

EPB 쉴드TBM터널공사

- 막장안정을 위한 굴진관리와 관리값의 설정방법 -



김재영

삼성물산 건설부문
토목ENG센터 지하토목팀
(geokimjy@korea.com)

1. EPB 쉴드TBM공법의 굴착 및 막장안정 유지 개요

EPB 쉴드TBM공법 (Earth Pressure Balanced Shield TBM Method)은 굴착토를 cutter head 배면의 챔버내에 채우고 가압하면서 굴진량과 함께 배토량을 제어하여 막장의 안정을 유지하는 기계식 터널굴착 공법이다. 따라서 굴착된 버력은 막장의 압력관리와 불투수층을 형성하여 지하수가 갭내로 분출하는 것을 방지하기 위해 적절한 소성 유동성이 요구되지만, 굴착토 만으로 소성 유동성을 얻을 수 없는 경우는 첨가재를 주입하여 교반한다. 또한, 굴착된 버력이 첨가재의 유무와 관계없이 진흙과 같은 상태를 나타내면 이토(泥土)라고도 한다. 따라서 EPB 쉴드TBM공법은 굴착 및 추진장치, 첨가재 주입장치, 교반 및 배토장치가 막장안정을 위한 관리요소가 된다. 그림 1에 EPB 쉴드TBM의 굴진시 막장에 작용하는 응력관계를 나타내었다.

2. EPB 쉴드TBM공법의 굴진관리

EPB 쉴드TBM공법의 막장안정을 위해서는 다음과 같은 굴진관리가 필요하다.

- 이토압으로 토압 및 수압에 저항한다.

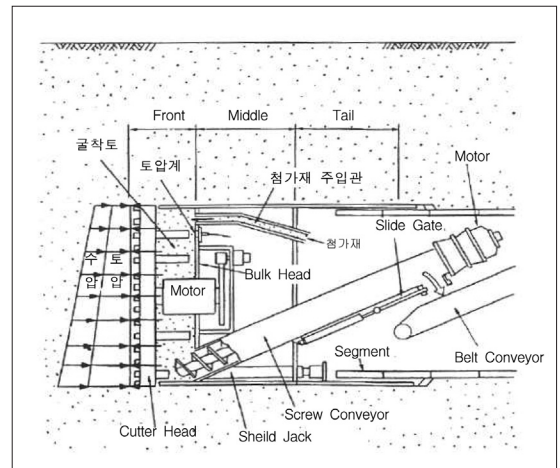


그림 1. EPB 쉴드TBM공법의 막장안정 개요

- 스크류 컨베이어 등 배토기구로 배토량을 조절한다.
- 필요에 따라 첨가재를 주입하여 이토의 소성 유동화와 불투수성을 확보한다.

EPB 쉘드TBM의 굴진중 막장안정을 이해하기 위해서는 먼저 이토압의 설정, 이토의 기능과 특징, 막장안정 확인방법 등에 대해 알아 둘 필요가 있다.

2.1 이토압의 설정

이토압은 기본적으로 다음과 같이 설정하며, 토압을 계산하는 경우는 이수식(Slurry Type) 쉘드TBM공법과 동일하다.

- 이토압 = 지하수압 + 토압 + 예비압

2.2 이토의 기능과 특성

쉘드TBM 전면의 cutter head에 의해 굴착되어 챔버내에 채워지는 이토의 기능은 다음과 같다.

- 막장(굴착면)의 붕괴를 방지해야 한다.
- 적당한 소성 유동성을 가지면서 막장의 압력관리

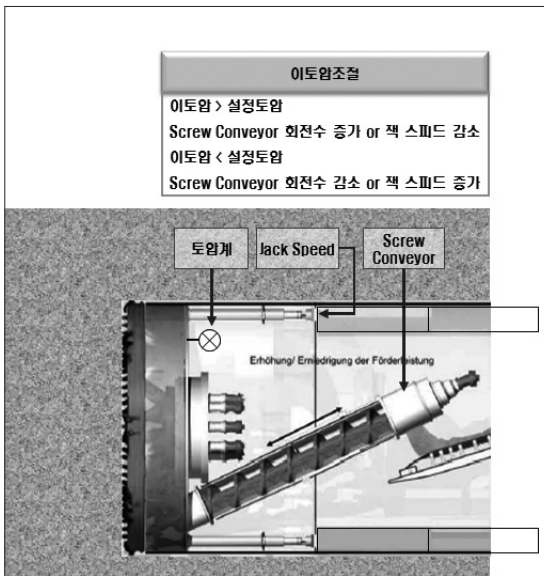


그림 2. EPB쉘드 TBM공법의 토압 제어 개요

가 가능해야 한다.

- 이토 전체는 불투수층을 형성하여 지하수가 갭내로 분출하는 것을 방지해야 한다.

이토는 유동에 관한 특성이 가장 중요하며, 유동성이 부족한 경우는 첨가재를 주입하여 확보할 필요가 있다.

2.3 이토압의 관리

EPB 쉘드TBM공법의 토압 제어 개요를 그림 2에, 굴진관리 flow를 그림 3에 나타내었다.

2.4 막장안정의 확인 및 조정방법

EPB 쉘드TBM공법에서 막장의 안정을 확보하기 위해서는 챔버내의 압력을 유지할 필요가 있다. 일반적으로 챔버내의 압력이 부족하면 막장의 붕괴가 발생할 위험성이 증가하며, 압력이 증가하여 최대가 되면 커터 토크나 추력의 증가, 굴진속도의 저하 또는 지반의 용기 등과 같은 문제가 발생한다.

막장의 관리압력으로서 조절하는 이토압은 지반조건을 충분히 검토하여 해당 구간의 상한치와 하한치를 사전에 설정하고, 설정한 범위 내에서 관리하는 경우가 많다.

EPB 쉘드TBM공법의 경우, 이토압의 조정방법으로는 다음과 같은 항목이 있다.

- ① 스크류 컨베이어의 회전수를 제어
- ② 쉘드 잭의 추력속도를 제어
- ③ 스크류 컨베이어에 설치된 게이트의 개폐 또는 토사 압송 펌프의 속도를 제어

EPB 쉘드TBM공법은 상기 ①~③과 같은 방법으로 시공조건에 맞는 적절한 굴진관리를 수행해야 한다. 그리고 굴진에 따른 지반변형과 배토상태, 또는 커터 토크의 변화 등을 확인하면서 막장의 관리압력을 굴진과 함께 보완할 필요도 있다.

굴진 중 관리 data로는 다음의 항목이 있으며, 굴진

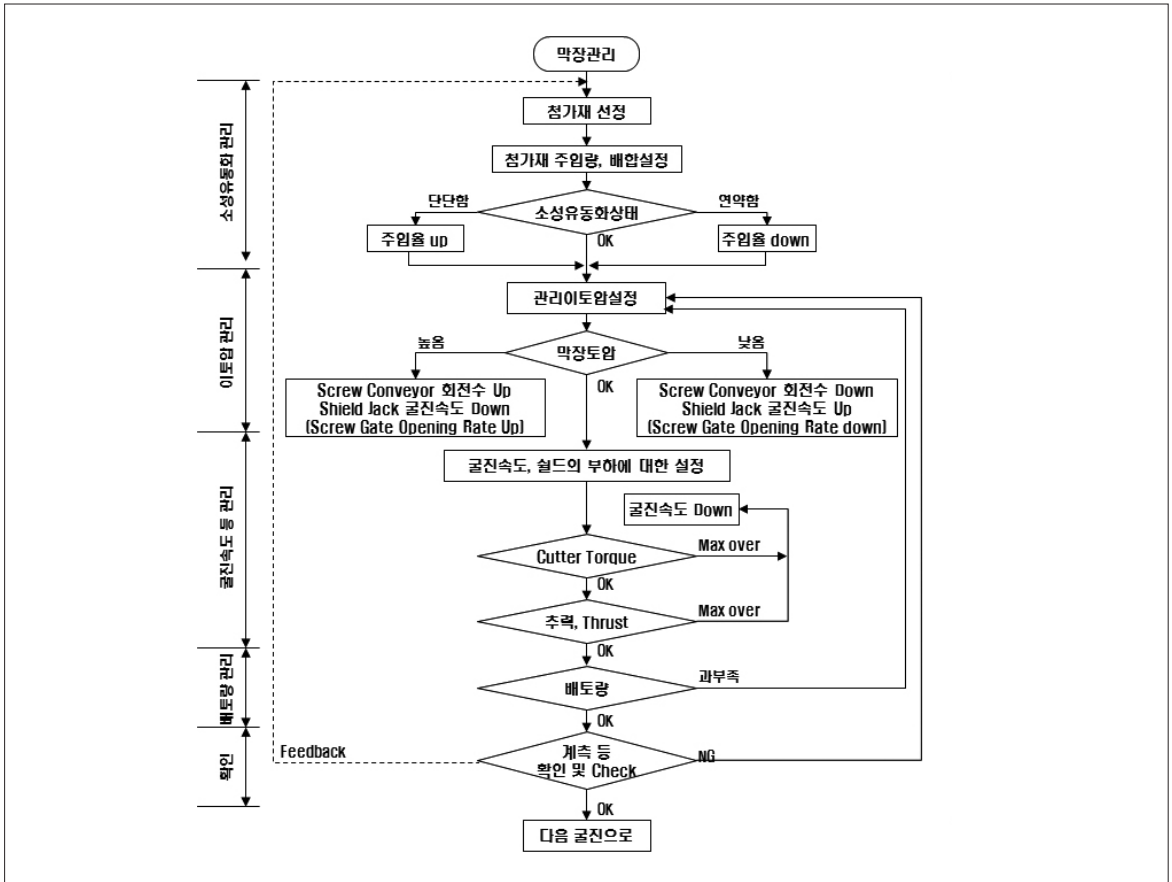


그림 3. EPB 실드TBM공법의 굴진관리 Flow

에 따른 real time으로 관리할 수 있는 항목으로는 ①, ②, ③이 있으나, 일반적으로는 정량적으로 판단 가능한 ①, ②에 의한 관리를 주로 수행하는 경우가 많다.

- ① 이토압
- ② 굴착토량 (체적, 중량)
- ③ 실드장비의 부하 (Trust, Cutter Torque, Screw Conveyor 등)
- ④ 지반 변형량
- ⑤ 막장 붕괴 계측 data
- ⑥ 뒷채움 주입관리 data

3. 이토의 품질관리

EPB 실드TBM공법은 이토의 소성 유동성 관리가 가장 중요하다. 따라서 이토의 소성 유동성을 굴진 data를 바탕으로 항상 파악하고, 다시 굴진관리값으로 feedback하여 보완할 필요가 있다.

3.1 커터 챔버 안의 토압

실드TBM의 챔버 내 격벽측에는 토압계를 설치한다. 이 계측값이 크게 변화하거나 변화가 나타나지 않는 경우는 소성 유동성의 부족이나 이토가 압밀 부착

되었을 가능성이 있다. 따라서 토압의 경시변화를 모니터링하여 유동성 관리를 간접적으로 하는 것도 가능하다.

3.2 쉴드의 부하

커터 토오크, 스크류 컨베이어의 토오크 등 기계부하를 모니터링하여 이토의 소성 유동성을 추정한다. 이 경우는 지반조건의 변화와 함께 관리할 필요가 있다.

3.3 배토상황의 계속

배토 상황을 육안 또는 샘플링한 이토를 사용하여 슬럼프 시험을 통해 판단하는 방법이 있다. 슬럼프값에 의한 관리는 지반조건이나 이토의 갱내 운반방법에 따라 다르지만, 사질토 지반의 경우 10~15cm정도로 관리하는 경우가 많다.

4. 이토압식 쉴드공법의 막장압 계산과 관리값 설정 예

상술한 내용을 바탕으로 실제 현장에서 EPB 쉴드 TBM 굴진시 막장압의 계산과 현장 관리값을 설정하는 방법은 다음과 같다.

- (1) 막장 관리압력의 설정 : 토압+지하수압(간극수압)+ α (예비압)
- (2) 토압 산정방법
 - 점성토 : Rankine 토압 이론
 - 사질토 : Rankine, Terzaghi, Murayama의 토압 이론
- (3) 토압 관리값의 설정 : 상한값 > 관리 상한값 > 관리토압 > 관리 하한값 > 하한값
 - 상한값 : 수동토압+지하수압- α
 - 하한값 : 주동 토압 또는 이완 토압+지하수압+ α

(지반의 자립성이 양호한 경우, 지하수압만으로 설정하는 경우도 있음)

- 관리 상한값 : 정지 토압 + 지하수압(간극수압)+ α (예비압)
 - 관리 하한값 : 주동 토압 또는 이완 토압+지하수압(간극수압)+ α (예비압)
- (4) 지하수압에 대해서는 계절적 변동도 고려하여 설정할 필요가 있으며, 토압의 경우는 다음을 고려하여 설정할 필요가 있다.
- 지반 자립성이 좋은 경우에는 낮은 압력으로 설정
 - 연약지반에서 지반변형을 최대한 작게 할 필요가 있는 경우는 높은 압력으로 설정
 - 예비압 α 는 시공시의 압력손실을 보완하기 위한 값으로, 일반적으로는 $\alpha=0.2\sim0.3 \text{ kgf/cm}^2$ ($20\sim30 \text{ kN/m}^2$) 정도의 값을 사용한다.

4.1 토사, 지하수를 하나로서 보는 전토압 (Rankine토압)에 의한 계산 예

그림 4에 전토압 계산방식의 단면과 계산과정의 예를 나타내고, 그 결과에 대한 설정관리압을 나타내었다.

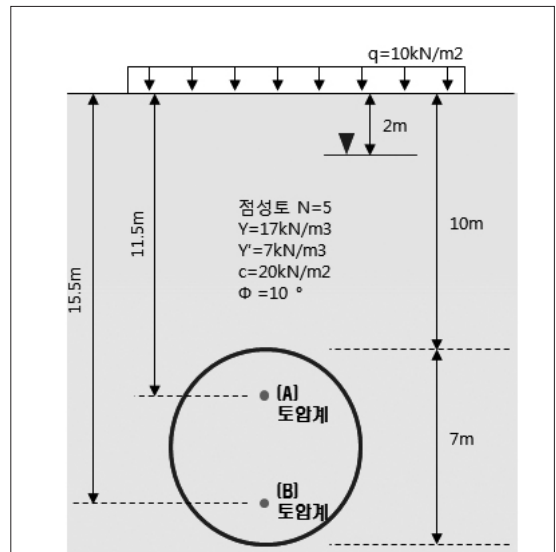


그림 4. 전토압 계산 개요

$$\bullet P_a = (\gamma \times Z + q) \times \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \times c \times \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$(A) = (17 \times 11.5 + 10) \times \tan^2\left(45 - \frac{10}{2}\right) - 2 \times 20 \times \tan\left(45 - \frac{10}{2}\right) = 111 \text{ kN/m}^2$$

$$(B) = (17 \times 15.5 + 10) \times \tan^2\left(45 - \frac{10}{2}\right) - 2 \times 20 \times \tan\left(45 - \frac{10}{2}\right) = 159 \text{ kN/m}^2$$

$$\bullet P_p = (\gamma \times Z + q) \times \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2 \times c \times \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$(A) = (17 \times 11.5 + 10) \times \tan^2\left(45 + \frac{10}{2}\right) + 2 \times 20 \times \tan\left(45 + \frac{10}{2}\right) = 340 \text{ kN/m}^2$$

$$(B) = (17 \times 15.5 + 10) \times \tan^2\left(45 + \frac{10}{2}\right) + 2 \times 20 \times \tan\left(45 + \frac{10}{2}\right) = 436 \text{ kN/m}^2$$

$$\bullet P_0 = K_0 \times (\gamma \times Z + q), K_0=1.0 \text{의 경우,}$$

$$(A) = 1.0 \times (17 \times 11.5 + 10) = 206 \text{ kN/m}^2$$

$$(B) = 1.0 \times (17 \times 15.5 + 10) = 274 \text{ kN/m}^2$$

- 예비압 $\alpha=20\text{kN/m}^2$
- 전토압(Rankine토압) 계산에 의한 설정관리값의 예는 표 1과 같다.

4.2 토사, 지하수를 분리하고 이완토압 (Terzaghi)에 의한 계산 예

그림 5에 이완토압의 산정개요를, 그림 6에는 검토 단면과 계산과정의 예를 나타내고, 계산결과에 대한 설정관리압의 예를 나타내었다.

- 터널굴착에 따른 영향의 반경에 대한 폭

$$B_1 = R_0 \times \cot\left(\frac{45 + \frac{\phi}{2}}{2}\right) = 3.5 \times \cot\left(\frac{45 + \frac{35}{2}}{2}\right) = 5.768m$$

$$\bullet E = e^{-\tan\phi \times \frac{H}{B_1}} = e^{-\tan 35 \times \frac{20}{5.768}} = 0.0882$$

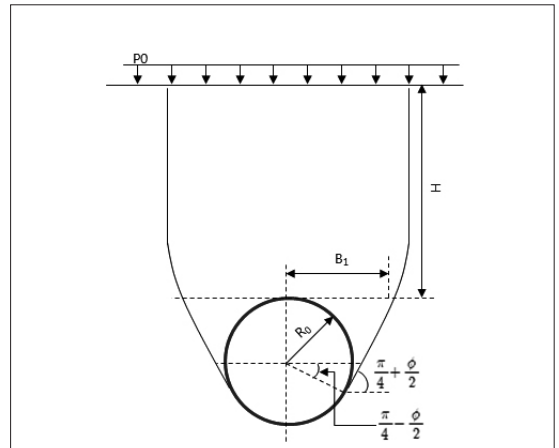


그림 5. 이완토압 산정 개요

표 1. 전토압(Rankine토압) 계산에 의한 설정관리값의 예

구 분	① 상한값 ($P_a - \alpha$)	② 관리상한값: ①, ③의 평균 or ③ $\times 1.1$ (10%증)	③ 관리토압 ($P_0 + \alpha$)	④ 관리하한값: ③, ⑤의 평균 or ③ $\times 0.9$ (10%감)	⑤ 하한값 ($P_a + \alpha$)
(A)	0.32 MPa	0.28 MPa	0.23 MPa	0.18 MPa	0.13 MPa
(B)	0.42 MPa	0.36 MPa	0.29 MPa	0.24 MPa	0.18 MPa

* 경험적으로 관리상한값, 관리하한값은 관리토압 $\pm 10\%$ 로 설정하는 경우가 많음

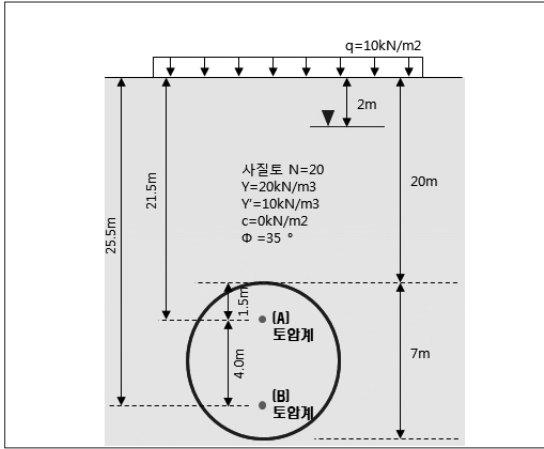


그림 6. 검토단면의 개요

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \frac{B_1 \times \left(\gamma - \frac{c}{B_1} \right)}{\tan \phi} \times (1 - E) + q \times E \\ &= \frac{5.768 \times \left(20 - \frac{0}{5.768} \right)}{\tan 35} \times (1 - 0.0882) + 10 \times 0.0882 = 76 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_a &= (\sigma_v + \gamma' \times h) \times \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2 \times c \\ &\quad \times c \times \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A) &= (76 + 10 \times 1.5) \times \tan^2 \left(45 - \frac{35}{2} \right) - 2 \times 20 \\ &\quad \times \tan \left(45 - \frac{35}{2} \right) = 24.7 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (B) &= (76 + 10 \times 5.5) \times \tan^2 \left(45 - \frac{35}{2} \right) - 2 \times 20 \\ &\quad \times \tan \left(45 - \frac{35}{2} \right) = 35.5 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_p &= (\gamma \times Z + q) \times \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2 \times c \\ &\quad \times \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A) &= (76 + 10 \times 1.5) \times \tan^2 \left(45 + \frac{10}{2} \right) + 2 \times 20 \\ &\quad \times \tan \left(45 + \frac{10}{2} \right) = 336 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (B) &= (76 + 10 \times 5.5) \times \tan^2 \left(45 + \frac{10}{2} \right) + 2 \times 20 \\ &\quad \times \tan \left(45 + \frac{10}{2} \right) = 483 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$P_0 = \sigma_v + K_0 \times (\gamma' \times h), K_0=0.5 \text{의 경우,}$$

$$(A) = 76 + 0.5 \times (10 \times 1.5) = 83.5 \text{ kN/m}^2$$

$$(B) = 76 + 0.5 \times (10 \times 5.5) = 103.5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{수압 (A)=195 kN/m}^2, \text{ (B)=235 kN/m}^2$$

$$\text{예비압 } \alpha = 20 \text{ kN/m}^2$$

• 이완토압 계산에 의한 설정관리값의 예는 표 2와 같다.

4.3 관리토압의 설정시 유의사항

상기와 같은 관리토압의 계산은 절대적인 방법이 아

표 2. 이완토압 계산에 의한 설정관리값의 예

구분	① 상한값 ($P_0 + \text{수압} - \alpha$)	② 관리상한값 : ①, ③의 평균 or ③ $\times 1.1$ (10%증)	③ 관리토압 ($P_0 + \text{수압} + \alpha$)	④ 관리하한값 : ③, ⑤의 평균 or ③ $\times 0.9$ (10%감)	⑤ 하한값 ($P_0 + \text{수압} + \alpha$)
(A)	0.51 MPa	0.41 MPa	0.30 MPa	0.27 MPa	0.24 MPa
(B)	0.70 MPa	0.53 MPa	0.36 MPa	0.33 MPa	0.29 MPa

* 경험적으로 관리상한값, 관리하한값은 관리토압 $\pm 10\%$ 로 설정하는 경우가 많음

니다. 실제 TBM굴진시에는 당초 예상했던 지반조건과 다르거나 변화하는 경우도 많고, 지하수 조건도 조사시의 수위와 다른 경우도 있다.

따라서 일반적으로는 초기 굴진시 상기와 같은 현장의 개략 검토결과를 바탕으로 관리토압을 설정한 후, 다음과 같은 모니터링 결과를 참고로 관리토압을 재설정하고 feedback할 필요가 있다. 그리고 지반조건은 시시각각으로 변화하기 때문에 현재까지의 굴진데이터와 기록을 참고로 하여 굴진하는 것이 바람직하다.

- 굴진 정지시 토압
- 배토량 또는 배토 상황
- 첨가재 농도 또는 주입량
- 토오크 등 기타 지표
- 지표 침하량

굴착지반의 자립성이 좋은 경우, 관리 이토압을 높

게 설정하면 오히려 챔버내의 폐색이나 비트의 마모를 증가시키기 때문에 하한값에 가까운 관리토압이 좋을 것으로 사료된다.

아울러 지표면의 환경조건, 중요 구조물에 근접하는 등의 조건에서는 TBM굴진에 따른 영향을 최소화하고 회피하기 위해 초기단계에 trial test와 계측모니터링을 실시하여 현장에서 설정한 관리토압에 대한 주변 구조물, 지표면에 미치는 영향을 파악하여 적절한 관리값으로 재설정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. セグメントの設計(改訂版), 日本土木学会, 2010.
2. シールド工法, 日本地盤工学会, 2012.

