

연약 파쇄 지반내 터널의 굴착·보강 설계 및 안정성 분석

Excavation Support Design and Stability Analysis of Shallow Tunnel in Heavily Fractured Rock Mass

신희순¹⁾, Hee-Soon Shin, 신중호²⁾, Joong-Ho Synn, 박찬²⁾, Chan Park, 한공창¹⁾, Kong-Chang Han, 최영학³⁾, Young-Hak Choi, 최용기⁴⁾, Yong-Ki Choi

- 1) 한국자원연구소 자원연구부 책임연구원, Korea Institute of Geology, Mining & Materials
- 2) 한국자원연구소 자원연구부 선임연구원, Korea Institute of Geology, Mining & Materials
- 3) 한국고속철도 과장, Korea High Speed Rail
- 4) 대원토질(주) 대표이사, Dae Won Soil Co., Ltd

SYNOPSIS : In excavation of tunnels especially located in shallow depth, it is not rare to meet geological change in excavation progress worse than expected in the initial design stage. This paper present a case study on the re-design of excavation and support system of a shallow tunnel under construction where it meets the unexpected bad geological condition during excavation. The detailed geological investigation shows that the rock mass is heavily weathered and fractured with RMR value less than 20. Considering this geological condition, the design concept is focused on the reinforcement of the ground preceding the excavation of tunnel. Two design patterns, LW-grouting & forepoling with pilot tunnelling method and the steel pipe reinforced grouting method, are suggested. Numerical analysis by FLAC shows that these two patterns give the tunnel and roof ground stable in excavation process while the original design causes severe failure zone around the tunnel and floor heaving. In point of the mechanical stability and the degree of construction, the steel pipe reinforced grouting technique proved to be good for the reinforcement of heavily fractured rock mass in tunnelling. This assessment and design process would be a guide in the construction of tunnels in heavily weathered and fractured rock mass situation.

Key words : Ground reinforcement, Excavation support design, Pre-grouting, Steel pipe reinforced grouting, Stability analysis

1. 서 론

각종 터널 건설 공사에서 입출구부 등 비교적 지하 천부를 통과하는 지역은 지질상태의 변화가 심하여, 굴착과정에서 초기설계단계의 지반조사에서 예측된 지질조건보다 나쁜 상황에 직면하는 경우가 많다. 본 사례 분석 연구의 대상인 고속철도 터널도 굴착 과정에서 이러한 상황에 직면하여 공사를 중단하고, 당초 설계안의 재 검토 및 새로운 굴착 보강 공법을 모색하게 되었다. 이를 위하여, 대상지역 지

반상태의 정밀 재 평가를 거쳐 이에 적합한 지반보강과 굴착·지보 패턴을 제시하고, 수치해석에 의한 터널 안정성 검증 해석을 통해 그 적용성을 분석하였다.

2. 대상지역의 지반 특성

이 지역은 선캄브리아기의 편암류가 주로 분포하고 있으며 규암과 석회암이 협재되어 있다. 지표 노두 관찰에 의하면, 본 지역은 노년기 지형으로 심한 조구조 운동을 받아서 습곡과 많은 단층이 발달하고 있으며 편암류 내에는 단층에 의해 부분적인 파쇄대가 발달되어 있다. 추가 시추를 통해 파악된 대상 지역의 지반 층서는 그림 1과 같은데, 굴착이 중단된 지점부터 지질상태가 급격히 변화되는 것으로 확인되었다. 이에 의하면, 당초 경암층으로 예상하였던 터널 구간이 실제로 연암 파쇄대와 경암 파쇄대로 확인되었고 연암층으로 예상하였던 터널 상부층은 풍화암층으로 나타났다. 연암 파쇄대층은 터널 하단부까지 존재하며 특히 RQD값이 0%인 파쇄대층이 터널막장 전반에 걸쳐 분포하고 있으며, 갱구부의 천단부는 완전 풍화된 상태로 코아회수가 "0"으로 조사되었다. 지하수위는 터널 천반으로부터 약 7.5~15.4m 상부에 위치하고 있어서, 터널 굴착시 터널상부 암석의 이완으로 인한 터널내부로의 지하수 유출이 예상되므로 공사시 이를 대비하여야 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 1993년에 B-57시추공의 2.0~3.0m 구간의 층적층에서 구한 투수계수는 3.99×10^{-3} cm/s였다.

이러한 지반조사 및 실내역학시험 결과를 이용한 암질평가에 의하면, 터널 구간에서의 RMR은 20 이하로서 매우 불량한 암반으로 평가되었다.

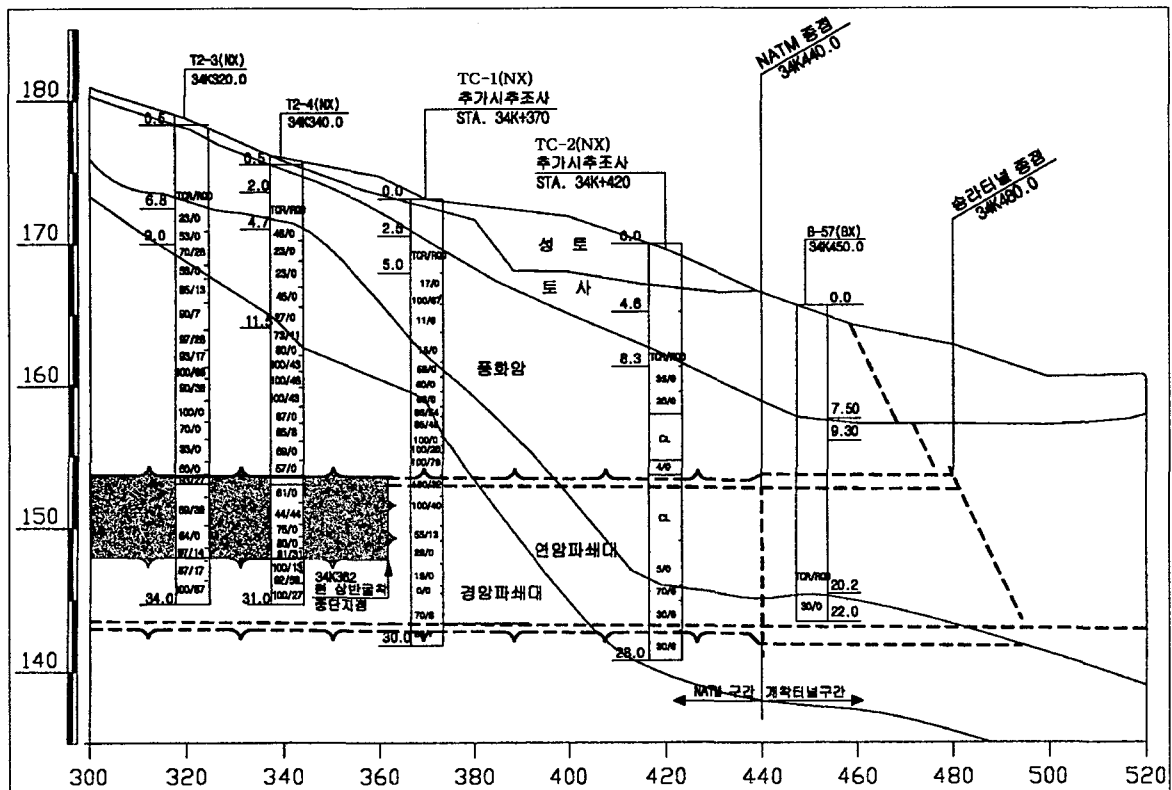


그림 1. 조사대상 지역의 지반 층서 단면도

3. 굴착·보강 방안의 검토

터널 굴착 설계에서는 기본적으로 굴착 대상 지반의 강화, 분할굴착 등의 굴착 방법, 굴착단면의 지보 방안 등이 고려되어야 한다. 터널 굴착시 발생하는 지반의 이완 및 붕괴, 부등 침하, 누수 등을 방지하고 주변 지반을 보강하고자 할 때는 지반 조건을 충분히 검토한 후 보강목적에 따라 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

본 대상지역의 경우에 시추조사 등을 통한 암질 정밀평가에 의하면 당초 설계시에 예상되었던 것보다 지반상태가 매우 불량한 것으로 나타났다. 당초 설계안의 pre-grouting 및 fore-poling 공법은 지반상태가 보통암 이상으로 예상하여 설계된 것으로, 재 확인된 매우 불량한 암질조건에서는 지반강화나 천반 지지 효과가 크지 않다. 이는 현장 굴착 시공 과정에서 확인된 바 있다.

따라서, 새로운 터널 굴착 및 지보 설계 방안 검토에 있어서, 굴착에 선행하여 터널 심도 특히 천반부의 지반을 강화하는 방안에 초점을 두고자 하였다. 분할 굴착 방법으로는 당초 2 분할 굴착 단계와 비교를 위해 pilot tunnel 굴착 단계를 추가하는 방안을 고려하였다.

이상으로부터, 새로운 굴착·보강 방안으로 두 가지 대안을 제시하였다. 즉, 굴착단계를 세분하여 터널의 상부 반단면에 대해 pilot 터널을 먼저 굴착하고 천반을 LW-grouting과 fore-poling으로 보강하는 방안 및 현재의 굴착 단계에서 천반을 강관 다단 grouting으로 보강하는 방안이다. 당초 설계안 및 새로운 보강설계안의 설계 도면은 그림 2와 같다.

3.1 당초 설계안

- 굴착단계 : 2단계 굴착 (상부 반단면 굴착 → 하부 반단면 굴착)
- 지반보강 : Pre-grouting (보강영역=3m, $\phi=46.5\text{mm}$, L=8m, CTC=5m)
(터널단면 원주상 범위=180°, 7공)
Fore-poling (보강영역=1.2m, $\phi=25\text{mm}$, L=4m, CTC=2.4m)
(터널단면 원주상 범위=108°, 31공)
주입재·방법 (Cement milk, 일반 저압주입 및 천공 hole 채움)
- 터널지보 : Shotcrete (1차=50mm, 2차=100mm, 3차=100mm)
Steel arch (H-150x150x7x10mm, CTC=0.8m)
Rock bolt (D25, L=5m, CTC=0.8m, 터널단면 원주상 32개)
- 라이닝 : T=40cm
- 인버터 : 설치하지 않음.

3.2 보강설계안-I

- 굴착단계 : 3단계 굴착 (pilot tunnel 굴착 → 상부 반단면 굴착 → 하부 반단면 굴착)
- 지반보강 : LW-grouting (보강영역=5m, $\phi=100\text{mm}$, L=9.2m, CTC=1.0m)
(터널단면 원주상 범위=180°, 20공)
Fore-poling (보강영역=1.2m, $\phi=25\text{mm}$, L=4m, CTC=2.0m)
(터널단면 원주상 범위=180°, 41공)
주입재·방법 (Water glass + Cement milk, 천공 hole 채움)
- 터널지보 : Shotcrete (1차=50mm, 2차=100mm, 3차=100mm)
Steel arch (H-150x150x7x10mm, CTC=0.8m)
Rock bolt (D25, L=5m, CTC=0.8m, 터널단면 원주상 32개)
- 라이닝 : T=40cm
- 인버터 : 설치함.

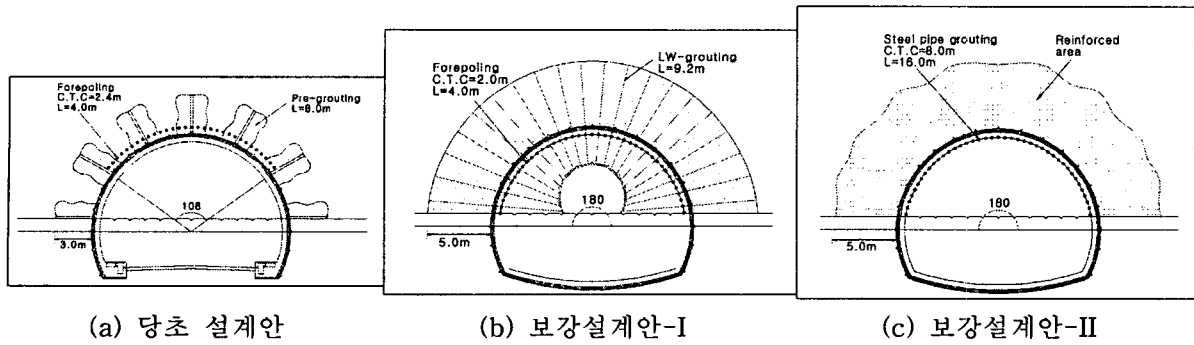


그림 2. 터널 굴착·보강 설계안의 비교

3.3 보강설계안-II

- 굴착단계 : 2단계 굴착 (상부 반단면 굴착 → 하부 반단면 굴착)
- 지반보강 : Steel pipe reinforced grouting
 (보강영역=5m, $\phi=125\text{mm}$, L=16m, CTC=8.0m)
 (터널단면 원주상 범위=180°, 41공)
 주입재·방법 (Water glass + Cement milk, Packer를 이용한 침투 주입)
- 터널지보 : Shotcrete (1차=50mm, 2차=100mm, 3차=100mm)
 Steel arch (H-150x150x7x10mm, CTC=0.8m)
 Rock bolt (D25, L=5m, CTC=0.8m, 터널단면 원주상 32개)
- 라이닝 : T=40cm
- 인버터 : 설치함.

4. 터널안정성해석에 의한 보강설계안의 검토

4.1 해석 모델 및 입력자료 설정

당초 설계안을 재 평가된 암질조건에 적용했을 때의 터널 안정성 측면의 불안전 요소를 파악하고, 새로운 보강설계안의 적용성을 검토하기 위하여 FLAC을 이용한 2차원 전산해석을 통한 터널안정성을 검토하였다.

잔여 굴착구간은 약 80m 정도로 전체적으로 터널심도까지 풍화암 또는 연암 파쇄대가 분포하고 있으며 STA.34K+400 지점을 기준으로 지반상태의 변화가 별로 없으므로(그림 1 참조), 이 지점에서의 지반 층서 및 터널 단면을 해석 단면으로 선정하였다.

해석을 위한 지반 층서는 지표로부터, 토사층, 풍화암 및 연암 파쇄대층, 경암 파쇄대층으로 구분하였다. 토사층의 경우 표준관입시험치(N)는 평균 30으로 조사되었는데, 이를 이용하여 구할 수 있는 내부마찰각이나 탄성계수 등은 Dunham 및 Schmertman의 제안식들로부터 구하였다. 이외의 물성은 조사 자료가 부족한 관계로 기존의 자료 및 기준들을 참고하여 일반적인 범위의 값을 적용하였다.

암반층의 지반정수는 통상 실내시험 및 암반평가자료에 의한 RMR을 이용하여 추정한다. 추가 시추에서 얻어진 암석 코어는 파쇄가 심하여 실내물성시험이 불가능하고 단지 경암 파쇄대층에서 1회 시험 가능한 코어를 얻을 수 있는 정도였다. 따라서, 경암 파쇄대층에 대한 지반정수 입력자료는 이 실내시험결과와 시추추상도에 나타나 있는 암반상태 기록을 기초로 RMR의 범위를 10 내외로 선정하고, Bieniawski 및 Serafim & Pereira 등에 의한 영률 추정 제안식, Truman 및 Hoek & Brown 등에 의한 강도 추정제안식을 적용하여 추정하였다. 그리고 기존 자료들과 비교하면서 파쇄가 심한 암질상태를 고

려하여 안전한 측면에서 되도록 보수적으로 정하였다. 풍화암 또는 연암 파쇄대층의 지반정수는 실내 시험이 불가능하고 기초 자료도 없기 때문에 위에서 결정된 경암 파쇄대층의 지반정수를 참고로 하여, 1/2에 해당하는 값들을 적용하였다. 이상으로부터 얻어진 층서별 지반정수 입력자료는 표 1과 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반 층서별 물성 자료

층서 구분 물성	토사층	풍화암 및 연암파쇄대층	경암 파쇄대층
단위중량 (kg/m ³)	1,900	2,400	2,600
체적팽창계수 (MPa)	3.53×10^1	3.17×10^2	6.23×10^3
전단계수 (MPa)	1.35×10^1	2.34×10^2	4.67×10^3
내부마찰각 (degree)	30	35	40
점착강도 (MPa)	0	0.05	0.1
인장강도 (MPa)	0	0.002	0.004

4.2 해석 결과의 비교 검토

4.2.1 소성 파괴 영역

당초 설계안의 경우, 굴착 완료 단계까지 터널 천반의 fore-poling 보강영역(터널 주위 약 2m 범위)과 pre-grouting 보강영역(터널 주위 약 3m 범위)에서 응력 이완대 및 락 형태의 소성영역이 나타나고 국부적인 인장파괴도 발생하였다(그림 3 참조). 즉, 당초 설계 공법 및 시공범위로는 지반 보강 효과가 크지 않으며 천반의 안정성을 확보하는데 어려움이 있을 것으로 판단된다. 보강설계안-I의 경우는 굴착이 진행되면서 천반 중앙부와 바닥부에서 약간의 응력이완대가 형성되나 당초 설계안에 비해서는 그 범위가 현저히 감소하여 불안정성을 유발할 정도는 아니며, 보강설계안-II의 경우도 상반 굴착이 완료된 상태에서 터널 천반 주위에 일부 소성영역이 발생하지만 그 범위는 매우 제한적이고 파괴발생 지점도 나타나지 않으며 하반 굴착 완료시에는 터널 주위에 소성영역이 나타나지 않았다.

4.2.2 내공변위 발생량

터널 바닥부의 상향 변위 즉, heaving량을 보면(표 2 참조), 인버터를 고려하지 않은 당초설계안에서는 굴착완료 후 20cm 이상이 발생하고 라이닝 설치 후에도 2cm 정도의 추가 변위가 계속되었다. 그리고 바닥부에서 전체적으로 인장파괴 영역이 깊게 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 두 보강설계안에서는 굴착완료 후 바닥부의 heaving은 3cm 내외로 당초 설계안의 약 16% 수준으로 줄어들었고 라이닝 설치후에는 지속적인 증가없이 안정화되는 양상을 보였다. 즉, 굴착 과정 및 장기적 측면의 터널 바닥부의 안정 유지를 위해서는 인버터를 설치하는 방안이 필요한 것으로 나타났다.

4.4.3 Rock bolt 축력 분포

터널 굴착이 완료된 상태에서 터널 천반 및 측벽부에 설치된 rock bolt에 작용하는 축력은, 당초 설계안에서는 최대 20 ton로 나타났다. 이는 rock bolt의 제원이나 grout에 따라 다르지만 통상적인 rock bolt의 허용 인발력인 약 10~15 ton과 비교할 때 최대 한계를 넘어서는 수준이다. 따라서, 이 해석 결과로 볼 때 터널 주위에서 국부적으로 rock bolt의 보강 효과가 발휘되지 않는 경우가 발생할 수가 있다.

보강설계안-I 및 보강설계안-II의 경우, rock bolt의 최대 인장 축력은 각각 1.2 ton 및 0.7 ton으로서 5% 이내로 감소하였다. 즉, 지반 보강에 따라 rock bolt의 천반 지지 효과도 커짐을 알 수가 있다.

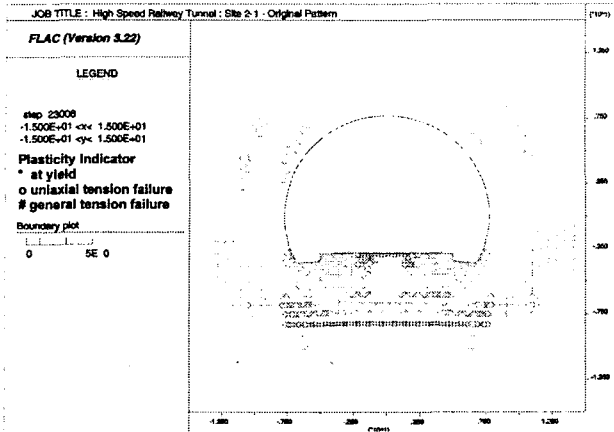


그림 3. 터널주변 소성파괴영역 분포(당초 설계안)

표 2. 터널 굴착에 따른 터널 내공 변위량

보강설계안	상반 굴착 후		굴착 완료 후	
	수직변위량 (cm)		수직변위량 (cm)	
	천반부	바닥부	천반부	바닥부
당초 설계안	-1.04	0.65	-1.18	22.34
보강설계안-I	-0.89	0.44	-0.90	3.27
보강설계안-II	-0.66	0.44	-0.60	3.39

5. 결론

천부 연약 파쇄 지반내의 터널 굴착 · 보강 공법의 설계 평가를 위해 수행된 본 사례 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

조사 대상 지역인 OO터널 종점부의 지반은 시추조사 및 암질 재평가 결과, 당초 설계시의 예상보다 연약한 풍화암층 및 연암 파쇄대가 터널 심도 주위에 넓게 분포하는 것으로 확인되었으며, 이에 따라 당초 설계안인 pre-grouting 및 fore-poling 공법으로는 굴착과정 및 이후의 터널의 안정성을 확보하기 어려운 것으로 평가되었다.

이에 따라, 특히 파쇄가 심한 이 구간의 암질특성을 고려하여 분할 굴착 방법이나 터널 지보 자체 뿐만 아니라 굴착 이전 단계에서의 지반 강화 측면에 초점을 두어 새로운 굴착 · 보강 방안을 검토하였다. 즉, 새 굴착 · 보강 설계로서, 굴착단계를 세분하여 터널의 상부 반단면에 대해 pilot 터널을 먼저 굴착하고 천반을 LW-grouting과 fore-poling으로 보강하는 방안 및 현재의 굴착 단계에서 천반을 강관다단 grouting으로 보강하는 방안을 제시하였다.

터널안정성해석에 의하면, 당초 설계안은 재 평가된 암반조건에서 터널 천반부 및 바닥부에서 소성파괴가 넓게 분포하고 바닥부에서도 심한 heaving 현상이 나타나지만, 제시된 두 보강설계안의 경우는 이러한 불안전 요소를 억제하여 터널의 안정성을 충분히 확보할 수 있는 것으로 나타나서, 이 구간에 대한 새로운 굴착 · 보강공법으로서 적용이 가능한 것으로 평가되었다.

제시된 공법들의 실제 현장 적용에 있어서는, 이러한 보강 효과 분석과 아울러 시공상의 장단점이나 공사비와 같은 경제적 측면도 함께 고려되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 신희순, 선우 춘, 이두화(1999), 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관, 600p.
2. (주)동일기술공사(1998), 서울-부산간 경부고속철도 제2-1공구 노반신설기타공사 터널단면해석 보고서, 622p.
3. 희구엔지니어링(주), 1999, 경부고속철도 제2-1공구 지질조사보고서, 34p.
4. Bieniawski, Z.T.(1989), *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, 251p.
5. Hoek, E. and Brown, E.T.(1997), "Practical estimates of rock mass strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
6. Serafim, L.J. and Pereira, P.J.(1983), "Consideration on the geomechanical classification of Bieniawski", *Int. Symp. On Engineering Geology and Underground Construction*, Vol.2, pp.33-42.