

시멘트현탁액 주입에 의한 절리암반의 역학적 특성 변화

김태혁^{1)*}, 이정인²⁾

The Effect of Cement Milk Grouting on the Deformation Behavior of Jointed Rock Mass

Tae-Hyok Kim and Chung-In Lee

Abstract Though the Grouting has been in use for a long time, it is still regarded as a technique rather than engineering. The study of ground improvement by grouting is rare especially in jointed rock mass. In this study, biaxial compression tests were performed in the jointed rock mass models with rough surface joints assembled with blocks before and after grouting. The load-deformation curves of the jointed rock masses showed a non-linear relationship before grouting but showed a relatively linear deformation behavior after grouting. Improvement ratio (deformation modulus after grouting/deformation modulus before grouting) decreased with increasing joint spacing and lateral stress. Improvement ratio decreased exponentially with increasing deformation modulus of the rock mass model before grouting. Three-dimensional FDM analysis was performed to a highway tunnel case using experimental data of grouted rock. The convergence of the tunnel predicted after grouting by the numerical modelling coincided with those attained from the field measurement.

KeyWords: Grouting, Jointed rock mass, Biaxial compression tests, Deformation modulus, Three-dimensional FDM analysis

초 록 주입공법은 터널 등 지하구조물의 보강법으로 적용사례가 증가하고 있으나, 그 효과의 공학적 평가에 관한 연구는 매우 부족한 실정이며, 특히 절리를 포함한 불연속암반의 주입에 의한 역학적 특성변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 형편이다. 따라서 본 연구에서는 주입에 의한 불연속암반의 변형특성을 규명하기 위하여 절리군의 경사, 절리군의 간격을 달리한 절리암반모형을 제작한 후, 이에 대한 주입전후에 대한 이축압축시험을 실시하여 변형특성을 조사하였다. 또한 시멘트현탁액 주입공법이 적용된 고속도로터널에 대한 3차원 유한차분해석을 실시하여, 이를 현장측정자료와 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다. 주입후 절리암반모형에 대한 이축압축시험결과, 절리암반의 하중-변형곡선은 주입전의 비선형에서 선형적으로 변하였으며, 변형계수도 증가하는 것으로 나타났다. 절리간격과 최소주응력이 커짐에 따라 주입전 변형계수에 대한 주입후 변형계수의 비가 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 주입전후의 이축압축시험결과로부터 주입전 암반의 변형계수와 주입후 암반의 변형계수의 관계를 지수함수로 표현한 경험식으로 제시하였다. 절리암반의 주입에 의한 보강효과를 3차원 유한차분법을 이용하여 해석한 결과, 주입공법이 적용될 경우 터널의 천단과 측벽에서 발생하는 변위는 현저하게 감소하는 것으로 해석되었으며, 굴착이 진행됨에 따라 발생하는 변위의 양상이 현장 측정결과와 유사한 경향을 나타내었다.

핵심어: 시멘트현탁액 주입, 불연속암반, 이축압축시험, 변형계수, 3차원 유한차분법

1. 서 론

지하구조물이 건설되는 절리암반의 역학적 거동은 암반 내 존재하는 균열, 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면

의 기하학적 형태와 역학적 성질에 크게 좌우된다. 그러므로 이러한 불연속면은 암반구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 되며, 불연속면을 포함한 암반구조물의 보강을 위하여 여러 공법들이 적용되고 있다. 이러한 보강공법중 주입공법은 파쇄대 등 불연속면이 발달한 암반을 대상으로도 최근 그 적용사례가 증가하고 있다.

그러나 현재까지 현장에서 적용되고 있는 주입공법은 시공자의 경험에 주로 의존하고 있으며, 그 효과에

¹⁾ 삼성물산 건설부문 과장

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

*교신저자(Corresponding Author): kimtaehyok@samsung.com

접수일: 2002년 12월 20일

심사 완료일: 2003년 9월 19일

대한 검증도 현장에서의 탄성파속도측정이나, 투수시험을 통하여 평가하고 있는 실정이다. 현장실험을 통해 주입에 의한 암반의 보강효과를 연구한 연구자들에 따르면 주입후 암반의 변형은 상당히 감소하는 것으로 나타나며 그 효과는 주입전 암반의 상태와 관련된 것으로 보고되고 있다¹⁾²⁾. 그러나 아직까지 주입에 의한 암반의 보강효과를 암반의 특성과 관련하여 평가하는 방법에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, 암반의 변형특성과 주입제 및 절리의 특성과의 관련성도 밝혀지지 않고 있다. 한편 주입에 의한 보강효과를 전산해석을 이용하여 규명하려는 연구들이 시도되어 왔으나³⁾, 이러한 대부분의 연구결과들은 전산해석의 가장 중요한 인자인 입력변수의 결정과정이 해석자의 주관적인 판단에 의해 결정되었다는 문제점을 가지고 있으며, 정확한 전산해석을 위해서는 실험에 의해 구해진 입력변수를 적용하고 주입범위에 대한 현실적인 판단이 이루어져야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 시멘트현탁액 주입에 의한 절리암반의 보강효과를 규명하기 위해 절리의 경사, 절리간격, 최소주응력의 크기를 달리한 절리암반모형을 구성한 후, 마이크로시멘트 현탁액을 주입하여 이축압축시험을 수행하였으며, 이로부터 암반의 변형거동특성을 주입전후 접선탄성계수를 통하여 정량적으로 평가하고자 하였다. 또한 시험결과로부터 구해진 입력변수들을 이용하여 실제 시멘트현탁액주입에 의한 보강이 이루어진 OO고속도로 OO터널에 대한 3차원 유한 차분해석을 실시하였으며, 이의 결과를 실제 계측에 의한 변위와 비교함으로써 시멘트현탁액 주입에 의한 절리암반의 변형거동을 평가하였다.

2. 시료, 실험장치 및 실험방법

2.1 시료의 특성 및 시험편 제작

대상 암석시료의 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위하여 실험실에서 각종 시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1에 제시되어 있다. 각 시험값은 5번의 시험에서 얻은 평균값을 나타낸 것으로, 인장강도는 간접인장시험으로 구한 것이며, 탄성계수는 축방향변형률에 대한

응력-변형률곡선에서 단축압축강도의 40~60% 구간의 평균 기울기로 구한 값이다. 포아송비는 변형률계지를 사용하여 측정한 원주방향변형률과 축방향변형률비를 압축강도의 40~60% 구간에서 구한 것이다.

본 연구에서는 현재 암반 주입공법에 많이 사용되고 있는 평균입径이 4.2 μm인 마이크로시멘트(쌍용시멘트 Micem 8000)를 주입제로 사용하였다. 시멘트는 물과의 혼합비에 따라 강도 특성이 바뀌는데, 본 연구에서는 시공시 가장 많이 적용되고 있는 물-시멘트비(W/C 비)인 1.682 : 1의 중량비로 주입재를 혼합하였다. 이렇게 혼합한 주입재를 충분히 교반시킨 후 주입제 자체의 물리적,역학적 특성을 파악하기 위해서 지름 53 mm의 파이프에 주입하고, 상온(평균 섭씨24도)에서 28일간 수증양생한 후 물리적, 역학적 특성을 측정하였다.

불연속 암반모형을 위한 이축압축시험을 실시하기 위

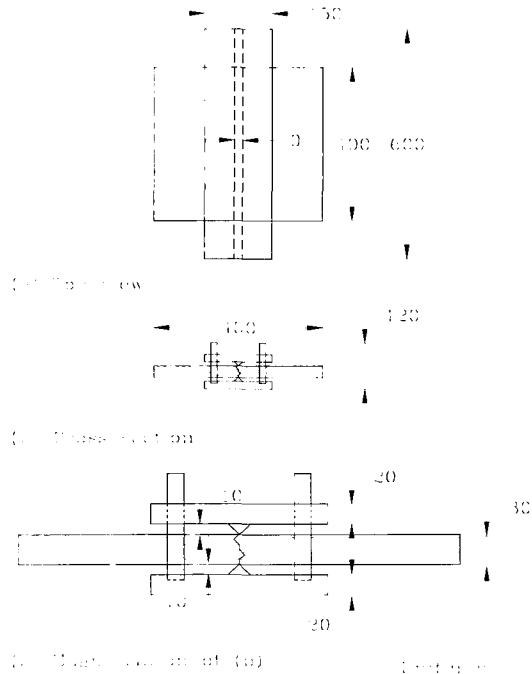


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for generating fractured joint of biaxial specimen.

Table 1. Physical and mechanical properties of sample materials.

Property Sample type	Specific Gravity	P wave Velocity (m/sec)	S wave Velocity (m/sec)	Uniaxial Compression Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
Marble	2.76	3,080	1,710	71	15.6	48	0.31
Microcement	1.47	2,590	1,140	10	1.1	5.7	0.29

해 여산대리석을 가로×세로×높이가 400×400×30 mm 인 평판으로 절단한 후, Fig. 1과 같은 평판용 인장절리 발생장치를 이용하여 인공적으로 절리군을 만들어 절리암반모형을 제작하였다. 불연속암반모형은 한 개의 절리군을 포함한 단일절리군 시료와 두 개의 직교하는 절리군을 포함한 직교절리군 시료로 성형하였으며, 절리군의 경사와 절리간격을 달리하여 시편을 제작하였다. 단일절리군의 경사는 0, 30, 45, 60, 90도가 되도록 성형하였으며, 직교절리군의 경사는 (0,90) (15,105) (30,120) (45,135)도로 성형하였다. 또한 각 절리간격은 40, 80, 133, 200 mm로 성형하여 암반모형시험에서 절리간격의 영향을 살펴보고자 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험장치는 유압식 이축압축장치로서 네 방향에 10톤 용량의 동일한 램이 부착되어 있으며, 시험장치의 크기는 가로×세로×높이가 150×150×20 cm이다. 최대주응력과 최소주응력은 실험장치에 연결된 유압식 수동펌프를 이용하여 가하였으며, 시험은 수평상태에서 실시하였다. 불연속암반에 등분포하중을 가

하기 위하여 단면이 8cm ×10 cm이고 길이가 40 cm인 ㄷ자형 가압판을 이용하였으며, 이 ㄷ자형 홈에 두께 3 cm의 철판을 끼워 가압시 불연속암반에 나타날 수 있는 위로 융기하는 현상을 방지하였다. 불연속 암반모형 시험체에 가해지는 하중의 크기는 유압펌프에 부착되어 있는 압력계로부터 측정하였으며, 변위측정은 실험장치에 설치된 8개의 다이알게이지를 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 실험장치의 제원과 개략도를 보여주고 있다.

3. 이축압축실험결과

본 연구에서는 여산대리석으로 절리의 간격, 경사, 응력상태 등의 조건을 달리한 단일절리와 직교절리를 포함한 암반모형을 성형하고 이에 대해 마이크로시멘트를 평균 0.5 mm 두께로 주입한 후 이축압축실험을 실시하여 절리조건과 주입효과의 관계에 대하여 연구를 수행하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 절리암반모형으로, 절리간격은 4, 8, 13.3, 20 cm, 절리의 경사는 단일절리군의 경우 0도, 30도, 45도, 60도, 90도, 직교절리군의 경우 (0,90)도, (15,105)도, (30,120)도, (45,135)도로 제작하였다. 불연속암반의 변형특성을 규명하기 위해서 8개의 다이알게이지로 암반모형의 변위를 측정하였고,

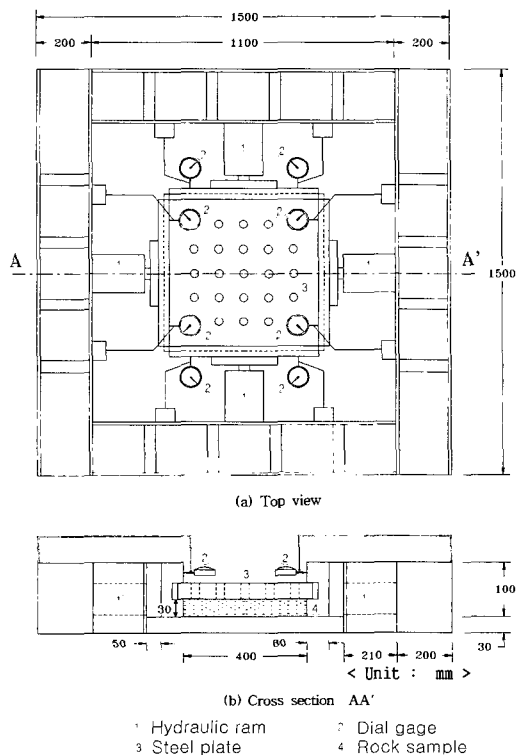


Fig. 2. Schematic diagram of biaxial compression test apparatus.

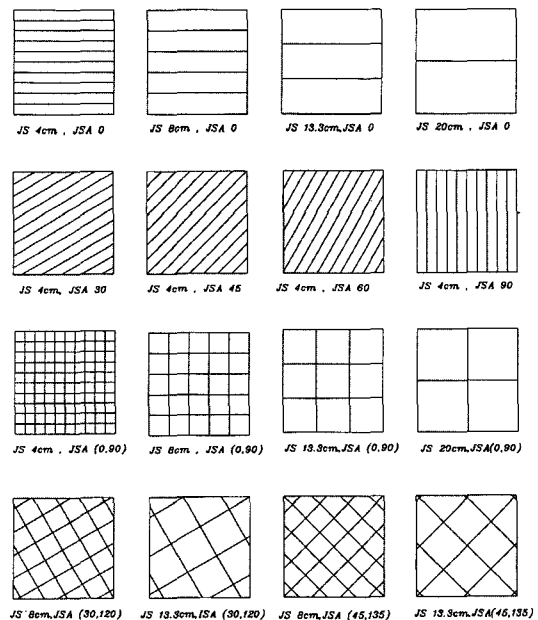


Fig. 3. Jointed rock mass model for biaxial compression test (JS: Joint Spacing, JSA: Joint Set Angle).

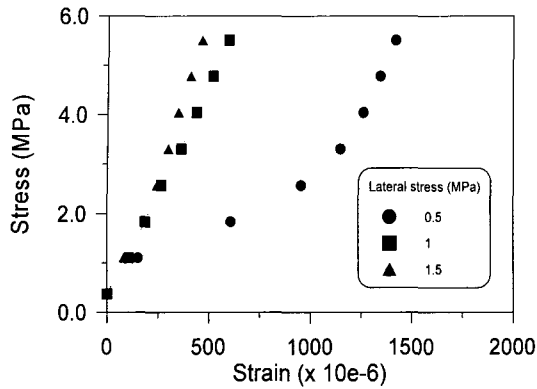


Fig. 4. Axial stress-axial strain curves for jointed rock mass model before grouting (Joint spacing 4 cm, joint set angle 45°).

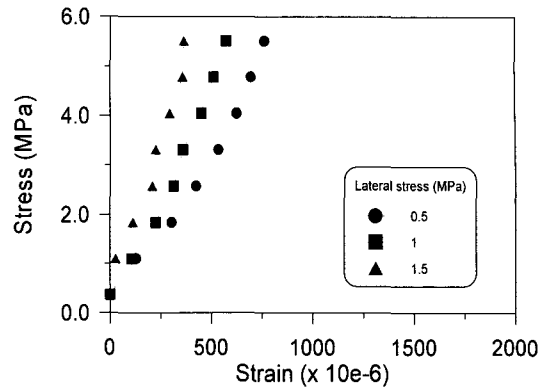


Fig. 5. Axial stress-axial strain curves for jointed rock mass model after grouting (Joint spacing 4 cm, joint set angle 45°).

최소주응력을 일정하게 유지한 상태에서 최대주응력의 크기를 증가시키면서 이축압축시험을 실시하였다. 또한 0.5 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa의 세가지 최소주응력에 대하여 시험을 실시하여 최대주응력 증가에 따른 암반 모형의 변형특성을 관찰하였다. 본 연구에서 적용한 암반의 변형계수는 점선변형계수로, 응력-변형률곡선의 최대주응력 3.3 MPa 지점의 점선기울기로부터 구하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 절리면간격이 4 cm, 최대주응력 방향과 45도 경사의 단일절리군시료에 대하여 주입에 의한 보강전후의 이축압축시험결과이다. 주입전 시료는 최대주응력이 증가함에 따라 변형률이 증가하고 있으며, 최소주응력이 0.5 MPa인 경우에는 최대주응력이 증가함에 따라 변형률이 크게 증가하는 지수함수적 변형거동을 보이고 있다. 이는 절리의 방향이 최대주응력에 수직으로 위치하고 있어 수직압축시험의 변형거동과 비슷한 거동을 보이는 결과이며, 이러한 변형거동은 응력에 대한 층상암반의 변형현상⁴⁾과 거의 비슷한 변형거동이다. 그러나 최소주응력의 크기가 커짐에 따라 변형곡선이 아래로 볼록한 경향은 점점 줄고 있으며 선형에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 동일한 절리시료에 대한 주입후 시험결과를 살펴보면, 주입전 시험결과에 비하여 최대주응력에 대한 변형이 줄고 변형거동도 거의 선형적으로 변한 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 절리의 수직압축시험에서 확인한 바와 같이 주입에 의해 절리면의 수직강성이 주입재의 강성으로 변화하여 수직강성이 커짐에 따라 발생하는 현상으로서, 이러한 현상은 절리의 간격이 13 cm인 단일절리군 시료에서도 거의 비슷하게 나타났다.

절리간격 4 cm, 절리경사 (45,135)도의 직교절리군을

가진 주입전 시료에서도 최소주응력이 0.5 MPa인 경우, 단일절리군 시료와 거의 비슷하게 최대주응력-변형률곡선상에서 완벽한 지수함수적 거동을 보였는데, 이는 직교절리군 시료에서도 시편의 변형거동이 절리의 수직변형에 크게 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 최소주응력이 1.0 MPa 이상에서는 시편의 변형거동이 비교적 선형적으로 나타나는데, 이는 최소주응력에 의한 측면구속으로 인해 전단강성이 증가한 영향으로 판단된다. 이에 반해 주입후 암반모형의 변형거동은 주입전에 비하여 상당히 선형적으로 변하였으며, 주입후 탄성계수도 최소주응력이 0.5 MPa인 경우, 8.9배까지 증가한 것으로 나타났다. 그러나 최소주응력이 큰 경우에는 탄성계수의 증가율이 최소주응력이 작은 경우보다는 작게 나타났다. 절리간격이 8 cm이고 절리경사가 (0,90)도인 절리암반모형의 경우에도 주입전후의 변형거동이 비슷한 경향을 나타내었으나, 주입에 의한 탄성계수의 증가효과는 절리간격이 4 cm인 경우에 비하여 작게 나타났다.

이러한 각 시편의 시험결과로부터 시료의 탄성계수를 구하고 이를 절리면 간격과 경사에 대하여 비교하였으며, 전체 시험결과를 주입전 시료의 탄성계수에 주입후 시료의 탄성계수비인 보강비(Deformation moduli improvement)로 비교하였다.

3.1 절리간격에 따른 주입후 절리암반모형의 변형특성

Fig. 6은 절리의 경사가 (0, 90)도인 직교절리의 간격이 4, 8, 13.3, 20 cm일때의 시험결과로서, 작용하는 최소주응력의 크기에 상관없이 블록의 크기가 커짐에 따라 주입전 탄성계수에 대한 주입후 탄성계수인 보강비가 지수함수적으로 감소함을 확인할 수 있다. 이러한

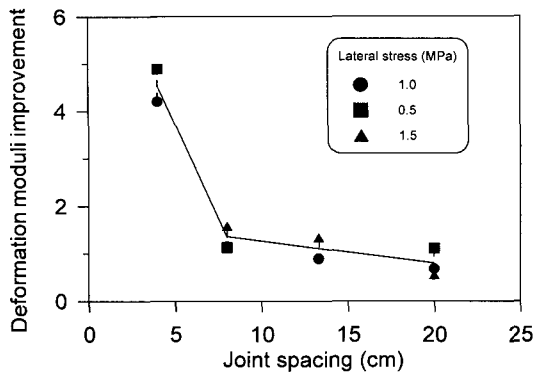


Fig. 6. Relationship between joint spacing and deformation moduli improvement (Joint set angle 0°, 90°).

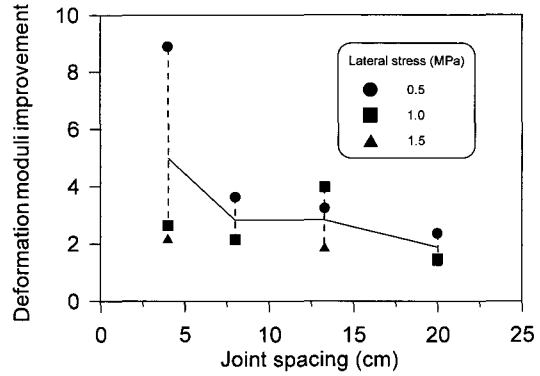


Fig. 7. Relationship between joint spacing and deformation moduli improvement (Joint set angle 45°, 135°).

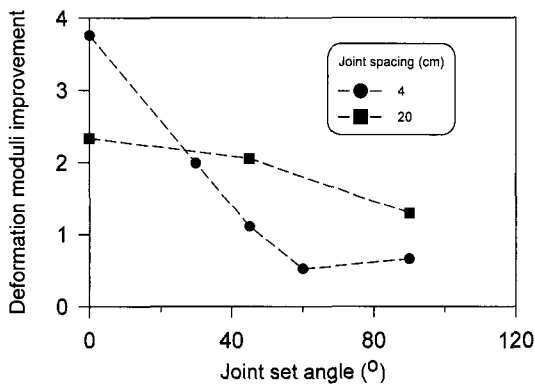


Fig. 8. Relationship between joint set angle and deformation moduli improvement (Single joint set).

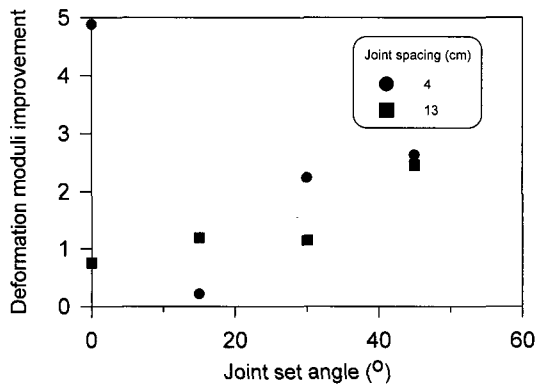


Fig. 9. Relationship between joint set angle and deformation moduli improvement (Double joint set).

특징은 절리의 경사가 (0, 90)도인 경우, 발생하는 변형이 최대주응력에 수직인 절리군의 수직변형이 되므로, 주입전 절리의 상대빈도와 주입효과가 직접적인 상관 관계를 가지는 것으로 생각된다. 그러나 절리의 경사가 (45, 135)도인 시료의 경우인 Fig. 7에서는 절리간격에 따라 보강비가 감소하기는 하지만 급격히 감소하지는 않고 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 앞선 수직압축시험과 전단시험결과에서 살펴본 바와 같이 주입에 의한 변위억제효과는 대부분 주입재 충전으로 절리의 수직변형성이 감소되는 것에 기인하므로 절리의 경사가 커지게 되면 절리의 수직변형성분보다는 전단변형성분이 절리암반모형의 변형에 더 큰 영향을 주기때문으로 판단된다. 이러한 절리간격이 커짐에 따라 주입후 암반의 변형계수의 증가비가 감소하는 현상은 실제현장에서 암반의 파쇄도가 커질수록 주입에 의한 변위억제효과가 커짐을 의미하며, 실제 현장

시험 상황과도 부합하는 결과이다.

3.2 절리경사에 따른 주입후 절리암반모형의 변형특성

Fig. 8은 절리간격이 4, 20 cm인 단일 절리시료의 경사를 0, 15, 30, 45도로 변화시킨 후 구한 주입전 탄성계수대 주입후 탄성계수의 변화비를 그린 그림이다. 절리의 경사가 커질수록 주입에 의한 변형억제효과는 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 절리의 경사가 커지게 되면 작용하는 전단응력의 크기는 커지고 수직응력의 크기는 작게 되며, 이로부터 주입재에 의한 수직변위의 감소효과가 떨어지게 되어 동일한 응력에 대하여 절리면의 변형이 더 많이 발생하기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 경향은 블록의 크기가 4, 13 cm인 직교절리에 대한 시험결과인 Fig. 9에서는 나타나지 않아, 직교절리의 경사와 주입전후 암반의 변형성에 대한 특정한 경향성을 확인할 수가 없었다.

3.3 최소주응력에 따른 주입후 절리암반모형의 변형특성

Fig. 10은 최대주응력축과 45도 경사를 가진 단일절리군 모형에 대하여 최소주응력의 크기를 달리하였을 경우 주입에 의한 보강전후의 이축압축시험결과이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 작용하는 최소주응력의 크기가 커짐에 따라 주입에 의한 탄성계수의 보강비는 작아짐을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 0도와 45도 직교절리군 모형에서도 동일하게 나타났으나, 단일절리의 경우보다는 비교적 분산이 크게 나타나는 경향을 띄었다. 이러한 현상은 최소주응력이 커지게 되면 절리에 작용하는 전단강성이 커지게 되어 주입전 절리암반모형의 탄성계수가 커지며, 주입전 전단강성에 대한 주입후 절리면 전단강성의 감소폭도 커지기 때문에 주입에 의한 보강비가 작아지는 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 주입에 의한 암반의 보강효과는 암반에 작용하는 최소주응력의 크기와 밀

접한 관계를 가지고 있으며, 최소주응력의 크기가 작을수록 주입에 의한 보강효과는 커지는 것으로 판단할 수 있다.

3.4 주입전후 절리암반모형의 변형계수 비교

Fig. 12와 Fig. 13은 단일절리군 시료와 직교절리시료에 대한 주입후 이축시험결과로부터 얻어진 탄성계수를 주입전 탄성계수의 비로 환산하여 나타낸 것이다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 보강비의 분산은 크게 나타나지만, 전반적으로 주입전 탄성계수가 작을 경우가 주입에 의한 보강효과가 더 크게 나타나고 있다. 이는 앞선 절리간격과 주입전후의 보강비관계에서 살펴본 바와 같이 주입에 의한 보강효과가 단위 길이당 절리빈도에 직접적인 양의 상관관계를 보이는 것과 관련된 현상으로, 이러한 경향은 현장시험을 통해 주입효과를 구한 Kikuchi 등^{(5),(6),(7)}의 시험결과와 거의 일치하는 현상이다.

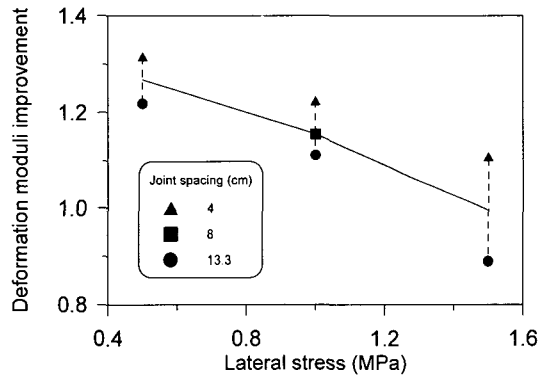


Fig. 10. Relationship between lateral stress and deformation moduli improvement (Joint set angle 45°).

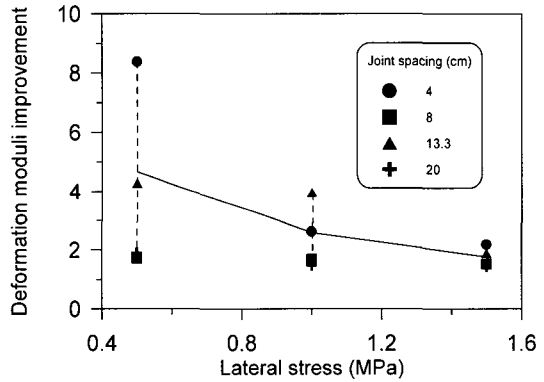


Fig. 11. Relationship between lateral stress and deformation moduli improvement (Joint set angle 45°, 135°).

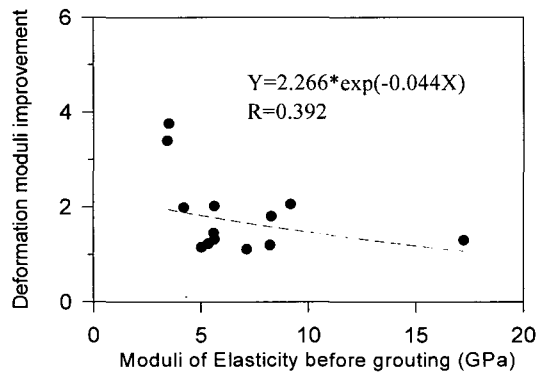


Fig. 12. Relationship between deformation moduli before grouting and deformation moduli improvement (Single joint set).

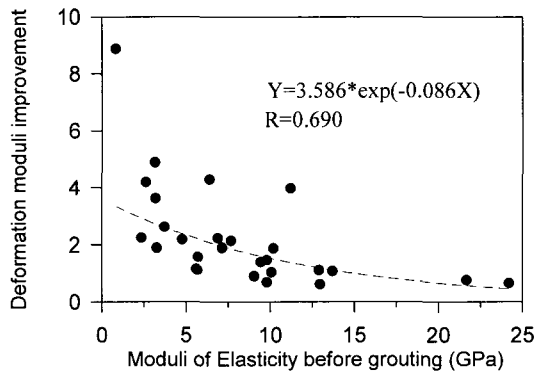


Fig. 13. Relationship between deformation moduli before grouting and deformation moduli improvement (Double joint set).

이러한 결과로부터 주입전 암반의 탄성계수와 주입후 암반의 탄성계수 증가율은 지수함수적인 관계가 있음을 확인하였으며, 주입후의 탄성계수와 주입전의 탄성계수의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있는 것으로 나타났다.

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

여기서

- E_a = 주입후 절리암반의 탄성계수
- E_b = 주입전 절리암반의 탄성계수
- A, B = 시험상수 (담, $B < 0$)

본 절리암반모형에 대한 이축압축시험에서는 시험상수 A, B가 단일절리군의 경우 2.27과 -0.0435, 직교절리군의 경우 3.59와 -0.0858로 나타났으나, 분산은 비교적 큰 편으로 이에 대한 정확한 해석을 위하여는 현장시험결과를 통하여 많은 자료의 축적이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이러한 결과로부터 파쇄대같이 주입전 암반조건이 좋지 않아 물리적 특성이 낮은 지역에서 주입후 더 좋은 변위억제효과가 기대되며 암반조건이 좋은 지역에서는 이러한 주입에 의한 보강효과는 떨어지는 것으로 예상할 수 있다.

4. 유한차분법을 이용한 주입공법의 효과해석

본 연구에서는 시멘트현탁액 주입후 절리의 전단시험과 이축압축시험에서 구한 결과를 이용하여 주입에 의한 암반의 변형거동을 유한차분법을 통해 분석하고 이를 실제 현장에서 얻은 변형과 비교하여 주입후 암반의 변형거동특성에 대하여 규명하고자 하였다. 해석에는 FLAC 3D를 사용하였는데, 이 프로그램은 Windows 95 또는 Windows NT를 운영체제로 하는 3차원 유한차분해석 프로그램이다.

4.1 해석대상 터널과 해석조건

본 연구에서는 OO고속도로 OO터널을 해석대상으로 선정하였다. 대상지역의 지형은 급경사지역과 완경사지역이 만나는 지점으로 터널이 통과하며, 주로 세일과 석회암이 분포하는 지역으로 전체적인 절리간격이 10 mm 내외로 매우 근접해있고 파쇄와 균열이 심하게 나타나 있다. 이중 주입에 의한 암반보강을 실시한 지역은 터널 시점부로, 측정된 RMR과 Q값이 19와 0.006으로 매우 낮고, 파쇄대에 가까운 절리빈도를 보이며, 암반상태가 매우 불량한 것으로 조사되었다⁹⁾. 이에 따라 본 연구에서는 터널상행선 5+320부터 약 100 m 구

간에 시행된 시멘트주입에 의한 지반보강의 효과를 유한차분법을 이용하여 굴착단계별로 해석하였다.

실제 주입공법은 터널중심을 기준으로 상부 120도 구간에 대하여 공간격 50 cm, 천공길이 16 m, 천공각도는 약 4도의 상향천공을 실시하여 외경 60.5 mm 강관을 설치하고 시멘트를 주입하여 터널상반에 대한 보강을 실시하였다. 강관다단그라우팅에 의한 보강효과에 대한 실제적 판단에는 주입에 의한 지반보강 뿐 아니라, 강관의 휨내력을 고려한 해석이 복합적으로 수행되어야 하나, 본 연구에서는 해석관점을 주입에 따른 보강효과에 두어 터널상부 120도 구간에 대하여 cable요소를 써서 강관을 묘사하였으며, 주입재가 터널벽으로부터 3 m범위까지 주입된 것으로 해석하였다. 또한 표준 지보방법에 따라 shell요소와 cable요소로 슛크리트와

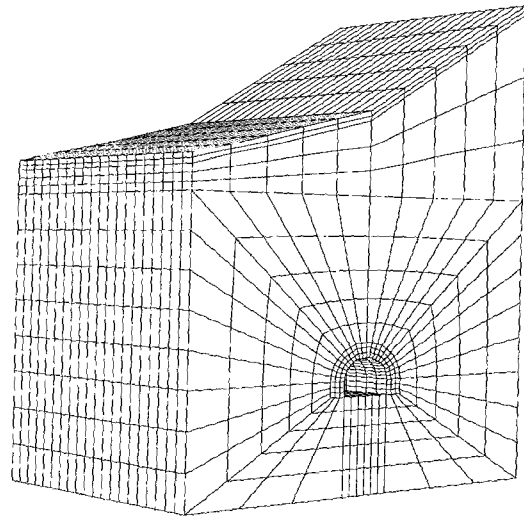


Fig. 14. 3D finite difference mesh for numerical analysis.

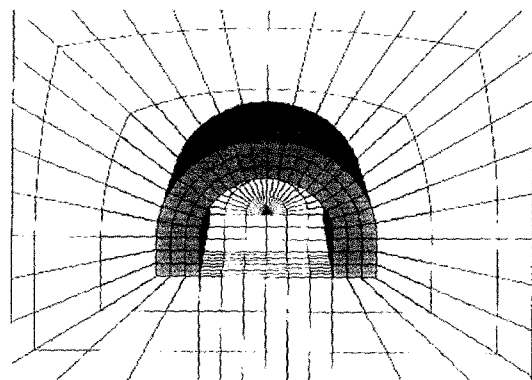


Fig. 15. A view of grouting zone.

록볼트를 모사하여 해석을 실시하였다. Fig. 14는 이렇게 구성된 요소망을 나타낸 것으로 터널은 지표에서 57 m 하부에 위치하며, 터널의 높이는 7.7 m, 터널의 폭은 8.6 m이다. 또한 Fig. 15는 주입에 의해 보강된 범위를 나타내고 있다.

해석지역은 지표시추조사 결과 상부토사층이 2 m 정도이며, 그 하부로 2층의 풍화암반이 터널부까지 분포하여 있는 것으로 조사되었다. 이에 따라 조사된 RMR 값과 현장에서 측정된 탄성계수를 바탕으로 해석지반의 물리적, 역학적 성질을 Hoek-Brown이 제시한 방법을 사용하여 Table 2와 같이 결정하였다. 또한 주입에 의한 암반의 특성변화는 주입범위를 가정하여 지반의 물리적, 역학적 성질을 증가시키는 방법을 썼다. 주입후 암반의 탄성계수는 앞선 단일절리에 대한 수직압축시험결과를 Yoshinaka⁹⁾가 제시한 식에 이용, 무결암의 탄성계수를 실험실시험결과인 37.3 GPa, 절리간격은 현장측정자료의 평균값인 0.208 m로 가정하여 계산한 결과, 주입전보다 약 4.7배 증가되어 10.73 GPa로 바뀐 것으로 계산되었다. 이렇게 보강된 탄성계수를 가지고 Sarafim & Pereira가 제시한 식¹⁰⁾으로부터 역산한 주입후 추정RMR값은 51.22로 계산되었으며, 이로부터 앞선 주입전 암반의 물리적, 역학적 성질에 대한 추정치를 구할 때 이용하였던, Hoek-Brown이 제시한 방법을 써서 계산된 암반의 마찰각과 점착력은 44.8도와 1.29 MPa로 계산되었다. 이 값을 주입후 절리면 전단시험결과와 비교하면 점착력은 비슷하나 마찰각은 매우 큰 값이며, 주입 후 직접전단시험에서 구한 마찰각과 점착력의 평균값이 이보다 낮게 나타났으므로, 본 해석에서는 실제 절리면에 대한 시험결과¹¹⁾를 주입후 보강된 암반의 파괴식으로 가정하여 해석을 실시하였다. 또한 수평응력대 수직응력비(K_0)는 해석대상 공구에서 측정된 현장시험결과가 없으나, 인접공구에서 측정된 측압계수가 1.0 내외로 나타남에 따라 본 해석에서는 1.0을 적용하였다. 주입후 암반의 전산해석에 사용된 물리적, 역학적

성질은 Table 2에 제시되어 있다.

본 연구에서는 굴착진행에 따른 임의 지점에서 변위 발생량을 추적하기 위하여 좌우측 터널측벽, 천단, 인버트에 변위 측정점을 선정하여 굴착단계에 따른 각 측정점의 변위를 구하여 비교하였으며 적용된 해석순서는 다음과 같다.

- 가. 선진강관다단그라우팅
- 나. 상반 2.4 m 굴착
- 다. 슛크리트 시공($t=20$ cm)
록볼트 시공(system bolt, 길이 4 m, 설치간격 1.2×1.5 m)
- 라. 하반 2.4 m 굴착
- 마. 슛크리트 시공($t=20$ cm)
록볼트 시공(system bolt, 길이 4 m, 설치간격 1.2×1.5 m)
- 바. 2번부터 5번까지 3회 추가시행

이렇게 9.6 m 굴착후 강관다단그라우팅부터 다시 수행하는 방법으로 총 19.2 m를 굴착할때까지를 해석하였다. Fig. 16은 해석에 적용된 록볼트와 강관을 cable 요소로 모사한 그림이며, Fig. 17은 해석단계에 따라 굴착이 진행되어가는 모습이다.

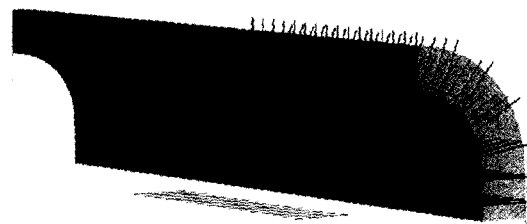


Fig. 16. Cable elements for simulating rock bolts and steel pipes.

Table 2. Material properties for FDM analysis.

Layer Property	Soil	Weathered rock 1	Weathered rock 2	Grouted rock (effect 100%)	Grouted rock (effect 50%)
Density (kg/m^3)	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

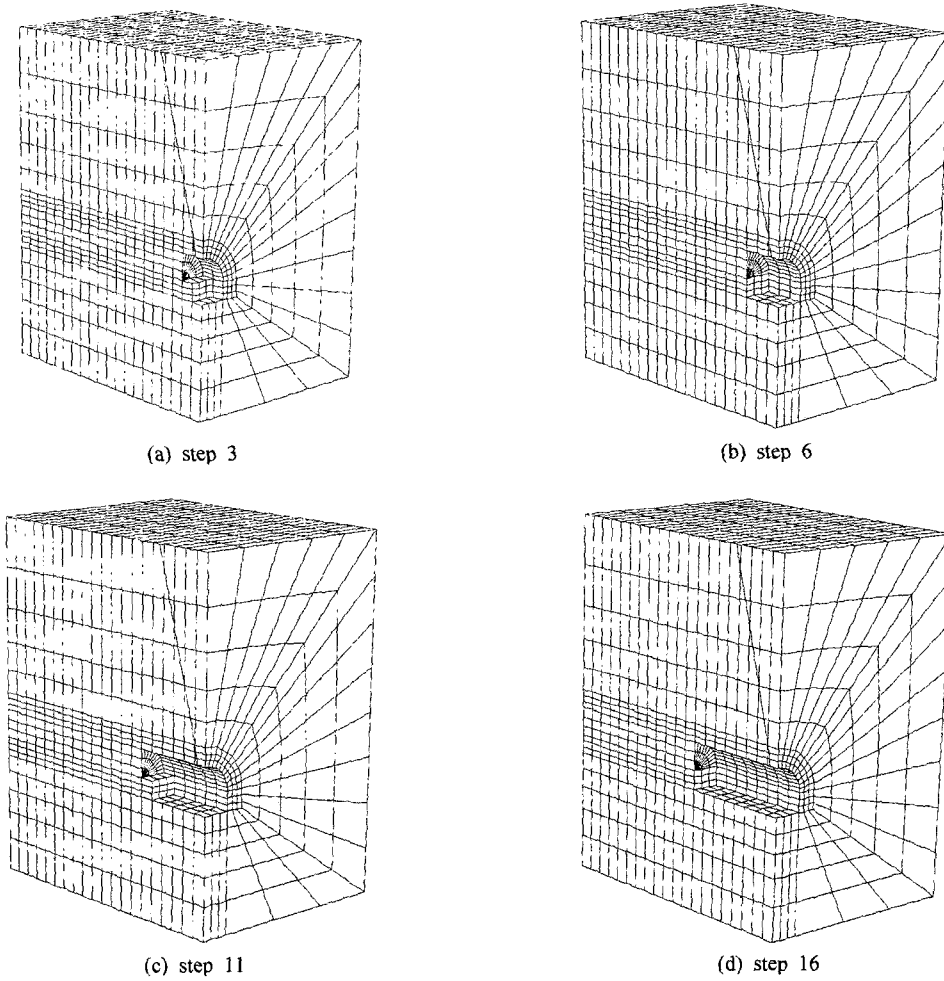


Fig. 17. Excavation step for analysis.

4.2 해석결과

주입에 의한 지반보강효과를 분석하기 위하여 강관다 단그라우팅으로 보강하지 않았을 경우에 대한 해석을 먼저 수행한 후, 보강터널 주위 3 m 범위에 대하여 강관다단그라우팅을 실시할 경우에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 18은 터널축으로부터 4.8 m 지점의 터널바닥 중심의 수직변위를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 바닥중심의 변위는 굴착이 진행됨에 따라 단계적으로 증가하며, 19.6 m가 굴착되었을 경우 최대 20.4 mm까지 증가된 것으로 나타났다. 또한 이러한 변위의 발생은 해석단면에 막장이 도달했을 때 급격히 일어나는 것으로 나타났다. Fig. 19는 19.2 m 굴착후 주입공법을 적용하지 않을 때의 터널의 수직방향 변위를 등변위선도로 나타낸 것으로 인버트의 용기현상이 명확하게 드

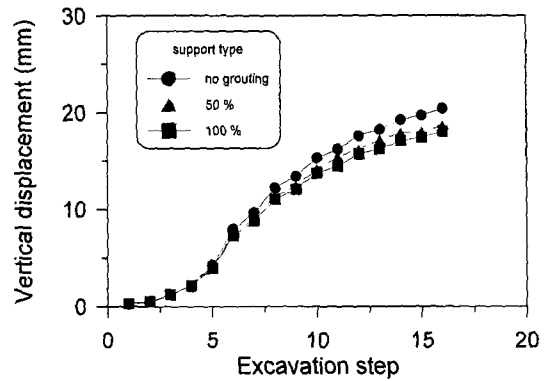


Fig. 18. Vertical displacement of the invert by excavation step.

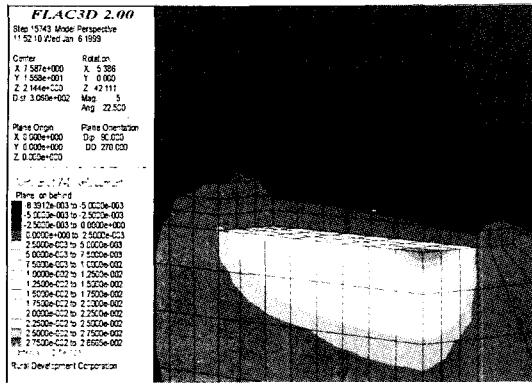


Fig. 19. Vertical displacement contour after excavation step 16.

러나고 있다. 주입공법을 적용할 경우의 등변위선도의 발생양상도 주입공법을 적용하지 않을 경우와 거의 유사하나 변위의 발생량은 감소한 것으로 나타났다. 주입에 의한 보강효과를 100%로 가정했을 경우의 터널바닥 중심의 변위는 주입공법을 적용하지 않은 때와 거의 비슷하게 굴착이 진행됨에 따라 단계적으로 용기하여 19.6 m 굴착되었을 경우, 최대 18.0 mm 정도까지 용기된 것으로 나타났다. 이 수치는 주입에 의한 보강이 없을 경우보다는 작은 수치이나 상당히 큰 변위가 발생하는 것으로서, 그 이유는 주입에 의한 보강대가 터널 상반과 측면에만 구성되어 있으므로 터널하반의 변위억제효과는 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 주입에 의한 보강효과를 50%로 가정했을 경우에도 터널바닥 중심의 용기현상은 거의 비슷하게 발생하며, 19.6 m 굴착되었을 경우 최대 18.6 mm까지 용기되는 것으로 해석되었다.

Fig. 20은 굴착단계에 따른 터널천단의 수직변위를 도시한 것으로 굴착단계가 진행됨에 따라 단계적으로 변위가 발생하여 주입공법을 적용하지 않을 경우에는 최대 7.4 mm까지 수직변위가 나타나는 것으로 해석되었다. 그러나 주입공법을 적용할 때에는 터널바닥중심 변위와는 달리 상당한 변위감소현상이 나타났는데, 주입에 의한 보강효과를 100%로 가정할 경우, 터널천단의 변위는 최대 0.2 mm, 50%로 가정할 경우, 터널천단의 변위는 최대 0.6 mm 정도로 나타나 주입에 의한 보강이 없을 때의 10% 이내로 변위가 억제되는 것으로 해석되었다. 또한 이러한 천단변위의 발생양상은 터널바닥중심변위와 마찬가지로 주입에 의한 보강여부에 관계없이, 굴착이 진행됨에 따라 단계적으로 발생하였으며, 해석단면에 막장이 도달했을 때 급격히 일어나는

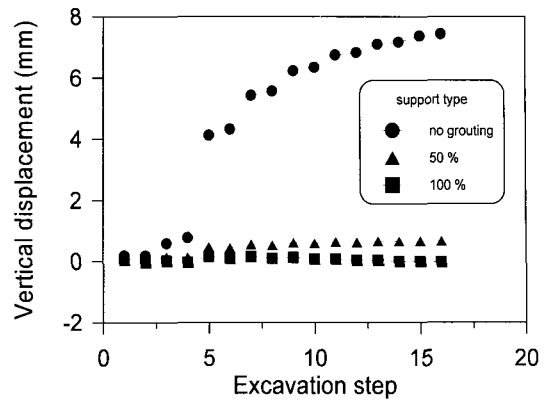


Fig. 20. Vertical displacement of the crown by excavation step.

것으로 나타났다. 이러한 결과는 주입에 의한 터널상부 보강방법이 매우 효과적임을 의미하나 실제현장에서 측정된 강관다단그라우팅에 의한 변위 감소효과가 20%에서 50%로 나타난 것과 비교해보면 천단변위의 감소효과가 너무 높게 해석된 것으로 판단된다.

Fig. 21은 터널측으로부터 4.8 m 지점의 터널측벽의 수평방향변위를 해석단계별로 도시한 것이다. 터널천단과 바닥중심의 수직방향변위와 마찬가지로 측벽의 수평방향변위는 굴착단계가 진행됨에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그 크기는 양측면에서 거의 비슷하게 나타났으나 지표면 경사의 영향으로 터널굴진방향에 대해 우측면에서 약간 크게 나타났다. 두 측정점 사이의 변위를 계산한 결과, 주입공법을 적용하지 않을 경우에는 최대 20.5 mm까지 나타나는 것으로 해석되었다. 주입에 의한 보강효과를 100%로 가정하여 해석한 경우에도 측벽의 수평방향변위는 굴착단계가 진행됨에

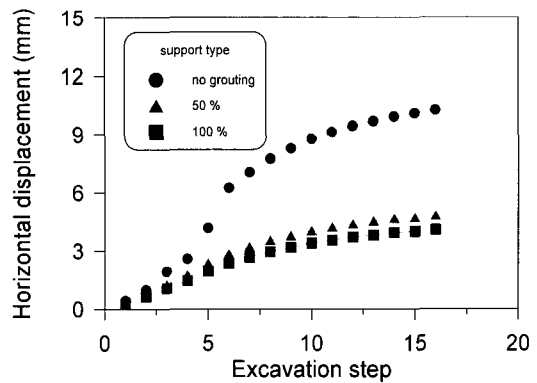


Fig. 21. Horizontal displacement of the right wall by excavation step.

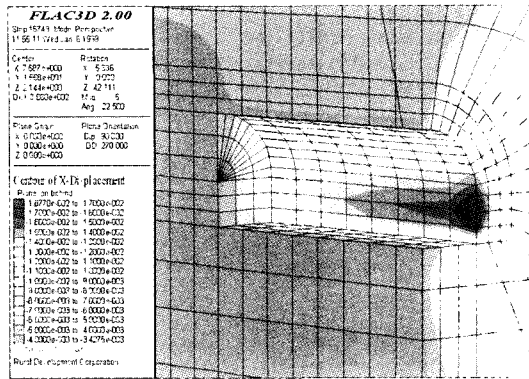


Fig. 22. Horizontal displacement contour after excavation step 16.

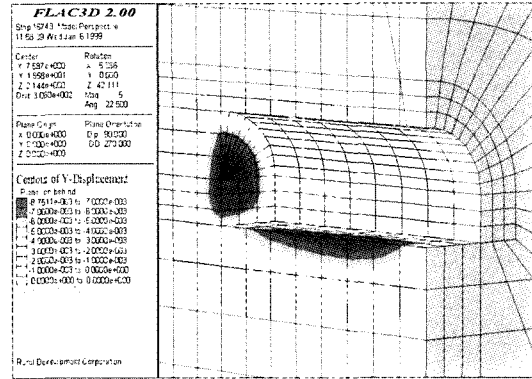


Fig. 23. Directional displacement contour along the tunnel axis after excavation step 16.

따라 증가하는 것으로 나타났으나, 그 크기는 주입공법을 적용하지 않았을 경우에 비해 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 수평변위의 발생양상은 양쪽 측면에서 거의 비슷하게 나타났으며, 각 측정점에서 최대 4.1 mm 정도의 변위가 발생하였고, 두 측정점 사이의 변위는 최대 8.2 mm까지 나타났다. 이 수치는 주입공법을 적용하지 않을 경우의 20% 수준으로, 현장에서 측정된 수평방향의 내공변위가 2~14 mm 정도임을 고려하면 현실적인 값으로 판단되며, 강관다단그라우팅에 의한 변위 감소효과가 20%에서 50%로 나타난 실제 현장시험¹²⁾에 의한 결과와 거의 비슷한 변위감소효과이다. 주입에 의한 보강효과를 50%로 가정했을 경우에서도 측벽의 수평방향변위의 감소효과는 비교적 크게 나타났으며, 그 크기는 주입공법을 적용하지 않을 경우의 25% 정도로 나타났다. 전체적인 변위의 발생양상은 앞선 결과와 마찬가지로 굴착이 진행됨에 따라 단계적으로 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 22는 주입공법을 적용하지 않을 경우의 수평방향변위를 등변위선으로 나타낸 그림으로 터널측벽에서 발생된 변위가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 전체적으로 주입공법의 적용유무에 관계없이 등변위선도의 형태는 비슷하게 나타났으나, 수평변위는 주입공법을 적용한 경우 현저하게 줄어드는 것으로 해석되었다.

Fig. 23은 주입공법을 적용하지 않을 경우의 터널굴진방향변위를 등변위선으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 굴진방향의 변위가 막장에 대칭적으로 발생하는 모습을 볼 수 있으며, 이로부터 중방향 아치효과를 뚜렷이 확인할 수 있다. 굴진방향변위는 막장의 중심부에서 -8.7 mm의 변위가 발생하였는데, 이는 터널측벽의 변위보다 조금 작은 값이다. 주입공법을 적용할 경우의

터널굴진방향변위는 -8 mm 정도로 주입을 적용하지 않을 때와 거의 비슷한 값을 보였으며, 이러한 현상은 주입에 의한 보강대가 막장면까지만 위치하여 막장면에서는 주입에 의한 보강효과가 나타나지 않기 때문으로 판단된다. 주입에 의한 보강후 굴진방향 등변위선도에서도 굴진방향의 변위가 막장에 대칭적으로 발생하는 모습을 볼 수 있으며, 중방향 아치효과가 나타남을 확인할 수 있었다.

해석된 변위를 종합해보면, 주입에 의한 보강효과

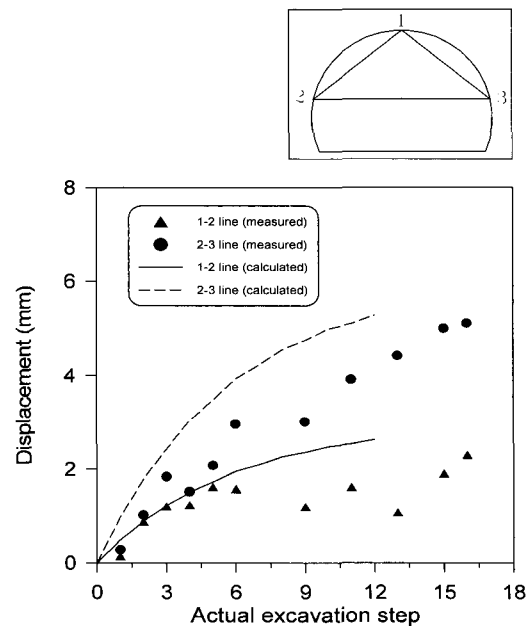


Fig. 24. Comparison of convergence between calculated and measured data.

크기에 관계없이 터널바닥중심의 변위가 가장 큰 값을 보였고, 그 다음이 측벽, 터널천단의 순으로 변위량이 발생하였다. 이는 주입보강이 터널측벽과 상반에 대하여만 이루어져, 터널바닥의 변위억제효과는 떨어지기 때문에 이러한 현상이 나타난 것으로 판단되며, 따라서 터널 인버트의 폐합이 이루어진다면 바닥중심에서 발생하는 용기량은 달라지리라 예상된다.

Fig. 24는 5+350지점에서 계측된 자료와 본 해석결과 얻어진 해석자료를 비교한 그림이다. 굴착초기에는 해석치가 계측치와 거의 유사하게 나타났으나, 굴착단계가 진행됨에 따라 계측치와의 오차가 커지는 것으로 나타났다. 12번의 굴착단계가 끝난 후, 해석에 의해 구해진 터널 천단과 좌측면 사이의 내공변위는 계측된 값보다 1.3배 정도 크게 나왔고, 양측벽 사이의 변위도 해석에 의해 구해진 값이 실측값보다 1.4배 정도 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. 그러나 계측이전의 변위를 고려하면 전체적으로 해석결과는 적합한 크기 범위에 있으며, 결과의 변위수렴양상도 유사하게 나타남을 확인 할 수 있다.

이와 같이 주입후 절리의 전단시험과 이축압축시험결과를 이용하여 현지암반의 주입에 의한 보강효과를 3차원 유한차분법을 이용하여 검토한 결과, 주입후 변형거동이 비교적 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 현지암반에 대해 정확한 물리적, 역학적 특성을 추정하고, 현장시험에 의하여 주입재의 주입범위와 주입재로 인한 강도증진효과에 대한 정확한 자료를 얻을 수 있다면 3차원 유한차분법에 의해서도 주입에 의한 보강효과를 정량적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 주입후 불연속암반의 변형특성을 규명하기 위하여 절리암반모형을 절리군의 경사 및 간격에 따라 제작한 후, 이 모형을 이용하여 주입전후에 대한 이축압축시험을 실시하였다. 또한 시험결과를 이용하여 실제 주입공법이 적용된 현장에 대한 3차원 유한차분해석을 실시하고, 이를 현장계측자료와 비교함으로써 해석의 타당성을 검토하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 인공적인 절리군을 발생시킨 후 주입을 실시한 암반 모형의 변형거동은 주입전에 비하여 상당히 선형적

으로 변화했으며, 주입후 변형계수도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 작용하는 최소주응력의 크기에 상관없이 절리간격이 커짐에 따라 주입전 변형계수에 대한 주입후 변형계수비가 지수함수적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

- 2) 단일절리에서는 절리군의 경사가 커질수록 주입에 의한 변형억제효과는 떨어지는 것으로 나타났으나, 직교절리에서는 절리군경사와 주입전후 암반의 변형성에 대한 특정한 경향성을 확인 할 수가 없었으며, 최소주응력의 크기가 커짐에 따라 주입에 의한 변형계수의 보강비는 작아짐을 확인할 수 있었다. 절리군경사와 최소주응력에 따른 변형계수의 보강비 감소현상은 주입에 의한 절리의 변위억제효과가 전단성분보다는 수직성분에서 크게 나타나기 때문으로 판단된다.
- 3) 주입전 암반의 탄성계수와 주입후 암반의 탄성계수 증가율은 지수함수적인 관계가 있음을 확인하였으며, 다음과 같이 표시할 수 있는 것으로 나타났다.

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

이 식의 정확한 적용을 위해서는 현장시험을 통한 많은 자료의 축적이 필요하며, 이로부터 적합한 시험상수 A, B를 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

- 4) 주입후 절리의 전단시험과 이축압축시험결과를 기초로 고속도로 터널에 대하여 주입에 의한 보강효과를 3차원 유한차분법을 이용하여 검토한 결과, 터널의 천단과 측벽에서 발생하는 변위는 주입공법을 적용하지 않을 경우의 25% 이내로 감소하는 것으로 해석되었다. 해석에 의해 구해진 내공변위는 계측치보다 1.4배 정도 크게 나타났으나, 굴착이전의 변위를 고려하면 전체적으로 해석결과는 적합한 크기 범위에 있으며, 결과의 변위수렴양상도 유사하게 나타남을 확인 하였다.

참고문헌

1. Natau O., Mutschler Th. and Stech H. J., 1995, Experimental Quantification of the Stabilizing Effect of Polyurethane and Silicate Resins, Proc. of 8th Int. Cong. on Rock Mechanics, 645-651.
2. 한국건설기술연구원, 1994, 강관보강 다단그라우팅공법의 개발. 1-210.
3. 이종우, 이준석, 김문겸, 1996, 그라우팅에 의한 터널 보강 효과의 해석적 연구, 터널과 지하공간, Vol. 6, 298-305.
4. Edwin T. Brown and D. Hugh Tollope, 1970, Strength of a Model of Jointed Rock, ASCE Journal of the

- Geotechnical Engineering Division, Vol. 96, No. SM2, 685-704.
5. Kokichi Kikuchi, Yoshitada Mito, Naoto Yoshino and Takuya Naruse, 1993, An Experimental Study of the Grouting Effect on Deformability of Rock Mass, Proc. of Grouting in Rock and Concrete, 437-441.
 6. Kokichi Kikuchi, Tetsuo Igari, Yoshitada Mito and Shinji Utsuki, 1997, In Situ Experimental Studies on Improvement of Rock Masses by Grouting Treatment, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 34:3-4, paper No. 138.
 7. Kokichi Kikuchi, Yoshitada Mito and Toshiyuki Adachi, 1995, Case Study on the Mechanical Improvement of Rock Masses by Grouting, Proc. of Rock foundation, 393-397.
 8. 한국도로공사, 1995, 중앙고속도로 영주-제천간 건설공사 실시설계, 토질조사 보고서, 147-189.
 9. Yoshinaka R. and Yamabe T., 1986, Joint Stiffness and the Deformation Behavior of Discontinuous Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23.1, 19-28.
 10. Mohammad N., Reddish D. J. and Stace L. R., 1997, The Relation Between In situ and Laboratory Rock Properties Used in Numerical Modelling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34.2, 289-297.
 11. 김태혁, 이정인, 2000, 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 역학적 특성변화, 터널과 지하공간, 10.2, 180-195.
 12. 한국도로공사, 1997, 중앙고속도로 영주-제천간 건설공사 실시설계, 터널계측관리 및 분석 종합보고서, 90p.

김 태 혁



1992년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 02-2145-5984
E-mail: kimtaehyok@samsung.com
현재 삼성물산(주) 건설부문 국내토목영업
팀 과장

이 정 인



1963년 서울대학교 공과대학 광산학과
공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과
공학석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)
대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-880-7221
E-mail: cilee@snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
교수