한국지반공학회논문집 제20권 9호 2004년 12월 pp. 133 ~ 144

굴진면 천단 및 수평보강에 따른 굴진면 전후의 종방향 아칭 특성

Longitudinal Arching Characteristics Around the Face of a Soil-Tunnel with Crown and Face-Reinforcement

권 오 엽[1] Kwon, Oh-Yeob　　최 용 기[2] Choi, Yong-Ki
이 상 덕[3] Lee, Sang-Duk　　김 영 근[4] Kim, Young-Gun

Abstract

Pre-reinforcement ahead of a tunnel face using long steel or FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) pipes in NATM (New Austrian Tunnelling Method), known as the RPUM (Reinforced Protective Umbrella Method) or UAM (Umbrella Arch Method), is the promising method to sustain the stability of a shallow tunnel face and reduce the ground settlements. In addition, horizontal reinforcing of the face is recently emphasized to improve the stability of the face. However, the characteristics on longitudinal arching around the face have not yet been established quantitatively with the RPUM (crown-reinforcing) and/or the face horizontal reinforcing. In this study, therefore, the behavior of cohesionless soil around the face reinforced by the reinforcing member representing the RPUM and horizontal reinforcing is investigated through two-dimensional laboratory model tests. A series of tests were carried out on various conditions by changing lengths and angles of the reinforcing members. Based on the vertical pressure around the face, the characteristics of longitudinal arching have been found for the case of the non-reinforced and the reinforced.

요 지

NATM터널 시공 중 강관이나 FRP관을 이용하여 터널 막장을 선행보강하는 방법은 RPUM이나 UAM 등으로 알려져 있으며, 얕은 터널 및 연약지반내 터널 굴착 시 굴진면의 안정성을 확보해주거나 지반 침하를 감소시켜주는 역할을 한다. 특히 굴진지반이 연약하여 자립이 어려운 경우 최근에는 굴진면 천단뿐 아니라 굴진면 수평보강을 실시하여 굴착에 따른 터널안정을 확보하게 된다. 일반적으로 터널굴착이 진행됨에 따라 굴진면 전후에는 종방향 아칭현상이 발생하며 이는 NATM 터널 지보재 작용원리의 근간이 된다. 따라서 터널 천단과 굴진면 수평보강을 실시하는 경우도 굴진에 따른 종방향 아칭의 관점에서 해석되어야 하나 이에 대한 연구는 현재까지 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 토사터널 굴진면에 RPUM(천단보강)이나 굴진면 수평보강이 실시된 경우, 종방향 아칭특성을 2차원 실내시험을 통해 살펴보았다. 실험결과, 연직토압의 변화를 토대로 한 종방향아칭 영향범위는 무보강의 경우 굴진면 전·후방으로 각각 2.5D와 1.5D(D는 터널직경), 천단보강 및 수평보강의 경우 2.0D와 1.5D, 천단과 수평보강이 동시에 적용된 경우는 2.0D와 1.0D까지로 측정되어 굴진면 보강에 따라 아칭의 영향범위가 감소함을 알 수 있었다. 반면 연직토압의 변화량은 굴진면 보강에 따라 증가하는 것으로 나타나 역학적으로 천단 및 수평보강재가 터널의 안정에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

Keywords : Crown-reinforced, Face-reinforced, Horizontal pressure, Longitudinal arching, Settlement ratio, Vertical pressure

1 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., School of Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., oykwon@konkuk.ac.kr)
2 정회원, 대원토질(주) 회장 (Member, Ph.D. Chairman, Daewon soil Co. Ltd.)
3 정회원, 아주대학교 환경도시공학부 교수 (Member, Prof., School of Dept. of Environmental & Urban Engrg., Ajou Univ.)
4 정회원, 한국전력공사 부산전력구건설처 과장 (Member, Busan Cable Tunnel Const., Korea Electronic Power Copr.)

1. 서 론

국내 터널공사에서 NATM이 도입되어 본격적으로 적용된 시기는 서울지하철 3호선 공사부터이며, NATM은 최근까지 국내의 터널설계 및 시공법에 있어 대부분을 차지하고 있는 실정이다. 그러나 지층이 연약하거나 토피가 얕은 지반 혹은 단층대와 같이 불균질지반에 터널을 굴착하는 경우, 숏크리트와 록볼트로 지보가 되었다 하여도, 굴진면의 자립성 저하 및 이에 따르는 터널 주변지반의 과도한 이완 등으로 인해 터널의 안정성이 저하되어 결국 붕괴에 이르는 사고사례가 상당수 보고되고 있다.

터널굴착에 따른 굴진면의 안정성을 확보하는 방안으로는 터널단면을 분할하여 굴착하면서 지보를 설치하는 분할굴착법과 굴진면의 강도와 차수성을 강화하는 보강법을 들 수 있다. 전통적으로는 인력과 소형장비를 이용한 소단면 분할굴착공법이 많이 적용되어 왔으나, 최근에는 갱내작업의 기계화와 지반보강기술의 발전으로 지반보강공법이 선호되고 있다. 즉, 터널굴착에 있어 갱내 대형장비의 작업효율성 면에서도 갱내 작업공간이 확보되어야 하므로 굴착단면의 크기를 유지하면서 굴진면을 안정시킬 수 있는 보강공법을 적용하는 것이 유리한 경우가 많다. 이러한 굴진면 보강공법에는 굴착면의 천단을 따라 보강하는 포아폴링, 파이프루프 등이 있으며 현재 가장 많이 적용되는 공법은 RPUM의 일종으로서 차수와 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 강관다단 그라우팅과 FRP다단 그라우팅이 있다.

일반적으로 터널굴착이 진행됨에 따라 굴진면 전후에는 종방향 아칭현상이 발생하며 이는 NATM 터널 지보재 작용원리의 근간이 된다(이인모, 2001). 따라서 굴진면 천단과 수평보강을 실시하는 경우도 굴진에 따른 종방향 아칭의 관점에서 해석되는 것이 타당할 것이다. 그러나 이에 대한 연구는 현재까지 거의 찾아볼 수 없다. 보강공법이 적용된 굴진면의 안정성에 관해서는 실험적인 다양한 방법을 토대로 RPUM의 보강효과에 대한 연구가 상당수 이르지만 대부분 굴진면 자체의 안정성 관점에서 연구가 수행되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면변형률 조건의 실내실험을 통해 터널굴착 시 무보강 시와 굴진면의 천단보강 및 수평보강 형태에 따른 굴진면 전후방의 연직토압 특성, 굴진면 수평토압 및 지표침하량을 측정·분석하였다. 실험결과를 토대로 굴진면 전후방 종방향 아칭특성 및 굴진면 보강형태 및 길이에 따른 보강효과를 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 토사지반의 굴진면 안정성

Broms 등(1967)은 Fig. 1과 같이 순수 점성토 지반에 시공되는 굴진면의 안정성을 평가하기 위해 다음의 식(1)과 같은 안정비 개념을 최초로 도입하였다.

$$N = \frac{\sigma_s - p_o + \gamma(H + D/2)}{c_u} \quad (1)$$

여기서, N : 굴진면의 안정성을 나타내는 안정비
c_u : 비배수전단강도 σ_s: 상재압력
p_o : 무보강 터널 굴진면에 작용하는 내압
H : 토피고 D: 터널의 직경

연구에 의하면 삼축시험(triaxial test)을 통해 압출실험을 실시하고 N값이 6보다 작으면 굴진면은 안정하다고 하였다.

2.2 굴진면의 종방향 아칭효과

터널을 굴착하게 되면 굴착 이전 정역학적인 평형상태로 작용하고 있던 응력, 즉 초기응력(혹은 초기지압, 1차 응력)이 교란되어 2차응력(혹은 유도응력)으로 변화하게 되며, 동시에 굴착부에서는 변형을 일으키게 된다(Walter, 1990). 이 때 굴진면 전후종방향(longitudinal direction)과 횡방향(transverse direction)으로 지반의 초기응력 일부가 전이(transfer)되며, 전이되고 남은 응력이

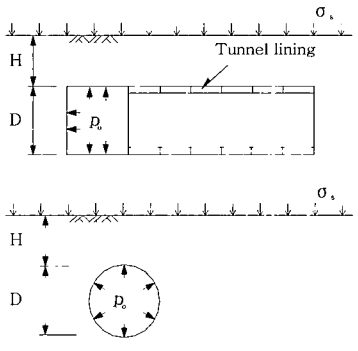


Fig. 1. Simplified Geometry for the Face Stability of Shallow Tunnel

터널주변에 재분배된다. Fig. 2, Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 굴착에 의해 굴진면에서는 변형이 발생하나 주변지반은 변형이 발생하지 않을 때, 원지반에 존재하던 토압이 변위가 발생되지 않는 주변지반 쪽으로 전이되는 현상을 아칭현상(arching action)이라 한다(Terzaghi, 1943).

이러한 아칭현상에 의해 굴착에 따른 초기 연직응력이 굴진면 전후방향과 횡방향으로 전이되는 것을 터널의 종방향 아칭과 횡방향 아칭이라고 한다.(Gnilsen, 1989). 아칭현상에 의해 굴진면 부근에서 분배되었던 토압은 굴진면으로 부터의 거리에 따라 그 크기를 달리하는데, 굴진면 주위에는 종방향 및 횡방향 아칭이 동시에 형성되나 굴진면 전방은 굴진면 코아부로 인해 대부분 종방향 아치가 형성되며, 굴진면에서 후방으로 멀어질 수록 종방향 아칭작용은 점차 사라지게 되어 결국 횡방향 아치만이 남게된다. 따라서, 굴진면 부근에서 발생하는 종방향 아칭현상은 굴진면의 안정성과 밀접한 관련이 있다. 또한 지보재가 설치되고 일련의 굴착이 진행됨에 따라, 이전 굴진면 위치에서 종방향 아칭에 의해 지지되었던 응력은 이전 굴진면 위치에 설치된 지보재에 대한 압력으로 다시 작용하게 된다. 이와 같이 터널의 종방향 아칭현상은 지보재에 가해지는 내압의 작용원리가 된다(이인모, 2001).

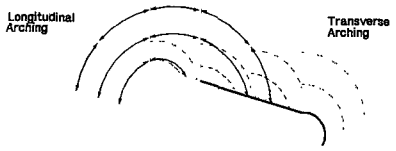


Fig. 2. Arching Effects at the Tunnel Face (Gnilsen, 1989)

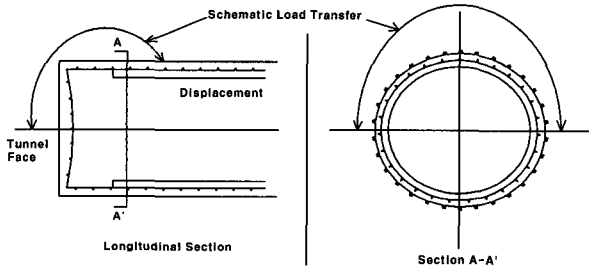


Fig. 3. Load and Displacement at the Tunnel Face (Gnilsen, 1989)

3. 실 험

3.1 모형 토조

토사터널 굴착에 따른 굴진면 전후의 종방향 아칭거동을 모사하기 위해 30cm(폭) × 113cm(길이) × 87cm(높이)의 크기를 가진 모형토조를 제작하였다. 토조의 프레임은 L형과 ㄷ자 형태의 강재를 사용하여 2차원 평면변형률 조건으로 제작되었다. 여기서 굴진에 따른 종방향의 육안관찰이 가능하도록 토조의 전면벽체를 투명 아크릴판으로 제작하였으며, 또한 지반과 전면벽체 사이의 마찰을 최소화하기 위해 아크릴판과 지반 사이에 마찰이 적은 유리판을 추가로 설치하였다(Fig. 4, Fig. 5). 토조 내 터널 굴진면을 모사하기 위해 Fig. 6과 같이 높이 250mm, 폭 300mm의 면적을 가지도록 6개의 토압판을 수직으로 세워 굴진면을 형성하도록 하였다. 굴진면을 구성하는 각각의 토압판에는 Load Cell을 수평으로 연결하였으며, 이를 통해 굴진면에 작용하는 수평토압의 분포를 측정할 수 있도록 하였다.

실험에서는 터널굴착에 따른 굴진면 전후방의 연직토압을 측정하기 위해 토조 하부에 지반을 지지하는 21개의 토압판을 수평으로 놓고, 각각의 토압판에는 수직

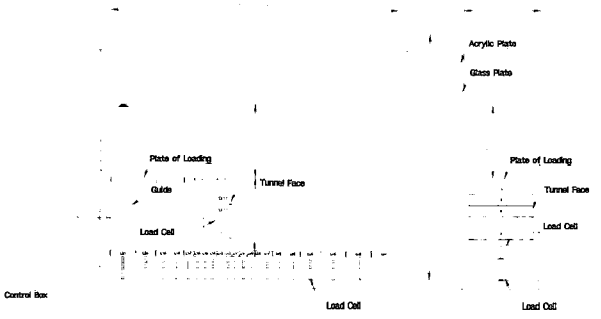


Fig. 4. Schematic Diagram of Laboratory Tunnel Model Device

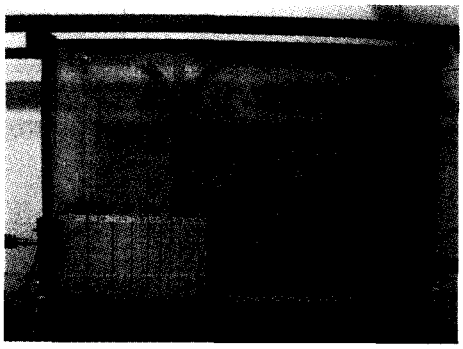


Fig. 5. Photograph of Laboratory (2D) Tunnel Model Device

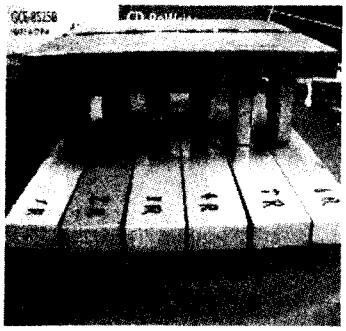


Fig. 6. Load Cell Connected with Tunnel Face

하중 측정이 가능하도록 Load Cell을 토조바닥 프레임에 장착하였다.

여기서 굴진면 후방의 터널천장에 작용하는 연직토압을 측정하기 위해 터널을 모사하는 박스를 제작하여 박스의 바닥이 토압판 상에 놓이도록 하였다.

3.2 실험의 종류

실험에서는 굴진면 보강형태, 보강재 수, 보강재 길이, 천단 보강재의 설치각도를 변수로 하여 굴진면 전후의 응력-변형 거동을 측정하였다. 실험의 종류는 크게 네 가지로서, 첫째는 굴진면에 대한 보강이 없는 무보강(NR, Non- Reinforced)의 경우이며, 둘째는 굴진면 천단부를 보강재로 일정한 각도로 보강(C, crown-reinforced)하는 경우, 셋째는 굴진면을 수평으로 보강하는 경우(F, face-reinforced), 넷째는 천단과 수평보강이 동시에 이루어지는 경우(CF, crown and face-reinforced)를 모사하였다.

먼저 천단부의 보강은, 보강재의 설치각도를 10°인 상태에서 보강재의 길이를 변화시키면서 실험을 행하였다. 수평보강의 경우는 보강재를 굴진면 중심에 1열로 설치한 경우(N1), 굴진면 바닥을 기준으로 0.25D, 0.75D에 각 1열씩 전체 2열로 설치한 경우(N2) 그리고 0.25D, 0.50D, 0.75D에 각 1열씩 전체 3열로 설치한 경우(N3)로 하여 실험을 실시하였으며, 역시 수평보강재의 길이를 변화시켰다. 또한 천단과 수평보강이 동시에 이루어지는 경우는 천단과 수평보강의 각 Case별 보강을 조합하여 실험하였다.

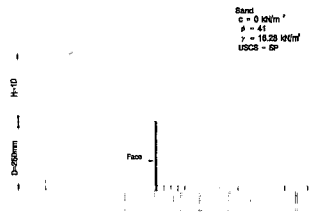
실험에 사용된 천단부 및 수평보강재의 길이는 터널 직경(D)을 기준으로 0.5D, 0.7D, 1.0D, 1.5D로 정하였으며, 천단부 보강재의 설치각도는 10°, 20°, 30°의 세 가지로 구분하였다. 굴진면 수평보강의 경우는 보강재를 수평으로 설치하므로 설치각도를 0°로 일정하게 적용하였다. 본 모형실험에 적용된 시험목록 및 그림은 Table 1, Fig. 7과 같다.

3.3 지반조성 및 지반 연직변위 계측

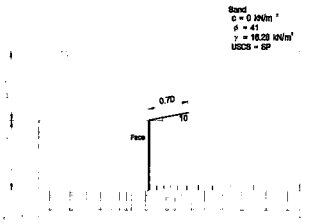
토조 내 지반 조성은 토조 상부의 일정한 높이에서 51cm(폭) × 45cm(길이) × 74cm(높이) 크기의 박스 내부에 모래를 채운 후, 모래박스 바닥면과 토조 상부에 롤러를 부착하여 박스를 일정한 속도로 수평이동하

Table 1. The List of the Laboratory Model Tests

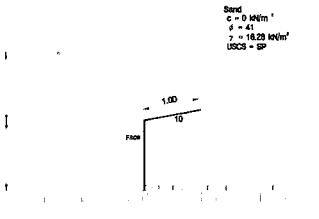
Reinforced Type	Test Notation	Reinforcement Member					
		Line (ea)		Angle (degree)		Length	
		Crown	Face	Crown	Face	Crown	Face
Non	NR	–	–	–	–	–	–
Crown	C0.7	1	–	10	–	0.7D	–
	C1.0	1	–	10	–	1.0D	–
	C1.5	1	–	10	–	1.5D	–
Face	F0.7N1	–	1	–	0	–	0.7D
	F0.7N2	–	2	–	0	–	0.7D
	F0.7N3	–	3	–	0	–	0.7D
	F1.0N3	–	3	–	0	–	1.0D
	F1.5N3	–	3	–	0	–	1.5D
Crown + Face	C0.7A10F0.5	1	1	10	0	0.7D	0.5D
	C0.7A10F0.7	1	1	10	0	0.7D	0.7D
	C0.7A10F1.0	1	1	10	0	0.7D	1.0D
	C0.7A20F0.7	1	1	20	0	0.7D	0.7D
	C0.7A30F0.7	1	1	30	0	0.7D	0.7D
	C0.7F0.7N3	1	3	10	0	0.7D	0.7D
	C1.0F1.0N3	1	3	10	0	1.0D	1.0D
	C1.5F1.5N3	1	3	10	0	1.5D	1.5D



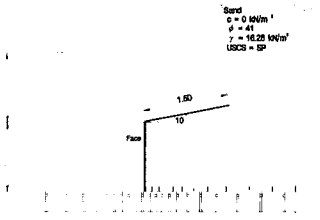
(a) NR (Non-Reinforced)



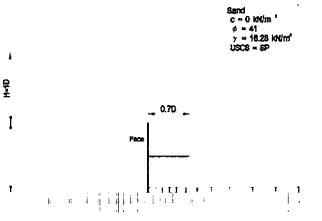
(b) C0.7



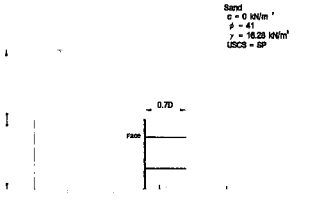
(c) C1.0



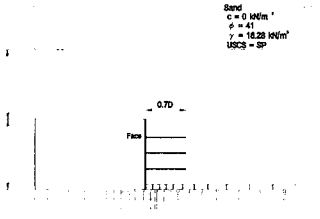
(d) C1.5



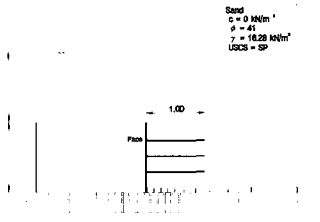
(e) F0.7N1



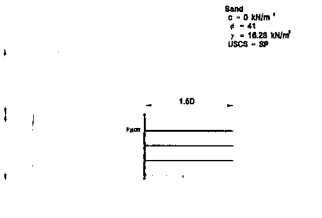
(f) F0.7N2



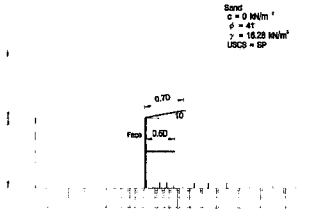
(g) F0.7N3



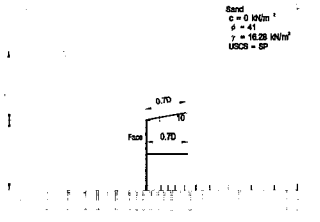
(h) F1.0N3



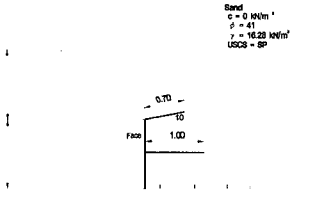
(i) F1.5N3



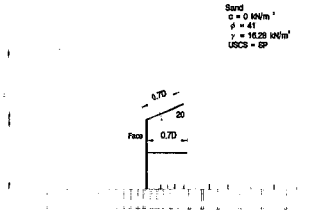
(j) C0.7A10F0.5



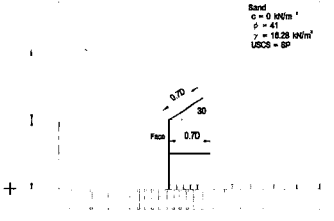
(k) C0.7A10F0.7



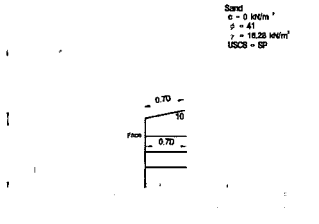
(l) C0.7A10F1.0



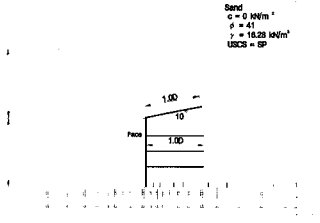
(m) C0.7A20F0.7



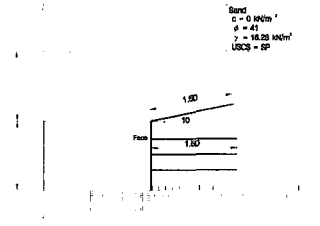
(n) C0.7A30F0.7



(o) C0.7F0.7N3



(p) C1.0F1.0N3



(q) C1.5F1.5N3

Fig. 7. Schematic Diagram of the Tests Changing the Type of Reinforcement

Table 2. Physical Properties of Testing Material

Unit Weight γ (kN/m^3)	Relative Density D_r (%)	Specific Gravity G_s	Friction Angle ϕ (degree)	Cohesion Intercept c (kN/m^2)	Soil Classification (USCS)
16.28	82	2.63	41	0	SP

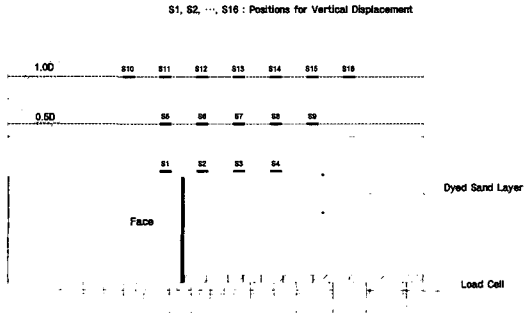


Fig. 8. Schematic Diagram of Monitored Positions for Vertical Displacement

면서 모래를 낙하시켜 일정한 상대밀도를 가지는 모래지반을 조성하였다. 모형지반의 채분석 결과 점착력이 없고 입도가 균등한 사질토이었다. 지반조성에 사용된 모래의 특성은 Table 2와 같다. 조성된 지반의 터널상부 토피고는 터널직경(D=25cm)과 같다. 굴착에 따른 지중 연직변위 측정을 위해 지반조성시 계획된 위치에 LVDT를 Fig. 8과 같이 설치하였다.

3.4 실험방법 및 절차

실험의 진행 순서는 다음과 같다.

① 일정한 밀도의 모래지반을 조성하기 위해 토조 상부에 박스를 제작하고 레일을 설치한 후, 박스 내 모래를 낙하시켜 샌드커튼방식(sand curtain)으로 균질한 모형지반을 조성한다. 이때 굴진면 수평이동에 따른 지반의 변형거동을 관찰할 수 있도록 매 6cm 두께마다 염색된 모래로 지층을 표시한다.

② 보강재는 모형지반을 보강재 위치까지 조성한 후에 설치한다.

③ 터널상부 0.5D지점과 지표(1.0D)까지 지반을 조성하고 지중변위 측정을 위해 LVDT를 설치한다.

④ 상기 과정을 반복하여 계획한 지표까지 지반을 조성한 후 지표침하계를 설치한다.

⑤ 계측센서들을 Data Logger에 연결하고 초기치(영점)를 설정한다.

⑥ 굴진면을 지지하고 있던 전면판을 기어박스를 통해 저속(1mm/1min)으로 굴진면 후방으로 수평이동시키면서 연직응력, 전면판의 토압분포와 지중 및 지표 변위를 측정한다.

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 무보강 시의 거동

굴진면의 수평이동에 따라 연직토압은 Fig. 9와 같이 굴진면 전방에서는 감소하고 굴진면 후방에서는 증가하는데, 이는 굴진면 전방에서 연직토압이 굴진면의 수평토압으로 전이되기 때문으로 판단된다. 이러한 굴진면 전후의 연직토압의 분포로부터 알수 있는 점은, 얕은 토사터널의 경우 굴착 직후 굴진면 직후방은 갱내 지보가 설치되지 않은 무지보 상태에 있게 되는데, 오히려 이 구간에서 응력집중이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 토사터널 굴착 시, 반드시 이전 굴진면에서 굴진면 천단을 선행보강 해야한다는 것을 의미하고 있다. 또한 굴진면 전방의 연직토압은 굴진면 전방으로부터 2.5D, 굴진면 후방은 1.5D 이후부터 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 굴진면 전후에서 종방향 아칭작용으로 인해 전이된 응력이 원지반내에서 평형상태에 도달하는 과정인 것으로 보인다.

굴진면 전후의 연직변위를 측정하기 위해 천단으로부터 0.0D, 0.5D, 1.0D(지표)의 위치에 LVDT를 매입하여 굴진면 수평이동에 따른 연직변위를 측정하였으며, 이 중 굴진면의 수평이동이 가장 큰 0.1D일 때의 지중 연직변위 측정결과는 Fig. 10과 같다. 그림을 보면 굴진면 전방 상부지반은 이완되어 연직변위가 발생하고 그 크기는 굴진면에 가까울수록 커졌다. 이러한 연직변위

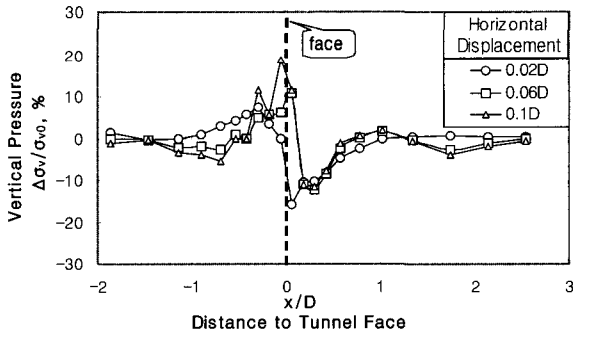


Fig. 9. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Horizontal Displacement of Tunnel Face (Non-Reinforced)

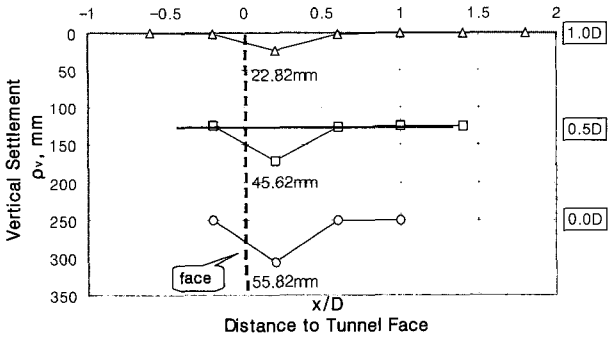


Fig. 10. Vertical Settlement, pv (mm) above the Tunnel - Distance to Tunnel Face Relationships at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Non-Reinforced)

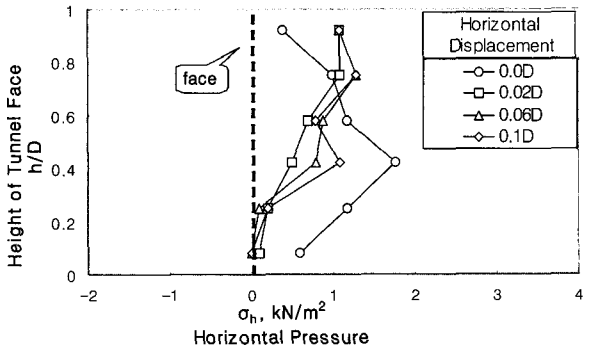


Fig. 11. Horizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with the Variation of Horizontal Displacement (Non-Reinforced)

를 굴진면 파괴 시까지 측정한 결과 연직변위의 파괴영역은 굴진면 전방 약 0.6D까지로 나타났다.

굴진면에 작용하는 수평토압은 Fig. 11과 같이 굴진면이 수평이동됨에 따라 굴진면 상부의 수평토압은 증가하고 하부에서는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 정지상태(0.0D)를 제외하면 수평변위가 커질수록 수평토압이 다소 증가하는데 이는 굴진면 전방 상부지반에 형성된 이완영역이 넓어져 이완하중이 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 굴착에 의하여 이완영역이 발생하는데 굴진면과 거리가 가까울수록 큰 변형을 일으키고 토피고가 1D인 본 실험에서는 지반의 이완이 지표까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4.2 굴진면 천단보강(길이)에 따른 거동

굴진면 천단 보강길이를 0.7D, 1.0D, 1.5D로 변화시키면서 실내실험을 행한 결과는 다음과 같다. 천단 보강길이에 따른 연직토압의 분포는 Fig. 12와 같이 무보강 시와 유사하게 굴진면 전방에서는 감소하고 후방에서는 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 연직토압의 증감량은 무보강 시에 비해 보강재 길이가 증가함에 따라 상당히 증가하는 것으로 나타나 굴진면 종방향의 응력전이 과정에서 천단보강재가 상당한 연직토압을 부담하고 있는 것으로 판단된다. 연직토압은 대략 굴진면 전방 2.0D, 후방 1.5D 이후부터 수렴하는 것으로 나타났다.

굴진면 수평이동에 따라 굴진면에 작용하는 수평토압은 Fig. 13과 같이 천단보강재의 길이가 증가할 수록 그 크기가 증가하면서 분포는 일정하게 나타나는데, 이는 천단보강재의 길이가 증가함에 따라 굴진면 전방 코아부의 변형이 억제되어 수평토압이 증가하는 것으로 보인다.

굴진면 천단을 보강한 경우, 굴진면 상부 위치별 지중 연직변위는 Fig. 14와 같이 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 무보강 시의 연직변위를 100%로 보고 천단보강재 길이에 따른 연직변위는 천단보강재의 길이가 0.7D인 경우 무보강 시에 비하여 불과 10% 이내로 나타나 천단보강재가 지표 및 지중침하 억제에 상당한 역할을 하는 것으로 나타났다. 따라서 천단보강재의 최소길

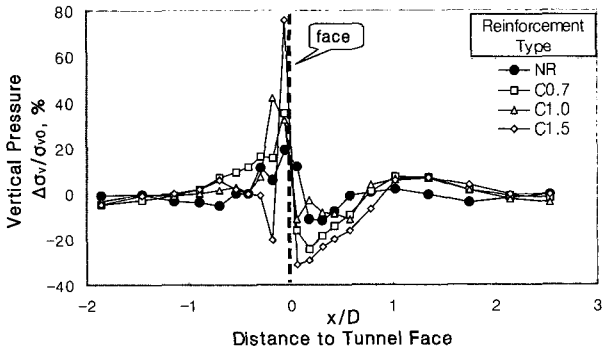


Fig. 12. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Length of Crown Reinforcement at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Crown-Reinforced)

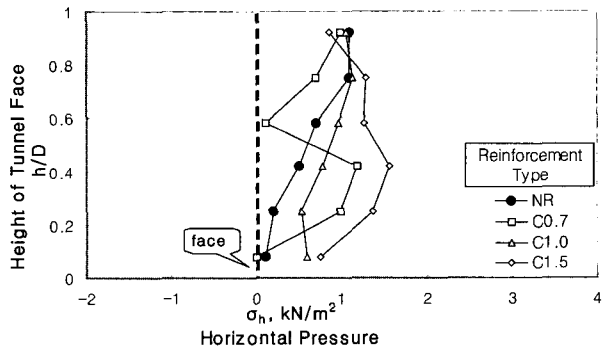


Fig. 13. Horizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with the Variation of Horizontal Displacement (=0.02D) (Crown-Reinforced)

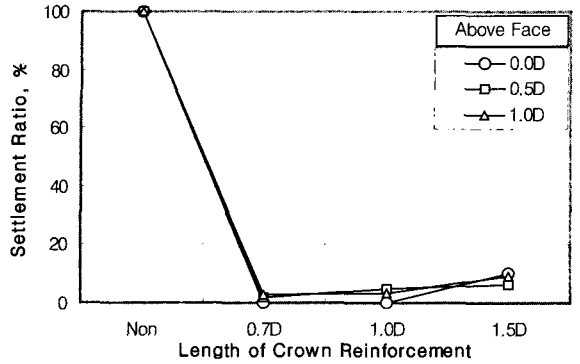


Fig. 14. Settlement Ratio - Length of Crown Reinforcement Relationship Compared to the Non-Reinforced above the Face (Crown-Reinforced)

이는 침하억제의 관점에서 0.7D 이상으로 하는 것이 가장 적합한 것으로 판단된다.

4.3 굴진면 수평보강에 따른 거동

4.3.1 수평보강재 길이에 따른 거동

굴진면을 수평보강만한 경우, 수평보강재 길이에 따른 거동을 살펴보기 위해 수평보강재 길이를 0.7D, 1.0D, 1.5D로 변화시키면서 굴진면 전후의 거동을 살펴보았다. 굴진면 전후 연직토압의 분포경향은 천단보강 시와 반대로 나타났다. 즉 Fig. 15와 같이 굴진면 전방 연직토압은 증가하고 후방 연직토압은 감소하는 것으로 나타나 수평보강재 보강열의 수가 증가함에 따라 굴진면 전방 코아부의 강성이 증가됨으로 인해 오히려 굴진면 전방지반의 하중지지 역할이 증대되는 것으로 보인다.

이러한 토압의 증감양상은 대체적으로 수평보강재 열의 수가 증가함에 따라 변화의 폭이 커지는 것을 알

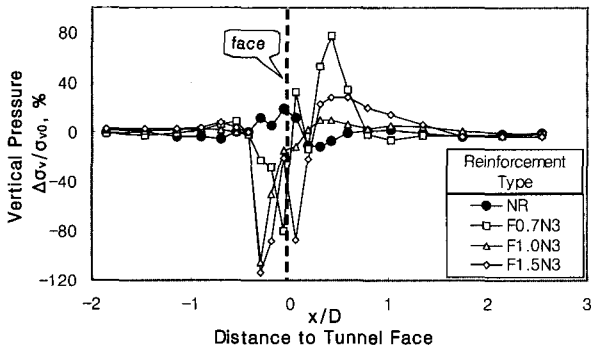


Fig. 15. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Length of Face Reinforcement at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Face-Reinforced)

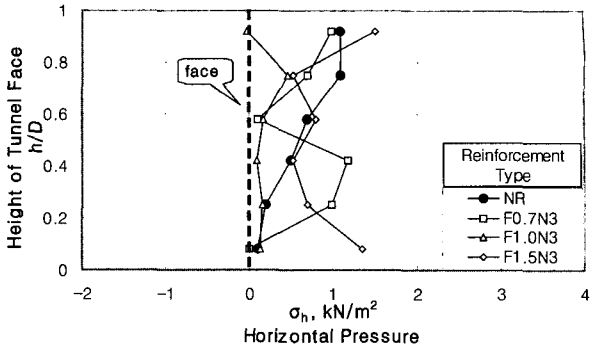


Fig. 16. Horizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with the Variation of Horizontal Displacement (=0.02D) (Face-Reinforced)

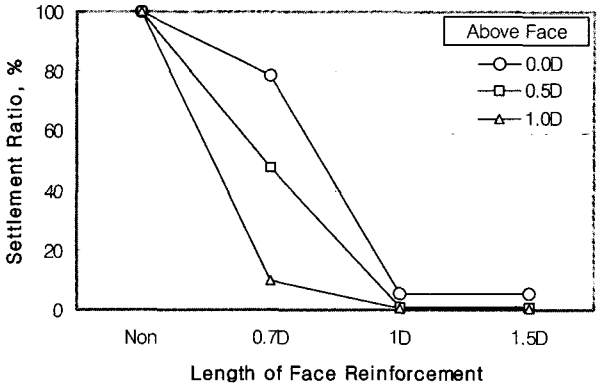


Fig. 17. Settlement Ratio - Length of Face Reinforcement Relationship Compared to the Non-Reinforced above the Face (Face-Reinforced)

수 있다. 이는 보강재의 수가 증가함에 따라 굴진면 전방 코아부의 수평변형이 억제되어 굴진면 전후방 지반의 강성이 증가된 까닭으로 보인다. 이러한 연직토압은 천단보강 시와 유사하게 굴진면 전방 2.0D, 후방 1.5D 이후부터 수렴하는 것으로 나타났다.

굴진면에 작용하는 수평토압은 Fig. 16과 같이 보강재 열의 수에 따른 뚜렷한 토압의 분포경향은 찾기 어려우나, 전반적으로 보강재의 수가 증가할 수록 전체 수평토압이 증가하는 것으로 보인다.

굴진면 상부 연직변위는 Fig. 17과 같이 무보강 시에 비하여 보강길이 0.7D, 1.0D, 1.5D에서 각각 평균 45.5%, 2.4%, 2.3%의 변위비로서 54.5%, 97.6%, 97.7%의 보강효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 연직변위 억제 측면에서는 수평보강 길이가 최소 1.0D이상이 필요한 것으로 판단된다.

4.3.2 수평보강재의 갯수에 따른 거동

수평보강재 열의 수에 따른 연직토압의 분포는 Fig.

18과 같이 천단보강의 경우와는 반대로 나타났다. 즉 굴진면 전방토압은 증가하고 후방토압은 감소하는 경향을 보이고 있다.

이는 굴진면 전방이 보강으로 인해 전방지반의 강성이 증가하여 결과적으로 종방향 아칭에 의한 하중전이에 있어 전방지반의 하중지지 역할이 증대된 것으로 보인다. 굴진면 전후에 나타나는 이러한 토압의 증감양상은 대체적으로 수평보강재 열의 수가 증가함에 따라 변화의 폭이 커지는 것을 알 수 있는데, 보강재 열 수가 증가함에 따라 지반보강효과도 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 굴진면 전후방 연직토압의 증감 경향을 보면, 굴진면 전후로 대략 1.0D에 이르면 연직토압의 대부분이 수렴하는 양상을 보이고 있다.

수평토압의 분포는 Fig. 19와 같이 보강된 수평보강재의 수에 따른 뚜렷한 토압의 분포경향은 찾기 어려우나 전반적으로 보강재의 수가 증가할수록 전체 토압의 크기는 증가하는 것으로 보인다. 이 역시 수평보강에 따른 지반강성의 증가로 인해 수평토압의 크기가 증가하는 것으로 판단된다.

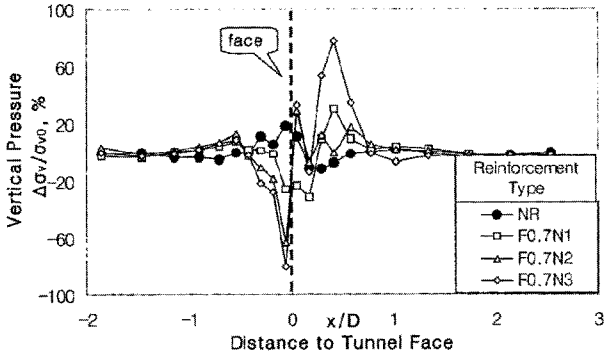
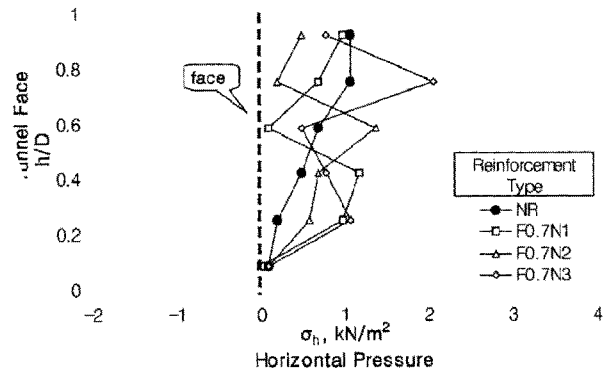


Fig. 18. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Line of Face Reinforcement at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Face-Reinforced)



'orizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with e Variation of Horizontal Displacement (=0.02D) (Face-nforced)

굴진면 상부 연직변위는 Fig. 20과 같이 무보강에 비하여 수평보강재의 수, N1, N2, N3에서 각각 45.5%, 29.9%, 16.0%의 변위비로서 54.5%, 70.1%, 84.0%의 보강효과가 있는 것으로 나타났다.

4.4 굴진면 천단과 수평보강에 따른 거동

4.4.1 천단보강재 종방향 설치각도에 따른 거동

수평보강재 1열을 보강한 상태에서 천단보강재의 종방향 설치 각도를 10°, 20°, 30°로 변화시키면서 연직토압 거동을 분석한 결과는 Fig. 21과 같다. 그림에 나타난 연직토압의 거동양상은 무보강인 경우와 유사하게 나타났으나, 변화량은 천단부 보강재의 설치각도가 증가할수록 더 크게 발생하였다.

이는 굴진면의 수평이동에 따라 굴진면 전방지반의 연직토압이 상부보강재를 따라 굴진면 후방의 천단 방

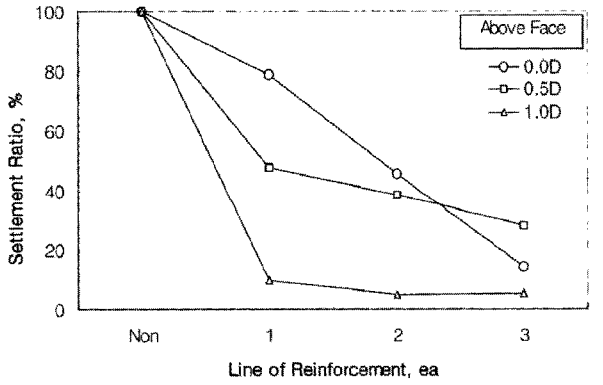


Fig. 20. Settlement Ratio - Line of Face Reinforcement Relationship Compared to the Non-Reinforced above the Face (Face-Reinforced)

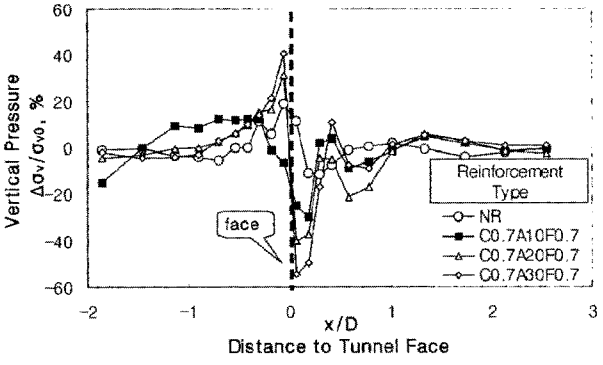


Fig. 21. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Angle of Crown Reinforcement at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Crown and Face-Reinforced)

향으로 전이되면서 응력이 증가하게 되며, 이 때 보강각도가 증가할 수록 천단쪽으로의 응력전이가 보다 쉽게 이루어져 천단부 연직토압이 증가하는 것으로 보인다. 이와 동시에 굴진면 전방의 연직토압은 굴진면 천단부로 전이되면서 감소되는 것으로 나타났는데, 이는 결과적으로 천단으로 전이되어 증가되는 연직토압의 양만큼 굴진면 전방에서의 연직토압은 감소하는 것으로 판단된다. 연직토압은 대략 굴진면 전후방으로 각각 2.0D, 1.0D 이후 수렴하는 것으로 나타났다.

굴진면에 작용하는 수평토압은 Fig. 22와 같이 천단보강재의 각도가 낮을 수록 수평토압이 작게 측정되었다. 이는 상부보강재의 설치각도가 클 수록 하중으로 작용하게 되는 상부보강재 하부영역이 넓어지기 때문에 수평토압이 증가하는 것으로 보인다.

천단보강 각도에 따른 굴진면 상부지반의 연직변위를 분석한 결과 Fig. 23과 같이 보강각도 10°에서 평균 10.3%의 변위비로서 89.7%의 침하억제 효과가 나타났다. 지표와 터널천단 0.5D의 위치에서는 보강각도가 수

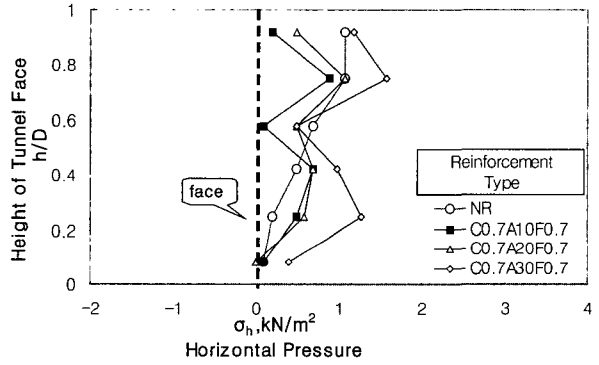


Fig. 22. Horizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with the Variation of Horizontal Displacement (=0.02D) (Crown and Face-Reinforced)

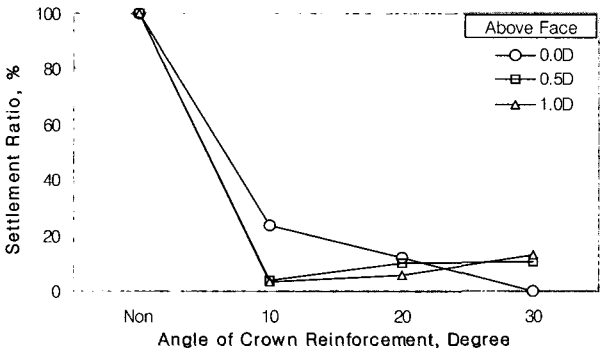


Fig. 23. Settlement Ratio - Angle of Crown Reinforcement Relationship Compared to the Non-Reinforced above the Face (Crown and Face-Reinforced)

평에 가까울수록 침하억제 효과가 증대되는 것으로 나타났다.

4.4.3 천단과 수평보강재 길이에 따른 거동

천단보강재의 각도를 10°로 하고 천단보강재와 수평보강재의 길이를 동시에 0.7D, 1.0D, 1.5D로 변화시키면서 굴진면 전후의 거동을 분석한 결과는 다음과 같다. 보강재의 길이에 따른 연직토압의 거동양상은 Fig. 24과 같이 보강재의 길이가 증가할 수록 굴진면 전방에서 상당한 토압의 변화가 발생하였으며, 이러한 변화의 양상은 굴진면 전방 약 0.5D에서 급격히 감소하다가 약 2.0D에 이르면 거의 수렴하는 양상을 보인다. 반면 굴진면 후방에서는 전방에서와 같이 큰 토압의 변화는 없었으며, 연직토압의 수렴양상 또한 1.0D이내에서 거의 수렴하는 것으로 나타났다. 이와 같이 굴진면의 수평이동에 따른 연직토압의 증감이 굴진면 전방에서 주로 이루어지는 까닭은 굴진면 천단과 코아부에 대한 수평보강을 동시에 수행하였기 때문으로써 종방향 아칭작용으로 인한 응력 전이가 굴진면 전방에 국한하여 나타나는 것으로 판단된다.

보강재의 길이에 따른 수평토압의 뚜렷한 경향은 에서 찾아 볼 수 없었는데(Fig. 25), 이는 모형실험 장치 하부의 경계조건이 수평토압에 다소 영향을 미치는 것으로 보인다. 굴진면 전후의 연직변위를 측정한 결과는 무보강 시에 비해 상당한 보강효과를 볼 수 있었으며 이를 무보강 시의 침하량을 100%로 보고 비교하면, Fig. 26과 같이 터널 상부 0.1D~0.35D에서 보강재 길이가 1.5D의 경우 불과 3.04%의 침하가 발생하였고, 지표에서는 침하가 발생하지 않았다.

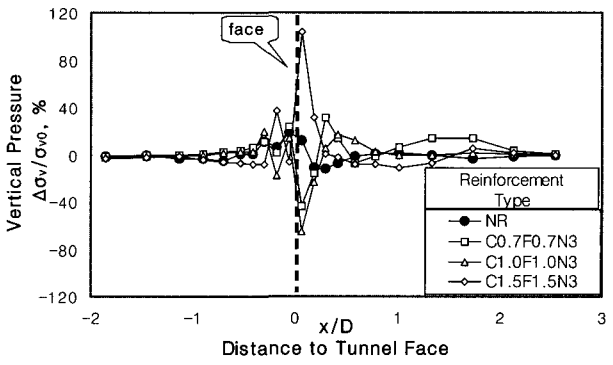
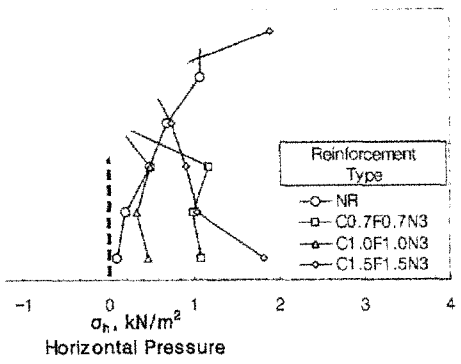


Fig. 24. Vertical Pressure - Distance to the Face Relationships Changing the Length of Crown and Face Reinforcement at the Horizontal Displacement (=0.1D) (Crown and Face-Reinforced)



.5. Horizontal Pressure Acted on the Tunnel Face with the Variation of Horizontal Displacement (=0.02D) (Crown and Face-Reinforced)

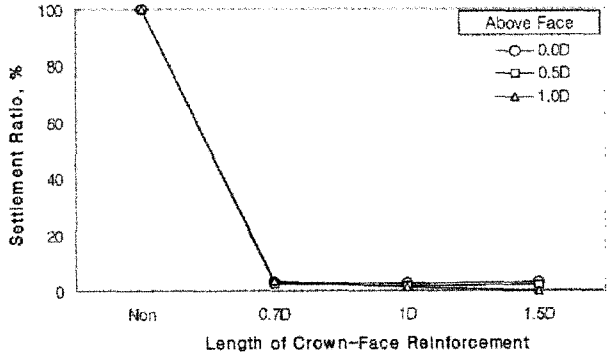


Fig. 26. Settlement Ratio - Length of Crown and Face Reinforcement Relationship above the Face (Crown and Face-Reinforced)

결론적으로 굴진면 천단 보강재와 수평보강재의 길이를 동일한 길이로 변화시킨 경우, 연직토압의 거동양상은 보강재의 길이가 증가할 수록 굴진면 전방에서 상당한 토압의 변화가 발생한 반면, 굴진면 후방에서는 전방에서와 같이 큰 토압의 변화는 없었다. 이와 같이 굴진면의 수평이동에 따른 연직토압의 증감이 굴진면 전방에서 주로 이루어지는 까닭은 굴진면에 대한 보강효과 측면에서 볼 때 굴진면 천단과 수평을 동시에 보강한 경우가 가장 효과적이며 종방향 아칭작용으로 인한 응력 전이가 대부분 굴진면 전방에 국한하여 나타나는 것으로 판단된다.

상기 내용을 종합해 보면 천단 보강재는 중첩 시공하여 터널상부로 전달되는 응력을 차단하여 터널상부에서 전달되는 연직토압을 감소시켜야 할 것이다. 터널 천단부가 umbrella 형태로 보강이 되고 수평보강재수가 증가할 수록 터널 굴진면의 안정성은 증가하여 전체적인 터널의 안정성이 높아질 것으로 판단된다. 보강재 길이에 따른 변위는 보강재 길이가 1.0D 이상인 경우에 침하가 거의 발생하지 않았으며, 천단부 보강각도에 따른 연직변위와 수평토압의 크기는 보강각도가 수평에 가까울 수록 감소하는 것으로 보아 보강측면에서 천단 보강재의 각도는 수평(0°)이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

천단보강재의 각도가 수평에 가까울 수록 침하경감 효과등이 증대된다는 상기 결과는 기존연구결과(유충식 등, 1995 ; 윤성현 등, 1999)와 일치하고 있으나, 실제로 천단보강이 터널 내에서는 천공장비의 구조적인 문제로 인해 최소 상향각인 10°~15°로 이루어지는 점 등을 감안한다면 수평보강은 불가능하므로 가장 적절한 천단부 보강각도는 10°로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널굴착에 따른 안정성을 확보하기 위해 현재 적용되고 있는 RPUM에 의한 천단보강과 굴진면 수평보강에 의한 효과를 굴진면 전후방의 종방향 아칭 거동 관점에서 정량적으로 분석하였다. 이를 위해, 토피고가 터널직경에 해당하는 모래지반의 2차원 평면변형률 터널을 모사하는 실내토조에서 다양한 보강조건에 따른 터널굴착 시 굴진면 주변지반의 아칭거동을 분석하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연직토압의 변화를 토대로 한 아칭 영향범위는 무보강의 경우 굴진면 전·후방으로 각각 2.5D와 1.5D(D는 터널직경), 천단보강 및 수평보강의 경우 2.0D와 1.5D, 천단과 수평보강이 동시에 적용된 경우는 2.0D와 1.0D까지로 측정되어 굴진면 보강에 따라 아칭의 영향범위가 감소함을 알 수 있었다.

(2) 반면 연직토압의 변화량은 굴진면 보강에 따라 증가하는 것으로 나타나 역학적으로 천단 및 수평보강재가 터널의 안정에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

(3) 터널 굴착에 따른 굴진면 전후에 대한 종방향 토압의 변화를 2차원 평면변형율 조건 시와 보강 시에 대해 실내실험을 수 천단보강의 효과를 증명하였고 또 및 수평보강 시, 천단부 보강 와 수평토압의 크기는 보 수록 감소하였으며 이 무적으로 10°이내의

타났다. 또한 연직변위 억제측면에서 천단 및 수평 보강재의 최소길이를 제안하였다.

(4) 실내 실험시 굴진면 보강형태(천단보강, 수평보강, 천단+수평보강)에 따른 분석결과, 터널굴착전 K_o 상태의 초기응력이 지반을 굴착하여 굴진면이 이동됨에 따라 초기응력이 교란되어 굴진면 전방으로는 0.5D 이내, 굴진면 후방으로는 0.2D 이내에서 연직토압의 변화양상이 매우 큰 것을 볼때, 이는 원지반의 굴착 전 토압이 주변지반 쪽으로 전이되는 과정으로서 종방향 아칭작용으로 인한 응력전이가 변위가 적게 발생하는 굴진면 후방보다는 굴진면 전방쪽으로 더 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이인모 (2001), 암반역학의 원리, SaeRon Publishing Co., pp. 334.
2. 유충식, 신승우, 김영준, 김연정 (1995), "3차원 유한요소해석에 의한 Umbrella Arch 공법으로 보강된 터널의 거동해석", 한국지반공학회, '95가을학술발표회 논문집, Vol.II, pp.11-16.
3. 윤성현, 임종철, 강희준, 오명렬 (1999), "얕은 터널에서 강관의 보강형식에 따른 효과에 관한 연구", 대한토목학회, 1999년도 학술발표회 논문집(II), pp.553-556.
4. Broms, B. B. and Bennemak, H. (1967), "Stability of Clay at Vertical Openings", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, No.SM1, pp.71-95.
5. Gnilsen, R. (1989), Numerical Analysis, *Underground Structures Design and Instrumentation*, Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering, 59A, pp.84-128.
6. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley&Sons, Inc. New York, pp.66-77.
7. Walter W. (1990), *Rock Mechanics : Theory and Applications with Case Histories*, Springer-Verlag, pp.444-471.

(접수일자 2004. 9. 15, 심사완료일 2004. 12. 7)