

안양천 함수 미고결 토사지반에서의 NATM 적용 사례
A Case Study of NATM Application in Soft Ground Tunnelling Under An-yang Cheon

문상조*1, Sang -Jo Moon 황제돈*2, Je-Don Hwang 오길영*3, Gil-young O

- *1 : 대우엔지니어링 부장, Manager, Daewoo Engineering Co.
- *2 : 대우엔지니어링 차장, Assistant Manager, Daewoo Engineering Co.
- *3 : 서울지하철 건설본부 과장, Assistant Director, Seoul Metropolitan Government

This case study presents the case study of tunnelling with NATM for Seoul Subway Line NO.5 in An-yang cheon alluvium layer, which consists of silt, sand and gravel.

In order to cut off water inflow and ensure face stability in crossing under An-yang cheon, the soft ground was improved with grouting cement injected from the ground surface, and installing re-bar in the milk-filled micro pile grouting hole.

Milk grouting was carried out at 1.0m interval in the transverse and longitudinal direction within 5.0m from the tunnel.

For the stability of tunnel portal, horizontal jet grouting was performed to support the soft ground around tunnel.

In order to reduce the face saturation and unexpected face sliding, additional cut-off groutings with forepoling were undertaken during excavation. Considering the quantity of water inflow, drainage system was reviewed with seepage analysis.

1. 서 언

함수 미고결 토사 지반에서 NATM에 의한 터널 건설은 굴착 직후 막장면의 자립성, 터널 변형에 의한 지반이완, 지하수 유입에 따른 Shotcrete 타설 영향, 터널 굴착에 따른 지표면 침하 및 이로 인해 주변 시설물에 미치는 영향등을 판단하여 적절한 보조공법을 계획 할수 있어야 하며 예비 설계 개념으로 실시 설계되는 패턴 설계 내용을 현장 여건에 부합토록 굴착, 지보패턴, 보조공법등을 조정 반영하는데 있어 조치시간이 지연되어 사고가 유발되지 않도록 해야하는 복합적인 사고 능력이 요구되고 있어 지반공학 분야에서 특히 관심을 갖고 연구하여야 할 부분으로 사료된다.

본 논문은 제2기 서울시 지하철 건설공사의 일환으로 시행된 서울지하철 5호선의 안양천 터널 시공성적을 정리한 것으로서, 안양천 충적층의 함수 미고결 토사 지반에서 NATM에 의한 터널 시공 사례이다.

안양천 터널이 포함되는 서울 지하철 5호선은 김포공항~도심~고덕을 연결하는 노선으로서, 한강을 하저로 통과하고, 또한 한강변 충적층이 깊은 지역에 노선이 위치하고 있어 터널 건설을 수행하는 과정에 충적층에서의 터널의 보조공법 개발이 가장 큰 현안문제로 부각되었고 이를 극복하는데 많은 어려움을 겪은바 있다.

안양천 터널은 서울 지하철 5호선중에서도 막장에 충적층이 출현하는 상태가 가장 심한 구간인바, 총연장 655.0m의 하저터널구간중 195.0m 구간에서는 모래-자갈층에 터널이 위치하고 있고, 210m 구간은 풍화대 토피가 3.0m 이하이다. 본 구간은 90. 9월에 착공되어 94. 12. 29일 (51개월 소요) 관통하였는데 안양천 충적층 지반에서의 터널 건설 성과는 어려운 여건속에서도 국내 터널 기술이 진일보되고 있음을 보이는 사례로 생각되며 향후 연약지반이나 하저 터널 시공에 많은 도움을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

2. 안양천 터널의 특성

2.1 노선 개요

서울지하철 5호선 안양천 터널구간은 영등포구 양평동과 양천구 목동을 잇는 900m 구간으로 안양천 하류에 위치하고 있고 순수 하저 터널 구간은 655 m 이다.

안양천 유심부를 통과하는 노선은 사진 1에 보이는 바와 같다.

2.2 종, 단면 계획

본 구간의 터널 형식은 복선터널(폭 x 높이 = 9.38m x 9.59m)이다. 그림 1은 종, 단면도를 보이고 있는바 터널 시점부 약 195m 구간 (PD2A, PD2B)은 충적층에 터널이 위치하고 있고 잔여 구간중 210m 구간(PD3)은 풍화대 토피가 3.0m 이내이다.

이러한 지층은 막장 자립을 기대할 수 없고 지반 강성을 크게 증가시키거나 굴착단면이 형성될 수 있도록 터널 굴착전에 굴착전방 방향으로 지보재를 설치하여야 NATM 개념으로 터널 굴진이 가능하다.

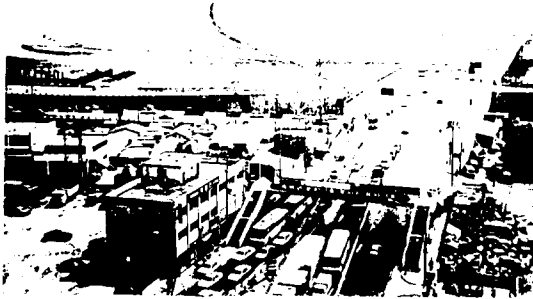


사진 1 안양천 노선 전경

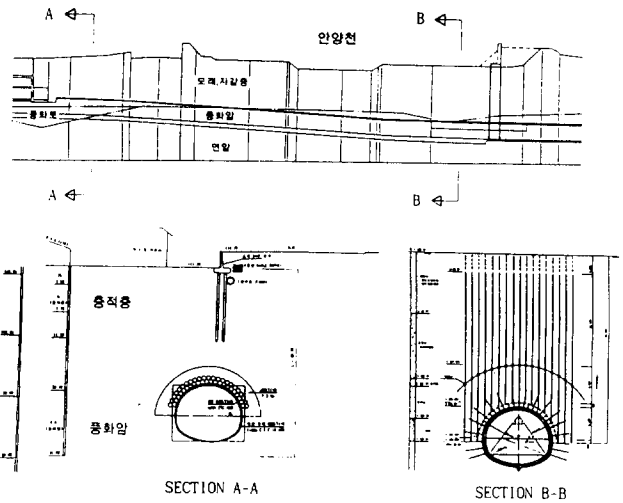


그림 1 터널 종단면도

2.3 터널 주변 지반 특성

안양천변의 기반암은 퇴적 기원 변성암으로서 호상 혹은도 편마암이 주류를 이루고 그 상부를 중생대 제4기의 충적층이 17.3~22.6m의 두께로 고르게 분포되어 있으며 실트층, 자갈섞인 모래층, 모래섞인 자갈층으로 구성되어 있다.

터널이 위치하는 충적층 및 기반암의 지반 물성치는 다음과 같다.

○ 충적층

본 층은 GL(-) 0.2~3.1m에서 GL(-) 19.6~24.3m 까지 평균 두께 약 20.8m로 전체적으로 고르게 분포하고 있다. 상부로부터 점토 및 실트층, 자갈섞인 모래층, 모래섞인 자갈층 순으로 구성되어 있으며, 모래 자갈층의 최대 자갈 직경은 $\phi 100\text{mm}$ 이며 N치는 50내외를 보인다.

투수계수는 $6.23 \times 10^{-5} \sim 1.68 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 함수비는 9.6~39.5%, 비중은 2.63~2.70의 범위를 보인다.

○ 기반암

본 층은 GL(-) 19.6~32.0m부터 나타나며 상부의 풍화암층의 강도는 약함(Soft)~보통강함(Medium Hard) 범위에 속하며 절리 간격은 5 cm 이하로써 파쇄정도가 심한편이다. 그리고 하부에 나타나는 연,경암도 대체로 강도가 약한 편이며 파쇄정도가 심하다. 투수계수는 풍화암이 $1.49 \times 10^{-5} \sim 3.94 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, 연암층이 $9.27 \times 10^{-6} \sim 4.13 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이다.

○ 지하 수위

본 지역의 지하수위는 시추조사 결과 GL(-)3.0m~(-)7.0m에 위치하고 있으며 안양천 유수지에 근접한 지점에서는 안양천 수위와 동일하다.

2.4 터널 굴착중의 유입량 및 지하수위 변화

시공 과정에서 확인된 지하수 유출량은 오목정거장 개착구간에서 약 $2.3 \text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이고 터널상반 굴착 상태에서 약 $3.8 \text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이다. 충적층에서 차수 Grouting을 위해 천공하는 Hole을 통한 유입수는 보통 200~300l/min이고 풍화대와 충적층이 경계되는 부분에서 유입수량이 가장 많다. 터널 굴착에 따른 지하수위 변화는 시간이 경과함에 따라 터널 천단까지 저하되었으나 굴착 단계에서는 거의 변화하지 않는 특성을 보였다.

2.5 개착 공법 가능성

주변의 주요 건물 및 지장물로는 안양천 제방 내측의 양천 뉴스 건물 (R.C 3층), 오목 육교, 오목교 Ramp 및 지지 옹벽, 목동 간선도로 및 옹벽과 제방 외측의 분류 하수관로(2.5mx2.5mx2연, 3.0mx3.0mx3연), Gas관 및 상수관이 있다. 개착 공법은 상기의 지장물중 오목교 Ramp, 안양천 양측 제방 부분을 훼손시켜야 하므로 교통 소통 및 홍수대비가 어렵고 부분개착 방법도 설계종단을 그대로 유지하는 상태에서는 공사비용, 공사기간, 시공성이 유리하지 않는 것으로 분석되었다.

2.6 방,배수 형식

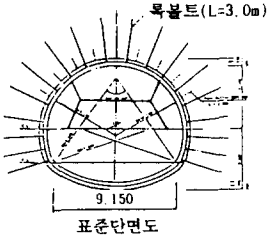
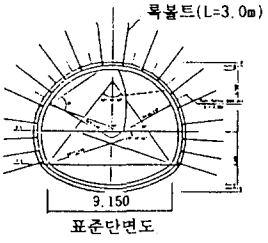
본 구간이 하저터널구간임에도 불구하고 Shotcrete를 침투한 유입수를 측구 및 중앙 배수관으로 유도 배수시키는 배수터널이 채택되었다. 검토결과, 완전방수형의 마계형이나 원형 터널은 굴착단면이 현 시공단면보다 크게되어 시공안전상 하향으로 중단조정이 요구되어 반영이 어려운 상태였다.

따라서, 시공단계에서 배수터널의 배수기능을 보완하는 측면에서 터널 유입량을 감안하여 부직포, 배수용량의 적정성을 검토하고 2차 라이닝에 수압대응 목적의 철근 보강을 계획하였다. 보강에 대한 상세 내용은 5절 내용에 기술하였다.

2.7 지보 패턴

지보패턴은 터널 상단부 지반상태에 따라 충적층 구간은 PD2A 및 PD2B, 풍화대 구간은 PD3로 구분 적용하였다.

표 1 지보 패턴

구 분	14k 585(수직구#1)~14k 680 L = 95m	14k 680~15k 060(수직구#2) L = 380m
설 계 패 턴	PD-2A(층적층 출현)	PD-2B(층적층 출현)
단 면		
1 차 지 보 재	.강지보 H-125 x 125 x 6.5 x 9 .Wire Mesh 1차 : $\phi 5 \times 100 \times 100$ 2차 : $\phi 5 \times 100 \times 100$.Shotcrete 250mm(50-100-100) .Rock Bolt L=3.0m, 18EA	좌 동
보 조 공 법	.차수 Grouting 폭 3.0m (갱내 시행) .수평 Jet Grouting	.Milk Grouting 공법 W=6.0m (지상시행)
2차 라이닝 콘크리트	.T = 350 mm	.T = 300mm

2.8 유한 요소 해석 방법에 의한 터널 안정성 검토 결과

해석방법 및 해석결과에 대해서는 1993. 10월 지반공학회의 지반개량에 대한 세미나에서 '연약지층 터널 보강방법에 관한 FEM 해석 사례 연구'로 발표된바 있으므로 내용 기술은 생략하였다.

안정성 검토결과에서 도출된 결론은

- 터널천단 보강 범위는 수평 Jet Grouting 구근 $\phi 600\text{mm}$ 를 기준할때 최소한 2열을 보강하여야 하며 구근기준 강도는 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.
- 보강 범위는 층적층뿐만 아니라 풍화토까지 시공하여 풍화암층에 구근이 지지되어 부등침하가 발생되지 않도록 하여야 한다.
- 상, 하 경계부의 측벽 풍화대층은 Micro Cement Grouting으로 적정 강도가 발휘되도록 별도 보강되어야 한다.
- 예상 변위는 상반시공을 분할 굴착과 함께 굴착 즉시 Shotcrete로 폐합 단면을 형성하는 경우 지하수위 저하 효과를 고려하지 않은 상태에서 지표 침하량은 7.2mm, 최대 천단 침하량은 12.2mm로 추정되었다. 이때의 Shotcrete에 발생하는 압축 응력은 27.9~31.3 kg/cm^2 이다.

3. 막장자립 시간 확보를 위한 보조공법 계획

3.1 공법선정 배경

함수 미고결 토사의 층적층에 터널을 굴착함에 있어서는 유입수에 의한 모래, 자갈의 진행성 여굴, 연약토사 활동으로 인해 지보설치 시간을 확보할 수 없으므로 막장 자립시간 확보를 위한 보조공법 계획이 요구되었다.

본 사례에서는 시멘트 Grouting에 의한 지반 개량 공법을 대상으로 시험 시공을 시행하여 Jet Grouting, Micro pile, Packer grouting등의 공법의 적용성을 검토하였으나, Jet Grouting 공법은 경사 시공에 어려움이 있으며, Micro pile 공법은 안양천 층적층을 천공한 후에 Casing 및 그라우팅 주입에도 사용할 수 있도록 천공비트를 부착한 강관 pile를 제작해야 하는 어려움이 있고, Packer grouting 공법은 안양천 층적층에서 주입압을 높일때 손상이 없도록 Packer을 설치할 수 없는 어려움이 노출되었다.

갱내에서 지반을 개량하는 방법은 갱내천공 Hole을 통해 지하수와 세립분이 함께 유입되어 붕락사고를 경험하였고, 보강 효과를 검증하는데 어려움이 있었다.

본 사례에서는 상기의 시험 시공결과를 토대로 하천 구간에 대해서는 시공의 용이성, 경제성, 막장내 심리적 안정감 유지 측면에서 유리한 변형된 Packer grouting 공법(packer 없이 시멘트 주입후 철근보강, 표2 참조)을 채택하였고, 갱문에 대해서는 수평 Jet Grouting에 의한 보강 방법을 반영하였다.

3.2 하천구간 보강 공법(일명, Root Milk Grouting 공법)

가. 시공순서 (그림 2 참조)

- ① 소정심도까지 천공후 Casing을 그대로 둔다.
- ② Casing홀내에 철근 (D25 규격) 연결후 삽입한다.
- ③ 천공수 주입 호스대신에 시멘트 밀크 주입호스를 교환하고 Casing을 단계적으로 일정 높이 (1.5m/1Step)로 인발하면서 그라우팅을 시행한다.
- ④ 개량심도 (D=6.0m)까지 다단주입한후 천공홀에 시멘트 밀크 채움을 실시 한다.

표 2 Packer Grouting 공법(봉지공법)과의 비교표

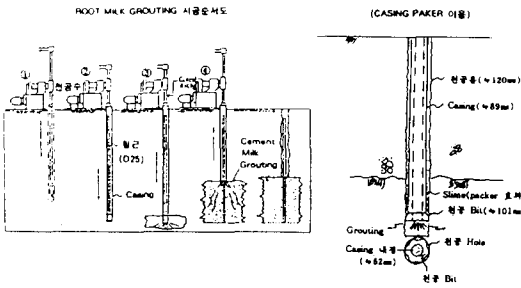


그림 2 시공 순서도

공 종	인양천 보조공법	Packer Grouting	차 이 점
1. 천공방법	o 자체 Rod(Casing) 이용 천공(C-6)	o 천공하는 동시에 Casing 인입 (Crawler Drill)	o 천공정비
2. 보강재 삽입	o Casing 내에 철근만 연결후 삽입	o Casing 내에 Packer Steel Bar 삽입	o Packer를 철근에 고정
3. 주입 방법	o 천공수 주입호스 대신 Grouting 주입호스를 이용하여 천공 주입	o 단계별(1~3차)로 별도의 주입호스로 주입	o 주입 방법
4. packer 설치	o 천공 Hole 내의 Slime에 의한 packer 역할 없음	o 별도의 packer를 일정 위치에 설치하여 packer Grouting 실시	o 사력층에서 packer를 지반에 고정시키기 어렵고 주입압을 높이면 압력이 외부로 새어 나온다.
5. Grouting 재	o 일반적인 Cement Milk 주입	o 차 동	

나. 공법의 특징

- o 원지반을 교란하지 않은 상태에서 천공하여 Cement Milk를 일정한 압력으로 지반속의 공극에 침투시키는 차수 및 지반 보강 공법이다.
- o 주입을 위한 천공 Casing 홀속에 보강재(철근)를 삽입하여 지반과 일체를 이루게 하므로 터널 주변 지반을 융합하여 지반을 보강하는 공법이다. (Micro Pile 개념)
- o 지상에서 시공하므로 천공시 지질의 분포 상태를 Slime을 통해 사전에 판단할 수 있다.
- o 천공후 Slime이 천공홀과 Casing 외측의 공간에 채워져 천공 Bit와 함께 packer 효과를 가진다.
- o 일부 Grouting 주입 압력에 의해 주입재가 지상으로 Overflow 될 경우에는 Casing을 상, 하운동시켜 천공홀을 인위적으로 무너뜨려 Slime을 채워 재 Grouting을 실시한다.

다. 시공 효과 확인

1) Grouting 시공전, 후 투수계수 측정

Grouting 시공전, 후 천단상부 지층에 대한 투수계수 시험결과 투수계수는 다소 적어졌지만 효과는 일반 약액 Grouting (SGR or LW등) 보다 미흡한 상태이다.

위 치	지 층	투수계수 (cm/sec)		비 고
		주 입 전	주 입 후	
GL(-)17M~20M	사 려 층	3.51×10^{-3}	2.243×10^{-3}	21회 평균
GL(-)20m 이후	풍화대 및 암	2.885×10^{-3}	1.503×10^{-3}	20회 평균

2) 막장 유입량 측정

- o 터널 천단부가 풍화암인 경우에는 지하수 유출이 다소적었고, 충적층이 터널 상반에 나타나는 경우에는 터널 천단과 측벽부 및 지층 경계부는 벽면을 타고 물이 흐르는 상태이거나 국부적으로 압력상태로 유입되었다.
- o 갱내 수평 시추 조사(1공 실시 L=25.0m D=2inch)에 의해 지하수 유출량 확인 결과는 다음과 같다.
 - 갱내 차수 Grouting (SGR)+지상 Grouting 구간: 약 1ℓ/min/m
 - 지상 Grouting 구간 : 약 3ℓ~6ℓ/min/m
 - 미시공 구간(자연상태) : 약 10ℓ~30ℓ/min/m

3) 막장 상태 관찰

굴착중의 상반 막장에 나타난 그라우팅 시공상태는 막장내에 Cement Milk가 주입되었고, 국소적으로 맥상 주입 및 천공홀 규격의 구근만 형성된 부분도 있었다.

구 분	막 장 상 태	시 공 결 과	갱 내 보 강
1. 풍화암의 절리를 통해 주입됨	· 풍화암의 절리를 통해 충전물을 밀어내고 Cement Milk가 주입됨(3~10cm)	· 암반층의 절리 불합효과로 막장 지지 양호 · 풍화암 부분의 지하수 유입이 감소되므로 막장 상태 양호	· 천단부 F/P 시공
2. 풍화대와 충적층의 경계부	· 풍화암과 풍화토 경계, 풍화토와 충적층 경계부에 Cement Milk가 두껍게 주입됨(10~50cm)	· 암층 및 연약층 경계부의 취약부에 상호 결합성이 양호함 · 주입이 맥상으로 이루어져 있으나 Core Sliding 방지효과 좋음 · 상부 연약층 지지로 지반 강도 증진시킴	· 천단부 강관 보강
3. 충적층 및 일부 취약 부위	· 풍화토 및 충적층내에 맥상 주입되어 있고 모래 자갈층 내에도 상호 결합력으로 형성됨(3~5cm)	· Cement Milk로 인하여 연약층이 Bond화 되어 막장 지지 및 Sliding 예방됨 · 일부 취약부위가 보강되어 지반 개량 효과 큼	· 천단부 강관 보강 및 F/P 시공
4. 천공홀	· 충적층이 매우 조밀한 구간은 천공홀 주변만 주입되고 구근이 형성되어 있음	· 격자형 시공으로 Cement Column이 형성되어 막장 지지는 양호 · 차수 Grouting 효과는 약액 Grouting 보다 다소 미흡	· 천단부 강관 보강 및 일부 차수 Grouting (SGR) 실시

4) 계측결과

단위 : mm

구 분	지상그라우팅 시공구간(충적층)		지상그라우팅 시공구간(풍화대)		일반 Grouting 시공 구간	
	천 단	충 적 층	충적층 및 풍화토	풍화토 및 풍화암	풍화토 및 풍화대	풍화대 및 풍화암, 연암
지 층	상 반	충적층(일부풍화토)	풍화토 및 풍화암	풍화암 및 연암	풍화대 및 풍화암, 연암	풍화암 및 연암
	하 반	풍화대 및 풍화암	풍화암 및 연암	연암	연암	연암
천 단 변 위		(+)16~(+)30	(+)10~(+)40	(+)15~(+)54		
내공변위	상 반	(+)4~(+)26	(+)4~(+)30	(+)5~(+)30		
	하 반	(+)3~(+)14	(+)1~(+)18	(+)4~(+)10		

상기 계측결과 만으로 지상그라우팅 효과의 정량적 분석은 어려우나 지상 그라우팅 구간의 지층이 전반적으로 일반 Grouting 시공 구간보다 현저히 불량함에도 불구하고 천단 및 내공변위가 오히려 적게 나타난 점은 보조공법에 의해 Soil Nailing 개념의 지반보강의 효과가 반영된 결과로 판단된다.

라. 시공중 특기사항

○ 막장 포화상태 구간 차수 그라우팅 추가

지상그라우팅에도 불구하고 막장이 완전포화되어 있어 장비 진동에도 여굴이 발생하는 구간과 지하수가 집중 응수되는 부위 및 세립분 유실로 막장 여굴이 발생하는 구간에 대해서는 부분적으로 갱내 차수 그라우팅을 추가 시행 하였다.

○ 지하수위 저하 공법 도입

터널 시점부에 충적층이 터널내부로 깊게 발달되어 있는 부분은 하수로 추정되는 지하수가 지속적으로 유입되고 우기시마다 유입량이 증가되는 경향이 있어 시험 시공 측면에서 Deep Well 공법(4공)을 추가 적용하였다. 시공여건이 취약하여 시공 간격은 28.0~39.0m로 불규칙하게 계획되었다. Deep Well 배수량은 약 80ℓ~120ℓ/분/공 이었고, 이로 인해 막장내에서는 지하수위가 다소 저하되고 우기중에도 유입수가 증가되지 않아 공사진행에 다소 도움을 얻었다.

마. 시공 결과 평가

○ 안양천 보조공법의 시공결과 절리가 심한 암층과 지층간 경계의 취약 부위에 시멘트 밀크로 맥상 주입되었다. 이러한 시멘트 주입과 보강 철근에 의해 암층이 불합되고 충적층이 천단 보강되어 막장 자립성을 확보하는데 기여한 것으로 판단되었다.

○ 차수 효과는 기존 약액 Grouting 보다 미흡했으나 전반적으로 지하수 유입이 감소되어 Shotcrete 타설 시공 환경개선에 좋은 효과를 주었다.

○ 터널 막장에 철근 콘크리트 기둥이 지지해주는 시각적인 효과가 있어 터널내 작업자의 심리적 안정에 큰 기여를 하고 연약지반 막장에서 사고의 두려움을 해소시켜 비상사태에도 대처하는 분위기를 조성할 수 있었다.

3.3 수평 Jet Grouting에 의한 갭문 보강

가. 갭문 안정성

터널의 갭문은 굴착중에 지반이완되고 응력이 집중되는 부분으로서 보강 시공이 요구되는 취약한 부위이다.

안양천 터널의 갭문은 오목고 Ramp가 시작되는 지점에 위치하고 있어 교통이 매우 혼잡한 지역이고 정거장 개착이 끝나는 지점에서 GL(-)25m까지 굴착 계획되었는데 갭문 지점의 지반상태는 충적층 심도가 가장 깊은 지점이고 터널의 S.L 지점(터널 상,하반 경계부 위)에 모래, 자갈층과 풍화대층의 경계층이 위치하고 유입수량이 과다하게 유입되는 상태였다. 이러한 갭문의 지역여건에 의해 터널 굴진을 위한 갭문 보강 공사중에 수차례 이상변위가 발생하는 등의 어려움을 겪었다.

나. 수평 Jet Grouting에 의한 보강 시공

1) 보강계획

- Rod 첨단부의 노즐에서 분사되는 첨단압이 400kg/cm² 내외로서 시멘트 + 물에 의한 고압분사로서 지반을 파쇄시키고 주입액을 주입하여 견고한 불부수성 구근을 형성시키는 공법이다. 구근 강도는 유한 요소해석 결과를 참조하여 100kg/cm²를 유지토록 시공관리 하였다.
- 시멘트에 의한 Jet Grouting Column은 힘에 대한 저항성이 적어 강관 Pipe를 추가 하였다.
- 지하수위가 높아 수평 천공중에 지하수와 세립분이 유입되어 차수 그라우팅에 의해 전면 막장 보강 시행 하였다.
- 시공단면은 그림 3에 보이는 바와 같다.

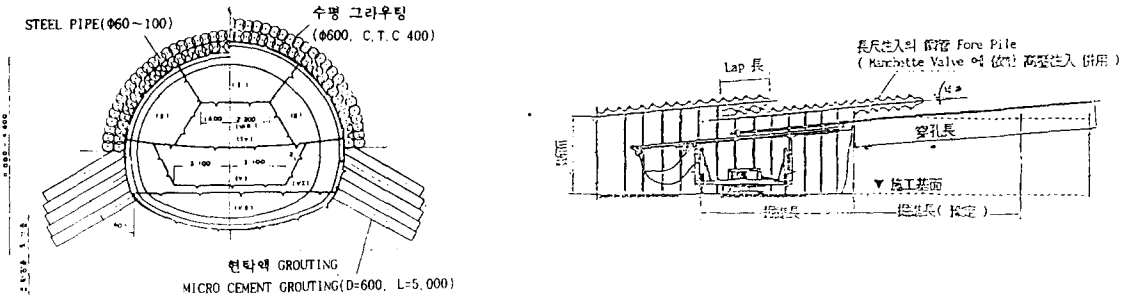


그림 3 시공단면도

2) 시공장비

- 천공장비 PG-125(이태리)
Bit φ101mm~φ90mm
Rod φ90mm
- 천공장 12.0m(공삭공 1.0m, 주입공 11.0m)
- 천공경사 6.2°
- 주입압 : 400kg/cm²
- 구 근 : φ400mm, φ600mm (φ50.8x4.5t 강관삽입)
- 물/시멘트 배합비 : 1 : 1

3) 시공순서

- 차수그라우팅 (지하수위를 저하시키는 방법으로 대체가능)
- 1.0m 공삭공 천공
- 공삭공 천공후 천공과 동시에 물 + 시멘트 밀크를 고압분사하면서 구근 형성
- Rod 인발 : 인발속도 5cm/5초 (60cm/1분)
회전수 24 rpm
- 강관 삽입 : 24시간 경과후 시행
- 강관속으로 L.W 그라우팅 : 첨단부 공극 채움

4. 터널굴진중 보조공법

안양천 터널 굴진중에 당면한 현안문제와 갱내에서 조치한 보조공법 내용을 정리하면 다음과 같다.

굴착중의 현안 문제	보 조 공 법
○ 터널 천단부위의 진행성여굴	○ Forepoling등의 보조공법 간격조정 ○ 급결재 개선 ○ 비상자재 이용 신속한 S/C 타설
○ 지하수 과다 유입부 측벽부 및 막장부 여굴	○ 여굴 부위 비상자재 이용 채움 실시 ○ 지하수 유도 배수 설치 ○ 채움 Grouting(LW) 실시
○ 차수 Grouting에 의한 압력 전달로 S/C 균열	○ 배수 Hole 설치 ○ 균열 S/C 제거후 재시공 ○ Rock Bolt 추가 시공
○ 일부 상반 구간에 발파암 출현	○ 막장에 발파 진동의 영향이 적은 거리에서 발파 제거 ○ Smooth Blasting 시행
○ 변위 억제	○ 상, 하반 Bench장 조정으로 신속한 폐합 실시 ○ 상, 하반 Bench 거리 : 15m 이내 유지
○ 막장 밀림 및 이상변위 발생 구간	○ 즉시 공사중지 및 막장 폐합 ○ 막장주변 보강용 시멘트 그라우팅 실시 ○ 막장 보강방안 강구 F/P 추가 및 막장면 S/C 타설 (W/M 부착) ○ 막장전면 배수처리 및 가 Invert S/C 타설로 단면폐합

5. 배수계획의 적정성 검토 및 수압대응의 Lining 보강 계획

5.1 검토 개요

본 사례는 하저터널 입에도 불구하고 Shotcrete를 침투한 유입수를 측구 및 중앙 배수관으로 유도 배수하는 배수터널 형식이다. 배수터널에서의 2차 라이닝 콘크리트는 배수능력이 침투유량보다 충분히 큰것으로 가정하여 내장기능, 내구성 향상, 방수막 지지 및 보호측면에서 무근콘크리트를 계획함이 일반적이다.

그러나, 안양천 터널은 터널굴진상태의 유입량이 설계배수용량($3\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$)을 상회하는 정도이고 유입속도가 시간이 경과하여도 저하되지 않는 상태로서 배수 능력에 대한 재평가가 요구되어 무근콘크리트의 라이닝 안정성검토가 필요한 것으로 분석되었다.

5.2 침투류 해석 기법에 의한 지하수 유입량 및 배수 기능 검토

안양천 주변 구간은 안양천 평수위와 거의 동일한 지하수위를 유지하고 있고 터널 건설중에도 거의 수위 변화가 없을 것으로 추정하고 정상류 상태의 침투류 해석결과를 활용하여 배수 터널의 측면 배수 및 중앙 배수의 기능을 분석하였고, 부직포 및 주변 지반의 투수계수, 터널 형상(PD-2, PD-3 패턴대상), 평수위, 홍수위에 따른 지하수 유입량 및 수압의 변화를 검토하였다.

침투류 해석은 유한 요소법에 의한 수치 해석법을 이용하고 안양천 평수위(EL 105m, 수두차 24m), 홍수위(EL 113m, 수두차 32m) 시의 유입수량 및 수압을 검토하고, 측면 배수구 및 중앙 집수관의 기능 저하에 따른 수압 변화를 검토하였다. 검토결과는 다음과 같다.

- ① 침투류 해석결과 지하수 유입량 및 수압의 변화는 투수성이 큰 지층(충적층)의 심도와 지반 투수 계수의 변화에 의해 크게 영향을 받고 있어 충적층 심도가 깊은 안양천 터널 구간은 차수 Grouting에 의한 불투수층 확보가 요구되었다.
- ② 작용 수압은 터널 측면 배수의 통수 능력에 따라 그 크기가 변하고 있으나 부직포 통수능력에 대한 재료 연구가 불충분하여 부직포 투수 계수 대비 유입수량의 비교 검토에 대한 부직포 투수계수($2 \times 10^{-1} \text{cm}/\text{sec}$)를 적용하여 침투류 해석을 수행하였는 바, 터널 천단의 작용 수압은 수위의 약 70% 정도로 확인되었다.
- ③ 안양천 구간은 전반적으로 충적층 심도가 깊어 홍수위를 기준으로 유입량을 판정하는 경우 약 $3.8\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로서 설계 용량 $3\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 보다 많은 것으로 산정되었다.
- ④ 측면 배수 및 중앙 배수 기능을 분석한 결과 측면 배수 기능이 상실되는 경우 지하수위의 약 70% 정도의 수압이 측벽에 작용되고 중앙 배수 기능이 상실되는 경우에는 기초 콘크리트 자중 이상의 부력이 작용되므로 이들의 배수 기능 유지가 절대 요구되는 것으로 확

인되었다. (그림 4참조)

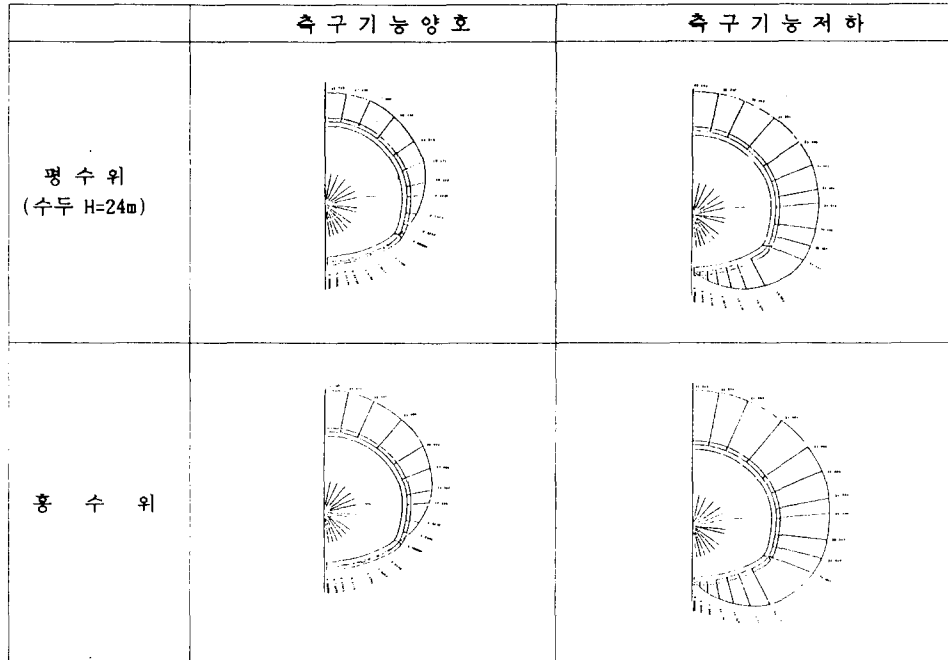


그림 4 수압 (STA. 15k 012)

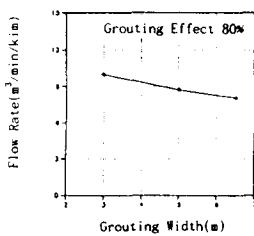
5.3 배수 기능 개선 방안 검토

가. 작용 수압 및 침투 유량 대책

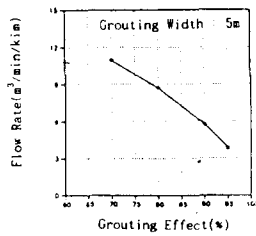
2차 라이닝 콘크리트의 작용 수압과 터널내로의 유입 수량을 감소시키기 위한 계획 수립의 일환으로 그라우팅폭, 그라우팅 효율 및 부직포 두께에 대하여 검토하였다.

1) 차수 그라우팅 효과 극대화 방안

침투류 해석에 의해 차수 그라우팅 폭과 차수 효율에 따른 유입수량 검토결과 적정 차수 그라우팅 폭은 3.0~5.0m 이고 5.0m 이상은 그라우팅 폭을 늘리기 보다는 시공관리를 강화하여 차수 효율을 높이는 것이 유입량 감소에 보다 효과적인 것으로 판단되었다.



(a) 폭 - 유입 수량



(b) 차수 효율 - 유입 수량

그림 5 차수 그라우팅 효과 검토

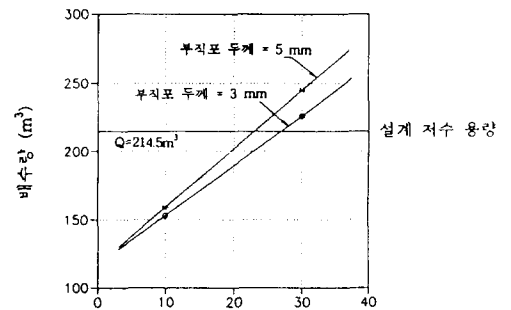


그림 6 집수정 용량과 펌프 가동 시간

2) 부직포 두께 조정 방안

동일 조건에서 침투류 해석결과 부직포의 두께를 5mm로 조정할 경우에는 통수 능력이 증가하여 2차 라이닝 콘크리트 배면에 작용하는 수압은 감소하는 것으로 확인되었다. 이론 해석만으로는 수압 감소 규모 또는 적정 부직포 두께를 산정할 수 없으나 3mm 부직포 설치에 따른 배수 기능 저하나 수압 증가를 감안할 때 부직포 두께를 5mm로 늘려 측면 배수 기능을 개선 도모함이 적정한 것으로 판단되었다.

나. 집수정 운영 개선 방안

부직포 두께가 3mm, 5mm인 경우, 해석 유량은 모두 현 설계 유량을 초과하는 것으로 나타났으므로 유입수가 집수정으로 모이는 경우

에 펌프 운영 조정에 의한 방안을 검토해서 적절한 운영 방안을 선정해야 한다고 판단되었다.

부직포 두께에 대하여 집수 시간 - 배수량 관계를 그래프로 분석한 결과(그림 6) 부직포 두께 3mm인 경우는 집수정 저류 시간을 27분으로, 부직포 두께 5mm인 경우는 23분으로 조정하면 집수정 유입수의 배수 처리가 가능한 정도의 용량 확대 효과가 있는 것으로 나타났다.

5.4 2차 라이닝 콘크리트 안정성 검토

PD-2, PD-3 설계단면에 대해 수압 대응 범위와 침투류 해석결과에 의한 작용 수압을 기준으로 수압 대응의 구조 해석 수행

가. 무근 콘크리트 2차 라이닝 콘크리트의 수압 대응 분석 결과

무근 콘크리트의 저항 능력이 주변 지반강도, 터널 형상에 따라 저항 수압 규모가 다르나 측면 배수 및 중앙 배수 기능이 유지되는 상태에서도 현처부가 일체로 사용되는 PD-2 단면에서는 20.0m 내외까지만 지지 가능하므로 평수위 홍수위 수위가 각각 24m, 32m 인 안양천에서는 불안정한 구조 형태로 판단되었다.

나. 침투 해석결과에서의 작용 수압을 기준으로 PD2, PD3의 2차 라이닝 구조 검토를 수행하고 라이닝 두께 조정 및 철근량 산정한 결과는 아래와 같다.

표 3. 2차 라이닝 보강 계획

설계 패턴	수 압 적 용	라이닝 두께	주 철 근
PD-2	측면배수 기능이 상실된 상태의 수압(현처부 수압 : 정수위의 70%)	T = 40 cm	D16 @150
		굴착구간 t=30cm	D16 @150 우각부 D22 @150
PD-3	측면배수 기능이 양호한 상태 (현처부 수압 : 0)	T = 40 cm	D16 @200
		굴착구간 T = 30cm	D16 @200

6. 결 언

함수 미고결 토사 지반에서 NATM에 의한 터널건설은 연약한 막장 지반 특성, 유입수 그리고 긴급 대처 시간이 지연됨에 따른 위험성 가중등으로 인해 설계상의 해석 안전을 만으로는 열악한 시공여건을 극복하기가 쉽지 않다.

안양천 충적층의 NATM 적용 사례를 통해 함수 미고결 토사 지반상의 터널 시공에 대해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 함수 미고결 토사 막장의 자립 특성

함수 미고결 토사 지반에서의 막장 자립성은 지반강도, 조밀성, 입도분포등의 지반 특성치보다 포화도, 지하수 유입상태에 따라 자립성이 저하된다. 따라서, 막장자립성 확보를 위해서는 지하수위 저하를 유도하고 터널주변을 보강하는 지반개량 공법을 계획함이 적절한 것으로 판단되었다.

2) 보조공법 계획시 고려되어야 할 사항

○ 보조공법 계획은 지반 개량 효과 극대화, 막장 유입수 최소화, 터널 굴착에 따른 지표침하가 억제될 수 있도록 터널 시공법과의 연관성을 고려하여 판단하여야 하고, 소정의 기대효과를 얻기 위해서는 지반특성, 막장 유입수량, 주변 지역여건, 지층 특성에 부합하는 천공 장비계획, 천공 Hole의 자립성, 보강 재료의 적용성, 배합방법, 효과의 검증방법, 공사비용, 공사기간, 시공의 확실성 등을 종합적으로 검토, 현장 여건에 부합토록 보완 조정되어야 하므로 이러한 부분의 지반공학적 판단 및 경험이 요구되었다.

○ 함수 미고결 토사 지반은 Casing이 없는 상태에서는 천공 Hole이 함몰되므로 천공 Casing에 Bit가 부착된 천공장비를 활용하여 보조공법을 계획하여야 한다.

○ 함수 미고결 토사 지반에서는 주입압을 높여 보강재료를 지반 간극속에 주입하는 Packer 방법을 적용할 수 없으나, 개량심도가 15.0m 이상인 지역에서는 천공 이수(Bentonite)의 비중을 이용하여 Packer 없이도 저압에 의한 그라우팅 주입이 가능함을 확인하였다.

○ 갱내에서 터널 주변을 보강하는 보조 공법으로 수평 Jet Grouting에 의한 보강방법을 반영하는 경우에는 수평 천공중에 천공 Hole을 통한 지하수 유입과 세립분이 유입되지 않도록 사전에 지하수위를 저하시키거나 차수 그라우팅이 시행되어야 한다.

○ 보강 주입재는 지반 간극을 고려하여 Micro Cement 사용을 원칙으로 해야 한다.

3) 터널 굴진중의 보조공법

터널 주변에 지반 보강을 위한 보조공법 시공에도 불구하고 막장토사가 포화되어 있으며 굴착장비의 진동, 충격에 의해 여굴이 발생하고 국부적인 유입수로 인해 Shotcrete 부착 능력이 저하되거나 세립분 유실에 의해 Shotcrete 배면 공동이 발생된다. 또한, 충격충과 경계한 풍화대는 굴착직후 급격히 연화되므로 지보재 지지능력이 저하되어 이상변위의 원인을 제공할수 있다. 따라서, 터널 주변의 지반을 개량하기 위해 보조공법이 시행되었어도 터널 굴진중에는 천단부위를 Forepoling, 강널말뚝등의 보조공법에 의해 별도 보강하여야 하며 막장이 포화된 지점이나 국부적으로 지하수가 유입되는 지점은 별도의 차수 보강이 추가되어야 한다.

4) 함수 미고결 토사지반에서의 배수터널의 2차 라이닝 계획

함수 미고결 토사 지반에서 배수터널이 계획되는 경우 유입수량 대비 부직포 기능, 측구 및 중앙 배수 능력이 침투류 해석에 의해 평가됨이 요구되고 배수 기능이 저하되는 경우에 대비하여 2차 라이닝에 미치는 영향이 검토되어야 한다. 이러한 구간에 대해서는 최소한 수압에 대응할 수 있는 정도의 철근보강을 계획함이 필요하다.

5) 함수 미고결 토사지반의 터널 붕락 양상

○ 안양천 터널 사례를 참조할때 암토피가 불규칙하게 변화하는 지점에서 터널 붕락이 있었는데, 이부분은 갱내 차수 그라우팅을 시행하고 철근에 의한 Forepoling등의 보조공법을 추가하였음에도 불구하고 유입수에 의해 Shotcrete 부착 능력이 저하되어 여굴이 진행됨에 따라 일시에 붕락에 이르게 되었다.

따라서, 미고결 토사 지반에서의 터널 굴진은 진행성 여굴에 대한 대처 시간이 지연되면 큰 사고로 직결될 수 있으므로 유입수에 의해 Shotcrete 부착 능력이 저하되지 않도록 차수 또는 유도 배수가 신속히 조치되어야 한다.

○ 갱내에서 차수 또는 지반보강 그라우팅에 의해 함수 미고결 토사지반을 보강하여도 보강효과가 대부분 미흡하고 취약구간이 생기면 추가보강에 시간이 소요되고 공사비용 추가 부담이 크게되므로 가능한 지상 보강을 우선함이 터널 안전관리상 유리한 것으로 판단된다.

6) 터널 굴착에 따른 지표면 침하 및 주변 시설물 영향 검토

함수 미고결 토사 터널에서의 지표면 침하는 터널 굴착량에 상당하는 체적 감소(Volume Loss)에 기인한 침하와 지하 수위 저하에 의한 침하가 복합되어 나타날 수 있다.

본 사례에서는 주변 시설물이 매우 인접되어 있고 교통 소음이 많은 오목고, 침하에 민감한 오목 육교등이 위치하고 있어 지표면 침하를 최대한 억제시키기 위해 지반개량 측면의 보조공법 시행, 굴착 즉시 Shotcrete 타설 및 폐합, 취약 막장 구간에 대해 차수 Grouting을 추가하여 지하수위 저하 속도를 지연시키는 등의 조치를 강구하였다.

시공결과 다행히도 인접 건물 상태는 굴착전에 균열 조사된 상태 이상으로 균열이 확대된 구간이 거의 없는 것으로 확인되었으나 이는 조밀한 지층 상태로 인해 지하수위 변화에 의해서도 침하 발생이 적었던 지반여건의 혜택으로 추정되므로 이후로는 설계단계에서 보다 정밀한 분석 및 대책이 요구되었다.

7. 제언 사항

국내의 NATM에 의한 터널 설계는 예비설계 개념으로서 지보재는 패턴 설계를 원칙으로 하고 보조공법은 차수 및 지반보강 개념의 그라우팅을 주로 갱내에서 시행토록 계획하고 적용 범위는 현장 여건에 따라 조정토록 설계한다.

따라서, 시공단계에서 정밀한 시공조사를 토대로 설계내용이 현장 여건에 부합하는지 여부를 판단한 후에 시공계획을 수립하여야 하고 계측에 의해 설계 패턴의 적정성을 판단한후 본격적으로 시공에 착수하여야 설계개념에 부합하게 시공이 시행됨을 의미한다.

이러한 설계 방법은 막장 자립성이 확보되는 암반터널에서는 별 문제가 없을 수 있으나 함수 미고결 토사지반등의 연약지반상의 터널에서는 보강방법에 대한 판단이 지연되는 경우 실제 시공과정에서 많은 위험성을 내포하게 된다.

따라서, 보조공법은 설계단계에서 갱내 차수보강 계획에만 의존하지 않아야 하며 시공단계에서 시행해야 하는 정밀조사 내용을 구체적으로 시방, 도면, 내역등에 반영함이 요구된다.

감사의 글

안양천 터널시공과 관련한 관계자를 포함하여 본 논문을 위해 자료 정리와 편집에 협조해 준 동료 직원들에게 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

(주)대우엔지니어링(1993) 서울지하철 5호선 5-12공구 안양천 터널구간 배수방법 검토 종합보고서

김주봉, 문상조, 황영철, 신영안(1993) '연약지층 터널 보강방법에 관한 FEM 해석 사례 연구', 지반공학회 논문집

김승렬(93) '서울지하철 터널의 설계 및 시공현황과 평가', 지하공간 건설 기술에 관한 서울 심포지엄 논문집, P51~P75.