토사터널 붕괴방지를 위한 지반보강방안에 관한 연구

A Study on the Ground Reinforcement Method in Soft Ground Tunneling

정동욱* · 임종철** · 주인곤*** · 황성필****

Jeong, Dong-Uk · Im, Jong-Chul · Joo, In-Gon · Hwang, Seong-Pil

Abstract

There are many problems about safety of many ground or underground structures, when we excavate tunnels in downtown area. Therefore, it is necessary to rise the stability considering the special condition. This paper uses micro pile that has eco-friendly, low noise and low vibration to solve the above problems. The paper analyzes settlements of earth surface, displacements of piles and crown settlements that is measured 321 section in the tunnel of Busan subway line 3 In order to examine the effect of micro piles. And this paper compares the measured data and numerical analysis to examine the effect on the angle and length of micro piles.

Key words : Low noise, Low vibration, Eco-friendly micro pile

요 지

도심지에서 터널시공시 지상 또는 지하 내에 존재하는 많은 구조물의 안정성에 관한 중요성이 언급되고 있다. 그러므로 각 현장의 특수한 상황을 고려하여 안정성을 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 친환경적이며, 저소음, 저진동 공법인 마이크로파일 공법을 적용하여 상기의 문제점을 해결하고자 한다. 마이크로파일의 효과를 분석하기 위해 부산지하철 3호선 굴착과정에서 계측된 지표침하와 말뚝의 변위, 터널내 변위 등을 분석하였으며, 마이크로파일의 각도와 설치길이에 관한 효과를 입증하기 위해 현장계측자료와 수치해석을 비교하였다.

핵심용어 : 저소음, 저진동, 친환경적인 마이크로 파일

1. 서 론

산업고도화로 인해 도심지가 초고층화, 지하화 되어 가용 공간의 활용이 증대됨에 따라 기존 구조물과 연계된 새로운 사회기반시설의 확충과 노후 구조물의 보수·보강이 증가되고 있다. 그동안 깊은 기초로서의 역할은 PC 말뚝, 강관 말뚝 또는 피어, 지하 연속벽 등이 주로 사용되었다. 그러나 도심에서의 소음과 진동으로 인한 민원이 증대되고 있는 현실을 감안해 볼 때 저진동·저소음 등의 친환경적인 요소가 중요시 되고 있다.

특히, 도심지 터널건설에서 지중 및 지상에 존재하는 각종 인접구조물에 대한 안정성 확보가 필수적인 요건으로 대두되고 있다.

따라서 이 같은 문제를 극복하면서 깊은 기초로서의 역할을 수행할 수 있는 공법으로 이탈리아에서 개발된 마이크로파일 공법이 있다. 이 공법은 세계 각국에서 지반 보강이나 지지 말뚝 혹은 그 혼용으로 널리 사용되고 있다. 이런 마이크로파일의 광범위한 활용에도 불구하고 명확한 설계기준이 없어 기존 말뚝개념을 준용하거나 경험적인 측면에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 도심지 터널 건설시 그 특성상 각종 인접 구조물의 안정성 확보가 필요함에 따라 지반거동 억제 역할을 수행 할 수 있는 마이크로파일 공법을 활용함에 있어 선행연구에서 규명되어진 역학적 메커니즘을 통해 파일의 적절한 보강 형식과 현장의 적용성 및 보강의 효율성을 높이기 위한 수치해석을 실시하고, 수치해석 결과와 현장계측 데이터

*교신저자. 정회원. 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정(Tel: +82-51-502-8741, Fax: +82-51-502-8742, E-mail: chung1632@hanmail.net)

Corresponding Author: Member, Graduate Research Assistant, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.

**부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.

***부산과학기술대학교 토목과 교수

Professor, Dept. of Civil Engng., Busan Institute of Science and Technology

****부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Graduate Research Assistant, Dept. of Civil Engng., Pusan National Univ.

값을 비교 분석함으로써 실 시공된 마이크로파일의 의한 인접 구조물의 침하 등 변위 억제 효과를 평가하고 모형실험을 통해 증명하고자 한다.

2. 마이크로파일의 보강 효과

선행된 연구에서 지반과 파일의 상호작용에 대한 역학적 메커니즘 규명에 많은 노력을 하였고 마이크로파일 보강의 효율성을 위한 마이크로 파일의 적절한 적용에 관한 연구로서 임종철 등(1998)이 토사터널에 사용된 마이크로파일의 지반침하 억제효과에 관한 연구에서 가장 효과가 우수한 마이크로파일의 보강방향을 제안하였다.

Fig. 1 및 Fig. 2는 마이크로파일의 보강방향 및 보강형태를 나타내었다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 각각 ϵ_1 방향 90°, 120°, Fig. 1(a)는 ϵ_3 방향 60° 경우로 실험하여, 방향 60° 보강이 ϵ_3 방향 120° 보강시 보다 침하비(ϵ_3 방향 60° 보강시 침하/ ϵ_1 방향 120° 보강시 침하)가 30% 감소하며(Fig 3),

Fig. 1. Reinforcement direction of Micor Pile

Fig. 2. Reinforcement type of Micor Pile

Fig. 3. Surface Settlement with Reinforcement Direction

Fig. 4. Surface Settlement with Reinforcement Type

Fig 5. Surface Settlement for the Effect of MP Installation Angle

Fig 2의 보강 형태로는 open 형의 경우보다 close 형의 보강이 더욱 유리한 보강방법이고 천단지표점의 침하를 억제하고자 할 시 토층비(Fig. 1의 H/D)가 1인 경우는 천단지표점의 침하를 20%, 토층비가 2인 경우는 60%의 침하를 억제할 수 있었다(Fig. 4). 그리고 터널 굴착으로 인해 인접구조물의 침하발생을 억제하기 위해 마이크로파일을 적용하였다. 터널 굴착을 근사시키기 위하여 터널직경을 10% 축소시키고, 마이크로파일의 설치각도를 변화시켜 이때의 구조물 좌측끝점에서의 침하량을 비교하여 설치각도에 따른 마이크로파일의 침하 억제효과를 분석하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 설치각도 60°에서 구조물의 침하가 현저히 감소함을 알 수 있었다.

3. 실내 모형실험

3.1 평면 변형률 토조

본 연구에서 사용된 평면 변형률 토조의 제원은 Fig. 6과 같으며, 토조의 앞면과 뒷면에는 아크릴판을 부착하여 지반의

Fig. 6. Plane Strain Soil-tank

거동을 관찰하는 데 용이하게 하였고, 모형지반을 제작할 때에는 지중변위를 측정하기 위해 직경 1 cm의 타겟을 거의 5 cm×5 cm 격자로 설치하고, 이들의 움직임을 사진촬영하여 지반의 변형을 분석하였다.

3.2 모형지반 제작 장치

모형지반을 균질하게 만들기 위하여 낙하고에 따른 밀도변화시험에서 거의 일정한 밀도가 되는 높이 1.2 m를 유지하고 일정한 속도로 움직이는 슬롯형 강사장치를 이용하여 일정 토피고까지 지반을 형성한다.

Fig. 7. Test Diagram for the Effect of MP Installation Angle

Fig. 8. Test Diagram for the Effect of MP Length

Table 1. Settlement Decrement Ratio of CL Piont

MP의 길이 (m)	설치 각도 (θ)	CL (mm)	CL점의 침하감소율 (%)
무보강	-	1.03	-
MP-0.3L	60°	0.70	32%
MP-0.4L		0.62	40%
MP-0.6L		0.59	43%

3.3 실험 종류

본 연구에서는 터널 굴착 시 MP의 설치각도와 길이에 따른 영향을 연구하기 위하여, 토피고(H/D) 2.0에 대하여 Fig. 7 및 Fig. 8과 같은 실내 모형실험을 실시하였다.

마이크로파일의 길이가 길수록 설치각도 60°일때 가장 큰 침하감소효과가 나타남을 알 수 있었다. Table 1은 설치각도 60°, 길이변화에 따른 천단지표점의 침하감소율을 나타내었다.

3.4 마이크로파일의 응력거동 및 흙의 변위벡터

본 모형실험에서는 마이크로파일에 설치된 Strain gauge를 데이터기록기로 측정한다. 측정된 변형률 값으로 터널단면 축소(내공변위)에 따른 마이크로파일의 거동을 파악한다. Fig. 9(a)-Fig. 9(c)는 최초 터널직경의 10% 축소 시 각 Case별 응력값과 흙의 변위벡터를 나타내었다.

(a)

Fig. 9. (a) MP-0.4L, $\theta = 45^\circ$, MP' Stress, (b) MP-0.4L, $\theta = 60^\circ$, MP' Stress, (c) MP-0.4L, $\theta = 75^\circ$, MP' Stress

Fig. 9. Continued

4. 현장실험

3장의 실내모형실험을 기준으로 현장보강을 위한 수치해석을 실시하였고, 수치해석 결과에 대한 보강을 실시하고 실제 현장의 계측결과와 비교하였다.

4.1 현장의 개요

계측용 MP(마이크로파일)는 ○○교육관 건물 끝단과 교육관 건물 중간 지점에 설치하였고, 변형률 게이지는 터널굴진 방향과 교육관 방향으로 양방향 마주보게 5지점 10개를 설치하여 계측하였다.

4.2 현장 보강을 위한 수치해석

4.2.1 수치해석의 개요

선행된 모형실험에서 제안된 마이크로파일의 적절한 설치 각도와 길이의 적용성에 대해 실 시공전 지반의 조건과 지

하수위 등의 현장여건을 고려하여 flac 2D로 유한차분 해석을 실시하여 마이크로파일 적용 효과를 확인하고자 한다.

마이크로 파일의 설치 위치는 Fig. 10의 우측상단 교육관 부분의 원호 위치에 설치된다. 해석단면은 Fig. 11에 나타난 바와 같이 터널 직경 11 m, 토피고 19.6 m의 도심지에서의 얇은 터널이다. 얇은 터널 굴착에 있어서 터널 인접 건물의 안정성 확보를 위해 마이크로파일(D=14 mm)을 적용하였다. 여기서, 마이크로파일의 보강 효과를 검토하기 위하여 마이크

Fig. 10. Micro Pile Installation Point

Fig. 11. Section of Analysis

Table 2. Condition of Numerical Analysis

구분	검토조건
CASE 1	마이크로파일 보강효과가 없는 경우
CASE 2-1	마이크로파일 보강 : 보강각도 60°, 길이 20 m
CASE 2-2	마이크로파일 보강 : 보강각도 60°, 길이 26 m
CASE 3-1	마이크로파일 보강 : 보강각도 75°, 길이 20 m
CASE 3-2	마이크로파일 보강 : 보강각도 75°, 길이 26 m

로파일 시공 각도와 길이에 따라서 Table 2의 CASE 3, CASE 4에 대한 검토를 수행하였다.

4.2.2 결과 분석 및 고찰

수치해석 결과 각 경우별 지표 침하 형상은 Fig. 12와 같다. 검토 결과 마이크로파일의 시공 각도가 60°인 경우가 75°인 경우보다 지표 침하를 억제하는 효과가 우수한 것으로 나타났다. 이 결과는 임종철 등(1999)의 연구결과와 일치하는 것으로 현장적용을 설치각도 60°로 하였다.

수치해석상의 검토결과를 Table 3과 같이 정리하였다. 여기서 무보강시와 CASE 2 및 CASE 3의 침하량에 있어서는 미소한 차이만 있음을 알 수 있었다. 그러나 부등침하 감소율(%)에 있어서 무보강시 보다 부등침하 억제효과가 우수한 것으로 확인되었다.

검토결과를 통해 설치각도 60° 보강길이 26 m가 가장 효율적으로 해석결과가 나왔으나 시공상의 문제로 인해 마이크로파일의 길이를 20 m로 제안하였다.

제안된 마이크로파일의 길이(20 m)는 $I/H=0.8$ 로 제안된 모형실험결과의 값 보다 큰 $I/H=1.02$ 로 제안된 길이에 비해 만족한다. 그러나, 향후 최적의 보강길이 26 m에 대한 보강효과

의 검증이 되었으면 한다. 터널 굴착에 따른 교육관 건물 기초부의 침하 검토 결과 최대 침하량 약 5.1 mm, 부등침하량 1.5 mm 정도가 발생하는 것으로 해석 되었다. 이것은 Table 4의 각종 허용침하량 기준 이내로 교육관 건물에는 특별한 영향이 없을 것으로 예측되었다.

4.3 현장계측 및 결과 분석

4.3.1 마이크로파일

계측용 마이크로파일은 STA. 0+720.00 및 STA. 0+712.00에 설치하고, 마이크로파일의 계측결과는 Strain gauge에 의해 계측된 변형률로 구한 휨응력과 축응력을 마이크로파일과 막장면 사이의 이격거리에 따른 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 마이크로파일에 작용하는 휨응력과 축응력의 값은 계측용 마이크로파일 통과 전부터 증가하며, 계측용 마이크로파일 통과 후에도 휨응력과 축응력의 지속적인 증가를 보인다. STA. 0+712.00에 위치한 마이크로파일은 막장 면과의 이격거리 30 m 지점에서 일정 값으로 수렴함을 알 수 있었다. 그리고, 이러한 휨응력과 축응력의 증가는 마이크로파일이 터널 굴진에 따른 인접 구조물의 침하를 억제하기 위한 저항체로서 작용하고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 12. Shape of Surface Settlement

Fig. 13. Generation Stress form MP

Table 3. Surface Settlement and Settlement Decrement Ratio

구 분	A점 침하량 (mm)	B점 침하량 (mm)	부등침하량(B점-A점) (mm)	부등침하 감소율 (%)	B점의 침하 감소율 (%)
CASE 1	3.1	6.2	3.1	-	-
CASE 2-1	3.6	5.1	1.5	51.6	17.7
CASE 2-2	3.7	4.9	1.2	61.3	21.0
CASE 3-1	3.1	5.3	2.2	29.0	14.5
CASE 3-2	2.9	4.6	1.7	45.2	25.8

Table 4. Result of Permissible Settlement

구 분	손상한계 (Skempton)	최대허용침하량 (Sowers)	등급 안전조치 (시설안전관리공단)	허용각변위 한계 (Bjerrum)
관리 기준	1/300	0.003S = 30.3 mm	예민한 기계기초 = 1/750	예민 기계 = 1/1,000
검토 결과	1/6,733	5.1 mm	1/6,733	1/6,733
판 정	안 정	안 정	안 정	안 정

4.3.2 건물경사계

교육관의 건물 기울기에 대한 현장계측을 위하여 건물경사계를 구조물 지하에 4개소 설치하여 측정한 결과 건물경사계의 변위 값은 0.03 mm로 나타나 터널굴착에 따른 인접구조물에 미치는 영향을 마이크로파일을 설치함으로 최소화 할 수 있었으며 구조물의 부등침하하는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다.

4.3.3 지표침하와 터널 천단변위 및 내공변위

현장에서 계측한 지표침하는 STA. 0+718.00 위치에서 계측한 것으로써 막장진행에 따라 변화하는 값을 횡단방향으로 나타내었다.

Fig. 14는 STA. 0+718.00 위치에서의 터널 횡단면상의 지표침하량을 나타내는데 굴착이 진행됨에 따라 지표침하량은 9.0 mm로 수렴함을 알 수 있다.

이 값은 수치해석으로 얻은 5.1 mm 보다 큰 값으로 나왔으나 허용 침하량 이내로 나타났으며, Fig. 15에서 터널 천단변위는 1.1 cm, 내공변위는 1.14 cm로 수렴하였으며 이 값 또한 관리 기준치 이내임을 알 수 있었다.

Fig. 14. Surface Settlement of Tunnel Crossing Direction (STA. 0+ 718.00)

Fig. 15. Displacement of Crown and Shoulder (STA. 0+ 726.00)

5. 결 론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 설치된 마이크로파일의 축응력 및 휨응력을 분석한 결과 최대 30 kgf/cm², 49 kgf/cm²로 나타났으며, 이는 실제 마이크로파일이 지반의 변형에 대해 저항체로서 작용하고 있다고 판단된다.
- 2) 현장계측 결과 터널 천단 지표점에서 계측된 최대 침하량은 9 mm 나타났으며, 구조물의 건물 손상 한계 (Skempton)의 관리기준 1/300 보다 작은 1/2500로 나타나 마이크로파일의 설치로 인해 구조물의 안정성 및 인접지반의 침하방지에 효과가 있음이 증명되었다.
- 3) 모형실험에서 길이에 따른 천단침하 감소율은 무보강에 대해, 동일설치각도 60°에서 L=1.5D 일때 32%, L=2.0D 일때 40%, L=3.0D 일때 43%의 감소율효과가 나타났다.
- 4) 마이크로파일의 길이비가 길어질때, L=3.0D 의 설치간격비(RS/BL, 설치간격/구조물의 종방향 폭)는 L=1.5D, 2.0D 에 비해 25% 향상된 값을 가진다.
- 5) 선행 모형실험에서 제안된 마이크로파일의 적정 설치각도 60°와 L/H=0.8의 적정성을 수치해석과 실 시공한 마이크로파일의 계측값, 금번 모형실험을 통해 증명하였다.

References

- Park, L.K. (2003) A Study on the Characteristic of Ground Behaviour and Settlement Restraining effect of Micropile during Shallow Tunnel Construction in Soft Ground, Unpublished doctoral dissertation, Pusan National University, p.78.
- Pusan National University, Research Institute of Industrial Technology (2001) A measurement report of Anmin tunnel, pp. 45-47.
- Lee, S.H. (2005) Study on design method considering the ground reinforcement effect of micropile, Unpublished master's dissertation, Pusan National University, pp.38-39.
- Lee, W.T. (1991) study on reinforcing effect of reticulated root piles on shallow footing, Unpublished doctoral dissertation, Seoul National University, pp.41-42.
- Lee, T.H. (2006) Study on the reinforcement effect of micropile on dense sand, unpublished doctoral dissertation, Pusan National University, pp. 87.
- Im, J.C. (1998) The laboratory model test for the settlement restraint effect of ground of the micro-pile installed around the soft ground tunnel, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, pp. 365-372.
- Im, J.C (1996) The principles and applications of strain gauges, Pusan National University, pp. 36.
- Im, J.C (1999) Written opinion for sector Han Sa Rang Apartment in Busan subway No. 306, pp. 3.
- Im, J.C (2006) A review report on reinforcement method of micro pile at rose motel in Busan subway line No.3, Pusan National University, pp. 49-55.
- Yun, I.H. (1999) Basic studies on the settlement of structure on the ground surface by shield tail void and the settlement reduction metho, Unpublished master's dissertation, Pusan National University, pp.51.

© Received June 5, 2013

© Revised June 7, 2013

© Accepted June 12, 2013