수직응력 하에서 돌출부가 파괴되는 길이 및 높이를 정의하였다.

주요어: 삼각형 돌출부, 전단거동, 크기효과, 파괴형상, 표면 돌출부

1. 서 론

Patton (1966)은 돌출부 거칠기를 정형화하여 수직 응력과 최대 전단강도의 상관관계를 이중선형 모델로 제시하였다. 규칙적인 톱니 형태의 돌출부로 실험을 실시한 Patton (1966)은 기본 마찰각과 돌출부의 각도

*Corresponding author: Seok-Won Lee
E-mail: swlee@konkuk.ac.kr

Received July 4, 2013; Revised July 17, 2013;
Accepted July 26, 2013

를 전단모델에 반영하였다. 이를 확대하여 절리면 전단거동 관점에서 보면, Patton (1966)의 이중선형 모델은 비선형적인 실제 암석 절리면에서의 전단파괴 포락선의 형태와는 차이가 있다. 그리하여 Ladanyi and Archambault (1970), Barton (1973), Goodman (1976), Bandis et al. (1983), Qiu et al. (1993), Hong (2005), Lee et al. (2006) 등이 파괴 포락선의 비선형적 특성을 고려한 경험적 전단모델을 제시하였다. 최근에는 Yang and Chiang (2000)이 Patton (1966)과 유사하게 삼각형 돌기모델을 사용하여 실험적으로 암반 절리면에서의 점진적인 전단거동을 표면 형상의 손상 특성을 사용하여 연구하였다. 삼각형 돌출부를 이용한 수치해석적 연구에 대해서는, Kim et al. (2012a)는 입자와 비파쇄 삼각형 돌출부에서의 전단거동에 대하여 연구하였고, Kim et al. (2012b)는 삼각형 돌출부의 파쇄가 전단거동에 미치는 영향에 대하여 수치해석적으로 연구하였다.

이러한 기존 연구들을 조사하여 보면, 대부분의 연구에서 돌출부의 크기 즉 돌출부 길이(λ) 및 돌출부 경사각(i°) 변화에 따른 전단거동 및 파괴 형상 특성에 대한 연구가 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 직접 전단시험기를 사용하여 돌출부 전단면의 전단거동에 있어서 돌출부의 길이 및 경사각 특성이 표면 돌출부의 파괴 형상 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 위하여 돌출부 길이(λ)는 4가지로 변환하였고, 수직응력(σ_n)은 3가지로, 그리고 돌출부 경사각(i)은 3개의 각도로 변환하면서 총 36회의 시험을 수행하였다. 시험을 수행한 시편은 3차원 형상측정기를 사용하여 파괴 형상 특성을 정량적으로 분석하였다. 이러한 시험을 통하여, 수직응력 변화에 따른 돌출부의 파괴 형상 특성을 조사하고자 한다. 또한 각각의 경사각에서 돌출부 길이를 변화시켜 시험을 수행함으로써, 특정 수직응력 하에서 돌출부가 파괴되는 길이 및 높이를 정의하고자 한다.

2. 시험 장비 및 방법

본 연구에서는 돌출부의 크기 및 경사각이 돌출부 파괴 형상 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해서, 다양한 크기 및 경사각의 돌출부를 지닌 시편을 우선적으로 직접전단시험기를 사용하여 돌출부 전단시험을 수행하고, 이렇게 수행된 시편을 3차원 형상측정기로 파괴된 형상을 관찰하여 분석하였다.

2.1 직접전단시험기 및 시편 제작

본 연구에 사용된 직접전단시험기는 Fig. 1과 같이 전단 상자가 $150 \times 150 \times 200$ mm (가로 $\times$ 세로 $\times$ 높이)로 구성되어 있다. 수평하중은 로드셀 (load cell)로, 그리고 수평변위와 수직변위는 LVDT (linear variable differential transformer)를 이용하여 측정하

Fig. 1. Direct shear test apparatus

Fig. 2. Test specimen

Fig. 3. Definition of λ and i

였다. 전단 변형율은 속도 조절시스템에 의하여 1.0~10 mm/min까지 조절이 가능한데, 본 연구에서 모든 시료에서 3 mm/min으로 수행하였다.

본 연구에서 사용한 삼각형 표면 돌출부 시편은 모래와 석고 그리고 물의 배합비를 2 : 5 : 5로 하였다. 모래는 주문진 여과사(KS L 5100)를, 석고는 도자기 형재용석고(KS L 9001)를, 물은 증류수를 사용하였다. 시편의 크기는 Fig. 2와 같이 가로 150 mm, 세로 150 mm, 높이 200 mm인 직육면체 형태로 직접전단 시험에 사용한 내부 전단 상자의 크기와 동일하게 제작하였다. 시편의 돌출부 부분은 시편의 몰드 가운데에 홈을 내어서 돌출부 길이(λ)와 돌출부 경사각(i°)을 변화시킨 돌출부 판을 탈·부착이 가능하도록 제작하였다. 돌출부 길이(λ) 및 각도(i)의 정의는 Fig. 3과 같다. 사용한 시편의 압축강도를 측정하기 위하여 Φ 100 mm $\times$ 200 mm 크기의 공시체를 제작하여 일축압축시험을 수행하였다. 측정된 시편의 일축압축강도는 5.1 MPa이었다.

본 연구에서 시험에 적용한 변수는 돌출부 각도(i°), 돌출부 길이(λ), 수직응력(σ_n)으로, i 는 10, 20, 30°로 변화시켰고, λ 는 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 cm로 변화시켰으며, 마지막으로 σ_n 은 100, 200, 400 kPa로 적용하였다. 따라서 총 36회의 돌출부 직접전단시험을 수행하였다.

2.2 3차원 표면형상 측정기

삼각형 돌출부가 직접전단시험 전·후에 변화하는 형상을 측정하기 위하여 Fig. 4과 같이 3차원 형상측정기를 사용하였다. 시험기를 사용하여 표면 형상을 측

Fig. 4. Three-dimensional surface roughness measurement apparatus

(a) Before test

(b) After test

Fig. 5. Measurement of fracturing characteristics

정한 예로 Fig. 5(a)는 직접전단시험을 시행하기 전의 시편 형상이고, Fig. 5(b)는 직접전단시험을 마치고 난 후의 파괴된 시편 형상이다.

2.3 시험 순서

직접전단시험을 수행하기 위하여 우선적으로 삼각형 돌출부 시편을 만들었다. 시편의 제작은 미리 결정된 배합비로 배합한 혼합 재료를 몰드에 붓고 24시간 동안 몰드 안에서 건조 시킨 후, 몰드와 시편을 분리시켜 총 15일 동안(목표 강도가 도달할 때까지) 자연건조시켰다. 이때 시편에 공극이 생성되는 것을 최소화하기 위해 고무망치로 계속해서 두드려 주었다. 시편이 굳은 후, 직접전단시험기의 하부판에 삼각형 돌출부 시편의 하부를 고정시킨다(Fig. 6). 그 후 상부판을 하부판 위에 고정시킨 다음, 수직응력을 가한다. 이때 수직응력은 일정하중조건을 적용하였다. 전단 속도 3 mm/min로 전단변위가 40 mm (최대 돌출부 길이 75 mm의 1/2보다 크게 전단변위가 일어나도록 하기 위해)가 될 때까지 전단을 계속시켰다. 40 mm의 전단변위가 일어난 후, 직접전단시험기를 분리하여 파괴된 시료를 3차원 형상측정기를 이용하여 그 형상을 측정하고 전단파괴 전의 시료 형상과 비교·분석하였다.

Fig. 6. Direct shear test apparatus with test specimen

3. 직접전단시험 결과

3.1 전단 변형에 따른 전단강도 특성

기존의 연구에서는 돌출부 전단거동에 있어서 크게 영향을 미치는 요소로 돌출부의 경사각만을 고려하고, 돌출부의 크기 즉, 돌출부 길이의 영향은 거의 연구되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 돌출부 길이가 돌출부 전단거동에 미치는 영향을 연구하기 위하여 돌출부 경사각을 각각 10, 20, 30°로 고정한 다음에, 각각의 수직응력 100, 200, 400 kPa에서 돌출부 길이 변화(4.5, 5.5, 6.5, 7.5 cm)에 따른 전단거동을 연구하였다. 수직응력을 이렇게 정한 이유는, 100 kPa에서는 미끄러짐에 대한 전단 거동, 400 kPa에서는 돌출부가 완전히 전단되는 완전전단파괴를, 그리고 200 kPa은 두 가지 거동의 중간 거동을 보기 위해서 선정하였다. 본 논문에서 미끄러짐이란 전단과정 중에서 돌출부가 파괴되지 않고 미끄러져 올라감으로써 수직변위(dilation)가 발생하는 과정을 말한다.

Fig. 7은 돌출부의 경사각을 10°로 고정시키고 수직응력을 100, 200, 400 kPa로 변화 시켰을 때, 돌출부 길이(λ)에 따른 전단변위-전단응력의 관계를 보여주고 있다. 모든 그림에서 보여주듯이, 돌출부 길이가 4.5 cm에서 7.5 cm로 증가할수록 전단응력이 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 돌출부의 경사각이 10°인 시편의 전단응력은 돌출부의 경사각이 20°, 30°의 시편과 비교했을 때 최대전단강도를 보이고 난 후 전단응력이 전체적으로 일정한 값으로 수렴하는 경향이 보인다. 경사각 10°에서 수직응력이 100 kPa일 때(Fig. 7(a))는 돌출부 길이에 따른 전단응력의 차이가 다른 그래프에 비해 눈에 띄게 보이지 않고, 전단이 진행되는 동안 미끄러짐 현상이 발생하여 전단응력 값이 증가·감소를 반복하였다. 미끄러짐 현상에 의하여 그래프 모양이 전체적으로 톱니모양을 이루고 있는 것으로 판단된다. 경사각 10°에서 수직응력이 200 kPa, 400 kPa일 때(Figs. 7(b), (c))는 상대적으

로 높은 수직응력을 주었기 때문에 미끄러짐 현상은 크게 일어나지 않았고, 돌출부 길이가 4.5 cm에서 7.5 cm로 증가할수록 전단응력 값이 증가하는 경향이 뚜렷이 나타났다. 특히 수직응력 400 kPa에서는 최대 전단강도가 가장 크게 나타났으며, 전단응력 값이 최대 전단강도를 지나고 난 후 일정한 값으로 수렴하는 경향(Yang and Chiang, 2000)이 가장 확실하게 나타

났다.

본 연구에서는 전단변위에 따른 수직변위도 관찰하였는데, 수직변위 결과로 보아 수직응력이 200 kPa와 400 kPa에서는 전단파괴가 발생하여, 돌출부 길이가 클수록 전단강도가 증가하는 것이 뚜렷이 나타났다. 이러한 연유는 돌출부 길이가 크다는 것은 동일한 수직응력에서도 발생하는 수직변위를 그만큼 더 억제

(a) $\sigma_n=100$ kPa

(b) $\sigma_n=200$ kPa

(c) $\sigma_n=400$ kPa

Fig. 7. Shear stress-displacement curves for $i=10^\circ$

(a) $\sigma_n=100$ kPa

(b) $\sigma_n=200$ kPa

(c) $\sigma_n=400$ kPa

Fig. 8. Shear stress-displacement curves for $i=20^\circ$

하여야 한다는 것이다. 즉, 돌출부 길이가 클수록 상부로 올라가는 수직 높이가 커짐에 따라 전단강도가 증가하게 된다.

Fig. 8은 돌출부의 경사각을 20°로 고정시키고 수직 응력을 100, 200, 400 kPa로 변화 시켰을 때, 돌출부 길이에 따른 전단변위-전단응력의 관계를 보여주고 있다. 돌출부의 경사각이 20°인 시편에서는 돌출부의

경사각이 10°인 시편과 비교하여, 돌출부 길이가 증가할수록 전단응력이 증가하는 양상이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 경사각 10°에서 수직응력이 100 kPa일 때 (Fig. 7(a))는 미끄러짐 현상 때문에 그래프가 톱니바퀴 모양이었지만, 경사각 20°에서 수직응력이 100 kPa일 때(Fig. 8(a))는 돌출부가 미끄러짐이 발생되지 않는 그 이상의 경사각을 가졌기 때문에 미끄러짐 현상이 크게 일어나지 않았다. 경사각 10°에서는 최대 전단강도 이후 전단응력이 대체적으로 일정한 값으로 수렴하였지만, 경사각 20°에서 최대전단강도 이후 전단응력 값이 감소하는 경향을 보였다. 돌출부의 경사각이 10°인 경우와 동일하게 돌출부 각도와 길이가 동일할 경우, 수직응력이 증가함에 따라 최대전단강도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 돌출부의 경사각을 30°로 고정시키고 수직 응력을 100, 200, 400 kPa로 변화 시켰을 때, 돌출부 길이에 따른 전단변위-전단응력의 관계를 보여주고 있다. 돌출부의 경사각이 30°인 시편은 경사각이 20°인 시편과 동일하게 돌출부 길이가 증가할수록 전단응력이 증가하는 양상이 뚜렷이 나타났으며, 미끄러짐 현상 역시 거의 발생하지 않았다. 경사각 20°인 경우와 경사각 30°인 경우를 비교하면, 경사각이 30°인 시편의 전단변위-전단응력 그래프가 최대전단강도 이후 전단응력이 더 급하게 감소하는 경향을 보였다.

3.2 전단면 마찰각 특성

돌출부 경사각이 10°, 20°, 30°일 때의 돌출부 길이에 따른 전단면 마찰각을 Table 1에 나타내었다. 이때 적용한 수직응력은 100, 200, 400 kPa이다. 전단면 마찰각의 결과 값을 비교하기 위하여, 돌출부 길이가 4.5 cm이고, 돌출부 경사각이 10°, 20°, 30°인 시편의 점착력 값을 돌출부 길이가 5.5 cm, 6.5 cm, 7.5 cm의 점착력 값을 보정하였다. 그 결과 동일한 돌출부 길이를 가질 때, 돌출부의 경사각이 10°에서 30°로 증가할수록 전단면 마찰각이 커졌고, 동일한 돌출부

Fig. 9. Shear stress-displacement curves for $i=30^\circ$

Table 1. Friction angle according to λ

i (°)	λ (mm)	Friction angle (°)
10	45	28.24
	55	33.96
	65	37.71
	75	40.96
20	45	35.21
	55	43.24
	65	46.46
	75	53.15
30	45	39.99
	55	45.23
	65	53.81
	75	58.30

의 경사각을 가진 시편에서는 돌출부 길이가 증가할수록 전단면 마찰각이 증가하였다. 본 연구에서 점착력 값을 특정 길이로 보정한 것은 돌출부 길이 변화에 따른 전단면 마찰각의 변화를 보기 위함이다. 따라서 만약 절리면 전단 거동 등에 적용한다면 이러한 보정

은 불필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시한 전단면 마찰각은 보정된 값이므로 이를 직접적으로 절리면 전단 모델에 적용할 수는 없다. 본 연구에서 제시한 전단면 마찰각은 돌출부를 완전히 올라타는 경우와 돌출부가 완전히 전단되는 두 가지 경우의 중간 영역에서 산정된 결과로서, 따라서 이를 직접적으로 Patton (1966)의 이중선형모델에 적용할 수는 없는 결과이다.

4. 3차원 형상측정기를 이용한 파괴 형상 특성

돌출부의 경사각이 10°, 20°, 30°일 때, 수직응력을 100, 200, 400 kPa로 변화를 주어 돌출부 길이에 따른 파괴형상을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에 각각 나타내었다. 3차원 형상측정기를 이용하여 측정한 파괴형상의 특징은 Fig. 13에서 보인 바와 같이 돌출부 파괴면의 수평거리(λ_f)와 돌출부 파괴면의 수직높이(λ_h)로 구

(a) $\lambda=4.5$ cm (b) $\lambda=5.5$ cm (c) $\lambda=6.5$ cm (d) $\lambda=7.5$ cmFig. 10. Surface asperity shape after test for $i=10^\circ$

Fig. 11. Surface asperity shape after test for $i=20^\circ$

Fig. 12. Surface asperity shape after test for $i=30^\circ$

Fig. 13. Definition of λ_f and λ_h

정할 수 있다. 일부 시편은 수평으로 전단되지 않고 비스듬하게 잘려나갔다. 이런 경우의 파괴된 돌출부의 수평거리와 수직높이는 파괴면이 평행하게 나타난 구간과 파괴전 시편의 형상이 만나는 점을 이어 파괴된 돌출부의 수평거리와 수직높이를 측정하여 결과 값을 얻었다. 본 논문에서는 3차원으로 파괴형상을 측정하였으나, 돌출부 파괴면의 수평거리와 돌출부 파괴면의 수직높이를 시료 폭을 따라 평균하여 2차원으로 산출하였다. Table 2는 Fig. 10, Fig. 11, Fig.

12의 결과를 숫자로 도표화하여 나타낸 것이다. 돌출부의 경사각이 같고 돌출부 길이가 동일할 때, 수직응력을 증가시키면 돌출부 파괴면의 수평거리는 점점 증가하고 돌출부 파괴면의 수직높이는 점점 감소하였다. 단, 돌출부 길이가 4.5 cm인 시편은 돌출부의 경사각, 수직응력에 관계없이 거의 모두 파괴되었다.

Fig. 14는 돌출부의 경사각이 10°, 20°, 30°일 때, 수직응력에 따른 돌출부 파괴면의 수평거리와 돌출부 파괴면의 수직높이를 그래프로 나타낸 것이다. 돌출부의 경사각이 10°이고 σ_n 이 100 kPa일 때, λ 에 관계없이 λ_f 는 32~38.5 mm, σ_n 이 200 kPa일 때, λ_f 는 45.5~46.1 mm, σ_n 이 400 kPa일 때, λ_f 는 49.8~55.4 mm이었다. 돌출부의 경사각이 20°이고 σ_n 이 100 kPa일 때, λ_f 는 23.4~25.9 mm, σ_n 이 200 kPa일 때, λ_f 는 26.9~32.2 mm, σ_n 이 400 kPa일 때, λ_f 는 31.5~37.6 mm이었다. 돌출부의 경사각이 30°이고 σ_n 이

Table 2. λ_f and λ_h according to σ_n for $i=10^\circ$, 20° , 30°

$i=10^\circ$						
λ (mm)	$\sigma_n=100$ kPa		$\sigma_n=200$ kPa		$\sigma_n=400$ kPa	
	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)
45	36.4	1.01	41.8	0.58	45	0
55	32	2.02	45.5	0.87	55	0
65	33.9	2.89	46.1	1.73	49.8	1.16
75	38.5	3.47	45.5	2.6	55.4	1.73
$i=20^\circ$						
λ (mm)	$\sigma_n=100$ kPa		$\sigma_n=200$ kPa		$\sigma_n=400$ kPa	
	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)
45	40.2	1.16	41.6	0.87	44.4	0.43
55	23.4	6.36	26.9	5.64	31.5	4.91
65	24.5	7.66	29.7	6.65	37.6	5.84
75	25.9	9.31	32.2	8.09	35	7.23
$i=30^\circ$						
λ (mm)	$\sigma_n=100$ kPa		$\sigma_n=200$ kPa		$\sigma_n=400$ kPa	
	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)	λ_f (mm)	λ_h (mm)
45	41.3	1.45	42.5	1.16	45	0
55	25.7	8.38	32.7	6.94	34.1	6.53
65	28.7	10.98	37.1	8.38	39.9	7.8
75	25.2	14.68	41.1	9.83	43.4	9.39

100 kPa일 때, λ_f 는 25.2~28.7 mm, σ_n 이 200 kPa일 때, λ_f 는 32.7~41.1 mm, σ_n 이 400 kPa일 때, λ_f 는 34.1~43.4 mm이었다. 단, λ 가 4.5 cm인 시편은 완전 파괴되었으므로 분석 대상에서 제외하였다.

돌출부의 경사각이 동일하고 수직응력이 같을 때, 돌출부 길이에 관계없이 돌출부 파괴면의 수평거리는 전체적으로 일정한 값을 가졌고, 돌출부 파괴면의 수평거리의 차이는 9 mm 내외였다. 동일한 조건에서 돌출부 길이가 증가할수록 돌출부 파괴면의 수직높이

의 값은 증가하는 경향을 보였다. 이는 일정한 돌출부 파괴면의 수평거리가 구현될 때까지의 돌출부 파괴면의 수직높이가 존재하는 것으로 판단된다.

직접전단시험을 시행하기 전의 돌출부 시편의 높이를 h 라 하고, 직접전단시험을 시행하고 난 후의 돌출부 시편의 파괴면 높이를 λ_h 라 하여, λ_h / h 값을 Fig. 15에 나타내었다. λ_h / h 의 값이 1.0에 가까워질수록 미끄러짐 현상이 발생하고, λ_h / h 의 값이 0.5일 경우에는 미끄러짐과 완전 전단파괴의 중간단계인 전이영역

(a) λ_f for $i=10^\circ$

(b) λ_h for $i=10^\circ$

(c) λ_f for $i=20^\circ$

(d) λ_h for $i=20^\circ$

(e) λ_f for $i=30^\circ$

(f) λ_h for $i=30^\circ$

Fig. 14. λ_f and λ_h according to normal stress

구간이고, λ_h/h 의 값이 0.0에 가까울수록 완전 전단파괴 현상이 일어나는 것이다. 수직응력을 아무리 작게 하여도 완전 미끄러짐이 발생하지는 않았다. 돌출부의 경사각이 같고, 동일한 수직응력 조건에서 λ_h/h 의 값은 돌출부 길이가 증가할수록 그 값이 커졌다. 또한 돌출부의 경사각이 같고, 동일한 돌출부 길이 조건에서 λ_h/h 의 값은 수직응력이 증가할수록 그 값이 작아졌다.

Fig. 15. λ_h/h according to normal stress

5. 결론

본 연구는 평면과 평면이 접하는 접촉면에서의 전단파괴 형상특성에 대해 연구하였다. 특히 돌출부 크기 및 경사각에 따른 전단강도 및 파괴 형상 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 돌출부의 경사각이 동일하고 수직응력의 조건이 같을 때, 돌출부 길이가 증가할수록 전단응력이 증가하는 경향을 보였다. 단, 돌출부 경사각이 10° 인 경우, 돌출부 길이가 증가할수록 전단응력이 증가하나, 다른 돌출부 경사각과 비교했을 때, 그 증가폭이 작았다. 이는 전단과정에서 돌출부의 경사각이 작아 미끄러짐 현상이 주로 발생하였기 때문이라고 판단된다.
2. 돌출부 경사각이 10° 인 경우 전단응력이 최대 전단응력을 지나간 후 대체적으로 일정한 값으로 수렴하였다. 그러나 다른 경사각에서는 경사각이 증가할수록 최대 전단응력 이후 전단응력이 더 급하게 감소하였다.
3. 돌출부의 경사각이 같고 돌출부 길이가 동일할 때, 수직응력을 증가시키면 돌출부 파괴면의 수평거리는 점점 증가하고 돌출부 파괴면의 수직높이는 점점 감소하였다.
4. 돌출부의 경사각이 동일하고 수직응력이 같을 때, 돌출부 길이에 관계 없이 일정한 돌출부 파괴면의 수평거리를 보였다. 동일한 조건에서 돌출부 파괴면의 수평거리의 차이는 돌출부 길이에 관계없이 9 mm 내외이다. 단, 돌출부 길이가 4.5 cm인 시편에서는 수직응력, 돌출부의 경사각에 관계없이 모두 파괴되었다.
5. 돌출부의 경사각이 동일하고 수직응력이 같을 때, 돌출부 길이가 증가할수록 돌출부 파괴면의 수직높이는 증가하는 경향을 보였다. 이는 일정한 돌출부 파괴면의 수평거리가 구현될 때까지의 돌출부 파괴면의 수직높이가 존재하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 “2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0022941).” 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R. (1983), “Fundamentals of rock joint deformation”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 249-263.
2. Barton, N.R. (1973), “Review of a new shear-strength criterion for rock joints”, Engrg. Geol., Vol. 7, pp. 287-332.
3. Goodman, R.E. (1976), *Methods of geological engineering in discontinuous rock*, West Pub., New York.
4. Hong, E.S. (2005), *Characterization of rock joint roughness based on roughness mobilization characteristics*, PhD Thesis, Korea University, Korea.
5. Kim, E.K., Lee, J.H., Lee, S.W. (2012a), “Shear behavior at the interface between particle and non-crushing surface by using PFC”, J. Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 4, pp. 293-308.
6. Kim, E.K., Jeong, D.W., Lee, S.W. (2012b), “Surface roughness crushing effect on shear behavior using PFC”, J. Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 4, pp. 321-336.
7. Ladanyi, B., Archambault, G. (1970), “Simulation of shear behavior of a jointed rock mass”, Proc. 11th Symp. Rock Mech., Urbana, Illinois, pp. 105-125.
8. Lee, S.W., Hong, E.S., Bae, S.I., Lee, I.M. (2006), “Modelling of rock joint shear strength using surface roughness parameter, R_s ”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, Issue 3-4, pp. 239-239.
9. Patton, F.D. (1966), “Multiple modes of shear in rock”, Proc. 1st Cong. ISRM, Lisbon, Vol. 1, pp. 509-513.
10. Qiu, X., Plesha, M.E., Huang, X., Haimson, B.C. (1993), “An investigation of the mechanics of rock joints - Part II. Analytical investigation”, Int. J. Rock. Mech. Min. sci. Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 3, pp. 271-287.
11. Yang, Z.Y., Chiang, D.Y. (2000), “An experimental study on the progressive shear behaviour of rock joints with tooth-shaped asperities”, Int. J. Rock Mech. Sci., Vol. 37, pp. 1247-1259.