

# 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 절리암반의 역학적특성 변화

김태혁<sup>1)</sup> 이정인<sup>2)</sup>

## 1. 서론

주입공법은 터널의 보강이나 폐공동상부의 지표침하억제책으로써 최근 적용사례가 증가하고 있으나, 그 효과의 공학적 평가에 관한 연구는 매우 부족한 실정이며 특히 절리를 포함한 불연속암반의 주입재에 의한 역학적 특성변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 형편이다. 이에 따라 본 연구에서는 주입에 의한 암석절리면의 수직압축특성과 전단특성의 변화를 규명하기 위하여 신선한 인공절리시료에 대하여 시멘트현탁액을 주입한 후, 절리압축시험과 직접전단시험, 이축압축시험을 실시하여 변형특성을 조사하였다. 또한 시멘트현탁액 주입공법이 적용된 고속도로터널에 대한 3차원 유한차분해석을 실시하여, 이를 현장계측자료와 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다.

## 2. 시료, 실험장치 및 실험방법

### 2.1 시험편제작

시멘트현탁액주입에 의한 단일절리면의 역학적특성변화에 대해 알아보기 위해 황등화강암과 여산대리석을 암석시료로 이용하였다. 화강암의 경우 가로×세로×높이가 100×150×100 mm, 대리석의 경우 100×150×100 mm인 블록형태로 성형한 후, 인장균열 발생장치의 양쪽가압판 사이에 놓고 하중을 가하여 인위적으로 절리면을 생성하였다. 이 인공절리시료에 대하여 레이저변위계를 이용한 3차원 거칠기측정을 실시하여 표면 거칠기 특성과 거칠기 평균 진폭을 구하였으며, 절리면거칠기 측정후 시멘트현탁액 주입을 실시하였다. 본 연구에서는 절리에 대한 주입재의 충전이 중력에 의해 이루어지며, 주입재가 절리면에 완벽하게 충전되는 것으로 가정하여 연구를 수행하였다. 또한 주입전후 불연속 암반의 변형특성에 대해 조사하기 위하여 여산대리석을 가로×세로×높이가 400×400×30 mm인 평판으로 절단한 후, 평판용인장절리 발생장치 기구를 이용하여 인공적으로 절리균을 만들어 절리암반모형을 제작하였다. 불연속암반모형은 한 개의 절리균을 포함한 단일절리균 시료와 두 개의 직교하는 절리균을 포함한 직교절리균시료로 성형하였으며, 절리간격은 4, 8, 13.3, 20 cm로 성형하여 시편을 제작하였다.

### 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 절리면의 거칠기와 평균진폭의 측정을 위해서 Fig. 2.1과 같은 레이저 변위계를 이용한 절리면거칠기측정기를 사용하였다. 절리면의 거칠기를 나타내는 기본해석 파라미터로는 평균거칠각을 사용하였으며, 측정된 거칠기 형상을 이용하여 절리면의 거칠기 평균진폭을 측정하여 주입두께를 정규화시켰다. 본 연구에서는 최대 200톤 까지 하중을 가할 수 있는 일본 Shimadzu사의 만능재료시험기와 일면직접전단시험기를 사용하여 시험을 수행하였으며, 시편의 변위와 하중측정을 위하여 측정시스템인 System 5000을 병행하여 사용하였다. 이축압축시험을 위하여는 네 방향에 10톤 용량의 동일한 램이 부착되어 있는 이축압축시험장치를 사용하였으며 하중의 크기는 유압펌프에 부착되어 있는 압력계로부터 측정하였고, 변위는 실험장치에 설치된 8개의 다이알 게이지를 이용하여 측정하였다.

1) 서울대학교 자원공학과 박사졸업

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 주입후 절리의 수직변형특성

Fig. 3.1에서 보는 바와 같이 시멘트현탁액을 주입한 후 절리의 수직압축곡선은, 수직응력이 작은 초기단계에서는 비교적 선형적인 변형을 나타내었으나 수직응력이 커짐에 따라 절리면거칠기에서의 응력집중으로 주입재의 국부적파괴가 발생하여 수직변형이 급격하게 증가 하였다. 주입후 수직응력 2 MPa까지의 수직변형량은 주입전의 1/10 정도로 감소하였다.

#### 3.2 주입후 절리의 전단변형특성

신선한 화강암과 대리석시료에 대한 주입후 전단시험결과, 절리면의 파괴는 대부분 주입재와 절리면사이 접촉면에서 발생하였다. 주입후 절리의 전단파괴식은 Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 1 MPa내외의 접촉력을 가지는 곡선형태의 파괴식으로 변화였고 주입두께가 커질수록 주입후 절리면의 최대전단강도가 작아지는 것으로 나타났다. 이 경우 접촉력은 주입재와 절리면사이 접촉면에서 주입재의 수화에 의해 발생되며, 주입두께에 따른 최대전단강도의 감소현상은 절리간극내의 주입재가 절리면 유효거칠기를 떨어뜨려 절리면 팽창성분을 감소시키기 때문으로 판단된다. 주입후 단일암석절리의 전단특성을 주입두께와 비교해 본 결과, 주입두께가 커질수록 최대전단강도는 작아져 일정값에 수렴하는 경향을 나타내었고, 전단강성과 최대팽창각은 분산은 심하나 주입두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 주입재에 의한 유효거칠기의 감소효과로부터 발생한 것으로 판단된다. 시험결과를 바탕으로 다음과 같은 주입후 신선한 절리면의 최대전단강도경험식을 유도하였다.

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \tan[\phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n)]$$

F는 유효거칠기감쇠함수로 주입두께대 거칠기평균진폭비(f/a)와 지수함수관계를 가지는 것으로 제시하였다.

#### 3.3. 주입후 절리암반모형의 변형특성

인공적인 절리균을 발생시킨후 주입을 실시한 암반모형의 변형거동은 주입전에 비하여 상당히 선형적으로 변하였으며, 주입후 변형계수도 증가 하는 것으로 나타났다. 또한 작용하는 최소주응력의 크기에 상관없이 절리간격이 커짐에 따라 주입전 변형계수에 대한 주입후 변형계수비가 지수함수적으로 감소함을 확인할 수 있었다(Fig. 3.4). 최소주응력의 크기가 커짐에 따라 주입에 의한 변형계수의 보강비는 작아짐을 확인할 수 있었다. 시험결과로부터 주입전 암반의 탄성계수와 주입후 암반의 탄성계수 증가율은 Fig. 3.5에서 보는 바와 같이 지수함수적인 관계가 있음을 확인하였으며, 다음과 같이 표시할 수 있는 것으로 나타났다.

$$E_a = A * E_b * \exp[B * E_b]$$

### 4. 유한차분법을 이용한 주입공법의 효과해석

#### 4.1 해석조건

본 연구에서는 FLAC 3D를 사용하여 시멘트현탁액 주입에 의한 암반의 보강효과를 해석하였다. 해석은 중부고속도로 11공구에 위치해 있는 단양터널상행선 5k320부터 약 100 m 구간에 대해 수행되었으며 시멘트주입에 의한 지반보강의 효과를 유한차분법을 이용하여 굴착단계별로 해석하였다. 조사된 RMR값과 현장에서 측정된 탄성계수를 바탕으로 해석지반의 물리적,역학적성질을 Hoek-Brown이 제시한 방법을 사용하여 Table 4.1과 같이 결정하였다.

#### 4.2 해석결과

해석결과 주입공법이 적용되었을 경우, 터널의 천단과 측벽에서 발생하는 변위는 주입공

법을 적용하지 않을 경우의 25%이내로 감소하는 것으로 해석되었다. 보강효과의 크기에 관계없이 터널바닥중심의 변위가 가장 큰 변위를 보였고, 그 다음이 측벽, 터널천단의 순으로 변위량이 발생하였다. Fig. 4.1은 5k350지점에서 계측된 자료와 본 해석결과 얻어진 해석자료를 비교한 그림이다. 굴착초기에는 해석치가 계측치와 거의 유사하게 나타났으나, 굴착단계가 진행됨에 따라 계측치와의 오차가 커지는 것으로 나타났으며, 12번의 굴착단계가 끝난 후 해석에 의해 구해진 내공변위는 계측치보다 1.4배정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 현장의 계측이 굴착후 하루가 지난 뒤부터 이루어져 계측치가 굴착에 의한 초기변형량을 반영하고 있지 않고, 현장시험결과의 부족으로 해석자료로 이용한 암반의 정확한 물리적, 역학적 특성의 추정이 어렵기 때문으로 판단된다.

## 5. 결론

1) 시멘트현탁액을 주입한 시료의 수직압축시험결과, 수직응력이 작은 초기단계에서는 비교적 선형적인 수직변형을 나타내었으나 수직응력이 커짐에 따라 수직변형이 급격하게 증가 하였다.

2) 주입후 절리면의 파괴식은 1 MPa내외의 점착력과 주입전보다 낮은 마찰각을 가지는 곡선형태의 파괴식으로 변화하였으며 시험에서 얻은 전단강도를 토대로 주입후 절리면의 최대 전단강도에 대한 다음과 같은 경험식을 유도하였다.

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \tan[\phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n)]$$

4) 인공적인 절리군을 발생시킨후 주입을 실시한 암반모형의 변형거동은 주입전에 비하여 상당히 선형적으로 변화하였으며, 주입후 변형계수도 증가 하는 것으로 나타났다. 주입전 암반의 탄성계수와 주입후 암반의 탄성계수 증가율은 지수함수적인 관계가 있음을 확인하였으며, 다음과 같이 표시할 수 있는 것으로 나타났다.

$$E_a = A * E_b * \exp[B * E_b]$$

6) 주입후 절리의 전단시험과 이축압축시험결과를 기초로 고속도로터널에 대하여 주입에 의한 보강효과를 3차원 유한차분법을 이용하여 검토한 결과, 해석에 의해 구해진 내공변위는 계측치보다 1.4배정도 크게 나타났으나, 굴착이전의 변위를 고려하면 결과의 변위수렴 양상은 유사하게 나타남을 확인 할 수 있었다.

## 참고문헌

1. Barton N. and Choubey V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mech. Vol. 10, pp. 1-54,
2. Papaliangas T. Hencher S.R., Lumsden A.C. and Manolopoulou S., 1993, The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No.2, pp. 81-91.
- 3 석탄산업합리화사업단, 1997, "폐광지역 지반침하 메커니즘 및 침하방지 공법에 관한 연구," pp. 106-282.
- 4 김태혁, 1999, "시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 절리암반의 역학적특성 변화에 관한 연구," 박사학위 논문, 서울대학교, p.154.

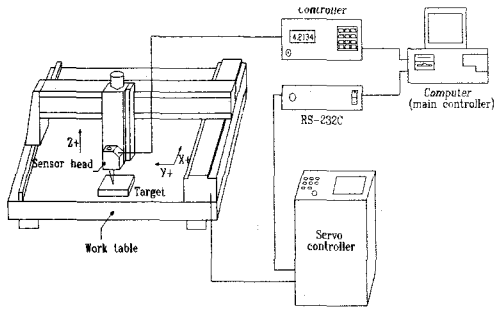


Fig. 2.1. Schematic diagram of coordinate measuring machine.

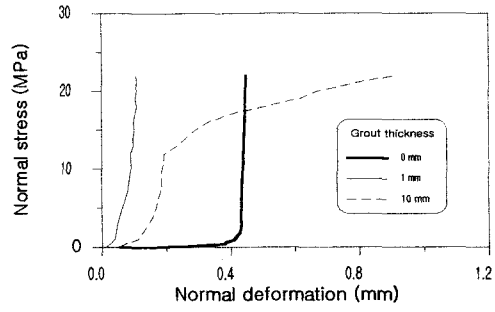


Fig. 3.1. Normal stress-normal deformation curve for a rough grouted joint specimen in granite (mated)

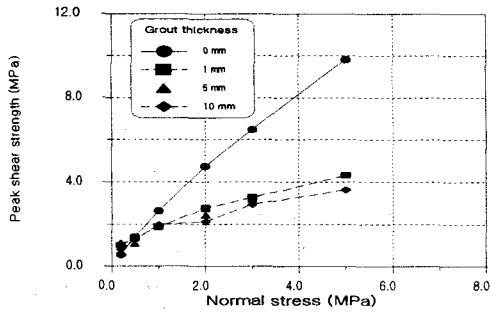


Fig. 3.2. Relationship between peak shear strength and normal stress of cement grouted granite joint.

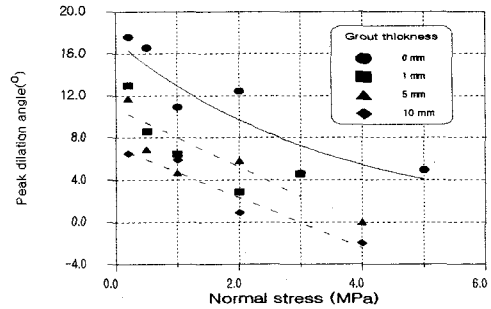


Fig. 3.3. Relationship between peak dilation angle and normal stress of cement grouted granite joint.

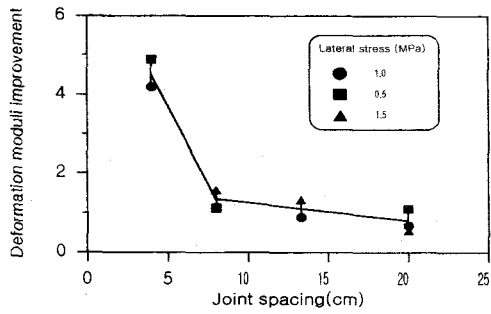


Fig. 3.4. Relationship between joint spacing and deformation moduli improvement (Joint set angle 45,135)

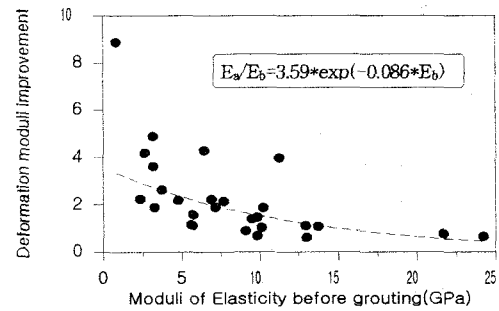


Fig. 3.5. Relationship between deformation moduli before grouting and deformation moduli improvement

Table 4.1. Material properties for FDM analysis

Property	Soil	Weathered rock 1	Weathered rock 2	Grouted rock (effect 100%)	Grouted rock (effect 50%)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,900	2,200	2,300	2,300	2,300
Shear modulus (MPa)	18	692	950	4,250	2,600
Bulk modulus (MPa)	50	1,500	1,670	7,470	4,600
Friction angle (°)	15	15	19	39	29
Cohesion (MPa)	0.025	0.05	0.17	1.20	0.95
Tensile strength (MPa)	0	0.025	0.085	0.60	0.48

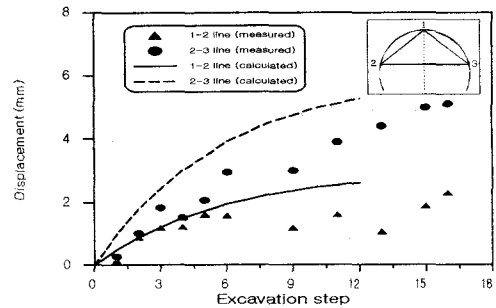


Fig. 4.1. Comparison of convergence between calculated and measured data.