

실드 TBM 터널의 gap parameter와 뒤채움재를 고려한 수치모델링 방법에 대한 연구

유광호^{1*} · 김영진²

¹정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 교수

²정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 석사과정

A study on numerical modeling method considering gap parameter and backfill grouting of the shield TBM tunnel

You, Kwang-Ho^{1*} · Kim, Young-Jin²

¹Member, Prof., School of Civil Environment Energy Eng., Univ. of Suwon

²Member, Graduated Student, School of Civil Environment Energy Eng., Univ. of Suwon

*Corresponding Author : You, Kwang-Ho, khyou@suwon.ac.kr

Abstract

Backfill grouting and realistic convergence distribution were not properly considered in previous studies on 2D numerical analysis of a shield TBM tunnel. In this study, a modeling method was suggested to cope with this problem by considering a realistic convergence distribution and proper properties of backfill grouting. To this end, the influence of gap parameter and depth of rock cover on volume loss and composed of ground volume loss around tunnel excavation and surface volume loss were analyzed with a single layer of weathered soil. As a result, most of surface settlements were occurred immediately after excavation. Additional, as depth of rock cover and gap parameter increased, the influence range of surface settlement curves obtained from 2D numerical analyses became broader than a suggested theoretical equation. Therefore, it is inferred that gap parameter should be applied based on load distribution ratio and the property of backfill grouting properly considered for the estimation of the precise behavior of a shield TBM tunnel in 2D numerical analysis.

Keywords: Shield TBM, Gap parameter, Volume loss, Surface settlement, Backfill grouting

초 록

실드 TBM 터널에 대한 2차원 수치해석 시 기존 연구에서는 뒤채움재 및 실제적인 내공 변위 분포를 적절히 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하고자 gap

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(5)799-812(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.5.799>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 21, 2017

Revised September 8, 2017

Accepted September 19, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

parameter 적용 시 굴착면에서 발생하는 실제적인 내공변위분포를 고려하고, 적절한 뒤채움재 물성치를 적용한 모델링 방법을 제시하였다. 이를 위해 단일층 풍화토 지반을 대상으로 gap parameter와 토피코가 굴착면의 지반손실량과 지표 손실량으로 구성되는 체적손실량에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 대부분의 지표침하가 굴착 직후에 발생하였으며, 토피코 및 gap parameter가 증가할수록 수치해석을 통해 얻은 지표침하곡선의 영향범위가 제안된 이론식보다 넓게 나타났다. 따라서 2차원 수치해석 시 쉴드 TBM 터널의 거동을 정확히 평가하기 위해서는 하중분담률을 이용하여 gap parameter를 적용하고, 뒤채움재의 물성치도 적절히 고려해야 한다고 판단된다.

주요어: 쉴드 TBM, gap parameter, 체적손실량, 지표침하, 뒤채움재

1. 서론

쉴드 TBM 공법은 굴진면에 압력을 가하여 변형을 억제함으로써 안정을 도모하며, 강성이 큰 쉴드가 굴착면의 변형을 억제한다. 또한 쉴드 통과 후 쉴드 후미의 빈 공간인 테일보이드(tail void)를 그라우팅 하여 지반변형을 억제한다(Oh et al., 2017). 이와 같은 특징으로 인하여 침하에 민감한 지역 및 연약한 지반에 쉴드 TBM 공법이 적용되고 있음에도 불구하고 실제 시공 시 침하가 발생하는 것으로 계속되고 있다. 따라서 토피코, 지반조건 등이 터널 굴착 시 주변지반에 어떠한 영향을 미치는지를 분석할 필요가 있다.

기존 쉴드 TBM 굴착 시 지반거동을 분석하기 위해 주로 사용되는 방법인 변위조절모델(Displacement Controlled Model, DCM)은 굴착원과 세그먼트 라이닝 원이 인버트에서 접하고 천단부에서 최대변위가 발생한다고 가정한다(Koh et al., 2011; Nam et al., 2017; Son and Yun, 2009). 이러한 방법은 뒤채움재를 고려하지 못하고, 내공변위를 인위적으로 발생시키므로 실제적인 양상을 고려하지 못하는 문제점이 있다.

이러한 DCM 방법의 단점을 보완하기 위해 You and Kim (2017a; 2017b)은 쉴드 TBM 터널 2차원 수치해석 시 gap parameter를 적용한 모델링 방법을 제시하여 기존연구보다 굴착 시의 안정성을 정확히 분석하고자 하였다. You and Kim (2017a)은 하중분담률과 테일보이드 감소계수(α)를 달리함으로써 쉴드 TBM 굴착 시의 안전율을 산출하였다. 하지만 경화되지 않은 뒤채움재 물성치를 적용하였고, 인버트에서 세그먼트와 지반 사이가 접촉되어있지 않고 이격되어 있어 그 사이의 공간을 뒤채움재로 채워서 모델링하였기 때문에 기존 터널 해석보다 변위가 많이 발생하는 불안정한 결과가 산출되었다. 한편 You and Kim (2017b)은 인버트와 천단부에서 발생하는 내공변위의 합을 gap parameter로 간주하고 하중분담률을 적용하여 DCM 방법보다 실제적인 변위양상을 고려하였다. 이 연구에서 제안한 방법이 DCM 방법보다 더 작은 지반손실률과 라이닝의 휨응력을 주기 때문에 경제적인 설계에 사용될 수 있을 것으로 기대되나, 뒤채움재를 적용하지 않은 점에서 DCM 모델링 방법과 큰 차별성이 없었다.

따라서 본 연구에서는 특정 gap parameter에 해당되는 내공변위가 발생되도록 하중분담률을 시행착오법으로 산정하여 보다 실제적인 내공변위 양상을 고려하였다. 그리고 변형된 지반과 세그먼트 사이의 공간은 경화된 뒤채움재가 채워지는 것으로 적용하여 보다 정확하게 쉴드 TBM 터널의 거동을 평가하고자 하였다. 또한 연약지반

에 시공되는 쉴드 TBM 터널을 모사하기 위해 지반조건을 풍화토인 단일층으로 적용했다. 단, 그라우팅은 동시 주입조건 하에서 발생한다고 가정하였다. 최종적으로, 범용 지반해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용한 수치해석을 통해 gap parameter, 지반조건, 토피고가 지반 및 지표손실량에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 쉴드 TBM 터널

2.1 뒤채움 주입방식

쉴드 굴착 시 굴착면과 세그먼트 사이에는 테일보이드(tail void)가 발생하게 된다. 이를 그대로 방치하면 과도한 지반침하가 발생하기 때문에, 터널 굴착 직후 조속하게 충전함으로써 구조적 안정성 확보가 가능하다.

뒤채움 주입방식은 Fig. 1과 같이 크게 3가지로 나뉜다. 먼저 동시주입방식은 테일보이드 발생과 주입·충전 처리가 시차가 없는 상태로 수행하는 방식으로써 가장 이상적인 방법이다. 주입관은 일반적으로 쉴드기 외측에 설치되며 지반침하를 최소화 할 수 있지만 작업공정이 복잡하다는 단점이 있다. Fig. 1(b)와 같이 반동시주입방식은 세그먼트에 설치된 그라우트홀이 쉴드의 테일에서 이탈함과 동시에 그라우트홀에서 뒤채움 주입을 실시한다. 지반침하는 중간 정도이나, 테일보이드 발생과 뒤채움재 충전과의 시차를 단축하기 위한 최적의 그라우팅 홀의 위치를 선정해야하고 작업공정이 복잡하다는 단점이 있다. 마지막으로 즉시주입방식은 1링 굴진을 완료하고 뒤채움재를 주입하는 방법으로써, 시공성이 우수하지만 임반조건이 좋은 경우에 한해서 사용된다.

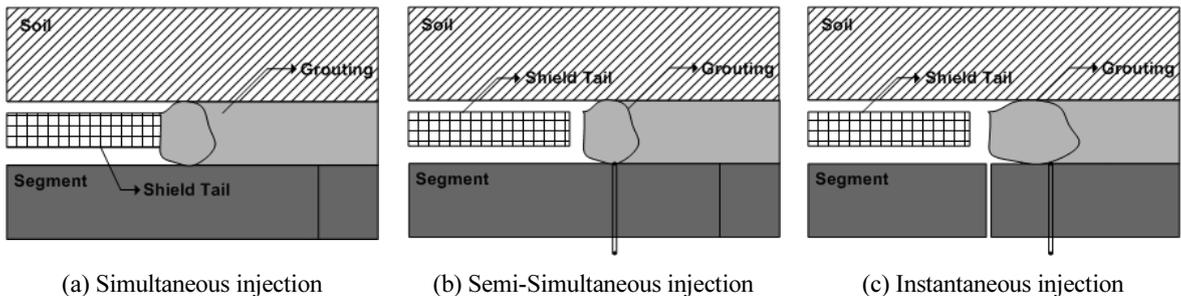


Fig. 1. Backfilling injection methods

2.2 Gap parameter

쉴드 TBM 굴진 시 커터외경, 쉴드외경, 세그먼트 외경의 차이로 인해 불가피하게 공극이 발생하게 되며 체적 손실이 발생하게 된다. Gap parameter는 쉴드 TBM 터널 시공 중에 발생하는 체적 손실(굴진면 손실, 굴진 시의 과굴착, 테일보이드에 의한 변형)에 의한 변위를 정량화시켜 수치해석 모델 상에 입력시킬 수 있도록 한 것으로서 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, gap parameter는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다(Chi et al., 2001).

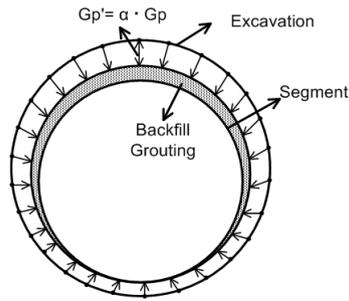


Fig. 2. The Concept diagram of shield TBM (You and Kim, 2017b)

$$G = G_p' + U_{3D} + w \tag{1}$$

여기서, G_p' = 테일보이드에서의 변형

U_{3D} = 굴진면에서 발생하는 등가 3차원 탄소성 변형

w = 시공 숙련도에 따른 굴진면의 방사방향 변위

그러나 연약지반에서 쉴드 TBM 터널 굴착 시는 변위 최소화를 위해 세그먼트 설치와 동시에 뒤채움이 실시되므로 고려된 gap parameter 전체가 지반침하로 연결되지 않는다. 따라서 이러한 점을 고려하지 않고 침하량을 검토할 경우 지표침하량이 크게 산정되어 과다설계가 될 우려가 있다. Gap parameter의 개념을 최초로 정립한 Lee and Rowe (1992)는 동시주입에 의한 gap parameter의 감소를 고려할 수 있도록 식 (2)를 제시하였다.

$$G_p' = \alpha G_p \tag{2}$$

여기서, α = 그라우팅에 따른 테일보이드 감소계수

G_p = 일반적인 테일보이드($2\Delta + \delta$)

Δ = 쉴드장비 스킨플레이트와 라이닝 사이의 공간

δ = 라이닝을 설치하는데 필요한 공간

식 (2)에서 α 값은 지반조건에 따른 테일보이드 감소계수로서 견고한 점토지반에서는 터널 침하속도가 굴착속도보다 느리므로 테일보이드 전체가 뒤채움재로 주입되는 것으로 간주하여 $\alpha \approx 0$ 으로 볼 수 있다. 반면 느슨한 사질토 지반에서는 즉시침하 형태로 발생하므로 $\alpha \approx 1$ 로 가정할 수 있다. 또한 Chi et al. (2001)은 동시주입조건에서 gap parameter가 점토지반에선 60~80% 축소되었으며 사질토지반에서는 70~80% 축소된 연구결과를 발표하였다.

2.3 지표손실량 예측

터널굴착 시 발생하는 지반변위가 주변 시설물과 구조물에 주는 영향을 분석하기 위해서는 우선 구조물이 위치해있는 지점의 지반변위를 예측해야 한다. Fig. 3과 같이 터널굴착으로 인해 발생하는 지표침하를 예측하기 위해 Peck (1969)은 실제 현장의 계측결과를 분석하여 지표침하곡선은 Gauss 분포곡선을 따르며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다고 제시하였다. 이와 같이 산출된 지표침하곡선의 영향범위(w)는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 터널 직상부로부터 변곡점까지 거리(i)에 2.5를 곱하여 계산할 수 있다.

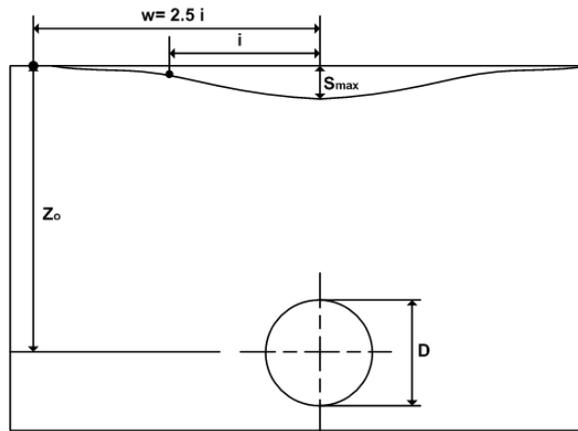


Fig. 3. The concept of surface settlement

$$S = S_{max} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (3)$$

여기서, S_{max} = 터널 직상부의 최대지표침하

S = 터널 직상부로부터 거리가 x 인 지점의 지표침하량

i = 침하곡선의 변곡점까지 거리

지표침하곡선 관계식에서 i 는 침하 영향범위를 결정하는 주요한 변수이다. i 가 크면 침하 영향범위가 확대되고, 반대로 i 가 작으면 침하 영향범위가 줄어든다. 따라서 i 값을 결정하기 위하여 O'Reilly and New (1982)는 Table 1과 같은 관계식을 제안하였고, Peck (1969)은 Fig. 4와 같이 암반과 토사지반이 포함된 17개 자료를 기반으로 터널반경(R), 깊이(Z_0) 그리고 지반조건을 알면 i 값 및 침하 영향범위($w=2.5i$)를 결정할 수 있게 하였다.

Table 1. Suggested equations for positioning of inflection point considering ground and layer conditions (O'Reilly and New, 1982)

Layer	Ground Condition	Suggested Equation
Single	Clay	$i = 0.43z_0 + 1.1$
	Sand	$i = 0.28z_0 - 0.1$
Multi	Sand (upper), Clay (lower)	$i = 0.43z_a + 0.28z_b + 1.11$
	Clay (upper), Sand (lower)	$i = 0.43z_a + 0.43z_b - 0.12$

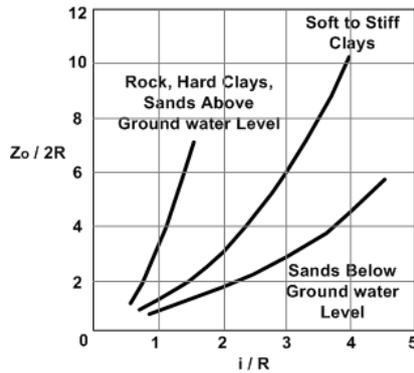


Fig. 4. Coefficient for positioning inflection point (Peck, 1969)

3. 수치해석 모델링

3.1 Gap parameter를 고려한 수치해석 모델링

본 연구에서는 유한차분법을 이용한 지반 범용 해석프로그램인 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 2D를 사용하여 Fig. 5와 같이 해석단면을 모델링하였다. 해석영역의 경계는 해석 결과에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 터널의 좌, 우측 굴착면을 기준으로 각각 터널 직경의 3배, 터널 인버트로 부터 아래로 2배 만큼을 해석영역으로 설정하였다. 또한 지반조건은 연약지반에 굴착되는 쉴드 TBM 터널을 모사하기 위하여 풍화토 단일층 지반으로 하였으며, 토피고에 따른 지표침하곡선의 경향을 알아보기 위하여 토피고를 10, 20, 30, 40 m로 적용하였다. 그리고 터널의 굴착직경과 세그먼트 라이닝의 직경은 Cho (2008)의 연구를 참고하여 각각 8.5, 8.2 m로 설정하였다. 그리고 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델, 터널의 세그먼트는 FLAC 2D에서 제공하는 파괴를 고려할 수 있는 구조부재 (structure element)인 liner 요소를 이용하여 모델링하였다.

터널주변영역(좌, 우 0.8D, 하부로 1D, 상부는 지표까지)은 해석의 정확도를 높이기 위하여 요소의 크기를 25 cm²의 정사각형으로 적용하였고, 외곽으로 갈수록 요소크기가 점차 커지도록 모델링하였다. 따라서 본 해석에서 고려되는 영역은 터널의 중심부를 기준으로 좌, 우 29.75 m 하부 21.25 m로 적용하였다. 그리고 해석요소망의 좌, 우 경계는 수평방향의 변위를 구속하였으며, 최하단은 수직방향의 변위를 구속하였다.

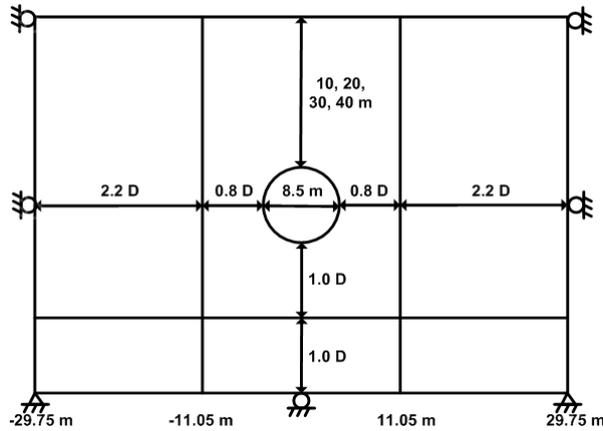


Fig. 5. Generals of the analysis section

Table 2. Load distribution ratio considering depth of rock cover and gap parameter

Depth of Rock Cover (m)	Gap (cm)	Load Distribution Ratio (%)
10	5	55
	10	77
	15	84
20	5	33
	10	58
	15	70
30	5	23
	10	39
	15	55
40	5	18
	10	30
	15	43

본 연구에서는 좀 더 현실적으로 쉴드 TBM 터널 굴착 단계를 모사하기 위해 원하는 gap parameter를 발생시키는 하중분담률을 찾고자 하였다. 먼저 굴착외경 내부의 지반을 제거한 후 터널의 천단과 인버트에서 발생한 변위의 합을 gap parameter로 하여 그 합이 각각 5, 10, 15 cm에 상응하는 하중분담률을 시행착오법을 통해 산정하였다. 이를 위해 터널 굴착 시의 하중분담률을 5%로 부터 5%씩 증가시켜가며 적용하고자 하는 gap parameter가 발생할 때의 하중분담률을 근사적으로 찾았다. 그 후 원하는 gap parameter가 발생할 것으로 예측되는 구간에서의 하중분담률을 1%씩 증가시키면서 최종적으로 특정 gap parameter가 발생하는 하중분담률을 Table 2와 같이 산출하였다. 그 후 세그먼트 라이닝을 설치하고 변위가 발생한 굴착외경과 세그먼트 라이닝 사이의 공간을 뒤채움재로 채워서 터널 굴착 단계를 모사하였다.

3.2 매개변수 및 물성치

본 연구에서는 단일층의 풍화토 지반에 굴착되는 굴착외경 8.5 m, 세그먼트 외경 8.2 m의 쉘드 TBM 터널을 대상으로 gap parameter와 토피고를 변화시켜가며 지반 및 지표침하에 대해 분석하고 터널의 안정성을 살펴보았다. 최종적으로 본 연구에서 사용된 매개변수의 조합을 통하여 토피고 10, 20, 30, 40 m (4가지) × gap parameter 5, 10, 15 cm (3가지)로 총 12가지 경우에 대해서 민감도분석을 수행하였다.

본 수치해석에 사용된 풍화토의 물성치는 OO 설계회사가 실시설계에 사용한 자료(Western Metro, 2016)를 참고하여 Table 3과 같이 적용하였다. 그리고 축압계수(K_0)는 모든 경우에서 동일하게 1.0을 적용하였다. 또한 세그먼트 라이닝과 지반 사이 공간에 주입되는 뒤채움재의 경우 You et al. (2007)이 적용한 물성치를 참고하여 적용하였다.

해석에 사용된 세그먼트 라이닝의 물성치는 You et al. (2017)에서 쉘드 TBM 터널 세그먼트 라이닝에 적용한 물성치를 참고하여 Table 4와 같이 적용하였다. 또한 세그먼트 라이닝의 설계기준강도인 45 MPa을 기준으로 허용휨압축응력과 허용휨인장응력을 각각 26.5, 1.3 MPa로 적용하였다.

Table 3. Properties of ground and backfill grouting

Type	Unit Weight (kN/m ³)	Deformation Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Friction Angle (°)	Cohesion (kPa)
Weathered Soil	19	25	0.32	29	20
Backfill	20	24.6	0.3	35	82.7

Table 4. Properties of segment lining

Elastic Modulus (GPa)	Moment of Inertia (m ⁴)	Thickness (m)	Allowable Bending Compressive Stress (MPa)	Allowable Bending Tensile Stress (MPa)	Residual Stress (MPa)
31.0	7.59×10^{-3}	0.45	26.5	1.3	0.65

4. 수치해석 결과 분석

본 연구에서는 2차원 수치해석을 통해 토피고, gap parameter가 쉘드 TBM 터널의 안정성에 미치는 영향을 지반 및 지표손실량의 상관관계 분석을 통해 살펴보았다. 더 나아가 일반적으로 사용되는 지표침하 예측 식을 이용한 곡선과 본 수치해석에서 적용한 파라미터가 달라질 때의 지표침하 곡선을 비교·분석하였다.

4.1 Gap parameter가 체적손실에 미치는 영향

쉘드 TBM 터널 굴착 시 발생하는 gap parameter가 체적손실량(volume loss)에 미치는 영향을 터널 굴착면에

서 발생하는 지반손실량과 지표면에서 발생하는 지표손실량으로 나누어 살펴보았다. 본 연구에서는 계획된 굴착 면적에서 터널 굴착 시 내공변위가 발생한 후의 면적을 뺀 값을 지반손실량으로 정의하였다. 이 때 지반 및 지표 손실량은 FLAC의 내부 프로그램인 FISH를 이용하여 원래의 터널 및 지표면의 좌표에서 변위/침하로 인해 이동된 좌표를 산출하고, 페다각형의 면적을 구하는 공식인 좌표법(Joo, 2016)을 이용하여 구하였다.

Table 5는 gap parameter가 5, 10, 15 cm로 달라질 때 발생하는 지반손실량 및 지표손실량을 굴착 직후와 지보 완료 두 가지의 해석 단계로 나누어 나타낸 것이다. 지반손실량은 터널의 면적과 굴착 후 변형이 발생했을 때의 면적의 차를 계산하여 산출하였고, 지표손실량은 터널 굴착 시 Fig. 3에 나타난 지표침하곡선 내의 면적을 구하여 산출하였다.

Table 5. Ground and surface volume loss considering gap parameter

Depth of Rock Cover (m)	Gap (cm)	Ground Volume Loss			Surface Volume Loss		
		After Excavation (m ³)	Support Completion (m ³)	Total	After Excavation (m ³)	Support Completion (m ³)	Total
10	5	0.61	3.29	3.90	0.16	0.19	0.35
	10	1.13	2.78	3.91	0.37	0.30	0.67
	15	1.91	1.99	3.90	0.92	0.25	1.17
20	5	0.61	3.30	3.91	0.19	0.25	0.44
	10	1.37	2.55	3.92	0.68	0.31	0.99
	15	1.95	1.95	3.90	1.07	0.32	1.39
30	5	0.60	3.32	3.92	0.18	0.28	0.46
	10	1.28	2.62	3.90	0.63	0.34	0.97
	15	1.90	2.01	3.91	1.12	0.34	1.45
40	5	0.62	3.31	3.93	0.15	0.34	0.49
	10	1.24	2.66	3.90	0.56	0.42	0.98
	15	2.33	1.59	3.92	1.14	0.38	1.52

분석 결과 토피고와 관계없이 gap parameter가 5 cm씩 증가할 때 굴착 직후의 지반손실량은 평균 0.7 m³씩 증가하였으며 지보완료가 되었을 때는 평균 0.3 m³씩 감소하였다. 이는 gap parameter가 작게 발생할수록 굴착 직후에 가해지는 하중분담률이 작기 때문에 지반손실량이 작아졌다고 판단된다. 그리고 지반이 분담하지 않는 하중은 이후 지보 단계에서 모두 분담하기 때문에 gap parameter가 증가할수록 지보완료 시의 지반손실량이 감소하는 경향을 보였다고 판단된다. 또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 gap parameter와 토피고가 증가할 때 총 지반손실량은 약 3.91m³로 산출되어 이론적 지반손실량이 3.94m³임을 감안할 때, 토피고와 gap parameter가 총 지반손실량에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이는 Table 3에서 보는 바와 같이 뒤채움재의 변형특성이 주변 지반인 풍화토와 유사하기 때문이라고 판단된다.

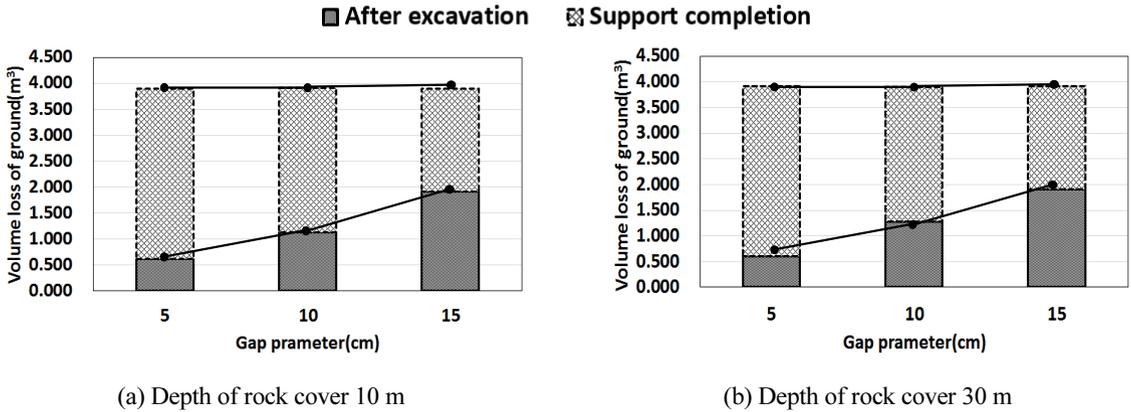


Fig. 6. Influence of gap parameter for ground volume loss

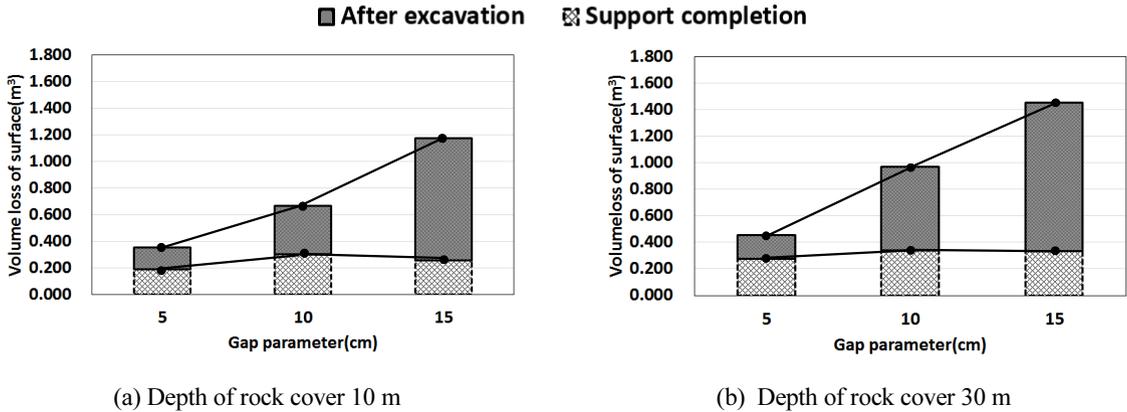


Fig. 7. Influence of gap parameter for surface volume loss

Fig. 7에 나타난 바와 같이 gap parameter가 증가함에 따라서 지반굴착 및 지보완료 시의 지표손실량은 비례적으로 증가하는 경향이 나타났다. 또한 gap parameter가 5 cm 증가할수록 굴착 직후의 지표손실량은 약 2.2 ~ 2.5배씩 증가하였지만, 지보완료 시는 gap parameter가 지표손실량에 거의 영향을 미치지 못하는 것을 Table 5를 통해 확인하였다. 이는 풍화토 지반인 경우 굴착 직후 즉시 침하로 인해 대부분의 지표손실이 발생하기 때문에 세그먼트 라이닝과 뒤채움재로 지보를 한 후에는 지표손실량이 gap parameter에 관계없이 동일하게 발생하였다고 판단된다.

4.2 Gap parameter와 지표침하곡선과의 상관관계

Gap parameter와 토피고가 지표침하에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 8은 토피고가 10 m일 때 gap parameter가 5, 10, 15 cm만큼 발생할 경우의 굴착 직후와 지보완료 시의 지표침하곡선을 수치해석 결과 및 Peck (1969)의 이론식을 이용하여 나타낸 것이다. 지보완료 시의 최대지반침하는 gap parameter가 5, 10, 15 cm일 때 각각 0.79

cm, 1.75 cm, 3.58 cm로써 약 2배 씩 증가하였으며, 변곡점 위치는 6.8, 7, 9.1 m로 중심으로부터 점차 멀어졌다. 또한 Fig. 8(a)와 같이 gap parameter가 5 cm인 경우 Peck의 이론식과 굴착 직후의 지표침하곡선이 유사하게 발생하였다. 하지만 지보 후의 최종침하가 되었을 때는 수치해석결과가 이론식보다 침하 영향범위가 넓고 침하량도 증가하였다. 이는 이론식의 경우 gap parameter를 고려하지 않기 때문에 gap parameter가 증가할수록 수치해석 시 더 큰 지표침하량이 발생하였다고 판단된다.

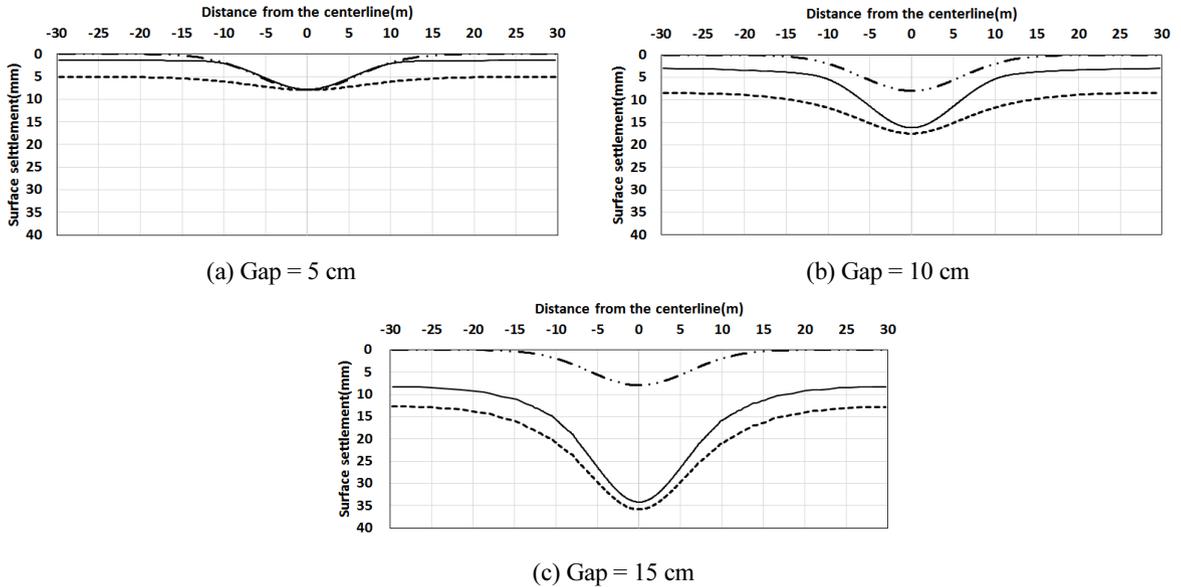


Fig. 8. Surface settlement curve by gap parameter (Depth of rock cover = 10 m)

한편, gap parameter가 5 cm인 경우 토피고가 10 m, 20 m, 30 m, 40 m로 달라질 때 지표침하곡선을 Fig. 8(a), Fig. 9와 같이 나타내었다. 그래프와 같이 동일조건에서 토피고가 10 m 증가할수록 지보완료 시의 최대지표침하는 7.5~8.4 mm 사이로 발생하였다. 반면 굴착 직후의 경우 토피고가 10 m씩 증가할 때 최대지표침하는 평균 1.72 mm씩 감소하였다. 이를 통해 풍화토 지반인 경우 굴착 직후의 침하량이 토피고에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 토피고가 10 m, 20 m인 경우 Fig. 8(a), Fig. 9(a)와 같이 터널 직상부에서 발생하는 최대지표침하가 좀 더 크게 발생하였지만 토피고가 30 m 이상이 될 경우 지표침하곡선이 거의 일직선으로 발생하여 이론식의 침하곡선보다 더 많은 양의 지표침하가 발생하였다. 이는 이론식이 실측치보다 작게 산출된다는 Cording (1991)의 결과에 상응하는 것으로 쉘드 TBM 터널 굴착에 대한 2차원 수치해석 시 굴착 직후의 지표침하뿐만 아니라 지보완료 후의 경우 그리고, gap parameter 및 뒤채움재를 고려할 필요가 있다고 사료된다.

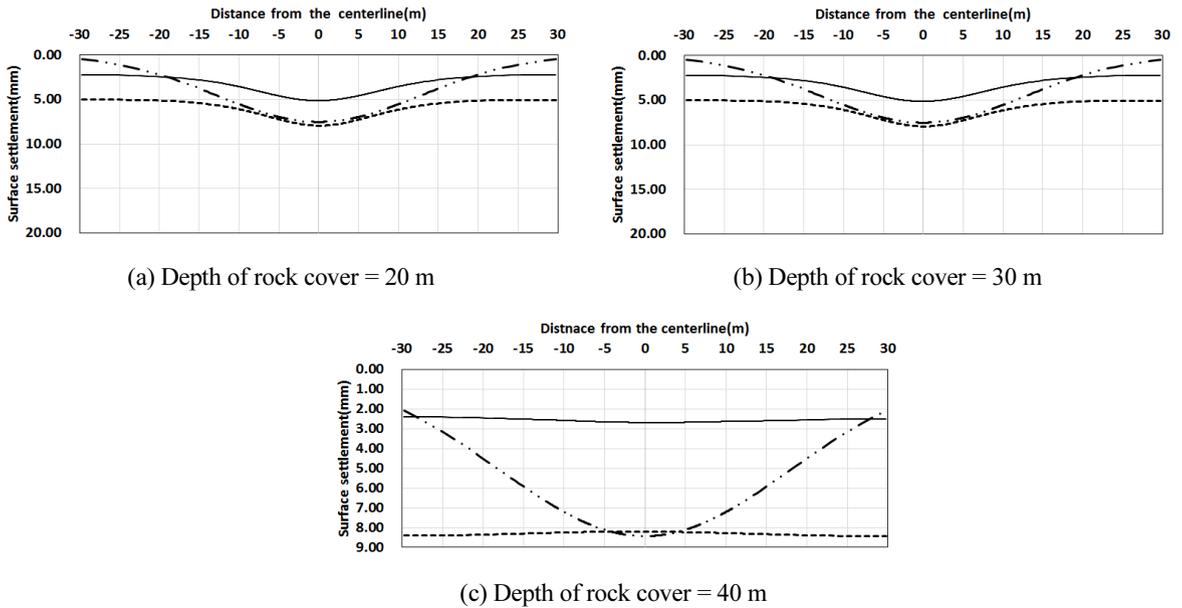


Fig. 9. Surface settlement curve by depth of rock cover (Gap parameter = 5 cm)

4.3 세그먼트 라이닝의 휨응력 비교

Fig. 10은 토피고가 10, 20, 30, 40 m인 경우 gap parameter가 5, 10, 15 cm 발생할 때 세그먼트의 최대휨응력을 도시한 것이다. 그 결과 동일한 gap parameter가 발생한 경우 토피고가 10 m 깊어질 때마다 최대휨응력은 평균 1.6배씩 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 동일한 토피고에서 gap parameter가 증가하는 경우 토피고가 10 m 인 저토피 일 때는 휨응력의 증가량이 적었지만, 토피고가 20 m 이상인 경우 증가량이 커지는 경향이 나타났다. 이는 토피고 증가로 인한 상재하중이 증가함과 동시에 gap parameter가 증가하여 지반이 분담하는 하중이 늘어났기 때문이라고 생각된다.

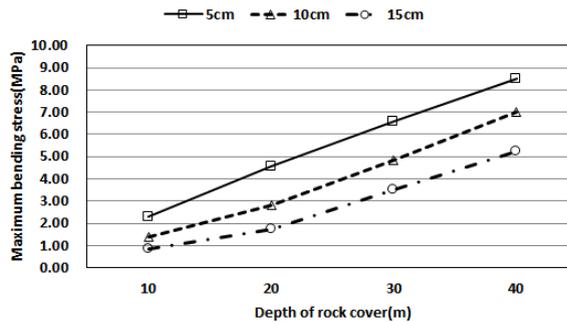


Fig. 10. Influence of gap parameter and depth of rock cover on maximum bending stress

5. 결론

본 연구에서는 쉴드 TBM 터널에 대한 2차원 수치해석 시 gap parameter와 뒤채움재를 적용하여 보다 실제적인 모델링 방법을 제안하고, 토피고, gap parameter가 체적손실에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 풍화토 지반에서 시공되는 굴착직경 8.5 m, 세그먼트 직경 8.2 m인 쉴드 TBM 터널을 대상으로 토피고와 gap parameter를 달리하여 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 풍화토지반에서는 지반손실량이 이론적인 값과 거의 유사하게 산정되어 토피고와 gap parameter가 총 지반손실량에 큰 영향을 못 미치는 것으로 나타났는데, 이는 뒤채움재와 굴착지반의 변형특성이 유사하기 때문이라고 판단된다.
2. Gap parameter가 증가할수록 굴착 직후의 지표손실량만 증가하였고 지보가 완료된 후에는 동일한 토피고인 경우 큰 차이를 보이지 않았으므로, 풍화토 지반에서는 대부분의 지표침하가 지보재 타설 전인 굴착 초기에 발생하는 것이 확인되었다.
3. 토피고가 10 m이고 gap parameter가 5 cm 발생한 경우 굴착 직후의 지표침하곡선은 Peck (1969)의 이론식과 유사한 경향을 보였지만, 지보재 타설이 완료된 경우 및 토피고 및 gap parameter가 증가함에 따라 이론식보다 침하영향범위가 넓어졌으며, 침하량도 증가하였다. 이는 이론식은 굴착 시 발생하는 gap parameter를 고려하지 않을 뿐만 아니라 지반조건을 세부적으로 고려하지 않기 때문이라고 판단된다.
4. 세그먼트의 휨응력은 gap parameter 및 토피고와 비례관계를 보였다. 특히 토피고가 10 m일 때보다 20 m 이상일 때 gap parameter가 증가할수록 휨응력이 더 많이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 토피고 증가로 인한 상재하중이 증가함과 동시에 gap parameter가 증가하여 지반이 분담하는 하중이 늘어났기 때문이라고 판단된다.

본 연구에서 적용한 풍화토 지반의 경우 쉴드 TBM 터널 굴착 시의 지표침하는 대부분 굴착 직후의 단계에서 발생하였다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 지반 및 지층조건을 고려하여 어느 시공단계에서 지표침하의 위험성이 높은지 분석할 필요가 있다고 사료된다.

References

1. Chi, S.Y., Chern, J.C., Lin, C.C. (2001), "Optimized back-analysis for tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 159-165.
2. Cho, J.S. (2008), "Analysis of ground movements and lining segment in shield TBM based on Three dimensional finite element method", Master's Dissertation, Pukyong National University, 58p.

3. Cording, E.J. (1991), "Control of ground movements around tunnels in soil", 9th Pan American Conference, Vina del Mar, Chile. Vol. 4, pp. 2195-2244.
4. Joo, H.S. (2016), Geoinformatics, Korean Studies Information, 865p.
5. Koh, S.Y., Kwon, S.J., Hwang, C.H., Kim, S.I., Choo, S.Y. (2011), "A study on gap parameter and influence area of ground settlement using back analysis constructed by shield TBM with shallow depth", 2011 Spring Annual Conference of the Korean Society for Railway, pp. 1509-1518.
6. Lee, K.M., Rowe, R.K. (1992), "Subsidence owing to tunnelling. II. Evaluation of a prediction technique", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, pp. 941-954.
7. Nam, K.M., Choi, M.K., Kim, J.J., Turab, H.J., Yoo, H.K. (2017), "Stability analysis of an existing utility tunnel due to the excavation of a divergence tunnel emerging from double-deck tunnel", Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 231-248.
8. O'Reilly, M.P., New, B.M. (1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and effects", Tunnelling '82, M. J. Jones, ed., London, England, pp. 173-181.
9. Oh, J.Y., Park, H.K., Kim, D.Y., Chang, S.B., Lee, S.B., Choi, H.S. (2017), "Study on the effect of tail void grouting on the short- and long-term surface settlement in the shield TBM tunneling using numerical analysis", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 265-281.
10. Peck, P.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Report, pp. 225-290.
11. Son, M.R., Yun, J.C. (2009), "Numerical analysis of tunnelling-induced ground movements", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 3, pp. 229-242.
12. Western Metro (2016), "Final design of private infrastructure investment project on OO-OO double track railway (zone 4)", Tunnel Analysis Report, 906p.
13. You, K.H., Jin, S.H., Kim, Y.J. (2017), "A stability study of deep and double-deck tunnels considering shape and reinforcing method of an enlarged section by using numerical analyses", Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 1, pp. 41-56.
14. You, K.H., Kim, Y.J. (2017a), "Application of gap parameter for 2D numerical analysis of a shield TBM tunnel", 2017 Spring Annual Conference of Korean Tunnelling and Underground Space Association, pp. 47-48.
15. You, K.H., Kim, Y.J. (2017b), "A comparative study with displacement controlled model on 2D numerical analysis of a shield TBM tunnel", KSCE 2017 Convention. (in press)
16. You, K.H., Lee, M.H., Park, Y.J. (2007), "Comparison and validation on shotcrete modelling method for the quantitative stability estimation of a tunnel", Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 2, pp. 99-107.