

제8강 실드TBM 굴진관리(8) 도심부 급곡선 시공사례

- 기계화시공위원회 실드TBM 공법연구그룹 -



김재영
(주)코템
대표이사/공학박사



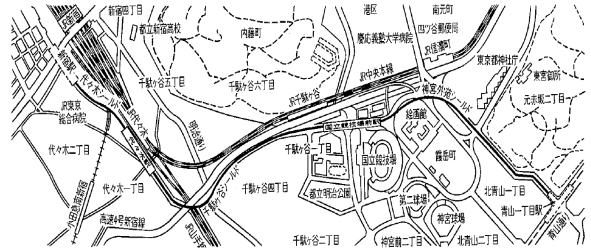
채종길
서울특별시
안전총괄본부/공학박사



문준식
경북대학교 토목공학과
부교수/공학박사

1. 머리말

본 연재강좌에서는 실드TBM터널의 굴진관리에 있어서 지금까지의 7회에 걸쳐 서술하였다. 여기서는 道営地下鉄12호선의 건설공사에 있어서 千駄ヶ谷 실드TBM공사에 있어서 수행된 굴진 관리의 사례에 대해 서술하고자 한다.



〈그림 1〉 시공위치

2. 공사 개요

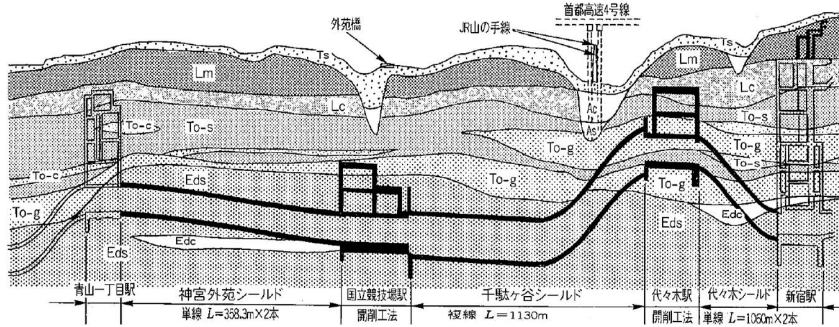
공사 개요를 표 1에 나타내었다. 본 공사는 国立競技場前駅の 발진구에서 首都高速4호선을 따라 도중에 JR山の手線を 지나 代々木駅の 도달부까지 복선단면 지하철터널을 이수기압식 실

드TBM공법으로 시공을 수행한 것이다. 그림 1에 평면도를 그림 2에 지질종단도를 나타내었다.

본 공사의 대상지반은 실드TBM 터널의 전반부는 江戸川모래층이며, 후반부는 東京자갈층도 혼재하고 있다.

〈표 1〉 공사 개요

굴진연장	실드TBM 외경	토피고	최소 곡선반경	터널구배	1차 라이닝	2차 라이닝
L=1,130m	φ=8,660mm	9~30m	R=103m	-2% ~ +45%	외경 8,500mm 직선부 RC세그먼트 곡선부 덕타일세그먼트	없음



〈그림 2〉 지질종단도

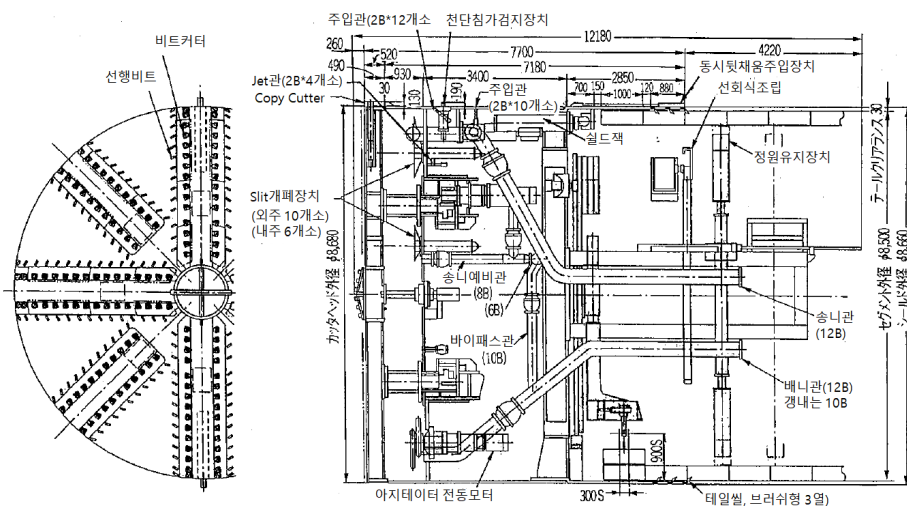
3. 실드TBM 장비

본 공구는 千駄ヶ谷 실드TBM 외, 神宮外苑 실드TBM($\phi 5440 \times$ 단선 2열 : 굴진연장 각 1,060m)와 代々木 실드TBM ($\phi 5440 \times$ 단선 2열 : 굴진연장 각 358m)의 총 5대의 실드TBM을 사용하여 시공한다. 공기단축을 위해 각 실드TBM의 시공시기를 중복 시켜야 하지만, 본 공구의 입지조건상 굴착토사 처리설비를 1개 소로 할 수밖에 없었다. 그래서 당초 계획에서는 이토압 실드TBM 공법으로 시공할 예정이었으나, 지질조사결과와 공기단축을 위해 이수가압식 실드TBM을 적용하게 되었다.

4. 굴진관리

실드TBM 굴진선형은 首都高速4호선에 평행/근접해 있어, 도중에 이 도로와 JR山の手線の 교차부 하부를 횡단한다. 또한 곡선길이가 전체 연장의 약 60%를 차지하고, 종단선형도 -2% 에서 $+45\%$ 의 급구배로 되어 있다.

지상부에는 首都高速道路, JR山の手線, 상가, 오피스빌딩이 있기 때문에 주변 지반이나 구조물의 변위계측관리, 지하구조물 등에서의 이수분발방지, 정밀한 실드TBM 선형관리가 중요하였다. 다음에 각 실드TBM 공사에 있어서 수행한 굴진관리에 대해서 서술하였다.



〈그림 3〉 실드TBM 장비개요

4.1 막장 이수압의 설정과 관리

4.1.1 막장 이수압의 설정

실드TBM굴착시의 이수압의 설정은 주변 지반, 근접구조물의 변위를 방지하고, 지반의 굴착량과 적정하게 되도록 다음과 같이 설정하였다.

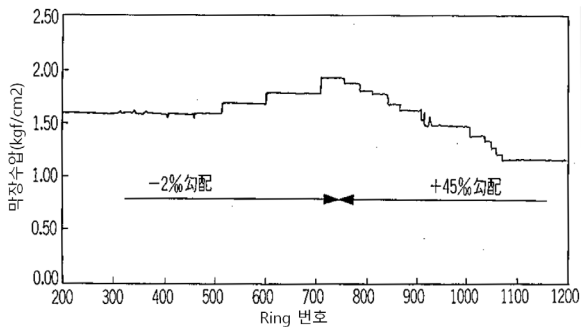
$$\text{이수압 상한값} = \text{정지토압} + \text{지하수압} + \text{여유압}$$

$$\text{이수압 하한값} = \text{주동토압} + \text{지하수압} + \text{여유압}$$

즉 막장 이수압의 설정값은 정지토압, 주동토압, 지하수압, 여유압, 이수압 상한값, 이수압 하한값, 분발이수압, 관리이수압을 설정하였다.

4.1.2 막장 이수압의 관리

막장 이수압은 실드TBM의 챔버내에 설치한 수압계로 측정된다. 이 막장 이수압과 설정한 막장이수압과의 편차로부터 굴진시 송니펌프의 회전수를 제어하고, 또한 굴진정지시에는 송니관의 콘트롤밸브의 개폐를 조정하여 막장 이수압을 유지시켰다. 이 때, 일니량, 편차량을 파악하고, 급격한 변화가 없는지 관리하였다.



〈그림 4〉 막장 이수압의 추이

4.2 운전관리

4.2.1 실드TBM 관리

실드TBM 굴진시에는 커터토크, 총 추력, 막장 이수압 등의 변화에 주의하였고, 실드TBM에 부하가 작용하는 굴진이 되

지않도록 주의하였다. 이 데이터는 굴진거리 2cm간격으로 굴진 관리용 컴퓨터로 읽고, 그래프로 표시하거나 평균값 등으로 계산하고, Ring보고서와 일일보고하여 처리하였다.

또한 기존 구조물의 기초에 근접하여 시공하는 위치가 있었고, 실드TBM 장비가 Column Jet Grout구간을 약간 굴착하기 위해 이 구간은 특히 부하데이터의 변화에 주의하였다.

4.2.2 방향제어

실드TBM은 계획선형상을 굴진하는 것이 바람직하지만, 실드TBM의 습관이나 지반의 상황 등 영향으로부터 사행을 피할 수 없다. 사행이 발생했을 때 급격하게 실드TBM의 자세를 바꾸면 세그먼트를 조립할 수 없는 경우가 있기 때문에 계획선형에서 실드TBM이 벗어난 경우는 그 오차량과 테일클리어런스에 맞춰 수 m전부터 맞추도록 방향제어를 수행하였다.

특히, 완화곡선부는 서서히 곡선반경이 작아지므로 단곡선구간의 곡선반경이 되므로 신중한 방향제어가 요구되었다. 완화곡선 구간 진입시에는 중절장치는 사용하지 않고 잭스트로크 차이만으로 방향제어를 수행하였고, 곡선반경이 수 100m정도의 위치에서부터 중절장치를 사용하고, 중절각과 잭스트로크 차이의 두가지로부터 방향제어를 수행하였다. 실드TBM의 방향제어는 측량결과를 바탕으로 좌우 및 상하의 잭스트로크 차이를 필요량으로 하여 수행하였다.

4.3 뒤택음주입관리

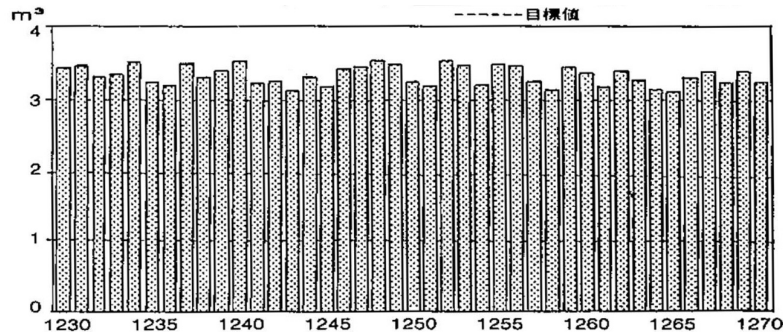
뒤택음주입재료는 가스성 이액형을 사용하고 품질관리는 지상플랜트에서 겔타임, 플로우값, 비중의 측정을 1일 1회의 빈도로 수행하였다. 표 2에 주입재료의 특성값을 나타내었다.

곡선부에서는 카피커터에 의해 여굴을 수행하기 때문에 필요 주입량은 증가한다. 뒤택음주입관이 여굴구간을 통과할 때는 카피커터의 사용상황에 맞춰 굴착단면적의 설정값을 변경하고, 여굴구간에서는 필요 주입율을 확보할 수 있도록 하였다.

지상의 뒤택음 주입플랜트 및 갱내 중계펌프에서는 주입재료를 로드셀 등에 의해 계측하고, 중앙제어실에 표시하여 주입재료의 관리를 그림 5와 같이 수행하였다.

〈표 2〉 주입재의 특성값

비중	Flow값 (cm)	겔타임 (sec)	일축압축강도(kgf/cm ²)			
			σ , 1hr	σ , 1일	σ , 7일	σ , 28일
1.22	35 이상	5~20	0.5	5.0	10.0	20.0 이상



〈그림 5〉 뒷채움주입

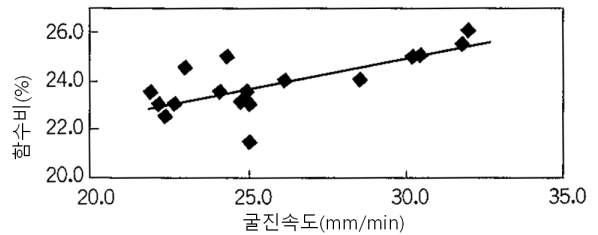
4.4 이수품질관리

이수의 품질관리는 굴착개시시에 비중, 점성, 사분율, Filtration 시험을 수행하고 소정의 품질로 굴진하도록 하였다. 비중, 점성에 대해서는 밀도계와 점성 자동계측기를 조정조에 설치하여 중앙제어실에서도 실시간 파악할 수 있도록 하였다. 또한 굴진종료시에도 상기 시험을 수행하여 굴착지반의 변화가 없는지 확인을 수행하였다. 굴진개시까지 소정의 품질의 이수가 되지 않는 경우는 물 또는 작니재를 첨가하는 등 이수품질을 조정하였다.

4.5 이수처리설비

이송된 굴착토사는 1차처리설비에서 74 μ 이상의 토사를 진동체와 사이클론으로 분리하고 토사피트에 저장하고, 74 μ 이하의 점성토를 여잉이수조에 보낸다. 여잉이수조의 이수는 2차처리설비의 필터프레스로 보내지고, 필요에 따라 응집제(PAC, Poly Aluminum Chloride)를 첨가한 후 가압탈수하고 Mud Cake 으로서 토사피트에 저장된다.

1차 처리토는 함수비가 높으면 액상화하기 쉬운 운반에 지장을 가져오므로 그림 6과 같이 적정 함수비의 계측을 수행하였다. 굴진속도가 상승하면, 시간 당 토사처리량이 증가하고 충분



〈그림 6〉 굴진속도와 함수비의 관계

히 함수비를 낮출 수 없기 때문에 함수비의 결과에 따라서는 굴진속도를 억제해야하는 경우도 있었다.

5. 맺음말

최근 실드TBM 터널공사에서는 컴퓨터의 발전과 함께 다양한 굴진데이터를 즉시 수집하고, 해석하는 것이 가능해졌다. 그러나 단지 데이터를 수집하는 것이 굴진관리라고 할 수 없고, 그 결과를 향후의 굴진관리에 피드백시켜 트러블을 미연에 방지하는 것도 가능해졌다. 향후 실드TBM 터널의 굴진관리는 집중관리, 집중제어, 자동화의 방향으로 더욱 개발이 진행될 것으로 생각되나, 컴퓨터에 의존하지 않고, 본 연재강좌에서 서술해 온 굴

진관리의 방법을 충분히 이해하고, 현장기술자가 적절한 판단을 하여 굴진을 진행시킬 필요가 있다.

참고문헌

1. トンネルと地下, 土木工学社: シールドトンネルの掘進管理 (10), 実施例, 第29巻3号, pp. 81-88, 1998.

실드터널 굴진관리 강좌를 마치면서

최근 도심지터널, 하해저터널, 대형 복층터널 등의 굴착을 위해서 실드 터널공법은 점차 필수적인 것으로 인식되어지고 있다. 실드 TBM을 이용한 터널의 굴착을 성공적으로 수행하기 위해서는 실드장비 설계, 구동원리, 장비의 운영·관리 등의 기계적인 분야를 포함하여 굴착 및 막장안정원리, 세그먼트 라이닝 설계 및 시공 등 지반 및 구조분야 등 다양하고 복합적인 기술에 대한 이해와 노하우가 필요하다. 이중 실드장비의 굴착 메커니즘이나 세그먼트 설계에 대한 내용은 우리학회에서 발간한 터널공학시리즈를 포함하여 여러 관련도서를 통해 이해할 수 있겠으나, 실드장비의 운영 및 유지관리, 막장안정관리, 세그먼트 조립 등 현장에서 직접적으로 부딪히는 실드장비 굴진관리 실무전반에 대한 내용이 기술된 도서는 찾기 어려웠다.

이에 “실드공법 연구그룹“은 실드공법의 운영실무에 대한 내용을 연구하고 터널지하공간학회 회원과 내용을 공유하기 위해 2016년 4월에 발족되었다. 실드공법 운영 및 시공관리에 관한 연구의 일환으로 일본 터널기술협회 협회지에 연재된 실드공법 기술강좌를 번역/보완하여 우리 학회지에 2016년 6월호부터 이번호를 끝으로 8회에 걸쳐 연재하였다. 8회의 연재강좌만으로는 실드장비의 굴진관리 실무전반을 다루기에는 다소 부족함이 없지 않았지만 실드장비를 적용함에 있어서 불확실성에 대한 대담과 향후 실드장비의 적용실적의 증가에 미약하지만 도움이 되리라 기대해 본다.

2018년 3월

실드공법 연구그룹 **문 준 식**