

실트질 지반에 굴착된 NATM 터널의 시공사례 연구

A Case Study on Construction of a Tunnel Excavated in Silty Ground by the NATM

박종호¹⁾, Jong-Ho Park, 윤효석²⁾, Hyo-Seok Yoon, 박종인³⁾, Jong-In Park, 이원규⁴⁾, Won-Kyu Lee

¹⁾ 대원토질(주) 상무이사, Executive Director, Daewon Soil Co., Ltd

²⁾ 대원토질(주) 과장, Manager, Daewon Soil Co., Ltd

³⁾ 쌍용건설(주) 이사, Director, Ssang yong Engineering & Construction Co., Ltd

⁴⁾ 쌍용건설(주) 부장, General Manager, Ssang yong Engineering & Construction Co., Ltd

개요(SYNOPSIS) : Geological and geotechnical surveys, in general, should precede the excavation to ensure the stability of the tunnel and should be followed up according to the various geological condition during the excavation. However actually the standard support patterns which were decided during the design phases used be insisted for the whole excavation phases in spite of the various geological conditions. When ○○ tunnel was excavated up to 25m long, the severe displacement was generated in the portal area of ○○ tunnel and the tunnel face was partly collapsed. Therefore, this paper present the case study on construction associated with the Umbrella Arch Method used in silty ground by the NATM.

주요어(Key words) : Umbrella Arch Method, tunnel stability, silty ground, NATM

1. 서 론

일반적으로 터널 설계시에는 지반조사 결과를 기초로 사용목적을 충분히 파악한 다음 터널이 굴착될 지반 조건 및 부지 특성 등을 검토, 안전하고 합리적인 시공이 이루어 지도록 하여야 한다. 특히 실트층과 같은 연약지반이 터널 상부에 분포하고 있는 경우, NATM의 기본원리인 주변지반의 아칭효과가 충분히 발휘되지 않기 때문에 터널내에 설치되는 각종 지보재와 더불어 지반보강 보조공법이 반드시 병행되어야 함에도 불구하고 당초 설계시 지질조사 결과만으로 결정된 설계패턴을 굴착과정에서 능동적으로 대처하지 못하므로 지형 및 지질조건 등에 상당한 영향을 받으며 특히, 터널 갱구부는 이외에도 기후 및 기상변화에도 민감하게 반응하게 된다.

○○○○철도 이설 및 개량공사중 ○○터널의 갱구부는 상부에 세립의 실트층이 30m 이상 두껍게 형성되어 있는 상황에서 당초의 조사결과에 따라 표준지보 패턴만으로 갱문부에서 약 25m 시공중 갑작스런 폭우로 인하여 갱문에 심한 변위가 발생하고 터널 막장이 무너진 상태이다. 따라서 터널 굴진을 재개하기 위해서는 이미 강도를 상실한 지반을 보강하고 상부 이완하중을 분산시킬 수 있는 다각적인 지반보강 대책이 요구되었다.

본 논문에서는 실트질 연약지반으로 구성된 터널 붕괴구간에 대해, 터널보강 보조공법인 강관 보강형 다단그라우팅 공법 및 미니 파이프 루프 공법, LW공법을 병행·적용하여 성공적으로 관통시킨 시공사례 연구이다.

2. 지질 특성

본 지역의 지질특성은 영동-광주 함몰대로서 심한 습곡 및 단층작용을 받아 매우 교란된 상태이며 중생대 트라이아스기-쥬라기의 북북동-남남서 방향의 분포를 나타내는 대보화강암과 터널 주변의 흑운모 화강암 및 미문상 화강암이 기반암을 이루고 있다. 또한 제4기 미고결 퇴적층이 부정합으로 상부층을 피복하고 있으며 장석, 석영, 운모 등의 구성광물이 주를 이루고 있고, 이를 관입한 중생대 화강암류는 장석의 색깔인 회백색이 우세하다.

지질조사 결과, 기반암인 화강암이 오랜기간 풍화가 진행되어 지하수 유입시 풍화정도가 매우 커서 석영을 비롯한 구성광물이 포함된 점토입자를 형성, 암의 형태를 띄고는 있으나 강도면에서 볼 때 물로 포화되어 암석의 역학적인 성질은 거의 상실한 상태이다. 또한 풍화 잔류토층의 심도가 거의 20m에 이르고 있어, 풍화가 상당히 심한 지역임을 알 수 있으며 그림 1은 터널 갱구부 지층 단면도를 나타내고 있다.

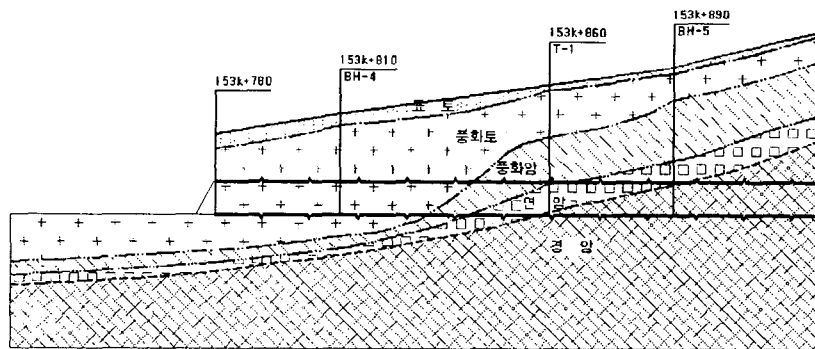


그림 1. ○○ 터널의 갱구부 지층 단면도

3. 터널의 붕괴원인 분석

○○ 터널 갱구부의 붕괴원인으로는 먼저, 터널 상부지반의 연약한 지반조건을 충분히 고려하지 못한 지보패턴 선정에 있다 하겠으나 무엇보다도 급작스런 폭우에 의한 수위 상승으로 터널 상부지반의 강도가 현격하게 저하되어 발생하였다고 볼 수 있다. 특히, 점토질을 함유한 실트층이 강우시 일종의 대수층(aquifer) 역할을 하면서 상재 하중을 증가시킴으로써 갑작스런 터널 및 지표부의 침하를 초래한 것으로 판단된다. 상기 터널 갱구부의 붕괴원인을 요약하면 다음과 같다.

- ① 본 지역의 실시설계 당시 시추조사 결과에 의하면 지표로부터 점토층(0.9~2.5m), 풍화토층(10.4~14.5m), 풍화암층(16.3~23.0m), 그 하부에는 연암층이 분포되어 있는 것으로 가정하여 설계를 하였으나, 실제 시공과정에서 확인된 막장관찰 결과 및 추가 시추조사 결과에 의하면 지표하 10m까지는 점토질 실트층, 그 하부 30m까지는 실트질 모래로 구성되어 있는 것으로 확인되어 당초 설계에 적용한 지층이 실제보다 양호하게 반영이 되었다.
- ② 530k+810지점에서 채취된 시료에 대한 실내시험 결과 대부분 채취된 시료는 점토섞인 실트로 구성되어 우수에 의한 침투 및 지하수 유입시 강도 손실이 매우 큰 지층이며 터널 자립에 취약한 지반으로 나타났다.

③ 따라서, 갱구부의 지층상태가 매우 불량하므로 아칭효과에 의한 터널 주변지반의 지지력이 전혀 발휘되지 않아 하중의 분산이 이루어지지 않은 채 천단부 슛크리트에 과도한 하중이 작용하여 갱문 변위가 발생한 것으로 판단된다.

4. 터널 보강대책

4.1 보강공법 선정시 고려사항

○○터널 갱구부의 붕괴원인을 제거, 터널의 안정성 확보를 위해서는 당초 설계시의 수치해석 결과로부터 상부지반에 형성된 전단 및 인장영역(터널 폭의 2D~2.5D)의 범위까지 최소한 차수 및 보강범위를 설정하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 검토에서는 지반조건 및 현장상황을 충분히 고려, 지반 보강공법을 선정하고자 보강목적 및 적용효과에 따른 공법비교를 하였으며 요약하면 다음과 같다.

표 1. 보강목적에 따른 고려사항

목 적	고 려 사 항	대 책
차 수	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 입도분포 및 투수계수 ▶ 지하수위 및 지하수량 ▶ 지반강도 (SPT, N치) ▶ 지하수 유출에 따른 인접구조물의 영향 ▶ 암반의 상태 ▶ 암반의 파쇄대 및 단층대 	토질의 입도분포 및 투수계수에 따라 주입재 선정과 차수공법 선정 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 주 입 재 : 보통시멘트, 마이크로 시멘트, 초조강 시멘트, 약액 등 ▶ 차수공법 : LW, SGR, JCM, JSP(JET), RJP, 강관다단, 우레탄, FRP 보강그라우팅
지 반 보 강	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지반침하 및 용기 영향 ▶ 토압증가에 의한 붕괴 영향 ▶ 지지력 ▶ 터널천단부의 여굴 방지 	터널보강 목적인가, 개착구조물 보강 목적인가에 따라 보강공법 선정 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 개착부 보강 : JSP(JET), RJP, SIG, SCW, CIP ▶ 터널보강 : 강관다단, 우레탄, FRP 보강그라우팅, Fore poling, 수평JET
차수 및 보 강	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 입도분포 및 투수계수 ▶ 지하수위 및 지하수량 ▶ 지반강도(SPT, N치) ▶ 지하수 유출에 따른 인접구조물의 영향 ▶ 암반의 파쇄대 및 단층대 구조 	토질 및 암반의 형태에 따라 차수 및 보강 공법 선정 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 토질 : JSP(JET), RJP, SIG, SGR, JCM, FRP 보강 ▶ 암반 : 강관다단, 우레탄, 수평JET, FRP 보강

4.2 적용가능공법의 검토

(1) 지반 특성

본 지역의 토질을 분석한 결과 #200번체 통과량이 40~50% 정도로 대부분 세립토로 구성됨에 따라 벌집구조나 면모구조로 형성되었을 것으로 판단되며 점토입자인 0.005mm 통과량은 1~2% 정도인 것을 볼 때 전반적인 토립자는 점토 보다는 실트질로 구성되어 있어 지하수 유입시 터널자립에 가장 취약한 지반으로 볼 수 있다. 따라서 벌집구조나 면모구조로 형성된 세립토는 지하수 유입시 대부분 강도를 잃게되는 지질적 특성 뿐만 아니라, 구조상 수분을 다량 함유하게 되나 배수성이 곤란한 지반특성 때문에 지하수 상승으로 유효응력이 감소하고 전단강도가 크게 감소하여 전단파괴가 발생될 가능성이 있는 지반특성을 지니고 있다.

(2) 토질 특성

표 2. 토질특성 비교

구 분	○ ○ 터 널
토질 분류	ML ~ SM
SPT	23 ~ 50
#200번체 통과량 (%)	40 ~ 50
투수계수 (cm/sec)	4.735×10^{-4}
탄성계수 (t/m^2)	1,940 ~ 6,200

(3) 보강공법의 선정기준

표 3. 보강공법의 선정기준

구 분	지 상 보 강 공	갱 내 보 강 공
목 적	지 반 보 강	차 수 및 지 반 보 강
보 강 공 법	Cement Milk	강관다단 (L.W주입 + Cement Milk 주입 + Beam Arch)
보 강 범 위	5.0m 이상	2.0m
주 입 범 위	1.2m	1.0m
주 입 형 태	침투, 할렬주입	침투, 할렬주입
토 질 명	점토질 실트 (ML)	
투 수 계 수	4.735×10^{-4}	
주입가능성 판단기준 (보통시멘트)	금·완결약액주입 $K=1 \times 10^{-3}$	×
	침투·할렬주입 $K=1 \times 10^{-4}$	△
주입가능성 판단기준	주 입 재	Micro Cement
	차 수 가 능 성	50%
	주 입 가 능 성	Micro Cement를 주입재로 선정하여 Cement 현탁액으로 주입시에는 점토질 실트(ML)인 투수계수 1×10^{-4} 이하에서도 주입이 가능하다.

(4) 주입재의 선정

주입공법에 의한 차수 및 지반 보강시 주입재의 선정은 토질 및 암질특성에 따라 보강효과를 평가할 하는 척도가 되므로 흡입자의 크기 및 배열, 간극비, 밀도, 함수비, 지하수위 등에 따라 지반의 강도 측면에서 대단히 복잡하게 변화하며 암반층은 절리간격, 크기, 파쇄대 및 단층대의 점토 Seam 등의 협재 여부, 피압지하수의 형성등 지반특성상 여러가지 지질적인 변화요인을 포함하고 있기 때문에 신중을 기하여 선정하여야 한다. 주입재는 분말도가 큰 보통 포틀랜드 시멘트와 입도가 미세한 Micro Cement, 초조강 시멘트 등이 있으며 지반보강시 주재료로 사용하고 있다.

▶ 주입재의 물성은 전단강도와 점성도이며 각각의 시간(T)에 따른 변화는 주입재(Q)의 유동에 따라 큰 영향을 미치기 때문에 주입재의 전단강도가 주입재의 최대 유동거리를 결정하므로 주입재의 침투성을 증가시키기 위해서는 전단강도를 낮추는 것이 바람직하다. 즉, 주입재의 배합비 결정과 시간(T)에 따른 주입압(P)과 주입량(Q)의 변화는 지반조건에 따라 다른 결과를 나타냄은 물론 지반내 주입재의 고결 형상과 주입범위를 예측할 수 있기 때문이다.

▶ 주입재가 유동할 때 간극의 크기가 작아서 주입재 입자가 통과하지 못하고 막히게 되어 더 이상의 침투가 이루어지지 않는 현상이 발생하는 단층 파쇄대 영역(절리크기가 미세하고 절리사이에 점토 seam이 협재한 경우)과 본 지역과 같이 점토질 실트층으로 구성된 지역은 주입효과의 극대화를 위하여 현장조건과 시공목적에 부합되는 유동특성을 가진 마이크로 시멘트를 주입재로 선정하는 것이 바람직하다.

▶ 그라우팅 보강전 투수시험 결과, 투수계수가 $a \times 10^{-4}$ cm/sec 이하 일때는 보통 시멘트에 의한 주입은 불가하기 때문에 분말도가 미세한 시멘트(Micro Cement)를 사용하여야 주입효과를 얻을 수 있다.

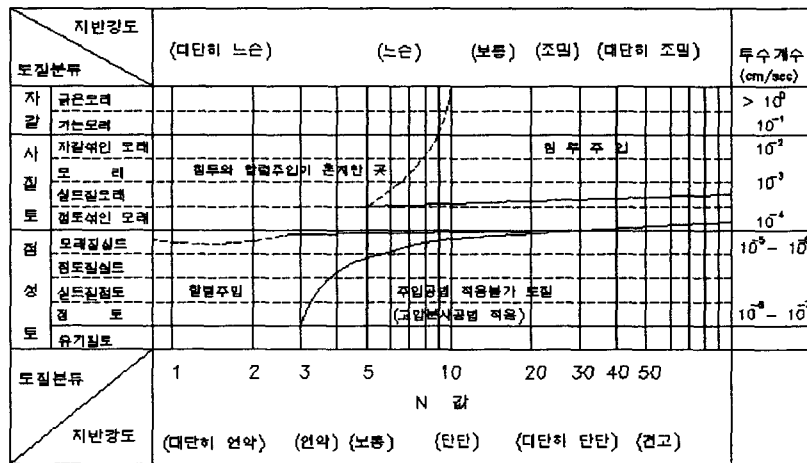


그림 2. 토질분류 및 투수계수에 따른 주입영역

(5) 적용가능공법의 선정

본 지역은 터널의 장기적인 안정성이 주목적이므로 토질특성에 맞는 보강공법의 선정과 주입재의 선정이 가장 중요하다. 따라서 토질입자와 투수계수, 지반의 강도를 고려하여 지상 보강공은 시멘트 현탁액 주입(Micro Cement Milk 주입)에 의한 보강공을 선정하였고, 갱내 보강공으로는 Beam Arch 효과와 약액주입(L.W)에 의한 외곽차수 효과를 동시에 얻을 수 있는 보강공법인 강관다단에 의하여 보강하는 것이 본 지역 토질특성으로 보았을 때 가장 효과적이라 판단되었으며, 그 결과는 표 4와 같다.

5. 계측결과 분석

5.1 변위발생 원인분석

(1) 1차 변위

▶ 기 간 : 4월 23일~4월 30일, 7일간

- ▶ 변위량 : <천단침하> $\Delta C=20\text{mm}$, $C_{\text{max}}=20\text{mm}$
 <내공변위> $\Delta W=17.32\text{mm}$, $W_{\text{max}}=-31.01\text{mm}$

▶ 원인 분석

이 기간 동안의 작업은 갯문입구 하반 굴착 및 Invert 폐합 공사가 진행중이었다. 일반적으로 토사터널에서 하반을 굴착하게 되면 터널의 직경은 상반 굴착시 직경의 2배에 이르게 되어 이완 하중고가 커지고 상하반 Slope가 1:0.5 이상이 됨에 따라 노출된 상반부분의 지지층이 없어짐으로 인한 천단침하 및 내공변위가 하반 폐합전 크게 발생된다. 또한, 당 현장의 경우 하반 작업시 측벽부의 지하수 유입 및 지반 자립도의 부족으로 여굴이 상당량 발생되었고 인버트부의 지층이 상당히 연약하여 지반 지지력 저하 및 측벽부 이완으로 내공 변위 및 천단침하가 크게 발생된 것으로 사료된다.

(2) 2차 변위

- ▶ 기간 : 4월 30일~5월 3일 , 4일간
- ▶ 변위량 : <천단침하> $\Delta C=\text{수렴됨}$.
 <내공변위> $\Delta C=76\text{mm}$, $W_{\text{max}}=-107\text{mm}$

▶ 원인 분석

이 기간 동안 상반 8.4m 구간에 측벽보강 강관일단식 그라우팅 112공 공사를 실시하였고 공사중 내공변위는 상당량 발생되었다. 그러나 천단침하는 수렴된 상태인 점을 고려할 때, 단기간에 터널 측벽에 천공 및 주입작업으로 인한 측벽 교란의 영향과 주입시 Back pressure에 의해 터널 측벽이 막장안으로 상당량 밀린 상태로 생각된다.

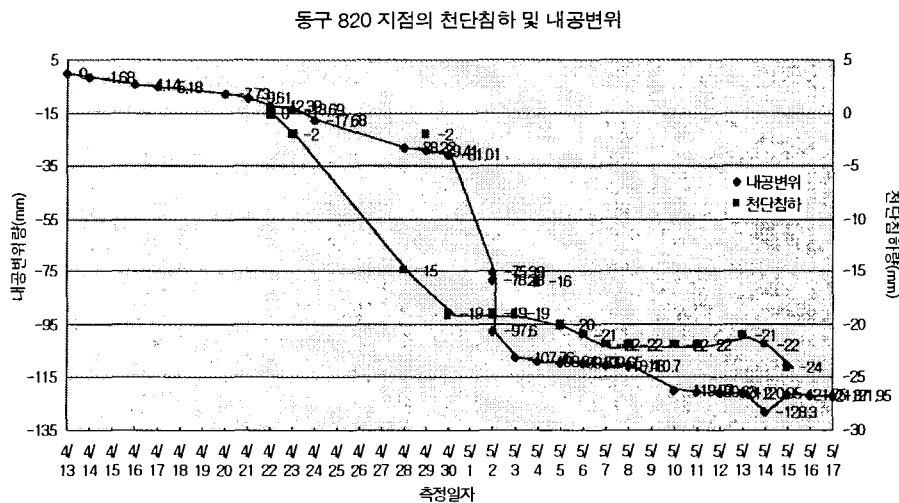


그림 3. ○○지점의 천단침하 및 내공변위

5.2 보강대책 강구

앞절의 계측결과 분석에서 알 수 있듯이 당 현장은 터널굴진 과정중 주로 하반굴착시 천단 및 내공변위량이 크게 발생하는데, 이는 하반 굴착과정중 지하수 유입에 따른 지반변화와 측벽여굴이 과다하기 때문일 것으로 생각된다. 당초 하반 보강을 위하여 상반 굴진후 측벽 강관 일단식 그라우팅을 실시하였으나 시공각도로 인하여 지반개량이 되지 않는 부분에 계속적으로 여굴이 발생하여, 이에 대한 보강이 필요할 것으로 생각되어 이 부분에 하반 굴착전 Fore poling 개념의 강관 일단식 보강 그라우팅을 그림 4와 같이 실시하여 측벽여굴을 방지하여 하반굴착시 천단 및 내공변위량을 줄일수 있었다.

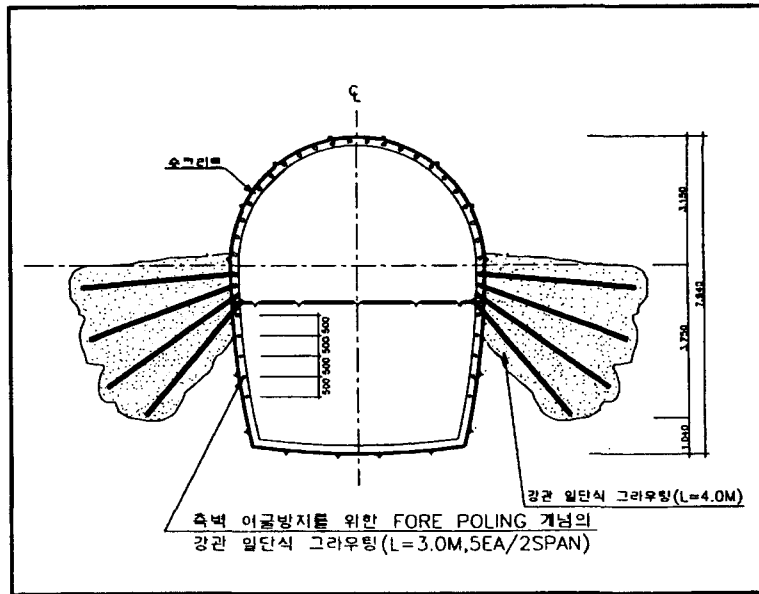


그림 4. 측벽 이굴방지를 위한 보강도

표 4. 적용가능공법의 비교

구 분	지상 + 갱내 보강공		지상 + 갱내 보강공		지상 + 갱내 보강공	
	지상 JSP	갱내 강관다단	지상 시멘트 밀크	갱내 Fore Poling	지상 시멘트밀크	갱내 강관다단
공 법 개 요	지반내 Cement Past를 고압으로 분사시켜 토립자를 파쇄, Mixing 하므로써 원추형의 Cement체를 형성하는 공법	터널 굴착전에 갱내에서 수평상향 천공 후 강관을 삽입하고 Cement 현탁액과 규산소다를 정배합으로 배합, 주입체에 의한 외곽차수효과와 Beam Arch 효과를 얻을 수 있는 공법	지상에서 소구경으로 천공하여 시멘트 현탁액을 중·저압으로 할렬주입에 의하여 주입체를 침투시켜 맥을 형성하면서 지중에 뿔어가 주입되는 공법	갱내에서 일정간격으로 경사천공하여 $\phi 32\text{mm}$ 전후의 철근을 삽입하여 지반을 보강하는 방법	지상에서 소구경으로 천공하여 시멘트 현탁액을 중·저압으로 할렬주입에 의하여 주입체를 침투시켜 맥을 형성하면서 지중에 뿔어가 주입되는 공법	터널굴착전에 갱내에서 수평상향천공 후 강관을 삽입하고 Cement 현탁액과 규산소다를 정배합으로 배합, 주입체에 의한 외곽차수효과와 강관에 의한 Beam Arch 효과를 얻을 수 있다.
적 용 지 반	토사지반 $N < 35$	토사~파쇄암반	토사지반	암반층	토사지반	토사~파쇄암반
주 입 제	보통시멘트+고화재	Micro Cement+규산	Micro Cement	-	Micro Cement	Micor Cement+규산
주 입 형 태	원주형 고결체	침투주입+할렬주입	할렬주입	-	할렬주입	침투입+할렬주입
주입후 강도	20~40kg/cm ²	점착력증가 + Beam Arch효과	점착력 증가	-	점착력 증가	점착력 증가 + Beam Arch효과
보 강 효 과	양 호	양 호	보 통	보 통	보 통	양 호
차 수 효 과	보 통	양 호	보 통	무	보 통	양 호
장 · 단점	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지반보강효과 기대이상 ▶ 차수효과 기대이하 ▶ $N \geq 35$인 지반에서는 교반혼합이 불가능 ▶ 공사비 고가 		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지반보강효과 보통~양호 ▶ 차수효과 기대이하 ▶ 공사비 저가 		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지반보강효과 기대이상 ▶ 차수효과 기대이상 ▶ 공사비 보통 	
보 강 구 간	L=54m	L=110m	L=54m	L=110m	L=54m	L=110m
경 제 성	1.3		0.8		1.0	
추 천 안	$N \geq 35$ 인 지반에서는 교반혼합이 불가능 X		X		O	
추 천 사유	지상에서 약 5m 정도의 Cement Milk 보강과 갱내에서 강관다단에 의하여 보강되는 강관에 의한 Beam 체 형성과 Cement Milk 주입에 의한 외곽차수 및 보강효과로 세립자가 함유된 점토성인 실트층으로 구성된 본 터널보강에 가장 효과적이라 판단된다.					

6. 결 론

실트질 연약지반으로 구성된 터널 붕괴구간에 대해, 터널보강 보조공법인 강관 보강형 다단그라우팅 공법 및 미니 파이프 루프 공법, LW공법을 병행·적용하여 성공적으로 관통시킨 시공사례 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 터널 NATM 시점부는 깊이 30m이상의 연약한 실트질 지반에 별도의 보강조치없이 설계되어 공사 초기에 갱문부위에서 터널의 자립성 부족으로 큰 변위가 일어났으며, 그에 따른 대책공법으로 갱내는 강관다단그라우팅으로 보강하고 지상에서는 시멘트밀크 그라우팅으로 보강하였다.
- ② 보강조치후에 터널굴진을 재개한 이후 정밀계측관리를 하던 도중 다시 큰 천단침하와 급격한 내공변위가 일어났다. 원인분석을 위해 역해석을 통한 수치해석을 실시하였으며, 그 결과 급격한 터널변형의 원인은 하반 굴착과정중 지하수 유입에 따른 지반변화와 측벽여굴이 과다하기 때문인 것으로 분석되었으며, 이에대한 대책공법으로 하반 굴착전 강관 일단식 보강 그라우팅을 실시하여 측벽여굴을 방지하고 안전한 시공이 되도록 제안하였다.
- ③ 당 현장은 현 상태에서 변위가 수렴되었다 할지라도 터널시공 완료후 상부에 성토공사에 따른 추가 하중발생 및 열차 운행에 따른 반복적인 진동과 교통하중을 고려할 때 허용치 이상의 부등침하가 예상된다. 따라서, 터널의 장기적인 안정성 확보측면에서 갱문으로부터 하반 지층상태가 불량한 25.0m~30.0m 정도 구간의 Invert 하부지반을 Micro Pile 개념의 강관일단식 그라우팅을 실시하였으며, 터널 인버트 하부지반을 개량하여 지내력을 확보한다 하더라도 라이닝 구조체에 작용하는 응력은 허용응력 이내여야 하므로 내부 라이닝에 대한 구조검토를 실시하여 설계조건을 기준으로 필요철근량을 제안하였다.
- ④ 상기 지반조건에 대한 대책으로, 최근에 개발 완료된 FRP 보강 그라우팅 공법 적용이 효과적일 것으로 판단된다. 본 공법의 특징은 기존 강관보강형 다단 그라우팅공법의 장점을 충분히 활용하면서 강관이 지닌 문제점(시공성 및 재료적 특성)을 개선하므로써 지반보강 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 대원토질 주식회사(1996), “강관보강형 다단그라우팅공법”, pp.1~6
2. 천병식(1995), “지반주입공법”, 원기술, pp.136~143, 152~156
3. 쌍용건설주식회사(1997), “화방터널 안정성 평가 및 최적보강설계”
4. 한국지반공학회(1998), “지반공학시리즈7. 터널”, pp.55~58
5. 대원토질 주식회사(1999), “터널보강재로서 FRP 적용성 검토”,
6. 최용기, 김현래, 권오엽, “1998 지반공학회 가을학술 발표회 논문집Ⅱ”, pp.53~58
7. Yunfeng, L.(1990), “Pipe Roof Supporting Method in Karst and Fill Section of Nailing Tunnel”, Proc of the Inter. Conf. The ITA Annual Meeting, pp.99~106
8. John Dunicliff(1988), “Geotechnical Instrumentation for Monotoring Field Performance”, John Wiley & Sons, pp.458~461