터널과 지하공간, 한국암반공학회지

터널굴착시 지질이상대 통과방안 설계사례 연구 유정훈¹⁾*, 김양균²⁾, 정철화³⁾

A Case Study on the Design of Tunnel Excavation in Geological Anomalies

Joung-Hoon Yoo, Yang-Kyun Kim, Chul-Hwa Chung

Abstract As a result of the detailed site investigation performed for the design of a 4.3 km long tunnel, geological anomalies of four fault zones and a rock boundary were discovered on the tunnel route. Most of all, it was confirmed that pyrite, which may corrode steel material, is contained inside the geological anomalies, and pressured ground water flows out of the fault fractured zone. To overcome these geological conditions, antisulfur concrete for the concrete lining and anticorrosive swelling rock bolts are designed in the pyrite-containing sections. For the sections where a great amount of groundwater outflows, water blocking methods including grouting are applied according to the result of numerical analyses on the seepage. In addition, since the past earthquakes occurred around Korea have take place mainly near fault zones, seismic analyses were performed based on the Soil-Structure Interaction (SSI) concept and the strength of concrete tunnel lining is designed to be 27 MPa from 24 MPa in order to reinforce the tunnel structure.

Key words Fault zone, Pyrite, Pressured groundwater, Reinforcement solution, Seismic analysis

초 록 터널설계를 위해 상세지반조사를 실시한 결과 터널 주요통과구간에 지질이상대로서 암종경계부 및 단층대 구간이 예측되었다. 특히 지질이상대에서 황철석이 분포하는 것을 확인하였으며 대심도 구간 시추조사 과정에서 단층파쇄대(F3)에서 피압에 의한 지하수 용출현상이 나타났다. 이에 따라 지질이상대 구간에서의 보강 대책을 수립하기 위해 황철석 함유구간에 대한 시설물 보강대책을 검토하였으며, 피압수 다량 구간에서는 침투 류 해석 및 차수대책 등 별도의 지보패턴을 계획하였다. 또한 한반도 인근 대지진이 주로 단층대에서 발생하고 있기 때문에 단층대 통과구간에 대해 지반-구조물 상호작호(SSI) 내진해석과 구조물 보강대책을 수립하였다.

핵심어 단층대, 황철석, 피압, 보강대책, 내진해석

1. 서 론

터널굴착시 지질이상대를 터널로 통과하는 경우 구조 물의 역학적 안정성 확보를 위해 설계단계에서 충분한 조사를 통해 보강대책을 수립하는 것이 필요하다.

본 연구대상 터널은 연장이 4,297 m의 장대터널로서 암 종경계부 및 단층파쇄대 등을 통과하는 것으로 조사되었 다. 특히 지질이상대 구간에 절리를 따라 황철석 광맥이

1) 코오롱건설 기반시설연구소 과장 2) 코오롱건설 기반시설연구소 소장 3) 코오롱건설 토목설계팀 차장 * 교신저자 : jhy9570@kolon.com 접수일 : 2011년 9월 26일 심사 완료일 : 2011년 10월 25일 게재 확정일 : 2011년 10월 27일

충전되어 있는 것으로 나타난 구간 통과시 산성암반배수 가 발생할 것으로 예상되었고, 대심도 구간 단층파쇄대에 서 다량의 피압수 발생도 확인되어, 터널시공시 침투류 유 입에 따른 터널 안정성 확보가 필요할 것으로 판단되었다. 또한 가까운 일본에서 최근 리히터 규모 9.0의 대지 진이 발생하였는데, 한반도 인근 대지진은 주로 단층대 에서 발생하고 점차 증가추세에 있다는 점을(전형식 외, 1996) 고려할 때 이에 대한 대책이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 터널굴착시 지질이상대 통과에 따른 안정성을 분석하고 내진성능 확보를 위한 구조물 보강대책을 제안하였다.

2. 터널계획

본 연구대상 터널은 고속도로 건설사업 중 일부구간





으로 경상남도 김해시 상동면에서 대동면에 이르는 고 속도로로서, 총연장은 4,560 m이며 이중 터널이 1개소 4.297 m로 대부분을 차지한다.

도로터널은 폭 12 m의 2차선 병렬터널로서 안전과 방재 및 친환경 고속도로 건설을 최우선적으로 설계되 었다.

터널내부에는 장대터널에서 발생할 수 있는 안전사고 예방을 위해 대형차 피난연결통로 2개소, 차량용 피난 연결통로 5개소 및 대인용 피난연결통로 14개가 설치 되었고, 터널 시공성을 고려한 굴착계획 및 구조물 안 정성 증대를 위한 다양한 방안들이 포함되었다. 터널의 주요 제원은 표 1과 같다.

3. 지반조사

3.1 지형 및 지질특성

본 구간은 백악기 경상분지 동남부의 주로 유천층군 들이 분포하는 유천소분지의 동남단에 위치하는 지역 으로 과업노선 주변은 대부분 산악지형으로 장년기에 해당하며, 200~600 m 정도의 산세를 형성하고 있다.

무척산(703 m)과 신어산(630 m)이 주요산계를 이루 고 신검산, 까치산과 무명의 소봉들이 있으며, 동쪽에는 양산단층에 의해 산계가 분절된 특징을 보이고 있다. 전반적으로 서쪽과 북쪽은 고지를 이루고 동쪽과 남쪽 에서는 낮은 산세형성을 이루는데 노선은 고지대에 위 치하고 있다. 대상구간 광역지질특성 현황은 그림 1과 같다.

지질특성을 살펴보면 시점부는 중생대 백악기의 경상 계 불국사통 마산암이 나타나며, 종점부는 중생대 백악 기의 경상계 신라통 녹색각력암 및 안산암이 나타난다.



그림 1. 광역지질특성 현황

주변지역은 중생대 백악기의 규장 반암과 각섬석화강 암, 주산안산암질암이 분포하며, 이를 부정합으로 덮고 있는 신생대 제 4기 모래자갈층이 붕적층으로 분포한 다. 과업지역에 분포하는 백악기 마산암과 녹색안산암 은 각기 화강암과 안산암으로 대표되어 나타난다.

3.2 지반조사 결과

지질구조, 단층대, 암종경계 등 설계영향요소를 파악 할 목적으로 시추 및 물리탐사를 수행하였으며 지반특성 을 파악하기 위해 현장시험 및 실내시험을 실시하였다. 특히 터널구간 대심도 구간에서의 지반조사시 시추조 사는 대상구간이 개발제한구역으로 수목밀집지역의 산 림훼손 최소화를 위해 시추장비를 헬리콥터로 운송하 여 시추조사를 수행하였다.

물리탐사는 가탐심도별 탐사방법을 검토하여 고출력 전기비저항과 전자탐사를 병행하여 정밀탐사를 실시하 였다.

물리탐사 종합분석 결과 STA.3+100 지점과 STA.3+ 800 주변에 전기비저항 이상대가 밀집하고 있는 것을 확인하였으며, 분석결과는 시추조사 자료와 상관분석을 통해 암반등급 산정에 활용하였다. 터널구간 물리탐사 종합분석 결과는 그림 2와 같다.

터널구간 암종분포 및 특징은, 터널노선을 따라 시점 부는 화강암, 종점부는 안산암질 응회암 및 안산암이 암종경계를 이루고, 경계부는 일체화되어 있으나 주변 부에 파쇄가 발달한 것으로 조사되었다. 전반적으로 지 질이상대를 제외한 암반등급은 우수한 것으로 평가되 었다.

지층분포 특성을 살펴보면 크게 세 구간, 즉, 시종점 갱구부 붕적층 발달구간, 산성암반배수 예상구간, 단층 대 통과구간으로 분류할 수 있다. 터널구간 지층분포 특성은 그림 3과 같다.



그림 4. 지질이상대 황철석 분포(시추코아)

암반에 포함된 황철석(Pyrite)은 터널굴착중 대기노출

시 지하수를 산성으로 변화시킬 가능성이 있는데(함주

의, 1996), 본 터널구간중 지질이상대인 암맥관입부, 단

현상을 확인하였는데, F3 단층은 상부까지 연장되지 못 하고 지하 심부에서 단절되어 있어 지하수의 주요 이동 통로가 될 것으로 예상되었다. NTB-12 시추조사를 통

층(F1) 통과부, 암종경계부 등에서 절리를 따라 황철석 해 확인한 단층은 그림 5와 같다. 광맥이 충전되어 있는 것을 시추코어를 통해 확인(그림 NTB-12 시추조사 구간에 발달하는 F2와 F3 단층은 4)하고 산성암반배수(AMD, Acid Mine Drainage) 예 또한 단층대는 터널노선을 따라 크게 4개소가 발견되

었으며 파쇄대가 발달한 것으로 조사되었다. 특히 대심 도 구간 NTB-12번 시추조사 과정중 신선한 암반구간 하부에서 단층파쇄대(F3) 및 피압에 의한 지하수 용출

상구간으로 설정하였다.

인장응력에 의해 형성된 정이동성 단층으로 판단되며, 이중 F2 단층이 주단층으로 먼저 생성되고 F3 단층은 F2 단층의 하부에서 분기되어 형성된 분기단층으로 판 단된다. 그림 6은 인장응력하에서 형성될 수 있는 Clay model의 한 단면으로 이를 Cloos(1968)는 Tilted fault blocks의 한 계열로 설명하였으며(George and Stephen, 1996), 단면 우측에 형성된 두 개의 정이동단층이 본 조 사구간의 F2 및 F3와 상당히 유사한 것으로 판단된다.

4. 지질이상대 통과방안 검토

4.1 지질이상대 보강대책

상세지반조사 결과 터널의 주요 통과구간에 지질이상 대로서 암종경계부 및 단층대구간이 예측되었으며, 해



그림 6. 분기단층(Tilted Fault) 형성



그림 7. 황철석 분포 예상구간

당구간에서의 터널 보강대책을 수립하기 위해 별도의 지보패턴 계획을 수립하였다.

우선 그림 7과 같이 지질이상대에 협재되어 있는 황 철석 함유구간 터널통과시 예상되는 산성암반배수는 지하수 오염, 콘크리트의 산화와 터널 지보재의 부식을 초래하여 터널의 구조적 안정성에 심각한 영향을 주므 로 이에 대한 대책수립이 필요하다.

산성암반배수에 의한 콘크리트 열화를 방지하기 위한 구조물 보강대책으로 콘크리트 라이닝 재료를 내황산 콘크리트를 사용하였으며 라이닝 강도를 24 MPa에서 27 MPa로 상향 적용하여 구조적 건전성을 확보하였다. 추가적으로 내부식성 코팅도금을 한 팽창성 강관 록볼 트를 적용하여 부식을 방지하고, 산성암반배수 유출구 간에 대한 조기 지보효과를 발휘할 수 있도록 하였다 (그림 8).

한편 대심도구간 단층대 특성분석에서 예측된 분기단 층(F3)에서 단층파쇄대에 따라 유로 형성시 피압수 발



그림 8. 황철석 통과구간 보강대책



그림 9. 침투류 해석

생이 예상되어 파쇄대 및 피압구간에 대한 별도의 지 보패턴 계획이 필요하였다.

우선 단층파쇄대 피압수 예상구간에 대한 대책을 수 립하기 위해서 침투류 해석을 통해 용수량을 산정하여 적정 차수대책을 검토하였다. 사용한 해석프로그램은 2 차원 침투류 해석 프로그램인 SEEP/W을 사용하였으 며, 단층파쇄대 투수계수는 풍화암 투수계수 값에 해당 하는 7.60×10⁻⁵ cm/sec을 적용하였으며, 차수그라우팅 투수계수는 2.89×10⁻⁶ cm/sec을 적용하였다. 그라우팅 보강 두께는 1.0 m를 적용하였으며, 적용 구간은 상행 선 120 m, 하행선 108 m이다. 그림 9는 피압수 다량 유출구간 침투류 해석을 나타낸다.

해석결과 표 2에 나타난 바와 같이, 피압구간 무처리 시 총 유출수량은 2.227 m³/min으로 분석되었으나, 차 수그라우팅공법 적용시 총 유출량은 0.923 m³/min로 분석되어 보강시 파쇄대 유출량이 약 59% 감소되는 것 으로 나타났다. 결과적으로 터널상부에는 강관다단 그 라우팅, 터널하부에는 차수그라우팅으로 보강하여 피압 수에 대한 대책을 수립하였다(그림 10).

4.2 단층대 구간 구조물 내진 검토

4.2.1 해석개요

단층대 통과시 구조물의 내진성능 강화를 위해 지반-





표 2. 해석결과 요약

구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI) 해	석
을 실시하여 구조물 안정성 검토를 수행하고 보강계	획
을 수립하였다.	

터널과 같은 지중구조물은 지반운동에 순응하여 구조 물이 진동하므로 큰 증폭현상이 나타나지 않는다(박인 준, 2009). 이것은 주변지반으로 인해 지중구조물은 큰 발산감쇠를 가지므로 주변지반에 대한 상대적인 거동 도 빨리 감소하기 때문인데, 이에 따라 지중구조물에 는 내진해석을 수행하지 않는 것이 일반적이다. 하지만 터널의 내진해석(한국도로공사, 2009)에 따르면 대규모 단층대 및 파쇄대 통과구간에 대해서는 내진설계를 실 시하도록 명기되어 있는데, 단층대 또는 지반조건이 다 른 두 지반을 통과하는 터널의 경우 라이닝의 응력은 지반물성에 따라 크게 차이가 날 수 있으므로 지반조건 을 고려한 내진설계를 수행하여야 한다.

한편, 가까운 일본에서 최근 리히터 규모 9.0로 기록 된 대지진이 발생하였고, 한반도 인근 대지진 발생이력 검토 결과 지진활동이 점차적으로 강해지고 있을 뿐만 아니라 그 발생빈도도 증가추세에 있으며 주로 판경계 및 판내부 단층대에서 발생하는 것으로 나타났다(전형 식 외, 1996). 다음 그림 11은 국내 주요 지진발생이력 을 나타냈다.

따라서 본 연구대상 터널구간 주변에도 양산단층, 모 량단층 등 다수의 단층대가 분포하므로 단층대 통과시 구조물에 대한 내진성능을 강화하기 위해, 국내에서 발 생 가능한 최대지진규모를 6.5과 7.0으로 설정하여 내



그림 11. 국내 주요 지진발생이력

구분		무처리시	합계 차수그라우팅 적용		합 계	비고	
보강구간 유출량 (m ³ /min)	상행선	1.175	2.227	0.486	0.022	■보강영역	
	하행선	1.052		0.437	0.923	→ 장행신 120 m → 하행선 108 m	

진설계를 실시하였다.

4.2.2 해석모델 및 물성 입력

본 터널노선에서는 암종경계와 단층대(F2)를 통과하 는 구간(STA. 2+820~3+040)에 대하여 3차원 지반-구 조물 상호작용(SSI)을 고려한 내진해석을 수행하였다. 해석모델은 실제 지반지형을 구조물과 함께 모델링하 였으며, 하중재하방법은 3방향(X,Y,Z)에 대한 지진가



그림 12. 해석구간 모델링도

표 3. 지반등급별 동적 설계지반정수 탄성파속도(m/sec) 동체적계수 동전단계수 동탄성계수 동포아송비 구분 G_d(MPa) E_d(MPa) K_d(MPa) Vp V_s Vd 풍화암 1,400 680 990 2.670 2.970 0.35 I 4,650 2,700 20,060 50,150 33,430 0.25 3,900 화강암 Π 2,200 12,830 32,590 23,620 0.27 III 3,050 1,650 6.940 17,910 14.210 0.29 지 29,600 0.25 반 I 4,400 2,540 17,760 44,400 등 Π 3,700 2,100 11,690 29,690 21,510 0.27 급 안산암 III 2,800 1,540 6,040 15,580 12,370 0.29 IV 1,800 950 2,160 5,700 5,280 0.32 V 1,400 690 1,070 2.890 3,210 0.35

식으로 하였다. 또한 지반을 탄성체로 모델링하였으며, 경계조건은 탄성파의 간섭을 최소화하기 위하여 무한 요소를 적용하여 지반의 반무한성과 지진파의 소산영 향을 고려하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 그림 12는 해석구간의 모델링도를 표시하고 있다.

속도를 시간에 따라 구조물의 하부지반에 입력하는 방

해석대상 지반은 상부의 풍화암층 및 암종별로 암반 등급에 따라 구성되어 있으며, S-PS검층, 하향식탄성파 탐사 등의 현장시험을 통해 내진설계를 위한 동적 물성 치를 산정하였다. 해석에 사용한 지반등급별 동적 설계 지반정수는 표 3과 같다.

지반운동의 특징을 반영하기 위한 설계지반운동은 기 준선 보정, 인공지진파 및 장·단주기파를 고려하여 선 정하였다.

입력지진파는 실지진기록인 Hachinohe(단주기파), Ofunato (장주기파) 지진파와 인공지진파(0.154 g)를 국내 내진 1등급(리히터 규모 6.5)에 해당하는 설계응답스펙트럼 에 만족하도록 수정하였다. 아울러 보다 보수적인 내진 안전성 검토를 위해 미국 서부 기준인 리히터 규모 7.0 에 해당하는 인공지진파(0.211 g)도 생성하여 입력지진

표 4. 인공지진파 생성



파로 사용하였다. 시간이력해석시 3축 방향(수평 2축, 수직 1축) 동시 재하로 지진하중조합을 고려하였고, 수 직방향 입력지진은 수평성분의 2/3를 적용하였다. 표 4 는 생성된 인공지진파를 나타낸다.

4.2.3 해석결과

내진과 관련된 허용변위 및 허용응력은 표 5와 같은 검토기준을 적용하여 콘크리트 라이닝에 대한 내진 안 정성 평가를 실시한 결과, 표 7과 같이 나타났다.

우선 콘크리트 강도 24 MPa에 대하여 내진해석을 수 행한 결과, 리히터 규모 6.5 적용시는 구조물의 안전에 문제가 없었으나, 규모 7.0에 대하여 라이닝 휨압축 혀 용응력 12.77 MPa를 넘어가는 12.92 MPa이 발생하여 허용기준 초과로 구조적 안전성을 확보하지 못하는 것 으로 나타났다. 따라서 라이닝 강도를 24 MPa에서 27 MPa로 상향하여 내진해석을 수행한 결과 지진하중에 대하여 발생응력 및 변위가 허용기준 이하로 나타났다 (표 6).

따라서 내진에 대한 보강대책으로 단층대 일부구간에

대하여 콘크리트 라이닝 강도를 27 MPa로 적용하고, 철근보강 및 강관다단 그라우팅으로 천단을 보강하였 다. 그림 13은 지진시 안정성을 고려한 전체적인 보강 방안이다.



그림 13. 내진에 대한 터널 보강대책

표	5.	검토기	준
---	----	-----	---

구 분	강도 24 MPa	강도 27 MPa	검토내용
휨압축응력	12.77 MPa	14.36 MPa	허용응력증가계수(1.33) × 0.4 × f _{ck} (도로교설계기준, 2010)
절대변위	300 mm	300 mm	붕괴방지수준(항만 및 어항시설의 내진설계표준서, 1999)

표 6. 내진해석 휨압축응력 발생 양상

콘크리트 라이닝 압축	·강도 24 MPa 적용시	콘크리트 라이닝 압축강도 27 MPa 적용시			
인공지진파(0.154 g)	인공지진파(0.211 g)	인공지진파(0.154 g)	인공지진파(0.211 g)		
· 휨압축응력 : 9.07 < 12.77MPaOK	5.52	· 휨압축응력 : 9.17 (14.36MPa ∴ OK	· 흽압축응력 : 14,05 (14,36MPa ∴ OK		

표 7. 내진해석 결과

	콘크리트 강도 24 MPa				콘크리트 강도 27 MPa					
구 분	휨압축 응력 (MPa)	허용 응력 (MPa)	절대 변위 (mm)	허용 기준 (mm)	평가	휨압축 응력 (MPa)	허용 응력 (MPa)	절대 변위 (mm)	허용 기준 (mm)	평가
수정 Hachinohe 지진파	8.18	12.77	52.18	- 300	O.K	9.58	14.36	83.44	300 -	O.K
수정 Ofunato 지진파	7.74		63.78		O.K	8.42		71.07		O.K
인공지진파(0.154 g)	9.07		58.62		O.K	9.17		70.90		O.K
인공지진파(0.211 g)	12.92		83.04		N.G	14.05		100.50		O.K

5. 결 론

지질이상대를 통과하는 터널설계와 관련하여 지반조 사에서 나타난 지질특성을 분석하고 터널 안정성 검토 를 수행하여 보강대책을 수립하였다. 그 결과를 요약하 면 다음과 같다.

본 터널노선 지반조사 결과 지질이상대로 암종경계부 및 4개의 단층파쇄대가 터널과 교차하는 것으로 확인되 었다.

특히 화강암 구간 단층대와 암종경계부에서 다량의 유화물을 함유한 황철석이 절리 내에 충전할 가능성이 높을 것으로 예측되어 산성암반배수 유출이 우려되었 다. 이에 대한 보강대책으로 내황산 콘크리트 라이닝을 적용하고, 조기 지보효과를 확보하기 위하여 내부식성 팽창성 강관 록볼트를 적용하였다.

대심도 구간에 존재하는 분기단층으로 판단되는 단층 대 F3에 피압수의 다량 유출이 예상되어 침투류 해석을 실시하였으며, 차수 그라우팅 공법 적용시 파쇄대 유출 량이 약 59% 감소되는 것으로 나타나 터널상부에는 강 관다단 그라우팅, 터널하부에는 차수그라우팅을 적용하 였다.

단층대 통과시 구조물에 대한 내진성능을 검토하기 위해 국내에서 발생 가능한 최대지진규모를 6.5와 7.0 로 적용하여 분석한 결과, 규모 7.0 적용시 라이닝의 휨 압축응력이 허용기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이 에 대한 보강대책으로 라이닝 강도를 27 MPa로 상향 적용하고, 철근보강 및 강관다단 그라우팅으로 천단을 보강하므로써 내진에 대한 구조물의 안정성을 확보하 였다.

참고문헌

- 1. 전형식, 윤건신 외 5명, 1996, 내진설계기준연구(I), 건설 교통부.
- 함주익, 심연식, 1996, 폐광된 탄광의 갱내수 유출실태와 오염 및 처리방안검토, 한국화학공학회, 화학공학의 이론 과 응용 제2권 제2호, pp. 1975-1978.
- 박인준, 최승호, 김재근, 2009, 대형 대단면 지하구조물의 내진해석 시 주요 영향인자 평가, 한국터널공학회 정기학 술발표회 논문집, pp. 199-200.
- 4. 한국도로공사, 2009, 도로설계요령 제4권 터널.
- 5. 한국도로교통협회, 2010, 도로교설계기준.
- 6. 해양수산부, 1999, 항만 및 어항시설의 내진설계표준서.
- Cloos, E., 1968, Experimental analysis of Gulf Coast fracture patterns, American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52, 420-444.
- George H. David and Stephen J. Reynolds, 1996, Structural geology of rocks and regions.-2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 353-355.



유 정 훈 1995년 상지대학교 자원공학과 공학사 2004년 아주대학교 산업대학원 건설교 통공학과 공학석사

Tel: 031-329-0639 E-mail: jhy9570@kolon.com 현재 코오롱건설(주) 기반시설연구소 과장

정 철 화 1998년 단국대학교 공과대학 토목환경 공학과 공학사

Tel: 02-3677-5357 E-mail: jch99@kolon.com 현재 코오롱건설(주) 토목설계팀 차장



김 양 균

1989년 한양대학교 공과대학 자원공학 과 공학사

1991년 한양대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2009년 노르웨이 NTNU대학교 대학원 Civil & Transport 공학과 공학박사

Tel: 031-329-0641 E-mail: ykkim@kolon.com 현재 코오롱건설(주) 기반시설연구소 소장