

재래식 터널 변상 조사 사례 및 안전성 평가에 관한 연구

A study on the evaluation of tunnel safety through a series of field inspection for ASSM tunnel

박시현^{*1}, 맹두영², 이유석³, 김영호⁴

Park, Si-hyun · Maeng, Doo-young · Lee, Yu-seok · Kim, Young-ho

Abstract

This study has carried out a series of field investigation for a ASSM railway tunnel which was constructed several decades ago. It appears that the tunnel lining was cracked in the region of arching structure. Precise inspection is carried out for this region with various non-destructive testing equipments. Based on the inspection results, the cause and the effect of tunnel defects were discussed by conducting the evaluation of tunnel safety with numerical analysis.

Keywords: ASSM tunnel, field inspection, numerical analysis, evaluation of tunnel safety

요 지

본 연구는 국내 재래식 철도 터널에서 발생한 아치부 종방향 균열 부위에 대하여 각종 현장조사를 실시하여 터널의 변상상태를 파악한 것이다. 현장 외관조사 및 각종 비파괴 조사를 통하여 균열 부위에 대한 상세한 조사를 실시하였으며 현장조사 결과를 토대로 균열의 발생 원인을 추정하였다. 아울러 현장여건을 고려한 안전성 해석을 실시하여 터널 구조물의 균열 발생 가능성을 검토하였다.

주요어: 재래식 터널, 현장조사, 수치해석, 안전성평가

1. 서론

포틀랜드 시멘트의 제조기술이 발달하여 본격적으로 건축 구조물에 사용되기 시작한 1850년을 전후로 하여 벌써 150년을 경과하게 되었다. 시멘트는 단지물과 모래 또는 자갈로 섞기만 하면 원하는 형태의 콘크리트 구조물의 시공이 가능하기 때문에 토목기술 발

달에 커다란 혁명을 일으켰다. 콘크리트를 사용하게 되면서 다양한 형태 및 구조의 토목구조물이 전 세계적으로 활발하게 건축되었다. 그러나 시간을 경과에 따라 콘크리트 구조물은 영구적으로 그 상태를 유지할 수 없다는 인식과 더불어 다양한 손상 및 열화에 대한 문제가 점차적으로 대두되기 시작하였다. 국내에서도 콘크리트 구조물의 역사가 한 세기를 넘어서게 됨에 따라 토목구조물의

*1 정회원, 한국시설안전기술공단, 과장(parksh@kistec.or.kr)

2 정회원, 한국시설안전기술공단, 부장

3 한국시설안전기술공단, 직원

4 한국시설안전기술공단, 직원

장기적인 유지관리에 대한 관심이 높아져 가고 있는 실정이다.

토목구조물 중에서 터널은 지반과 밀접한 관계를 유지하고 있기 때문에 주변 지반환경에 따라 장기적인 유지관리의 관점이 달리 적용되어야 한다. 이러한 주변지반은 때로는 지보재로서 터널에 유리하게 작용하기도 하고 때로는 외부하중으로 작용하여 터널의 안정성에 불리하게 작용하기도 한다. 또한 지반의 비균질, 불연속적 특성과 투수성, 장시간에 걸친 변형특성(크리프 등) 등은 터널의 유지관리에 있어서 다양한 변형 특성을 유발하는 직, 간접적인 원인이 된다.

본 연구에서는 국내의 재래식 철도 터널에서 발생한 변상 부위에 대하여 다양한 현장 조사를 실시하여 터널의 변상 상태를 파악하고 아울러 변상의 원인 추정과 함께 조사된 터널 변상을 고려한 안정성 평가를 실시한 것이다.

2. 대상 터널의 특성

본 터널은 1942년에 준공되었으며 61년이 경과된 중앙선 철도터널로서 말굽형 단면으로 시공되었다. 현재 준공도면은 보존되어 있으나 설계 및 시공 당시의 상황을 파악할 수 있는 관련 자료는 보존되어 있지 않다. 터널의 총 연장은 2,730m이며 부분적으로 인버트가 설치

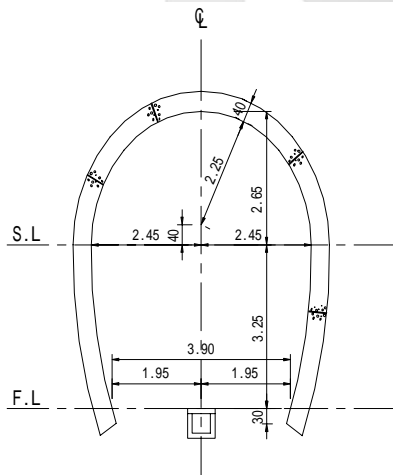


그림 1. 터널 횡단면도

되어 있다. 터널은 재래식 공법 (American Steel Support Method, ASSM)으로 시공되었고 콘크리트 라이닝의 설계 두께는 지반 조건에 따라 30~60cm로 조사되었다. 또한 콘크리트의 강도는 철도청 표준도의 배합비 (한국에너지연구소, 1987)를 참고할 때 배합비 (물:시멘트:골재)는 측벽부 1:3:6과 아치부 1:2.5:5로서 설계기준강도는 각각 100kgf/cm^2 과 120kgf/cm^2 로 추정된다.

외관상 드러난 터널의 변상은 터널 입구부에서 약 120m (233k050) 진입한 지점 주변에서 터널 아치부에 종방향의 균열이 수~수십 m 연장에 걸쳐 나타났으며 균열 폭, 연장 및 단차가 커 안정성에 취약한 것으로 추정되었다. 본 연구에서는 이러한 변상구간에 대하여 상세한 현장 조사 및 안정성 평가를 실시한 것이다. 그림 1은 변상이 발생한 지점에서의 터널 횡단면도를 나타낸 것이다.

3. 현장조사 결과

3.1 지형 및 지질 특성

본 터널^{3, 4)}은 국도 5 호선을 우측으로 끼고 북서부지역은 낙동강이 심하게 사행하여 흐르고 있으며 주변 지

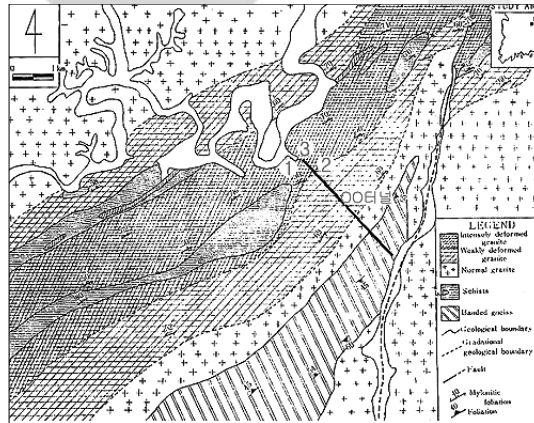


그림 2. 지질도 및 노두조사 위치

형은 지질의 영향을 받아 고지형은 표고가 약 500여 m에 달하고 급경사를 이루며 표고 약 200~300m 정도에서 취락지역 및 전답이 발달하고 있다. 수계는 북북동 방향으로 달리는 산계의 영향으로 북서부 방향으로 낙동강 및 우측 방향으로 유입되는 조립 수지상 수계를 보여 준다.

본 지역에 분포하는 주요 암석으로는 기반암을 이루고 있는 선캄브리아기 소백산 편마암 복합체 편마암류와 이와 부정합 관계를 이루는 시대 미상의 석영편암, 흑운모 편암 및 이들에 협재한 석회암으로 이루어진 변성 퇴적암류, 그리고 대부분을 점하는 이들을 관입한 주리기 화강암으로 구성된다. 본 지역의 중심부에는 넓은 폭(약 5km)의 연성 전단대가 발달하고 있는데 이 전단대에 발달하는 압쇄암 조직은 주변부에서 중심부로 갈수록 현저한 경향을 보여주며 압쇄조직의 발달정도에 따라 전단대를 약 변형대와 강 변형대로 구분할 수 있다. 한편 연성 전단대내에 발달하는 압쇄암 엮리는 전체 전단대를 통하여 거의 같은 방향성을 보여주는데 N20~80E, 55~90(NW, SE)의 방향에 가장 집중된다. 본 터널의 전반부는 이러한 연성전단대에 위치하고 있다(원종관, 1989).

터널 입구부에서 실시한 노두조사 위치를 지질도와 함께 나타낸 것이 그림 2에 나타내었다(윤지선, 1998).

3.2 외관조사결과

변상이 발견된 지점에 대하여 상세 외관조사를 실시하였다. 외관조사를 실시함에 있어서는 고성능 조명기, 천정부 접근용 비계 및 점검용 망치 등을 이용하여 근접 육안 조사를 실시하였다.

라이닝 표면에는 최대 약 2~10mm의 분진이 덮여 있으며 균열, 누수 및 재료분리가 부분적으로 발생한 것으로 조사되었다. 특히 본 연구의 대상 지점에서는 터널 아치부에 종방향 단차균열이 좌우 대칭적으로 뚜렷하게 발생한 것으로 조사되었다. 이러한 단차균열은 터널 시공시 종방향의 구분을 위해 설치한 횡방향 시공이음부 경계로 인해 끊어지기도 하고 때로는 연속성을 달리하는 양상을 보이기도 하였다. 단차는 5~15mm, 균열폭은 10~20mm에 이르는 것으로 조사되었으며 단차균열을 경계로 터널 하부구조체가 상부구조체보다 터널 내부로

튀어나온 듯한 형상을 취하고 있었다.

그림 3은 아치부 종방향 단차균열 발생 지점의 라이닝 상태를 나타낸 것이며 그림 4는 이 지점에서의 외관조사 망도를 나타낸 것이다.

3.3 비파괴 조사 결과

본 연구에서는 변상이 발생한 지점의 터널 라이닝에 대하여 각종 비파괴 시험^{6), 7)}을 실시하였다. 비파괴 시험으로는 반발경도 시험, 초음파 시험, GPR (Ground Penetration Radar) 탐사를 각각 실시하였다. 반발경도법은 슈미트해머를 이용하여 콘크리트 표면을 타격하여 이때의 반발도로서 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것이며 초음파 시험은 콘크리트 내부를 통과하는 초음파 속도를 이용하여 콘크리트의 품질을 개략적으로 추정하는 방법이다. 한편 이들 비파괴 조사 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 터널 벽면 2개소에서 채취한 콘크리트 코어의 일축압축강도를 활용하여 비파괴 추정강도를 보정하였다. GPR 탐사는 터널 라이닝의 측벽부 및 아치부에 대한 라이닝 두께 및 공동 규모를 파악하기 위하여 실시하였다(한국콘크리트학회, 1993).

표 1은 본 연구의 대상지점에 대한 각종 조사 결과를 요약한 것이며 그림 5는 Sta 233k057(그림 4 참조) 지점에 대한 GPR 탐사 결과를 각각 나타낸 것이다.

코어 채취 및 비파괴 시험에 의한 일축압축강도를 조사한 결과, 아치부 및 측벽부에 대하여 설계기준강도를 만



그림 3. 변상이 발견된 지점에서의 종방향 단차균열

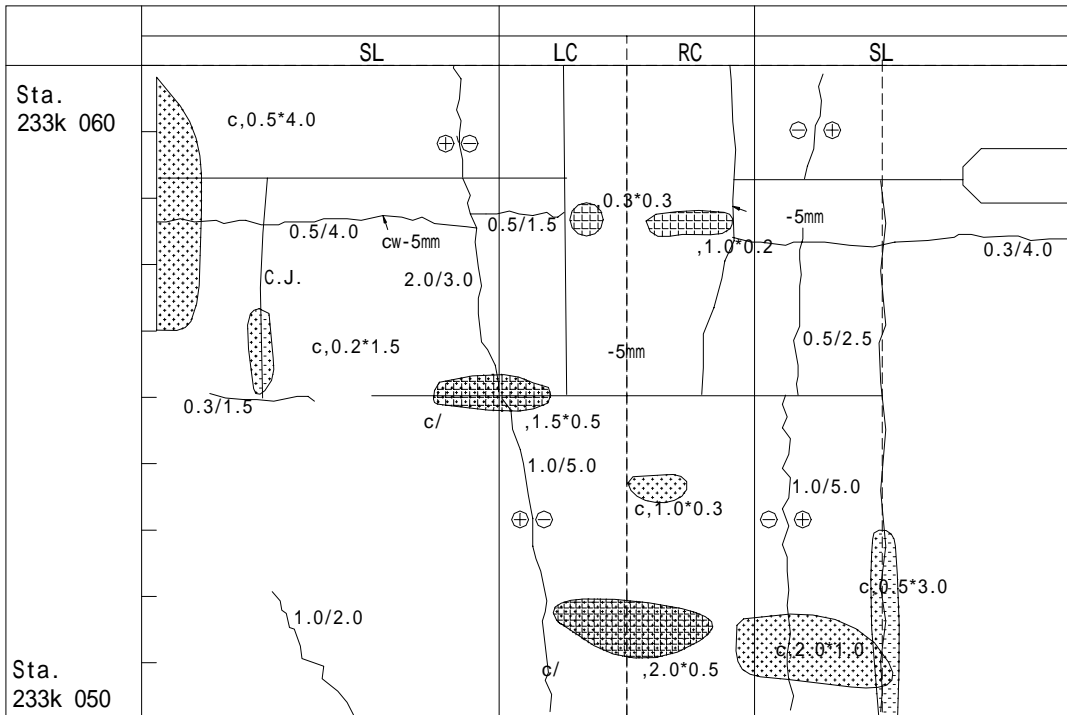


그림 4. 터널변상 발생지점의 외관조사망도

표 1. 변상 발생 지점에서의 현장조사 결과 요약

자 료 구 분	내 용	라이닝 현황	비 고	
설계 기준강도 (kgf/cm ²)	아치부	120		
	측벽부	100		
라이닝 설계 두께 (cm)	아치·측벽	40		
코 어 채 취 (평균 치)	압축강도	256kgf/cm ²	φ100×200mm	
	탄성계수	19,810MPa		
	단위중량	2331kg/m ³		
비 파 괴 강 도 (초음파 및 반발경도)	아치부	277~283kgf/cm ²		
	측벽부	267~303kgf/cm ²		
외관조사 결과	천단부	라이닝 두께 24cm	좌우·측 아치부에서 종방향 균열 및 단차 균열 발생	
	아치부	라이닝 두께 22~27cm 배면공동 80cm		
GPR탐사에 의한 라이닝 두께	종단탐사	천단부	22~27cm	
		아치부	25~42cm	
	횡단탐사	천단부	20~25cm	
		아치부	25~45cm	

족하는 상태인 것으로 나타났다. 또한 GPR 탐사 및 외관조사에 의한 라이닝 두께 조사를 실시한 결과 천단부 및 아치부에서 18~45cm로 조사되었으며 천단부의 두께가 아치부보다 더 얇은 것으로 나타났다. 한편, GPR 탐사 결과를 토대로 배면공동을 파악한 결과 조사 대상 지점에서는 천정부 및 아치부에 배면공동이 존재하는 것으로 나타났다. 배면공동이 발생한 지점에 대하여 드릴링 (지름 10mm)을 실시하여 배면공동 규모를 직접 파악한 결과 배면공동의 깊이는 24cm 이상으로 나타났으며

국부적으로 80cm에 이르는 곳도 조사되었다.

3.4 내시경 조사

일반적으로 재래식 공법의 터널은 굴착시 여굴이 발생하기 마련이며 이러한 여굴에 대한 처리 기술이 부족하여 충전이 제대로 실시되지 않은 콘크리트 라이닝을 시공함으로써 배면공동이 존재하게 된다.

금번 현장 조사 시 배면 공동의 유무와 라이닝의 두께

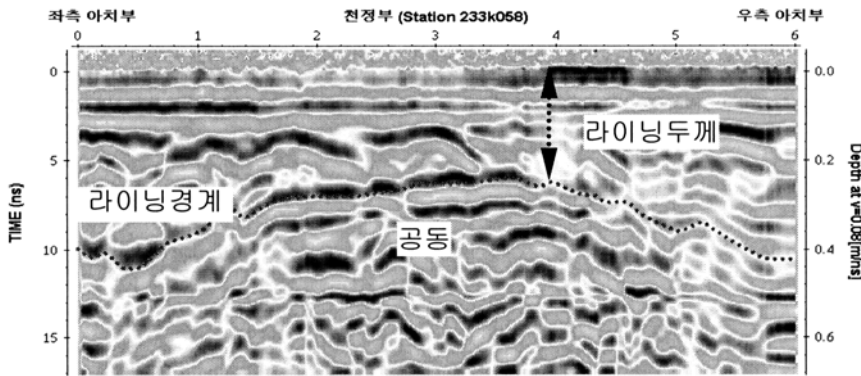


그림 5. Sta. 233k057 지점에서의 횡방향 GPR 탐사 결과

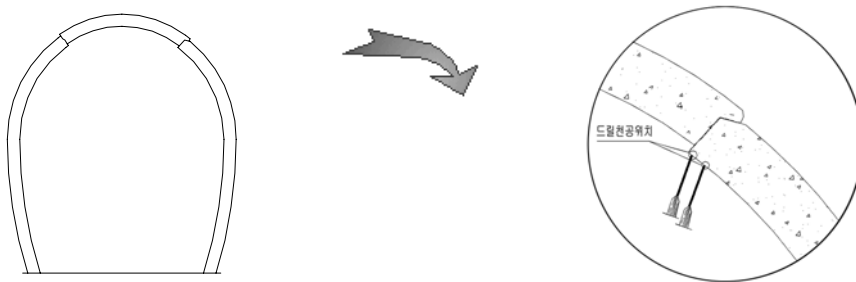


그림 6. 라이닝 균열 내시경탐사 및 균열모식도

를 조사하여 GPR 탐사 결과의 자료로 활용하는 한편 중 방향 단차균열의 상태 및 방향성을 파악하기 위하여 내시경 탐사 (Inspection Scope)를 실시하였다. 어깨부의 단차가 발생한 지점의 균열이 서로 엇물려 전단된 상태이고 동시에 그 방향성이 Rabcewicz (1965, 1969)의 전단면과 유사한 상태이면 시간의 경과와 더불어 증가한 터널 벽체의 축압에 기인한 구조적 균열일 가능성이 높아진다. 균열의 방향성으로 균열이 수평으로 발생하였으면 축압이 우세하여 발생한 균열일 수도 있고, 시공시 발생한 폴드조인트 일 수도 있으므로 내시경탐사를 통해 균열의 방향성을 조사하였다.

그림 6은 Sta. 233k057의 우측 어깨부 균열에 대한 내시경 탐사결과로서 균열 아래 두개의 구멍 (지름 10mm)을 천공하여 균열 상태를 조사하였다. 천공된 구멍으로 균열 상태를 명확히 확인할 수 있었으며 라이닝의 두께는 22~25cm, 공동의 깊이는 60~80cm 정도였다. 균열은 서로 엇물린 채로 전단된 형상을 취하고 있지는 않으며 수 mm의 간격으로 이격되어 있으며 균열면을 볼 때 오래전에 발생된 것으로 추정되었다. 또한 천공 위치를 서로 달리하여 균열의 방향성을 조사한 결과 균열의 방향은 라이닝 곡면에 대체로 직각을 이루는 것으로 조사되었다. 한편, 균열이 발생한 어깨부 지점에는 배면공동이 위치하고 있으며 지반과의 접촉지점이 어깨부의 아래에 위치하는 것으로 나타났다.

3.5 균열의 원인 추정

콘크리트 라이닝에 발생한 균열의 원인을 추정하기 위

해서는 해당 터널의 시공당시의 설계 및 시공 수준에 대한 이해와 더불어 이들 방법에 대한 명확한 자료가 필요하다. 이러한 자료를 토대로 현장의 변상 상태에서부터 그 원인이 될 만한 내용을 반대방향으로 추론해 나가는 것이 일반적인 원인 추정의 방법이다. 본 연구에서 해당 터널의 변상에 대한 현장 조사는 여러 가지 방법으로 수행하였으나 설계 및 시공에 관련된 자료가 보관되어 있지 않아 변상의 원인을 추정하는데 많은 어려움이 있었다. 이에 본 연구에서는 해당 터널의 현장 조사 결과를 면밀히 살펴보는 한편 준공년도가 일제 시대인 것에 착안하여 일본의 터널 시공 기술의 발달을 검토하여 당시의 시공 기술 및 방법을 종합적으로 고려하여 균열의 원인 추정을 실시하였다.

일본의 터널시공은 2차 세계 대전이 끝나는 시점을 전

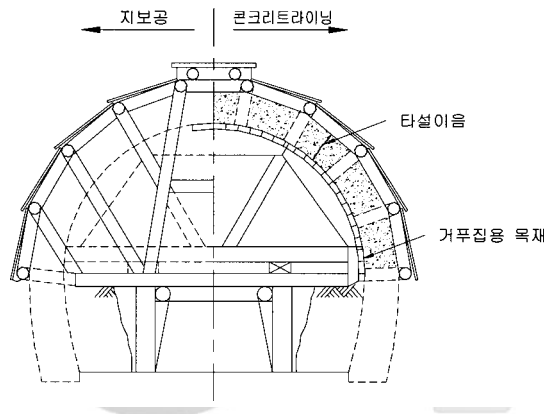
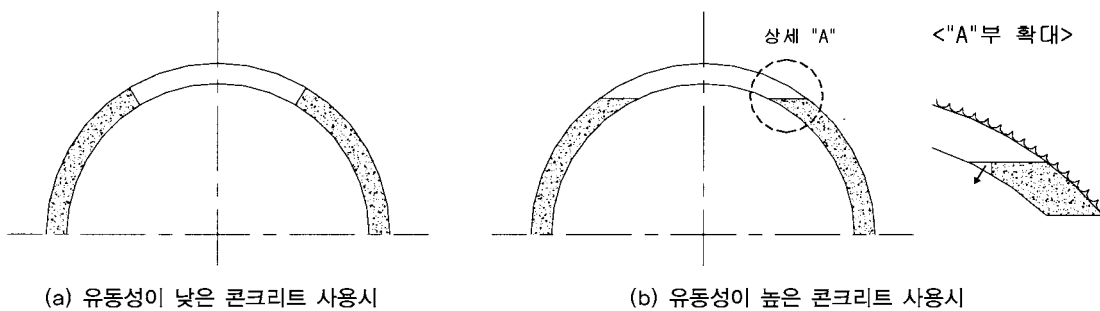


그림 7. 목재 지보공을 이용한 터널 라이닝 타설



(a) 유동성이 낮은 콘크리트 사용시

(b) 유동성이 높은 콘크리트 사용시

그림 8. 라이닝 콘크리트의 타설이음부

후로 하여 목재 지보공 (그림 7 참조) 시대에서 강제 지보공 시대로 변천하게 된다. 목재 지보공 시대에는 목재를 이용하여 굴착면의 지반이완을 억제하기 위한 지주식 지보 개념을 도입하였으며 또한 이 때의 타설시 콘크리트는 슬럼프치가 0에 가까워 유동성이 거의 없는 상태에서 사용되었다. 이러한 유동성이 낮은 생콘크리트를 사용하는 경우에는 타설이음부를 두지 않고 천단까지 일체형 시공을 원칙으로 하였으나 타설이음부를 두는 경우에는 이음면이 아치단면의 중심부로 향하도록 하여 마치 부체살과 같은 형상 (그림 8 참조)이 되도록 유지하였다. 이러한 시공 개념은 콘크리트의 펌프가 대중화되고 생콘크리트의 운송을 원활히 하기 위해 유동성이 높은 콘크리트를 타설하기까지 지속되었다.

터널 라이닝의 시공기술 변천을 고려하면 본 대상 터널의 아치부 단차균열 발생부위는 시공상 콘크리트 타설이음의 시간적 차이로 인해 발생한 타설이음부 (Cold Joint)인 것으로 추정된다. 현장 조사 결과를 살펴보면 아치부에 발생한 단차 균열은 터널 종방향으로 수 m~수십 m에 이르는 연장성을 가지는 것으로 나타났으며 비슷한 시기에 건설된 중앙선 철도터널 수 곳에서도 발견되었다. 이러한 콜드조인트 부위는 일체형 구조체 단면에 비해 구조적 내력이 약하기 때문에 터널굴착 후 장기간에 걸친 주변 지반의 안정화에 의한 지반거동의 영향을 받아 변형이 누적된 것으로 판단된다.

4. 안전성 평가

본 연구에서는 라이닝 어깨부 균열 발생 가능성을 라이닝 부재의 구조적 안정성 측면에서 평가하기 위하여 현장조사 결과를 토대로 터널해석을 실시하였다. 안전성 평가를 실시함에 있어서는 현재 국내외에서 터널의 안전성 평가에 폭넓게 활용되고 있는 FLAC 프로그램을 이용하였으며 지반의 변상으로는 배면공동을 고려한 해석을 수행하였다.

4.1 터널해석 개요

터널의 안전성 평가를 위해 실시한 수치 해석에 사용된

해석단면은 Sta. 233k057 지점으로 터널상부 토피고는 약 40~45m이며 터널중심축에서 좌측으로 70m 지점에 계곡이 연하고 있다. 본 연구에서 선정된 지형의 횡단면도는 그림 9와 같다.

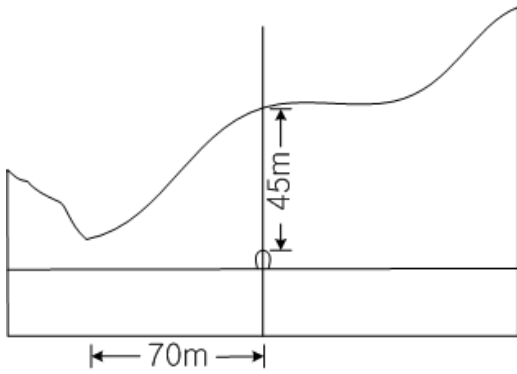
해석에 필요한 지반 물성치는 실내 및 현장실험에 의한 자료를 확보하지 못하였기 때문에 해석 단면이 위치한 터널 입구부 주변의 3지점에서 실시한 노두 조사 결과를 토대로 개략 산정하였다. 본 연구에서의 터널 해석은 라이닝 균열이 발생한 지점에 대하여 배면공동의 존재 여부로 인해 라이닝 단면력의 변화를 검토하는 것을 그 주된 목적으로 하고 있으며 해석 결과를 그대로 구조물의 안전성 평가와 직결시킬 수는 없음을 지적해 둔다.

터널 입구부에서 실시한 지표노두 조사 (그림 2 참조)로 추정된 RMR값은 표2와 같다.

터널 해석단면에 비교적 근접한 3개소에서의 암반은 모두 III등급의 “보통”으로 판정되었으며 이를 토대로 Bieniawski, Serafim과 Pereira, Trueman의 추정식을 이용하여 암반 물성치를 평가하면 표 3과 같다. 한편 축압계수에 대해서는 정확한 값을 산정하지 못하였으며 일반적으로 국내 암반의 실측 범위인 0.48~ 4.0를 참고로 하여 1.0을 적용하였다. 해석 단면에 대한 안정성 평가를 실시함에 있어서는 현장 조사시 발견된 변상중에서 아치부 배면공동을 고려하였으며 아치 천정부 60도에 걸쳐 천단부 공동의 최대 깊이 60cm를 설정하였다.

4.2 해석 결과

안정성 검토를 실시함에 있어서는 허용응력 설계법을 이용하였으며 터널 해석결과에 대해 천단부, 아치부 및 측벽부 발생 응력을 표 4에 정리하였다. 배면공동이 존재하지 않는 경우에 있어서는 라이닝 발생 응력이 모두 설계 기준강도보다 낮은 것으로 나타나 안전성을 확보하고 있는 것으로 평가되었으나, 배면공동을 고려한 경우에는 주로 천단부와 아치부에 허용응력을 상회하는 것으로 나타났으며 특히 아치부에서는 배면공동에 의한 지반과 콘크리트 라이닝 접촉부에서 전단응력이 크게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 이러한 배면공동의 존재에 의해 라이닝 내부의 콜드조인트와 같은 내하력 취약면이 쉽게 영향 받을 수 있는 것으로 판단된다.



가. 지형 횡단면도

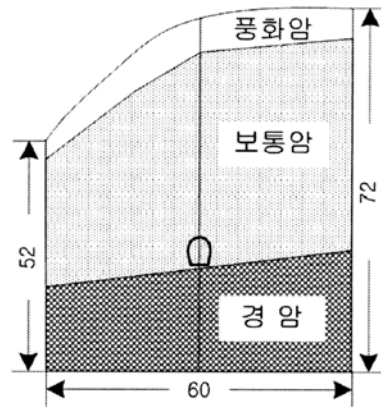


그림 9. 터널해석 지점에서의 횡단면도 (Sta. 233k057)

표 2. RMR 분류 결과

구 분	위치	일축강도	RQD	불연속면 간격	불연속면 상태	지하수	보정	총 점	등 급
아랫 도둑골	①	15	13	11	7	10	-5	51	III
산태골	②	15	17	15	7	10	-5	59	III
터널입구 절취사면	③	12	10	15	7	7	0	51	III

표 3. 구조해석시 사용된 암반 물성치

위 치	단위중량	변형계수	점착력	내부마찰각	포아송비	축압계수
	(t/m ³)			t/m ²		
풍화암	2.30	200,000	26.0	33	0.30	1.0
보통암	2.68	900,000	90.0	40	0.25	1.0
경 암	2.68	1,700,000	170.0	45	0.20	1.0

5. 결론

본 연구에서는 재래식 공법에 의해 구축된 국내 철도터널의 변상에 대하여 상세한 현장 조사를 실시하여 터널 구조물의 안정성을 평가하였다. 현장조사를 실시함에 있어서는 외관조사 및 콘크리트 라이닝 시공 상태를 파악하기 위한 각종 비파괴 조사를 실시하였다. 라이닝의 안정성 평가는 현장 조사시 확인된 배면공동을 고려하여 배면공동 발생에 의한 라이닝 응력 변화를 살펴보았다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 대상 터널의 콘크리트 라이닝 시공 상태는 전반적으로 당시의 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다.
2. 아치부에 발생한 종방향 단차 균열은 주변 지반의 변형 등에 의해 발생한 전단 균열은 아니며 터널 시공 당시의 콘크리트 타설 이음부인 것으로 판단된다.
3. 콘크리트 타설 이음부는 일체형 구조물에 비해 내하력이 취약하게 되고 터널 굴착이후 지반의 장기 안정화에 의한 지반 거동의 영향으로 라이닝 변형이 누적

표 4. 배면공동 규모에 따른 해석결과

해석 구분	위치	휨모멘트 (tonf-m)	압축력 (tonf)	전단력 (tonf)	휨응력		전단응력 (kgf/cm ²)
					압축+휨 (kgf/cm ²)	압축-휨 (kgf/cm ²)	
배면공동 미 고려	천단부	0,26	105,24	0,06	36,8	33,3	0,02
	아치부	0,34	107,17	0,71	38,0	33,5	0,24
	측벽부	-0,51	61,56	0,50	13,5	17,3	0,13
배면공동 고려	천단부	8,46	50,63	-1,24	73,2	-39,5	-0,41
	아치부	-9,92	43,55	-25,84	-51,6	80,7	-8,61
	측벽부	-0,23	52,26	-0,34	12,2	13,9	-0,09
설계기준강도	아치천정부	fck = 120 kgf/cm ²					
	측벽부	fck = 100 kgf/cm ²					
허용휨압축응력	아치천정부	0,4 × fck = 48,0 kgf/cm ²					
	측벽부	0,4 × fck = 40,0 kgf/cm ²					
허용휨인장응력	아치천정부	0,42 × √f _{ck} = 4,60 kgf/cm ²					
	측벽부	0,42 × √f _{ck} = 4,20 kgf/cm ²					
허용 전단응력	아치천정부	0,25 × √f _{ck} = 2,74 kgf/cm ²					
	측벽부	0,25 × √f _{ck} = 2,50 kgf/cm ²					

※ 휨멘트의 (-) 부호 : 부모멘트 응력의 (-) 부호 : 인장응력

되어 단차 균열 형상을 띄게 된 것으로 판단된다.
 4. 라이닝 배면의 공동을 고려한 터널 해석 결과 배면공동의 존재로 인해 배면공동과 지반과의 경계부에 위치한 라이닝 단면력이 커지는 것을 확인하였으며 이러한 영향은 곧 내하력 취약부인 타설 이음부에 영향을 미치게 되어 타설 이음부의 변형을 더욱 촉진시킨 것으로 평가된다.

참고문헌

1. 건설부 (1987), 시설물 유지관리지침.
2. 신회순 (1999), 우리나라 지반특성, 대한터널협회지 창간호, pp. 51-58.
3. 원종관 외 (1989), 지질학 원론, 우성문화사.
4. 윤지선 (1998), 토목지질공학, 구미서관.
5. 철도청 (2000), 국유철도건설규칙.
6. 한국에너지 연구소 (1987), 콘크리트 비파괴검사 기술개발.

7. 한국콘크리트학회 (1993), 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 및 안전진단.
8. 한국콘크리트학회 (1995), 콘크리트 구조물의 진단·보강 및 유지관리.
9. Bieniawski, Z. T. (1973), Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Transactions, South African Institution of Civil Engineers, Vol. 15, No. 12, pp. 335-344.
10. Bieniawski, Z. T. (1978), Determining rock mass deformability ; experience from case histories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.15, pp. 237-248.
11. Itasca Consulting Group (1991), Flac-2D Manual, Inc., Minesota, U.S.A.
12. Rabcewicz L.V. (1969), Stability of tunnels under rock load, Water Power, June/July/August.
13. Rabcewicz L.V. (1965), The New Austrian Tunnelling Method, Water Power, Jan.
14. Serafim J.L. and Pereira J.P. (1983), Considerations of the geomechanical classification of Bieniawski, In Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Con-

struction, Lisbon, 1, II, 33-42.
 15. Trueman R. (1988), An Evaluation of Strata support techniques in dual life gateroad, Ph.D, Thesis, Univ. of Wales.

16. 日本道路公団 (1998), 設計要領 第3集 トンネル本体工 施工編.
 17. (財)土木學會 (1996), トンネル標準示方書 山岳工法編 同解説.



박시현
 한국시설안전기술공단 과장
 parksh@kistec.or.kr



맹두영
 한국시설안전기술공단 부장
 mdy3226@kistec.or.kr



이유석
 한국시설안전기술공단 직원
 yslee@kistec.or.kr



김영호
 한국시설안전기술공단, 직원
 kyh@kistec.or.kr