

# 토사NATM 터널의 네일 보강에 의한 지반침하 억제효과에 관한 연구

## A Study on the Restraint-Effect of Ground Settlement by Nail Reinforcement of Tunnel in Soft Ground

임 종 철\*<sup>1</sup> Im, Jong-Chul  
고 호 성\*<sup>2</sup> Ko, Ho-Seong  
박 이 근\*<sup>3</sup> Park, Lee-Keun  
오 명 렬\*<sup>4</sup> Oh, Myoung-Ryoul

### Abstract

The nail (or rock-bolts) are used as means of reinforcement when the NATM is used for the soft ground tunneling. However, proper methods of installation for the nails have not been investigated. In this study, the effectiveness of the nails is studied by varying their length and positions. It was found that when nails are used in soft ground for ground reinforcing, the economic length is 0.5 times of tunnel diameter. The effectiveness of reinforcement was different depending on the location of nailing, that is, the degree of effectiveness showed in the order of lower, middle, upper part of side wall on tunnel lining.

### 요 지

네일(또는 락볼트)은 토사터널의 NATM 시공 시 보강재로 사용되어진다. 그러나, 네일의 적절한 설치방법이 아직까지 정립되지 않았다. 본 연구에서는 네일의 길이와 위치를 변화하여, 그 효용성을 연구하였다. 그 결과, 네일이 지반보강을 위하여 토사터널에 사용될 시 경제적인 길이는 터널직경의 0.5배이다. 보강의 효용성은 네일의 위치에 따라 터널 라이닝 측벽의 하부, 중부, 상부의 순서이다.

**Keywords** : Soft ground gunnel, Nail, Model test

\*1 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
\*2 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료  
\*3 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정  
\*4 정회원, 삼성물산주식회사 건설부문 토목공사팀 차장

# 1. 서론

## 1.1 연구의 목적

터널은 대상 지반에 따라 암반터널과 토사터널로, 또한 그 지리적 위치에 따라 산악터널, 도시터널, 하저터널 등으로 분류할 수 있다. 과거에는 산악터널이 주를 이루었지만, 최근 교통, 통신, 에너지 수송 등을 위하여, 도시터널의 수요가 증가하는 추세이다. 도심지 터널의 경우 대부분 토피고가 낮고, 토사에 구성되어 있으며, 터널상부 및 주변영역에 도로, 구조물 등이 있는 경우가 많아, 지반자립, 토압분산, 지표침하억제 등이 일반 산악터널에 비하여 더욱 요구되어진다고 하겠다. 일반적으로 지반조건이 불리한 경우 터널 굴착시 보조공법을 병행하는데 네일공법, 그라우팅 공법, 마이크로파일공법(임종철 외, 1998) 등이 적용되어진다.

본 연구에서는 토피고가 낮은 토사터널의 역학적 거동과 네일공법 적용시의 보강효과를 실내 모형실험을 통해 밝히고자 한다. 세부적인 연구의 내용은 다음과 같다.

- ① 터널 굴착시 지표면의 침하형상 및 주변지반의 거동 분석
- ② 보강방법에 따른 최대·최소 주변형률방향의 분석
- ③ 네일의 보강효과
- ④ 네일의 효율적인 설치위치 및 경제성 있는 네일 길이의 선정

## 1.2 종래의 연구

터널주변지반의 역학적 거동특성을 해석하는 방법으로는 크게 이론적 해석방법과 추계학 이론을 바탕으로 한 경험적 해석방법으로 나눌 수 있다. 이론적 해석방법은 터널 자체의 안정해석에 많이 적용되어왔는데 탄소성론에 의한 해석에서 유한요소해석법에 이르기까지 발전되었으며, 경험적 해석방법은 변위조건을 기준으로 한 추계학적 이론을 바탕으로 하여 현장계측과 모형실험을 통하여 터널주변지반거동의 예측법으로 발전되었다.

이론적 해석방법의 경우, 지반을 등방성, 균질성을 갖는 연속체로 가정하고 탄성해석, 비선형 탄성해석, 점탄성 해석, 탄소성 해석, 점소성 해석 등으로 연구되어왔다. 1920년 Jeffery는 중앙에 구멍이 나있는 반무한 탄성판의 변위 해석식을 제시하였으며, 1969년 Schmidt는 원형터널에서 정수압 상태와 지반이 등방성, 균질성으로 가정하고 자중, 경계면 영향, 소성영역에서의 체적변화, 크리프 등을 무시한

후 완전 탄소성 해석을 실시하여 터널주변에 발생하는 지반변위와 지반손실량을 산정할 수 있는 식을 제안하였다. 얇은 터널의 경우 1943년 Terzaghi의 터널에 작용하는 토압의 제안이후 Bierbaumer 등에 의해 다양한 방법이 제안되었다(藤田圭一, 1983). 유한요소 해석법은 1972년 Peck의 선형탄성해석이후 Duncan(1970)의 비선형모델과 Roscoe의 CamClay모델이 제안됨에 따라 이들 모델이 적용한 비선형 해석과 Cam Clay모델 적용해석이 발표되었다.

경험적 해석방법의 경우, 1950년대에 흙입자의 변위거동을 추정된 추계학적 변위해석모델이 제시되었다. 1965년 Sweet와 Bogdanoff는 이 모델을 발전시켜 이차분포함수에 의한 침하해석식을 제시하였으며, 1969년 Schmidt는 침하해석식으로 가우스 정규분포함수식으로 제안하였다. 이후 Peck(1969), Hansmire와 Cording(1972), Attewell(1972), Atkinson(1977) 등이 현장계측과 모형실험등을 통해 지반종류와 터널의 깊이에 따른 가우스 정규분포함수식의 형상계수  $i$  값을 제안하였다. 1985년 아다찌가 알루미늄봉체를 지반재료로 사용한 모형실험을 통하여 이용하여 주변지반의 거동을 연구하였으며, 1990년 후루시마가 평면변형률 형태로 근사화한 모래지반의 중단터널굴착에 관하여 연구하였다. 위에서 기술한 바와 같이 터널굴착시의 주변지반의 거동에 관한 연구는 다수 있으나 본 연구와 같은 네일의 침하억제 효과에 대한 연구는 찾기 어렵다.

## 2. 실내모형실험

### 2.1 실험장치

실험장치의 개요는 그림 1과 같다. 전체 실험장치는 ① 평면변형률 토조(林漢旭 외, 1995) : 720(H) × 1650(L) × 400(W) mm ( $V=0.475m^3$ ), 전 후면 아크릴 판, ② 횡단방향 모형터널(임종철 외, 1996) : 직경 90mm, 외부 장치를

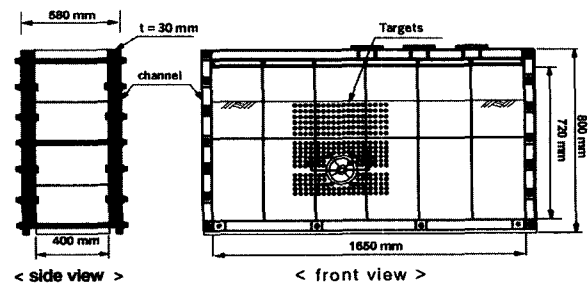


그림 1. 평면변형률 토조

통해 10%까지 축소, ③ 네일(임종철 외 1997):  $\phi$  1.3mm 철선에 모래부착, ④ 변위측정장치: 지표침하는 다이얼게이지를 이용하고, 지중변위는 타겟(임종철 외, 1996)을 이용하여 계측 ⑤ 모형지반 제작장치: 슬롯형 뿌리기 장치(姜樂安, 1995), 호스형 뿌리기 장치(洪碩佑, 1994) 지표면 성형기로 구성 등의 6개 부분으로 나눌 수 있다.

### 2.2 실험의 종류

본 연구에서는 토층비(H/D)가 2인 경우에 대해서만 실험을 행하였으며, 네일의 위치 및 개수변화(상, 하부 등)에 대해 5종류, 네일의 길이(l) 변화(직경의 0.2~1.0)에 대해 5종류, 무보강인 경우 총 11종류의 실험을 실시하였다(그림 2 참조).

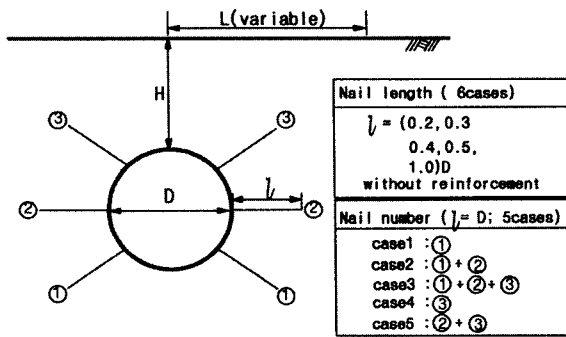


그림 2. 실험종류

### 2.3 실험방법

① 시료의 제작: 모형지반용 시료는 구포사를 #200체를 사용하여 물로 씻어 세립분을 제거하고, 공기 건조시킨 후, #20체를 통과한 것만을 사용하였다. 지반의 함수비는 평균 0.34%이었다.

표 1 구포사의 특성

Property	Symbol	Value
Max. void ratio	$e_{max}$	1.096
Min. void ratio	$e_{min}$	0.791
Min. dry density	$\gamma_{dmin} (g/cm^3)$	1.274
Max. dry density	$\gamma_{dmax} (g/cm^3)$	1.491
Specific gravity	$G_s$	2.67
Water content	$w$ (%)	0.34
Relative density	$D_r$ (%)	122
Average grain size	$D_{50}$ (mm)	0.325
Effective grain size	$D_{10}$ (mm)	0.185
Uniformity coefficient	$C_u$	1.95
Coefficient of gradation	$C_g$	1.10

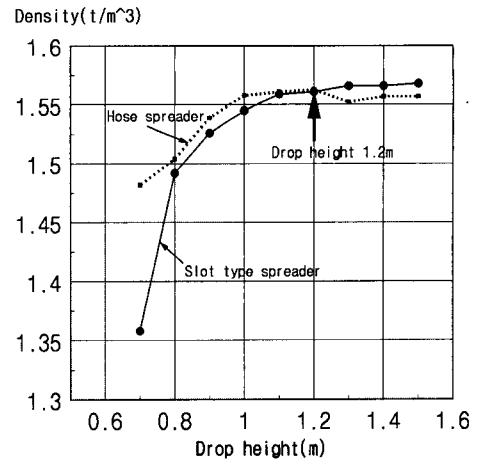


그림 3. 낙하고에 따른 건조밀도

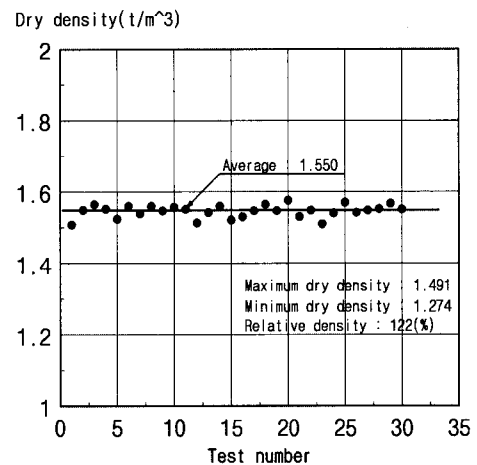


그림 4. 밀도시험

- ② 모래 뿌리기 속도: 평균  $115 \text{ cm}^3/\text{cm}/\text{min}$  을 유지하면서 뿌리기를 실시하였다.
- ③ 낙하고의 결정: 터널 하부지반의 제작은 슬롯형 모래뿌리기만으로는 어려우므로 호스형 모래뿌리기 장치를 제작하였다. 이 두 장치가 거의 동일한 밀도를 나타내는 낙하고를 구하기 위하여 실험을 행하였으며, 그 결과는 그림 3과 같다. 본 연구에서는 전 실험에 걸쳐서 낙하고를 120cm로 유지하였다.
- ④ 지반제작: 모든 실험에 있어서 일정한 밀도를 유지하고 최대 밀도에 가까운 지반을 제작하기 위하여 낙하고를 일정하게 유지하였다. 그림 4는 각 실험의 밀도분포도를 나타낸 것인데, 시험에 걸친 밀도의 분포는  $1.508 \sim 1.576 \text{ g/cm}^3$  (평균  $1.550 \text{ g/cm}^3$ ) 으로 위치에 따른 밀도의 변화는 거의 없이 균질함을 알 수 있다.
- ⑦ 모형터널의 변형: 모형 터널장치를 최대 10%까지 축

소 변형시킨다. 이때, 각 단계의 변형 시 지표면 침하량을 계측하고, 타겟의 움직임을 사진으로 촬영한다.

- ⑧ 시험종료 : 모형터널의 변형이 종료하면, 모형지반 밀도와 함수비를 측정하고, 사진법을 이용하여 지반의 변형을 특성면(무신축방향, 파괴면 등)을 구한다.

### 2.4 실험조건

터널굴착에 따른 지표면의 침하에 대한 영향과 터널 주변지반의 변형형상을 파악하였으며, 네일의 영향을 충분히 밝히고자 하는 것이 본 연구의 목적이다. 터널에 보조공법을 실시하는데 있어서 네일의 설치위치 및 설치깊이에 따라 그 영향의 차이를 밝히기 위하여 다음과 같은 조건으로 실험을 행하였다.

- ① 지반은 평면변형을 상태이다.
- ② 토층비( $H/D$ )는 2에 대해서만 행한다.
- ③ 네일의 접촉부는 연결되어 있다.
- ④ 사질지반으로 점착력은 없다.
- ⑤ 지반은 균질하고, 등방이며, 지하수의 영향은 없다.

### 3. 지반의 요소시험

지반의 강도정수를 구하기 위하여 평면변형을 압축시험을 통하여 평면변형률 상태의 강도정수를 구하였다. 시료는 시료 성형기에 시험시와 같은 높이로 모래를 낙하한 후 동결법<sup>18)</sup>을 이용하여 제작하였다.

전단강도를 구하기 위하여 구속압이 50, 60, 75, 95kPa 인 경우에 대하여 평면변형률 CID시험을 실시하였다. 각 시험에서의 축 변형률과 축차응력과의 관계는 그림 8과 같다. 이 그림에서 파괴시의 전단저항각( $\phi_r$ )은 54.1°, 잔류시의 전단저항각( $\phi_r'$ )은 39.7°이다.

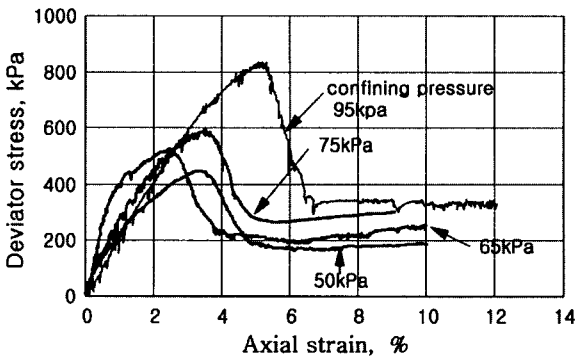


그림 5. 변형률에 따른 축차응력

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 무보강시의 지표침하분석

그림 6은 무보강시의 상부지표면 위치,  $L/D$ (터널천단 상부에서의 거리/터널직경)에서의 침하비,  $s/D$ (지표면 침

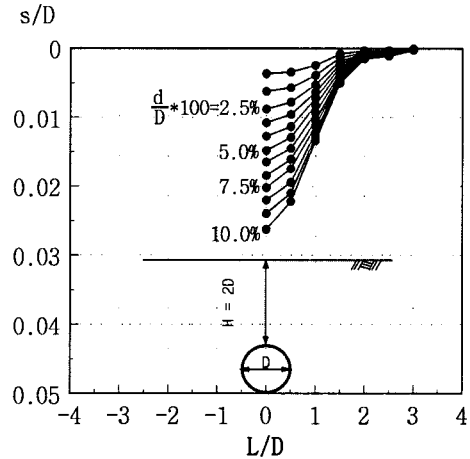


그림 6. 무보강시의 지표면 침하

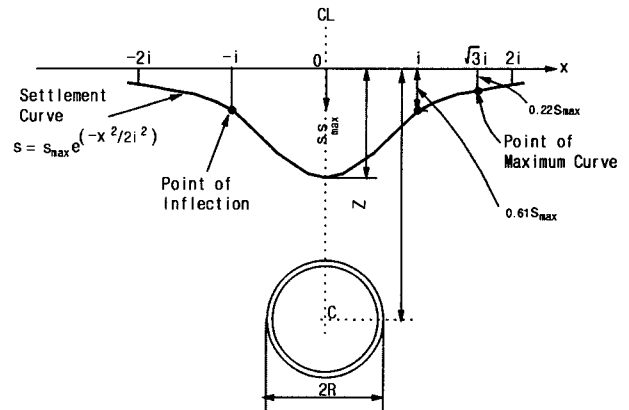


그림 7. 침하곡의 형상

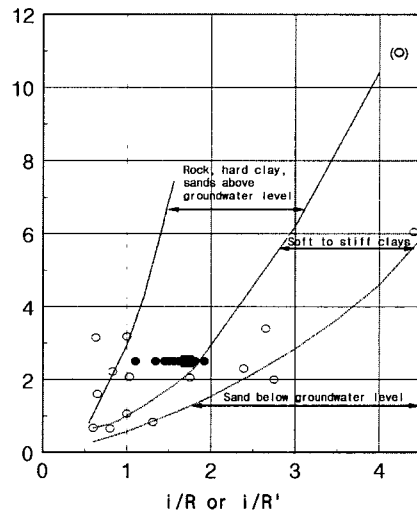


그림 8. 침하영역 해석도표

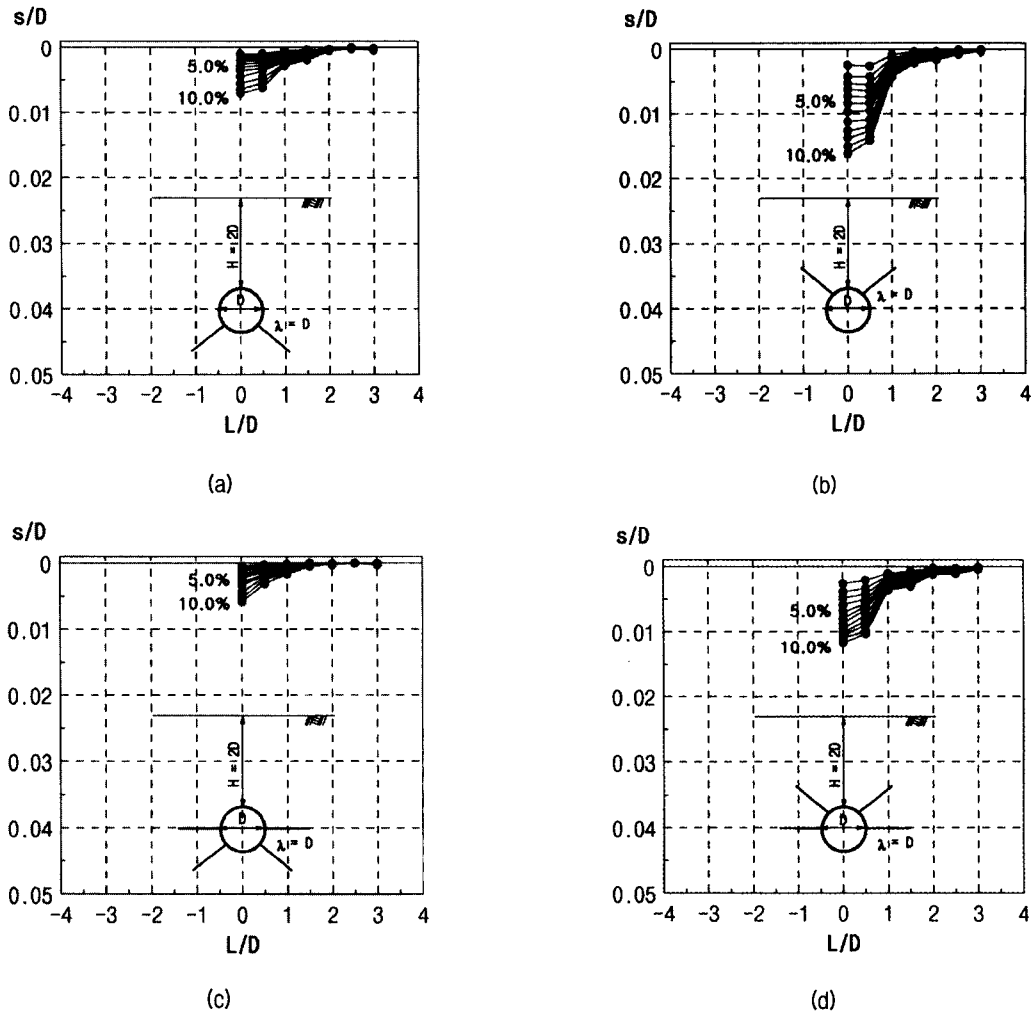


그림 9. 네일 보강위치에 따른 침하-치표위치

하/터널직경)를 터널의 각 변형 시에 대하여 나타낸 것이다. 이 때, 침하가 수렴하는 지표면위치(L/D)는 2로 추정되며, 터널 10%축소시의 천단상부침하비(s/D)는 약 0.27이다.

그림 6에서 터널단면 10%최종축소시의 침하곡의 면적을 Simpson 제 1공식으로 구하였다. 침하곡의 면적  $A = 457.44 \text{ mm}^2$ , Peck(1969)이 제안한 침하형상계수  $i = 77.4 \text{ mm}$  였으며, 지반조건에 따른 침하곡의 폭과 터널심도의 관계를 나타낸 그림 8의 (■)가 본 연구에서 모델링한 지반이다. (●)는 네일이 보강된 경우에 해당한다.

#### 4.2 네일의 보강위치 및 보강개수에 따른 영향

네일의 보강위치 및 개수에 따른 영향을 분석하기 위하여 1.0D길이의 네일을 터널 상부, 하부, 중앙부로 나누어 보강 실험을 하였다. 상·하부의 비교를 위하여 상부보강,

하부보강, 상·중부보강, 하·중부보강으로 구분하였다. 그림 9는 각 경우에 있어서의 지표위치-침하비 그래프이다.

상부보강 시와 하부보강 시의 지표침하량을 비교하여 보면 동일한 네일량을 설치하였지만 그 침하량에서 볼 때, 상부보강 시 (b)그림의 천단지표점의 침하량이 하부보강 시의 (a)그림보다 2.3배 더 크다. 하부·중부보강 시와 상부·중부보강 시에서도 (d)그림의 천단지표점 침하량이 (c)그림보다 2.1배 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 9(b)의 터널하부만의 보강으로도 무보강인 경우에 대해 천단지표점의 침하감소효과는 73.0%로 터널하부만의 보강으로도 지반의 침하억제효과는 상당함을 알 수 있다. 이는 하부를 보강하므로써 상부가 느슨해지는 것을 방지하는 효과가 크다는 것을 의미하고 있는 것이다. 그림 10는 터널단면 10% 축소 시 터널천단지표점의 침하량을 각 실험에 대해 비교한 것이다. 또한, 그림 11은 각 실험에서 발생한 침하곡의 면적을 플롯한 것으로 여기서도 역

시 네일의 설치량을 많이 할수록 침하곡의 면적은 줄어들지만, 그 설치위치에 따라 차이가 큰 것을 알 수 있다.

### 4.3 네일의 길이변화에 따른 영향

네일의 길이변화에 따른 영향을 연구하기 위하여 상·중·하부 보강의 실험에서 네일의 길이를 터널직경의 0.2,

0.3, 0.4, 0.5, 1.0의 비로 변화시켜 실험을 행하였다.

그림 12를 보면 네일의 길이가 길어짐에 따라 침하량이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 천단지표점의 침하량에 대해 비교를 한 그림 14와 침하곡의 면적비를 비교한 그림 15를 보면 터널직경에 대한 네일의 길이비의 값이 0.5인 경우와 1.0인 경우는 그 효과가 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있다.

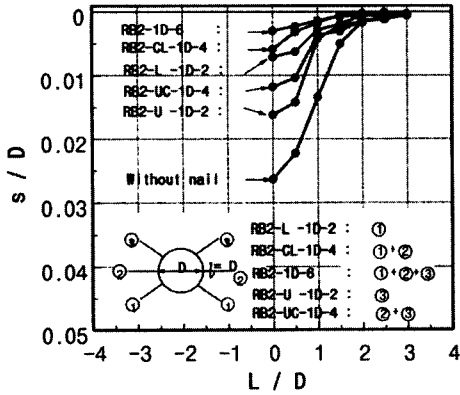


그림 10. 터널직경 10% 축소 시의 지표침하

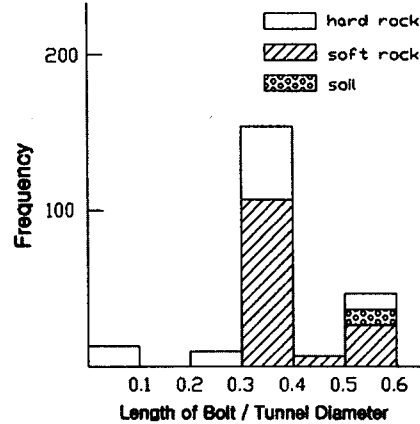


그림 13. 락볼트 길이의 분포<sup>19)</sup>

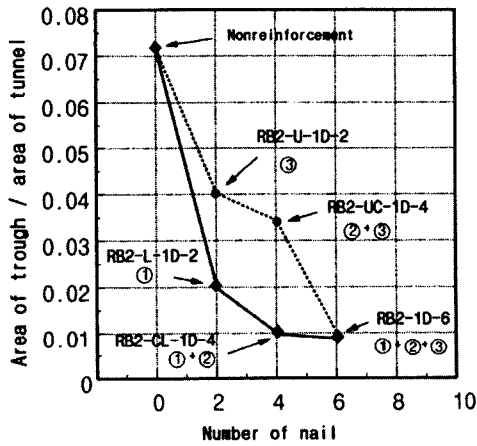


그림 11. 각 시험에서의 침하곡의 면적

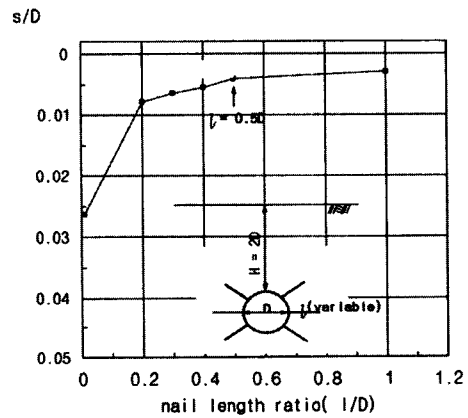


그림 14. 네일길이에 따른 터널천단지표점의 침하비

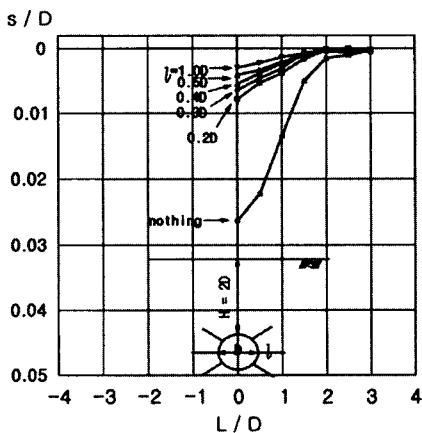


그림 12. 네일 길이비에 따른 위치-침하비

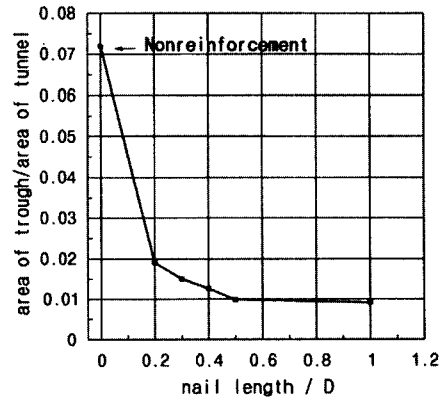


그림 15. 네일의 길이비에 따른 지표침하곡의 면적비

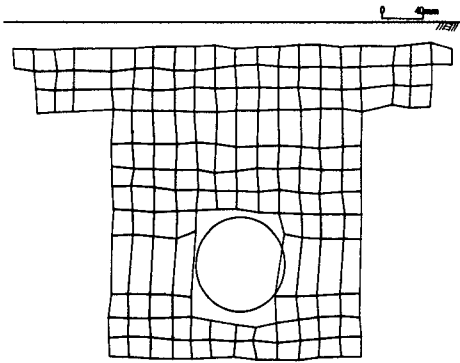
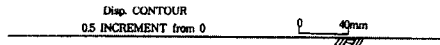
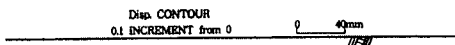


그림 16. 지반의 요소망



(a) 무보강 시

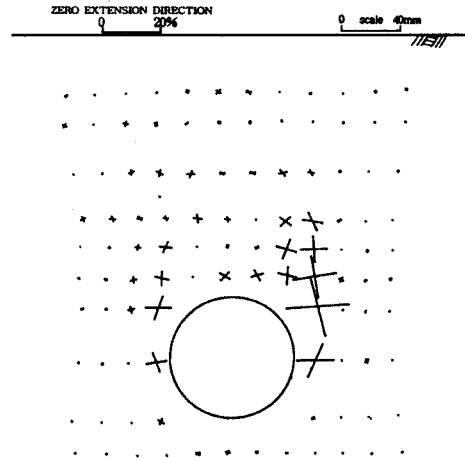


(b) 라이닝 및 네일보강 시 ( $l/D = 0.5$ )

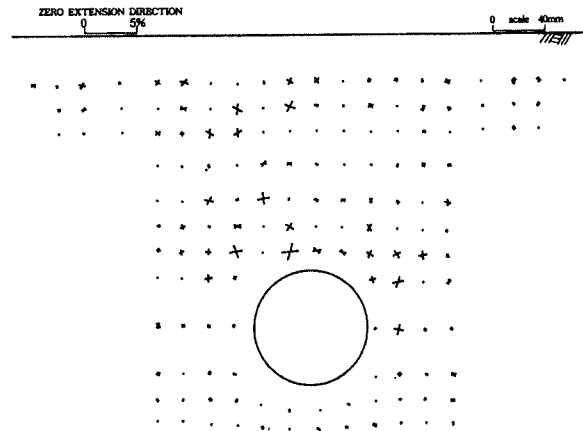
그림 17. 변위등고선도

따라서, 본 연구에서는 사질지반의 경제적인 네일의 길이비  $l/D = 0.5$ 로 제안한다. 이는 종래 토사지반에 시공된 현장적용 네일의 길이비를 조사한 문헌(19)에서도 0.52라는 값이 나타나 있다(그림 13참조). 경제적인 네일의 길이비라고 제안하는 0.5인 경우 토층비 2에서의 무보강에 대해 천단지표점의 침하감소효과는 84.4%이다.

#### 4.4 주변지반의 거동 분석



(a) 무보강 시



(b) 라이닝 및 네일보강 시 ( $l/D = 0.5$ )

그림 18. 무신축 방향

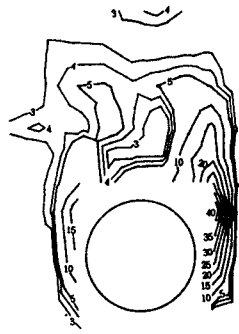
사진범(林鍾鐵, 1989)을 이용하여 모형지반의 거동을 분석하였다. 무보강인 경우, 네일 길이비( $l/D$ )가 0.5인 경우에 대해서 변위등고선, 무신축방향, 최대전단변형률 등고선 및 최대·최소주변형률방향을 그려 파괴형상을 분석하였다.

주변지반 변형해석을 위한 요소망은 그림 16과 같다.

##### 4.4.1 변위등고선도

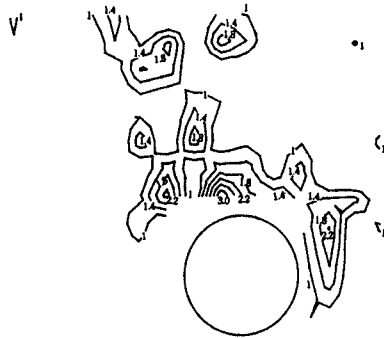
그림 17은 무보강인 경우와 네일 보강시의 연직방향 변위등고선도이다. 그림(a)에서 보면 터널굴착 시 터널주변 지반이 아치거동을 함을 알 수 있다. (a)와 (b)를 비교하여 보면 네일의 효과로 인하여 동일한 변위등고선값으로 둘러싸인 면적의 영역이 급격하게 줄어들어 있음을 알 수 있다. 예로써, 변위등고선 1.0에 대해 생각을 해보면, (a)그림에서는 1.0 이상의 값에 해당하는 면적이 상당히 큰 반면

$\gamma_{max}$  CONTOUR  
5 INCREMENT from 0



(a) 무보강 시

$\gamma_{max}$  CONTOUR  
0.4 INCREMENT from 0



(b) 라이닝 및 네일 보강시 ( $l/D=0.5$ )

그림 19. 최대전단변형률 등고선 ( $\gamma_{max} = (\epsilon_1 - \epsilon_3)$ )

(b)그림에서는 1.0값이 나타나지 않고 있다.

#### 4.2.2 무신축방향

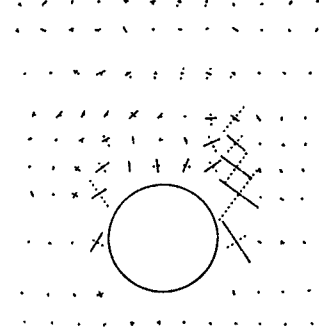
무신축방향(林鍾鐵, 1989)이 연속되는 곳을 이은 연결 선을 파괴면으로 볼 수 있는데, 무보강시의 파괴면은 그림 18 (a)에서 무신축 방향이 터널의 어깨부에서 발생하는 아치형상을 나타남을 알 수 있다.

#### 4.2.3 최대 전단변형률 등고선

무보강인 경우에, 최대 전단변형률 등고선으로 본 파괴면의 형상도 무신축방향으로 정의한 파괴면의 형상과 마찬가지로 터널의 어깨부를 통하는 아치형상인 것을 알 수 있다(그림 19 참조).

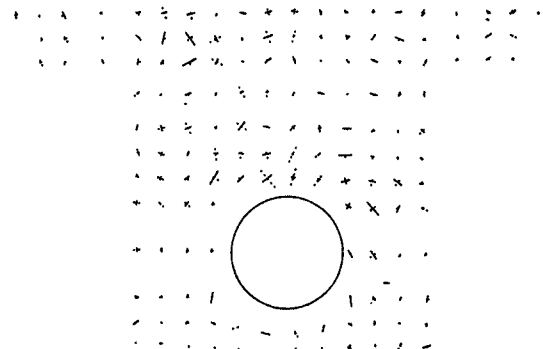
라이닝 및 네일로 보강된 경우에는 파괴면은 찾을 수 없으며, 굴착된 터널주변에 전단변형률이 집중하고 있음을 알 수 있다.

$\epsilon_1(-), \epsilon_3(---)$  DIRECTION  
2%



(a) 무보강시

$\epsilon_1(-), \epsilon_3(---)$  DIRECTION  
5%



(b) 라이닝 및 네일 보강시 ( $l/D=0.5$ )

그림 20. 최대 최소 주 변형률 방향

#### 4.2.4 최대 · 최소 주 변형률 방향

그림 20을 보면, 터널주변에서의 최대주변형률( $\epsilon_1$ )방향, 최소주변형률( $\epsilon_3$ )방향이 무보강 굴착시와 네일 보강시가 서로 다를 수 있다. 즉, 무보강시는 천단주변의  $\epsilon_3$  방향은 거의 원주방향인 반면, 네일이 보강되었을 경우의  $\epsilon_3$  방향은 터널중심방향에 가깝게 방향이 바뀔 수 있다. 또한, 터널중심 하부에서는 보강의 유무에 관계없이 수평방향에 대해 약  $30^\circ$  정도의 각도를 유지함을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 토층비가 2 인 미고결 토사지반에 터널 굴착시 토층비에 따른 네일의 보강효과와 경제적인 네일의 보강방법을 연구하기 위하여, 사질지반 내의 터널에 대하여 모형실험을 실시하였다. 연구결과는 다음과 같다.



- 1) 천단주변지반의  $\epsilon_3$  방향은 무보강시는 원주방향이지만, 네일이 보강될 경우  $\epsilon_3$  방향은 터널의 중심방향으로 향하게 됨을 발견하였다. 그리고, 터널중심 상부에서의  $\epsilon_3$  방향은 터널중심방향과 거의 일치하나 터널중심 하부에서는  $\epsilon_3$  방향이 수평에 대해 상향으로 30° 정도 기울어져 있음을 알 수 있다.
- 2) 네일의 경제적인 보강길이는 0.5D(여기서, D는 터널직경)이다.
- 3) 토층비가 2인 사질지반 토사터널에서 네일보강에 의해 지표침하가 무보강시의 침하량의 80%이상 감소하였다.
- 4) 터널굴착시 파괴면은 터널의 어깨부에서 발생하고, 토층비 2의 경우 파괴면의 높이는 터널직경의 1.3배이며, 파괴면의 형상은 아치를 이루고 있다.
- 5) 네일이 지표침하를 억제하는 효과인 보강위치는 터널 축벽의 하부보강 > 중부보강 > 상부보강의 순서이다.

## 참고 문헌

1. 임종철, 고효성, 박이근, 오명렬 (1998). "토사터널에 사용된 마이크로 파일의 지반침하 억제효과에 관한 실내모형실험", 1998 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.365-372.
2. Jeffery, G. B., "Plane Stress and Plane Strain in Bipolar Coordinates", Transactions of the Royal Society, Series A, Vol.221, London, England, 1920, pp.265-293.
3. Schmidt, B.(1969), "Settlements and Ground Movement associated with Tunnelling in Soils" Ph.D Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, pp. 224.
4. Karl Terzaghi(1943), "Theoretical Soil Mechanics", New York, Eighth Printing, pp.195-196.
5. 藤田圭一(1983.10). "基礎工からみたシールド工法-地山の沈下とゆるみ-", 基礎工, pp.2-14.
6. Duncan, J. M. and Chang, C. Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, SM5, September, 1970, pp.1629-1653.
7. Peck, R. B. (1969). "Advantages and Limitations of the Observational Methods in Applied Mechanics", Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp.171-187.
8. John O. Bickel & T. R. Kuesel (1982). "Tunnel Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold Co. Inc., New York, pp. 88-89.
9. John H. Atkinson, David M. Potts. "Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT4, 1977, pp.307-325,
10. 足立紀尚, 田村武,(1985) "砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木學會論文報告集, 第358号 III-3, pp.129-136
11. 福島伸二, 春川和夫 (1990), "Effect of Bolt-reinforcement for Shallow Tunnel in Sandy Ground", 土の基礎 90.4., 報告 2019.
12. 林漢旭, 李喜根 (1995). "터널·지하공간 굴착공학", 歐美書館, pp. 27-38.
13. 임종철, 강낙안, 공영주, 주인곤 (1996. 6). "지반굴착시의 지반영거에 의한 근접 구조물의 침하억제 효과", 부산대학교 생산기술연구소 논문집, 제 50집, pp49-59.
14. 임종철, 고효성, 박이근, 장지건 등 (1997). "실내모형실험에 의한 토사NATM의 연구용역 보고서", 부산대학교 생산기술 연구소, pp. 69-76.
15. 임종철, 고효성, 박이근, 오명렬 (1996). "모래지반내의 터널굴착시 지반거동에 관한 실내모형실험", 1996년도 학술발표회 논문집(II), pp. 371 ~ 374.
16. 姜樂安 (1995). "모래地盤 掘鑿時 近接 構造物의 沈下抑制 效果에 관한 實驗的 研究", 博士學位論文, 釜山大學校
17. 洪碩佑 (1994). "SI 앵커의 引拔抵抗力에 관한 研究", 碩士學位論文, 釜山大學校.
18. 高豪成 (1996), "殘積土의 平面變形率 試驗法의 開發과 力學的 特性에 관한 研究", 碩士學位論文, 釜山大學校
19. 洪성영 역(1993), "터널의 설계이론", 탐구문화사, pp. 82~86.
20. 林 鍾鐵 (1989. 3). "砂地盤内の グラウンドアンカーの引抜き抵抗メカニズムに関する研究", 東京大學校 工学博士 學位論文,

(접수일자 1999. 9. 15)