

암석절리면 전단강도 예측모델 및 영향요소에 관한 연구

Study on the Estimation Model of Shear Strength at Rock Joint and Its Influence Factor

손 무 락¹ Son, Moorak

Abstract

This study investigates the existing models for estimating the shear strength of rock joints, presents related problems, and introduces a newly proposed model to overcome the problems. The results of many experimental tests show that the shear strength of a rock joint depends on many complex factors, including asperity angle, compressive strength, applied normal stress, friction angle, asperity cohesive strength, and progressive damage of asperities. However, the existing models do not account for these factors enough. To overcome these problems, Son (2020) developed a new model to estimate the shear strength of rock joints and confirmed its reliability by comparing with experimental results and existing models. In this paper, the developed model was used to investigate the various factors that affect the joint shear strength, and the results were compared and analyzed. Through this study, the factors that affect the shear strength of the rock joint could be identified in more detail.

요 지

본 연구에서는 암석절리면의 전단강도를 예측하기 위한 기존 여러 모델들에 대해서 조사하고 관련 문제점을 제시함과 더불어 문제점 극복을 위해 새롭게 제안된 모델에 대해서 소개한다. 많은 실험적 결과에 따르면 암석 절리면에서의 전단강도는 절리돌기 각도, 압축강도, 작용 수직응력, 마찰각 및 절리돌기 점착강도, 절리돌기의 점진적 손상을 포함한 많은 복합요인에 따라 달라짐에도 불구하고 기존 강도예측 모델은 이러한 요소들을 충분히 고려하지 못한 점이 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 Son(2020)은 새로운 절리면 전단강도 예측모델을 개발하고 그 신뢰성을 실험결과 및 기존 모델과 비교하여 확인한 바 있다. 본 논문에서는 개발모델을 이용하여 절리면 전단강도에 영향을 미치는 여러 요소들에 대해서 조사하고 그 결과를 비교분석 하였다. 본 연구를 통해서 암석절리면 전단강도에 영향을 미치는 요소들에 대하여 보다 자세히 파악할 수 있었다.

Keywords : Estimation model, Friction angle, Joint asperity, Rock joint, Shear strength

1. 서 론

암반지층에서 절리면의 전단강도는 사면, 터널, 굴착,

기초지반 등에 대한 안정성 해석을 수행할 때 가장 중요한 요소중의 하나로서 작용한다. 따라서 암석절리면에서의 전단강도 발현 메커니즘을 이해하고 전단강도를

¹ 정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Daegu Univ., Tel: +82-53-850-6527, mson@daegu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

신뢰성있게 예측할 수 있는 방법을 제공하는 것은 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 절리면에서의 전단거동은 암석의 성질, 절리상태, 현장 작용응력조건 등에 따라 매우 복잡한 현상을 나타낸다. 암석절리면의 전단강도를 연구할 때 고려할 요소로는 절리면의 기하학적 조건을 반영하는 절리돌기 경사각, 절리면에서의 압축강도, 절리면에 작용하고 있는 수직응력, 절리면 마찰각 및 절리돌기의 점착강도 등이 있다. 암석절리면의 압축강도와 작용응력은 암석의 형상과정, 풍화정도, 위치 등에 따라 달라질 수 있다. 절리면의 기하학적 조건으로서는 절리면 절리돌기의 레이아웃 및 절리돌기의 경사각 등이 있으며 전단이 일어나는 동안의 절리돌기의 손상에 의한 기하학적 변화도 포함된다. 절리면의 기하학적 특성은 전단강도의 역학적 거동에 상당한 영향을 미치지만 간단하게 정의하기는 쉽지 않다. 암석절리면에서의 전단강도와 관련하여 많은 연구자들이 다양한 연구하고 그 결과를 발표하였다(Patton, 1966; Ladanyi and Archambault, 1970; Barton, 1973; Barton and Choubey, 1977; Saeb, 1990; Jing, 1990; Zhao, 1997a,b; Kwon et al., 2000; Grasselli, 2001; Kim et al., 2001; Oh, 2005; Kim and Lee, 2007; Asadi and Rasouli, 2012; Son, 2020). 국내에서도 암석절리면에 대한 다양한 연구가 이루어졌으나 대부분(Kim, 2002; Lee et al., 2006; Jang et al., 2021)은 Barton(1973) 또는 Barton and Choubey(1977)가 제시한 전단강도 예측식이나 거칠기 프로파일과 관련된 것에 한정되었다. 이외에도 JRC값을 보다 정확하게 정량화하려는 많은 시도(Tse and Cruden, 1979; Reeves, 1985; Lee et al., 2002)가 있었지만 절리면의 전단강도가 전단방향에 크게 영향을 받음에도 불구하고 전단방향의 의존성에 대한 분석이 이루어지지 않는 등의 문제점을 안고 있다(Huang and Doong, 1990; Jing et al., 1992).

암석절리면 전단강도 예측모델 개발에 대한 많은 연구자들의 기여 및 노력으로 암반절리면에서의 전단강도에 대한 이해가 크게 향상되었지만 절리면 전단강도의 중요성은 매우 크기 때문에 더 많은 이해 및 모델개선에 대한 필요성이 지속적으로 요구되고 있다. Son(2020)은 기존 여러 모델들의 문제점을 파악하고 이를 극복하기 위해 새로운 절리면 전단강도 예측모델을 소개하고 그 신뢰성을 실험결과 및 기존 모델과 비교하여 확인한 바 있다. 본 연구에서는 Son(2020)에 의해 새롭게 개발된 모델을 이용하여 절리면 전단강도에 영향을 미치는 여러 요소들에 대해서 조사하고 그 결과를 비교분석 하였다.

2. 기존 절리면 전단강도 예측모델 문제점 분석 및 개발 예측모델 신뢰성 확인

현재 암석절리면의 전단강도 예측모델은 다양하게 존재하지만, 절리면의 전단강도 모델은 입상토의 전단 시 발생하는 팽창현상에 기초하여 처음으로 개발되었다. 팽창영향을 고려한 입상토의 전단강도 모델은 Newland and Alleley(1957) 및 Row et al.(1964)가 제시한 바 있다. 이를 토대로 Patton(1966)은 톱니모양의 암석절리면을 묘사한 실험체에 대하여 전단실험을 수행한 후 전단강도 예측모델로서 bilinear 모델을 제시하였다. 이 모델은 작용응력에 대한 전단강도의 비선형특성을 고려하지 못하고 전단과정 동안 절리돌기의 손상을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. Ladany and Archambault(1970)는 일과 에너지 원리에 근거하여 다항함수를 이용한 전단강도 모델을 제안하였다. 이 모델은 작은 수직응력하에서 절리면은 전단방향에 수직되는 방향으로 팽창하려는 경향이 있으며 수직응력이 증가하면 이러한 현상은 없어진다는 점과 절리면에서 절리돌기부가 차지하는 면적비를 고려하였다는 점에서 개선된 모델로 판단된다. 그럼에도 불구하고 모델식에 전이응력(취성에서 연성으로 바뀌는 시점의 응력)개념을 사용하였는데 이 응력을 직접적으로 파악하기 어려운 문제점이 있으며, 절리돌기 방향과 관련한 추가적인 마찰저항각을 별도로 모델식에 고려함으로써 관련 마찰각 산정에 어려움이 있고 모델의 단순성이 결여된 점이 있어서 단점이 있다. Saeb (1990)은 Ladanyi and Archambault 모델식을 이론적으로 더욱 엄밀하면서 간편하게 수정하였지만 앞에 언급한 문제점과 단점을 여전히 내포하고 있다. Barton(1973, 1976)은 실험결과 및 데이터분석 등을 고려하여 상대적으로 작은 수직응력하에서 거칠기계수(JRC)등을 고려한 경험적 전단강도 모델식을 제안하였다. Barton의 초기실험은 σ_n/σ_c (작용 수직응력/절리면 압축강도) 값이 0.001에서 0.3 사이의 상대적으로 낮은 수직 응력하에서 수행된 특징이 있으며, Barton 모델에서 사용되는 대수항(log term)은 작용된 수직 응력(σ_n)이 작아짐에 따라 매우 큰 전단강도값을 산출하기 때문에 논리적으로 맞지 않은 점이 있다. 이와 더불어 Barton은 최대 마찰각도가 70도 이하여야 한다는 제한을 두었으며, 절리면의 절리돌기를 따라 팽창하는 현상이 억제되는 높은 수직 응력 하에서 Barton모델에 의해 예측되는 전단강도는 합리적이지 않다는 문제점을 내포하고 있다. Zhao(1997)

는 JMC(Joint Matching Coefficient)를 고려하면서 Barton 모델을 수정하는 전단강도 예측식을 제안한 바 있으나 앞에 언급한 문제점은 여전히 내포하고 있다. 대부분의 기존 전단강도 모델은 전단 시 절리면에서 슬라이딩 및 인터로킹이 절리면 전체에서 동시에 발생하는 것으로 간주한다. 그러나 많은 경우에 있어서 절리면의 일부에서는 전단 초기부터 절리돌기의 상호 작용이 거의 또는 전혀 나타나지 않고 잔류 전단강도만 해당 부분에서 발현될 수 있다. 또한 기존 모델은 절리돌기의 경사각, i 를 1차 절리돌기 경사각의 평균값으로 고려하고 있지만 절리면에서의 전단거동은 가장 경사각이 큰 절리돌기에서 시작하고 해당 절리돌기가 손상되면서 그 다음으로 경사각이 큰 절리돌기를 대상으로 전단이 계속해서 진행된다. Fig. 1은 현장에서 접할 수 있는 다양한 절리면 절리돌기의 모습을 보여준다.

새로운 강도모델을 개발하고 제시함에 있어서 반드시 고려해야 할 사항은 개발모델이 실험적 테스트에서 얻은 관찰결과를 포함하도록 하는 것이다. Patton(1966)은 다양한 실험을 통해 작용하는 수직응력이 작을 경우 전단강도는 주로 절리돌기의 경사각에 의해 영향을 받지만 수직응력의 크기가 증가함에 따라 절리돌기의 점착강도 영향이 증가하는 반면 절리돌기 경사각의 영향은 감소한다고 보고하였다. Ladanyi와 Archambault(1970)는 실험을 통해 절리돌기의 전단손상은 절리면에서의 압축강도와 작용된 수직응력 모두에 영향을 받는다는 것을 관찰했다. 그들이 제안한 모델은 전단손상이 일어남으로서 절리돌기에서의 팽창거동이 줄어드는 동시에 전단에 대한 점착강도가 발현되는 것을 고려하였다. Barton(1973)은 절리면을 따라 발생하는 팽창각이 절리면에서의 압축강도와 작용하는 수직응력의 비(σ_n/σ_c)와 대수적(log) 관계가 있다고 보고했지만, 관련 데이터를 다시 조

사하고 분석한 바, 그 관계는 대수함수 보다는 다항식 함수로 더 잘 나타낼 수 있는 것으로 나타났다. Jing(1990)도 실험 데이터를 통해 팽창각의 감소를 나타냄에 있어서 다항식 함수를 제안하였다. Grasselli(2001)는 실험을 통해 절리면의 기하학적 형상이 응력분포와 전단과정에 큰 영향을 미치며 전단손상 영역은 응력의 크기 및 전단 작용방향에 영향을 받는다고 보고하였다. 또한, 절리작용 방향의 가장 큰 경사각을 가진 절리돌기가 절리면의 손상을 좌우하며 손상형태는 절리돌기 및 암석의 특성에 영향을 받고 전단으로 인한 손상과정이 절리면에서 보다 일정한 기하학적 형상을 발생시킨다고 보고하였다. Asadi와 Rasouli(2012)는 절리돌기 손상에 대한 절리면 거칠기의 영향을 조사하였다. 그들이 관찰한 바에 따르면 경사가 큰 절리돌기에서 손상이 가장 크게 발생하고 수직응력을 증가시키면 절리돌기의 손상 또한 크게 증가한다고 보고하였다.

이와같이 암반 절리면에서의 전단거동이 다양하게 관찰되었음에도 불구하고 대부분의 기존 전단강도 예측 모델은 이러한 암석절리면에서 관찰된 전단 특성을 충분히 고려하지 못한 점이 있었다. 이와같은 이유로 Son(2020)은 기존 다양한 실험관찰로부터 확인된 결과에 기반하면서 암석절리면에서의 복잡한 전단거동 특성을 보다 합리적으로 나타낼 수 있는 개선 전단강도 모델을 개발하여 아래와 같이 제시하였다.

$$\tau = \sigma_n \cdot f^{1.5} \cdot \tan(i_s \cdot f^2 + \phi_u) + (1 - f^{1.5}) \cdot (r \cdot c + \sigma_n \cdot \tan \phi_r) \quad (1)$$

여기서,

τ = 최대 전단강도, σ_n = 작용 수직응력, f = 절리손상 저항계수, $1 - \frac{\sigma_n}{r \cdot \sigma_c}$ (σ_c = 압축강도, r = 전체 절리면적(A)에 대

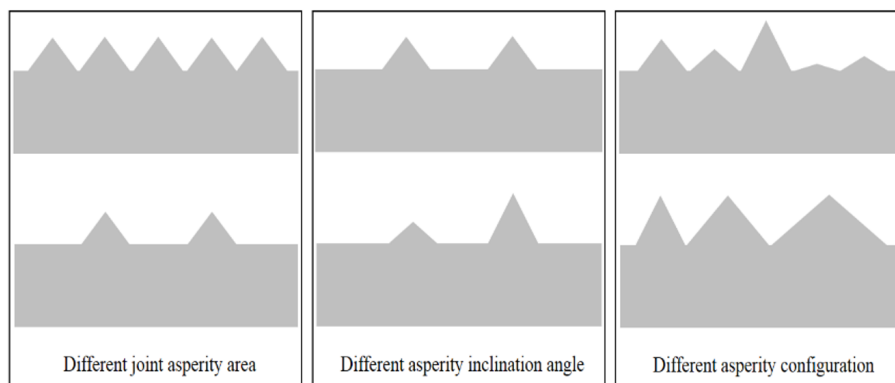


Fig. 1. Schematic view of various joint asperities (Son, 2020)

한 인터로킹 절리돌기의 투영면적(A_a) 비 = $(A_a)/A$, i_s = 최대 일차 절리돌기 경사, ϕ_u = 마찰저항각, c = 절리돌기 점착강도, ϕ_r = 잔류마찰각

개선된 모델은 경사가 가장 큰 절리돌기에서 전단손상이 시작되고 손상된 절리돌기의 경사각도가 두 번째로 경사가 큰 절리돌기와 같게 되면 두 절리돌기를 따라 전단이 동시에 일어나는 것으로 고려하였다. 그리고 이 과정은 모든 절리돌기가 전단되어 사라질 때까지 반복된다(Fig. 2). 또한 전단파쇄가 일어남으로서 절리돌기에서의 팽창거동이 줄어드는 동시에 절리돌기 점착강도의 영향이 증가하는 것을 고려하였으며, 절리면을 따라 초기 절리돌기의 분포면적 비 및 기존 전단에 따른 응력 집중 및 재분배(Fig. 3)도 고려되도록 하였다.

개발된 전단강도 예측모델의 신뢰성을 확인하기 위하여 Patton(1966)이 실시한 실험결과와 비교하는 동시에 널리 알려진 두 가지 기존 모델(Barton 모델, Ladanyi & Archambault 모델)과도 비교하였다(Fig. 4, Son, 2020). 비교결과, 개발된 전단강도모델은 절리돌기 경사각, 절리돌기 분포, 절리돌기 압축강도 및 작용 수직응력, 절리돌기 마찰저항각 및 점착강도 등을 반영하여 절리면에서의 복잡한 전단거동 특성을 보다 잘 묘사할 수 있었으며 기존 모델과 비교하여 절리면 전단강도를 더 신뢰성있게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

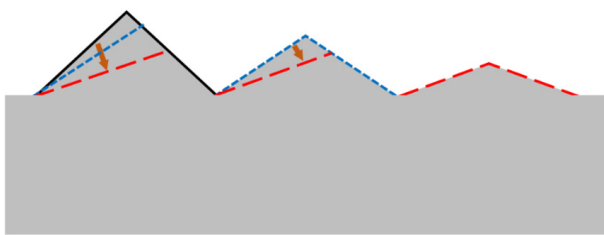


Fig. 2. Schematic view of progressive asperity degradation (Son, 2020)

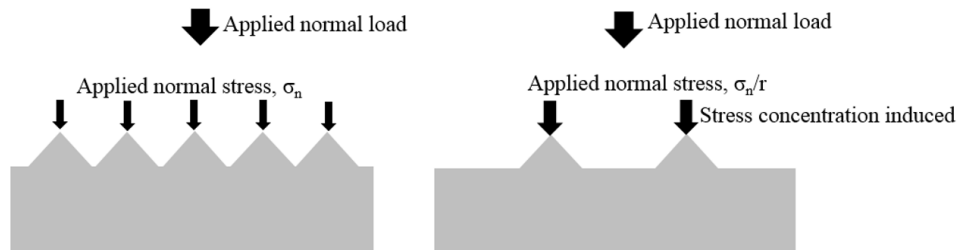


Fig. 3. Schematic view of progressive asperity degradation (Son, 2020)

3. 절리면 전단강도 영향요소 분석

본 절에서는 개발모델을 이용하여 절리면 전단강도에 영향을 미치는 다양한 요소들(절리돌기 경사각, 절리돌기 압축강도, 절리돌기 투영면적 비, 마찰저항각, 점착강도)에 대해서 조사하고 분석하였다.

3.1 절리돌기 경사각의 영향

절리면에서의 절리돌기 경사각을 변경하면서 개발 전단강도 모델로부터 예측되는 전단강도에 대해서 조사하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다. 절리돌기 경사각 외 다른 모든 요소들의 물성치는 동일(압축강도: 100MPa, 마찰저항각: 35°, 잔류마찰각: 30°, 절리돌기 점착강도: 20MPa, 절리돌기 투영면적비: 1)하게 유지하면서 절리돌기의 경사각만을 0°에서 50°로 변경하면서 예측되는

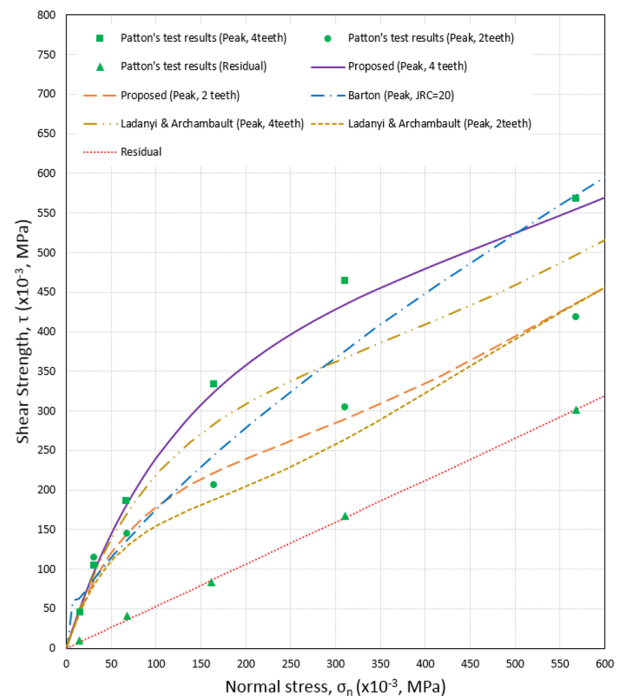


Fig. 4. Comparison of test results and different models (Son, 2020)

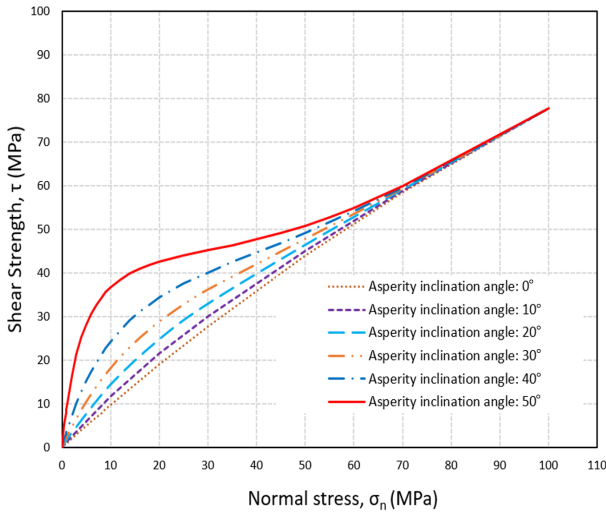


Fig. 5. Effect of asperity inclination angle

전단강도의 변화를 파악하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 절리돌기의 경사각이 0°이면 잔류 전단강도 값을 나타내었으며, 절리돌기 경사각이 증가함에 따라 예측 전단강도 값은 작용 수직응력(σ_n)의 크기가 작은 범위에서는 큰 차이를 보이다가 수직응력의 크기가 압축강도의 크기에 근접하면서 절리돌기의 경사각에 관계없이 잔류 전단강도 값으로 수렴하였다. 예측 전단강도 곡선의 접선 기울기는 수직응력이 작을 때 더 급한 경사각을 가지며 수직응력이 증가함에 따라 기울기의 전이구간을 거치면서 작용 수직응력이 압축강도의 크기에 근접하면서 접선 기울기는 잔류마찰각에 수렴하는 것으로 나타났다. 즉 절리면에서의 전단작용은 수직응력이 작을 때는 절리돌기의 경사각이 큰 영향을 미치나 수직응력이 증가함에 따라 그 영향은 감소하면서 동시에 절리 점착강도의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 절리돌기의 경사각이 증가할수록 전단강도의 상승폭이 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 절리돌기 압축강도의 영향

절리면에서의 절리돌기 압축강도를 변경하면서 개발 전단강도 모델로부터 예측되는 전단강도에 대해서 조사한 결과는 Fig. 6과 같다. 절리돌기 압축강도 외 다른 모든 요소들의 물성치는 동일(절리돌기 경사각: 30°, 마찰저항각: 35°, 잔류마찰각: 30°, 절리돌기 점착강도: 20MPa, 절리돌기 투영면적비: 1)하게 유지하면서 절리돌기의 압축강도만을 100Mpa에서 500Mpa로 변경하면서 예측되는 전단강도의 변화를 파악하였다.

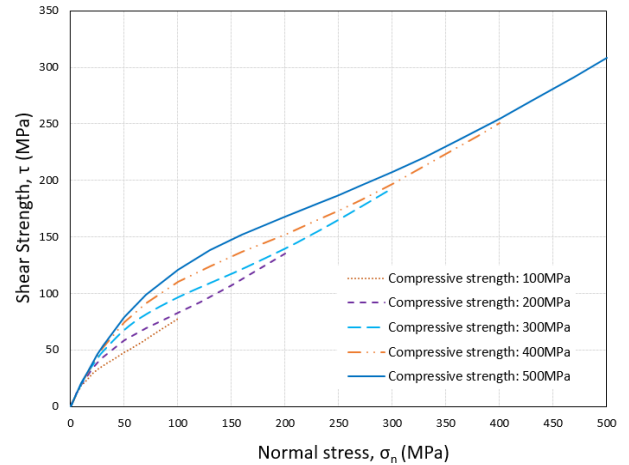


Fig. 6. Effect of compressive strength

Fig. 6에서 보는 바와 같이 절리돌기의 압축강도가 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 절리돌기의 경사각이 같더라도 압축강도와 작용 수직응력의 비에 따라 전단강도 곡선의 접선 기울기가 달라지는 것으로 나타났다. 예측 전단강도 곡선의 접선 기울기는 수직응력이 작을 때 더 급한 경사각을 가지다가 수직응력이 증가함에 따라 기울기의 전이구간을 거치면서 작용 수직응력이 압축강도의 크기에 근접하면서 접선 기울기는 잔류마찰각에 수렴하는 것으로 나타났다. 압축강도가 증가할수록 전단강도 곡선의 접선 기울기가 완만해지는 시점은 더 큰 작용 수직응력으로 옮겨가는 것으로 나타났다.

3.3 절리돌기 투영면적 비의 영향

절리면에서의 절리돌기 투영면적 비를 변경하면서 개발 전단강도 모델로부터 예측되는 전단강도에 대해서 조사한 결과는 Fig. 7과 같다. 절리돌기 투영면적 비 외 다른 모든 요소들의 물성치는 동일(절리돌기 경사각: 30°, 마찰저항각: 35°, 잔류마찰각: 30°, 절리돌기 점착강도: 20MPa)하게 유지하면서 절리돌기의 투영면적 비를 0.5에서 1.0으로 변경하면서 예측되는 전단강도의 변화를 파악하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 절리돌기의 투영면적 비가 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며 예측되는 전단강도는 단순히 절리돌기의 투영면적 비만에 의존하지는 않았다. 또한 절리돌기의 경사각이 같더라도 절리돌기의 투영면적 비에 따라 전단강도 곡선의 접선 기울기가 달라지는 것으로 나타났으나 작용 수직

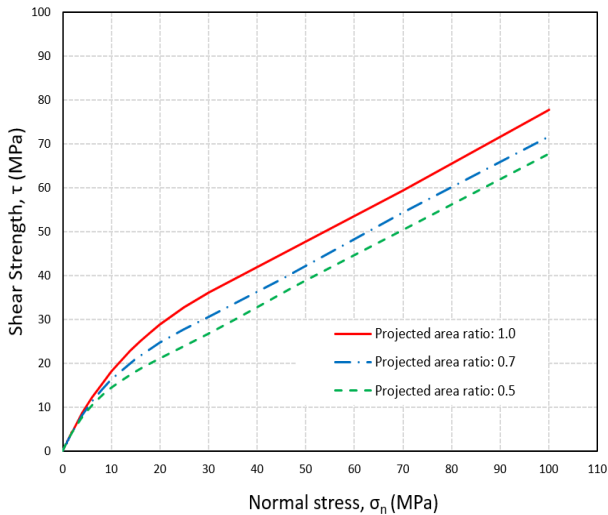


Fig. 7. Effect of projected area ratio

응력이 압축강도의 크기에 근접하면서 접선 기울기는 잔류마찰각에 수렴하는 것으로 나타났다. 투영면적 비가 증가할수록 전단강도 곡선의 접선 기울기가 완만해지는 시점은 더 큰 작용 수직응력으로 옮겨가는 것으로 나타났다.

3.4 절리면 마찰각의 영향

절리면에서의 마찰각을 변경하면서 개발 전단강도 모델로부터 예측되는 전단강도에 대해서 조사한 결과는 Fig. 8과 같다. 절리면 마찰각 외 다른 모든 요소들의 물성치는 동일(절리돌기 경사각: 30°, 잔류마찰각: 30°, 절리돌기 점착강도: 20MPa, 절리돌기 투영면적 비: 1)하게 유지하면서 마찰각을 30°에서 50°로 변경하면서 예측되

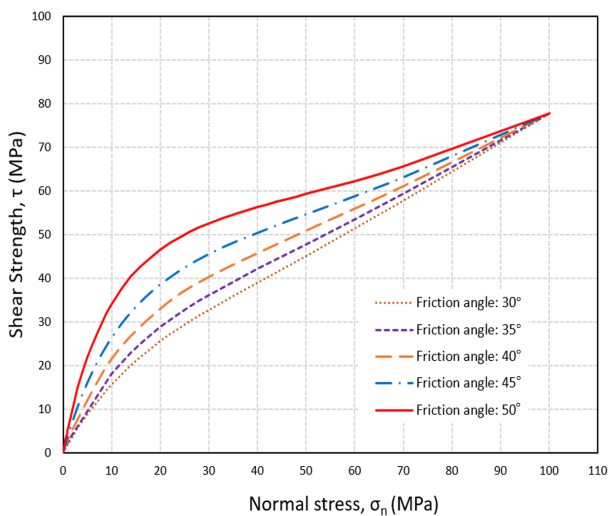


Fig. 8. Effect of friction angle

는 전단강도의 변화를 파악하였다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 마찰각이 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 예측 전단강도 값은 작용 수직응력(σ_n)의 크기가 상대적으로 작은 범위에서는 마찰각에 따라 큰 차이를 보이다가 작용 수직응력의 크기가 압축강도에 근접할수록 마찰각의 영향은 줄어들면서 잔류 전단강도로 수렴하는 것으로 나타났다. 예측 전단강도 곡선의 접선 기울기는 수직응력이 작을 때 더 급한 경사각을 가지다가 수직응력이 증가함에 따라 기울기의 전이구간을 거치면서 작용 수직응력이 압축강도의 크기에 근접하면서 접선 기울기는 잔류마찰각에 수렴하는 것으로 나타났다. 절리면에서의 전단작용은 수직응력이 작을 때는 마찰각이 큰 영향을 미치나 수직응력이 증가함에 따라 그 영향은 감소하면서 절리점착강도의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 마찰각이 증가할수록 전단강도의 상승폭이 증가하는 것으로 나타났다.

3.5 절리돌기 점착강도의 영향

절리돌기의 점착강도를 변경하면서 개발 전단강도 모델로부터 예측되는 전단강도에 대해서 조사한 결과는 Fig. 9와 같다. 절리돌기 점착강도 외 다른 모든 요소들의 물성치는 동일(절리돌기 경사각: 30°, 마찰저항각: 35°, 잔류마찰각: 30°, 절리돌기 투영면적 비: 1)하게 유지하면서 절리돌기 점착강도를 5MPa에서 30MPa로 변경하면서 예측되는 전단강도의 변화를 파악하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 절리돌기의 점착강도가 증

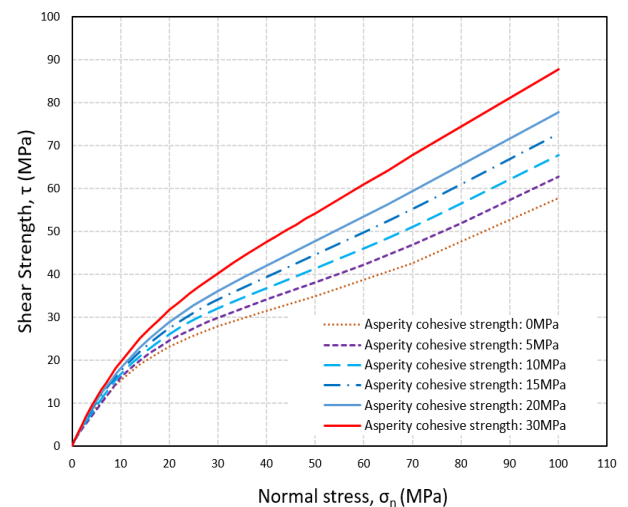


Fig. 9. Effect of cohesive strength

가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났다. 작용 수직응력의 크기가 작을 때는 절리돌기 점착강도의 영향이 상대적으로 작았으나 수직응력이 증가함에 따라 그 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 작용 수직응력의 크기가 절리돌기 압축강도와 같아질 때의 예측 전단강도는 점착강도 증가만큼 상승하는 것으로 나타났다. 다시 말해서 큰 수직응력하에서는 팽창작용이 억제되어 발생하지 못하게 되고 대신에 전단거동은 절리돌기의 점착강도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 Son(2020)에 의해 개발된 절리면 전단강도 예측모델을 이용하여 절리면 전단강도에 영향을 미치는 여러 요소들(절리돌기 경사각, 절리돌기 압축강도, 절리돌기 투영면적 비, 마찰저항각, 점착강도)에 대해서 매개변수 해석을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절리돌기의 경사각 및 마찰각이 증가함에 따라 예측 전단강도 값은 작용 수직응력(σ_n)의 크기가 작은 범위에서는 큰 차이를 보이다가 작용 수직응력의 크기가 압축강도에 근접할수록 절리돌기 경사각 및 마찰각에 관계없이 잔류 전단강도 값으로 수렴하였다.
- (2) 절리면에서의 전단작용은 수직응력이 작을 때는 절리돌기의 경사각 및 마찰각이 큰 영향을 미치나 수직응력이 증가함에 따라 그 영향은 감소하면서 동시에 절리 점착강도의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 절리돌기 경사각 및 마찰각이 증가할수록 전단강도의 상승폭은 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 절리돌기의 압축강도 및 투영면적 비가 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 압축강도 및 투영면적 비가 증가할수록 전단강도 곡선의 접선 기울기가 완만해지는 시점은 더 큰 작용 수직응력으로 옮겨가는 것으로 나타났다. 예측되는 전단강도는 단순히 절리돌기의 투영면적 비만에 의존하지는 않는 것으로 나타났다.
- (4) 절리돌기의 점착강도가 증가할수록 전단강도는 증가하는 것으로 나타났다. 작용 수직응력의 크기가 작을 때는 절리돌기 점착강도의 영향이 상대적으로 작게 나타났으나 수직응력이 증가함에 따라 그 영향이 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 작용 수직응력의 크기가 절리돌기 압축강도와 같아질 때의 예측 전단강도는 점착강도 증가만큼 상승하는 것으로 나타났다. 다시 말해서 큰 수직응력하에서는 팽창작용이 억제되어 발생하지 못하게 되고 대신에 전단거동은 절리돌기의 점착강도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

참고문헌 (References)

1. Asadi, M.S. and Rasouli, V. (2012), "Physical Simulation of Asperity Degradation Using Laboratorial Shear Tests of Artificial Fractures", *Proceedings of EUROCK 2012*, ISRM International Symposium: Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction, May 28-30, Stockholm, Sweden, p.14.
2. Barton, N. (1973), "Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints", *Engineering Geology*, Vol.7, No.4, pp.287-332.
3. Barton, N. (1976), "The Shear Strength of Rock and Rock Joints. Int", *J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.13, No.9, pp.255-279.
4. Barton, N. and Bandis, S. (1982), "Effects of Block Size on the Shear behaviour of Jointed Rock", *23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics*, Berkeley, USA, pp.739-760.
5. Barton, N. and Choubey, V. (1977), "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice", *Rock mechanics and Rock engineering*, Vol.10, No.1-2, pp.1-65.
6. Grasselli, G. (2001), "Shear Strength of Rock Joints based on Quantified Surface Description", Ph.D thesis, Univerist? di Parma, Italy.
7. Huang, T. H. and Doong, Y. S. (1990), "Anisotropic Shear Strength of Rock Joints", *Proc., Int. Symp. on Rock Joints*, Loen, Norway, pp.211-218.
8. Jang, H.S., Sim, M.Y., and Jang, B.A. (2021), "New Joint Roughness Coefficient and Shear Strength Criterion Based on Experimental Verification of Standard Roughness Profile", *J. of Engineering Geology*, Vol.31, No.4, pp.561-577.
9. Jing, L. (1990), "Numerical Modeling of Jointed Rock Masses by Distinct Element Method for Two, and Three-dimensional Problems", PhD thesis, Lulea University of Technology, Lulea.
11. Johnston, I. W. and Lam, T. S. K. (1989), "Shear behavior of Regular Triangular Concrete/rock Joints Analysis", *Journal of geotechnical engineering*, Vol.115, No.5, pp.711-727.
12. Jing, L., Nordlund, E., and Stephansson, O. (1992), "An Experimental Study on the Anisotropy and Stress-dependency of the Strength and Deformability of Rock Joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.29, No.6, pp.535-542.
13. Kim, D.Y. (2002), "Roughness Effects on the Shear Behavior Rock Joints", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.3, pp.56-57.
14. Kim, D.B., Lee, S.G., and Lee, J.I. (2001), "The Engineering Properties of Shear Strength of Rock Joints in Korea", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.4, pp.301-315.
15. Kim, D.Y. and Lee, Y.N. (2007), "New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints Using Quantified Joint Roughness Parameters", *11th Congress of the International Society for Rock mechanics*, Lisbon, pp.355-358.
16. Kwon, J.W., Kim, S.M., and Yoon, J.S. (2000), "A Study on

- Residual Stress Characteristics for Joint of Rock in Ring Shear Tests”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.6, pp.35-41.
17. Ladanyi, B. and Archambault, G. (1970), “Simulation of the Shear behavior of a Jointed Rock Mass”, *Proc. 11th. U.S. Symp. on Rock Mechanics*, pp.105-125.
 18. Lee, I-M, Hong, E-S, Bae, S-I, and Lee, S-W (2002), “Analysis of the Rock Joint Strength Characteristics Using New Rock Joint Roughness Quantification Method”, *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No.4, pp.229-238.
 19. Lee, S-W, Hong, E-S, Bae, S-I, and Lee, I-M (2006), “Modelling of Rock Joint Shear Strength Using Surface Roughness Parameter, Rs”, *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, Vol.21, No.3-4.
 20. Lee, Y-K, Park, J-W, and Song, J-J (2014), “Model for the Shear behavior of Rock Joints under CNL and CNS Conditions”, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol.70, No.9, pp.252-263.
 21. Newland, P. L. and Allely, B. H. (1957), “Volume Changes in Drained Triaxial Tests on Granular Materials”, *Geotechnique*, Vol.7, No.1, pp.17-34.
 22. Oh, J. (2005), “Three Dimensional Numerical Modeling of Excavation in Rock with Dilatant Joints”, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
 23. Patton, F. D. (1966), “Multiple Modes of Shear Failure in Rock”, *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, pp.509-513.
 24. Plesha, M. E. (1987), “Constitutive Models for Rock Discontinuities with Dilatancy and Surface Degradation”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.11, No.4, pp.345-362.
 25. Reeves, M. J. (1985), “Rock Surface Roughness and Frictional Strength”, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. and Geo. Abstr.*, Vol.22, No.6, pp.429-442.
 26. Rowe, P. W., Barden, I., and Lee, I. K. (1964), “Energy Components During the Triaxial Cell and Direct Shear Tests”, *Geotechnique*, Vol.14, No.3, pp.247-261.
 27. Saeb, S. (1990), “A Variance on the Ladanyi and Archambault’s Shear Strength Criterion”, *International symposium on rock joints*, Barton & Stephansson (eds), Balkema, pp.701-705.
 28. Son, M. (2020), “Shear Strength of Rock Joints and Its Estimation”, *KSCE J. Civ. Eng.* Vol.24, pp.2931-2938.
 29. Tse, R. and Cruden, D. M. (1979), “Estimating Joint Roughness Coefficients”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.*, Abstr, Vol.16, pp.303-307.
 30. Zhao, J. (1997a), “Joint Surface Matching and Shear Strength Part A - Joint Matching Coefficient (JMC)”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.2, pp.173-178.
 31. Zhao, J. (1997b), “Joint Surface Matching and Shear Strength Part B - JRC-JMC Shear Strength Criterion”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.2, pp.179-185.

Received : January 26th, 2023

Revised : April 4th, 2023

Accepted : April 4th, 2023