

## 시공 중 발생한 터널붕괴 특성연구

이수곤<sup>1)\*</sup> · 김낙영<sup>2)</sup> · 전복현<sup>1)</sup> · 최호순<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

최근 들어 인구증가와 경제발전에 따른 고속도로 건설과 확장이 증가하고 있고 이에 따라 증가에 따라 터널 건설도 증가하며 상대적으로 터널 시공 중 붕괴가 발생하는 위험도 증가한다. 본 연구에서는 고속도로 터널 시공 중 보편적인 붕괴 사례를 조사함으로써 다른 지질에서의 붕괴원인과 형태를 적용하여 보강공법에 대해 분석하였다.

### 2. 본 론

고속도로의 터널 시공 중 붕괴사태에 대하여 갱구부에서의 국부적인 썩기형 붕락, 소규모 계곡부에서 강우시 천단부에서 지표부까지 함몰된 경우, 과발파 등으로 인한 국부적인 썩기형 암반블럭 붕락, 터널굴진방향과 미끄럼면의 교차로 인해 터널내 침하가 발생한 경우로 4가지로 분류하여 붕괴사태를 유형별로 세부적으로 원인 분석하고 그에 따른 적절한 보강공법 및 향후 관리방안에 대해 연구하였다.

#### 2.1 터널의 붕락유형

##### 터널의 붕락 개요

터널 시공 중 많은 터널붕괴 사고나 불안정한 사례가 발생하는 이유는 여러 원인들이 있을 수 있으나 거시적인 측면에서 보면 첫째, NATM의 원리를 충분히 이해하지 않은 상태에서의 설계 및 시공을 들 수 있다. 둘째, 설계 당시의 불충분한 지반조사 및 부적절한 지반분류, 그리고 시공 중의 막장관찰 결과의 미반영 등 치밀하지 못한 공법 설계, 적용에 원인을 들 수 있다. 셋째 연약지반 통과 구간 등 비교적 시공 난이도가 높은 구간을 굴착하면서 적절한 보강 대책 등이 없이 낮은 수준의 기능도에 의해서 무리하게 굴착을 진행하다가 붕락 위험에 노출되는 등의 다양한 원인들을 들 수 있다.

##### NATM 터널의 일반적인 붕락 메카니즘

터널천단부의 지지층이 충분치 못하고 터널이 지하수위 아래에 위치하는 경우 붕락에 취약함이 밝혀졌다. 특히 투수성이 큰 지반의 무지보 터널이 이러한 조건에 놓이면 지하수의 유입과 함께 붕락에 이를 가능성이 큰 점을 지적하였다. 또한 가장 흔한 형태의 파괴 메카니즘은 천단부의 국부적인 붕괴이며 대부분 파괴가 막장주위에 집중되는 특성을 보였다. Chambon(1994)의 원심모형시험을 이용한 사질토 지반내의 NATM 터널에 대한 파괴메카니즘 조사에서도 막장 천단부 Crown Hall 파괴메카니즘이 발표되었고 무지보 터널의 길이가 파괴메카니즘에 지대한 영향을 주는 것으로 조사되었다.

주요어 : 터널, 붕락, NATM, 지보패턴

1) 서울시립대학교 토목공학과 (sglee@uos.ac.kr)

2) 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 (ynagkm@ex.co.kr)

## 2.2 터널 시공 중 붕락 유형

터널의 붕괴형태는 시공순서에 따라 상이하게 발생되며 시공단계별 굴착시공 중 붕락, 슛크리트 타설 후 붕락, 콘크리트라이닝 타설 후로 3가지 붕괴형태로 분류할 수 있다.

### 굴착시공 중 무지보 상태의 붕락

굴착 중 발생할 수 있는 터널붕락 형태는 벤치부 파괴, 천장부 파괴, 막장부 파괴, 전막장 파괴, 연약대 파괴, 표토층 파괴로 6가지 유형으로 구분된다.

### 스�크리트 타설 후 붕락

스�크리트 타설 후 붕괴되는 원인은 상반 굴착직후 지지력 부족에 의한 인버트에서의 침하 및 전단파괴, 터널 주변지반의 측압으로 인한 바닥부의 부풀림 현상, 터널 측벽부 콘크리트라이닝에서의 측압에 의한 파괴로 조사하였다.

### 콘크리트라이닝 타설 후 붕락

콘크리트라이닝 타설 후 붕락의 원인은 전단파괴(Shear Failure), 압축파괴(Compression Failure), 휨과 단층의 조합파괴(Combined Bending and Thrust)와 국부파괴(Punching Failure)가 있다.

## 2.3 고속도로터널 붕락사례 분석

본 연구에서는 총 8개의 붕괴 사례에 대해 분석하였다. 그 중 가장 흔히 발생하고 있는 붕괴는 갱구부의 자연환경 훼손을 최소화하기 위해 절취면을 최소화하려는 최근 터널설계의 추세에 따라 천단부 부근에서 낙석이 발생하고 지표면까지 붕락이 연결되는 형태이다. 이런 붕락형태의 경우 붕락의 진행이 거의 완료된 시점에서 붕락된 천단부에 슛크리트를 타설하고 이미 타설된 슛크리트부의 이완상태를 파악하여 추가로 슛크리트를 타설하고 막장면에 토사를 채워 더 이상의 붕락이 발생하지 않게 하여 추가적인 붕락을 막을 수 있었다. 다음으로 붕락이 일어나 지표부까지 함몰되는 경우로 붕락시 공사기간의 연장과 막대한 터널보강비가 증가되어 터널현장 운영에 많은 문제점을 야기 시킨다. 지표부까지 함몰된 사례로 붕괴구간은 저토포 구간으로 소규모 단층대가 존재하여 지보패턴-F3로 설계하였지만 인접한 전후 암반이 매우 양호하여 지보패턴-I, II로 판단하고 지보패턴-III로 시공하여 붕괴가 일어났다. 190m'정도로 터널 상부의 지표면은 폭 6m 깊이 3m로 함몰되었다.

## 3. 결 론

도로터널 시공 중 발생한 붕락사례를 조사하여 종합적으로 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 도로터널 시공 중 발생한 붕락사례를 위치별로 분석을 해보면 터널 입출구부와 풍화 파쇄가 심한 계곡부에서 대부분이 발생하고 그 외에는 국부적인 파쇄대가 존재하는 본선부에서 발생한 것으로 조사되었다.

2) 국가별 터널 붕락을 분석해보면 국내 터널에서는 연약대 붕락 41%, 천정부 붕락 33%를 나타내었으며, 해외터널에서는 천정부 붕락 23%, 연약대 붕락 20%로 나타나 다소 차이를 보였다.

3) 터널붕락사고가 발생한 위치에서 분석해보면 입출구 부근과 계곡부에서 대부분 발생하였다. 이는 터널굴착거동 특성이 3차원 거동이므로 아칭현상(arching effect) 발현을 위해서는 적절한 토피괴가 확보되어야 하고 또한 막장전방 미굴착 구간의 지반조건이 급격히 저하되는 경우에는 터널 붕락가능성이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

4) 붕락이 발생한 대부분의 터널에서 분석된 공통된 특징은 풍화 파쇄대 구간이면서 저토피괴의 조건을 가질 때 발생하였고 부가적으로는 붕락발생 시점이 강우 직후에 발생하는 경우가 가장 많았다. 이는 강우로 인하여 지반전단강도의 급격한 저하로 인하여 터널 굴착에 따른 아칭현상이 발달할 때 불리한 조건으로 작용한 것으로 분석되었다.

5) 터널 내 국부적인 썩기형 암반블럭 붕락의 경우는 대부분 지보패턴 I에서 발생하였는데 이는 지반조건이 매우 양호한 상태에서 굴진거리를 증가시키기 위한 과발파 등으로 인하여 발생하는 것으로 분석되었다.

6) 고속도로터널 공사 중 발생한 붕락형태를 분석해 보면 터널 붕락이 지표면까지 함몰되는 형태의 붕락은 대부분 계곡부에 위치하는데 특징적인 사항으로는 대규모 계곡부에서 붕락이 발생하는 경우보다 소규모 계곡부에서 발생하는 경우가 더 많은 것으로 분석되었다. 이는 대규모의 계곡부 지점 통과 시에는 설계단계에서 터널보강공법이 반영되어 시공관리가 가능하나 소규모 계곡부의 경우 설계단계에서 터널보강공법이 미반영 되어 있어 시공하는 과정 중에서 체계적인 계측과 현장조사를 실시하여 보강공법 적용에 대한 검토가 수행되어야 할 것으로 분석되었다.

7) 터널시공 중 붕락된 구간에 터널 안전성 확보를 위해 적용된 보강공법을 붕락 형태별로 요약하면 다음과 같이 구분된다. 가장 큰 피해가 발생하는 붕락형태인 지표면까지 함몰된 경우는 적절한 보강방법은 지표부에서 시멘트그라우팅, 터널 내에서 강관다단그라우팅 또는 FRP 그라우팅 공법이 적용되는 경우가 적정하고 터널 내 부분적인 암반블럭 붕락의 경우에는 4m 길이 이상의 록볼트를 설치하고 반드시 붕락부위를 와이어 메쉬를 설치한 후 슛크리트로 붕락부위를 최대한 채워 터널형상을 이루도록 해야 콘크리트 라이닝 타설 후 지하수 등이 집수되어 누수가 발생하는 것을 방지할 수 있는 것으로 분석되었다.

## 사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면 붕괴 예측 및 대응 기술 개발) 연구비의 일부지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.