

암반과 그라우트체의 접촉면 마찰 평가를 위한 모의실내실험

박지호¹, 김영욱^{1*}, 정경한², 김정한³

¹명지대학교 토목환경공학과, ²(주)도담이앤씨중합건축사사무소, ³극동건설 주식회사

Laboratory Experimental Study on Interfacial Friction of Rock and Grout

Ji-Ho Park^{1*}, Young-Uk Kim¹, Kyeong-Han Jeong² and Jung-Han Kim³

¹Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

²Dodam Engineering & Construction CO., LTD.

³Kukdong Engineering & Construction CO., LTD.

요약 이 연구에서는 암반과 그라우팅 사이의 마찰거동에 대하여 고찰하고자 실내실험과 중대형 실험을 수행하였다. 실내실험의 경우 암반에 대한 모사는 특별히 제작된 원통형 몰드를 통해 구현하였으며 모형토조실험의 경우, 인공암반을 토조에 조성한 후 압력식과 중력식 그라우팅에 따른 그라우트체의 인발거동을 측정하였다. 두 종류의 실험 결과 모두 압력식 그라우팅이 암반과 그라우트체의 벽면 마찰거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Abstract This study investigated the friction behaviors of rock and grout through the small /large scale laboratory experiments. The small-scale laboratory tests were undertaken using a specially designed and fabricated equipments to simulate the contact surface of rock. In calibration chamber test, a artificial rock mass was prepared in soil container to measure the tensile resistance of grout. Test condition includes the grouting method of pressure involvement. The results of the tests show that the pressure grouting increases the frictional resistance significantly.

Key Words : Interfacial Friction, Pressure, Grout, Gypsum, Pullout capacity

1. 서론

최근 건물의 기초보강, 사면안정, 지하 구조물 및 매설 구조물의 보호 그리고 구조물의 지지 또는 지반보강에 앵커(anchor), 마이크로파일(micro-pile), 쏘일네일링(soil-nailing) 등 천공과 그라우팅을 이용한 공법들이 널리 적용되고 있다[1]. 특히 마이크로파일은 주변 구조물이나 지반 그리고 환경에 최소한으로 영향을 주면서 시공되며, 협소하고 접근성이 불량한 지역과 모든 종류의 토질조건에서 시공이 가능한 장점으로 사용이 증가하고 있는 추세이다. 경사시공이 가능하며 고압 그라우팅으로 인한 주변마찰력의 확보가 가능하고 인장과 압축을 동시에 저항이 가능하며, 시공과정에서 진동과 소음이 적은 공법이다

[2]. 마이크로파일은 그라운드 앵커와 비슷한 방식으로 그라우트와 지반의 마찰력으로 강재가 지지하는 외부하중을 지반으로 전달된다. 마이크로파일의 선단지지력은 직경(일반적으로 300mm 이하)이 작으므로 보통 무시하며, 그라우트/지반 부착력은 주로 지반조건이나 그라우팅 방법에 따라 크게 좌우 된다[3]. 그라우팅 방법에는 크게 중력에 의한 중력식 그라우팅(gravity grouting)과 가압에 의한 압력식 그라우팅(pressure grouting)으로 구분된다. 최근에는 그라우팅의 3~6회 반복 주입에 따른 공동 발생 및 충전 불량 등의 문제점을 지닌 중력식보다 1회의 압력 그라우팅만으로 중력식보다 보강 성능을 향상시킬 수 있는 압력식 그라우팅을 적용한 시공 사례가 증가하고 있는 추세이다[4]. 압력식 그라우팅은 토사지반에서

본 논문은 국토해양부 건설교통 RND 정책인프라사업의 연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 김영욱(yukim@mju.ac.kr)

접수일 11년 06월 08일

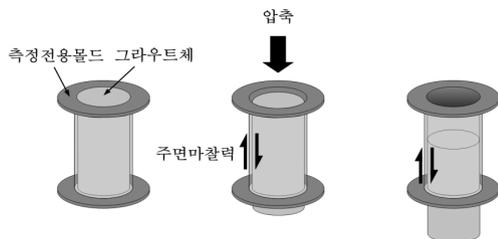
수정일 11년 08월 03일

게재확정일 11년 08월 11일

압력으로 인한 유효경 증가에 따른 부착력 증가 등의 보강효과가 향상되어 중력식 그라우팅에 비하여 전체적인 안전율이 증가되는 장점이 있다. 그러나 가압에 따른 그라우트와 지반 사이의 메커니즘이 매우 복잡하여 경험적인 설계에 의존하고 있으며, 특히 암반과 그라우팅 사이의 거동특성, 즉 암반과 그라우트 접촉면의 부착력에 대한 연구는 미흡하여 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 암반과 그라우팅 사이의 거동, 즉 마찰거동에 대해 고찰을 하고자 실내실험을 수행하였다. 암반에 대한 모사는 특별히 고안된 원통형 몰드를 통해 구현하였으며 압력식 주입 여부에 따른 공시체의 마찰거동을 알아보았다.

2. 실내실험

실내 실험은 암반과 그라우팅 사이의 거동, 즉 접촉면 부착력을 측정할 목적으로 수행한 주면마찰력실험과 각 조건에서 양생된 시료의 압축강도를 알아보기 위한 일축 압축강도시험으로 구성되며, 일축압축강도시험 종료 후에 파괴된 시료를 230배 확대하여 시료단면형상을 관찰해보았고, 압력식 몰드에 토압계를 설치하여 시간에 따른 잔류응력을 측정하였다. 공시체 제작 몰드로의 그라우팅 방법은 압력식과 중력식으로 나누어 진행하였고 일축압축강도시험을 KS F2405기준에 의거하여 각 조건에서의 압축강도를 알아보았다. 실험장비는 특수 제작된 부착력 실험용 몰드를 이용하여 무결암(intact rock) 조건을 모사하였으며 시험 중 주면마찰력을 측정할 수 있도록 하였다. 부착력은 만능시험기를 이용하여 특수 제작된 몰드 내에서 양생된 그라우트를 밀어내어 이 때 측정된 응력을 부착면적을 고려하여 측정하였다. 그림 1은 주면마찰력 실험의 모식도이다.



[그림 1] 주면마찰력 시험을 위한 시험용 몰드
[Fig. 1] Mold for skin friction test

2.1 실험조건 및 방법

실험은 압력주입통, 가압펌프, 특수 제작된 중력식과

압력식 그라우트 양생용 몰드를 사용하였으며, 다음 그림 2와 같다. 가압펌프 용량은 최대 5kg/cm²의 압력을 주입시킬 수 있으며, 중력식, 압력식 그라우트 양생용 몰드는 지름 50mm, 높이 100mm의 크기로 특수 제작하였다. 실험용 그라우트체는 물/시멘트 비(W/C, 중량비)가 0.5(현장에서 현재 사용되고 있는 일반적 비율)인 시멘트 밀크를 사용하였다. 각각의 몰드에 주입된 그라우트는 7일 동안 양생시켜 부착력실험과 압축강도시험을 수행하였고, 이를 표 1에 정리하였다.

[표 1] 실험 조건

[Table 1] The experimental conditions

Case	주입방법	몰드 크기		W/C (%)	양생기간 (일)	주입압력 (kg/cm ²)
		지름 (mm)	높이 (mm)			
1	중력식	50	100	50	7	0
2	압력식					5

실험은 그라우트 양생 후 만능시험기로 완성된 그라우트체를 밀어내어 주면마찰력을 측정하였다. 압력식 그라우팅은 압력식 몰드에 5kg/cm²의 일정한 압력으로 압력주입통에 담겨진 시멘트 밀크를 주입하였으며, 이 때 주입하는 반대쪽 출구로 시멘트 밀크가 유출될 때까지 주입하고 시멘트 밀크가 유출되는 시점에서 유입구의 밸브를 잠가 그라우트체의 성형이 완료될 때까지 몰드내의 압력이 유지되도록 하였다. 중력식 그라우팅은 압력식 그라우팅방법과 동일한 방법으로 주입하되 주입한 후에 즉시 중력식 몰드의 밸브를 열고 주입압력을 소산시켜 그라우트를 양생하였다.



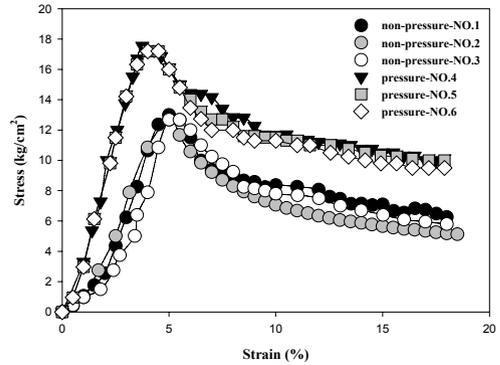
(a) 주면마찰력측정 (a) Before test
(b) 실험완료 (b) After test

[그림 2] 주면마찰력실험

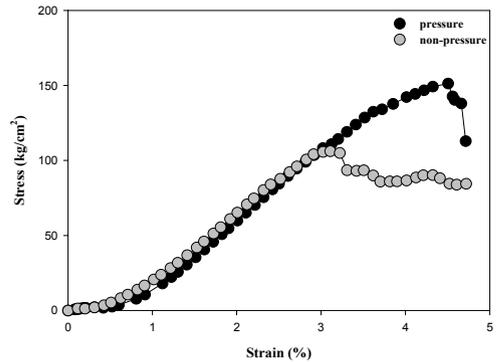
[Fig. 2] Skin friction experiments

2.2 실험결과

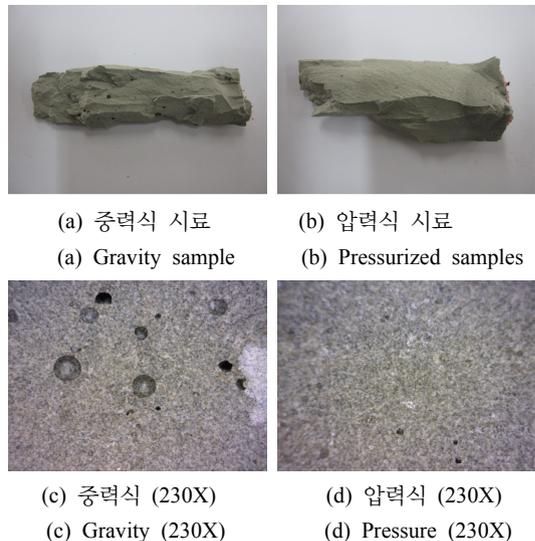
주면마찰력실험은 그라우팅방법에 따른 분류로 나누어지는 중력식방법과 압력식방법이 각각 압반에 적용되었을 경우에 압반과 그라우트 사이에 발생하는 거동현상, 즉, 부착력의 크기를 실내실험을 통하여 측정하고 비교·분석하는 목적으로 수행되었다. 실험은 실험과정에서 발생할 수 있는 전반적인 문제점을 예비 실험을 통하여 미리 파악하여 대책강구와 효과적인 실험 진행 방법을 결정하고 각각의 조건에서 일정한 결과값을 보일 때까지 수차례 실험한 후에 최초 제시한 실험 조건으로 3번의 실험을 수행하여 평균값을 실험 결과 값으로 사용하였다. 그 결과 그림 3과 같이 모든 경우에서 압력식 그라우트가 중력식 그라우트보다 상대적으로 주면마찰력-변형률곡선 상에서 최대응력이 크게 나타났다. 이 때 압력식은 약 17.3kg/cm^2 , 중력식은 약 12.8kg/cm^2 의 최대응력이 측정되었고, 압력식의 경우가 중력식보다 최대응력이 약 26% 증가된 것으로 나타났다. 이는 실내실험으로부터 압력식 그라우트가 중력식그라우트보다 상대적으로 큰 주면마찰력을 발휘하는 것을 간접적으로 판단할 수 있다고 판단된다. 따라서, 압반에 그라우팅시공을 할 경우에 그라우팅방법을 달리하는 것으로 시공효과(벽면마찰력)가 다르다는 것을 알 수 있었다. 그림 4와 같이 일축압축시험 결과로부터 중력식 보다 압력식에서의 일축압축강도가 중력식의 일축압축강도보다 약 30%정도 크게 나타났다. 이는 주입량의 차이에서 기인한다고 판단이 되는데 예비 실험결과 압력식으로 밀크를 몰드에 주입하였을 경우 약 10%의 밀크가 중력식 주입보다 더 들어가는 것으로 나타났다. 시료 파괴 후 230배 확대하여 조사한 시료의 표면을 그림 5에 나타냈는데 이에서 보이듯이 압력식으로 주입한 시료의 표면에 분포하는 기포의 수가 매우 적으며 조밀한 입자구성을 볼 수 있다. 그림 6은 그라우트 주입시에 분포하는 잔류응력을 양생일수와 함께 보여주고 있다. 잔류응력측정실험결과 주입압력은 주입시 발생하는 에너지 손실 등의 요인으로 최초 설정된 5kg/cm^2 보다 다소 작은 4.32kg/cm^2 로 측정되었고 이 주입압력은 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 제작된 몰드결합부분으로부터 일부 빠져나가는 압력과 그라우트체의 체적변화에서 인하는 것으로 판단된다. 그러나 이 잔류응력이 압력식으로 압반에 그라우팅한 경우 중력식으로 그라우팅한 경우보다 상대적으로 지반의 초기 지중응력의 증가에 기여할 것으로 판단되며, 이 잔류응력의 영향으로 중력식보다 압력식의 경우에서 상대적으로 주면마찰력이 커지는 이유의 한 부분으로 판단된다.



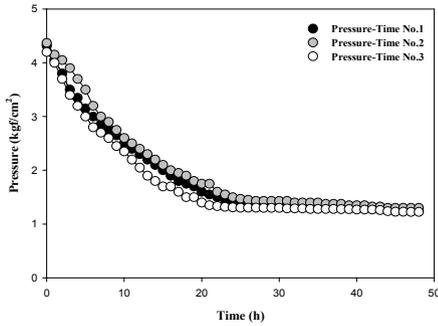
[그림 3] 주면마찰력 실험결과
[Fig. 3] Results of skin friction test



[그림 4] 일축압축강도 시험결과
[Fig. 4] Uniaxial compression test results



[그림 5] 시료단면관찰
[Fig. 5] Sample section

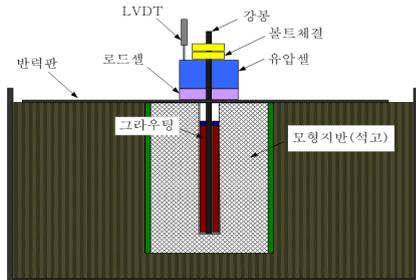


[그림 6] 잔류응력측정 실험결과
[Fig. 6] Residual stress measurement

3. 모형토조실험

3.1 실험 방법 및 조건

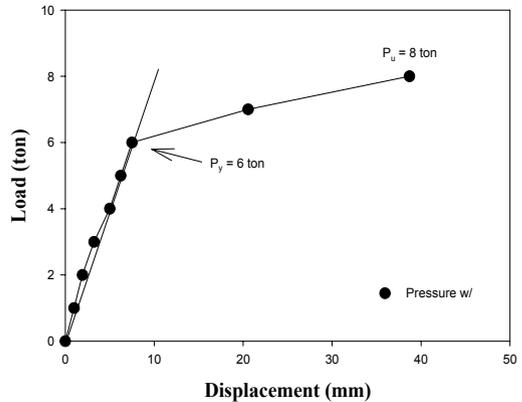
모형토조 실험은 압력식 그라우팅의 암반벽면마찰 증대효과에 관한 현장 실험을 진행하기에 앞서서 비교적 큰 스케일로 모형토조에 인공암반을 모사하고 인공암반에서의 압력식과 중력식의 인발력을 측정하여 실내실험결과와 비교·분석하는 목적으로 수행하였다. 지반은 석고를 이용하여 가로, 세로, 높이가 각각 450mm × 300mm × 800mm인 불연속면이 없는 인공암반을 모사하고 PVC 파이프를 사용하여 천공(Ø50mm)하였다. 인장시험을 수행하기 위한 텐션은 스틸재질의 원형봉강(Ø16mm)을 사용하여 천공된 곳에 삽입하고, W/C가 50%인 시멘트믹크로 그라우팅 주입을 실시하였다. 팩킹은 실리콘재질로 자체 제작하여 이형봉강에 설치하여 원활한 그라우팅 주입을 할 수 있도록 하였다. 양생은 그라우팅 후 7일간 실시하여 중공형 유압잭인 인발시험기와 로드 셀로 인발시험을 수행하였다. 그림 7은 모형토조 인발실험의 모식도이다. 석고의 일축압축강도는 20MPa를 갖도록 성형하여 상사법칙에 의한 연암을 모사하였으며 양생 후 인발시험기(중공형 유압잭)와 로드셀, LVDT를 사용하여 인발력과 인발량을 측정하였다.



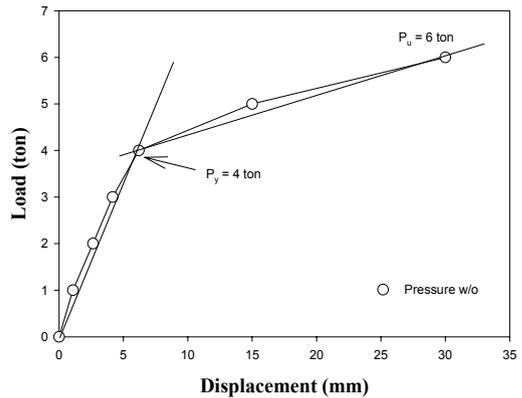
[그림 7] 모형토조 인발실험 모식도
[Fig. 7] Calibration chamber pullout test

3.2 실험 결과

모형토조실험결과에는 그림 8에 나타나듯이 인발량은 중력식의 경우에 30.0mm, 압력식의 경우에는 32.1mm로 거의 비슷한 결과를 보였다. 그러나 극한강도는 중력식의 경우 6ton, 압력식의 경우 8ton, 항복강도는 중력식의 경우 4ton, 압력식의 경우 6ton으로 중력식으로 그라우팅한 시험체보다 압력식으로 그라우팅한 시험체의 인발력이 약 25% 정도로 크게 나타났으며 압력식의 주면마찰력 크기가 중력식의 주면마찰력보다 약 26%크게 나타난 실내실험결과와 아주 유사 결과를 나타내었다. 인발량은 비슷하지만 중력식보다 압력식의 인발력이 크게 나타나 압력식으로 그라우팅하여 시공할 경우에 중력식으로 그라우팅한 경우보다 상대적으로 보강효과가 증가될 것으로 판단되었다.



(a) 극한강도 및 항복강도 (압력식)
(a) Ultimate and yield strength (gravity)



(b) 극한강도 및 항복강도 (중력식)
(b) Ultimate and yield strength (pressure)

[그림 8] 모형토조실험결과
[Fig. 8] Results of Calibration chamber test

4. 결론

압력식 그라우팅은 토사지반에서 압력으로 인한 유효경 증가에 따른 부착력 증가 등의 보강효과가 향상되어 중력식 그라우팅에 비하여 전체적인 안전율이 증가되는 장점이 있다. 그러나 가압에 따른 그라우트와 지반 사이의 메커니즘이 매우 복잡하여 경험적인 설계에 의존하고 있으며, 특히 암반과 그라우팅 사이의 거동특성, 즉 암반과 그라우트 접촉면의 부착력에 대한 연구는 미흡하여 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이 연구에서는 특수 제작된 부착력실험용 몰드와 만능시험기를 이용하여 암반과 그라우팅 사이의 거동, 즉 부착력을 그라우팅 방법을 달리하여 비교·분석하였고, 실내 및 모형토조실험을 수행하여 압력식 주입에 따른 인발력을 차이를 알아보았으며 이에 따른 결론을 다음과 같이 내릴 수 있었다.

주면마찰력 실험결과로 모든 경우에서 압력식 그라우트가 중력식 그라우트보다 상대적으로 응력-변형률곡선 상에서 최대응력이 크게 나타났다. 이 때 압력식은 약 17.3kg/cm², 중력식은 약 12.8kg/cm²의 최대응력이 측정되었고, 압력식의 경우가 중력식보다 최대응력이 약 26% 증가된 것으로 나타났다. 이는 실내실험으로부터 간접적으로 압력식 그라우트가 중력식그라우트보다 상대적으로 큰 주면마찰력을 발휘하는 것으로 판단된다. 따라서, 암반에 그라우팅시공을 할 경우에 그라우팅방법을 달리하는 것으로 시공효과가 다르다는 것을 알 수 있었다. 또한, 압력식으로 그라우팅된 그라우트체의 일축압축강도가 중력식으로 그라우팅 된 그라우트체보다 약 30% 크게 나타났다. 잔류응력측정결과로 주입압력은 주입시 발생하는 에너지 손실 등의 요인으로 최초 설정된 5kg/cm²보다 다소 작은 4.32kg/cm²로 측정되었다. 주입압력은 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 약 24시간이 경과할 때까지 감소하는 경향을 보이다가 실험 종료시까지 약 1.4kg/cm²의 압력으로 유지되어 잔류응력으로 수렴하는 결과를 보였다. 따라서 잔류응력은 압력식으로 암반에 그라우팅한 경우에 중력식으로 그라우팅한 경우보다 상대적으로 지반의 초기 지중응력의 증가에 기여할 것으로 판단되며, 이 잔류응력의 영향으로 중력식보다 압력식의 경우에서 상대적으로 주면마찰력이 커지는 이유의 한 부분으로 판단된다. 모형토조실험결과로 인발량은 중력식의 경우에 30.00mm, 압력식의 경우에는 32.10mm로 거의 비슷한 결과를 보였다. 그러나 극한강도는 중력식의 경우 6ton, 압력식의 경우 8ton, 항복강도는 중력식의 경우 4ton, 압력식의 경우 6ton으로 중력식으로 그라우팅한 시험체보다 압력식으로 그라우팅한 시험체의 인발력이 약 25% 정도로 크게 나타났으며 압력식의 주면마찰력

크기가 중력식의 주면마찰력보다 약 25% 크게 나타난 실내실험결과와 같은 경향을 나타내었다. 이에 따라 각 경우에 인발량은 비슷하지만 중력식보다 압력식의 인발력이 크게 나타나 압력식으로 그라우팅하여 시공할 경우에 중력식으로 그라우팅한 경우보다 상대적으로 보강효과가 증가될 것으로 판단된다.

References

- [1] Young Shik Paik et al. "Retaining Wall Design and Construction", pp.965, ENGINEERS, 1999.
- [2] Myoung Mo Kim et al. "Design of Ground Improvement Method", pp.390 SHARON, 2004
- [3] Duncan C.Wyllie "Foundations on rock", pp.333, E&FN SOPN, 1992
- [4] Kyeong Han Jeong et al. "A Study on Pullout-Resistance increase in soil nailing due to pressurized grouting" Korean Geotechnical Society, Vol.24 No.4, pp.101-114, 2008.

박 지 호(Ji-Ho Park)

[정회원]



- 2004년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목고등설계교육원 박사 후 연구원

<관심분야>
지반공학

김 영 욱(Young-Uk Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : 펜실베니아 주립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
지반공학

정 경 한(Kyeong-Han Jung)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : (주)도담이앤씨 건설사업본부 전무이사

<관심분야>
지반공학

김 정 한(Jung-Han Kim)

[정회원]



- 2000년 6월 : 경희대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 8월 : 경희대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 1월 : 한국해외기술공사 지반공학부
- 2008년 5월 ~ 현재 : 극동건설 기술연구소 선임연구원

<관심분야>
지반공학