

터널 굴착 막장면 후방에서 발생하는 진행성 변위 거동 분석 Progressive displacement in the weathered zone

김낙영¹⁾, Nag-Young Kim, 박영호²⁾, Young-Ho Park, 김성환³⁾, Sung-Hwan Kim

¹⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, Senior Researcher, Korea Expressway Corporation

²⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, Senior Researcher, Korea Expressway Corporation

³⁾ 한국도로공사 기술본부장, Korea Expressway Corporation

SYNOPSIS : Recently, accelerating population and advanced economy result in extending old freeways and constructing new freeways. To make a good freeway shape, tunnel constructions are also rapidly increasing. Therefore, a possibility of a collapse during a tunnel excavation is getting higher in a proportionate manner. This research paper will analyze forms and causes of the collapses for different geological conditions and applied reinforcement solutions by investigating typical collapse sites during highway tunnel constructions.

Keywords : Road tunnel, Tunnel collapse, Progressive displacement

1. 서론

고속도로 터널 시공 중 터널 붕락사태가 터널공사의 급증과 더불어 증가하고 있는 추세이다. 이와같이 터널굴착 공사중 터널 붕락 발생은 과거의 경우, 강우 발생 직후 2~3일 이후 주로 계곡부와 같은 저토피고에서 주로 발생하였고 터널 굴착중 붕락사태의 80% 이상을 차지 하였다. 그러나 최근의 터널 붕락 사례를 조사해 보면 이러한 저토피고 계곡부에서 터널 굴착중 붕락사태는 감소하고 있고 미굴착 막장 후방에서 숏크리트 타설후 과도한 변위 발생 및 균열 발생등으로 불가피하게 터널보강을 실시하는 경우가 급증하고 있다. 이와같은 터널붕락의 경우, 붕락발생부위가 광범위하므로 붕락발생시 복구가 쉽지 않은 것으로 조사되고 있다.

1.1 터널붕괴 유형

터널붕괴는 부적절한 지보형식 또는 지보재 설치시간 지연 등과 같이 설계 및 시공불량에 기인하는 경우 외에 갑작스런 지하수 유입, 불균질성 및 이방성 지반이나 예측지 못한 파쇄대 발생 등 이상 지반 특성에서도 그 원인을 찾아볼 수 있다. 터널붕괴 전에 나타나는 일반적인 현상은 균열, 과도한 박리현상, 측벽부의 침하, 토사유입과 지하수 용출등이 있다. 여기서 풍화 변질된 결정편암, 단층파쇄대 또는 층상단층보다 측압비가 큰 지반 등에서 터널 주변에 생긴 소성영역이 확대되어 터널지보에 하중으로 작용할 경우, 소성압에 의한 터널의 변형이 발생된다.

또한, 일반적으로 사면지형에 터널이 존재하는 경우 편토압의 문제점이 야기될 수 있으나, 이방성 지반에서 측압비가 큰 경우에도 편토압의 발생으로 인한 터널의 변형 및 붕락이 발생할 수 있다. 그리고 터널 굴착시 주변 지반의 이완이 진행되면 지반의 사하중이 증가하고 더욱이 발파진동 등에 의한 지반열화 및 지하수 유출등에 의한 절리면 전단강도의 저하 등에 의하여 터널 아치부에서 수평균열과 터널 천단부에서 붕락등이 발생할 수 있다.

터널굴착시 붕괴 및 붕락이 발생하는 원인은 굴착대상지반의 연약한 강도, 과도한 지하수 유입, 얇은 암 피복두께, 심한 파쇄질리를 통한 막장면 활동등이 터널파괴의 원인으로 지적되고 있으나 근본적으로 터널시공중에 발생하는 외력을 터널 지보재가 충분히 저항하지 못하게 되는 경우로 설명될수 있다. 따라서 터널굴착에 있어서 가장 우선시 되어야할 조건은 터널굴착 및 지보재를 설치하는 동안 터널을 안전하게 지지할수 있는 충분한 지지력의 확보이며 지보력이 충분하지 못한 경우에는 지반이완이 발생하고 하중이 점진적으로 크게 작용하여 박편(spalling), 압착(squeezing) 및 갑작스러운 파괴(popping)등과 같은 현상이 발생하면서 결국 터널붕괴에 까지 이를 수 있다. 이러한 터널의 붕괴형태는 시공단계에 따라 상이하게 발생하며 기존의 연구사례(HSE, 1996)에서 제시된 각국의 대표적인 터널붕괴사례에 대한 터널 굴착 단계별 붕괴 발생위치 및 발생원인을 요약하면 다음과 같다.

표 1. 주요 터널붕락현황 및 발생원인(HSE, 1996)

구분	붕락의 원인	개소	비율(%)
A형태	터널막장과 1차 지보재가 완료된 지역에서의 터널붕락	35	70
A1	굴착된 막장에서 불안정한 지반의 붕락	8	16
A2	인위적인 지반결함에 의한 불안정한 굴착 막장의 붕락	1	2
A3	과도한 천단침하로 인한 숏크리트면의 부분적인 붕락	8	16
A4	터널 종방향에 있는 벤치의 붕락	1	2
A5	굴착중 터널 중심방향으로 존재하는 벤치의 붕락	2	4
A6	1차 숏크리트 타설 부분의 터널진행방향 켈틸레버 붕락	2	4
A7	숏크리트 폐합전 과도한 상반부 굴착에 의한 붕락	3	6
A8	천단부 지지력 부족에 의한 인버트 파괴에 의한 붕락	1	2
A9	천단부 지지력 부족에 의한 상반 인버트의 천단파괴	1	2
A10	지반거동 및 하중에 의한 지보의 붕락	3	6
A11	지보시간 경과에 의한 붕락	4	8
A12	시공결함에 의한 붕락	1	2
B형태	라이닝 타설이 완료된 후의 붕락	1	2
B1	과도한 터널침하에 의한 붕락	1	2
C형태	기타 붕락	3	6
C1	풍화 및 이완된 암반에서 발생하는 갱구부의 붕락	2	4
C2	지하수 및 연약대에 의한 수직갱의 붕락	1	2

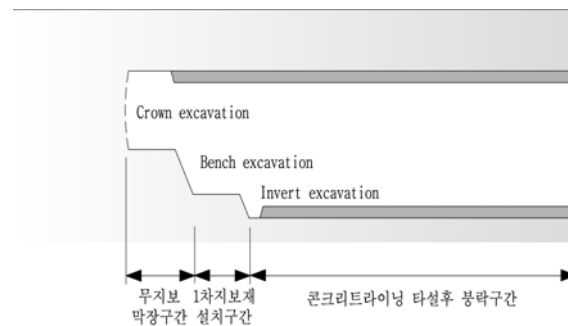


그림 1. 시공단계별 붕괴특성

1.2 1차 지보재 타설 후 붕괴

1차 지보재 타설후 붕괴발생은 터널 상하반의 지보재가 폐합되기 전에 발생하는 붕괴와 터널지보재가 폐합된 후에 발생하는 붕괴로 구분할 수 있다. 각각의 붕괴유형에 대한 특성은 다음과 같다.

(1) 지보재가 폐합 전에 발생하는 붕괴

지보재가 폐합전에 발생하는 붕괴유형으로는 지지력 부족으로 인한 붕괴, 측압증가에 의한 붕괴, 강지보재 파괴에 의한 붕괴가 있다.

지지력 부족에 의한 붕괴는 터널하반에 연약한 지반이 출현했을 경우에 주로 발생하며, 지지력 부족으로 터널 상반에 설치된 1차 지보재의 우각부 침하로 변형이 발생하는 경우에는 내공단면의 유지가 곤란하고 지보재의 균열등을 초래하여 직접적으로 터널의 붕괴로 이어질수 있다.

측압증가에 의한 붕괴는 일반적으로 원지반의 구속응력 중 연직응력보다 수평응력이 크게 발생하는 경우에 주로 발생하며 측벽부에 과도한 변위 발생으로 1차 지보재 천장부에 균열발생, 하부지반의 유기등이 발생할 수 있어서 터널의 붕괴로 이어질 수있다. 강지보재 파괴에 의한 붕괴는 보통 지반이 불량한 경우에 연직분할 굴착공법 적용시 일시적인 지보개념으로 적용한 경우에 발생하는 붕괴이다.

(2) 지보재 폐합 후에 발생하는 붕괴

지보재 폐합 후에 발생하는 터널의 붕괴유형은 전단파괴로 인한 붕괴, 압축파괴에 의한 붕괴, 편칭파괴에 의한 붕괴, 휨압축파괴에 의한 붕괴, 밀림현상에 의한 붕괴가 있다.

2. 1차 지보재 설치후 터널붕락

2.1 갱구부 지반조건 및 갱구부 붕락 형상

다음 사진1.과 같이 갱구부 시공을 위하여 굴착하는 과정중 함탄층과 풍화파쇄대가 교호하고 있는 갱구부 형성에 앞서 다음과 같이 일정구간에 대하여 선진수평시추를 실시하였다.

- ① STA. NO. 0+628.6 지점 - 상해선) : 80.6M시추
- ② STA. NO. 0+596.2 지점 - 하행선) : 100.5M시추



사진 1. 터널(상행선)갱구부 지질사진(탄층과 풍화파쇄대 혼재 상태임)



사진 2. 터널(하행선) 갱구부 사면 붕괴 사진

상기 사진1.,2와 같이 갱구부 굴착시 열악한 지질조건이 예상되어 터널 안정성 평가를 위해 조사된 미굴착구간에 대한 막장면 선진수평시추조사 결과는 다음과 같다.

2.2 선진시추조사 결과

본 연구대상 터널의 지형은 화산암류로 구성되는 동부지역에서 비교적 험준한 산계가 발달하고 있으며, 본 지역은 편암류지역으로 지형이 약간 험한 산계를 나타내고 있다.

산계는 장평면 배동리 서남쪽에 있는 가지산에서, 용두산, 제암산을 연결하는 산계와 남단에 있는 화방산을 기점으로 그 북쪽의 병점면의 별낙산과 성자산 및 유치면 조양리 서남쪽에 있는 354m고지를 연결하는 선에 평행하는 산계로 나뉘어 진다. 이들 산계는 N30. W방향의 산계나 NS방향의 산계가 모두 습곡과 밀접히 관계되어 있는 것으로 보이는데, NS방향의 산계에 있어서는 습곡과의 관련이 더욱 뚜렷하다. 화방산, 별락산, 성자산 일대에 발달된 중생대의 분포상태는 NS방향의 축을 갖는 향사구조임을 말해 준다. 수계의 발달은 각 산계에서 수지상으로 흘러나오는 하천 및 저수지가 발달하고 있으며, 남단에서 남서쪽으로 흘러 남해로 유입되는 탐진강이 우세하게 분포하고 있다.

본 조사지역의 지질분포는 주로 변성암과 퇴적암으로 구성되어 있고 이에 용암, 심성암 및 맥암이 분류 또는 관입하여 있다. 변성암류의 대부분은 편마암류이며 편암류는 편마암내에 소규모로 협재되어 있다. 본 지역은 시대미상이며, 편암류에 속하는 설옥리층에 해당하고 있는데, 오봉산에서 본층 하부인 용암산규암층과 접하며 달영 부근에서 화강암질편마암과는 점이적으로 접하며 다도응회암에 의해 부정합으로 피복되어 있다. 기반암은 백운모편암, 녹니석편암, 석영편마암등의 호층으로 구성되어 있으며, 또한 장동면 반산리에도 소규모로 발달되어 있다. 구성암석은 대체로 회백색 내지 암회색을 띠며, 운모도 위운모화되어 세립질이며 편리가 잘 발달되어 있다. 백운모편암은 주로 백운모와 석영으로 구성되어 있는데, 백운모는 석영입자들과 같이 편리방향에 평행하게 배열되어 현저하게 보이고 석영입자는 다소 편리에 평행하게 신장되어 있다.

2.2.1 선진수평 시추조사 결과

본 조사는 Core 회수율을 높이기 위해 Diamond BIT와 D-3 Core 튜브를 사용하였다.

(1) TBH-1 시추조사결과(상행선 80.6M)

기반암은 우백질 편마암으로서 대부분 파쇄대로 발달되어 있으며, 절리면사이는 변질, 변색되어 황갈색을 나타내고 있다. 0.0m~21.7m 구간은 담회색을 띠며, 완전풍화~보통풍화 정도를 나타낸다. 21.7m~45.0m구간은 완전 풍화되어 손으로 힘을 가하면 암편 또는 흙 입자로 분리되어 코아 형태를 유지하지 못하며 대부분 파쇄대 구간으로서 R.Q.D는 0~20%이내이다. 73.0m~75.8m구간은 편마구조가 발달된 파쇄대층으로서, 코아형태를 유지할수 없을 정도로 연약하며, 암편 상태로 발달되어있다.



사진 3. 상행선 sta0+628 선진수평시추코아

(2) TBH-2 시추조사 결과 (하행선 100.5M)

기반암은 우백질 화강암으로서 대부분 파쇄대로 발달되어 있으며, 경,연이 반복되어 나타났다. 0.0m~4.8m구간은 완전파쇄대층으로서 평균2~5cm미만의 암편으로 코아가 채취 되었으며, 절리면 사이는 변질, 변색되어 황갈색을 나타내고 있다. 4.8m~18.5m구간은 장주상~단주상 코아가 채취되었으며, R.Q.D는 16~58% 정도로 매우불량~보통정도의 암질지수를 나타내고 있다. 18.5m~21.6m구간은 완전 파쇄대층으로서, 평균 2~5cm미만의 암편으로 코아가 채취되었으며, 암편이 완전 교란되어있다. 37.4m~60.2m 구간은 단층각력암 및 단층점토가 발달된 구간으로서 흑색을 띠며, 손으로 만지면 쉽게 암편 및 흙 입자로 분리되며 코아 형상을 유지하지 못 할 정도로 연약하다. 또한 광물성분들이 점토화 되어있어 손으로 만지면 쉽게 달라붙는 특징이 있다.





사진 4. 하행선 선진수평시추코아

(3) 선진 수평시추 조사 분석

전반적으로 파쇄대 층의 발달로 인하여,

① TBH-1공은 R.Q.D가 0~49%이내로서, 불량 ~ 매우 불량한 암질지수를 보이며, 코아 회수율은 33%~98%를 나타내고 있다. 22.0m ~77.5m 까지는 완전파쇄대층으로서 완전 풍화되어있으며 암질 내부까지 변질, 변색되어있다. 따라서 굴착전 세밀한 막장 관찰이 요구된다.

② TBH-2공은 R.Q.D가 0~84%이내이고, 매우불량 ~ 양호한 암질지수를 보이며, 코아 회수율도 26~100%를 나타내고 있다. 19.0m~74.6m 까지는 완전파쇄대층으로서 단층각력암 및 단층점토가 넓게 협재되어 나타나고 있으며 손으로 힘을 가하면 쉽게 암편 및 흙입자로 분리되며 연약하게 나타남에 따라서 굴착전 세밀한 막장관찰이 요구된다.

③ 수직 절리 면이 발달된 지층에서는 Slickenside (경면)이 발달되어 있으며, 손으로 힘을 가하면 쉽게 암편으로 부서지는 경향을 나타낸다.

④ R.M.R 분류결과 대부분 구간에서 암반등급이 V ~ IV로서 매우불량~불량한 것으로 나타났으며, 이는 터널 굴착조건이 매우 나쁜 것을 의미한다.

3. 터널붕락 발생

3.1 1차 터널 붕락

본 연구대상 터널의 경우, 이러한 지반조건으로 인하여 터널굴착중 붕락사례 발생을 예상하여 천단부 대구경 강관다단그라우팅과 소구경 강관다단그라우팅을 지반조건과 용수상태를 고려하여 병행하여 설치하며 시공을 하였다. 그러나 사진 5., 와 같이 슛크리트 타설후 막장부를 기준으로 후방 측벽부에서 과다변위 발생으로 인한 밀림현상(밀림폭 약 60cm)이 발생하였다.



사진 5. 막장 후방부 측벽부 과다변위에 의한 균열발생(최대 60cm)

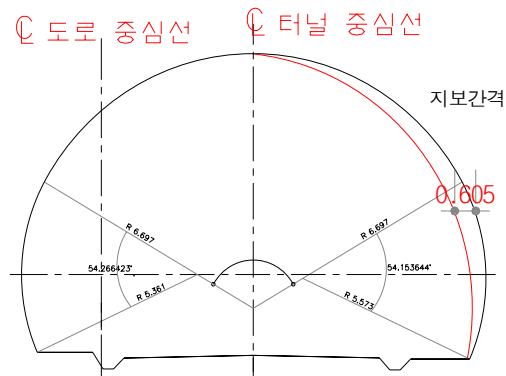


그림 2. 막장 후방 측벽부 밀림현상 발생 횡단면도(밀림폭 : 최대 60CM)

3.2 2차 터널붕락발생

본 연구대상 터널에서 2차 터널붕락이 사진 6.(a)와 같이 측벽부에서 강관다단그라우팅을 보강하였음에도 불구하고 격자지보재 손상을 발생시키는 붕락이 발생하였다. 본 붕락구간의 지반조건은 사진 6.(b)와 같이 탄층대와 풍화대가 상호 교호하는 특성을 보였다. 용수가 발생하지 않는 것으로 조사되었다. 굴착구간에 대한 막장면에 대한 RMR 분류방법으로 조사한 결과, 전반적으로 RMR 10이하로 매우 불량한 것으로 조사되었다. 본 붕락구간의 막장면은 상대적으로 지반조건이 양호한 것으로 조사되었다. 표 2. 본 붕락구간과 인근 구간에 대한 내공변위 및 천단침하 측정값이다. 최대 6cm까지 발생하여 최대 6cm 발생구간에 대해서는 추가 보강을 수행하여 변위 발생을 억제하였다.



(a) 측벽부 과다변위로 인한 격자지보재 손상



(b) 과다변위 발생구간 막장면 상태

사진 6. 슛크리트 타설후 측벽부 과다변위로 인하여 강지보재 파괴

표 2. 내공변위 및 천단침하

STA.	상대계측(거리)		절대계측(level값)		비고
	내공변위	천단침하	좌측벽침하	천단침하	
1	-9	-2	-12	-14	상대계측 : 압성토후 2차 시행한 값임
2	-11	-11	-18	-18	
3	-11	-27	-29	-33	
4	-9	-32	-36	-39	
5	-10	19	-43	-60	
6	-7	18	-51	-45	
7	-8	23	-62	-76	
8	-11	36	-76	-59	
9	-8	18	-40	-26	
10	-14	8	-32	-55	
11	-31	20	-51	-31	
12	-10	5	-13	-9	

3.3 3차 봉락발생

본 봉락구간은 기 상부대구경 강관다단그라우팅과 측벽부 보강이 기 실시된 구간으로 강우 발생시에 터널내 설치된 수발공으로 많은 양의 지하수가 발생하는 특성을 보였고 봉락직전 수발공을 통한 지하수 발생량이 저하된 것으로 조사되었다.

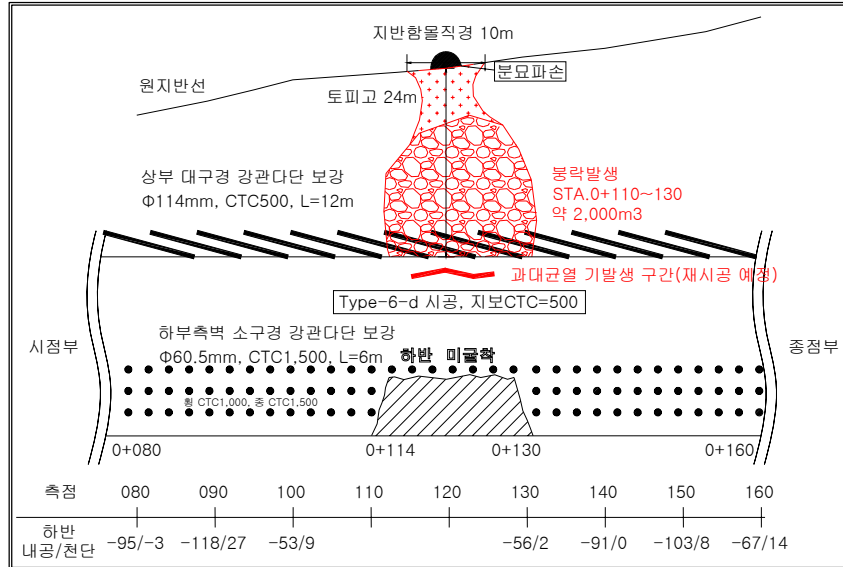


그림 3. 기 보강구간에서 봉락발생(터널내 발생 용수량 증가후 발생)

4. 결 론

(1) 상기 대상 터널에 대하여 봉락에 대한 세부적인 원인분석을 위하여 다음과 같이 세부적인 조사조사를 다음과 같이 수행하였다.

- ① 3차원 전기비저항탐사 : 1식
- ② 터널 종방향 : 5개 축선(0.5km×5축선=2.5km)
- ③ 터널 횡방향 : 11개 축선(0.2km×11축선=2.2km)
- ④ 수직시추조사 : 7개공(상행선 2개공 / 하행선 5개공)
- ⑤ 현장시험 및 실내시험 : 1식

세부 지반조사를 실시한 결과

- 사질편암과 운모편암의 교호대로서 엽리가 잘 발달되어 있으므로 극심한 물성의 이방성이 예측됨
- 운모편암 파쇄대로의 지하수 유입과 이로 인한 심한 풍화대 점토화를 가속, 전단강도 감소, 잠재적파괴활동면

함탄편암류(명봉층): STA.0+164~0+171, 0+302~0+565

편암류(설옥리층): STA.0+000~0.212, 0+565~0+700

- 함탄층은 이미 지하수에 의해 포화되어 있으므로, 자립능력이 현저히 낮은 것으로 조사됨
- 극심한 파쇄, 단층대의 경계에 평행한 취성엽리가 발달되어 있으므로 단층대 또한 물성의 이방성

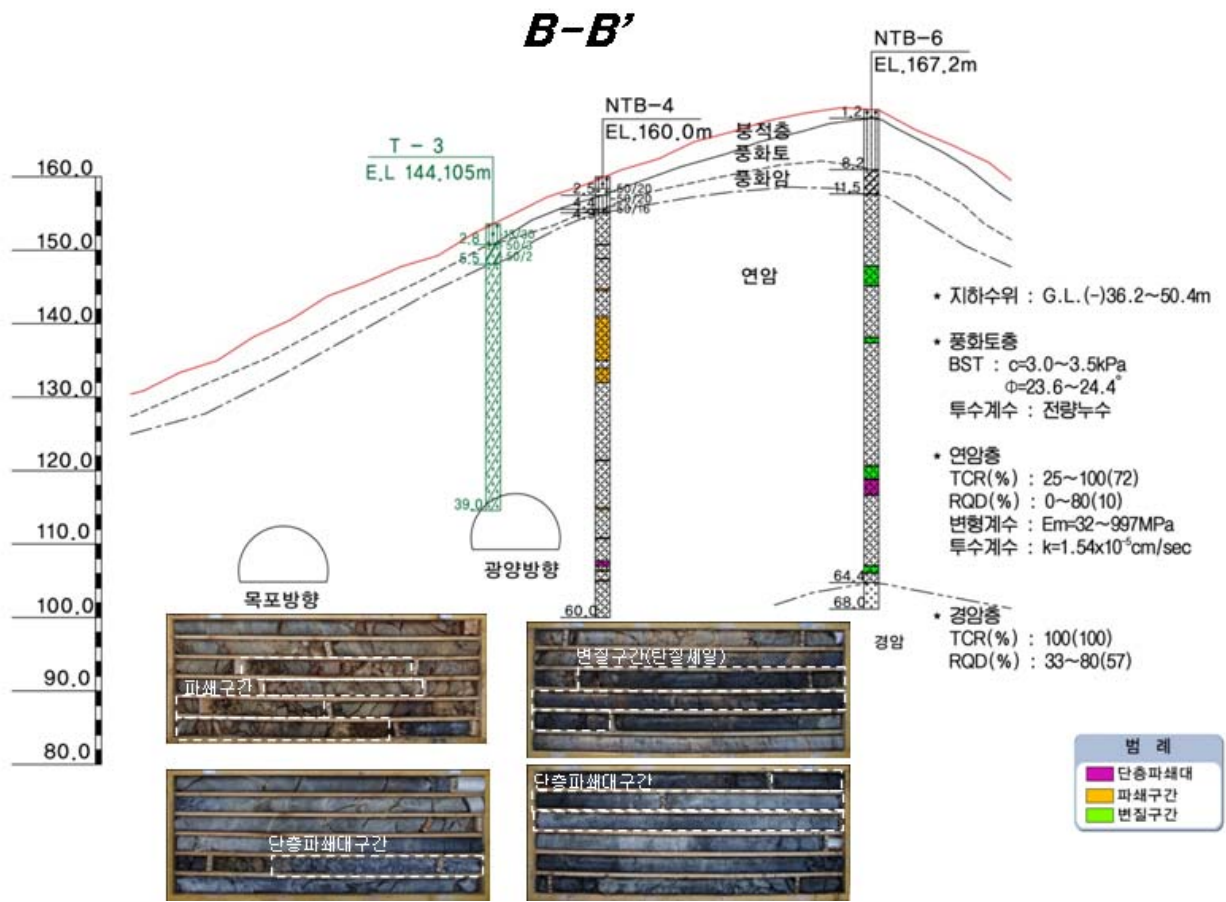
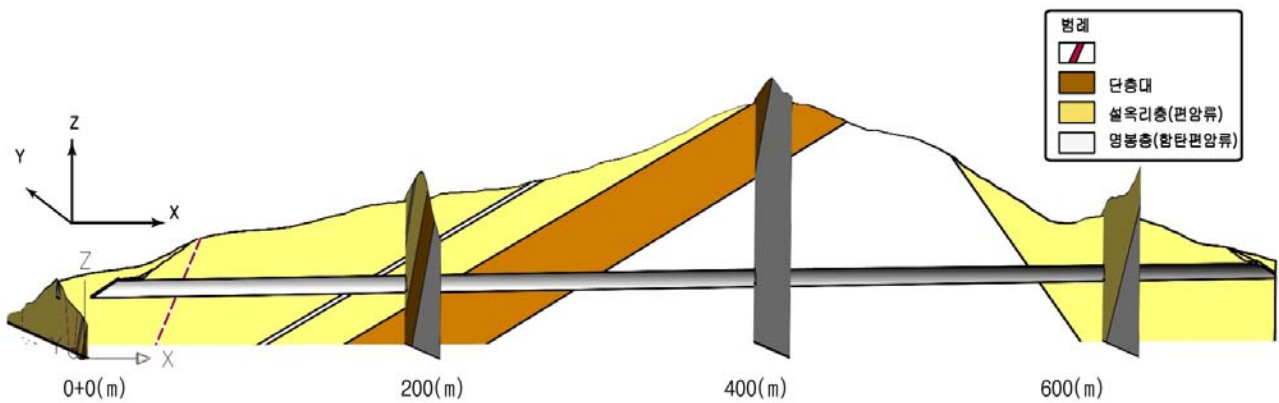
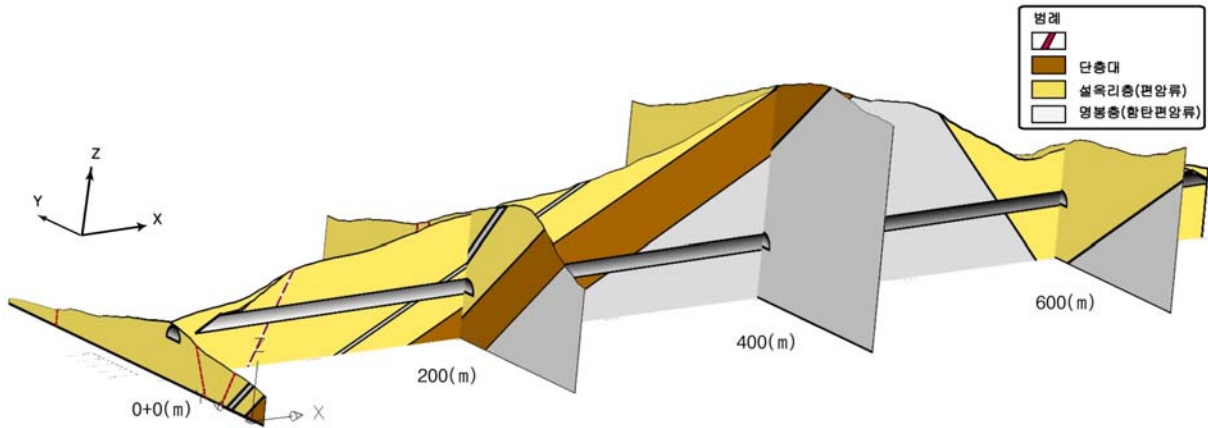


그림 4. 상세 조사 결과



(a) 상해선 상세지질조사결과(페스다이아그램)



(b) 하해선 상세지질조사결과(페스다이어그램)

그림 5. 상세 지질특성

(2) 붕괴의 원인을 지질적 특성측면에서 요약하면 다음과 같다.

① 지질구조적 특성 : 단층대 영향

- 명봉층과 설옥리층의 지질경계는 원래 부정합면이 습곡되어 접하고 있는 경계부
- 습곡작용 등 2차적인 지질구조 발달과정에 수반된 단층이 존재
- 단층대 영향권 내에서 취성변형작용으로 단층가우지, 단층각력, 단층파쇄암, 단열, 미세단층 및 맥 형성, 주변 암석에 비해 극히 낮은 인장강도와 높은 투수성 함유 예상
- 퇴적암 기원인 주변 암석의 풍화잔류물 등이 단층대(또는 단열대)에 충전될 경우 또는 단층가우지 함유 구간은 낮은 투수성이 예상되나, 이들이 지하수 유입과 함께 유실되거나 터널굴착과 같이 지중에 자유면 형성시 단층대는 일종의 파괴면으로의 역할
- 퇴적된 원암에서 변형된 것으로 추정되는 본 역의 편암류 등은 다양한 암상이 교호 : 경계부의 지질이상대

② 암석의 물리역학적 특성 : 편암류의 지질공학적 문제

- 퇴적 기원암의 변성암인 편암류의 풍화 및 광물학적 특성에 의한 지질이상대
- 모암인 퇴적암의 특성 및 다른 암석에 비해 풍화에 대한 내구성이 현저히 낮음, 일축압축강도 저하
- 변성작용시 압축-열화된 형태, 단층대 형성시 단층가우지 형성 등으로 엮리면, 단층면을 따라
- 충전되어 절리나 단층의 전단강도를 현격하게 저하시키는 요인(단층대 포함) 풍화 또는 암반굴착 등에 의한 응력이완 등으로 엮리면 또는 절리면 등이 미세한 거동을 한다면, 최대마찰각과 큰 차이를 보이는 잔류마찰각으로 인하여 암반 자체 지지력의 상당한 저하 초래

참고문헌

과학기술부(2000), “첨단기법을 이용한 터널 정보화 설계/시공 기술개발”, pp. 1 ~101
 Kaser P.K.(1980), "Effect of stress-history on the deformation behavior of underground openings", 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, pp.133~140
 M. L. Jeremic. "Ground Mechanics in Hard Rock mining", Balkema, pp.415~501
 Bieniawski, Z.T., "Determination of rock mass deformability; Experience from case histories", Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr., pp237-247
 Carmichael, R.S.(1989), "Practical Hand book of Physical Properties of Rocks and Minerals", pp.139-209