

연약지반 터널굴착시의 지반보강 사례연구

Application of Umbrella Arch Method for Tunneling in the Soft Ground

최용기¹⁾, Yong-Ki Choi, 김창용²⁾, Chang-Yong Kim, 한명훈³⁾, Myoung-Hun Han, 황찬호⁴⁾ Chan-Ho Hwang

¹⁾ 대원토질(주) 대표이사, President of Dae Won Geotechnical CO., LTD

²⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 연구팀장, Project Manager Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute Construction Technology

³⁾ 대원토질(주) 엔지니어링사업부 대리, Assistant Manager of Dae Won Geotechnical CO., LTD

⁴⁾ 대원토질(주) 엔지니어링사업부 기사, Engineer of Dae Won Geotechnical CO., LTD

SYNOPSIS : Soil and rock improvement and reinforcement techniques are applied to achieve safe tunnel excavation in difficult geological conditions. The Umbrella Arch Method(UAM), one of the auxiliary techniques, is used to reduce ground permeability and improve stability of the tunnel by inserting a series of steel pipes into the ground around the crown inclined to the longitudinal axis of the tunnel. Additionally, multi-step grouting is added through the steel pipes. UAM combines the advantages of a modern forepoling system with the grouting injection method. This technique has been applied in subway, road, and utility tunneling sites for the last few years in Korea.

This paper presents the case histories on ground improvement associated with UAM used in two soft ground construction sites. First is the case that passed the fault zone. Second is the case that passed the weak soil zone. This paper suggest the reinforcement design for these cases and further applicability on another cases

KEYWORDS : 강관보강형 다단그라우팅공법(UAM), 터널 보조공법, Fore Poling, 약액주입공법, 우레탄공법, Fault Zone

1. 서 론

연약지반 터널굴착시의 지반 개량공법 중 하나인 강관보강형 다단그라우팅 공법은 90년대에 들어 급속히 터널보강공법으로 많이 사용되고 있다. 이 공법은 터널 굴착전 막장에 강관을 적절한 형상으로 배열, 설치하고 주입재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반개량으로 인하여 강관과 주변지반을 일체화시키며 Umbrella type으로 Beam arch를 형성, 상부의 토압 및 이완 영역을 경감시키고 강관을 이용, Grout재를 주입하여 차수 및 지반 보강효과를 동시에 얻는 공법이다.

본 연구는 Fault zone 및 연약 토사층인 경우의 터널굴착에 따른 지반보강시 본 공법을 적용하여 시

공한 사례와 그 결과를 제시하고 향후 본 공법의 시공에 대한 제반 문제점과 아울러 특수한 현장에 본 공법을 적용할 수 있는 방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 공법의 특징

2.1 기본원리

강관보강형 다단그라우팅공법은 기존 터널보강 공법들의 문제점을 보완하기 위해 개발된 공법이다. 본 공법은 먼저 터널굴착전에 천공장비를 이용하여 수평천공후 소구경 강관을 지중에 일정한 각도로 삽입 설치한다. 그리고 그 강관의 내측으로 Packer를 설치하여 Grout재를 다단으로 주입함으로써 지반굴착 전에 강관의 Beam작용을 유발시키고 주입재에 의한 차수 및 접착력 증대, 밀도, 탄성계수를 증가시켜 상부 및 주변지반을 지지해 주는 역할을 하기 때문에 하중 경감효과 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 공법이다.

본 공법이 적용될수 있는 경우로는 또한 토피가 얇아 터널 굴착시 이완영역이 지표에 까지 전개되는 경우, 터널 상부지반의 풍화가 심해 굴착시 붕락이 예상되는 경우, 터널주변에 지중시설물 및 기존터널이 인접하여 지나가는 경우, 큰 상재하중이 직접적으로 하부터널에 전달되는 경우 등에 주로 적용되고 있다.

2.2 공법의 비교

일반적으로 국내에서 사용되고 있는 터널 보조공법으로는 Fore poling공법, 약액주입공법 (S.G.R, G.C.M, J.C.M etc), 우레탄공법, 강관보강형 다단그라우팅 공법등이 있으며 각 공법을 비교하면 다음표와 같다.

현재 터널 보조공법의 추세는 차수 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있고 경제성이 있는 강관보강형 다단그라우팅공법을 선호하고 있는 실정이며, 현재 서울지하철, 부산지하철, 인천지하철, 대구지하철, 전력구, 통신구 및 도로 터널, 경부고속철도 터널 등 다양한 터널현장에 본 공법이 적용되고 있다.

표 1. 터널 보조공법의 비교

구 분	FORE POLING	약액주입공법	우레탄 공법	강관보강형 다단그라우팅공법
공법개요	지반내에 철근을 삽입하고 시멘트 몰탈로 공내를 충진하는 공법	지반내에 시멘트현탁액과 규산소다를 정배합으로 주입하면서 Gel Time을 조절하는 공법	지반내에 발포성을 갖는 우레탄계 약액을 주입하여 막장 전방의 이완방지 및 차수 효과를 얻는 공법	지반내에 강관을 삽입하고 시멘트 현탁액을 주입하여 강관과 주변지반을 일체화 시켜 Beam Arch를 형성시키는 공법
목 적	보강목적	차수 및 보강목적	차수목적	차수 및 보강목적
적용지반	암반 및 풍화대	모든지반	파쇄암반	모든지반
차수효과	불 가	양 호	아주양호	양 호
보강효과	양 호	보 통	보 통	아주양호
경 제 성 (본 공법 1.0 기준)	0.5	1.2	1.5	1.0

표 1. 에서 보는 바와 같이 유사한 역할을 하는 여러 보조공법중 본 공법은 적용될수 있는 지반조건이나 그 효과면에서 타 공법에 비해 유리한 것으로 나타났고, 특히나 경제성 측면에서 보면 차수 및 보강목적을 동시에 얻는 공법중에서는 가장 유리한 것으로 나타나 현재 많은 터널현장에서 적용되고 있다.

2.3 설계 및 시공법

본 공법의 설계 및 시공방법의 적용에 있어서 고려해야 할 일반적인 내용은 다음과 같다.

- (1) 강관의 간격 : 강관의 분리간격은 지반성질(점착성, 입도, 밀도, 균열, 지하수 등)에 따라 결정해야 하나 일본 실험식의 경우 강관경의 10배 전,후를 적용하며 국내 지하철 및 도로터널 현장에서의 평균 간격은 토사~풍화암층은 30~50cm, 파쇄 연암층은 40~60cm 간격으로 시공하고 있다.
- (2) 강관의 구경 : 강관은 일반구조용 탄소강관(SPS-400)을 사용하며 크기는 가해지는 하중크기에 따라 변화하므로 강관단면 크기를 가정한 후 가정 단면에 미치는 실용력을 외부하중으로부터 산정하여 강관의 허용응력과 비교 분석 후 결정하나 국내 터널에 사용하고 있는 강관은 $\phi 50\sim 60\text{m/m}$ 로 시공하고 있다.
- (3) 강관의 겹침길이 : 강관의 겹침시공은 터널보강 및 차수효과의 극대화와 터널굴착부의 안정성을 도모하는데 중요한 인자로서 국내에서는 토사~풍화암층은 강관길이의 40~50%, 파쇄연암층은 30~40%를 중복시켜 시공하고 있다.
- (4) 천공각도 : 터널내에서 수평시공을 할 경우에는 확대지보에 의한 터널확공이 요구되므로 시공성 및 경제성을 고려하여 상향 경사시공을 실시하고 있으며 이완영역을 고려한 천공각도의 결정이 필수적이다. 현재 국내실정은 토사층은 $5\sim 7^\circ$, 풍화암층은 $7\sim 10^\circ$, 연암층은 $7\sim 15^\circ$ 로 시공하고 있다.
- (5) 보강 zone : 터널굴착시의 보강 zone의 결정은 갱구부일 경우 지층상태와 토피고에 따라 결정하나 통상 토사층이나 풍화암층일 경우에는 2열 $150\sim 180^\circ$, 파쇄연암층일 경우에는 1열 $120\sim 180^\circ$ 로 보강하고, 갱내 보강시는 토사터널은 $180\sim 270^\circ$, 암반층일 경우는 $120\sim 180^\circ$ 로 시공하고 있다.
- (6) 천공장비 : 강관다단그라우팅시의 천공은 내경 50m/m 이상의 가공된 강관과 실링호스가 삽입될 수 있는 $\phi 110\text{m/m}$ 이상의 천공이 가능한 강력한 Power를 가진 터널전용 천공기를 투입하여 천공해야 한다.
- (7) 주입장비 : 주입장비는 3조식 믹서와 동량 주입식 펌프(토출압력 20kg/cm^2 이상), 주입압과 주입량을 자동기록하는 자동 유압 유량계를 설치해야 한다.
- (8) 주입재 : 주입재는 강도, 침투범위, 시공성 등을 고려하여 보통시멘트와 마이크로 시멘트를 사용하고 있으며, 지질특성을 고려하여 주입재를 선정해야 한다.

3. 연약지반 보강사례

3.1 FAULT ZONE 통과구간에 대한 지반보강 사례

3.1.1 현장 현황

당 현장은 OO 신광산 개발 공사중 NATM 터널구간으로서 지질학적으로 보면 지질구조선이 이 터널의 중심을 가로지르는 형태의 용출수가 많은 단층대이다. 막장상단이 붕괴된 지역으로 단층점토가 지층사이에 협재해 있고, 단층의 경사는 약 70° 로서 단층점토와 파쇄된 Schist, Pegmatite 등의 혼합체가 용출수에 의해 급경사의 매끄러운 단층면을 따라 Sliding이 계속적으로 일어났던 지역이며 붕괴구간내

강관 보강형 다단그라우팅공법을 시행, 보강이 완료되어 안전하게 터널공사를 마무리 하였다.

또한 암석역학적으로 보면 R.M.R값이 매우 낮은 현장이며, 동력변성 작용에 수반된 단층작용의 부차적인 파쇄대 형성은 터널 자립 및 차수의 개념에서 상당히 보강을 필요로 하였다. 따라서, 단층대 구간에서의 본 터널은 강관보강형 다단그라우팅을 적용하여 보강 시공하였다.

3.1.2 시 공 방 법

1) 터 널 상 부

본 지역은 편마암과 석회암 단층경계선상의 단층대에 용출수가 50ton/day 정도로 분출하기 때문에 우선적으로 차수효과를 얻을수 있는 공법이 필요 하였고, 단층경계선에서 터널막장으로의 Sliding을 막기위해서는 강관과 주변지반 및 단층대를 일체화시켜 굴착진 Beam arch를 형성시킬 수 있는 강관보강형 다단그라우팅 공법으로 시공하는 것이 가장 적절하다고 판단되었다.

이미 굴착되어 있는 부분은 단층대가 붕괴된 지역이므로 2열(16m보강장/8m굴착장)로 시공하였으며 아직 굴착되지 않은 부분에 대해서는 1열(16m보강장/8m굴착장)로 보강하였다. 기 굴착부는 시공중 추가 붕락이 발생하더라도 강관에 의한 Beam체가 2열로 형성되어 있으므로 급붕락에 의한 인적, 물적 피해를 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단되기 때문에 2열로 강관보강형 다단그라우팅을 시공하였다. 그림 3.1은 본 공법의 보강도를 보여주고 있다.

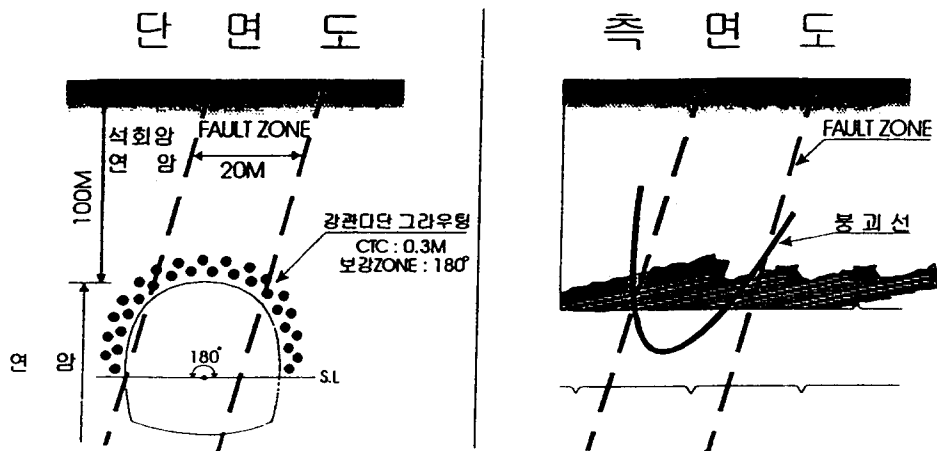


그림 3.1 터널상부 보강도

2) 터널 INVERT

본 지역은 Against Dip 75° 내외로 발달한 단층 파쇄대로서 이러한 영향으로 응력해방에 따른 Heaving현상 및 Swelling Rock의 부피 팽창현상에 의해 내공변위가 발생할수 있으므로 Invert구간의 안정성 증대를 위한 측벽 및 천단부의 보강외로 별도의 대책검토가 요구되어졌다. 따라서 단층지역의 붕괴구역에서는 Invert의 융기현상이 발생하였고, 마제형 터널구조에서 측벽부의 응력을 상쇄시킬수 있는 형태로 하부보강을 실시 하였다. 특히 단층 파쇄대 하부의 경우 Bolt pattern의 조정에 의해 파쇄암층을 관통, 신선한 경암층에 Grout Bolt(C.T.C = 1.5M)형태의 심도를 달리하는 주입방식으로 대상암을 고결하였고, 단층 파쇄대 인접구간은 C.T.C 4.0M 를 적용하여 보강하였고, 측벽부의 굴착으로 인한 2차적 횡압의 발생을 억제하기 위해 45° 각도로 좌,우측부에 보강을 하였다. 그림 3.2는 본 공법의 Invert부 보강도를 보여주고 있다.

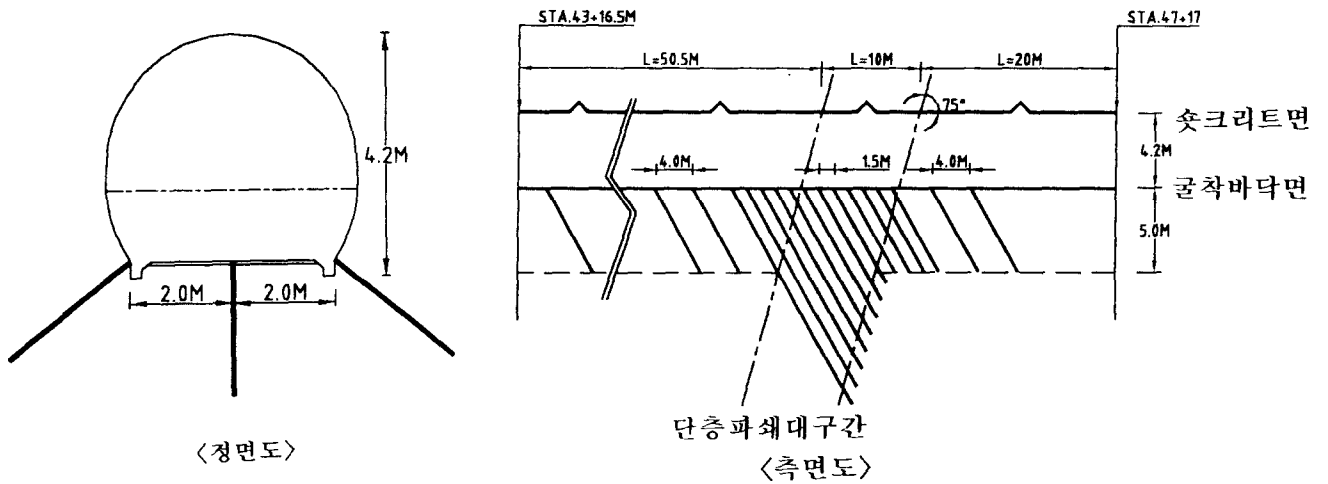


그림 3.2 터널 Invert 보강도

3.1.3 시공 결과

강관보강형 다단그라우팅 공법에 의하여 단층대 통과구간에서 시공한 결과, 주입재에 의한 차수효과로 굴착시 지하수 유입이 현저히 줄어 들었으며(15 ton/day) 지반보강전의 투수계수는 $K = 5.48 \times 10^{-3}$ cm/sec 였으나 보강후의 투수계수는 $K = 3.15 \times 10^{-5}$ cm/sec로 나타나 차수 및 지반보강효과를 간접적으로 확인할 수 있었다.

또한 기굴착부는 단층파쇄대가 붕괴된 지역이므로 본 공법으로 보강할 경우에는 Umbrella Type에 의한 Beam Arch 효과로 터널 굴진시 이완영역이 거의 없었으며 이로 인한 영향으로 천단변위는 0.13 mm, 내공변위는 3.1mm 정도 발생하였으나 초기에 수렴하는 현상을 보여 주었다.

Invert 보강 구간에서는 단층 파쇄대 통과시 하부의 보강방법으로 강관의 길이를 조절하여 단층파쇄대를 통과하여 신선한 암반층에 삽입 고정하여 대상암을 고결시킴으로써 본 공법으로 단층 파쇄대를 봉합하는 효과를 얻을 수 있었다.

강관보강형 다단그라우팅 공법은 Long Type에 의한 천공방법으로 보강을 실시하므로 막장전면에 대한 암질 예측이 가능한 장점을 가지고 있으며 당 현장에서도 시공중 막장전방에 대한 암질예측이 가능하다는 것을 아울러 볼 수 있었다.

3.2 토사구간에 대한 지반보강공사

3.2.1 현 장 현 황

본 사례지역은 154 KV 000-00 전력구 4차 공사중 터널 보강공사구간으로서 터널 생구부에서 약 60 M 지점까지는 당초 Pre-Grouting에 의하여 설계되어 있었으나 수직구 굴착에 따른 지반의 상태를 분석한 결과 기반암인 풍화암이 오랜 기간 풍화가 진행되어 지하수 유입시 풍화정도가 매우 커서 석영을 비롯한 구성광물이 포화된 점토입자로 측면에서는 물을 함유하고 있기 때문에 암석의 역학적인 성질을 상실하고 있는 상태였다. 여러 방향의 길리민과 함께 불연속면을 확대시켜 터널자립에 불리한 요인으로 작용하게 되므로 이에 따른 보강대책으로 강관보강형 다단그라우팅을 적용하였으며, 천공작업 도중 9.0~13.0M 지점에서 폭 4.0M, 높이 5.0~10.0M 의 토사 공동층을 발견하였다. 즉 주입재의 주입압력이나 천공작업시 천공속도를 비교해 보면 전방에 일정규모 이상의 공동(Cavity)를 발견할수 있었다.

3.2.2 시 공 방 법

본 지역은 풍화가 심하게 발달한 풍화암이나 암석역학적 성질을 거의 상실한 상태로서 갱구부 보강을 2열로 270° 원형 배열의 보강을 통해 지하수 유동을 억제하고 동시에 Beam체 형성을 통해 포화된 상태의 풍화암에서의 급붕락에 의한 인적, 물적 피해를 방지하였다.

또한, 갱내부와 측벽부의 보강은 270° 원형 배열의 1열 보강(16m 보강장/18m 굴착장)을 시행하였으며 S.L 선을 기준으로 하여 하부의 경우 이격 거리를 확대하여 하향시공을 하였다.

토사 공동의 보강방법은 터널천단부에 사하중의 영향을 최소화할 수 있는 방안으로 주입재를 선정하였으며 1차로 갱내에서 LW grouting에 의해 공동을 채운 후 2차로 지상에서 공동을 충전하여 공동구간에 대한 보강공사를 완료한 다음 막장내에서 강관보강형 다단그라우팅공법에 의하여 선진 보강후 공동구간을 통과하였다.

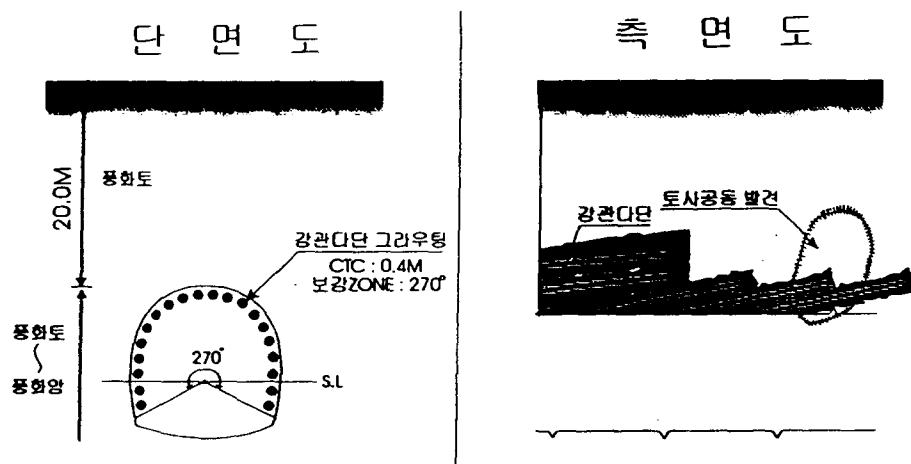


그림 3.3 토사구간 보강도

3.2.3 시 공 결 과

강관보강형 다단그라우팅 공법에 의하여 토사구간에 대한 지반보강공사를 시공한 결과 Umbrella Type에 의한 Beam Arch 효과로 터널굴진시 이완영역이 거의 없었으며 이로 인한 영향으로 천단변위는 0.1mm, 내공변위는 2mm 정도 발생하였으나 초기에 수렴하는 현상을 보여 주었다.

또한, 강관다단은 Long type에 의한 천공에 의하여 보강을 실시하므로 본 전력구 현장에서와 같이 보강 공사 천공중 토사공동층을 발견하여 굴착으로 인한 막장 전면 Sliding 현상을 미연에 예측하는 효과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 시공사례 연구에서는 강관보강형 다단그라우팅 공법의 적용에 대한 사례와 적용효과를 입증하고자 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단층대 통과구간에서 시공한 결과 강관의 길이를 조정해가며 단층파쇄대를 통과하여 신선한 암반층에 고정함으로써 강관과 주입재가 단층파쇄대를 봉합하는 효과를 얻을 수 있었다.
- (2) 강관보강형 다단그라우팅공법으로 보강할 경우에는 Umbrella Type에 의한 Beam Arch 효과 때문에 발파시 이완영역이 거의 없었으며 이로 인한 영향으로 천단변위는 각각 0.1mm, 0.13mm였으

- 며 내공변위는 2mm, 3.1mm 정도 발생하였으나 초기에 수렴하는 현상을 보였다.
- (3) 주입제에 의한 차수효과로 지반보강전의 투수계수는 $K = 5.48 \times 10^{-3}$ cm/sec였으며 보강 후의 $K = 3.15 \times 10^{-5}$ cm/sec로 나타나 차수 및 지반보강 효과를 간접적으로 확인하였다.
 - (4) 강관다단 설계시에는 지질특성과 입자의 배열상태, 밀도, 파쇄대의 발달상태등을 고려하여 설계를 하여야 하며 시공시에는 천공각도, 천공간격, 주입 배합비, 주입압력의 관리를 철저히 해야만 상기의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
 - (5) 또한 본 2가지 사례이외에도 현재 많은 시공실적이있는 터널 갱구부 보강이나 상재하중을 많이 받는 도로 및 철도 횡단구간 하부등 향후 다양한 현장에 본 공법이 적용될 수 있을것으로 사료된다.

5. 참고 문헌

1. 대원토질주식회사(1996), “강관보강형 다단그라우팅공법”, pp.1~6.
2. 배규진, 김창용, 구호본, 문홍득(1995), “지하 생활공간 개발 요소기술 연구(Ⅲ)”, 한국건설기술연구원, pp.1~12, pp.121~138.
3. Yunfeng, L.(1990), “Pipe Roof Supporting Method in Karst and Fill Section of Nanling Tunnel”, Proc of the Inter. Conf. The ITA Annual Meeting, pp. 99~106.
4. Karol, R. H.(1984), “Chemical Grouting,” Marcel Dekker, Inc. New York, pp.10~12.