

제3강

막장안정관리(2) 토압식 실드TBM

- 기계화시공위원회 실드공법연구그룹 -



채중길
삼성물산(주)
과장 / 공학박사



김재영
(주)코템
대표이사 / 공학박사



장선중
(주)삼보기술단
부장



최창림
(주)삼보기술단
상무

1. 토압식 실드TBM의 막장안정

1.1 막장안정 메커니즘

토압식과 이수식 실드TBM의 차이는 챔버내 압력을 유지시키는 매개체의 차이에 따른 것으로 막장안정에 관한 기본적인 개념은 같다. 그래서 이전의 강좌 내용과 일부 중복되지만, 복습을 위해 다시 한 번 설명하고자 한다.

터널 막장에 있어서 굴착작업은 지반 내의 응력관계에서 보면 제하에 해당한다. 따라서 역학적으로는 막장 안정을 위해 제하되는 토압과 수압에 상응하는 압력(이하, 이토압이라고 칭함)을 보충할 필요가 있다. 토압식 실드TBM에 있어서 이러한 개념을 그림 1에 나타내었다. 그림과 같이 토압식 실드TBM에서는 굴착도를 커터챔버에 충만 가압시켜 굴착도량에 상응하는 배토량을 확보함으로써 막장의 안정을 도모한다. 이를 위해서는 굴착도에 적당한 소성유동성이 요구되는데, 굴착도만으로 소성유동성이 확보되지 않는 경우에는 첨가재를 주입하여 혼합한다(굴착도는 첨가재의 유무에 관계없이 이토라고 명칭함). 따라서 토압식 실드TBM에서는 굴착-굴진기구, 첨가재 주입장치, 혼합기구 및 배토기구 전체가 막장안정기구를 구성하게 된다.

토압식 실드TBM에 있어서 막장안정은 다음의 역할에 의해 성립한다고 생각된다.

- ① 이토압으로 토압 및 수압에 대항한다.
- ② 스크류컨베이어 등의 배토기구로 배토량을 조정한다.
- ③ 필요에 따라 첨가재를 주입하고, 이토의 소성유동성과 불투수성을 확보한다.

상술한 사항으로부터 토압식 실드TBM의 막장안정 메커니즘을 이해하기 위해서는 우선 이토압의 설정, 이토의 기능과 특성, 막장안정의 확보방법 등에 대해서 이해할 필요가 있다.

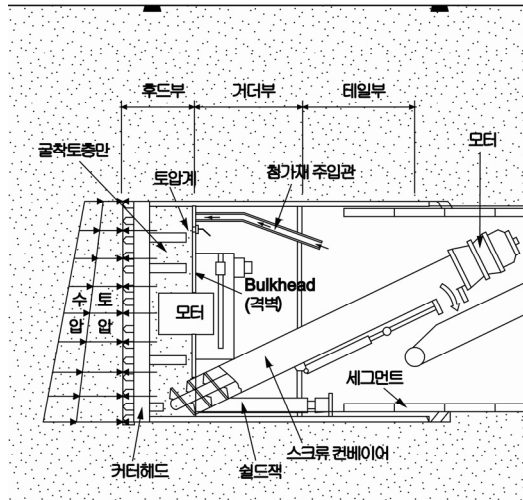


그림 1. 토압식 실드TBM¹⁾

1.2 이토압의 설정

이수압은 기본적으로 다음과 같이 설정된다.

$$\text{이수압} = \text{지하수압} + \text{토압} + \text{예비압} \quad (\text{식1})$$

지하수압(간극수압)은 관측정 등에서 계측된 값을 이용하는 것이 바람직하다. 그 이유는 보링조사에 의한 공내수위를 바탕으로 설정한 경우는 막장에 나타나는 지층의 간극수압이나 계절에 따른 수위 변동 등을 정확하게 파악할 수 없기 때문이다. 또한 점성토에서는 이를 토압에 포함하여 다루는 것이 일반적이다.

여기서의 토압은 기본적으로 수평방향으로 작용하는 수평토압을 의미한다. 막장토압의 대표적 산정법을 표 1에 나타냈으나, 기준이 되는 연직토압은 지반조건에 따라 전토압 또는 이완토압을 이용하고, 수평토압의 산정에 이용하는 토압계수는 정지토압계수 또는 주동토압계수를 이용하는 경우가 많다. 또한 사질토에서 이완토압 발생을 기대할 수 있는 경우에는 막장면에 생기는 활동면에 대한 모멘트를 고려한 村山(Murayama)의 식을, 점성토에서는 안정수를 고려한 B.B.Broms의 식을 이용하여 산정하는 방법도 있다.

예비압은 지하수압 및 토압의 설정오차나 굴진에 따른 이토압의 변동 등을 고려하여 경험적으로 결정하는데, 통상 20~50kN/m² (0.2~0.5kgf/cm²) 정도의 값을 적용한다.

표 1. 막장토압의 대표적 산정법²⁾

토압설정방법	기준 하중	적용이론 및 제안법		대상토질	
막장 전면에 작용하는 수평토압 (응력단위)	토피하중 (자연퇴적상태에 서의 연직토압)	Rankine 주동토압계수		사질토, 점성토	
		Brooker 정지토압계수		점성토(침하억제)	
		B,B,Broms 이론		점성토	
	이완토압	Terzaghi 이완토압, Rankine 주동토압계수		사질토	
막장 전면에 발생하는 활동면에 관한 모멘트 (힘 단위)	이완토압 활동도괴중량	대수나선 활동	시행착오법(村山 기본이론)		사질토
			일의적 결정법	村山 수정법	사질토
				간편법	사질토

1.3 이토의 기능과 특성

(1) 이토의 기능

이토의 기능은 다음과 같다.

- ① 막장(굴착단면)의 붕괴를 방지할 것
- ② 적당한 소성유동성을 가지고, 막장의 압력관리를 가능하게 할 것
- ③ 이토 전체로 불투수층을 구성하여 지하수의 갭내 분출을 방지할 것

(2) 이토의 특성

이토는 비중이 높기 때문에 이수와 같이 많은 특성을 필요로 하지 않고, 그 기능을 발휘하기 위한 유동에 관한 특성이 가장 중요하다. 이 때문에 이토가 유동성이 부족한 경우에는 첨가재를 혼입하여 유동성을 도모할 필요가 있다.

(3) 점성지반의 이토 특성³⁾

점성지반에서는 굴착에 의해 원지반보다 강도가 저하하여 비교적 양호한 소성유동성을 나타내는 경우가 많다.

그러나 모래분 함유율이 높은 지반이나 홍적층에서는 함수비가 낮기 때문에 유동성이 저하되거나, 커터챔버 내에 이토가 쉽게 부착되는 경향이 있다. 이 경우에는 첨가재(물을 포함)를 주입하여 유동화를 촉진할 필요가 있다.

또한 일반적으로 점성지반은 투수성이 낮기 때문에 스크류컨베이어에서의 지하수 분출은 문제가 되지 않는다.

(4) 사질토 지반의 이토 특성³⁾

사질토지반에서는 일반적으로 이토의 유동성이 부족할 뿐만 아니라 투수성도 높기 때문에 지수성 확보가 필요한 경우가 많다. 특히, 세립분 함유율 30%이하에서 이러한 경향이 강하게 나타나므로 첨가재 주입을 처음부터 계획할 필요가 있다.

1.4 막장안정의 확인방법

토압식 실드TBM에서는 막장의 상태를 육안으로 직접 확인할 수가 없으므로, 설정한 이토압과 이토성상의 타당성을 확인하는 방법이 필요하다. 그래서 현장에서는 막장의 상태를 확인하기 위한 방법으로 다음의 계측 데이터를 이용한 점검을 수행한다.

- ① 굴착토량(용적, 중량)
- ② 실드TBM 부하(추력, 커터토크, 스크류컨베이어 등)
- ③ 지반변위량
- ④ 막장붕괴탐사 데이터
- ⑤ 뒷채움주입관리 데이터

이 중 실드TBM 굴진과 병행하여 실시간으로 관리할 수 있는 항목으로 ①, ②가 있으나, 정량적으로 판단할 수 있는 ①에 의한 관리를 주로 한다.

2. 막장안정을 위한 시스템

2.1 시스템 구성

토압식 실드TBM 시스템 개요도를 그림 2에 나타냈다.

막장안정에 직접 관계하는 기구는 설비면으로는 굴착·추진기구, 첨가재 주입장치, 혼합기구 및 배토기구의 4가지로 구성되고, 각각의 기구는 막장안정기구가 충분히 기능할 수 있도록 역할을 한다.

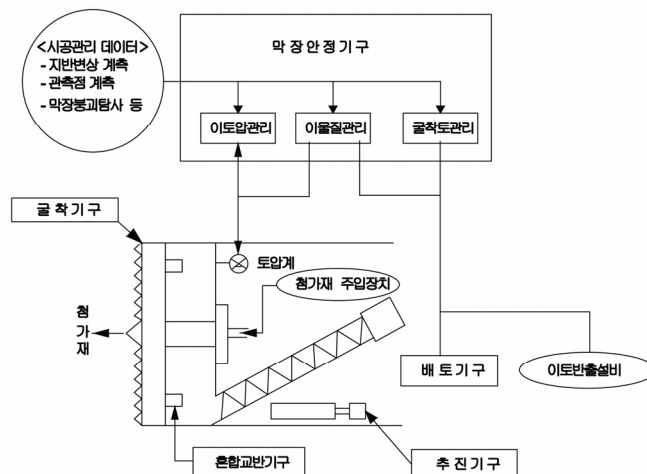


그림 2. 토압식 실드TBM 시스템 개요도

2.2 굴착·굴진기구

토압식 쉴드TBM의 커터페이스는 면판형과 스포크형 2종류로 나뉜다. 막장안정에 있어서 면판형은 면판에 의한 흠막이 및 이토의 교반효과를 기대할 수 있고, 또한 커터슬릿을 설치하여 면판을 통과하는 자갈 직경을 제한할 수 있는 장점이 있다. 이로 인해 막장에서 의 장애물 철거 작업, 커터비트 교환 작업 시에 스포크형에 비해 유리한 측면이 있다고 판단된다. 단, 커터챔버 내에 이토의 충만성 부족과 점성지반에서 커터슬릿부와 격벽 등에 이토의 부착이 발생하기 쉬운 등의 단점이 있다.

스포크형은 이토의 충진이 쉽기 때문에 커터챔버 내의 충만성이 높고, 막장면에 작용하는 토·수압과 토압계에서 계측되는 값의 차이가 작게 나타나고, 그 반응성이 좋다. 또한 이토가 압밀되기 어려운 구조이므로 부착 문제가 적고, 커터토크가 낮게 작용하는 등의 장점도 있다. 단, 스크류컨베이어를 통과할 수 없는 호박돌 등이 유입되는 지반이나 장애물 철거가 필요한 조건에서는 적용 시에 신중한 검토가 필요하다.

2.3 첨가재 주입장치

세립분(점토, 실트)이 적은 지반에서는 이토의 소성유동성 확보가 어렵고, 투수성도 높기 때문에, 첨가재를 주입하여 흙의 성질을 개량하는 작업이 이루어진다. 첨가재 주입에 필요한 장치에는 첨가재 플랜트, 첨가재 주입펌프, 커터헤드와 커터챔버에 설치되는 첨가재 주입구 등이 있다.

2.4 혼합교반기구

이토와 필요에 따라 주입한 첨가재를 교반하여 소성유동화를 도모하기 위한 장치는 다음과 같다(그림 3 참조).

- ① 커터헤드(비트, 스포크, 중간 빔)
- ② 커터 배면 교반날개
- ③ 스크류컨베이어축에 설치한 교반날개
- ④ 격벽에 설치한 고정 날개
- ⑤ 독립구동 교반날개

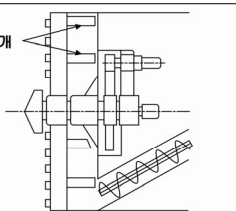
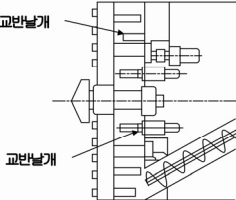
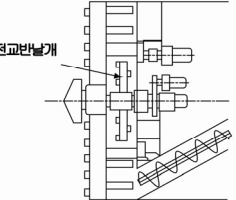
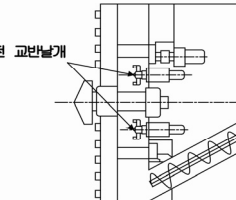
커터 챔버 내 교반기구		모식도
혼합날개		
고정 교반날개 가동 교반날개		
독립회전 교반날개	A 대형×1개	
	B 소형×복수개	

그림 3. 첨가재 교반모식도

2.5 배토기구

토압식 실드TBM의 배토기구의 핵심인 스크류컨베이어는 구동방식으로 축구동형 및 외통 구동형의 2종류가 있고, 각각 샤프트 부착식과 리본식(축이 없음)이 있으며, 샤프트 부착식은 배출가능한 자갈의 직경이 리본식에 비해 작으나 지수성이 비교적 좋은 특징이 있다.

막장안정을 위해서는 굴착토량과 배토량 사이에 균형을 확보할 필요가 있다. 이토의 소성유동성이 좋은 경우, 스크류컨베이어 배토량은 회전수에 비례하기 때문에 스크류 회전수를 토대로 굴착토량관리가 수행된다. 또한 토압계를 통해 계측값과 설정압을 비교하여, 스크류컨베이어의 회전수 증감에 따라 이토압 관리가 이루어진다.

다음으로 막장안정을 위해 배토기구에서는 스크류컨베이어 말단부의 지수성의 확보 중요하고, 주로 다음과 같은 방식이 적용된다(그림 4 참조).

- ① 게이트 방식
- ② 기계적 차단방식
- ③ 2차 스크류컨베이어 방식
- ④ 압송펌프 방식
- ⑤ 슬러리 펌프 방식

배토형태	모식도
게이트 방식	
기계적 막이방식	
2차 스크류 컨베이어 방식	
압송펌프 방식	
슬러리 펌프방식	
호스압송 방식(추가)	

그림 4. 토압식 실드TBM의 배토 및 지수형태^(4),5)

2.6 막장안정을 위한 관리

막장안정을 위한 관리 흐름(예)을 그림 5에 나타내었다.

토압식 실드TBM의 막장안정이 성립하기 위해서는 이토압 관리, 이토의 소성유동성 관리, 막장의 안정상태를 판단하는 굴착토량 관리의 3가지가 중심이 된다. 또한 막장의 안정상태는 지반변위계측, 막장붕괴탐사 등의 시공관리 데이터를 더하여 종합적으로 판단한다.

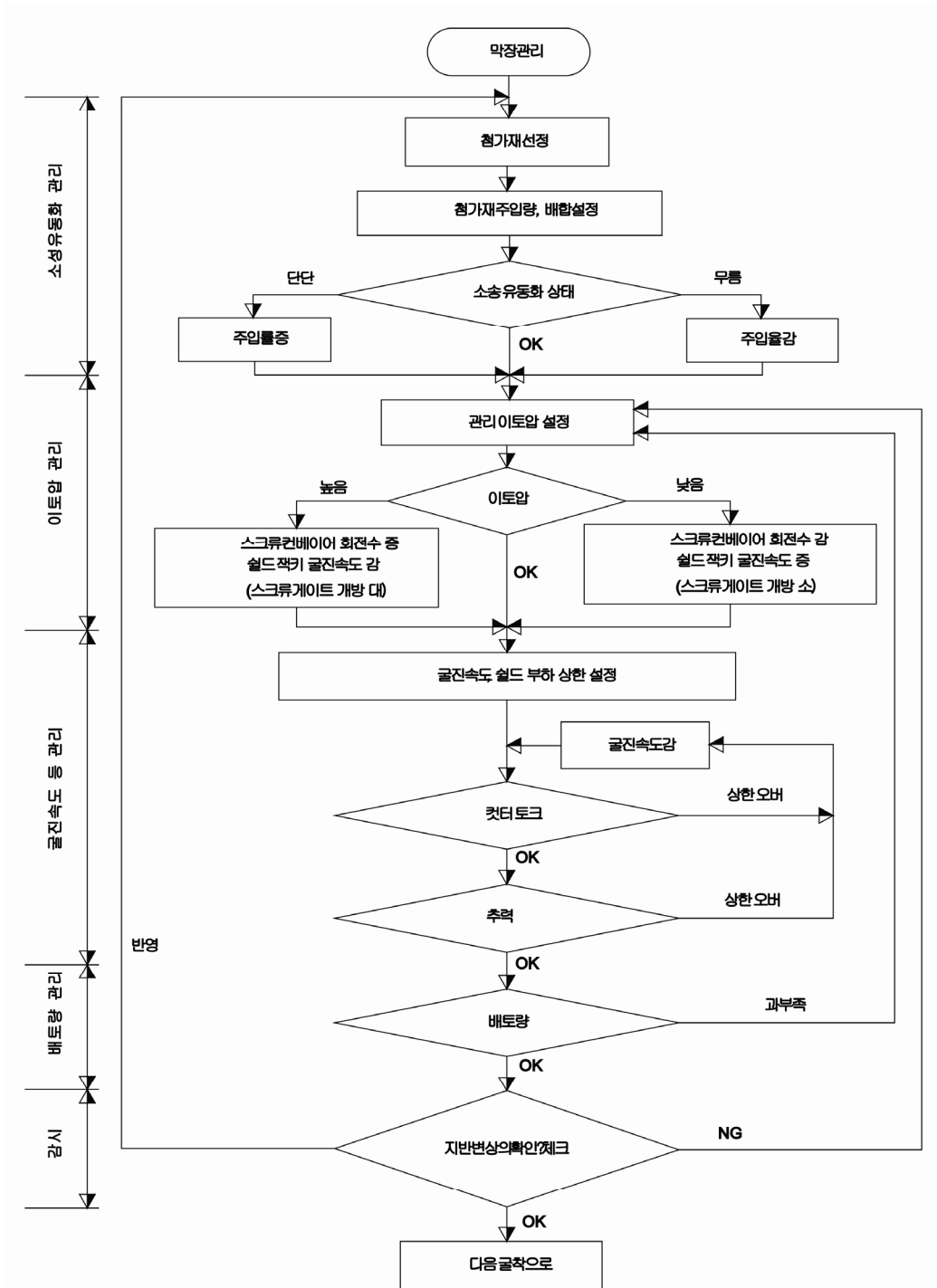


그림 5. 토압식 실드TBM의 굴진관리 흐름 예⁵⁾

3. 이토압 관리

토압식 실드TBM에 있어서 이토압 제어 시스템을 그림 6에 나타냈다. 이 공법에서 막장안정을 확보하기 위한 조건의 하나로 커터 챔버 내의 압력을 적정하게 유지할 필요가 있다. 일반적으로 압력부족은 막장붕괴의 위험성을, 과도한 압력은 지반응기나 분발 등의 위험성을 증가시킨다.

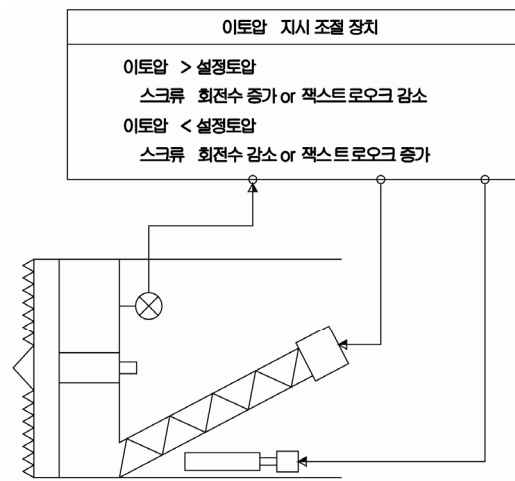


그림 6. 토압식 실드TBM의 이토압 조정시스템 (예)

3.1 이토압 지시조절장치

토압식 실드TBM에 있어서 이토압 조절방법으로는 이하와 같은 방법이 있다.

- ① 스크류컨베이어 회전수로 제어
- ② 실드TBM잭의 굴진속도로 제어
- ③ 양자의 조합으로 제어

3.2 막장 관리압력

이토압은 앞서 기술한 「1.2 이토압의 설정」에서 나타난 식(1)로 산출한 값을 이용하지만, 식에서 가장 설정하기 어려운 항목은 토압이다. 이론적으로는 정지토압을 적용하는 것이 이상적이지만, 이완토압을 기대할 수 있는 양호한 지반에서는 막장 관리압력이 너무 크게 되어 설비 효율이 매우 나빠지게 된다. 이를 위해 지반조건을 충분히 검토하여 상한치와 하한치(예를 들면, 상한치로는 정지토압, 하한치로는 주동토압을 이용하는 등)를 결정하여, 이 범위 내에서 관리압력을 설정하는 방법이 적용되는 경우가 많다. 이 경우는 굴착 토량이나 지반변형량 등의 데이터를 종합적으로 판단하여 관리압력을 증감시킨다⁵⁾.

4. 이토의 품질관리

4.1 소성유동성 관리

토압식 쉼트BIM에서는 이토의 소성유동성 관리가 가장 중요하다. 따라서 이토의 소성유동성을 쉼트BIM 굴진과 관련된 데이터를 통해 항상 파악하여 시공관리에 피드백할 필요가 있다

(1) 커터챔버 내의 토압

쉼트BIM의 격벽에는 토압계가 설치되어 있지만, 이 값이 크게 변동하거나, 변동이 나타나지 않는 경우, 계기의 고장은 별도로 하고, 소성유동성 부족과 이토의 압밀부착 가능성이 있다. 따라서 토압의 경시변화를 주목함으로써 소성유동성 관리를 간접적으로 할 수 있다.

(2) 쉼트BIM 부하

쉼트BIM 부하는 커터토크, 스크류컨베이어의 토크 등 기계부하의 경시변화를 통해 추정한다. 물론 이 경우 지반조건의 변화를 고려하여 관리할 필요가 있다.

(3) 스크류컨베이어 배토효율

이토의 소성유동성이 좋은 경우에는 스크류컨베이어 회전수로부터 산출된 배토량과 계산굴착토량의 상관성이 높다. 따라서 항상 양자의 상관성에 주목하여 관리할 필요가 있다.

(4) 배토성상의 계측

배토상황을 육안 또는 샘플링한 이토의 슬럼프시험을 통해 판정하는 방법이다. 슬럼프값에 의한 관리는 지반조건이나 이토의 갱내 운송방법에 따라서 다르지만, 사질토지반에서는 10~15cm 정도로 관리하는 경우가 많다.

상술한 바와 같이 소성유동성 관리는 시공데이터에 근거한 추정과 정성적 판단에 의한 것이 많다. 따라서 초기굴진이나 지반조건이 변화하는 구간에서는 조기에 지반변상 등의 관리와 병행하여 소성유동성 관리치(성상)를 결정할 필요가 있다.

4.2 첨가재 종류와 특징

이토의 소성유동성은 지반의 입도분포나 세립분 함유량에 따라 다르므로 유동성이 부족한 지반에서는 첨가재 주입이 필요하다.

(1) 첨가재의 기능과 특징

첨가재의 기능은 다음과 같다.

- ① 막장안정에 대한 지원(소성유동성 및 지수성 부여)이 가능할 것
- ② 커터비트 마모를 지연하는데 효과적일 것

- ③ 커터챔버내 이토의 압밀부착을 방지할 수 있을 것
- ④ 스크류 토크나 펌프의 부하저감이 가능할 것

따라서 첨가제 기능을 충분히 발휘하기 위해서 필요한 특성은 다음과 같다.

- ① 적당한 점성(소성유동성의 부여)
- ② 이토와의 혼합성(지수성의 부여)
- ③ 분리 저항성
- ④ 무공해성
- ⑤ 굴착토 처리의 용이성

(2) 첨가제 종류와 특성

일반적으로 이용되고 있는 첨가제는 광물계, 계면활성제계, 고흡수성 수지계, 수용성 고분자계의 4가지로 구분된다.

① 광물계

사용재료는 벤토나이트, 점토, 도토(도자기 제작에 사용되는 재료) 등의 천연광물이다. 벤토나이트, 점토 등과 이토를 교반하여 이토에 소성유동성이나 지수성을 부여할 수 있다.

첨가제의 농도나 주입량(사용량)은 입도분포에 근거하여 산정한다. 폭넓은 토질에 대응할 수 있기 때문에 사용실적이 많다. 다른 첨가제와 비교하여 주입플랜트가 대규모가 되기 쉽고, 굴착토 처리에 있어서는 산업폐기물로 처리하는 경우가 많다.

② 계면활성제계

사용재료는 계면활성제인 특수기포제이다. 이것에 고분자계·수용성 폴리머를 추가하여 사용하는 경우도 있다. 또한 소포(기포 제거)를 위한 약제도 있다.

특수기포제와 압축공기로 만들어진 기포와 굴착토를 교반하여 소성유동성이나 지수성을 부여함과 더불어 이토의 압밀부착을 방지할 수 있다. 첨가제에는 2종류의 표준배합이 있고, 주입량(기포혼합율)은 입도분포에 근거하여 산정한다. 기포가 혼입된 이토는 소포가 가능하므로, 굴착토 처리가 용이하다. 단, 이토의 반출방법으로 펌프운송을 계획하는 경우는 기포가 쿠션재가 되어 효율을 저하시키는 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

③ 고흡수성 수지계

사용재료는 고분자계·불용성 폴리머에 속하는 고흡수성 수지(자중의 수 백배의 물을 흡수하여 겔성상으로 되는 재료)이다. 이 재료는 흡수하더라도 물에 용해되지 않으므로 지하수에 의한 희석열화가 없고, 고수압 지반에서 분발방지 등에 큰 효과를 발휘한다.

그러나 염분농도가 높은 해수나 금속이온을 다량 포함한 지반 혹은 강알칼리(약액주입구간)이나 강산성 지반에 있어서는 흡수능력이 저하한다. 또한 자연분해에 장시간이 걸리기 때문에 염류산포를 통한 강제탈수나 고화처리를 검토할 필요가 있다.

④ 수용성 고분자계

사용재료는 물에 용해하여 점조성(찰지게 되는 성질)을 부여하는 고분자계·수용성 폴리머이다. CMC(natrium carboxy methyl cellulose)로 대표되는 셀룰로오스계를 비롯하여 다당류계, 아니온(anion)계 재료가 있다.

이 재료는 굴착토와 혼합되면 이토에 소성유동성이나 지수성을 부여함과 동시에 펌프 운송에 있어서 압송성 개선 효과를 나타낸다. 한편, 굴착토 처리에서는 소성유동성이 높기 때문에 문제가 되는 경우도 없지 않아 있지만, 최근에는 분해처리재를 산포하여 해겔화(un-gelatinize)할 수 있는 재료도 개발되어 있다.
첨가재 농도나 주입량은 광물계 첨가재를 참고하여 결정하는 경우도 많다.

5. 굴착토량 관리

토압식 실드TBM의 굴착토량 관리는 굴착토 반출방법에 따라 여러 계측방법이 적용되고 있다.

5.1 굴착토 반출설비

토압식 실드TBM의 굴착토 운반의 흐름을 그림 7에 나타냈다. 굴착토량의 파악은 굴진과 동시에 이루어져야만 한다. 따라서 굴착토량 관리는 반출설비에 적합한 계측방법을 적용할 필요가 있다.

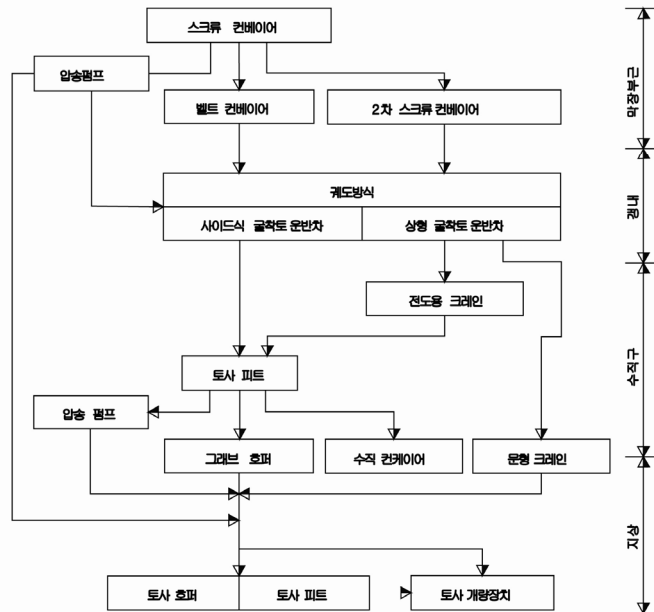


그림 7. 굴착토 반출설비⁴⁾

5.2 굴착토량의 계측방법

토압식 실드TBM의 굴착토량 계측방법을 표 2에 나타내었다.

계측시기는 후방계측과 연속계측으로 대별되고, 계측내용으로는 중량계측과 용적계측의 2종류가 있다. 중량계측은 광차중량 계측 이, 용적계측은 광차대수에 의한 것과 스크류컨베이어 회전수에 의한 것이 많이 적용되고 있다. 이수식 실드TBM의 계측과 같은 것으로는 배토관에 설치한 유량계와 밀도계에 의한 방법이 있다.

토압식 실드TBM에서는 지반의 토량변화율에 범위가 존재한다는 점과 첨가재의 종류와 첨가량, 또는 반출방법에 따라 굴착토의 겉보기 용적과 중량이 변화하기 때문에 정확하게 굴착토량을 파악하는 것은 어렵다. 따라서 굴착토량의 관리만으로 막장의 안정을 판단하는 것은 불가능하므로, 이토압 관리와 지반변위 등의 시공관리 데이터 등을 포함한 종합적인 관리가 요구된다⁹⁾.

표 2. 굴착토량 계측방법⁹⁾

형식	토 사 반 출 방 법	계 측 방 법	유 의 점	
후 방 계 측 식	광차 운반방식	궤도 적산하중 계측-로드셀	광차에 흙이 부착한 채로 적재하므로, 오차가 큼	
		인상 하중계측-로드셀	운반 시 벨트컨베이어와 광차에서 넘침	
		광차대수 용량계측	토사성상에 따라 변화함	
토사호퍼 계측식	토사호퍼의 기초기동에 하중계 설치	굴진 중은 잔토처리 할 수 없음		
막 장 부 계 측 형	벨트 컨베이어 식	중량식	벨트컨베이어 아래에 중량계를 설치하여 중량을 계측	토사, 성상 및 맥동에 의해 변동이 있음 역상은 유실됨
		초음파식	정속으로 움직이는 벨트컨베이어 위에 복수의 초음파계 측정점을 설치하여, 배토단면을 계측	센서 설치 수에 따라 측정치가 변함 벨트컨베이어 상에 토사 밀도의 변동이 있으면 오차가 발생
		레이저광식	정속으로 움직이는 벨트컨베이어 위에 복수의 레이저광계측점을 설치하여, 배토단면을 계측	정도 높은 단면형상을 계측할 수 있으나, 토질에 따라 반사성이 달라 오차가 발생함
	펌프압송식	슬러지 펌프의 피스톤 운동을 카운트	굴착토 성상에 따라 계측치에 오차가 발생함	
	스크류회전계측식	스크류 회전수를 카운트	스크류컨베이어 내 토사밀도의 변동에 따라 오차가 발생함	
	배 토 관 방 식	전자기 유량계식	배토구에 전형유량계를 설치하여 유량을 계측	배토의 유속이 작으면 정도가 악화됨 토질에 따라 오차가 큼
		초음파도플러 (Doppler)식	관외측에서 초음파를 발신하여 도플러효과에 의해 유량을 계측	배토 유속이 작으면 정도가 악화됨 펌프압송파동으로 변동이 큼
		비저항치 계측식	비저항치 계측물질을 흙이 혼입하여 전기적으로 유속을 계측	혼입물의 유동상황이 토사와 동일하지 않으면 오차가 크게 발생함
		롤러카운트식	배토구에 롤러회전계를 설치하여 회전수를 카운트	배토성상에 크게 좌우됨
		배토관토압 계측식	배토관 내에 2점의 압력센서를 설치하여 토압차를 계측하여 유량을 산출	압력센서 설치장소에 따라 오차가 발생함 토질변화에 따른 보정이 필요함

참고문헌

1. (社)地盤学会：シールド工法入門, 1992.
2. 奥園 清·白石和雄：泥水加圧シールド工法(2), トンネルと地下, Vol.13, No.5, pp.61~67, 1982.
3. 二村 敦：シールドトンネルの新技術(6), トンネルと地下, Vol.21, No.11, pp.67~74, 1990.
4. (社)地盤工学会：シールド工法の調査·設計から施工まで, 1997.
5. 西尾誠高·園田徹士:土質条件に適応した添加材の配合計画と管理及び実施例、第26回シールド工法講習会テキスト, (有)日本プロジェクトリサーチ, pp.37~68, 1985.
6. 泥水加圧シールド工法協会：泥水加圧シールド工法, 積算資料, 1993.
7. 気泡シールド工法協会：気泡シールド工法, 技術·積算資料, 1992.
8. 北川滋樹：シールドトンネルの新技術(17), トンネルと地下, Vol.22, No.10, pp.67~76, 1991.
9. (社)日本トンネル技術協会：密閉型シールドの施工管理, 1992.
10. 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(3), Vol.28 No.7 1997.