매개변수 분석을 통한 단층파쇄대의 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]정회원, (주)수성엔지니어링 지반부 사원

A study on the optimal reinforcement area for excavation of a small cross-section shield TBM tunnel in fault fracture zone through parameter analysis

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

When excavating a small cross-section tunnel in a fault fracture zone using the shield TBM method, there is a high possibility of excessive convergence and collapse. Appropriate ground reinforcement is required to minimize construction cost loss and trouble due to a fault fracture zone. In this study, the optimal reinforcement area was suggested and the surrounding ground behavior was investigated through numerical analysis using MIDAS GTS NX (Ver. 280). For the parameters, the width of the fault fracture zone, the existence of fault gouge, and the groundwater level and depth of cover were applied. As a result, when there is not fault gouge, the convergence and ground settlement are satisfied the standard when applying ground reinforcement by up to 0.5D. And, due to the high permeability coefficient, it is judged that it is necessary to apply 0.5D reinforcement. There is a fault gouge, it was possible to secure stability when applying ground reinforcement between the entire fault fracture zone from the top of the tunnel to 0.5D. And, because the groundwater discharge occurred within the standard value due to the fault gouge, reinforcement was unnecessary.

Keywords: Shield TBM, Small cross-section tunnel, Fault fracture zone, Fault gouge, Reinforced zone

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
22(3)261-275(2020)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.3.261

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received March 23, 2020
Revised April 14, 2020
Accepted April 23, 2020

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 ⓒ 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

쉴드 TBM 공법을 사용해 단층파쇄대에 소단면 공동구 터널을 굴착 시 과다한 내공변위 및 붕락 발생 가능성이 높다. 단층파쇄대로 인한 트러블 및 공기증가로 인한 공사비 손실을 최소화하기 위해 적절한 지반보강이 요구된다. 본 연구에서는 단층파쇄대의 폭, 단층점토의 존재여부, 토피고 지하수위를 매개변수로 하여 MIDAS GTS NX (Ver. 280)을 이용한 수치해석을 통해 최적보강영역을 제시하고 주변지반 거동을 알아보았다. 그 결과 단층점토가 없는 경우 최대 0.5D 만큼 지반보강 적용 시 내공변위 및 지표침하 기준을 만족하였으며, 높은 투수계수로 인해 0.5D의 차수보강 적용이 필요하다고 판단된다. 단층점토가 존재할 때 내공변위 및 지표침하는 최소 0.5D에서 최대 터널 상부 단층파쇄대 전체에 지반보강 적용 시 안정성확보가 가능하였으며, 단층점토로 인해 지하수 유출량이 기준치 이내로 발생하여 차수보강이 불필요하였다.

주요어: 쉴드 TBM, 소단면 터널, 단층파쇄대, 단층점토, 보강영역

1. 서 론

최근 국내에는 높은 전력의존도로 인해 도시의 변전소와 발전소를 연결하는 초고압 송전선로와 같은 기반시설의 필요성이 증가하고 있다. 하지만 도심지 내에서의 송전선로는 소음 유발 및 환경을 훼손하므로 송전선로의 지하화가 요구된다(Cho et al., 2014). 도심지에서 전력구 터널 시공 시 불가피하게 연약지반, 특수지반 구간을 통과해야하는 경우가 빈번하기 때문에 암반 및 토사지반에 모두 안정적으로 굴착이 가능한 쉴드 TBM (Shield Tunnel Boring Machine) 공법의 수요 및 연구 필요성이 증가하고 있다(Kim, 2015; Jeong et al., 2018).

쉴드 TBM 공법의 적용성 향상을 위해 고속굴진을 통한 공기단축, down time 최소화, 효율적인 굴진관리 등과 같이 쉴드 TBM 굴진성능 향상에 집중하여야 한다. 하지만 국내의 경우 도심지에 면적 3~10 m^2 이하인 소단면 공동구 터널 굴착 중 단층/파쇄대(Fault/Fracture zone)와 같은 특수지반 조우 시 트러블을 최소화 할 수 있는 지반보강 방법 및 영역 등을 제시하는 체계적인 가이드라인이 부족한 실정이다. 파쇄대의 너비, 각도, 보강방법에 따른 터널과 지반 거동 특성 분석(Nam et al., 2003; Cho et al., 2014), 복합지반에 대한 쉴드 TBM 굴착 시 지표 침하 및 주변지반 거동 분석(Oh, 2014; Kwak and Park, 2015) 등의 연구가 수행되었지만, 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(Kang et al., 2019).

따라서 본 연구에서는 2차원 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS NX (Ver. 280)를 사용하여 쉴드 TBM 공법으로 단층파쇄대에 굴착되는 소단면 전력구 터널(직경 3.5 m)의 주변지반 거동을 분석하고 최적 보강방법 및 보강영역을 제시하고자 한다. 단층파쇄대의 폭, 단층점토 존재 여부, 토피고, 지하수위를 매개변수로 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 쉴드 TBM 굴착 시 발생하는 내공변위, 지표침하, 유출량을 분석하여 최적의 지반보강 방법 및 영역을 제안하고자 한다. 향후 본 연구결과와 시공사례의 비교분석이 이루어진다면 특수지반에 대한 소단면 쉴드 TBM공법을 적용하는데 설계 및 시공에 대한 체계적인 가이드라인이 제시될 수 있다고 판단된다.

2. 단층파쇄대

2.1 개요

단층파쇄대는 풍화 및 파쇄가 심한 토사가 암반구간 사이에 존재하는 것으로 터널 굴착 시 과다한 변위 및 붕락을 발생시킨다. 따라서 터널 설계 및 시공 시 지반조사를 통해 단층파쇄대 분포를 파악한 후 적절히 반영하여야 한다. Fig. 1은 국내 활성단층 분포 현황이다.

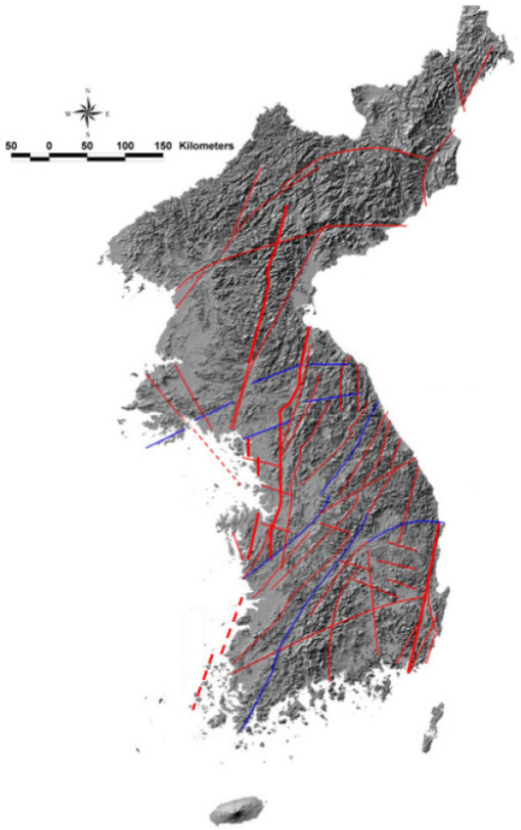


Fig. 1. Active fault map in Korea (National Emergency Management Agency, 2012)

단층대는 단층면을 기준으로 불연속적인 변위가 발생하는 취성단층과 일정한 전단영역 내에서 연속적인 변형을 보이는 전단대로 구분할 수 있다. 단층 변위가 단층이 밀집되어 있는 취성단층면에 의해 연속적으로 분포할 때 이를 단층대(fault zone)라 한다(Son, 2017). 단층대는 구성물질의 손상도에 따라 Fig. 2와 같이 단층핵(fault core)과 단층 손상대(damaged zone)으로 나뉘고 단층핵은 각력암(breccia), 파쇄암(cataclasite), 단층점토(fault gouge)로 구분된다(Song et al., 2016).

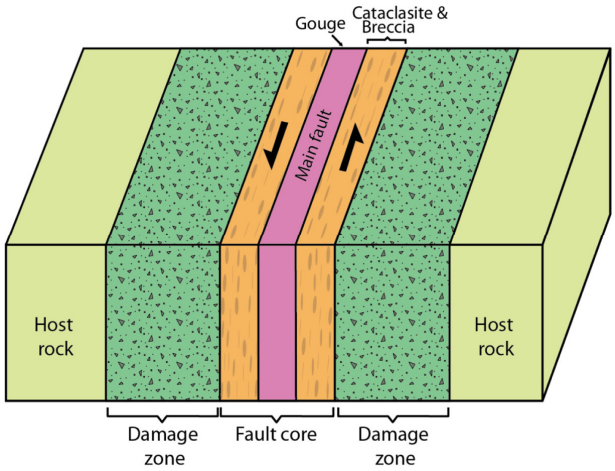
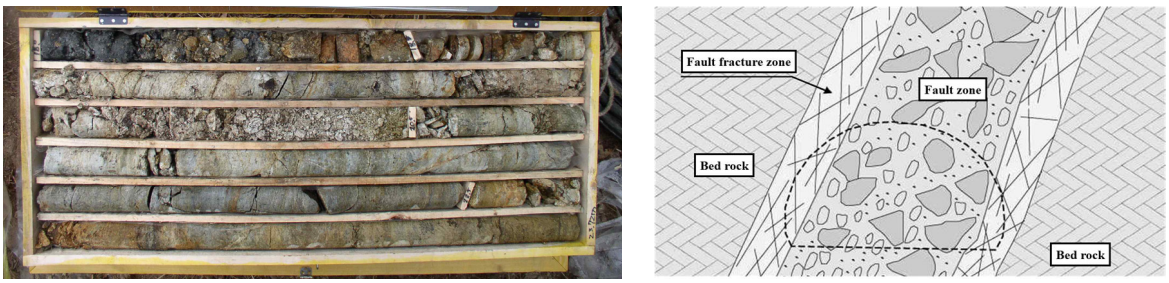


Fig. 2. Conceptual model of a (strike-slip) fault including fault gouge, fault breccia, and fault damage zone (Song et al., 2016)

2.2 단층파쇄대 공학적 특성

단층파쇄대는 주로 선형으로 분포하기 때문에 토목구조물에 부분적으로 예측 불가능한 거동이 발생할 가능성이 있다. 대표적으로 변형특성 저하로 인한 구조물 및 인접구조물의 침하, 전단강도 저하로 인한 외부하중, 굴착 시 지지력 불량, 투수특성 변화로 인해 지하수위 저하 등이 있다. 이러한 거동을 예측하기 위해 단층대의 투수성, 전단강도, 변형특성 등과 관련된 시험을 수행하여야 한다. 일정규모 이상의 단층파쇄대는 단층점토, 단층각력암, 단층풍화암이 일정하게 분포하지 않고 반복적, 순차적으로 나타는 것이 일반적이다(Fig. 3).



(a) Irregularly repeated condition (b) Distributed sequentially

Fig. 3. Fault distribution pattern (Son, 2017)

단층파쇄대의 붕괴는 지하수, 지층 조건, 등에 따라 다르게 발생하지만, 일반적으로 굴진방향과 단층방향이 반대인 경우 더 불리하며 단층파쇄대에서 발생하는 용수는 막장붕괴를 유발할 수 있기 때문에 설계 및 시공 시 유의할 필요가 있다.

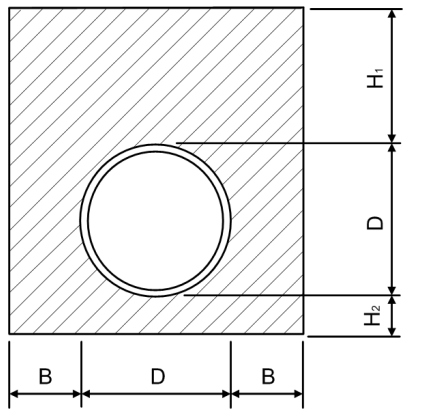
3. 수치해석

3.1 매개변수 및 모델링

본 연구에서는 직경 3.5 m의 소단면 쉴드 TBM 굴착 시 단층파쇄대 폭, 단층점토 존재 여부, 토피고, 수위에 따른 지반거동을 분석하고 최적 보강영역을 제안하고자 한다. 토피고에 따른 지반거동 분석을 위해 토피고 5 m, 10 m, 20 m, 30 m 4가지로 구분하였다. 터널 굴착 시 지하수위 존재여부에 따라 안정성에 큰 영향을 받으므로, 지하수위가 지표면까지 포화된 경우(1.0H)와 토피고 절반까지 지하수위가 존재하는 경우(0.5H)를 적용하였다. 일본 지반공학회에서 제시한 쉴드 TBM 터널 지반보강 범위와 계산방법(Japan Geotechnical Society, 2012)에서는 최소 보강범위를 Table 1과 같이 제시하고 있다. 굴착직경 3.5 m에 해당하는 최소보강범위는 좌·우 1.5 m, 상부 2.0 m, 하부 1.0 m지만 본 연구는 일반적인 지반조건보다 불리한 단층파쇄대에 굴착되는 터널에 대한 연구이므로 터널 굴착면을 기준으로 터널 직경의 0.5배, 1.0배, 2.0배의 지반 및 차수그라우팅을 적용하였다.

Table 1. Minimum reinforcement area for tunnel diameter (Kim et al., 2017)

Tunnel diameter D (m)	Minimum reinforcement area (m)		
	B	H_1	H_2
1.0 ≤ D < 3.0	1.0	1.5	1.0
3.0 ≤ D < 5.0	1.5	2.0	1.0
5.0 ≤ D < 8.0	2.0	2.5	1.5
8.0 ≤ D < 10.0	2.5	3.0	2.0
10.0 ≤ D < 13.0	3.0	3.5	2.5



단층파쇄대는 단층폭을 터널 직경대비 0.5D, 1.0D, 2.0D로 적용하였으며 단층파쇄대 구성 요소 중 단층점토(fault gouge)의 존재여부에 따라 발생변위 및 지하수 유출에 큰 차이가 있을 것이라고 판단되어 단층점토 존재여부에 따라 2가지 케이스로 구분하였다. 본 연구에 적용한 매개변수를 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2. Parameters of the numerical analysis

Ground condition	Depth of cover (m)	Reinforced zone	Ground water level	Fault width	Fault gouge	Grouting type
Fault fracture zone	5, 10, 20, 30	Unconstrained, 0.5D, 1.0D, 2.0D	0.5H, 1.0H	0.5D, 1.0D, 2.0D	Included / Not included	Ground reinforcement, Waterproof

수치해석을 위해 유한요소법을 이용한 지반범용 해석프로그램인 Midas GTS NX (Ver. 280) 이용하여 적용한 단면을 Fig. 4와 같이 모델링하였다. 수치해석 수행 시 원지반 상태에서 변위초기화 적용 후 지반보강그라우팅, 터널 굴착, 세그먼트 설치 순서로 진행하였으며, 터널 굴착 시와 세그먼트 설치 단계에서의 하중분담율을 90%와 10%로 적용하였다. 직경 3.5 m의 소단면 터널(면적 10 m^2 이하)을 대상으로 해석영역은 굴착면으로부터 30 m (약 8.5D)로 적용했으며, 해석영역의 좌우 측면은 수평변위, 하단은 수직변위를 구속하였다. 측압계수는 1.0을 적용하였으며, 세그먼트 라이닝의 경우 두께 20 cm인 탄성체로 적용하였다. 굴착면 내부로 발생하는 지하수 유출량을 분석하기 위해 굴착면 전체에 지하수침투 경계조건을 적용하여 응력-침투 연계해석을 수행하였다.

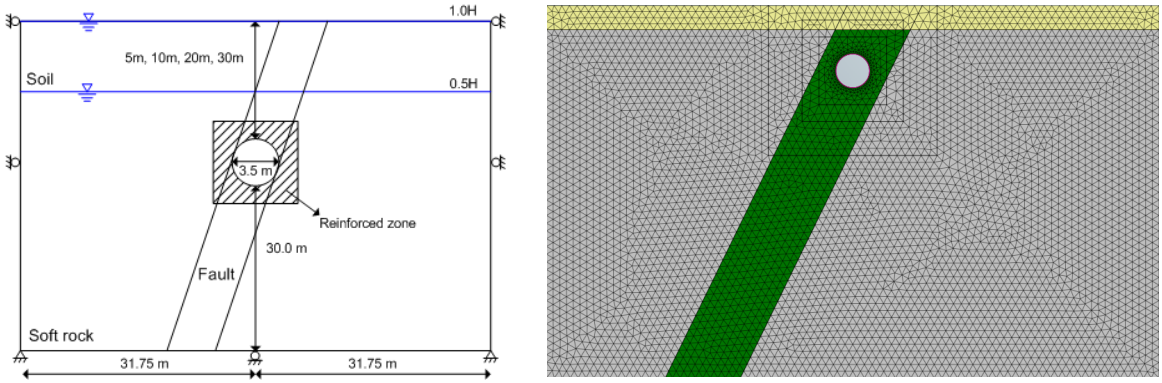


Fig. 4. Generals of the analysis section

3.2 물성치

본 연구에서 사용된 지반물성치는 국내의 전력구와 지하철 관련 총 35개 현장의 지반정수를 분석하여 Table 3과 같이 적용하였다. 단층파쇄대의 물성치는 Ko (2014), Yun and Seo (2016)의 연구결과를 참고하여 선정하였다.

Table 3. 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	Sand		18.0	5.0	29.5	18.5	0.34	1.8×10^{-3}
	Soft rock		23.5	250.0	34.0	1,600.0	0.27	5.1×10^{-5}
	Fault fracture zone	With gouge	19.0	16.0	26.5	15.0	0.39	1.0×10^{-4}
		Without gouge	21.3	0.8	35.0	75.0	0.32	7.0×10^{-3}
After grouting	Sand		18.0	10.0	39.5	64.8	0.29	1.8×10^{-3}
	Soft rock		23.5	500.0	44.0	5,600.0	0.22	5.1×10^{-5}
	Fault fracture zone	With gouge	19.0	32.0	36.5	52.5	0.34	1.0×10^{-4}
		Without gouge	21.3	20.0	45.0	262.5	0.27	7.0×10^{-3}

그라우팅 주입 시 보강효과를 제시한 Kim (2013)의 연구를 참고하여 본 연구에서는 변형계수 3.5배, 점착력 2배, 내부마찰각을 10° 증가시키고 포아송비를 0.05 감소시켰다(Table 4). 지반보강그라우팅 적용 시 유출량이 허용치를 초과한 경우 차수그라우팅을 적용하였다. 차수그라우팅은 투수계수를 1.0×10^{-5} 적용하였으며 나머지 물성은 지반보강그라우팅과 동일하게 적용하였다(Seo, 2016). 세그먼트 라이닝은 본 연구와 유사한 케이스인 외경 3.6 m의 쉴드 TBM 터널 굴착 시 지반거동을 연구한 Cho (2016)의 물성치를 참고하여 Table 5와 같이 적용하였으며, 투수계수가 고려되지 않는 탄성체로 모델링하였다.

Table 4. 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 5. Properties of segment lining

Unit weight (kN/m^3)	Elastic modulus (kN/m^2)	Poisson's ratio	Thickness (m)
22.5	2.1×10^7	0.25	0.2

4. 수치해석 결과

단층파쇄대 구간에 소단면 쉴드 TBM 터널 굴착 시 주변 지반거동(내공변위, 지표침하량, 지하수 유출량)을 분석하여 매개변수 간의 상호관계 및 최적 보강방법 및 영역을 제시하고자 한다. 해석결과 분석은 세그먼트 설치 후에 발생된 결과를 바탕으로 수행하였다. 허용내공변위는 일본토질공학회가 제시한 천단침하 관리기준(Kim, 2001)인 30.0 mm를 적용하였고, 허용지표침하량은 ○○건설공사 쉴드 TBM 설계부분을 참고하여 10.0 mm를 적용하였다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011)를 참고하여 지하수 허용유출량은 0.3 m^3/min/km를 사용하였다.

4.1 내공변위

소단면 쉴드 TBM 굴착 대상 지반이 단층파쇄대인 경우 발생 내공변위를 Tables 6, 7과 같이 정리하였다. 먼저, 단층대에 단층점토가 존재하는 경우 단층폭이 0.5D일 때 토피고가 10 m 증가할 때마다 약 51%만큼 내공변위가 더 발생하였으나, 최대 22.16 mm가 발생하여 지반보강이 불필요하다고 사료된다. 단층폭 1.0D, 2.0D는 각각 토피고 10 m, 5 m까지 최대 29.31 mm의 내공변위가 발생하여 안정성 확보가 가능하였으나, 그 이상의 토피고에서는 31.92~119.17 mm의 내공변위가 발생해 추가적인 지반보강이 필요하였다(Fig. 5(a)). 따라서 내공변위 허용치를 만족하지 못하는 케이스에 0.5D 만큼 지반보강을 수행한 결과 토피고 30 m, 단층폭 2.0D를 제외하고

11.38~27.52 mm의 내공변위가 발생하여 안정성 확보가 가능하였다. 토피고 30 m, 단층폭 2.0D의 경우 2.0D만큼 지반보강 수행 시 지하수위 1.0H일 때 내공변위 25.23 mm로 허용치를 만족하였다.

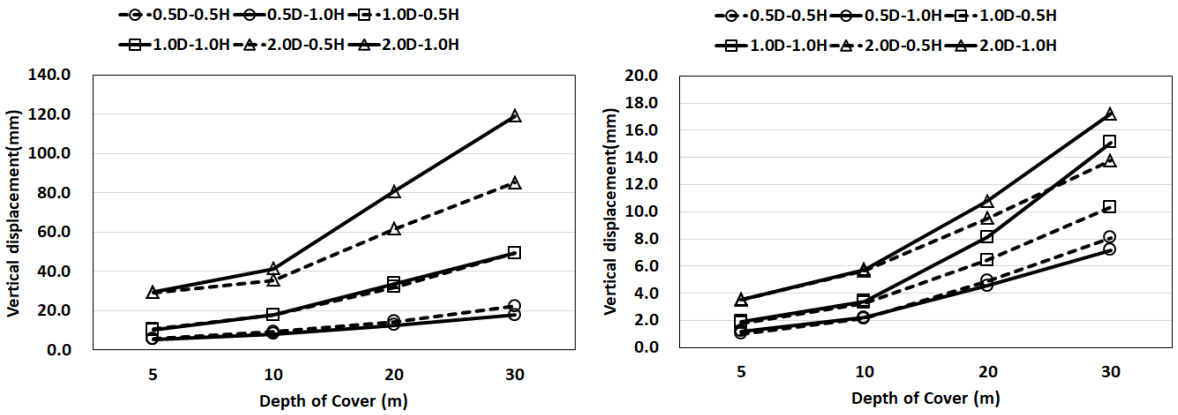
단층대에 단층점토가 존재하지 않는 경우 단층폭이 0.5D일 때 지반보강을 수행하지 않고 굴착할 때 토피고 10 m 증가 시 평균 3.4 mm씩 약 30%만큼 내공변위가 증가하여 최대 17.68 mm가 발생해 굴착면 주변의 지반보강이 불필요하였다(Table 7). 반면 단층폭이 1.0D 이상일 때 단층점토가 존재하지 않아 낮은 점착력으로 인해 Fig. 6과 같이 굴착면 주면 소성파괴가 발생하여 수치해석 수렴이 불가능하였다. 따라서 0.5D 지반보강을 수행한 결과 토피고 10 m 증가 시 평균 약 4.1 mm의 내공변위 증가가 발생하였으며 최대 17.19 mm가 발생하여 본 연구에서 적용한 케이스 모두 안정성 확보가 가능하였다(Fig. 5(b)).

Table 6. Convergence of fault fractured zone (with gouge) (mm)

Reinforced zone	Fault width (m)	Ground water	Depth of cover (m)			
			5.0	10.0	20.0	30.0
Unconstrained	0.5D	0.5H	5.55	9.28	14.35	22.16
		1.0H	5.40	8.03	12.49	17.63
	1.0D	0.5H	10.59	17.72	**31.92**	**49.09**
		1.0H	10.08	17.82	**33.77**	**49.23**
	2.0D	0.5H	29.28	**35.42**	**61.47**	**85.25**
		1.0H	29.31	**41.36**	**80.74**	**119.17**
0.5D	0.5D	0.5H	-	-	-	-
		1.0H	-	-	-	11.38
	1.0D	0.5H	-	-	12.44	25.48
		1.0H	-	-	12.75	27.52
	2.0D	0.5H	-	16.19	24.46	**32.95**
		1.0H	-	17.17	26.74	**37.44**

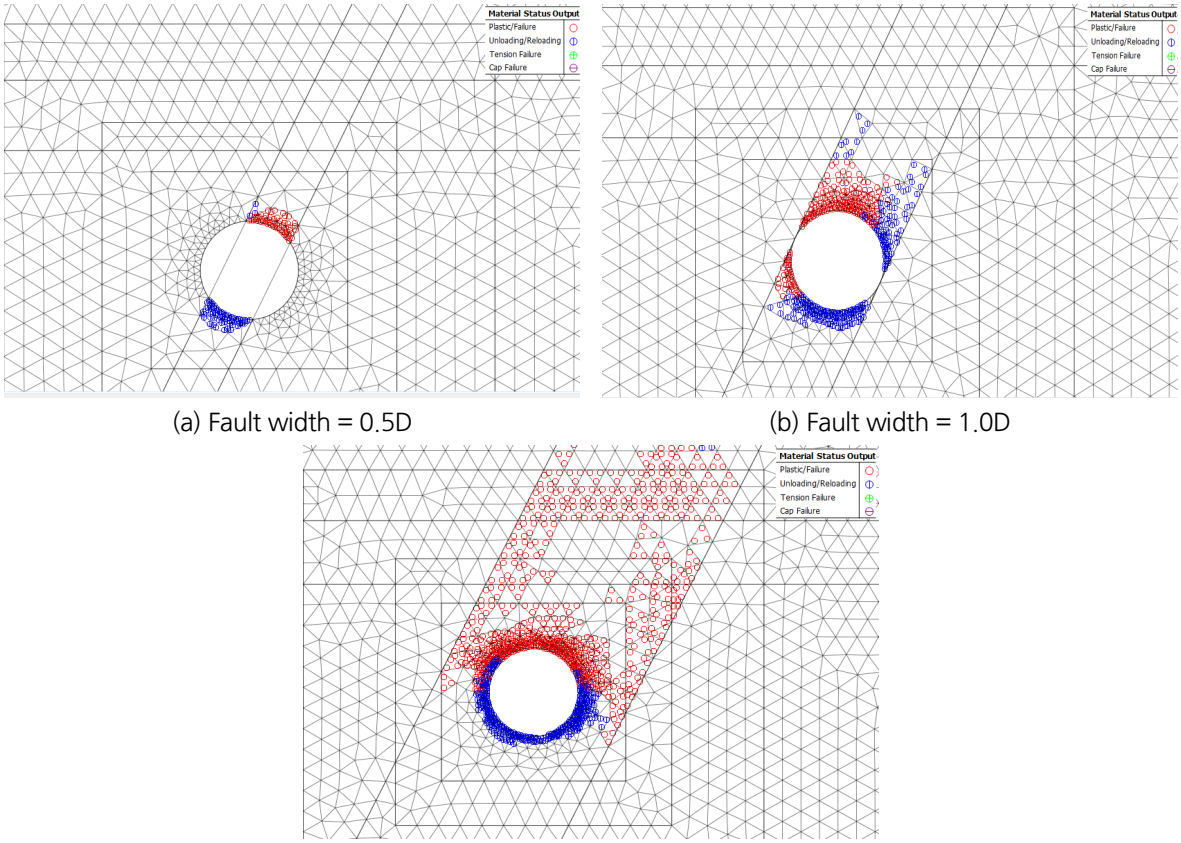
Table 7. Convergence of fault fractured zone (without gouge) (mm)

Reinforced zone	Fault width (m)	Ground water	Depth of cover (m)			
			5.0	10.0	20.0	30.0
Unconstrained	0.5D	0.5H	12.40	10.88	13.50	17.68
		1.0H	8.80	8.19	11.43	15.10
0.5D	0.5D	0.5H	1.01	2.15	4.89	8.08
		1.0H	1.18	2.21	4.55	7.19
	1.0D	0.5H	1.77	3.28	6.42	10.33
		1.0H	1.90	3.42	8.11	15.10
	2.0D	0.5H	3.52	5.65	9.52	13.77
		1.0H	3.54	5.73	10.78	17.19



(a) Unconstrained / With gouge (b) Ground reinforced (0.5D) / Without gouge

Fig. 5. Vertical displacement of fault fractured zone



(a) Fault width = 0.5D (b) Fault width = 1.0D

(c) Fault width = 2.0D

Fig. 6. Ground behavior around excavation surface

4.2 지표침하

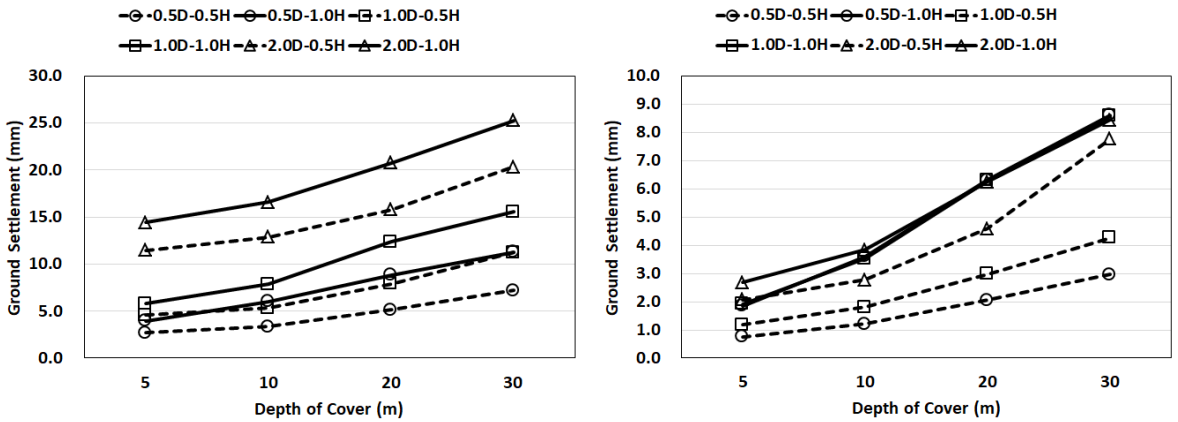
단층파쇄대 구간 굴착 시 발생하는 지표침하를 단층점토 존재 여부에 따라 Tables 8, 9와 같이 나타내었다. 단층파쇄대에 단층점토가 존재하는 경우 지반보강을 수행하지 않고 굴착 시 단층폭 0.5D는 토피고 30 m, 1.0D는 토피고 20 m, 30 m, 2.0D는 토피고 5~30 m 케이스에서 지표침하가 허용치인 10.0 mm 이상 발생하여 지반보강이 필요한 것을 확인하였다(Fig. 7(a)). 0.5D 지반보강 시 지표침하가 평균 1.94 mm만큼 감소하였으며, 단층폭 0.5D는 최대 9.56 mm의 지표침하가 발생하여 토피고에 관계없이 안정성 확보가 가능하였고 단층폭 1.0D는 지표침하가 최대 1.35 mm 감소하였으나 허용치를 만족하지는 못하였다. 단층폭 2.0D는 토피고 5 m 일 때만 9.98 mm로 허용치를 만족하여 추가적인 지반보강이 필요하다고 판단된다.

Table 8. Ground surface settlement of fault fractured zone (with gouge) (mm)

Reinforced zone	Fault width (m)	Ground water	Depth of cover (m)			
			5.0	10.0	20.0	30.0
Unconstrained	0.5D	0.5H	2.68	3.36	5.15	7.20
		1.0H	3.96	6.03	8.83	**11.30**
	1.0D	0.5H	4.59	5.34	7.91	**11.23**
		1.0H	5.79	7.85	**12.38**	**15.55**
	2.0D	0.5H	**11.47**	**12.89**	**15.78**	**20.32**
		1.0H	**14.43**	**16.59**	**20.76**	**25.25**
0.5D	0.5D	0.5H	-	-	-	-
		1.0H	-	-	-	9.56
	1.0D	0.5H	-	-	7.36	**11.02**
		1.0H	-	-	**11.03**	**15.37**
	2.0D	0.5H	7.81	**10.16**	**13.93**	**18.49**
		1.0H	9.98	**14.00**	**18.77**	**23.21**
1.0D	0.5D	0.5H	-	-	-	-
		1.0H	-	-	-	-
	1.0D	0.5H	-	-	6.71	**10.95**
		1.0H	-	-	**10.58**	**14.90**
	2.0D	0.5H	-	8.14	**12.88**	**17.45**
		1.0H	-	**11.77**	**17.55**	**21.76**
2.0D	0.5D	0.5H	-	-	-	-
		1.0H	-	-	-	-
	1.0D	0.5H	-	-	-	**10.86**
		1.0H	-	-	9.76	**14.79**
	2.0D	0.5H	-	6.46	**10.81**	**16.04**
		1.0H	-	9.26	**15.47**	**20.24**

Table 9. Ground surface settlement of fault fractured zone (without gouge) (mm)

Reinforced zone	Fault width (m)	Ground water	Depth of cover (m)			
			5.0	10.0	20.0	30.0
Unconstrained	0.5D	0.5H	1.63	2.05	3.14	4.43
		1.0H	2.94	6.60	**18.63**	**29.00**
0.5D	0.5D	0.5H	0.76	1.21	2.06	2.96
		1.0H	1.85	3.61	6.31	8.62
	1.0D	0.5H	1.17	1.81	2.98	4.26
		1.0H	1.91	3.53	6.30	8.58
	2.0D	0.5H	2.07	2.77	4.59	7.77
		1.0H	2.68	3.84	6.25	8.44



(a) Unconstrained / With gouge (b) Ground reinforced (0.5D) / Without gouge

Fig. 7. Ground surface settlement of fault fractured zone

지반보강 1.0D 적용 시 평균 1.07 mm의 지표침하가 감소하였으나 보강영역 0.5D 적용 시 허용치를 초과한 케이스 모두 10.0 mm 이상의 지표침하가 발생하였다. 지반보강 2.0D 적용 시 단층폭 1.0D와 2.0D에서 각각 토피고 30 m, 토피고 20 m, 30 m에서 10.81~20.24 mm의 지표침하가 발생하여 2.0D 이상의 지반보강이 필요한 것을 확인하였다. 따라서 지반보강을 터널 상부의 파쇄대 전체에 적용한 결과 토피고 20 m (단층폭 2.0D)에서는 6.71 mm, 토피고 30 m의 단층폭 1.0D, 2.0D에서 각각 7.89 mm, 9.15 mm의 지표침하가 발생하여 안정성을 확보할 수 있었다.

단층점토가 존재하지 않는 경우 지반보강을 수행하지 않았을 때 Table 9에서 확인할 수 있듯이 단층폭이 0.5D이고 지하수위가 0.5H인 경우 최대 4.43 mm의 지표침하로 지반보강이 불필요하였으며, 지하수위 1.0H인 경우 토피고 20 m, 30 m에서 최소 18.63 mm의 지표침하로 추가적인 지반보강이 요구되었다. 또한 단층폭 1.0D 이상

에서는 단층점토가 존재하지 않는 단층대의 특성상 낮은 점착력으로 인해 Fig. 6과 같이 굴착면 주변의 소성파괴가 발생하여 지반보강이 필요한 것을 확인하였다. 따라서 0.5D 지반보강 결과 토피고 10 m 증가 시 평균 1.78 mm의 지표침하 증가가 발생하였으나 최대 8.62 mm가 발생하여 안정성 확보가 가능하다고 판단된다(Fig. 7(b)).

4.3 유출량

터널 굴착 시 굴착면 내로 발생하는 지하수 유출량을 단층점토 존재여부 별로 Table 10과 같이 나타내었다. 단층점토가 존재하는 경우 단층 내 점성이 존재하기 때문에 1.0×10^{-6} m/sec의 낮은 투수계수로 인해 최대 0.07 m^3/min/km의 유출량이 발생하여 허용치인 0.3 m^3/min/km 이하이므로 차수보강을 적용할 필요가 없다고 판단된다. 한편, 단층점토가 존재하지 않을 때 차수보강을 수행하지 않는 경우 0.36~1.19 m^3/min/km의 지하수 유출량이 발생하여 차수보강이 필요하다고 판단된다. 차수보강 0.5D 적용 결과 0.03~0.12 m^3/min/km의 유출량이 발생하여 안정성 확보가 가능하다고 사료된다.

Table 10. Flow rate of fault fractured zone (m^3/min/km)

Sort	Reinforced zone	Fault width (m)	Ground water	Depth of cover (m)			
				5.0	10.0	20.0	30.0
With gouge	Unconstrained	0.5D	0.5H	0.02	0.02	0.03	0.04
			1.0H	0.02	0.03	0.05	0.07
		1.0D	0.5H	0.02	0.02	0.03	0.04
			1.0H	0.02	0.03	0.05	0.06
		2.0D	0.5H	0.02	0.02	0.03	0.04
			1.0H	0.02	0.03	0.05	0.06
Without gouge	Unconstrained	0.5D	0.5H	**0.36**	**0.55**	**0.74**	**0.83**
			1.0H	**0.73**	**0.85**	**0.89**	**1.19**
	0.5D	0.5D	0.5H	0.02	0.03	0.04	0.06
			1.0H	0.03	0.04	0.08	0.12
		1.0D	0.5H	0.05	0.06	0.07	0.10
			1.0H	0.06	0.07	0.08	0.10
		2.0D	0.5H	0.01	0.01	0.01	0.02
			1.0H	0.01	0.01	0.02	0.03

5. 결 론

본 연구에서는 단층파쇄대에 굴착되는 소단면 쉴드 TBM 터널에 대한 최적 보강영역을 분석하고자 하였다. 이를 위해 직경 3.5 m의 소단면 공동구 터널을 대상으로 단층파쇄대 폭, 단층점토 존재여부, 토피고, 지하수위, 보강영역을 달리하여 수치해석을 수행해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 단층점토가 없는 경우 단층폭 0.5D는 지반보강을 적용하지 않아도 내공변위가 허용치 내로 발생하였으나, 단층폭 1.0D, 2.0D에서는 주변지반의 소성파괴로 인해 터널 굴착면 주변 0.5D의 지반보강이 요구되었다. 단층점토 존재 시 단층폭 1.0D 이상, 토피고 10 m 이상일 때 내공변위가 30.0 mm 이상 발생하여 0.5D만큼 지반보강 적용 시 안정성 확보가 가능하였으며, 토피고 30 m, 단층폭 2.0D의 경우 2.0D의 지반보강이 요구되었다.
2. 지표침하는 단층점토가 없을 때 단층폭 0.5D의 경우 토피고 20 m 이상에서 최소 18.63 mm가 발생하여 지반보강이 요구되었으며, 그 이상의 단층폭 역시 추가적인 지반보강이 필요함을 확인하였다. 지반보강 0.5D 적용 결과 모든 케이스에서 최대 8.62 mm의 지표침하가 발생하여 안정성 확보가 가능하다고 판단된다.
3. 단층점토가 존재할 때 지반보강 미수행 시 단층폭 2.0D는 모든 토피고에서 11.47 mm 이상의 지표침하가 발생하였고, 단층폭 0.5D, 1.0D의 경우 토피고 20 m, 30 m에서 11.23 mm 이상의 지표침하가 발생하였다. 지반보강 적용 결과 보강영역 0.5D~2.0D 적용 시 안정성 확보가 가능하였으며, 단층폭 2.0D의 토피고 20 m, 30 m의 경우 터널 상부 단층대 전체에 지반보강을 수행해야 지표침하가 10.0 mm 이내로 발생하여 안정성 확보가 가능하였다.
4. 단층점토 존재 시 낮은 투수계수로 인해 지하수 유출량이 최대 0.07 m^3/min/km가 발생하여 차수보강이 불필요 하였으나, 단층점토 미존재 시 모든 케이스에서 최소 0.36 m^3/min/km 이상의 지하수 유출이 발생하여 차수보강 적용이 필요하였다. 차수보강 적용 결과 0.03~0.12 m^3/min/km의 유출량이 발생해 안정성 확보가 가능하다고 판단된다.
5. 본 연구는 지중 내 암반층에 대한 단층파쇄대의 다양한 수많은 조건들을 반영하기에 어려움이 있어 일반적인 단층파쇄대의 조건을 암반파쇄대인 미고결 각력암 조건과 압쇄대를 고려한 미고결 각력암과 단층점토가 혼재된 조건에 대해 주변여건을 변경하며 영향을 고려하였다. 따라서 상기와 다른 단층파쇄대(단층파쇄대의 조건이 다양함을 고려)조건에 대해서는 많은 자료와 실제 시공사례를 통한 상세연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 '도심지 소단면(ø3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(과제번호: 20SCIP-B105148-06)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

저자 기여도

강병윤은 연구개념 및 설계를 하였고, 박형근은 원고검토를 하였고, 차재훈은 데이터 수집 및 분석을 하였고, 김영진은 데이터해석 및 원고작성을 하였다.

References

1. Cho, W.S. (2016), Numerical analysis on the behavior of shield TBM cable tunnel, Master Thesis, Inha University, pp. 12-17.
2. 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", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 4, pp. 403-415.
3. Japan Geotechnical Society (2012), Shield TBM method.
4. Jeong, H.Y., Zhang, N., Jeon, S.W. (2018), "Review of technical issues for shield TBM tunneling in difficult grounds", Tunnel and Underground Space, Vol. 28, No. 1, pp. 1-24.
5. Kang, B.Y., Park, H.K., Cha, J.H., Kim, Y.J. (2019), "A study on the optimal reinforced zone of a small sectional shield TBM tunnel in difficult ground", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 6, pp. 735-747.
6. Kim, J.W. (2013), Case study on the effectiveness of injection in LW grouting, Master Thesis, Pukyong National University, pp. 38-39.
7. Kim, J.Y., Moon, J.S., Jeon, K.C. (2017), "Soil improvement area estimation method and examples for shield TBM tunnel construction", Geotechnical Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 18-25.
8. 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. 1-4.
9. Kim, S.S. (2001), A study on forecasting ultimate displacement in tunneling, Master Thesis, Inha University, pp. 13-15.
10. Ko, M.S. (2014), The study of tunnel reinforcement method by structural features of fault zones, Master Thesis, Woosong University, pp. 29-30.
11. Kwak, C.W., Park, I.J. (2015), "Numerical simulation for surface settlement considering face vibration of TBM tunnelling in mixed-face condition", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 333-339.
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), Road design manual-tunnel (in Korean), pp. 1118.
13. Nam, K.C., Heo, Y., You, K.H. (2003), "The effects of the face reinforcement at shallow tunnels in fractured rock masses", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 5, No. 4, pp. 323-336.
14. National Emergency Management Agency (2012), Active fault map and seismic hazard map (in Korean).
15. 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. 1-124.
16. Seo, M.B. (2016), Ground reinforcement effect of short-period vibration grouting, Ph.D. Thesis, Korea National University of Transportation, pp. 100-104.
17. Son, Y.M. (2017), Behaviour analysis of chimney collapse under tunnel excavation in small scaled fault fracture zone, Ph.D. Thesis, Mokpo National Maritime University, pp. 68-72.

18. Song, G.J., Yun, H.S., Seo, Y.S. (2016), “Prediction of fault zone ahead of tunnel face using longitudinal displacement measured on tunnel face”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 26, No. 2, pp. 187-196.
19. Yun, H.S., Seo, Y.S. (2016), “Analysis of fault attitudes by using trajectories of the maximum longitudinal displacement on tunnel face”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 26, No. 3, pp. 393-401.