

터널 붕괴 사례

정 구 영 (케이시 지오컨설턴트)

1. 서론

기존의 재래식 터널 굴착공법에서의 지보는 발생하는 상재하중을 지지할 수 있는 강성지보와 콘크리트 라이닝을 주 지보재로 시공하였지만 NATM 개념 터널 굴착공법에서는 록볼트와 슛크리트를 주 지보재로 사용하여 굴착 후 노출되는 암반을 가능한 빨리 폐합시켜 막장 주변에 지반아치를 형성시켜 터널을 안정시켜야 한다. 즉 1차 지보재를 적용하는 시간동안 터널 막장은 지반이 가지고 있는 지지력에 의해 자립되어야하고 자립시간이 부족한 경우에는 막장내 혹은 지표에서 인위적인 보강작업 후 NATM 공법을 적용하여야 한다.

그러나 최근 교통, 환경문제 등으로 개착식 굴착공법은 가능한 지양되고 연약층, 파쇄대 등의 취약구간에서도 NATM 개념 굴착공법이 수행되는 경우가 많아 적절한 보강없이 무리한 굴진으로 인하여 터널이 붕괴되거나 위험에 직면하는 경우가 있다. 또한, 위험구간으로 판단되어 터널 굴착전 충분한 보강을 실시하고 조심스러운 굴착은 하지만 지반이 가지는 불확실성으로 인하여 터널에 작용하는 하중을 명확하게 추정하기 곤란하고 미굴착 지역 및 상재하중에 대한 정보의 불확실성으로 막장 자립시간의 추정과 설치한 지보가 부적절하여 붕락이 발생하는 경우도 있다.

본 연구에서는 터널붕락 지반의 특성을 파악하고자 외국에서 조사된 자료를 소개하고, 국내에서 발생되었던 터널의 붕락 사례를 분석하였다. 또한 각기 다른 붕락 특성을 가지는 3개소 터널에 대하여 붕락

의 발생원인과 계층값의 변화, 응급조치, 지반보강 방안 등에 대해서 분석하였다.

2. 터널 붕락의 정의 및 분류

본 연구에서는 설계에서 허용되는 굴착한계선을 초과하여 터널의 안전성에 영향을 미칠 수 있는 통상 5.0m³ 이상의 낙반이 발생한 경우와 터널내부에서 발생한 과대여굴이나 붕락이 지표면까지 연결되어 과대한 함몰이 발생한 경우를 모두 광범위한 의미의 “붕락”이라 명하고 이후 사용되는 붕락의 의미는 붕락~함몰붕락 사이의 상태를 말한다.

1) HSE의 터널붕락 분류

Heathrow Express Rail Link에서 터널 붕락사고가 발생한 후 HSE에 의해 각국에서 조사된 대표적인 터널 자료를 기초로 터널 굴착 단계별 붕락 발생위치 및 발생 원인을 나타내면 다음 <표 1>과 같이 구분할 수 있다.

2) 터널 붕락의 굴착 단계별 분류

Leichnitz(1990)는 독일 철도터널의 붕락경험을 바탕으로 터널 붕락이 발생한 위치별로 굴착단계에 따라 다음과 같이 구분하였다.

- 무지보 막장면에서의 붕락

표 1. 전세계의 주요한 터널 붕락 현황 및 발생원인(HSE,1996)

| 붕락의 원인 | | 개 소 | 비 율(%) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|-----|--------|
| A type 터널막장과 1차지보가 완료된 지역에서의 터널붕락 | | 45 | 92 |
| A1 | 굴착된 막장에서 불안정한 지반의 붕락 | 18 | 36 |
| A2 | 인위적인 지반결함에 의한 불안정한 굴착 막장의 붕락 | 1 | 2 |
| A3 | 과도한 천단침하로 인한 슛크리트면의 부분적인 붕락 | 8 | 16 |
| A4 | 터널 종방향에 있는 벤치의 붕락 | 1 | 2 |
| A5 | 굴착중 터널 중심방향으로 존재하는 벤치의 붕락 | 2 | 4 |
| A6 | 1차 슛크리트 타설 부분의 터널 진행방향 Canillever붕락 | 2 | 4 |
| A7 | 스�크리트 폐합전 과도한 상반부 굴착에 의한 붕락 | 3 | 7 |
| A8 | 천단부 가인버트 파괴에 의한 붕락 | 1 | 2 |
| A9 | 천단부 지지력 부족에 의한 상반인버트의 천단파괴 | 1 | 2 |
| A10 | 지반거동 및 하중에 의한 지보의 붕락 | 3 | 6 |
| A11 | 지보시간 경과에 의한 붕락 | 1 | 2 |
| A12 | 시공결함에 의한 붕락 | 4 | 8 |
| B type 라이닝 타설이 완료된 후의 붕락 | | 1 | 2 |
| B1 | 과도한 터널 침하에 의한 붕락 | 1 | 2 |
| C type 기타 붕락 | | 3 | 6 |
| C1 | 풍화 및 이완된 암반에서 발생하는 갱구부의 붕락 | 2 | 4 |
| C2 | 지하수 및 연약대에 의한 수직갱의 붕락 | 1 | 2 |

- 지보가 설치된 상반구간에서의 붕락하반굴착구간에서의 붕락
- 인버트 링폐합 구간에서의 붕락

3. 국내 터널붕락 특성조사분석

국내터널 붕락 자료의 수집은 1980년대 이후의 NATM 개념의 터널 굴착시 붕락 및 지표함몰 붕괴 자료를 중심으로 전력구 1개소, 지하철 12개소, 도로 터널 3개소, 철도터널 5개소 등 총 21개 현장에 대한 터널심도, 암석종류, 지층 풍화도 등 터널 붕락에 영향을 줄 수 있는 지반특징에 대한 분석을 하였다.

1) 국내 터널 붕락 현장의 지반공학적 특성

국내 터널 붕락 현장의 특징을 지반조건별로 분석해서 요약하면 다음 <표 2>과 같이 요약할 수 있고 지반조건 특징은 다음과 같다.

① 불연속면 수, 방향성

<표 2>에서 절리군이 3개 이상 존재하는 현장이 62% 이상을 차지하고 있는데 붕락 현장의 대부분이 파쇄대가 집중적으로 발달하는 현장이 많아 불연속면의 수가 많은 것으로 사료되며 특히 파쇄대 폭이 커서 막장 전면에 발달할 경우 불연속면 수를 판단하기 곤란하여 “Shattered” 상태와 “Earthlike” 상태로 분석된 현장이 4개소가 있었다.

② 풍화도 분류

터널 막장의 풍화정도에 따른 분류로서 풍화암층 이하에서 붕락이 발생된 경우가 45%를 차지하고 있고, 보통암층과 연암층에서 붕락된 경우가 40%를 차지하고 있는데 터널 막장면 지반의 강도가 2등급 이상 다른 암종들로 구성되어 있는 경우가 큰 비중을 차지하였다.

③ 터널심도

본 고의 붕락현장의 심도를 Z0/D(Z0 : 토피고, D : 터널폭)로 환산하여 분석하면 1.5D 이하의 천심도에

표 2. 국내 터널 붕락 현장의 지반 특징

| 불연속면 수 | | | | | | 불연속면 방향성 | | | | | |
|------------------------------|---------|------------------------|---|-----------|----------------|-----------------|----------------------|------------------|----------------|-------------------|------|
| massive | One set | Two set | Three set 이상 | Shattered | Earthlike | Very favourable | Favourable | Fair | Unfavourable | Very unfavourable | |
| • | 3 | 5 | 9 | 3 | 1 | • | • | 1 | 15 | 5 | |
| • | 14(%) | 24 | 43 | 14 | 5 | • | • | 4 | 72 | 24 | |
| 터널막장의 풍화도 분류 | | | | | | 암석의 종류 | | | | | |
| 퇴적토층 | 풍화토층 | 풍화암층 | 연암층 | 보통암층 | 경암층 | 편암류 | 편마암류 | 기타변성암류 | 화산암류 | 심성암류 | 퇴적암류 |
| • | 1 | 8 | 6 | 2 | 3 | 5 | 8 | 1 | • | 5 | 1 |
| • | 5(%) | 40 | 30 | 10 | 15 | 25(%) | 38 | 6 | • | 25 | 5 |
| 터널심도(Z0/D) | | | | | 절리간격(RMR등급) | | | | | | |
| >1.5 | 1.5,3.0 | 3.0,4.5 | 4.5 > | 1등급 | 2등급 | 3등급 | 4등급 | 5등급 | | | |
| 6 | 8 | 5 | 2 | • | • | 2 | 12 | 7 | | | |
| 28(%) | 38 | 24 | 10 | • | • | 10(%) | 57 | 33 | | | |
| 절리상태(RMR등급) | | | | | 지하수 상태(RMR 등급) | | | | | | |
| 1등급 | 2등급 | 3등급 | 4등급 | 5등급 | 건조상태 | 습기 인지정도 | 습윤 | 벽면을 타고 물이 흐르는 상태 | 피압수·암력상태의 집중용수 | | |
| • | • | 4 | 4 | 13 | • | 1 | 7 | 11 | 2 | | |
| • | • | 19(%) | 16 | 62 | • | 5(%) | 33 | 52 | 10 | | |
| RQD(%) | | | | | 붕락규모(m³) | | | | | | |
| <.25 | 25.50 | 50.75 | 75.90 | >.90 | 0.50 | 50,100 | 100,150 | 150,200 | 200이상 | | |
| 15 | 5 | 0 | • | 1 | 10 | 2 | • | 2 | 7 | | |
| 71(%) | 24 | 0 | • | 5 | 47(%) | 10 | • | 10 | 43 | | |
| 기타(21개소 터널 중 10개소 터널에 대한 분석) | | 시추조사 | 붕락지점과 가장 인접한 구간에서의 시추조사 및 막장조사에 의한 결과와 실제 막장의 풍화정도가 다른 현장 : 5개소 | | | | | | | | |
| | | 붕락단계(Leichnitz (1990)) | • 무지보막장면 | | | | • 지보가 설치된 상반구간 : 4개소 | | | | |
| | | | • 하반굴착구간 : 2개소 | | | | | | | | |

서 발생된 경우가 29%, 1.5D~3.0D사이에서 발생한 경우가 38%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이것은 1.5D이하의 저토피 구간은 굴착전 사전 보강작업을 하거나 조심스러운 굴착을 하는 경우가 많아 실질적으로 위험 구간임에도 불구하고 터널 붕락이 발생하는 경우가 적었으나, 유입된 토석의 특징이나 붕락부의 특징 등으로 판단할 때 토피고가 1.5D~3.0D 구간에서 실질적인 암피복두께가 얇은 곳에서 붕락이 많이 발생한 것으로 사료된다.

④ 절리특징

특히 편마암 지대에서 굴착된 현장 중에는 절리 사

이에 충전물질로 흑연 활석 등이 포함되어 지반의 전단강도를 크게 저하시키는 경우가 많았으며 토피고가 낮아 지표 퇴적층 중의 점토들이 지하수와 함께 절리 틈에 협재되어 있는 경우가 많았다. 이러한 절리들은 붕락현장에서 대부분 터널 굴진방향에 대하여 불리하게 작용하고 있었다.

4. 국내터널 붕락사례

본 고에서 인용된 사례는 첫째, 하천과 인접한 구간의 연약한 지층에서 기계 장비를 이용한 상반분할

굴착시 사전에 강관다단 그라우팅을 하였으나 강관 사이로 지하수와 함께 모래가 유출되면서 지표부 함몰까지 발생된 붕락 현장의 경우, 둘째, 저토피 구간에서 상반 굴착 후 하반 굴착시 과도한 굴진장에 의한 상반 지보구간에서 붕락된 경우, 셋째, 전단면 굴착시 막장 전면에서 대규모의 파쇄대가 발달하고 흑연이 협재되어 있는 등 막장의 자립이 곤란한 파쇄대 지반에서 굴착된 경우에 대한 사례 연구를 수행하였다.

1) ○○터널 붕락사고

① 지반개요/붕락현황/원인

본 터널 구간은 하천과 인접한 구간으로(하천과 약 50m이격)서 기반암인 호상편마암의 풍화대 및 충전층이 막장 상부까지 발달하고 있었고 막장전면은 파쇄대 및 절리 발달이 매우 우세한 풍화대 및 토사로 구성되어 있었다. 토피고는 1.5~2.0D 정도로서 아칭 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료되나 지층의 구성 상태로 볼 때 발파에 의한 굴착이 곤란하여 기계장비를 이용하여 굴착을 하였다.

굴착은 전방 20m를 차수그라우팅 및 강관 1단 그라우팅($\Phi 42\text{mm}$, $L=6\text{m}$, CTC 35cm)의 보조공법을 시행한 후 굴진중 막장 및 천단부가 연약층으로 판단되어 Fore poling($L=10\text{m}$, CTC=35cm)을 추가 시공하였다. 막장은 상반을 3개로 분할하여 기계를 이용한 굴착으로 우측면($L=0.8\text{m}$) Ring cut 굴착 및 1차 슛크리트를 타설하고 좌측면($L=0.8\text{m}$)을 굴착 후 슛크리트 타설 중 천단부 좌측에서 풍화암이 낙석되고 터널 상부에 근접해 있던 풍화토층과 충전층의 토사가 지하수와 함께 유출되어 상부 지표면이 함몰되었다. 붕락규모는 토사의 막장내 유입과 동시에 1차로 지표면 직경 10m 정도의 타원형으로 함몰되었고 응급복구를 시행하는 동안 2차로 직경 40m의 추가 함몰이 발생하였다.

② 계측자료분석

붕락구간 전·후 약 800m 구간에 대한 터널 A계측 결과를 하반통과, 인버트통과, 최종수렴값에 대하여 측선별로 분석하면 붕락전 60m 구간의 천단침하량은 약 22~30mm의 최종 침하량이 측정되었고 특히 인버트 통과시의 침하량은 하반통과시 보다 2배 이상의 침하량이 발생되었는데 이는 위 구간의 하반부 내 공변위량이 상반 내공변위량 보다 큰 값이 측정된 것으로 보아 하반 및 인버트 굴착시 굴진장이 길어 슛크리트 타설 및 인버트 폐합시간이 늦어진 때문으로 분석된다. 붕락이 발생된 구간에서는 오히려 내공변위 및 천단침하가 큰 폭으로 감소되어 나타나는 데 이는 굴진장을 0.8m로 하였고, 상반을 3구역으로 소단면 분할굴착으로 막장의 자립시간을 확보하고 지반 변형을 최대로 억제한 점과 굴착전에 수행된 강관 1단 그라우팅으로 터널굴착에 의한 선행변위량을 감소시켰기 때문으로 사료된다.

③ 지반보강

본 구간에서 발생한 토사의 터널내 유입과 지표부 함몰에 대한 응급조치는 다음과 같은 순서로 진행되었다.

• 응급조치

스�크리트로 조치하려 했으나 여굴이 계속 진행 → 락볼트 및 와이어메쉬 부착 → 페이로더 bucket 이용 → 충전층의 지속적인 유출로 인원 대피

• 하천통과구간 터널보조공법 변경 방안

Curtain grouting, 붕락부 보강 채움 그라우팅, 하수관 보강공사

④ 결과분석

본 현장은 하천통과 구간의 연약한 지층에서 상반 분할 굴착시 사전에 강관다단 그라우팅 보강을 하였으나 강관 사이로 지하수와 함께 모래가 유출되면서 발생된 붕락 현장의 경우로서 초기에는 막장에서 소

규모 붕락이 발생하였으나 시간이 경과함에 따라 붕락규모가 확대되어 결국 지표면이 직경 40m의 타원형의 함몰이 발생되었다. 붕락구간에서의 지반상태는 RMR 평가 및 시추결과에 의하면 붕락부에 인접할수록 RMR 값이 20~30점대로 매우 불량한 상태이고 층적층이 막장 천단부까지 발달되었다. 터널 A계층의 변화값은 붕락구간에서 특별한 경향을 보이지 않는데 이는 소단면 분할굴착으로 막장의 자립시간을 확보하고 지반변형을 최대로 억제한 점과 굴착전에 수행된 강관 1단 그라우팅으로 터널굴착에 의한 선행 침하량을 감소시켰기 때문으로 사료된다.

붕락이 발생된 후 취해진 응급조치는 슛크리트 타설 도중 발생된 것이므로 현장에서 조달하기 쉬운 슛크리트, 락볼트, 와이어 메쉬 등을 이용하여 응급조치를 하려 했으나 토사함몰 규모가 확대되어 결국 2차함몰까지 발생되었다.

본 하천통과 구간에서의 터널 붕락은 지하수에 대한 대책이 미흡하여 발생한 사고로써 하천통과 구간의 층적층에 대한 강관사이의 지반고결이 부족하여 사고가 발생한 것으로 사료된다.

2) 터널붕락사고

① 지반개요/붕락원인/붕락현황

본 터널 붕락 현장의 지층은 풍화토, 풍화암, 연암 및 경암층으로 구성되어 있으며 터널변상구간은 토피고가 0.9~1.2D에 이르는 저토피 구간이다. 상반 굴착시에 조사한 막장관찰자료에 의하면 전반적으로 풍화가 심한 파쇄암반으로 조사되었고 본 붕락구간의 응급복구시에 그라우팅 작업용 천공중 추정된 지층상태는 붕락부에 파쇄대가 집중적으로 형성되어 있는 것으로 조사되었다.

당초 설계시의 붕락구간은 지보패턴-5로 설계되어 다단면 분할굴착 방법으로 계획되었고 터널상부는 길이 4.0m, 길이 1.6m의 휘폴링으로 보강토록 하였으

며 인버트 아치를 두어 단면이 폐합되도록 계획되었으나 지보설치에 따른 경제적인 측면과 시공성을 감안하여 상 하반단면 굴착을 기본으로 적용하되 안전성을 통하여 설계변경하여 하반부를 시공중에 있었다.

붕락지점은 굴착과 지보재 설치과정에서 터널의 어깨와 측벽부로부터 토사와 암반이 혼재한 지반이 터널내부로 밀려들어오는 사고가 발생되었고 대규모 변상은 터널 평균직경의 약 2D 구간에서 대규모 변상이 발생되었다. 붕락이 직접적으로 발생된 지점에서는 천단부 강지보재 연결부가 파단되었으며 파단부에서 우측 강지보재와 좌측 강지보재는 약 20~30cm 정도의 상대변위가 발생되었다. 터널 내부로 유입된 토석의 양은 약 200m³ 정도로 추정되며 지상에는 반경 7~8m 정도의 함몰이 발생하였고 함몰부위의 최대심도는 약 2.5m로 측정되었다.

본 막장에서 붕락이 발생된 원인을 크게 두 가지로 요약하면 첫째, 붕락이 발생된 막장 및 대규모 변상이 발생된 구간은 터널 토피고가 약 0.9~1.0D로 터널에서의 아칭효과를 거의 기대할 수 없었고, 풍화대가 터널 상반까지 발달되어 있어 실질적인 터널 천단부의 rock cover가 크게 부족한 상태였다. 둘째, 작업일지 검토결과 상반에서는 열악한 지반조건하에서 1m씩 조심스러운 굴진을 하였지만 하반굴착시에는 상반보다 약간 나은 지반상태였지만 약한 지반상태에서 과도한 굴진장(약 4m)으로 인한 붕락이 발생된 것으로 추정된다.

② 계측자료분석

터널 붕락사고 발생지점 전 후방 약 90m 구간내에 설치된 내공변위 측정점과 천단침하 측정점으로부터 측정된 변위값을 시간경과에 따라 분석한 결과 약 3일전까지는 각 지점마다 천단침하나 내공변위가 안정되게 수렴된 모양을 보여주고 있다. 또한 사고 3일전부터 붕락주변구간을 중심으로 증가되는 경향을 나타내고 있으나 그 값이 3~4mm 정도로 작은 값이어서

붕락사고를 사전예측하기가 용이하지 않았을 것으로 사료되며, 10mm 이상의 큰 변위량 증가는 사고당일 발생한 것으로 나타나 있어 터널붕락사고는 보강조치를 할 시간적 여유없이 하반굴착직후 바로 발생한 것임을 알 수 있었다.

③ 지반보강

• 응급조치

갱내 붕락부 슛크리트 타설 → 갱내 붕락부 전후 계속 실시 → 지표 함몰부 주변 지반보강 시멘트밀크 그라우팅 → 확인시추 및 투수시험과 암석시험을 병행하여 실시

• 붕락부 재시공 및 장기적인 안전성 확보 방안

락볼트 보강 방안 → 강관다단 그라우팅 보강 방안 → 지보재 변경 및 재시공

④ 결과분석

본 현장은 상반 굴착 완료 후 하반 작업시 상반보다는 양호하지만 풍화층이 터널 상부까지 발달한 열악한 환경하에서 1막장당 약 4m 정도의 과굴진에 의해 기 보강된 상반의 어깨부에서 붕락이 발생되었으며 약 30m 구간에 슛크리트면에 균열이 발생되어 터널 평균직경의 약 2D 구간에서 대규모 변상이 발생되었고, 약 200m³ 토석이 막장내로 유입되었다.

본 터널 붕락구간에서는 하반 굴착시 상반에 비해 약 4배의 과도한 굴진장을 가졌으며 압피복 두께가 부족한 저토피 구간에서의 부적절한 설계 변경으로 붕락이 발생한 것으로 사료된다. 붕락사고 직후 시행한 응급조치 도중 주입재의 충진, 암입그라우팅을 시행하는 과정에서 주입압력 및 주입재의 중량으로 인한 하중증가로 추가적인 터널의 변형이 발생되었으나 주입작업 후의 계측자료에 의하면 터널의 변위가 감소하여 수렴한 점으로 미루어보아 응급조치는 적절히 수행된 것으로 판단된다.

3) 철도터널 붕락사고

① 지반개요/붕락원인/붕락현황

철도터널의 붕락은 막장의 2/3이상이 활석층과 흑연대가 발달하고 두 개의 단층대가 교차하는 지점에서 발생한 붕락으로 붕락구간은 활석 및 흑연이 발달한 부분으로 막장자립이 불가능한 상태이며 암반의 점착력 및 전단강도가 매우 낮은 지반조건이었고 두 개의 큰 단층이 터널 막장 상부에서 교차되고 있었다.

본 붕락 현장은 폭 7.4m, 높이 7.48m의 터널을 발파 굴착(굴진장=1.5m)으로 전단면 굴착을 수행하고 있었다. 붕락은 버력 처리 후 1차 슛크리트 타설 도중 발생하였으며, 붕락현황은 약 20m³ 정도 붕락되었고 약 2~3D 구간에 걸쳐 강지보 및 슛크리트에 균열이 발생하였다.

② 막장관찰 자료 및 계측자료분석

붕락지점 전방부터 RMR 변화는 60점으로부터 15점으로 급격히 지반상태가 악화되고 있었고 전방 약 20m에 대한 터널 내공변위 변화는 20.5~25.6cm의 매우 큰 내공변위가 발생되었다.

③ 지반보강

• 붕락발생부 응급조치

버력채움 및 슛크리트 타설 → 측벽부 락볼트 보강 → 크라운부 락볼트 보강

• 막장보강 및 굴진

막장전면부 Fore Poling → Pattern3 굴진장에 준해 조심스럽게 굴진 → 현재 설치된 계측장소와 추가로 계측핀 설치 후 계측 → 선진보링 실시

④ 결과분석

본 터널 붕락이 발생한 막장은 2/3 이상이 자립력이 극히 불량한 활석과 흑연으로 구성되어 있고, 지반

상태에 비해 과도한 굴진장(L=1.5m)으로 발파굴착을 수행하였다. 또한 터널 지상부에서 두 개의 단층대가 교차하고 있었고, 붕락은 약 27m 구간에서 슛크리트면에 균열이 발생하였고(약 2~3D 구간에서 변상 발생) 약 20m³ 규모의 붕락이 발생되었다. 붕락구간의 RMR평가 결과 붕락부에 인접할수록 값이 급격히 저하되고 있었고, 특히 붕락전 27m 구간의 내공변위의 변화도 20~30m의 큰 폭의 내공변위 축소가 발생하였다. 따라서 본 붕락 현장의 경우 사전에 충분히 위험의 예측이 가능한 현장이었을 것이라고 사료된다.

지반보강 후 재 계측된 내공변위 값은 사고 발생 약 15일 후 내공변위가 10mm 이하에서 수렴되어 적절한 보강 조치가 이루어진 것으로 사료된다.

5. 결론

연구에서는 국내에서 발생한 21개소의 터널 붕락 자료를 수집하여 붕락현상이 가지는 지반특징에 대하여 분석하고 터널 붕락중 각기 다른 특성을 가지는 3개소의 현장에 대하여 상세한 분석을 함으로써 유사

한 지반조건하에서 반복적으로 발생하는 터널붕락에 대한 주의를 촉구하고자 붕락이 발생된 터널에 대해 지반조건, 붕락현황, 계측값의 변화, 보강대책에 대해서 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 조사된 21개소의 터널 붕락은 물론 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하지만 붕락부에서의 가장 큰 지반 특징은 터널 막장은 양호하나 천단부 압피복 두께가 부족하거나 풍화층으로 구성된 경우 터널 붕락사고가 빈번하게 발생
- (2) 국내 터널 붕락 자료를 분석한 결과 상반 굴착시 붕락사고가 80%로써 주로 발생하였고 하반 굴착시도 20%의 사고가 발생되어 터널 굴착의 전 단계에서 붕락사고에 대한 대비가 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 터널 내에서 수행되는 계측자료로는 붕락의 사전예측이 힘드므로 막장조사, 지표조사 등의 자료를 종합적으로 이용하는 것이 유리한 것으로 판단된다.
- (4) 불연속면의 조합에 의한 낙반 사고외에 파쇄대, 연약층 등이 원인일 경우 피해 손상범위가 2~3D에 걸쳐 발생하는 특징이 있다.

참고문헌

1. 박광준, 이안근(1993), “도심지 지하철 터널의 붕락 유형과 원인”, KGS Spring '93 National Conference/Geotechnical Engineering and Tunneling Technology, Seoul Korea, pp. 46~71
2. 한국건설기술연구원(1999), “고속전철 교량/터널구조 및 유지관리시스템 개발”, pp. 46 ~ 71
3. 한국건설기술연구원(1999), “Neural Network를 이용한 터널 설계 적정성 평가용 Expert System 개발(II)”, pp. 48~117
4. Chencho Lee(1992), “Identification of Failure mechanism of underground opening by an approximate reasoning system”, A thesis submitted to the faculty of the graduate school of the university of Minnesota, pp. 2~11
5. HSE(1996), “Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels”, pp.15~20
6. Wolfhard Leichnitz(1990), “Analysis of Collapses on Tunnel Construction sites on the New Lines of the German Federal Railway”, Tunnels and Underground Space Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 199~203