

톱니형 인공 절리의 시멘트 그라우팅 전·후의 전단거동에 관한 연구

A Study on the Shear Behaviors of Non-Grouted and Cement Grouted Sawtoothed Artificial Joints

이영남¹⁾, Young-Nam Lee, 천병식²⁾, Byung-Sik Chun, 김대영³⁾, Dae-Young Kim

¹⁾ 현대건설 기술연구소 소장, Head Research Director, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 토목공학과 박사과정, 현대건설 기술연구소 선임연구원, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Senior Researcher, Hyundai Inst. of Const. Tech.

SYNOPSIS : The shear behavior of sawtoothed artificial joints grouted with cement milk was investigated in the laboratory under constant normal stress conditions. Tests were conducted on joints with asperities having inclinations of 16.7° and 26.6° , compressive strengths having 15MPa and 47MPa under a given range of normal stresses varying from 0.76 to 1.91 MPa and at a free condition of pitching, rolling and dilatancy. Results show that the effect of asperities on shear strength increase is significant up to asperity height to grout thickness (t/a) ratio of 0.3~1.0. Increase of cohesion is the main cause of shear strength increase in cement grouted sawtoothed artificial joints.

Key words : sawtoothed joints, constant normal stress condition, pitching, rolling, asperity height, grout thickness

1. 서론

암석과 절리의 역학적 특성을 추정하는데 있어서 불확실성과 자연 절리의 복잡성 그리고 제한된 현장 및 실내시험 정보로 인해 응력해석에 사용되는 암반물성을 예측하는 것은 지반공학분야에서의 중요한 문제이다. 기초, 댐, 터널 그리고 사면에서의 불연속 암반은 외력(하중, 수압, 지진력 등 과 같은)과 구속조건에 의해 영향을 받는다. 암반의 역학적거동과 수리학적 특성은 암반에 존재하는 균열, 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 성질에 크게 좌우되며, 불연속면을 따라 풍화가 진행되어 역학적, 수리학적 성질이 저하된다. 이러한 부분의 보강을 목적으로 그라우팅이 빈번하게 사용되고 있는 실정이다. 이 암반 그라우팅은 주로 차수 목적으로 사용되고 있으며, 터널이나 댐에 강도증대 목적으로의 사용은 있으나 그 효과에 대한 체계적인 연구는 미비한 실정이다. 현재까지의 그라우팅된 절리면에 대한 연구를 살펴보면 그라우팅된 절리면의 전단 강도는 주입재의 종류, 주입두께, 절리면 거칠기, 수직응력 수준 등 실험조건에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다(Szwedzicki, 1990 ; 정형식 등, 1990 ; Natau 등, 1995 ; Srivastava 등, 1990 ; 김태혁 등, 2000).

본 연구에서는 절리면에 시멘트 현탁액이 그라우팅되었을 때의 역학적 특성 변화를 알아보기 위하여 톱니형 인공절리를 제작하여(직경 100mm이 원형 시편)에 대하여 절리면 전단시험을 실시하였다. 낮은 수직응력상태 즉, $0 < \sigma_j < 0.3$ 에서 톱니 경사각을 16.7° 와 26.6° 그리고 시편압축강도를 15MPa와 45~

47MPa인 시편에 대하여 각각 그라우팅 두께(t)와 거칠기 진폭(asperity height, a)의 비 t/a에 따른 침투 전단강도, 점착력, 마찰각, 최대팽창각 등에 대한 전단 거동에 대하여 조사하였으며, 그라우팅후의 침투 전단강도를 쌍곡선 관계를 이용하여 모델화하였다.

2. 시편제작

툽니형 절리의 주형은 공업용 플라스틱을 재료로 하여 직경 99.9mm의 원판위에 경사가 16.7° 와 26.6° 인 삼각툽니(그림 1)를 10 열로 제작하고 상하가 서로 일치되도록 한쌍의 툽니 주형(그림 2(a))을 가공하였다.

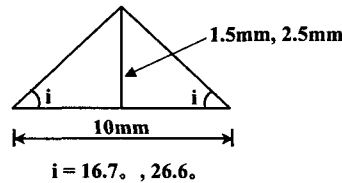
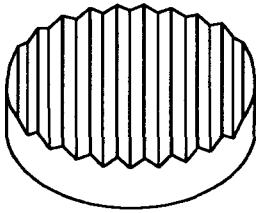


그림 1. 툽니형 시편

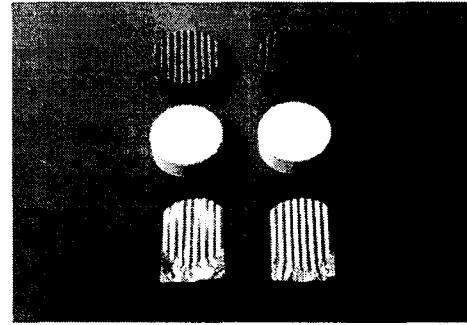


그림 2. 툽니주형, 시편, 스페이서

내경 100mm, 외경 120mm 높이 75mm의 모울드에 20mm 높이의 스페이서를 바닥에 놓고 그위에 툽니 주형 상, 하면을 각각 놓고 모울드를 길이 조절이 가능한 철재 밴드(호스 클램프)로 조인다. 툽니형 절리시편은 치재용 고강도 석고(Rhombrock) : 표준사 : 물을 1.85 : 1 : 0.625 : 1로 중량배합하여 재료혼합용 믹서에서 약 3분간 혼합한후 모울드에 부은후 진동기로 기포를 제거하고 어느정도 경화되면 표면을 매끈하게 정리한다. 약 30분이 경과한후 모울드에서 석고샘플을 탈형하고 절리면에서 툽니형 주형을 탈형하면 툽니가 서로 완전히 맞물리는 한쌍의 툽니형 절리 샘플이 완성된다. 각 절리 시편의 바닥에서 부터 툽니의 중심까지의 높이는 35mm 이다. 이들 샘플을 온도 22° ~ 25° C의 샘플 저장실에 45일간 양생하였다. 양생이 완료된 시편(그림 2(b))의 강도는 45~47MPa이며, 평탄면 전단시험에서 구한 기본 마찰각은 41.6° 이다. 또 다른 강도의 시편으로는 소석고 : 물을 1 : 0.6 으로 배합하여 같은 과정으로 양생한 시편의 강도는 15MPa 이며, 기본마찰각은 33.6° 이다.

절리면 그라우팅재로서 사용한 시멘트는 평균 입경이 4.4 μm 인 마이크로 시멘트(쌍용 시멘트 Micem 8000)를 사용하였다. 시멘트현탁액의 배합비는 시멘트 : 물 : 고유동화제(SP-8N)을 1 : 1 : 0.02로 사용하였다. 이 시멘트 현탁액을 툽니형 절리 시료에 주입 두께를 0, 0.5, 1.0, 1.5, 1.9, 2.3mm로 각각 주입하여 22° ~ 25° 의 시료 저장실에서 28일간 양생하였다. 그라우팅재의 28일 강도는 24~27MPa 이다.

시멘트를 주입하기 위해서는 우선 절리면이 완전히 일치된 상태에서 회전이나 기울어짐 없이 일정 두께 만큼 두 절리사이를 띄워야한다. 한쌍의 플라스틱 툽니 절리 주형 사이에 주입두께와 같은 두께의 알루미늄 호일을 원판으로 만들어 넣고 압착하면 툽니형의 스페이서가 완성된다(그림 2(c)). 이 스페이서를 그라우팅을 실시할 툽니형 석고 사이에 2/3 정도 넣은 상태에서 상하면의 툽니가 일치되도록 한다 음 석고 시편의 상하 측면에 테이프를 발라 고정시킨 후 스페이서를 빼내고 스페이서가 빠져나온 측면에도 테이프를 발라 고정하면 툽니가 서로 일치된 상태에서 시멘트를 주입할 두께만큼 일정 거리를 띄운 상태를 유지할 수 있다. 이 시료를 측면으로 세우고 주사기를 사용하여 절리면 사이에 준비된 시멘트 현탁액을 주입한다. 시멘트 현탁액은 약 20분이 경화하면 발열 및 경화가 시작되므로 주입은 교반한지 20분 이내에 완료하였다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

절리면 직접전단시험기는 전단변형중에도 일정 수직응력을 유지할 수 있도록 설계, 제작하였다(김대영 등, 1999). 이 시험기는 수직하중 재하 시스템, 수평하중 재하 시스템, 파워유닛, 제어장치 및 데이터 저장 장치로 구성되어있다(그림 3). 직접전단 시험기의 단면은 그림 4에 나타내었다.

전단실험에 적용한 하중조건은 일정 수직응력상태(constant normal stress)로 하였으며, 그림 5에 나타난 바와 같이 전단 변형중에 발생하는 팽창(dilatancy)이 자유롭게 허용되도록 전단 방향에 대하여 좌우 거동(rolling, θ_x)과 전후거동(pitching, θ_y)을 자유로 하였다 . 전단속도는 0.5mm/min.이며, 수직응력은 0.76, 1.15, 1.53, 1.91MPa의 4단계로 하였다. 전단은 톱니의 1/2 피치 이상인 6.6~7mm까지 발생시켰다.

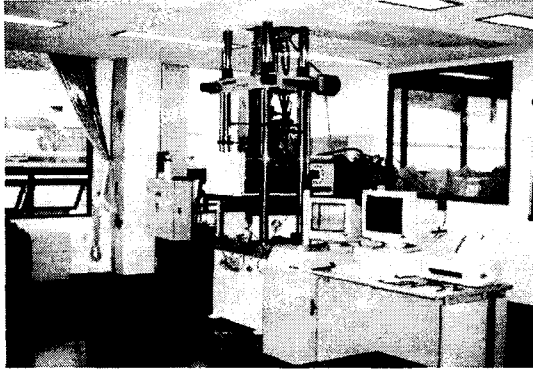


그림 3. 암석 절리면 직접전단 시스템

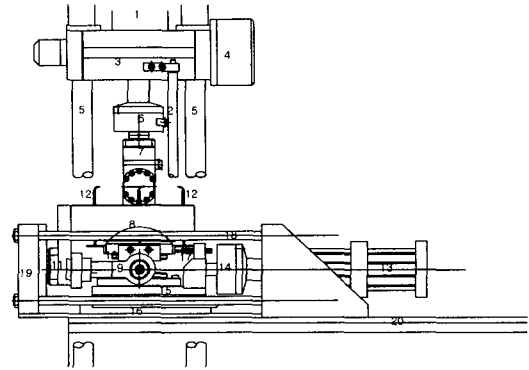


그림 4. 암석 절리면 직접전단 시험기 측면도

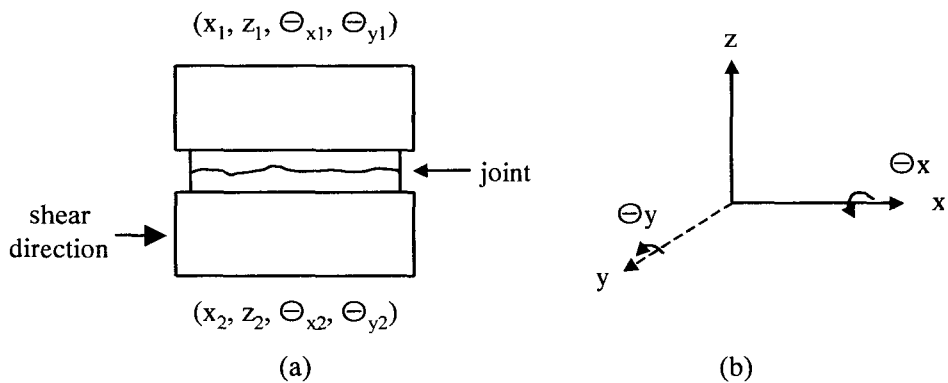
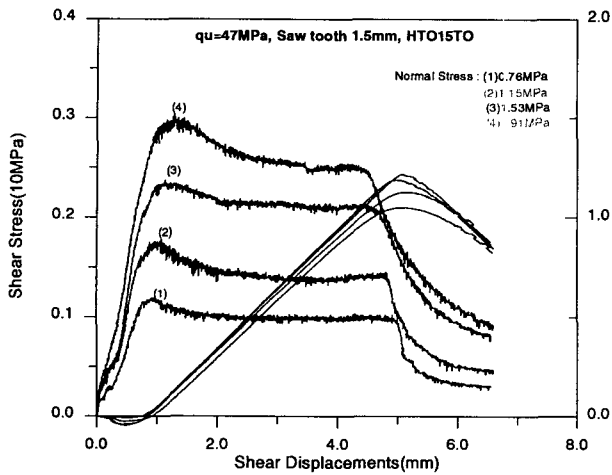


그림 5. 전단시험 자유도

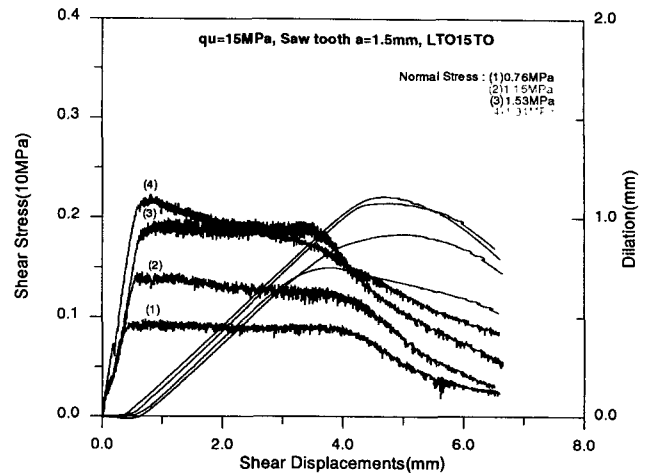
4. 실험 결과

4.1 그라우팅 전, 후의 전단 거동

그림 6은 톱니경사각 $i=16.7^\circ$ 인 시편의 그라우팅 전의 수직응력별 전단응력곡선과 팽창곡선을 나타낸 것으로 (a)는 시편강도 47MPa, (b)는 시편강도 15MPa에 대한 결과이다. (a)와 (b) 모두 수직응력의 증가에 따라 전단응력과 전단강성이 증가하였으며, 다일러턴시(dilatancy)는 감소하였다. 압축강도가 작은 (b)의 경우에는 전단변형에 의한 전단파쇄(shearing off)가 (a)에 비하여 크게 발생함을 팽창곡선에서 알 수 있다. 침투전단강도는 Patton(1966)의 모델 $\tau = \sigma_n \tan(\phi + i)$ 와 거의 일치하며 측정결과에서 구한



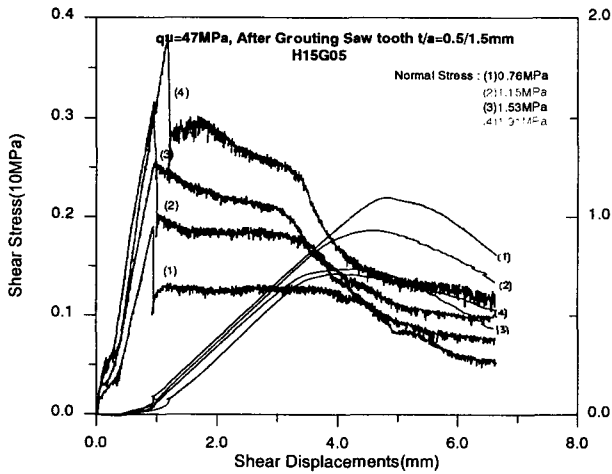
(a) $q_u=47\text{MPa}$



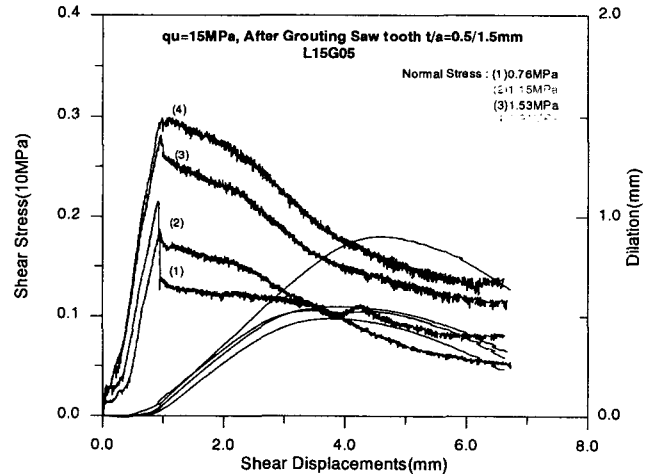
(b) $q_u=15\text{MPa}$

그림 6. $i=16.7^\circ$ 인 시편의 그라우팅 전의 수직응력별 전단곡선과 팽창곡선

침투팽창각이 i 와 일치한다. 그림 7은 그림 6과 같은 시편에 0.5mm 두께로 마이크로 시멘트 그라우팅이 실시된 시편에 대한 수직응력별 전단응력곡선과 팽창곡선을 나타낸 것이다. (a)와 (b) 모두 그림 6에 비하여 전단강도와 전단강성이 증가하였으며 초기 전단 변형시의 압축이 상당히 감소되었다. 그라우팅 전에 비하여 전단변위에 따른 팽창곡선은 침투팽창각은 증가하였으나 최종 팽창량은 감소하였다. 이는 점착력이 작용한 침투 전단강도 이후에 시멘트의 파괴 및 시편과 시멘트의 분리에 따라 강도가 작은 쪽의 전단파쇄가 발생하는 것을 의미한다.



(a) $q_u=47\text{MPa}$



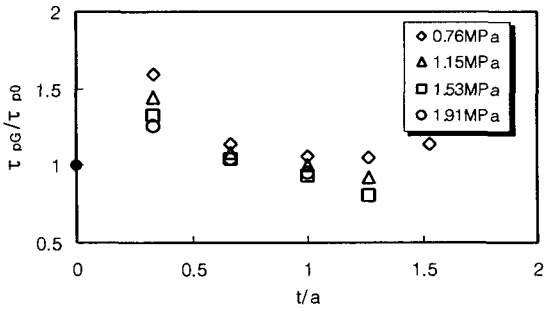
(b) $q_u=15\text{MPa}$

그림 7. $i=16.7^\circ$ 인 시편의 그라우팅 후의 수직응력별 전단곡선과 팽창곡선

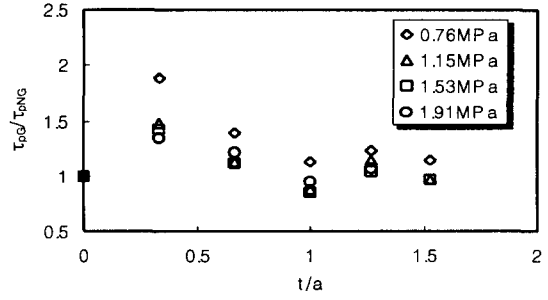
4.2 그라우팅 두께 대 진폭비(t/a)에 따른 전단특성 변화

그림 8과 그림 9에는 그라우팅 두께(t)와 절리 거칠기 진폭(a)의 비인 t/a 의 증가에 따른 그라우팅 후의 침투전단강도의 변화를 수직응력별로 그라우팅하지 않은 상태의 침투전단강도로 정규화하여 나타내었다. t/a 의 비가 작고 수직응력이 낮은 상태일 때 전단강도 증대가 크고, 그라우팅 두께가 증가하여 t/a

가 1 이상이 되면 그라우팅 하지 않은 절리의 전단강도에 수렴하는 경향을 보인다. 전단강도의 증대는 시편의 압축강도가 작고 진폭이 작은 경우, 즉 거칠기가 낮은 경우가 크게 나타났다.

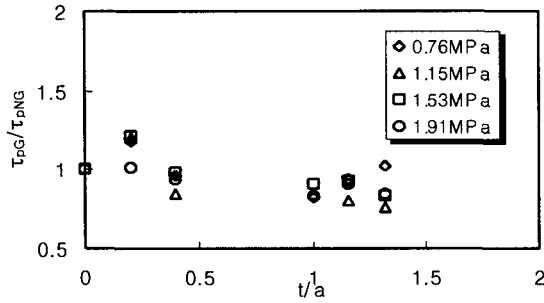


(a) $qu=47\text{MPa}$, $i=16.7^\circ$

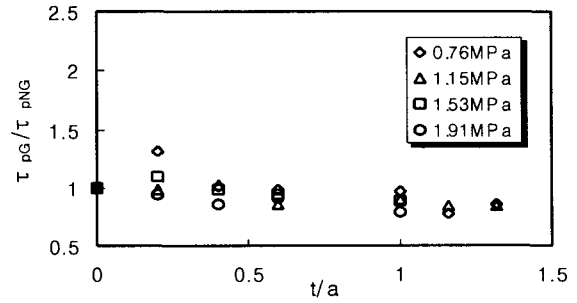


(b) $qu=15\text{MPa}$, $i=16.7^\circ$

그림 8. 그라우팅후 전단강도와 t/a의 관계

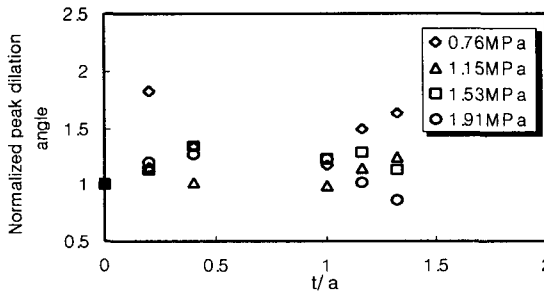


(a) $qu=47\text{MPa}$, $i=26.6^\circ$

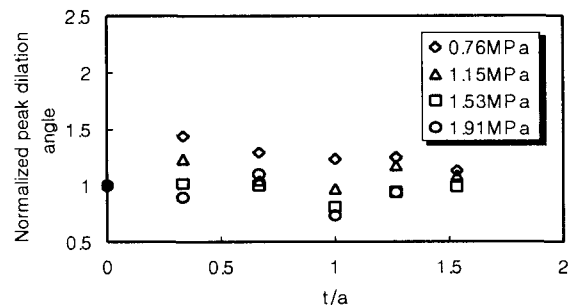


(b) $qu=15\text{MPa}$, $i=26.6^\circ$

그림 9. 그라우팅후 전단강도와 t/a의 관계

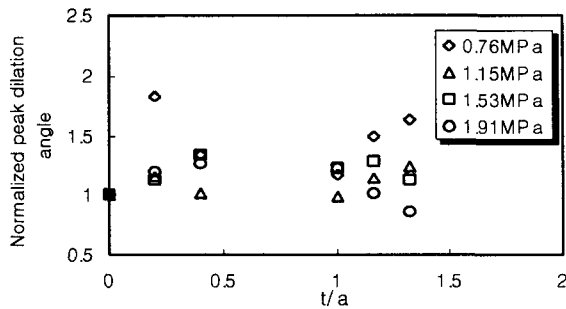


(a) $qu=47\text{MPa}$, $i=16.7^\circ$

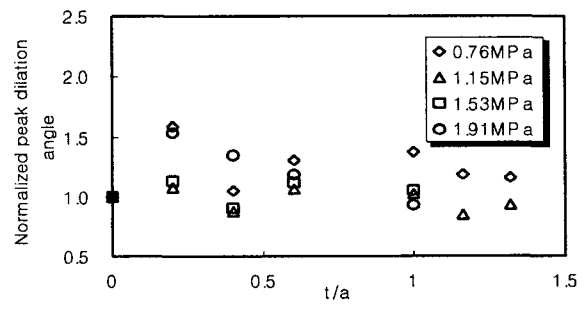


(b) $qu=15\text{MPa}$, $i=16.7^\circ$

그림 10. 침투팽창각과 t/a의 관계



(a) $qu=47\text{MPa}$, $i=26.6^\circ$

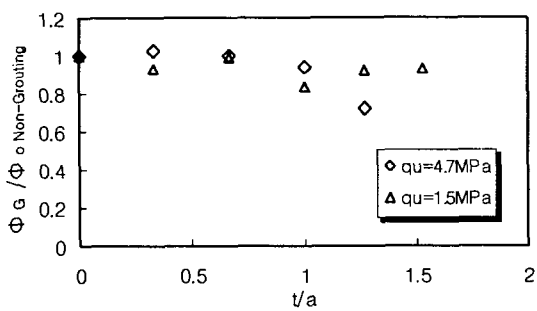


(b) $qu=15\text{MPa}$, $i=26.6^\circ$

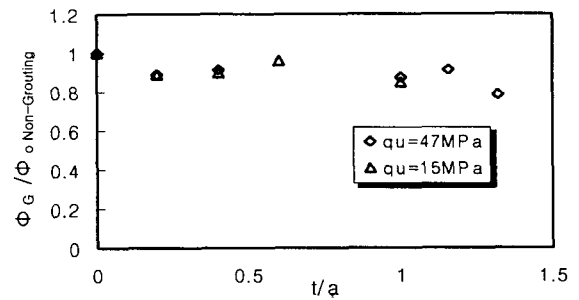
그림 11. 침투팽창각과 t/a의 관계

그림 10과 그림 11에는 t/a 와 침두팽창각을 그라우팅 전의 침두팽창각으로 정규화하여 수직응력 별로 나타내었다. t/a 와 수직응력이 작을수록 침두팽창각의 증가는 크며, t/a 가 1 이상이 되면 수렴하는 경향을 보인다. 시편의 압축강도가 크고 거칠기 진폭이 클수록 t/a 비가 작을 때 침두팽창각의 증대는 크고 t/a 의 증가에 따라 감소율이 크게 나타난다.

그림 12와 13에는 t/a 에 따른 마찰각과 점착력을 나타내었다. 마찰각은 t/a 가 0.67 이상으로 증가하면 감소하는 경향이 나타나나 t/a 의 비에 따라 감소한다고 보기는 어렵고 그라우팅전에 비하여 80% 정도에 해당한다. 점착력은 작은 t/a 에서 가장 크게 증가하고 t/a 가 증가하면 감소하는 것으로 나타난다. 큰 t/a 비에서 점착력이 크게 나타나면 마찰각은 작아진다. 그림 13에서 그라우팅 후의 전단강도 증대는 주로 점착력의 증가에 의한 것임을 알 수 있다. 위의 결과중에서 침두팽창각과 점착력이 작은 t/a 에서 증가되고 t/a 가 커지면 감소되는 관계는 낮은 t/a 에서도 침두팽창각이 감소되고 점착력은 t/a 와 관계없다는 시험결과(김태혁 등, 2000)와는 상당한 차이를 나타낸다.

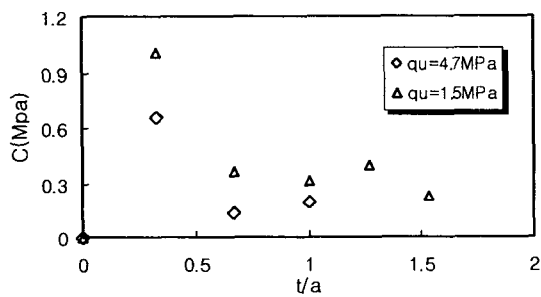


(a) $i=16.7^\circ$

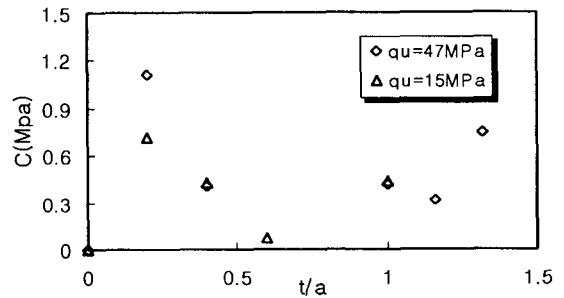


(b) $i=26.6^\circ$

그림 12. 마찰각과 t/a 의 관계



(a) $i=16.7^\circ$



(b) $i=26.6^\circ$

그림 13. 점착력과 t/a 의 관계

4.3 그라우팅후 전단강도의 예측

위에서 수행한 시험을 그라우팅에 두께와 관련하여 전단강도 증대를 쌍곡선 함수로 나타내기 위하여 Duncan과 Chang(1970)이 제안한 간편법을 적용하였다. NSI(Normalized Strength Increase)와 t/a 의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$NSI = \left(\frac{\tau_G}{\sigma_{no}} \right) = \frac{t/a}{\alpha(t/a) + \beta} \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 수직응력 σ_{no} 와 절리면 거칠기와 관련된 상수이다. 그림 14(a)를 그림 14(b)와 같이

정규화하고 이를 직선관계로 나타나기 위하여 그림 14(c)와 같이 변환하면 식(2)와 같고 α 와 β 는 그림 14(c)에서 얻을 수 있다.

$$\frac{t/a}{NSI} = \beta + \alpha(t/a) \quad (2)$$

시험의 압축강도 $q_u=47\text{MPa}$, 톱니경사각 $i=16.7^\circ$ 에 대한 실험 결과에서 경험상수 α 와 β 를 구하기 위하여 그림 15를 도시하였다. 여기에서 구한 α 와 β 를 이용하여 그라우팅 후의 전단강도를 t/a 와 수직 응력별로 도시하여 실험결과와 비교하면 그림 16과 같다.

그라우팅된 절리면의 전단강도를 예측하기 위해서는 t/a 에 따르는 점착력과 침투팽창각과의 관계, 절리면압축강도와 그라우팅재의 압축강도, 절리면 거칠기 파라미터 그리고 수직응력이 포함되어야 할 것이다. 앞으로 자연 절리면에 대한 시험 결과를 보강하여 분석하면 그라우팅후의 전단강도는 예측가능할 것으로 판단된다.

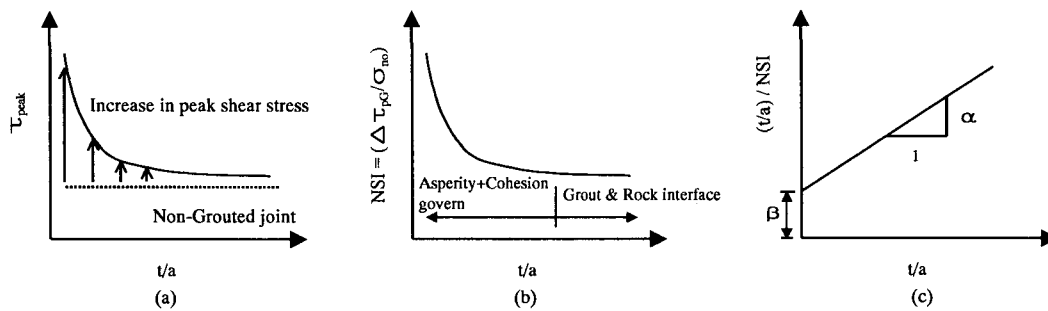


그림 14. 그라우팅에 의한 침투전단강도 증대의 예측을 위한 쌍곡선 모델의 공식화

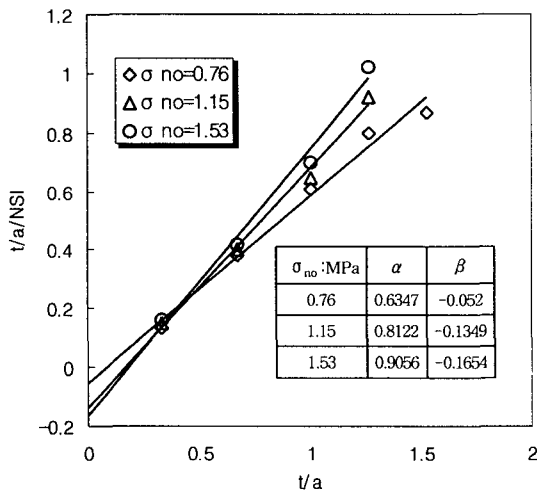


그림 15. 쌍곡선 상수 α 와 β 의 결정

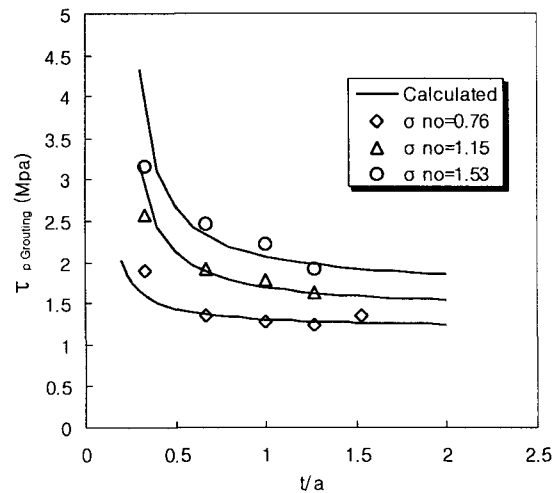


그림 16. 쌍곡선모델과 실험결과 비교

5. 결론

본 연구에서는 그라우팅에 의한 절리면의 전단특성을 알아보기 위하여 톱니형 인공절리면에 시멘트 그라우팅 후 전단시험을 실시하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 그라우팅에 의한 전단강도의 증대는 주입두께대 거칠기 진폭비(t/a)가 작을수록, 수직응력이 낮을수록

록, 시편의 압축강도가 작을수록, 거칠기 진폭이 작을수록 크며 t/a 가 1 이상에서는 그라우팅 하지 않은 절리의 전단강도에 접근한다.

- (2) 침두팽창각은 t/a 가 작을수록 수직응력이 낮을수록 크게 증대되며, t/a 와 수직응력이 증가함에 따라 증가율은 감소하며, 시편의 압축강도가 크고 거칠기 진폭이 클수록 t/a 비가 작을 때 침두팽창각의 증대는 크고 t/a 의 증가에 따라 감소율이 크게 나타난다
- (3) 전단강도의 증대 원인은 토사에서의 그라우팅 메카니즘과 같이 주로 점착력의 증가에 기인하며, t/a 가 작을수록 점착력의 증대는 크다. t/a 의 증가에 따라 마찰각은 조금 감소하는 경향을 나타내었다.
- (4) 그라우팅후의 전단강도증대를 쌍곡선 모델을 적용하여 나타내었으며, 추후 절리면에 대한 결과를 보강하면 그라우팅후의 전단강도예측에 대한 경험식을 일반화할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김대영, 천병식, 서영호, 이영남(1999), “응력, 하중, 변위 제어 방식의 암석 절리면 전단시험기의 개발”, '99 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.471-477.
2. 김태혁, 이정인(2000), “시멘트 현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 역학적 특성변화”, 한국암반공학회지, 제 10권 2호, pp.180-195.
3. 정형식, 이승호(1990), “신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도의 변화에 대한 연구”, 대한토목학회논문집, 제10권, 제3호, pp.99-106.
4. Duncan, J. M. and Chang, C. Y.(1970), “Non-linear analysis of stress and strain in soils”, *J. of Soil Mech. Found. Div., ASCEE96*, No. 5, pp.1629~1653.
5. Natau O., Mutschler Th. and Stech H. J.(1995), “Experimental quantification of the stabilizing effect of polyurethane and silicate resin”, *Proc. of 8th Int. Cong. on Rock Mechanics*, pp.645-651
6. Patton, F. D.(1966), “Multiple modes of shear failure in rock”, *Proc. 1st Congr. SRM, Lisbon*, 1, pp.509~513.
7. Srivastava R. K., Jalota A. and Amir A.A.A.(1990), “Shear behaviour of cemente grout filled artificially created planer joint”, *Proc. of Rock Joints*, pp.309-315.
8. Szwedzicki T.(1990), “Mechanical properties of strengthened rock joint”, *Proc. of Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp.905~911.