특수지반 구간의 소단면 쉴드 TBM 터널 굴착 시 최적 보강영역 연구

강병윤[1] · 박형근[2*] · 차재훈[3] · 김영진[4]

[1]정회원, (주)수성엔지니어링 대표이사
[2]비회원, 충북대학교 토목공학부 교수
[3]비회원, (주)수성엔지니어링 지반부 이사
[4]비회원, (주)수성엔지니어링 지반부 사원

A study on the optimal reinforced zone of a small sectional shield TBM tunnel in difficult ground

Byung-Yun Kang[1] · Hyung-Keun Park[2*] · Jae-Hoon Cha[3] · Young-Jin Kim[4]

[1]President, Soosung Engineering
[2]Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University
[3]Director, Geotechnical and Tunnel Dept., Soosung Engineering
[4]Engineer, Geotechnical and Tunnel Dept., Soosung Engineering

***Corresponding Author :** Hyung-Keun Park, parkhk@cbnu.ac.kr

Abstract

Due to the lack of ground space by urbanization, the demand of utility tunnels for laying social facilities is increasing. During the construction of a utility tunnel in downtown area using a shield TBM, various problems may occur when difficult ground is encountered such as mixed ground and cobbly ground. Thus, in this study, using MIDAS GTS NX (Ver. 280), a numerical analysis was performed on characteristics of difficult ground, reinforced area, depth of cover and groundwater level to analyze the optimal ground reinforced area according to combination of parameters. As a result, it was difficult to secure stability in unconstrained excavation cases on both the mixed ground and the cobbly ground. However, when ground reinforcement grouting as much as 2.0D is applied, convergence occurred within the allowable limit, except for mixed ground with a depth of cover 30 m. In addition, excessive leakage occurred during excavation of both the mixed ground and the cobbly layers. It was able to secure stability after applying waterproof grouting.

Keywords: Shield TBM, Small sectional tunnel, Difficult ground, Grouting, Reinforced zone

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(6)735-747(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.735

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received August 2, 2019
Revised August 30, 2019
Accepted September 4, 2019

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 ⓒ 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

도시화에 따른 지상공간 부족으로 인해 사회시설물 매설을 위한 공동구 터널의 수요가 증가하고 있다. 쉴드 TBM 공법을 이용한 도심지에서의 공동구 터널 시공 중 불가피하게 복합지반, 호박돌층과 같은 특수지반 조우 시 여러 가지 트러블이 발생하여 공기 및 공사비가 증가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MIDAS GTS NX (Ver. 280)을 이용해 특수지반의 특성, 보강영역, 토피고, 수위를 달리하여 수치해석을 수행하여 매개변수 조합에 따른 최적의 지반보강영역을 분석하였다. 그 결과 복합지반과 호박돌층 모두 무보강 지반굴착 시 안정성 확보가 어려웠으나 최대 2.0D 만큼의 지반보강 그라우팅 적용 시 토피고 30 m인 복합지반을 제외하고 내공변위가 허용치 내로 발생하였다. 또한 복합지반 및 호박돌층 모두 굴착 시 과다한 지하수 유출이 발생하여 차수그라우팅 적용 후 안정성을 확보할 수 있었다.

주요어: 쉴드 TBM, 소단면 터널, 특수지반, 그라우팅, 보강영역

1. 서 론

국내외적으로 도시화에 따른 인구과밀화로 인한 지상 공간 부족 및 교통문제 해결을 위해 터널 및 지하공간 개발은 필수적이다. 특히 교통터널과 사회시설물 매설을 위한 공동구터널은 미래 도심지 개발의 핵심 시설이다. 도심지 터널 시공은 불가피하게 연약지반 및 특수지반을 통과하여야 하며 소음 및 진동으로 인해 민원, 교통에 영향을 미칠 수 있으므로 연약지반과 암반에 안정적으로 굴착이 가능한 쉴드 TBM (Shield Tunnel Boring Machine) 공법의 수요 및 연구 필요성이 증가하고 있다(Kim, 2015; Jeong et al., 2018).

도심지에서 전력구터널을 위한 면적 3~10 m^2 이하인 소단면 쉴드 TBM 터널 시공 시 복합지반(Mixed Face Ground Condition), 호박돌층(Cobbles Layer), 단층/파쇄대(Fault/Fracture Zone)와 같은 특수지반을 불가피하게 통과하게 되는 경우가 빈번하다(Lee, 2008). 특수지반 조우 시 지반보강과 같은 적절한 조치가 즉각적으로 이루어져야 각종 트러블을 방지하고 공사비의 손실을 최소화 할 수 있다. 그러나 국내의 소단면 공동구 설계 및 시공 기술은 선진국에 비해 상당히 낮은 수준이며 특수지반에 대한 연구와 체계적인 가이드라인이 부족한 실정이다. Cho et al. (2014), Nam et al. (2003)은 파쇄대의 너비, 각도, 보강방법에 따른 터널과 지반 거동 특성을 분석하였으며, Oh (2014), Kwak and Park (2015)는 복합지반에 대한 쉴드 TBM 굴착 시 지표 침하 및 주변지반 거동을 분석하였다. 하지만 터널의 단면적에 따라 안정성에 영향을 미치는 내공변위량이 다르기 때문에, 10 m^2, 50 m^2 이상의 중, 대단면 규모의 터널에 대한 지반거동 및 보강을 소단면 쉴드 TBM 터널에 적용하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

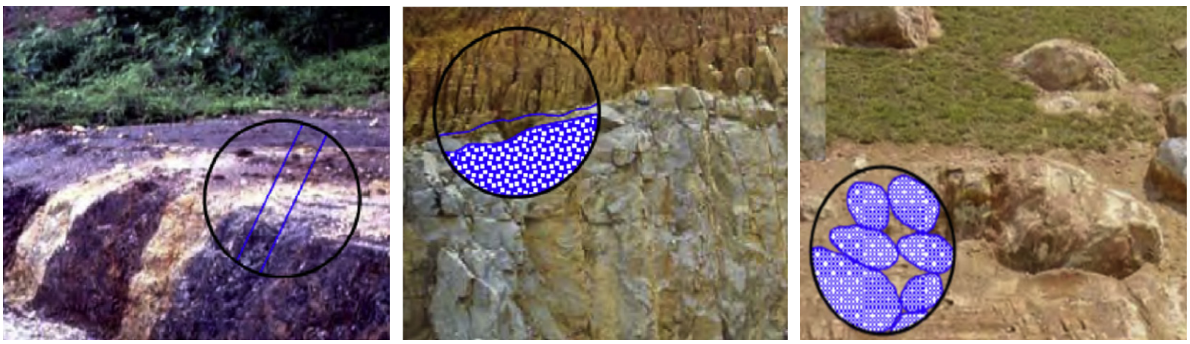
따라서 본 연구에서는 MIDAS-GTS NX (Ver. 280)를 이용한 2차원 유한요소해석을 통해 쉴드 TBM공법을 적용한 소단면 전력구 터널(D = 3.5 m) 시공 시 특수지반에서의 최적 보강공법 및 영역을 제안하고자 한다. 실제 특수지반 분포 현황은 다양하기 때문에 복합지반 내 터널 굴착면에서 사질토와 암반의 비율, 호박돌의 분포밀도, 지반보강영역, 토피고, 지하수위를 달리하여 수치해석을 수행하였다. 향후 본 연구결과와 시공사례의 비교분석

이 이루어진다면 특수지반에 대한 소단면 쉴드 TBM공법을 적용하는데 설계 및 시공에 대한 체계적인 가이드라인 제시가 가능할 것으로 판단된다.

2. 특수지반

2.1 복합지반

굴착면의 지반이 두 종류 이상의 지층으로 구성되어 있고, 각 지층의 지질학적, 역학적 및 풍화의 정도가 다른 경우를 복합지반이라 한다(Jeong et al., 2018). 복합지반의 종류는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 먼저, 단층, 전단층 및 기반암이 층상으로 분포하는 경우, 토사와 기반암이 인접한 경우, 토사층과 핵석이 혼합된 경우가 있다(Fig. 1). 이러한 복합지반을 TBM 굴착 중 조우 시 장비의 굴착성능이 급격히 저하되어 지반보강 등으로 인한 공사비 및 공기의 증가, 커터의 편마모가 발생할 수 있으며 특히 지하수 유입으로 인해 굴착 안정성에 문제가 발생할 수 있다.



(a) Layered or banded ground (b) Interface ground of soil/rock (c) Mixed face with locked cobble-stones/rock block with soil

Fig. 1. Three types of mixed ground (Gong et al., 2016)

2.2 호박돌층

호박돌층은 (Architecture and Civil Engineering Dictionary, 1994) 건축·토목사전에 따르면, 호박돌(boulder, rubble stone)은 “지름이 20~30 cm의 둥글넓적한 돌을 통틀어 일컬음. 개울 등에 있는 천연돌이며, 보통 안산암질 및 화강임질이고, 초석(礎石), 기초잡석 지정, 바닥콘크리트 지정 등에 쓰임.” 이라고 정의되어 있다. 하지만 흙의 입경에 의한 분류(Korean Agency for Technology and Standards, 1992)에 따르면 2~75 mm 사이의 입경을 가지고 있는 경우를 자갈로 분류하고 있어서 75~200 mm 국내의 암반 및 토질분류법을 이용해서 호박돌층을 분류하는 것은 어려운 실정이다(Im and Hong, 2001).

Hunt (2017)는 TBM의 막장면의 조건에 따라 호박돌의 분포 비율과 리스크의 상관관계를 분석하였으며, Fig. 2와 같이 터널 단면 대비 호박돌의 비율이 30% 이상일 때 리스크 발생 가능성이 큰 것으로 판단하였다. 호박돌의 분포 비율인 CVR (%)은 터널 굴착 시 트러블을 발생시키는 중요 인자이며, 식 (1)과 같이 산출된다.

$$CVR(\%) = \frac{\text{Cobble Volume}}{\text{Excavation Volume}} \tag{1}$$

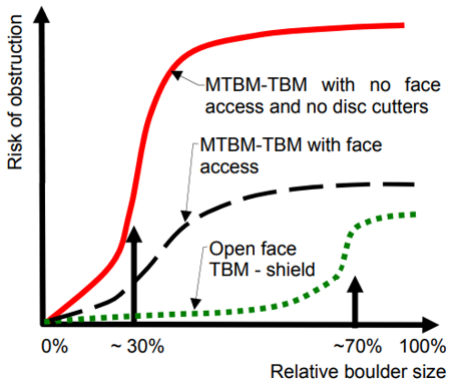


Fig. 2. A risk of obstruction for boulder size and conditions of tunnel face (Hunt, 2017)

3. 수치해석

3.1 매개변수 및 모델링

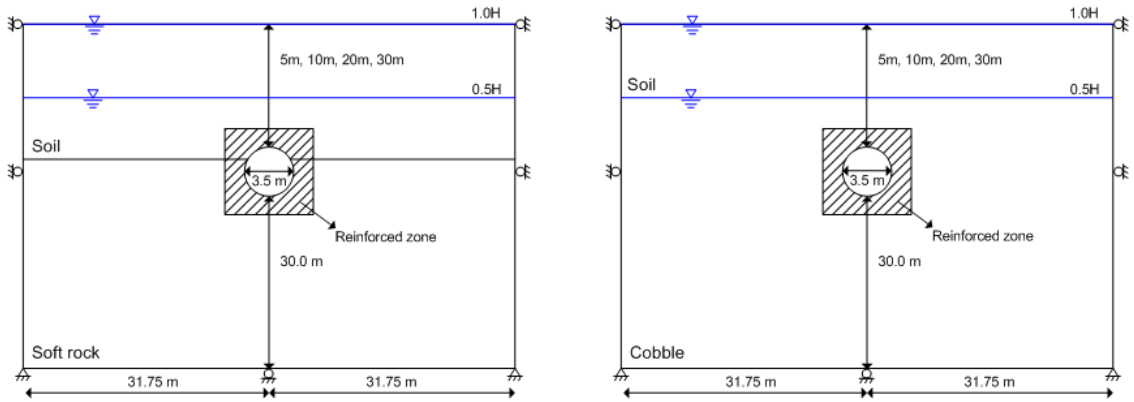
본 연구에서는 직경 3.5 m의 소단면 쉴드 TBM 굴착 시 특수지반 종류(복합지반, 호박돌층) 및 분포특성, 토피고, 수위에 따른 최적 보강영역을 제안하고자 한다. 토피고가 5 m, 10 m, 20 m, 30 m일 때 지하수위에 따른 차수그라우팅 보강 여부를 분석하기 위해 지표면 까지 포화된 상태(1.0H)와 토피고의 절반까지 지하수위가 존재하는 상태(0.5H)를 선정하였다. 최적 보강영역 제안을 위해 터널의 천단, 인버트, 좌우 측면으로부터 0.5D, 1.0D, 2.0D의 지반보강그라우팅을 적용하여 무보강 지반 굴착 시와 비교 분석하고자 하였다.

복합지반의 경우 상부지층과 하부지층의 지반 물성치를 다르게 적용하였다. 상부지층은 퇴적층(사질토), 하부지층은 연암으로 선정하였으며, 터널 굴착면을 구성하는 퇴적층과 연암의 비율을 30%/70%, 70%/30%로 적용하여 기반암 분포 비율에 따른 굴착 안정성을 확인하고자 하였다. 호박돌의 분포비율은 호박돌층의 트러블 발생에 대한 주요 인자이므로 CVR (%)을 30%, 50% 두 가지 케이스로 적용하였으며 본 해석에 적용한 매개변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters of the numerical analysis

Sort	Depth of cover (m)	Reinforced zone	Ground water level	Difficult ground condition	Grouting type
Mixed ground	5, 10, 20, 30	Unconstrained, 0.5D, 1.0D, 2.0D	0.5H, 1.0H	Soil - Rock ratio	Ground reinforcement, Waterproof
				30%/70%, 70%/30%	
Cobbly ground				CVR	
				30%, 50%	

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 지반범용 해석프로그램인 Midas GTS NX (Ver. 280)를 사용해 특수지반 조건(복합지반, 호박돌층)별 단면을 Fig. 3과 같이 모델링 하였다. 원지반 상태에서 변위초기화를 한 후 지반보강, 터널굴착, 세그먼트 설치 순으로 해석을 진행하였으며 지반과 세그먼트의 하중분담률을 각각 90%, 10%로 적용하였다. 터널 직경은 3.5 m이고 해석영역은 결과에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 터널의 인버트 및 좌, 우 굴착면으로부터 30 m (약 8.5D)만큼 설정하였으며 좌우 측면은 수평, 하부는 수직변위를 구속하였다. 세그먼트 라이닝은 두께 20 cm인 탄성체로 적용하였으며 굴착면 내부로 발생하는 지하수 유출량을 분석하기 위해 응력-침투 연계해석을 수행하였다.



(a) Mixed ground (30%/70%) (b) Cobbly ground

Fig. 3. Generals of the analysis section

3.2 물성치

본 연구에서 사용된 지반물성치는 국내의 지하철 및 전력구 총 35개 현장의 지반정수를 분석하여 Table 2와 같이 적용하였다. 복합지반은 퇴적층(사질토) 및 연암의 물성을 적용하였다. 호박돌층의 단위중량은 CVR에 따라 자갈층과 연암층의 단위중량을 참고해 가중치 평균을 이용하여 산정하였으며, 그 외의 지반정수는 자갈층과 동일하게 적용하였다.

Table 2. Properties of ground

Type			Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (c, kPa)	Friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio	Permeability coefficient (cm/sec)
Before grouting	Sedimentary layer	Sand	18	5	29.5	18.5	0.34	1.8×10^{-3}
		Gravel	19	0.8	35	75	0.32	7.0×10^{-3}
	Soft rock		23.5	250	34	1,600	0.27	5.1×10^{-5}
	Cobbly ground	CVR 30%	20.4	0.8	35	75	0.32	3.0×10^{-3}
		CVR 50%	22.2	0.8	35	75	0.32	7.0×10^{-3}
After grouting	Sedimentary layer	Sand	18	10	39.5	64.8	0.29	1.8×10^{-3}
		Gravel	19	1.6	45	262.5	0.27	7.0×10^{-3}
	Soft rock		23.5	500	44	5,600	0.22	5.1×10^{-5}
	Cobbly ground	CVR 30%	20.4	1.6	45	262.5	0.27	3.0×10^{-3}
		CVR 50%	22.2	1.6	45	262.5	0.27	7.0×10^{-3}

그라우팅 적용 시 보강물성치는 그라우팅 주입효과 사례를 제시한 Kim (2013)의 연구를 참고하여 변형계수 3.5배, 점착력 2배, 내부마찰각을 10°증가시키고 포아송비를 0.05 감소시켰다(Table 3). 또한 차수그라우팅 시 지반물성치는 지반보강그라우팅과 동일하고 투수계수는 1.0×10^{-5} cm/s를 적용하였다(Seo, 2016). 세그먼트 라이닝은 외경 3.6 m의 소단면 쉴드 TBM 터널 거동을 연구한 Cho (2016)의 물성치를 참고하여 Table 4와 같이 적용하였으며, 투수계수가 고려되지 않는 탄성체로 모델링하였다.

Table 3. Properties of reinforced ground by grout

Sort	Deformation modulus	Cohesion	Friction angle	Poisson's ratio
Value of increase and decrease	3.5 times increase	Twice increase	10° increase	0.05 decrease

Table 4. Properties of segment lining

Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (kN/m^2)	Poisson's ratio	Thickness
22.5	2.1 × 107	0.25	0.2

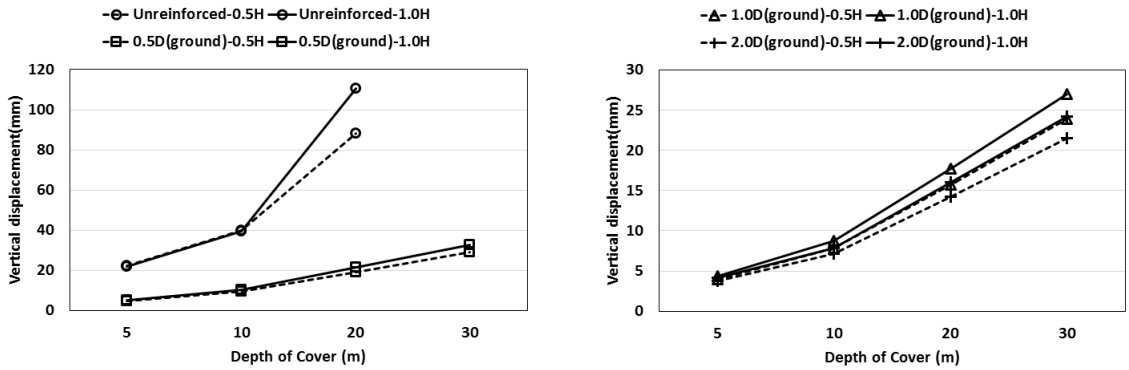
4. 수치해석 결과

복합지반, 호박돌층을 통과하는 소단면 공동구 터널을 쉴드 TBM 공법으로 굴착 시 발생하는 내공변위 및 굴착면으로 유출되는 지하수 유출량을 비교·분석하여 최적 보강영역을 제안하고자 한다. 세그먼트 설치 후의 내공변위 및 유출량을 기준으로 해석결과를 분석하였다. 허용내공변위 기준은 일본토질공학회 천단침하 관리기준

(Kim, 2001)인 30.0 mm를 사용하였으며, 지하수 유출에 대한 관리기준치는 Road Design Manual-Tunnel (2011)에서 제시하는 0.3 m^3/min/km를 적용하였다.

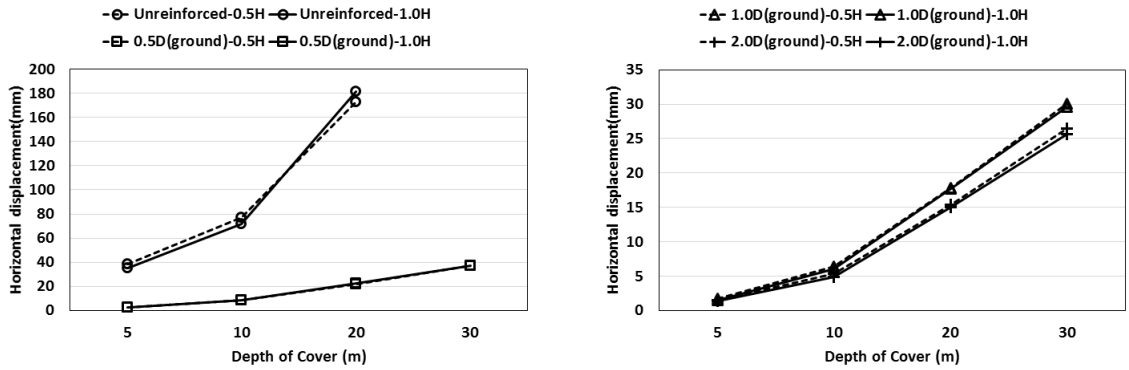
4.1 복합지반

복합지반(30%/70%)일 때 굴착 시 발생하는 연직, 수평변위를 토피고와 보강영역에 따라 Fig. 4, Fig. 5와 같이 나타내었다. 무보강 지반 굴착 시 모든 케이스에서 수평변위가 30 mm 이상 발생하였으며, 특히 토피고 30 m는 굴착 단계에서 터널 천단부에 Fig. 6(a)와 같이 소성파괴가 발생하여 안정성 확보가 불가하였다. 따라서 모든 케이스에 지반보강 그라우팅을 0.5D 만큼 적용한 결과 토피고 5 m, 10 m, 20 m는 내공변위가 30 mm 이내로 발생하였고, 토피고 30 m는 2.0D 만큼 지반보강 그라우팅을 적용해야 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.



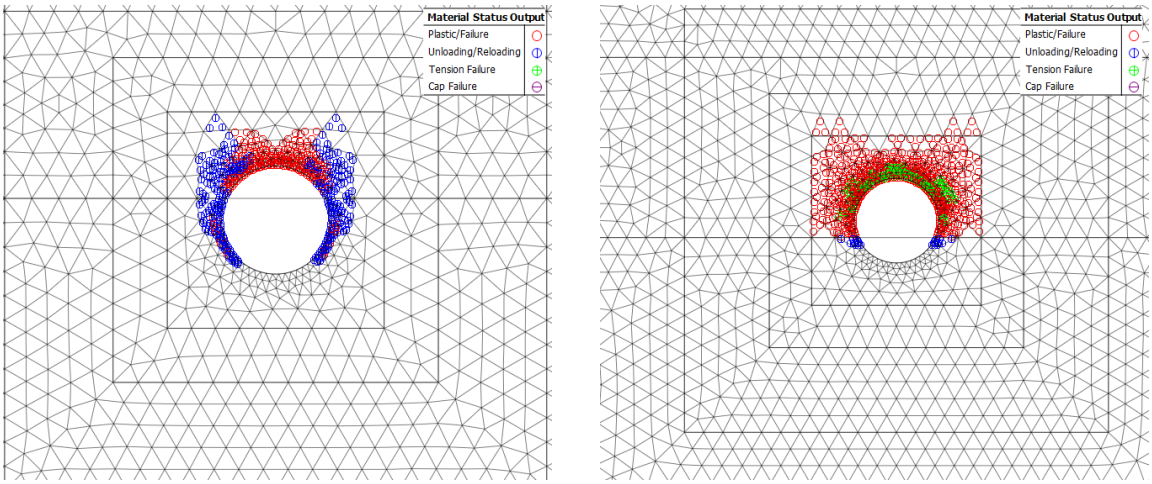
(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

Fig. 4. Vertical displacement of mixed ground (30%/70%)



(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

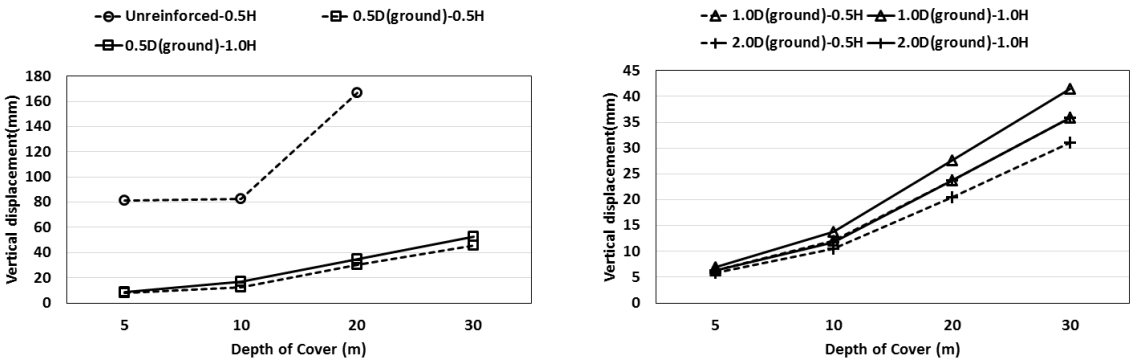
Fig. 5. Horizontal displacement of mixed ground (30%/70%)



(a) 30%/70%, Depth of cover = 30 m (b) 70%/30%, Depth of cover = 30 m

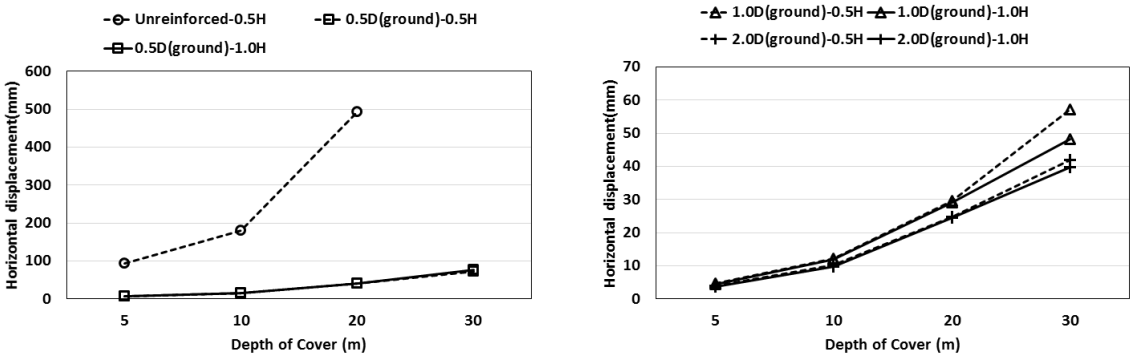
Fig. 6. Plastic status of excavation side

토사층과 연암의 비율이 70%/30%일 때 무보강 지반 굴착 시 Fig. 7, Fig. 8과 같이 모든 경우에서 내공변위가 81.06~492.51 mm가 발생하여 안정성 확보가 불가능하였다. 특히 지하수위가 1.0H일 때와 토피고 30 m인 경우 굴착면 천단과 측면에서 소성파괴가 발생하여 수렴이 불가하였다(Fig. 6(b)). 지반보강 그라우팅을 적용한 결과 토피고 5 m, 10 m는 0.5D 만큼 적용하였을 때 안정성 확보가 가능하였다(Fig. 7(a), Fig. 8(a)). 토피고 20 m는 2.0D 만큼 지반보강 그라우팅을 적용해야 내공변위가 30 mm 이내로 발생하였으며, 토피고 30 m는 2.0D 적용 시 천단변위는 30 mm가 발생하였으나 수평변위가 45.9 mm가 발생하여 시공 시 현장여건에 맞게 보강공법 및 영역을 별도 산정해야 된다고 판단된다.



(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

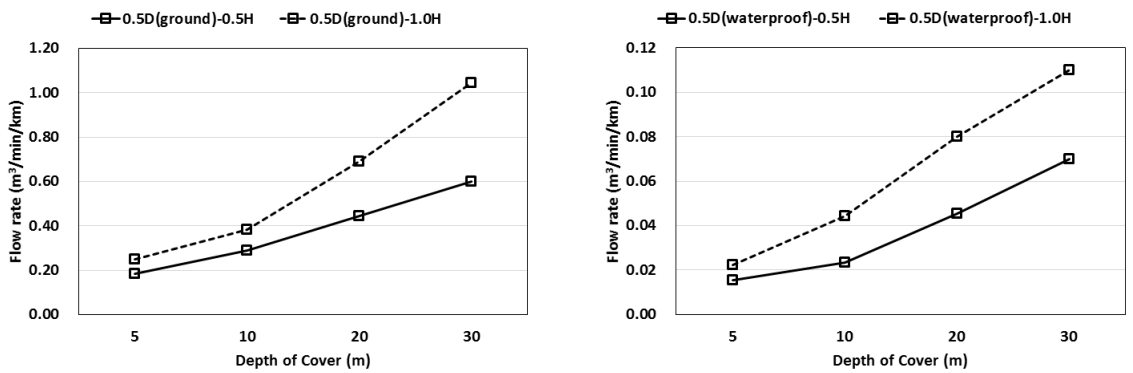
Fig. 7. Vertical displacement of mixed ground (70%/30%)



(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

Fig. 8. Horizontal displacement of mixed ground (70%/30%)

복합지반 굴착 시 지하수로 인한 유출량은 가장 불리한 조건인 70%/30%인 경우를 대표 케이스로 선정하여 분석하였다(Fig. 9(a)). 지표면까지 지하수위가 포화되어있는 조건(1.0H)에서 토피고 5 m를 제외한 10 m, 20 m, 30 m에서 0.38~1.04 m^3/min/km가 발생하여, 허용치인 0.3 m^3/min/km를 초과하였다. 유출량 감소를 위해 차수그라우팅 0.5D 적용 결과 보강 시 유출량이 0.02~0.11 m^3/min/km으로 안정성을 확보할 수 있었다(Fig. 9(b)).



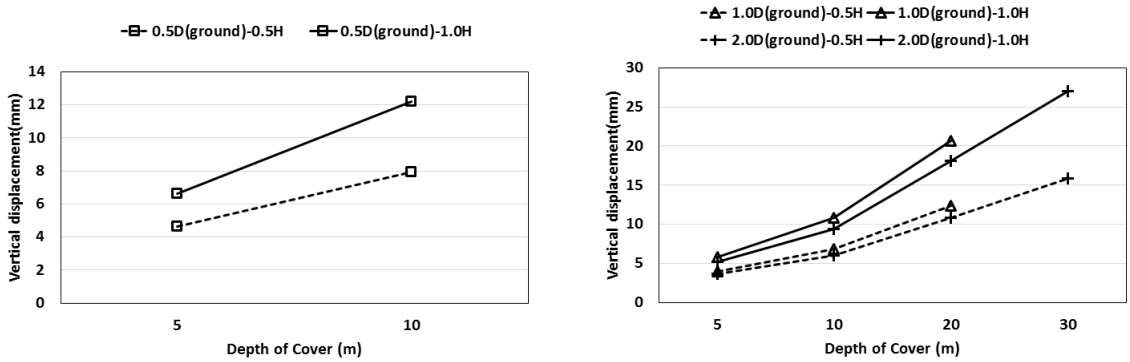
(a) Before waterproof grouting (b) After waterproof grouting

Fig. 9. Flow rate of mixed ground (70%/30%)

4.2 호박돌층

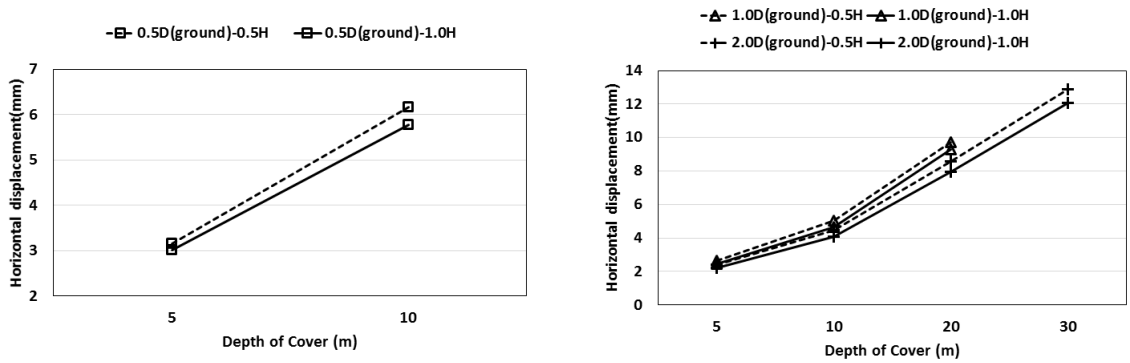
CVR 30%인 호박돌층에 무보강 지반 굴착 시 토피고에 관계없이 굴착면 주변으로 소성파괴가 발생해 수렴이 불가하여 지반보강의 필요성을 확인하였다. 지반보강 그라우팅을 수행한 결과 토피고 5 m, 10 m는 보강영역 0.5D 적용 시 발생 내공변위가 최대 12.2 mm가 발생하여 안정성이 확보 가능하다고 판단된다(Fig. 10(a), Fig. 11(a)).

한편, 토피고 20 m와 30 m는 각각 보강영역이 1.0D와 2.0D일 때 안정성 확보가 가능했으며, 최대 내공변위가 27.0 mm가 발생하였다(Fig. 10(b), Fig. 11(b)).



(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

Fig. 10. Vertical displacement of cobbly ground (CVR 30%)



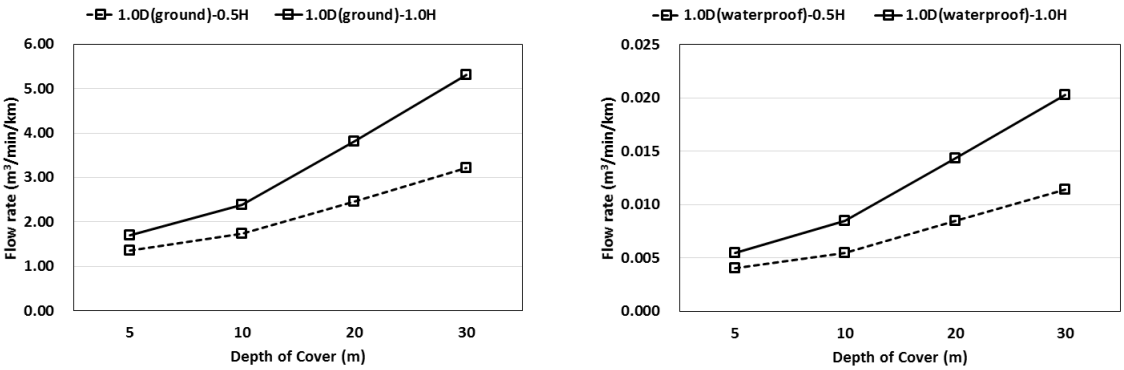
(a) Unreinforced / Ground reinforced (0.5D) (b) Ground reinforced (1.0D, 2.0D)

Fig. 11. Horizontal displacement of cobbly ground (CVR 30%)

CVR 50%인 경우 CVR 30%와 마찬가지로 굴착면 주변 지반의 소성파괴로 인해 모든 케이스에서 안정성 확보가 불가하였다. 지반보강 그라우팅 보강영역 분석 결과는 토피고 10 m일 때 1.0D의 보강영역이 필요했으며 나머지 케이스는 CVR 30%와 동일한 결과가 산출되었다. 이는 CVR 변화는 호박돌층의 단위중량 및 투수계수에만 영향이 있기 때문이라고 판단된다.

호박돌층 굴착 시 발생하는 지하수 유출량 검토 결과, CVR 50%, 토피고 5 m에서 최대 1.7 m^3/min/km가 발생하였고 토피고 30 m에서 최대 5.3 m^3/min/km가 발생하여 허용 유출량인 0.3 m^3/min/km를 초과하였다(Fig. 12(a)). 따라서 유출량 감소를 위해 차수그라우팅을 1.0D 적용한 결과 토피고 30 m에서 0.02 m^3/min/km의 유출

량이 발생하였고 최대내공변위가 21.4 mm가 발생하여 안정성 확보가 가능하였다(Fig. 12(b)) CVR 30%의 경우도 CVR 50%와 투수계수의 차이가 미소하여 CVR 50%의 결과와 비슷하게 산출되었다.



(a) Before waterproof grouting (b) After waterproof grouting

Fig. 12. Flow rate of cobbly ground (CVR 50%)

5. 결 론

본 연구에서는 복합지반, 호박돌층에 굴착되는 소단면 쉴드 TBM 터널에 대한 최적 보강영역을 분석하고자 하였다. 이를 위해 직경 3.5 m의 소단면 공동구 터널을 대상으로 지반조건, 토피고, 보강방법 및 영역을 달리하여 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 복합지반에서는 무보강 지반 굴착 시 모든 케이스에서 내공변위가 30.0 mm 이상 발생하였으며, 특히 복합지반(70%/30%)에서 만수위인 경우 굴착면 주변 지반에 소성파괴가 발생하여 지반보강이 필요하였다.
2. 토피고 5 m, 10 m의 경우 복합지반의 지층분포비율과 관계없이 0.5D만큼 지반보강 적용 시 안정성 확보가 가능하였으며 토피고 20 m는 30%/70%, 70%/30% 각각 0.5D와 2.0D의 지반보강이 필요하였다. 하지만 토피고 30 m, 70%/30%의 경우 2.0D 만큼 지반보강 시 내공변위가 허용치를 초과하여 시공 시 현장여건에 맞게 보강공법 및 영역을 별도 산정 해야된다고 판단된다.
3. 호박돌층은 무보강 지반 굴착 시 굴착면을 따라 소성파괴가 발생하여 지반보강이 필요하였다. 지반보강 결과 호박돌층은 CVR 변화에 따라 보강영역의 변화가 크게 발생하지 않았으며, 토피고가 5 m, 10 m, 20 m, 30 m일 때 각각 0.5D, 1.0D, 1.0D, 2.0D의 지반보강이 필요하다고 판단된다.
4. 토피고 5 m 복합지반을 제외하고, 복합지반 및 호박돌층 굴착 시 기준치인 0.3 m^3/min/km 초과하는 다량의 지하수 유출이 발생하여 차수보강그라우팅 적용이 필요하였으며 보강 결과 최대 0.11 m^3/min/km로 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

특수지반에서 소단면 터널 무보강 지반 굴착 시 안정성 확보가 불가하였으나 호박돌층의 경우 적절한 보강 시 안정성을 확보할 수 있었다. 그러나 복합지반은 토피고 증가 시 허용변위가 초과되는 경우가 발생하였으므로 향후 연구에서는 다양한 보강영역 및 보강방법을 고려한 안정성 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 '도심지 소단면(ø3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(과제번호: 19SCIP-B105148-05)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Architecture and Civil Engineering Dictionary (1994), Korea dictionary research publishing, pp. 1401.
2. Cho, W.S. (2016), Numerical analysis on the behavior of shield TBM cable tunnel, Master Thesis, Inha University, pp. 104.
3. Cho, W.S., Song, K.I., Kim, K.Y. (2014), "The study on the effect of fracture zone and its orientation on the behavior of shield TBM cable tunnel", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 4, pp. 403-415.
4. Gong, Q., Yin, L., Ma, H., Zhao, J. (2016), "TBM tunneling under adverse geological conditions: An overview", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 57, pp. 4-17.
5. Hunt, S.W. (2017), Tunneling in cobbles and boulders, Breakthroughs in Tunneling Short Course, Chicago, USA, pp.1-46.
6. Im, J.C., Hong, S.W. (2001), "A case study on the decision of boulder layer in Busan subway construction site", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 3, No. 3, pp. 50-57.
7. Jeong, H.Y., Zhang, N., Jeon, S.W. (2018), "Review of technical issues for shield TBM tunneling in difficult grounds", Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 1-24.
8. Kim, J.W. (2013), Case study on the effectiveness of injection in LW grouting, Master Thesis, Pukyong National University, pp. 101.
9. Kim, K.Y. (2015), A study on cutter exchange cycle in earth pressure balance shield TBM method during the drilling of complex strata for city railway construction, Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 71.
10. Kim, S.S. (2001), A study on forecasting ultimate displacement in tunneling, Master Thesis, Inha University, pp. 58.
11. Korean Agency for Technology and Standards (1992), KS F 2302 (in Korean).
12. Kwak, C.W., Park, I.J. (2015), "Numerical simulation for surface settlement considering face vibration of TBM tunnelling in mixed-face condition", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 333-339.

13. Lee, S.W. (2008), Development of simulation model for urban subway tunnel construction based on simulation, Master Thesis, Inha University, pp. 61.
14. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), Road Design Manual-Tunnel (in Korean), pp. 1118.
15. Nam, K.C., Heo, Y., You, K.H. (2003), "The effects of the face reinforcement at shallow tunnels in fractured rock masses", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 5, No. 4, pp. 323-336.
16. Oh, T.S. (2014), Model testing and analysis on shield TBM excavation for railway tunnel in mixed ground, Ph.D. Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 124.
17. Seo, M.B. (2016), Ground reinforcement effect of short-period vibration grouting, Ph.D. Thesis, Korea National University of Transportation, pp. 130.