

An experimental study on the reduction method of earth pressure acting on the cut-and-cover tunnel lining

¹⁾, Sang-Yoon Kim, ²⁾, Jong-Chul Im, ³⁾, Lee-Keun Park,
⁴⁾, Ferdinand E. Bautista

¹⁾ , Master course, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

²⁾ , Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

³⁾ , Senior Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ.

⁴⁾ , Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

SYNOPSIS : Cut and Cover Method is generally used in shallow tunnels and tunnel entrances with thin soil cover. In this type of construction, backfilling is considered to be the most important process. In this process even though the backfill material is thoroughly compacted, compaction and self-weight due to vehicular vibration and pressure exerted by the soil cause the backfill material to undergo self-compression which leads to settlement. The settlement of the backfill material subjects the tunnel lining under excessive earth pressure which cause cracking and deformation. In the model test performed installation of geotextile on the sides and top of the tunnel was able to reduce the earth pressure acting on the tunnel lining.

Key words : Cut-and-Cover, Geotextile, Earth pressure

1. 서 론

터널 굴착시, 갱구부는 일반적으로 개착식으로 시공한다. 이 때, 성토체는 다짐을 철저히 하더라도 여러 요인에 의해 성토체 자체의 압축이 일어나 성토체의 침하가 발생하게 된다. 이러한 성토체의 침하는 터널 라이닝에 과도한 토압을 작용시켜 라이닝의 균열이나 변형의 원인이 될 수 있다. 개착식에 의한 굴착 사면에서, 성토에 의해 라이닝에 발생하는 초기토압 및 성토체에 침하가 발생할 때 증가하는 토압에 대한 연구는, 수치해석에 의한 토압산정이 주를 이루고 있으나, 실제적인 접근이 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 개착식 터널의 라이닝에 작용하는 토압을 분석하기 위하여, 평면변형을 토조 내에 굴착 사면과 터널을 모형으로 제작하고, 성토후의 토압과 성토체의 다짐후의 토압을 측정한다. 라이닝에 작용하는 토압의 경감대책으로 매트보강을 여러 형태로 적용하여 실시하며, 각 보강 형태별 토압을 측정하여 토압의 경감효과 및 가장 효과적인 보강 형태를 제시한다. 사진판독에 의하여 변형해석을 수행하고, 라이닝에 작용하는 토압이 증가될 경우의 토압의 산정방법을 제안하고자 한다.

2. 실내모형실험

2.1 실험장치의 개요

① 평면변형율 토조 : 토조의 내부 제원은 720(H)×1490(L)×400(W)(mm ; $V=0.429m^3$)이다(그림 1). 토조 앞면과 뒷면의 아크릴에는 격자 아스테이지를 부착하여 지반조성시나 보강매트 설치시에 수평을 유지하고, 타겟과 아크릴면의 마찰을 줄이며 타겟 설치시에 기준선으로 사용하였다. 평면 변형율 토조는 지면에 밀착된 토조받침대로부터 스프링으로 지지되며 탈착이 가능한 받침대가 있다. 토조의 하부에는 진동 모터가 부착되어있다.

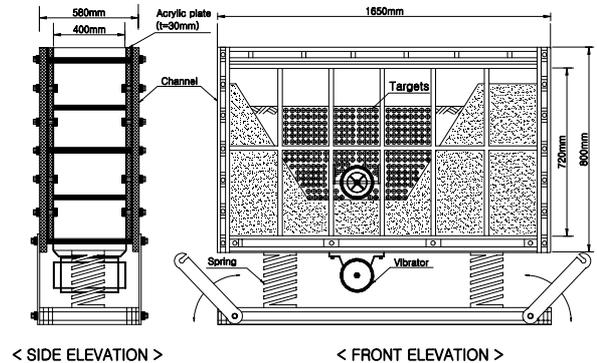


그림 1 모형 토조

② 횡단방향 터널 : 횡단방향 모형터널 장치는 직경(D)이 180mm이며, 총 8개의 세그먼트로 구성되어 있다. 각각의 세그먼트에 2방향 로드셀을 부착하여 터널의 천단, 어깨, 측면에 작용하는 토압을 측정할 수 있도록 하였다. 평면변형율 토조 내에 설치되어 있는 모형터널을 위에서 본 모습은 그림 2와 같다.

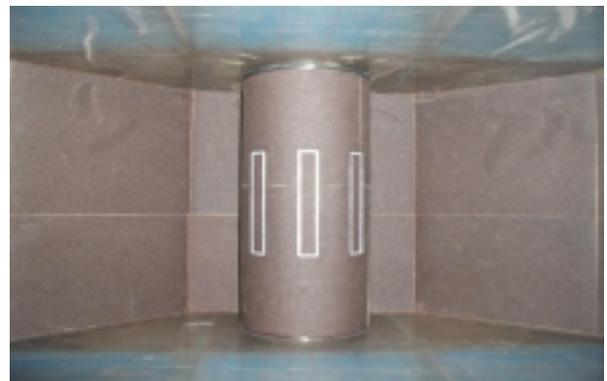


그림 2 토조내 모형 터널

③ 보강매트 : 보강 매트는 폴리에스테로 제작된 망사 모양의 천을 사용하였다.

④ 지반 제작장치 : 일정한 출구폭(3mm)의 아크릴제 슬롯형 강사장치를 이용하였다.

⑤ 진동 다짐장치 : 진동장치는 진동모터와 콘트롤 박스로 구성되어 있다. 모형지반 제작시에는 토조 하부를 고정하여 지반제작 과정 중에 평면변형율 토조가 외부의 충격·진동에 의해 지반이 다짐되지 않도록 하였으며, 진동을 지반에 가할 때에는 고정장치를 풀어 스프링만으로 토조를 지지함으로써 모터의 진동이 효과적으로 토조에 전달되도록 하였다.

⑥ 토압측정장치 : 횡방향 모형터널은 총 8개의 세그먼트로 구성되어 있다. 각 세그먼트의 중앙에는 2방향 로드셀을 장착 하였으며, 계측장치(UCAM-10A)를 통하여 수직하중과 수평하중을 측정하였다.

⑦ 변형측정장치 : 지중변위 측정을 위하여 타겟(target)을 사용하였으며, 타겟의 뒷면에는 사포(#100)를 부착하여 타겟이 설치 되어있는 지반의 거동을 효과적으로 반영할 수 있도록 하였다. 또한, 아크릴 면에는 마찰이 거의 없는 아스테이지(acetate)를 부착하여 타겟과 아크릴면 사이의 마찰을 최소화 하였다.

2.2 모형지반의 재료

모형지반은 공장제품인 주문진표준사(K.S.L 5100)를 이용하여 제작하였다. 주문진표준사의 물성치는 표 1과 같으며, 초기지반 조성시 건조단위중량(γ_d)은 약 $1.43 gf/cm^3$ 으로 상대밀도는 약 20%로써 매우 느슨한 상태이다. 100Hz로 20분간 진동 다짐후의 상대밀도는 약 63.8%이다. 그림 3의 밀도변화 그래프에서 알 수 있듯이, 100Hz는 진동 지속시간 20분이 경과하면서부터 밀도변화가 수렴상태에 들어가지만, 진동시간이 10분을 지나면서 타겟이 지반속으로 묻히는 경향을 보인다. 따라서 타겟의 관찰이 가능하면서 실험에서 요구되는 다짐에 적합한 진동시간은 약 10분 내외로 판단되어 본 연구에서 행한 모든 실험에서는 10분을 진동지속시간으로 하였다.

표 1 지반재료의 물성치

| 물 성 종 류 | 부 호 | 물 성 치 |
|--------------------|-----------------|-------|
| 최대 간극비 | e_{max} | 0.923 |
| 최소 간극비 | e_{min} | 0.604 |
| 최대건조밀도(g/cm^3) | γ_{dmax} | 1.652 |
| 최소건조밀도(g/cm^3) | γ_{dmin} | 1.378 |
| 비 중 | G_s | 2.65 |
| 함수비(%) | w | 0.30 |
| 평균입경 (mm) | D_{50} | 0.595 |
| 유효입경 (mm) | D_{10} | 0.443 |
| 균등계수 | C_u | 1.402 |
| 곡률계수 | C_g | 0.912 |

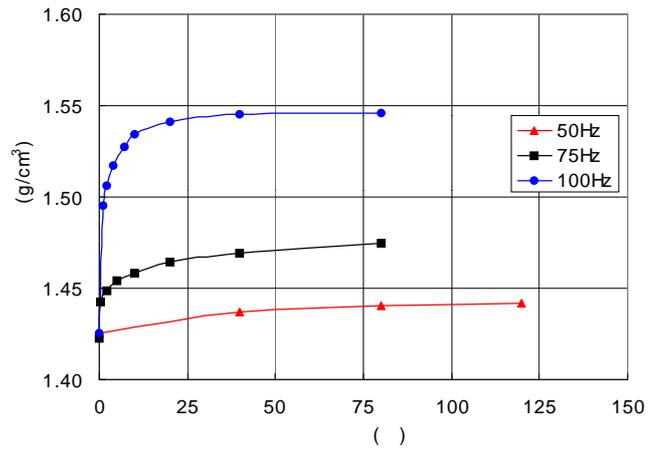


그림 3 각 주파수별 시간-밀도변화 비교

2.3 실험 종류

라이닝에 작용하는 토압의 영향요소에는 터널직경(D), 토피고(H), 절취사면의 각도(θ) 및 거칠기, 사면과 터널의 간격(G) 등이 있으며, 본 연구에서는 절취사면의 각도(θ)는 45° , 사면과 터널의 간격(G)은 0.5D로 고정하였으며, 토피고(H)를 1D, 1.5D로 구분하여 실험하였다.

본 실험에서 실험명은 다음과 같이 정의하였다(그림 5~8 참고).

NR : No Reinforcement

MR : Mat Reinforcement

- MR1 : 터널 상부에 mat 1장 보강
- MR2 : 터널 상부에 mat 2장 보강
- MR4C : 터널 상부에 mat 2장, 측면에 mat 2장 보강(C는 closed mat)
- MR4O : 터널 상부에 mat 2장, 측면에 mat 4장 보강(O는 open mat)

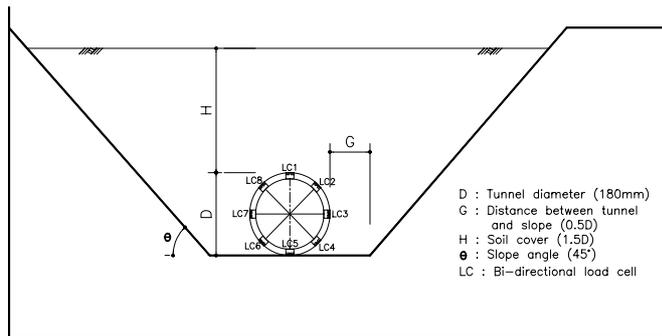


그림 4 토조내에 설치된 모형터널과 사면, 경사각의 관계

표 2 실험의 종류

| 실험명 | 비고 |
|------------|----------------|
| H1.5D-NR | D : 터널의 직경 |
| H1.5D-MR1 | H1.5D : H=1.5D |
| H1.5D-MR2 | H1.0D : H=1.0D |
| H1.5D-MR4C | |
| H1.5D-MR4O | |
| H1.0D-NR | |
| H1.0D-MR1 | |
| H1.0D-MR2 | |
| H1.0D-MR4C | |
| H1.0D-MR4O | |

3. 실험결과 및 고찰

모형터널에 장착된 로드셀을 이용하여 터널에 작용하는 토압을 측정하였다. 토피고 1.5D 실험에서 측정된 토압은 표 3과 같다. 또한, 보강형태별 보강효과를 보기 위하여 무보강과의 비교를 통해 토압의 증감을 표 4와 같이 나타내었다. 토피고 1.0D의 실험은 매트와 보강효과 및 보강형태별 보강효과와의 차이를 확인할 수 없었으며, 아래의 결과는 토피고 1.5D 실험의 결과를 분석하였다.

표 3 보강형태별 토압

| Load Cell Location | | Type of Reinforcement (Earth Pressure, gf/cm^2) | | | | |
|--------------------|---|---|--------|--------|--------|--------|
| | | NR | MR1 | MR2 | MR4O | MR4C |
| Crown | | 93.524 | 80.164 | 78.108 | 90.236 | 77.286 |
| Shoulder | R | 30.827 | 31.235 | 32.664 | 31.847 | 33.685 |
| | L | 28.581 | 23.681 | 27.969 | 27.560 | 27.152 |
| Sidewall | R | 25.927 | 21.640 | 12.453 | 16.332 | 16.740 |
| | L | 40.626 | 43.892 | 20.007 | 26.744 | 39.197 |

표 4 보강형태별 토압감소 효과

| Load Cell Location | | Type of Reinforcement (Reinforcement Effect, %) | | | |
|--------------------|---|--|-------|-------|-------|
| | | MR1 | MR2 | MR4O | MR4C |
| Crown | | 14.28 | 16.48 | 3.52 | 17.36 |
| Shoulder | R | -1.32 | -5.96 | -3.31 | -9.27 |
| | L | 17.14 | 2.14 | 3.57 | 5.00 |
| Sidewall | R | 16.54 | 51.97 | 37.01 | 35.43 |
| | L | 8.04 | 50.75 | 34.17 | 3.52 |

3.1 무보강 실험

무보강 실험을 실시하고, 초기 및 다짐이 발생한 후에 터널에 발생하는 토압을 측정하였다. 상대밀도 66.9%에서 실험을 실시하였는데, 초기 및 다짐시 발생한 토압은 각각 $64.0 gf/cm^2$ (건조밀도 : $1.473 gf/cm^3$), $93.5 gf/cm^2$ (건조밀도 : $1.55 gf/cm^3$)이었다. 이때의 토압들은 $\sigma_v = \gamma h$ 로 계산할 때, 초기가 $39.8 gf/cm^2$, 다짐후가 $41.9 gf/cm^2$ 로 실제 측정치보다 훨씬 적은 값으로 나타났다. 개착식 터널 상부의 토압을 계산하는 공식들을 이용하여 다짐후의 토압을 계산하고, 표 5와 같이 상호 비교하였다.

표 5 측정토압과 계산토압의 비교

| 적용공식 | 연직토압 ($\sigma_v, gf/cm^2$) |
|-------------------------------|------------------------------|
| 측정값 | 93.5 |
| 계산값 ($\sigma_v = \gamma h$) | 41.9 |
| Terzaghi | 33.73 |
| Bierbäumer | 41.63 |
| Marston-Spangler (굴착구식) | 27.61 |
| Marston-Spangler (돌출식) | 67.83 |

Marston-Spangler의 토압이론과 동일한 개념으로 아칭면에 발생하는 힘이 하향으로 터널에 작용하는 경우에 대한 Terzaghi의 토압공식을 본 논문에서는 ‘수정 Terzaghi 토압공식’으로 부른다. 이 공식에 의한 σ_v 는 $36.15 gf/cm^2$ 이다. 계산과정에서, 영향범위 B 대신에 터널의 직경 D를 사용하게 되면 연직토압 σ_v 는 $67.83 gf/cm^2$ 이 된다. 이 식은 Marston-Spangler의 돌출식과 동일한 식이 되고, 값 또한 동일하게 된다. 따라서, 측정값과 계산치의 비는 $93.5/67.83 = 1.38$ 이다. 터널의 측벽에 작용하는 평균 수평토압의 측정값 $\sigma_{ho(m)}$ 은 $33.3 gf/cm^2$ 이다. 계산값은 $\sigma_{ho} = K_o \cdot \gamma \cdot h$ 식을 사용하였을 때 $25.6 gf/cm^2$ 이고 측정값과 계산값의 비는 $33.3/25.6 = 1.30$ 이다.

3.2 매트(mat) 보강 실험

매트의 보강 효과를 확인하고, 적절한 보강영역을 확인하기 위해서 4가지 형태의 매트 설치에 따른 실험을 실시하였다. 터널 천단에서 보강효과가 가장 뛰어난 형태는 MR4C로 최대 17.36%의 보강효과를 보였다. 그 다음으로 MR2, MR1, MR4O 순으로 토압 경감효과를 보였다. 또한 터널 어깨부에서 가장 보강효과가 뛰어난 형태는 MR1형태로 17.14%의 보강효과를 보였고, 터널 측면에서 가장 보강효과가 뛰어난 형태는 MR2형태로 51.97%의 효과를 나타내었다. 무보강에 대한 이들의 보강효과는 표 3과 표 4에 나타내었다. 각 보강 형태별로 무보강과의 토압비교를 그림 5~그림 8에 나타내었으며, 그림 9에 무보강과 MR4C 보강시의 y방향 변위 감소효과를 나타내었다.

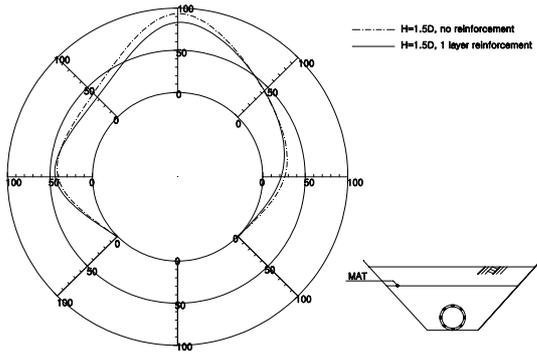


그림 5 MR1 보강시 토압

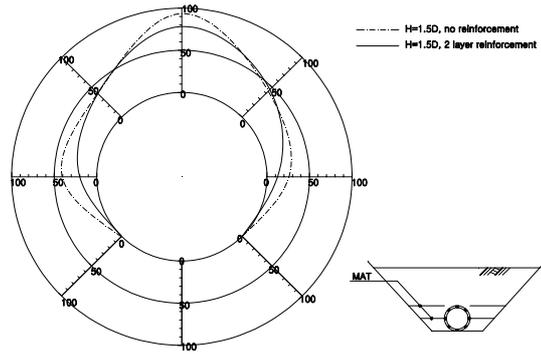


그림 6 MR2 보강시 토압

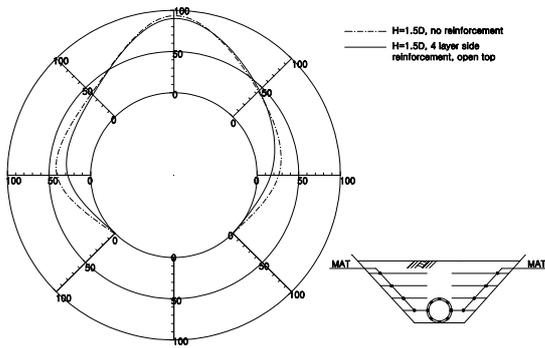


그림 7 MR4O 보강시 토압

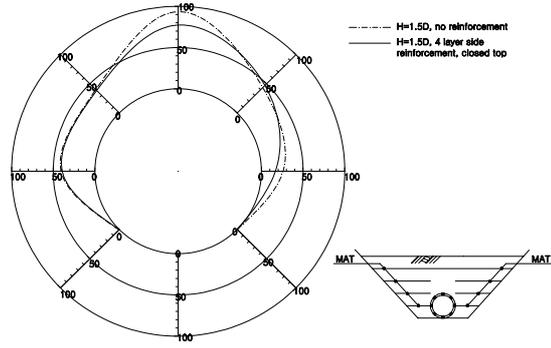


그림 8 MR4C 보강시 토압

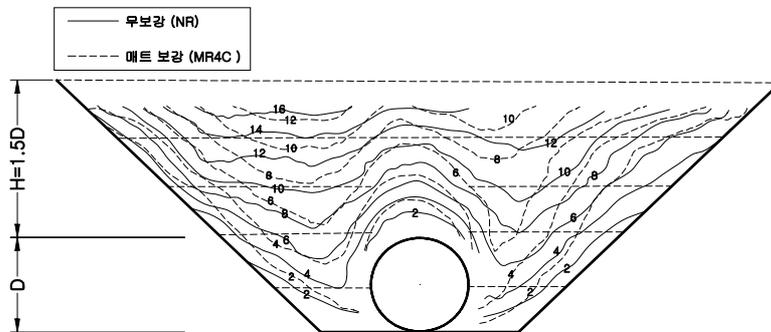


그림 9 y방향 변위등고선

4. 결론

본 연구에서는 개착식 터널 상부의 성토체의 침하에 의해 라이닝에 작용하는 토압 변화를 관찰함으로써 라이닝 설계토압을 산정하는 방법을 제안하고, 라이닝에 작용하는 토압을 경감시키기 위한 매트 보강효과를 모형실험을 통해 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 성토체의 침하에 의해 라이닝에 작용하는 토압의 산정식
계측에 의해 터널의 천단에서 구해지는 토압의 크기와 터널 주변지반의 변형 양상을 살펴보면, Marston-Spangler의 돌출식의 역학적 기구가 적용되는 것으로 나타났다. 라이닝 설계에 이 식을 사용하고, 식에 대한 안전율의 개념으로서 계산된 값의 1.3~1.5배의 값을 라이닝 설계에 적용하여야 하는 것으로 판단된다.
- (2) 라이닝에 발생하는 토압 감소 대책
라이닝에 발생하는 균열방지를 위한 하나의 방법으로써, 라이닝에 발생하는 토압의 효과적인 매트 보강대책은 다음과 같다. 되메움 시에 MR4C(Closed mat)의 경우와 같이 터널 측면과 상부 지반에 매트를 보강하여 다짐을 실시하면, 가장 큰 토압이 발생하는 터널 천단에서는 최대 17% 정도의 토압을 감소시킬 수 있어 가장 효과적인 보강패턴으로 밝혀졌다. 이때, 보강매트의 폐합효과를 분석하면, MR4C(Closed mat)의 경우가 MR4O(Open mat)의 경우보다 효과가 우수한 것으로 나타났다. 이러한 효과는 정량적인 의미보다는 현상적으로 그 효과가 입증되는 것을 확인한 것이며, 실제현장에서 현장실험을 통하여 정량적인 효과를 확인하는 것이 더욱 중요하다고 판단된다.
- (3) 지반의 변형 분석
지반의 변형은 Marston-Spangler의 돌출식에서 가정하고 있는 터널 직경 D만큼의 폭으로 하중이 추가되는 것이 아니라 더 넓은 영역의 토괴가 터널에 작용하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 林種鐵(1989), “砂地盤内のグラウンドアンカーの引抜抵抗メカニズムに関する研究”, 東京大學 工學博士學位論文.
- 2) 박이근(2003), “얇은 토사터널 굴착시의 주변지반거동 특성과 마이크로파일의 침하억제효과에 관한 연구”, 부산대학교 박사학위논문, pp.41~49.
- 3) 건설교통부(2000), 도로설계편람(I) 제 6편, 606 콘크리트라이닝, 612개착터널부, 613갱구부.
- 4) 백경중(1993) 역, 실무자를 위한 토목기술 노하우2, 탐구문화사, p.147.
- 5) 지반공학회(1998), 지반공학시리즈7 터널, 구미서관, p.131.
- 6) 林永國, 알기쉬운 터널역학, pp.13~37.
- 7) 林鍾鐵, 朴性栽, 朱仁坤, 朴鏞富, 金永仁(1992), 平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解釋法, 韓國地盤工學會誌 第8卷 第1號, pp.29~39.
- 8) 지반공학회 터널강좌(2001.7), Vol. 17, No.7, 터널(VII) 갱구부 설계, pp.14~20.
- 9) 한국터널공학회(2001.6), 터널기술, Vol. 3, No.2, 복개터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구, pp.13~16/pp.19~22.
- 10) Braja M. Das, Principle of Geotechnical Engineering, 4th edition, pp.628~631.
- 11) J.O. Bickel, T.R. Kuesel & E.H. King(1996), Tunnel Engineering Handbook, 2nd edition, pp.320~328.
- 12) Karoly Szechy(1976), The Art of Tunnelling, 2nd Edition, pp. 735~756.