

터널막장 단층파쇄대의 지반특성 분석에 대한 사례연구

민경남^{1)*}, 임광수²⁾, 장창식³⁾, 임대환⁴⁾

Case Study about the Ground Characteristics Analysis of Tunnel Face Fault Fractured Zone

Kyoung-Nam Min, Kwang-Su Lim, Chang-Sik Jang and Dae-Hwan Lim

Abstract The area of investigation belongs to Okchon metamorphic zone and the fault fractured zone runs parallel to the tunnel direction. It causes the independent decline of tunnel face and the slackness of the tunnel surrounding base so, after all, the severe displacement has occurred within the tunnel. Accordingly, the TSP(Tunnel Seismic Prediction) survey has been performed to investigate the extent of fault fractured zone and to analyze its characteristics. Also, we have analyzed the behavior causes by performing the tunnel face mapping and drilling investigation, and confirmed the position and scale of geological anomaly area and front fractured zone which influences tunnel excavation and supporting. Collected data analyzed ground layer condition through 3 dimensional modeling. Several variables included in the modeling were analyzed by geostatistics. The analysis of the modeling data shows that the belt of weathering by fault fractured zone is developing on the basis of the right side of tunnel and that is decreasing to the left side. The fault fractured zone was confirmed that it has strike N0~5°E, dip NW, and it is consisted of large-scale fractured zone including several anomalies. The severe displacement in tunnel is probably caused by asymmetrical load that was generated by the crossing of discontinuity and the rock strength imbalance of tunnel's both side by fault fractured zone, and judge that need tunnel reinforcement method of grouting etc.

KeyWords fault fractured zone, TSP survey, tunnel face, three-dimensional modeling, geostatistics

초 록 연구지역은 옥천변성대에 속하며 단층파쇄대가 터널굴착방향과 평행하게 존재하여 막장면의 자립성 저하 및 이에 따르는 터널 주변지반의 이완 등으로 터널 내에 과도한 변위가 발생하였다. 이에 따라 단층파쇄대의 영향범위를 파악하고 특성을 분석하기 위하여 TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사를 수행하였다. 또한 막장면 조사와 시추조사를 병행 실시하여 거동원인을 분석하고 전방 파쇄대의 예측을 통하여 터널 굴착 및 지보에 영향을 주는 지질구조대나 용수대의 위치와 규모를 확인하였다. 조사결과를 토대로 터널형상 및 그에 따른 지층상태를 3차원으로 모델링 하였다. 모델링된 개체 내에 포함된 여러 변수(함유량, 물성치, 암반등급 등 모든 정량적인 수치)는 지구통계학적 기법을 통해 분석하였다. 모델링 결과를 분석하면 단층파쇄대에 의한 풍화대의 분포가 터널우측을 중심으로 발달하면서 좌측으로 그 범위가 감소하고 있다. 단층파쇄대는 주향 N0~5°E, 경사 NW의 방향성을 가지며, 여러 개의 지질이상대를 포함한 대규모의 파쇄대로 이루어진 것으로 확인되었다. 터널내 과대 변위는 해당구간에 밀집된 불연속면의 상호교차 및 단층대에 의한 터널 좌우측 암반강도 불균형으로 편하중이 발생한 것으로 판단되며 그라우팅 등의 터널보강공법이 필요한 것으로 판단된다.

핵심어 단층파쇄대, TSP탐사, 막장면, 3차원 모델링, 지구통계학

1. 서 론

단층파쇄대가 관찰되는 복잡한 지질구간에서는 지질

변화에 대한 예측에 어려움이 많아 붕락사고에 대한 대처가 힘들다. 따라서 이러한 지반에서는 막장관찰, 변위계측 뿐만 아니라 다중적인 지반평가가 수행되어야만 한다.

반적으로 굴착중인 터널 내에서 전방 단층파쇄대의 영향범위를 파악하기 위해 TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사가 수행된다. 그리고 탐사자료를 검증하길 기 위하여 시추조사 등을 병행 실시 하는 경우가 많지만 획득된 자료를 객관적으로 종합 처리하여 실제

¹⁾ 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 차장

²⁾ 건설교통부 서울지방국토관리청 도로계획과 과장

³⁾ 건설교통부 대전지방국토관리청 도로공사와 과장

⁴⁾ 두산산업개발 국내토목부 현장 소장

* 교신저자 : knmin4183@naver.com

접수일: 2005년 4월 8일

심사 완료일: 2005년 4월 23일

지반조건과 유사하게 반영하기가 쉽지 않다.

본 논문은 TSP탐사와 시추조사 자료를 이용한 지층의 3차원 모델링을 통하여 단층대의 공간적인 분포를 예측하고, 지반정보의 공학적인 판단을 하고자 시도된 사례연구이다. 이러한 방법으로 전방 단층파쇄대의 정확한 위치를 파악하고 신뢰성 있는 암반물성치를 산정하여 터널 보강설계와 안정시공을 위한 대책을 수립하고자 하였다.

2. 현장개요

2.1 지형 및 지질

연구지역은 옥천변성대에 속하며 광역지질은 남동변에 북동주향의 단층이 영남육괴의 편마암류 기반암과 접하고 있으며, 북서부는 변성암류가 분포하고 있어 조사지역 일대를 중심으로 좌우의 지질시대가 크게 다르다(Fig. 1).

산계는 노선을 중심으로 성주산(624 m), 백하산(634 m), 칠봉산(521 m)의 준봉이 둘러싸고 있다. 조사구간은 지형적으로 고지 사이의 계곡지역 집수지형에 위치하여 다량의 지하수가 유입되고 있다.

조사지역의 지질은 시대미상의 화강편마암 및 편마암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 이를 백악기의 석영반암이 관입하였다. 노선 주위에는 변성퇴적암류, 반상화강암류 및 편암, 편마암류가 분포하며 이들 층적층이 부정합으로 피복하고 있다. 특히 화강편마암 및 편마암류는 단층, 습곡 및 관입작용에 의해 복잡한 지질구조를 가지고 있으며 지표면까지 파쇄대가 형성되어 있다.

터널구간은 화강편마암과 석영반암으로 구성되어 있으며 단층에 의해 심하게 교란되어 압괴의 형태는 유지

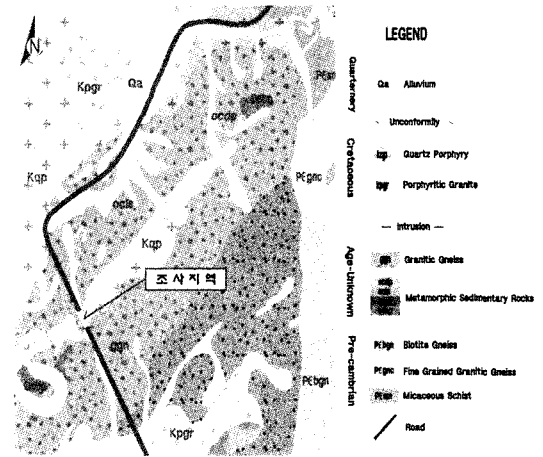


Fig. 1. Geological map(KIGAM, 1986)

하고 있으나 대부분 토사화되어 있다. 불연속면들의 방향성은 단층작용에 의해 불규칙하게 분포하나 터널굴착방향과 평행하게 발달한다.

2.2 터널현황

○○터널은 총 연장 500 m의 2차로 병설터널이다. 본 터널은 NATM 구간이 410 m, 개착구간이 90 m이며 터널중점에서부터 시점방향으로 일방향 굴착을 진행하여 하행선 65 m 굴착중 과대변위가 발생하여 현재 공사중지 상태에 있다(Fig. 2).

변위발생구간은 지보패턴 6타입으로 굴착공사를 진행하였다(Table 1). 변위발생 후 강판다단그라우팅을 180° 확대시공하고 굴착하였으나 막장면 후방 20 m 지점에서 추가 변위가 발생하였다. 이후 막장면을 슛크리

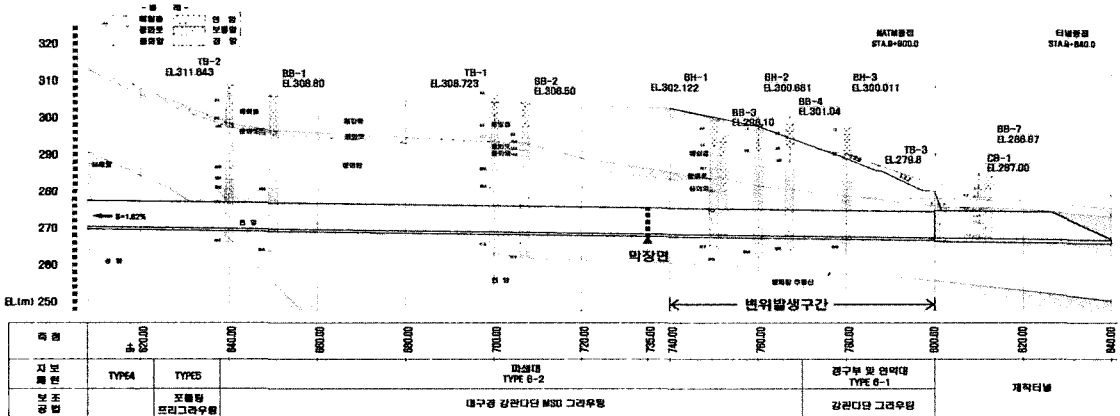


Fig. 2. Tunnel sectional view

트 폐합처리하고 터널내를 압성토한 후에 변위가 수렴된 상태이다. 계측결과 천단침하 및 지보하중이 모두 허용치를 초과하여 현재 상당한 이완하중이 터널에 작용하는 것으로 판단된다.

막장면의 지질은 당초 설계시(○○터널 설계보고서, 2004) 예상했던 것보다 매우 열악하고 심하게 변질된 화강편마암내에 단층점토가 10~15 cm 협재되어 있으며 파쇄대가 발달하여 현재 지반자립이 어려운 상태에 있다.

3. 현장조사

3.1 TSP 탐사

설계단계에서 파악하기 힘들었던 불량암질 구간의 지질조건을 정밀하게 파악하기 위하여 터널내 3차원 TSP 탐사를 실시하였다. TSP탐사를 실시하여 단층파쇄대의 위치 및 지반특성을 파악하고 터널구간에 대한 시추조사를 통하여 탐사신뢰성을 확인하였다.

탐사에 필요한 화약량은 암의 강도에 따라 약간의 차이가 있으나 수진기와의 거리에 따라 공당 40~100 g 씩 발파공 수에 맞게 준비하였다.

TSP탐사 자료해석은 회절중합법을 이용하였고, 터널 전방의 단층 및 파쇄대의 존재 유무와 위치파악을 중심으로 결과해석을 실시하였다.

탐사결과 터널구간은 불량한 암질대가 10~20 m 간

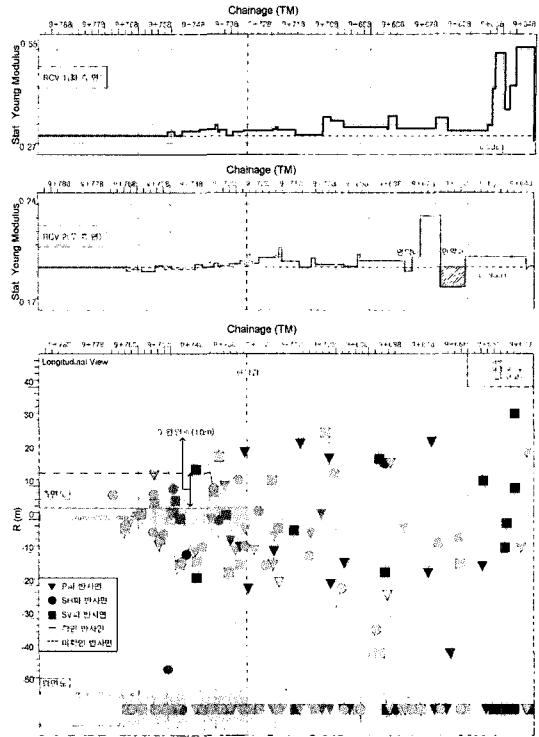


Fig. 3. Result of TSP survey

격으로 반복하여 나타나며, 암질의 변화가 매우 심하였

Table 1. Standard supporting pattern of tunnels

구 분	지 보 패 턴 6-1	지 보 패 턴 6-2
표 준 단 면		
암반 등급	갱 구 부(시, 종점) 및 연약대	파쇄대
굴착 공법(발파)	상·하반단면굴착	상·하반단면굴착
굴진장(상반/하반)(m)	1.0/1.0	1.0/1.0
shotcrete 두께(mm)	80(SFRS)	80(SFRS)
룩볼트	길 이(m)	4.0
	갯 수(개)	2/4
격자지보 (m)	간 격	1.0(중방향), 1.5(횡방향)
	규 격	TYPE-50×20×30
라이닝 두께	간 격	0.5 m
	라이닝 두께	30.0 cm(철근)
보 조 공 법	강관다단 그라우팅 (L=16 m. C.T.C. 500, θ=180°)	대구경 강관다단 MSG 그라우팅 (L=16 m. C.T.C. 700, θ=120°)

다. 지질이상대는 주로 터널우측에서 탐지되었고, 이는 지질구조대의 방향이 대체적으로 터널 축으로부터 우측으로 기울어져있는 것이 우세하다는 것을 보여준다.

불량암질에 의한 지질이상대는 터널위치 Sta. 9+758, 9+740, 9+725, 9+712, 9+685, 9+673 부근에서 터널과 조우하게 된다(Fig. 3).

암질분류에 의하면 좌측면은 연암, 우측면은 풍화암의 특징을 보이며, 좌측에 비해 우측의 지반강도가 떨어지는 것으로 보인다.

탐사구간에서의 역학특성치를 살펴보면, 감소계수를 고려한 실제의 정탄성계수(Esta.)는 6,000 tf/m²로 풍화암에 해당된다(Table 2).

측정된 탄성파자료는 불연속면으로부터 반사되어 나오는 반사파 신호를 분석함으로써 터널 막장전방과 주변에 분포하는 이질지층의 경계면 및 단층파쇄대와 같은 불연속면의 공간적 위치와 경사, 경계면의 전후에 놓인 지층의 상대적 강성도 변화 그리고 터널 주변지반의 탄성특성치(탄성계수, 포아송비)를 알 수 있다.

탄성파처리과정을 거치면 최종적으로 반사파로부터 터널전방의 반사이벤트의 위치와 방향을 결정할 수 있다. 이를 이용하여 구간별 불연속면의 방향성 분석을 실시한 결과는 아래와 같다(Fig. 4).

3.2 막장면 조사

막장면에서 관찰되는 불연속면은 간격이 짧고 반복적으로 나타나며, 연장이 길어 막장면안정에 아주 불리하게 작용한다. 이들 불연속면의 빈도는 평균 15~20 개

/m 내외로써 불연속면의 빈도가 높아지면 지하수에 의한 암반의 풍화가 집중되어 절리 내에 점토광물이 많이 형성되는 것으로 알려져 있다(박재현 등, 2001). 불연속면의 방향성은 터널굴진방향과 평행한 것이 우세하며 대부분이 심하게 풍화되어 개열(open) 되어 있다(Fig. 5). 슈미트햄머에 의한 일축강도는 평균 250 kgf/cm²로 풍화암 이하의 강도분포를 갖는다.

터널구간의 단층파쇄대는 적어도 2회 이상의 단층이 발생된 것으로 인지된다. 편마암의 엽리면 방향이 교란되어 있는 것은 후기 변성작용 동안에 형성된 단층에 의한 것으로 판단되며 이러한 단층작용에 의해 단층점토가 생성된 것으로 추정된다(민경남 등, 2004).

팽창성광물이 터널내에 분포하고 있을 경우에는 광물의 팽창이 터널의 거동에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 단층에 의해 형성된 점토광물에 대하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하여 광물의 종류를 확인하였다. 분석광물은 Sta. 9+735 지점 막장면의 화강편마암내에 10~15 cm 협재된 단층점토를 대상으로 하였다(Fig. 5. Right).

분석결과, 시료는 석영(Quartz), 백운모(Muscovite)와 점토광물인 고령토(Kaolinite)와 일라이트(Illite)로 구성되어 있음이 확인되었다(Fig. 6).

이들 점토광물은 팽윤성 점토광물로 막장에서 잠재적인 거동을 할 것으로 판단된다. 일반적으로 단층점토는 숏크리트의 기능을 저하시키고 주입재에 의한 주입효율을 떨어뜨려 주의가 요망된다.

Table 2. Comparison of ground properties by TSP survey

구 분	탄성파속도(P파)(m/sec)	탄성파속도(S파)(m/sec)	탄성계수(tf/m ²)	암반등급 판단
3D-TSP	1800~2100	1000~1200	6,000	풍화암
설계시	3500~4000	-	38,860	연 암

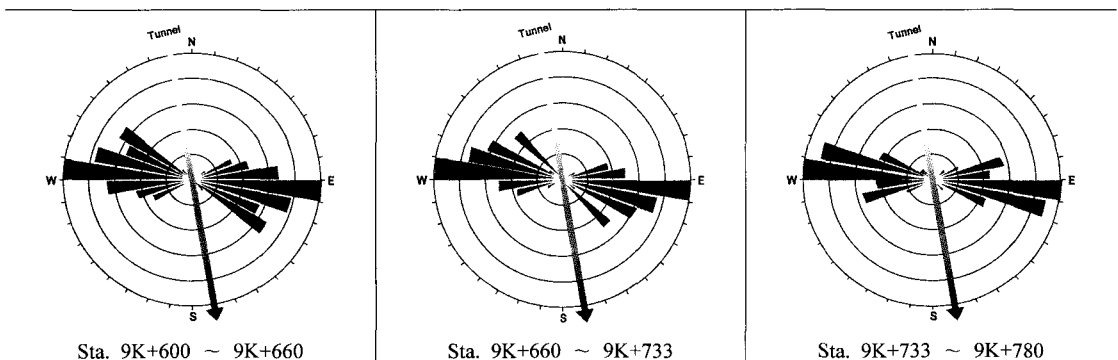


Fig. 4. Discontinuity direction of TSP reflected wave

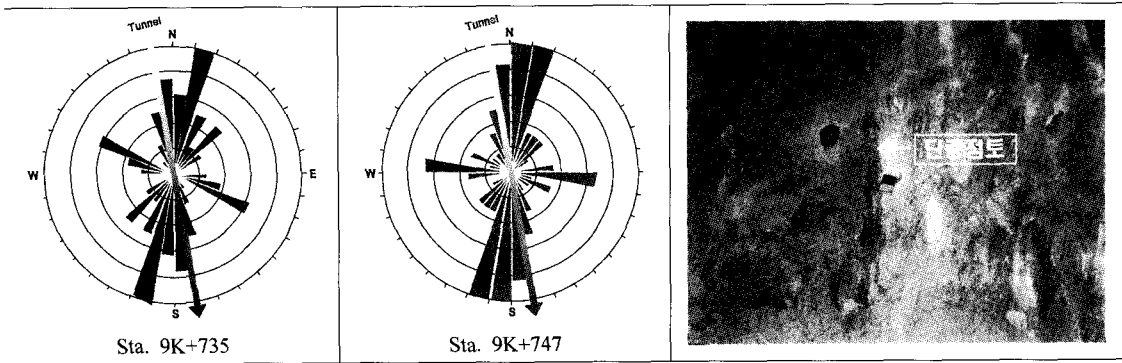


Fig. 5. Main discontinuity direction in tunnel face

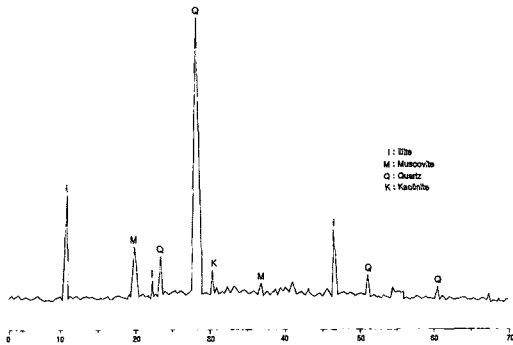


Fig. 6. Result of XRD

3.3 시추조사

TSP 탐사에서 파악된 단층대와 암질상태를 확인하기 위하여 시추조사를 시행하였다. 시추조사자료는 막장면 Face Mapping 자료와 비교·검토한 후 지층상태를 분석하였다.

코아확인결과, 기반암은 화강편마암과 석영반암으로 구성된다. 화강편마암은 단층의 영향으로 터널부근에서 토사화되어 있거나 RQD가 대부분 20% 미만으로 아주 불량하다(Fig. 7). 파쇄대는 주로 풍화암층에서 관찰된다. 점토가 협재되기도 하며 암질상태는 터널중심선을 축으로 우측이 좌측보다 풍화대 심도도 깊고 암질도 불량하다. 석영반암은 두께 2~3 m의 맥상으로 분포하며 암질은 화강편마암보다 양호한 편이다.

시추조사 위치는 지형상의 장애로 TSP 결과에 따른 지질이상대에 정확히 시추할 수 없었으나, 시추위치 Sta. 9+758, 9+740, 9+725 부근에서 단층대의 영향권에 속하는 함수파쇄대를 확인하였다. 단층대로 확인된 불량 암질구간은 심하게 파쇄되거나 풍화되어 터널굴착시 매우 불안정하게 거동할 것으로 판단된다.

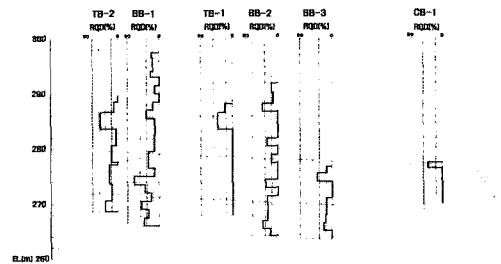


Fig. 7. RQD distribution of borehole

4. 지반특성 분석

터널구간의 단층파쇄대는 원설계 당시 조사 자료의 한계성으로 인하여 연암으로 구분하였으나 TSP탐사와 현장조사를 토대로 풍화암으로 조정하여 지층상태를 분석하였다.

지층분포는 터널형상 및 그에 따른 지층상태를 3차원으로 모델링을 실시하였다(Fig. 8, Fig. 9). 모델링된 개체내에 포함된 여러 변수(함유량, 물성치, 암반등급 등 모든 정량적인 수치)는 지구통계학적 기법을 통해 분석이 가능하며, 이는 Variogram 모델을 통한 3차원 크리깅 기법으로써 부분적이고 불규칙한 자료를 공간적으로 연속성을 지닌 자료로 확장하고 가시화하였다. 3차원으로 모델링된 개체는 그 부피 및 무게가 계산되어지고 이는 토공량 산정에도 적용될 수 있다.

모델링 결과를 분석하면 단층파쇄대에 의한 풍화대의 분포가 터널우측을 중심으로 발달하면서 좌측으로 그 범위가 감소하고 있다. 또한 터널시점부의 상부지형으로 진행하면서 기반암이 조기에 출현하는 경향을 보이고 있는데 이러한 결과는 지표조사와도 부합한다.

TSP탐사와 시추조사 결과, 단층대는 주향 N0~5°E, 경사 NW의 방향성을 가지며, 여러개의 지질이상대를

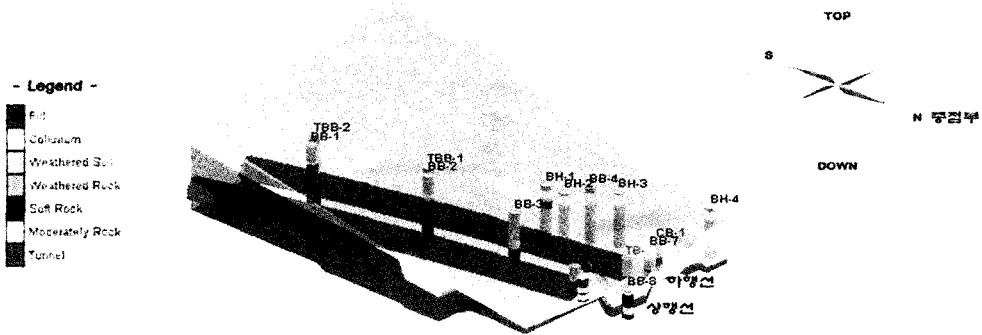


Fig. 8. Ground layer distribution by 3-D modeling(up line → down line)

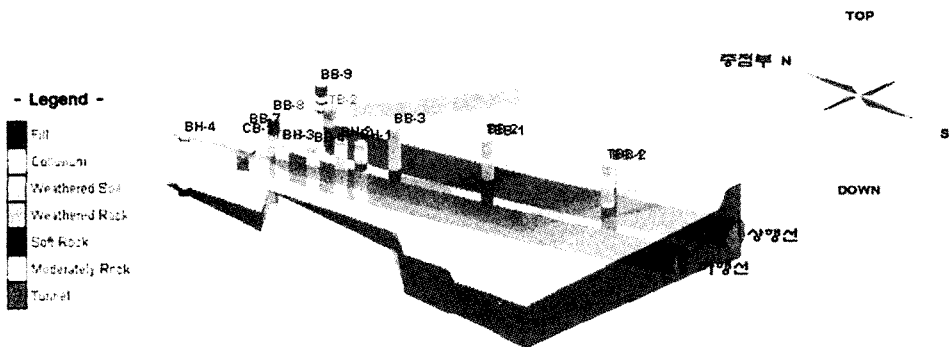


Fig. 9. Ground layer distribution by 3-D modeling(down line → up line)

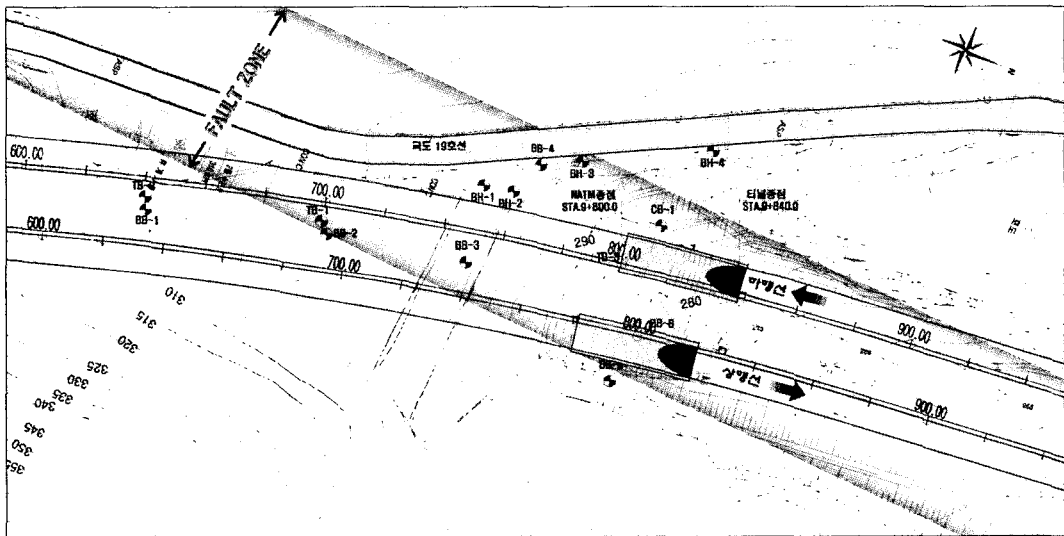


Fig. 10. Location of fault zone

포함한 대규모의 파쇄대로 이루어진 것으로 확인되었다. 단층대는 터널안정성에 영향을 줄 것으로 판단되며 분포위치를 표시하면 Fig. 10과 같다.

불연속면의 방향성은 TSP자료와 막장면에서의 자료가 서로 상이한 분포를 보인다. 이는 불연속면에 대한 탄성과 입사파의 각도에 기인하는 것으로 입사파 입계

각 범위의 불연속면들은 반사이벤트가 형성되지 않아 반사파신호가 수신되지 않는다. 즉 터널방향과 평행한 불연속면들은 반사 신호가 약하거나 산란되어 위치와 방향을 결정할 수 없는 것이다.

이러한 탐사결과를 보완하기 위하여 막장면에서의 불연속면 방향성 자료를 구간별로 조사하였다. 막장면에서의 방향성 자료는 TSP 자료와 종합하였으며 분석결과는 다음과 같다(Fig. 11).

이상의 자료를 종합 분석하면 하행선 터널중심선을 기준으로 우측이 좌측보다 암질상태도 불량하고 지질이상대도 상대적으로 많이 예상된다. 이러한 결과는 노선과 교차하는 단층파쇄대 때문에 발생한 것으로 판단되는데 이는 계속결과와도 일치한다. 즉 터널내 과대변위는 해당구간에 밀집된 불연속면의 상호교차와 단층대로 인한 터널 좌우측 암반강도 불균형으로 편하중이 발생하여 변위가 진행된 것으로 판단된다.

막장부근에서 불연속면의 방향성 및 밀집도를 고려한 RMR 값은 평균 10내외의 값으로 Type 6 이하의 암질을 보이고, 상부 매립토와 좌우측 암질의 심한 불균형으로 인한 편압을 고려할 때 검토구간은 그라우팅 등의 터널보강공법이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 고찰

단층파쇄대 등의 복잡한 지질구간에서는 지질변화에 대한 예측에 어려움이 많아 붕락사고 및 과대변형이 빈번하게 발생한다. 본 사례연구는 TSP탐사와 막장면, 시추조사를 이용하여 단층파쇄대의 영향범위와 위치를 파악하고 이를 토대로 지반정보의 공학적인 판단을 하고자 수행되었다. 그 과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 터널구간의 단층파쇄대는 원설계 당시 조사자료의

한계성으로 인하여 연암으로 구분하였으나 TSP탐사결과 탄성계수가 6,000tf/m²로 풍화암으로 조정하여 지층상태를 분석하였다. TSP에 의한 물성치산정은 단층파쇄대와 같이 시료성형이 되지 않는 구간에서 신뢰성 있는 지반정수를 확보할 수 있다.

- 2) TSP탐사와 현장조사 결과는 지층의 3차원 모델링에 사용하였으며 이를 토대로 단층파쇄대의 공간적인 분포를 추정하였다. 이러한 방법은 수치해석시 보다 현실성 있는 해석단면을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.
- 3) 막장면에서의 불연속면과 탐사에 의한 불연속면 방향성은 서로 상이하게 분포하는데 이는 불연속면에 대한 반사파의 각도에 기인한 것으로 판단되며 막장별 조사 자료와 종합하여 보완하였다. 이러한 점은 향후 풀어야 할 과제라 생각된다. 막장면에서 조사된 불연속면과 점토광물은 단층에 의한 것으로 조사결과는 그라우팅 보강공법 결정과 주입효율산정에 활용할 수 있을 것이다.
- 4) 터널구간의 단층파쇄대는 주향 N0~5°E, 경사 NW의 방향성을 가지며, 여러 개의 지질이상대를 포함한 대규모의 파쇄대로 이루어진 것으로 확인되었다. 터널내 과대변위는 해당구간에 밀집된 불연속면의 상호교차 및 단층대에 의한 터널 좌우측 암반강도 불균형으로 인하여 편하중이 발생한 것으로 판단되며 그라우팅 등의 터널보강공법이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국지질자원연구원, 1986. 영동도폭.
2. 건설교통부 ○○지방국토관리청, 2004, ○○터널 실시설계 종합보고서.
3. 건설교통부 ○○지방국토관리청, 2004, ○○터널 지반조

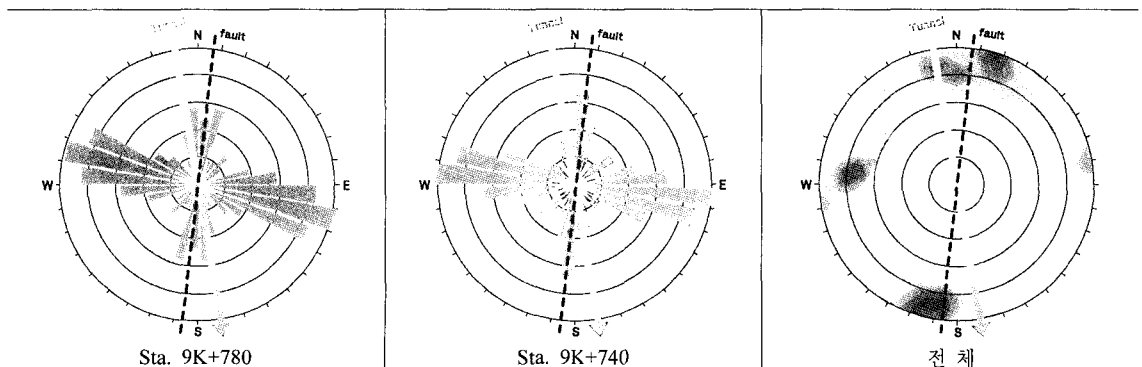


Fig. 11. Direction revision of TSP and tunnel face discontinuity

사보고서.

4. 박재현, 함세영, 성익환, 이병대, 정재열, 2001, 청송군 현서면 일대 도수로터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성, 지질공학회지, 제11권 2호, 141-152.

5. 민경남, 윤진오, 이태선, 고평태, 임대환, 2004, 터널갱구부 붕괴사면의 안정성해석 및 보강대책 사례연구, 한국암반공학회 추계학술발표회 논문집, 49-59.

민 경 남



1996년 충남대학교 지질학과 이학사
1998년 충남대학교 대학원 지질학과 이학석사

Tel: 042-360-6600
E-mail: knmin4183@naver.com
현재 대원토질(주) 엔지니어링사업본부 차장

임 광 수



1986년 대전산업대학교 토목공학과 공학사
2004년 한밭대학교 산업대학원 토목공학과 공학석사

Tel: 02-2125-2603
E-mail: lim579@moct.go.kr
현재 건설교통부 서울지방국토관리청 도로계획과 과장

장 창 식



2000년 충주대학교 토목공학과 공학사

Tel: 042-670-3521
E-mail: so100mt@moct.go.kr
현재 건설교통부 대전지방국토관리청 도로공사과 계장

임 대 환



1975년 충북대학교 토목공학과 공학사
2003년 충주대학교 대학원 건설도시공학과 공학석사

Tel: 043-744-1511
E-mail: limdh@doosan.com
현재 두산산업개발 국내토목부 현장 소장