

제7강 셸드TBM 굴진관리(7) 뒤채움주입

- 기계화시공위원회 셸드TBM 공법연구그룹 -



김재영
㈜코템 대표이사



채종길
서울특별시
안전총괄본부

1. 머리말

셸드TBM공법은 막장 안정성의 확보와 테일보이드의 뒤채움을 얼마나 적절하게 수행하는 점에 있어서 본질적인 문제를 가지고 있다. 그리고 당초에는 터널굴착에 함께 약간의 지표침하는 주요 원인으로서 막장의 안정관리와의 관계가 깊은 것으로 판단되었다. 본 연재강좌의 제2, 3회에 이수식과 토압식의 막장 안정관리에서도 서술하였듯이 최근과 같이 시공조건이 열악해지는 요즘은 특히 신중한 관리가 요구되고 있다.

한편, 최근 지표침하량을 엄격하게 규제하는 경우가 증가하면서 오히려 테일보이드의 적절한 뒤채움이 중요한 대책이 될 수 있는 점이 인식되고 있다. 지금까지도 뒤채움재료의 개발이나 주입시기, 주입관리 등이 재검토되고 있으며 기술혁신을 목표로 해야 하는 분야로 되어 있다. 여기서는 뒤채움주입에 대해서 서술하고자 한다.

2. 뒤채움주입의 설계

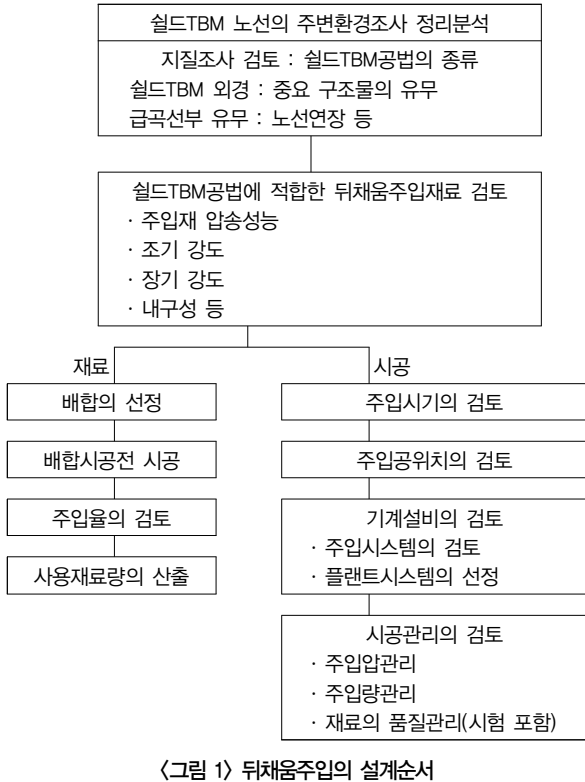
셸드TBM공법에 있어서 뒤채움주입은 그림 1에 나타내듯이 조건에 적합한 뒤채움재료, 시공방법에 대해서 검토하여 결정한다.

2.1 목적

세그먼트 조립완료후 셸드TBM을 굴진하면 테일플레이트두께, 테일클리어런스 및 여굴 등에 의해 테일보이드가 발생한다. 이 공극을 그대로 방치하면 응력해방이 진행되고, 주변지반의 변형이 발생하여 그 결과 지표침하나 주변 구조물의 침하, 경사, 손상 등 악영향이 발생한다. 뒤채움주입의 첫 번째 목적은 이러한 지반변형을 미연에 방지하는 것이지만 그 외에도 중요한 목적이 있다. 그 목적을 정리하면 다음과 같다.

- ① 터널주변의 지반이완을 억제하고, 지반변형을 방지한다.
- ② 세그먼트르 조기에 안정시키고, 책추력이 지반에 원활하

제7강. 뒤택음주입



〈그림 1〉 뒤택음주입의 설계순서

게 전달되도록 한다.

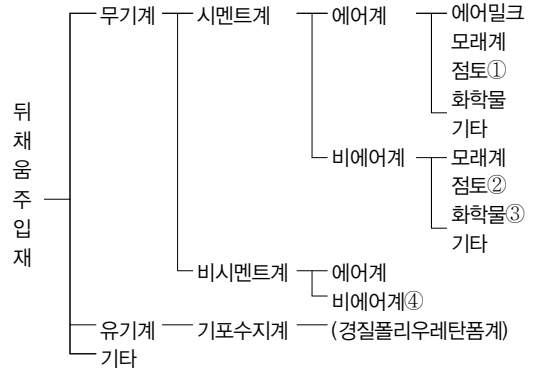
- ③ 세그먼트에 작용하는 토압의 균등화를 도모할 수 있고, 세그먼트에 발생하는 응력이나 변형을 저감할 수 있고 쉴드의 방향제어를 편리하게 한다.
- ④ 누수방지나 압기공법을 적용시에는 누기방지에 유효한 층을 형성한다.

2.2 뒤택음재료

2.2.1 요구품질

뒤택음주입은 테일보이드에 신속, 확실하게 충전시켜야만 한다. 이 때문에 뒤택음재료에 요구되는 성질로서는 다음과 같다.

- ① 충전성이 우수하고, 막장애의 역류나 테일예의 누출을 방



〈그림 2〉 사용재료에 의한 분류

지할 수 있어야 한다.

- ② 유동성이 좋고, 브리징이 적어야 한다.
- ③ 조기에 균일하게 해당 지반의 강도이상이 얻어져야 한다.
- ④ 재료분리가 적고, 장거리 압송이 가능하여야 한다.
- ⑤ 주입시에 지하수에 의한 희석이 적어야 한다.
- ⑥ 경화후 체적감소가 적어야 하고 투수성이 작아야 한다.
- ⑦ 무공해로서 경제적이어야 한다.

2.2.2 사용재료에 의한 분류

뒤택음주입에 사용하는 재료는 여러 가지 관점으로 분류할 수 있지만 사용재료의 성상에 따라 그림 2와 같이 분류된다. 이 중 ①~④의 4종류가 많이 이용되고 있다.

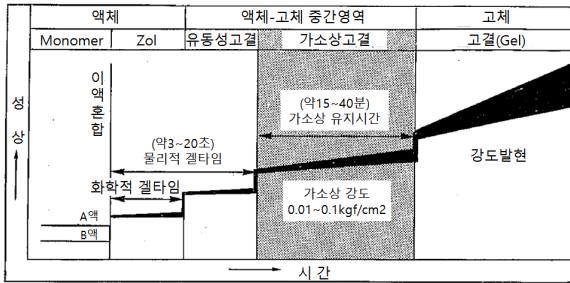
2.2.3 주입상태에 의한 분류

뒤택음재료를 주입시의 성상, 즉 공극내(테일보이드)에서 주입재가 충전되는 과정의 성상으로부터 표 1과 같이 분류되고 사용비율을 나타내었다.

일본 터널기술협회“뒤택음주입”에 관한 실태조사보고서(이하 “JTA양케이트”라고 칭한다)에서 정리된 것으로 1993년, 이 액성, 물유리계의 순결고결형과 가소상형을 합치면 90%를 초과하고 있다. 이 가소상 뒤택음재료는 뒤택음주입용으로 개발된

<표 1> 뒤채움 주입상태 분류

구분		건수	비율(%)	
일액형	현탁액형	5	1.3	
이액형	물유리계	고결형	완결고결형 20 순결고결형 159	5.2 41.2
		알미늄계	가소상형	194
	알미늄계	가소상형	3	0.8
	기타		5	1.3



<그림 3> 가소상 뒤채움재의 겔화와 경화과정의 특성

재료로서 정지한 상태에서는 자립(고체적 성질)을 하고 있지만 가압주입하면 용이하게 유동(액체적 성질)화하는 재료를 공동 내에 순차충진하는 것이다. 경화발현재로서는 시멘트계와 슬래그-석회계가 있으며 최근 사용실적은 증가하고 있다.

그림 3에 가소상 뒤채움주입재의 특성을 나타내었다.

3. 뒤채움주입방법

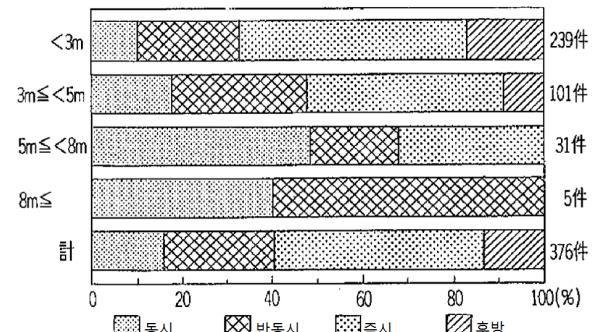
3.1 주입시기

3.1.1 1차 주입

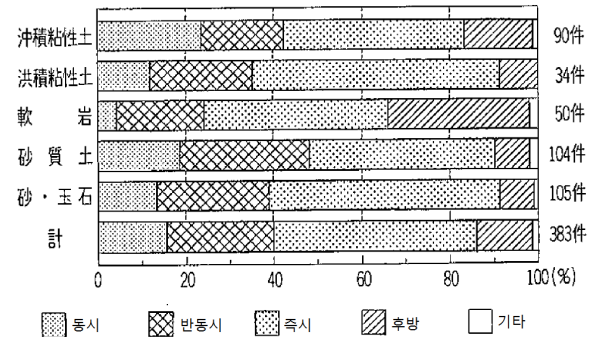
1차 주입은 주입시기에 따라 표 2와 같이 분류된다. 과거에는 거의 즉시주입이나 후방주입이 수행되었으나 층적층 등에 있어서 지반변형의 원인이 되기 때문에 최근에는 동시주입이나 반동시주입의 적용이 많아지고 있다. 동시주입은 쉴드TBM 장비내에서 직접 테일보이드에 주입하는 방식 외에 세그먼트의 그라우

<표 2> 주입시기의 분류

분 류	방 법
A : 동시주입	테일보이드의 발생과 뒤채움주입을 동시에 수행하는 방법
B : 반동시주입	세그먼트에 설치된 그라우티홀이 테일실에서 이탈함과 동시에 그 그라우트홀에서 뒤채움을 수행하는 방법
C : 즉시주입	1링 굴진완료마다 뒤채움주입을 수행하는 방법
D : 후방주입	수 링 후방의 그라우트홀에서 뒤채움주입을 수행하는 방법



<그림 4> 뒤채움주입시기와 쉴드TBM 외경



<그림 5> 막장의 대표적 토질과 주입시기

트홀을 2개소 이용하여 동시주입하는 방식과 그라우트홀을 세그먼트의 중앙이외에 설치함으로써 굴진에 맞춰 동시주입하는 방식이다.

JTA양케이트에서 정리한 쉴드TBM 외경에 대한 뒤채움주입시기와 토질별 주입시기를 그림 4, 5에 나타내었다. 쉴드TBM 외

경과의 관계에서는 외경이 커질수록 동시주입의 비율이 높으며, 외경 5m 이상에서는 동시주입이 약 70%를 차지하고 있다. 또한 토질과의 관계에서는 동시주입은 충적점성토와 시질토에서 많고, 후방주입은 지반이 자립하는 연암에서 많은 것을 알 수 있다.

3.1.2 2차 주입

2차 주입은 1차 주입의 미충진부의 완전 충전이나 뒤택음재료의 브리징이나 에어소실 등에 의한 체적감소의 보충을 위해서 수행되고 있다. 일반적으로 1차 주입과 같은 재료를 사용하고 있다.

또한 주변 지반의 이완영역의 확대방지를 목적으로 하는 2차 주입을 수행하는 경우에는 약액주입재를 사용하는 경우가 많다.

3.2 주입량과 주입압

뒤택음주입의 관리는 압력관리와 양적 관리를 병행하여 수행하는 것이 일반적이다. 압력관리는 항상 주입압을 일정하게 유지되도록 주입량을 제어하는 것이니 양적 관리는 설정한 일정량을 주입하는 방법으로 주입압이 변화한다. 어떠한 경우라도 어느 한편의 관리만으로는 충분하지 않고 굴진상황에 맞춰 두 방법을 종합적으로 관리하는 것이 바람직하다.

최근에는 축침(축압)식이나 반사파(초음파, 자기파, 탄성파 등) 방식을 사용하여 지반붕괴조사장치의 개발에 의해 지반의 이완상황, 지반과 쉐드TBM과의 공극, 테일보이드량을 계속하고, 계측결과와 연동하는 주입관리방법도 고려하고 있다.

3.2.1 주입량

주입량은 뒤택음재료의 지반에의 침투나 누출 외 곡선시공, 여굴, 뒤택음재료의 압밀탈수 등에 의해 영향을 받기 때문에 명확하게 정할 수 없는 실정이나 일반적으로는 다음의 시으로 산정된다.

$$* \text{주입량 } Q = V(\text{이론 공극량}) \times \alpha(\text{주입율})$$

여기서 주입율은 여러 가지 요인에서 복합적이지만 그 중에서도 중요한 것으로 다음의 3가지 항목이다.

① 주입압에 의한 압밀

재료에 따라 그 정도가 다르지만 가소상형 재료에서는 겔 직후부터 고결에 이르기까지의 유동고결 및 가소상 고결 영역에 있어서 가압에 의한 압밀(탈수)현상이 발생한다. 또한 에어계의 경우는 함유 에어가 주입압에 의해 수축하기 때문에 비에어계에 비해 주입율이 약간 증가한다.

② 지반에의 침투와 누출

연약점성토지반의 테일보이드에 주입하는 경우, 지반내에 침투하거나, 자갈질 지반의 토립자간에 압입누출하는 경우가 있다. 또한 막장축으로의 누출은 토질에 관계없이 발생하는 경우가 있다.

③ 시공상의 Loss

발전 수직구 주변에 설치한 플랜트에서 직접 압송하는 경우가 대부분이며, 압송과정에서 시공상(기술적으로도) 피할 수 없는 Loss가 있다.

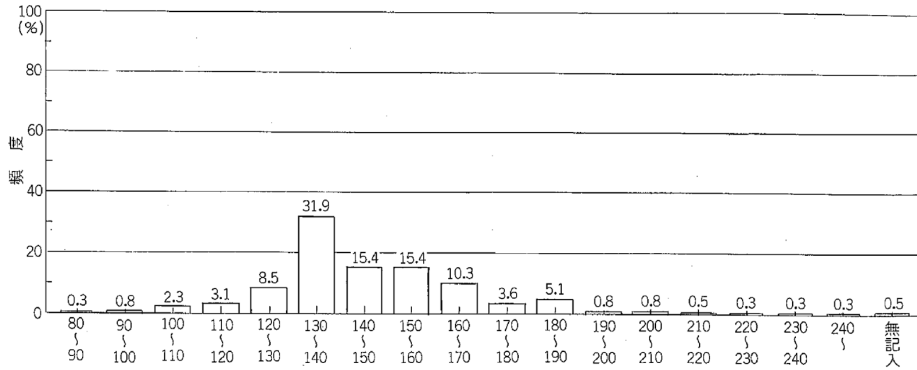
JTA양케이트에 따르면 표준구간(보조공법을 적용하지 않는 구간)에 있어서 주입율의 실태는 그림 6에 나타내듯이 평균 143%이다.

연약한 점성토지반에서는 주입압이 상승하지 않는다고 주입율을 과대하게 설정하면 할열주입에 의한 2차 압밀을 발생시킬 수 있으므로 주의가 필요하다.

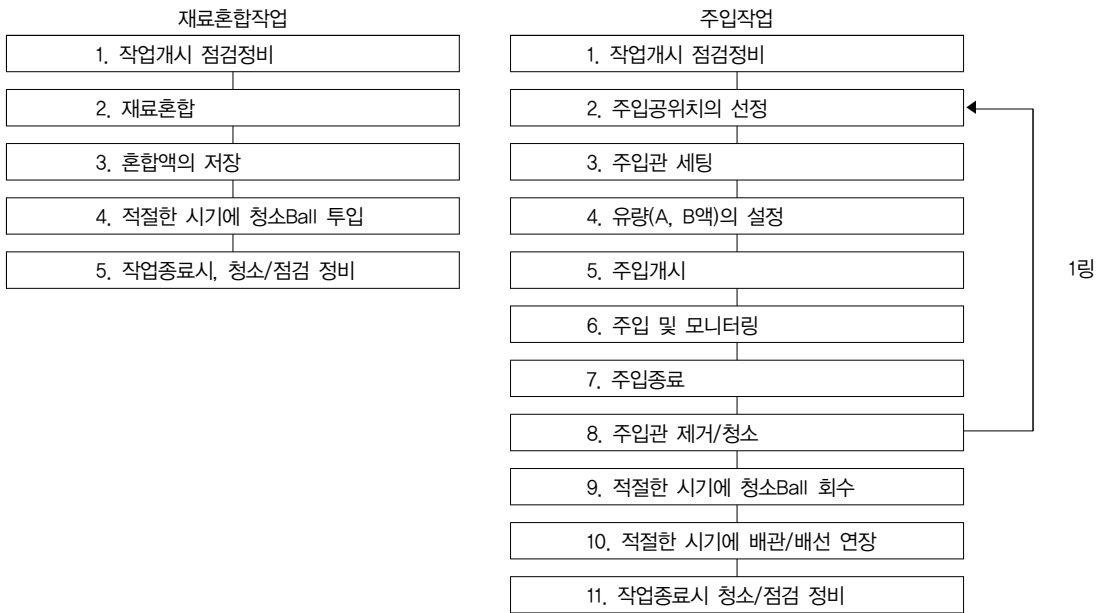
3.2.2 주입압

주입압은 토압, 수압, 세그먼트의 강도 및 쉐드TBM의 형식과 사용재료의 특성을 종합적으로 판단하여야 한다. 일반적으로 세그먼트 주입구에서 100~300kN/m² (1~3kgf/cm²) 정도의 경우가 많지만 간극수압+200kN/m² (+2kgf/cm²)을 목표로 하는 경우도 많다.

한편 주입압이 너무 높으면 강제세그먼트의 스킨플레이트가



〈그림 6〉 표준구간의 평균 주입율



〈그림 7〉 뒤채움주입의 시공순서

과도하게 변형하거나, 반경방향 삽입형의 K세그먼트에서는 이 음볼트가 진단되는 경우도 있으므로 주의가 필요하다.

또한 이액형 가소상형의 뒤채움재료를 사용하는 경우에는 겔 타임의 선정이 중요하며, 극단적으로 짧게 하면 주입압의 상승과 주입관의 폐색을 일으키므로 주의가 필요하다.

주입량, 주입압 모두 어느 정도의 시행을 반복하면서 주입효과, 주변 지반이나 타 구조물로의 영향 등을 확인한 후에 결정하

는 것이 바람직하다. 실제 시공에 있어서도 일정한 범위마다 효과의 확인을 수행하고 그 결과를 피드백시키는 것이 필요하다.

4. 시공순서

가소상형 뒤채움주입의 시공순서를 그림 7에 나타내었다. 그러나 이 두가지 작업은 서로 연계된 작업임과 함께 쉴드

TBM 굴진작업의 사이클중에 조합하는 것이 필요하기 때문에 현장의 작업조건에 맞춰 작업순서를 작성하는 것이 바람직하다.

5. 맺음말

실드TBM공법에 있어서 주변지반의 변형방지나 시공정밀도의 확보를 위해 뒤채움주입이 중요한 역할을 하고 있는 점을 서술하였다. 최근에는 재료의 개발이 진행되어 가소성 뒤채움재료를 많이 사용하고 있고, 이에 따른 시공방법도 변화하고 있으며, 직접압송방식의 동시주입이 주류가 되어 있다.

향후 실드TBM공법은 더욱더 시공조건이 열악한 환경제약에서 시공하는 사례도 증가함과 함께 뒤채움주입관리의 중요성을 재확인하고, 재료와 시공법 모두 한층 더 진전하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 三木五三郎·斎藤孝夫·下田一雄·木村 昌義, 裏込め注入工法の設計と施工, 山海堂, 1990.
2. (社)地盤工学会, シールド工法の調査・設計から施工まで, 1997.
3. (社)日本トンネル技術協会, 第6回トンネル技術シンポジウム, シールド工事における裏込め注入, 1984.
4. (社)日本トンネル技術協会, 「裏込め注入」に関する実態調査報告書, 1994
5. 可塑状グラウト協会, シールドトンネル注入工法技術マニュアル, 1994
6. (社)土木学会, トンネル標準示方書「シールド工法編・同解説」, 1996.
7. 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 (6), 裏込め注入管理, 第28巻11号, p.79-86, 1997.