

터널굴착과 안전관리

임영국 / 유신코오퍼레이션 감리단장
토목시공기술사

1. 머리말

터널을 굴착할 때 원지반의 붕괴를 어떻게 방지하는가? 이는 바로 어떻게 하면 안전하게 터널을 굴착할 수 있는가라는 안전관리와 직결되는 매우 중요한 문제로서 옛부터 목재지보공의 조립방법과 이에 따른 터널 1단면의 분할 굴착 방법 및 시공순서가 연구되어 왔다.

이에 따라 독일식, 아메리카식, 오스트리아식과 같은 국명, 단라식과 같은 터널명, 저설도갱선진식, 상반선진식, 원폭형, 후광양식 등의 보통 명칭과 이들을 조합하여 명칭을 붙인 많은 공법이 생기게 되었다. 2차대전 후 대형기계를 사용하기 위한 강제지보공법(ASSM)이 미국에서 개발되어 널리 보급되었으나 보다 더 안전하고 경제적으로 터널 원지반의 역학적 특성에 효과적으로 합치되는 공법도 있을 것으로 믿고 연구를 계속한 오스트리아의 La-dislaus Von Rabcewicz에 의해 발표(1962년 제13회 국제암반역학회의)된 것이 신오스트리아 터널공법(NATM)이라 명명되었다.

현재 유럽, 일본, 한국에서 주로 채택하고 있는 터널시공공법이 NATM으로서 이에 대한 안전시공을 기술코자 한다.

2. 시공시의 유의점

1) 개요

NATM에서 가장 중요한 것은 원지반 자체가 갖고 있는 강도를 최대한으로 활용하는 것이다. 즉 원지반 자체가 주지보재로서 그 강도는 원지반의 느슨함(이완)에 따라 저하되므로 원지반을 느슨하지 않게 하는 것이 원지반 강도를 최대한으로 활용하는 일이 된다.

한편 NATM에는 어느 정도 원지반의 변위를 활용하중을 조절하여 원지반의 움직임을 평형하게 유도하는 것으로 고려되어 있다. 특히 팽창성 원지반에서는 가축지보공을 사용하여 슛크리트에 Slit을 만들어 그 부분에 변위를 흡수케 하는 일이 있으나 이런 경우에도 원지반의 변위능력을 유효하게 활용할 수 있는 것으로 원지반을 느슨하게 하는 것을 혼돈하는 일이 없도록 특히 유의하여야 한다.

보통 시공과정에서는 지보공(슛크리트, 록볼트 등)의 시기, 방법을 잘못하면 원지반의 느슨함이 예상외로 커져서 터널안전에 심각한 문제가 일어날 수가 있다.

「NATM 시공의 기본은 원지반의 움직임을 제어하여 터널 주위의 원지반을 안전하게 유도하는 것으로 적정한 양의 변형을 하는 것보다 더

불어 원지반을 이완시키지 않고 원지반 성상에 적합하고 정확한 시공을 하는 것에 있다.」

2) NATM의 시공준비

(1) 원지반 성상을 충분히 파악하여 설비, 자재, 작업인원, 공정은 무리가 없도록 계획을 세워야 한다.

(2) 작업원이 NATM을 이해할 수 있는 기록영화, 시공, 안전 등의 설명회로 사전에 충분한 교육을 시행하여야 한다.

(3) 막장관리에 경험이 있는 막장관리자를 선임하여야 한다.

3) 굴착시의 유의점

(1) 굴착

NATM에서 굴착공법의 특징은 재래공법의 경우보다 비교적 단면분할을 크게 할 수 있다는 것과 대형장비를 투입하여 굴진속도를 향상할 수 있다는 것이며 이의 유의점은 아래와 같다.

가) 굴착은 될 수 있는 한 일정한 속도를 가져야 한다.

나) 굴착을 장기간 중지할 경우 내공변위나 지질상태를 판단하여 굴착면에 슛크리트 및 록볼트를 추가 시행하여야 한다.

다) 벤치컷 공법으로 시공하지 않을 경우 하반 및 인버트의 굴착길이는 내공변위의 계측결과 등을 고려하여 결정하여야 한다.

라) 굴착면은 될수 있는 한 고르게 하여 여굴량을 적게 하여야 한다.

마) 원지반이 불량하고 용수가 심할 경우에는 적절한 보조공법을 시행하여야 한다.

(2) 발파

※ NATM에서의 발파는 예정굴착면의 원지반을 주시보재로서의 개념을 살피 발파의 영향(균열, 요철, 여굴 등)을 최소화 하기 위하여 스

무스 브라스팅이나 번켓 발파법을 적용하여 굴착면이 깨끗하게 이루어져야 한다.

특히 유의하여야 할 점은,

가) 여러 회의 시험발파를 시행하여 그 원지반에 적절한 발파패턴을 작성하여 주위환경에 미치는 영향이 최소로 되게 하여야 한다.

나) 굴착면에 천공 빗트 흔적이 60~80% 이상 있도록 조절발파를 하여야 한다.

(3) 슛크리트(Shotcrete)

① 굴착면을 피복하여 원지반의 풍화를 방지한다.

② 굴착면의 요철을 작게 하여 응력집중을 감소한다.

③ 콘크리트 아치로서의 작용으로 하중을 부담한다.

④ 원지반의 거동을 구속하고 삼축응력상태로 되어 원지반의 전단저항력을 높인다.

이상과 같은 효과와 목적에 대한 시공시의 유의점으로,

가) 1차 슛크리트(Seeling)는 굴착 후 가능한 한 속히 시행하고 원지반이 불량할 때는 굴착과 병행하여 1차 슛크리트를 하여야 한다.

나) 일반적으로 측벽부에서부터 아치부로 향하여 순차 뿔어붙이는 것이 보통이나 부분적으로 원지반 불량개소가 있으면 그 부분을 우선 뿔어붙인다.

다) 원지반에 와이아메슈를 붙일 경우에는 원지반과의 사이에 탈이된 토사의 퇴적이 없도록 한다.

라) 뿔어붙이면에 대한 노즐을 직각이 되도록 유지하고 노즐선단과 원지반의 간격을 약 1.0m로 지키도록 한다.

마) 슛크리트의 일회 뿔어붙이기 두께는 10cm 정도를 표준으로 한다.

4) 강제지보공

※ 강제지보공의 역할은 슛크리트가 일정의 강도에 도달할 때까지 원지반을 지보하는 것이다.

가) 강제지보공은 될 수 있는 한 1차 슛크리트와 밀착하여 설치하도록 한다(설계높이, 폭에 구애받지 말고 원지반에 바짝 올리고 넓혀서 시행하는 것이 좋다).

나) U형 지보공을 사용할 때 가축인가 아닌가의 목적을 명확하게 하고 접합구조를 고려하여 시공하도록 한다.

5) 록볼트(Rockbolt)

※ 록볼트의 효과

① 인장력으로 내공변형에 저항하고 느슨함의 발생을 억제한다.

② 원지반의 절리나 균열에 따른 슬라이딩을 방지한다.

③ 원지반의 전단 파괴면의 움직임에 저항한다.

④ 원지반을 3축 응력상태로 하고 원지반의 항복강도를 높인다.

이상과 같은 효과에 따른 시공상의 유의점으로,

가) 록볼트의 타설은 막장굴착 2~4시간 이내에 하도록 한다(타설이 늦어지면 이완연역이 확대된 후에는 작용효과를 얻기가 어렵다).

나) 록볼트의 프레이트는 슛크리트면에 잘 접하여 정착시키도록 한다.

다) 시스템 록볼팅은 원주의 접선방향과 직각으로 타설하도록 한다.

라) 램뎀 록볼팅은 절리면에 직각으로 타설하도록 한다.

※ 록볼트의 정착방법

① 선단 정착형

② 전면 정착형

③ 변용형

④ 마찰형

(가) 선단 정착형은 절리나 균열이 적은 경암이나 중경암에 적용되며 레이징으로 정착시킨다.

(나) 전면 정착형은 풍화암, 연암 등 모든 지반에 적용하며 시멘트밀크나 시멘트몰탈로 진충 정착시킨다(현재 지하철과 같이 토피가 적은 곳에 적용).

(다) 변용형은 선단 정착형으로 장기적인 지보로 사용코자 할 때 용수 등에 의해 록볼트가 부식할 우려가 있을 때 시멘트밀크 등을 주입하여 전면 정착형으로 정착시킨다.

6) 막장관리

(가) 막장 관리자는 항상 지질의 상황(암의 강도, 절리, 용수) 및 원지반의 거동(굴착 후의 원지반의 움직임, 내공변위 등)을 막장 관찰이나 계측결과를 판독하여 예기치 않은 원지반의 거동을 발견하였을 때는 보조공법의 채택이나 지보부재의 수정을 포함한 적절한 조치를 강구하여야 한다.

(나) 보조공법의 채택이나 지보부재의 수정을 시행할 경우에는 시공의 난이도 및 시공시간 등을 충분히 고려하고 작업원에게도 그의 취지를 충분히 설명, 이해시켜야 한다.

3. 계 측

1) 개 요

NATM식 터널공사에서 계측이야말로 안전관리와 직접 연관된 항목으로서 원지반을 대상으로 시행하는 계측을 대별하면 다음 두 종류가 있다.

(1) 조사 또는 계획에 있어서 암반의 역학적인

특성을 알기 위하여 실시하는 계측

(2) 터널굴착과 동시에 주변 원지반의 거동감시를 주체로 시공중에 시행하는 계측(현장 계측)

NATM이 종래의 공법과 상이한 점은 시공중에 터널 원지반의 토압 및 변형을 계측하여 지보공의 규모가 적절한가를 진단하고, 정적 평형이 이루어졌는지를 확인한 후 2차 라이닝을 시공하는 것에 있다.

그러므로 계측결과에 따라 터널 지보공의 수정 여부를 결정한다는 것이 NATM에서 계측의 위치라고 본다.

2) 계측의 목적

현장 계측의 최종적인 목적은 터널의 안정성을 증명하는 데 있다.

이것을 구체적으로 기술하면,

- (1) 원지반 거동의 관리
- (2) 지보공 효과의 확인
- (3) 안정상태의 확인
- (4) 근접 구조물의 안정성 확인 등
- (5) 장래의 공사계획의 자료 축적

3) 계측 항목

(1) 계측 A(일상의 계측)

- ① 갱내 관찰 조사
- ② 내공 변위 측정
- ③ 천단 침하 측정
- ④ 록볼트 인발시험

(2) 계측 B(대표개소에 시행하는 계측)

- ① 원지반 시료시험
- ② 지중 변위 측정
- ③ 록볼트 응력 측정
- ④ 라이닝 응력 측정
- ⑤ 지표, 지하의 침하 측정

⑥ 갱내 탄성과 속도 측정

4) 일상관리의 계측(계측 A)

(1) 갱내 관찰 조사

갱내 관찰 조사는 막장의 지질관찰과 지보공의 변형(숏크리트의 균열, 록볼트의 프레임트 변형 등의 관찰로 구분한다)

(가) 막장의 지질관찰은 원칙으로 굴착시 매일 시행하나 지질의 변화가 심할 때는 매 발파마다 실시하여 일보에 기록하여(관찰도) 책임기술자가 한눈에 그 상황을 파악할 수 있게, 계측결과를 기록한 수평, 지질단면도를 정리하여야 한다.

(ㄱ) 지질(암석명)과 그 분포 및 성상

(ㄴ) 지층의 고결도, 경암, 절리의 갈리진 틈의 량, 변질정도

(ㄷ) 당층의 분포와 방향, 경사, 점토화, 연약화의 상태

(ㄹ) 용수개소, 용수량의 그의 상태

(ㅁ) 연약층의 분포상태

(나) 지보공의 변화관찰은 다음과 같은 점을 주목하여야 한다.

(ㄱ) 록볼트 타설 위치 및 방향

(ㄴ) 볼트의 베어링 프레임트의 느슨함

(ㄷ) 베어링 프레임트와 원지반과의 접촉 정도

(ㄹ) 숏크리트의 소정의 두께

(ㅁ) 숏크리트의 균열(발생위치, 균열의 종류, 폭, 길이)

(ㅂ) 강제 지보공의 변형, 좌굴위치 및 상황

(ㅅ) 강제 지보공의 원지반과의 접촉상태

(ㅇ) 가축 지보공의 축소상태

(2) 내공변위와 천단의 침하 측정

(가) 내공변위 측정은 현장계측 중에서 가장 중요하게 이용되는 것으로 터널의 안전성에 관해서 판정재료가 되는 것뿐만 아니라, 록볼트의 증

설, 2차 라이닝 타설시기를 결정하는 데 기준이 된다.

(나) 천단 침하 측정은 내공변위의 측정에 준하는 것으로 토피가 얇은 경우와 단층 등의 붕괴가 일어나기 쉬운 곳에는 특히 중요한 측정이다.

(다) 록볼트의 인발시험

록볼트의 정착효과를 확인하기 위해 유압자크를 사용하여 볼트 두부에 인발력 P를 가해 다이얼 게이지에서 볼트의 신장 δ 를 측정하여 P-S의 관계에서 인발내역을 얻는다. 이때 인발하중의 재하속도는 1ton/min를 표준으로 한다.

(3) 계측관리 기준치의 설정

측정치의 평가기준을 계측관리기준이라고 하며, 이것을 결정하는 것은 공법변경(때로는 중지)을 판단하는 기능을 정하기 위해 이것을 결정하는 데 있어서는 공기, 공사비에 직접적으로 영향이 있으므로 대단히 중요한 문제이며 이 기준치(때로는 허용한계치)는 한편으로는 공정과 공비, 또 한편으로는 안전과의 접합점을 구함에 의해 결정되어야 한다.

터널 공사와 같은 지하공동굴착 공사에 있어서는 아직까지도 용인되어진 수치기준은 없다.

그러나 이치를 결정하지 않으면 계측을 방치하는 상태가 되기 때문에 실제의 각 터널에서는 반은 경험에다 상당한 안전율을 가진 상태에 있는 치를 설정하고 있다.

(가) Alberg 터널 기준치

〈록볼트의 증설기준과 2차 라이닝 타설〉
 굴착 후 10일째의 상대변위, d_{10} 이 150mm 이상 또는 10일째의 변위속도 d_{10} 이 10mm/일 이상일 때 즉시 볼트를 증설하여야 한다.
 굴착 후 100일 이상 경과한 30일간에 있어서 상대변위 7mm(변위속도 $d=0.23\text{mm/일}$) 이하에 달하였을 때 2차 라이닝을 시공한다.

(나) Franc 공업성의 평가기준(터널의 단면적)

토피의 깊이(m)	Arch Crown의 최대허용 변위량	
	경암지반(cm)	소성지반(cm)
10 - 50	1-2	2-5
50 - 100	2-6	10-20
500 이상	6-12	20-40

(다) 지하철 공사시의 예상변위량
(Geo-Consultant 설계기준)

Rock	Class	예상변위량(cm)
Class I	경 암	0-0.5
Class II	연 암	0.5-1.5
Class III	풍화암	1.5-3.0
Class IV	마사토	3.0-5.0

4. 결 론

이상과 같이 터널 굴착시의 유의점은 기본적인 안전관리지침이며 천태만상의 원지반을 대상으로 시공함에 있어 때로는 연약지반, 단층, 파쇄대, 팽창성 원지반 및 용수가 심한 개소 등을 조우하였을 때 안전시공을 위해 대처할 수 있는 보조공법을 각 나라마다 연구개발하여 시행하고 있다.

그 대표적인 공법으로 C.D(Center Diaphragm) 공법, umbulela 공법 및 장대 forepiling 공법(다단 관공법) 등 이에 따른 기계화된 대형장비(T.B.M loadheader 등)가 꾸준히 개발되며 실용화되고 있으므로 안전관리에 더욱 만전을 기하여야 한다.