

제5강 실드TBM 굴진관리(5) 굴착토 관리

- 기계화시공기술위원회 실드공법연구그룹 -



김재영
(주)코템
대표이사 / 공학박사



채종길
서울특별시
안전총괄본부 /
공학박사

1. 머리말

실드공법에 있어서 이수식과 토압식에서는 기계와 설비계통 등의 차이가 있으나, 「굴착된 토사를 챔버 내에서 굴착(굴진)을 위해 최대한 이용함과 동시에 지상까지 운반하여 적정하게 처리한 후 반출한다」라는 점에서는 본질적으로 동일하다. 또한 실드 굴진관리 시의 굴착토 관리의 의미는 「안전한 굴착(막장안정)을 확보하면서 굴착토사를 원활하게 효율적으로 운송하여 합법적이고 환경친화적 형태로 반출한다」라고 하여도 과언이 아니다.

여기서는 이수식과 토압식으로 나누어 각각의 굴착토 관리에 대해서 기능과 설비 등을 설명하고자 한다.

2. 이수식 실드의 굴착토 관리

이수식 실드공법에서는 실드장비 선단에 장착된 격벽과 막장면과의 사이(챔버)를 가압한 이수로 충만시켜서 이수의 압력과 지반으로의 침투, 불투수막 형성에 의해 막장지반의 토수압과

균형을 확보하면서 지반을 굴착하고, 굴착토사를 이수와 함께 배출한다.

또한, 배출된 굴착토사를 포함한 이수는 입도, 비중, 점성 등을 조정하여 다시 챔버 내로 송출한다. 굴착토사는 송니수로 순환되어 다시 이용되는 부분과 처리후 현장 밖으로 반출되는 부분으로 구분할 수 있다.

따라서 이수식 실드에 있어서 굴착토의 관리에서는 이수의 운송·처리시스템의 관리가 중요하고 높은 비중치를 가지게 된다.

2.1 이수

2.1.1 이수의 요구품질

굴착토 관리에 있어서 이수의 요구품질에 대한 주요 사항을 막장의 안정성과 함께 나타내었다. 또한, 품질시험이나 측정방법에 대해서는 본 연재강좌 제2강(Vol.28, No.7)을 참조하기 바란다.

(1) 적절한 비중

비중이 작을수록 막장면의 안정성이 저하되지만, 한편 비중이 높을수록 운송 펌프의 부하가 증가하여 관의 폐색이나 이수처리 시에 곤란한 상황이 발생하기 쉽게 된다. 일반적으로 1.05~1.30 정도의 비중이 많이 이용되고 있다.

(2) 적절한 점도

점성이 작을수록 챔버 내에서의 굴착토사의 침전, 운송관 내에서의 토사분리, 막장지반에서의 이수침투성 증가를 불러오지만, 한편 점성이 높아질수록 비중과 마찬가지로 관의 폐색이나 이수처리시에 곤란한 상황이 발생하기 쉽다. 일반적으로 판넬점성에서 점성토층 25~30초 정도, 사질토층 30~40초 정도가 적정하다.

(3) 우수한 이막의 형성

막장에 형성되는 이수의 이막은 투과량의 측정에 의해 판단된다. 투과량이 적을수록 얇고 강고한 이수벽이 형성된다.

(4) 우수한 현탁분산성

운송 및 막장의 안정에 있어서 이수는 장시간 방치되어도 분리되지 않는 것이 바람직하다. 또한, 앞에서 언급한 (1)~(3)의 품질확보에도 연결된다.

2.1.2 첨가제

막장에서 운송되어 오는 굴착토사를 포함한 이수를 조정처리하여 얻은 점토성분만으로 상술한 요구품질을 확보할 수 없는 경우가 발생하면 굴진이 곤란하게 된다. 이러한 경우나 굴진을 개시한 때에는 여러 종류의 재료를 조합하여 이수를 만들어 보충할 필요가 있다.

(1) 배니수 중의 점성토

성상을 고려하여 사용되는 경우가 있다. 또한, 최대한 사용되는 것이 바람직하다.

(2) 벤토나이트

주 재료이거나 (1)의 보완재로서, 일반적으로 사용되는 몬모릴로나이트를 주성분으로 하는 점토광물로 비중 2.4~2.9, 겉보기 비중 0.8~1.2, 액성한계 330~600%이다. 특성으로서 친수성이 풍부하여 수중에서 5~10배로 팽창한다. 또한, 표면이 부(-)전위를 나타내고, 지반의 정(+)전위와 결합하여 우수한 이막을 발휘한다

(3) CMC(Carboxy Methyl Cellulose)

목재, 파이프를 화학적으로 처리한 고분자 플로서 물에 녹으면 높은 점성을 나타낸다. 주로 모래자갈층에서 사용되지만, 투과성의 저감이나 일니 방지를 위해서도 이용된다.

(4) 폴리머제

유기 폴리머류나 무기 폴리머류를 첨가하여 이용한다. 첨가된 이수는 1% 전후의 저농도로 적절한 점성을 얻을 수 있다 또한, 시멘트나 염분에 의한 열화도 적다.

(5) 물

지하수나 하천수의 사용에 있어서는 사전에 수질검사나 조합시험을 수행하여 불순물 제거나 pH조정이 필요하게 된다.

(6) 흙산(Humic Acid)소다, 탄산소다 등

비중이나 점성의 저하를 도모하고, 이수를 활성화하는 분산제로서 사용된다.

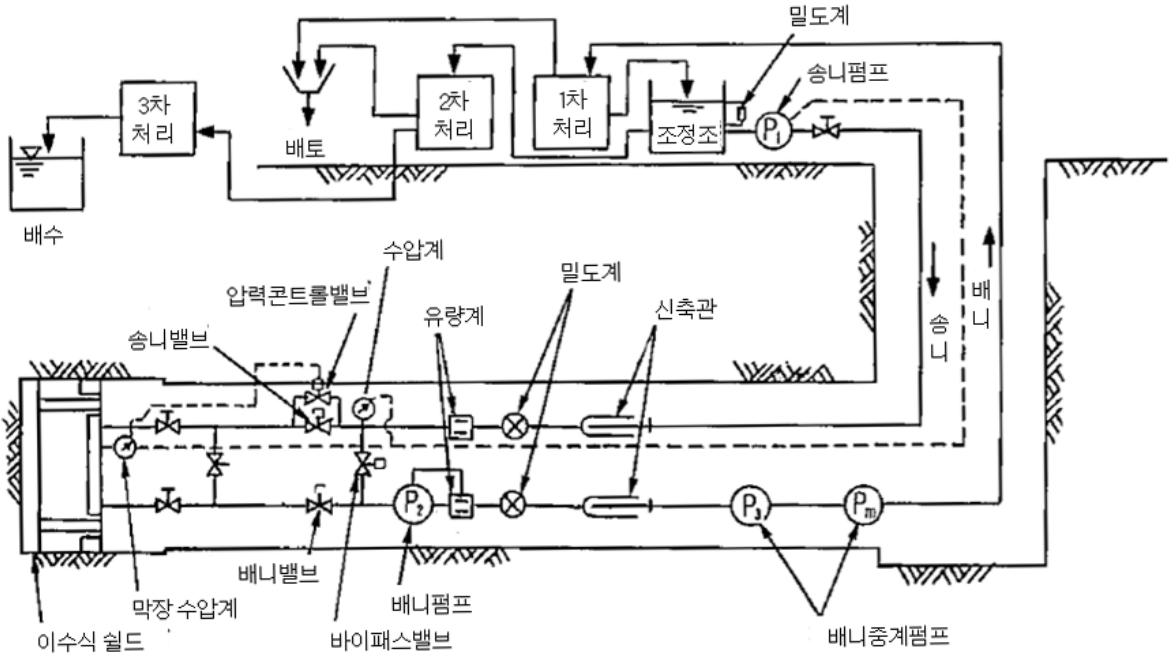
(7) 황유산(sulfuric acid), 인산(phosphoric acid) 등

뒤채움 주입재 등의 알칼리성 성분이 이수에 혼합된 경우에 열화방지를 위해 중화제로서 사용된다.

2.2 이수운송

2.2.1 이수운송시스템

이수운송 시스템은 이수를 막장에 운송하기 위한 송기능력,



〈그림 1〉 이수운송 시스템 개요도

굴착토사를 포함한 이수를 처리설비까지 보내는 배니기능 및 그 외의 기능(자갈 제거, 바이패스, 배관 연장 등)으로 구성된다 (그림 1).

(1) 챔버내 압력제어

송니펌프의 압력을 조정하여 수행한다.

(2) 송배니관의 연장

실드 굴진에 따라 수행한다.

(3) 중계펌프 설치

송니관은 조정된 이수가 흐르기 때문에 굴진에 따라 배관연장이 길어져도 압송력은 거의 저하하지 않으나, 배니관은 굴착토사를 이수처리설비까지 보내기 때문에 연장이 길어지면 압송능력의 손실이 급격하게 발생한다. 이로 인해 배니관에는 도중에 중계펌프를 설치하여 배니압력(유량)의 저하를 방지해야만 한다.

(4) 자갈제거

배니관에서 압송이 불가능한 자갈을 처리한 후 운송한다.

(5) 바이패스 경로 설정

주로 자갈질 굴착토나 연약점성토층의 굴진 시에는 굴착토사에 의해 배니관내 폐쇄이 발생할 가능성이 있다. 이 때, 막장에 과도한 이수가 보내지는 등 이수운송 밸런스가 무너져 막장지반의 붕괴나 주변지반의 융기, 침하로 연결될 우려가 있다. 그 방지책으로서 막장에 이수를 보내지 않는 바이패스 운전을 할 수 있는 설비가 필요하게 된다.

2.2.2 이수운송설비

(1) 슬러리 펌프

• 송니펌프

이수처리설비(조정조)로부터 막장에 이수를 보내는 정치식 펌프로, 일반적으로 지상에 설치된다.

- 배니펌프
막장에서 이수처리설비로 이수를 배출하기 위한 회전수 가변식 펌프로서, 일반적으로 쉴드장비의 후방대차에 설치된다.
- 중계펌프
쉴드의 굴진연장 증가에 따라 배니펌프의 압력손실을 보충하기 위한 정치식 정속회전 펌프로서 일반적으로 200~300m 정도마다 설치된다.
- 수직구 하부 펌프
배니수를 수직구 아래에서 지상의 이수처리설비까지 밀어올리기 위한 회전수 가변식 펌프이다.

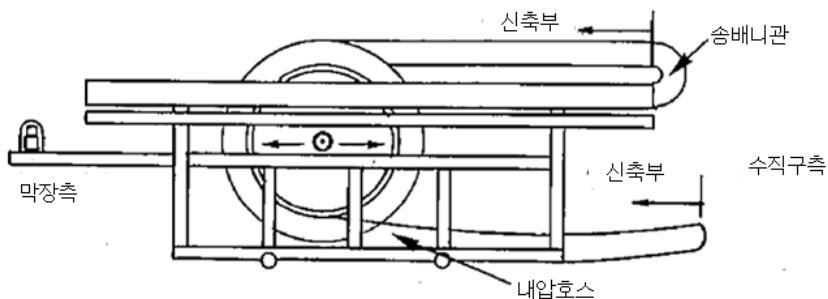
(2) 배관설비

- 송니관
일반적으로 배니관보다 50mm정도 큰 관을 이용하여 압력손실의 저감을 도모한다. 단, 쉴드장비 부근, 후방대차부, 밸브설치부, 신축관부 등에서는 배니관과 동일한 직경이 사용되는 경우가 있다.
- 배니관
운송되는 자갈 직경, 토립자의 침강한계속도, 굴진속도, 쉴드장비의 외경 등에 따라 직경이 정해진다. 모래자갈 지반에서는 200mm이상을 필요로 하는 경우가 많다.
- 밸브
이수의 흐름을 조작하기 위한 밸브 변경 장치로 쉴드장비 후방대차에 설치된다.

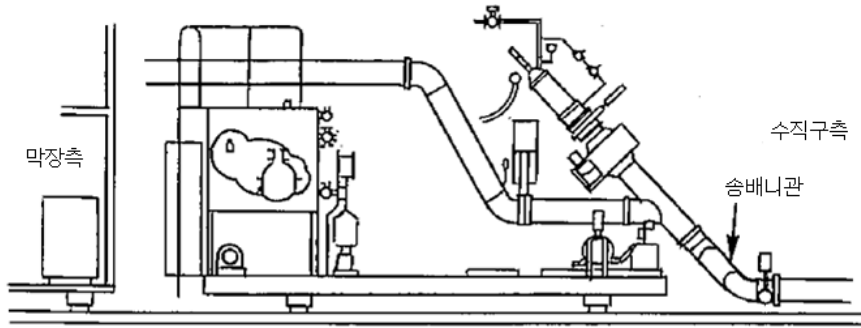
- 신축관 장치
쉴드의 굴진에 따라 연장하는 호스 드럼식 장치로 늘어나는 상태로 배관을 연장한다(그림 2).
- 플렌저 파이프
배관연장 시에 이수가 관내에서부터 누수되지 않도록 하는 장치로서 신축관의 후방에 설치된다. 이 장치에 의해 이수의 비산 및 손실을 억제하는데 도움이 되고, 이수에 의해 갱내가 오염되는 상황이 감소한다(그림 3).

(3) 계측장치

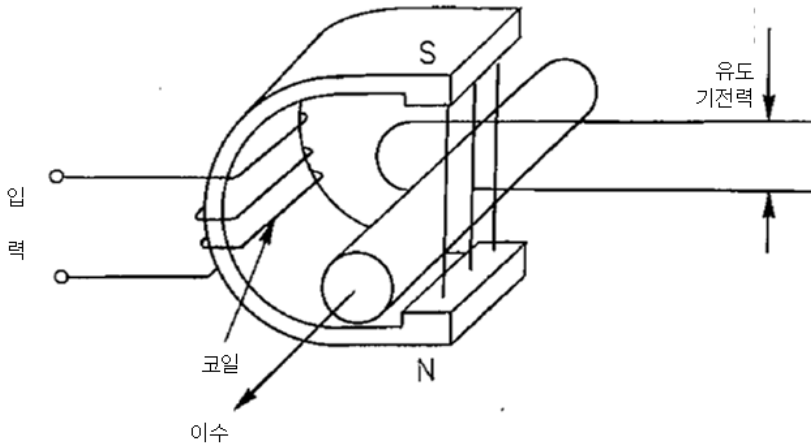
- 전자유량계
유체에 작용하는 자력에 의해 발생하는 유도기전력을 유량으로 변환한다(그림 4).
- 초음파 토플러 유량계
유체에 포함된 고형물이나 기포에 맞는 초음파 도플러 효과에 의한 주파수 변화량을 유량으로 변환한다(그림 5).
- 압력
금속의 탄성을 Hook's 법칙 범위 내에서 압력계측에 사용하여 변위로 변환하여 측정한다. Bourdon관, Diaphragm식, Bellows식 등이 있다.
- 밀도
- γ 선 밀도계
관로에 γ 선을 방사하여 그 투과에 의한 흡수특성을 이용하여 투과 γ 선 강도를 측정, 전자회로를 거쳐 전



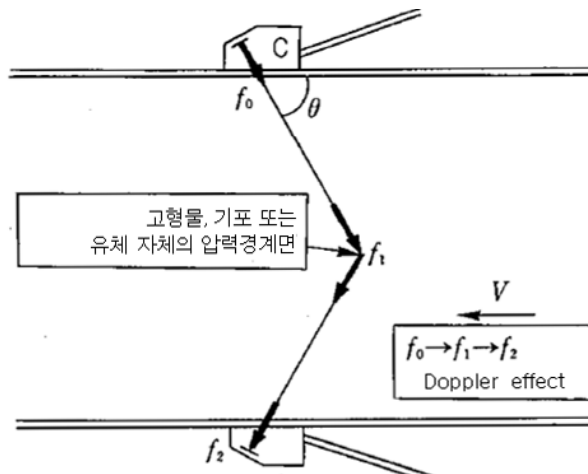
〈그림 2〉 신축관 장치



〈그림 3〉 Plunger 밸브



〈그림 4〉 전자유량계의 원리



〈그림 5〉 초음파 도플러 유량계의 원리

류로 변환하여 밀도를 구한다(그림 6).

- 중력식 밀도계

이수가 흐르는 관로의 일부(계측관)에서 중량을 계속하고, 환산을 통해 밀도를 구한다.

- 압력식 밀도계

관로의 내부에 교차하는 부분을 설치하여 그 전후에 있어서 유체의 압력차로부터 밀도를 구한다.

재이용 가능한 송니수로의 조정기능, 방류 가능한 폐수로의 처리기능이다(그림 7).

(1) 1차 처리

굴착토사를 포함한 배니수 중에 자갈, 모래, 실트, 점토 덩어리 등 74 μ m 이상의 입자를 분리하여 회수한다.

(2) 송니수 조정

1차 처리의 사이클론 오버 이수(회수되지 않은 이수)의 비중, 점성을 조정하여 송니수로 한다.

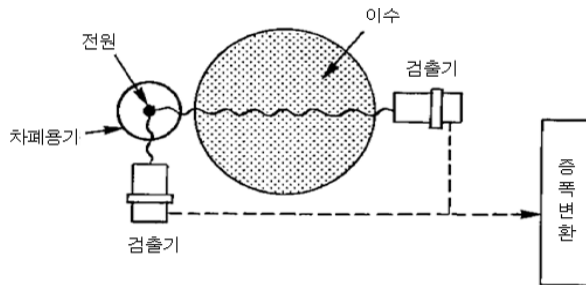
2.3 이수처리

2.3.1 이수처리시스템

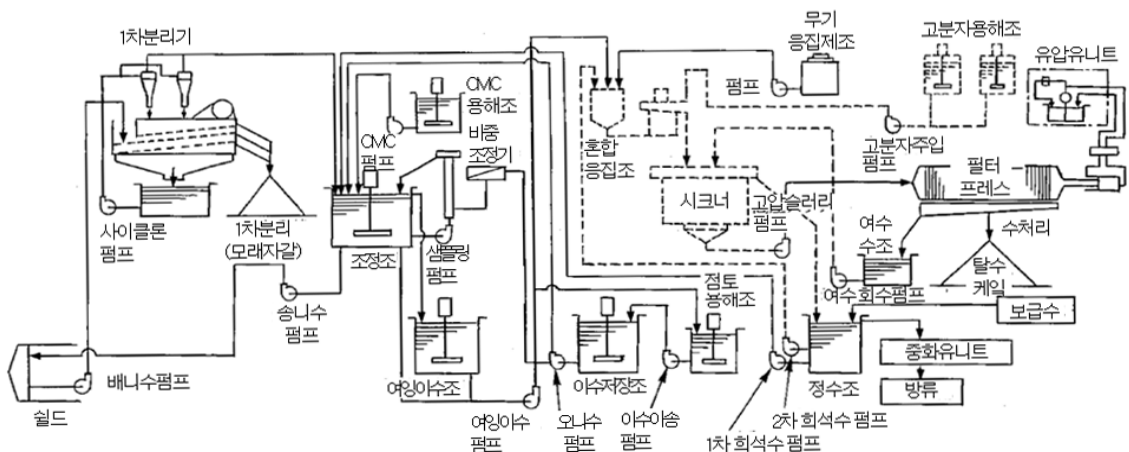
이수처리시스템은 반출, 운반가능한 토사의 분리기능, 순환,

(3) 2차 처리

송니수의 조정 후 발생하는 여잉이수를 응집(탁수처리), 탈수



<그림 6> γ 선 밀도계의 원리



<그림 7> 이수처리 시스템 개요도

하여 운반, 반출 가능한 상태로 처리한다.

(4) 3차 처리

2차 처리(응집, 탈수)에 의해 발생하는 여과수를 방류 가능한 상태로 처리한다.

2.3.2 이수처리설비

(1) 1차처리설비

- 토사 진동체 등
기계의 진동과 체로 주로 입경 5mm이상의 자갈, 고결 점토를 분류한다.
- 습식 사이클론 등
원심력을 이용한 사이클론을 이용하여 입경 74μm전후의 토립자를 분류한다.
- 조합 흐름 예
토사 진동체와 습식 사이클론을 조합한 흐름 예를 <그림 8>에 나타내었다.

(2) 2차 처리설비

• 응집분리설비(탁수처리설비)

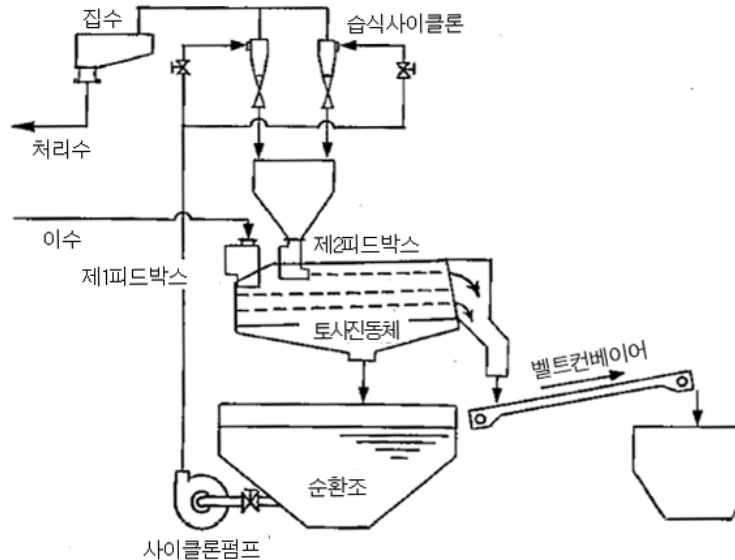
여잉이수를 pH조정 후, 응집침전조에 교반하면서 응집제를 첨가하여 입자간을 결합시켜(블록(단위)의 형성), 침전을 촉진한다. 응집제에는 무기계(PAC, Poly Aluminum Chloride 등)와 고분자계(알카리산 소다 등)가 있고, 두가지를 병용하는 경우도 많다. 무기계는 토립자의 표면전위저하작용에 의해, 고분자계는 그 선상(線上)고분자의 가교작용에 의해 각각 블록을 형성한다(그림 9).

• 탈수설비

응집한 블록의 간극수 대부분을 탈수하고, 반출운반 가능한 케이크형상(함수율 40~60% 정도)으로 한다.

- 가압탈수방식(필터프레스)

펌프나 컴프레셔 등을 이용하여 블록에 압력을 가하여 여과필터(부직포 등)를 통해서 탈수한다. 재래형은 원액압송에 의해 가압력(6~8kgf/m²)뿐이었지만, 최근에는 가압력은 동일하지만 필터 사이에 내장된 Diaphragm에 공기를 주입하는 압착공정을 더한 것



<그림 8> 토사진동체와 습식 사이클론 조합 흐름예

과, 가압력을 40kg/㎡정도로 하는 고압식이 이용되어 오고 있다.

- 진공탈수방식

진공방수로에 의해 여과필터를 펴서 회전 드럼 내에 부압을 가하여 그 압력차를 이용하여 여과탈수를 수행한다.

- 원심분리방식

원액을 회전체 내에 넣어 고속회전시켜 원심력에 의해 케이크는 벽면에 누적되고, 분리액과 케이크는 각각의 배관을 통해 분리 배출된다.

(3) 3차 처리설비

• pH 조정장치

분급, 응집, 탈수에 의해 발생하는 폐수나 갱내로부터의 오폐수는 일반적으로 알칼리성을 나타내는 경우가 많으므로, 황유산(sulfuric acid) 등에 의해 중화하여 방류 쪽 수질기준에 따라 pH를 조정한 후에 방류할 필요가 있다.

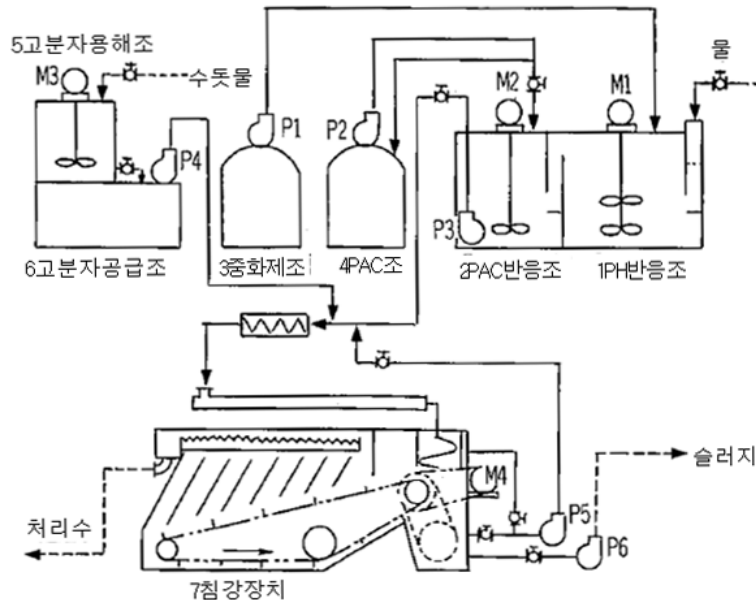
2.4 자갈처리

파이프나 펌프의 폐색 등 배운송의 불능을 초래할 가능성이 있는 큰 입경의 자갈 등은 별도 처리된다. 그 설비는 자갈처리 또는 파쇄에 충분한 능력을 가지고, 자갈을 확실하게 처리할 수 있는 것이어야만 한다. <그림 10>에 자갈처리장치의 분류를 토압식에 관한 것을 더하여 나타냈다.

3. 토압식 실드에 있어서 굴착토 관리

토압식 실드공법에서는 굴착토사를 챔버내에 충전하여 배토량을 억제하면서 막장의 안정을 도모하고, 그 토압을 유지하면서 연속배토, 굴진한다. 그 중에서 굴착토의 관리로서 주요한 사항은 이하의 3항목으로 나누어진다.

- 첨가재의 주입(막장의 안정과 굴착토의 원활한 배출)
- 운반(막장으로부터 갱내를 경유하여 지상까지)
- 개량처리(현장 외로 반출가능한 굴착토의 성상확보)



<그림 9> 응집분리 흐름 예



〈그림 10〉 자갈처리장치

3.1 가니재 주입

3.1.1 이수 요구품질

(1) 적절한 유동성

막장의 유연한 압력관리와 굴착토사의 원활한 운송을 위해서 적절한 유동성이 필요하다.

(2) 강한 분리저항성

침강에 의한 토압의 유지곤란이나 토사의 폐색을 방지하기 위해서 강한 분리저항성이 필요하다.

(3) 높은 지수성

토사 전체가 소성유동체로서 외압에 저항하고, 압력을 유지할 수 있기 위해서 높은 지수성이 필요하다.

3.1.2 가니재

가니재라는 것은 상술한 품질을 확보할 수 있도록 굴착토사에 첨가되는 소성유동화제이다.

(1) 가니재 성능

가니재에 요구되는 성능은 이하와 같다.

- 고밀도로 유동성이 있고, 재료분리나 침강이 없다.
- 공극을 채우는 효과가 있다.
- 자경성(自硬性)이 없고, 경시변화가 적고 안정성이 있다.
- 굴착토사를 오염시키지 않는다.
- 취급이 용이하고, 높은 안전성을 지닌다.
- 경제적이고 공정시에도 안정한 공급을 할 수 있다.

(2) 가니재 기능

가니재의 주입에 의해 막장과 지반 중의 자유수를 배제하고, 토립자간 간극을 메워 지수성을 향상시킴과 동시에 굴착토의 입도분포를 개선하여 유동성을 확보한다. 또한, 커터비트의 마모 지연, 쉐드장비 등으로의 굴착토사의 고착방지, 잭추진 저감 등도 도모할 수 있다.

3.1.3 첨가재

첨가재라는 것은 가니재의 소재로서, 일반적으로 물과 혼합하여 가니재를 만드는 것이다.

(1) 첨가재 분류와 사용목적

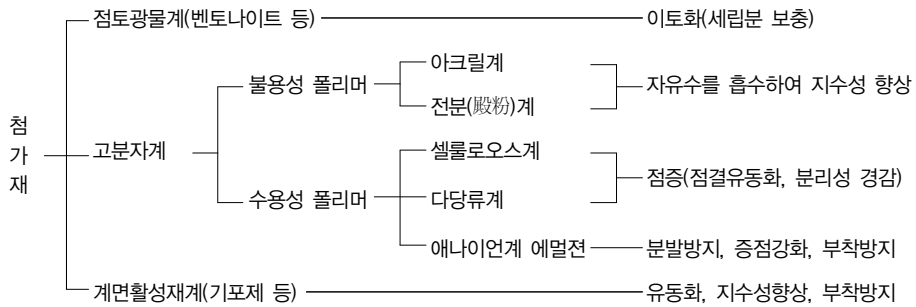
첨가재의 분류와 사용목적을 〈그림 11〉에 나타내었다.

(2) 토사의 유동화 기능(첨가제별)

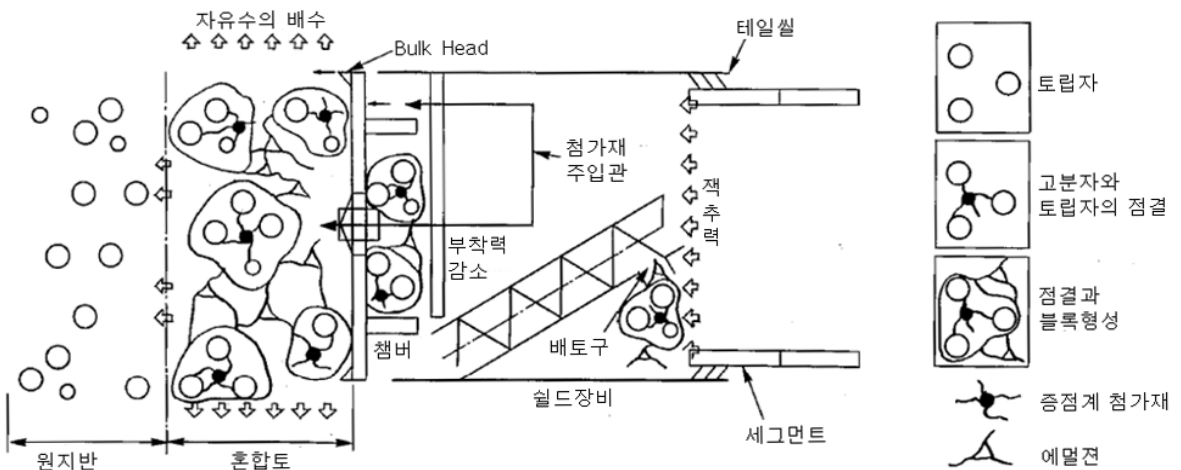
- 점토광물계
벤토나이트 등의 점토광물이 다량 혼합된 가니재를 주입하여 토사에 내부마찰각이 작은 미세입자를 보충하고, 토압으로 변형이나 파괴를 유발시켜 유동화를 도모한다.
- 불용성 폴리머(흡수성수지)
자중의 수백배에 해당하는 수분을 흡수하여 지수성을 향상시키고 토립자 사이의 간극을 메워 베어링효과를 높여 유동화를 도모한다.
- 셀룰로오스계, 다당류계
토사 중의 자유수를 밀어내 치환하고, 증점성에 의해 토립자간을 점결시켜(연결함으로써) 내부마찰각을 저감

시켜 유동화를 도모한다.

- 애나이언계(Anionic) 에멀전
토사 중의 수분과 토립자와의 사이에 블록을 형성하여 점착연결시켜서 내부마찰각을 저감하여 유동화를 도모한다.
- 계면활성제계
토사 중의 자유수를 밀어내어 치환하고, 기포의 베어링 효과에 의해 유동화를 도모한다.
- 첨가제의 복합사용
최근에는 첨가제의 특성과 굴착지반의 성상에 비추어 단독으로 사용하기보다 복합사용으로 상호 효과발현을 한층 더 강화하는 예가 많다. <그림 12>에 셀룰로오스계


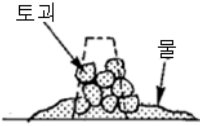
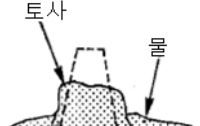
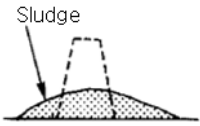


<그림 11> 첨가제 분류와 사용목적



<그림 12> 첨가제의 복합사용 시의 상호작용 메커니즘

〈표 1〉 이토 성상별 처리방법

이상상태		처리방법
고결	 <p>슬럼프, 0~5cm</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 가니재의 주입량을 증가시킨다 • 첨가재의 배합량을 저감시킨다
반고체	 <p>토괴 물</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 굴진배토를 중단하고 챔버내의 토사균질화를 위해 재굴진전에 수분간 커터를 회전시킨다. • 첨가재의 배합량을 증가시키고 액체 점토의 상승을 피한다.
반고체	 <p>토사 물</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 첨가재의 배합량을 증가시킨다. • 굴착건사량을 체크하여 정상이라면 가니재의 주입량을 저감시키고 과굴착의 경우는 토압을 상승시킨다.
액체	 <p>Sludge</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착건사량을 체크하고 정상이라면 가니재의 주입량을 감소시키고 과굴착의 경우는 토압을 상승시킨다. • 첨가재의 배합량을 증가시키고 이후 개선되지 않는 경우는 첨가재를 변경한다.

와 애나이언계 에멀전을 복합사용한 경우의 토립자와 각 첨가재 입자의 상호작용의 메커니즘을 나타냈다.

3.1.4 이토의 품질판단과 이상시의 대처

(1) 굴착토사의 성상확인

이토의 품질은 하나의 눈대중으로서 지상에 배출된 굴착토사의 성상에 의해 판단된다. 성상확인인 정량적인 방법으로는 콘크리트 슬럼프시험을 적용하는 예가 많고, 관리치는 일반적으로 5~12cm 정도로 되어 있다.

(2) 이상시의 대처방법

이토(배토)의 성상별 대처방법을 〈표 1〉에 나타냈다.

3.2 굴착토사의 운송

챔버내 굴착토사는 실드장비에 장착된 스크류컨베이어로부

터 배출되어 갱내에서부터 갱구를 경유하여 지상까지 운송된다.

과거 궤도설비(레일, 배터리카)와 먹카에 의해 갱구까지 운반하여, 문형크레인이나 수직컨베이어 등을 이용하여 지상으로 반출하는 방법이 일반적이었다. 그러나 최근에는 기계화나 가니재의 품질향상, 환경개선 등의 개발이 진행하여 파이프 운송에 의해 지상까지 운반하는 방법이 많이 적용되고 있다 여기에서는 그 중에서도 스크류컨베이어와 펌프압송방식에 대해 설명하고자 한다.

3.2.1 스크류컨베이어의 형상

스크류컨베이어는 그 내부에 나선형으로 토사를 충전시켜 분발방지와 지수성을 확보한다. 그리고 회전 수를 변화함으로써 굴착토량의 제어와 막장토압 조정을 수행한다.

(1) 축식 스크류

스크류 날개의 중앙부에 축이 있다. 범용형으로 지수성도 높

다(그림 13).

(2) 리본식 스크류

스크류 날개의 중앙부가 비어있는 형태이다. 호박돌 직경에 따라 스크류 간격을 결정할 수가 있는 반면에 지수성이 나쁘다(그림 13).

3.2.2 스크류컨베이어의 구동방식

(1) 주변구동방식

배토구 부근에서 날개의 외주 드럼을 회전시키는 형태이다. 정면에서부터 배토가 가능하므로 사력이나 점성토의 굴착에 적합하고, 2차 스크류 등의 장착도 용이하다. 스크류를 직접 회전시킬 수 없으므로 토사 운송력은 약하다(그림 14).

(2) 축구동방식

축 부착 스크류는 후방부에서 축을 회전시키는 방식이다. 밀폐성이 좋고 고장이 적다(그림 14).

3.3 굴착토사의 개량처리

토압식 실드공법에서는 가니재의 작용으로 함수율 및 유동성

이 높은 굴착토사가 발생하는 경우가 많다. 일반적으로 공사 현장 내에서 중간처리로서 굴착토사를 개량하여 지지체의 허기를 받은 전문업자에게 운반, 처분을 위탁하여 수행하는 경우가 많다.

굴착토사의 현장 내에서의 개량방법은 물리적 방법으로서 물 빼기, 자연건조, 강제탈수가 있고, 화학적 방법으로서 시멘트계 개량, 석회계 개량, 고분자계 개량이 있다.

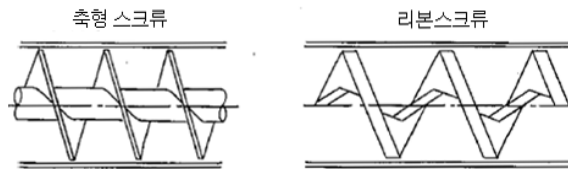
이 중에 강제탈수는 이수식 실드공법에 있어서 2차 처리(가압탈수방식 등)이 해당한다.

토압식 실드공법에서는 화학적 방법이 적용되고 있고, 어느 경우에도 토사 중에 수분과 화학재료와의 반응에 의해 함수비를 저하시켜 개량토로 하는 점에서는 동일하다. 설비의 규모나 형식에도 큰 차이는 없다.

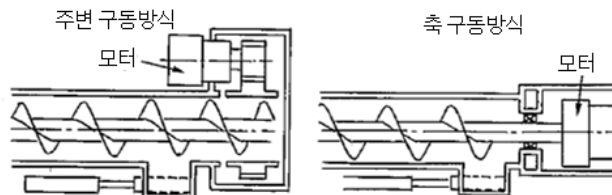
그러나 시멘트계나 석회계는 개량강도가 높고 저렴하지만, 알칼리성 개량토가 된다. 한편, 고분자계는 신속성이 있고, 개량토도 거의 중성이지만, 고가이면서 개량효과가 다소 떨어지고 운반시에 재유동화할 위험도 있다.

따라서 상호의 장점을 강화하여 단점을 보완하는 목적으로 개량제를 복합적으로 사용하는 사례를 많이 접할 수 있다.

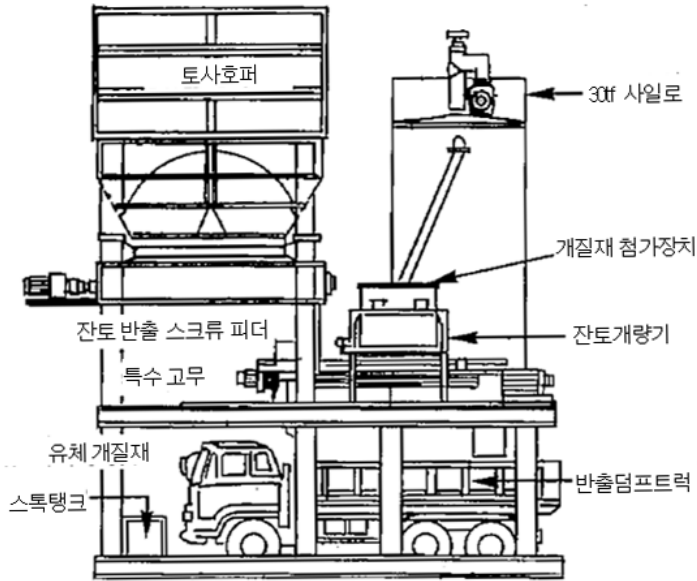
또한, 최근에는 토사압송의 적용과 도시부 공사부지의 제한으로 인해 개량설비의 기계화 및 컴팩트화를 꾀하고 있으며, <그림 15>에 그 예를 나타내었다.



<그림 13> 스크류 형상



<그림 14> 구동방식



〈그림 15〉 굴착토사 개량설비 예

4. 맺음말

굴착토사는 막장의 안정이나 운송과정에서는 유동성과 점성이 요구되고, 처리나 반출과정에서는 탈수고화하지 않으면 안된다. 결국 굴착토사의 성상을 유연하게 변화시켜 쉴드공법에 의한 터널굴착이 안전하고 원활하게 수행되고 있다. 또한, 그 배경에는 지속적으로 개발되고 있는 다양한 기계와 설비, 재료 등의 활용이 있고, 현재도 계속 발전하고 있다.

이울러 쓰임이 변하면 제품도 변하듯이 굴착토사의 질과 양을 리얼타임으로 파악하며 굴진에 최대한 유효하게 피드백하고, 또한 굴착토사를 원지반 상태에 가까운 형태로 하거나 또는 지

구환경에 보다 좋은 형태로써 자연계로 귀환시키는 이 두 가지의 명제에 고민을 반복하면서 인간의 지혜와 힘을 모을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)同解説,
2. 厚生省生活衛生局水道環境部産業廃棄物対策室：建設廃棄物処理ガイドライン,
3. 日本廃棄物対策協会：建設廃棄物の適正処理に関する調査研究,
4. 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29巻1号, 1998.