

터널 붕락 유형에 따른 보강 대책 분석

- 국내외 터널 붕락 및 보강 사례를 중심으로 -



김은섭
(주)산하이엔씨
설계부 차장



인현진
(주)산하이엔씨
설계부 차장



허종석
(주)바우컨설턴트
터널부 부장



한병헌
삼성건설(주)
토목ENG팀 차장



김영근
삼성건설(주)
토목ENG팀 부장

1. 서론

산업발달로 인한 교통수요의 증가에 비해 산악지형이 많은 국내 여건에 따라, 터널에 대한 수요는 계속 증가하였으며, 우리나라의 터널 설계 및 시공 실적도 많이 축적되어 있다. 또한 많은 설계 및 시공 경험을 통해 터널 기술 또한 많은 발전을 이루었으며, 특히 터널 시공 시 발생하는 각종 변상 및 붕락사고들에 대한 분석 및 대책 수립 연구를 통해, 터널의 안정성을 확보하기 위한 다양한 기술들이 발전되어 왔다.

국내외에서 발생된 터널 붕락 사고는 저토피 구간, 연약층, 파쇄대 구간에서 적절한 보강 없이 무리한 굴진으로 인하여 터널이 붕괴되거나 위험에 직면하는 경우가 많이 발생하였다. 또 한편으로, 사전에 연약 지층을 보강하고, 조심스러운 굴진을 하여도 터널에 작용하는 하중을 추정하기 힘들고, 터널 굴진 방향과 수직인 파쇄대의 출현 등 지반의 불확실한 특성상 터널 붕락이 불가피

하게 발생하는 경우가 많이 발생하고 있는 실정이다.

예상치 못한 터널 붕락이 발생하는 경우, 터널 설계조건 및 시공상황 등의 제반여건을 고려하여 최적의 보강 대책을 수립하여 향후 안전한 터널 구조물을 확보하는 것이 가장 중요한 문제라 할 수 있으며, 특히 적절한 보강공법을 선정하기 위해서는 터널 붕락이 발생한 지질 및 지반조건 뿐만 아니라 터널 붕락 유형의 특성을 고려하는 것이 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

본고에서는 국내외 터널 변상 및 붕락과 이에 따른 보강 사례들을 수집하여, 이를 붕락유형별로 분류하고, 붕락 유형별 보강, 복구 대책을 분석하였다. 물론 설계 및 시공 시 정밀한 조사와 계측을 통해 붕락을 예측하고 보강계획을 수립하여 붕락을 사전에 방지하는 것이 가장 바람직한 것이다. 하지만 변화가 심한 지반의 완벽한 파악에는 한계가 있으므로 붕락사고가 발생했을 때, 신속하게 효과적인 대책을 수립함으로써 터널 안정성을 확보하는 것 역시 매우 중요하다.

현재 터널 붕락에 관한 연구는 주로 터널 붕락의 원인 분석 및 붕락 형태, 예방을 위한 보강에 관한 내용이 주를 이루고 있지만, 본고에서는 국내외 다양한 터널 붕락 사례를 수집하고 분석하여 터널의 변상 및 붕락 유형별 보강 및 복구대책을 면밀히 검토하므로써 터널 붕락 구간에 대한 최적의 보강공법 선정시 활용할 수 있도록 하였다.

2. 터널 붕락 유형 분석

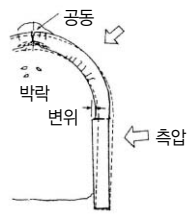
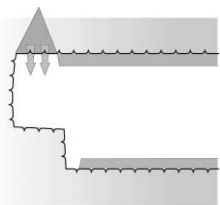
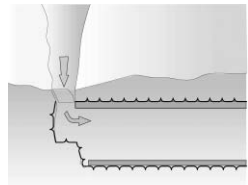
일반적으로 터널의 변상 및 붕락은 발생 시점, 규모, 원인 등에 의해 구분될 수 있다. 즉 터널의 붕락은 크게 시공 중 붕락과 완공 후 운영 중 붕락으로 나눌 수 있는

데, 대부분 시공 중 발생한 경우가 주류를 이루고 있다.

터널 붕락의 규모는 작은 규모의 여굴 발생에서부터 대규모의 붕괴에 이르기까지 다양하다. 설계상의 허용 굴착량으로 고려되는 여굴과 허용 굴착량을 벗어난 과대여굴, 터널 측벽이나 천장부에서 과도한 낙반을 의미하는 붕락, 터널 내부에서 발생한 과대 여굴이나 붕락이 지표면까지 연장되어 지표면에 과대한 함몰을 초래한 경우인 함몰 붕괴 등으로 구분할 수 있다

터널 파괴 발생 원인 및 과정에 따라 구분하면 지반의 절리 방향이 터널의 굴진 방향과 불리하게 형성되어 발생하는 슬라이딩, 슛크리트층 하부 기초의 침하에 따른 천장부의 전단파괴, 굴착면의 지지력 부족 및 과다한 지하수유입에 기인한 토사층의 점진적인 파괴, 주변지반의 크리프거동에 의한 크리프 파괴 등이 있다.

표 1. 터널 변상 및 붕락 유형

구 분	형 상	특 징
터널 변형		<ul style="list-style-type: none"> · 점진적인 지반이완 · 지하수 및 지질 구조에 의한 지반 이완으로 지보재 작용하중 증가 · 설계시와 다른 지반상태(지반불량)
터널 낙반 (막장면 붕락포함)		<ul style="list-style-type: none"> · 불연속면 및 절리군에 의한 슬라이딩 및 썩기 파괴 · 연약대 또는 파쇄대에서의 슬라이딩 · 굴착후 시간지연으로 인하여 터널 주변지반이 자립력을 상실하면서 막장면 전체에서 낙반 발생
터널 함몰형 낙반 (지표함몰동반)		<ul style="list-style-type: none"> · 터널규모에 비해 토피고가 낮아 터널막장 상부 표토층 함몰 · 연약대 및 파쇄대 지반에서 지반의 전단강도 약화가 진행되면서 이완하중 증가로 터널 낙반 및 지표 함몰

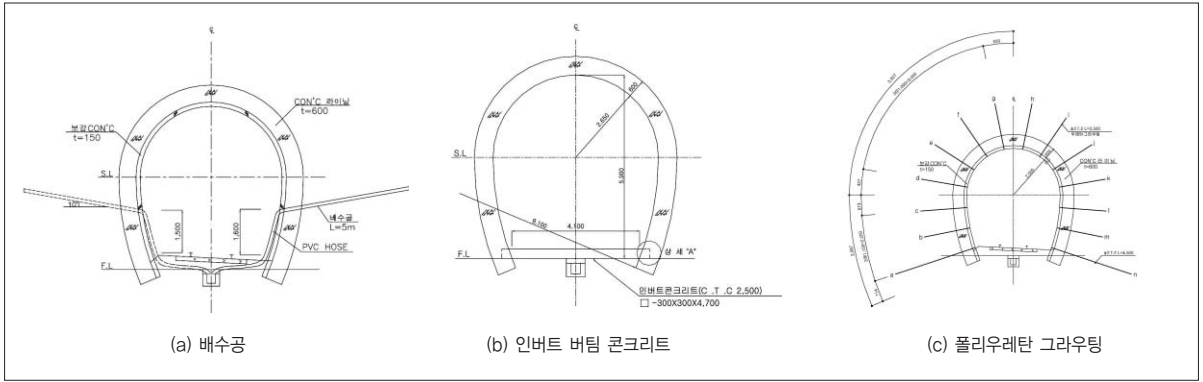


그림 1. 산골터널 보강도

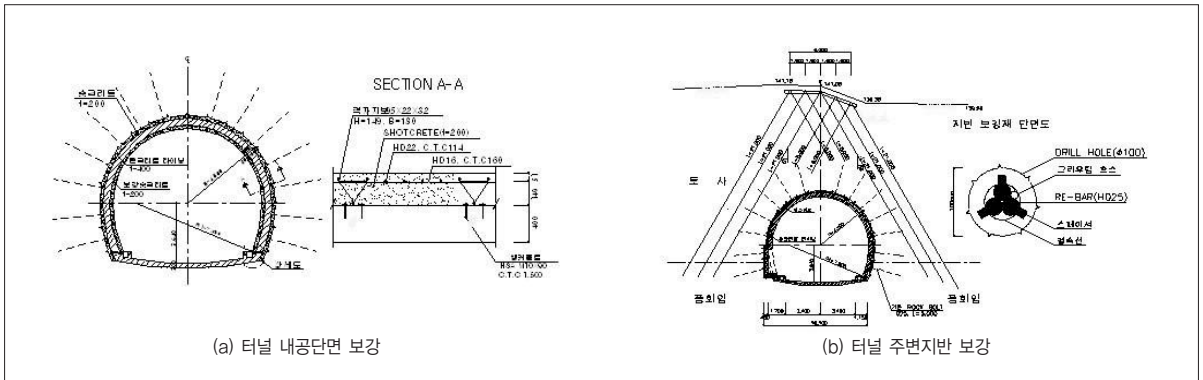


그림 2. 안산터널 보강도

본 고에서는 수집자료 개수의 한계 등을 고려하여 터널 붕락의 규모와 원인에 따라 다음 표 1과 같이 터널 변형, 터널 낙반, 터널 함몰형 낙반 등 3개의 유형으로 분류하였다.

3. 터널 붕락유형별 보강 사례

3.1 터널 변형 사례

1) 산골터널

영동선 산골터널은 1963년에 준공된 철도터널로 1995

년 11월~1996년 3월에 실시된 정밀안전진단 결과 터널 천단부에 중단 균열이 관측되고, 4개월간 3.8mm의 내공축소 변위가 계속되어 터널 라이닝이 건축한계선을 침범하였다. 변형 원인을 분석한 결과, 여러매의 Trust에 의해 형성된 넓은 파쇄대와 지하수에 의한 점토 유실로 인한 지반 이완현상으로 터널 측벽부에 높은 압력이 작용함으로써 변상이 진행된 것으로 판단되었다.

본 터널의 내공단면이 이미 건축한계 이내로 축소되어 있으므로 강지보공이나 슛크리트 등을 시공할 수 없으므로 배면지반의 강도 증가를 통한 안정화 공법을 적용하였다. 배수공을 설치하여 라이닝에 작용하는 하중을 저감시키고, 보강 영역 구간에 자갈도상을 제거하고

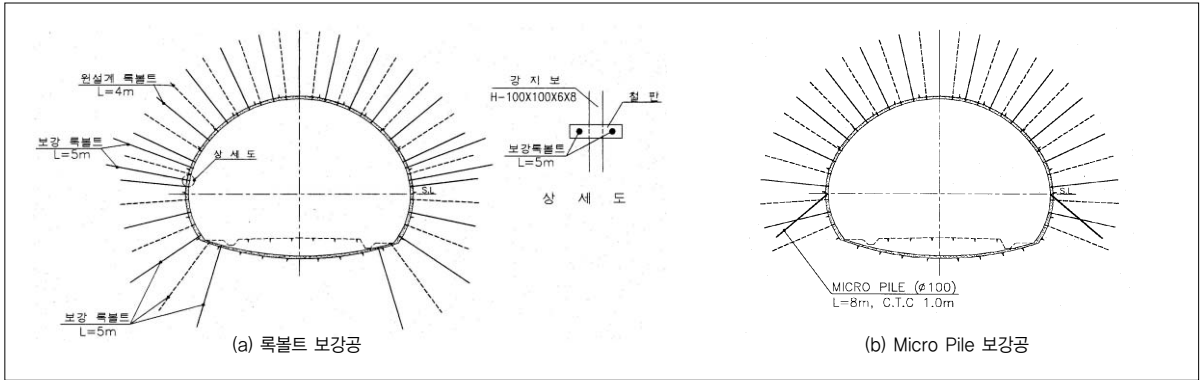


그림 3. 신광터널 보강도

인버트 버팀 콘크리트를 타설하여 인버트를 폐합하였으며, 라이닝 배면 지반 소규모 공동충진 및 지반강화, 누수방지를 위해 폴리우레탄 그라우팅을 실시하고, 기존 라이닝에 흠을 파고 C.T.C 1m 간격으로 래티스거더를 설치한 후 채움 모르터를 충전하였다.

2) 안산터널

안산터널은 반월역과 상록수역(금정-안산간 철도) 사이에 위치한 복선단면의 철도터널로 1988년에 준공되었다. 전체적으로 터널 천정부 공동, 양생 중 건조수축, 누수 등에 의한 재료열화 등이 복합적으로 작용하여 터널 라이닝의 균열 및 배면 공동이 발생하였으며, 일부 구간은 시공 중 붕락으로 인해 이 부분의 지반이완이 라이닝 균열의 요인으로 작용하였다.

손상의 보강을 위해 우선 배면 공동을 충전하고, 콘크리트 라이닝 균열부 및 열화부를 보강하였다. 그리고 지반 이완으로 인해 변상이 발생한 구간은 격자지보 및 슛크리트, 강관보강다단 그라우팅으로 터널 내공단면을 보강하였으며, 그라우팅을 이용하여 터널 주변의 지반을 보강하여 지반의 Ground Arching 효과를 증대시켰다.

3) 신광터널

서해안 고속도로 건설공사중 신광터널에서 상부굴착 완료 후 하부 굴착 중 일부 구간에서 과대한 터널 변위가 발생하였고, 터널 측벽부 및 천단부에 수직방향의 균열이 다수 발생하였다. 굴착을 중단하고 토사로 되메움을 실시한 상태에서, 변위발생 원인을 분석하고 기변위 발생구간 및 추가 변위 발생 우려구간에 대한 굴착 및 보강방안을 수립하였다.

변상 발생의 주원인은 실제 터널구간의 지반상태가 조사당시 예측한 지반상태에 비해 전반적으로 불량하다는 것이었다. 터널구간의 지반이 수차례의 구조운동과 관입활동의 영향으로 습곡구조, 호층구조 등과 같은 매우 복잡한 지층형태를 이루고 있었다.

보강공법은 주로 터널의 보강에 중점을 두어 적용되었다. 인버트를 폐합시켜 터널측벽 변형 및 침하를 억제하였으며, 강지보 좌우에 보강 록볼트를 설치하고 철판을 이용하여 강지보와 용접·고정시켜 지반보강 효과뿐만 아니라 강지보의 변형 억제효과도 얻고자 하였다. 또한 터널내에서 시점 방향으로 하향경사로 Micro Pile (φ100, L=8m)을 설치하여 활동이 예상되는 부분의 전단저항력을 증대시켜 불안정한 주변지반을 보강하였다.

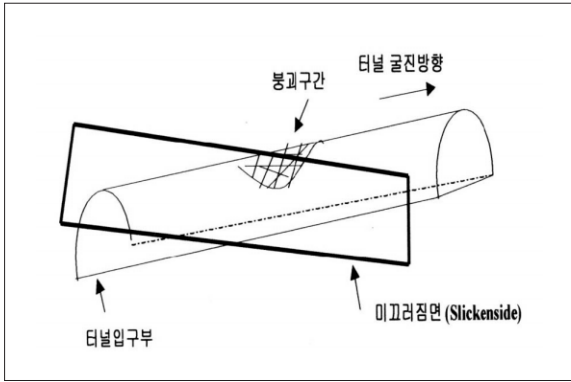


그림 4. 고속도로 OO터널 단층방향(10°)

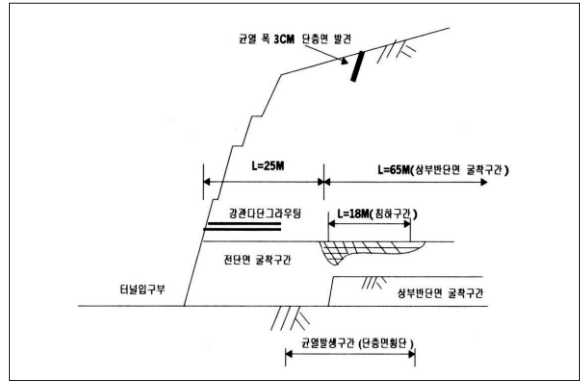


그림 5. 고속도로 OO터널 보강도

4) 고속도로 OO 터널

연장 857m인 2차선 병렬터널로 상부 반단면을 약 90m 선굴착하고 하부반단면을 굴착하던 중 입구부 17m 후방지점에서 직후방으로 26m 구간에 걸쳐서 균열 및 침하가 15~50cm 발생하였으며, 지표부에도 균열폭 3cm의 침하가 20cm 정도 발생하였다.

변상원인은 그림과 같이 갱구부 터널측과 10° 정도로 교차하고 터널 좌측(중점부를 향하여)으로 70° 정도 경사진 단층을 따라 파괴가 발생하여 그 미끄러짐면을 경계로 후방에는 보강공법이 생략되고 강지보재와 숏크리트로만 지지된 상태에서 지보공이 상부 하중을 지탱하지 못함으로서 단층과 모암에서 절리면을 따라 이완이 발생한 것으로 분석되었다.

주요 보강방법으로는 균열 발생구간에 강관다단그라우팅(L=12m)을 10m 간격으로 설치하여 미끄러짐면의 활동을 방지하였다.

3.2 터널 낙반 사례

1) 차령터널

천안~논산간 고속도로의 차령터널 시공 중 2개의 단층파쇄대(F3과 F4)가 교차하면서 형성된 썩기 형태의 붕락이 발생하였다.

주요 보강공법으로는 붕락구간의 토사를 고결시키고 지반의 아칭(Arching)효과 증대를 위해 터널내 강화시멘트 밀크 그라우팅을 실시하였으며, 강관의 Beam작용으로 지반강화 및 상부하중 경감시키기 위해 강관보강 다단 그라우팅을 실시하였다.

2) 태봉터널

태봉터널은 울진군 죽변~북면간 도로 4차로 확장 및 포장공사 현장의 터널로서 막장굴진 작업 중 취약한 천단부와 막장상부를 기점으로 Sliding이 발생하였다. 낙반원인은 극히 불량한 암질조건 즉 Graphite Seam이 협재된 구간에서 수분을 흡수하여 연약화된 Graphite가 굴착에 따른 개방력에 저항하지 못해 진행성 파괴가 발생한 것이다.

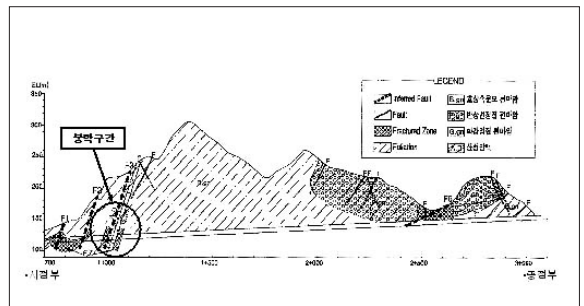


그림 6. 차령터널 지질단면도

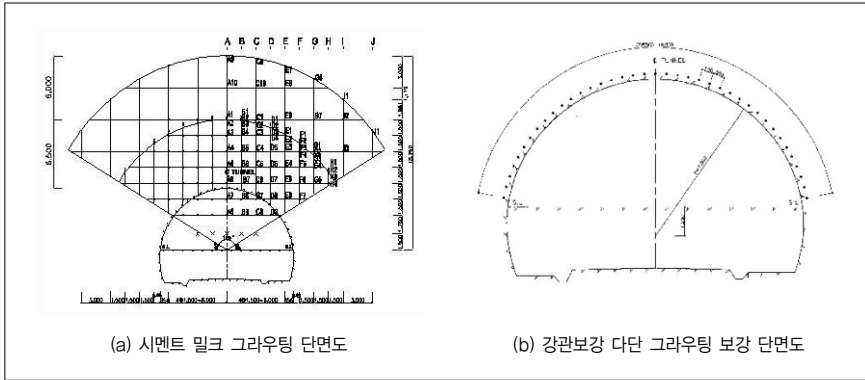


그림 7. 차령터널 보강도



그림 8. 태봉터널 천단부 낙반현황

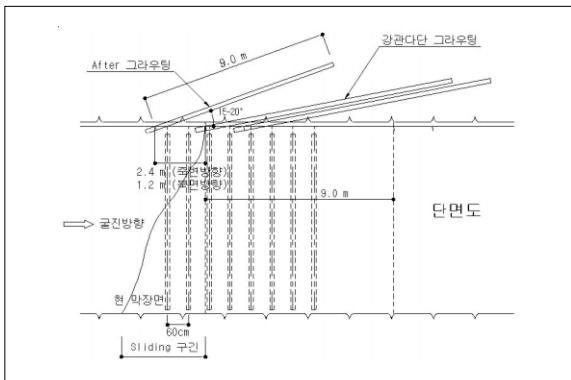


그림 9. 태봉터널 보강도

보강은 차수 및 지반고결을 위해 After Grouting (Back Fill Grouting)을 실시하고, 강관다단그라우팅

으로 막장전방 고결에 의한 지반아치를 형성하였다.

3) 고속도로 OO터널

연장 1400m의 2차선 병렬터널로 전반적으로 보통~양호한 암반층에 굴착하였으나, 발파후 막장면의 버력을 처리하는 과정에서 입구부 기준으로 223m 지점에서 약 7m구간에 걸쳐 급작히 썩기형태의 암반블럭 낙반이 발생하였다.

낙반원인은 터널굴진에 불리한 방향의 절리와 지보재의 지보능력 부족으로 인한 것으로 분석되었다. 낙반부는 낙석부분에 대하여 록볼트의 길이를 4m에서 6m로 연장하고, 와이어 메쉬와 슛크리트로 낙반된 부분을 채워 보강하였다.

4) 일본 도로터널

소산야 터널은 1967년에 준공된 일본 일반국도 127호선의 터널로서, 1990년 터널 천단부에서 길이 6.6m 폭 5.5m에 걸쳐 붕락이 발생하였으며, 붕락 시 강지보공 상호 연결부에서 파단이 일어났다.

붕락원인으로는 모래혼합 실트암과 실트 혼합의 사암이 서로 층을 이루며 고결도가 낮은 불량한 지반조건에 의해, 터널 천정부부의 공극이 확대되기 쉬운 경향이 있으며 누수 등에 의해 이완·공극이 넓고 동시에 지압·편압이 커져서 붕락이 발생하였다.

보강은 낙반구간과 낙반외 구간으로 구분되어 실시되었다. 낙반구간은 슛크리트·에어몰탈 타설, 약액주입, Rock Bolt 보강공 설치, 하단 보강공 설치, 철망 아치 지보공 설치, 콘크리트 라이닝 설치 등이 수행되었으며, 낙반외 구간은 콘크리트 라이닝공 설치와 공극 및 배면 주입이 수행되었다.

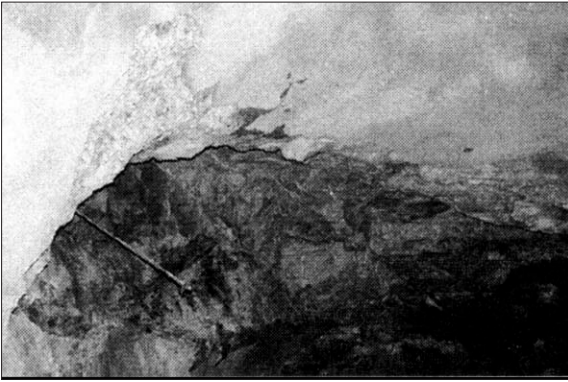


그림 10. 고속도로 ○○터널 낙반 현황

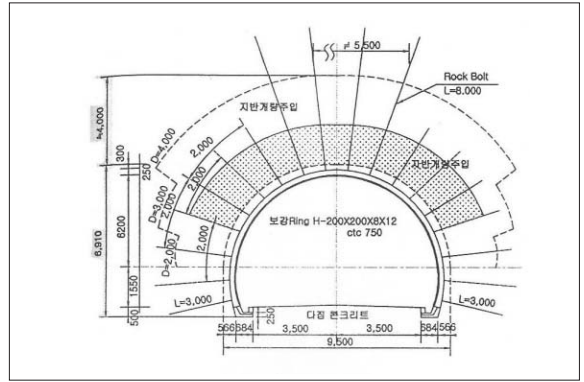


그림 13. 일본 도로 터널 낙반구간 보강대책

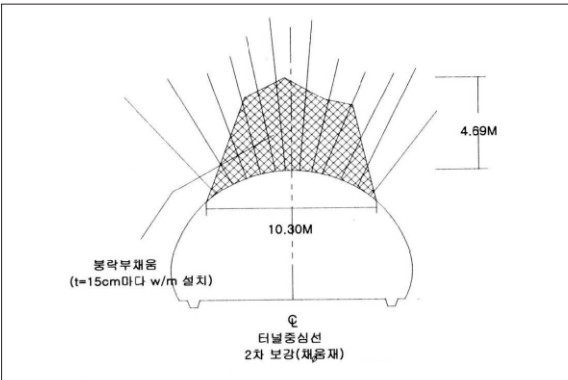


그림 11. 고속도로 ○○터널 낙반구간 보강도

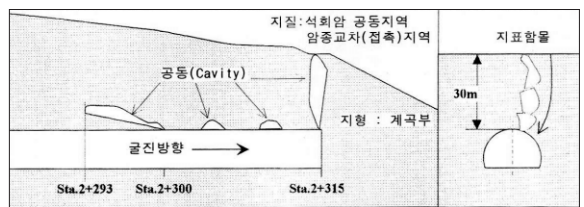


그림 14. 중앙고속도로 ○○터널 터널붕락 개요도

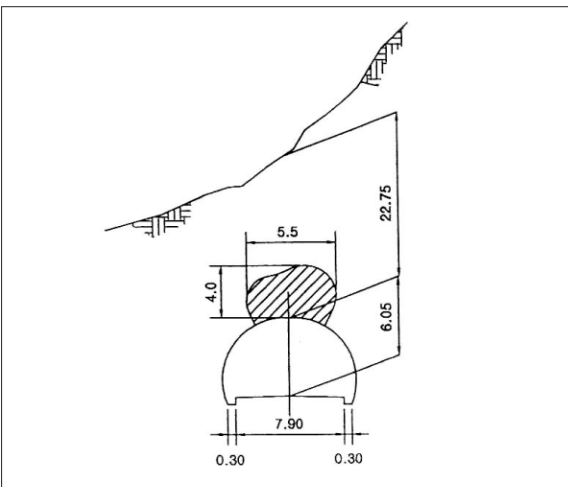


그림 12. 일본 도로 터널 낙반 현황

3.3 터널 함몰형 낙반 사례

1) 중앙고속도로 ○○터널

규암층과 석회암층을 통과하는 2차로 병렬 고속도로 터널에서 하행선 굴착중 터널 천장부에 반원형 석회암 공동 관찰되고 계속 굴진 중 막장토사유출에 따른 붕락 사고가 발생하였다. 지표면에서 함몰된 공동의 깊이는 2~3m, 직경은 2.5m이었으며, 터널막장에서 붕락부위 길이는 5m~6m였다.

보강은 지표 및 터널부 그리고 붕락범위에 따른 보강 Zone을 구분하여, 지상 시멘트밀크그라우팅과 강관다 단그라우팅, 터널 내 강관다단그라우팅이 실시되었다. 그라우팅 시공시 주입재가 어느 정도 균질하게 주입되지 않을 경우 붕괴부의 되메움토가 터널에 하중으로 작용할 경우가 발생 할 수 있으므로 지상 및 갱내에서 강관 응력재를 삽입하여 토괴의 거동에 저항토록 하였다.

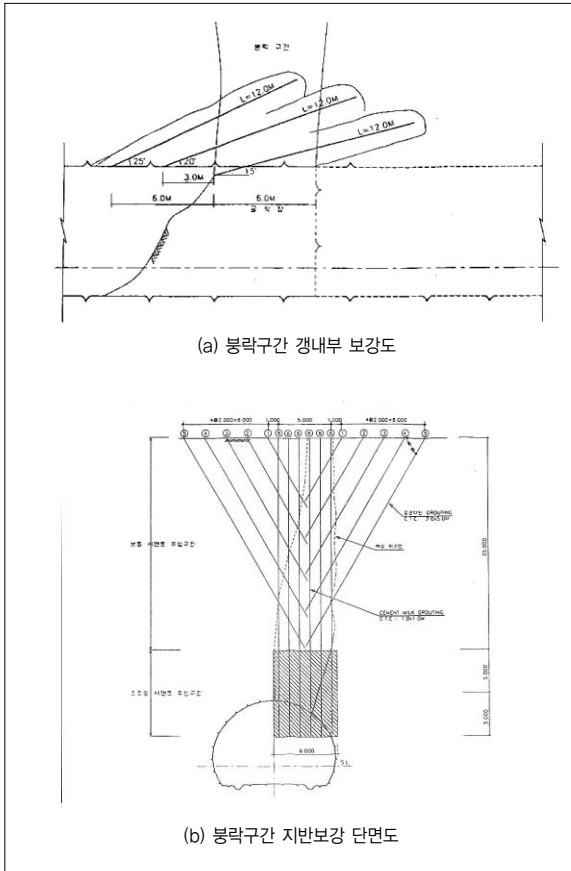


그림 15. 중앙고속도로 OO터널 붕락구간 보강도

2) 장연터널

중부내륙고속도로 수안보-구미간에 위치한 장연터널의 붕락은 터널 천단부 우측에서 약 1.5×1.5m 크기로 발생하였으며, 터널천단부로부터 약 55m되는 지표부근에 약 9×12m 크기로 지표 함몰이 발생하였다. 터널 전방에서 상호 교차되는 절리에 의해 썩기 형태로 형성되어 있는 파쇄대가 막장 전방 3~7m에 위치해 있는 연약대와 함께 터널내부로 Sliding되면서 붕락이 발생하였다.

보강공법은 절리와 균열이 발달한 파쇄대에 침투주입으로 이완된 파쇄대의 차수 및 전단강도 증진이 가능한



그림 16. 장연터널 막장 붕락 전경



그림 17. 장연터널 상부 지표 함몰 전경

공법을 선정하였다. 터널 내 보강은 터널 굴착작업과 병행하여 시공이 가능한 공법으로 갱내 시공이 가능하고 터널굴진 방향으로 1D 이상 Long Type 보강이 가능하도록 강관다단그라우팅 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.

3) 고속도로 OO 터널

연장 795m의 고속도로 2차선 병렬터널 붕락과 지표

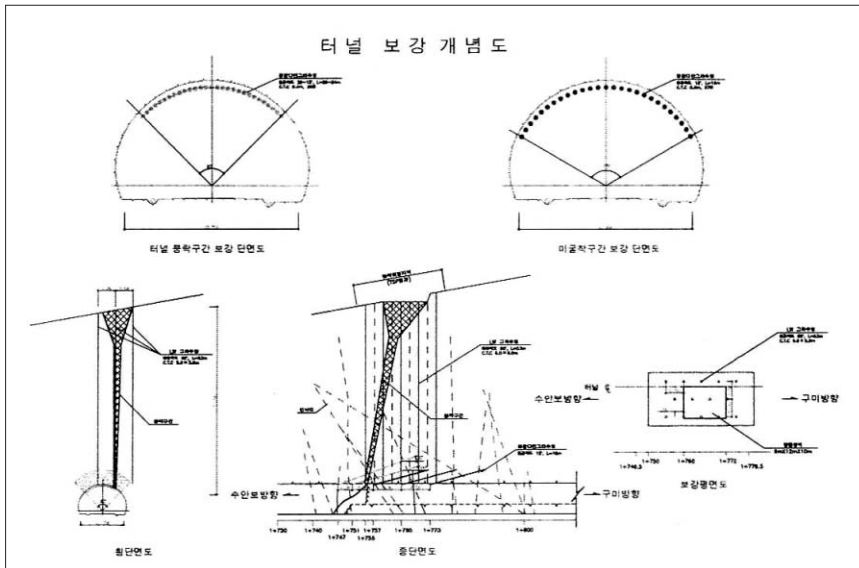


그림 18. 장연터널 보강 개념도

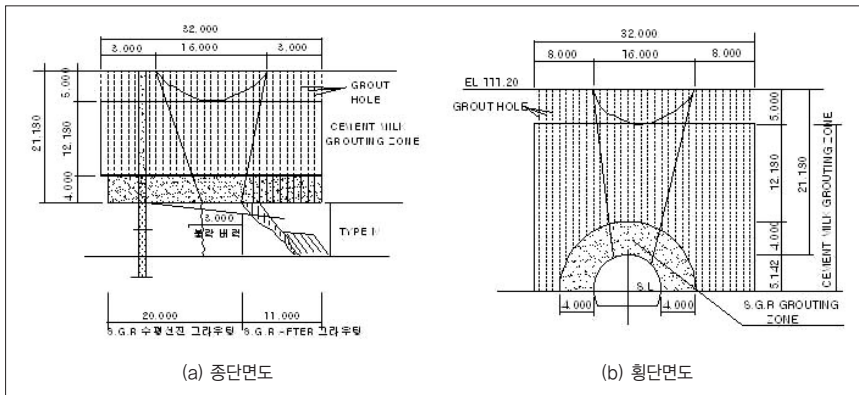


그림 19. 고속도로 ○터널 봉락구간 보강도

함몰이 발생하였다. 터널 천단부의 지반이 풍화토에 가깝고 터널 종방향으로 지층의 변화가 심하며, 봉락 당일 70mm 정도의 강우가 내림으로서 지반의 결합력 및 전단강도가 급격히 감소하면서 슛크리트가 경화되기 전 파쇄대의 이완에 의해 슛크리트가 지보능력을 상실하여 봉락 및 함몰이 발생하였다.

보강 대책으로 토사층의 주입시 충전효과를 고려하여 시멘트믹크(CTC 1000mm간격)로 터널 상부 연약지반

을 지상에서 보강하고, 터널 굴착시 안정성이 충분히 확보되도록 예상 봉락 가능 범위에 대하여 터널내부에서 침투성이 양호하고 균질한 지반개량이 가능한 SGR공법과 Pipe Roof공법을 적용하였다.

4) 부산지하철 터널
설계시 예측되지 못한 터널 상부 지반의 불량으로 인해 굴착 중 봉락이 발생하였다. 봉락구간 토사 되메움 후 봉락구간 및 봉락외 구간에 보강을 실시하였다.

봉락구간은 유입된 봉락 토사를 제거하고 상반굴착 완료 후 인버트를 폐합하였으며, 추가 Rock Bolt를 설치하여 보·아치형성 작용과 내압작용효과를 증진시켰다.

미시공구간은 지상보강으로 터널상부에서 6m 이내의 해성퇴적층 및 풍화토지반에 J.S.P 그라우팅 실시하고 G.L. -0.2m에서 터널상부 1m까지 Micro Pile을 시공하였으며, 터널보강으로 Rock Bolt설치 및 상반굴착후 인버트 폐합(Shotcrete 타설, t=10m)과 터널 아치부에 강관보강다단그라우팅(횡방향 C.T.C=40cm, 종방향 C.T.C=6m, L=12m) 시공하였다. 또한 돌발적인 용수 배수 및 지하수위 저하방지를 위해 선진수발공을 적용하였다.

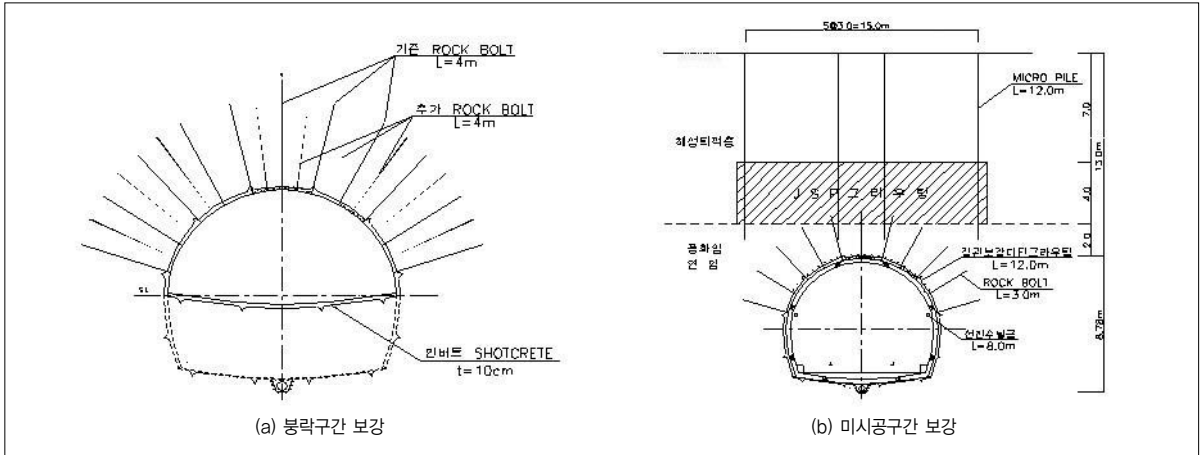


그림 20. 부산지하철 터널 보강도

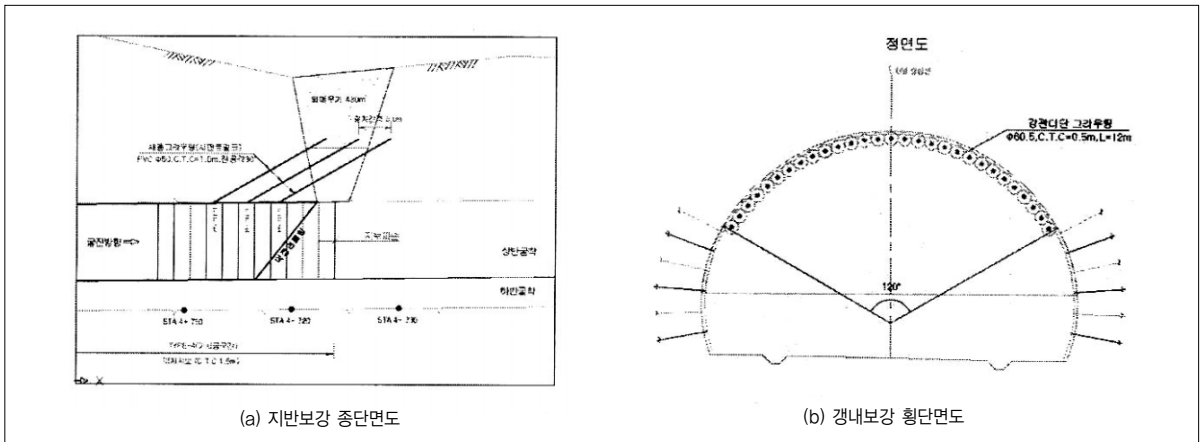


그림 21. 국도 OO터널 보강도

5) 국도 OO 터널

편마암과 흑운모 화강암을 통과하는 터널로서 터널 굴진 중 천단에서 붕락이 발생함과 동시에 상부 지표가 함몰되었다. 함몰 원인은 지하수위가 높은 상태에서 터널 굴진시 응력해방에 의해 썩기형 파괴가 발생한 것으로 현장 압판정시 막장의 상태가 비교적 우수하게 나타나 파쇄대 구간에 대한 예측이 어려웠다.

보강 대책으로 지반보강 및 갱내보강, 지보패턴 변경을 실시하였다. TSP 탐사결과 붕락부 이완구간, 지표

함몰부 되메우기 구간에 시멘트밀크 그라우팅으로 지반을 보강하였다. 그라우팅 채움 구간과 이완영역을 대상으로 터널 내에서 대구경 강관다단을 우산망 형태로 보강하였으며, 당초의 지보패턴을 하향 조정하였다.

6) 대만고속철도 터널

총연장 1,231km인 대만 중서부의 고속철도 터널 상반 굴착 완료 후 터널 붕괴가 발생하여 지표면의 함몰이 일어났다. 침투수에 의해 터널천단부에서 발생한 붕락

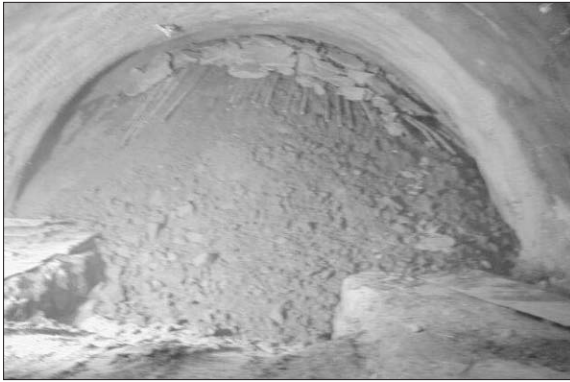


그림 22. 대만고속철도 터널 막장 붕락 전경



그림 23. 대만고속철도 터널 상부 지표 함몰 전경

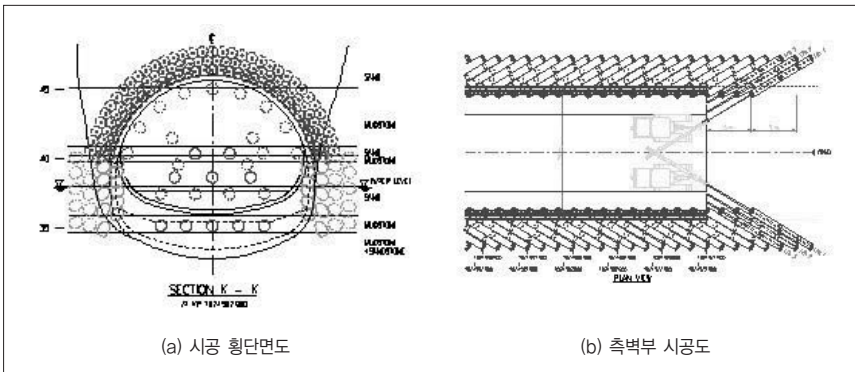


그림 24. 대만고속철도 터널 제트그라우팅 시공도

에 의해서 굴착면 주변지반에 아치를 형성시키지 못하거나 자립시간내에 지보설치가 불가능한 지반에서는 지반을 인위적으로 보강하거나 추가의 지보재를 설치함으로써 NATM 개념의 적용이 가능한 지반으로 개량한 후 터널을 굴진해야 한다.

과 지하수의 유입이 터널상부의 사암층에 공동을 발생시켜 지표까지의 함몰을 일으켰다.

주요 보강방법으로 터널 내에서 고압(펌프 : 380~450 bar, 노즐 : 240~290 bar)의 수평 제트그라우팅(single jet system-no air pressure)을 실시하여 터널 주변 지반을 보강하였다.

4. 터널 붕락유형별 보강대책 분석

NATM 공법의 기본원리는 굴착 후 굴착면 주위에 지보를 적절히 설치함으로써 굴착면 주변의 지반에 지반아치를 형성시켜 터널을 안정시키는 것이다. 어떤 요인

터널 붕락은 지반보강이 미흡하거나, 지보폐합시기를 놓쳐 터널 변형 및 파괴로 인해 낙반과 붕락이 발생하게 된다. 따라서 터널 변형 및 붕락이 발생한 경우 그 유형에 따라 손상 및 파괴영역을 보수하고 추가 지보재 설치를 통해 터널 지보능력을 향상시키거나, 터널 내 또는 지상에서 주변지반을 개량하여 터널 안정성을 재확보해야 한다.

터널 변형 및 붕락에 따른 주요한 보강사례를 정리하면 표 2와 같다. 터널 변형이 발생한 경우 주로 지보능력 향상을 위해 지보 보강량을 증대시키며, 주변지반 전단강도 증대 및 하중분산을 위해 터널 배면 공동 충전 및 주변 지반보강을 실시한다. 드문 경우지만 터널내 주변 지반보강이 어려운 경우 지상에서 터널주변지반을

표 2. 터널 붕락유형별 보강 사례 - 터널 변형

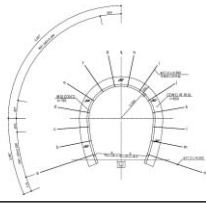
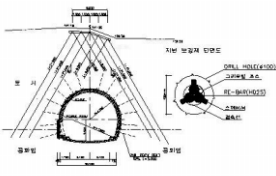
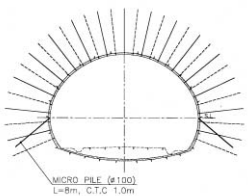
구 분	터널명	개요도	적용 보강공법
터널 변형	산골터널		<ul style="list-style-type: none"> · 배수공 설치 · 인버트 버팀 콘크리트설치 · 폴리우레탄 그라우팅 · 래티스거더 설치
	안산터널		<ul style="list-style-type: none"> · 경량기포모르터 주입 · 콘크리트라이닝 열화부 보강 · 격자지보+췁크리트타설 · 지반보강재를 이용한 터널주변지반 보강
	신광터널		<ul style="list-style-type: none"> · 인버트 폐합 · 록볼트 보강 · 터널내 마이크로 파일 · 콘크리트 라이닝 철근배근

표 3. 터널 붕락유형별 보강 사례 - 터널 변형

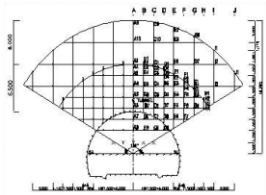
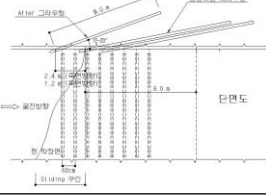
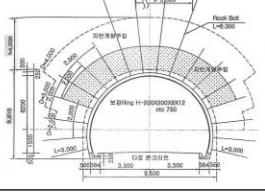
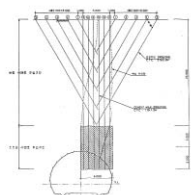
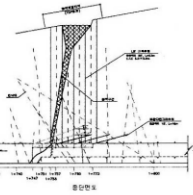
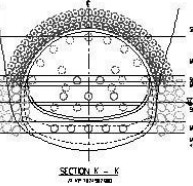
구 분	터널명	개요도	적용 보강공법
터널 낙반	차령터널		<ul style="list-style-type: none"> · 시멘트 밀크그라우팅 · 강관보강 다단 그라우팅 · 지보 보강량 증대 · 콘크리트라이닝 철근 배근
	태봉터널		<ul style="list-style-type: none"> · After Grouting(Back Fill Grouting) · 강관다단그라우팅
	소산야터널		<ul style="list-style-type: none"> · 췁크리트, 에어몰탈 타설 · 약액주입 · Rock Bolt 보강공 · 하단 보강공 · 철망 아치지보공 · 콘크리트 라이닝 설치

표 4. 터널 붕락유형별 보강 사례 - 터널 변형

구 분	터널명	개요도	적용 보강공법
터널 함몰형 낙반	중앙 고속도로 ○○터널		<ul style="list-style-type: none"> · 지상 시멘트밀크그라우팅 · 지상 강판다단그라우팅 · 갱내 강판다단그라우팅
	장언터널		<ul style="list-style-type: none"> · 지상 LW그라우팅 · 갱내 강판다단그라우팅
	대만 고속철도 터널		<ul style="list-style-type: none"> · 수평제트그라우팅 분사압력 : 380~450bar(펌프), 240~290bar(노즐)

보강하기도 한다.

터널 낙반의 경우 주로 낙반 여굴부에 채움 그라우팅을 실시한 후 낙반부 고결 및 강화를 통한 주변지반 전단강도 증대 및 하중분산을 위해 주변 지반보강을 실시한다. 이와 병행하여 지보 보강량 증대를 통해 지보능력을 향상시킨다.

터널 함몰형 낙반의 경우 함몰부의 고결 및 강화를 통해 상부지반의 전단강도를 강화시키고 낙반토사의 하중작용을 방지한다. 상부지반의 보강은 상부 지표면에서 주로 이루어지며 토피가 낮은 함몰의 경우 갱내에서 터널 상부지반을 보강한다. 함몰부 보강과 함께 터널 주변 지반보강과 지보량 증대도 같이 실시되는 경우가 많다.

5. 결 언

국내의 터널 변상 및 붕락과 이에 따른 보강 사례들을 수집하여, 이를 붕락유형별로 분류하고, 붕락 유형별 보강, 복구 대책을 분석하였다.

수집자료 개수의 한계 등을 고려하여 터널 붕락의 규모와 원인에 따라 다음의 3가지 유형으로 분류하였다.

- ① 터널의 과도한 변형과 라이닝 균열 현상이 나타나는 터널 변형
- ② 터널 천단부 및 측벽부의 낙반과 막장면 붕락 등을 포함하는 터널 낙반
- ③ 터널 낙반과 동시에 지표면 함몰이 발생한 터널 함몰형 낙반 등

터널 붕락의 원인은 주로 지반보강이 미흡하거나, 지보 폐합시기를 놓쳐 터널 변형 및 파괴로 인해 낙반과 붕락

이 발생하였으며, 따라서 보강은 붕락 발생 유형에 따라 손상 및 파괴영역을 보수하고 추가 지보재 설치를 통해 터널 지보능력을 향상시키거나, 터널 내 또는 지상에서 주변지반을 개량하는 공법을 실시하였다.

터널 변형에 대해서는 지보 보강량을 늘리고 보조공법을 통해 주변지반을 보강하였으며, 터널 낙반이 발생한 경우 보조공법을 통해 낙반부를 보강하고 필요시 지보 보강량을 증가시켰으며, 터널 함몰형 낙반의 경우 붕락부 고결화 및 강화(터널 상부지반보강)와 보조공법을 통한 터널 주변지반보강을 실시하였다.

터널 붕락을 사전에 방지하는 것이 가장 바람직하겠지만, 붕락사고가 발생했을 때 붕락 원인과 규모에 따라 효과적인 보강 계획을 수립하는데 앞서의 붕락유형별 사례 분석이 참고가 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김영근, 백기현, 김성운, 2001, 석회암 공동지역에서의 터널 붕락사고 및 보강사례, 공사중 터널의 사고사례 발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 27-36
2. 박남서, 하은룡, 김은섭, 2001, 터널 붕락에 따른 보강설계 및 시공사례, 공사중 터널의 사고사례 발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 15-26
3. 이영훈, 강준구, 장선철, 이재원, 2001, 도로터널의 붕괴 및 보강사례, 공사중 터널의 사고사례 발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 67-80
4. 이인기, 황영철, 2006, 도심지터널의 변위/변상 사례와 제어대책, 터널기술강좌-도심지 천층 및 근접터널, 한국터널공학회, pp. 563-589
5. 서울지하철5호선 건설공사 제5-2공구 시공감리 종합보고서, 1996, (주)대우엔지니어링, 서울특별시 지하철건설본부
6. 안산선 안산터널 긴급 보강공사 실시설계보고서, 1998, 서울지방철도청
7. 영동선 통리~심포리간 산골터널 긴급보강공사 준공보고서, 1997, 영주지방철도청, 대덕공영(주), 표준건설(주)
8. 천안-논산간 고속도로 건설공사 제2공구 차령터널 조사 및 보강 설계 보고서, 1999, (주)대우