

페이스 볼트 공법을 이용한 터널 막장 안정성에 관한 수치해석적 연구

라지현^{1*}, 윤지선²

A numerical study on the safety of tunnel face using face bolting method

Jee-Hyun Ra, Ji-Sun Yoon

Abstract As tunnel excavation generates stress release, a stability security of tunnel face is mainly important in case of tunnel excavation in the weak grounds. using the steel bar or glass fiber pipe which had regular hardness, a face bolt method to reinforce previously is applied to an excavation object tunnel face aspect among measures methods regarding this. Therefore, used *FLAC^{3D}* Ver. 2.1 on 5 Case of 0.5D (2EA), 1.0D, 1.5D, 2.0D with the length and 6 Case of 0, 20, 40, 60, 80, 100EA with the number of the bolt that a face bolt method was installed at these papers in the necessary weak grounds in order to review applicability of the tunnel face reinforcement method that used these face bolts, and executed three dimension continuous analysis.

Keywords: Rock bolt, non-destructive test, guided wave, dispersion, defect ratio, AE (acoustic emission)

요 지 터널 굴착은 응력해방을 발생시키기 때문에 연약한 지반에서의 터널 굴착 시에는 막장의 안정성 확보가 무엇보다도 중요한 사안으로 대두되고 있다. 이에 대한 대책 공법 중 굴착대상 막장면을 일정한 강성을 가진 강봉이나 유리 섬유 파이프를 이용하여 선행 보강하는 페이스 볼트 공법이 적용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 페이스 볼트를 이용한 막장 보강공법의 적용성을 검토하기 위해 페이스 볼트 공법이 필요한 연약한 지반에서 타설 되는 볼트의 개수를 0, 20, 40, 60, 80, 100개의 6가지 Case와 길이를 0.5D (2가지), 1.0D, 1.5D, 2.0D의 5가지 Case에 관하여 *FLAC^{3D}* Ver.2.1을 이용해 3차원 연속체 해석을 실시하였다.

주요어: 터널 막장 안정, 페이스 볼트 공법, 3차원 연속체 해석

1. 서 론

NATM공법은 산악터널을 중심으로 급속히 보급되어 이미 표준 공법으로 정착되었다고 볼 수 있지만, 도시 및 그 주변에 NATM공법을 적용할 때는 아직 특별한 검토를 필요로 하는 경우가 많다.

터널 굴착은 응력해방을 발생시키기 때문에 연약한 지반에서의 터널 굴착 시에는 막장의 안정성 확보가 무엇보다도 중요한 사안으로 대두되고 있다. 터널 막장의 불안정으로 인한 막장 붕괴 및 이에 수반되는 지표면 침하, 터널 주변부의 이완 등을 야기 시킬 수도 있으며, 천층 터널의 경우 지표면 함몰로 이어져 막대한 경제적 손실 및 인명 피해를 야기 시키기도 한다. 따라서 터널

굴착 시 막장의 안정성 평가는 중요하다.

막장이 불안정한 경우에는 일반적으로 분할 굴착을 적용하게 되는데, 이러한 분할 굴착공법은 일반적으로 공사 기간과 공사비를 증가시킬 뿐만 아니라, 지반이 불량한 경우에는 분할 굴착을 적용하더라도 막장이 불안정한 상태로 있는 경우가 많게 된다. 이에 대한 대책 공법 중 최근 유럽 지역에서는 굴착대상 막장면을 일정한 강성을 가진 강봉이나 유리 섬유 파이프를 이용하여 선행 보강하는 페이스 볼트 공법이 활발히 적용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 페이스 볼트를 이용한 막장 보강공법에 관한 3차원 연속체 해석을 *FLAC^{3D}* Ver.2.1을 이용해 수치해석적 검토를 수행하였다. 통상 페이스 볼트의 효과는 볼트 길이, 설치 본수, 배치 형상 등 여러 가지 요소들에 의해 영향을 받지만, 본 논문에서는 볼트 길이와 설치 본수에 대해 연구를 하였다.

¹(주)단우기술단 기사

²정회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수

*교신저자:라지현 (idisi100@hotmail.com)

2. 기본 이론

NATM에서는 굴착 직후 벽면은 숏크리트나 록볼트에 의해 지지되기 때문에 채래공법과 비교하여 암반의 느슨함도 적고 막장의 자립성도 좋지만, 막장은 통상 무지보 상태로 놓여 있기 때문에 암반이 연약 하거나, 붕괴성 암반 또는 팽창성 암반에서는 막장의 밀어냄이나 붕괴가 발생하는 경우도 있다. 이와 같은 막장면의 안전은 천반의 안정에도 큰 영향을 미치기 때문에 주의해야 할 사항이기도 하다.

이러한 경우에 쓰이는 보조 공법으로는 막장 전방 지반에 아치셀상의 구조체를 구축하는 프리라이닝을 들 수 있으며, 또한 막장 자립성을 얻기 위해 사용하는 막장면 숏크리트공, 막장면 록볼트공 등이 있다.

이와 같은 대응으로 큰 단면을 시공할 수가 있으며 보다 효율적인 시공이 가능하게 된다.

막장면 록볼트 공법은 막장면이 굴착된 터널 쪽으로 밀려나오음을 방지하기 위한 막장 강화 대책의 하나로써 막장에 록볼트를 타설하여 막장의 안정을 얻고자 하는 방법이다. 암반의 상황에 따라 타설하는 록볼트의 개수와 설치 간격이 결정되며 또한 막장면 일부에 설치하는 경우와, 전면에 설치하는 경우로 구분하기도 한다.

록볼트의 길이는 막장 굴착시 이전에 타설한 볼트가 충분히 암반에 남아 있어서 효과적으로 작용할 수 있는 길이가 요구되는데, 보통 1회 굴진장의 3배 정도로 하고 있다.

일반적으로 널리 쓰이는 록볼트를 막장면 안정을 목적으로 사용하면 굴착 작업 시 시공에 지장이 됨으로 비교적 쉽게 절단되는 글라스 파이버(glass fiber) 록볼트를 막장 자립공으로 사용하기도 한다. 또한 막장의 밀려나오에 효과적으로 저항할 수 있도록 지압판(plate)으로 단단히 막장면을 구속하기도 하고, 강관다단 공법이나 제트 그라우팅 공법과 병행되어 적용되기도 한다.

3. 해석 방법

3.1. 해석 모델

본 해석에서 적용된 해석 모델은 터널 직경 12.198m

로 2차선 도로 터널 단면으로 하였다. 해석 프로그램은 3차원 연속체 해석이 가능하고, 유한차분법을 이용하는 Itasca 사의 *FLAC^{3D} Version 2.10*을 사용하였다. 지반의 파괴조건은 Mohr-Coulomb을 적용하여 탄소성 해석을 실시하였다. 해석영역은 터널 중심으로부터 각각 좌우 3.5D, 하부경계까지는 4.0D, 토피고는 30m로 길이 60m, 높이 80m, 폭 100m의 Fig. 1과 같은 매쉬를 적용하였다.

3.2. 지반 물성

해석 지반은 페이스 볼트 공법 적용이 필요한 연약한 풍화토 지반의 물성치를 Table 1과 같이 적용하였다.

굴착 후 지보는 통상 풍화토에서 적용되는 숏크리트와 록볼트를 하였고, 페이스 볼트는 터널 굴착 시 절단하기 쉬운 FRPG의 물성치를 적용하였다. Table 2에 해석에 쓰인 지보재의 물성치를 나타냈다.

3.2. 해석 방법

본 해석에서는 페이스 볼트의 수와 길이를 변수로 하여 굴진면 전후의 응력-변형 거동을 측정하였다. 굴진장은 2m로 페이스 볼트 개수에 따라 6가지 Case와 길이에

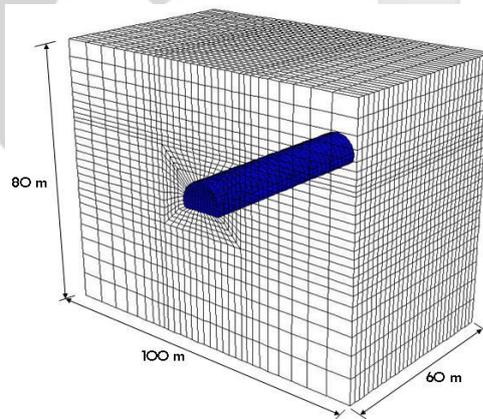


Fig. 1. Three dimensional mesh for numerical analysis

Table.1. Physical properties used in the numerical analysis

Class	Elastic modulus	Poisson's ratio	Friction angle	Cohesion	Density
Unit	MPa	-	°	KN/m ²	KN/m ³
Weathering soil	39.22	0.33	30	29.42	22.55

Table 2. Reinforcement properties used in the numerical analysis

Class	Elastic modulus	Poisson's ratio	Cohesion	Density	Area	Thickness
Unit	MPa	-	KN/m ²	KN/m ³	m ²	m
Rock bolt	1.96×10 ⁵	-	-	-	5.07×10 ⁴	-
Face bolt	2.0×10 ⁵	-	-	-	1.71×10 ³	-
Shotcrete	4.9×10 ³	0.27	294	22.56	-	0.25

Table 3. Cases for numerical analysis by the number of face bolts

Case	The number of face bolts (EA)	Length of face bolts (m)	The overlaping length of face bolt (m)
Case1(0)	0	12 (1.0D)	6
Case2(20)	20	12 (1.0D)	6
Case3(40)	40	12 (1.0D)	6
Case4(60)	60	12 (1.0D)	6
Case5(80)	80	12 (1.0D)	6
Case6(100)	100	12 (1.0D)	6

Table 4. Cases for numerical analysis by the length of face bolt

Case	The number of face bolts (EA)	Length of face bolt (m)	The overlaping length of face bolt (m)
Case7(0.5D)	60	6 (0.5D)	4
Case8(0.5D)	60	6 (0.5D)	2
Case9(1.0D)	60	12 (1.0D)	6
Case10(1.5D)	60	18 (1.5D)	6
Case11(2.0D)	60	24 (2.0D)	6

Table 5. The sectional view by the number of face bolts

Case	Sectional view	Case	Sectional view
Case1 (0)		Case2 (20)	
Case3 (40)		Case4 (60)	
Case5 (80)		Case6 (100)	
Cross section			

Table 6. The sectional view by the length of face bolt

Case	Sectional view
Case7 (0.5D)	
Case8 (0.5D)	
Case9 (1.0D)	
Case10 (1.5D)	
Case11 (2.0D)	

따라 5개의 Case (Table 3~6 참고)로 나누어 해석을 실시하였다.

4. 해석 결과

4.1 설치 개수별 해석 결과

해석결과는 Table 7에 나타나 있다. Table 7은 타설하는 볼트 개수에 따른 막장변위, 천단침하, 지표면 침하, 터널의 좌우측 벽의 변위 최대값을 나타낸 것이다.

볼트의 개수가 증가할수록 변위가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 Case 6 (100EA)에서 막장 최대 변위는 145.47mm로 Case 1 (0 EA)에 비교해 약 43% 정도 막장 변위가 감소된 것을 볼 수 있다. Fig 2. 는 무보강시의 최대 변위를 100%로 나타냈을 때의 타설 하는 볼트 개수에 따른 막장 최대 변위, 천단 최대 변위, 측벽 최대 변위, 지표면 최대 변위의 값을 나타낸 그래프 이고 Fig 3. 은 페이스 볼트 설치 개수별 막장면 변위 양상 그래프이다.

4.2 설치 길이별 해석 결과

Table 7. Max. displacement by the number of face bolts

Case (mm)	Case1 (0 EA)	Case2 (20 EA)	Case3 (40 EA)	Case4 (60 EA)	Case5 (80 EA)	Case6 (100 EA)
Face max. displacement	251.67 (100%)	200.43 (79.64%)	175.54 (69.75%)	169.10 (67.19%)	156.55 (62.20%)	145.47 (57.80%)
Crown max. settlement	99.45 (100%)	87.67 (88.16%)	81.53 (81.99%)	77.44 (77.87%)	73.48 (73.89%)	70.15 (70.54%)
Left wall max. displacement	80.21 (100%)	73.90 (92.13%)	70.51 (87.91%)	68.42 (85.30%)	66.35 (82.73%)	64.55 (80.48%)
Right wall max. displacement	80.00 (100%)	73.82 (92.27%)	70.26 (87.82%)	68.15 (85.19%)	66.05 (82.56%)	64.18 (80.22%)
Vertical max. settlement	-27.73 (100%)	-24.09 (93.61%)	-23.05 (89.56%)	-22.47 (87.30%)	-21.85 (84.92%)	-21.22 (82.46%)

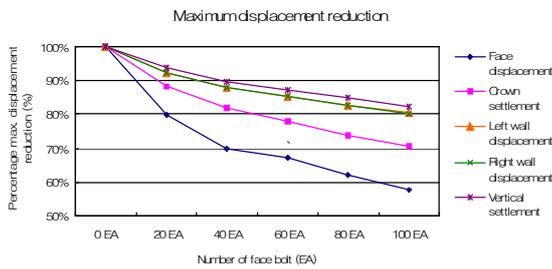


Fig. 2. Max. displacement by the number of face bolts

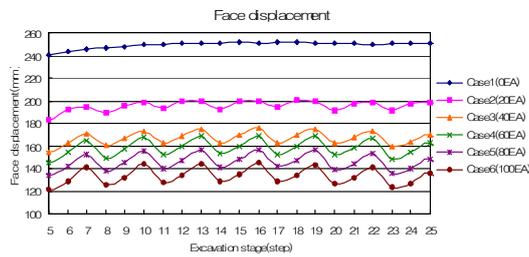


Fig. 3. Face displacement by the number of face bolts

Table 8. Max. displacement by the number of face bolts

Case (mm)	Case1 (0EA)	Case7 (0.5D)	Case8 (0.5D)	Case9 (1.0D)	Case10 (1.5D)	Case11 (2.0D)
Face max. displacement	251.67 (100%)	156.94 (62.36%)	187.93 (74.67%)	169.10 (67.19%)	201.27 (79.97%)	229.11 (91.04%)
Crown max. settlement	99.45 (100%)	73.33 (73.74%)	76.21 (76.63%)	77.44 (77.87%)	88.88 (89.37%)	90.13 (90.63%)
Left wall max. displacement	80.21 (100%)	65.98 (82.26%)	67.62 (84.30%)	68.42 (85.30%)	75.19 (93.75%)	76.92 (95.90%)
Right wall max. displacement	80.00 (100%)	65.74 (82.17%)	67.39 (84.24%)	68.15 (85.19%)	75.04 (93.79%)	76.71 (95.89%)
Vertical max. settlement	-25.73 (100%)	-22.22 (86.36%)	-22.54 (87.60%)	-22.47 (87.30%)	-23.83 (92.60%)	-24.28 (94.35%)

해석결과는 Table 8에 나타나 있다. Table 8은 타설하는 볼트 길이에 따른 막장변위, 천단침하, 지표면 침하, 좌우측 변위의 최대값을 나타낸 것이다. Fig. 4는 무보강시의 최대 변위를 100%로 나타냈을 때의 타설하는 볼트 길이에 따른 막장 최대 변위, 천단 최대 변위, 측벽 최대 변위, 지표면 최대 변위의 값을 나타낸 그래

프 이다.

CASE 7 (0.5D)과 CASE 9 (1.0D)로 타설 시 CASE 1 (0EA)과 비교해 볼때 막장 변위가 최대 38%, 33% 감소하는 것으로 보인다.

Fig. 5에는 페이스 볼트 타설 길이별 막장면 변위 양상 그래프를 나타내었다.

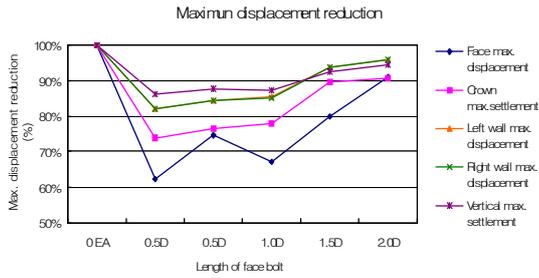


Fig. 4. Max. displacement by face bolt length

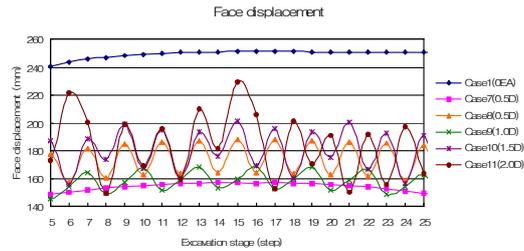


Fig. 5. Face displacement by the face bolt number

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 막장 안정 보강 공법의 하나인 페이스 볼트 공법의 검토를 위해 3차원 연속체 해석을 실시하였다. 막장면에 타설 하는 볼트의 개수와 길이에 따른 변위와 막장면의 응력분포도를 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 페이스 볼트 공법은 막장면에 타설 하는 볼트의 개수와 길이 등에 영향을 받게 된다. 타설 하는 볼트의 개수가 증가할수록 막장면에서 변위가 최대 43%정도 감소하는 것을 알 수 있으며, 설계 시 적절한 볼트의 타설 개수는 시공성과 경제성, 단면의 크기 등을 고려해 결정해야 된다고 판단된다.
2. 타설 하는 볼트의 길이는 해석 결과 0.5D와 1.0D에서 변위가 최대 약48%, 43% 정도 감소하였다. 하지만 0.5D로 시공 시 시공단계가 많아지게 되므로 본 논문에서 적용 시에는 1.0D 정도면 막장면 보강 효과가 있다고 판단된다.
3. 막장면의 최대 주응력 분포도에서는 무보강시보다 볼트 타설 개수가 증가할수록 터널 막장에서의 응력 집중 현상이 작아지는 것을 알 수 있으며, 볼트 길이는 0.5D나 1.0D정도면 막장의 응력 집중을 저감하는데 효과가 있다고 생각된다. 하지만 이는 어디까지나 수치해석에 의한 결과이므로 향후 현장 실험 등에 의해 적절한 적용이 필요하다고 판단된다.

4. 페이스 볼트 공법은 타설 개수 및 길이뿐만 아니라, 타설 각도나 지반 조건, 축압계수 등에 영향을 받게 되므로 향후 이와 같은 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 서경원, 배규진, 西村和夫, 土門剛 (2006), “터널 안정화를 위한 페이스볼트의 효율적 배치에 관한 수치해석적 연구”, 터널기술, 제8권 제2호.
2. 유충식, 신현강 (2000), “수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동” 대한터널협회 학술논문.
3. 유충식, 신현강 “모형실험에 의한 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동 분석”, 터널기술, 제2권 제2호.
4. 윤지선 (1991), NATM 工法의 調査·設計·施工, 구미서관, pp. 216~217.
5. 이선복 (2003), “비점성토 지반의 얇은 터널에 적용된 프리라이닝 공법의 유효성 평가”, 박사학위논문, 인하대학교, pp. 8~12.
6. 임한옥, 김치환, 터널공학, 구미서관, pp. 99~100.
7. 조영준 (2003), “프리라이닝의 지표침하 억제효과에 관한 모형실험”, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 1~6.
8. 한국지반공학회, 지반공학시리즈 7 터널편, 구미서관, pp. 123~125, 203~256.
9. 土木學會 (2000), プレライニング工法, トンネルライブラリー 第10号, pp. 10.
10. Itasca Consulting Group (2002), “Theory and Background”, Inc. FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 2.1, pp. 1~16.



라 지 현
(주)단우기술단 기사

E-mail: idisil00@hotmail.com



윤 지 선
인하대학교
환경토목공학부 교수

E-mail: jyoons@inha.ac.kr

K C I