

수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동에 관한 축소 모형실험

Reduced-Scale Model Tests on the Behavior of Tunnel Face Reinforced with longitudinal reinforcements

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 신현강²⁾, Hyun-Kang Shin

¹⁾ 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept: of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This paper presents the results of a parametric study on the behavior of tunnel face reinforced with horizontal pipes. A series of reduced-scale model tests was carried out to in an attempt to verify previously performed three-dimensional numerical modeling and to investigate effects of reinforcement layout on the tunnel face deformation behavior. The results of model tests indicate that the tunnel face deformation can significantly reduced by pre-reinforcing the tunnel face with longitudinal members and thus enhancing the tunnel stability. In addition, the model tests results compare fairly well with those from the previously performed three-dimensional finite element analysis. Therefore, a properly calibrated three dimensional model may effectively be used in the study of tunnel face reinforcing technique.

Key words : Tunnelling, Face stability, Face reinforcement, Reduced-scale mode test

1. 서론

최근의 급속적인 경제성장으로 인해 도심지에서는 전력구, 통신구, 고속철도, 지하철 등 산업기반시설을 위한 터널 공사가 매우 빈번히 이루어지고 있으며, 앞으로 더 많은 터널 공사가 예정되어 있다. 특히 사용 가능한 부지의 부족 및 환경 보존 의식의 강화, 건설 공해의 규제 강화 등으로 인해 터널 시공 조건은 날로 열악해지고 있는 실정이라서 불량한 지반조건하에서도 터널을 굴착해야 하는 경우가 빈번해지고 있다. 터널 굴착은 응력해방을 발생시키며 따라서 연약한 지반에서의 터널 굴착은 막장의 안정성 확보가 가장 중요한 문제중의 하나이며 NATM 뿐만 아니라 기계굴착공법인 Shield 공법에서도 막장압의 조절이라는 측면에서 매우 중요하게 다루어진다.

막장이 불안정할 경우에는 일반적으로 막장 중앙부에 코아(core)를 남겨두고 분할 굴착을 수행하거나 굴착 단면을 축소하는 측벽 선진 도개 공법 등을 적용한다. 이러한 분할 굴착공법은 일반적으로 시공기간이 길어지고 공사비가 증가하는 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라 굴착 단면이 비교적 크거나 지반이 불량할 경우에는 막장 불안정의 근본적인 문제를 해결할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에 들어와서 프랑스나 이태리 등 유럽 지역에서는 지반 조건이 열악한 터널 굴착시에 다단계 분할 굴착 공법을 채택하는 대신 그림 1과 같이 굴착대상 막장면을 일정한 강성을 보유하는 강봉(steel bar) 혹은 유리 섬유 파이프(fiber glass pipe)를 이용하여 선형 보강하여 막장 안정성을 확보하는 공법을 매우 활발히 적용하고 있다.

일반적으로 이러한 기법은 강관다단 공법이나 제트 그라우팅 공법과 병행되어 적용되는데 공법의 효율적인 적용을 위해서는 수평 보강에 따른 터널 및 주변 지반의 거동에 관한 역학적 거동 메카니즘에 관한 이론과 지반 및 터널 조건에 따른 설계 기법이 필수적이나 이에 관련된 체계적인 연구가 전무한

실정되어서 공법의 합리적인 적용이 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 유충식과 신현강 (1999)의 지속적인 연구의 일환으로 수평보강재로 보강된 터널 막장의 거동 메커니즘의 고찰 및 향후 합리적인 설계기법 개발을 위해 실내축소 모형실험을 수행하고 그 결과를 정성적으로 분석·고찰하였다.

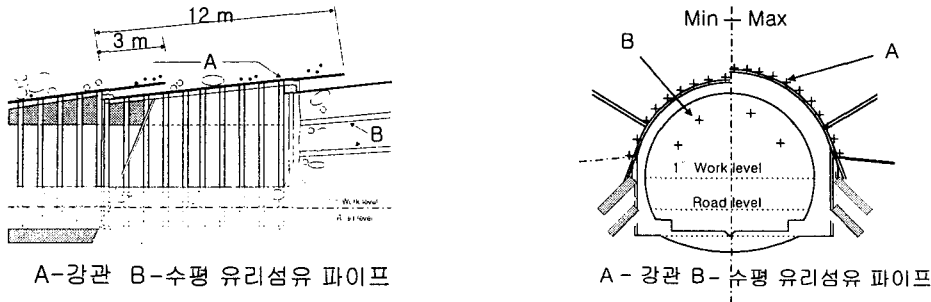


그림 1. 막장 수평보강 공법 적용 예

2. 기존의 연구동향

최근 들어 막장 수평보강을 통한 터널 안정성 확보에 관한 관심이 증가되면서 이에 관련된 많은 연구가 수행되고 있다. Mastropietro(1979)는 이회토(marl) 지반에서 5 m의 강봉을 이용한 막장 수평보강 사례를 최초로 발표한 바 있으며 Barbacci 등(1990)은 팽창성 지반에서 시공되는 수로터널에 3.0 m 길이의 Swellex 볼트와 12 m 길이의 마이크로 파이프를 이용한 막장 보강 사례를 보고한 바 있다. Lunardi 등(1992)은 유리섬유강봉을 이용한 수평보강공법을 적용하고 현장 계측에서 얻어진 터널의 거동을 보고한 바 있다. 또한, Grasso 등(1993)은 수평 보강재의 막장 보강 효과에 관한 축대칭 유한요소 해석을 수행하여 수평보강재의 보강효과를 정성·정량적으로 평가하였으며, 보강효과를 정량화 하는 방법으로서 등가 점착력(c^*) 개념을 식 (1)과 같이 제시하였다. 여기서 c 와 ϕ 는 각각 지반의 점착력 및 내부마찰각이며 $\Delta\sigma_3$ 는 보강재로 인한 최소주응력 증가량을 나타낸다.

$$c^* = \left[c + \frac{1 + \sin \phi}{2 c \cos \phi} \right] \Delta\sigma_3 \quad (1)$$

한편, Pelia(1994)와 Peila 등(1996)은 각각 유한요소법 및 유한차분법을 이용하여 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 토대로 식 (2)로 정의되는 막장등가압력을 이용하여 막장 수평보강효과를 정량화하는 방법을 제안하였다.

$$P_{face} = \min \left\{ \frac{n A \sigma_a}{S} ; \frac{n s_l \tau_a}{S} \right\} \quad (2)$$

여기서 n 은 보강재 수, A 는 보강재의 단면적, σ_a 는 보강재의 항복강도, S 는 막장단면적, s_l 은 보강재의 표면적, 그리고 τ_a 는 지반/보강재 마찰강도로 정의된다.

또한, Peila 등(1996)은 3차원 유한요소해석을 통해 터널 막장의 안정성에 관한 수평 보강 유리섬유 파이프의 영향에 대해 매개변수 연구를 수행하였으며 Jassionnesse 등(1996)은 막장 보강 공법의 설계법을 제시하였고, Wong 등(1996, 1997)은 Jassionnesse 등(1996)의 연구를 확장시켜 한계평형해석법을 이용한 해석적 모델을 개발하였다. Calvello 와 Taylor(1999, IS-Tokyo)는 원심모형시험을 통해 수평 보강 막장의 거동 메커니즘에 관한 보강재의 길이와 보강패턴에 따른 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 제시한 바 있다. 특히 Calvello 와 Taylor는 원심 모형 시험기의 모형지반에 마커를 조밀하게 설치하고 좌·우측부에 CCTV 카메라를 설치하여 시험 수행 전과 수행 후의 지반의 거동을 Digital Image Processing을 통해 막장부의 거동 메커니즘을 고찰하였다. 또한 Arsena 등과 Lunardi 등은 현장 적용예를 보고하였는데 특히 Lunardi의 경우 유리섬유 파이프를 이용하여 막장 보강에 관한 현장 계측결과를 보고하였다.

자세히 알아본 바와 같이 막장 수평 보강 공법이 유럽지역을 중심으로 활발히 적용되고 있음에도 불구하고, 설계 및 시공에 있어서 경험적 방법에 의존하고 있으며, 막장 안정성 평가에 관한 이렇다할 예

측 기법과 막장의 3차원적 거동 메카니즘에 대한 이해를 바탕으로한 합리적인 설계 기법이 존재하기 않고 있는 실정이다. 따라서 현재 적용되고 있는 막장 수평 보강 공법의 합리적인 적용을 위해서는 터널 막장의 안정성을 평가하고 그 결과를 바탕으로 지반 조건 및 터널의 기하조건을 고려한 합리적인 설계 기법 개발의 필요성이 증가하고 있다.

3. 실내 축소 모형 실험

3.1 모형 지반

본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 모형지반을 조성하였다. 모형 지반 조성에 사용된 주문진 표준사는 표 1에서와 같이 유효입경(D_{10}), 균등계수(C_u), 곡률계수(C_c)가 각각 0.36mm, 1.6, 1.1 인 입도 분포 특성을 가지며 모형지반을 균등화하는데 있어서 균질한 지반과 상대밀도를 일정하게 유지하기 위해 기존에 제작된 강사장치를 이용하여 지반이 약 50%의 상대밀도(D_r)를 갖도록 하였다. 50%의 상대밀도(D_r)시 단위중량 및 내부마찰각은 각각 1.4 g/cm^2 와 31° 로 나타났다.

표 1. 주문진 표준사의 특성치

주문진 표준사	
입도분포	$D_{10} = 0.36 \text{ mm}$ $C_u = 1.6$ $C_c = 1.1$
최대건조밀도	1.7 g/cm^3
최소건조밀도	1.3 g/cm^3
최대간극비	0.9
최소간극비	0.6
$D_r=50\%$ 시 단위중량	1.4 g/cm^3
내부마찰각	31°

3.2 모형 토조 및 실험 장치

본 실험에서는 그림 2에서 보이는 바와 같이 두께가 20mm인 아크릴을 이용하여 길이 1200 mm, 높이 1200 mm, 폭 490mm의 모형토조를 제작하였으며 이에 대한 구체적인 제원은 그림 3와 같다.

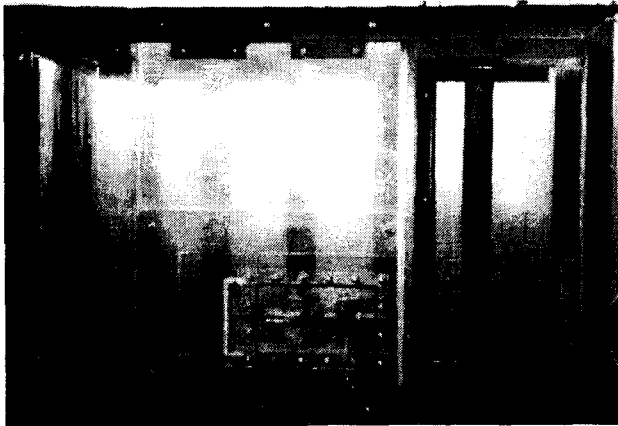


그림 2. 모형 토조

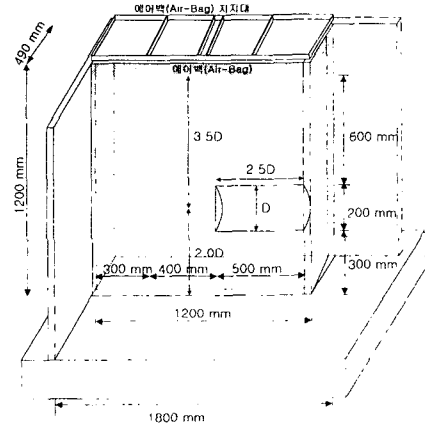


그림 3. 모형 토조 제원

본 실험에서는 터널 거동 메카니즘을 명확하게 모사하기 위해 그림 4와 6에서 상세히 나타난 바와 같이 터널 라이닝 및 막장 부분을 특수 제작하였다. 여기서 굴착 과정은 콤프레서를 이용하여 막장 공기압을 조절하는 방법으로 모사하였으며 압력을 조절할 때 사용한 압력 조절기는 그림 5에 나타나 있다. 막장전면부에는 막장 내부로의 흙의 유입을 차단시키고 막장의 변형량을 측정하기 위해 신축성이 뛰어난 라텍스 멤브레인(Latex Membrane)을 설치하였다(그림 6 (b)). 한편, 터널 막장의 수평보강재로 사용된 재료는 직경 3mm의 목봉을 제작하여 보강재로 적용하였다.

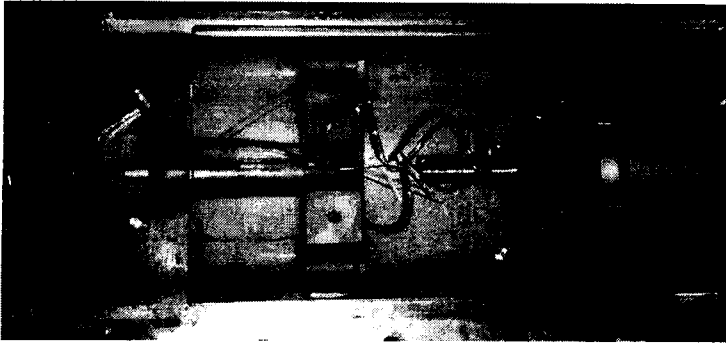


그림 4. 터널 막장 내부 장치

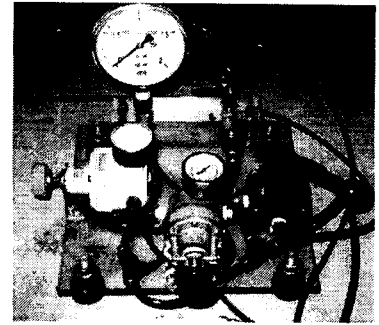


그림 5. 압력 조절기

그림 6에서 보이는 바와 같이 LVDT의 거치를 위해 거치대를 만들어 고정시킴으로써 실험이 진행될 때에도 LVDT가 다른 영향없이 순수한 막장의 변위만을 계측할 수 있도록 하였으며, AI-1600 Data logger를 이용하여 실시간 수집하여 막장 변위 및 막장압의 관계를 측정하도록 하였다.

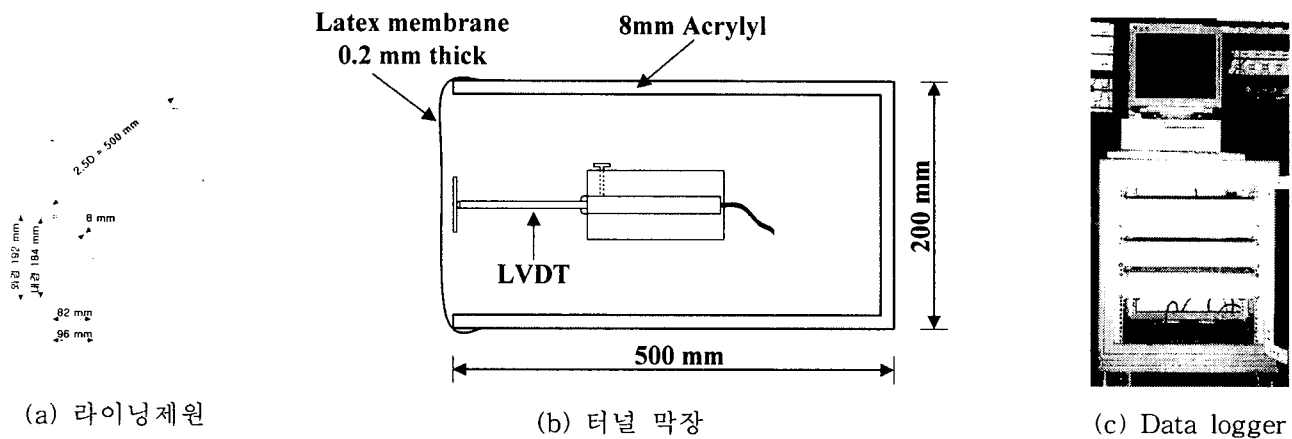


그림 6. 터널 막장부 상세도 및 Data Logger

3.3 실험방법 및 실험과정

본 연구에서는 표2에 제시된 바와 같이 크게 비보강 막장의 경우와 보강 막장의 경우에 대해 실험을 수행하였다. 비보강 막장의 경우에 있어서는 굴착전 초기조건을 강사중 초기응력에 상응하는 막장압을 가하면서 지반을 조성하였으며, 터널 굴착이 시작되면서 터널 막장 내압을 서서히 감소시키는 방법으로 모사하였다. 한편, 보강 막장의 경우에는 지반 조성시 그림 7에서 보이는 바와 같이 보강패턴에 따라 보강재를 예정된 위치에 설치하면서 지반을 조성하는 방법으로 초기 조건을 설정하였다. 아울러서 모형지반 조성시 터널 막장의 거동 메커니즘을 파악하기 위해 마커를 토조 전면에 조밀한 간격(4cm)으로 설치하고 실험한 후의 마커 이동 경향을 사진 판독법으로 분석하여 막장 변위 거동을 고찰하였다. 그림 8은 모형 지반 조성 후 실험 전 모습을 사진으로 보여주고 있으며, 그림 9은 실험 장치 및 계측 개요도를 나타내고 있다.

표 2. 실험 조건

	비보강 막장	보강 막장
C/D	2.5, 4.5, 10.5	
지반	사질토 (주문진 표준사)	
보강재의 수(NP)	-	9, 27
보강재의 길이(LP)	-	0.3D, 0.5D, 1.0D

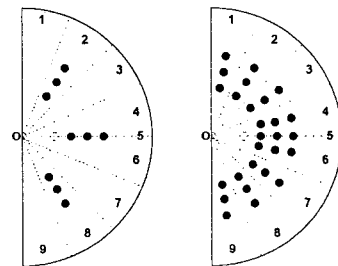


그림 7. 보강재 타설 본수에 따른 보강패턴

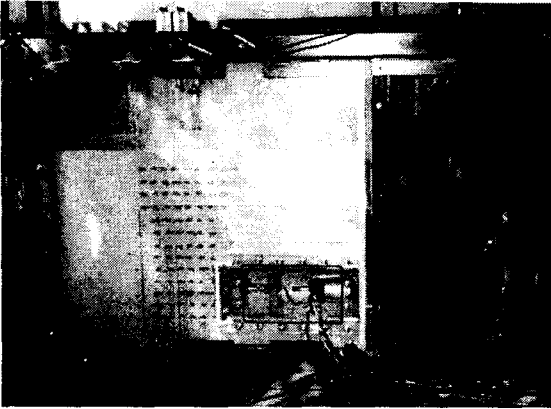


그림 8. 모형지반

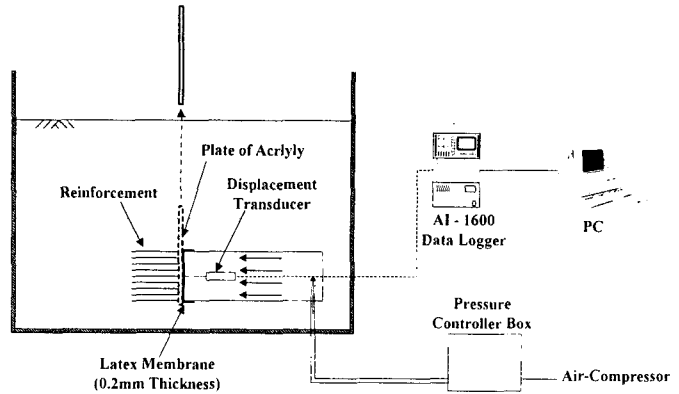


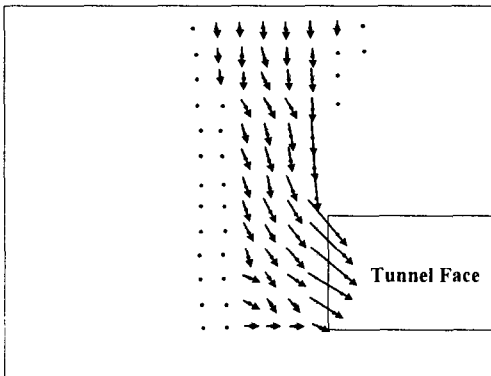
그림 9. 실험과정 개요도

4. 실험 결과 및 분석

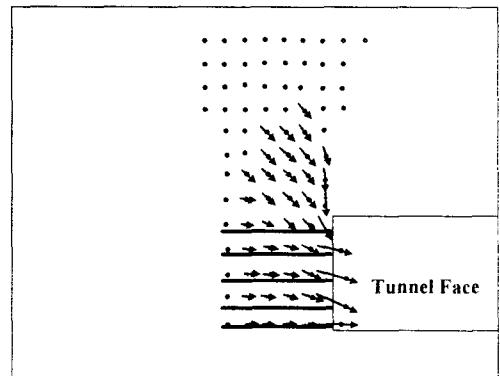
4.1 터널 막장의 거동 메커니즘

보강 막장의 막장압 감소에 따른 변형거동의 정성적인 고찰을 위해 막장의 변형 벡터 및 응력해방과 막장의 축방향 변위(δ_f)와의 관계를 고찰하였다. 그림 10은 비보강 막장과 수평보강재로 보강된 막장의 지반 거동 경향을 변위 벡터의 형식으로 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 수평보강재로 보강된 막장의 경우에 있어서 변형 벡터의 크기가 현저히 감소되는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 수평보강재가 터널 막장면의 변위를 억제시켜주는 등가의 막장압과 같은 역할을 수행해 주기 때문이라 판단된다.

한편, 비보강 막장의 경우 연직방향 변위 성분이 현저한 반면, 보강막장의 경우에는 수평성분이 두드러지게 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이는 보강재로 인한 주응력 회전 및 응력 전이에 기인한 것으로 판단된다.



(a) 비보강 막장의 변형 벡터



(b) 보강 막장의 변형 벡터

그림 10. 터널 막장의 변형 벡터

한편, 그림 11는 터널 중심부에서 축방향 변위(δ_f)와 응력해방단계(LSR)와의 관계를 나타내고 있다. 여기서 하중단계[$LSR = (P_o - P_i)/(P_o)$]는 응력해방정도를 나타내는 지수로서 LSR의 증가는 응력해방정도가 증가하는 것을 의미한다.

그림 11에서 나타난 바와 같이 실내 축소 모형 실험 결과 그래프에서는 막장압과 막장 변위와의 관계를 세 구간으로 나눌 수 있다. 즉, 실험 초기에 막장압을 서서히 감소해도 막장의 변위가 발생하지 않고 안정한 구간(Stage 1)과 임의의 막장압에 도달하였을 때 막장의 변위가 급격히 증가하는 구간(Stage 2), 막장압을 완전히 제거한 후 막장의 변위가 증가하다가 수렴되는 구간(Stage 3)으로 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 또한 막장의 변위가 임의의 막장압에서 급격하게 변하는 것은 막장 주변에 소성영역

이 확장되어 이 단계에서는 임계 막장압을 결정하기가 곤란하다고 할 수 있으므로 막장 변위가 억제되는 구간(Stage 1)과 변형이 발생하는 사이의 구간(Stage 2의 시점부)을 실질적인 파괴(Failure)의 구간으로 간주할 수 있으며 막장압이 완전히 제거된 후 변위가 수렴하는 부분을 막장의 붕괴(Collapse)시점으로 간주할 수 있다. 이러한 막장압과 막장 변위에 관한 관계 그래프는 Chambon & Corte(1994, ASCE)가 발표한 논문과 유사한 경향을 가지고 있으나 원심 모형 실험을 통해 나타난 결과이므로 정량적으로 보다는 정성적인 경향이 유사하다 할 수 있다.

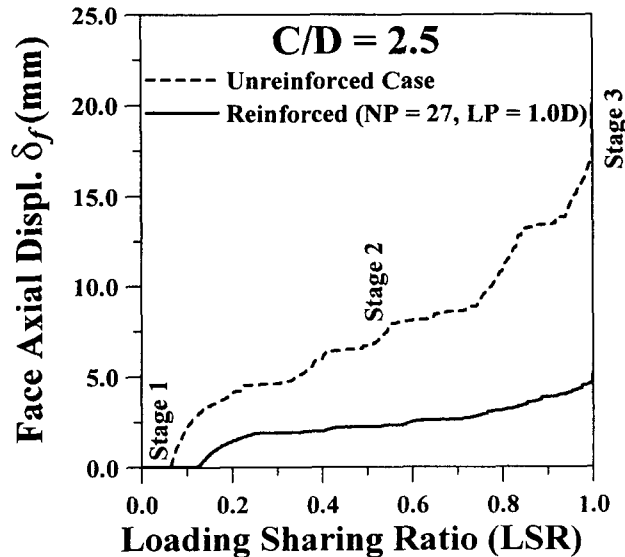


그림 11. LSR에 따른 δ_f 의 발생경향

한편, 그림 11에서는 막장에서 응력이 해방됨에 따라 그래프의 기울기가 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이는 막장보강으로 인해 막장 수평변위(δ_f)가 현저히 감소함을 의미한다. 정량적인 관점에서 관찰하면, 보강된 막장의 최종 변위가 비보강 막장의 최종변위의 약 75%이상 감소하며, 특히 보강 막장의 경우에는 그림에서 나타난 바와 같이 LSR- δ_f 곡선이 선형적인 관계를 나타내고 있어 막장부 주변이 수평보강재의 보강효과로 인해 탄성상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

4.2 보강재 수(NP)의 영향

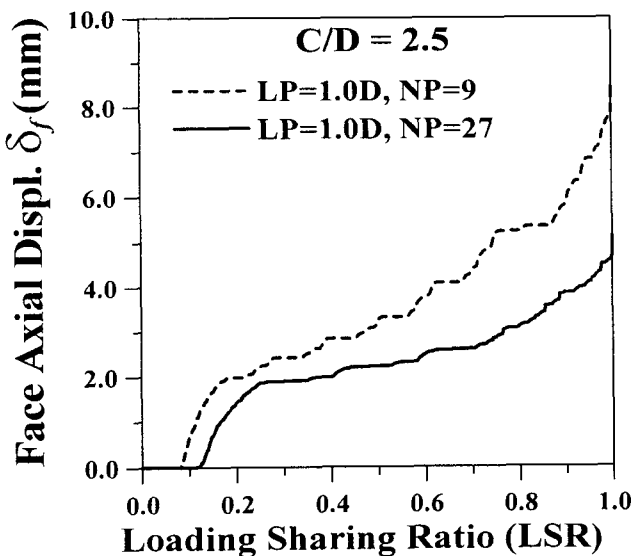


그림 12. 보강재 타설 본수에 따른 영향

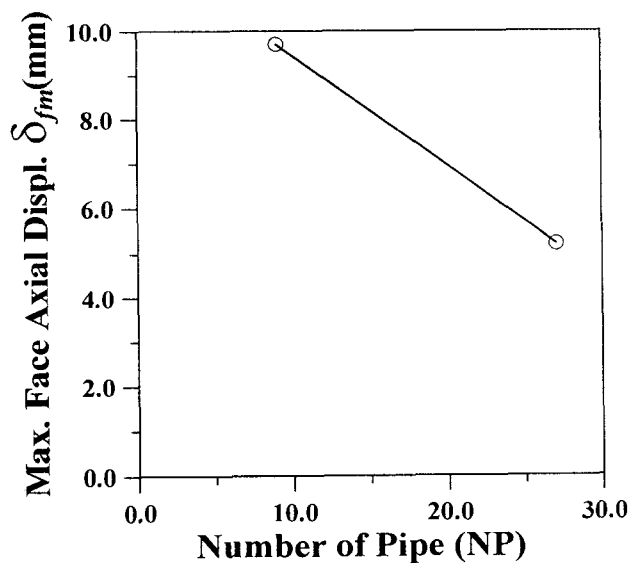


그림 13. NP에 따른 δ_{fm} 의 변화 경향

보강 막장의 거동은 보강재 타설 본수(NP)에 많은 영향을 받으며 따라서 주요 설계 변수라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 NP에 따른 막장 변위 거동을 고찰하였다. 그림 12는 보강재의 타설 본수에 따른 막장의 변형(Δ_f)과 막장의 응력해방단계에 따른 관계 그래프를 나타내고 있다.

한편, 그림 13은 보강재의 타설 본수가 증가함에 따라 그래프의 기울기가 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한 NP = 9에서 NP = 27로 증가함에 따라 최종단계에서의 변위가 약 46%가 감소했으며 이러한 경향은 동일한 응력해방정도에 대하여 NP가 증가할수록 δ_f 가 감소하는 것을 의미하므로, 보강재 수가 증가함에 따라 보강효과 또한 증가한다는 경향을 나타낸다고 할 수 있다.

4.3 보강재 길이의 영향

유충식과 신현강(1999)의 연구에서 막장의 변위 거동은 보강재의 길이(LP)에 또한 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 LP에 따른 δ_f 변화거동을 고찰하기 위해 LP를 0.3D~1.0D로 변화 시키면서 실험을 수행하였다.

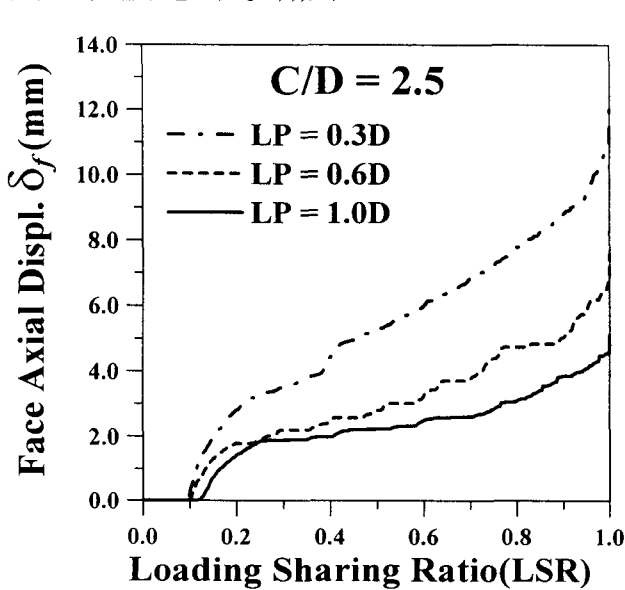


그림 14. 보강재 길이에 따른 영향

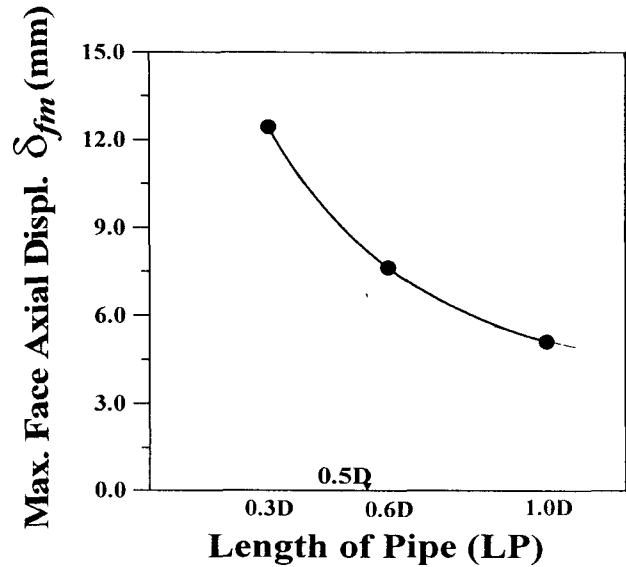


그림 15. LP에 따른 Δ_{fm} 의 변화 경향

그림 14는 LP에 따른 LSR vs. δ_f 곡선의 변화경향을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 유충식과 신현강(1999)의 3차원 유한요소해석 결과와 유사하게 LP가 증가할수록 곡선의 기울기가 감소하는 경향을 나타내고 있어 보강재의 길이가 길어짐에 따라 보강효과가 증가함을 알 수 있다. 한편, 그림 15는 LP에 따른 막장 최대수평변위(δ_{fm}) 변화 경향을 보여주고 있는데 그림 15에서 보이는 바와 같이 LP가 0.3D에서 1.0D로 증가함에 따라 δ_{fm} 가 50% 이상 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 LP에 따라 비선형적인 감소경향을 보이고 있는데 이는 유충식과 신현강(1999)의 연구결과와 잘 일치하고 있는 것으로서 최적의 보강효과를 얻기 위해서는 LP 선정시 이러한 경향을 적절히 반영하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 프랑스와 이태리등의 유럽지역에서 터널 시공시 막장의 안정성 확보방안으로 널리 적용되고 있는 수평보강재를 이용한 터널 막장보강 공법에 대한 실내 축소 모형 실험 연구를 다루었다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 수평 보강재를 이용한 막장 보강공법은 터널의 막장 수평 보강 공법에 탁월한 효과가 있으며 따라서 막장 불안정이 예상되는 경우에 대한 보강 공법으로 매우 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 2) 수평 보강재로 터널 막장을 보강한 경우 막장 전면의 주동 파괴 영역에서의 응력재분배로 인한 연직 방향의 파괴쇄기가 형성되는 경향을 억제함으로써 응력전이현상이 발생하여 수평변위 발생영역이 다소 확장되는 경향을 나타냈다.
- 3) 본 연구에서 다루어진 터널 막장 수평 보강 공법은 적용하는데 있어 막장의 변위 거동에 많은 영향을 받는 것으로 나타나 설계시 이에 대한 충분한 고려가 있어야 하는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구의 실험 결과는 3차원 유한요소 해석 결과와 매우 유사하게 나타나고 있어 적절한 유한 요소 해석 모형을 적용할 경우에는 의미있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 유충식, 신현강 (1999), "수평 보강재로 보강된 터널 막장의 거동", '99 가을 학술발표회 논문집, 1999년 10월 30일, pp185 ~ pp192
2. Mastropietro, G.(1979), "Progetto esecutivo della galleria", *Proc. of the Seminario sui lavori in galleria, ANAS, Roma*; pp. 45~66
3. R. C. K. Wong and P. K. Kaiser (1991), "Performance Assessment of Tunnels in Cohesionless Soils", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117. No. 12, December, 1991
4. Pierre Chambon and Jean-Francois Corte (1994), "Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120. No. 7, July, 1994
5. R. Al Hallak, j. Garnier, E. Leca (1994), "Experimental Study of the stability of a tunnel face reinforced by bolts", pp1 ~ pp5
6. Broms, B.B. and Bennermark, H. 1967. Stability of clay at vertical openings, *Journal of the Soil Mechanics and Foundaion Division*, 93: 71-95
7. Lunardi, P., P., Focaracci, A., Giogi, P. and Papacella, A.(1992), "Tunnel face reinforcement in soft ground design and constrol during excavation", *Int. Congr. Towards New Worlds in Tunnelling, Acapulco*, Vol 2, pp. 897~908.
8. Peila, D, Oreste, P.P, and Pellizza, S.(1996), "Study of the influence of sub-horizontal fiber-glass pipes on the stability of a tunnel face.", *Proc. Int. Conf. on Noth American Tunneling 96*. Vol. 1, pp. 425~431.
9. Calvello M. and Taylor, R.N.(1999), "Centrifuge modelling of a spile-reinforced tunnel heading", *Preprint Volume of Proceedings on Geotechnical Aspects of Underground Construction in soft Ground*, Tokyo, pp. 313~318.
10. Yoo, C.S. and Shin, H.K.(1999), "Behavior of tunnel face pre-reinforced with sub-horizontal pipes", *Preprint Volume of Proceedings on Geotechnical Aspects of Underground Construction in soft Ground*, Tokyo, pp. 434~441.