

도로 터널 시공중 발생한 붕락형태 분석 연구

이수곤¹ · 김낙영² · 전복현^{1*}

¹서울시립대학교 공과대학 토목공학과

²한국도로공사 도로교통기술원

A Study on the Collapse Pattern of Road Tunnel under Construction

Su-Gon Lee¹ · Nag-Young Kim² and Bok-Hyeon Jeon^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, The University of Seoul

²Highway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

최근 들어 인구증가와 경제발전에 따른 고속도로의 확장 또는 신설이 급증하고 있고 양호한 노선을 위해 터널 건설도 급속도로 증가하고 있다. 이와 더불어 터널 시공 중 붕괴가 발생할 수 있는 경우도 상대적으로 높아지고 있다. 특히, 도로의 양호한 선형 확보를 위하여 지반조건이 불량한 구간에서 터널 굴착이 증가하므로 적절한 보강공법의 적용 없이 굴착을 실시하는 경우에 붕괴가 자주 발생하였다. 본 논문에서는 고속도로 터널 시공 중 보편적인 붕괴 사례를 조사함으로써 다른 지질조건에서의 붕괴원인과 형태 및 적용 보강공법에 대해 분석하고자 한다.

주요어 : 고속도로, 터널건설, 붕괴, 보강공법

Recently, accelerating population and advanced economy result in extending old freeways and constructing new freeways. To make a good freeway shape, tunnel constructions are also rapidly increasing. Therefore, a possibility of a collapse during a tunnel excavation is getting higher in a proportionate manner. Especially, tunnel excavation has increased in poor geological condition in order to maintain good alignment of road and the collapse of tunnel has often happened without reinforcement method. This research paper will analyze forms and causes of the collapses for different geological conditions and applied reinforcement solutions by investigating typical collapse sites during highway tunnel constructions.

Key words : highway, tunnel construction, collapse, reinforcement solution

서 론

본 논문에서는 고속도로 터널 시공 중 터널 붕괴사례에 대하여 분석하여 붕괴형태를 크게 4가지로 분류하였다.

최근 들어 터널 시공 중 가장 흔히 일어나는 터널붕괴형태는 갱구부에서의 국부적인 썩기형 붕괴이고 그 다음으로는 소규모 계곡부에서 강우 직후 터널 천단부에서 지표부까지 함몰된 경우이다. 또한, 막장 암반조건이 매우 양호한 조건에서 굴진거리 증가를 위한 과발과 등으로 인한 국부적인 썩기형 암반블럭 붕괴의 경우, 터널 굴진방향과 미끄럼면의 교차로 인해 터널 내 침하가 발

생한 경우로 조사되었다. 터널붕괴가 발생한 위치는 입출구 40m 이내와 입출구와 인접한 계곡부에서 80% 이상 발생되었다.

터널 굴착 중 발생한 터널붕괴는 파괴개념관점에서는 일반적으로 다음과 같이 구분하는데 첫째는 지반의 절리방향이 터널굴진방향과 불리하게 형성되어 발생하는 활동파괴(sliding failure), 둘째는 슛크리트층 하부기초의 침하에 따른 천장부의 전단파괴(shear failure), 셋째는 굴착면의 지지력 부족이나 과다한 지하수 유입에 기인한 토사층의 점이적인 파괴(progressive failure), 네 번째는 주변지반의 크리프거동에 의한 크리프 파괴(creep

*Corresponding author: bobkook@hanmail.net

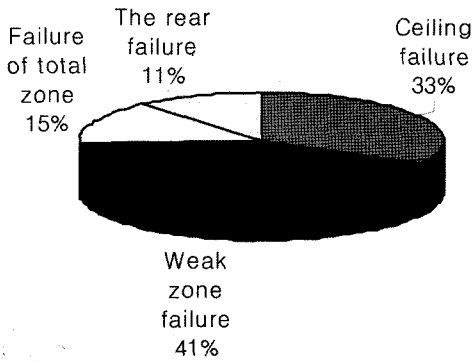


Fig. 1. The analysis of tunnel collapse pattern in Korea.

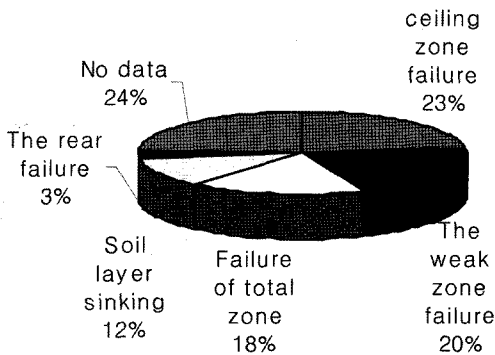


Fig. 2. The analysis of tunnel collapse pattern in abroad(Ministry of science and technology, 2000)

failure)로 나눌 수 있다. 지하철 터널의 경우 붕락사례를 조사해 보면 점이적인 파괴가 절반이상을 차지하는 것으로 조사되었다(전복현, 2006).

이하 본문에서는 고속도로 건설공사 중 발생된 8개소("A"~"H")의 터널에 대한 붕락 현황조사 및 붕락사례를 유형별로 세부적으로 원인 분석하고 그에 따른 적절한 보강공법 및 향후 관리방안에 대해 논해보고자 한다.

터널의 붕락 유형

터널의 붕락 개요

근래 국내의 터널은 대부분 NATM 터널로 설계, 시공되고 있다. 이러한 NATM은 지반자체의 지지력을 이용하여 추가적인 이완을 방지하면서 시공하는 공법이다. 즉 터널 시공 중 적절한 시기에 지보재(스프리트, 록볼트 및 강지보재)를 설치함으로써 지반과 지보재의 응력상태가 평형을 이루도록 하여 터널 자체의 안정성을 높인다(Brandy and Brown, 1985; Hoek et al., 1995; Hudson and Harrison, 1997). 그러나 이러한 NATM의

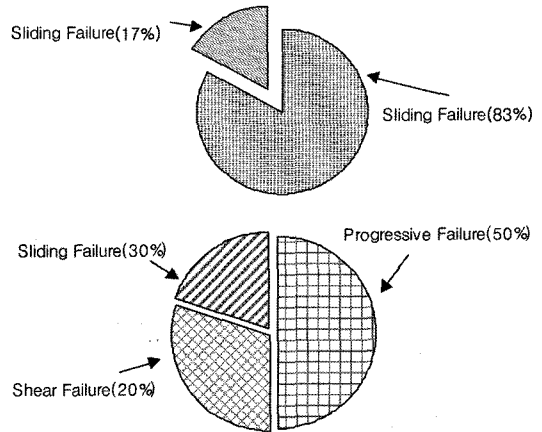


Fig. 3. The percentage of collapse patterns according to the fracture conception of road tunnel(upper) and subway tunnel(lower).

장점에도 불구하고 시공중 많은 터널붕락 사고나 불안정한 사례가 발생하는 이유는 여러 원인들이 있을 수 있으나 거시적인 측면에서 보면 Fig. 1, 2, 3(과학기술부, 2000)에서와 같이 첫째, NATM의 원리를 충분히 이해하지 않은 상태에서의 설계 및 시공을 가장 먼저 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 낮은 수준의 기능도에 의해서 무리하게 굴착을 진행하다가 붕락 위험에 노출되는 등의 다양한 원인들이 들 수 있다.

NATM 터널의 일반적인 붕락 매커니즘

HSE(1996)는 Heathrow Expressway의 NATM 터널 붕락이후 NATM 터널의 근본적인 붕락원인을 규명하고자 광범위한 터널붕락 사례를 수집하여 분석하였다. 이 분석결과에 따르면 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 큼을 지적하였다. 또한 가장 흔한 형태의 파괴메커니즘은 천단부의 국부적인 붕괴이며 대부분 파괴가 막장주위에 집중되는 특성을 보였다.

Chambon(1994)의 원심모형시험을 이용한 사질토 지반내의 NATM 터널에 대한 파괴메커니즘 조사에서도 막장 천단부(crown hall)의 파괴메커니즘이 발표되었고

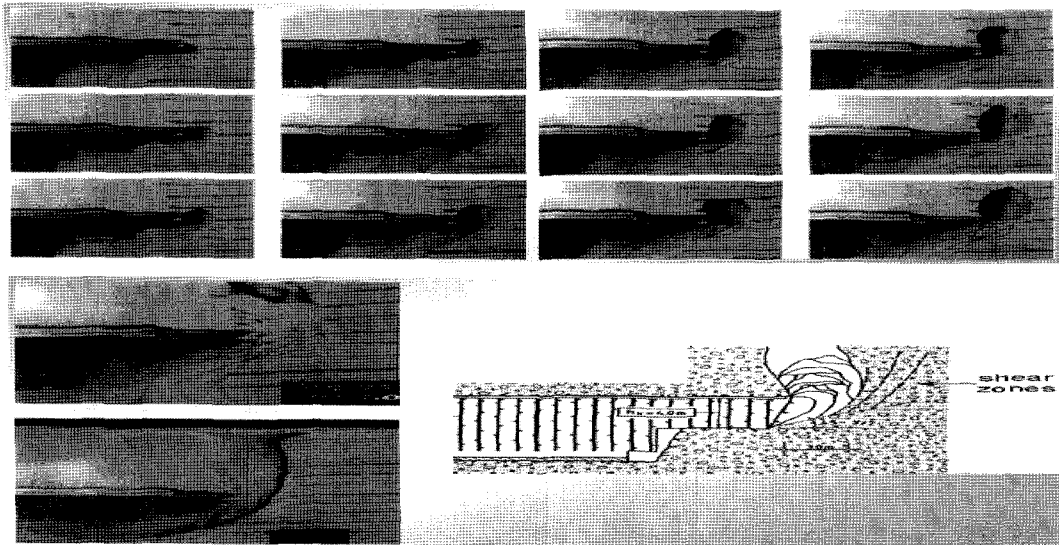


Fig. 4. Scale down model of shear failure in tunnel face (HSE 1996).

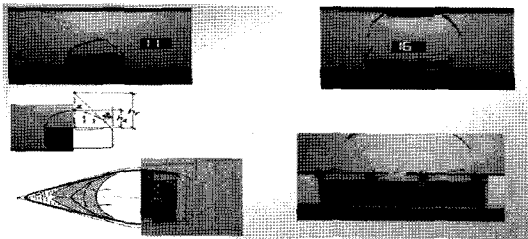


Fig. 5. The scale model to be subsided up the earth's surface.

무지보 터널의 길이가 파괴메카니즘에 지대한 영향을 주는 것으로 조사되었다.

막장위치에 따른 붕락빈도를 조사해보면 가장 안전율이 취약한 위치는 막장 굴착 후 지보가 설치되기 직전이다. 일반적으로 막장파괴는 빠르게 진행되므로 많은 경우에 지보를 설치할 여유가 충분치 않고 이에 대한 시공사의 대처도 용이치 않은 경우가 많으나 통상 설계 단계에서는 막장의 일시적인 안정이 체계적으로 검토되고 있지 못하다.

다음 Fig. 4, 5는 터널붕괴 형태를 모사하기 위해 실시된 축소모형 터널 붕락사진이다.

터널 시공중 붕락유형

터널굴착에서 가장 기본적인 요구사항은 지보재를 설치하는 동안 터널을 지탱할 수 있는 잠재력의 확보인데 굴착으로 인하여 터널 주변지반의 이완형태 뿐만 아니

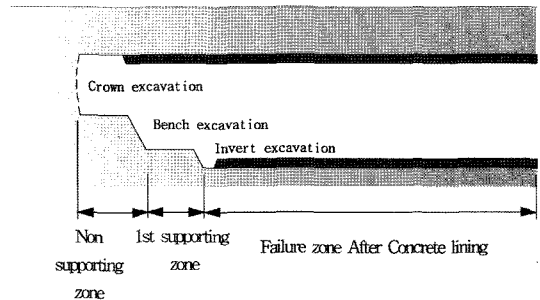


Fig. 6. Construction procedure depending on tunnel collapse pattern.

라 원지반의 높은 초기응력으로 인한 쪼개짐(spalling) 및 팽 터짐(popping)등과 같은 현상이 터널붕괴 시 발생할 수 있다. 따라서 이러한 터널의 붕괴형태는 Fig. 6 과 같이 시공순서에 따라 상이하게 발생되며 시공단계 별 3가지 붕괴형태로 분류할 수 있다.

굴착시공중 무지보 상태의 붕락

굴착중 발생할 수 있는 터널붕락 형태는 다음과 같이 6가지 유형으로 구분된다(Nicholson and Bieniawski, 1990): 벤치부 파괴, 천장부 파괴, 막장부 파괴, 전막장 파괴, 연약대 파괴, 표토층 파괴.

숏크리트 타설 후 붕락

굴착후 숏크리트를 타설한 경우 숏크리트가 경화되지

못한 상태에서 주변지반의 거동으로 1차 지보재가 한계 강도에 도달하면 크리프 파괴형태로 터널의 붕괴를 초래한다. 슛크리트 타설 후 강지보재의 설치 및 굴착속도의 조절로 지반의 안정성을 향상시킬 수 있다.

1차 슛크리트 타설 후 터널의 붕괴형태를 분류하면 다음과 같다: 상반 굴착직후 지지력 부족에 의한 인버트에서의 침하 및 전단파괴, 터널 주변지반의 측압으로 인한 바닥 의 부풀림 현상, 터널 측벽부 콘크리트 라이닝에서의 측압에 의한 파괴.

콘크리트라이닝 타설 후 붕락

터널 붕괴 확률이 작으며 모든 지보재를 타설한 후 붕괴가 발생하는 경우로 이는 터널 설계의 오류 등으로 인하여 터널의 구조적인 문제와 터널 시공시 품질관리 불량 및 이에 따른 터널 시공 후 유지관리의 소홀로 대부분 일어난다(Bieniawski, 1979, 1989). 이런 붕괴형태는 다음과 같이 분류된다: 전단파괴(shear failure), 압축파괴(compression failure), 휨과 단층의 조합파괴(combined bending and thrust), 극부파괴(punching failure).

고속도로 터널 붕락사례 분석

“A” 터널현장

“A” 터널 붕락 현장의 경우는 갱구부의 자연환경 훼손을 최소화하기 위하여 절취면을 최소화하려는 최근 터널설계에 추세에 따라 가장 흔히 발생하고 있는 터널 붕락사례이다.

본 설계대로 강관보강형 그라우팅공법을 시공한 후 터널굴착을 진행하던 중에 갱구에서 15m 굴진한 지점에서 터널 강지보재 설치 후 슛크리트 타설 중에 천단부 부근에서 낙석발생이 진행되어 지표면까지 붕락부가 연결되었고, 붕락현황은 Fig. 7, 8과 같다.

“B” 터널현장

“B” 터널 붕락사례와 같이 지표부까지 함몰되는 경우는 공사기간의 연장과 막대한 터널보강비가 증가 되어 터널현장 운영상에 많은 문제점을 야기 시키는 경우이다.

붕락구간에 대한 지질조사 보고서에 의하면 본 붕락구간은 다음 Fig 9, 10과 같이 계곡부에 위치하는 저토피구간이고 물리탐사 결과 일부 차별 풍화된 소규모 단층대가 존재하는 것으로 예상되어 지보패턴-F3로 설계되어 있었다.

그러나 실제 터널붕락구간 전후 매 막장에 실시한 막

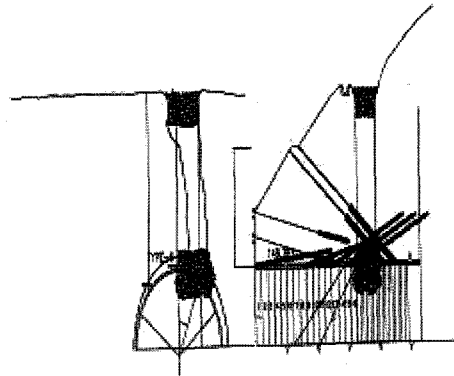


Fig. 7. The present situation of collapse accident of “A” tunnel and reinforcement sketch.



Fig. 8. “A” tunnel collapse shape.

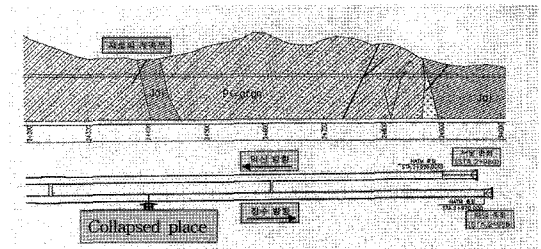


Fig. 9. “B” tunnel in the shallow depth section.



Fig. 10. Photograph of surface on the collapse tunnel.

장관찰기록에 의하면 붕락 발생구간에 인접한 전후 암반이 매우 양호한 구간이 전반적으로 분포하는 것으로 평가되어 지보패턴은 지보패턴-, 지보패턴-로 시공되었다. 또한, 붕락구간 직전의 막장면도 암질이 양호하고 압관정 결과에 따르면 암반등급은 1,2등급으로 양호한 것으로 평가되어 지보패턴을 변경하는 것이 적절하다. 본 붕락이 발생된 구간이 저토피구간(H=17.5 m)이고 계곡 부이므로 터널의 굴착에 따른 거동특성상 터널의 안정성을 저하시키는 경향 등을 고려, 지보패턴을 한 등급 낮추어 지보패턴-으로 관정후, 굴착 중 발파작업 종료와 동시에 터널 상부에서 붕락이 발생하였다(Kaser, 1980).

“C” 터널현장

“C” 터널의 터널연장은 630 m이고 편도 2차로 터널이다. 터널 갱구부 토피고는 약 8 m이고 전반적으로 풍화가 심한 풍화대가 광범위하게 분포하고 있고 특히, 국부적으로 탄층이 존재하여 터널 굴착에 매우 불리한 지질적인 조건으로 형성되어 있는 상태로 조사되었다.

따라서 터널 굴착 초기에도 이러한 불리한 지질학적 특성을 고려하여 굴착에 따른 터널 안정성 확보를 위해 터널 갱구부에서 3월 강관다단을 120°, C.T.C 60 cm 간격으로 보강을 한 후, 굴착 작업을 수행하였다. 이와 같은 보강공법을 적용하여 약 20 m 굴진중에 Sta. 0+660 인접구간에서 Fig. 11과 같이 터널 막장면과 측벽부의 과도한 변형에 의한 밀림현상(밀림 폭 : 약 60 cm)과 갱구부 상부에서 인장균열이 수 개소 발생하였다.

“D” 터널현장

“D” 터널 붕락 사례의 경우는 하행선 지점 (Sta.

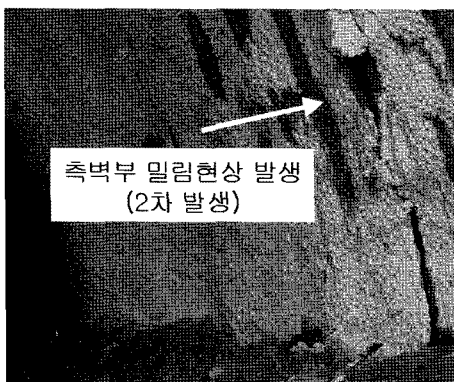


Fig. 11. “C” tunnel Sta. 0+660 excessive displacement in the side wall.

2+780)의 강지보 자리 굴착 후 강지보 설치 준비 작업 중 좌측 하단부에서 용수가 발생한 상태에서 기설치 된 강지보 및 슛크리트가 하중을 견디지 못해 막장붕락이 발생하였다. 이때 굴착은 Sta. 2+779 지점까지 굴착한 상태에서 터널 막장이 붕락되어 강지보의 파손과 약 50 m³의 토사가 유입되었으며 다음 Fig. 12, 13과 같이 터널 갱구부 사면이 함몰(5 m × 5 m × 2 m)되었다.

“D” 터널의 지반조건은 쥐라기에 형성된 퇴적암층이 기반암을 이루고 있으며 Fig. 14와 같이 사암 및 혈암이 우세하게 분포하고 화산암류가 맥상으로 관입되고 있는 것으로 조사되었다(Carmichael, 1989).

“E” 터널현장

“E” 터널은 NATM 공법으로 터널 굴착작업을 시행하던 중 2004년 7월 8일 오전 10시경 막장 천반부 붕락사고가 발생하였다. “E”터널의 붕락구간은 Fig. 15, 16과 같이 변성퇴적암류(편암 및 셰일, 탄질셰일)가 주로 분포하

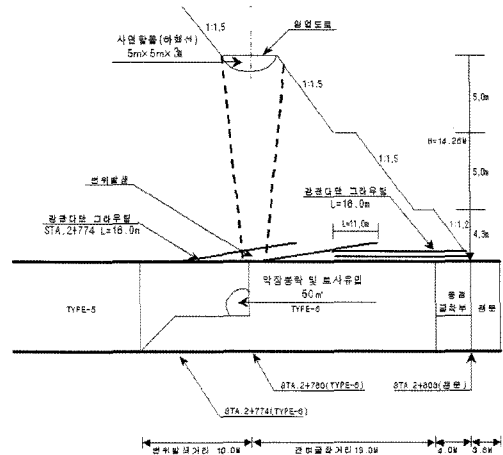


Fig. 12. “C” tunnel Sta 0+660 excessive displacement in the side wall.

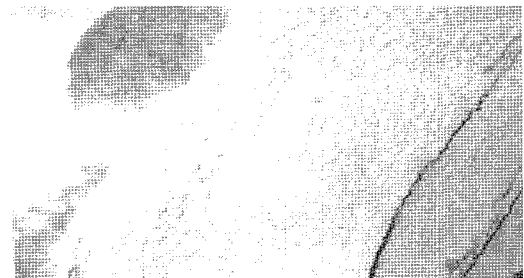


Fig. 13. The deformation of steel support.

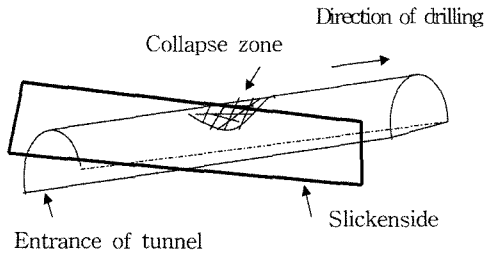


Fig. 20. The inclination 10° of slickenside in the collapse section.

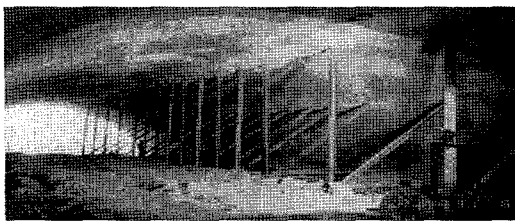


Fig. 21. Reinforcement inner tunnel.

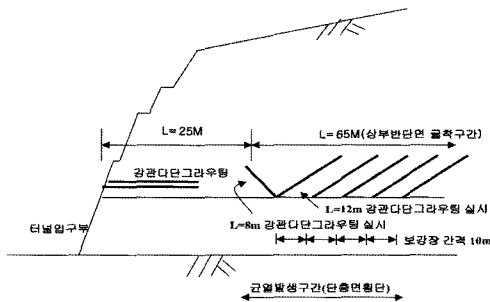


Fig. 22. The cross section of reinforcement in the collapse section.

도 상행선 터널 좌측상부에서 터널 방향과 10°각도로 교차되는 단층마찰면을 경계로 하여 지표에 균열폭 3 cm, 침하 20 cm 정도 발생되었다. 입구부 강관다단그라우팅공법이 적용된 17 m 구간에는 침하 및 균열이 발생치 않았다(Jeremic, 1991).

“H” 터널현장

본 터널은 시추조사결과 붕락구간은 붕적층이 2.0 m 내외로 분포하고 터널심도까지는 흑운모화강암, 각섬석 화강암 등 일부구간을 제외하고는 전반적으로 보통~양호한 암반층이 분포한다. Fig. 23, 24와 같이 쉐기형태의 암반블럭이 급작이 붕락하였고 낙반수량 27.85 m³, 여굴 깊이 약 4.69 m, 폭 10.3 m 발생하였다.

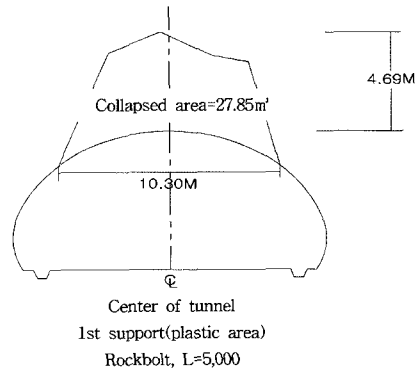


Fig. 23. Cross section of wedge collapse.



Fig. 24. Typical key block collapse.

결 론

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

1) 도로터널 시공중 발생된 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 토피고가 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 저토포고의 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) 터널내 국부적인 쉐기형 암반블럭 붕락의 경우는 대부분 지보패턴 에서 발생하였는데 이는 지반조건이 매우 양호한 상태에서 굴진거리를 증가시키기 위한 과발파 등으로 인하여 발생하는 것으로 분석되었다.

6) 고속도로터널 공사 중 발생한 붕락형태를 분석해보면 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 강관단단그라우팅 또는 FRP그라우팅 공법이 적용되는 경우가 적정하고 터널내 부분적인 암반블럭 붕락의 경우 에는 4m 길이 이상의 록볼트를 설치하고 반드시 붕락부위를 와이어 매쉬를 설치한 후 슛크리트로 붕락부위를 최대한 채워 터널행상을 이루도록 해야 콘크리트 라이닝 타설 후 지하수 등이 집수되어 누수가 발생하는 것을 방지할 수 있는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- 과학기술부, 2000, 첨단기법을 이용한 터널 정보화 설계 /시공 기술개발, 1-101.
- 전복현, 2006, 고속도로 터널 시공중 붕락 분석 연구, 서울시립대학교 산업대학원 공학석사학위논문, 80p.
- Bieniawski, Z.T., 1979, Determination of rock mass deformability, Experience from case histories, Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr., 16, 1, 237-247.
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classification, John Wiley, New York, 251p.
- Brandy, B.H.G. and Brown, E.T., 1985, Rock mechanics for underground mining, George and Unwin, 527p.
- Carmichael, R.S., 1989, Practical Hand book of Physical Properties of Rocks and Minerals, material, 741p.
- Chambon, P, Corte, J. F., 1994, Shallow tunnels in cohesionless soil, stability of tunnel face, journal of geotechnical engineering, 120, 7, 1148-1165.
- Hoek, E, Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Balkema, 215p.
- HSE, 1996, Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels, A review of sprayed concrete tunnels with particular reference to London Clay, Health and Safety Executive (HSE) Books, Sudbury, 80p.
- Hudson, J.A. and Harrison, J.P., 1997, Engineering rock mechanics, Pergamon, 444p.
- Jeremic. M. L., 1991, Ground Mechanics in Hard Rock mining, Balkema, 537p.
- Kaser, P.K., 1980, Effect of stress-history on the deformation behavior of underground openings, 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, 133-140.
- Nicholson, G. A. and Bieniawski, Z.T., 1990, A Nonlinear Deformation modulus based on rock mass classification, Geotechnical & Geological Engineering, 8, 3, 181-202.

2007년 2월 7일 원고접수, 2007년 3월 13일 게재승인

사 사

이 연구는 건설교통부 2004년 건설핵심기술 연구개발 사업 “대형·대단면 지하공간 창출을 위한 건설기술” 연구비 일부지원과 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면 붕괴 예측 및 대응 기술 개발) 연구비 일부지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

이수곤

서울시립대학교 토목공학과
서울특별시 동대문구 전농동 90
Tel: 02-2210-2407
Fax: 02-2243-2407
E-mail: sglee@uos.ac.kr

전복현

한국도로공사 익산-장수간 건설사업단
품질환경팀
Tel: 063-430-7275
Fax: 063-430-7409
E-mail: bobkook@hanmail.net

김낙영

한국도로공사 도로교통기술원
경기도 화성시 동탄면 산척리 50-5번지
Tel: 031-371-3342
Fax: 031-371-3409
E-mail: ynagkm@ex.co.kr