

실드 TBM 뒤택움압 산정 및 침하영향에 대한 수치해석적 연구

안창균¹ · 유정선¹ · 이석원^{2*}

¹비회원, 건국대학교 사회환경공학과 석사

²정회원, 건국대학교 사회환경공학과 교수

Evaluation of the backfill injection pressure and its effect on ground settlement for shield TBM using numerical analysis

Chang-Kyun Ahn¹ · Jeong-Seon Yu² · Seok-Won Lee^{3*}

¹Master, Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental Engineering

²Professor, Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental Engineering

*Corresponding Author : Seok-Won Lee, swlee@konkuk.ac.kr

Abstract

Backfill injection pressure in shield TBM affects not only ground settlement but also adjacent underground structures. Therefore, it is essential to estimate a suitable backfill injection pressure in advance in design stage. In this paper, seven suggested equations worldwide to calculate the backfill injection pressure were reviewed and compared. By assuming 6 cases of virtual ground condition, backfill injection pressures were calculated and analyzed. It was confirmed that the backfill injection pressure increases as the depth of overburden increases, but the increasing ratio decreases. The numerical analysis was carried out by applying the calculated backfill injection pressure to investigate the influence of backfill injection pressure on the settlement of surface and crown of tunnel. It was confirmed that the final settlement at the surface and crown of tunnel on the both unsaturated and saturated condition are more influenced by the applied face pressure than the applied backfill injection pressure. In addition, the effect of backfill injection pressure decreases as the depth of overburden increases, and the effect of backfill injection pressure increases as the applied face pressure decreases.

Keywords: Backfill injection pressure, Shield TBM, Face pressure, Ground settlement

초 록

실드 TBM 공사에서 뒤택움압은 지표 침하는 물론 주변 지하 구조물의 안정성에 영향을 미친다. 따라서 설계단계에서 뒤택움압을 미리 산정하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 전 세계적으로 제시되어 있는 7가지 뒤택움압 산정 이론을 고찰하고 비교하였다. 6가지의 가상 지반조건을 가정하여, 그에 따른 뒤택움압을 산정하고 분석하였다. 그 결과,

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)269-286(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.269>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received January 5, 2018

Revised February 2, 2018

Accepted February 7, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

토피코가 증가함에 따라 산정되는 뒤택음압이 증가하나 그 증가율은 감소함을 알 수 있었다. 또한 산정된 뒤택음압이 지표 및 천단침하에 어떻게 영향을 미치는 지를 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 불포화 지반조건 및 포화 지반조건 모두에서 동일하게 지표 및 천단 침하는 뒤택음압 보다는 막장압에 더욱 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 토피코가 증가할수록 뒤택음압의 영향이 감소하고, 적용 막장압이 감소함에 따라 뒤택음압의 영향이 증가함을 알 수 있었다.

주요어: 뒤택음압, 쉘드 TBM, 막장압, 지반 침하

1. 서론

국민의 생활수준이 증진하면서 특히 도심지의 경우, 기존의 발파공법을 이용한 터널굴착은 소음 및 진동 등으로 인하여 많은 민원을 유발시켜, 터널 굴착과 동시에 쉘드로 상부 지반의 붕괴를 방지하면서 세그먼트 라이닝을 조립해 나가는 쉘드 TBM (Tunnel Boring Machine)의 적용이 늘어가고 있는 추세이다. 쉘드 TBM 공법은 소음과 진동이 비교적 적으며, 터널 굴착 시 지반거동으로 인한 터널 상부에 위치하는 구조물의 안정성을 보장하여 도심지 굴착에 유리하며, 지하수위가 높고 상재하여 고수압의 굴착 조건에서 터널 안으로의 지하수 유입에 대한 위험성이 상대적으로 적은 특징이 있다(Kim et al., 2017; Lee et al., 2017; Seong and Youn, 2017).

이러한 쉘드 TBM 공법에 있어서, 기계적 특성 상 터널 굴진 시에 쉘드 면판의 굴착 외경과 세그먼트 라이닝 외경의 차이로 인하여 그 사이에는 원주형의 빈 공간(이하 테일 보이드)이 발생하게 된다. 따라서 테일 보이드를 채우는 뒤택음 작업은 쉘드 TBM 공법에서 필수적인 과정이라 할 수 있다. 뒤택음이란, 쉘드 TBM 굴진과 함께 테일 보이드로 인하여 발생할 수 있는 지표 침하를 방지하기 위하여, 테일 보이드를 뒤택음재를 사용하여 충전하게 되는데 이때 적용하는 뒤택음재 주입압력을 말한다. 뒤택음압이 너무 크게 가해지거나 반대로 너무 작게 가해지면 지반의 용기 또는 침하가 발생하여 상부 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 또한 지표의 변형뿐만 아니라 기초나 공동구 혹은 상하수도과 같은 인접 지하공간의 다른 지하 구조물에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 안전한 쉘드 TBM 공법의 현장 적용을 위해서는 지반 조건에 적합한 뒤택음압 설계가 중요한 요인이 된다.

따라서 본 연구에서는 우선적으로 현재까지 연구되어진 뒤택음압 산정 이론(모델)들을 조사하고 분석하였다. 이렇게 분석된 여러 가지 뒤택음압 모델들을 적용하여 다양한 가상의 토사지반 조건들을 대상으로 설계단계에서의 쉘드 TBM 굴진 시 굴착 상부 지반의 지표 침하를 방지하기 위한 뒤택음압 모델별로 뒤택음압을 산정하였다. 이후, 산정된 뒤택음압을 수치해석에 적용하여 모델별 뒤택음압의 차이가 지반 조건과 토피코에 따라 지표 및 터널 천단부 변위양상에 어떻게 영향을 미치는가에 대하여 정량적인 결과 값을 이용하여 비교 분석하였다.

2. 뒤택음압 산정이론

뒤택음압은 보통 쉘드 TBM 막장압(횡토압)에 근거하여 산정되거나, 또는 TBM 천단에 작용하는 수직응력과 수압에 대응하여 산정된다. 뒤택음압은 어떠한 산정이론에 의한 표준화된 계산 방법은 아직 제시되지 않았으며,

지반조건(흙의 종류, 무지보 자립시간, 단위중량 등)에 따라서 경험적으로 산정되고 있다. 예를 들어 느슨한 지반에서의 경우, 테일 보이드 내로 밀려들어온 흙을 다시 원 상태로 밀어내기 위해 비교적 큰 뒤채움압이 요구된다. 실제 설계 과정에서는 뒤채움압 범위를 예상하는 수준이며, 터널 굴착 시 쉴드 TBM이 굴진하면서 현장 조건에 맞게 압력센서에 의해 측정되는 값에 의존하는 경우가 많다. 일반적으로 뒤채움압은 다음의 몇 가지 조건을 만족하여야 한다.

- 가능한 한 쉴드 TBM 터널 굴착으로 인한 체적 손실이 적도록 그 압력이 충분히 커야 한다.
- 테일 보이드 내에서 기압이 되므로 세그먼트 라이닝에 과하게 하중이 걸리지 않고, 터널 상부 지반의 용기가 일어나지 않도록 하여야 한다.
- 원지반과 터널 굴착면으로 뒤채움재가 유입되지 않게 그 압력이 충분히 작아야 한다.
- 세그먼트 라이닝의 국부적인 손실을 방지하고, 뒤채움압으로 인하여 키 세그먼트가 압축이 되지 않아야 한다.

본 연구에서는 문헌조사를 통하여 뒤채움압 산정 방법을 터널 막장면에 작용하는 지지압(막장압, 횡토압)에 근거하여 산정하는 이론과 터널의 천단부에 작용하는 수직응력에 근거하여 산정하는 이론으로 나누어서 분석하고 이를 제시하고자 한다. 다만, 현업에서는 현재 설계 시 산정되는 막장압, 토압+수압, 수압에 대해 +0.2 bar 정도를 설정하는 것이 국내에서 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이는 이론적으로 정해진 부분이 아님을 주지할 필요가 있다.

2.1 막장압(횡토압)에 근거한 뒤채움압 산정이론

2.1.1 Gatti and Cassani (2007) 이론

Gatti and Cassani (2007)는 EPB TBM을 활용한 도심지 터널 굴착 시 지표침하 관리를 위한 연구에서 지표 침하를 최소화하기 위한 방법으로 챔버 내 압력 조절, 지반 개량, 뒤채움 주입량 및 주입압 관리를 제시하였다. 이 중 뒤채움 주입압은 간극의 집중(Convergence of the cavity)을 막고 뒤채움재가 균일하게 주입될 수 있도록 막장면 중앙에 작용하는 횡토압과 수압의 합보다 크게 산정되어야 한다고 제안하였다. 이들이 제안한 산정이론은 식 (1)과 같다. 이 때 토압계수, K 의 경우, Jaky's law에 의해 구해진 정지토압계수보다 큰 값을 사용하도록 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 추후 수치해석 연구를 위하여 임의로 정지토압계수에 0.1을 더하여 계산을 하였으나, 이는 굴착 지반 조건에 따라 설계자의 판단에 따라 결정되어야 한다.

$$\sigma_{inj} > u + \gamma' (H + D/2) \cdot K \quad (1)$$

여기서, u : 정수압(hydrostatic pressure)(kN/m²)

γ' : 흙의 유효단위중량(kN/m³)

H : 터널 상부의 토피고(m)

D : 터널 직경

K : 토압계수(토압계수 K 는 K_0 (정지토압계수)보다 큰 값) ($K_0 < K < 1$)

2.1.2 Peila (2010) 이론

Peila (2010)는 경험적으로 뒤채움압을 식 (2)와 같이 적용 막장압에 0.5 bar를 더한 값으로 제안하였다.

$$\sigma_{inj} = \sigma_{face} + 0.5 \quad (2)$$

여기서, σ_{face} 는 적용 막장압(bar)

2.1.3 Ramirez (2010) 이론

Ramirez (2010)는 경험적으로 뒤채움압을 식 (3)과 같이 적용 막장압에 1.5~1.8을 곱한 값으로 제안하였다. 본 연구에서는 추후 수치해석 연구를 위하여 임의로 중간 값인 1.65를 설정하여 연구를 수행하였으나, 이는 굴착 지반 조건에 따라 설계자의 판단으로 결정되어야 한다.

$$\sigma_{inj} = (1.5 \sim 1.8) \cdot \sigma_{face} \quad (3)$$

여기서, σ_{face} 는 적용 막장압

2.1.4 경험적 산정 방법

일반적인 쉴드 TBM 시공 현장에서 뒤채움의 최소 주입량, 최소 주입압, 최대 주입압을 설계하는데 있어 지반 조건에 대해 경험적인 방법으로 결정한다. 최소 주입압의 경우, 수압보다 커야하며 터널 주변부로 균일하게 주입될 수 있는 값이어야 한다. 또한 굴착된 버력이 굴착된 지반을 통해 테일 보이드로 유입되지 않게 적용 막장압보다 커야 한다. 이러한 경험을 토대로 뒤채움 최소 주입압은 식 (4)와 같이 적용 막장압보다 1~2 bar 크게 산정한다. 본 연구에서는 추후 수치해석 연구를 위하여 임의로 중간 값인 1.5 bar를 설정하여 계산하였으나, 이는 굴착 지반 조건에 따라 설계자의 판단으로 결정되어야 한다. 최대 주입압은 지표면에서의 용기를 막기 위해 터널 상부 토피고의 하중과 지반의 전단강도의 합보다 작게 산정한다. 본 논문에서는 이러한 경험적 산정방법을 이후에는 C.V (Conventional Value)라고 명한다.

$$\sigma_{inj} = \sigma_{face} + (1 \sim 2) \quad (4)$$

여기서, σ_{face} 는 적용 막장압(bar)

2.2 수직응력에 근거한 뒤채움압 산정방법

지표면에서의 침하를 최소화하기 위해 터널 천단부에 작용하는 수직응력을 기준으로 한 뒤채움압 산정방법들이 기존의 문헌에서 제안되었다. 쉴드 TBM이 굴진함에 따라 발생하는 테일 보이드 내로 터널 상부의 지반이 밀려들어 오는 것을 방지하기 위해 수직응력에 대응하는 압력으로, 이는 굴착된 터널 상부 지반의 이완토압은 고려하지 않고 단순히 터널 천단부에 작용하는 수직응력에 안전율의 개념으로 일정한 값을 곱하거나 더한 값으로 제시되었다.

2.2.1 Wittke (2007) 이론

Wittke (2007)는 뒤채움압을 터널 천단부에 작용하는 수직응력에 대응하는 값으로 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\sigma_{inj} = \sigma_v \quad (5)$$

여기서, σ_v 는 터널 천단부의 수직응력

2.2.2 Biosca and Bono (2008) 이론

Biosca and Bono (2008)는 뒤채움압을 식 (6)과 같이 터널 천단부에 작용하는 수직응력에 0.5~1.0 bar를 더한 값으로 제안하였다. 본 연구에서는 추후 수치해석 연구를 위하여 임의로 중간 값인 0.75를 설정하여 계산을 하였으나, 이는 굴착 지반 조건에 따라 설계자의 판단으로 결정되어야 한다.

$$\sigma_{inj} = \sigma_v + (0.5 \sim 1.0) \quad (6)$$

2.2.3 Mollon et al. (2013) 이론

Mollon et al. (2013)는 뒤채움압을 식 (7)과 같이 터널 천단부에 작용하는 수직응력에 1.2를 곱한 값으로 제안하였다.

$$\sigma_{inj} = 1.2 \times \sigma_v \quad (7)$$

3. 가상 지반조건 설정

본 연구에서는 Table 1과 같이 총 6가지의 가상의 지반조건을 설정하였다. 크게는 지하수위 상부에서 터널이 굴착되는 3가지 불포화 지반조건(Case 1~3) 및 하·해저터널과 같이 지하수위 하부에서 굴착되는 3가지 포화 지반조건(Case 4~6)으로 구분하였다. 더 세분하여 각각의 경우에서 지반 정수(단위중량, 점착력, 내부마찰각)를 달리하여 총 6가지의 지반조건을 가정하였다.

터널 굴착 조건은 Fig. 1과 같이 설정하였다. C (토피고)는 30 m, $D = b$ (굴착 직경)은 8.3 m, h_w (터널 천단으로부터 지하수위 높이, Cases 4-6의 경우에 한함)는 50 m로 설정하였다.

막장압 및 뒤택음압을 산정하기 위해서는 지반조건을 가정하여야 하는데 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 설정하였다. 우선 지반은 균질하고 등방이다. 막장압에 근거한 뒤택음압은 TBM 굴진 시 압력의 손실을 고려하여 예비압 더해준 값인 타겟 막장압(target face pressure)을 사용하여 구한다. 이 때, 막장압의 작용점은 TBM 하부로부터 $1/3 \times D$ 지점으로 가정한다. 수압은 정수압을 적용한다.

Table 1. Ground conditions

Classification	γ_t (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	Saturation
Case 1	19	-	0	35	Unsaturated
Case 2			5	30	
Case 3			10	25	
Case 4	-	20	0	35	Saturated
Case 5			5	30	
Case 6			10	25	

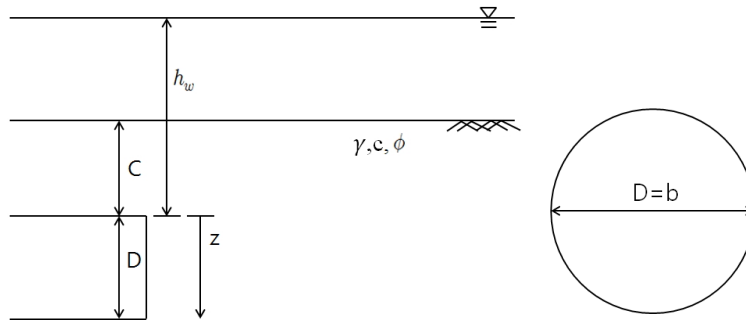


Fig. 1. TBM tunnel excavation condition

4. 뒤택음압 산정 결과

앞에서 제시한 터널 막장압에 근거한 4가지 뒤택음압 산정이론 및 천단부에 작용하는 수직응력에 근거한 3가지 뒤택음압 산정이론을 Table 1에 제시한 가상의 6가지 지반조건 및 Fig. 1에 제시한 TBM 터널 굴착 조건에 적용하여 각각의 뒤택음압을 산정하였다. 여기에서 터널 막장압에 근거한 뒤택음압을 적용하기 위해서는 우선 막장압을 산정하여야 하는데, 본 연구에서는 막장압을 다음과 같이 산정하였다. 여러 연구자에 의해 다양하게 제시된 12가지 막장압 산정 모델(Yu, 2016) 가운데, Murayama (1966), Anagnostou and Kovari (1996), DIN 4085 (2011)의 3가지 모델과 일본 지반공학회에서 제안한 경험적 산정식으로 구한 4가지 타겟 막장압을 산술평균하여 막장압을 산정하였다.

4.1 지반조건에 따른 뒤채움압 산정 결과

앞에서 서술한 바와 같이 가상의 6가지 지반조건에 7가지 뒤채움압 산정이론을 적용하여 각각의 뒤채움압을 산정하였고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

불포화 지반조건(Case 1~3)에서는 막장압에 근거한 뒤채움압 산정결과들이 지반강도 정수의 변화에 따라 그 값이 다소 변화가 있으나, 지반강도 정수의 영향이 없는 수직응력에 근거한 뒤채움압 산정결과는 지반이 포화지반이나 불포화지반이나 만이 변수일 뿐 각각의 경우에서 동일하게 산정되었다. 대체적으로 수직응력에 근거한 산정결과가 막장압에 근거한 결과와 비교하여 크게 산정되었다. 수직응력에 1.2를 곱하는 방법(Mollon 모델)이 가장 크게 산정되고, 막장압이 비교적 작아 막장압에 0.5 bar를 더하는 방법(Peila 모델)이 가장 작게 산정되었다. 불포화지반에서 Case 1, Case 2, Case 3에 따라 순차적으로 내부 마찰각이 감소하고 점착력이 증가하는데, 이에 따라 타겟 막장압이 증가하고 따라서 막장압에 근거하여 산정되는 뒤채움압도 증가함을 확인할 수 있다.

포화 지반조건(Case 4~6)에서는 불포화 지반조건에 비해 산정되는 타겟 막장압이 상대적으로 크기 때문에 막장압에 근거한 산정결과들과 수직응력에 근거한 산정결과들이 모두 비슷하게 나타났다. 그 중 막장압에 1.65를 곱하여 구하는 Ramirez 모델의 산정값이 가장 크게, 막장압에 0.5 bar를 더하여 구하는 Peila 모델의 산정값이 가장 작게 산정되었다. Case 4, Case 5, Case 6에 따라 순차적으로 내부 마찰각이 감소하고, 점착력이 증가하는데 이에 따라 불포화 지반조건과 동일하게 산정되는 타겟 막장압이 증가하고 결과적으로 막장압에 근거하여 산정되는 뒤채움압도 증가함을 확인할 수 있다. 그러나 포화 지반조건에서는 산정되는 타겟 막장압 결과 값의 대부분을 수압이 영향을 미치므로, 뒤채움압 증가량이 불포화 지반조건과 비교하여 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

Table 2. Results of backfill injection pressure (case 1~6)

Model	Backfill injection pressure (kPa)					
	Unsaturated condition			Saturated condition		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Gatti and Cassani	466.10	531.24	599.75	1045.31	1079.60	1115.66
Peila	144.75	160.75	183.50	917.25	921.50	928.25
Ramirez	156.34	182.74	220.28	1430.96	1437.98	1449.11
C.V	244.75	260.75	283.50	1017.25	1021.50	1028.25
Wittke	570.00	570.00	570.00	1100.00	1100.00	1100.00
Biosca	645.00	645.00	645.00	1175.00	1175.00	1175.00
Mollon	684.00	684.00	684.00	1320.00	1320.00	1320.00

4.2 토피고 변화에 따른 뒤채움압 산정 결과

Fig. 1에서 정의한 토피고(C)를 변화시켜 가면서 각 이론별로 뒤채움압을 산정하였다. 앞에서 서술한 Table 2는 토피고가 30 m인 경우에 산정된 뒤채움압을 나타내고 있다. Table 3은 지반조건 Case 1~3 (Table 1 참조)에 대

하여 7가지 뒤채움압 이론을 적용하여 토피고가 각각 $C = 10\text{ m}$ 및 $C = 20\text{ m}$ 인 경우에 산정된 뒤채움압을 보여주고 있다. 또한 Table 4는 Table 3과 동일하나 지반조건이 Case 4~6인 경우이다.

Table 3. Backfill injection pressure according to ground cover (case 1~3)

Model	Backfill injection pressure (kPa)					
	Case 1		Case 2		Case 3	
	C = 10 m	C = 20 m	C = 10 m	C = 20 m	C = 10 m	C = 20 m
Gatti and Cassani	266.05	366.07	303.24	417.24	342.35	471.05
Peila	133.25	141.50	142.50	155.00	153.00	173.75
Ramirez	137.36	150.98	152.63	173.25	169.95	204.19
C.V	233.25	241.50	242.50	255.00	253.00	273.75
Wittke	190.00	380.00	190.00	380.00	190.00	380.00
Biosca	265.00	455.00	265.00	455.00	265.00	455.00
Mollon	228.00	456.00	228.00	456.00	228.00	456.00

Table 4. Backfill injection pressure according to ground cover (case 4~6)

Model	Backfill injection pressure (kPa)					
	Case 4		Case 5		Case 6	
	C = 10 m	C = 20 m	C = 10 m	C = 20 m	C = 10 m	C = 20 m
Gatti and Cassani	740.03	892.67	759.60	919.60	780.18	947.92
Peila	711.00	815.50	712.25	818.50	714.00	823.50
Ramirez	1090.65	1263.08	1092.71	1268.03	1095.60	1276.28
C.V	811.00	915.50	812.25	918.50	814.00	923.50
Wittke	700.00	900.00	700.00	900.00	700.00	900.00
Biosca	775.00	975.00	775.00	975.00	775.00	975.00
Mollon	840.00	1080.00	840.00	1080.00	840.00	1080.00

불포화 조건의 Case 1의 경우, 토피고가 10 m에서 20 m로 증가하면 막장압에 근거한 산정방법의 Gatti and Cassani 모델은 37.59%, Peila 모델은 6.19%, Ramirez 모델은 9.91%, C.V 모델은 3.54% 증가하고, 수직응력에 근거한 산정방법의 Wittke 모델과 Mollon 모델은 100%, Biosca 모델은 71.70% 증가한다. 모든 모델에서 토피고가 증가함에 따라 뒤채움압이 증가하는데, 계산식에 토피고가 직접적으로 영향을 미치는 Gatti and Cassani 모델과 수직응력에 근거한 산정 방법들이 상대적으로 더욱 민감하게 반응하여 그 증가 비율이 다른 모델과 비교하였을 때 더 큰 값을 가진다.

토피고가 20 m에서 30 m로 증가하면 막장압에 근거한 산정방법의 Gatti and Cassani 모델은 27.32%, Peila 모델은 2.30%, Ramirez 모델은 3.55%, C.V 모델은 1.35% 증가하고, 수직응력에 근거한 산정방법의 Wittke 모델

과 Mollon 모델은 50%, Biosca 모델은 41.76% 증가한다. 이는 토피고가 10 m에서 20 m로 증가했을 때와 비교해 볼 때, 뒤채움압이 증가한다는 경향은 비슷하지만 그 증가량이 상대적으로 작아 토피고의 영향이 전체적으로 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Case 1에서는 토피고가 증가함에 따라 산정되는 뒤채움압이 증가하는 경향을 보이나, 일정 높이 이상의 토피고에서는 뒤채움압의 증가율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 불포화 지반조건과 포화 지반조건의 모든 Case에서도 Case 1과 유사한 경향을 확인할 수 있다. 특히 막장압에 근거한 모델 중에서, Peila 모델, Ramirez 모델, C.V 모델은 산정되는 막장압이 토피고에 비례하지 않고 일정 토피고보다 클 때는 터널 상부의 토체의 전체 하중으로 고려하지 않고 이완 하중으로 작용(Yu, 2016)하여 그 영향은 더 줄어드는 것으로 판단된다.

5. 뒤채움압 변화에 따른 지표 및 천단침하 양상

본 연구에서는 앞에서 각 모델별로 다르게 산정된 뒤채움압을 수치해석에 적용하여, 각 모델별로 다르게 산정된 뒤채움압 값들이 쉴드 TBM 터널 굴진에 따른 지표 및 천단침하(지반 거동)에 어떻게 영향을 미치는지를 조사하였다. 이를 위하여 지반수치해석 프로그램으로 MIDAS GTS NX를 선정하였다. 3차원으로 쉴드 TBM의 터널 굴착 전 과정과 유사하게 모델링하여 세그먼트 라이닝 조립 및 그라우트 경화 과정을 해석단계별로 적용하였다.

5.1 3차원 쉴드 TBM 수치해석 모델링

수치해석을 위한 지반은 “3. 가상 지반조건 설정”에서 제시한 지반조건을 적용하였다. 즉, 균일한 지반으로 폭 40 m, 터널 굴착방향 길이 90 m, 굴착직경 8.3 m, 굴진장 1.5 m, 그리고 토피고는 3가지 경우로 나누어 터널 상부로부터 10~30 m로 모델링 하였다. 세그먼트 라이닝 두께와 뒤채움 그라우팅 두께는 각각 30 cm 및 20 cm이다. 포화 상태의 경우 터널천단으로부터 50 m 상부에 수위를 모델링하였다. Fig. 2는 토피고가 20 m일 때의 수치해석 모델링이다. TBM 굴착 길이 방향에서 중간 지점인 굴착 시작점으로부터 45 m 떨어진 지점에서의 굴착 단계에 따른 지반거동을 분석하였다.

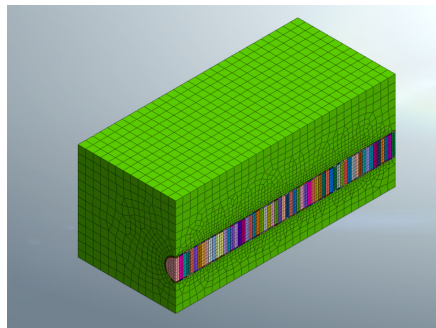


Fig. 2. Numerical modelling

각 Case별 지반 물성은 앞에서 제시한 Table 1을 적용하였다. 본 연구에서는 그라우트 경화 과정을 해석단계별로 모사하였는데, 이를 위하여 Lovera (2010)가 일반적인 모르타르 주입재의 탄성 계수와 프아송비를 주입 후 테일과의 거리에 따라 그라우트재의 물성치 변화 값을 제시한 결과를 준용하였다. 따라서 본 연구에서는 세그먼트 라이닝, 쉴드 그리고 경화단계에 따른 뒤택움재의 물성을 다음 Table 5와 같이 설정하였다. 지반 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였고, 쉴드 및 다른 재료는 Elastic 모델을 적용하였다. 뒤택움재는 경화 과정을 1~5단계로 나누어 점진적 물성 변화를 모사하였다.

Table 5. Input data for numerical analysis

	Model	Element	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m ³)
Ground	M-C model	Solid	50	0.30	19 (unsaturated), 20 (saturated)
Shield	Elastic	Shell	250,000	0.30	78
Segment	Elastic	Solid	21,000	0.20	24
Grout hardening step 1	Elastic	Solid	8	0.49	22.5
Grout hardening step 2	Elastic	Solid	50	0.49	-
Grout hardening step 3	Elastic	Solid	1000	0.47	-
Grout hardening step 4	Elastic	Solid	2000	0.43	-
Grout hardening step 5	Elastic	Solid	8000	0.30	-

굴착 단계에 따른 수치해석을 수행하기 위해 시공단계 해석을 설정하였다. 터널 굴착 시 막장압은 굴진 방향의 지반에 순차적으로 작용하며, 그 뒤로 쉴드 요소가 활성화되어 쉴드가 상부 토피의 하중을 지지한다. 쉴드가 지나 감과 동시에 세그먼트 라이닝이 설치되고 뒤택움재가 주입되면서 뒤택움압이 지반에 작용하는 일반적인 쉴드 TBM 굴진 순서로 모델링 하였다. 굴착은 1링 기준인 1.5 m 씩 진행된다.

5.2 수치해석에 적용하는 막장압 및 뒤택움압 산정

수치해석에 적용하기 위한 막장압 및 뒤택움압은 Case 1~6에 대하여 각각 산정하였다. 뒤택움압은 전술한 7가지 방법을 적용하였고, 막장압은 전술한 4가지 산정방법을 각각 산정한 후 최대 막장압과 최소 막장압을 각각 적용하였다. 비록 6가지 Case에 대하여 연구를 수행하였으나, 본 논문에서는 대표적으로 Case 2와 Case 5에 대한 결과만을 제시하고 고찰하였다. 다른 Case는 비슷한 경향을 나타내었다. Table 6과 Table 7은 각각 Case 2와 Case 5에서 토피고 변화에 따른 모델별 적용 막장압과 적용 뒤택움압을 나타내고 있다. 수치해석은 예를 들어, Case 2인 경우 각각의 토피고에서 최대 막장압 및 최소 막장압을 각각 적용하고 7가지 뒤택움압을 적용($3 \times 2 \times 7 = 42$ case)하여 쉴드 TBM 굴진에 따른 지표침하 및 천단침하를 산정하였다.

Table 6. Face and backfill pressure for numerical analysis (case 2)

Ground cover	Cover = 10 m		Cover = 20 m		Cover = 30 m	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Face pressure (kPa)	92	39	106	58	110	69
Backfill injection pressure (kPa)						
Gatti and Cassani	161.31	161.31	275.00	275.00	389.31	389.31
Peila	142.00	89.00	156.00	108.00	160.00	119.00
Ramirez	151.80	64.35	175.00	96.00	174.90	113.85
C.V	242.00	189.00	256.00	208.00	260.00	219.00
Mollon	228.00	228.00	456.00	456.00	684.00	684.00
Wittke	190.00	190.00	380.00	380.00	570.00	570.00
Biosca	256.00	256.00	455.00	455.00	645.00	645.00

Table 7. Face and backfill pressure for numerical analysis (case 5)

Ground cover	Cover = 10 m		Cover = 20 m		Cover = 30 m	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Face pressure (kPa)	673	619	772	729	874	835
Backfill injection pressure (kPa)						
Gatti and Cassani	684.90	684.90	845.00	845.00	1004.90	1004.90
Peila	723.00	669.00	822.00	779.00	924.00	885.00
Ramirez	1110.45	1021.35	1274.00	1203.00	1442.10	1377.75
C.V	823.00	769.00	922.00	879.00	1024.00	985.00
Mollon	840.00	840.00	1080.00	1080.00	1320.00	1320.00
Wittke	700.00	700.00	900.00	900.00	1100.00	1100.00
Biosca	775.00	775.00	975.00	975.00	1175.00	1175.00

5.3 수치해석 결과 및 분석

셸드 TBM 굴진 과정에서 발생하는 지표 및 천단 침하 경향을 적용 막장압 및 뒤채움압 모델별로 도출하였다. 세부적으로는 강도정수 변화, 각 조건에 따른 최대 및 최소 적용 막장압, 포화여부에 따라 다시 구분하여 분석하였다. Fig. 3은 셸드 TBM 터널 굴착 시, 셸드 TBM 굴진에 따른 각 침하 요인의 비율을 나타낸 것이다. 주요 침하 요인은 크게 4가지이며 관측점 기준으로 셸드가 지나가기 전은 막장압과 셸드에 의한 침하, 셸드가 지나가고 나서 뒤채움 부분에서 발생하는 침하와 장기침하로 분포한다. 비교적 비율이 적은 장기침하의 영향을 무시하고 수치해석상의 막장압과 셸드에 의한 침하량이 동일하다고 가정한다면, 굴진 중 셸드 막장면이 관측점에 도달했을 때의 침하량과 최종 침하량과의 차이를 비교함으로써 뒤채움압의 영향을 파악할 수 있다.

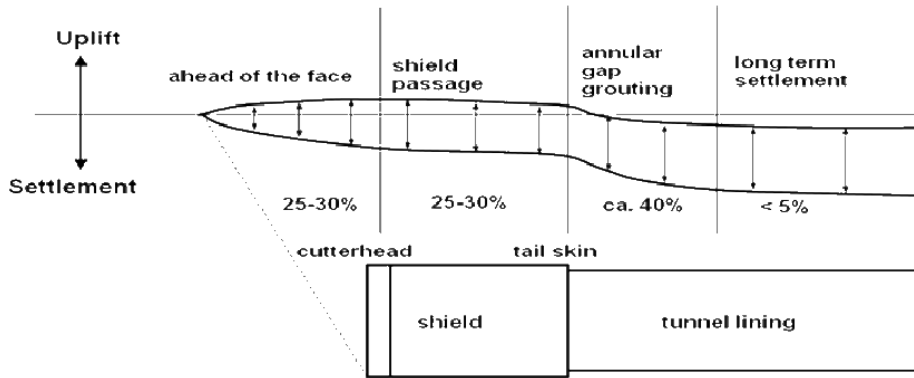


Fig. 3. Settlement causes during shield TBM tunnelling

5.3.1 지표침하 양상

(1) Case 2의 조건에서 토피고 변화에 따른 뒤채움압 모델별 지표침하 양상

Table 8은 굴착 지반 조건이 Case 2이고 터널 상부 토피고(ground cover)가 각각 10 m, 20 m, 30 m 일 때, 최대·최소 막장압 그리고 뒤채움압 모델들을 각각 적용하였을 때의 지표침하량(굴진 중 쉴드 TBM 막장면이 관측점에 도달했을 때의 침하량(Face in Table 8)과 최종 침하량(Final in Table 8))을 나타내고 있다. 분석 결과, 최대 막장압이나 최소 막장압이나에 따라서 즉, 적용 막장압에 따라서는 유발되는 침하량의 차이는 크게 나타났으나, 적용 뒤채움압에 따른 침하량의 차이는 비교적 작게 나타났다.

Table 8. Ground settlement according to face and backfill pressure (case 2)

Ground cover	Cover = 10 m				Cover = 20 m				Cover = 30 m			
	Face pressure		Min		Max		Min		Max		Min	
	Ground settlement (mm)											
	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final
Gatti and Cassani	0.77	2.87	2.79	4.89	4.68	9.21	7.02	11.74	6.29	11.72	7.75	13.55
Peila	0.77	2.89	2.80	4.96	4.70	9.27	7.05	11.83	6.34	11.82	7.81	13.68
Ramirez	0.77	2.88	2.80	4.98	4.70	9.26	7.06	11.84	6.33	11.82	7.81	13.68
C.V	0.75	2.79	2.79	4.86	4.68	9.22	7.04	11.78	6.32	11.78	7.79	13.63
Mollon	0.76	2.80	2.78	4.82	4.64	9.12	6.99	11.65	6.24	11.59	7.70	13.42
Wittke	0.76	2.84	2.79	4.86	4.66	9.16	7.00	11.69	6.26	11.64	7.72	13.47
Biosca	0.75	2.77	2.78	4.78	4.64	9.12	6.99	11.65	6.24	11.61	7.71	13.44
Average	0.76	2.83	2.79	4.88	4.67	9.20	7.02	11.74	6.29	11.71	7.75	13.55
Settlement by back pressure	2.07 (73.16%)		2.09 (42.89%)		4.52 (49.17%)		4.72 (40.20%)		5.42 (46.30%)		5.80 (42.79%)	

정량적인 수치로 비교해보면, 토피고가 10 m일 때, 최대 막장압을 적용하고 가장 큰 뒤채움압인 Biosca 모델(뒤채움압 = 256 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 2.02 mm, 가장 작은 뒤채움압인 Peila 모델(뒤채움압 = 142 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 2.12 mm이다. 최소 막장압을 적용했을 때는 가장 큰 뒤채움압인 Biosca 모델(뒤채움압 = 256 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 2.00 mm, 가장 작은 뒤채움압인 Ramirez 모델(뒤채움압 = 64.35 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 2.18 mm이다. 결국 산술적으로 보면, 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압 변화에 대한 침하량은 0.00070 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때는 0.00073 mm/kPa이다. 같은 방법으로 토피고가 20 m, 30 m에서 구했을 때, 각각 최대 막장압을 적용했을 때 0.00030 mm/kPa, 0.00025 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때 0.00033 mm/kPa, 0.00026 mm/kPa이다. 토피고가 증가할수록 지표침하에 대한 뒤채움압의 영향은 줄어들고, 모든 경우에서 최대 막장압을 적용했을 때보다 최소 막장압을 적용했을 때 뒤채움압의 영향이 큰 것을 확인할 수 있다.

(2) Case 5의 조건에서 토피고 변화에 따른 뒤채움압 모델별 지표침하 양상

Table 9는 Table 8과 동일하게 산정된 지표침하량이나, 단지 지반 조건이 포화 조건인 Case 5인 경우이다. 불포화 조건인 Case 2 (Table 8)와 비교해보았을 때, 수압이 막장압과 뒤채움압 산정에 대부분을 차지하기 때문에 적용 막장압 및 뒤채움압의 영향이 상대적으로 작게 나타났다.

Table 9. Ground settlement according to face and backfill pressure (case 5)

Ground cover	Cover = 10 m				Cover = 20 m				Cover = 30 m			
	Max		Min		Max		Min		Max		Min	
	Ground settlement (mm)											
	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final
Gatti and Cassani	7.00	20.83	7.28	21.08	5.58	16.10	5.76	16.31	4.28	11.76	4.41	11.93
Peila	6.99	20.79	7.28	21.10	5.58	16.11	5.77	16.34	4.29	11.80	4.43	11.98
Ramirez	6.94	20.42	7.24	20.76	5.50	15.90	5.69	16.13	4.19	11.58	4.34	11.77
C.V	6.98	20.69	7.27	20.99	5.56	16.06	5.75	16.29	4.27	11.75	4.41	11.94
Mollon	6.98	20.69	7.26	20.94	5.53	15.99	5.71	16.19	4.22	11.63	4.35	11.80
Wittke	6.99	20.81	7.28	21.07	5.57	16.08	5.75	16.28	4.26	11.72	4.39	11.89
Biosca	6.98	20.69	7.27	20.99	5.55	16.04	5.73	16.24	4.25	11.69	4.38	11.86
Average	6.98	20.70	7.27	20.99	5.56	16.04	5.74	16.25	4.25	11.70	4.39	11.88
Settlement by back pressure	13.72 (66.29%)		13.72 (65.37%)		10.48 (65.37%)		10.52 (64.71%)		7.45 (63.68%)		5.80 (42.79%)	

정량적인 수치로 비교해보면, 토피고가 10 m일 때, 최대 막장압을 적용하고 가장 큰 뒤채움압인 Ramirez 모델(뒤채움압 = 1110.45 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 13.48 mm, 가장 작은 뒤채움압인 Wittke 모

델(뒤채움압 = 700 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 13.82 mm이다. 최소 막장압을 적용했을 때는 가장 큰 뒤채움압인 Ramirez 모델(뒤채움압 = 1021.35 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 13.52 mm, 가장 작은 뒤채움압인 Wittke 모델(뒤채움압 = 700 kPa)을 적용했을 때의 뒤채움에 의한 침하량은 13.79 mm이다. 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압 변화에 대한 침하량은 0.00083 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때는 0.00050 mm/kPa이다. 같은 방법으로 토피고가 20 m, 30 m에서 구했을 때, 각각 최대 막장압을 적용했을 때 0.00029 mm/kPa, 0.00013 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때 0.00022 mm/kPa, 0.00024 mm/kPa이다. 불포화 조건과 마찬가지로 토피고가 높아질수록 지표 침하에 대한 뒤채움압의 영향은 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 불포화 조건에서와는 다르게 포화 조건에서는 오히려 최소 막장압을 적용했을 때 보다 최대 막장압을 적용했을 때 미소하게나마 그 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

5.3.2 천단침하 양상

(1) Case 2의 조건에서 토피고 변화에 따른 뒤채움압 모델별 천단침하 양상

Table 10은 굴착 지반 조건이 Case 2이고 터널 상부 토피고(ground cover)가 각각 10 m, 20 m, 30 m 일 때, 최대·최소 막장압 그리고 뒤채움압 모델들을 각각 적용하였을 때의 천단침하량(굴진 중 쉴드 막장면이 관측점에 도달했을 때의 침하량(Face in Table 10)과 최종 침하량(Final in Table 10))을 나타내고 있다. 분석 결과, 침하 경향은 전체적으로 불포화 조건에서의 지표 침하(Table 8) 양상과 유사하다.

Table 10. Crown settlement according to face and backfill pressure (case 2)

Ground cover	Cover = 10 m				Cover = 20 m				Cover = 30 m			
	Max		Min		Max		Min		Max		Min	
	Ground settlement (mm)											
	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final
Gatti and Cassani	1.62	5.45	5.73	8.62	12.6	25.92	20.97	30.26	1.62	5.45	5.73	8.62
Peila	1.63	5.49	5.73	8.78	12.6	25.95	20.97	30.33	1.63	5.49	5.73	8.78
Ramirez	1.62	5.47	5.73	8.83	12.6	25.95	20.97	30.34	1.62	5.47	5.73	8.83
C.V	1.62	5.27	5.73	8.56	12.6	25.92	20.97	30.29	1.62	5.27	5.73	8.56
Mollon	1.62	5.30	5.73	8.48	12.6	25.87	20.98	30.20	1.62	5.30	5.73	8.48
Wittke	1.62	5.38	5.73	8.56	12.6	25.89	20.98	30.23	1.62	5.38	5.73	8.56
Biosca	1.62	5.22	5.73	8.40	12.6	25.87	20.98	30.20	1.62	5.22	5.73	8.40
Average	1.62	5.37	5.73	8.61	12.6	25.91	20.97	30.26	1.62	5.37	5.73	8.61
Settlement by back pressure	3.75 (69.81%)		2.88 (33.41%)		13.31 (51.37%)		9.29 (30.70%)		17.54 (41.29%)		13.22 (28.70%)	

정량적인 수치로 비교해보면 토피고가 10 m일 때, 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압 변화에 대한 침하량은 0.00158 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때는 0.00183 mm/kPa이다. 같은 방법으로 20 m, 30 m에서 구했을 때, 각각 최대 막장압을 적용했을 때 0.00027 mm/kPa, 0.00042 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때 0.00034 mm/kPa, 0.00061 mm/kPa이다. 지표 침하와 비교했을 때, 뒤채움압의 영향은 전체적으로 커지며 지표 침하와는 반대로 최소 막장압을 적용했을 때보다 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압의 영향이 큰 것을 확인하였다. 이는 막장압에 따른 뒤채움압의 산정값이 막장압에 따라 커지면서 지표보다 천단에서 뒤채움압의 영향이 즉각 반영됨으로 기인한 것으로 판단된다. 또한 토피고가 증가할수록 천단 침하에 대한 뒤채움압의 영향은 줄어든다.

(2) Case 5의 조건에서 토피고 변화에 따른 뒤채움압 모델별 천단침하 양상

Table 11은 Table 10과 동일하게 산정된 천단 침하량이나, 단지 지반 조건이 포화 조건인 Case 5인 경우이다. 분석 결과, 전체적인 경향은 불포화 조건(Table 10)의 지표 침하 양상과 유사하였다.

정량적인 수치로 비교해보면 토피고가 10 m일 때, 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압 변화에 대한 침하량은 0.00197 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때는 0.00118 mm/kPa이다. 같은 방법으로 20 m, 30 m에서 구했을 때, 각각 최대 막장압을 적용했을 때 0.00027 mm/kPa, 0.00007 mm/kPa, 최소 막장압을 적용했을 때 0.00134 mm/kPa, 0.00117 mm/kPa이다. 불포화 조건에서의 천단 침하와 마찬가지로 지표 침하와 비교했을 때, 뒤채움압의 영향은 전체적으로 커지며 최소 막장압을 적용했을 때보다 최대 막장압을 적용했을 때 뒤채움압의 영향이 큰 것을 확인하였다. 이는 막장압에 따른 뒤채움압의 산정값이 막장압에 따라 커지면서 지표보다 천단에서 뒤채움압의 영향이 즉각 반영됨으로 기인한 것으로 판단된다.

Table 11. Crown settlement according to face and backfill pressure (case 5)

Ground Cover	Cover = 10 m				Cover = 20 m				Cover = 30 m			
	Max		Min		Max		Min		Max		Min	
	Ground settlement (mm)											
	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final	Face	Final
Gatti and Cassani	9.30	30.61	9.95	31.19	9.63	42.06	10.29	42.75	9.30	30.61	9.95	31.19
Peila	9.29	30.53	9.95	31.23	9.63	42.07	10.29	42.77	9.29	30.53	9.95	31.23
Ramirez	9.25	29.72	9.91	30.49	9.60	41.92	10.26	42.64	9.25	29.72	9.91	30.49
C.V	9.28	30.31	9.94	31.01	9.62	42.03	10.28	42.74	9.28	30.31	9.94	31.01
Mollon	9.28	30.31	9.93	30.89	9.61	41.98	10.27	42.67	9.28	30.31	9.93	30.89
Wittke	9.30	30.58	9.95	31.16	9.62	42.04	10.28	42.73	9.30	30.58	9.95	31.16
Biosca	9.29	30.42	9.94	31.01	9.62	42.01	10.28	42.71	9.29	30.42	9.94	31.01
Average	9.28	30.35	9.94	31.00	9.62	42.01	10.28	42.72	9.28	30.35	9.94	31.00
Settlement by back pressure	21.07 (69.41%)		21.06 (67.94%)		32.40 (77.11%)		32.44 (75.94%)		35.73 (77.28%)		35.77 (76.34%)	

5.3.3 수치해석 결과 분석

불포화 및 포화 지반조건에서 지표 및 천단부에서의 최종 침하량은 적용 뒤채움압 보다는 적용 막장압의 영향이 더 큰 것을 확인하였다. 적용 막장압과 적용 뒤채움압에 따른 지반 거동의 양상은 비슷하지만 지표에서보다는 천단에서 뒤채움압이 작용함에 따라 즉시 변위가 발생한다. 또한 지표와 천단부에서 모두 토피고가 증가함에 따라 뒤채움압의 영향은 감소하고, 적용 막장압이 작을수록 뒤채움압의 영향은 커지는 것을 확인하였다. 그러나 불포화 지반조건에서는 토피고가 높아짐에 따라 지표 침하가 증가하는데, 포화 지반조건에서는 오히려 감소하는 것을 확인하였다. 이는 토피고가 증가함에 따라 이완 하중 개념이 적용되어 침하가 감소하는 것으로 판단된다. 이에 반해 천단부에서의 침하는 터널 굴착과 뒤채움압의 적용에 따라 즉각 반응하므로 토피고가 높아질수록 불포화 및 포화 지반조건 두 경우 모두 증가하는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구는 쉘드 TBM 터널 굴착 시 지표 침하를 최소화하기 위한 설계단계에서의 뒤채움압 산정에 대한 연구로써, 뒤채움압 산정 방법에 대한 연구와 모델별 뒤채움압을 적용한 수치해석을 통해 이루어졌다. 총 7가지 뒤채움압 산정 방법을 가상의 지반조건을 설정하여 지반 정수와 토피고를 달리하면서 그에 따른 뒤채움압을 산정하였으며, 산정된 뒤채움압을 수치해석에 적용함으로써 뒤채움압이 지표침하와 천단침하에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서 가정한 지반조건에서, 7가지 뒤채움압 산정방법의 산정 뒤채움압은 불포화 지반조건에서는 Mollon 모델이 가장 크게, Peila 모델이 가장 작게 산정되었다. 포화 조건에서는 Ramirez 모델이 가장 크게, Peila 모델이 가장 작게 산정되었다. 전체적으로 포화 조건보다 불포화 조건에서 각 모델별로 산정된 뒤채움압의 차이가 큰 것을 확인하였다.
2. 토피고가 증가함에 따라 불포화 지반조건 및 포화 지반조건 모두 뒤채움압은 증가하지만, 토피고가 증가할수록 토피고의 영향은 점점 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 막장압에 근거한 뒤채움압 산정 방법인 Peila 모델, Ramirez 모델, C.V 모델에서 적용된 막장압이 토피고에 비례하지 않고 일정 토피고보다 클 때는 터널 상부의 토체의 전체 하중으로 고려하지 않고 이완 하중으로 작용하는 경향을 보이기 때문으로 판단된다.
3. 불포화 지반조건일 때, 지표에서보다 천단부에서 뒤채움압에 대해 더욱 민감하게 반응하고, 토피고가 증가할수록 지표 침하와 천단 침하에 대한 뒤채움압의 영향은 감소하는 것을 확인하였다. 또한 막장압을 달리 하여 수치해석을 수행하였을 때, 막장압이 작을수록 지반 침하에 대한 뒤채움압의 영향이 커지는 것을 확인하였다.
4. 포화 지반조건일 때, 불포화 지반조건과 마찬가지로 지표에서보다 천단에서 뒤채움압에 대해 더욱 민감하게 반응하고, 토피고가 증가할수록 지표 침하와 천단 침하에 대한 뒤채움압의 영향은 감소하는 것을 확인하였다.
5. 불포화 지반조건일 때, 토피고가 높아짐에 따라 지표 침하 및 천단 침하가 증가함을 확인하였다. 그러나 포화

지반조건일 때, 지표 침하는 토피고가 높아짐에 따라 오히려 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 천단 침하와는 다르게 터널 굴착에 즉시 반응하지 않으며, 토피고가 높아짐에 따라 이완 하중 개념이 적용되어 침하가 감소하는 것으로 판단된다. 이에 반해 천단 침하의 경우 터널 굴착과 뒤채움압의 적용에 따라 천단 변위가 즉각적으로 반응하여 토피고에 따라 침하량도 증가하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2016학년도 건국대학교의 연구년교원 지원 및 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Anagnostou, G., Kovari, K. (1996), "Face stability conditions with earth-pressure -balanced shields", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 165-173.
2. Biosca, F., Bono, R. (2008), "Construccion de la linea 9 del metro de Barcelona", *Obras Urbanas Magazine*, pp. 1-8.
3. DIN 4085 (2011), "Baugrund-Berechnung des Erddrucks", pp. 1-22.
4. Gatti, M.C., Cassani, G. (2007), "Ground loss control in EPB TBM Tunnel excavations", *Underground space-the 4th dimension of metropolis*, Proceedings of the world tunnel congress, Prague, pp. 1141-1146.
5. Kim, K.H., Kim, H., Mun, C.H., Kim, Y.H., Kim, D.H., Lee, J.Y. (2017), "A study on the establishment of domestic criteria through analysis of shield TBM requirements in overseas ITB (Invitation to Bid)", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 6, pp. 985-997.
6. Lee, G.J., Kwon, T.H., Kim, K.Y., Song, K.I. (2017), "Relationship between brittleness index of hard rocks and TBM penetration rates", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 4, pp. 611-634.
7. Lovera, V. (2010), "Tunnelling with full face shield machines: study of the backfill of the tail void", Ph.D. Thesis, Central University of Venezuela, pp. 31-49.
8. Mollon, G., Dias, D., Soubra, A.H. (2013), "Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements", *Acta Geotechnica*, Vol. 8, No. 2, pp. 181-199.
9. Murayama, S. (1966), "Review of excavation performance of mechanized shield from viewpoint of soil mechanics", *Proceedings of the 1st Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 12-17.
10. Peila (2010), "Personal communication".
11. Ramirez (2010), "Personal communication".
12. Seong, J.H., Youn, J.U. (2017), "Identification and importance analysis of hazards affecting the stability

- of TBM tunnelling works”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 6, pp. 973-983.
13. Wittke, W. (2007), “Stability analysis and design for mechanized tunnelling”, WBI-PRINT6, pp. 16-22.
 14. Yu, J.S. (2016), “Evaluation of the face pressure for slurry shield TBM”, Master Thesis, Konkuk University, pp. 34-55.