

도심지 지하철 터널의 붕괴유형과 원인 Modes and Causes of Collapse of Subway Tunnels

박 광 준, KWANG JOON PARK
(주)대우엔지니어링, 과장, Senior Engineer, DAEWOO Engineering Company.

이 인 근, IN KEUN LEE
서울시 지하철 건설본부, 설계감리실 과장, Assistant Director, Design and Supervision Division, Seoul Metropolitan Government.

SYNOPSIS :

The 2nd phase of Seoul Subway, Lines 5,6,7 and 8, is in progress. To reduce the surface traffic congestion during construction the greater part of the system has been engineered by bored tunnelling. The current tunnelling methodology is based on the New Austrian Tunnelling Method.

Several collapses have been reported to date. Most of the collapses took place in the area formed with soft ground. The modes and causes of the collapses were progressive failures in the unsupported surface and sliding failures due to the unfavourable joint direction. The major causes turned out to be the weakness of ground and the sudden influx of ground water from the surface.

Some measures to prevent the failures are also presented. To ensure the safe tunnelling through the soft ground the unsupported excavation area has to be minimized and closed as early as possible. Additional support measures such as supporting core, sealing shotcrete, forepoling, spread footing, face rock bolting and grouting should be employed as well depend on ground conditions.

1. 서 론

과거에 건설된 지하철은 건설비, 토목기술, 공사기간, 그리고 선형조건상의 이유때문에 개착식 공법이 주로 적용되어 왔다. 그러나, 이러한 개착식 공법은 노면교통에 막대한 지장을 초래하여 도시민의 활동에 큰 제한을 주게 되었고, 지하철망이 확장되면서 주택지나 하천하부등을 통과하는 것이 불가피해짐에 따라 터널공법의 적용이 증대되고 있다. 그동안 도심지 지하철 건설공사에 있어서 NATM 터널공법은 주로 암반상태가 양호한 경우에 대해서만 선택적으로 적용되어 왔으나, 근래에는 원활한 노면교통의 제공이란 측면에서 지반조건에 구애받지 않고 노선 대부분에 대해서 터널식 공법을 적용하게 되었고, 이에따라 중적층, 중화토/중화암층, 단층파쇄대층과 같은 불량한 연약지반 층에도 터널의 굴진이 불가피하게 되었다.

현재 도심지 지하철의 터널은 모두 NATM 개념에 의해서 설계·시공되고 있는데, 이 공법의 기본원리는 굴착후 굴착면 주위에 지보물 적절히 설치함으로써 굴착면 주변의 지반에 지반아치를 형성시켜 터널을 안정시키는 것이다. 이는 어떤 요인에 의해서 굴착면 주변 지반층에 Arch를 형성시키지 못하거나, 자립시간 이내에 지보설치가 불가능한 지반에 대해서는 NATM 공법을 적용할 수 없음을 의미한다. 따라서, 연약지반을 인위적으로 보강하거나 추가의 지보재를 설치함으로써 NATM 개념의 적용이 가능한 지반으로 개량한 후 터널을 굴진하여야 한다. 그러나, 실제로는 불량한 조건의 지반에 대해서 적절한 대책없이 굴착하거나, 낮은 수준의 기능도에 의해서 무리하게 굴착을 진행하다가 붕괴의 위험에 직면하게 된 경우가 종종 있었다.

본 논문에서는 그동안 제 2기 서울 지하철 터널현장에서 발생한 터널의 붕괴유형을 다각적으로 분석하고 이들의 원인을 규명하여 향후 터널의 설계 및 시공에 도움을 주고자 한다.

2. 도심지 지하철 터널의 특징

2.1 지반특성

도심지의 일반적인 지반특성은 기반암층이 깊게 발달되었을 뿐만 아니라, 지역에 따라 심한 지각변동과 중화작용을 받아 단층파쇄대가 많이 발달되어 있으며, 중화심도의 변화가 심한 특징을 보이기도 한다.

지반조사 결과에 의하면, 서울 지하철 노선의 종단은 건조한 규경암층에서 연약한 중적토층에 이르기까지 매우 다양한 지층을 대상으로 관통하게 되는데, 그중 절반 이상이 보통 내지 심한 정도로 중화된 암반층을 통과하도록 되어 있으며, 일부구간에서는 연약한 중적토층이 막장전면에 나타나는 경우도 있다. 더욱이 이러한 연약한 중적층 지역은 풍상 지하수위가 높기 때문에 터널시공시 과도한 지반변형이나 대량의 지하수 유입에 따른 터널붕괴의 가능성이 높다고 하겠다.

이와같이 최근에 건설되고 있는 지하철 터널은 이제까지 국내에서는 경험해보지 못한 매우 불량한 지반조건을 대상으로도 공사를 해야하는 상황에 직면해 있기 때문에 그 어느때 보다도 신중한 지반공학적 접근이 요구되고 있다.

2.2 주변 환경 특성

초기에 건설된 지하철은 공사비 문제와 비교적 원활했던 노면 교통상태등의 이유로 넓은 간선도로에 연하여 개착식 공법을 적용하였기 때문에, 주변건물이나 지장물에 피해를 최소화하면서 공사를 진행할 수 있었다. 그러나, 지속적으로 지하철 노선망이 확장되면서, 후속적으로 건설되는 지하철은 노면교통의 포화상태, 기건설된 지하철과의 환승 등을 고려하여 협소한 이면도로나 사유지(주택, 빌딩) 하부로의 심층 통과가 불가피하게 되었다. 따라서, 이제까지 지하철 건설의 주공법이었던 개착식 공법은 더이상 경제적인 공법이 될수 없게 되었으며, 국내 토목기술의 괄목할만한 발전에 힘입어 터널식 공법에 의한 지하철 건설이 선호되고 있는 추세이다.

무엇보다도 도심지의 협소한 이면도로면에는 낮은 빌딩들이 밀집해 있고 도로하에는 각종 지하시설물(상수도, 하수도, 전화 케이블, 송전설비등)이 매설되어 있어, 도심지에서의 지하철 터널붕괴는 곧 과도한 사유재산의 피해와 공공시설의 기능마비를 초래할 뿐만 아니라, 지하철 건설 자체의 공사비 증가와 공기지연을 유발시켜 막대한 국가적 손실을 초래하기 때문에, 붕괴방지를 위한 최선의 대책들이 우선적으로 적용되어야 할 것이다.

2.3 설계특성

도심지에 건설되는 지하철의 정거장은 승객들의 접근성을 향상시키기 위하여 가능한한 지표에 근접하여 위치시키고 있다. 따라서, 터널의 상부에 충분한 두께의 견고한 지반피복층을 가지지 못할 경우가 종종 발생할 뿐만 아니라 경우에 따라서 터널을 충격층에 건설해야 하기도 한다. 이러한 노선종단의 선정은 설계단계에서 실시한 지반조사를 모태로 하여 이루어진다. 그러나, 설계단계에서 조사공을 통하여 추정된 지층의 구조는 완벽한 것이 필수 없으므로, 시공중에 경험하고 관측된 여러가지의 지반정보에 의해 편설계는 지속적으로 수정보완되어야 한다. 이를 위해서는 유능한 지질전문가와 계속전문가의 조사와 분석이 선행되어야 하고, 이를 모태로 대상 지반에 가장 적절한 지보매단을 결정해 줄 수 있는 터널 기술자가 반드시 현장에 상주하여야 할 것이다. 이러한 사항은 NATM의 설계는 현장 기술박약에 의한 수정보완을 전제로 실시된 예비설계안을 분명히 시사하는 것이다. 그러나, 각 지역의 지반특성과 현장여건을 다각적으로 충분히 검토하여 현실에 근접한 설계를 수행하여야 하는 것이 설계자가 있어서는 안될 중요한 과제이다.

국내 NATM 터널의 설계기술은 도입된지 10여년이 경과한 현재까지도 도입 당시의 도면들이 아무런 비반없이 계속해서 재복사되고 있으며, 기술 선진국에서 실험과 검증용 기지 폐기되거나 전한된 설계사들이 아직도 국내에서는 그대로 적용되고 있음은 국내 터널기술자들의 자성이 촉구되는 사항이다.

2.4 시공특성

도심지에서 수행되고 있는 지하철 공사는 교외지나 산악 지역과는 달리 주변여건이나 상황에 의해 크게 영향을 받는다. 첫째로, 인락지반을 자주 접하게 되고 둘째, 암반구간의 발파를 자유롭게 할 수 없을 뿐만 아니라 셋째, 주위에 기존 유틸리티 시설이나 건물등에 피해를 주지않는 시공을 실시하여야 한다. 따라서, 상기 조건들을 만족시키는 시공을 위해서는 적절한 장비와 전문인력을 투입하여야 한다.

특히, 발파진동에 의한 피해를 줄이기 위해서는 발파전문가가 상주하여야 하며, 진하를 줄이기 위해서는 채택된 공법의 기본원리를 철저히 준수하는 시공이 되도록 하여야 한다.

도심지 지하철 공사는 공사장이 협소하므로 안전사고에 대한 충분한 배려도 있어야 한다.

2.5 환경보존

도시는 오래전부터 많은 사람들이 모여살아 왔으며, 시설이 집중적으로 건설되었기 때문에 지하철 건설에 따른 급작스런 자연환경의 변화는 도시기능에 큰 장애를 일으킬 수 있다. 지하철 건설에 따라 가장 직접적이며 광범위하게 영향을 미치는 사항중의 하나는 지하철 노선망의 확충에 따른 도시 전체의 광범위한 지하수위 저하와 이에따른 지표침하나 건물균열발생, 그리고 각종 지하시설물의 빈번한 기능장애의 발생일 것이다. 그리고, 도시의 지하수위가 저하되면 고층건물에서 개발해 사용하고 있는 우물이나 지하수원의 고갈이 예상된다. 그밖에 지하철 운행에 따른 지중 온도변화, 소음진동이 인체에 미치는 영향, 화확 투입제가 지하수에 미치는 영향등 지하철 건설이 자연생태계에 미치는 영향등이 명확하게 규명되어야 한다.

3. 터널의 붕괴유형 및 원인

3.1 일반

지하철 터널의 붕괴는 공사중 붕괴와 운행중 붕괴로 대별될 수 있으나, 이제까지 발생하였던 지하철 터널 붕괴사고의 대부분은 굴착공사중 발생하였기 때문에 여기서는 터널공사중 붕괴한 경우에 대해서만 고찰하고자 한다. 터널붕괴의 규모는 작은 규모의 여굴발생에서부터 대규모의 붕괴에 이르기까지 다양하다. 그러나 이러한 붕괴 규모별 정의가 명확치 않기 때문에 표현의 혼동을 피하기 위해서 잠정적으로 다음과 같이 정의키도 한다.

- 여굴(Overbreak) : 설계된 굴착단면보다 크게 굴착된 것을 총칭하며, 시공상 불가피하게 발생하는 시공허용오차와, 지반의 변형을 반영한 지반허용변형량을 고려한 설계상의 허용 굴착 한계선(지불선)이다.
- 과대여굴(Excessive Overbreak) : 설계에서 허용하는 지불선을 초과하여 굴착한 경우를 일컬으며 터널의 안전에 심각한 영향을 미칠수 있다. 풍상 0.5~1.0m³ 정도의 굴착면 주변지반이 유실된 경우를 일컫는다.
- 붕락(Fall) : 터널속벽이나 천정이 과도하게 떨어져 내린 것을 일컬으며, 풍상 1.0~5.0m³ 정도의 낙반이 발생한 경우에 해당된다.
- 함몰붕괴(Daylight Collapse) : 터널내부에서 발생한 과대 여굴이나 붕락이 지표면까지 연장되어 지표면에 과대한 함몰을 초래한 경우를 일컫으며, 터널의 구조적 기능이 완전히 상실된 상태에 해당된다.
- 붕괴(Collapse) : 과대 여굴에서 시작하여 붕락, 함몰 붕괴에 이르기까지 모든 형태의 크고 작은 터널 구조물의 기능손상을 총칭하는 의미이다.

3.2 터널의 붕괴유형별 원인분석

3.2.1 발생위치별 붕괴특성

공사중 발생한 터널붕괴를 발생위치별로 분류하면 터널 굴착 단계에 따라 그림 1과 같이 4개소로 대별될 수 있으며 그 특성은 아래와 같다.

1) 무지보 막장면에서의 붕괴

이제까지 터널굴착시 가장 빈번히 발생하였던 붕괴 유형으로, 지반조건과 지하수 유입상태 그리고 기능공의 숙련도 미숙등의 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 붕괴의 규모도 작은 여굴에서부터 대형의 함몰붕괴에 이르기까지 다양한 형태로 나타나고 있다.

2) 지보가 설치된 상반구간에서의 붕괴

터널막장으로부터 터널폭의 1D~2D까지의 후반에 위치한 상반구간에는 무지보 막장구간에 비해서 상대적으로 강성이 큰 지보재가 설치되었기 때문에 3차원상으로 응력이 집중하게 되는데, 이 구간에 타설된 슛트리트는 아직 강도가 충분히 발현되지 못한 Green Shotcrete 상태일 뿐만 아니라, 지반 거동과 지하수 흐름도 급격히 변화하는 불안정한 구간이기 때문에 지보재의 지지력은 거의 한계상태에 도달해 있다고 볼 수 있다.

3) 하반 굴착구간에서의 붕괴

하반을 굴착하게 되면 터널의 직경은 상반 굴착후의 직경에 비해서 거의 2배에 이르게 되고, 1회 굴진장도 상반에서의 굴진장에 비해서 2~3배 정도로 시공하기 때문에 붕괴의 가능성이 높아지게 된다.

4) 인버트 링폐합 구간에서의 붕괴

대부분이 터널에서는 인버트 굴착후 링폐합이 이루어지게 되면 내공변위도 일정값에 수렴하게 되고 터널은 안정된 상태에 도달한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 내공검측결과 콘크리트 복공의 설계단면이 부족한 경우에는 기 타설된 슛크리트를 일정누께 제거해야될 경우가 있다. 이때 과도하게 제거하게 되면 주변 슛크리트에 응력이 집중되어 균열이 발생하거나 부분적인 붕괴가 발생할 수도 있다.

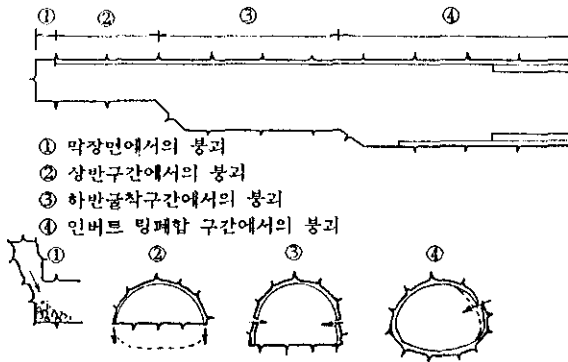
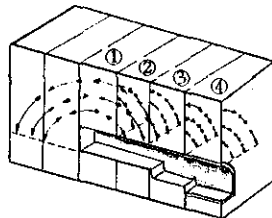
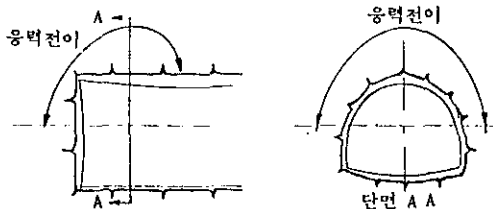


그림 1. 굴착단계별 붕괴 발생위치



(가) 3차원상의 응력전이



(나) 주변지반의 응력과 변이

그림 2. 터널 주변지반의 응력전이

3.2.2 붕괴유형 및 원인분석

1) 현황 분석

제 2기 서울 지하철 공사중 발생하였던 터널붕괴현황을 정리하면 표 1과 같다. 여기에 나타난 바와같이, 대부분의 터널붕괴는 지하수위가 높은 충적층 하부에 3m 이하의 얇은 암피복두께를 갖고 PD-3나 PD-2 지보패턴으로 굴착되던 복선터널에서 발생하였음을 알 수 있다. 그리고, 터널붕괴를 굴착단계별 발생위치별로 구분하면 10건중 7건이 무지보 막장면에서 발생하여 대부분을 차지하고 있으며, 지보가 완성된 상반구간에서 2건, 그리고 하반굴착 지역에서 1건이 발생하여, 터널공사의 전 단계에서 붕괴 가능성이 있음을 시사하고 있다.

한편, 물리학적 또는 공학적으로는 큰 의미는 없으나, 8건이 수직구로부터 25~50m 굴진하였을때 붕괴가 발생하였음을 알 수 있다.

2) 파괴개념별 붕괴유형

터널의 굴착중 발생한 붕괴를 파괴 개념별로 구분하여 설명하면 첫째는, 지반의 절리방향이 터널굴진방향과 불리하게 형성되어 있음으로써 발생하는 Sliding(or Wedge) Failure이고, 둘째는, 슛크리트층 하부기초의 침하에 따른 전정부의 전단파괴이며, 셋째는 굴착면의 지지력 부족이나 과도한 지하수 유입에 기인한 토사층의 진행성 파괴(Progressive Failure), 그리고 네번째는 주변지반의 Creep 거동에 기인한 장기적인 Creep Failure로 대별될 수 있다. 이러한 파괴개념에 의해 터널의 붕괴특성을 규명하고 붕괴원인을 분석하여 정리하면 다음과 같다.

가) Sliding Failure(or Wedge Failure)

그림 3에서처럼, 지반절리가 터널축과 거의 직교하고 경사가 20~45° 상향으로 발달된 지층을 굴진할 경우, 터널굴착시 막장면 상부가 쏟아져 내려오는 Sliding Failure가 발생하기 쉽다. 그리고, 그림 4에서처럼, 지반절리가 터널축과 거의 평행하고 경사가 굴진방향과 거의 평행할 경우에는 터널 축벽의 주변지반이 절리면을 타고 쏟아져 내릴 가능성이 높다. 서울 지하철 붕괴 현황중 이와같은 Sliding Failure에 의해서 붕괴된 경우가 4건을 차지하고 있다. Sliding Failure가 발생하게 되는 주원인은 첫째, 지반조사시 단층파쇄대응의 확인이나 지층의 절리방향 확인이 이루어지지 않고 있기 때문이며 둘째, 터널굴착시 정확한 막장관찰결과에 따라 굴착방법과 지보패턴을 탄력적으로 변경하지 못한데 기인하며 셋째, 기능공의 숙련도 및 이해도가 낮아 지보순서와 지보방법을 적절하게 이행하지 않은데 기인한다.

나) 침하에 따른 전단파괴(Shear Failure)

그림 5에 나타난 바와같이 굴착면의 지지력이 약할 경우에는 1차지보가 완료된 터널축벽이 침하하게 된다. 연약한 토사층에 건설된 터널에서 이러한 침하가 발생하면 천정상부의 전로피하중이 1차지보에 전달되므로 슛크리트층은 전단파괴가 발생하여 균열이 생기거나 붕괴하게 된다. 서울 지하철에서도 1건이 이와같은 터널의 침하에 따른 전단파괴에 의해서 붕괴된 것으로 판단된다. 이와같은 1차지보층의 전단파

표 1. 계 2기 서울 지하철 터널 붕괴현황

(1991.10 - 1993.3)

붕괴지역	터널단면 (지보법면)	암피부두께 (막장지반)	지반조건 (지하수위)	굴진거리	발생위치	붕괴규모	파괴유형
A	복선 (PD - 3)	중화암 4m (중화암)	층적토 10m (GL. - 2m)	10m	막장	붕락	진행성 파괴
B	복선 (PD - 2)	중화토 3m (중화암)	층적토 21m (GL. - 3m)	40m	막장	함몰붕괴	진행성 파괴
C	복선 (PD - 2)	중화암 3m (중화암)	층적토 22m (GL. - 7m)	40m	막장	함몰붕괴	Sliding Failure
D	복선 (PD - 3)	중화암 3m (중화암)	층적토 16m (GL. - 4m)	25m	막장	함몰붕괴	진행성 파괴
E	복선 (PD - 2)	연암 4m (연암)	층적토 21m (GL. - 9m)	20m	막장	함몰붕괴	진행성 파괴
F	단선 (PS - 4)	중화암 5m (연암)	층적토 15m (GL. - 10m)	80m	막장	붕락	Sliding Failure
G	복선 (PD - 3)	중화암 2m (중화암)	층적토 10m (GL. - 7m)	180m	막장	함몰붕괴	진행성 파괴
H	단선 (PS - 3)	중화암 2m (중화암)	층적토 15m (GL. - 6m)	50m	상반	함몰붕괴	Sliding Failure
I	복선 (PB - 2)	잔류토 4m (잔류토)	매립토 6m (GL. - 6m)	25m	하반	함몰붕괴	전단 파괴
J	단선 (PS - 4)	경암 5m (경암)	잔류토 2m (GL. - 15m)	25m	상반	붕락	Sliding Failure (Creep Failure)

괴를 초래하는 터널의 침하원인으로서, 첫째, 굴착 지면 지반의 지지력이 불충분한 경우(그림 6) 둘째, 공사중 배수구를 축벽에 인접하여 설치하거나 원할한 배수를 하지않아 지반이 지지력을 저하시킨 경우(그림 7) 셋째, 장비의 원활한 운용을 위해서 터널 중앙하부를 굴착한 경우(그림 8참조) 넷째, 토사층에 작은 모피를 남기고 터널을 굴진한 경우등이다.

다) 진행성 파괴(Progressive Failure)

터널 막장면은 무지보 상태이기 때문에 지반이 연약하거나 지하수 유입이 과다하게 되면 시간이 지남에 따라 지반의 지지력이 저하되면서 수십분 내지 수시간에 걸쳐 진행성 파괴가 일어난다. 서울 지하철 붕괴의 절반은 이와같은 진행성 파괴에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 터널의 진행성 파괴가 발생되게 하는 주된 원인으로는 첫째, 굴착지반의 자립시간이 지보설치 시간보다 짧을 경우 둘째, 터널내 용수량이 과다하여 굴착지반이 지지력을 약화시키고 1차지보설치를 곤란하게 할 경우 셋째, 굴착즉시 Sealing Shotcrete 타설이 제대로 이행되지 않는 경우 넷째, 굴착방법과 지보 패턴이 지반조건에 부적합하게 설계·시공되는 경우 다섯째, 기능공의 숙련도와 이해도가 낮아 굴진장, 지보순서 및 지보방법을 제대로 이행하지 않은 경우등이다.

라) Creep Failure

터널은 1차지보에 의해서 팽배압이 이루어지면 안정된 상태로 회복되는 것이 일반적이다. 그러나, 인위적으로 설치한 1차지보재는 시간이 경과함에 따라 지지력이 저하되기 때문에 이에따른 균형유지를 위해서 장시간에 걸쳐 주변지반이 Creep 거동을 하게되며 때로는 터널의 붕괴까지도 초래하게 된다. 그러나, 이러한 터널의 Creep 거동은 터널굴착후 상당한 시간이 경과한 후 발생하기 때문에 계속에 의해서 쉽게 확인되기 때문에 파괴에 이르는 매우 드물다. 서울 지하철 붕괴중에는 Creep성의 Sliding Failure가 1건 발생하였다. 이러한 Creep Failure를 발생시키는 주된 원인으로서는 첫째, 1차지보재의 품질이 적절하지 못하거나 설치가 부적절 하였을 경우 둘째, 굴착면 주변 지반이 응력이 넓은 범위까지 이완된 경우 셋째, 터널의 장기적인 배수기능 저하와 터널주변 구조물 신속등으로 하중조건이 달라진 경우등이다.

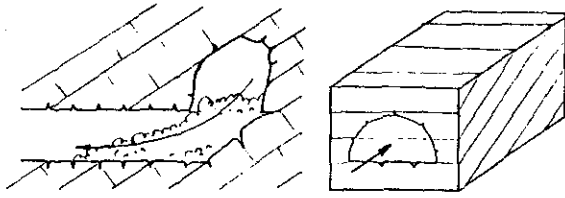


그림 3. 막장면에서의 Sliding Failure

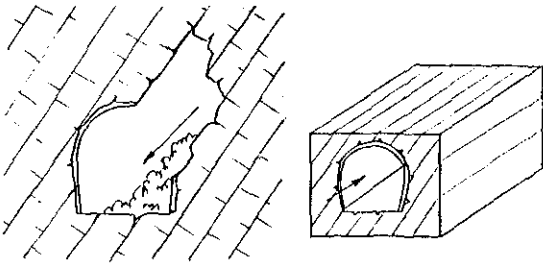


그림 4. 터널 측면에서의 Sliding Failure

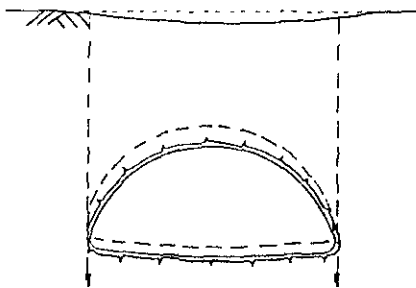


그림 5. 터널의 침하

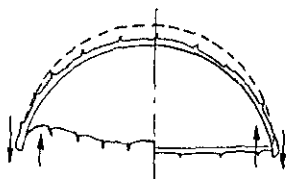


그림 6. 지지력 부족에 의한 침하



그림 7. 공사중 배수구에 의한 침하

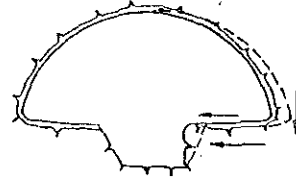


그림 8. 중앙 하부 굴착에 의한 침하

4. 터널붕괴 방지대책

4.1 굴착대책

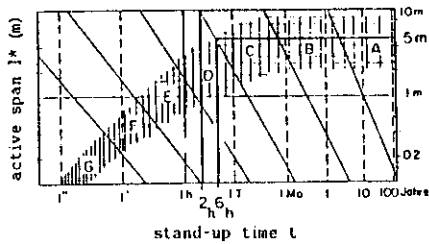
NATM의 기본원리상 1차지보재는 굴착대상 지반의 자립시간 이내에 설치하는 것이 필수적이다. 막장면의 자립시간은 암의종류 및 상태에 따라 크게 달라지나 일정조건에 따른 암반일 경우에는 굴진장과 굴착폭에 영향을 받는다. 그림 9는 Laufer가 제시한 굴진장과 굴착폭에 따른 암의 상태별 막장면 자립시간은 나타낸 것이다. 예를들어 복선터널의 경우 (D≈10m) 양호한 암반조건(A, B, C)에서는 무지보 자립시간이 1일 이상이기 때문에 지보설치를 위한 시간이 충분히 확보될 수 있다. 그러나, 풍화가 심하거나 파쇄된 지반(D, E)의 자립시간은 수십분에서 수시간밖에 되지 않기 때문에 굴착폭을 현저히 줄이는 것이 필수적임을 알 수 있다.

따라서, 현재 풍화암이나 풍화로 지역에서 널리 쓰이고 있는 Ring Cut이나 Multi Bench 공법은 굴착폭이 커서 침하량이 과대하게 발생하므로 터널천정 및 지표면 침하를 최소화하고 구조물을 막장면 자립시간내에 안전하게 구축하기 위해서는 분할굴착과 조기에 링폐합을 할 수 있는 CD나 CRD 또는 측면 선진도강공법이 효과적이다. 그러나 분할이 많아질수록 공종이 복잡하여 공기가 많이 소요되고 고도의 기능수준이 요구되기 때문에 이에대한 충분한 고려가 있어야 한다.

그림 10은 연약한 암반지층에 적용되는 굴착공법별 적용특성을 간략하게 도식화한 것이다.

4.2 지보대책

NATM공법에는 원래 주지보재가 굴착후 즉시 설치되어 주변 지반의 이완과 붕괴를 저항하도록 되어 있으나, 앞에서 검토한 붕괴유형 및 원인분석결과에서 나타난 바와같이, 주지보재만으로는 충분한 터널의 안정성을 확보하지 못하는 경우가 있으므로 이때에는 다음에 제시하는 추가의 지보대책을 적용하여야 한다. 그러나, 지반이 극히 연약하여 막장의 자립시간이내에 지보설치가 불가능할 경우에는 보강 Grouting, Forepoling 또는 막장면 Shotcrete 타설, 지지코아 쏘치, 막장면 Rock Bolt 설치등의 대책이 적용될 수 있다.



rock mass class	condition of rock mass
A	intact rock
B	stratified rock
C	moderately jointed rock
D	blocky and seamy rock
E	crushed but chetically intact rock
F	squeezing rock
G	swelling rock

그림 9. 암종별 굴착 폭과 굴진장에 따른 자립시간

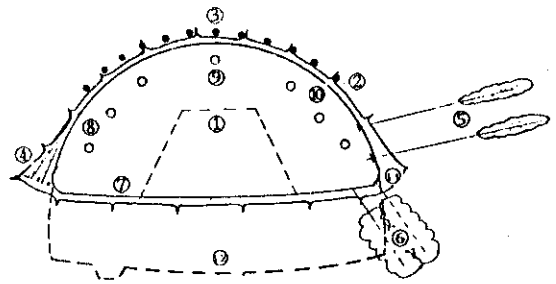
Excavation Method	Ring-cut method	Multi-bench method	CD methods	CRD methods	Sideheading method
Main condition	shell		flat		
size of tunnel section	large (50~100m ²)		very large (over 100 m ²)		
stability of original ground	slightly poor		poor		very poor
allowable settlement values	large		middle		small
construction period	middle		long		
Note	care of the vertical load value care of the horizontal load value strength around the upper half bottom care of removing center diaphragm or side drift				

그림 10. 연약지반에서의 터널 굴착대책

4.2.1 상반굴착시 지보대책

1) 지지코아(Supporting Core)

기존의 Ring Cut 공법은 대형의 지지대를 제공한다는 측면에서는 바람직하나 굴착면의 공간이 협소하여 슛크리트나 Rock Bolt를 제대로 설치할 수 없다는 단점이 있기 때문에, 지지코아의 규모를 축소시켜 막장면 지지의 목적도 달성하면서, 1차지보도 원활하게 설치할 수 있는 소형의 지지코아 방식을 채택하는 것이 바람직하다. 지지코아 상부와 측부에서 철망설치, Steel Rib설치 및 Shotcrete 타설을 원활히 하기 위해서는 Core 상부와 측부에 2.0m 정도의 공간이 확보되어야 한다.



- ① 지지코아
- ② Sealing Shotcrete
- ③ Forepoling
- ④ 확대기초
- ⑤ Anchor
- ⑥ 주입보강
- ⑦ 가인버트
- ⑧ 수발공
- ⑨ 지반주입
- ⑩ 3각 격자형 거더
- ⑪ 언검부 길이음
- ⑫ 링패합

그림 11. 연약지반에서의 터널 지보대책

2) Sealing Shotcrete 타설

지반이 극히 불량한 경우에는 일정 단면적만 분할굴착한 후, 비력반출전에 굴착면과 막장면에 대해서 5cm이상의 Sealing Shotcrete를 타설하여 굴착면을 조기에 안정시킨 후 주변 지역을 계속 굴착하도록 해야 한다.

3) Forepoling 설치

중화암층보다 강도가 약한 모든 지층에 대해서는 매 막장마다 굴진장의 2.5~3.0배 길이의 Pipe를 수평에 가깝게 설치하여야 한다. 이때 횡방향 설치구간은 터널중심의 120° 구간에 설치하고 배치간격은 30cm 정도가 되도록 한다. 터널 천정부에 토사층이 나타날 경우에는 소형 Sheet Pile에 의한 Lagging을 설치하는 것이 효과적이다.

4) 상반측벽 하부 확대기초설치

굴착저면의 암반조건이 불량할 경우에는 지보설치후 측벽저면이 침하하여 터널 크라운 상부에 하중이 집중되어 진행성 파괴를 유발시킬 가능성이 있기 때문에 침하방지를 위한 측벽 확대기초의 설치가 필요하다. 확폭크기는 저면에서 50cm 이상이 되도록 하고 철망과 슛크리트로 채우도록 한다. 확폭과 유사한 효과를 발휘할 수 있는 또다른 대책은 Steel Rib 사이에 H-Beam을 삽입시켜 받치는 방법도 고려해 볼 수 있다.

5) Anchor 설치

상반터널의 측벽하부가 침하될 가능성이 있는 경우에는 굴착면으로부터 충분히 떨어진 곳에 Anchor체를 형성시킨 후 인장력을 발휘하여 침하를 방지하는 방법도 고려해 볼 수 있다. 토사지반에서는 Anchor가 효과적이며 풍화된 암반 지역에서는 인장 Rock Bolt의 설치가 효과적인 것이다.

6) 측벽하부 주입보강

측벽하부에 지지말뚝 기초의 역할을 할 수 있는 보강 grouting이 적용될 수 있다.

7) 상반 가인버트 설치

굴착면은 조기에 숏크리트에 의해서 폐합을 시킬수록 구조적으로 안전하다. 따라서 상반굴착후 저면에 가인버트를 설치하여 조기에 팽폐합이 되도록 한다. 이때 가인버트는 편평하게 설치하지 말고 충분히 깊게 설치하여 구조적인 Shell이 되도록 한다. 가인버트를 타설한 후에는 차량 하중에 의한 손상을 방지하기 위하여 30cm이상의 refill을 하여야 한다.

8) 막장면 수발공 설치

막장면으로부터 많은 양의 물이 스며나올 경우에는 5~6m 길이의 수발공을 설치하여 막장전면에 잔류되어 있는 물을 일정 장소로 유도배수 시키는 것이 바람직하다.

9) 지반주입

앞에서 제시한 지보대책에 의해서도 막장면이 불안정하거나 용수가 과다할 경우에는 보강주입이나 차수주입을 먼저 실시한후 굴착을 해 나가는 것이 바람직하다. 그러나, 시간이 많이 소요되고 고가이므로 주입공법의 적용은 신중을 기하여야 한다.

10) 3각 격자형 거더(Lattics Girder)

현재 사용되고 있는 H-125x125의 Steel Rib는 너무 무거워서 인력으로 거치(erection)시키는데 어려움이 있을 뿐만 아니라, 판상 구조물이므로 숏크리트 타설시 배면공극의 발생이 불가피하고 Forepoling이나 Pipe roof 설치시 설치 각도를 줄일 수 없는 등 장점보다는 단점이 더 많은 지보재 중의 하나이다. 따라서 철근을 삼각형 격자로 용접하여 만든 격자형 거더(Lattics Girder)를 사용하여 배면공극 충전문제, Forepoling이나 Pipe roof의 설치각도문제, 그리고 인력거치 문제들을 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

4.2.2 하반 또는 인버트 굴착시 지보대책

1) 상·하반 연결부 길이증

상반과 하반의 연결부는 시공이음부가 되어 취약해짐 가능성이 있으므로 철망과 철근을 이용하여 길이증이 되도록 한다.

2) 측벽하부 주입보강

상반굴착시와 동일

3) 조속한 팽폐합

팽폐합거리와 시간은 가능한 짧게하여 구조적인 링이 되도록 한다.

4.3 기타 대책

4.3.1 시공중 배수

시공중 터널저면에 유입수가 저류되면 지반을 연화시켜 측벽하부의 지지력을 약화시키기 때문에 신속한 배수가 이루어져야 한다.

4.3.2 막장 관찰

터널의 파괴유형중 Sliding Failure나 Creep Failure는 적절한 막장관찰이 이루어지고 이를 반영한 지보대책이 적용된다면 사전에 방지할 수도 있다.

4.3.3 현장계측

터널의 현장계측은 NATM 터널의 핵심이다. 터널설계와 시공의 적합성 여부는 오직 계측에 의해서만 입증될 수 있으며, 터널공사의 징후를 가장 먼저 정확하게 예지할 수 있는 것도 계측밖에 없음을 인지하여야 할 것이다.

5. 결론

최근에 제 2기 서울 지하철 공사현장에서 발생하였던 지하철 터널의 붕괴사태에 대한 유형과 원인분석결과에 의하면, 굴착대상 지반의 강도가 약한 경우, 굴착면으로 지하수의 유입이 과다한 경우, 암피복두께가 얇거나 파쇄철리가 심한 경우, 그리고 절리면의 방향이 터널굴진방향과 불리하게 형성된 불량한 지반에 대해서 대단면의 터널을 적절한 대책없이 무리하게 굴착하다가 발생한 것으로 나타났다. 대부분의 붕괴는 불량한 지반조건하에서 3M 이내의 암피복두께를 갖는 PD-3나 PD-2의 지보대면인 복선터널에서 발생하였으며, 발생위차도 보면 무지보 상태의 막장면에서 발생하였다. 그러나 지보가 완성된 상반과 하반 그리고 인버트 굴착시에도 터널이 붕괴되는 것으로 나타나, 전 공사기간을 통해서 항상 최선의 대책을 강구하여야 함을 시사하고 있다.

결론적으로, 이와같은 붕괴유형과 원인으로 발생하는 터널의 붕괴를 방지하기 위한 대책으로서, 첫째는 굴착대책으로서, 분할굴착에 의해 1회 굴착단면적을 축소하고 조기에 팽폐합을 실시하여 지포침하를 최소화하고 굴착면의 안정을 확보하여야 한다. 그러나, 분할이 많아질수록 공중이 복잡하여 공기가 많이 소요되고 고도의 기능수준이 요구됨을 고려하여야 한다. 둘째 대책은 추가의 지보를 보강하는 대책으로서, 인약한 자연지반을 NATM의 원리에 적합한 지반으로 개량하기 위하여 인위적으로 지지코아 존치, Scaling Shotcrete 타설, 대막장 Forepoling 설치, 상반 측벽하부 확대기초 설치, 막장면 Rock Bolt 설치, 막장면 수발공 설치, 지반주입, 삼각 격자형 거더사용등이 단독적 또는 복합적으로 적용되어야 한다.

6. 감사의 글

본 논문의 일부는 서울시 지하철 건설본부에서 주관하고 있는 터널시공감리단의 업무수행중 획득한 정보와 자료로서 이물 논문의 자료로서 사용토록 허락해 주신 지하철 건설본부의 관계자에게 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

Duddeck, H. and Stading, A.(1989). Tunneling in soft ground and sedimentary rock for the high-speed double track railway lines in Germany. Proceedings of the International Congress on Progress and Innovation in Tunneling, Vol.I, PP. 273-280.

Gnlisen R.(1989). Numerical Methods, Underground Structures, Design and Instrumentation, Elsevier, PP.84-128.

Leichnitz, W.(1990). Analysis of Collapses on Tunnel Construction Sites on the New Lines of the German Federal Railway. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.5, No.3, PP. 199-203.

Narasaki, M.,Takizawa M.,Tsuchiya Y.,and Nagai, K.(1989). The development of a CRD method for the purpose of controlling the surface subsidence - For urban tunnels, as an example of application. Proceedings of the International Congress on Progress and Innovation in Tunnelling Vol.I, PP.375-380.

Seki, J.,Okada, M.,Inoue, H.,and Miwa, T.,(1989). Adaptability of upper half vertical subdivision method to flat and large diameter tunnel construction. Proceedings of the International Congress on Progress and Innovation in Tunnelling Vol.I, PP.393-400.