

저토피 · 편경사 지형에서 터널굴착사례

A Case Study on Excavation of Tunnel in a Shallow Layer & Uneven Slope

이춘석¹⁾ Lee, Chun-Suk

류기정²⁾ Yoo, Ki-Cheong

정찬규³⁾ Jung, Chan-Gyu

송평현⁴⁾ Song, Pyung-Hyun

최충락⁵⁾ Choi, Choong-Lak

권민석⁶⁾ Kwon, Min-Seok

¹⁾ (주)수성엔지니어링 전무, 기술사, Soosung Engineering Co Ltd., Senior Managing Director & CFO, PE

²⁾ (주)한진중공업 건설부문 상무, 기술사, 공학박사, Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd.,
Managing Director, PE, Ph.D

³⁾ (주)선진엔지니어링 이사, 기술사, Sunjin Engineering Co Ltd., Director, PE

⁴⁾ (주)세일엔지니어링 이사, 기술사, Seil Engineering Co Ltd., Director, PE

⁵⁾ (주)선진엔지니어링 차장, 기술사, Sunjin Engineering Co Ltd., Deputy General Manager, PE

⁶⁾ 경희대학교 대학원 토목공학과, 박사수료, KyungHee Univ. Dept Civil of Engineering, Ph.D. Candidate

SYNOPSIS : NATM 터널에 작용하는 토압(이완하중)의 크기는 지형조건, 지질조건등에 따라 다르므로 정량적으로 산정하기에는 다소 어려움이 있으며, 실무적으로 Terzaghi(1946)가 제안한 암반의 이완하중을 적용하고 있다. Terzaghi 암반이완하중은 지형상 저토피, 편경사등을 고려하기에는 다소 무리가 있고 특히, 설계시 시공중 · 공용후 터널에 편토압이 작용한다고 예측하는 것은 더욱 어렵다고 할 수 있다. 본 연구에서는 저토피 · 편경사지형에서 터널의 문제점 · 보강대책방안에 대하여 종합 검토하였으며, 실제 지형상 저토피, 편경사를 이루나 암질이 양호하다고 판단되어 아칭 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상되는 터널이 굴착과정중 설계시 추정된 지반조건과 상이하여 터널지보재(숏크리트)의 균열 및 이상변위가 발생된 터널에서 보강대책방안으로 인버트폐합을 실시하여 안정된 터널굴착을 할 수 있었던 사례를 소개하고 저토피 · 편경사 지형에서 NATM 터널의 설계 · 시공시 유의사항에 대하여 검토하였다.

Keywords : 저토피, 편토압, NATM, 암반이완하중, 인버트폐합

1. 서 론

국내에서 설계 · 시공되는 산악터널의 대부분은 NATM을 채택하고 있으며, NATM은 지반이 지보능력을 발휘한다고 보는 지반공학적인 터널공법으로 주로 암반의 분류방법인 RMR 과 Q-system 을 기반으로 설계 · 시공이 이루어 진다. 특히, 근래에 들어 친환경적인 설계를 지향하면서 터널의 갱구부 형성위치가 점점 저토피화 되고 지반이 아칭효과(Arching)을 기대하기 힘든 구간에 갱구가 형성되어 이에 대한 대책방안으로 갱구부안정, NATM 터널내 막장안정 및 천단안정을 기대하고자 보강사례가 급증하고 있는 실정이다. 본 사례연구에서는 토피고가 낮고, 편경사지형을 이루며, 암질이 불량한 지반에서 터널굴착시 지반의 응력해방으로 인하여 발생될 수 있는 문제점등을 살펴보고 실제 터널공사시 지보재 균열등의 문제점이 나타난 터널의 보강사례를 통하여 저토피 · 편경사 지형에서 NATM 터널의 설계 · 시공시 유의사항에 대하여 살펴하였다.

2. 저토피 · 편경사지형의 터널특성

2.1 저토피구간 터널특성

터널 상단부의 토피가 확보되는 조건 즉, 지반의 아칭효과(Arching Effect)를 발휘 할 수 있는 지반조건일 경우 NATM공법은 지반이 그 자체로 지지보재로써 최대한 활용될 수 있고 절리 및 기타 영향등에 의해 지지력이 저하된 구간에 대해 슛크리트, 록볼트, 강지보등을 통해 지지력을 보강하여 터널의 안정을 확보하면서 구조물을 완성시키는 공법이다. 그러나, 지반이 지보재로써 활용될 수 있는 최소한의 토피를 확보하지 못하는 경우 터널은 굴착시 막장면 및 천단부 등의 변위와 붕괴, 지표면의 침하 등을 유발 할 수 있다. 이러한 변위 및 붕괴는 상재하중과 지하수에 크게 영향을 받게 되므로 터널설계시 지하수의 대책을 수립하지 않으면 안된다. 또한, 막장부의 자립성 평가와 적절한 보조공법 선정이 중요한 항목이라 할 수 있다.

2.2 편경사지형 터널특성

터널에 작용하는 토압은 암반이 양호하고 암반이 지보재로써의 능력을 발휘할 수 있을 만큼의 토피고 즉, 아칭작용이 발휘될 수 있는 토피고를 확보한다면 일반적으로 토압은 터널에 균등하게 분포하여 편토압의 영향을 무시할 수 있다. 그러나, 터널에 작용하는 토압이 현저히 불균등하게 작용하는 경우 편토압이 작용한다고 볼 수 있으며, 편토압이 작용되는 일반적인 경우는 편경사지형을 이루는 곳에서 터널을 굴착하는 경우에 나타나지만, 단순히 편경사지형에서 편토압이 작용되는 것이 아니라 지형의 생성과정, 터널 시공중 불균형, 갱구부 사면형성 중 굴착에 의한 지하수위의 급격한 저하, 저토피 구간, 파쇄대(단층)의 존재유무, 암질이나 절리의 발달특성등 편토압의 발생원인은 매우 다양하다고 할 수 있다.

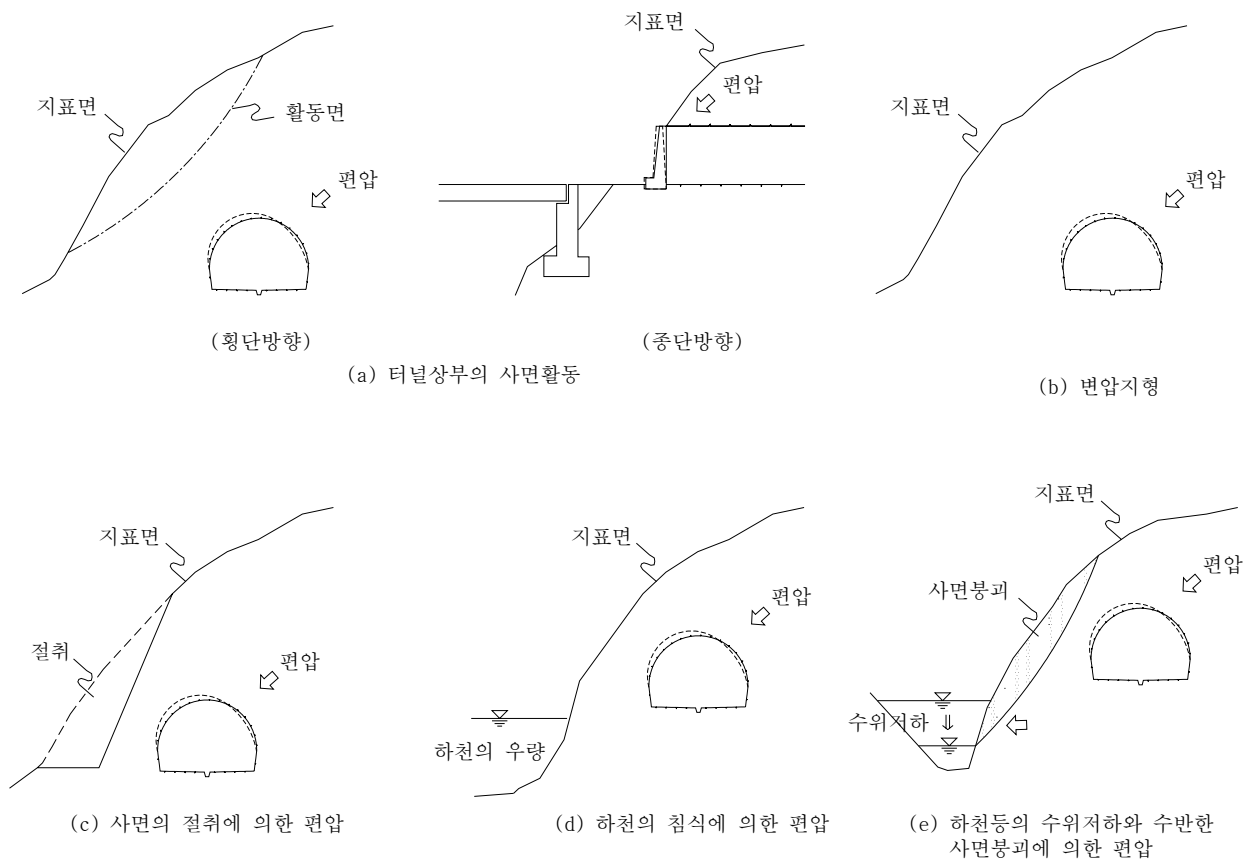


그림 1. 저토피 · 편경사지형의 터널거동

2.3 저토피 · 편경사지형 대책방안

2.3.1 주요고려사항

저토피 · 편도압구간에서의 터널설계 · 시공시 고려해야 할 주요 사항은 다음과 같다.

- 1) 터널 막장 및 상부구간의 지반의 공학적 특성
- 2) 터널막장면 안정성 확보
- 3) 측벽부와 천단부의 변위 및 지표면 침하에 대한 안정성 확보
- 4) 주변 보안물건에 대한 굴착에 따른 영향
- 5) 콘크리트 라이닝에 작용하는 하중

2.3.2 터널천단부 안정공법

1) Fore-Poling

- 강지보공을 지지점으로 굴진길이의 2배이상 길이철근을 막장전방에 타설하여 천단의 붕괴를 방지하는 공법으로 횡간격 50cm, 타설경사 15°~20°, 타설범위는 아치부 60°~100° 로 설치함.

2) 파이프 루프/강관(FRP)다단그라우팅

- 지반을 천공한 후 파이프 루프/강관(FRP)을 넣고 그라우팅을 실시하여 지반보강과 차수를 기대하고자 횡간격 50cm, 타설경사 10°, 강관길이 12m로 설치함.
- 탄성계수는 풍화암의 경우 2배이상 증진시키며, 막장안정성, 터널천단침하 및 지표침하를 경감시킴.

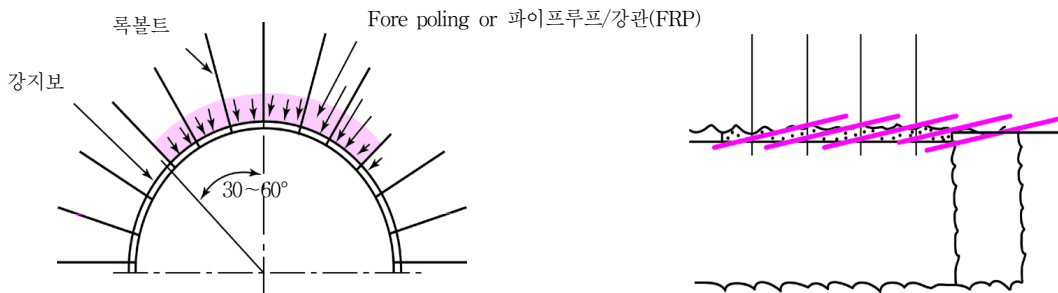


그림 2. Fore-Poling, 파이프루프/강관(FRP) 설치개념도

3) 그라우팅 공법

- 주입재를 지반에 주입시켜 지반의 강도증진, 지수성 증진, 변위억제등을 유도.
- 주입약액에 따라 SGR, LW, 우레탄, MSG 그라우팅등이 있음.

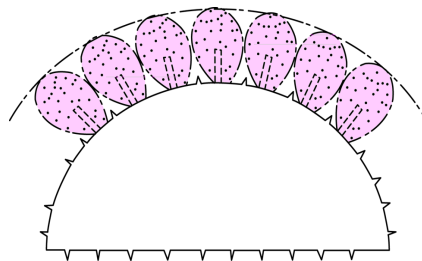


그림 3. 그라우팅 공법 설치개념도

2.3.3 터널막장면 안정공법

- 1) 지지코아 설치
 - 막장면중앙부에 지지코아를 남겨두고 굴착한 후 지보재 설치
 - 연약한 지반에서 필수적이며, 지지코아의 크기 및 후속작업공정의 원활한 수행이 가능하도록 결정
- 2) 막장면 슛크리트
 - 미고결지반, 팽창성지반, 함수풍화대에서 유효한 공법으로 막장면 전면에 슛크리트($t=3\sim 5\text{cm}$)를 타설
 - 장기간의 공사중지시 필수적이며, 시공이 용이하고 효과가 빠름
- 3) 막장면 록볼트
 - 길이는 굴진장의 3배이상으로 하고 연약한 지반의 경우 막장면 슛크리트와 병용하면 매우 효과적임.
 - 절단이 용이한 재료를 사용하고 베어링 플레이트를 설치하여 정착하며, 천공홀은 충전이 필요함.

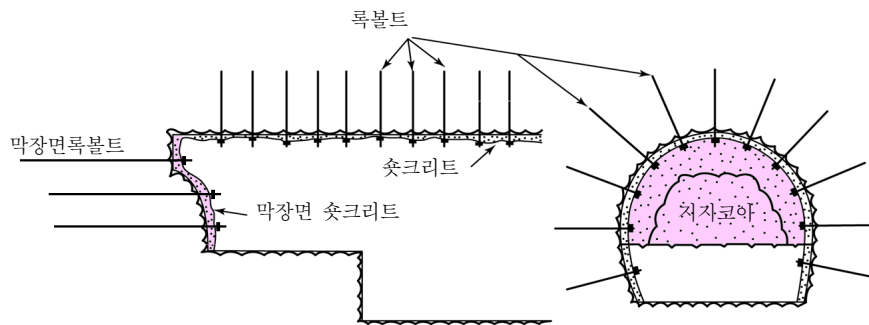


그림 4. 막장면 안정대책 설치개념도

2.3.4 굴착에 의한 안정공법

토피가 얇고 연약한 지반에 건설되는 터널의 경우 현장여건에 따라 아래표와 같이 분할굴착공법, 측벽선진도갱공법, 중벽분할공법등과 같이 굴착방식을 변경·적용하여 안정적인 터널건설이 가능하다.

표 1. 터널굴착공법

굴착방식		형단면	적 용 조 건	정 의
분할굴착공법	슛벤치		· 토사에서 팽창성지반까지 가장 일반적인 공법	$1D < L < 3D$
	다단벤치		· Short Bench Cut에서는 막장이 자립하지 않는 경우	벤치수 3개 이상
	미니벤치		· 도시터널에서 침하를 억제하는 경우 · 팽창성 지반에서 빠른 시기에 전주변에 걸쳐 지보를 시공하는 경우	$L < 1D$
	가 Invert		· 도시터널에서 침하를 억제하는 경우 · Short Bench Cut에서 침하가 큰 경우의 대책으로서 적용	· 터널바닥부 인버트설치
측벽선진도갱공법			· 도시터널에서 침하를 억제하는 경우 · 비교적 대단면에서 지반의 지지력이 부족한 경우	단면의 측벽부를 먼저 굴착
중벽분할 공법			· 침하를 극력 억제해야 하는 경우 · 비교적 대단면으로 막장이 자립하지 않는 경우	연직 분할굴착

3. 터널개요

3.1 지형 및 지질

본 터널 북측으로는 도덕봉(△407.3)-철봉산(△449.0)이 북측 경계를 형성하며 터널의 남측으로는 장용산-매봉-월이산-송이봉(△224.5)이 남측 경계를 형성하여 터널과 평행하게 분포하고 있다. 지형상으로는 동-서 방향의 능선이 발달하였으며 금강 천변과 계곡부를 따라 충적지가 발달하여 이들 충적지와 구릉지를 따라 묘목단지 및 농사가 행해지고 있다. 터널 시점부쪽에는 장잠리에서 발원한 건천이 터널과 평행하게 동류하여 금강에 합류하며 남측 마니산에서 발원한 이원천이 남에서 북류하여 금강에 합류하고 있다.

본 터널지역의 지질은 백악기 불국사 화강암류의 일종인 흑운모 화강암과 반상 흑운모 화강암을 기반암으로 이들의 풍화대와 제4기 충적층이 부정합으로 기반암을 피복하고 있다. 지역별 암상의 분포상태는 노선 시점부에서는 기반암으로 흑운모 화강암이 분포하나 산 중턱 급경사부를 따라서는 흑운모 화강암을 관입한 석영반암이 분포하며 이들은 풍화도의 차이에 의하여 상대적으로 석영반암 지대가 급경사 지형을 형성하고 있으며 지형적 영향으로 상대적 저지대인 하부의 흑운모 화강암 지대로 상부의 석영반암 성분의 거력의 암괴와 암편이 중력에 의해 붕괴되어 Talus상태로 흑운모 화강암의 풍화잔류토와 혼합 붕괴되어 있다. 시점부에서는 풍화대가 깊어 노두의 출현이 없으나 산지의 선단부와 ○○터널 종점부, △△터널 시점부와 종점부에서는 상대적으로 급경사 지형을 형성하여 노두의 출현 상태가 양호한 편이다.

3.2 지반조사

1) 지반조사내용

○○터널과 △△터널에서 총 8개소의 시추조사를 실시하였으며, 물리탐사 및 현장·실내시험을 실시하였으며 그 현황은 아래표와 같다.

표 2. 지반조사수량

터널명	시추조사공수	탄성파탐사	현장시험	실내시험
○○터널	6공	360.0m	공내재하시험 8회 수압시험 8회	일축압축시험 11회 삼축압축시험 3회
△△터널	2공	300.0m	공내재하시험 2회 수압시험 2회	일축압축시험 2회 삼축압축시험 2회

2) 지층현황분석

- 표 토 층 : 지표면 최상부로부터 0.2~0.5m의 심도까지 분포하고 있으며 실트 섞인 모래로 구성되어 있다.
- 잔류토층 : 지표면 하부 1.8m~8.6m 두께로 분포하고 있으며, 색조는 황갈색, 함수상태는 습한 상태인 실트 섞인 모래로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N치는 12/30~50/12로 보통에서 매우 조밀한 상대밀도를 나타낸다.
- 풍 화 암 : 지표면 하부 2.1~18.2m의 심도에서 0.6~10.7m 두께로 분포하고 있으며 표준관입시험의 타격시 암편은 실트 섞인 모래로 분해된다. 표준관입시험에 의한 N치는 50/9~50/3으로 나타내며 매우 조밀한 상대밀도를 나타낸다.
- 연 암 : 기반암인 연암은 4.2m~21.0m의 심도에서 나타나며 흑운모 화강암을 모암으로 하고 있으며 풍화상태는 보통풍화, 강도는 보통강한상태. TCR(코아회수율)은 11~75%, 암질지수(RQD)는 0~65%임.
- 경 암 : 연암 하부로 부터 6.0m~31.0m의 두께를 확인하였으며 흑운모 화강암을 모암으로 하고 있다. 풍화상태는 약간풍화, 강도는 강한상태이며 TCR(코아회수율)은 80~100%, 암질지수(RQD)는 48~100%임.

3.3 지보패턴 및 보강설계

○○터널과 △△터널은 ○○선 철도 일부 선형개량 공사구간의 복선터널로 ○○터널은 총연장 283.0m중 개착구간 90.0m, NATM구간 193.0m이며, △△터널은 총연장 213.0m중 개착구간 128.0m, NATM구간 85.0m로 구성되어 있으며 ○○터널은 터널상부 토피고가 0.5D(D:터널직경)이내의 저토피구간으로 개착터널구간과 NATM구간이 구간별로 병행되었으며, △△터널은 전반적으로 저토피·편경사 지형이 심하여 시점측 일부구간만을 NATM으로 계획하고 나머지 전구간은 NATM터널로 계획하기에는 무리가 있을 것으로 판단되어 개착터널로 계획하였다.

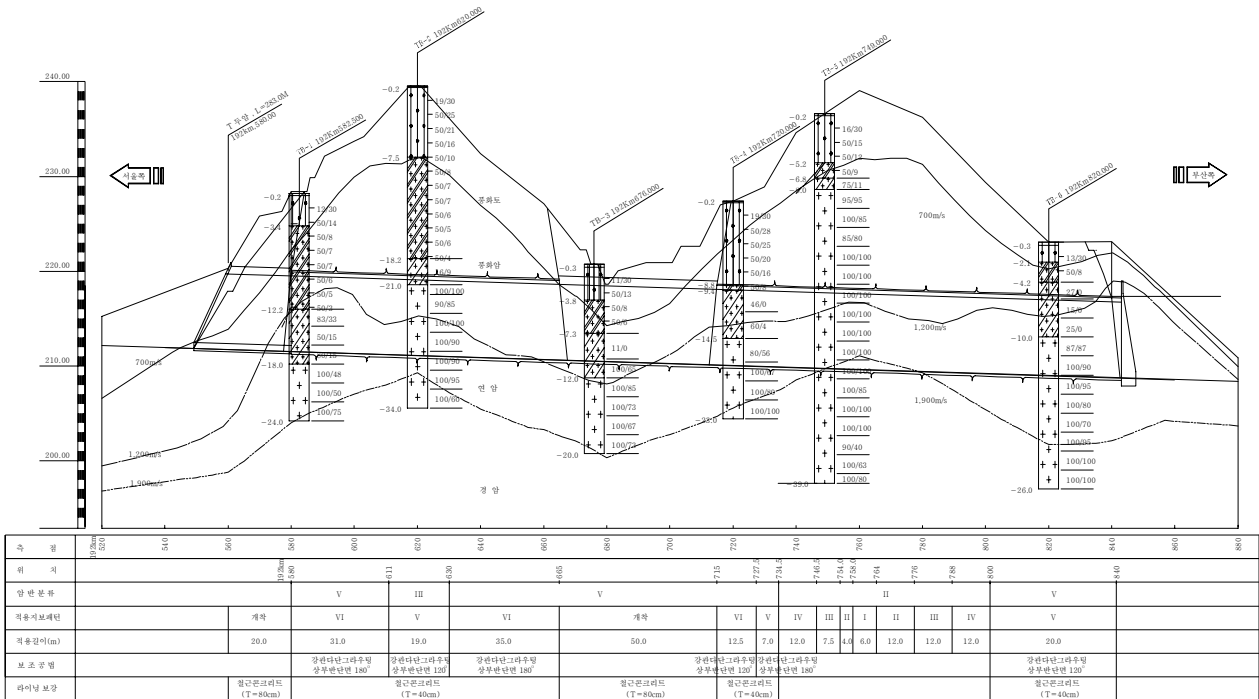


그림 5. ○○터널 지층단면 및 지보패턴적용현황

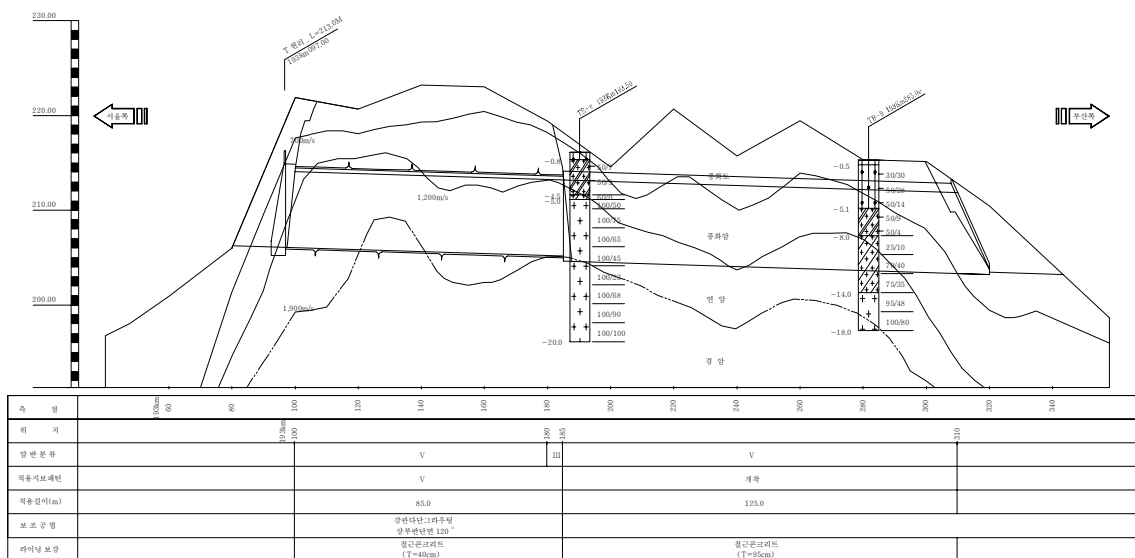


그림 6. △△터널 지층단면 및 지보패턴적용현황

○○터널 시점부는 저토피, 리핑암 및 파쇄가 심한 발파암구간으로 갱구부에서 강관다단 그라우팅 보강을 2열 보강하고 측벽부 일부는 발파암구간까지 강관다단 그라우팅 보강공을 실시하였으며, 종점부는 급격한 편경사 지형으로 지반조사는 지형상 장비진입의 어려움등으로 조사를 실시하지 못하였으나 터널갱구가 형성되는 구간의 암질이 매우 양호하여 터널천단부만 강관다단 그라우팅 보강을 적용하는 것으로 계획하였다.

△△터널 시점부는 암질이 다소 불량하고 저토피구간이지만 철도노선의 선형조건이나 지형상 비탈면으로 처리하기에는 전반적으로 무리가 있어 NATM터널로 계획하였으며, 저토피 구간이 심한 곳은 록볼트 시공시 록볼트가 지표면으로 도출되는 것을 방지하고, 안정적인 터널 굴착이 될 수 있도록 하였으며 시·종점부 모두 강관다단 그라우팅 보강을 적용하는 것으로 계획하였다.

4. 공사중 변형조사

4.1 육안조사

터널 갱구부의 외관상 변형은 육안을 이용하여 알 수 있는 현상(균열, 누수 및 배수, 사면부의 변형, 생성물)이 터널 막장면 또는 사면부에 나타난다. 외관상 변형의 조사는 막장면에서 공사가 이루어지는 동안 실시할 수 있으며 가장 원초적이면서도 확실한 방법이라 할 수 있다.

본 2개소의 터널중 육안으로 변형이 발견된 △△터널은 변형현상으로 누수, 균열등이 나타났으며, 누수는 록볼트설치지점에서 균열은 터널굴착면방향으로 나타났으며, 일부구간에서는 종방향 균열이 나타났다.

숏크리트면의 누수 및 균열은 측벽부보다는 천단부에서 많이 발생되었으며, 균열이 주로 횡방향으로 발생된 것으로 보아 강지보재의 설치구간과 미설치구간의 단차에 의해서 발생된 것으로 판단된다.



터널 천단부 균열 및 누수 현황



터널 측벽부 균열 및 누수 현황

그림 7. △△터널 변형 현황도

4.2 계측자료분석

○○터널 종점측 갱구부와 △△터널 시점측 갱구부에 설치된 계측기 설치현황 및 수량은 다음 표 3. 와 같으며 계측관리 기준치는 지반조건 및 현장여건에 따라 일률적으로 엄격하게 적용하기는 어려우나 일반적으로 표 4. 과 표 5.를 많이 이용하고 있다.

터널계측은 2004년 10월부터 2005년 2월 5일까지 실시하였으며 ○○터널 종점측 갱구부 및 △△터널 시점측 갱구부의 계측분석결과 내공변위 및 천단침하의 최종변위는 연암지반을 기준으로 할 때 주의레벨 I 과 주의레벨 II에 해당하는 변위가 발생했으며, 전체적으로는 수렴하는 상태를 나타냈으며, 지표면의 변위도 15mm내외로 안정적으로 수렴한 것으로 나타났다.

그러나 변위양상(내공변위 및 지중변위), 록볼트 축력, 숏크리트 응력의 터널내 천단 및 좌우측결과를 분석해

보면 계측결과는 관리기준치를 초과하지 않고 안정적으로 수렴했으나 변위 및 응력이 한쪽으로 편중되는 양상을 보이고 있어 편토압의 영향을 받고 있는 것으로 판단할 수 있었다.

표 3. 계측기 설치위치 및 수량

구 분	설치현황	
	○○터널 종점측 갱구부	△△터널 시점측 갱구부
천단변위	2 개소	2 개소
내공변위	12 개소	12 개소
록볼트 축력	5 개소	5 개소
지중변위	5 개소	5 개소
숏크리트 응력	5 개소	5 개소
지표침하	3 개소	3 개소

표 4. 천단침하관리기준 (일본의 천단침하 관리기준, 1986) 단위:mm

레벨 \ 지반	A (경암)	B (연암)	C (풍화암)
I	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~3.0
II	1.0~1.5	1.5~4.0	4.0~9.5
III	3.0~4.0	4.0~11.0	11.0~27.0

표 5. 내공변위 관리기준 (ASCE ; Franklin, 1976) 단위:mm

주의 Level	관리기준	대응방법
1	내공변위의 속도가 막장에서 5mm/day보다 크게 된다. 또는 숏크리트에 부분적인 Crack이 발생된다. 지하수가 침투된다	책임기술자에게 보고한다
2	내공변위의 속도가 막장에서 10mm/day, 후방에서 5mm/day보다 크게 된다. 숏크리트에서 상당한 균열이 발생한다. 지하수의 침투있다	책임기술자에게 보고함과 동시에 지보재, 록볼트, 숏크리트를 추가 시공한다
3	변위가 가속된다. 균열이나 지하수의 침투가 Level2를 더욱더 넘는다	책임기술자에게 보고한다, 굴착을 정지하고 잠정적으로 강지보재와 긴 길이의 록볼트를 시공한다, 조사를 한다

주의레벨 I : 지반은 안정해 있지만 이완영역의 발생한계에 달하기 때문에 굴착에 약간의 주의를 요함.

주의레벨 II : 이완영역이 발생하는 것으로 간주함.

주의레벨 III : 명확하게 이완영역이 발생하기 때문에 안전의 문제와 시공의 곤란이 예상되므로 굴착방법, 지보공법 등의 변경을 요함.

4.3 변형조사결과 요약 및 분석

이상과 같이 ○○터널 종점측 갱구부 과 △△터널 시점측 갱구부의 현장 육안조사결과와 계측결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) ○○터널 종점측 갱구부의 숏크리트 균열은 육안으로 확인하기에는 다소 어려움이 있었으나 △△터널 시점측 갱구부의 숏크리트 균열은 육안 및 사진촬영으로도 확인할 수 있었다.
- 2) 계측결과 안정적으로 수렴하는 것으로 보이며 관리기준치의 주의레벨 I ~ II 정도를 나타냈다.
- 3) 터널내 변위양상(내공변위 및 지중변위)은 △△터널 시점측 갱구부의 경우 편토압이 작용하는 방향과 일치하는 좌측방향으로 발생하였다.

△△터널 시점측 갱구부의 경우 숏크리트 균열 및 누수등이 발생한 원인은 아래와 같다고 판단된다.

첫째, 지반조사시 연약한 암반의 미발견

둘째, 터널갱구부를 저토평 경사 지역에 설치하여 편토압 유발

5. 안정성 검토

△△터널의 지보재 균열 및 안정성 확보차원의 대책방안으로는 터널은 굴착을 완료한 상태에 있었으며 추가적인 변위가 발생되지 않았고, 향후 터널의 안정성을 확보하기 위한 방안으로 인버트폐합을 통한 콘크리트 라이닝 보강방법을 채택하였으며 SAP2000을 이용한 구조해석을 실시하여 안정성을 확보하였다.

5.1 검토조건

범용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 이용한 콘크리트 라이닝 구조해석은 지반조건 및 하중조건(하중조합)에 따라 해석결과에 영향을 받게 된다. 본 검토에서는 설계시 제시된 지반물성치와 하중조건(하중조합)을 사용하고 편토압을 재하하기 위하여 Terzaghi 암반이완 하중값에 $K_0=0.5$ 를 적용하여 측압으로 재하하였다.

인버트를 폐합 전·후의 콘크리트 라이닝의 단면력과 철근보강량등의 차이를 알아보기 위하여 콘크리트 라이닝의 폐합 전·후에 대하여 해석을 실시하였다.

5.2 검토결과

「5.1 검토조건」에서와 같이 Terzaghi 암반이완하중값에 $K=0.5$ 를 적용하여 편토압을 측압으로 재하하였고 SAP2000을 사용하여 구조해석을 실시한 결과는 다음과 같다.

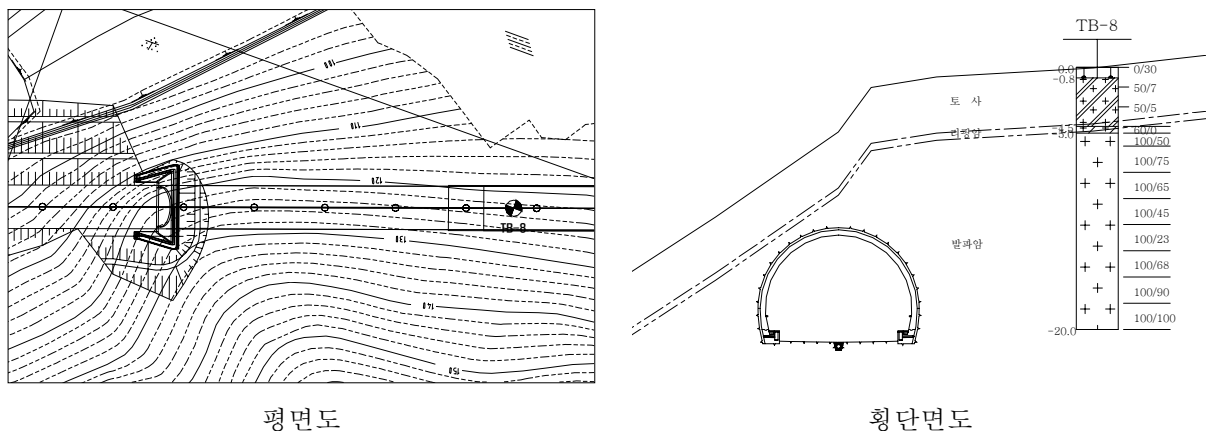
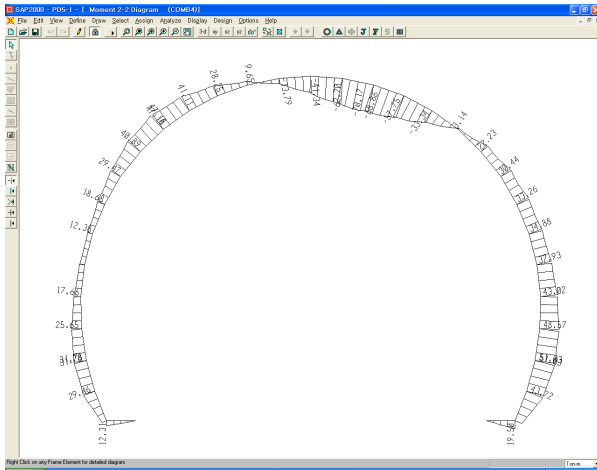
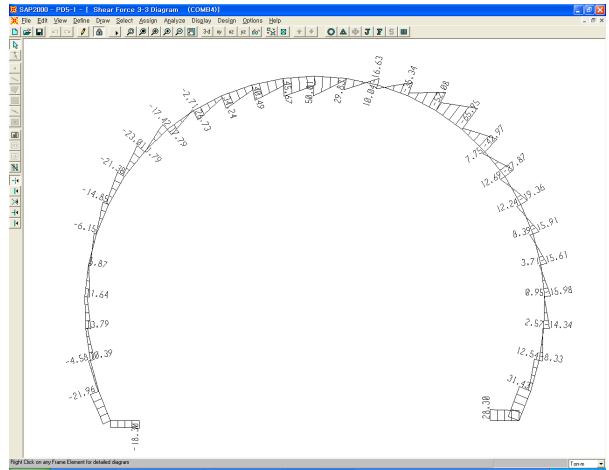


그림 8. 검토단면 현황도

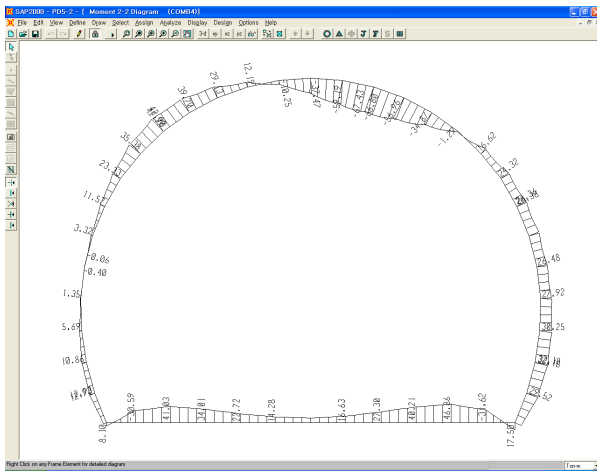


(모멘트도)

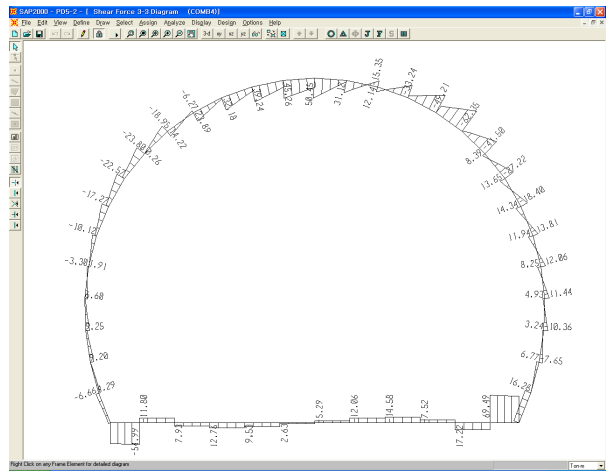


(전단력도)

그림 9. 인버트 폐합전의 단면력도



(모멘트도)



(전단력도)

그림 10. 인버트 폐합후의 단면력도

이상과 같이 결과에서 보듯이 인버트 폐합전 콘크리트 라이닝의 최대모멘트는 70.17 tonf·m, 전단력은 65.95 tonf 로 나타났으며 인버트 폐합후 콘크리트 라이닝의 최대모멘트는 67.43 tonf·m, 전단력은 62.35 tonf 로 나타났으며, 천단부, 좌우측벽부로 나누어 검토한 결과 모멘트는 4.0%~37%, 전단력은 6.5%~48.2% 감소되어 인버트 폐합후 편도압 작용에 의한 응력집중현상을 완화시켜 폐합전보다 안정적인 콘크리트 라이닝 시공이 될 것으로 판단된다.

표 6. 위치별 단면력 검토결과

검토조건		위치	단면력		
			천단부	측벽부(좌)	측벽부(우)
모멘트 (tonf·m)	콘크리트 라이닝 폐합전		70.14	47.18	51.03
	콘크리트 라이닝 폐합후		67.43	42.90	32.18
전단력 (tonf)	콘크리트 라이닝 폐합전		65.95	21.90	31.43
	콘크리트 라이닝 폐합후		62.35	16.66	16.28

6. 결 론

저토피 편경사 지형을 이루는 갱구부에서 발생한 변형 및 대책방안사례를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) ○○터널 종점측 갱구부와 △△터널 시점측 갱구부 모두 지반조건은 불량한 연암반의 상태의 강관다단보 강그라우팅보강을 적용하는 것으로 계획하였다.
- 2) 터널굴착중 △△터널 시점측 갱구부에서 육안으로 확인 할 수 있는 슛크리트 균열 및 누수가 발생하였으며, 전반적으로 계측결과는 관리기준치의 주의레벨 I ~ II 정도로 변위가 수렴되는 결과를 나타냈지만, 변위양상이 편경사지형 방향으로 비대칭적으로 발생되었고, 편경사 지형방향으로 변위 및 응력이 상재적으로 집중되는 것으로 보아 편토압이 발생하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 편토압에 대한 대책방안으로는 콘크리트 라이닝을 인버트 폐합함으로써 구조적인 안정성을 기하고 하였고 인버트 폐합전보다 안정적으로 터널을 건설 할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같은 결과에서 보듯이 거의 유사한 편경사 지형을 나타내고 있는 두 터널중 ○○터널 종점측은 육안조사결과 및 계측분석결과 편토압이 발생된다는 징후를 발견할 수 없었지만 △△터널 시점측은 편토압이 발생하는 것으로 분석되었다.

터널계획시 저토피구간에 대한 대응방법으로는 설계시 반영이 편토압구간보다는 상대적으로 용이하나, 편토압을 받는구간에 대한 대응여부는 다소 어려움이 있다. 일반적으로 편경사 지형을 이루면 편토압이 발생할 가능성 높지만 지반조건(암질, 불연속면의 방향성, 파쇄대 존재여부등)에 따라 편토압의 발생여부는 다소 미지수라 할 수 있다.

향후 터널계획시 편경사정도 및 지반조건에 따른 편토압 발생여부에 대한 연구가 수행되어 편토압 작용여부를 판단할 수 있는 정성적인 기준값을 제시할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ○○선 ○○~○○간 일부선형개량 노반공사 기본 및 실시설계 설계보고서
2. ○○선 ○○~○○간 일부선형개량 노반공사 기본 및 실시설계 터널계측관리보고서
3. (사)대한터널협회 (1999), 건설교통부제정 터널설계기준, pp8~9, pp38~41, pp56~58
4. (사)대한터널협회 (2002), 터널공학시리즈 1. 터널의 이론과 실무, pp217~233
5. 한국지반공학회 (2001), 공사중 터널의 사고사례 발표회 논문집
6. 한국지반공학회, 지반공학시리즈 7 터널, pp349~352
7. 이영남, 김대영 (2003), “설계시 지반조사 결과가 터널 굴착에 미치는 영향”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 한국터널공학회, pp3~32
8. 최용기, 박종호, 이상백, 정용진 (2003), “풍화대층의 터널시공시 굴착 및 보강공법에 따른 터널의 변형거동에 관한 연구”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 한국터널공학회, pp35~42
9. 유충식, 김선빈 (2004), “터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 한국터널공학회, pp.77~90
10. 김대영, 이홍성, 이영남, 권형석 (2004), “파쇄대 보강 지반의 굴착거동”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 한국터널공학회, pp158~171
11. 이형주 (2002), 터널 보수와 보강매뉴얼, 기술경영사, pp70~73, pp104~111
12. 이춘석 (2004), 토질 및 기초공학 이론과 실무, 예문사, pp1531~1533