

얕은 터널의 굴진면 변형에 따른 종방향 하중전이 특성에 대한 실험적 연구(I)

김양운¹ · 이상덕^{2*}

¹정회원, 아주대학교 건설교통 시스템공학과 박사과정

²정회원, 아주대학교 건설교통 시스템공학과 교수

Experimental study on the longitudinal load transfer of a shallow tunnel depending on the deformation tunnel face (I)

Yang Woon Kim¹, Sang Duk Lee^{2*}

¹Ajou University, Dept. of Civil and Transportation Eng, Ph. D Student

²Ajou University, Dept. of Civil and Transportation Eng, Professor

ABSTRACT: If a tunnel is excavated, the released stress is redistributed in the ground around the tunnel face, which lead the stress state of the surrounding ground of the tunnel and the load acting on the tunnel support to change. If the tunnel face deforms, the ground ahead of it is relaxed, and the earth pressure acting on it decreases. And if the displacement increases so much that, the ground ahead of the tunnel face reaches in failure state. At this time, load would be transferred longitudinally in the tunnel, depending on the cover and the face deformations. The longitudinal load transfers in the tunnels induced by the tunnelling has been often studied; however, the relation between the deformation of the tunnel face and the longitudinal load transfer was rarely studied. Therefore in this study assesses the characteristics of the longitudinal load transfer as the face was failed by displacement by conducting a model test in a shallow tunnel. In other words, the longitudinal load transfer of the tunnel with the progress of the face deform was measured by conducting a model test, beginning at the state of earth pressure at rest. As results of this study, most of the longitudinal load transfers occurred drastically at the beginning of the displacement of the tunnel face, and as the displacement of the face approached the ultimate displacement, it converged to the ultimate displacement at a gentler slope. In other words, when the ground ahead of the tunnel face was still in an elastic state, the longitudinally transferred load increased sharply at the beginning stage but it tended to increase gradually if it approached to the ultimate limit. Thus, it was noted that the earth pressure in the face and the longitudinal load transfer of the tunnel had the same decreasing tendency.

Keywords: Tunnel face, Ultimate displacement, Shallow tunnel, Model test, Longitudinal load transfer

초 록: 터널을 굴착하면 굴진면 주변지반은 응력이 해방되고, 해방된 응력이 주변지반으로 재분배 되어 터널주변지반의 응력상태와 터널지보공에 작용하는 하중이 변한다. 굴진면에 변위가 발생하면 굴진면 전방지반이 이완되고 굴진면에 작용하는 토압은 감소하며, 변위가 일정한 크기 이상 커지면 굴진면 전방지반이 파괴상태에 이른다. 이때에 터널의 종방향으로 하중전이가 발생하며, 토피고나 굴진면의 변위정도에 따라 그 경향이 다르다. 굴진면 파괴에 따른 터널 종방향 하중전이에 대해서는 연구된 사례가 있으나, 굴진면 변위와 종방향 하중전이를 결부시켜서 연구한 사례는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 토사터널에서 모형실험을 수행하여 굴진면이 과다변위로 인해 파괴됨에 따른 종방향 하중전이의 특성을 파악하였다. 즉, 정지토압 상태에서 시작하여 굴진면의 변위가 진행됨에 따른 터널 종방향 하중전이를 모형실험을 수행하여 측정하였다. 연구 결과, 종방향 하중전이는 굴진면 변위 초기에 대부분이 발생하고 굴진면 변위가 한계변위에 근접할수록 완만한 기울기로 한계치에 수렴하였다. 즉, 종방향 하중전이는 굴진면 전방지반이 아직 탄성상태일 때 급격히 증가하였고, 지반이 한계상태에 근접하면 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 굴진면에서 변위에 의한 토압감소와 터널 종방향 하중전이는 같은 추세로 발생하는 것을 알 수 있었다.

주요어: 굴진면, 한계변위, 얕은터널, 모형실험, 종방향 하중전이

*Corresponding author: Sang Duk Lee

E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr

Received September 12, 2016; Revised September 26, 2016;

Accepted September 28, 2016

Copyright ©2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

터널은 굴진방향으로 길이가 긴 구조물이므로 터널과 주변지반을 평면변형률 상태로 2차원 해석(Lee, 2013)하며, 터널의 형성에 있어 횡방향 하중전이가 중요한 인자로 인지되어 다양한 연구(Terzhagi, 1936)가 이루어져 왔다. 그런데 터널의 굴진면 주변에서는 지반이 3차원적으로 거동하여 횡방향 뿐만 아니라 종방향에 대한 하중전이가 발생(Gnilsen, 1989)하므로 그 특성을 명확히 알 필요가 있다. 종방향 하중전이는 굴진면의 전방과 후방으로 발생되며, 굴진면 후방으로 발생하는 하중전이는 터널에 추가적인 하중으로 작용되어 터널의 안정성과 결부된다.

터널의 종방향 거동에 대한 기존의 연구는 Lunardi (2000)가 굴진면 전방의 변형에 의한 응력변화의 크기는 굴착된 터널의 안정성에 영향을 준다고 하였고 Yoo and Shin (2000)이 볼트 보강된 굴진면의 거동특성에 대해 연구하였으며 Kwon et al. (2004)는 보조공법에 의한 종방향 아칭현상에 대해 연구하였다. 또한 터널 굴착시 굴진면의 안정에 대한 연구로 Chambon and Corte (1994), Idinger et al. (2011)는 비점착성 지반에서 굴진면의 안정에 대해 연구하는 등 주로 터널의 안정성에 주안점을 두었다.

종방향 하중전이는 굴진면의 변위와 관련이 크고, 굴진면이 파괴되기 전에 이미 상당한 크기로 발생되고 있는 현상이므로 굴진면의 안정성 평가 이전에 그 거동 메카니즘의 파악이 우선시 되어야 할 필요가 있다.

최근 지하공간의 활용도가 증가함에 따라 터널의 수요가 늘어나고 특히 도심지는 매립, 퇴적층등에 입지하고 있어 터널의 계획심도에서 상부로 갈수록 불량한 지층으로 구성되는 경우가 많아 굴진면의 변위는 상부에서 크게 변형되는 형태로 거동할 것이다.

본 연구에서는 터널 굴진면이 상부에서 변위가 크게 발생될 경우를 고려하였으며, 변위 정도에 따른 터널 천단상부와 바닥하부 지반으로 전이되는 토압을

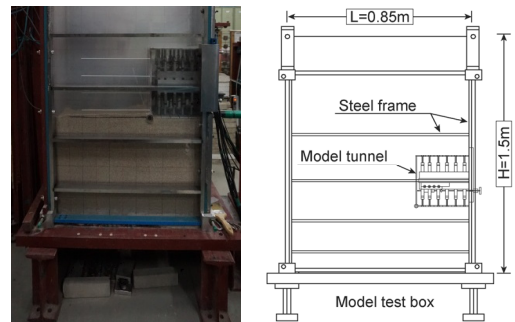
측정하여 종방향 하중전이 거동에 대해 실험적 연구를 수행하였다.

2. 모형실험

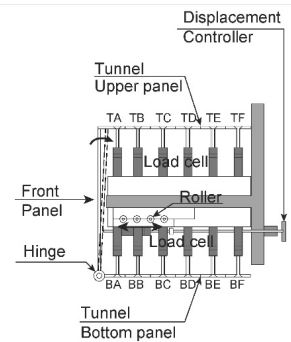
본 연구에서는 사질토 지반에서 터널을 모사하여 굴진면 변형시 터널 굴진면에서의 토압변화와 터널 주변의 상·하부로 발생하는 하중전이에 대한 실험적 연구를 실시하였다.

2.1 모형실험기

모형실험기는 모형토조와 모형터널로 구성되어 있다(Fig. 1). 모형토조의 크기는 0.30 m (Width) × 1.50 m (Height) × 0.83 m (Length)로 벽체는 굴진면과 염색사를 포설한 지반의 거동을 외부에서 관찰할 수 있도록 투명아크릴판으로 제작하였다.



(a) Model test box



(b) Model tunnel

Fig. 1. Experiment equipment

모형 지반 조성시 발생하는 토압으로 인해 벽체가 변형되는 것을 방지하기 위하여 벽체 외부에 강제 프레임을 설치하였다. 모형터널은 터널의 종방향 단면을 모사하였으며 터널의 상부와 하부는 각각 6개의 분리된 하중판으로 설치하였고 각 위치별로 초기 토압과 굴진면 변위시 전이되는 하중을 측정하였다. 모형터널의 크기는 0.30 m (Width) × 0.30 m (Height) × 0.30 m (Length)으로 모형터널의 전면판은 굴진면의 변위를 유발하기 위해 하부를 힌지 조건으로 하여 굴진면 변위가 발생 되도록 하였다. 또한 전면판에 작용하는 토압을 측정할 수 있도록 하였다.

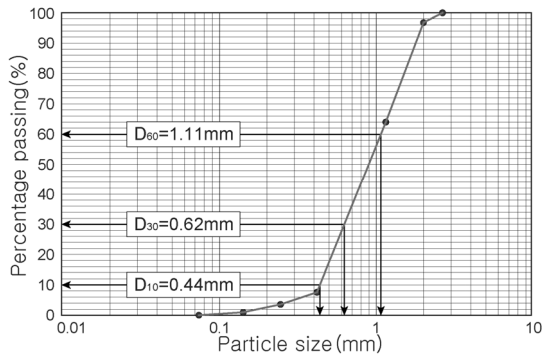


Fig. 2. Grain Size accumulation curve

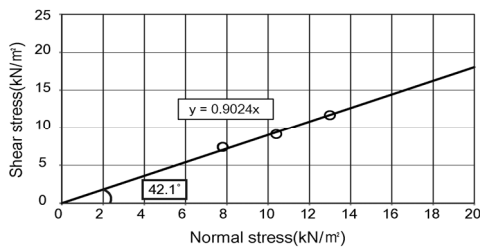


Fig. 3. Result of direct shear test

Table 1. Result of laboratory soil tests

Particle size distribution	Maximum dry unit weight (γ_{dmax})	Minimum dry unit weight (γ_{dmin})	Unit weight (γ_d)	Relative density (D_r)	Specific gravity (G_s)	Internal friction angle (ϕ)	Cohesion (kPa)
$C_u=2.52$, $C_c=0.79$ SP	17.8 kN/m ³	15.4 kN/m ³	17.4 kN/m ³	85.3% (very dense)	2.65	42.1°	0

2.2 모형지반

모형지반은 주문진 자연사를 사용하여 샌드커튼 방식으로 균질한 지반을 조성하였다. 모형지반의 물리적 특성은 입도분포시험(KS F 2302), 최대·최소 건조단위중량 시험(KS F 2345)을 수행하여 파악하였고 모형지반을 공학적으로 분류(KS F 2324)하였다. 또한, 직접전단시험(KS F 2343)을 수행하여 모형지반의 역학적 특성을 파악하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 입도분포시험과 직접전단시험 결과이며, 모형지반의 물리적, 역학적 특성은 Table 1과 같다. 사질토를 이용한 모형지반은 낮은 응력수준에서도 굴진면 변위-응력관계의 분석이 가능하고 상대밀도가 조밀한 사질토 지반은 파괴시 응력변화 특성이 명확하다는 특징이 있어 본 연구의 모형지반으로 이용하였다.

2.3 계측

모형 실험기에 적절한 측정장치를 설치하여 굴진면의 변위에 따른 터널 주변지반 내 하중전이 및 지반 변위 거동특성을 파악하였다. 모형터널의 상하부를 각각 2개의 Load Cell이 설치된 하중판 6개로 제작하여 위치별로 전이되는 하중의 크기를 측정하였고, 전면판에 1개의 Load Cell을 설치하여 전면판에 작용하는 토압의 변화를 측정하였다. 전면판의 변위와 지표 침하는 변위측정용 LVDT를 설치하여 측정하였다. 실험중 하중과 변위데이터는 실시간 모니터링과 동시에 저장이 가능한 정적데이터로거를 이용해 수집하였다. 측정장치 및 데이터수집 장치는 Table 2와 같다.

Table 2. Instrument type and capacity




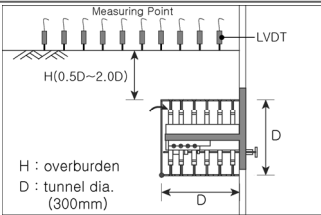
Category	Load Cell	LVDT	Data Logger
Instruments			
Location	Model tunnel	Model tunnel Surface	-
Object	Earth Pressure Measurement	Front wall displacement & Surface settlement measurement	Data collection
Capacity	0.5 kN (Precision $\leq 0.03\%$)	50 mm (Sensitivity 200×10^{-6} mm)	Measurable data 36
Quantity	25	11	1

Table 3. Variables of tunnel model experiment

Category	Variables		Outline
	Tunnel face deformation	Overburden	
CASE 1	Maximum displacement on the top	0.5 D	
CASE 2		1.0 D	
CASE 3		1.5 D	
CASE 4		2.0 D	

2.4 실험방법 및 변수

얇은 터널에서 굴진면의 변위에 따른 종방향 하중 전이 및 지반 거동 특성을 파악하기 위한 모형실험 방법은 다음과 같다.

모형 지반을 조성한 후 모형터널 전면판의 변위를 허용하여 굴진면에 변위가 발생하도록 하였다. 이때 발생하는 터널 상·하부 하중판, 전면판의 토압변화 및 지표변위를 측정하였다. 실험변수는 굴진면이 상부 큰 변위인 변위형태에서 얇은 터널 범주의 토피고에 의한 굴진면 응력조건과 하중전이 특성을 분석하기 위해 토피고의 변화를 실험변수로 선정하였다 (Table 3).

3. 결과분석

터널 굴진면의 변위에 따른 터널 주변지반의 종방향 하중전이 및 지반 변위거동 특성을 파악하기 위한

모형실험의 결과는 다음과 같다.

3.1 굴진면 토압변화

Fig 4는 굴진면 변위 발생에 따른 작용하는 토압의 변화를 보여주고 있다. 토압의 변화는 초기 토압(E_0)과 변화된 토압(E_t)의 비로 무차원화하여 표현하였다. 모든 실험조건에서 굴진면에 변위가 발생하면 굴진면

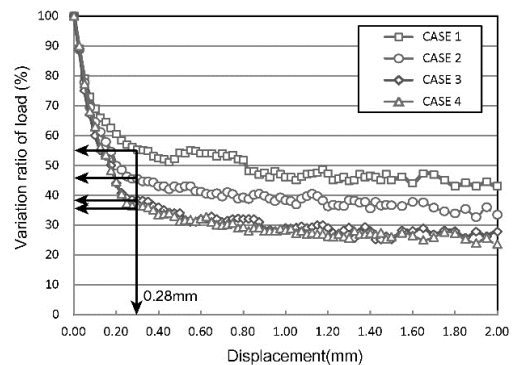


Fig. 4. Load variation of tunnel face

에 작용하는 토압이 선형적으로 급격히 감소하는 경향을 보이며, 특정 변위에 도달했을 때 굴진면 변위에 대한 토압감소량이 완만한 감소를 나타내거나 수렴하는 경향을 보였다. 이 때를 굴진면의 한계상태 즉, 굴진면의 파괴상태로 판단하였으며 이 때의 변위를 한계변위(ϵ_a)로 규정하였다. Fig. 4와 같이 한계변위는 0.28 mm로 실험조건에 관계없이 동일하게 나타났으며, 반면 토압감소량은 토피고가 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다. 이는 토압을 받는 구조물의 한계 변위가 벽체높이, 지반의 상대밀도에 영향을 받는다(Lee, S.D, 2014)는 것과 동일하였다.

한계상태의 굴진면 변위를 굴진면 높이(D)와 굴진면의 수평변위(Δs)의 비로 무차원화 했을때 CASE

1~CASE 4에서 한계상태의 $\Delta s/D$ 는 약 0.1%로 주동토압을 받는 벽체의 한계상태 벽체변위에 비추어 조밀한 모래에서의 한계변위와 동일한 수준인 것으로 나타났다(Table 4, Lee, 2014). Table 5는 굴진면의 토압이 한계상태로 진행될 때까지의 토압을 일정한 간격으로 나누었을때 굴진면 변위를 나타낸 것이다. 각 CASE별로 한계상태 토압의 50%가 굴진면 한계변위의 17.9~25.0%에서 발생하고, 75%가 굴진면 한계변위의 46.4~50.0%에서 발생하여 굴진면 변위에 민감한 것을 알 수 있다. 굴진면 변위 발생에 의한 토압감소량은 토피고가 증가할수록 커지나 한계상태의 토압감소량을 비교 했을때 토피고 증가에 따라 편차가 점차 작아지는 경향을 나타내므로 토피고가 증가하면 굴진면 전방지반의 일정한 영역내에서 파괴 영역이 형성되는 것으로 판단된다(Table 4). 이는 모형지반내 염색사를 일정한 간격으로 포설하여 굴진면 변위에 따른 변화를 사진 촬영하여 비교하였을 때에도 확인이 가능하였다(Fig. 5).

Table 4. Load variation and displacement at failure

Category	E_{a1}/E_0 (%)	$\Delta s/D$ (ϵ_a , %)
CASE 1	56.6	≈0.1 %
CASE 2	45.5	
CASE 3	38.5	
CASE 4	36.4	

Table 5. Relation of load variation and displacement at the tunnel face

Category	CASE 1		CASE 2		CASE 3		CASE 4	
	E/E_0	ϵ_a	E/E_0	ϵ_a	E/E_0	ϵ_a	E/E_0	ϵ_a
$E_{0\%}$	100.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	0.0%
$E_{25\%}$	89.2%	10.7%	86.4%	10.7%	84.6%	12.5%	84.1%	12.5%
$E_{50\%}$	78.3%	17.9%	72.7%	21.4%	69.3%	25.0%	68.2%	25.0%
$E_{75\%}$	67.5%	46.4%	59.1%	50.0%	53.9%	50.0%	52.3%	50.0%
$E_{100\%}$	56.6%	100%	45.5%	100%	38.5%	100%	36.4%	100.0%

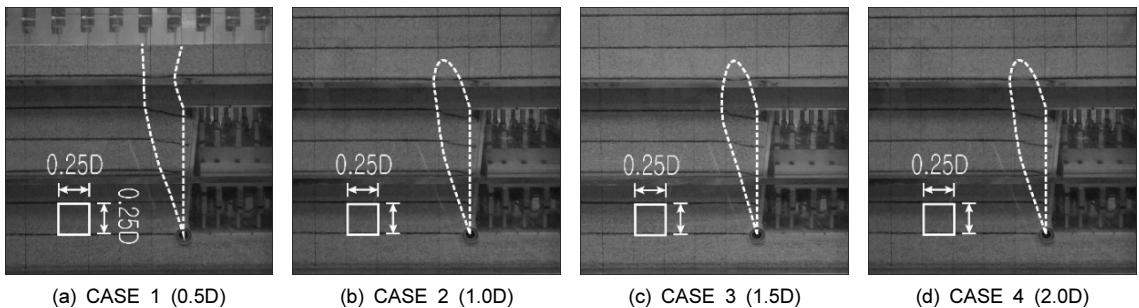


Fig. 5. Ground deformation shape

3.2 터널의 종방향 하중전이

굴진면의 변위가 증가함에 따라 작용하는 토압의 크기는 감소하였다. 이와 더불어 터널의 상·하부에 작용하는 토압에도 변화가 발생하였으며 이는 터널의 종방향으로 하중이 전이되었기 때문으로 판단된다. 터널 상·하부의 토압 변화는 굴진면에 근접한 측정점 TA, BA에서 1.0D 이격된 TF, BF까지 측정하여 분석하였다(Fig. 1 참조).

3.2.1 굴진면 변위와 터널 상·하부의 하중전이

굴진면의 변위와 터널 종방향 하중전이와의 관계에 대해 분석하였다.

CASE 1에서는 굴진면에 변위가 발생하면 터널 상부측점 TA~TC (약 0.5D 범위)에 하중전이가 집중되었다. 굴진면이 한계상태에 이르기까지 TA에서 26.4%, TB에서 20.6%, TC에서는 7.0%의 하중이 증가하였다. 반면 측정점 TE와 TF에서는 굴진면이 한계상태에 근접할수록 원지반 하중보다 감소되는데 이는 낮은 토압으로 인해 터널 상부지반이이완되었기 때문으로 판단된다.

터널 천단상부에서는 굴진면 한계변위의 25% (0.25ε_a) 일 때 한계상태에서 발생되는 전이하중의 50% 이상이 발생하고, 전이되는 하중의 90% 이상이 굴진면 한계 변위의 50% (0.50ε_a)에서 발생하였다(Fig. 6(a)).

터널 하부 측정점은 굴진면 변위발생에 따라 굴진면

과 근접한 측정점 BA에서 크고 이격거리가 먼 BF에서 작아지는 선형적인 분포경향을 나타냈다. 이때의 최대 하중 증가량은 6.0%이다. 터널 바닥부의 하중전이는 굴진면 한계변위의 25% (0.25ε_a)에서 25%가 발생하고, 굴진면 한계변위의 50% (0.50ε_a)에서 80% 이상이 발생하였다(Fig. 6(b)).

이로부터 터널 종방향 하중 전이는 굴진면에 변위가 발생하는 초기에 대부분 발생하는 것으로 나타났으며 터널 하부로 전이되는 하중에 비해 상부로 전이되는 하중의 크기가 크고 작은 범위에서 발생하는 것으로 나타났다.

CASE 2에서는 굴진면 한계변위의 25% (0.25ε_a)에서 굴진면과 근접한 측정점 TA에서 가장 크고 이격거리가 멀어짐에 따라 선형적으로 감소하는 분포를 나타냈다. 굴진면 한계변위의 50~100%범위에서는 측정점 TB의 하중증가량이 최대치를 나타내는 꺾은선형 분포를 보이며 최대 하중증가량은 10.2%가 발생하였다. 이러한 분포 경향은 굴진면의 변위는 굴진면 전방지반을 이완시키고 변위가 증가함에 따라 터널 주변지반의 이완이 커지므로 터널 천단상부의 하중전이 경향에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 전반적으로 굴진면의 변위가 진행될수록 터널 천단상부로 전이되는 하중이 증가하고 영역이 넓어졌다(Fig. 7(a)).

터널 하부에서는 굴진면이 한계변위의 50%인 0.50D 부터 하중전이가 발생되었고 측정점 BA~BD에서 최대 2.0%가 발생하였다. CASE 1보다 하중전이의 크기와 영역이 작게 발생되었다(Fig. 7(b)).

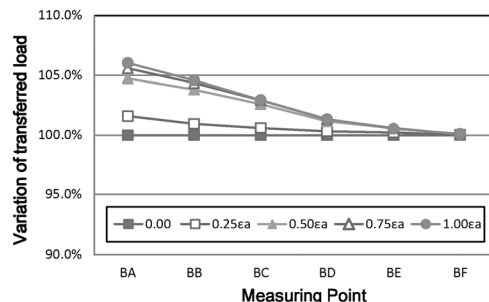
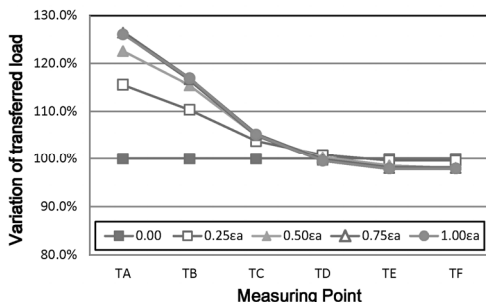


Fig. 6. Load transfer of tunnel (CASE 1)

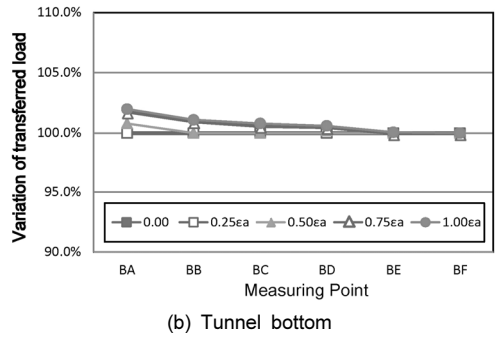
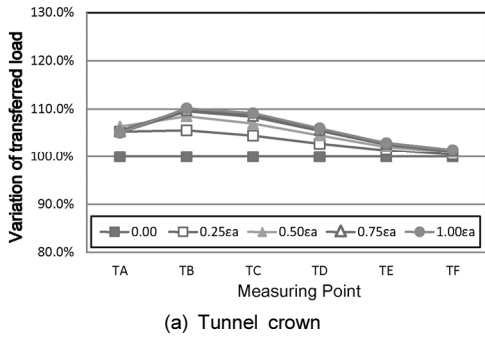


Fig. 7. Load transfer of tunnel (CASE 2)

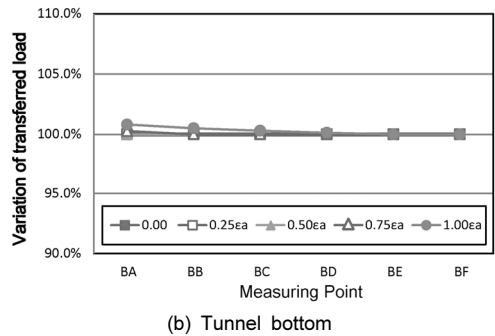
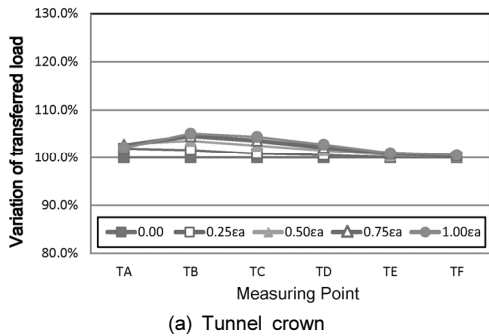


Fig. 8. Load transfer of tunnel (CASE 3)

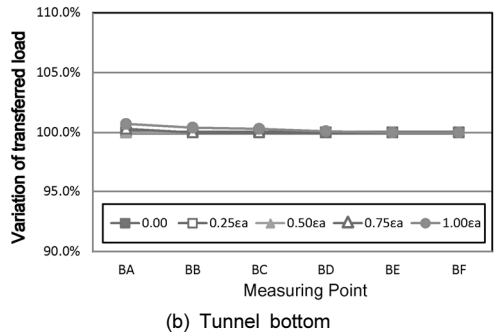
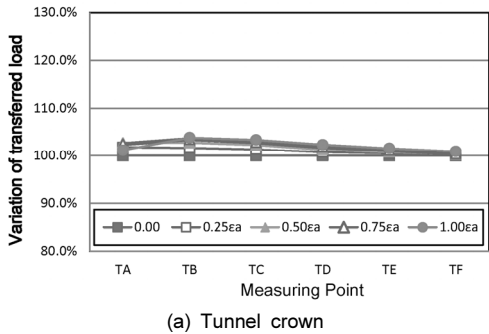


Fig. 9. Load transfer of tunnel (CASE 4)

CASE 3의 터널 상부는 CASE 2의 하중전이 경향과 유사하였다. 한계변위의 25%에서 측정점 TA의 하중증가량이 최대치이고 굴진면 한계변위의 50~100%범위에서는 측정점 TB의 하중증가량이 최대치를 나타냈다. 이때의 최대 하중증가량은 6.0%이다. 굴진면의 변위가 커질수록 하중전이 최대치가 굴진면에서 이격되어

발생하고 터널 종방향으로 전이되는 하중의 범위도 확대되었다(Fig. 8(a)). 터널 하부에서는 굴진면이 한계변위에 이르렀을때하중전이 발생하였고 측정점 BA~BC에서 최대 0.3~0.8%가 발생하였다.

CASE 4는 CASE 2, 3과 유사한 거동 특성을 나타냈다. 굴진면 변위가 증가하면 하중전이 형태는 측정

TA가 큰 선형분포에서 측정점 TB, TC가 큰 꺾은선형의 형태로 변하고 굴진면이 한계상태에 도달했을때 최대 3.8%의 하중증가가 발생되었다. 또한, 하부에서는 측정점 BA~BC에서 최대 0.3~0.7%의 하중전이가 발생하였다(Fig. 9).

3.2.2 굴진면 토압변화와 터널의 종방향 하중전이

앞서 살펴본 바와같이 굴진면에 변위가 발생하면 굴진면에 토압이 감소하고 터널의 천단상부와 바닥하부의 토압이 변화되어 종방향으로 하중전이가 발생하였다. 이를 통해 굴진면의 토압변화는 종방향 하중전이에 직접적인 영향을 주고 있음을 파악할 수 있다. 따라서 굴진면의 토압변화와 종방향 하중전이의 관계를 분석하여 터널의 종방향 하중전이 특성을 파악하였다.

한계상태의 굴진면 한계변위는 토피고와 무관하게 동일하지만 토압감소량은 토피고에 따라서 달라지므

로 각 실험조건의 초기 토압에서 한계상태의 토압을 일정한 비율(25%)로 나누어 토압의 크기에 대한 터널 종방향 하중전이의 변화를 분석하였다.

여기서는 터널 상부의 하중전이 특성이 하부보다 명확하므로 터널 상부의 하중전이 특성에 대해서만 다루었으며 터널 천단상부 전체의 하중전이량을 굴진면 토압감소량과 비교하였다.

CASE 1은 굴진면 토압변화에 따라 터널 상부로 전이되는 하중이 증가하며 굴진면 토압감소량이 50%에서 75%로 증가할 때 전이되는 하중의 증가폭이 가장 커졌다. 굴진면 토압감소량이 75~100%가 될 때 즉, 토압감소량이 75%에서 한계상태에 도달할때까지 하중전이는 완만한 기울기로 증가하였으나 전체적으로는 선형 비례하는 것으로 판단되었다(Fig. 10(a)).

CASE 2에서도 굴진면 토압이 감소하면 터널 상부로 전이되는 하중이 증가하였다. 구간별로는 굴진면의 한계상태 토압감소량의 25%와 75%에서 증가폭이

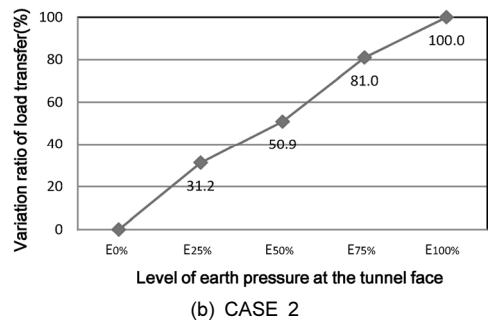
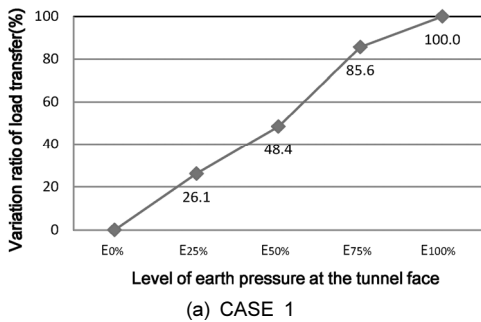


Fig. 10. Relation of load variation at the tunnel face and crown

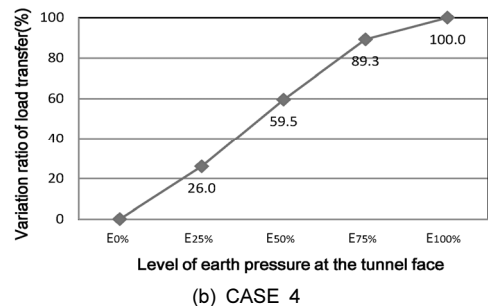
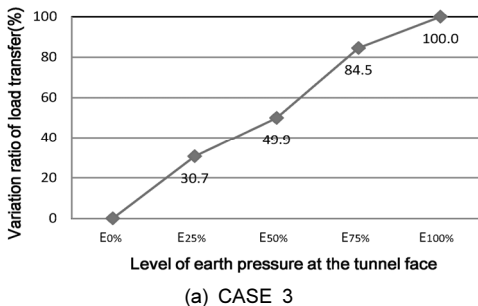


Fig. 11. Relation of load variation at the tunnel face and crown

커지는 경향을 나타내고 굴진면 토압감소량이 75%에서 한계상태에 도달할때까지 하중전이는 완만한 기울기로 변화했으나 전체적으로는 선형적인 비례관계에 있는 것으로 판단되었다(Fig. 10(b)).

CASE 3과 4에서도 굴진면 토압이 감소하면 터널 상부로 전이되는 하중이 증가하였다. 굴진면의 한계상태 토압감소량의 75%에서 전체 하중전이량의 84.5~89.3%가 발생하여 비교적 급한 기울기로 증가하였고 토압감소량 75% 이후에는 증가추세가 둔화되었다. 전체적으로는 선형적인 관계에 있는 것으로 판단되었다(Fig. 11)

모든 실험조건에 대한 분석결과 굴진면의 토압변화와 종방향 하중전이는 선형적으로 비례관계에 있는 것으로 판단되었다.

3.3 지표침하

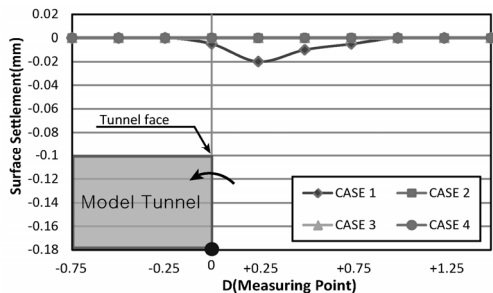
다음은 각 실험조건별 굴진면 변위에 따른 지표침하를 나타낸 것이다. Idinger et al. (2011)는 비점착성

지반의 원심모형실험에서 굴진면 변위에 의한 지표침하의 경향이 토피고 1.0D이상에서 일정한 것을 통해 지반의 종방향 아칭현상이 발현되었기 때문인 것으로 제시 하였다. 본 연구에서 지표침하는 토피고와 굴진면의 변위발생량에 영향을 받는 것으로 나타났다.

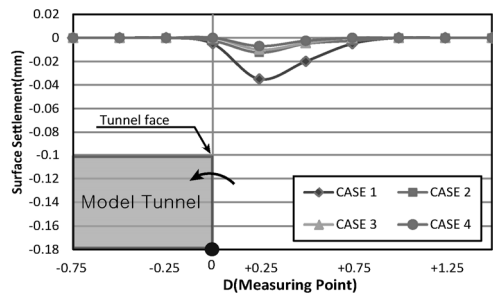
굴진면 변위 $0.5\epsilon_a$ 에서 지표침하는 토피고0.5D인 CASE 1에서만 발생하였다. 굴진면을 기준으로 $-0.25D \sim +1.00D$ 범위내에서 발생하고 굴진면 전방 $+0.25D \sim +0.50D$ 위치에서 변화폭이 가장 크며 굴진면 후방에서는 적게 발생하였다(Fig. 12(a)).

굴진면의 한계변위인 $1.0\epsilon_a$ 에서 지표침하는 모든 실험조건에서 발생하였다. 토피고가 가장 낮은 CASE 1에서 가장 크게 발생하고 CASE 2~CASE 4는 침하량이 유사하고 작은 크기로 발생하였다. CASE 1에서는 지표 침하영역이 $-0.25D \sim +1.00D$ 범위내로 가장 넓고 토피고가 증가할수록 지표침하 영역은 좁아졌다. 최대 침하구간은 공통적으로 굴진면을 기준으로 $+0.25D$ 위치에서 발생하였다(Fig. 12(b)).

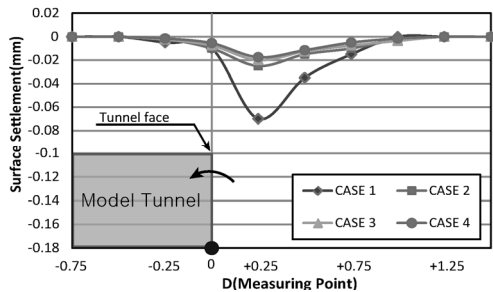
지표침하 경향을 보다 명확히 파악하기 위해 굴진



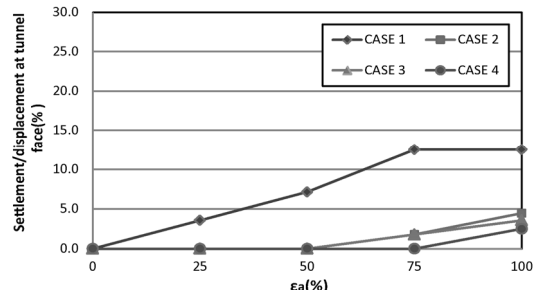
(a) Settlement (Face displacement $0.50\epsilon_a$)



(b) Settlement (Face displacement $1.00\epsilon_a$)



(c) Settlement (Face displacement $2.00\epsilon_a$)



(d) Relation between settlement and tunnel face displacement

Fig. 12. Surface settlement

면 한계변위 이상의 변위인 $2.0\epsilon_a$ 에서 지표침하를 분석하였다(Fig. 12(c)). 토피고가 가장 낮은 CASE 1에서 침하량이 크고 토피고가 가장 큰 CASE 4에서 작게 발생하였다. 모든 실험조건에서 굴진면 $\sim 0.25D$ 의 위치에서 가장 큰 기울기로 침하가 발생하였다. 굴진면 변위가 한계변위 이상 발생하더라도 CASE 1에서는 지표침하 영역이 확대되지 않았으나 토피고가 가장 큰 CASE 4에서 지표침하 영역은 $-0.50D \sim +1.25D$ 의 범위로 확대되었다. 이는 Idinger et al. (2011)의 실험에서 지표침하 거동과 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 굴진면의 한계변위와 지표침하와의 관계를 파악하기 위해 지표침하와 굴진면 한계변위를 무차원화 하여 그 경향을 나타냈다(Fig. 12(d)). 지표침하는 굴진면 한계변위에서 굴진면 변위의 2.5~12.5%로 발생하였다. CASE 1은 굴진면 변위 발생과 함께 지표침하가 선형적으로 발생되고 CASE 2~CASE 4와 같이 토피고가 증가할수록 한계변위에 근접하여 침하가 시작되었다.

지금까지의 지표침하 경향분석을 통해 토피고가 낮은 경우는 지표까지 연장되는 파괴 형태를 나타내며 침하영역이 제한적인 것을 알 수 있었다.

토피고가 높은 경우는 지반내에서 파괴영역이 형성되고 굴진면 한계상태 이후에는 파괴영역이 지반내에서 점차 확대되고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

굴진면의 변위형태는 다양하게 발생할 수 있으며 변위형태에 따라 터널 종방향 하중전이에 대한 특성을 연구한 사례가 드물다. 따라서 본 연구에서는 얇은 터널에서 굴진면 상부에서 큰 변위가 발생하는 조건에 대해 종방향 하중전이 특성을 실험적으로 연구하였다. 굴진면이 상부 큰 변위로 거동하는 조건에서 굴진면 전방지반이 한계상태에 도달될 때까지 변위를 발생시키면서 변위에 따라 터널 천단상부와 바닥하부

에 발생하는 하중전이 양상의 변화는 물론 토피고의 영향을 파악하였다. 이를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 굴진면에서는 변위가 증가함에 따라 작용하는 굴진면 토압은 크기가 감소하였다. 굴진면 토압은 변위 초기에는 급격한 기울기로 감소하였고 한계상태에 근접할수록 완만한 기울기로 극한치에 수렴하였다.
2. 굴진면 전방지반은 토피고에 무관하게 굴진면 변위가 일정한 크기에 이를 때에 한계상태에 도달하였다. 굴진면 토압의 감소율은 토피고가 증가할수록 크며, 토피고가 $1.5D$ 이상이면 일정한 값을 유지하였다.
3. 굴진면 변위가 발생되면 굴진면, 터널의 천단 상부와 바닥에 작용하는 토압은 증가하였다. 이는 굴진면의 이완이 진행됨에 따라 굴진면에 작용하던 하중이 종방향으로 전이되었기 때문으로 판단된다. 하중전이에 의한 토압증가는 하부지반에 비해 상부지반에서 크게 나타났다. 터널 천단상부와 바닥의 토압은 굴진면 변위가 작을 때 즉, 굴진면 전방지반이 탄성상태일 때 크게 증가하였고 굴진면 변위가 증가함에 따라 증가추세는 감소하였다.
4. 지반 내 종방향 하중전이는 토피고가 낮은 터널에서는 굴진면 부근에 집중되었으나, 토피고가 커질수록 하중전이 영역이 넓어지는 것으로 나타났다. 또한 터널 하부로의 하중전이는 토피고가 낮은 경우에 뚜렷하게 나타났다.
5. 굴진면의 토압은 굴진면 변위 초기에 급격히 감소하였으며 굴진면 변위가 커져서 지반이 한계상태에 근접하면 완만하게 감소하였다. 따라서 터널 종방향 하중전이는 굴진면 변위 초기 즉, 지반이 탄성상태일때 급격히 증가하며 굴진면 변위가 커서 전방지반이 한계상태에 근접하면 완만하게 증가하는 경향을 나타냈다.
6. 굴진면에서 변위에 의한 토압감소 추세가 터널

천단상부와 바닥의 토압 증가에 영향을 미치는 현상으로 미루어 볼 때 굴진면의 이완정도는 종방향 하중전이에 영향을 미치며 종방향 하중전이는 터널 상부에서 하부에 이르는 영역에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

References

1. Chambon, P., Corte, J.F. (1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil : stability of tunnel face", *J. of Geotech. Engng.* Vol. 120, No. 7, pp. 1148 -1165.
2. Kwon, O.Y., Choi, Y.K., Lee, S.D., Kim, Y.G. (2004), "Longitudinal Arching Characteristics Around the Face of a Soil-Tunnel with Crown and Race-Reinforcement", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 9, pp. 133-144.
3. Gnisen, R. (1989), *Numerical Methods, Developments in Geotechnical Engineering. 59A, Underground Structures Design and Instrumentation*, Elsevier, New York, pp. 84-128.
4. Idinger, G., Aklik, P., Wu, W., Borja, R.I. (2011). Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel. *Acta Geotechnica* 6, No. 2, pp. 105-117.
5. Lee, S.D. (2013), "Tunnel Mechanics", CIR publication, pp. 253-360.
6. Lee, S.D. (2014), "Soil Mechanics", CIR publication, pp. 344-346.
7. Lunardi, P. (2000), "The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils", *T&T International ADECO-RS Approach* May, pp. 3-30.
8. Terzaghi, K. (1936), "Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door", *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311
9. Yoo, C.S., Shin, H.K. (2000), "Investigation on the Behavior of Tunnel Face Reinforced with Longitudinal Reinforcements using Reduced-Scale Model Tests", *Tunnelling and Underground Space Space Association*, Vol. 2, No. 2, pp. 32-40.