학술논문

한국터널공학회논문집 2010년 1월
제12권 제1호, pp. 000-000

PNT공법에 대한 원리 및 수치해석적인 연구

채성은[1], 서동현[2], 임기운[3], 천성렬[4], 김상환[5]*

A study of mechanism and numerical analysis of PNT method

Sung-Eun Chae, Dong-Hyun Seo, Gi-Woon Im, Sung-Yul Chun, Sang-Hwan Kim

Abstract In this paper, a new soft ground tunneling technique termed the PNT method(Pre-Nailed Tunneling Method) is studied. Mechanism of the method is investigated in terms of theoretical and numerical approaches. The pre-nailing effects are validated by performing two dimensional numerical analyses. It is identified that the method is successful in soft grounds, and greatly efficient in reducing the ground deformation by nailing the ground. To develop the design guidelines of the method, numerical parametric analyses on the installation range and angle were also carried out.

Keywords: Tunnel, pre-support method, soft ground tunnel, F.E.M, PNT method

요 지 본 논문은 새로운 연약지반 보강 굴착기술인 PNT 대한 연구로써 공법의 메카니즘 이론을 제시하였으며 선 네일의 설치 보강효과를 확인하기 위하여 2차원 수치해석을 수행하였다. 연구결과 PNT공법의 적용시 선 네일에 의한 연약지반에서의 변위가 크게 감소함을 확인하였다. 또한 PNT공법의 설계적용을 위하여 네일의 설치간격, 설치각도 및 설치 너비 등에 대한 다각적으로 분석하였다.

주요어: 터널, 선지보, 토사터널, 유한요소, PNT공법

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전으로 인하여 지역 간 연결과 물류이동의 극대화를 위하여 기존도로의 선형 정비 및 신규 도로의 개설이 증가하고 있다. 국토의 70%가 산지인 우리나라에서 도로의 종단구배 최소화 및 평면 선형의 직선화로 효율적인 국토이용을 위해 지하공간에 대한 수요가 증가하여 지하공간 개발이 나날이 증가하는 추세이다.

국내에 NATM공법이 도입되어 본격적으로 적용된 시기는 1980년대 초에 시행된 서울지하철 3호선 건설공사부터이며, NATM은 최근까지 국내의 터널설계와 시공법에 있어 대부분을 차지하고 있는 실정이다(권오엽 등, 2004). 일반적으로 산악 또는 견고한 지반에 주로 적용되었던 NATM공법은 노선선정 조건 및 환경적인 제약조건으로 인하여 저토피구간과 토사지반에서의 적용이 점차 증가하고 있다. 토사지반은 미고결 상태이므로 터널의 막장면 및 천단부의 변위와 붕괴, 지표면 침하 등이 문제가 되며 자립성이 확보되지 않는 경우 적절한 보조공법을 선정하여 터널의 안정성을 확보한 후 굴착하여야 한다(문훈기 등, 2004). 그러나 터널을 대상으로 한 수치해석의 경우는 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어왔다(유광호 등, 2005). 또한 저토피 터널의 경우 굴착시 터널주변에 발생된 변위가 지표면까지 미치게 되며 진행성 파괴의 경우에는 조기에 보강을 하지 않을 경우 변형과 붕락이 진전되어 대규모 함몰사고까지 나타날 수 있다(터널의 이론과 실무, 2007).

이러한 경우 터널굴착 후 지반을 보강하는 개념의 공법보다는, 자립시간과 굴착으로 인한 변형을 제한시켜 반영구적인 안정성에 기여할 수 있는 지반을 선보강 하는 공법이 유용할 것이다(Korbin.G.E and Brekke.T.L, 1976).

일반적인 선보강 공법으로는 강관다단그라우팅 공법을 적용하고 굴착 후 굴착면 전체 혹은 일부에 숏크리트, 록볼트, 마이크로 파일 등의 보강공법을 적용하는 것이 일반적이나 연약한 지층에서는 터널의 안정을 확보하기 위해 보다 과도한 설계가 요구되는 것이 일반적이다(방춘석 등, 2001, 배규진 등, 2003). 또한 보강된 터널주변 지반의 지보, 보조 및 보강, 굴착설계 시 보강된 주변지

[1]건국대학교 석사과정
[2](주)현이앤씨 사장
[3](주)도화종합기술공사 이사
[4](주)이산 도로국토부문 사장
[5]호서대학교 토목공학과 교수
*교신저자: 김상환 (kimsh@hoseo.edu)

www.kci.go.kr

반의 강도를 고려해야 한다(김상환 등, 2005). 이에 따라 경제성과 안정성을 동시에 만족시킬 수 있는 보강공법의 연구와 특허 개발이 요구되고 있다.

그 중, PNT공법(Pre-nailed Tunnelling Method)은 토사 및 저토피 구간 터널의 상부 지표면에서 선지보 네일을 수직으로 설치하여 터널 주변지반의 보강효과를 확보한 후 터널을 굴착하는 공법이다. 김상환 등(2009)은 기존 터널의 지보시스템과 선지보의 적용성을 비교한 결과 토사, 연약대 터널 등의 보강에 적합하며, 특히 갱구 입구에서 환경적, 경제적, 안정성 측면에서 유리하다고 판단하였다. 하지만 PNT공법의 설계 파라미터의 결정을 위한 연구는 아직 수행되어 있지 않아, 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 토사지반에 위치한 대단면 터널 굴착 시 PNT공법 적용에 따른 보강효과를 수치해석 도구를 이용한 파라미터 스터디를 통하여 분석하고자 하였다.

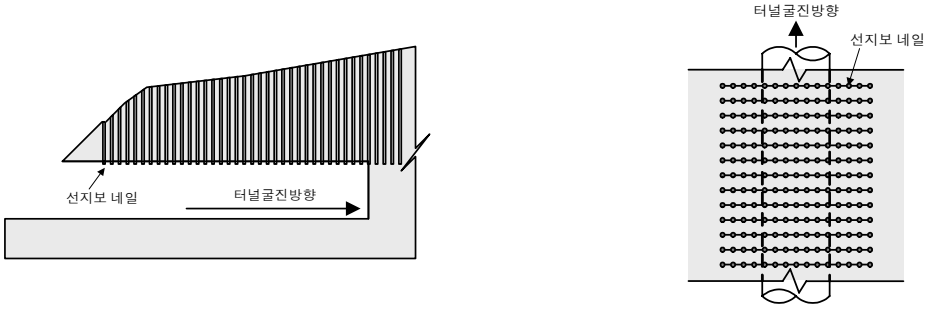
2. PNT 공법의 메카니즘

2.1 PNT 공법 개요

PNT공법은 그림 1과 같이 시공이 예정된 터널의 상부 지표면에서 계획 굴착선을 향해 선지보 네일(네일과 결합된 팩커를 이용하여 압력그라우팅)을 시공함으로써 터널 주변 지반을 보강하여 아칭영역을 확보한 후 터널을 굴착하는 공법이다. 이 공법은 지반침하를 저감하고 자립시간을 증대하여 저토피 토사구간 터널의 안정성을 증대시킨다. 또한 선지보네일의 그라우트 유효경이 증가하여 인발저항이 증가하며, 터널 아칭영역이 완벽하게 성립되도록 락볼트의 역할을 수행한다.

2.2 공법의 원리

Soft Ground Tunnelling의 기술적 핵심은 지반변위를 최대한 억제하는 것이다. PNT공법은 갱구부 사면보강을 실시하면서 동시에 네일을 수직으로 설치하여 사면보강 및 터널보강을 동시에 확보할 수 있으며 지보재로 압력식 그라우팅 네일을 적용하여 네일의 인발력 향상과 지반의 보강효과를 동시에 확보가능하다. 따라서, 터널 굴착 시 발생하는 지반의 응력 부담을 선지보 네일이 먼저 부담함으로써 숏크리트 및 보조지보재의 응력부담을 줄이고 천단 및 측벽의 변위량을 선지보 네일이 굴착과 동시에 억제시킬 수 있다. 네일은 굴착면이 접근함에 따라 그림 2와 같이 지반 보강재 역할로 종횡방향 아칭



(a) 종단면도 (b) 횡단면도

그림 1. PNT공법 개요도

(a) 종방향 아치 (b) 횡방향 아치

그림 2. 굴착 전 지반보강 효과

www.kci.go.kr

현상을 강화시켜주며, 굴착 후에 보강기능을 하던 네일의 역할을 그림 3과 같이 지보기능으로 전환함으로써 터널의 안정을 도모한다.

네일의 지반보강 및 지보작용효과는 그림 4에서와 같이 선 시공한 네일의 영향으로 인해 굴착 전 보강효과가 발생하여 침하(δu_1)가 감소하고, 굴착 후 지압판을 설치함으로써 보강기능을 하던 네일은 지보기능으로 그 역할이 전환되어 굴착 후 발생하는 침하(δu_2)를 감소시키게 된다.

2.3 설계와 시공

터널 지표면에서 네일을 선 시공하게 되므로 토피에 따른 시공성의 한계가 있으며, 네일의 설치간격과 설치각도가 PNT공법의 설계 및 시공에 주요한 요소가 된다. 하지만 아직 설계요소에 대한 정립이 이루어져 있지 않아, 본 논문에서 네일의 설치 간격, 각도 및 너비 등의 설계요소에 대한 영향을 평가하였다.

PNT공법의 계략적인 시공순서는 그림 5와 같다. 예정된 터널의 입·출구 또는 저토피 부근 상부 지표면에서 본 터널의 단면라인을 향하여 터널 굴착 전 네일을 미리 천공하여 설치 및 그라우팅 후에 본선터널을 굴착한다.

3. 수치해석

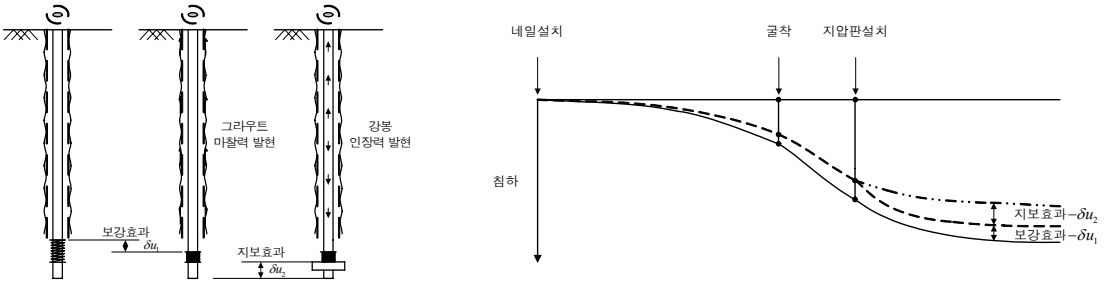
3.1 해석 모델

수치해석에 적용된 터널은 폭(B) 13 m, 높이(h) 9 m의 대단면 마제형 터널로 가정하였으며, 지표로부터 15 m 하부에 위치하는 것으로 묘사하였다. 지반의 경계조건을 고려하여 터널의 양 측방 및 하부는 터널 외각선에서 각각 터널 폭의 4배 이상을 취하였다. 상용프로그램인 MIDAS/GTS를 사용하여 지반모델과 터널 라이닝 모델은 각각 Mohr-Coulomb 모델과 Elastic 모델을 적용하였으며, 네일은 Embeded truss요소를 사용하였다. 그림 6은 해석적용 모델의 개념도를 나타낸 것이다.

해석에 적용된 지반물성은 선지보 설치에 따른 거동을 확인하기위하여 단일층인 토사 지층으로 설정하였으며, 설계 파라미터인 네일에 의한 지반 보강효과를 검토하기 위하여 그라우팅으로 인한 추가적인 지반보강효과

(a) 종방향 (b) 횡방향

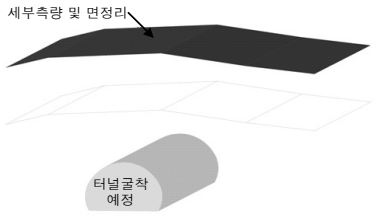
그림 3. 굴착 후 지보보강 효과



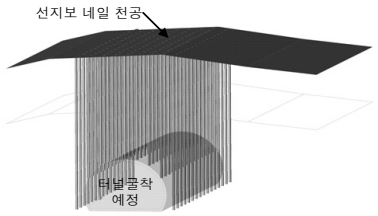
(a) 지반보강 및 지보작용 (b) 침하로 본 선지보 효과

그림 4. 네일의 보강 및 지보작용

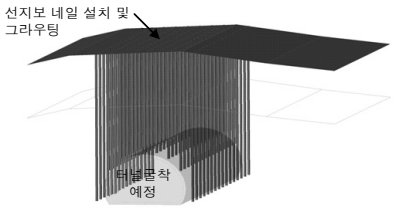
www.kci.go.kr



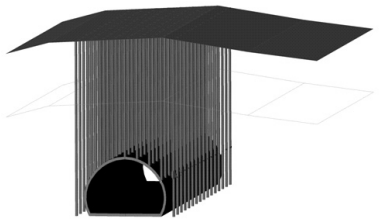
(a) 선지보 네일 위치 측량 및 면정리



(b) 선지보 네일 천공

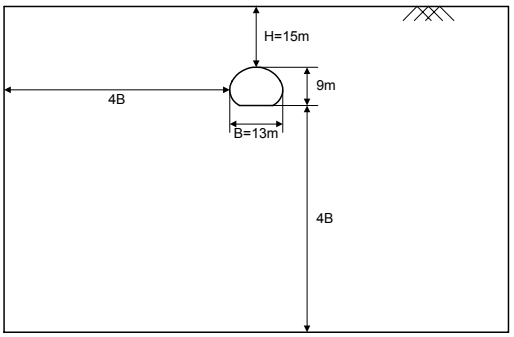


(c) 선지보 네일 설치 및 그라우팅

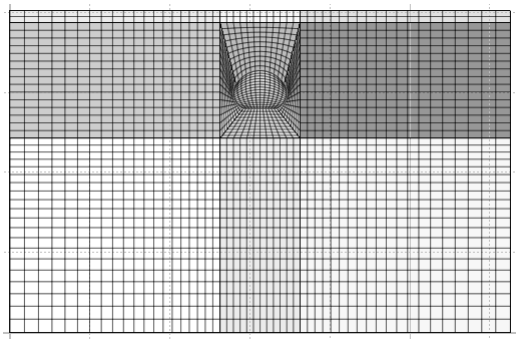


(d) 본선터널 굴착

그림 5. PNT공법 시공순서



(a) 해석모델



(b) 메쉬

그림 6. 해석모델 및 메쉬

는 고려하지 않았다. 본 연구에 적용된 모델링 물성치는 표 1과 같다.

3.2 해석 케이스

저토피의 토사터널에서 PNT공법 적용시 지반보강 효과분석을 위하여 표 2와 같이 해석케이스를 설정하였다. 지반보강에 영향을 줄 수 있는 네일의 다양한 시공형태를 고려하였으며, 수행된 결과 중에서 최적의 결과를 나타내는 선지보 네일의 형태는 다음 해석케이스의 시뮬레이션에 반영하였다. 수치해석의 시공순서는 네일 설치 후 굴착을 하여 1차숏크리트 및 2차숏크리트가 적용되는 것으로 모델링하였다. 또한 사용된 하중분담율은 ○○도로터널의 설계시 적용된 사례를 기준으로 하중분담률을 각각 굴착 40%, 1차숏크리트 30%, 2차숏크리트 30%로 산정하였다. 또한 네일의 절점을 터널의 절점과 공유하게 설정하여 지압판 효과를 대신하였다. 터널해석에 적용된 네일의 최적패턴검토는 지보 간격, 설치각도, 설치 너비 순으로 수행하였다.

4. 해석 결과

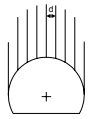
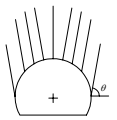
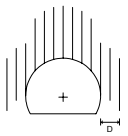
터널 굴착은 지반손실을 가져와 필연적으로 지반의

www.kci.go.kr

표 1. 해석 물성치

구 분		$\gamma(kN/m^3)$	$c(kPa)$	$\phi(°)$	$E(MPa)$	ν	K_0
토사층		19.0	15.0	30.0	85.0	0.35	0.5
선지보 네일		78.5	-	-	210,000	-	-
숏크리트	1차	25.0	-	-	5,000	-	-
	2차				15,000		

표 2. 해석 케이스

case		변수	비고
네일 간격		선지보 간격(m)	
		1.0 m	네일 길이 7.0 m
		2.0 m	
		3.0 m	
설치 각도		설치 각도(°)	
		60°	네일간격 : 1.0 m 선지보길이 : 9.0 m
		75°	
		90°	
설치 너비		설치 너비(m)	
		0.1B	선지보길이 : 9.0 m 설치각도 : 90°
		0.5B	
		1.0B	

변형을 일으킨다. 변형은 터널이 굴진됨에 따라 지중을 거쳐 점차 지표까지 전달되어 지표침하의 형태로 나타난다. 터널상부의 어느 수평단면상에서 발생하는 횡방향의 지반변위는 터널 중심선을 기준으로 할 때 지반손실의 영향이 미치는 일정한 구간 내에서 발생한다. Peck (1969)은 횡방향 침하형상은 식 (1)과 같은 가우스정규분포 곡선으로 나타내었으며, 이러한 수학적 해석은 현재까지 널리 이용되고 있다.

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \tag{1}$$

여기서, $S_{v,\max}$: 터널 중심선에서 최대 침하량, i_x: 변곡점까지의 거리

대표적인 침하형상은 그림 7과 같으며, 터널중심에서 거리 i_x에 위치한 변곡점에서 침하형상의 최대기울기를 갖는다.

지반침하 곡선의 부피는 이론적 터널 부피 이상으로 굴착된 지반의 부피와 같으며, 일반적으로 초과된 부피는 이론적 터널 부피의 비율로 설명할 수 있다(식 (2) 참조).

$$V_L = \frac{V_s}{\frac{\pi D^2}{4}} \tag{2}$$

여기서, V_L: 부피손실, D: 터널 외면 지름, V_s: 단위길이에 대한 침하곡선 부피

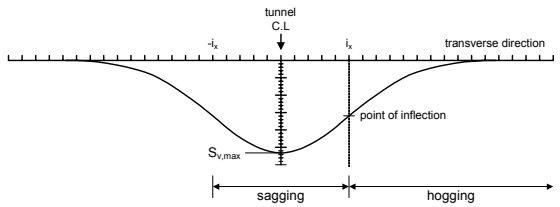


그림 7. 횡방향 침하형성(Franzius, 2003)

www.kci.go.kr

해석결과는 천단침하, 지표침하, 체적손실의 세가지 관점에 대하여 분석하였다.

4.1 네일간격 변화

그림 8은 선지보 네일이 설치되지 않은 무지보 경우의 천단침하량을 δ_{c0}로 설정하고 네일이 설치된 경우의 천단침하량을 δ_c로하여 침하량을 비율로 정규화하여 나타낸 것이다. 네일의 간격이 줄어듦에 따라 곡선의 기울기가 증가하며 천단의 침하가 크게 감소하는 경향을 나타내었으며, 네일의 간격 1.0 m에서 천단침하가 최대 20%의 감소되는 것을 확인하였다.

지표침하의 경우 네일이 설치되지 않은 무지보의 경우와 비교하여 선지보 네일 설치시 최대 10%의 지표침하 감소효과를 나타내었다. 또한 그림 9에서와 같이 네일의 간격이 줄어듦에 따라 횡방향 침하범위가 감소하는 것으로 나타났다.

침하곡선의 최대 기울기를 갖는 변곡점의 변화는 그림 10에 정규화 하여 나타내었다. 네일 간격이 증가함에 따라 변곡점의 거리는 크게 증가하는 것을 확인하였으며, 그림 11에서와 같이 변곡점의 변화에 따른 체적손실량을 비교하였을 때 네일 간격 1.0 m인 경우 최대 40%의 감소효과를 확인할 수 있었다.

4.2 네일설치 각도 변화

네일의 터널 천단 설치각도에 따른 정규화 천단침하는 그림 12와 같다. 네일이 수직으로 설치되지 않고, θ=75°로 설치되었을 경우 천단 침하감소효과가 최대로 나타났다. 천단의 상부에서의 지표침하 또한 앞의 터널 천단 침하와 같이 네일이 θ=75°로 설치되었을 경우 침하가 최소로 나타났으며 그 외의 경우는 증가하는 양상을 나타내었으나 그 차이는 약 3% 차이로 크지 않았다.

하지만, 그림 13과 14에서 볼 수 있듯이 네일이 경사로 설치된 경우 지표 침하는 수직으로 네일이 설치된 경우보다 작지만, 변곡점과 침하 범위는 넓어져 θ=60° 경우 네일이 설치되지 않은 무지보 상태의 침하 범위에 근접함을 확인하였다. 따라서 터널 굴착에 따른 선지보 네일 시공시 인접 건물에 영향이 염려될 경우 네일을 수직으로 설치하여 지표 침하 범위를 축소시켜야 할 것으로 판단된다.

체적손실의 경우 네일의 설치 각이 θ=75°인 경우 지

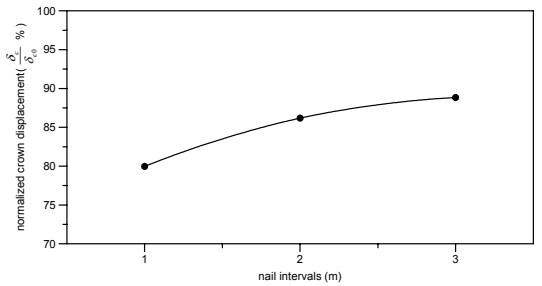


그림 8. 네일 간격변화에 따른 정규화 천단침하

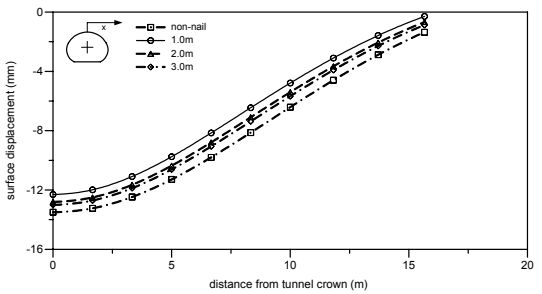


그림 9. 네일 간격변화에 따른 지표침하

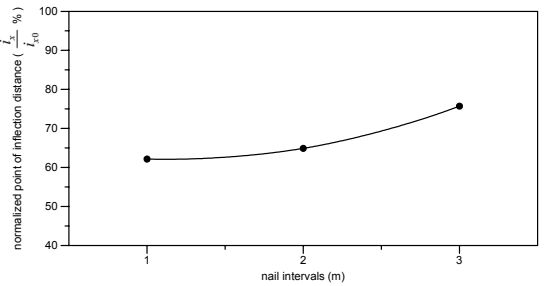


그림 10. 네일 간격변화에 따른 변곡점(i_x)변화

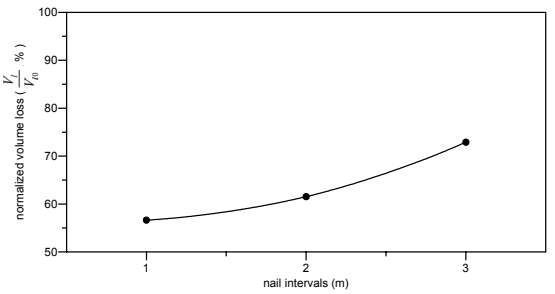


그림 11. 네일 간격변화에 정규화 체적손실

www.kci.go.kr

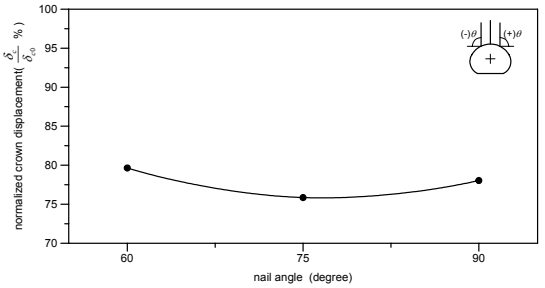


그림 12. 네일 설치각도변화에 따른 정규화 천단침하

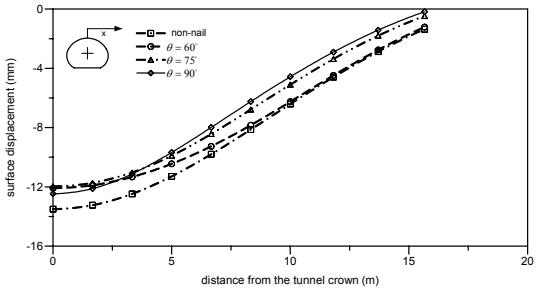


그림 13. 네일 설치각도변화에 따른 지표침하

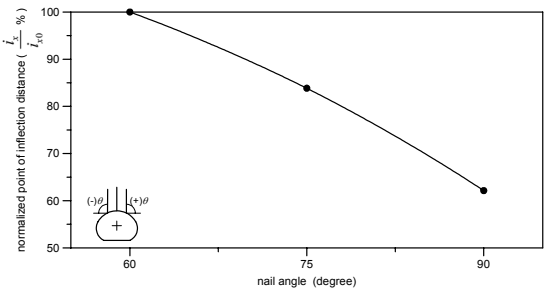


그림 14. 네일 설치각도변화에 따른 변곡점(i_x)변화

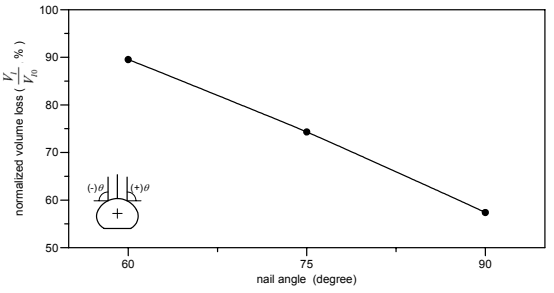


그림 15. 네일 설치각도변화에 따른 체적손실

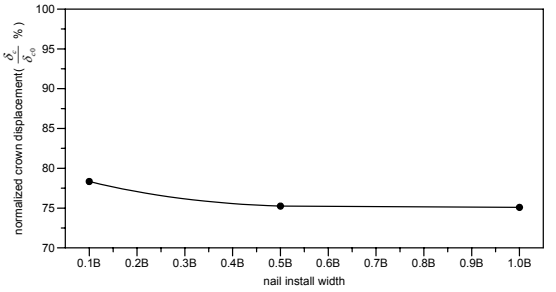


그림 16. 네일 설치너비변화에 따른 정규화 천단침하

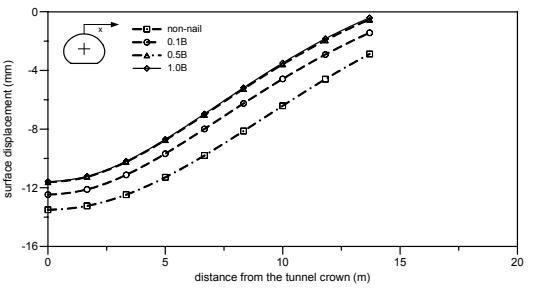


그림 17. 네일 설치너비변화에 따른 지표침하

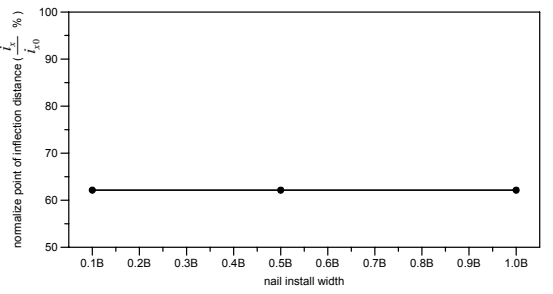


그림 18. 네일 설치너비변화에 따른 변곡점(i_x)변화

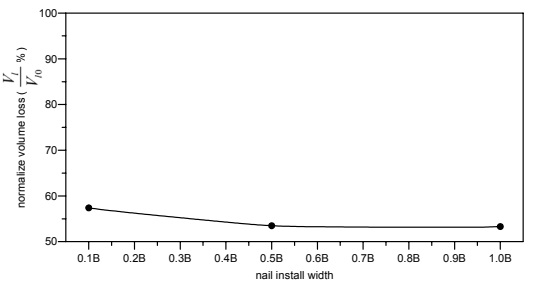


그림 19. 네일 설치너비변화에 따른 체적손실

www.kci.go.kr

표침하가 최소였으나, 침하곡선의 변곡점 및 침하범위가 넓게 분포하여 그림 15에서 확인할 수 있듯이 체적손실에서는 네일이 수직으로 설치되어있는 경우와 비교하여 감소효과가 작게 나타났다.

4.3 네일설치 너비 변화

선지보 네일의 보강범위는 터널 측벽부로 터널 폭(B=13 m)의 0.1배에서 1배까지 확인하였다. 네일 보강 범위에 따른 천단침하 양상은 그림 16에 나타내었다. 네일의 설치범위가 터널의 측벽부로부터 $0.1B$에서 $0.5B$로 증가함에 따라 천단침하는 약 3% 감소하였으나 그 보다 넓은 범위의 보강으로 인한 터널 천단 침하 감소효과는 없는 것으로 나타났다.

그림 17과 18은 횡방향 네일 설치너비 변화에 따른 지표 침하경향을 나타낸 것이다. 지표 침하는 그림에서와 같이 네일 설치너비가 터널 폭의 0.5배까지는 네일 설치에 따라 감소하나 설치너비가 그 이상이 되는 경우 보강효과는 증가하지 않는 것으로 나타났다. 또한 에러함수 곡선의 최대기울기를 갖는 변곡점 위치는 모두 동일한 것으로 나타났다. 위의 결과에서 확인한 것과 같이 네일의 설치너비가 $0.1B$에서 $0.5B$로 증가함에 따라 천단 침하와 지표 침하는 감소하였으나 $0.5B$이상의 경우에서 보강효과는 미미하였다. 터널 굴착으로 인한 체적손실 또한 앞서 결과와 마찬가지로 네일 설치너비가 $0.5B$ 이상인 경우 큰 의미가 없음을 그림 19에서 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 저토피 토사지반에 굴착되는 대단면 터널에서의 네일 적용에 따른 지반보강효과를 수치해석을 수행하여 확인하였다. 주요 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수치해석결과 네일의 설치 간격이 좁아질수록 지반의 변위는 감소하나 침하감소비율을 고려하였을 경우 1.0 m~2.0 m 사이의 간격이 적정하다.
2. 네일의 설치 범위는 터널 폭의 0.5배 이하가 적정한 것으로 판단되었다.
3. 네일을 경사지게 설치하는 경우 θ=75°에서 지표 및 천단침하가 크게 감소하였으나, 침하영향범위가 확대되는 것을 고려하였을 경우 네일의 수직설치가 요구된다.

그러나 본 논문에서는 2차원모델로 횡방향 파라미터만을 제공하여 추가적으로, 3차원 모델을 이용한 종방향 파라미터의 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 현ENC의 지원으로 이루어졌으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권오엽, 최용기, 이상덕, 김영근 (2004), “굴진면 천단 및 수평보강에 따른 굴진면 전후의 종방향 아칭 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 제19호, pp. 133-144.
2. 김상환, 방규민 (2005), “록볼트로 보강된 터널주변지반의 강도정수 변화에 대한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제7권, 제1호, pp. 51-61
3. 김상환, 윤승기, 서동현 (2009) “저토피 구간의 신개념 고성능 터널지보시스템에 대한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제25권, 제7호, pp. 11-21.
4. 문훈기, 조서연, 김시격 (2004), “산악터널 토사구간에 적용된 보강공법에 대한 고찰”, 제4회 터널시공기술 향상 대토론회, pp. 33-50.
5. 방춘석, 이준석, 이상덕 (2001), “그라우팅 및 강관 다단 병용공법의 설계기법에 대한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제5c호, pp. 53-61.
6. 배규진, 신휴성, 최용기 (2003), “터널 보강용 강관다단 그라우팅 공법의 이방성보강 메카니즘 규명에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 245-259.
7. (사)한국터널공학회 (2007), “터널의 이론과 실무”, 구미서관.
8. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권 (2005), “지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구”, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제7권, 제1호, pp. 37-49
9. Jan Niklas Franzius (2003), “Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence” Ph.D. thesis, Imperial College, University of London.
10. Korbin, G.E. and Brekke,T.L. (1976), “Model study of tunnel prereinforcement”, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, pp. 895-908.

www.kci.go.kr

11. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunneling in soft ground. Pages 225{290 of: Proc. of the 7th int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the art, volume. Sociedad Mexicnan de Mecanica de Suelos, A. C.

접수일(2009.12.30), 수정일(2009.1.5), 게재확정일(2010.1.20)

www.kci.go.kr