

터널 굴착시 인접구조물의 침하억제를 위한 마이크로파일의 두부조건 및 설치영역에 따른 효과

The Head Condition and the Installation Position of Micro-Pile to Reduce the Settlement of Adjacent Structures in Sandy Ground Tunnelling

임 중 철 ^{*1}	Im, Jong-Chul
박 이 근 ^{*2}	Park, Lee-keun
오 명 렬 ^{*3}	Oh, Myug-Ryul

Abstract

Tunnelling in the urban area is usually constructed under the shallow cover. In this study, the laboratory model tests are carried out by modeling the tunnel construction in the ground with the cover ratio 1 and 2. One of some difficulties in the urban shallow tunnelling is to protect the damage of the structures along the tunnel line. In this case, Micro-Pile method has some merits in simple construction and cost as it is constructed with small equipments. The effect of the Micro-Pile method is analysed in the light of the earth pressure acting on the tunnel and the settlement in the ground surface through laboratory model test. The degree of freedom of the head of Micro-Pile and the installation position are considered in model tests. As results, the fixed head of Micro-Pile is better than the free head, and it is more effective to install the Micro-Pile in the zone where the distance ratio A/L_p is less than 0.5. Such an installation shows the reduction of settlement by 22%~37%. The similar tendency appeared in the result of the earth pressure acting on tunnel.

요 지

도심지에서의 터널은 주로 얇은 토층비에서 이루어진다. 따라서, 본 연구에서는 토층비 1, 2정도의 얇은 터널에 대한 터널시공을 고려하였다. 또한, 도심지 얇은 터널에서 겪게 되는 어려움 중 하나인 지상구조물의 손상을 방지하는 것이다. 이러한 경우, 구조물의 손상을 방지하기 위해 소형장비로 간단하고 저렴한 시공이 가능한 마이크로 파일공법의 채택이 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 마이크로 파일의 설치위치와 설치각도 및 두부 고정도를 달리한 실험을 실시하여 토압 및 지표면 침하를 중심으로 그 영향을 평가하였다. 마이크로 파일의 설치위치에 있어서 거리비 (A/L_p) 0.5이내에서 침하감소면에서 대략 22%~37%정도의 효과가 있었으며, 마이크로 파일의 두부는 파일간 서로 결속하는 것이 더 효과적임을 알 수 있었다. 이러한 경향은 토압분포에서도 마찬가지로이다.

Keywords : Laboratory model test, Load cell, Micro-pile, Tunnel earth pressure

1. 서 론

최근 대도시에는 만성적인 교통문제를 해결하기 위

하여 각종 지하철도, 지하철 등 대규모 지하 교통시설과 함께 전력구 및 통신구와 같은 다용도 터널 등이 지하에 건설되고 있다. 이와 같은 도심지 터널은 경제성 우위로

*1 정희원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*3 정희원, 대원토질 주식회사 전문

개착식공법으로 행해지는 것이 대부분이다. 그러나, 심도가 깊어지게 되는 2호선 이상의 터널을 비롯하여 교통문제, 환경문제, 주변구조물에 미치는 영향 등 많은 문제점이 대두되면서 도심지 NATM이 주목을 받고 있다.

도시를 떠받치고 있는 지반은 대개 산악에 형성된 지반보다는 비교적 연약한 퇴적지반 및 풍화가 많이 진행된 토사지반으로 이뤄지는 것이 보통이다. 도심지 터널은 비교적 토피가 얇은 것이 특징이므로, 주변지반의 변위가 터널설계를 지배하는 주요인자가 된다. 따라서, 지반의 변위를 최소화하여 주변구조물에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 침하억제를 위한 적절한 공법을 고려하지 않으면 안된다.

구조물의 손상을 방지하기 위해 소형장비로 간단하고 저렴한 시공이 가능한 마이크로 파일공법이 주목을 받고 있다.

따라서, 본 연구에서는 도심지 토사지반에 건설되는 얇은 토층(도심지 공사에서 가장 많이 직면할 수 있는 토피고 2D(D : 터널직경) 이내인 터널)을 상정하고, 터널 노선 상에 지상구조물이 존재할 경우, 구조물의 침하억제방법 및 부등침하억제, 또한 구조물로 인해 터널에 발생하는 응력을 모형실험을 통하여 분석하였다.

터널 굴착시 지상구조물의 침하억제를 위해 마이크로파일을 적용하였으며, 마이크로파일의 적용패턴에 따라 부등침하를 효과적으로 억제할 수 있는 가능성을 제시한다. 또한, 마이크로 파일 두부처리가 고정인 경우와 자유인 경우를 서로 비교하고, 터널 굴착시 인접구조물에 대한 지반의 거동을 분석하여 보다 적절한 보강의 영역을 제안한다.

2. 실내모형실험

도심지 얇은 터널로서 토피고 2D(D : 터널직경)이하의 상태를 평면변형률 토조에서 모델링하고, 마이크로 파일의 두부 고정 여부 및 설치위치에 대한 실험을 실시하였다. 마이크로파일을 터널 종방향으로 60°와 90°로 엇갈리게 설치하였으며, 두부 고정 여부에 있어서는 60° 및 90° 각각에 대해서도 그 효과를 확인하였다. 2.2.2의 실험종류 및 방법에서 그림 5에 마이크로 파일의 설치에 대한 개념도를 나타내었으며, 실내모형실험에서 행한 실험종류는 표 2와 같다.

2.1 지반재료

2.1.1 물리적 특성

실내모형실험에 사용한 지반재료는 공인된 주문진 표준사(K.S.L 5100)이며, 주문진 표준사의 물리시험결과는 표 1과 같으며, 입도분포 곡선은 그림 1과 같다. 또한, 평면변형률 토조 내에서 제작된 지반의 평균건조밀도는 1.632 g/cm^3 (상대밀도 $D_r=96.5\%$)로서 상당히 밀한 상태이다.

2.1.2 역학적 특성

실내모형실험에서 평면변형률 상태를 재현하므로, 지반재료(주문진 표준사)의 강도 정수를 구하기 위하여 평면변형률 압축시험을 실시하였다. 모래로 모형지반을 제작할 경우, 낙하고에 따라 밀도가 변화한다(박, 1998, 임, 2000. 11). 그래서, 모형실험에서 지반을 제작한 낙하고와 동일한 낙하고(1.2m)로 공중낙하 하여 요소시험용 공시체를 성형하였으며, 이를 수침시킨 후, 동결하여 공시체를 평면변형률 압축시험기에 세팅하였다. 세팅이 완료된 공시체에 구속압을 준 상태에서 동결된 공시체가 녹을 때까지 구속압을 유지하였다가 등방압밀배수 상태로 평면변형률 압축시험을 실시하였다.

등방압밀배수(CID) 평면변형률 압축시험에 사용한 구속압(σ_3)은 80kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa의 네 가지이며, 변형률 제어법으로 시험하였다. 각 시험에서의

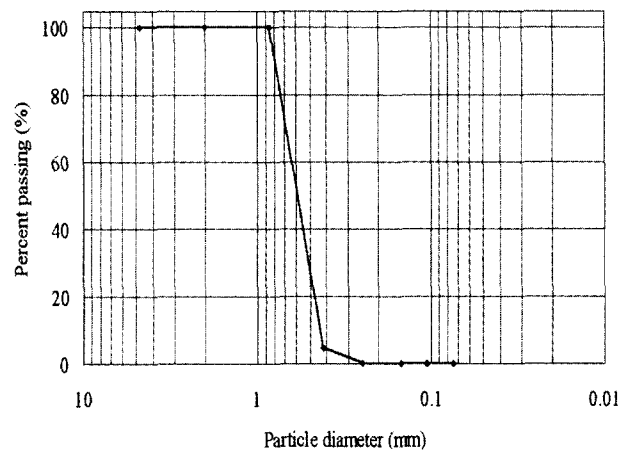


그림 1. 입도분포곡선(주문진 표준사)

표 1. 지반의 물성치

물성종류	최대간극비	최소간극비	최대건조밀도	최소건조밀도	함수비
물성치	0.843	0.617	1.639 g/cm^3	1.438 g/cm^3	0.3%

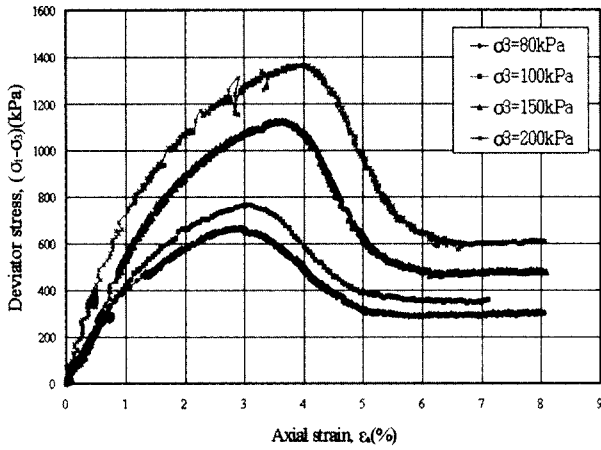


그림 2. 축차응력과 축변형률의 관계

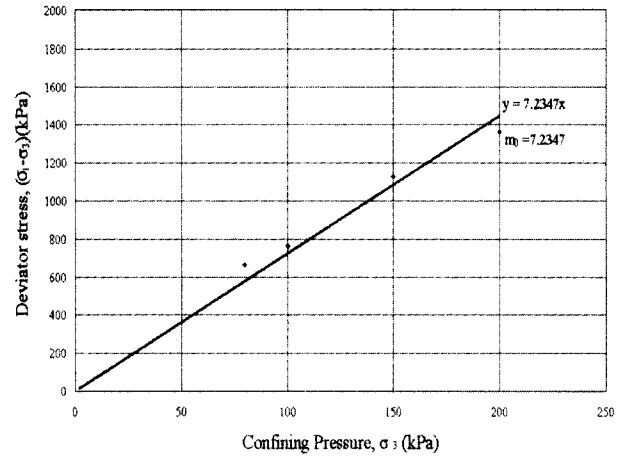


그림 3. (σ₃)와 (σ₁ - σ₃)의 관계

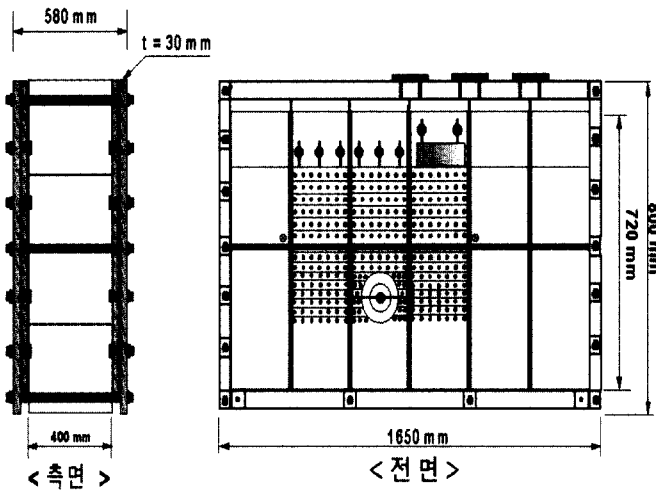


그림 4. 모형실험장치의 개략도

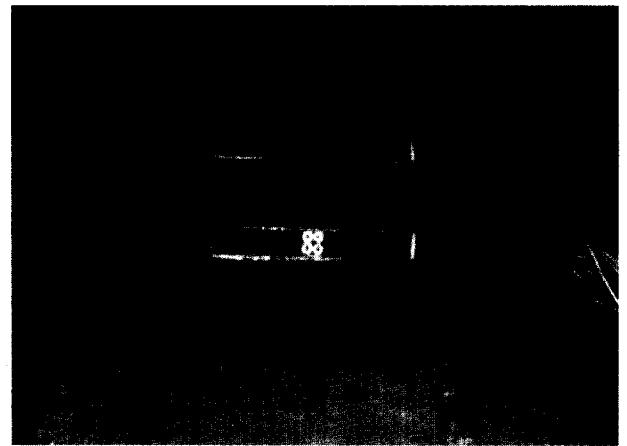


사진 1. 모형터널

축변형률과 축차응력과의 관계는 그림 2와 같다. 구속압과 최대 축차응력의 관계는 그림 3과 같으며, 최소사승법으로 구한 기울기(m_0)를 식 (1)에 대입하여 전단저항각을 구할 수 있다. 이렇게 구한 주문진 표준사의 전단저항각(ϕ_{ps})은 51.6° 이다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{m_0}{2 + m_0}\right) \quad (1)$$

여기서, m_0 는 그림 3에서 직선의 기울기

2.2 실내모형실험의 개요

2.2.1 실험장치

실내모형실험에 사용한 실험장치의 개요는 그림 4 및 사진 1과 같다.

- (1) 토조 : 토조의 앞면과 뒷면은 30mm두께의 투명 아크릴판을 사용하여 지반의 변형을 반영하는 타겟의 움직임을 사진 촬영할 수 있게 하였으며, 아크릴판과 지반과의 마찰을 최소화 하기 위해 표면이 매끄러운 아스태이지로 처리하였다. 이 평면변형률 토조의 제원은 1700(L)×410(W)×760(H)mm이다.
- (2) 모형터널 : 모형터널은 직경이 200mm, 길이 400mm로서, 모두 8개의 원형 세그먼트로 이루어져 있다. 원형으로 조립된 터널단면은 외부에서 손잡이를 회전하므로써 터널단면이 변하게 설계되어 있다. 또한, 각 세그먼트에는 2방향 로드셀(渡辺, 1977)이 부착되었으며, 이 로드셀을 통하여 터널 주변지반의 변형에 따라 터널에 작용하는 토압을 측정한다. 조립 완성된 모형터널의 외형은 사진 1과 같다.
- (3) 토압 측정장치 : 터널 원형단면을 구성하는 8개의 세그먼트에 2방향 로드셀을 한 개씩 설치하여, 각

세그먼트에서 반경방향응력(수직응력)과 접선방향 응력(전단응력)을 측정한다.

- (4) 모래 뿌리기 장치 : 균질한 모형지반 조성을 위하여 슬롯형 모래 뿌리기 장치와 호스형 모래뿌리기 장치를 사용하였고, 슬롯 폭은 3mm, 낙하고는 두 가지 장치 모두 1200mm를 유지하였다(박, 1998, 임, 2000, 11).
- (5) 구조물 하중 : 구조물 하중은 0.375 kgf/cm^2 이며, 구조물의 폭은 20cm로 하였다.
- (6) 모형 마이크로 파일 : 모형 마이크로파일은 $\phi 1.0\text{mm}$ 철선 표면에 모래입자를 부착하여 표면마찰력이 발휘될 수 있도록 하였다(모래입자가 부착되었을 때 철선은 약 $\phi 1.8\text{mm}$ 이다).

2.2.2 실험 종류 및 방법

도심지에서의 터널은 주로 얇은 토층비에서 이루어진다(강, 2000, 2). 따라서, 본 연구에서는 토층비 1, 2 정도의 얇은 터널에 대한 터널시공을 고려하였다. 이러한 얇은 터널에서는 터널 축선상에 존재하는 지상구조물의 손상이 우려된다. 이를 방지하기 위해 소형장비로 시공이 간단하고 저비용·고효율의 마이크로 파일공법이 적절하다고 판단된다. 본 연구에서는 마이크로 파일의 설치위치와 설치각도 및 두부 고정도를 달리한 실험을 실시하여 토압 및 지표면 침하를 중심으로 그 영향을

표 2. 마이크로 파일(MP)의 설치패턴에 따른 실험종류

토층비 (H/D)	MP의 직경	설치간격 (RS)	MP의 길이 (l)	MP의 설치위치 (A)	설치각도 (θ)
1.0	1.0mm	46mm	H(=1.0D)	50mm	60° & 90° Fx
				100mm	
				150mm	
				200mm	
				50mm	60° Fr
				50mm	90° Fr
2.0	1.0mm	46mm	1.0D	50mm	60° & 90° Fx
				100mm	
				150mm	
				200mm	
				50mm	60° Fr
				50mm	90° Fr
				50mm	60° Fx
				50mm	90° Fx

* 여기서, 60° & 90° 이란 마이크로 파일을 60도와 90도를 병행하여 설치한 것임을 의미하고,

* Fr은 마이크로 파일의 두부를 서로 고정하지 않은 것을, Fx는 상호고정을 의미한다.

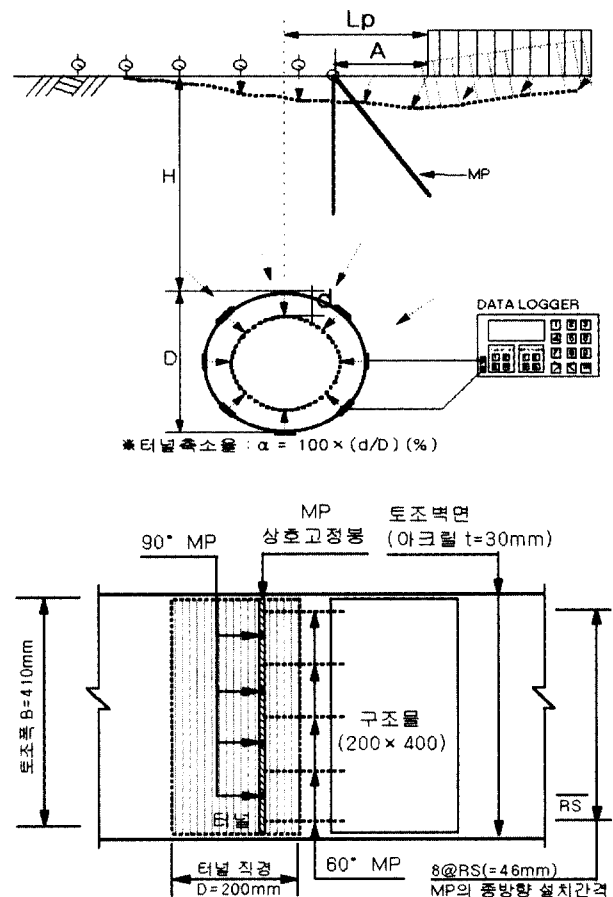
평가하였다. 본 연구에서 행한 실험의 종류는 표 2와 같다. 표 2에서 사용된 기호에 대한 설명은 그림 5에서 나타내었다.

평면변형을 토조에 조립 완성된 원형터널을 세팅하고 모형지반을 제작하면서 지반변형을 추적할 수 있는 타겟을 일정간격으로 설치한다. 지반 내부에서 터널을 굴착 진행하는 상황은 터널단면을 축소시키는 것으로 재현하는데, 터널 단면을 축소시키면 터널 주변지반이 변형을 일으킨다. 주변지반의 변형을 따라 타겟이 움직이는데, 이 움직임을 사진촬영·판독하여 지반의 변형 상황을 FEM으로 변형해석한다(임, 1992).

또한, 터널 주변지반의 변형에 따라 터널에 작용하는 토압도 변화할 것이다. 이의 변화는 지표면침하의 측정과 함께 각 로드셀을 통하여 측정한다.

실험방법에 대한 개념도를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다. 표 2와 그림 5에 표기한 A 및 마이크로 파일의 두부조건, 설치각도를 변화시켜 실험하였다.

두부조건은 그림 5의 평면도에서 MP 상호고정봉을



평면도

그림 5. 모형실험의 개념도

설치하여 MP를 서로 고정한 경우를 두부 고정(Fx), MP 상호고정봉을 제거한 경우를 두부 자유(Fr)로 하였다. 두부고정은 강한 접착제를 사용하여 강결시켰으며, 실험종료 후에도 그 고정도는 유지되었다.

3. 실험결과 및 고찰

모형실험의 결과를 지표면 침하 및 터널에 작용하는 2방향의 응력에 대해서 정리하였다. 2방향응력은 그림 11과 같이 터널면에 작용하는 반경방향응력과 접선방향 응력을 말한다.

3.1 지표면 침하의 분석

지상구조물이 터널 노선변에 있는 경우에 터널을 굴착하면 지표면 침하형상은 그림 6 및 그림 7과 같다. 터널 굴착으로 인해 터널 주변지반의 변형(V_L)이 지표면 침하(V_S)로 이어지게 된다. 터널 주변지반의 변형이 지표면침하에 미치는 정도는 V_S/V_L 로 나타낼 수 있다(그림 6). 이하에서는 $V_S/V_L \times 100(\%)$ 에 의해 마이크로 파일의 보강효과를 나타내기로 한다.

V_S 를 구하는 데 있어서, 지표면침하는 $(-3.0 \sim 4.0)D$ 의 영역에서 발생하는 것으로 가정하고(그림 7), 즉 $L=-3.0$ 과 $L=4.0$ 에서 침하량을 0으로 하고 침하영역의 부피를 구하였다.

3.1.1 두부조건에 따른 지표면 침하

마이크로 파일을 그림 5와 같이 설치하면, 마이크로 파일의 두부조건을 어떻게 처리하여야 할지가 의문시 된다. 마이크로 파일간 두부의 연결여부에 따라 지표침

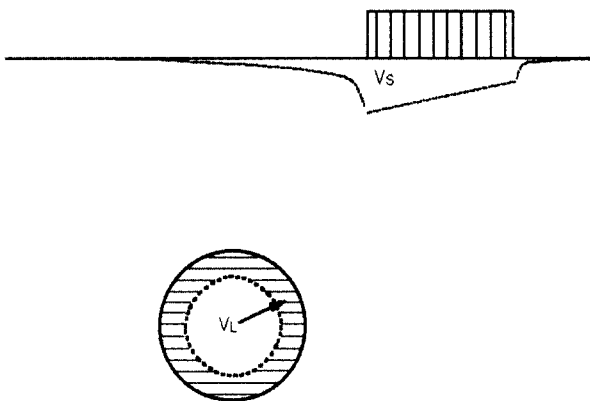


그림 6. V_L 과 V_S 의 개념도

하에 미치는 영향에 대해 알아보고자 토피고 2D에 대해서 실험하였다.

터널축소율 α 에 따른 $V_S/V_L \times 100(\%)$ 값을 그림 8에 나타내었다. 터널축소율(α)은 $d/D \times 100(\%)$ 로 나타낸 것으로, 터널직경의 축소량(즉, 터널 주변지반의 변형의 크기)을 터널직경에 대해 백분율로 나타낸 것을 말한다.

그림 8의 (a)는 60° , (b)는 90° , (c)는 $60\&90^\circ$ 로 마이크로 파일을 보강하였을 때의 지표면 침하를 나타내며, 각각에 대해서 두부 고정과 자유의 영향을 알아보았다.

그림 8을 보면, 마이크로 파일의 두부를 고정하는 것이 고정하지 않는 것보다 터널 주변지반의 변형이 지표면에 전달되는 영향을 줄이는데 더 효과적임을 알 수 있다. MP의 두부고정 여부에 따라 그 효과가 다른데, 이 조건에 따른 지표면 침하영역의 감소효과를 살펴보면 아래와 같다. $60\&90^\circ$ 의 경우, 무보강인 경우에 비해 초기변형에서 31%의 차이로 가장 크다가 전체적으로 7% 내외의 효과 차이가 난다. 그리고, 60° 의 경우와 90° 의 경우에는, 각각의 무보강에 비해 10% 내외의 효과 차이가 있는 것을 알 수 있다.

3.1.2 설치위치에 따른 지표면 침하

단부를 고정하여 60° 와 90° 로 엇갈리게 설치한 마이크로 파일의 설치위치에 대한 영향을 보기 위해, 설치위치 A를 구조물좌단으로부터 $50(\text{거리비 } A/L_p=0.25)$, $100(0.5)$, $150(0.75)$, $200(1.0)\text{mm}$ 로 변화시켜 토피고 1D 및 2D에 대하여 실험하였다.

터널축소율(α) 0.3% 부근에서 터널 주변지반의 변형이 지표면에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 토피고 1D, 2D에서는 초기의 터널 주변지반 변형의 40%에서 최대 99%정도까지 지표면에 전달되는 것으로

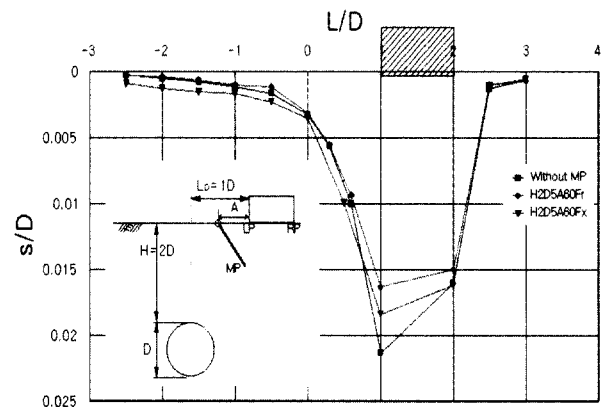
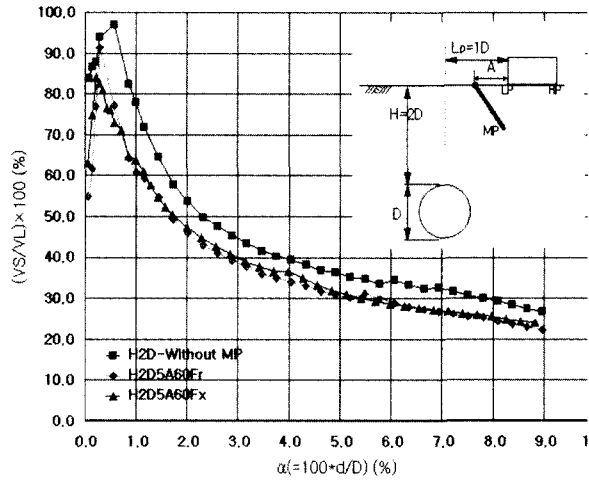
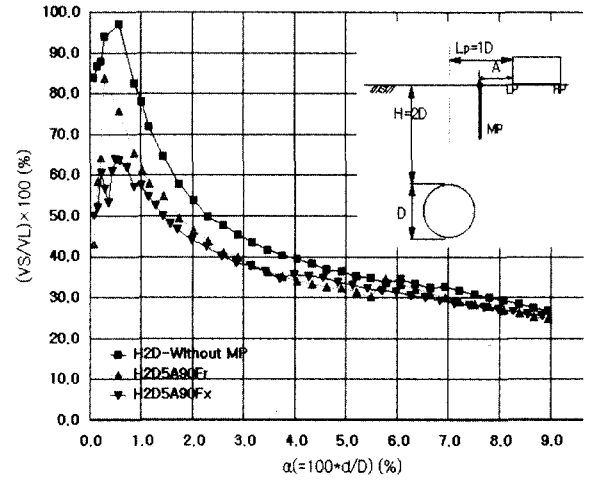


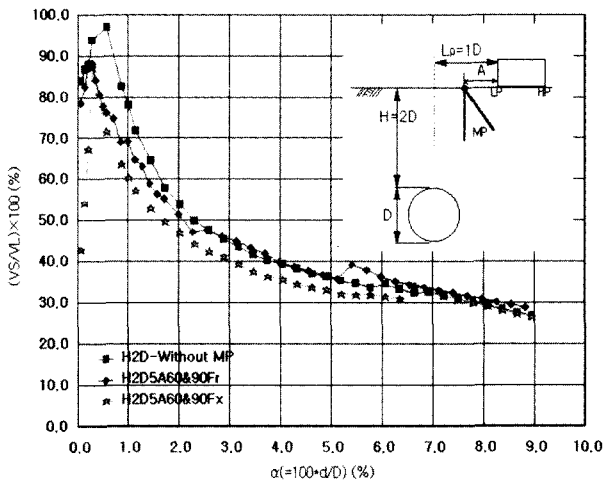
그림 7. 구조물의 영향을 받는 침하곡의 형상 ($\alpha \approx 9.0\%$)



(a) 설치각도 : 60°



(b) 설치각도 : 90°



(c) 설치각도 : 60&90°

예로, 실험명 H2D5A90Fr에 대해서,

H2D : H=2D

5A : A=5cm

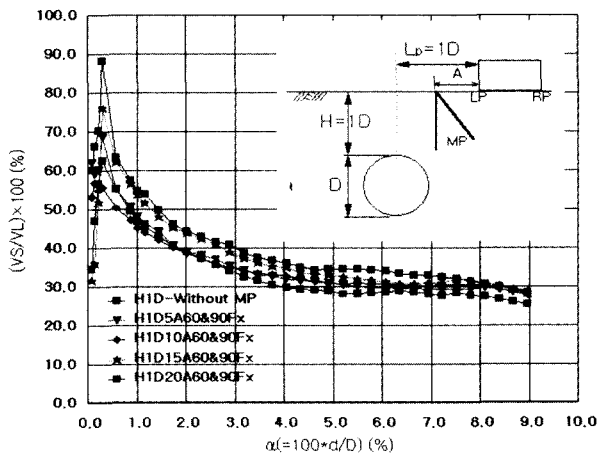
90 : MP의 설치각도

Fr : MP의 두부자유

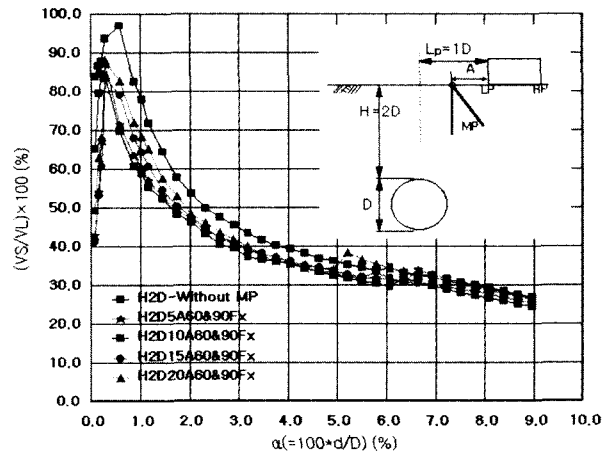
* $L_p = 1D \approx 200\text{mm}$

MP : Micro-Pile, $l = 1D$

그림 8. MP의 두부조건(고정, 자유)의 영향(H/D=2)



(a) 토층비 H/D = 1



(b) 토층비 H/D = 2

그림 9. 터널 주변지반의 변형에 따른 지표면 침하

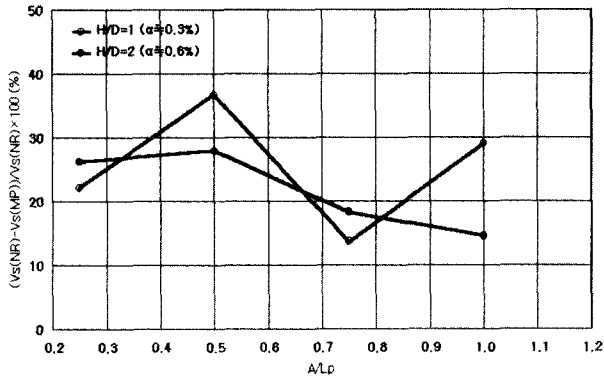
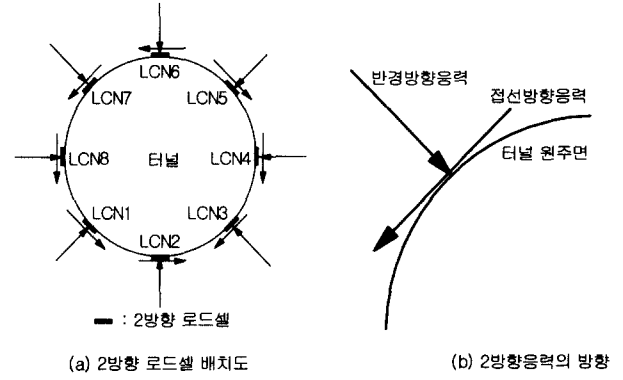


그림 10. MP의 설치위치에 따른 영향



(a) 2방향 로드셀 배치도

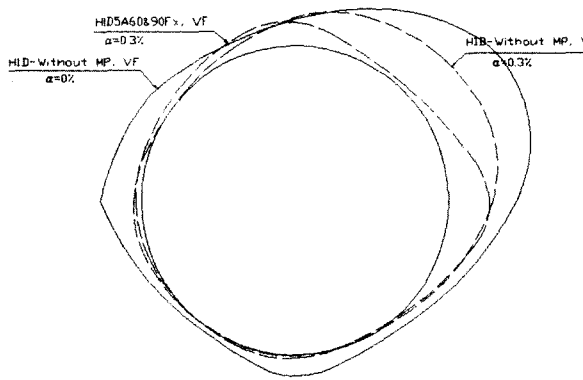
(b) 2방향응력의 방향

그림 11. 2방향응력(반경방향응력 및 접선방향응력)

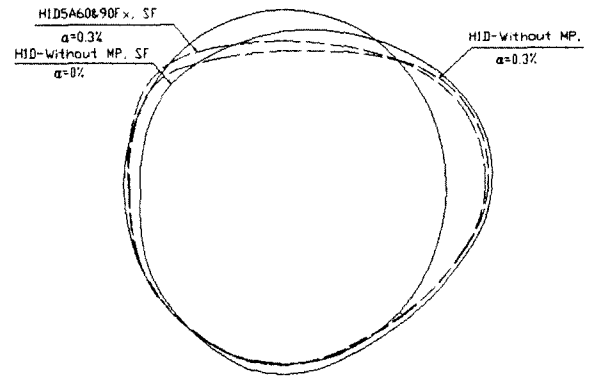
나타났다. 토피고 1D보다 2D에서 터널 주변지반의 변형이 지표면에 미치는 영향 ($V_s/V_L \times 100$)이 큰 것으로 나타났는데, 이는 토피고 1D에서는 상부구조물의 영향을 많이 받기 때문에 터널 상부 구조물 반대편 지반은 상대적으로 침하가 적어졌기 때문으로 판단된다.

마이크로 파일을 설치함으로써 지표침하를 저감시키는 효과는, 토피고가 1D인 경우에는 터널축소율(α)이

0.3%부근에서, 토피고가 2D인 경우에는 0.6%부근에서 가장 큰 효과를 보였다. 이를 그림 10에 나타내었는데, 종축은 무보강에 대한 보강시의 지표침하 차이로서 보강효과를 표현한 값이다. 대체적으로 1D와 2D에서 마이크로 파일 설치 거리비(A/L_p)가 0.5이내에서 효과가 좋은 것을 알 수 있으며, 이 범위에서 대략 22%~37% 정도의 침하 감소효과가 있음을 알 수 있다.

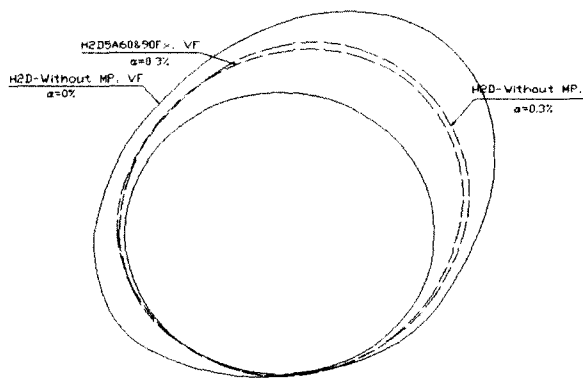


(a) 반경방향응력

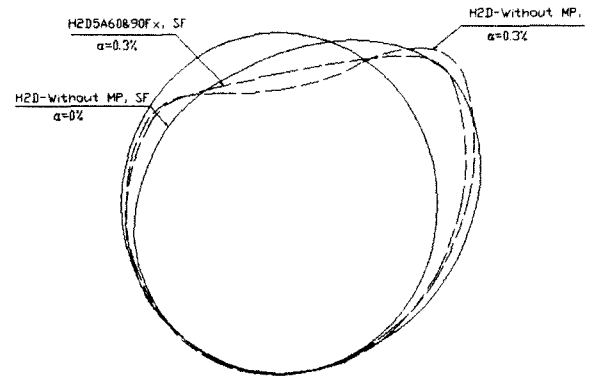


(b) 접선방향응력

그림 12. 터널에 작용하는 토압의 분포 ($\alpha = 0\%$ and 0.3% ($H/D=1$))



(a) 반경방향응력



(b) 접선방향응력

그림 13. 터널에 작용하는 토압의 분포 ($\alpha = 0\%$ and 0.3% ($H/D=2$))

그리고, 전체적으로 10%이상의 효과는 보이므로, 천단 지표점 ($A/L_p=1.0$ 되는 지점)에서 구조물 위치까지 전 영역에 걸쳐서 실제로 보강하면 터널 굴착시 지상구조물의 손상방지에 큰 효과가 있을 것이라고 판단된다.

3.2 터널에 작용하는 토압의 분석

터널축소율(α)에 따라 터널에 작용하는 토압을 2방향 로드셀에 의해 반경방향응력 및 접선방향응력으로 나누어 나타내었다. 2방향응력에 대한 개념은 그림 11을 참고하기 바란다. 터널에 작용하는 토압의 형상을 토피고(H/D) 1 및 2에 대하여 그림 12 및 그림 13에 나타내었다. 실선으로 나타낸 것은 터널 원형에 분포하는 초기토압을 나타내고, 점선으로 표현한 것은 보강시 및 무보강시의 터널축소율 $\alpha \approx 0.3\%$ 에서의 분포이다.

터널축소율 α 가 0.3%부근이 될 때, 터널 어깨부와 천단부에서 터널에 작용하는 토압은 최대가 된다. 따라서, 이하에서는 터널 어깨부와 천단부에 대한 토압을 비교하여 마이크로 파일의 보강효과를 분석한다.

3.2.1 단부조건에 따른 토압

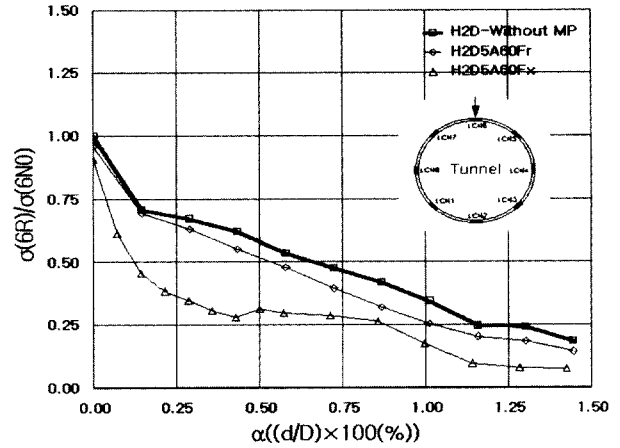
마이크로 파일의 단부 고정 및 자유에 대한 토압분포는 그림 14와 같다. 터널 천단부의 반경방향응력의 변화가 컸으며, 이에 대한 것만을 식 (2)로 정의된 응력비로서 그림 14에 나타낸다.

이하에서 반경방향응력비 및 접선방향응력비는 각각 무보강시 초기에 발생하는 응력값에 대한 어떤 터널 축소율 α 에서 발생하는 응력의 비를 의미한다. 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

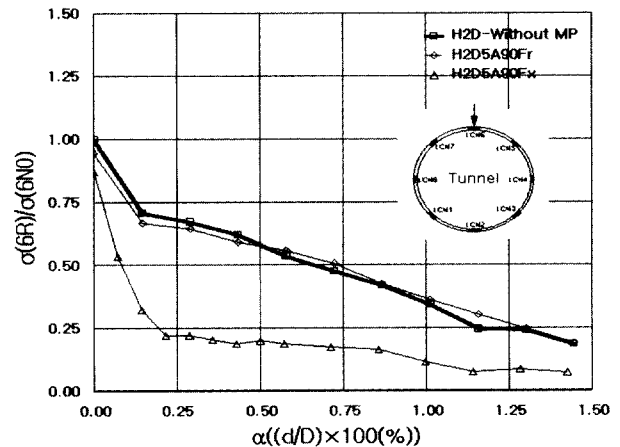
$$\text{응력비} = \frac{\text{어떤 터널축소율}\alpha\text{에서의 응력}}{\text{무보강시 초기응력}} \quad (2)$$

터널축소율에 따라 터널 주변지반이 변형을 일으키면서 터널에 작용하는 토압은 터널축소율의 초기 1.5% 이내에서 크게 변화한다. 그림 13에 나타낸 그림은 횡축에 터널축소율(터널축소율은 터널이 굴착진행되면서 터널에 응력해방을 일으키는 것을 모델링 한다)을, 종축에 무보강시 초기토압으로 무차원화한 토압비를 나타내고 있다.

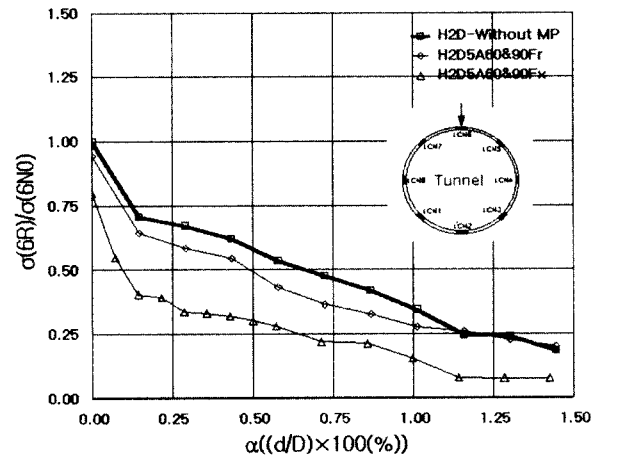
단부를 고정하였을 경우, 지표면 침하에서도 그러하였듯이 토압에서도 단부가 자유인 경우보다 그 효과가 더 크다. 따라서, 터널 축선상을 따라 설치되는 마이크로 파일



(a) 두부 자유 및 고정(설치각도 60°)



(b) 두부 자유 및 고정(설치각도 90°)



(c) 두부 자유 및 고정(설치각도 60&90°)

그림 14. MP의 두부조건에 따라 터널에 작용하는 토압

상호간에 지상에서 두부를 상호고정하여 시공하면 그 보강효과를 더욱 크게 할 수 있다고 판단된다.

3.2.2 설치위치에 따른 토압

그림 15에서는 토피고 1D 및 2D에 대해 무보강시의

응력에 대한 보강시의 응력의 비로서 보강에 의한 응력 감소효과를 알아보았다.

1) H/D=1인 경우

그림 15를 보면, LCN6의 접선방향응력의 값의 변화가 가장 크게 됨을 알 수 있다. 그러나, 토압의 크기가 가장 크게 작용하는 곳은 LCN5에서이다. 전체적으로 보면, A/L_p가 0.5 이내인 곳에서의 보강의 경우 터널

에 작용하는 토압을 많이 감소시켜주는 것을 알 수 있다. A/L_p가 1.0인 경우(H1D20A60&90Fx)에는 보강효과는 보이지만, 무보강과 거의 같은 크기의 토압이 발생하고 있다.

2) H/D=2인 경우

그림 16에서 마이크로 파일의 설치위치의 변화에 따른 LCN5 및 LCN6의 접선방향응력을 보면, H2D5A60&90Fx

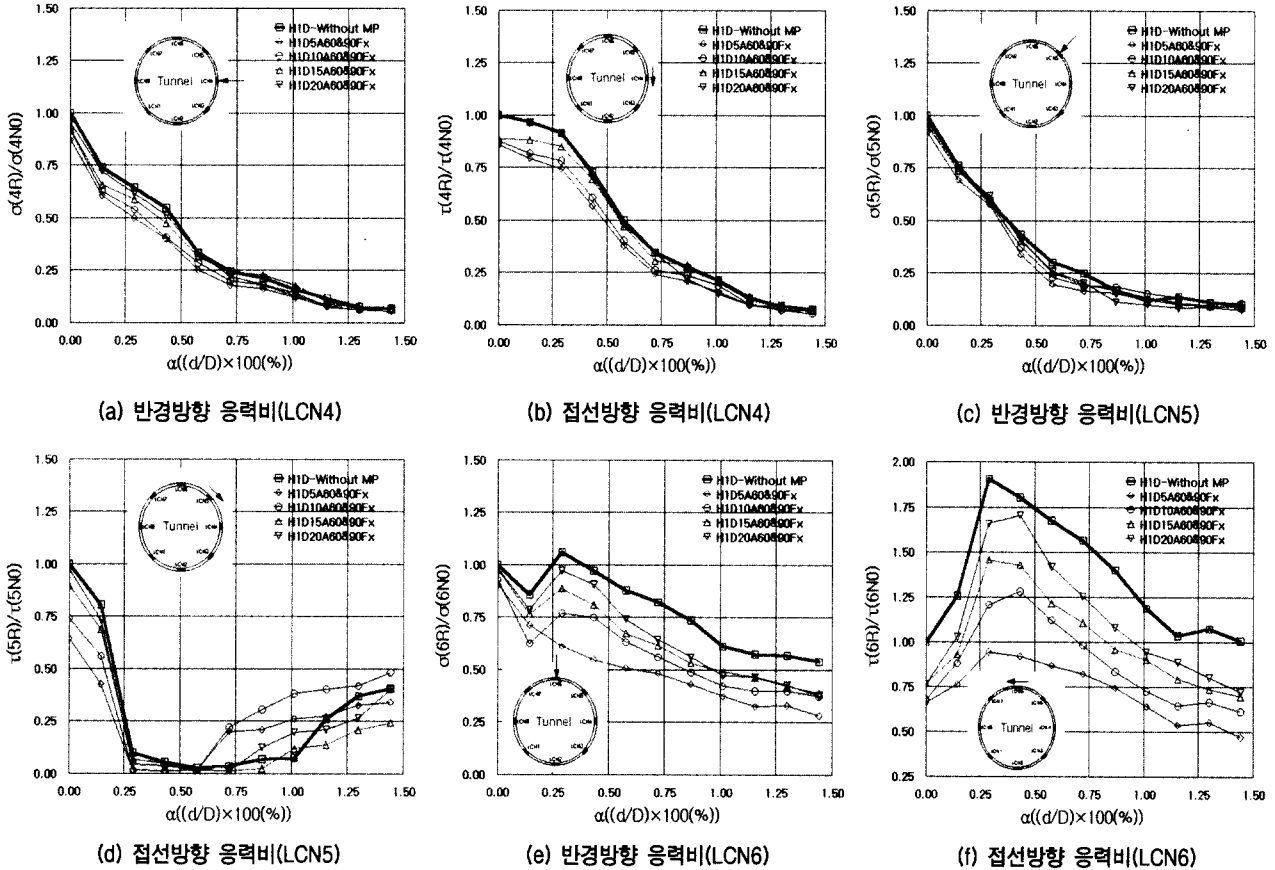


그림 15. A/L_p에 따라 터널에 작용하는 토압(H/D=1)

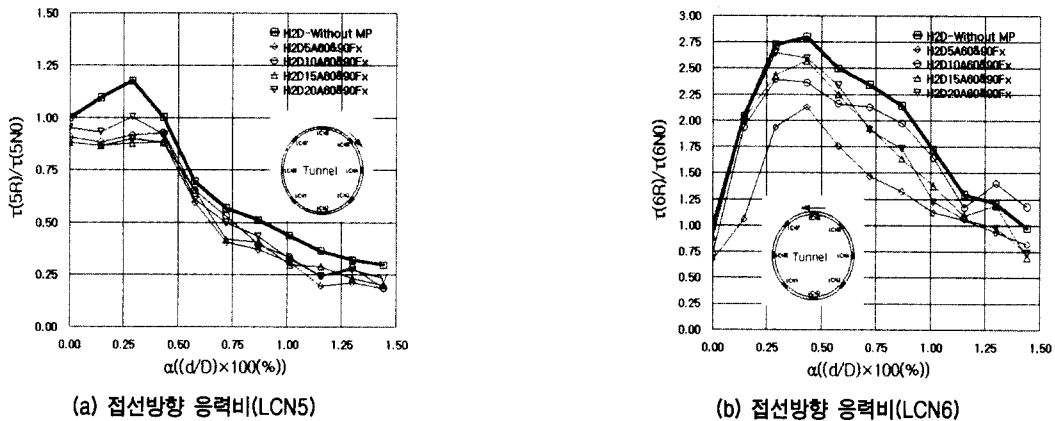


그림 16. A/L_p에 따라 터널에 작용하는 토압(H/D=2)

보강이 가장 효과적임을 알 수 있다. LCN5에서는 보강위 치별로는 그리 큰 차이를 보이지 않으나 보강효과는 분명히 크며, LCN6에서는 보강위치별로 큰 차이가 난다. 특히, 거리비 $A/L_p=0.5$ (H2D10A60&90Fx의 보강) 이내의 영역에서 보강효과가 크게 기대된다.

4. 결론

- (1) 마이크로 파일의 두부를 고정하는 것이 고정하지 않는 것보다 터널 주변지반의 변형이 지표면에 전달되는 영향을 줄이는데 더 효과적이었다. 본 연구에서는 고정의 경우가 자유의 경우보다 최소 7% 정도의 효과 차이가 나는 것으로 나타났다.
- (2) 터널 축소율(α)이 0.21% 이하인 초기의 작은 변형에서, 거리비(A/L_p) 0.5이내에서 22%~37%정도의 마이크로 파일의 보강효과가 보인다. 하지만, $\alpha \approx 0.3\%$ 정도부터는 마이크로 파일 설치 거리비(A/L_p) 0.75 이상에서의 마이크로 파일의 보강은 효과가 10% 이내로 저하된다.
- (3) 터널 축소율 0.3%부근에서 토압의 변화폭이 크며, 구조물쪽 터널 측벽에서의 변화폭이 가장 크다. 그러나, 토압이 가장 크게 걸리는 곳은 터널 어깨부이며

이곳에서의 무보강에 대한 비로서는 크게 차이가 나지 않지만, 토압감소량은 가장 크다.

- (4) 지표면 침하와 터널에 작용하는 토압을 통틀어 볼 때, 60° 와 90° 로 엇갈리게 일렬로 설치한 마이크로 파일의 보강효과가 최소한 10%정도는 있는 것으로 보아 거리비 $A/L_p=1.0$ 되는 지점(천단지표점)까지 전체적으로 보강하면, 터널 굴착시 지상구조물의 손상방지에 큰 효과가 있을 것이라고 판단된다.

참고 문헌

1. 임종철, 공영주, 고희성, 박이근, 최형길, 현승훈, 김창수(2000. 12), 토사 NATM 터널의 굴착에 의한 구조물 침하 억제대책 수립을 위한 실내모형실험 중간보고서(1), 부산대학교 생산기술연구소
2. 박이근(1998. 2), 土砂 NATM의 볼트 보강효과에 관한 實驗的 研究, 석사학위논문, 부산대학교, p.11.
3. 임종철, 유문오, 박이근, 고희성, 오명렬(2000. 11), 터널 굴착시의 인접구조물 침하 억제용 마이크로 파일의 효과에 관한 연구, 대한토목학회논문집, pp.565~577.
4. 임종철, 박성재, 주인곤, 박용부, 김영인(1992. 3), 평면변형률 상태에 있는 모형지반의 변형해석, 한국지반공학회지, pp.29~39.
5. 강희준(2000. 2), 토사 NATM 터널의 막장 안정용 보조공법의 효과에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교, p.22.
6. FHWA(1997), Drilled and Grouted Micropiles : State-of-Practice Review Volume IV : Case Histories.
7. 渡辺 理(1977. 4), ひずみゲージとその応用(改訂版), 日刊工業新聞社.

(접수일자 2001. 4. 23)