

제6강 셴드TBM 굴진관리(6) 측량 및 방항제어

- 기계화시공위원회 셴드TBM 공법연구그룹 -



김재영
(주)코템
대표이사 / 공학박사



채종길
서울특별시
안전총괄본부 / 공학박사

1. 머리말

셴드TBM 터널의 경우 사용목적에 따라 사행량에 대한 허용 값이 정해져 있다. 세그먼트는 셴드TBM의 테일 내에서 조립되므로, 설치위치는 셴드TBM의 궤적과 거의 일치한다고 생각할 수 있다. 따라서 사행을 허용범위로 억제하면서 터널을 정해진 위치에 구축하기 위해서는 셴드TBM을 가능한 계획선형에 따라 추진시킬 필요가 있다.

셴드TBM 터널의 측량에는 기준점 측량, 노선중심선 측량, 기준점·수준점의 갱내 도입측량 및 셴드TBM 갱내측량이 있다.

여기서는 이러한 측량방법 중 갱내측량 방법과 그 결과를 바탕으로 수행하는 셴드TBM의 방항제어 방법에 대해서 기술하고자 한다.

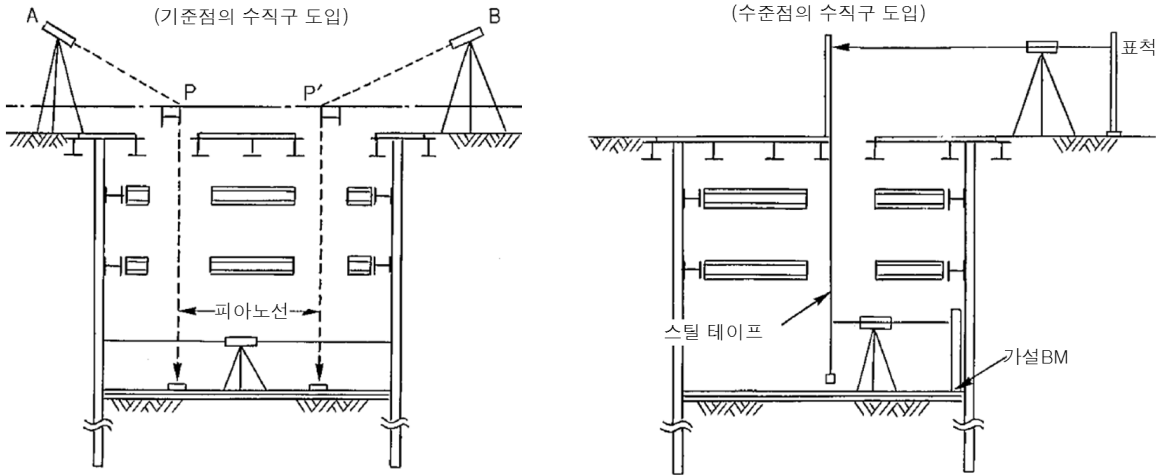
2. 셴드TBM 갱내측량

2.1 갱내기준측량

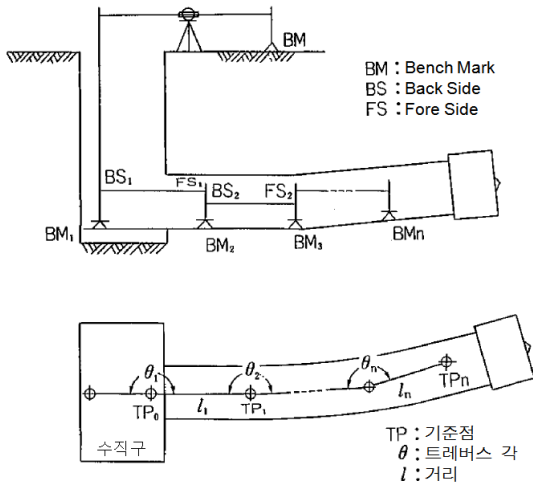
2.1.1 기준점·수준점의 갱내 도입

셴드TBM의 위치측량에 이용하는 수준점 및 가수준점은 수직구에서 셴드TBM 갱내로 도입된다. 수직구 도입측량은 정밀하게 수행하고, 중심선에는 인조(引照)점을 설치하여 점검할 수 있도록 해 둔다. 그림 1에 수직구에서 도입측량의 예를 나타냈다.

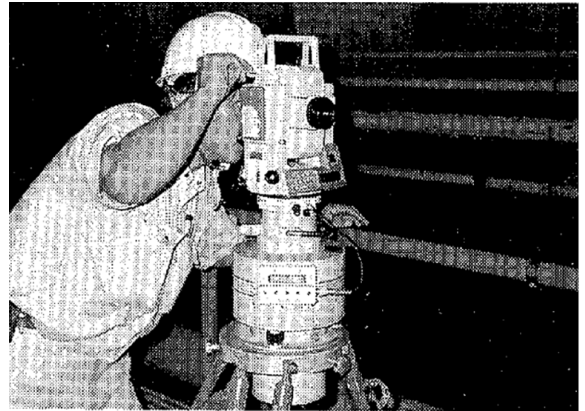
셴드TBM의 굴진이 진행됨에 따라 트레버스 측량 및 레벨 측량에 수행하여 셴드TBM 갱내 기준점 및 가수준점을 순차적으로 설치한다(그림 2). 기준점 및 가수준점은 세그먼트의 인버트부에 핀 등을 고정하여 설치한다.



〈그림 1〉 기준점·수준점의 수직구 도입의 예



〈그림 2〉 기준점·가수준점의 갱내도입



〈사진 1〉 광파기를 이용한 갱내 기준선 검측

2.1.2 기준점 검측

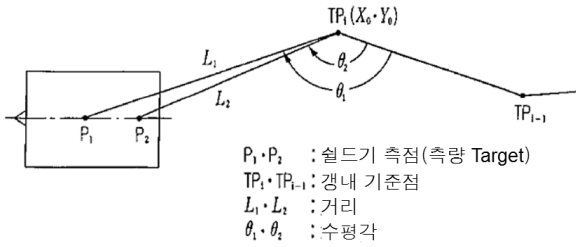
쉴드TBM의 추진력을 받는 세그먼트의 변형·이동에 따라 쉴드TBM 터널의 갱내에 설치한 기준점도 미소하지만 이동하기 때문에 정기적으로 검측하여야 한다. 실적에 따르면 추력이 미치는 영향범위는 50~80m 정도이다. 이 범위내에 기준점을 설치하는 경우는 정기적인 관측에 따라 움직임이 수렴하는지를 확

인하여 갱내 기준측량에 사용한다.

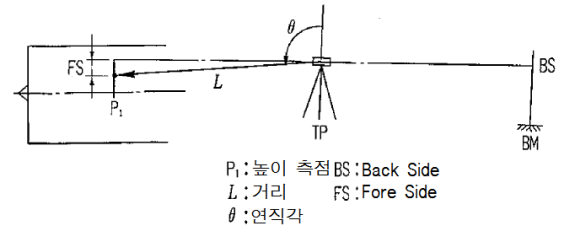
수직구에서 도입된 기준선은 그 거리가 짧기 때문에 반드시 지상 기준선과 조합하여 검측할 필요가 있다. 예를 들면 5m 기준선을 오차 1mm로 도입할 수 있다하더라도 1km 터널에서는 계산상 200mm의 오차가 발생하게 된다.

검측 시기는 초기굴진완료 전후에 수행하는 것이 일반적이다. 또한 곡선부를 제외한 지점과 도달 직전 등에도 검측하는 것이 바람직하다.

검측 방법은 지상에서부터 터널까지 시추하여 관측공을 설치



<그림 3> 쉴드TBM 평면위치측량 방법



<그림 4> 쉴드TBM 종단위치 측량의 개요

하는 방법과 정밀한 광파기에 의해 갱내 기준선의 방위각을 측정하여 지상 기준선의 방위각과 비교하여 기준점 좌표를 수정하는 방법이 있다.

2.2 쉴드TBM 추진관리 측량

2.2.1 평면위치측량

쉴드TBM의 위치와 방향을 정확하게 파악하기 위한 방법으로서 트레버스 측량에 기반한 좌표관리가 일반적으로 이용되고 있다. 여기서는 쉴드TBM의 정해진 2점을 측량하여 쉴드TBM의 위치와 방향을 구하는 방법을 소개하고자 한다.

쉴드TBM의 평면위치측량 개념을 그림 3에 나타내었다. 측량 순서는 다음과 같다.

- ① 쉴드TBM에 측정점 P1, P2를 설치해 둔다. 측정점은 격벽, 거더부 또는 스크류 컨베이어나 작업데크 등 쉴드TBM 장비 내 고정물에 설치한다.
- ② 갱내 기준점으로부터 트레버스 측량에 의해 이 2점의 거리와 각도를 측정하고, 측정 좌표를 계산한다.
- ③ P1, P2의 방향으로부터 롤링량을 보정하고, 쉴드TBM의 방향을 구한다.
- ④ 쉴드TBM의 중심선과 측정 위치관계로부터 막장, 테일 좌표를 계산한다.
- ⑤ 터널 계획좌표와 비교하여 계획선형에서의 사행량 및 방향 오차량을 계산한다.

2.2.2 종단위치측량

레벨을 이용한 직접 수준측량 또는 트레닛을 이용한 간접 수준측량(삼각수준측량)이 있다. 간접 수준측량은 트레닛 망원경의 연직각(또는 천정각)과 거리로부터 고저차를 구하는 방법이다.

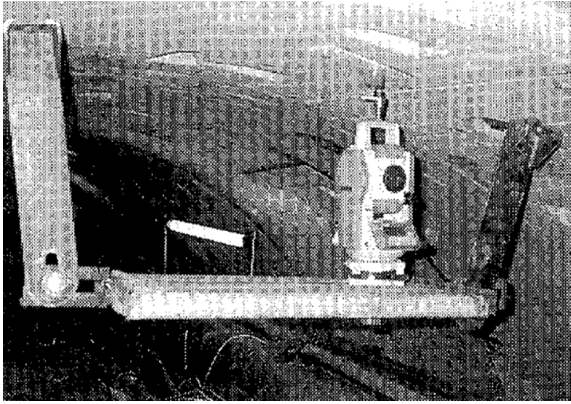
간접 수준측량으로 구한 측정 좌표로부터 경사계에 의한 피칭을 추가하여 쉴드TBM의 막장과 테일의 표고를 계산한다.

레벨에 의한 직접 수준측량시 종단선형 구배가 급해지면, 시준할 수 있는 거리가 짧게 되고 레벨의 설치횟수가 증가한다. 또한 평면위치측량과 종단위치측량을 별도로 수행하므로, 측량공의 수도 많아지게 된다. 간접 수준측량에 의하면 평면위치측량과 동시에 측량결과를 얻을 수 있으므로, 측량시간을 단축할 수 있다(그림 4).

2.2.3 측량빈도

쉴드TBM의 사행을 매우 작게하기 위해서는 항상 사행량을 파악해 두는 것이 중요한 것은 말할 필요도 없다. 이를 위해서는 1링 추진마다 측량하는 것이 바람직하다. 쉴드TBM의 중심위치, 쉴드TBM 장비의 특성, 토질 변화 등의 요인으로 인해 쉴드TBM이 예상치 못하게 사행되는 경우도 있다. 따라서 쉴드TBM의 사행특성을 파악할 때까지는 가능한 측량빈도를 많이 하는 것도 좋은 방법이라고 할 수 있다.

중구경, 대구경 쉴드TBM에서는 후방대차 상부의 공간에 사신 2와 같이 측량기기를 설치하여 항상 측량할 수 있도록 해두는 것이 좋은 방법이다. 소구경 쉴드TBM에서는 이러한 공간을



〈사진 2〉 쉴드TBM 위치측량용 토탈스테이션

확보하는 것이 곤란하므로, 측량빈도가 적은 경향이 있다. 이러한 경우는 시공조건에 따라 그 외의 측량방법을 병행하여 점검하는 것으로 보완하는 것이 바람직하다.

2.3 기타 측량방법

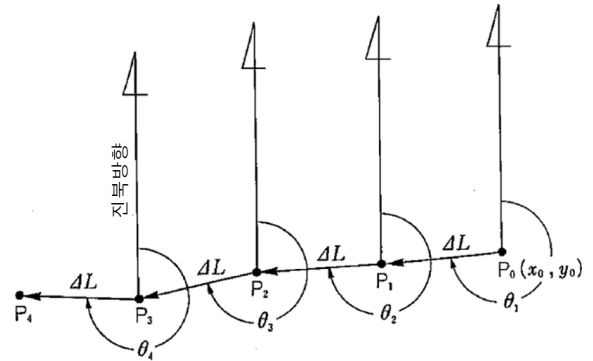
2.3.1 센터측량

쉴드TBM의 수평위치를 관리하는 측량방법의 하나로 센터측량에 의한 방법이 있다. 센터측량은 갱내의 계획중심선상에 핀을 설치하여, 트레닝으로 센터방향을 관측하여 쉴드TBM이나 세그먼트 중심선으로부터의 변위량을 측정하는 방법이다. 곡선부에서는 접선방향에 대한 편각으로 센터방향을 관측한다.

센터측량을 하면 계획선형에서 벗어난 오차량을 갱내에서 바로 알 수 있다. 특히 직선부에서는 레이저를 이용하면 항상 센터위치를 알 수 있으므로 유효한 방법이다. 앞서 말한 트레버스 측량에 의한 쉴드TBM의 위치측량과 병행하여, 곡선의 시중점 등 측정점을 갱내에 설치하여 측량 점검에도 이용된다.

2.3.2 자이로에 의한 평면위치측량

쉴드TBM 장비내에 광파기를 탑재하여 추진 중 방위각의 변



〈그림 5〉 자이로에 의한 평면위치측량의 원리

화로부터 쉴드TBM의 위치를 계산하는 것이다. 그림 5과 같이 쉴드TBM의 방위가 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ 에서 미소거리 ΔL 추진했을 때의 위치 P_1, P_2, P_3, \dots 를 실시간으로 산정할 수 있다.

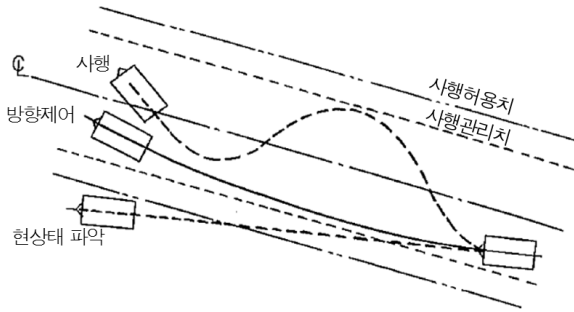
쉴드TBM의 진행방향은 반드시 측정되는 방위각과 일치하지 않는다. 이 때문에 자이로에 의한 위치계산을 반복하면 오차가 누적되고, 실제 사행량을 정확하게 파악할 수 없게 된다. 따라서 이 측량방법은 굴진 싸이클의 제약으로 광학측량을 이용한 위치측량을 수 링마다 정도로 자주 실시할 수 없는 경우에 보조적인 관리방법으로 이용되고 있다.

3. 쉴드TBM 방향제어

3.1 사행수정의 고려

쉴드TBM의 방향제어를 수행하는데 있어서 기본적인 개념은 다음과 같다.

- ① 사행량이 커지기 전에 초기에 수정한다.
- ② 임기응변적으로 수정하지 않고, 현재의 방향으로 추진하는 경우에 10~20m 전방에서 사행량이 어떻게 될 지를 항상 예측한다.
- ③ 사행량의 관리값 및 허용값을 포함하여, 사행수정 방침을 수립한다.



〈그림 6〉 쉴드TBM의 굴진에 있어서 사행수정의 개요

그림 6에 쉴드TBM의 방향제어, 사행수정에 대한 개요를 나타내었다. 정해진 사행량 허용값을 넘지 않도록 시공하기 위해서는 우선 사행 관리값(허용값의 50~80%를 목표로 함)을 관리 범위 내에서 수정하는 것을 목표로 굴진관리를 수행한다.

항상 사행을 수정한다는 인식은 필요하지만, 언제까지 어느 정도 수정하는지에 대한 방침이 불명확하면, 그림과 같이 실제로 “사행”을 반복하는 경향이 된다.

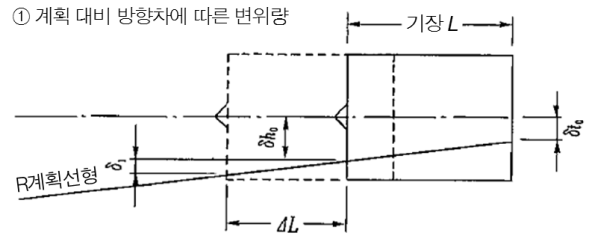
사행과 함께 방향수정을 하면, 여굴과 쉴드TBM의 외주면 마찰의 증대에 따라 주변지반이 교란되고 침하 요인으로 된다. 침하방지의 관점에서도 사행량을 작게 하는 것이 바람직하다.

방향제어에 있어서는 현재 상태의 방향으로 쉴드TBM을 추진한 경우에 사행량이 어떻게 되는지 “현재 상태 파악”이 우선 필요하다. 그 다음으로 관리값 내로 억제하기 위해서는 방향 수정량을 어떻게 설정할 것인가, 관리값을 넘어서더라도 몇 m 앞에서 수정되는지 등을 분석하여 “방향제어”를 수행할 필요가 있다.

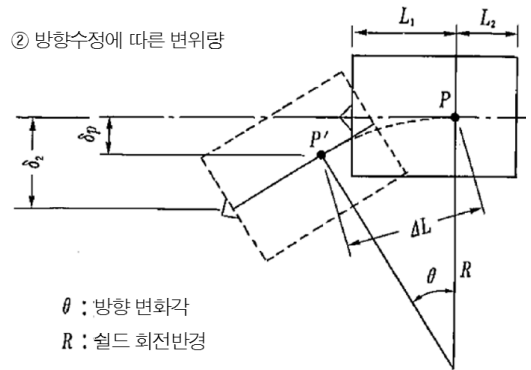
3.2 쉴드TBM 방향제어

3.2.1 방향수정량 결정 방법

쉴드TBM의 방향수정량을 결정할 때는 쉴드TBM의 위치, 방향변화 시뮬레이션을 수행하여, 사행수정방법을 명확하게 해 둘 필요가 있다. 쉴드TBM의 방향변화량 θ 에서 미소거리 ΔL 추진한다고 가정하면, 계획선형에 대한 사행량 변화 δ 는 그림 7에 따



① 계획 대비 방향차에 따른 변위량



θ : 방향 변화각
 R : 쉴드 회전반경

〈그림 7〉 쉴드TBM 위치예측 방법 예

라 다음 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 + \delta_2 \\ \delta_1 &= (\delta_{h0} - \delta_{t0}) \Delta L / L \\ \delta_2 &= \delta_p + L_1 \cdot \sin \theta \\ \delta_p &= R(1 - \cos \theta) \\ &= \Delta L \cdot (1 - \cos \theta) / \{2 \cdot \sin(\theta/2)\} \end{aligned}$$

여기서, δ_1 : 계획 대비 방향차에 따른 변위량

δ_2 : 방향수정에 따른 변위량

δ_{h0} : 현재 상태의 막장부 사행량

δ_{t0} : 현재 상태의 테일부 사행량

쉴드TBM의 실제 추진방향은 그 자세-방향과 일치하지 않는 경우가 있으므로, 주의가 필요하다. 특히 종단방향의 쉴드 TBM 거동에 대해서는 쉴드TBM의 자중과 지내력 관계로 쉴드

TBM의 방향과 실제의 추진방향이 다른 경향이 강하다.

쉴드TBM의 위치를 예측할 때에는 이러한 쉴드TBM의 거동도 고려하여 시뮬레이션을 수행하고, 방향수정량을 결정하는 것이 중요하다. 쉴드TBM의 거동을 파악하는데 있어서는 소정의 방향수정량을 주었을 경우에 사행량 변화에 대한 실적값이 참고가 된다. 이를 위해서는 쉴드TBM의 사행상태를 나타내는 도면을 작성하여 경향을 분석하고 관리할 필요가 있다.

3.2.2 방향제어방법

쉴드TBM의 방향수정은 기본적으로는 추진책의 선택을 통해 수행된다. 즉, 책의 편압에 의해 상하, 좌우로 방향을 수정하기 위한 회전모멘트를 쉴드TBM에 작용시키기 때문이다.

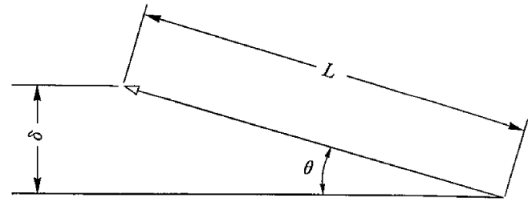
쉴드TBM의 사양을 결정할 때에는 터널 선형, 최소곡률반경, 토질 등을 감안하여 장비추력, 책의 수 및 배치를 충분히 검토하여 여유있게 해 두는 것이 바람직하다. 급곡선 시공이나 평면과 종단의 복합곡선 시공에서는 책의 선택에 제약이 있기 때문에 중절기구를 장착하여 곡선시공성을 높이는 배려도 필요하다(그림 8).

3.2.3 추진 중의 방향변화 관리

방향수정량은 평면방향에 대해서 방향각의 변화량 또는 막장~테일의 벗어난 오차량의 변화를 좌우 추진책의 스트로오크 변화량으로 환산하여 관리하는 것이 일반적이다. 종단방향에 대해서는 동일한 개념으로 상하 스트로오크 변화량 또는 경사계에 의한 피칭변화량으로서 관리하는 것이 바람직하다.

굴진 중의 방향변화는 스트로오크계에 의한 좌우 추진 책의 스트로오크 차이, 자이로 방위각의 변화, 경사계의 피칭각 등을 통해 파악한다. 이들 추진 데이터의 목표값과의 차이를 관리하면서 책패턴을 변경하여 방향제어를 실시한다.

연약지반에서의 급곡선 시공 등에서는 지내력 부족이 원인으로 방향이 변화하고 있음에도 불구하고, 횡방향의 상태가 곡선 외측으로 쉴드TBM이 사행하는 경우도 있다. 이러한 경우에는



$$\Delta S = D \cdot \tan \theta \\ = D \cdot \delta / L$$

- ΔS : 스트로오크 변화량
- D : 세그먼트 외경
- θ : 쉴드TBM 방향각 변화량
- δ : 막장-테일의 오차변화량
- L : 쉴드TBM 길이

〈그림 8〉 방향수정량 산정방법

추진을 일시중단하고, 측량을 통해 쉴드TBM의 위치를 파악하는 것도 필요하다.

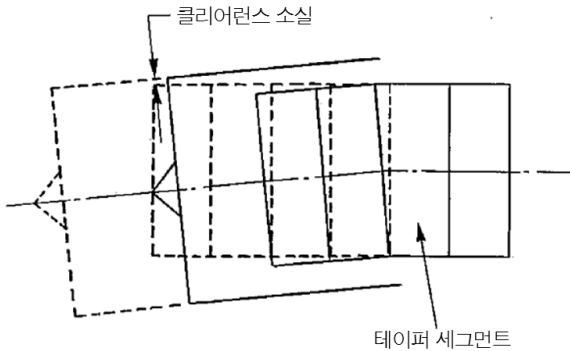
3.3 세그먼트 조립관리

쉴드TBM의 방향수정과 함께 세그먼트 조립관리를 신중히 수행할 필요가 있다.

세그먼트와 테일·스킨 플레이트의 클리어런스가 감소하면 다음과 같이 쉴드TBM의 추진에 여러 가지 악영향이 나타난다.

- ① 세그먼트 조립작업에 지장이 되고, 경우에 따라서는 조립이 되지 않는다.
- ② 무리한 조립을 하게 되면 터널의 진원도가 저하하는 한편, 이음부 단차, 벌어짐이 커지게 되고, 이는 누수의 원인이 된다.
- ③ 세그먼트와 테일의 마찰에 의해 추력이 상승한다. RC세그먼트의 경우는 세그먼트 본체에 크랙 등의 손상이 발생하는 경우도 있다.

이 때문에 추진완료 시 및 세그먼트 조립완료 시에 클리어런스를 계측하고, 쉴드TBM의 방향에 맞추어 테이퍼세그먼트를 사용하여 세그먼트 방향을 수정해야만 한다.



〈그림 9〉 테이퍼를 이용한 세그먼트 방향 수정

그림 9과 같이 직선부에서도 상하·좌우 스트로오크 차이가 있으면 추진을 계속하는 동안에 한 쪽의 테일클리어런스가 서서히 사라져 버리므로, 사행용 테이퍼세그먼트를 준비한다. 곡선부에서 사용하는 테이퍼세그먼트에 대해서는 곡선을 고려하여 테이퍼량, 형상(양테이퍼, 편테이퍼), 조립패턴 등을 충분히 검토할 필요가 있다.

4. 맺음말

최근 향상된 전자장비를 사용하여 각도측량과 거리측량을 동시에 실시할 수 있다. 이러한 기술들을 쉴드TBM의 추진관리측량에 이용함으로써 측량작업이 충분히 용이하고 단시간에 수행할 수 있게 되었다.

또한 각종 자동측량 시스템과 쉴드TBM의 잭 조작을 무인으로 수행하는 방향제어시스템도 이용되고 있다. 자동화 에너지 절약은 사회의 요구이기도 하므로, 이들 시스템을 유효하게 활용하는 것도 좋은 방법이다.

현장의 관리자는 쉴드TBM이 소정의 위치에 도달하기까지는 충분히 납득될 때까지 수차례의 측량을 반복하고 싶어야 한다. 이는 토목기술자로서 당연한 것이다. 컴퓨터에 의한 자동화 시스템을 이용하는 경우에도 담당자 스스로가 측량, 방향제어의 원리를 잘 이해하고, 측량결과를 점검하고, 방향제어를 판단할 필요가 있다.

참고문헌

1. 「新・トンネル測量」 連載講座小委員会：「新・トンネル測量」, トンネルと地下, 土木工学社, 第27巻11号, p.84, 1996.
2. 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 (8), 第28巻9号, p.83-88, 1998.