

단층파쇄대 구간에서의 터널 시공방안 Tunnel Construction Strategy in fault zone

이상덕¹⁾, SangDuk, Lee

¹⁾ 아주대학교 건설교통공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Transportation Eng., Ajou University

1. 서론

암반은 대체로 연속적으로 일정한 강도, 변형성, 투수성을 가지고 있지만, 단층파쇄대가 있으면 강도가 약화되고 변형성과 지하수 유동성이 영향을 받는다. 터널은 공사 중 단층파쇄대를 통과할 때에 응력 집중으로 인해 국부적 파괴나 막장붕락이 일어날 수 있다. 굴착면 전방에 분포하는 단층파쇄대에 의해서도 영향을 받아서 단층파쇄대의 근접도에 따라 거동특성이 달라진다. 따라서 공사 중에 터널의 교차면에서 계측을 통해 단층파쇄대의 존재를 확인하고 이에 대비한 지보변경 및 추가 지반보강을 통하여 터널의 안정성을 확보하여야 한다.

2. 단층대 통과구간 터널 시공대책

2.1 지반보강

일반적으로 단층대 구간은 지각운동에 의한 열변성작용을 받은 상태이고 존재하는 지하수의 영향으로 풍화가 진행되어 주변지반에 비하여 취약하다.

터널과 조우하는 단층파쇄대의 규모, 방향 등에 따라 응력조건이 달라지며 매우 불리한 응력조건을 가지는 경우 단층파쇄대에서 큰 소성변위를 일으킬 가능성이 있다. 단층파쇄대를 통과하여 터널을 굴착할 경우에 지반강도 부족에 따른 과다변형 가능성이 가장 큰 문제로 대두된다. 지보재의 지지능력을 초과하는 과도한 지반변형이 발생하게 되어 터널의 안정성을 확보하기 어렵고 이는 곧 지반의 붕락으로 이어져 큰 사고가 발생할 수 있다. 단층대의 지반보강은 이완하중에 대한 저항성을 강화하는 목적으로 계획하여야 하며, 단층 파쇄대의 규모에 따라 적용위치와 공법을 정하여야 한다. 대체로 단층파쇄대가 수평이고 터널단면 전체에 분포하는 경우에는 천단보강과 함께 인버트 아치를 적용하여야 하고, SL보다 위에 파쇄대가 분포하는 경우에는 볼트의 길이를 조정하여 지반아치를 형성시키도록 계획하여야 한다. 일반적으로 터널이 소규모 단층을 통과하는 경우에는 천단부 붕락방지에 중점을 두어 지반을 보강하고, 단층대가 비교적 규모가 크고 파쇄가 심한 경우에는 강관다단그라우팅 또는 대구경 강관다단그라우팅 등을 적용하여 인위적으로 지반아치를 형성시키는 개념으로 지반을 보강한다.

2.2 과다 용출수 처리 대책

단층이 다량의 지하수를 포함하고 있어서 용출수가 과다하게 발생하는 구간에서는 숏크리트 부착이 어렵고 지하수에 의해 터널안정성이 저하되므로 적절한 차수공법을 적용하거나 유도배수를 계획하여야 한다. 일반적으로 과다한 용수가 발생하는 구간에는 수발공을 설치하여 용수를 배수하고 터널 굴착 전에 차수층을 형성하여 터널 내 유입수를 차단함으로써 막장의 안정성과 작업의 편리성을 확보하여야 한다.

단층지반은 불규칙하게 분포하는 경우가 많으므로 터널 시공시 터널내부로 예측하지 못한 지하수 유입이 발생할 수 있으므로 이에 대비할 필요가 있다. 이때에는 터널상부와 측벽에 약액주입 그라우팅을 병행하

여 주변지반의 차수효과를 증진시키고 개량지반의 강도증가 효과를 동시에 발휘하도록 계획하기도 한다. 또한 공벽의 자립도가 저하된 구간이나 용수가 많은 파쇄대에서는 신속한 지보를 기대할 수 있는 Swellex 볼트를 적용하기도 한다. 터널에 근접하여 피압상태 단층대가 있으면, 터널 굴진 중에 측벽에서 용수가 돌발 유출되면서 위험할 수 있으므로, 단층지역에서는 이에 대한 가능성을 염두해 두어야 한다.

표 1. 단층대 터널 시공 중 대응방안

적용개소	적용공법	기대효과
대규모 단층파쇄대	프리그라우팅	·단층대 차수 ·파쇄대 고결
	강관다단그라우팅	·점토 험재 단층대 보강 ·천단부 대규모 붕락 방지
소규모 단층파쇄대	휘폴링	·용수 없는 소규모 단층대 ·천단부 소규모 붕락방지

2.3 터널 굴착방법

단층대 구간에서 터널을 굴착할 때에는 대개 단면분할굴착(링 컷, 벤치 컷, 측벽선진도갱, 중벽분할공법 등)방법을 적용하되, 가급적 시공이 용이하고 응력집중이 과도한 취약부가 생기지 않는 지보방법을 선정하여야 한다. 조기에 링 폐합이 가능한 단면으로 계획하고, 막장자립성이 불량하거나 변위수렴이 지연 될 때에는 막장면을 슛크리트나 임시 록볼트 등으로 추가 보강한 후에 굴착하여야 한다. 굴착방법은 단층파쇄대의 강도특성에 따라 기계굴착 또는 발파굴착을 선택적으로 적용한다. 파쇄가 심한 단층대는 주로 기계굴착하며, 계단식으로 굴착하면 막장 안정성 유지에 유리하다.

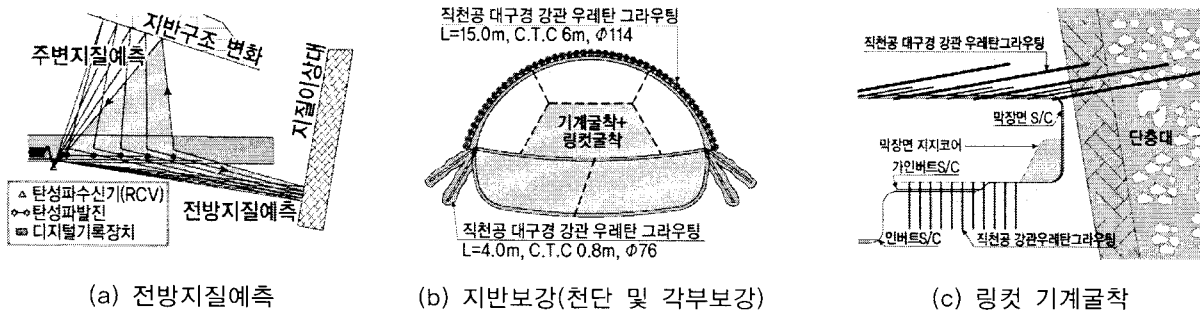


그림 1. 터널 전단면에 단층이 분포하는 경우 굴착 및 보강공법 적용 예

2.4 시공중 지보변경 및 구조물 보강

대개 단층파쇄대구간에서는 암반강도가 부족(지반강도비가 0.2이하인)하며, 이런 경우에는 암반의 장기 소성변형 발생가능성이 커지므로 지보재 설계시에 주의를 기울여야한다. 단층대 규모가 클 경우에는 지반의 소성거동에 따른 변위발생으로 인해 터널주변에 이완영역이 형성되며, 특히 록볼트 설치시에는 지반조건과 이완영역의 분포를 고려하여 볼트길이와 간격을 결정하여야 보강효과가 있고 터널을 안전하게 시공할 수 있다.

장기 소성변형 가능성이 있는 경우에는 인버트 아치를 설치하고 휘폴링 및 강지보공을 확대 적용하며, 소성구간에 대한 록볼트를 추가 설치하는 것이 바람직하다. 굴착으로 인하여 단층파쇄대 내의 지하수위가 저하되었다가 장기적으로 수위가 회복되면 라이닝에 수압이 작용할 수 있으므로 콘크리트 라이닝을 철근으로 보강하고 라이닝 두께를 증가시켜야 하며, 시공중 과도한 변위발생이 예상되는 구간에서는 가축성 지보재를 적용하여야 한다.

2.5 전방지질 예측

단층대를 통과하는 터널의 중방향 변위와 천단변위의 비율을 분석하여 막장 전방상태를 예측하고자 하는 연구가 Schubert(1993)에 의해 진행되었고, Schubert & Budil(1995)은 변위벡터의 방향성과 3차원 수치해석을 통하여 터널 전방의 강성변화 예측을 시도하였다. 최근에는 터널 내공변위 함수 파라미터와 막장전방 암반상태의 관계를 3차원 수치해석을 통하여 전방지질을 예측하고자 하는 시도가 이루어지고 있다(김창용 등 2004, 2005).

터널 시공 중에 선진보링(LIM시스템 등)을 실시하여 천공시 회전속도 및 굴착시간의 변화로부터 암반의 연경도를 분석하거나 선진수평시추하고 암반 코어를 판별하여 막장 전방지반상태를 예측하고 유입수를 확인하면 원활한 작업조건을 유지할 수 있다. 탄성파탐사를 실시하면 단층대를 예측하고 시료성형이 어려운 파쇄대의 지반물성치를 확보할 수 있어서 지보변경과 보강대책을 효과적으로 수립할 수 있다.

표 2. 시공중 전방지질 예측방안

선진천공(LIM, DRISS 등)	선진수평시추	탄성파탐사(TSP)
· 근거리 조사 : 10~20m	· 중거리 조사 : 50~100m	· 장거리 조사 : 100~200m
· 굴착속도	· 코아 획득	· 탄성파 속도차이
· Graph(속도, 토오크, 정압)	· 육안검사, 강도특성	· 단층파쇄대 위치 및 방향특성

3. 단층변위에 대한 대책

단층은 대체로 취성변형 거동하며 암체 내의 변형작용에 의해 발생된 불연속면이나 불연속대에 인접한 두 암체가 상대적으로 이동한 지질구조이다. 절리와 다른점은 불연속면 양쪽의 암체가 상대변위(displacement)를 일으켰다는 것이다. 이러한 변위로 인해 단층면상에 미끄럼으로 인한 단층활면(slickenside)이 형성되며, 단층조선(striation)이 발달한다(이병주, 2006).

단층지역에 터널을 건설할 경우에는 단층통과구간에 터널단면을 확대하거나 변위를 수용할 수 있는 조인트나 라이닝을 설치하여 단층변위로부터 터널의 안정성과 필요한 건축한계를 확보하고 터널을 보호할 수 있다.

Jaw-Nan Wang(Design Strategies - Fault Displacements, 2005)은 단층변위에 대한 대책으로 다음과 같은 방안을 제시하고 있다.

- 터널단면 확대
- 연성재료 또는 변위수용이 가능한 라이닝 뒷채움
- 연성 라이닝
- 인위적인 조인트 설치
- 긴급보수를 위한 예비계획 반영

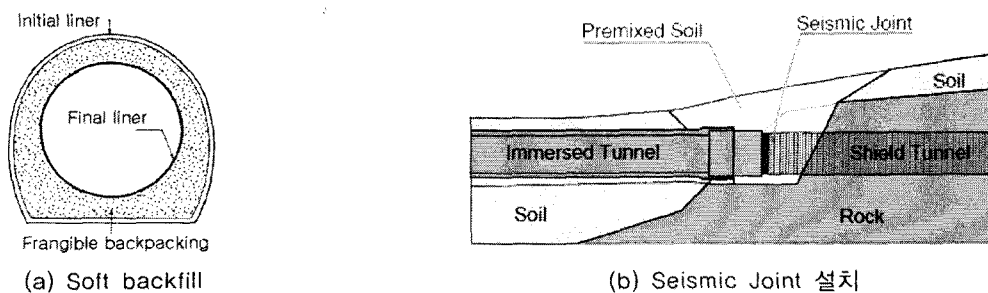


그림 2. 단층변위에 대한 터널구조물 대책 예

이와 같은 대책공법의 하나로 미국 LA Metro에서는 할리우드단층대(Thrust Fault)를 통과하는 터널의 단면을 확대하여 단층 변형을 수용하고 변형 후에는 터널단면을 유지할 수 있으며, 간단히 보수할 수 있도록 하였다.(그림 3.)

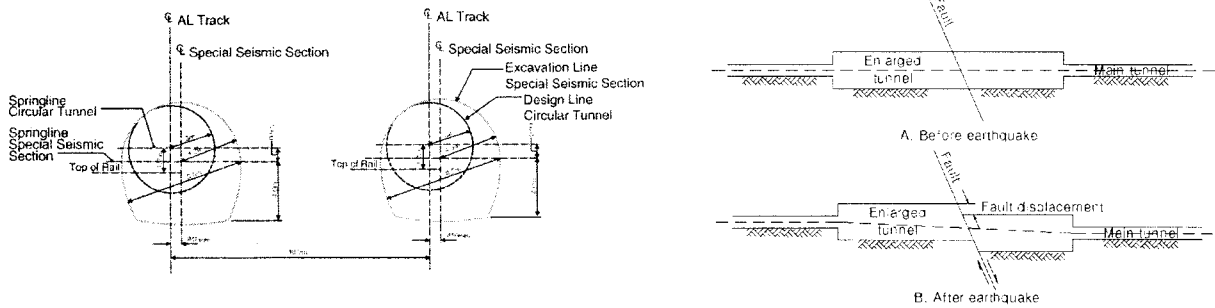


그림 3. 할리우드단층 터널 내진단면

4. 결론

단층대를 통과하여 터널을 설계할 때에는 지반조사결과로부터 단층의 방향성을 예측하고 지반물성을 파악하며 수치해석을 통하여 보강구간을 결정한다. 단층대 구간에서는 예비패턴 형태로 지보를 설계하고 있으므로 실제 시공과정에서는 계측을 통하여 단층대의 지반특성과 규모를 파악하고 터널 지보형식의 적정성을 검토한 후에 적용하여야 터널구조물의 장기적 안정성을 확보할 수 있다. 또한 단층대 통과 구간 시공시에는 미끄럼 면을 따라 굴진면이 붕괴되거나 과도한 지하수가 유입되어 시공성이 저하되고 막장면이 불안정해지므로 용수처리와 굴진면 지보 등의 부가적인 방법을 선택적으로 적용하여야 안전한 터널을 시공할 수 있다.

참고문헌

1. 김용일 등(2003), “터널굴착시 암반예측시스템 적용사례”, 한국암반공학회 춘계학술발표회
2. 김창용 등(2005), “합리적인 터널 계측 및 막장 관찰방안 연구”, KICT 사이버연구성과발표자료
3. ○○~○○간 터널설계보고서(2006) 대우건설
4. 이병주 등(2006), “토목구조물에서 단층의 등급분류에 대한 제의”, 한국터널공학회지, Vol.8, No.2, pp.68~76.
5. 이상덕 등(1994), “안정된 지하구조물의 설계 및 시공”, 도서출판 새론
6. Jaw-Nan Wang(2005), “Design Strategies - Fault Displacements”, Parsons Brinkerhoff Quade & Douglas, Inc., USA
7. LA MTA(2006), “한국터널공학회 Presentation 자료”, Parsons Brinkerhoff Quade & Douglas, Inc., USA