

단층대 구간에서의 암반구조물의 문제와 보강대책 Problems and Reinforcement Measures for Rock Structures in Fault Zone

김영근¹⁾, Young-Geun Kim, 한병현²⁾, Byeong-Hyeon Han, 신영완³⁾, Young-Wan Sin

¹⁾ 삼성물산(주) 건설부문 토목ENG팀 부장, Civil ENG Team, Samsung Corporation

²⁾ 삼성물산(주) 건설부문 토목ENG팀 차장, Civil ENG Team, Samsung Corporation

³⁾ (주)하경엔지니어링 터널지반부 이사, Tunnel and Geotechnical Division, Hakong Engineering

요약 : 암반내 존재하는 단층은 암반거동에 중대한 영향을 미치게 되며, 특히 단층내에 충전물이 협제되어 있거나, 파쇄대가 넓게 발달한 경우에는 암반구조물의 안정성에 보다 심각한 문제를 가져오는 경우가 많다. 이는 단층의 불연속적인 거동과 충전물의 거동이 복합적으로 작용하게 되며, 장기적인 시간을 두고 나타나기 때문이다.

본 검토에서는 단층의 공학적 특성을 분석하고, 단층대 구간에서는 보강설계 사례 및 단층대 구간에서의 붕락사고로 인하여 문제가 발생한 현장사례분석을 통하여 단층이 암반사면이나 터널과 같은 암반구조물에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 통하여 단층과 점토 그리고 지하수 등의 복합거동에 의한 장기적이고 잠재적인 거동을 수반할 수 있는 단층의 공학적 문제점을 고찰하였다.

주요어 : 단층, 붕락, 암반구조물, 복합거동, 안정성

1. 서론

최근 들어 터널, 암반사면과 같은 암반구조물에서의 붕락 및 붕괴사고가 많이 발생하고 있으며, 이러한 경우 대부분 그 원인을 단층(Fault)에서 찾는 경우가 많음을 볼 수 있다. 즉 단층이 암반구조물에 미치는 영향이 매우 큰 주지의 사실로서, 지반조사시 단층에 대한 상세조사가 더욱 요구되고 있는 현실이다.

하지만 단층에 대한 정확한 공학적인 정의가 규정되어 있지 않은 상태이며, 같은 지역에서 조차도 다른 지반조사결과를 보여주는 경우(단층의 위치, 규모, 폭, 개수 등)가 경우가 많아 오히려 기술자들에게 혼선을 초래하거나 지질조사에 대한 불신을 증가시키는 경우도 나타나고 있다.

따라서 단층에 대한 지질학적 의미와 토목공학적 의미에 대한 체계적인 고민이 필요하다고 생각된다. 단층의 지질학적 의미와 지질구조적 특성, 단층의 규모, 크기, 폭 등을 조사하기 위한 지반조사방법, 단층암, 단층가우지, 파쇄대에 대한 공학적 성질을 규명하기 위한 제반 시험방법, 다양한 시험결과로부터 지반정수를 산정하여 암반구조물의 안정성을 검토하고 설계하는 방법, 그리고 시공중 예상치 못한 단층대를 조우할 경우에 대한 보강대책방법 등, 지질 및 지반관련 기술자들이 해결해야 할 몫이라고 생각한다.

단층은 분명 토목공사에서 나쁜 영향을 미치는 위험요소(Risk factor)이므로, 조사, 설계 시공 단계에서 이를 무시하거나 간과하지 말고, 단층의 특성을 규명하고 분석하므로써 단층이라는 위험요소에 적극적으로 대응해간다면 충분히 극복할 수 있는 있을 것이다.

본고에는 단층의 공학적 특성과 설계단계에서의 단층대에서의 굴착 및 보강방안을 살펴보고, 실제 시공중 단층대에서 겪었던 문제점(붕락사례 등)과 보강대책을 분석하였다.

2. 단층의 공학적 특성

2.1 불연속면으로서의 단층

암반내 존재하는 단층(fault)는 암반의 거동에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 암반사면, 터널과 같은 암반구조물의 설계 및 시공에 있어서 단층의 크기나 분포 그리고 공학적 특성에 대한 대한 조사는 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

암반내에는 다양한 종류의 불연속면(discontinuity)이 존재하는데, 불연속면은 인장강도가 없거나 매우 작은 값을 갖는 암반내의 분리면을 말하며, 단층은 대표적인 불연속면의 한 형태로 전단변위의 발생여부로 단층을 정의한다. 단층은 발생형태에 따라 정단층, 역단층 그리고 주향이동단층으로 구분되고(그림 1), 역단층중에서 특히 저각으로 이루어진 경우를 스러스트라고 한다.

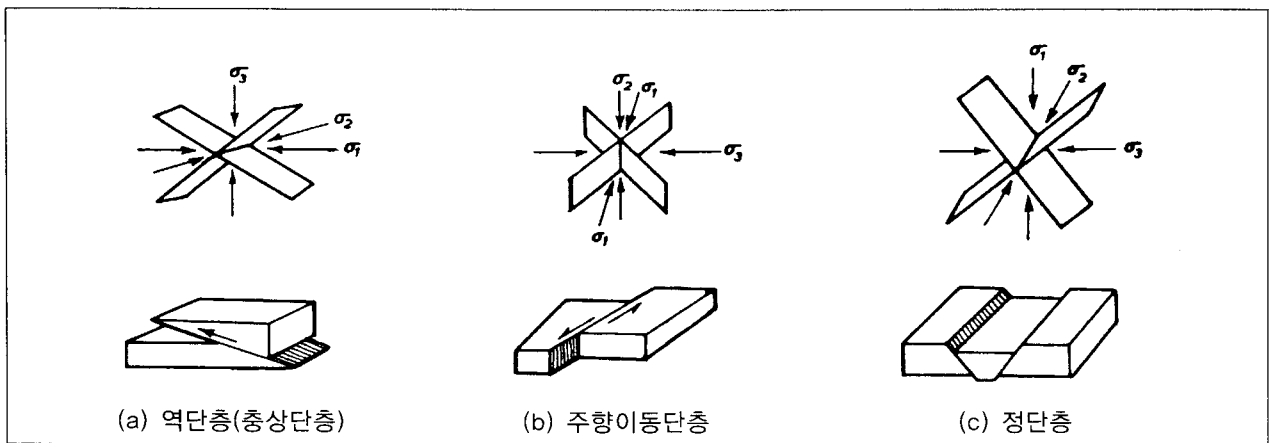


그림 1. 지반내 응력 분포와 단층의 형태

스러스트 단층에서, 수평하게 가로 놓인 지층이 측방향에서 압축을 받는 경우에 flat 지층과 ramp 가 연결되어 계단 상태의 형태를 취하게 되는데, 새로운 드러스트 단층에 따라 상반의 지층이 이동하게 되면 새로운 ramp 가 형성되면서 지층이 겹쳐 쌓이게 되면 최종적으로 기와를 겹친 것처럼 배열해서 duplex를 형성하게 된다. 그림 2는 duplex의 여러 형태를 보여주고 있는데, 단층이 하나의 것이 아닌 여러개의 형태를 나타냄을 볼 수 있다.

단층면은 자주 단층동을 했을때의 마찰에 의해 연마되어 매끈매끈하고 광택을 가진 경면(slickenside)이라고 하는 면을 형성한다. 또한 단층활동에 따라 단층면의 주변에는 이차적인 소구조를 가진 단층암(fault rock)이 형성된다. 이 단층암이 파쇄대(fracture zone) 내지 전단대(shear zone)라고 하는 부분을 구성한다. 단층암중에서 손으로 부술수 있는 정도의 연약하고 점토상태의 세립한 기질부가 많은 것을 단층점토(fault gouge)라고 한다.

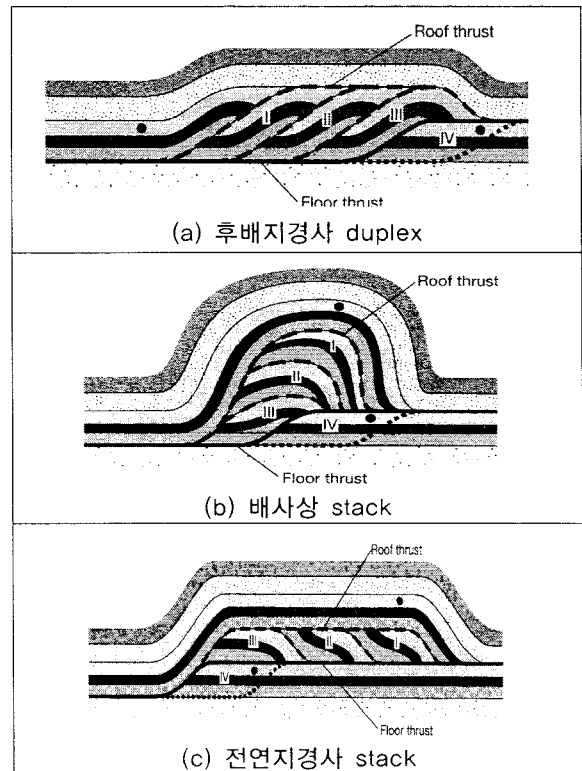


그림 2. 스러스트 단층의 형태

2.2 단층 충전물과 단층 파쇄대

충전물(filling)은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질로 정의되어지며, 전형적인 충전물로는 방해석, 녹니석, 실트, 단층 점토, 각력암, 석영, 황철석 등이 있다. 그림 3은 단층 충전물의 다양한 종류를 보여주고 있다. 충전물은 단층의 전단강도에 중요한 영향을 미치게 되는데 단층점토와 같은 충전물로 채워진 불연속면(filled discontinuity)은 충전물이 없거나 닫힌 불연속면에 비하여 보다 낮은 전단강도를 가지게 된다. 또한 충전된 불연속면의 거동은 충전물의 광물특성, 입자크기, 과압밀비, 함수상태와 투수율, 선행전단변위, 거칠기, 폭 등과 같은 요소들에 중요한 영향을 받게 되며, 충전물의 두께가 두꺼울수록 최대전단강도가 발현되는 전단변위는 커지며, 최대강도는 감소한다.

단층내 물질은 주변의 암석이 자갈상으로부터 점토에 이르기까지 파쇄된 것과 풍화변질에 의해 변화되고 이차적으로 생성된 점토광물과 지하 침투수에 의한 유입점토 등이 있다. 그림 4에는 단층면을 따라 열수용액의 흐름에 의한 효과를 보여주고 있다.

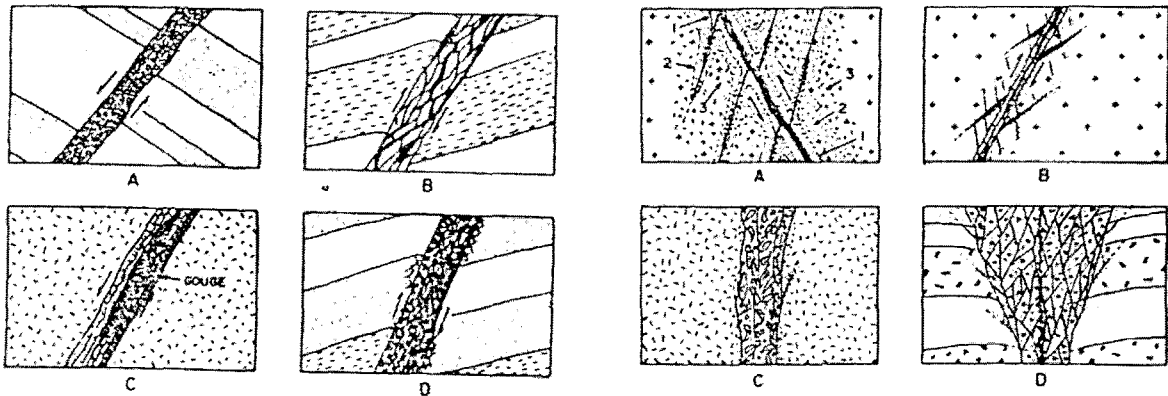


그림 3. 단층 충전물의 다양한 형태

그림 4. 단층면을 따라 발생한 열수변질

단층이 발생하면 그 면을 따라 암석강도가 저하되기 때문에 반복하여 파괴가 발생한다. 그 결과 크기가 다른 여러 가지 규모의 파괴면이 밀집되고, 어느 방향으로 방향성을 가지는 zone이 형성된다. 이들을 단층파쇄대라고 한다. 단층파쇄대를 구성하는 물질은 전단파괴의 정도에 따라 점토, 각력이 혼합된 점토, 각력이 혼합된 모래, 점토가 얇게 피복된 각력, 비교적 큰 압괴와 각력이 혼합된 층, 균열이 발달한 층, 비교적 균열이 많은 층으로 구분할 수 있다.

단층파쇄대의 역학적 특성과 투수성은 파쇄대내 물질이 점토내지는 각력을 주로 하는가에 따라 크게 달라지는데, 이것들이 조합된 형태들로 그림 5에서 보는 바와 같이 분류할 수 있으며, 여러 번의 구조작용에 의해 단층이 계속 파쇄되어 넓은 단층대를 형성하는 경우도 있다.

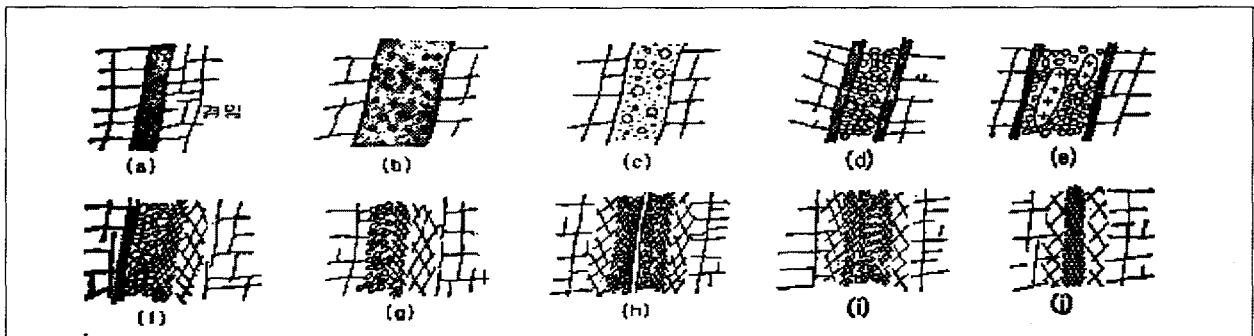


그림 5. 단층 파쇄대의 형태

2.3 단층암의 특성

2.4.1 단층암 분류

Takaki와 Kobayashi(1996)는 표 1에서 보는 와 같이 단층암 분류표를 수정한 분류표를 제시하였다. 단층암은 크게 응집(cohesive)과 비응집(incohesive)로 구분되고 Incohesive는 보이는 암편의 함량에 따라 Fault gouge와 Fault breccia로 구분된다. 또한 Cohesive는 기질의 함량과 엽리의 발달정도에 따라 구분됨을 알 수 있다. 이러한 기준에 의한 편암지역에서의 단층조사의 한 예를 보면, 단층암은 주로 엽리가 발달된 파쇄암(Foliated Cataclasite)

에 해당되며, 일부는 엽리가 발달된 원파쇄암에 해당되지만 그 변형정도가 약한 경우는 단층 영향대(Fault damage zone)로 분류하기도 한다.

표 1. 단층암의 분류

명칭	파쇄암편의 비율	파쇄암편의 직경
단층각력	> 30%	megabreccia >256mm mesobreccia 10-256mm microbreccia <10mm 통상 <10mm
단층가우지	< 30%	통상 <10mm
Protocataclasite	>50%	통상 <10mm
cataclasite	10-50%	
ultracataclasite	<10%	
	porphyroclast의 량	가질구성광물의 양
protomylonite	원암의 종류에 따라 다양	>100μm
mylonite		20-100μm
ultramylonite		<20μm

2.4.2 단층암 형성 깊이 및 특징

엽리가 발달된 파쇄암들은 응집(cohesive)된 암석으로써 적어도 3~4km의 깊이에서 형성된 것으로 추정된다. 따라서 어떤 단층암들은 그림 6에서 보는 바와 같이 "cohesive brittle fault rocks"의 영역에서 형성되었으나 용기와 침식에 의해 현재 지표근처에 분포하게 되는 경우도 있으며, 또한 "incohesive brittle fault rocks" 조건에서 형성된 단층비지와 단층각력암보다는 응집력이 있었기 때문에 변질작용에 강했던 것으로 해석되기도 한다. 일부는 지표환경에서 재활성한 것으로 추정되며 단층가우지(Fault gouge)를 포함한 전단띠(Shear band) 및 단층비지가 포함되지 않은 단층활면을 발달시키기도 한다.

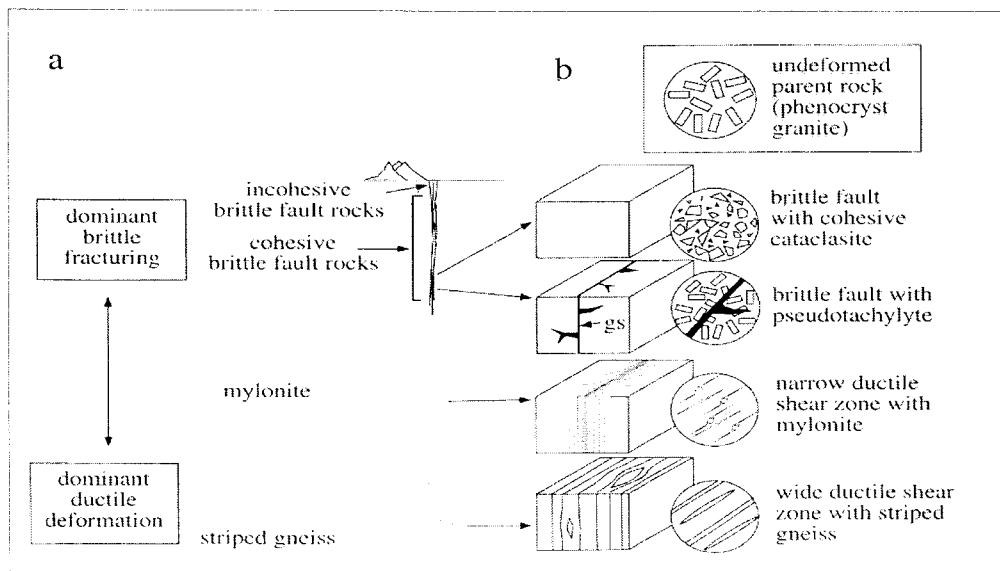


그림 6. 단층암의 형성 심도(Passchier, 1996)

3. 단층이 암반구조물에 미치는 영향

3.1 터널 안정성 문제

단층대는 암반이 상당히 약화되었기 때문에 큰 소성지압이 작용하게 되어 지보공의 변형, 침하, 암반의 팽창 등의 변형이 발생하기 쉽다. 또한 단층이 터널과 직교하는 경우는 낙반 및 용수를 동반하는 붕괴의 위험성이 있고, 사교 또는 평행하는 경우는 편압이나 강한 압력이 작용할 위험성이 있기 때문에 단층의 방향 및 경사에 주의를 기울여야 한다.

그림 7은 터널공사에서 단층에 의해 나타날 수 있는 문제점을 나타낸 것으로, 특히 단층의 방향이 굴진방향과 against dip인 경우에 기본적으로 취약한 요소를 형성할 수 있으며, 터널용수에 의해 단층점토나 흑연과 같은 충전물이 포화되고 급속히 열화되므로서, 단층면의 미끄러짐을 보다 쉽게 일으킬 수 있는 경면(slickenside)을 형성하는 것이다. 이러한 상태는 터널굴착중 뿐만 아니라 굴착이후의 장기적인 거동을 일으키는 원인이 될 수 있으므로 단층대의 폭이 크거나 단층점토 등이 협재된 경우는 특히 주의 해야만 한다.

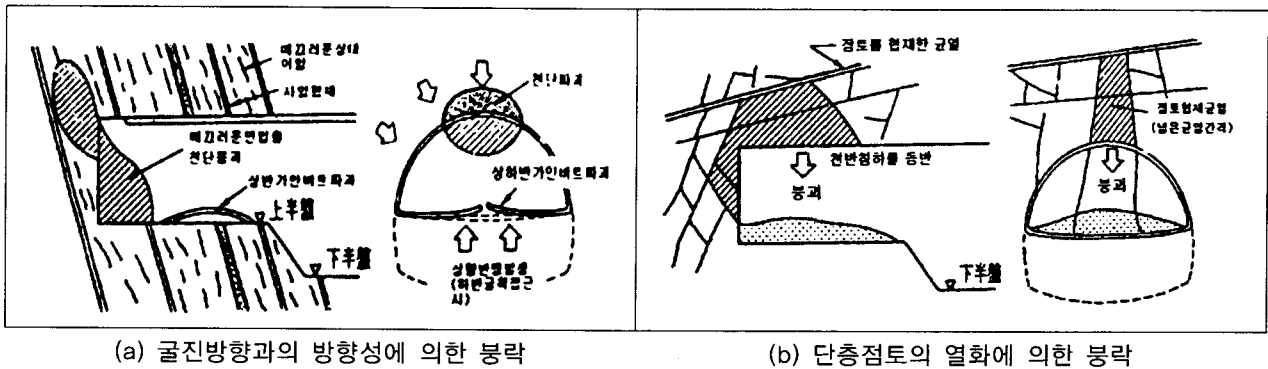


그림 7. 단층이 터널의 안정성에 미치는 영향

3.2 지하수 문제

단층대는 투수대이면서 한편 차수대이다. 터널에서 단층과쇄대는 그림 8에서 보는 바와 같이 돌발적인 용수와 그것에 따르는 막장의 유출이나 붕괴의 원인이 된다. 즉 단층을 따라 흐르는 용수는 막장 붕괴를 일으키는 경우가 많으므로 단층대에서의 용수상태의 관찰에 주의하지 않으면 안된다.

특히 터널 굴착에 따라 지하수 거동에 영향을 미치게 되고 지하수는 상대적으로 취약한 면을 형성하고 있는 단층과쇄대를 따라 이동하게 된다. 이때 단층과쇄대의 열화는 급격히 진행하게 되고, 단층대 내의 단층점토나 협재물은 지하수에 영향을 받게 되어 더욱 약화되며, 대규모 단층대인 경우에는 지표수 유입에 의한 영향도 고려해야만 한다.

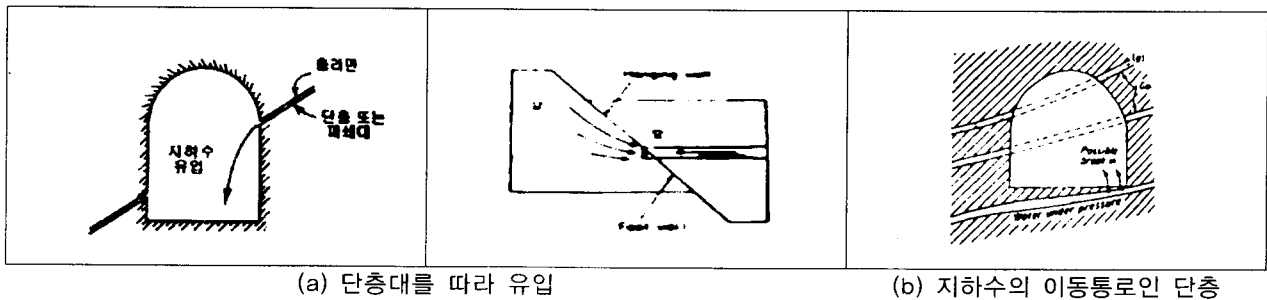


그림 8. 단층이 지하수 거동에 미치는 영향

4. 단층대 구간에서의 보강설계

지반조사결과 단층이 조사되는 경우에는 터널 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 굴착, 지보 그리고 보조공법 등을 반영하여 터널을 설계하여야만 한다. 일반적으로 단층대 구간에 적용되는 지보패턴은 단층대의 규모 및 터널과의 교차상태, 단층대 특성 등에 따라 구분될 수 있으며, 단층대의 폭에 따라 소규모 단층대(폭 1.0m 이하), 중규모 단층(폭 1~10m) 그리고 대규모 단층대(10m 이상)로 구분하고 있다.

일반적으로 소규모 단층대의 경우는 보조공법과 병행한 상·하 분할굴착 공법을 적용하고 중규모 및 대규모 단층대의 경우는 막장안정성을 중점적으로 고려하여 보조공법 및 지반개량 후 중벽분할 또는 링컷 굴착 공법을 적용하고 있다(그림 9).

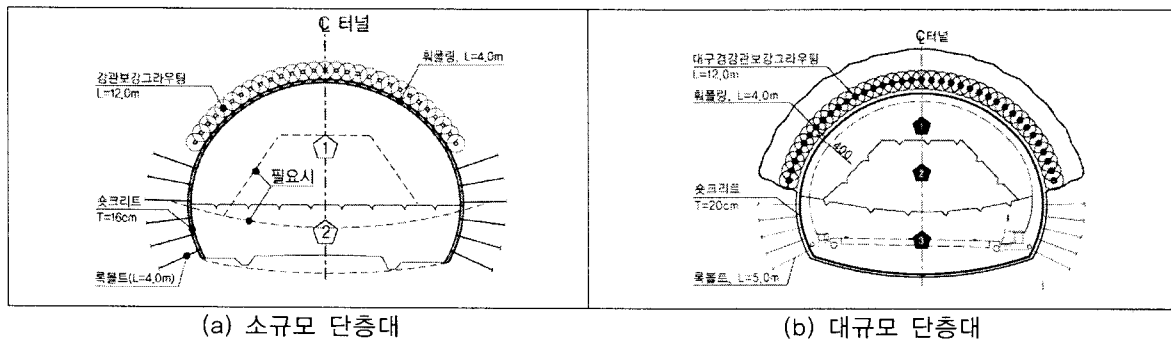


그림 9. 단층대 구간에서의 터널 설계

일반적으로 단층대 구간에서 요구되는 지보량은 일반구간 보다 크기 때문에 강성이 큰 H형강의 적용 및 숏크리트 두께 20~25cm 적용 등으로 일반구간보다는 다소 큰 지보가 적용된다. 또한 막장 자립시간이 매우 짧기 때문에 굴진장은 0.6~1.0m로 축소하여 적용되고 있다. 또한, 단층대 구간에 터널 굴착시는 터널 상부 지반의 이완이 일반 구간보다 크게 발생하기 때문에 지반자체로서 응력 아치 형성 효과를 기대하기 힘들기 때문에 천단부 보조공법 또는 지반개량공법과 병행하여 시공되는 것이 일반적이다.

단층대 구간과 같이 지반조건이 열악하여 막장이 자립할 수 없는 경우에는 막장 및 천단부 등 지반의 안정성 확보를 위하여 보조공법이 필요하게 된다. 천단부 또는 주변지반 안정화를 위해 적용되는 보조공법으로 주로 휘포링, 소구경 강관다단, FRP 보강그라우팅, 대구경 강관보강 그라우팅 공법 등이 적용되고 있으며, 각 공법에 대한 비교는 표 2에 나타내었다.

또한, 연약한 지반의 막장면이 밀어넘이나 붕괴에 저항할 수 있도록 막장면 자립공법으로서 지지코어, 막장면 숏크리트, 막장볼트 등이 적용되며 용수의 처리를 위한 수발공, 굴착단면 축소(분할굴착) 등의 공법이 적용된다.

단층대 구간과 같이 막장 및 지반 안정이 문제가 되는 불량 지반의 경우에는 지지력이나 지반 강성이 부족한 경우가 많으며, 상반 각부의 침하가 막장의 안정이나 터널 지보 구조의 안정을 손상시킬 수 있으므로 단독 혹은 보조공법과 병행한 각부보강공법의 적용이 증가하고 있다.

지보공 각부의 안정 및 보강대책으로는 지보공 각부의 지지면적을 확대하거나 상반부에 인버트를 시공하는 방법, 각부 지반의 강도증가를 도모하는 방법, 각부를 록볼트나 파일 등에 의해 보강하는 방법 등이 있다(그림 10). 공법선정에 있어서는 터널의 시공법, 지반 조건, 지하수의 상황, 주변환경 조건 등을 종합적으로 판단하여 효과적이고 합리적인 공법을 적용할 필요가 있다.

표 3에는 단층대 구간에서 적용된 도로, 지하철, 고속철도, 지하철 등의 터널 설계의 사례를 나타내었다.

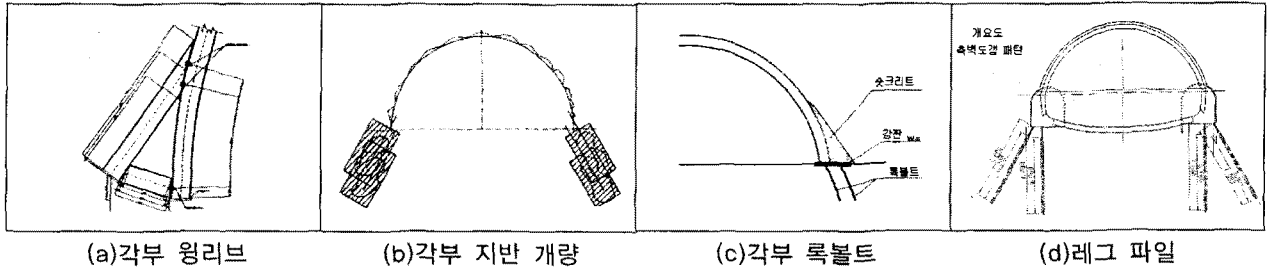
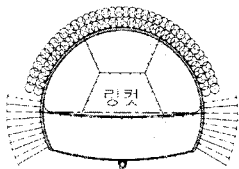
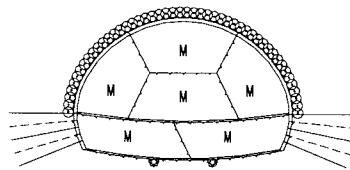
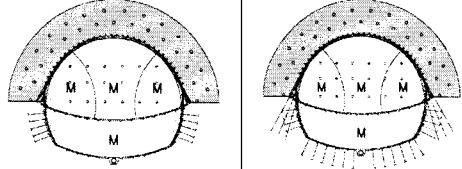
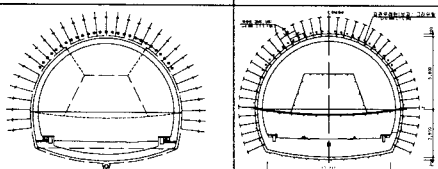
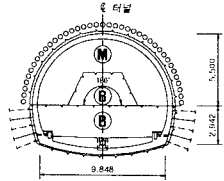
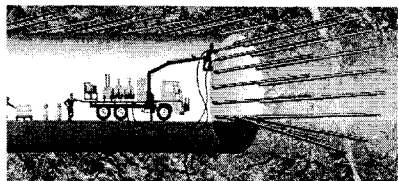


그림 10. 단층대 구간에서의 각부 보강방안

표 2. 터널 보조공법 비교

구분	소구경 보강공법		대구경 보강공법	워플링 공법
	FRP 보강 그라우팅	강관 보강 그라우팅	대구경 강관보강그라우팅	
개요도				
공법개요	고강도 FRP 보강재를 적절한 형상으로 배열, 그라우트재를 주입하여 보강 및 차수효과 증진	소구경 강관을 적절한 형상으로 배열, 그라우트재를 주입하여 개량체 (Beam Arch) 형성	굴착면 전방에 우산모양의 구조체를 형성하여 굴착시 구조적인 안전성을 도모 유지하는 공법	터널 천단부에 종방향으로 철근을 관입하여 국부적인 천단 및 막장 붕락을 방지
주입재	·시멘트+ 규산소다+ 혼화재	·시멘트+ 규산소다	·시멘트+ 규산소다 or 마이크로 실리카 시멘크	·시멘트 밀크 또는 몰탈 주입
적용지반	·풍화암, 연암, 파쇄대 및 단층대	·풍화암, 연암, 파쇄대 및 단층대	·풍화암, 연암, 파쇄대 및 단층대	·풍화암 및 연암 등 암블록이 형성되는 지반에 적용
적용목적	·여굴 및 붕락방지 ·차수 및 지반보강	·여굴 및 붕락방지 ·차수 및 지반보강	·여굴 및 붕락방지 ·차수 및 지반보강	·여굴 및 붕락방지
시공	· $\phi 60\text{mm}$, L=12m FRP관 ·설치간격 (횡/중) : 0.5m / 8.0m	· $\phi 50.8\text{mm}$, L=12.0m 강관 ·설치간격 (횡/중) : 0.5m / 8.0m	· $\phi 114\text{mm}$, L=12.0m 강관 ·설치간격 (횡/중) : 1.0m / 6.0m	· $\phi 38\text{mm}$, L=4.0m 강관 · $\phi 25\text{mm}$, L=4.0m 철근 ·설치간격 (횡/중) : 4.0m / 매막장 또는 2막장
시공장비	·터널전용 수평천공기나 크롤러 드릴	·크롤러 드릴 등	·터널 전용 수평천공기	·크롤러 드릴 등
장점	·불연속면의 봉합 및 차수효과 우수 ·중량이 가벼워 취급용이 ·내화학적, 내부식성 우수하여 영구적인 보강재로 가능 ·주입관과 간격재 일체화되어 주입효과 양호	·불연속면의 봉합 및 차수효과 우수 ·강관제작이 용이 ·FRP관에 비해 재료비저렴 ·천공홀 붕괴시에도 강관의 단면적이 작아 강관의 삽입이 용이하나 벤딩부의 파손이 우려됨	·전용장비시공으로 시공정밀도가 비교적 우수 ·불량지반조건에 적용 용이 ·강성이 큰 강관 사용으로 보강효과 우수	·시공이 간편하고 경제적 ·국부적 붕락방지 예방 ·막장관리 용이
단점	·FRP보강재, 주입관, 연결재 등을 현장에서 조립사용하는 추가공정이 필요	·부식성에 약함으로써 영구보강재로 결함 ·천공길이가 길어지면 강관의 파대한 증량으로 인해 천공홀 삽입이 곤란	·지하수 과다유입시 차수불량, 토립자 유실우려 ·강관자체증량으로 인한 시공성 저하 ·장비 및 시공비 고가	·FRP나 강관다단그라우팅에 비해 보강효과 작음 ·막장 굴착길이가 길어질수록 보강효과 감소 ·지하수 유출구간의 누수방지효과 없음
적용	·단층파쇄대, 풍화암 이하 지반 보강	·단층파쇄대, 풍화암 이하 지반 보강	·저토포 토사층 및 풍화토층의 지반보강	·연암이상의 갱구부 및 파쇄대 보강

표 3. 단층대 구간 터널 보강공법 설계사례

사례	구분	공법 개요도		비고
도로	단층파쇄대 (고속도로)	P5-1	P5-2	·인버트 단면 / 굴진장 1.0m - 1.0m ·RING CUT / CD 분할굴착 ·라이닝 40cm(철근보강) ·강관보강 그라우팅 + 휘폴링 ·가인버트 및 영구 인버트 구조물 설치
		F-1	F-2	·단층대 일부통과(F1)과 전체통과(F2)로 구분 ·F2의 경우 인버트 단면적용 ·RING CUT 분할굴착 / 굴진장 1.0m-1.0m ·라이닝 40cm(철근보강) ·TAS(이중관 우레탄) 그라우팅
지하철	단층대 (복선 단면)			·인버트 단면 ·RING CUT 분할굴착 / 굴진장 0.8m-0.8m ·라이닝 50cm(철근보강) ·대구경 강관보강 그라우팅 ·가인버트 / 막장면 슛크리트 + 막장면 록볼트
	단층대 (유친선 단면)			·인버트 단면 ·RING CUT 분할굴착 / 굴진장 0.5m- 0.5m ·라이닝 50cm(철근보강) ·대구경 강관보강 그라우팅 + 차수그라우팅 ·가인버트 / 막장면 슛크리트
고속 철도	단층 Core대			·측벽선진도개 공법 ·자천공 대구경 강관 그라우팅 ·단층 Core대는 Elephant Foot 각부보강 및 하부 록볼트 보강
	단층파쇄대	P5-1	P5-2	·상하반 CD 굴착 / 굴진장 1.0m / 1.0m ·라이닝 40cm(철근보강) ·FRP보강 그라우팅 ·상반 가벽 록볼트 ·필요시 자천공 록볼트/Swellex 볼트
철도	단층파쇄대			·링컷분할 굴착 ·H-125 / 대구경강관다단그라우팅 ·인버트 단면 ·단층대 폭 3m이상인 구간에 적용
	단층대 구간 (3m이상)			·인버트 단면 ·RING CUT 분할굴착 / 굴진장 1.0m ·라이닝 40cm(철근보강) ·대구경 강관보강그라우팅 ·필요시 차수그라우팅 적용
기타	단층파쇄대 (용출수구간)			·연약층, 파쇄대의 용수구간에 적용 ·천공경 $\phi 45\text{mm}$, L=9.0m, 경사각=20° ·주입압력은 최대 10kgf/cm ² ·수발공과 동시적용시 효과적

4. 단층대 구간에서의 붕괴 및 보강대책

4.1 단층대 구간에서의 붕락사례 1

단층에 의한 낙반사례로서, 단층내 협재된 흑연질 충전물은 불연속면의 경면화를 야기시켜, 불연속면의 전단강도 및 마찰각이 현저히 저하되고, 특히 이러한 충전된 불연속면의 방향이 터널 굴진방향과 반대방향으로 발달한 경우에 낙반 가능성이 매우 크게 된다. 또한 용수가 있는 경우에는 흑연질 충전물이 급속히 열화되므로 불연속면을 따라 슬라이딩이 발생하게 된다.

붕락의 원인은 단층파쇄대내 단층점으로 인해 잔류마찰각이 작고, 매끈한 면을 형성하게 되어 자립을 위한 안전율이 급격히 저하되어 붕괴되는 것으로 보인다. 그림 11은 위에서 설명한 원인에 의해서 본선터널구간에서 붕락사고의 예를 보여주고 있다.

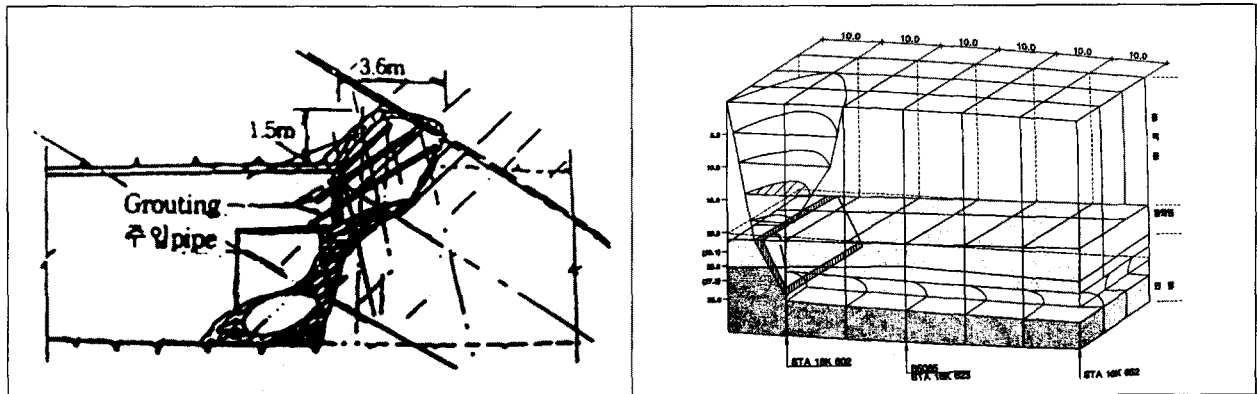


그림 11. 단층경면에 의한 터널 붕락사례

4.2 단층대 구간에서의 붕락사례 2

그림 12에서 보는 바와 같이 OO터널 붕락원인을 분석하면 붕락구간을 통과하는 2개의 단층파쇄대(F3와 F4)가 직접적인 원인이 된 것으로 보이며, 단층들의 방향성으로 추정할 수 있는 붕락형태는 붕락구간에서 두 단층이 교차하면서 형성된 쉼기 형태의 키블릭의 붕락이거나 파쇄대 구간에서의 압괴붕락일 것으로 판단된다.

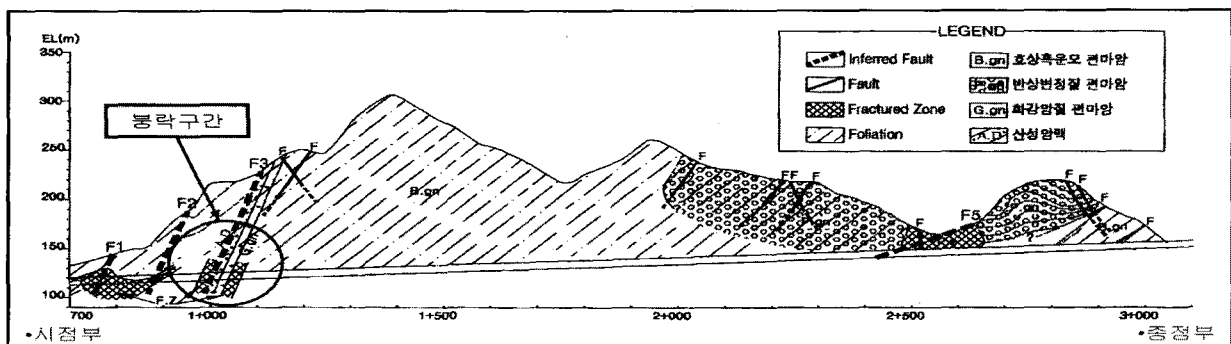


그림 12. 단층교차에 의한 터널 붕락사례

터널에서의 붕락규모를 추정하기 위하여 터널파괴의 직접적인 원인이 된 것으로 판단되는 2개의 단층대를 터널 평면도 및 단면도상에 도시하여(그림 13) 가장 가능성이 높은 파괴의 형상을 추정하였다.

구조지질도에서 나타난 바와 같이 0K+980 부근에서는 터널 굴착 진행방향 우측 측벽부에 위치

하는 NS주향 단층대(F4)와 터널측벽에서 다소 이격된 거리에 있던 NW주향 단층대(F3)가 터널 굴착 방향인 1K+020 지점으로 가면서 교차하며 터널 단면대로 단층대의 중심선이 통과하는 방향성을 나타낸다.

주요 보강공법으로는 봉락구간의 토사를 고결시키고 지반의 아칭효과 증대를 위해 터널내 강화시멘트 밀크 그라우팅을 실시하였으며, 강관의 Beam작용으로 지반 강화 및 상부하중 경감시키기 위해 강관보강 다단 그라우팅을 실시하였다(그림 14).

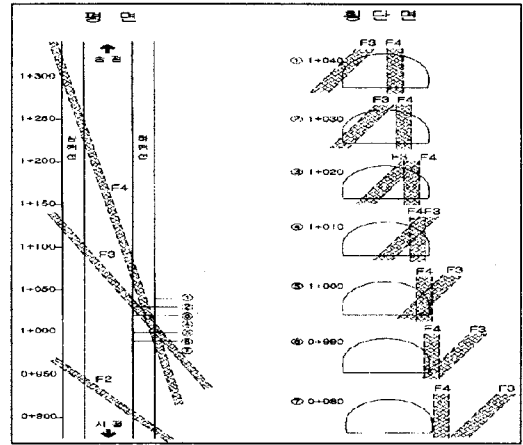
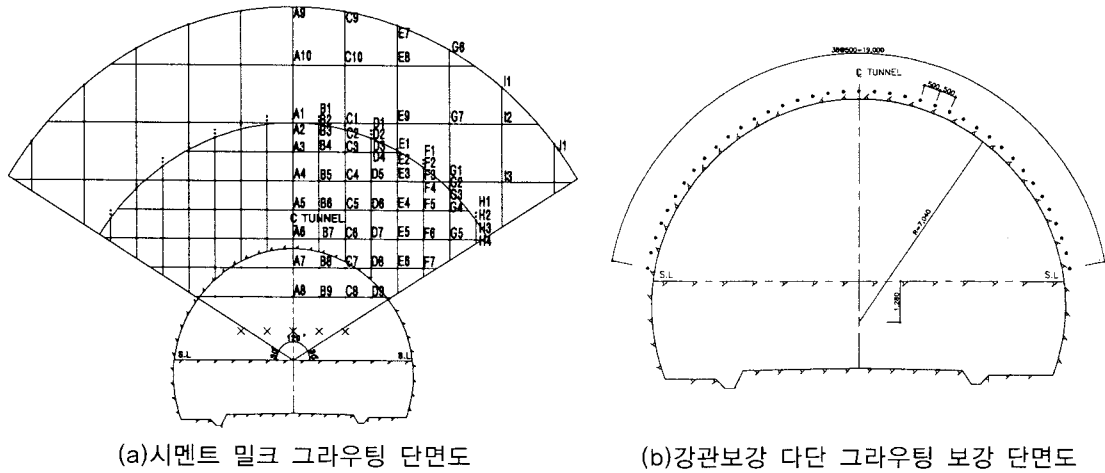


그림 13. 터널 단층 전개도



(a)시멘트 밀크 그라우팅 단면도

(b)강관보강 다단 그라우팅 보강 단면도

그림 14. OO터널 봉락구간 보강도

4.3 단층대 구간에서의 봉락사례 3

중부내륙고속도로 수안보-구미간에 위치한 OO터널의 봉락은 터널 천단부 우측에서 약 1.5×1.5m 크기로 발생하였으며, 터널천단부로부터 약 55m되는 지표부근에 약 9×12m 크기로 지표 함몰이 발생하였다. 터널전방에서 상호 교차되는 절리에 의해 썩기 형태로 형성되어 있는 파쇄대가 막장 전방 3~7m에 위치해 있는 단층파쇄대와 함께 터널내부로 슬라이딩되면서 봉락이 발생하였다. 그림 15와 그림 16는 터널 막장 봉락과 지표함몰을 나타낸 것이다.



그림 15. OO터널 막장 봉락 전경



그림 16. OO터널 상부 지표 함몰 전경

보강공법은 절리와 균열이 발달한 단층파쇄대에 침투주입으로 이완된 파쇄대의 차수 및 전단강도 증진이 가능한 공법을 선정하였다. 터널 내 보강은 터널 굴착작업과 병행하여 시공이 가능한 공법으로 갱내 시공이 가능하고 터널굴진 방향으로 1D 이상 Long Type 보강이 가능하도록 강판단 그라우팅 공법이 실시되었으며, 갱내보강만 수행할 경우 함몰구간의 하중에 의한 응력집중으로 과도한 천단침하 및 지표침하가 발생하고 숏크리트의 휨압축응력과 전단력이 허용치를 초과하므로 굴착시 여굴 및 붕락방지 공법이 병행되는 공법으로서 시공성이 우수한 지반보강 공법인 LW 그라우팅 지상보강을 실시하였다(그림 17).

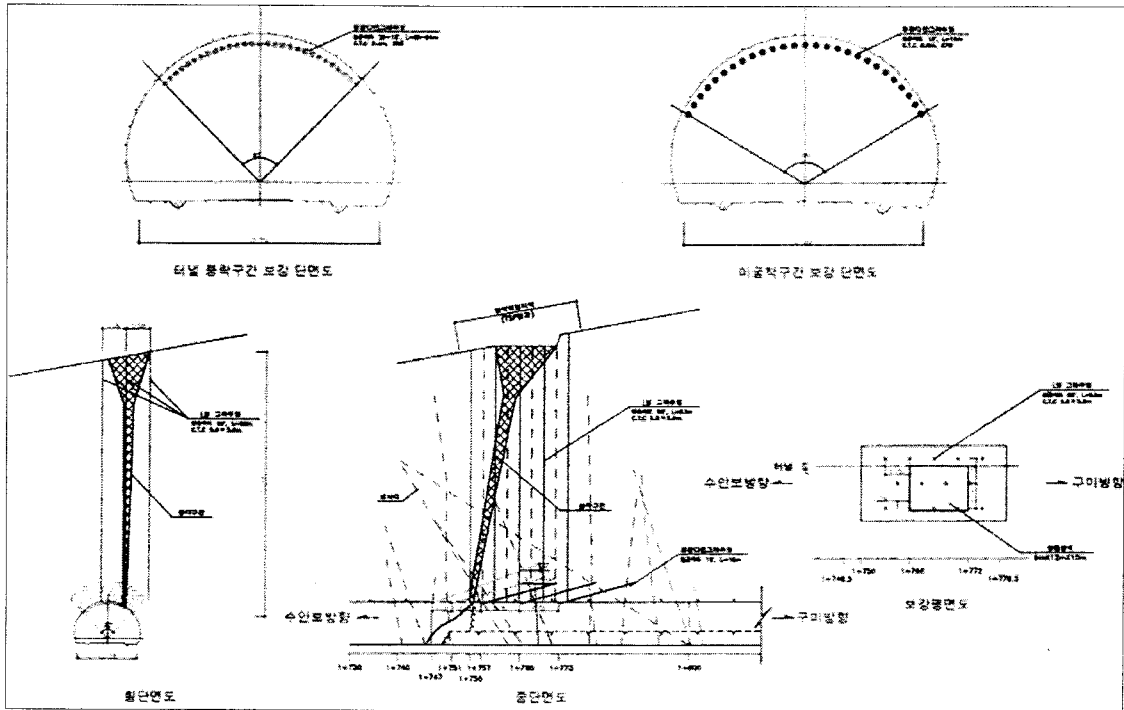


그림 17. 00터널 붕락구간 보강도

5. 결 언

암반내 존재하는 단층은 암반거동에 중대한 영향을 미치게 되며, 특히 단층면내에 충전물이 협재되어 있는 경우에는 암반구조물의 안정성에 보다 심각한 문제를 가져오는 경우가 많다. 이는 단층이 불연속면의 거동과 충전물의 거동이 복합적으로 작용하게 됨으로서 나타나기 때문이다.

본 검토에서는 단층의 공학적 특성을 분석하고, 터널 현장에 대한 붕락사례분석을 통하여 단층대가 터널과 같은 암반구조물에 미치는 영향을 살펴봄으로서, 단층의 공학적 문제점을 고찰하였으며 이를 정리하면 다음과 같다.

■ 단층의 공학적 특성

단층은 불연속면으로서의 공학적 특징을 가지며, 또한 단층파쇄대(fractured zone)나 단층영향대(damage zone)와 같이 일정 규모의 폭과 규모의 zone의 특성을 가진다. 또한 단층대내에는 단층점토와 단층암과 같이 충전물이 협재된 특성을 보인다. 특히 단층점토나 흑연과 같이 물에 의해 쉽게 팽창하거나 열화되는 특성을 가진 경우에는 단층면의 전단저항이 급격히 저하되어 쉽게 미끄러지는 활면(slickenside)을 형성하게 되어 잠재적이면서 급격한 붕괴성의 특징을 가지게 된다.

■ 단층대에서의 문제점

암반구조물에서 단층의 문제점은 일차적으로 암반구조물과의 방향성의 문제, 즉 암반사면의 경우 단층면면과 사면의 방향, 터널의 경우 단층면과 터널의 굴진방향이라 할 수 있으며, 이차적으로 강우나 지하수에 의해 충전물이 장기적으로 열화되므로서 가장 취약한 활동면을 형성하게 된다는 점이다. 이러한 취약한 조건을 가지고 있는 경우, 매우 작은 응력조건의 변화나 외력에 의해서 쉽게 거동을 일으킬 수 있으며, 매우 급격하게 확대되는 대규모 붕괴양상을 보이게 된다.

■ 단층대에서의 보강공법

단층대가 통과하는 구간에서의 안정성을 확보하는 대책으로는 단층대의 규모나 크기에 따라 구분하여, 인버트 단면을 채택하고 굴착공법으로는 링컷 또는 CD 분할굴착을, 보조공법으로 소구경 또는 대구경 보강공법을 적용하도록 하고 있다, 또한 출수가 우려되는 구간에서는 차수그라우팅을 적용하여 안정성을 확보하도록 한다.

■ 단층대에 대한 안전대책

조사 및 설계단계에서 단층의 공학적 특성을 파악하기가 매우 어려우며, 시공중에도 단층의 공학적 특성을 파악하는 일은 쉽지 않다. 따라서 시공중 전문 기술자에 의해 조사 및 관찰을 철저히 수행하도록 하여야 하며, 단층대의 폭이 크거나, 단층가우지가 발달한 경우 그리고 단층대 구간에 용수가 과다한 경우에는 이에 대한 보강대책을 수립하여야만 한다.

특히 암반구조물이 단기적으로 안정성이 확보된 경우라 할지라도 장기간 공사가 진행되는 경우에 단층대가 존재하는 구간을 중심으로 정량적인 관찰(장기 계측 등)을 통하여 장기적으로 암반구조물에 이상 징후 및 변상이 발생하는지에 대하여 계속적으로 확인하도록 하여야 하며, 필요시 추가적인 안전대책이 이루어지도록 하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김영근, 한병현, 2006, '충전된 불연속면과 암반구조물의 안정성' 한국지반공학회 2006년 가을학술 발표회 논문집, pp 205
2. '공사중 터널사고사례' 발표회 논문집, 2001, 한국지반공학회 터널기술위원회
3. '이암/셰일의 공학적 특성 및 문제' 학술세미나 논문집, 2002, 한국지반공학회 암반역학기술위원회
4. '천매암의 공학적 특성 및 문제' 학술세미나 논문집, 2004, 한국지반공학회 암반역학기술위원회
5. 서울지하철5호선 건설공사 제5-2공구 시공감리 종합보고서, 1996, (주)대우엔지니어링, 서울특별시 지하철건설본부
6. 천안-논산간 고속도로 건설공사 제2공구 차령터널 조사 및 보강 설계 보고서, 1999, (주)대우
7. Engineering Properties of Rock, Elsevier Geo-Engineering Book Series Vol. 4, 2005, Lianyang Zhang
8. A Geology for Engineers, F.G.H Blyth and M.H. de Freitas, 7th ed., Elsevier
9. Robert J. Twiss and Eldridge M. Moores. 1992. *STRUCTUREAL GEOLOGY*. New York: W. H. Freeman. pp. 106
10. T. Blenkinsop. 2000. *Deformation Microstructures and Mechanism in Minerals and Rocks*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 6
11. P. B. Attewell and R. K. Taylor, 1984, "Ground Movements and Their Effects on Structures", Survey University Press, USA