

터널 붕괴사례로 부터의 기술적 교훈

Technical lessons learnt from the case history of tunnel collapses

신휴성¹⁾, Hyu-Soung Shin, 권영철¹⁾, Young-Yun Kim, 배규진²⁾, Gyu-Jin Bae

¹⁾ 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Eng. Dept., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원, 선임본부장, Executive Vice President, KICT

SYNOPSIS : In this study, a database composed by 46 cases of tunnel collapses has been built up. Based on the database, comprehensive data analysis is carried out, providing us a number of the technical lessons, which can be considered in future design and construction to minimize possibility of tunnel collapse disaster. For making a better understanding, the technical lessons are given in two divisions: mountain tunnel and urban tunnel. Tunnel collapses taking place in the former tunnel are generally due to bad discontinuity condition of jointed rock mass. Otherwise, urban tunnel has weak condition generally on ground water and weathering of ground. Most of technical comments given in this paper are made based on the cases of tunnel collapses only used in this study, so that the comments seems to be hard to be available to all the tunnelling cases. However, the comment should be valuable technical lessons for tunnel engineers to consider in tunnel design or construction.

Keywords : tunnel collapse, technical lesson, mountain tunnel, urban tunnel

1. 서론

본 논문에서는 수집된 붕괴사례에서 제시된 주요 붕괴 원인 분석 및 기술적 고찰 내용을 취합하여, 각 붕괴유형별로 공통된 붕괴 발생 메커니즘 및 주요 발생 원인을 요약정리하고, 일반 기술자들이 기존 붕괴사고를 통해 생각해 볼 수 있는 기술적 주요 쟁점에 대해 논하고자 한다.

이를 위해 우선적으로 붕괴사례를 산악지역과 도심지역으로 분류하였다. 산악터널이나 도심지 터널 공히, 취약 토사층 뿐만 아니라 암반층을 모두 만나게 되나, 일반적으로 산악터널은 암반 불연속면에 의한, 도심지 터널은 취약 토사지반 특성에 의한 붕괴가 주를 이룬다. 산악지역에서는 도로터널이나 철도 터널이 주로 건설되는 지역으로, 산악지역의 특성상 갱구부를 제외하고는 상대적으로 도심도의 토피고를 가지고 암반상에서 터널시공이 이루어진다. 하지만 수집된 붕괴사례에 의하면 일반적인 암반의 취약한 불연속면 조건으로부터 유발된 붕괴사고와 같은 매우 일반적인 유형외에도 석회암 공동 등과 같은 매우 특수한 조건으로부터 유발된 붕괴유형도 다수 보고되고 있다. 본 논문에서는 산악지역에서 발생하는 붕괴유형은 크게 5가지로 구분하여 각각의 붕괴유형별로 공통적으로 관찰 가능한 붕괴 메커니즘을 정리하였다. 첫째, 가장 일반적인 산악지역 붕괴유형인 암반 불연속면 및 단층 파쇄대 등의 연약대를 통한 막장 붕괴이며, 둘째, 전체의 산악지역의 터널구간에 비하면 매우 짧은 구간이지만 붕괴사고가 지배적으로 발생하는 갱구부 구간에서의 붕괴, 셋째, 높은 산악지역에서 국부적으로 맞게되는 계곡부나 저토피 구간에서의 붕괴, 넷째, 굴진이 완료되어 슛크리트 라이닝 타설이 완료된 이 후에 막장과 충분히 이격된 구간에서 발생하는 붕괴, 마지막으로 석회암 지역에서 발생하는 매우 특수한 메커니즘의 붕괴사고로 구분한다.

반면 지하철 건설이 주를 이루는 도심지역의 터널 붕괴는 산악지역에서 보다 지반조건이나 지하수 조건에서 훨씬 취약한 조건을 갖고 매우 복잡한 붕괴유형으로 사고가 발생한다. 하지만 이를 세분화 하기는 힘들므로, 도심지역에서의 붕괴유형은 크게 3가지로 구분하여 정리하였다. 첫째 지하수와 연계가 되지만 취약지반조건에 지배적으로 영향을 받아 발생한 붕괴, 둘째 취약한 지반조건과 연계되지만 유로 형성과 이를 통해 발생하는 세굴현상에 지배적으로 영향을 받아 발생하는 붕괴, 마지막으로 이들과는 연계되지 않지만, 수집된 붕괴사례에 포함된 도심지내 기계화 시공상 문제발생 사례로 정리하였다.

2. 수집 터널 붕괴사례 현황

본 논문에서는 46개소의 터널 붕괴사례들이 수집되어 정리되었다. 우선 수집 사례의 종합적인 분석을 위해 수집자료 현황을 살펴보면 수집자료의 지역별 현황은 서울·경기가 전체의 37%로 가장 많은 분포를 보이고 있으며 다음으로 강원도와 부산 경남 순으로 조사되었다. 서울·경기에서는 도시철도가 대부분을 차지하고 있으며 강원지역은 경춘고속도로 및 영동선 확장공사에 따른 도로터널공사, 부산·경남 지역은 고속철도와 부산신항과 관련된 철도 터널 개소가 증가되어 다수의 사례가 축적되었다. 수집된 붕괴 사례 발생 위치별 현황은 도로 및 철도터널이 주를 이루는 산악터널, 지하철 터널이 주를 이루는 도심지 터널, 기타 하저/해저터널로 구분할 수 있다. 전체 67.4%(31건)이 산악터널로 도로터널이 27건 여수로 터널 2건 철도터널 2건이 수집되었다. 도심지터널은 도시철도 터널(11건)이 대부분을 차지하며 전력구 터널 3건이 수집되었다. 하저/해저터널은 도시철도 터널인 한강하저터널이 유일하였다. 수집 붕괴사례중 도로터널이 45.7%를 차지하며, 도시철도터널은 23.9%, 산악 철도터널은 9.6%로 분포하고 있다. 기타 전력구와 댐 여수로 터널이 각각 3건과 2건이 수집되었다. 굴착방법별 수집현황은 대부분이 NATM 공법에 의해 시공된 현장으로 쉘드 TBM 등과 같은 기계화 시공으로 건설된 터널사례는 전체의 2건에 불과하다. 이러한 통계들은 수집된 자료 현황을 의미하고 본문에서 정리된 기술적 교훈의 기초 배경을 이해하는데 도움을 주기 위함이지, 터널 유형이나 재원별 붕괴 발생 가능성이나 위험수준을 의미하지 않는다.

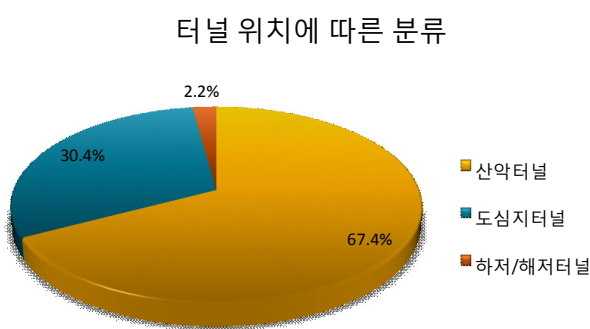


그림 1. 수집된 붕괴사례의 발생위치별 현황

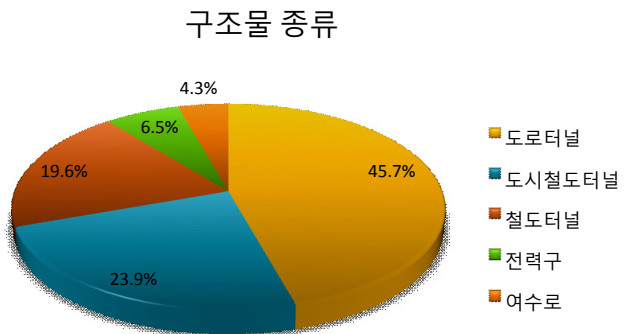


그림 2. 구조물 종류별 분류

3. 주요 붕괴 유형별 기술적 교훈

3.1 산악지역

3.1.1 불연속면의 연약대를 통한 막장 붕괴

(1) 전기 비저항 탐사결과 해석상 이상 구조대 영역의 과소평가

설계당시 조사결과 봉락구간의 추정파쇄대가 터널 상부에 발달되어 있어 굴착시 봉락발생 가능성이 낮은 것으로 판단하였으나, 실제 터널계획고까지 발달하여 봉락사고에 주요 원인이 된 사례가 빈번하다.

이는 설계당시 시행되는 전기 비저항 탐사를 통해 이상 구조선이 파악되었음에도 불구하고, 이상대로 평가된 영역을 너무 정량적으로 맹신하여, 이상 구조선의 연장을 너무 과소평가한 결과였다. 따라서 암반의 불연속면이나 단층대는 항상 연장성이 있으며 규칙성을 가진다는 것을 명심하고 시추조사나 전기 비저항 탐사 결과의 분석을 수행하여야 하겠다. 또한, 설계당시 검토된 지반조사 결과는 추정된 결과이므로 실제 현장과는 차이를 보일 수 있기 때문에 시공 중 반드시 육안관찰 및 계측 등을 통해 안정성을 확인해야 하며, 시험발파, 선진 수평보링을 적절히 활용하여 진동영향 범위와 이완범위를 파악한 후 보강방안을 선정하는 것이 바람직하다.

(2) 추가 봉락 및 대규모 확장성 붕괴의 억제

일반적으로 대규모 붕괴는 단계적으로 진행되며 막장의 불안정 요소로 인해 1차적인 소규모 봉락으로부터 확장되는 경우가 많다. 1차 소규모 봉락 후에는 터널 주변의 아치효과가 즉각적으로 교란되며 지반의 자체 지지효과가 저감되어, 용수 등의 추가 영향 없이도 1차 봉락부 배면의 추가봉락이 단계별로 진행될 수 있으며 대규모 붕괴로 확장될 가능성이 매우 크다. 따라서 소규모 봉락이라도 발생하는 즉시, 규모에 따라 슛크리트나 경량 기포 콘크리트 등의 적절한 재료로 충전하고 록볼트 등으로 원지반과 일체화 시켜 줌으로써 터널 주변의 아치효과가 유지될 수 있도록 하여야 한다. 아치효과가 교란되거나 막장 지반의 자립도가 매우 취약했을 시에는 굴착 직후 조기 지보 설치 및 소규모 봉락의 조기 대응 과 같이 대처시기가 매우 중요하다. 소규모 붕괴로 유발되는 터널 주변 이완영역은 다양한 방법으로 쉽게 확장될 수 있다. 한번 붕괴된 현상이 재 붕괴로 이어지면 1차 붕괴시보다 몇 배 큰 복구비와 공사지연을 가져 올 수 있음을 명심해야 한다. 터널 공사에 있어서는 공기에 쫓겨 무리하게 공사를 진행하다 훨씬 더 큰 낭패를 당하는 사례가 비일비재하다.

(3) 불연속면 기하학적 조건 파악 및 면 상태 파악

암반산악지역에서 터널이 굴진하면서 발생하는 썩기형 낙반은 복수의 불연속면이 교호하여 굴착면 주변에 썩기형 암괴가 형성되어 발생하며, 전단이동을 용이하게 만드는 절리면의 열화나 풍화 정도가 매우 민감하게 작용하므로 매 굴진시 막장관찰을 통해 절리면 상태를 면밀히 파악하는 것이 중요하다. 빈번하게 절리면이나 단층 파쇄대의 충전물의 지하수와 연계된 팽창성 특성 등이 매우 민감하게 영향을 미치므로 팽창성이 큰 일라이트 계열, 흑연이나 탄질의 충전물이 존재하거나 기반암의 열화나 풍화도가 매우 좋지 않은 때에는 이들의 공학적 특성파악 조사를 시행하는 등 매우 주의를 기울여야 한다.

산악 암반터널에서는 막장의 암반분류 결과 암반등급 점수가 비교적 양호하게 산정되었다 하더라도 불연속면의 방향성, 절리면 및 지하수 상태에 따라 썩기형 낙반이 흔히 발생한다. 따라서 암반등급이 양호할 때에는 굴진장마다 막장관찰 시 절리면 특성 파악에 중점을 두어 막장관리를 수행하는 것이 필요하다. 필요시에는 매 막장면에서 관찰된 절리면 정보를 연결하여 지질 종단면도를 작성하는 것이 매우 합리적이다. 이를 통해 발생 가능한 암괴 낙반을 사전에 예측하고 굴진에 따른 막장 상태의 변화를 관리하는 것이 바람직하다. 일반적으로 산악터널에서의 불연속면에 의한 파괴는 불연속면 특성을 고려하여 록볼트 타설방향과 CTC를 배치하고(예: 비대칭 타설) 타설한다면 경제적으로 암괴 낙반을 최소화시킬 수 있으며, 막장 스케일링 후, 슛크리트의 조기타설로 굴착면을 고르게 하고 굴착면 암괴를 일체화 시킴으로써 초기 암괴의 낙반(키블록 보호)을 방지하고 보다 큰 붕괴사고를 막을 수 있다. 때때로, 막장에 일정폭으로 뚜렷한 이질암종의 관입현상이 발견될 수 있으며, 이들의 관입방향과 서로 교차하는 절리군들과 연계하여 낙반이 발생한 사례가 있다.

(4) 반응성 막장 암종 협재시의 영향 저감

지하수와 연계하여 팽창성을 보이거나 전단저항을 상실하는 탄질이나 흑연질의 팽창성 암종이 막장을 구성하고 있거나 국부적으로 협재되어 있을시에는 즉각적이고 적극적으로 막장의 용수를 처리할 필요가 있다. 암거를 설치하거나 펌프를 이용하여 지하수를 터널 외부로 빠르게 배출시키는 방안을 모색하고, 막장의 적절한 위치에 수발공을 두어 반응성 암종이 지하수와 접촉되는 현상을 최소화 시켜주는 것이 막장안정에 매우 유리하다.

(5) 국부적 취약 지반인자의 인지

붕괴사례 중 일부 터널구간은 변성퇴적암류(편암 및 셰일, 탄질 셰일)가 주로 분포하고, 소규모 단층 파쇄대가 발달하고 있으며, 함탄층이 협재한 지질특성을 지니고 있는 경우가 있다. 이러한 지반특성으로

인해 터널 굴착 중 급격한 지질변화에 대한 예측이 어려워 붕락사고의 원인이 된 연약 파쇄대층에 대해 대처하지 못한 사례가 있다. 이러한 세일 및 탄질세일이 포함된 변성암 및 퇴적암 복합체 지반에서는 수평시추, 막장관찰, 변위계측 등 시공 중 다중적인 지반평가를 면밀히 수행하여 사전에 위험요인을 파악하고 대처하는 것이 중요하다.

(6) 숏크리트 기초부의 처리

일반적으로 단층 파쇄대 등 붕괴를 유발하는 연약대는 연장성이 있으므로 단선병렬형 터널을 시행할 시에는 선행하는 터널의 막장 지반상태와 계측결과를 반대편 터널 시공에 적극적으로 활용할 필요가 있다. 기존 몇몇의 붕괴사례에서는 붕괴구간과 인접한 반대편 터널에서 대규모 과대 변위가 발생하였거나, 다른 낙반사고가 발생한 경우가 있다. 또한, 선행 터널의 막장관찰 자료에서 발견된 취약 지반요인들이 후행 터널의 인접구간에서도 발견되는 사례가 빈번함으로 선행터널의 이상 징후들이 후행터널의 시공상에 매우 유용한 정보가 될 수 있으므로 적극적인 활용노력이 필요하다.

(7) 막장관찰 자료의 활용

막장면 맵핑은 굴착과정에서 노출되는 암반정보를 기록하는 것으로 가장 양질의 자료를 제공할 수 있으나, 시공현장에서는 부정확한 기재 및 무의미한 정보의 나열로 일관하는 경우가 비일비재하다. 한 붕괴 현장에서는 막장면 맵핑만 실시했을 뿐 막장관찰자료에서 인지된 위험요인들을 간과하고 대응방안을 강구하지 않은 채 공사를 강행하다 막장면 붕괴가 발생하였다. 향후 어떤 터널 현장이라도 막장면 맵핑을 어느 시점에서 어떻게 활용할 것인지에 관한 구체적인 방침을 사전에 정해둘 필요가 있다.

(8) 터널굴착 중 막장전방에 대한 암반정보 획득

실제 설계단계에서 지반정보를 충분히 확보하는 것은 재원이나 시간상 불가능한 것이 현실이므로 터널굴착과정에서 암반정보를 획득하기 위한 노력은 터널의 시공 안전성 확보와 직결된 문제이다. 한 붕괴 현장에서 비교적 소규모 막장면 붕락이 발생하였고, 연이어 터널천반 붕락 등의 대규모 붕괴사고가 가능한 상황이었다. 하지만 소규모 붕락 즉시, 즉각적인 TSP탐사 등을 수행하고 파악된 막장전방의 정보를 1차 붕괴구간 폐합을 위한 복구설계에 반영하여 붕괴구간을 조기에 폐합하여 대규모 함몰붕괴를 막을 수 있었다.

(9) 숏크리트 기초부의 처리

배수공의 설치나 공동구 설치를 위한 트랜치 시공시에 유발되는 숏크리트 기초부 들뜸현상은 즉각적으로 숏크리트 지보효과를 상실시켜 붕괴로 이어질 가능성이 높으므로, 어떠한 상황에서도 숏크리트 기초부의 굴착은 막아야 하며, 항상 건조한 상태를 유지하여야 한다. 유입수 배출을 위한 배수공 설치시 터널 바닥 중앙부에 설치하거나 피치 못해 측벽부에 설치하여도 숏크리트 기초부와 충분한 이격거리를 두고 시공되어야 한다. 공동구 설치를 위한 트랜치 굴착시에도 임시적으로나마 숏크리트 기초부를 지지하기 위한 대책을 마련하여 시행하여야 할 것이다. 여기서 강관파일의 타설이나 엘리펀트 풋을 통한 숏크리트 기초부 지지를 고려할 수 있을 것이다.

3.1.2 갱구부 함몰 붕괴

(1) 임시 응급조치

균열발생이나 과대변위 발생 구간에서는 국부적인 록볼트 시공보다는 압성토 시행이 단기적 변위폐합에 효과적이다. 또한, 천단부 변위 폐합은 천단부 보강과 함께 터널 측벽 하부 숏크리트 기초부의 보강과 병행하는 것이 매우 효과적임을 염두에 두어야 한다.

(2) 정확한 지반조건 미파악으로 인한 인버트 미설치

한 갱구부에서 발생한 붕괴사례에서는 터널 배면에서 집중호우로 인해 발생한 토사유출로 인하여 배면 공동이 발달되고 2차적인 강지보재의 과대변위 양상으로 발전되었다. 이러한 붕괴 과정의 직접적인 원인은 자연적인 요인으로 불규칙한 지층에서 토사 세굴유출을 발생시킨 집중호우이지만 간접적인 원인으로서는 이러한 세굴유출 사전 인지 부족과 이러한 공극발생으로 인한 지보재 지지능력 상실을 간과한 것으로 보고된 바 있다. 따라서 본 붕괴 현장에서는 세굴이 용이한 지반특성을 사전에 인지하여 지보재

의 지지성능을 유지시키기 위한 인버트 설치 등의 조치를 사전에 시행하였더라면 대형 붕괴사로를 막을 수 있었을 것이다.

(3) 갱구부 가시설 및 보강공법의 영향

갱구부 처리를 위해서 굴진 전 강관다단 그라우팅 등 지반 보강공법을 시공하고 앵커와 함께 가시설을 설치하는 것이 일반적이다. 다수의 붕괴사례를 통해 보고된 바에 의하면 강관다단 보강 그라우팅의 시험시공 결과 지반개량 형상이 불규칙한 할렬 맥상주입 형태로 나타난 경우가 다수 발견되어 보조공법 시공품질이 좋지 않은 경우가 많았다.

풍화토층이 깊게 분포하는 지반의 상부에 시공되는 가시설 앵커나 갱구부 상부의 사면을 보강하기 위해 시공되는 소일네일이나 앵커는 원지반의 강성을 증가시키는 요인으로 작용하여 터널 천단부의 안정성을 증대시킬 수 있을 것이다. 하지만 이와는 반대로 앵커 설치 후에 가한 긴장력은 앵커 정착부 가까운 지점에서의 구속압을 감소시키는 역할을 하게 되어 지반의 전단강도를 감소시켜 이완영역을 확대시키고 주요 지하수 유동경로를 제공하여 붕괴를 촉진시키는 요인이 될 수 있다. 즉, 터널 갱구부에서 인장력을 가하는 앵커 등의 보강공법은 가시설 및 사면 자체의 안정성은 확보할 수 있어도 가시설 배면의 변위 및 응력의 재분배를 일으켜 터널 자체의 안정성에는 위해요인이 될 수 있다.

(4) 터널내 배수공 처리 방법

갱구부에서와 같이 상대적으로 지반이 취약하고 풍화가 많이 진행된 구간에서는 유입 지하수 처리를 위해 시행되는 시공중 배수방법이 부절절하면 터널 측벽이 연화되어 지보재의 성능이 발휘될 수 없는 상황이 되므로, 갱구부와 같이 지하수에 쉽게 연화되는 지반에서는 일반적인 측벽배수방법 보다는 중앙배수방법이 바람직하다.

(5) 갱구부 굴착은 가급적 양방향으로

저토포의 갱구부 굴착시 갱내에서 갱구로 향하는 1방향 굴착은 지보재 응력 증가와 종방향 아칭효과 상실을 초래할 수 있으며 지반조건이 불량한 경우 지반이완에 따른 막장면 붕괴와 사면함몰로 귀결될 수 있으므로 굴진시에는 가급적 양방향으로 굴진하여 어느정도 토포가 확보된 구간에서 관통을 시키는 것이 바람직하다.

(6) 지반조건에 부합하는 시공 중 변경조치

시공중에 설계 당시 예상되었던 지반조건과 다르게 파악되어 지보패턴 변경 등의 조치가 가능했음에도 불구하고, 이를 무시하고 막장붕락 이전까지 추가적인 지반조사나 굴착방법상의 변경조치를 시행하지 않고 당초 시공계획대로 진행했던 사례가 빈번하다. 이는 터널 시공중 붕괴사고에 대한 안전 불감증이 붕괴사고로 귀결된 전형적인 사례이다.

(7) 지반조사에 물리탐사와 상호 보완

시추조사는 현장의 지층조건을 직접 확인할 수 있지만, 제한된 수와 위치의 시추공을 통해 지반정보를 얻게 됨으로써 잘못된 판단을 유도하는 결정적인 자료로써 활용될 수 있다. 이에 해당 지반의 지질조건에 적합한 물리탐사 방법을 선정하여 탐사결과와 정확성을 확보하고, 물리탐사 결과상에 이상조건이 발견된다면 반드시 추가 시추를 통해 지반조사결과와 보완이 이루어질 수 있는 조치를 강구하는 것이 바람직하다.

(8) 갱구부 시공에 관한 가이드 마련

최근 환경 친화적인 갱구설계 지침에 따라 저토포고 조건에서 갱구부가 계획됨으로써 사고위험이 더욱 증가하고 있으므로, 지질조건 변화나 지형적인 조건을 심도 깊게 검토하여 현장 실무자와 설계자간의 논의를 통해 파악된 위험요인에 대한 실증적인 대안을 사전에 마련하는 것이 필요하다.

3.1.3 저토포 및 계곡부 구간 붕괴

(1) 연약대의 자립시간을 고려한 조기 지보 설치

NATM 터널의 기본원리상 1차 지보재는 굴착대상지반의 자립시간 내에 설치하는 것이 필수적이다. 저토포 구간이나 계곡부 구간은 수직방향으로 발달된 연약대 출현이 빈번하여 지반강도가 낮고, 부족한

토포고의 영향으로 아칭효과 발현이 어려워 지반의 자립시간이 상대적으로 짧아질 수 있다. 따라서 이러한 지반의 자립시간을 기대키 어려운 구간에서는 시행되어온 시공 싸이클의 조정을 통해 지보 설치시간을 앞당겨 조기에 지보재를 시공할 필요가 있다.

(2) 전방 지반예측과 사전 보강

산악지역의 계곡부에서는 터널 종방향으로 지층변화가 심하고 인접지역 보다 지반상태가 불량한 것이 일반적이다. 계곡수가 존재하고 집중강우 발생시에는 유로가 형성되어 지반의 전단강도 저하와 세굴을 유발할 수 있다. 따라서 산악지역에서 저토포 구간과 계곡부 구간은 특히 높은 관심을 요하며, 지표조사와 터널 전방 지반조사를 통해 계곡부 구간의 정밀 지반조사를 수행하고 필요시 국부적 사전 그라우팅 등의 보조공법 투입으로 사전에 위험요소를 제거하는 노력이 필요하다.

(3) 천단부 보강공법의 중첩시공 및 여유있는 적용범위의 설정

포아폴링이나 강관다단 그라우팅 공법 등의 보강공법이 충분히 시공되었음에도 붕괴사고가 발생했던 사례가 있다. 여기서 붕괴발생 위치 및 시점을 살펴보면 천단부 보강공법 타설 구간의 끝단에서 막장붕괴가 발생하였거나, 중첩 시공되지 않은 포아폴링 끝단에서 다음의 포아폴링 타설 준비 중에 막장붕괴가 발생하였다. 이러한 붕괴사례를 통해 항상 지반 상태는 불확실성을 내재하고 있으므로 다양한 지반 조사를 통해 파악된 취약지반조건의 보강구간은 충분히 여유를 가지고 설정토록 하고, 중첩시공을 기본으로 하여야 한다.

(4) 함몰구간 주변지반 보강

붕락부위는 경량콘크리트 또는 슛크리트 등으로 반드시 밀실하게 채워야 하고, 지표면 상부 함몰부도 함몰구간을 중심으로 채우며, 함몰지역의 추가 이완영역 발달과 잠재적인 대규모 추구방괴를 예방하기 위하여 함몰직경의 최소 2배 이상 범위까지 그라우팅을 실시하는 것이 바람직하다.

3.1.4 굴진완료 후 후방 붕괴

(1) 굴착완료 이후에도 완전폐합시까지 지속적인 계측관리 필요

일반적으로 상·하반까지 굴착이 완료되어 지보재 타설이 완료된 터널은 매우 안정상태에 있다고 여겨진다. 하지만 최근들어 이러한 고정관점이 통하지 않는 후방 붕괴사고가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 터널 굴착완료 이후의 지속적인 계측관리의 중요성, 단층대구간에서의 라이닝 조기타설에 의한 터널 안정성의 확보가 매우 중요하다는 것을 염두해 둘 필요가 있다.

(2) 막장 관찰의 전문화 및 막장관찰자료의 적극 활용

팽창성 지반 등 매우 특수한 지질구간에서 터널을 시공하는 경우, 지질 및 암반에 대한 지질구조적 특성과 암석역학적 특성에 대한 분석이 반드시 수행되어야 하고, 매 막장마다 작성되는 막장관찰 자료를 활용해 터널 종단 지질도를 작성하고 향후의 지질구조선 변화추이를 파악하는 것이 매우 중요하며, 막장관찰 자료의 체계적인 관리를 통해 굴착 완료 후나 향후 공용 중 유지관리 등에도 적극적으로 활용될 수 있도록 해야 한다. 또한 매 막장마다 수행되는 막장관찰은 지질 전문가를 통해 정밀하게 수행되고 중요한 지반정보가 누락되지 않도록 해야 한다. 충분히 막장관찰을 통해 정보화되어 사전 인지된 위험인자들은 충분히 사전에 대응하여 대형 붕괴사고를 막을 수 있다.

(3) 불연속면의 방향성 파악

엽리가 발달하는 흑운모 편암이 분포지형에서 엽리의 방향성 및 파쇄대, 단층대의 분포 방향이 사면 및 터널 굴진 방향과 일치할 경우 터널 및 사면의 설계 및 시공 시 각별한 주의가 필요하다. 특히 터널과 평행한 두터운 연약대층은 터널 굴진시에 막장관찰을 통해 인지하기 어렵지만 굴진중이나 굴진 완료 후에도 지하수 등과 연동하여 터널 인접부에서 큰 하중으로 작용될 수 있기 때문이다.

3.1.5 석회암 지역 붕괴

(1) 석회암 공동의 조사 및 대응

석회암 공동지역의 경우 공동이 다양한 크기나 형태로 존재하게 되며, 터널 굴진시 굴착면과 접하여

파악이 되는 경우도 있으나 터널 굴착면에 인접하여 확인되지 못하는 경우도 많다. 따라서 석회암 지역을 통과할 때에는 석회암 공동의 사전 파악 노력이 매우 중요하다. 터널 막장면과 만나 공동이 파악되었을 시에도 공동과 접한 터널 막장의 안정성에 크게 악영향을 미치게 된다. 일부 붕괴사례에서 터널내에서 석회암 공동을 조사하기 위하여 GPR 탐사를 실시한 바 있으나 그 결과는 좋지 않았다. 터널 내 전방지질뿐만 아니라 주변지반에 대한 조사방법 선정을 위한 구체적인 검토를 수행하는 것이 바람직하다. 석회암 지역에서의 터널굴착 시 석회공동이 나타나는 경우, 석회공동의 크기 및 터널에서의 이격거리, 충전물의 유무 및 종류 등에 따라 석회암 공동에 대한 보강대책을 수립하여야 할 것이다.

(2) 급격한 지하수 용출에 대비

석회암 단층파쇄대를 통해 지하수 유입과 지상부 싱크홀이 우려되는 곳에서는 급작스런 지하수 용출이 발생할 수 있으며 이에 대한 특별한 사전 대응책 마련이 필요하다. 지하수의 유무가 공사 진행에 영향을 미치는 경우에는 공사 중 펌프 용량을 늘려 용출수를 터널 외부로 빠르게 배출시키고, 처리시설 부족에 따른 환경문제가 발생하므로 오탍수처리시설 용량을 확충하는 방안을 모색해야 한다.

3.2 도심지역

3.2.1 취약지반 붕괴

(1) 미고결 충적층에서의 조속한 막장면 지하수 처리

하천 하부통과시 지하수와 연계된 미고결 충적층을 만나 대형 지표 함몰 붕괴사고가 발생한 사례가 있다. 본 사례에서 터널 통과구간 지반조건은 터널 상부에 퇴적층(자갈모래), 터널 하부에 풍화암으로 구성되어 있었으며, 일부 암반구간에도 활동면을 가진 단층점토대나 파쇄대가 출현하고 있었다. 이러한 미고결 상태의 충적층 지반에서는 무지보 자립시간이 매우 짧고, 막장안정성도 매우 취약하기 때문에 유입수를 효과적으로 차단하기 위해 설계 및 시공에 있어서 각별한 주의가 필요하다. 이러한 상황에서 터널 막장면의 지하수 처리 시에는 그라우팅공법이 일반적으로 적용되지만 지하수압이 높고 지하수 유동속도가 빠른 상태에서는 그라우팅의 효율이 떨어지고 차수효과가 발현되지 않는 경우가 빈번하다. 이러한 경우에 지반의 지하수 유동을 막기 위하여 Deep Well을 설치하여 지하수위를 저하 시킨 후 그라우팅을 타설하여 성공적으로 차수효과를 발현한 사례가 있다. 즉 고수압 조건에서 차수 그라우팅은 배수공법과 적절히 조합하면 보다 효과적인 시공이 될 수 있다.

(2) 자립력 부족 지반에서의 지보재 지지력 향상

천단부 풍화대의 토피 감소와 사력층이 천단부에 근접하게 발달된 일부구간에서 터널 측벽 및 상·하반 경계부로 물이 흐르거나 압력상태의 집중용수가 발생되어 천단 및 측벽부 자립력 부족이 우려되는 경우에는 상반을 1, 2단 분할굴착하고 강지보재 하단에 침하방지 하중분배 Beam을 설치함으로써 무지보 자립시간을 단축하고 천단침하를 감소시킨 사례가 있다.

(3) 자립력 부족 지반에서의 여굴 최소화 노력

당초 Mini Pipe Roof(L=6m)를 Gel Time의 조절이 가능한 강관 1단 Grouting (L=6m, 1.5 Shot)으로 변경하여 터널 천단부 보강을 강화하는 천단부 Payline 보강을 실시하는 등 천층 토사지반에서의 갱내 여굴을 최소화 시키는 대책을 강구하여 터널의 안정성을 확보한 사례가 있다.

(4) 막장의 복합 지반조건에 고려

도심지 천층터널의 경우 한 막장에서 매우 복잡하고 다양한 지질조건이 관찰되는 사례가 빈번하다. 이러한 조건에서는 파괴형태도 암반의 낙반형태와 토사지반의 전단파괴 등 복합된 파괴형태를 보이는 경우가 많다. 따라서 취약지반에서의 보강공법과 굴착단면 분할방법 결정시 이러한 복합지반 특성과 가능한 복합 붕괴형태 등이 사전에 충분히 검토되고 반영되어야 한다.

(5) 터널 막장의 안정화

터널 막장 안정을 위해 강관보강 그라우팅 공법을 적용함으로써 포아플링 효과가 있으며 차수 및 지반 보강효과도 기대할 수 있다. 또한 상부 반단면의 굴착시에는 발파진동에 의한 영향이 없도록 기계식

으로 굴착하여야 하며, 지질 상태가 악화될 경우 단면 분할을 함으로써 무지보상태의 경간을 지반의 자립경간 보다 작게 하여 안정을 얻도록 해야 한다. 이 외에도 용수가 기준 이상이거나 토립자가 계속적으로 지하수와 함께 유출될 때에는 고결 및 차수 그라우팅으로 보강하면 막장의 안정을 꾀할 수 있다.

(6) 접속부 구간에서의 터널 시공

본선터널과 횡갱터널 연결부는 응력 상호작용으로 인한 구조적 취약구간으로 콘크리트 라이닝의 추가 보강 등이 요구되므로, 횡갱터널의 수평 지반조사와 보강방안의 합리적인 결정을 위한 검토가 필요하다. 횡갱 터널 위치는 작업통행로를 우선한 확실적인 간격으로 결정되기 보다는 지질여건이 양호한 지점으로 신중히 결정하는 것이 바람직하다. 양측 본선터널 굴착 후에는 횡갱터널을 굴착하므로 본선터널 굴착시 발파진동의 누적으로 파쇄대 절리계의 이격이 심화되어 켜기파괴와 미끄러짐 파괴 가능성이 있다. 따라서 주절리 방향이 터널굴착 방향에 대해 반대방향인 불리한 구간에서는 발파공법을 지양하고 진동을 최소화 할 수 있는 기계굴착 등으로 시공방법을 변경할 필요가 있다.

(7) 세립질 사질토 지반에서의 발파

터널 천단 상부에 세립질의 모래가 포함되어 있는 경우 발파진동에 의한 과잉간극수압이 발생할 수 있고 유효응력이 감소하여 지반의 전단강도가 감소할 수 있으므로 액상화가 예상되는 경우 대책 수립이 필요하며 터널 시공중 갱내 유입수량을 분석하고 추가의 갱내 그라우팅 시행여부를 판단하여 적합한 지반보강 대책을 수립하는 것이 바람직하다.

(8) 조밀한 하부 반단면 굴착

하부 반단면 굴착시에 시행되는 발파는 소발파로 하여 지반의 진동을 최소화 하는것이 바람직하다. 상부 반단면에 설치되는 강지보재의 간격을 고려하여 1회 발파의 굴진길이를 H형 강지보공의 유효지지가 1조씩만 되도록 하는 것이 좋으며, 하부 반단면 굴착시 사이클 타임을 잘 맞추어 상부 반단면의 H형 강지보공 받침부의 유효지시시간을 단축하는 것이 바람직하다. 하부 반단면의 H형 강지보공도 굴착 즉시 설치하고 저부 받침부의 지지가 견고하게 되도록 강관췌기를 삽입해야 한다. 이러한 조건을 고려해 1회 굴진장을 합리적으로 결정하여 조밀한 굴진장으로 굴착하는 것이 바람직하다.

(9) 가인버트 타설 및 균열발생 대책

상반굴착 후 숏크리트 폐합을 위하여 가인버트 타설시에는 바닥에 어느 정도 두께의 토사 되메우기를 시행하여 중차량이 가인버트 숏크리트에 직접적으로 접촉되어 운행되지 않도록 하는 것이 중요하다.

(10) 엘리펀트 풋 설치

숏크리트에 과대 균열발생을 사전에 예방하기 위해서 숏크리트 우각부에 엘리펀트 풋을 설치하여 숏크리트 라이닝 기초부를 견실히 고정되게 하는 것이 유리하며 필요시 엘리펀트 풋을 강관 그라우팅 등으로 보강하여 기초부 역할을 강화하는 것도 바람직하다.

3.2.2 유로형성으로 인한 붕괴

(1) 과도한 막장 지하수 처리

터널 내부로 다량의 지하수가 유입되는 경우에는 발생용수를 유도배수하고 차수 보강공법의 적용과 함께 장기적으로 발생 가능한 토립자의 유실과 추가침하의 발생을 억제하는 방안을 강구하여야 한다. 이를 위해서는 향후 터널내부에서 막장면 물빼기공, 터널외부에서 지표수를 처리하기 위한 방안 등 터널로 유입되는 지하수를 처리하기 위한 지하수처리공법을 적용하기 위한 검토가 필요하다.

(2) 막장 천단 및 어깨부 지반의 풍화도 관찰

다단계에 걸쳐 진행되는 유로형성은 터널 막장의 천단부나 어깨부에서 매우 풍화가 심하여 투수능이 매우 좋은 지반조건에서 이루어지기 쉽다. 따라서 시공 시에 막장을 대표하는 지반등급 수준의 변화를 관찰하는 것도 중요하지만 막장관찰시 국부적인 막장의 풍화정도, 국부적 단층 파쇄대 출현, 관입암 상태 등과 같은 국부적 지반조건의 관찰과 기록도 매우 중요하다. 따라서 굴진단계에서 설계당시 시행한 지질조사가 미흡한 것으로 판단될 경우에는 지반조건이 급격히 변하는 경우에 대비하여 갱내 수평선진 시추조사와 막장관찰을 통하여 설계 지반등급과 국부적인 지질학적 취약인자들을 꼼꼼히 확인하고 시공

을 진행시켜야 한다.

(3) 세굴에 취약한 지반 구성물질

지하수에 의한 대표적인 침하 메커니즘은 지하수위 저하로 인한 압밀침하와 유로형성과 세굴발생으로 세립분 유실에 의한 전단강도 저하 및 공동발생으로 유발되는 국부적 붕괴유형을 들 수 있다. 이러한 침하유형들은 지하수를 성인으로 하지만 그 발생의 이론적 배경은 전혀 다르다. 일반적으로 전자의 경우는 지하수위 저하에 의한 유효응력 증가로 발생되며 이는 국부적으로 발생되기 보단 지하수위 저하 현상과 직접적으로 연계하여 전체적으로 발생하므로 지표침하 계측과 함께 지하수위 변화 관찰이 중요하다. 따라서 지표침하 발생형태, 침하 발생시기와 지하수위 저하시기 및 응력이력 등과 동일한 조건으로 지하수위가 저하된 인접지역의 지반침하가 발생하지 않았을 경우에는 첫 번째 침하 유형인 지하수위 저하에 의한 침하 가능성은 매우 낮을 것으로 판단할 수 있다. 반면에 지하수 유출에 수반된 토립자의 유실에 의한 침하 가능성은 지반 구성물질 특성 파악을 통해 추정할 수 있다.

터널 막장 및 상부지층을 이루고 있는 지반이 풍화도 이하의 모래질이고 세립분 함유율이 10%이하 수준으로 매우 적은 경우는 세굴에 매우 취약한 지반이다. 이러한 지반에서의 지표침하는 국부적으로 분포하는 연약대에서 발생한 다량의 지하수의 유입으로 인한 부분적인 세굴 및 토립자의 유실에 의해 발생할 가능성이 매우 높다. 이러한 세굴에 의한 침하는 일반적인 압밀침하 해석으로 파악이 불가능하다.

(4) 중장기 지하수 유동 상태 안정화 유지

시공중 막장의 과다 지하수 유입은 굴진을 위한 안정화뿐만 아니라 장기적 터널의 안정성을 유지하기 위해서도 차수공이나 배수공을 통해 지하수 유동을 안정화 시키는 것이 바람직하다. 임시적인 막장의 지하수 처리를 통해 굴진이 성공적으로 진행되었다 하더라도 터널 배면에서 빠르게 흐르는 지하수 조건에서는 항상 세립토 유실을 초래할 수 있고 이는 중장기 적으로 배면 공동과 지반의 전단강도를 약화시켜 굴착 완료 후에도 대형 붕괴사고가 발생할 수 있다. 이러한 현상은 다수의 굴착완료 후 막장 후방 붕괴사례에서도 찾아볼 수 있다.

또한, 붕괴구간의 보강은 붕괴된 암반부위와 인근주변을 충분히 고결시켜 지하수를 차단하고 상재하중에 대하여 안정되어야 하며, 터널 상부 붕괴구간과 주변지반의 공극을 그라우팅으로 충전하여 지반침하억제, 터널 막장부의 자립능력 극대화 및 지하수 유입량 최소화, 터널 재굴착에 따른 주변 구조물의 침하방지를 위하여 즉각적이고 적절한 대책공법을 마련하여야 한다.

(5) 집중강우나 과다 용출시 세립분 유출 확인

시공 중이나 붕괴가 발생한 이후에도 집중강우가 발생하였거나 어떠한 이유에서건 과다 지하수 용출이 발생하였을 때에는 토사 세립분의 유출 유무를 확인하는 것이 좋다. 일반적으로 집중 지하수 용출시에 세립분 유출이 함께 진행된다면 시공 중 터널 바닥부에 마련되어 있는 가배수로의 지하수가 매우 탁한 상태가 되어 세립분 유출상태를 추정할 수 있다. 즉, 과다 지하수 용출시에는 가배수에서 흐르는 지하수의 탁도를 일정간격으로 확인하고 비교해 나갈 필요가 있다. 유관으로도 확인 가능할 정도로 세립분 유출이 심할 경우는 굴진이 가능하다 하여도 중장기적인 터널 안정성 유지를 위해 즉각적으로 토사 유출을 막기 위한 대책을 마련하는 것이 바람직하다.

(6) 오목한 향사형 지질 구조선

지층이 아래로 오목한 향사형 구조로 되어있는 경우는 투수능력이 다른 지층간 경계부를 통해 지하수가 집적되고, 본 구간을 터널이 관통할 시 순간적으로 지하수 유입이 집중될 가능성이 높다. 따라서 설계당시 시추조사와 전기 비저항 탐사로 결정된 터널 지질 종평면도나 막장관찰을 통해 파악된 지층구조와 지질 구조선을 참조하여 사전에 향사형 지층구조를 파악하고 잠재해 있는 과다 지하수 유출에 대한 사전 대응방안을 마련해 놓으며, 과다 지하수 유출 발생 시, 즉각적으로 현장 조치를 취할 수 있도록 준비하는 것이 바람직하다.

(7) 시추조사 공을 통한 지하수 유입

작은 시추공 하나가 주요 지하수 유입 경로를 제공하여 토사 유출과 함께 대형 붕괴사고로 발전된 사례가 있다. 따라서 기존 시추조사 현황을 참조하여 사전에 시추공 위치를 파악하고 터널과의 교호 여부를 파악하여, 파악되지 않은 시추공도 막장관찰을 통해 인지할 수 있도록 노력할 필요가 있다. 시추공

발견 시 시추공을 통한 지하수 유입 정도를 파악하여 과다 지하수 유출 시에는 즉각적으로 그라우팅 등으로 폐합하여 지하수 유출을 막는 것이 바람직하다.

(8) 배수공법의 적절한 활용

터널 상부에 지하수위가 존재하여 터널 굴착시 막장면에 지하수 유출이 발생하고 침투로 인한 수압작용 및 토사유출 등으로 인해 막장 자립성이 불량할 것으로 예상되는 조건에서는 갱내 막장면에서 적극적으로 지하수를 배제할 수 있는 공법을 계획하는 것이 바람직하다. 막장면에서 적용가능 한 지하수 배제공법은 막장부 물빼기공이며 물빼기공을 체계적으로 적용하여 용수의 영향을 최소화 시킬 수 있다.

(9) 막장면 작업 기능공의 숙련도 향상

터널작업의 성패는 막장면에서 작업하는 기능공들의 숙련도에 의해 좌우되므로 기능공들의 작업숙련도를 향상시킬 수 있는 현장 교육과 실무 프로그램을 운영하여 시공 품질 향상을 유도하는 시공관리와 필요하다.

(10) 막장면 응급조치 장비 구비

터널 천장부 상부에 일정 두께의 풍화암층이 있고 그 위에 충적층이 있는 경우에는 터널이 일시에 붕괴되는 것이 아니라 일정 시간을 두고 붕괴되는 진행성 파괴를 보이는 것이 일반적이다. 따라서 충적지반을 대상으로 굴착하는 도심지 터널 공사에서는 막장면에 인접하여 슛크리트 노즐과 철망등 응급장비를 구비하여 비치해 두는 것이 필요하다.

(11) 현장 근무자 일별 인수인계

굴착시 지하수 및 토사유출이 발생할 경우 초기에 상황대처가 매우 중요하며, 막장 근무자의 정확한 보고 및 교대자와의 충분한 현장상황에 대한 인수인계가 막장에서 이루어져야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 산악지역과 도심지 지역에서 발생한 46개의 붕괴사례를 기반으로 설계나 시공시에 고려되어 잠재된 붕괴 가능성을 최소화 시킬 수 있는 주요 고려항목을 도출하고, 각 고려항목에 대한 기술적 고려 방향 및 대처방안을 정리하였다. 본 논문에서 제시된 기술적 교훈들은 기존 붕괴사례의 개별 분석을 통해 도출된 결과이므로, 모든 현장에서 반드시 고려되고 적용되어야 하는 필수항목들은 아닐 것이다. 하지만, 항상 지반은 불확실성이 내재해 있고, 아무리 양호한 지반조건에서도 중대형 붕괴사고가 발생할 수 있다는 사실을 기존 붕괴사례를 통해 잘 알 수 있다. 반면에 아무리 좋지 않은 지반조건 및 시공 여건에서도 터널 기술자들의 평상시 위험에 대한 경각심과 위험 요인에 대한 적극적인 대처 노력을 통해 대형 붕괴사고를 사전에 막을 수 있거나, 최소한 붕괴규모를 최소화 할 수 있다는 것 또한 기존 사례를 통해 알 수 있다.

사 사

본 논문은 한국건설기술연구원 기관고유사업의 일환으로 진행되었으며, 본 논문에 사용된 붕괴사례를 제공해 주신 많은 터널 전문가 분들과 붕괴 사고 대응 시나리오 및 대응 매뉴얼 작성 연구를 함께 진행하고 있는 에스코 아이에스티의 황제돈 사장님과 박치면 상무님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2008), **터널공사 재해 최소화 및 예방기술 개발(V)**, 건기연 기관고유사업 연차 보고서, 건기연 2008-056, p. 572.
2. HSE(1996), **Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels**, pp. 15-28.