

## 터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

### A Study on Improvement Effects on Fractured Rock Mass by Consolidation Grouting in Tunnel

정 교 철(Jeong, Gyo Cheol)  
서 용 석(Sco, Yong Seok)

안동대학교 지구환경과학과  
한국건설기술연구원 토목연구부

#### 요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 파쇄대구간에서 현장시험을 실시하여 암반의 역학특성과 투수성 등을 평가함으로써 그라우팅에 의한 암반파쇄대의 개량효과를 평가하였다. 시험위치 주변 암반에 실시된 압밀그라우팅으로 인한 평균적인 암반개량정도는 변형계수가 평균 2.30, 탄성계수가 2.49로 나타나 탄성계수에 대한 개량이 더 효과적으로 나타났다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 주입단계가 진전됨에 따라 총 주입량의 변화는 암반의 일체화를 보여준다.
- (2) 압밀그라우팅의 실시 후에 측정된 루전치의 감소는 투수성의 개량을 보여준다.
- (3) 그라우팅 주입은 암반의 변형성과 강도특성의 개량을 가져올 수 있다.
- (4) 암반 개량전에 변형성이 큰 암반은 더욱 큰 역학특성의 개량을 보인다.

주요어 : 압밀그라우팅, 투수성, 변형성, 강도특성

In this study we carried out the in situ test in order to explore the grouting effects of fracture zone on mechanical properties and permeability in tunnel. After consolidation grouting the rock mass averaged 2.30 in the modulus of deformation and 2.49 in the modulus of elasticity.

The results obtained through this study are as follows.

- (1) With advance of the injection steps, the total cement take shows uniformity of the rock mass.

(2) After consolidation grouting the improvement of permeability can be identified by reduction of Lugeon values.

(3) Grouting injection can improve deformability and strength of rock mass.

(4) More mechanical improvement appears for more deformable rock mass before grouting injection.

Key Words: consolidation grouting, permeability, deformability, strength

## 서 론

지하에 분포하고 있는 암석과 암반은 구조물 건설을 위한 개착이나 굴착에 의해 초기에 가지고 있던 압력으로부터 해방이 되며, 이 때 작게는 수  $\mu\text{m}$ 에서 크게는 수 m에 이르는 변형을 수반하게 된다. 이러한 암석과 암반의 변형거동은 암반 고유의 공학적 특성인 강도특성, 변형특성, 열적 특성 및 투수성 등에 따라 결정된다.

암반은 신선한 암석과 비교해서 절리 등의 불연속면이 분포하고 있는 것이 일반적이며, 이러한 불연속면은 암반의 변형 및 강도특성과 투수특성을 지배하는 중요한 요인이다. 일반적으로 건설현장에서는 구조물과 주변 암반의 안정성을 확보하기 위하여 암반의 공학적 특성들을 실험을 통하여 정량적으로 측정하고 있으며, 이를 통하여 필요한 경우 암석·암반의 공학적 특성을 개량함으로써 시공 안정성을 확보하기 위하여 암반개량공법들이 널리 실시되고 있다.

암반의 개량을 위해 주로 사용되고 있는 방법은 그라우팅 공법으로서, 이 공법은 주요 대상 암반이 경질의 암반인 경우 절리 등의 틈 공극을 그라우트(grout)로 충전함으로써 암반 자체를 고밀화, 일체화, 균질화시켜 암반의 변형성 및 강도를 개량하는 것을 주 목적으로 실시된다. 실제 현장에서 암반 개량을 위한 그라우팅은 많이 실시하고 있지만 그 효과에 대하여 정량적으로 평가를 실시한 것은 최근의 일이다. 국내에서는 김덕근(1999), 김덕근과 김교원(2001)에 의하여 도수터널의 차수그라우팅에 대한 효과를 정량적으로 평가한 바 있다. 또한 송성호 등(2002)은 저수지의 누수 개량을 목적으로 실시된 그라우팅의 효과를

전기비저항 수직탐사를 실시하여 평가한 바 있다. 해외의 사례로는 Gustafson and Stille (1996)과 Fransson and Gustafson (2000)에 의하여 그라우트의 주입특성과 수압시험 및 투수특성을 이용하여 지반개량 효과를 예측하는 연구가 수행된 바 있으며, Kikuchi et al. (1997)은 탄성과 탐사와 공내재하시험 등을 이용하여 그라우팅에 의한 지반개량 효과를 평가한 바 있다.

본 논문에서는 터널내의 암반 파쇄대 구간에서 실시된 압밀그라우팅으로 인한 암반의 개량효과를 평가하기 위하여 루전시험 및 공내재하시험을 실시하여 개량암반의 투수성과 변형성을 측정하였으며, 그 결과를 정량적으로 해석, 검토하였다. 현장시험은 OO터널 내에서 파쇄가 심한 OO구간 두 곳을 대상으로 하였으며, 본 구간에 분포하는 암반은 그 변형성이 불연속면에 의존하는 대표적인 경우로서 주 구성암석은 섬록암에 속한다.

## 압밀그라우팅

### 재래식 터널구간

재래식 공법으로 시공된 구간은 터널 출구를 기준으로 1369~1390m까지의 21m 구간이다. 압밀그라우팅 주입용 시추공은 단면 당 6공씩 등간격으로 총 8단면에 48공이 천공되었으며, 단계별 12공씩 4차에 걸쳐서 격공 주입을 실시하였다. 또한 주입효과를 확인하기 위하여 1차 확인공 42개소와 2차 확인공 34개소를 천공하여 루전값, 유출량, 자연수압을 측정 후 그라우팅을 실시하였다.

Figure 1은 1차~4차에 걸친 격공 주입시 시멘트 주입량을 나타낸 그래프로서 격공 천공 후 주

터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

입함으로써 1차와 3차에 비해 2차와 4차의 주입량이 적음을 알 수 있다. 이러한 현상은 확인공의 경우에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 1차 확인공의 주입량이 현저히 많은 것에 비해 2차 확인공의 주입량은 적게 나타난다.

1~4차 압밀그라우팅과 1차 확인공의 천공열에 따른 시멘트 주입량의 변화(Fig. 2)를 보면 1369m 구간의 첫 번째 열에서 218.94kg이 주입된 예외적인 경우를 제외한다면 1385.5m까지 대체로 증가하는 경향을 보이며 1385.5m부터 1390m까지는 감소하는 경향을 보인다.

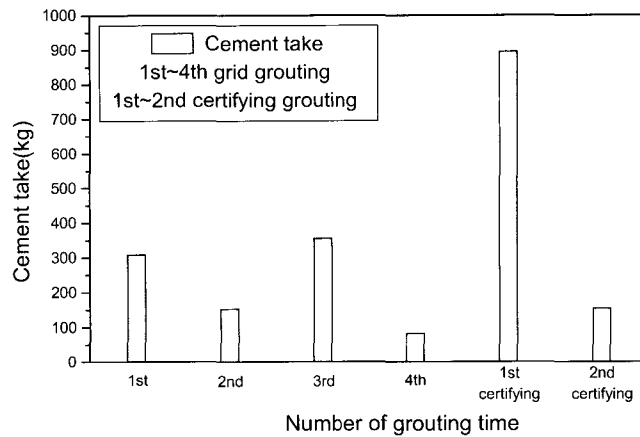


Fig. 1. Total cement take at each stage of consolidation grouting.

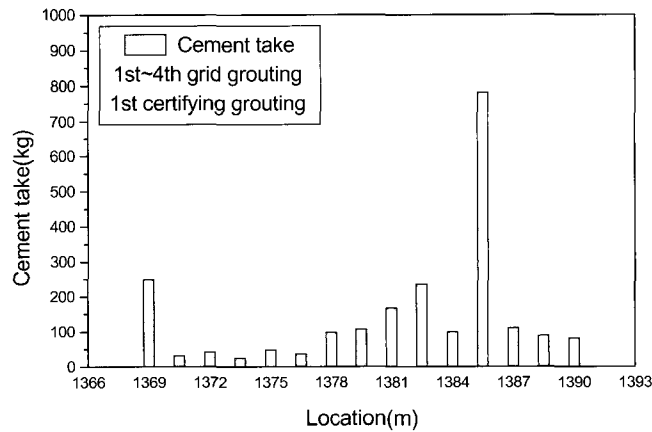


Fig. 2. Total cement take of consolidation grouting at each borehole row.

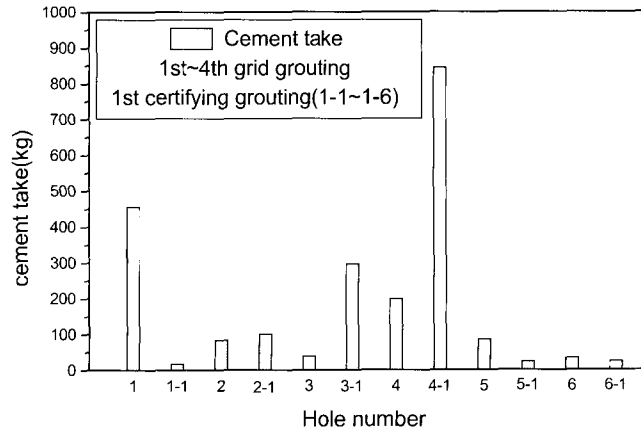


Fig. 3. Total cement take of consolidation grouting at each borehole column.

Figure 3은 천공행별 즉 터널 굴진방향을 기준으로 동일 레벨에 존재하는 주입공에서의 주입량을 나타낸 것이다. 1번(crown)에서 3번(east tilting)까지 감소하는 경향을 나타내다가 3-1과 4-1번공(invert)에서 상승하고 5번(west tilting)부터 6번(upper west side)까지는 다시 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상을 터널공벽에 적용하여 보면 원형 터널단면의 중심에 대해 대칭되는 위치의 시추공들이 주입량에 있어서 유사한 경향을 보이고 있다. Figure 3에서 인버트부에 해당하는 4번과 4-1번공(invert)의 주입량이 가장 많았고 천단부로 갈수록 주입량이 적어짐을 알 수 있다. 1차~4차 압밀그라우팅시 천단부의 주입량이 바닥부의 주입량보다 많았던 것을 고려하면 1차~4차 주입에 의해 천단부는 충분히 충전되어 있는 상태라는 것을 알 수 있다.

재래식 공법 시공구간에서 압밀그라우팅의 실시 전에 루전시험을 실시하여 주입압력, 배합비 등을 결정하였으나, 1차~4차 그라우팅시 일부 구간에서 루전값이 급증하는 현상이 있었다. 이러한 루전값의 비약적 증가의 원인으로는 고압의 그라우팅으로 인해 암반이 손상되어 일어난 결과이거나, 압밀그라우팅시 주변암반의 불연속면 등에 그

라우트가 충전됨으로서 지하수의 유동경로가 감소하여 압력이 일부 경로에 집중되어 발생한 불연속면의 확장 가능성, 주변암반을 지나는 지하수 유동에 의해 그라우트가 암반의 불연속면에 충전되기 전에 손실되어 일어난 현상, 또는 암반의 불연속면 등이 보통 포틀랜드 시멘트로 충전할 수 없을 정도로 미세하여 그라우트가 시추공벽 주변에만 일산되어 발생한 현상이라고 판단된다.

#### TBM 터널구간

TBM 시공구간에서의 시험구간은 터널 출구를 기준으로 8338~8354m 구간으로 터널단면의 크기는 약 350cm이다. 단면 당 8공씩 총 48개의 시추공이 천공되었다. 주입재로는 보통 포틀랜드 시멘트와 마이크로 시멘트가 사용되었으며, 총 2차로 나누어 격공 주입하였다. 1차 격공 주입시 사용된 주입재의 양은 총 2150kg으로 보통 포틀랜드 시멘트가 1180kg, 마이크로 시멘트가 970kg이 사용되었다. 2차 격공 주입시에는 총 주입량 1766kg 중 보통 포틀랜드 시멘트가 672kg, 마이크로 시멘트가 1094kg이 주입되었다. 1차와 2차 격공 주입을 통해 주입된 주입재의 총량은 3916kg이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 1차 주입시의 주입

터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

량이 2차 주입의 양보다 많은 것은 재래식 공법 시공구간과 마찬가지로 1차 주입시 주변암반의 불연속면 등이 그라우트로 인해 어느 정도 충전되어 2차 주입시의 주입량이 적게 나타나는 것으로 판단된다.

Figure 5는 천공열의 위치에 따른 주입량의 변화를 나타내고 있다. 다른 위치에 비해 8341.5m의 천공열과 8350.5m 구간의 주입량이 높게 나타나고 있다. 이것은 터널공벽에서 관찰된 암반파쇄대와 관계있는 것으로서 이들 천공열의 위치는 파쇄대 부근이다.

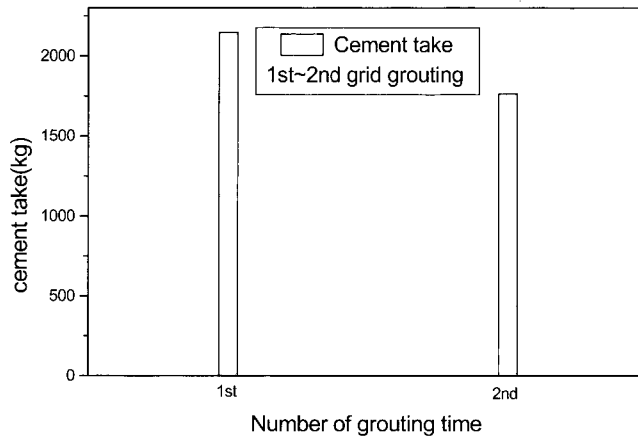


Fig. 4. Total cement take at each stage of consolidation grouting (8338~8354m)

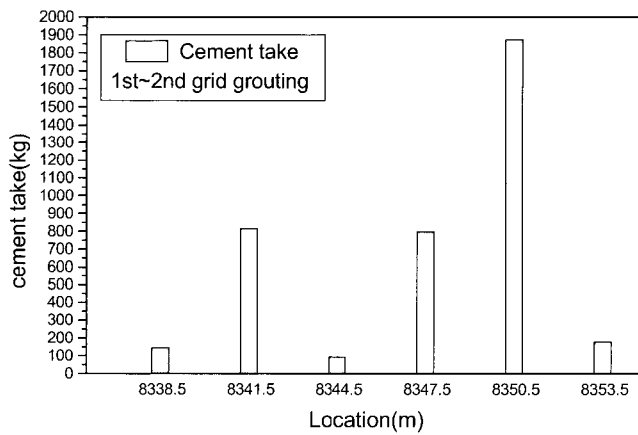


Fig. 5. Total cement take of consolidation grouting at each borehole row (8338~8354m).

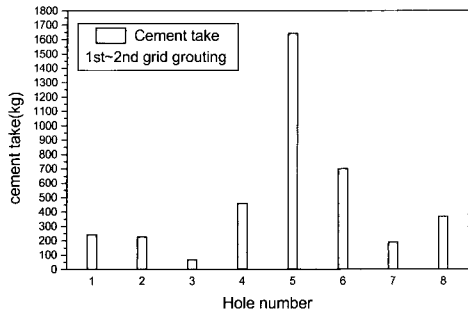


Fig. 6. Total cement take of consolidation grouting at each borehole column.

Figure 6은 동일행별 주입량을 나타내는 그래프로서 4, 5, 6번공의 주입량이 높게 나타나고 있다. 4, 5, 6번공은 인버트부와 측벽부 사이의 위치에 해당하는 시추공으로 측벽부와 천단부 공들에 비해 주입량이 현저하게 많은 것을 알 수 있다. 이것은 재래식 발파터널에서와 유사한 현상으로 측벽부보다는 인버트부와 천단부에서의 유출량이나 시멘트 주입량이 많은 경향을 보인다.

### 루전시험

#### 1차 확인공에서의 루전 시험

재래식공법에 의한 시공구간에서 압밀그라우팅의 효과를 확인하기 위하여 1차 확인공을 천공하여 유출량, 자연수압을 측정 후 루전시험을 실시하였다. 유출량은 평균 2.54 l/min이며 자연수압은 약 1.39kgf/cm<sup>2</sup>, 평균 루전값은 16.74이다. 유출량의 경우 1382.5m 구간의 1번공에서 60 l/min의 측정치가 나타나고 있으며 다른 시추공에서는 대부분 10 l/min 미만의 분포를 보여주고 있다. 1차 확인공에 대한 루전시험에서 특이할 만한 구간은 1382.5m 구간과 1385.5m 구간으로 각각 3번공에서의 루전값이 160, 4번공에서의 루전값이 320으로 측정되었다. 다른 시추공에서의 측정결과가 대부분 20Lu 미만인 것과 비교한다면 상당히 높게 나타난다.

Figure 7은 1차 확인공의 천공 직후 각 위치에 따른 시추공의 루전값 측정치를 보여주고 있다. 전술하였듯이 1382.5m 구간의 3번공과 1385.5m 구간의 4번공에서 높은 측정치를 나타낸다. 이것은 1차~4차 압밀그라우팅의 영향으로 볼 수 있으며, 1381m 구간과 1387m 구간의 인버트부 4번공과 5번, 6번공 부근의 그라우트 주입량이 높은 루전값에 비해 현저히 적고 다른 주변공들에 주입이 집중된 것으로 보아 이 부분의 불연속면이나 파쇄구조에 큰 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

#### 2차확인공에서의 루전시험

2차 확인 천공 시에는 1차 확인공의 주입시 주입량이 많았던 위치를 선정하여 34개공을 천공하였다. 천공 직후 유출량과 자연수압을 측정하고 루전시험을 실시한 결과 공당 평균 유출량은 3.99 l/min, 자연수압은 2.21kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며 시추공 전체에 대한 평균 루전값은 11.59Lu 정도이다. 시험결과 1차 확인공의 천공 시 높은 루전값을 보였던 대부분의 구간에서 측정치가 현저하게 낮아진 것을 볼 수 있다(Fig. 8). 특히 1차 확인공의 그라우트 주입시 주입량이 많았던 1388.5m 구간과 1381.5m 구간 사이에 19개공을 천공하여 주입효과를 확인하여 본 결과 대부분의 시추공에서 30Lu이하의 측정치를 보였으며 이를 초과하는 시추공은 19번공과 28번, 29번 시추공으로 3개공에 불과하다. 최고 측정치를 1차 확인공과 비교하여 볼 때 약 77%의 감소효과를 확인할 수 있다.

### 공내재하시험

공내재하시험(ISRM, 1978)은 시추공의 공벽면을 가압하여 그때의 공벽면 변형량을 측정함으로써 암반 성질(강도, 변형특성)을 조사하는 시험이며, 평판재하시험의 기본원리를 응용하면서 이것을 시추공 공내에서 시험할 수 있게 한 것이다. 본 시험은 일반적으로 지반의 변형계수를 구하는 목적으로 실시되지만, 암반분류의 지표를 얻기 위하여 실시하는 경우도 있으며 암반의 탄성계수나

터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

항복치를 구한다든지 공동 주변의 이완영역 추정 등의 목적으로 실시되는 경우도 있다.

공내재하시험은 시추공 공내에 삽입하는 존데(sonde) 또는 재하 및 변위 검출장치(probe)의 출입이 가능하면 시험공 깊이나 방향에는 특별히 제한 받지 않는다. 존데 외경은 40mm - 90mm 까지 있기 때문에 목적에 따라 선별하여 사용할 수 있으며 본 시험구간에서는 직경 76mm, 길이 6m의 시험공을 굴착하여 시험을 수행하였다.

시험에 적용된 재하방법은 등분포재하방법으로서 시험공 공내에 고무튜브(rubber tube)제의 존데(혹은 probe)를 삽입하고 액체(물 또는 기름)나 기체에 의하여 시험공 공벽에 하중을 작용시키는 하여 일정하게 같은 하중을 작용시킬 수 있기 때

문에 응력분포가 축대칭으로 나타나며 따라서 이론적인 취급이 용이한 것이다. 단, 불균질 지반이나 이방성 지반의 경우에도 얻어지는 변형계수 등은 시험개소 공벽 전체 주면의 평균치로 계산 된다. 일반적으로 저압의 압력원으로는 질소(N<sub>2</sub>)가스를, 고압의 압력원으로는 유압 또는 수압을 사용할 수 있으며 본 시험구간에서는 수압을 압력원으로 사용하였다. 가해지는 압력은 액압으로 전환되어 고압호스를 통하여 재하부에 전달 된다. 재하부는 내압용 고무튜브로 구성되고 있다. 본 시험에서는 OYO사의 Elastometer 200 기종을 사용하였다.

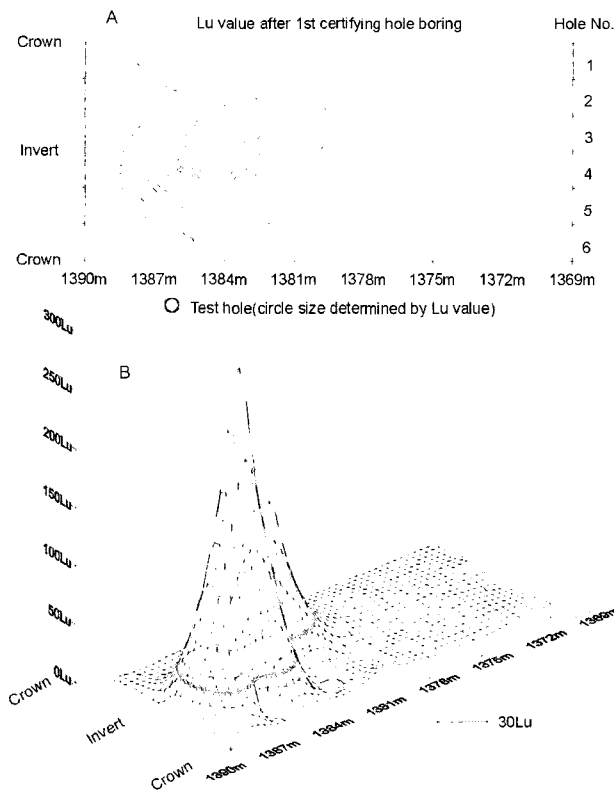


Fig. 7. The distribution of Lugeon values at each 1st certifying hole.

정교철, 서용석

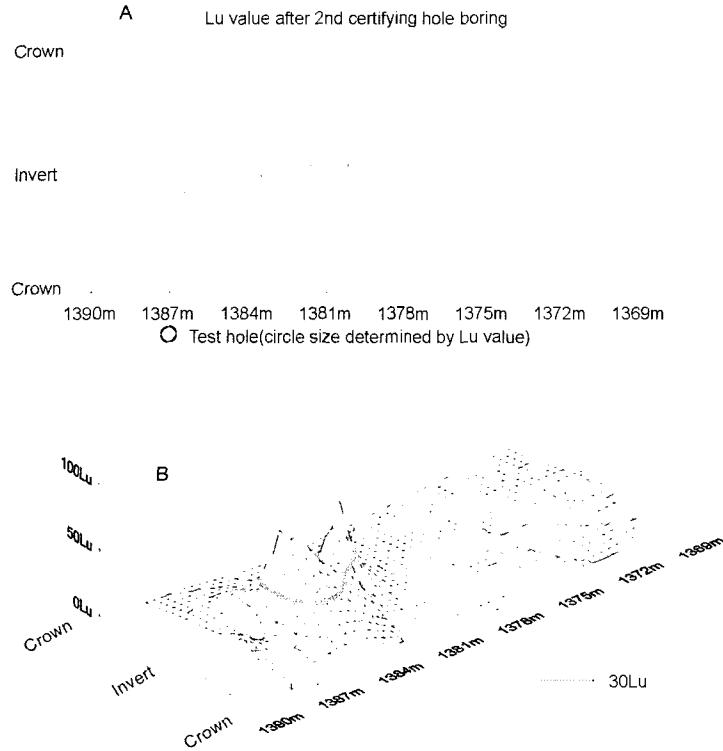


Fig. 8. The distribution of Lugeon values at each 2nd certifying hole.

시험방법

압밀그라우팅 실시 전 공내재하 시험은 TBM굴착 구간에서 실시되었으며, 시험공의 위치는 출구 기준 8349.5m 지점이다. 관저고는 194m이며 지표고는 약 519m, 토피고 약 325m이다. 시험위치부의 지질은 세립질 섬록암으로 비교적 치밀하며, 시추조사시 회수된 코어의 관찰과 터널공벽의 조사결과 시험구간은 단층파쇄대 구간으로 추정된다. 굴착 초기 물이 방울져 떨어지는 상태였으나, 점점 누수량이 증대하여 다량의 지하수 유출로 이어졌다. 이후 차수 그라우팅을 수차에 걸쳐 실시하였으나, 비교적 다량의 지하수 유출이 관찰되었다. 시험대상 암반은 부분적으로 열수의 침투에 기인한 규화작용(silicification)과 탄산염화(carbonitization), 그리고 도토(porcellanite)화 작용으로 인하여 석영맥(quartz vein), 방해석맥(calcite vein) 및 부분적으로 점토 협재물이 나타나며 강도가 상당히 저하

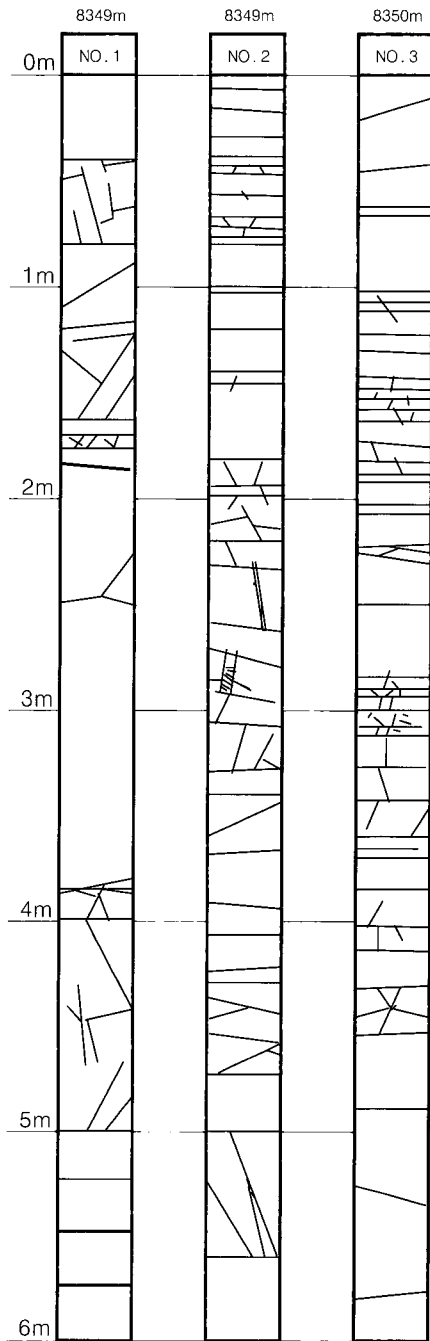
된 상태이다. 압밀그라우팅 전 콘크리트 라이닝이 25cm 두께로 타설되었다.

압밀그라우팅 후 공내재하시험은 출구기준 8349m 단면의 우측과 좌측벽, 그리고 8350m 단면의 인버트부에 각 항공씩 3공에서 실시하였다. 천공 길이는 압밀그라우팅 전과 동일한 6m이며 시추구경은 시험전과 동일한 76mm이다. 천공일시는 그라우트와 라이닝의 양생기간을 충분히 고려하여 양생기간이 지난 후 천공하였다. 압밀그라우팅 후 시험공에 대한 시추추상도를 Fig. 9에 나타내었다.

압밀그라우팅 실시 후 시험위치는 실시 전에 비해 30~50cm 가량의 차이를 보이고 있으나 시험목적이 암반 전체적인 변형성의 전체경향을 파악하기 위한 것이므로 큰 차이는 없을 것으로 판단된다. 압밀그라우팅 전과 후의 시추공 방향은 Fig. 10과 같다



터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구



NO 1 : hard~medium  
 fresh~moderately or completely weathered rock  
 0~0.3m concrete  
 1.5~1.55m evidence of urethane injection in joint  
 1.8~1.9m extremely fractured zone, completely weathered joint

NO 2 : hard~medium  
 fresh~moderately or completely weathered rock  
 0~0.3m concrete  
 1.9~2.3m Quartz vein in contact zone(with Diolite)  
 rock fragment(0.5~2.0cm, redish color)  
 2.0~2.9m extremely fractured joint plane, clay mineral in joint  
 2.9~4.8m Quartz vein in joint  
 5.3~5.4m extremely fractured and completely weathered joint, Quartz vein

NO 3 : 0~0.3m concrete  
 0.4~0.6m short cylindrical core  
 0.6~0.8m weathered joint, short cylindrical core  
 2.5~3.5m Quartz vein

Fig. 9. Core log after consolidation grouting.

가는 방법이다. 본 시험에서도 각 재하단계에 따

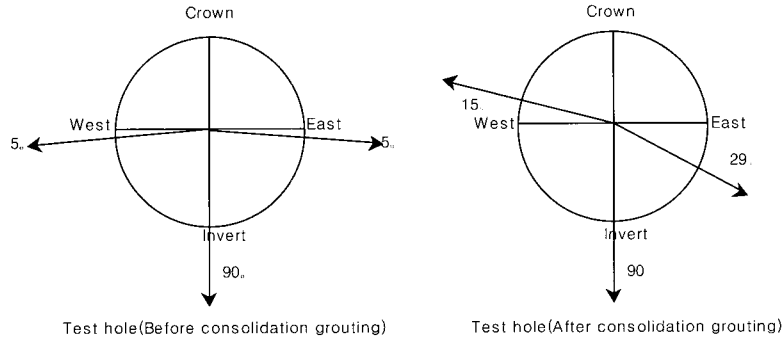


Fig. 10. Drilling direction of elastometer test hole

최대하중의 크기는 설계 대상 구조물에 따라 발생하는 암반내의 설계응력에 의하여 결정되는 것이며, 항복 하중 이내에서도 암반의 느슨함, 불연속면의 분포상황 및 점탄성적 성질 등의 영향에 의하여 변형특성이 다르게 나타난다. 일반적으로 대상암반이 연질암반의 경우는 하중 강도 100 kgf/cm<sup>2</sup> 이내에서 하중강도와 변위 관계에 변곡점(항복점)이 인정되는 경우가 많아 최대하중을 100kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 하고 있는 것이 보통이다. 경질암반에서는 수 100kgf/cm<sup>2</sup>라도 변곡점이 인정되지 않는 경우가 많지만, 특수한 경우를 제외하고 200kgf/cm<sup>2</sup> 정도를 최대하중으로 보고 있다. 본 시험에 있어서도 200kgf/cm<sup>2</sup>를 최대하중으로 하였다.

공내재하시험의 재하방법은 아직 표준적인 것이 확립되어 있지 않고, 시험목적이나 대상 암반에 따라 결정되고 있다. 현재 자주 사용되고 있는 기본적 방법은 단조 재하, 단계 재하, 반복 재하, 지속 재하 등 4가지가 있다. 본 시험에 있어서는 단계 재하방법이 적용되었으며, 이 방법은 암반의 균열이나 파쇄에 의한 영향이 변형에 미치는 정도를 하중단계마다 조사할 수 있다. 또한 최대하중까지를 3~5단계의 하중으로 나누어 각 하중에 대하여 재하 및 제하를 반복하여 최대하중, 항복점이나 파괴점에 도달할 때까지 하중을 증가시켜

라 일정한 압력을 유지하며 15, 30, 60, 120초 일때의 반경의 변화를 기록한 후 재하와 제하를 반복하였다.

변형계수 및 탄성계수의 측정

암반의 변형성상을 나타내는 물리정수로 변형계수 및 탄성계수가 있다. 변형계수는 암반의 전체적인 변형성을 파악하는 것이며, 탄성계수는 암반의 소성적인 변형을 제거한 암반의 탄성적인 성상을 나타내는 것으로, 하중강도-변위곡선으로부터 구해진다. 일반적으로 변형계수는 하중강도-변위곡선의 초기 재하부에서 직선의 기울기로 간주되는 탄성영역에서 평균변형계수로 나타내며, 탄성계수는 하중강도-변위곡선에서 반복재하부에서 직선의 기울기로 간주되는 탄성영역에서 접선의 기울기로부터 구한다.

변형계수( $D_b$ ) 및 탄성계수( $E_b$ )를 구하기 위하여 아래 식을 사용하였다.

$$D_b, E_b = (1 + \nu)R_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta r} \quad (1)$$

여기서

$\nu$  : 포와송비

터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

$\Delta P/\Delta r$  : 하중강도-변위곡선의 경사  
(kgf/cm<sup>2</sup>/cm)

$R_m$  : 경사를 구한 구간 중간의 시험공 반경  
(cm)

$\Delta P$  : 압력증분

$\Delta r$  : 시험공 반경의 증분(공경변화량)

포화송비(poisson's ratio,  $\nu$ )는 일반적으로 경질 암반에서는 0.2, 연질암반에서는 0.3, 풍화암에서는 0.35의 값을 사용되고 있으나 암반조건에 따라 바뀌며 본 시험구간에서는 0.25를 적용하였다. Figure 11-13에 공내재하시험의 결과 중 좌측벽, 우측벽, 인버트부에서 실시한 예를 하나씩 나타내었다.

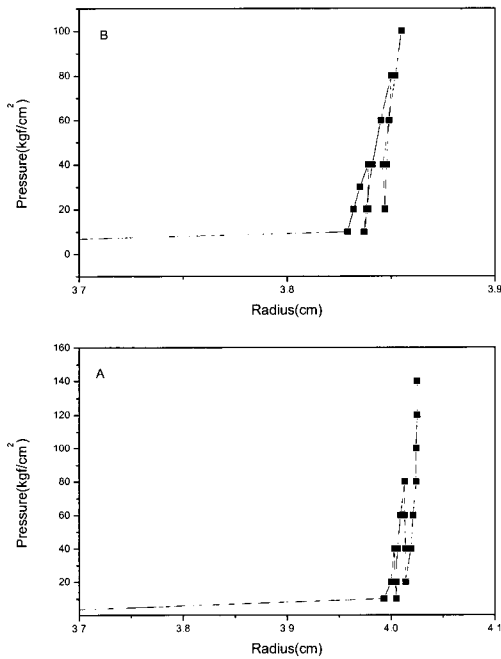


Fig. 11. Variations of rubber tube radius under pressure.  
A : Before consolidation grouting, right wall (test depth 1.3m)  
B : After consolidation grouting, right wall (test depth 1.5m)

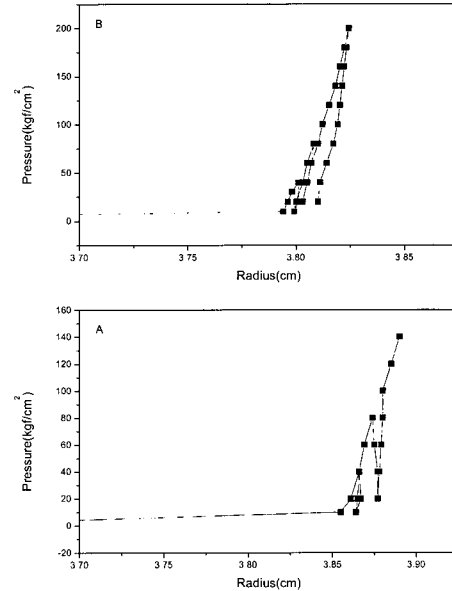


Fig. 12. Variations of rubber tube radius under pressure.  
A : Before consolidation grouting, left wall (test depth 2.7m)  
B : After consolidation grouting, left wall (test depth 4.3m)

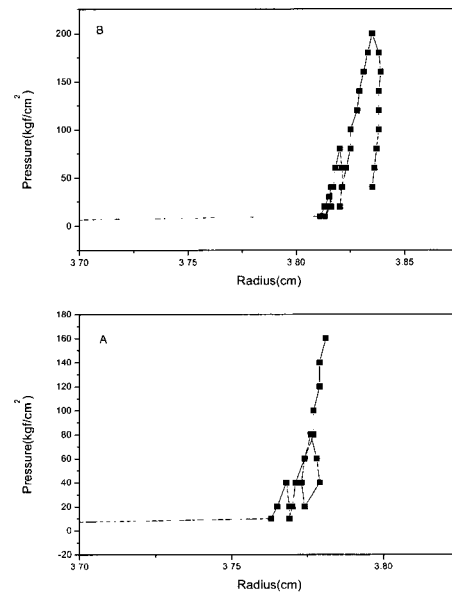


Fig. 13. Variations of rubber tube radius under pressure.  
A : Before consolidation grouting, invert (test depth 2.7m)  
B : After consolidation grouting, invert (test depth 2.7m)

시험결과 및 분석

공내재하시험을 실시한 시추공에 대하여 그라우팅 전의 시험결과와 그라우팅 후의 시험결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 또한 암반 전체적인 변형계수 및 탄성계수의 변화 경향을 알아보기 위하여 암밀그라우팅 전의 변형계수, 탄성계수에 대한 암밀그라우팅 후의 변형계수, 탄성계수 개량비를 편대수 그래프로 점시하였다(Fig. 14~15). 탄성계수의 일부 시험구간을 제외하면 대체적으로 지반이 개량된 것으로 나타나고 있다.

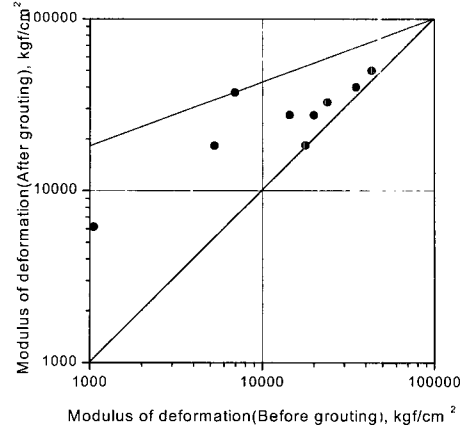


Fig. 14. The relationship on modulus of deformation between before and after grouting.

Table 1. Improvement of Db & Eb

Hole	Test depth(m)		Db (kgf/cm <sup>2</sup> )	Improvement After/Before	Eb (kgf/cm <sup>2</sup> )	Improvement After/Before
	Before	After				
Right	1.3		18245		37584	
		1.5	18345	1.01	27399	0.73
	2.6		14458		18411	
		2.6	27476	1.90	76284	4.14
	4.6		5295		7935	
Left		4.6	18271	3.45	30377	3.83
	2		6935		9694	
		1.3	37198	5.36	43408	4.48
	2.7		19951		34558	
		4.3	27453	1.38	38324	1.11
Invert	3.3		43296		74416	
		5.5	24945	0.58	63441	0.85
	0.7		1055		1359	
		0.7	4916	4.66	6816	5.02
	2.7		35021		48073	
Invert		2.7	35655	1.02	49844	1.04
	5.5		23919		43296	
		5.5	32645	1.36	54260	1.25
				2.30		
					2.49	

터널 내 파쇄지반 개량을 위한 압밀그라우팅 성능 평가 연구

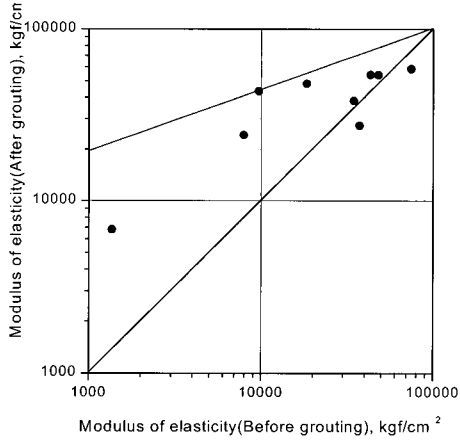


Fig. 15. The relationship on modulus of elasticity between before and after grouting.

상대적으로 공극이 적은 암반에서는 그라우팅에 의한 변형성 및 탄성의 개량효과가 작게 나타나는 것을 잘 반영하고 있는 것이다.

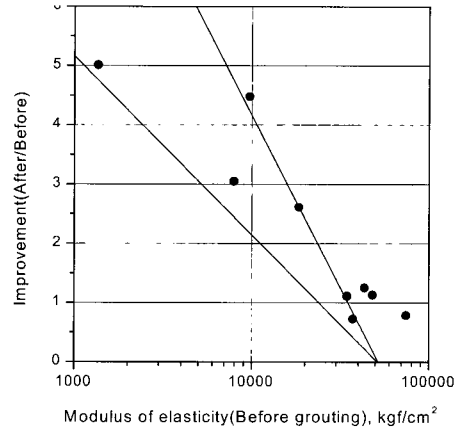


Fig. 17. The distribution of Improvement at each modulus of elasticity.

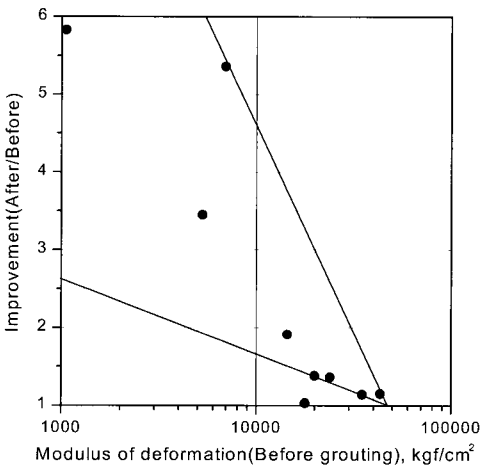


Fig. 16. The distribution of Improvement at each modulus of deformation.

Figure 16과 17은 그라우팅 전의 변형계수 및 탄성계수에 대한 개량비의 관계를 편대수 그래프에 나타낸 것이다. 그라우팅 전의 값이 작은 위치에 대해서는 개량비가 크게 나타나고 그라우팅 전의 값이 큰 위치에서는 개량비가 작게 나타난다. 이는 변형성 및 탄성이 큰 암반보다 작은 암반일수록 불연속면에 의한 공극이 크기 때문에 그라우팅에 의한 개량효과가 크게 나타나는 반면,

결 언

재래식 공법으로 시공된 21m 구간에서 주입용 48개공에 대하여 총 4차로 나누어 그라우팅을 위하여 격공 주입을 실시한 결과 1차 격공 주입시 시멘트 사용량은 약 309.73kg, 2차 주입시에 약 154.709kg, 3차 주입시에 약 356.75kg, 4차 주입시에 약 84.2kg이 주입되었다. 또한 1차 확인공 주입시 소요된 시멘트의 양은 약 1314.81kg이며 2차 확인공의 주입시에는 약 155.39kg이 주입되었다. 2차 확인공의 주입시에 주입량이 소량인 것으로 보아 이미 대부분의 암반이 그라우트로 충전되었다는 것을 알 수 있다.

TBM 공법으로 시공된 16m 구간에서도 역시 48개공에 대하여 2차에 걸쳐 그라우팅을 실시하였다. 1차 격공 주입시 사용된 주입재의 양은 총 2150kg으로 보통 포틀랜드 시멘트가 1180kg, 마이크로 시멘트가 970kg이 사용되었다. 2차 격공의 주입시에는 총 주입량 1766kg 중 보통 포틀랜드

시멘트가 672kg, 마이크로 시멘트가 1094kg이 주입되었다. 본 구간에서는 지질조사로 확인된 파쇄대의 분포로 인하여 1차 주입시 그라우팅이 충분히 이루어지지 않았으며, 2차주입에서도 상당량의 그라우트재가 주입된 것을 알 수 있다.

1차와 2차 확인공에서 실시된 루전시험 결과에 의하면 루전치는 파쇄대의 구조적 분포에 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 또한 2차 확인공에서의 루전치 결과는 1차 확인공과 비교할 때 최고치에서 77%의 감소를 보이고 있다.

시험위치 주변암반에 실시된 암밀그라우팅으로 인한 평균적인 암반개량정도는 변형계수가 평균 2.30, 탄성계수가 2.49로 나타나 탄성계수에 대한 개량이 더 효과적으로 나타났다. 또한 변형계수 및 탄성계수에 있어서 그라우팅 전의 측정값이 작은 경우에 개량비가 크게 나타나고 그라우팅 전의 값이 큰 경우에는 개량비가 작게 나타난다. 이것은 그라우팅 전의 변형성 및 탄성이 작은 암반에서는 불연속면의 발달로 공극이 크고 많아 그라우팅에 의한 지반의 개량도가 큰 것으로 판단된다.

### 참고문헌

김덕근, 1999, 암반터널 차수그라우팅의 주입효과에 대한 연구, 경북대학교 대학원 석사학위논문.

김덕근, 김교원, 2001, 도수터널의 차수그라우팅 현장시험, 지질공학, 11, 81-99.

송성호, 장의웅, 김진호, 김진성, 김진춘, 2002, 전기비저항 수직탐사를 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가, 지질공학, 12, 63-73.

Fransson, A. and G. Gustafson, 2000, The use of transmissivity data from probe holes for predicting tunnel grouting, Tunnelling and Underground Space Technology, 15, 365-368.

Gustafson, G. and H. Stille, 1996, Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data, Tunnelling and

Underground Space Technology, 11, 325-332.

ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanisms Commission on Standardization of Laboratory and Field tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & geomech. Abstr., 15, 319~368.

Kikuchi, T., T. Igari and S. Utsuki, 1997, In Situ experimental studies on improvement of rock masses by grouting treatment, Int. J. Rock mech. Min. Sci., 34, 594.

---

#### 정교철

안동대학교 자연대 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-823-1627  
e-mail: jeong@andong.ac.kr

#### 서용석

한국건설기술연구원 토목연구부  
411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311  
Tel: 031-910-0225  
Fax: 031-910-0211  
e-mail: ysseo@kict.re.kr