

서울 지하철 건설에서 조명된 NATM 터널의 설계 및 시공상의 문제점 Design and Construction Problems of NATM Tunnel Emerged from Seoul Subway Construction

정 명 균, MYUNG KEUN JUNG

(주)대우엔지니어링, 과장, Senior Engineer, DAEWOO Engineering Company.

김 승 렬, SEUNG RYULL KIM

(주)대우엔지니어링, 부장, Manager, DAEWOO Engineering Company.

박 광 준, KWANG JOON PARK

(주)대우엔지니어링, 과장, Senior Engineer, DAEWOO Engineering Company.

이 인 균, IN KEUN LEE

서울시 지하철 건설본부, 설계감리실 과장, Assistant Director, Design and Supervision Division, Seoul Metropolitan Government

SYNOPSIS :

NATM becomes one of the major methods of tunnel construction, such as that of subways and highways. However, a number of design and construction problems have been noticed and reported from the recent large-scale tunnelling projects. Some of them are presented and discussed in this report in order to call an attention to these problems and provide a sound basis for the improvement of current problems.

1. 서론

서울시는 현재 대중교통난 해결을 위한 일환으로 연장 160km (77노선)의 제 2기 지하철을 건설중에 있다. 이공사가 완공되는 시점인 '96년에는 지하철 총연장은 278km에 달하고 지하철 수송분담율도 50%에 달하게 될 것으로 예상된다.

제 2기 지하철은 공사중 야기되는 교통혼잡을 줄이기 위해 도심통과구간이나 교통혼잡이 예상되는 구간은 NATM 공법을 채택하고 있다. NATM 공법은 기존 지하철 3, 4호선 건설에 성공적으로 적용된 바 있으나, 설계 및 시공기술숙적이 일부회사에 국한되어 있는 실정이기 때문에 제 2기 지하철을 건설하면서 설계 및 시공상에 많은 문제점들이 대두되고 있다.

이러한 문제점들을 분석 정리한다는 것은 우리 기술수준을 점검해 보고 개선 발전시킨다는 관점에서 꽤 가치있는 일이다.

서울 지하철 터널시공감리단에서 지난 1년동안 업무 수행하면서 얻어진 NATM 구간의 설계와 시공사항에 대한 계보 보완 필요사항들을 정리하였다. 이 사항들은 실무에 종사하는 기술자들이 알고도 잔과한 부분도 있을 것이고, 전문지식의 부족으로 발생한 것들도 있을 것이지만 조속히 개선되어야 할 것이다.

NATM의 원리 및 지보의 역할에 이어 각 문제점들과 그에대한 개선방향들을 설계 및 시공사항으로 대별하여 각각 3절과 4절에 수록하였다.

2. NATM의 원리와 지보

2.1 NATM의 원리

지반내에 터널을 굴착하면 굴착면 주변의 지반은 3축응력상태에서 1축응력상태로 된다. 이때 소멸되는 지반응력때문에 접선응력이 크게 증가하게 되어 지반은 내측으로 변위를 일으키게 된다. 변위크기는 지반의 고유강도와 세로이 형성된 응력의 크기에 좌우된다. 그림 1에서 보여주는 바와 같이 반경 방향으로 작용하는 응력은 벽면 변위가 증가함에 따라 급격히 감소하지만, 변위가 어느한계를 넘으면 지반이 이완되기 시작하므로 원래의 지반강도는 완전히 상실되고 터널주변의 지반은 하중으로 지보공에 작용하게 된다.

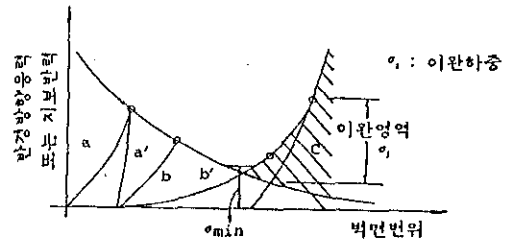


그림 1. 반경방향응력 σ_r 과 벽면변위 U의 관계

NATM 공법은 이러한 원리를 토대로 지반자체가 주지보제 역할을 감당할 수 있도록 슛크리트와 강지보제 및 록볼트등으로 지반을 보강해 주는 공법이다. 즉, 가축성 지보제를 설치함으로써 변위를 허용하되 지반의 강도를 상실시키지 않는 상태에서 지반과 지보제가 평형을 이루도록 하는 것이다. 따라서, 도면에 제시된 지보제를 이러한 원리를 무시한 채 일반구조물 건설의 최종 구축물로 생각하고 시공한다면 이는 이미 NATM 공법이 아니다. NATM은 적절한 시기에 적절한 강성의 지보를 실시하여야 한다는 시간개념이 가장 중요한 요소이다.

2.2 NATM 지보제의 종류 및 역할

터널작업시 설치되는 지보제는 주변지반이 강도를 최대한 발휘하도록 설계되어야 한다. NATM 터널에 사용되는 주요 지보제의 종류와 이들의 주요역할을 살펴봄으로써 제기된 문제점들의 원인을 드러내고자 한다.

2.2.1 슛크리트의 역할

- 지반의 이완방지, 암반 Joint의 폐합, 암괴의 활동에 의한 낙반방지
- 굴착면의 원지반강도를 유지시켜 암아치 형성
- 응력의 극부적인 집중방지

2.2.2 철망의 역할

- 슛크리트 부착력 및 전단강도 증가
- 슛크리트 경화시까지 강도 및 자립성 유지
- 슛크리트 유연성 유지

- 숏크리프 시공이음부 보강 및 크리이프(creep) 또는 증가 응력에 의한 균열발생 방지

2.2.3 강지보제의 역할

- 무지보 지반의 직접보강 및 숏크리프 라이닝의 하중 분산 효과
- 숏크리프 타설후 경화시까지 일시적인 지보기능 담당
- Forepoling의 지지 및 터널단면 형상 유지

2.2.4 쿼볼트의 역할

- 국부적인 압력의 분산방지 및 굴착면 주위에 압착형성
- 압의 전달강도를 증가시키고 소성영역의 확대 방지
- 암반의 크리이프(creep) 거동 억제

3. 설계상의 문제점 및 개선방향

3.1 지반조사와 지반분류

지반조사는 타당성 조사, 노선계획, 공법결정등과 같은 기본 설계 뿐만 아니라, FEM 해석, 굴착공법 및 지보패턴결정등과 같은 실시설계, 그리고 시공단계에까지 영향을 미치므로 터널 공사의 전 과정을 고려한 광범위하고 치밀한 조사계획을 수립하여 실시하여야 한다.

3.1.1 지반조사와 지반분류상의 문제점

- 시추위치가 중간적으로 설정되어 중점조사가 이루어져야 할 구간을 간과하는 경향이 있다.
- 암반층에 대한 코아 회수율이 저조하여 지층의 연속적인 관찰이 곤란하다. 특히, 풍화토, 풍화암층에서는 코아가 회수되지 않아 지층의 경계를 명확히 알 수 없어 지보패턴 및 굴착공법 결정에 많은 문제점을 내포하고 있다.
- 지하수위는 시추조사시 측정하는 것을 끝으로 시추공을 폐쇄하도록 되어 있다. 따라서 측정된 지하수위는 시추시기에 해당하는 일시적인 것으로 계절별로 변화하는 지하수위를 대표하지는 못한다.
- 현장투수시험, 강도시험등이 충분히 시행되지 않는 관계로 정확한 공법설계를 수행하는데 한계가 있다.
- 조사단계에서의 암반분류는 "건설부 표준 썸성"상의 시추조사 표준썸성의 분류기준을 적용함으로써 터널설계와 시공을 위한 지반분류로서는 불충분 하다.

3.1.2 지반조사상의 개선방향

1) 설계조사

조사는 설계조사와 시공중 조사로 구분하여 실시함이 바람직하다. 설계조사는 시공하기전 대상지반에 대한 충분한 지반정보를 얻기 위하여 다각적으로 수행되어야 하며 시공중 조사는 설계조사의 보완을 위한 조사로서 가장 현실적이고 시공에 직접영향을 주는 조사이다. 설계는 필요에 따라 시공조사에 의해 변경 조정되어야 한다.

가) 기존 조사자료의 적극 활용화

지금까지 수행된 각종 지반조사자료와 시공중 수집된 지반자료등을 분석정리하여 조사와 설계 및 시공자료로 활용할 수 있는 체계 확립이 필요하다.

나) Field mapping

도심지에서는 성공적인 field mapping 결과를 얻을 수 없다 할지라도 가능한 field mapping을 실시하여 노선 통과지역에 대한 노두관찰, 주량과 경사 그리고 암층의 개략적인 깊이, 하천 배후지의 충격층 위치등을 조사하여 시추조사위치를 결정하거나 결과를 분석하는데 사용하여야 한다.

다) 탄력적인 시추위치 결정

현장조사시 실시한 field mapping 자료와 기존 지반조사 자료를 분석하여 심한 지층변화가 예상되는 지역은 중점

적으로 조사할 수 있도록 배려하여야 한다. 또한 터널 노선을 따라 3차원적 지반상태를 파악할 수 있도록 시추 위치와 횡수를 결정하여야 한다.

라) 코아 회수율 증대

파쇄대 또는 풍화토, 풍화암지역에서는 시추공경을 가능한 크게하고, 이중(double core barrel) 또는 삼중(triple core barrel) 코아 채취기를 사용하여 코아회수가 가능하도록 하여야 한다.

마) 경사시추를 통한 불연속면의 조사

지층의 변화가 심할 것으로 예상되는 곳이나 단층대등의 불연속면이 있는 것으로 예상되는 지점에 대해서는 경사시추를 실시하여 불연속적인 지층구조에 대한 상세한 자료를 수집하여야 한다.

바) 지하수위의 지속적인 관측

지반조사시 천공한 시추공을 통해서 지하수위 변동우이를 장기적으로 관측할 수 있도록 하여야 한다.

사) 물리탐사법의 활용

물리탐사법을 부분적으로 적용하여 중요한 지역의 정확한 지층구조를 파악할 수 있도록 하여야 한다.

2) 시공중 조사

가) 막장 관찰 조사

육안으로 암반의 절리상태(절리수, 간격, 방향, 경사, filling 상태등)와 풍화정도, 암층등을 관찰하고 슈미르 램머등을 이용하여 강도를 개략측정하여 기존 암분류와 비교하고 분석하여 실제적인 지보형태등을 결정하는 자료를 제공한다.

나) 경내 선진수평 지반조사

선진수평 지반조사를 시행하여 굴착대상지역의 지반상태를 종합적으로 조사한다.

3.2 표준지보패턴

설계단계에서는 부족한 지반정보자료에 의해서 지층을 분류하고 이론적 해석을 실시하게 되므로 유형화된 표준지보패턴밖에 제시할 수가 없다. 따라서 시공시 추가의 지반조사와 막장관찰 그리고 현장계측을 통해서 얻은 결과를 이용해서 실제 현장에 적합한 지보패턴으로 수정·보완하는 작업이 필요하다.

3.2.1 기존 지보패턴의 문제점

- 지반조사시의 지반분류기준과 터널의 지보패턴 결정시의 지반분류기준에 일관성이 결여되어 있다.
- 설계도에 나타난 지보패턴을 경직되게 적용하고 있다.

3.2.2 지보패턴상의 개선방향

- 지반조사시의 암반분류는 정량적으로 분류·평가할 수 있는 방법을 사용하여 설계와 시공시 비교검토가 가능하도록 하여야 한다.
- 실제의 지반상태, 지하수 현황 및 지질구조의 기하학적 특성을 분석하고, 계측자료를 비교하여 설계 지보패턴을 적절히 조정하는 탄력적인 시공이 수반되어야 한다. 이를 위해서는 전문 기술인력의 뒷받침이 필요하다.

3.3 FEM 해석

설계단계에서의 FEM 해석은 터널굴착으로 인한 지반의 거동 및 터널주변의 영향을 예측하고, 설계구조물의 안전성을 평가하며, 향후 시공단계에서 실시하게될 현장계측의 관리기준치를 제공하여야 한다.

3.3.1 FEM 해석상의 문제점

- 해석에 사용하고 있는 지반특성치의 입력자료가 설계사마다 다른 차이를 보이고 있다.
- 풍화토, 풍화암에서는 코아회수가 되지 않아 지층경계가 불명확하고, 특성치를 가정하여 사용하므로 해석결과에 대한 신뢰도가 떨어진다.

- 각 용역사별로 적용하는 하중분담율이 큰 차이를 보이고 있다.
- 또한 굴착 단계별 해석과정에서 실 시공순서를 고려하지 않는 경우가 많아 실제의 지반거동을 예측할 수 없다.
- 설계시 터널굴착 영향권내에 위치하고 있는 주요 구조물과 지하시설물에 대한 영향평가가 간과되고 있다.

3.3.2 FEM 해석상의 개선방향

- 보다 현실적인 지반특성치를 얻기 위해 대구경의 시추기를 사용하여 코아 회수율을 높이고 현장 및 실내시험의 양과 질을 향상시켜야 한다.
- 설계시 터널굴착으로 영향을 받을 수 있는 인접 구조물이나 지하시설물에 대한 안전성 검토도 아울러 실시하여 보강 여부를 판단하여야 한다.
- 해석결과와 실시반 정보 및 계속자로부터 사용한 프로그램의 검증을 실시하고, 현장 지반조건에 적합한 설계도 수정해 나가야 한다.
- 시공법에 따라 터널을 포함한 주변압반의 거동이 다르기 때문에 실제의 시공단계를 고려한 전단면 해석을 실시하여야 한다.
- 하중 분담율의 적용기준은 현장계속자로의 결과를 이용해서 수정해 나가야 한다.
- 해석적 접근방법의 총체적인 분석이 필요하며 이의 표준화가 필요하다.

3.4 굴착설계

터널의 굴착은 대상 지반조건과 단면크기 및 각종 설계조건을 만족시키면서 최종적으로 안전한 구조물을 축조할 수 있도록 설계·시공되어야 한다.

3.4.1 굴착설계의 문제점

- 현실계는 지보매턴에 따른 표준굴착공법만을 제시하고 있을 뿐 실제의 지반조건 및 현장여건에 대응하여 변경하고 조정하는 굴착공법이 제시되지 않고 있다.
- 제시된 표준굴착공법은 횡방향은 비교적 상세하나, 종방향에 대한 굴착방법은 상세하지 못하다.
- 가인버트가 너무 편평하여 구조적으로 취약한 형상이고, 링폐합시기가 너무 지연되고 링폐합거리가 너무 길다.
- 막장안정대책으로 링컷트(ring cut) 공법을 적용하고 있으나, 코아의 크기가 너무 크고 길어서 1차지보의 적절한 시공이 불가능하다.

3.4.2 시공성 향상을 위한 개선방향

- 굴착공법은 지반조건 및 주변여건을 고려하여 상세한 종횡단도 및 시공순서를 제시하여야 한다.
- 가인버트는 축력이 매끄럽게 전달되도록 원형에 가까운 구조로 하는 것이 바람직하다.
- 링폐합시기와 링폐합거리는 가능한 짧은 구간에서 이루어 지도록 설계하여야 한다.
- 링컷트 공법을 적용할시 코아의 크기를 잘 조정하여 숏크리트 타설이나 후속공정에 필요한 작업공간을 제공할 수 있도록 하여야 한다. 소형의 지지코아로는 막장안정이 불안할 경우는 추가의 막장안정공법을 적용하여야 한다.
- Forepoling은 매막장마다 가능한 수평으로 시공하여 과도한 여굴발생을 줄이도록 설계하여야 한다.

3.5 방·배수체계

현재 운영·건설중에 있는 지하철 터널의 대부분은 방·배수 터널로 설계되어 있으며, 일부 하천통과구간에 대해서는 완전 방수터널로 설계되어 있다. 방·배수터널이라 함은 터널상부는 방수를 실시하고 터널바닥에서 배수시키는 터널형태를 일컫는다.

3.5.1 배수형 터널의 문제점

- 배수형 터널에서 정밀한 분석없이 수압을 완전히 무시

하고 콘크리트 라이닝을 설계하고 있으나, 이는 터널의 장기적인 안전성을 해치는 결과를 초래할 수 있으므로 유입수가 다량 예상되고 토사 유출현상이 예상되는 지역에서는 반드시 배수시설의 항구적인 능력을 평가할 필요가 있다.

- 터널내부의 습도를 높여 차량 및 중요 기기의 부식을 촉진시킨다.
- 지하수위저하에 따른 주변지반의 장기침하를 초래하여 지상구조물 및 지하시설물의 안정에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 지하수원 고갈에 따른 사회문제를 야기시킬 수 있다.

3.5.2 배수형 터널에 대한 개선사항

- 배수기능을 향상 유지시키기 위해서 측방방 배수관의 관경을 확대하고, 일정한 간격마다 청소구를 두도록 하여야 한다.
- 측방방 배수관이 내부라이닝의 두께를 잠식하지 않도록 굴착단면을 조정하여 라이닝의 최소 설계두께를 유지하도록 하여야 한다.
- 충격충동 다량의 지하수 공급이 예상되는 지역에서는 배수형 터널일지라도 침투수 해석을 통해 내부 타이닝에 수압이 작용하는 여부를 분석해 보아야 한다.
- 지하수위저하가 지상구조물이나 지하시설물에 영향을 미치는 경우에는 보호대책을 강구하거나, 방수터널로의 전환을 피하여야 한다.

3.6 세부설계

구조물의 형상이 복잡하여 시공상 어려움이 예상되는 곳에 대해서는 상세한 설계가 제시되어 부설시공의 원인을 제거하여야 한다.

3.6.1 세부설계상의 문제점

- 시공허용편차와 허용변형량이 설계에 고려되어 있지 않아 정밀시공이 이루어지지 않을 경우 설계단면 확보가 어렵다.
- 평면선형의 곡률반경에 따라 각기 다른 단면형상을 적용하여 시공성이 떨어진다.
- 강성이 다른 구조물이 서로 연결되는 지점에 대한 상세한 검토가 시행되어 있지 않아 연결부에 균열을 초래하거나, 방수막에 치명적인 손상을 입힐 수 있다.
- 횡경의 배치간격이 비교적 짧고, 일부구간에서는 개착구간에 인접해 있는 곳도 있다.
- 2m치 및 3m치 터널에서 연결부의 시공성을 충분히 고려하지 않고 있다.

3.6.2 세부설계상의 개선방향

- 설계에서 제시된 내공단면을 확보하기 위해서는 시공허용편차와 허용변형량을 설계에 반영하여야 한다.
- 한 공구내에서 최소반경을 갖는 최대단면을 대표단면으로 선정하여 전 구간에 적용하게 된다면 시공성을 향상시키고 거푸집 재작정비용 줄일 수 있을 것이다.
- 강성이 다른 구조물의 접합부에는 시공이음부를 두어 두 구조물을 분리시킴으로써 향후 예상되는 구조적 및 방수막 손상을 방지하여야 한다.
- 횡경의 간격은 300m 이상을 유지하여야 하며, 수택지 하부나 지반이 인악한 곳을 피하여 설치하여야 한다.
- 2m치와 3m치 터널의 경우 시공이음부에 충분한 굴착단면을 제공하여 원활한 철근 연결 및 방수막 시공이 수행될 수 있도록 하여야 하며, 이에 대한 상세설계가 이루어져야 한다.

3.7 시설물 보호대책

도심지에서 터널굴착으로 인한 주변 지반인원과 지하수위 저하 등으로 지표면에 침하가 발생하여 지상이나 지하구조물에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우에는 설계시 이러한 영향을 평가하여 충분한 대책을 수립하여야 한다.

3.7.1 문제점

- 터널이 구조물이나 지장물에 근접하여 시공될 때 침하영향 평가, 건물보호대책 그리고 중진계측계획들이 설계시 고려되어 있지 않다.
- 터널굴착면 주위에 실시하는 그라우팅의 목적, 주입재 및 상세시공방법들이 명시되어 있지 않다. 대부분의 보강대책은 주변 건물보호대책으로는 불충분하다.

3.7.2 보호대책

- 주변 건물보호대책은 설계단계에서 고려되어야 할 사항으로 주변 지반조사자료와 시공도면을 참조하고, 현장에서의 현황 파악을 기초로 하여 수립되어야 한다.
- 계측관리치를 분석 제시하여 시공단계별 안전성을 점검할 수 있도록 하여야 한다.
- 이러한 구간은 터널시공에 앞서 지하수위 측정계, 지중반위계, 지표면 침하계, 지중침하계등을 건물 주위에 중점적으로 설치하는 계측계획이 수립되어야 한다.
- 지반조건에 따른 지중반위의 확산형태를 분석하여 적절한 범위 확산방지대책을 강구하는 것이 바람직하다.
- 터널굴착으로 인한 침하는 적절한 지보재 설치, 굴착 및 지보순서 그리고 인부들의 숙련도에 의해 억제할 수 있으므로 별도의 보조공법을 고려하기 전에 시공법 개선으로 문제를 극복할 수 있는지 여부를 분석하여야 한다.
- 배수형 터널의 시공에 따른 장기적인 지하수위 저하가 주변 건물에 피해를 초래할 수 있으므로 경우에 따라서는 터널을 환전 방수형 터널로 전환시키는 것이 바람직한 대책중 하나이다.

3.8 계측계획과 관리기준치

제한된 지반조사와 수치해석법에 의해서는 실제의 지반거동을 파악하는데는 한계가 있으므로, 지반중에 계측기를 직접 매설하여 측정하는 것이 이상적이다. 따라서, 주어진 지반조건과 주변환경 및 시공상의 제반사항등을 충분히 고려하고, 공사중의 지반거동을 종합적으로 파악할 수 있도록 계측계획을 수립하여 이러한 계측결과와 막장관찰을 통해 당초의 설계를 실시반조건에 적합하도록 조정 시공하여야 한다. 시공중 현장계측결과를 신속히 설계·시공에 반영시키기 위해서는 측정값에 대한 관리 기준치와 그에 대한 대책을 미리 설정해 두어야 한다.

3.8.1 계측계획상의 문제점

- 현실계획상의 계측위치는 너무 희박적으로 설정되어 있어 특정 구간 즉, 터널굴착의 영향권내에 중요시설물이나 건물등이 위치하고 있는 구간에 대한 배려가 되어 있지 않다.
- 주계측단면과 FEM 해석단면위치를 일치시키지 않는 곳이 있다.
- 터널굴착으로 인한 주변구조물이나 지하시설물에 미치는 영향에 대한 관리기준치가 설정되어 있지 않다.

3.8.2 계측계획 및 시행상의 개선방향

- 개축단면은 일률적으로 설정하되 주변에 굴착으로 인한 영향을 받는 구조물이 있는 지역이나, 지반이 특히 연약한 지역에 대해서는 추가 계측계획이 이루어져야 한다.
- 주계측은 FEM 해석단면과 일치시켜 사전 설계의 적정성 여부 검토에 사용될 수 있도록 하여야 한다.
- 계측결과는 반드시 기록 유지하여 유사한 지반조건하에서의 터널설계시에 참고가 될 수 있도록 하여야 한다.
- 지상구조물이나 지하매설물의 구조, 중요도에 따라 관리기준치를 설정하여 터널굴착으로 비롯되는 침하로 인한 피해를 예방하여야 한다.

3.9 기타

인악지반 개량을 위한 대책으로 그라우팅이 적용되고 있으나, 적절한 주입공법을 선정하기 위한 시험주입이 상세하게 제시되어 있지 않고 개량목표(Larget)도 제시되어 있지 않다.

또한 터널시공중 또는 운행중 진동·소음이 주변에 영향을 미칠 우려가 있는 경우에도 설계단계에서 진동·소음대책이 마련되어 있지 않은 실정이다.

4. 시공상의 문제점 및 개선방향

4.1 굴착면에서의 지반평가

터널굴착으로 노출된 굴착면을 직접 관찰하여 설계시 가정된 지반의 역학적 특성치들과 비교 검토하고, 터널설계시 고려되지 않았으나 시공시 터널안정에 큰 영향을 미치는 절리나 단층 등 지질구조적 특성과 암반거동과의 관계를 규명하여 설계의 적합성 뿐만 아니라 시공공법의 적정성 여부도 판단하여야 한다.

4.1.1 문제점

- 표준화된 지반분류안이 설정되어 있지 않을 뿐 아니라 각기 상이한 분류기준을 사용하고 있어 전 과정의 일관성 유지가 이루어지지 않고 있다.
- 시공시 경내 막장관찰을 실시하고 있으나 대부분 신뢰성이 떨어지고 기록으로만 유지하고 있을 뿐 이를 통한 설계의 적합성 여부를 평가하는 작업은 이루어지지 않고 있다.

4.1.2 개선방향

- 시공시의 지반조사에는 정량적인 지반분류 방법을 적용하도록 하여 지보패턴의 변경조정에 실질적이고 쉽게 활용할 수 있도록 하여야 한다.

4.2 지보패턴의 적용

현재 적용하고 있는 지보패턴은 조사단계에서 마련된 지반분류에 근거를 두고 있으며 그의 적용도 너무 경직되어 있다. 이는 현장여건에 따라 유연성 있게 대처하여야 하는 NATM의 기본원리에 일치하지 않고 있다.

4.2.1 문제점

- 설계시 적용된 지반조건이 설치반상태와 차이를 보여 과소·과다설계가 되는 경향이 있다.
- 설계도에 나타난 표준지보패턴을 손쉽게 변경하며 시공할 수 있는 제도적·기술적 뒷받침이 부족하다.

4.2.2 개선방향

- 지보패턴을 설계시 결정하는 것은 설계·시공계획의 설정 및 개략적인 공사비와 공사기간을 산정하기 위한 것으로 실시공시 접하게 되는 모든 여건을 반영한 것이 아니므로 현장여건 및 지반의 상태등에 따라 적절히 변경조절하여야 한다.
- 또한 지보패턴을 변경조절할 경우에도 정량화된 패턴들로 변경하기 보다는 좀 더 유연성 있는 대처가 필요하다. 즉 PD-4에서 PD-3 또는 PD-3에서 PD-4로 단계별 패턴조정을 하기 보다는 주변여건과 시공성, 경제성 및 안전성을 고려하여 수정·보완하는 것이 바람직한 것이다.

4.3 품질관리

설계가 요구하는 품질을 달성하기 위하여서는 시공자체에 하자가 없어야 할 뿐만 아니라 공사준비단계부터 공사종료시까지 지속적인 품질관리가 시행되어야 한다. 터널의 1차지보제에 대한 시공상의 문제점과 품질개선사항들은 다음과 같다.

4.3.1 슛크리트

NATM 터널에서 가장 중요한 1차지보제는 슛크리트이다. 슛크리트는 굴착 즉시 가능한 최단시간내에 타설하여 굴착면을 보호하고, 지반의 변형을 억제하여야 하므로 슛크리트 타설장비는 항상 막장으로부터 근거리에서 타설준비를 갖추고 대기시켜야 한다. 슛크리트의 초기 응결시간, 양호한 시공성 및 최종 강도등과 같은 특성치와 관련 요구되는 품질을 얻기 위해서는 적절한 배합설계, 양질의

시공장비, 높은 속도도 및 철저한 품질관리가 수행되어야 한다.

- 1) 문제점
 - 타설시기의 지연 및 배면공극 발생
 - 체계적 강도관리 미흡과 리바운드량 과다
 - 비효율적 장비 운영 및 배합장비의 나후
 - 기능공의 속도도와 품질관리대책 미흡
- 2) 품질향상을 위한 개선방향
 - 시방서에서 규정한 입도분포의 골재를 사용하며, 골재의 개량은 중량개량으로 한다.
 - 압송압력의 기준은 2.5kg/cm²이며, 가능한 이보다 높지 않게 한다.
 - 노즐과 벽면과의 거리는 1m, 각도는 90°가 되도록 유지한다.
 - 타설순서는 저면, 측면을 먼저 타설한 후 중앙부를 나중에 타설한다.
 - 먹서기와 노즐 사이의 거리는 최대 30m 이내로 유지하여 노즐면과 수신호가 가능도록 한다.
 - 상하 이동식 작업대를 사용하여 타설시에 적당한 타설거리가 확보될 수 있도록 한다.
 - 1차철망을 원지반에 밀착 고정시킨 후 슛크리트를 타설함으로써 슛크리트와 지반과의 부착을 증진시키고 리바운드량을 줄이도록 한다.

4.3.2 철 망

철망은 슛크리트의 후속 파괴거동에 있어서 유연성을 증대시키는 역할을 할 뿐만 아니라 슛크리트의 부착성을 증대시켜 주는 역할을 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 철망은 불규칙한 굴착면에 밀착 설치할 수 있을 만큼 유연하여야 하는 반면, 보강제로서의 역할을 하기 위해서는 충분한 강성을 가져야 한다.

- 1) 문제점
 - 3x50x50mm의 1차철망은 유연성은 커서 지반과 밀착성은 좋지만 슛크리트 리바운드량을 증가시키며, 구조적 보강제로서 약하다.
 - 종·횡방향으로의 굽이음 상재가 제시되어 있지 않다.
 - 2차철망의 경우 종방향으로의 중첩이 현실적으로 불가능하다(강지보재).
- 2) 시공성 향상을 위한 개선방향
 - 슛크리트 리바운드량을 감소시킬 수 있으며, 구조적인 기능을 갖는 크기의 철망인 5x100x100mm를 사용하는 것이 적당하다.
 - 철망은 항상 굴착면에 밀착 고정시켜 슛크리트와 굴착면 사이에 공극이 발생하지 않도록 한다.
 - 철망이 구조적인 기능을 발휘할 수 있도록 충분한 굽이음을 실시한다(종방향 1격자(10cm), 횡방향 2격자(20cm) 이상).

4.3.3 강지보재

NATM 공법에서 강지보재는 일시적인 지반지지와 단면형틀과 forepoling을 용이하게 해주는 역할을 한다.

- 1) 문제점
 - 슛크리트 두께가 얇은 곳에서 H-125 규격의 강지보재를 사용하면 슛크리트 품질을 저하시킬 수 있다.
 - 강지보재의 설계·제작시 허용변형량 및 시공허용편차를 고려하지 않으므로써 내부라이닝의 두께를 설계치대로 일정하게 유지시키기가 곤란하다.
- 2) 시공성 향상을 위한 개선방향
 - 강지보재의 규격은 시공성을 고려 H-100으로 변경시키는 것이 바람직하다

- 강지보재의 형상은 지반의 허용변형량과 시공허용편차를 고려하여 기존의 것보다 커져야 한다.
- 상·하반 분할굴착시 지반조건에 따라서 하부의 강지보재물 일부 생략할 수 있다.

4.3.4 록볼트

록볼트는 선단 정착용과 전면 집착형 및 이들의 혼용으로 구분할 수 있다. 록볼트는 시공중 일시 지지부재로 사용될 수 있으나, 주로 영구 지지구조물로 간주되므로 이의 적합한 시공이 요구된다.

- 1) 문제점
 - 대체로 설치시기가 지연되고 있다.
 - 길이는 터널의 내공단면의 크기 및 지반조건과 관계없이 일정하다.
 - 굴착면에 직각방향으로 시공되지 못하고 있다.
 - 볼트 조임상태가 느슨한 경우가 많다.
 - 지반에 완전히 정착시키지 못하는 경우가 많다.
 - 용수상태에 따라 적합한 종류의 록볼트 선정이 고려되지 못하고 있다.
 - 시공후 품질관리가 제대로 이루어지지 않고 있다.
- 2) 품질향상을 위한 개선방향
 - 레진형 록볼트의 사용을 지양하고 시멘트 몰탈이나 시멘트 밀크 주입형 록볼트를 사용한다.
 - 록볼트의 길이는 굴착단면 크기 및 지반조건에 따라 3~6m 길이를 선택적으로 사용토록 배려하여야 한다.
 - 록볼트 설치시기는 굴착면으로부터 2~3m정도를 넘지 않도록 한다.
 - 매막장마다 록볼트는 엇갈려서 배치하고 굴착면에 직각 방향으로 시공한다.
 - 록볼트 설치시에는 막장별로 사용갯수, 번호, 길이, 천공 직경, 시멘트 주입량 및 주입압동을 기록하여 철저한 관리가 되도록 한다.
 - 록볼트의 품질관리 시험은 시방에 규정된 대로 철저히 시행하여야 한다.

4.3.5 Forepoling

지반조건이 불량할 때 막장상 상부 천단부의 안정을 확보하고 여굴을 줄이기 위한 대책으로 사용한다.

- 1) 문제점
 - 27g 막장마다 1회씩 설치함으로써 충분한 중첩이 이루어지지 않고 있다.
 - 설치각도가 너무 급하여 여굴이 많고 지지효과가 충분치 못하다.
 - 철근을 사용함으로써 막장전면 상부 토사하중에 대한 휨저항력이 약하다.
- 2) 품질향상을 위한 개선방향
 - 터널 크라운부의 지반조건이 중화토 또는 풍화암일 경우에는 forepoling을 매막장마다 실시한다.
 - Forepoling의 배치는 터널 크라운부의 120°내에 설치한다.
 - Forepoling의 배치간격과 길이는 지반조건 및 굴진장에 따라 좌우되나 통상 배치간격은 0.3~0.4m, 길이는 굴진장의 2.0~2.5배가 바람직하다.
 - 재질은 휨 강성이 큰 강관을 사용하고 내부는 시멘트 몰탈로 주입토록 한다.
 - Forepoling의 설치각도는 가급적 수평을 유지토록 한다. (15°미만)

4.3.6 대 차

현재 대부분의 현장에서 사용하고 있는 대차는 너무 높고

고정식으로 제작되어 있어 1차지보의 품질을 저하시키는 한 요인이 되고 있다. 따라서 대차는 다음과 같이 개선되어야 한다.

- 1) 슛크리트 타설과 록볼트 설치를 위한 대차
높이조절이 가능한 가동식 대차를 사용하여 슛크리트 타설과 록볼트 설치가 용이하도록 하여야 한다.
- 2) 철망과 강지보재 설치를 위한 대차
높은 대차를 사용하여 철망과 강지보재를 원지반에 밀착 설치할 수 있어야 한다.

이와같이 대차는 1차지보의 종류에 따라 높낮이가 다른것을 사용하여야 하기 때문에 고정식 높은 대차가 있는 경우에는 낮은 대차를 별도로 하나 더 준비하고, 그렇지 않을 경우에는 높낮이를 조절할 수 있는 가동식 대차를 구비하여야 한다.

4.4 기타

4.4.1 주입

주입공법은 주입제 및 주입대상 지반의 특성에 따라 주입 효과에 큰 차이가 있으므로 반드시 시험주입을 실시하고 효과를 확인한 후 적절한 공법과 주입방법을 결정하여야 한다. 그러나, 이러한 과정이 무시된 사례가 대부분이다.

4.4.2 시공중 계속

계속점의 초기지 축경이 지연되어 실제 지반거동이 정확히 파악되지 않을 뿐만 아니라 축정후 분석결과가 시공에 즉시 반영되지 않고 있다. 기술자들의 부단한 노력과 제도적인 뒷받침이 요구된다.

5. 결 론

NATM 공법이 국내에 도입된 이래 이 공법은 지하철 터널뿐 아니라, 도로, 철도 및 수모터널등 광범위한 분야에서 적용되었다. 그러나 이러한 많은 설계와 시공실적에도 불구하고 지금까지 괄목할만한 기술자료의 축적이나 시공기술의 개선은 미흡한 실정이다. 이는 대규모의 프로젝트를 수행하여 왔을 뿐 이에 참여한 기술자들을 육성하고 국내 기술로의 전환을 피하고자 하는 체계적인 장치가 마련되지 않았기 때문이라 하겠다.

NATM 설계는 과거의 심적조사와 수치해석기법을 통한 사전설계를 실시한 후 시공단계에서 막장관찰과 계속자료를 분석평가하여 사전 설계의 적정성 여부를 검증하고, 설계를 보완·수정하여야 한다. 그러나 이러한 분석, 평가, 검증작업은 소홀시되고 임기응변식 설계와 시공이 만연되어 발전해야 할 기술이 담보상태에 있는 사실은 안타까운 일이 아닐 수 없다.

본 보고서에서 조명된 각종 사안들은 좀 더 심층있게 분석되어 기술발전에 진일보할 수 있는 전기를 마련하여야 할 것이다. 아울러 전문기술인력, 즉 전문기술자 및 전문기능인력등을 체계적으로 교육·양성하여 다가오는 기술개발화 시대를 대비하여야 할 것이다.

6. 감사의 글

본 보고서의 일부는 서울시 지하철 건설본부에서 주관하고 있는 터널시공감리단의 업무수행중 획득한 정보와 자료로서 이를 발표할 수 있도록 허락해 주신 지하철 건설본부의 관계자에게 감사의 뜻을 포함합니다.