터널 굴진면 전방에 위치한 연약대 폭과 이격거리에 따른 이완영역에 대한 실험적 연구

함현수[1] · 이상덕[2*]

[1]정회원, 아주대학교 일반대학원 건설교통공학과 박사과정
[2]정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수

Experimental study on the relaxation zone depending on the width and distance of the weak zone existing ahead of tunnel face

Hyeon Su Ham[1] · Sang Duk Lee[2*]

[1]Graduate Student, Dept. of Civil and Transportation Engineering, Ajou University
[2]Prof. Dr-Ing., Dept. of Civil System Engineering, Ajou University

***Corresponding Author :** Sang Duk Lee, lsangduk@ajou.ac.kr

Abstract

When a weak zone exists ahead of tunnel face, the stress in the adjacent area would increase due to the longitudinal arching effect and the stability of the tunnel is affected. Therefore, it is critical to prepare a countermeasure through the investigation of the frontal weakness zone of the excavated face. Although there are several researches to predict the existence of weak zone ahead of tunnel face, such as geophysical exploration, numerical analysis and tunnel support, lack of studies on the relaxation zone depending on the width or distance from the vulnerable area. In this study, the impact of the weak zone on the formation of the relaxation zone was investigated. For this purpose, a series of laboratory test were carried out varying the width of the weak zone and the separation distance between tunnel face and weak zone. In the model test, sand with a water content of 3.8% was used to form a model ground. The model weak zone was constructed with dry sand curtains. The tunnel face was adjusted to allow a sequential excavation of upper and lower half part. load cells were installed on the bottom of the foundation and the tunnel face and measuring instruments for displacement were installed on the surface of the model ground to measure the vertical stress and surface displacements due to tunnel excavation respectively. The test results show that the width of weak zone did not affect the ground settlement while the ground subsidence drastically increased within 0.25D. The vertical stress and horizontal stress increased from 0.5D or less. In addition, the longitudinal arching effect is likely within the 1.0D zone ahead of the tunnel face, which may reduce the vertical stress in the ground following tunneling direction.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(5)855-867(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.5.855

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received July 12, 2018
Revised August 3, 2018
Accepted August 9, 2018

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

Keywords: Tunnel face, Weak zone, Longitudinal arching, Relaxation, Test model

초 록

터널 굴진면 전방에 연약대가 존재할 때에는 종방향 아칭에 의해서 굴진면 직전영역에 응력이 증가되어 터널의 안정성이 영향을 받는다. 따라서 굴진면 전방에 연약대 존재 여부 및 연약대의 특성을 파악하여 이에 대한 대비책을 마련하는 것이 중요하다. 굴진면 전방 연약대의 예측 방법은 물리탐사 및 수치해석적 방법과 터널지보 및 보강방안에 대한 연구는 많이 이루어 졌으나 굴진면 전방 연약대의 폭과 이격거리에 따른 이완영역에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 굴진면 전방에 연약대 존재 시 연약대의 폭과 이격거리에 따른 이완영역에 대하여 실내모형실험을 통해 규명하였다. 모형시험기에 주문진 자연사를 이용하여 함수비 3.8%로 모형 원지반을 조성하였으며 모형 연약대는 모형 원지반과 같은 자연건조 상태의 주문진 자연사를 샌드커튼 방식으로 강사하여 조성하였다 연약대 폭과 굴진면과 연약대 간 이격거리를 변화시키며 실험을 수행하였다. 모형시험기는 상하반단면 굴착이 구현 가능하도록 제작하였으며, 토조 바닥에 로드셀을 설치하고 지표에 변위계를 설치하여 터널굴착에 따른 연직응력 및 지표변위를 측정하였다. 지표침하는 연약대의 폭에 상관없이 굴진면과의 이격거리가 0.25D 이내에서 급격히 증가하였고, 수직응력 및 수평응력 또한 이격거리가 0.5D 이내에서부터 증가하는 경향이 나타났다. 실험결과 종방향 아칭의 영향은 터널 전방 1.0D 영역 내부터 형성된다고 판단된다.

주요어: 굴진면, 연약대, 종방향아칭, 이완영역, 모형시험

1. 서 론

우리나라는 전 국토의 70%가 산악지형으로 형성되어 있어 이용 가능한 지상 토지 면적이 협소하다. 사회가 비약적으로 발전함에 따라 필요 공간이 증가하는 반면, 지상공간의 제한으로 인해 산악지역 및 도심지의 지하공간 활용이 증가하고 있다.

NATM이나 TBM 공법으로 터널을 시공할 경우 현장의 지질구조 및 대상지반의 공학적 특성을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 연약대나 단층 파쇄대를 포함하는 암반에 터널을 굴착할 경우에는 지질특성에 의해 예상치 못한 터널의 변형이 유발되어 터널이 불안정해질 수 있으므로 이를 사전에 예측하여 적절한 지보 및 보강 계획을 수립해야 한다.

국내·외에서 파쇄대 등의 연약대로 인한 터널 거동과 관련된 많은 연구가 진행되어왔다. Schubert and Steindorfer (1996)는 터널이 단층대를 지나는 경우 터널의 종방향 변위와 천단변위의 비율 분석을 통하여 굴진면 전방 상태를 예측하였고, 터널 굴진면 전방의 강성 변화의 예측을 위한 공간 변위벡터 방향성을 3차원 수치해석을 통해 확인하였다. Kim et al. (2004)은 3차원 절대변위 분석에 의해 추정된 연약대 위치와 TSP탐사로 추정한 위치를 연계하여 현장 적용성 검증을 시도하였다. 현장에서 계측을 통한 거동확인을 하는 방법에 대하여 적극적인 활용 방법을 제안(Bang et al., 2007; ITA WG2, 2011)하기도 하였고, 광파 측정기를 이용한 3차원 계측법이 연구되었다

www.kci.go.kr

(ITA-CET, 2009). 굴진면 보강에 대한 연구로는 Kwon et al. (2004)은 굴진면 천단 및 수평보강에 따른 굴진면 전후의 종방향 아칭 특성에 대하여 연구하였고, 전방 연약대와 조우 시 지보패턴을 상향하여도 붕괴의 위험이 있다는 연구(Ribeiro e Sousa, 2004)가 진행되었다. You and Park (2014)는 연약대의 주향조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 굴진면 전방 연약대의 폭과 이격거리에 대하여 굴진면 응력과 지반거동에 대한 실험적 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 실내모형실험을 수행하여 굴진면 전방에 연약대가 존재하는 경우 연약대의 폭 및 굴진면과의 이격거리에 따른 터널 주변지반의 거동을 분석하였다.

모형실험은 1,130 mm (L) × 870 mm (H) × 300 mm (W) 크기의 토조에서 상·하반 분리굴착을 구현 가능한 시스템을 적용하여 수행하였다. 토조의 바닥과 굴진면에 로드셀을 설치하여 터널 주변지반의 응력을 측정하고, 지표에는 LVDT를 설치하여 지표침하를 확인하였다. 터널직경(D)을 기준으로 연약대의 폭을 0.5D, 1.0D, 1.5D로 하고, 굴진면과의 이격거리를 0.0D, 0.25D, 0.5D, 1.0D로 변화하여 실험을 수행하였다.

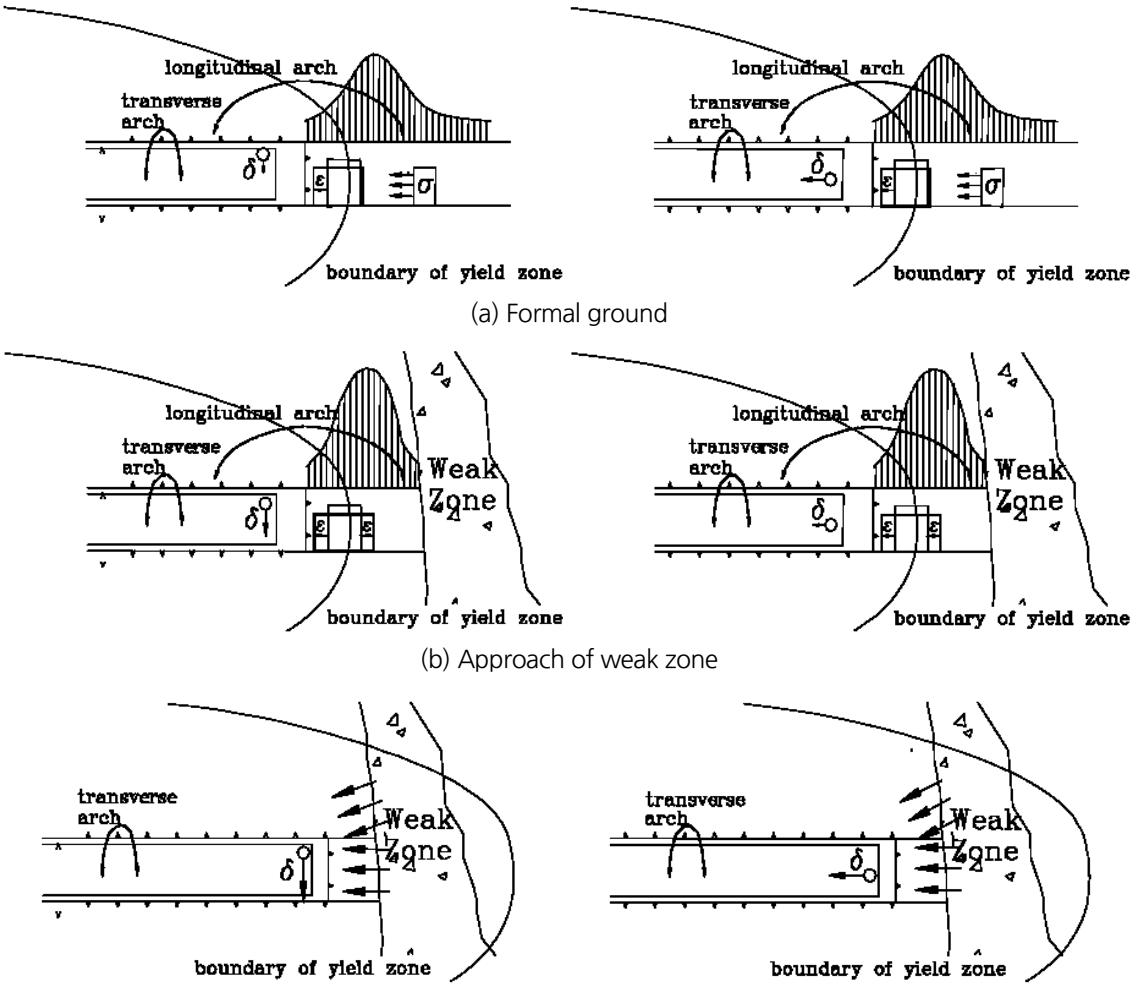
2. 이론적 배경

아칭(arching)은 지반의 국부적 변형에 의하여 토압이 변위가 발생되지 않는 쪽으로 전이되는 현상으로 지하구조물이 성립될 수 있는 가장 중요한 원리이다. 초기 응력상태인 지반에 터널을 굴착하면, 횡방향은 물론 종방향으로 아칭효과(arching effect)에 의해 굴진면 주변으로 응력이 재배치가 되고, 이러한 응력 재배치 현상은 터널의 안정성에 중요한 역할을 하게 된다. 터널 시공 중에 굴진면 전방에 파쇄대와 같은 연약대가 있는 경우에는 이에 의해 영향을 받아 응력재배치가 이루어져서 굴진면과 연약대 사이에 응력이 집중되어 굴진면에 인접한 부위에서 변위가 급격히 증가하게 된다. 따라서 사전에 굴진면 전방의 연약대를 감지하지 못하는 경우 터널의 붕괴 또는 붕락이 발생 할 수 있다.

Schubert and Steindorfer (1996)는 Fig. 1과 같이 암반지반에서 굴진면 전방에 연약대가 존재할 때 종방향 아칭효과에 의해 종방향 변위가 달라질 수 있음을 제안하였다. 즉, 균질한 암반에서의 터널막장전방의 응력은 축방향 아칭효과에 의해 증가하게 되고, 이 증가된 응력에 의해 막장전방에서 터널안쪽으로 축방향 변위가 발생하게 된다. 그러나 굴진면 전방에 연약대가 존재하면 증가된 응력이 구속을 받지 못하여 굴진면 안쪽의 응력은 작아지며 축방향 변위도 작아진다.

토사지반인 경우에도 굴진면 전방에 연약대가 분포하면 굴진면 변위가 크게 발생할 가능성이 크고, 이로 인해 터널 굴착시 굴진면 근처의 연직 및 수평응력이 비정상적인 아칭이 발생하여 터널굴착에 불리한 상태가 된다. 굴진면 변위가 크게 발생되는 경우에는 굴진면을 보강하여 터널굴착에 유리한 지반아칭 형성을 유도하여야 터널을 안전하게 굴착 할 수 있다.

www.kci.go.kr



(a) Formal ground

(b) Approach of weak zone

(c) Close to weak zone

Fig. 1. Changes in vertical, longitudinal, and horizontal displacement depending on the arching effect at the approach of weak zone

3. 모형시험

3.1 모형지반 특성

지반 강성이 작을수록 터널굴착에 의한 영향범위가 넓고 굴착공간의 자립이 어려울 수 있다(Lee, 2013). 지반 강성에 영향을 미치는 요인 중 점착력은 매우 작더라도 터널을 단시간 자립시킬 수 있다. 이 점착력은 흙입자 사이에서의 접촉면에 있는 물의 표면장력에 의해서 생기는 겉보기 점착력이다. 이러한 원리를 모형실험에 적용하여 원지반은 습윤 상태의 모래를 사용하여 겉보기점착력을 유도하여 조성하였고, 연약대 지반은 마른모래로 조성하였다.

www.kci.go.kr

원지반, 연약대 모두 입도가 균등한 모래를 사용하여 조성하였고, 통일분류상 SP로 분류되었다(Lee, 2017). 한국산업규격(KS)에 의한 기본 물성시험을 수행하였으며, 모형지반의 기본물성은 Table 1과 같다.

Table. 1. Results of laboratory tests of the soil

Category	Maximum dry unit weight (γ_{dmax}, kN/m^3)	Minimum dry unit weight (γ_{dmax}, kN/m^3)	Unit weight (γ_d)	Relative density (D_r, %)	Moisture content (%)	Internal friction angle (φ , °)	Cohesion (kPa)
Ground	SP, 16.76	14.21	16.43	87	3.8	30	12.8
Weak zone	SP, 16.76	14.21	16.28	82	-	27	-

3.2 모형시험기

원지반은 일정한 함수비(3.8%)의 습윤 모래를 일정하게 다지고, 연약대는 샌드커튼 방식으로 건조한 모래를 균일하게 포설하여 모사하였으며, 굴진면은 상하 반단면 굴착이 가능하도록 하고 로드셀을 6단으로 장착하여 굴진면에 작용하는 수평토압과 그 분포를 측정할 수 있도록 하였으며, 지표에 변위계를 설치하여 지표침하를 측정하였다. 모형지반과 접하는 터널 상부와 바닥판은 모형지반 내부마찰각과 같은 마찰각을 갖도록 샌드페이퍼를 부착하였다(Fig. 2).

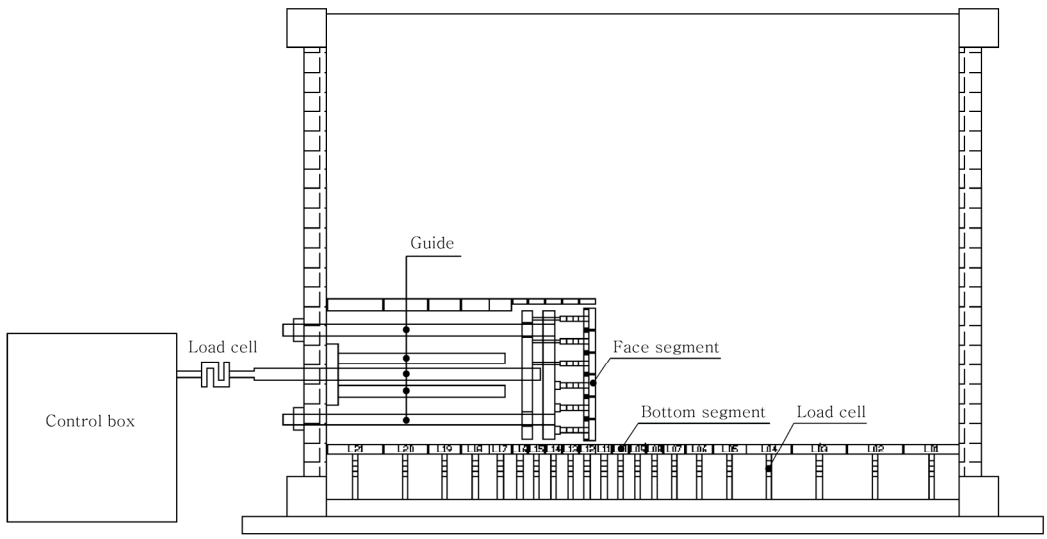


Fig. 2. Test model box

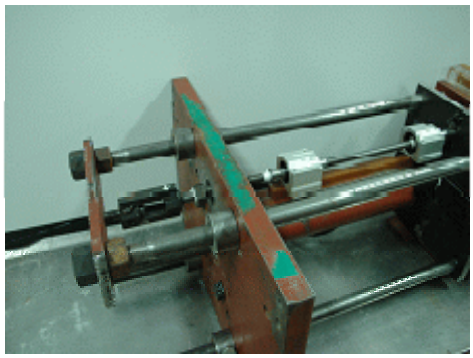
굴진면의 상반과 하반을 0.5 mm/min의 속도로 각각 개별적으로 후퇴 가능하도록 시스템을 제작하여 상하반단면 굴착을 모사할 수 있도록 하였다.

www.kci.go.kr

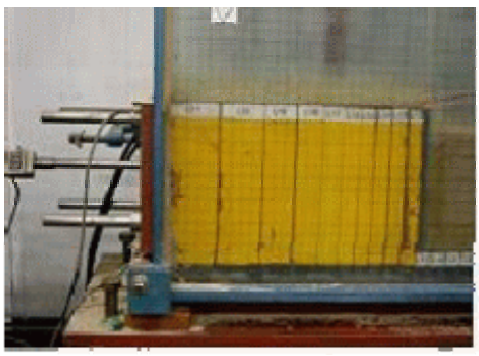
터널은 굴진면을 6개의 Segment로 조립하여 각 Segment는 수평토압을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 상부 3개, 하부 3개의 Segment씩 이동이 가능하도록 제작하였고, 강봉으로 고정하고 롤러를 부착하여 수평이동이 용이하도록 제작하였다.

터널 굴진면 전·후방에는 연직토압을 측정하기 위하여 토조하부에 토압판을 설치하고 각각의 토압판에는 로드셀을 설치하였다. 토압판에는 샌드페이퍼를 부착하여 원지반과 동일한 마찰조건을 모사하였다(Fig. 3).

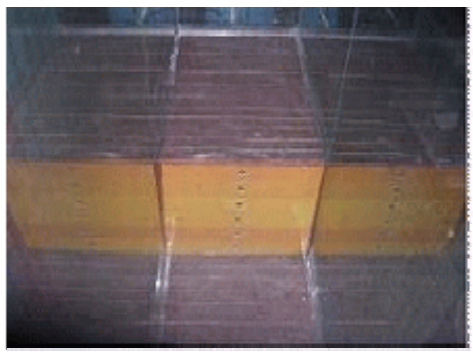
(a) Tunnel Faces



(b) Guide roller



(c) Tunnel side



(d) Friction condition of bottom

Fig. 3. Model tunnel

3.3 실험 방법

본 연구에서는 연약대의 위치에 따라 터널 상하 분할굴착시 굴진면의 수평토압과 주변지반의 거동을 살펴보기 위하여 다음의 순서대로 실험을 수행하였다.

① 지반조성 전 계측기를 초기화 한다.

② 원지반은 일정한 함수비의 젖은 모래를 다짐하여 조성하고 연약대는 샌드커튼방식으로 강사고를 일정하게 유지하며 지반을 조성한다. 일정 높이마다 염색사를 포설하여 육안으로 거동을 확인할 수 있게 한다.

www.kci.go.kr

③ 최종 높이까지 지반을 조성한 뒤 지표 침하 및 지중변위 계측을 위한 계측장치를 설치한다.
④ 상부 및 하부굴착은 일정한 속도(0.5 mm/min)으로 후퇴하여 굴착을 모사한다.

3.4 실험 변수

본 연구에서는 연약대 천단 보강, 연약대 폭과 굴진면과의 이격거리가 터널 굴착시 굴진면에 미치는 영향을 검토하기 위하여 연약대의 폭을 0.5D, 1.0D, 1.5D로 하고 연약대와 굴진면간 이격거리를 변화시켜가며 실내모형실험을 수행하였다(Table 2).

Table 2. Cases of model tests

Width of weak zone	Distance of weak zone	Cases
0.5D	0.00D (0 mm)	F05L000
	0.25D (60 mm)	F05L025
	0.50D (120 mm)	F05L050
	1.00D (240 mm)	F05L100
1.0D	0.00D (0 mm)	F10L000
	0.25D (60 mm)	F10L025
	0.50D (120 mm)	F10L050
	1.00D (240 mm)	F10L200
1.5D	0.00D (0 mm)	F15L000
	0.25D (60 mm)	F15L025
	0.50D (120 mm)	F15L050
	1.00D (240 mm)	F15L100

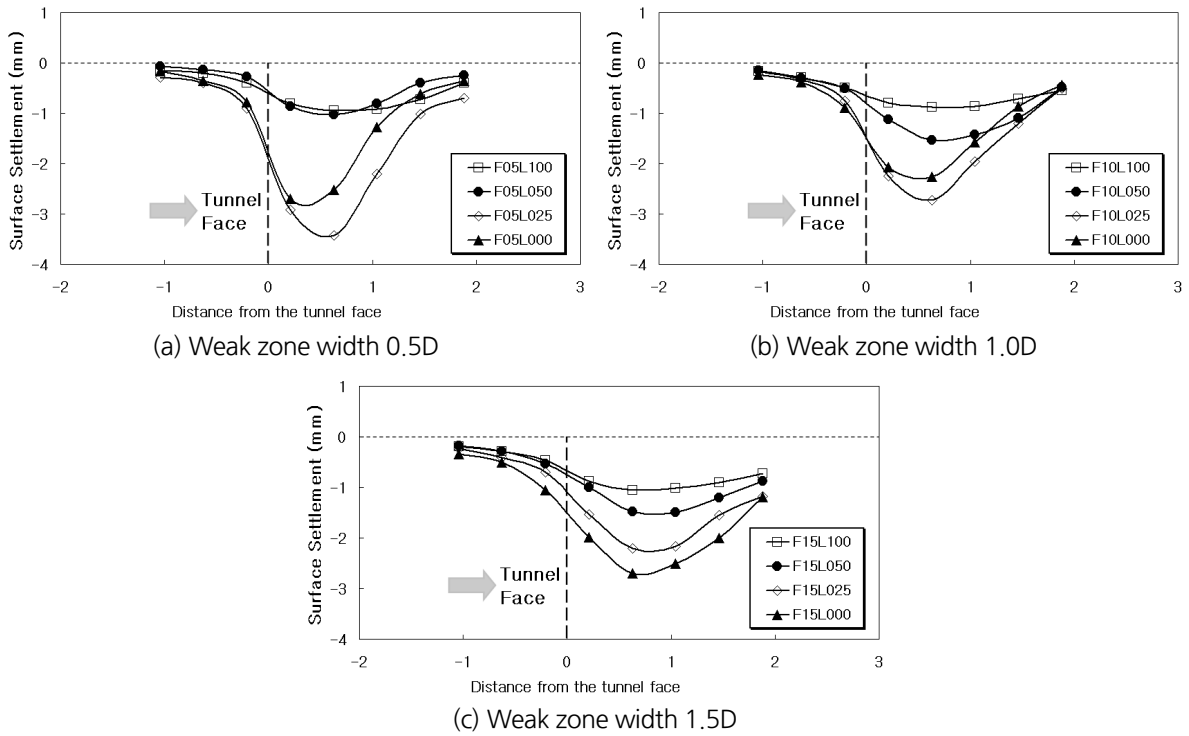
4. 실험결과

4.1 지표침하

연약대 폭 0.5D, 1.0D 1.5D 모두 굴진면 후방에서는 급격한 기울기의 침하경향이 나타났고, 굴진면 전방에서는 굴진면 후방보다 완만한 기울기의 침하경향이 발생하며 넓은 범위의 침하분포가 나타났다. 침하량은 연약대 폭이 작은 경우에 더 크게 발생하였고, 연약대가 넓어질수록 적어지지만 발생 범위가 넓어졌다.

연약대와 굴진면과의 이격거리에 따른 지표침하는 연약대의 폭이 작을수록, 굴진면과의 이격거리가 작을수록 증가하는 것으로 나타났다. 연약대 폭 0.5D와 연약대 폭 1.0D는 굴진면에 근접 할수록 지표침하량이 증가하지만, 이격거리가 0.25D일 때 0.0D보다 큰 침하가 발생하였다. 연약대 폭 1.5D는 0.5D, 1.0D와 달리 굴진면이 연약대에 근접 할수록 지표침하량이 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4).

www.kci.go.kr



(a) Weak zone width 0.5D

(b) Weak zone width 1.0D

(c) Weak zone width 1.5D

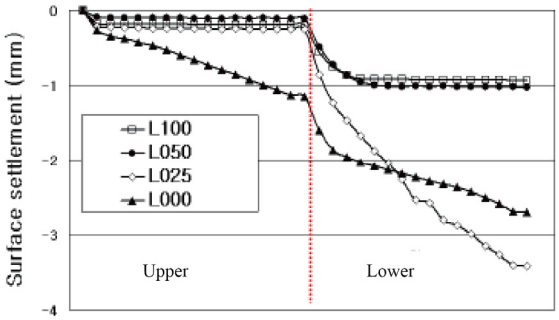
Fig. 4. Settlement of surface depending on the weak zone width and distance between tunnel face and weak zone

터널이 연약대에 근접할수록 연약대의 최대 지표침하량은 증가하였다. 하반 굴착시 연약대 폭이 0.5D일 경우, 연약대와의 이격거리가 0.5D 범위 이상에서는 지표변위가 수렴하지만 이격거리가 0.25D 이내에서는 지표변위가 수렴하지 못하여 원지반이 자립하지 못하고 붕괴되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5).

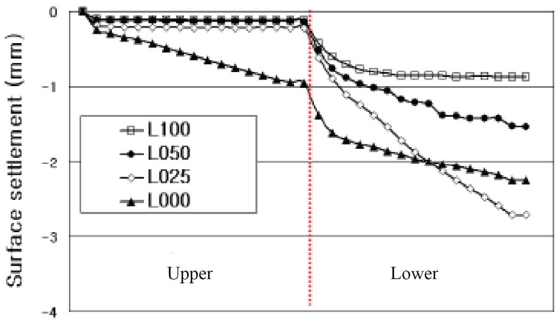
연약대 폭이 1.0D, 1.5D인 경우 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.5D 이상에서 하반 굴착시 지표 침하가 수렴하는 양상이 나타나지만, 이격거리가 0.25D 이내에서는 지표침하가 수렴하지 못하고 계속 증가하였다. 따라서 연약대 폭에 상관없이 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.25D 이내에서는 연약대의 영향을 받아 굴진면이 자립하지 못하였다.

터널이 연약대에 근접할수록 최대 지표 침하가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하반 굴착시 연약대 폭이 0.5D일 경우, 연약대와의 이격거리가 0.5D 범위 이상에서는 지표변위가 수렴하지만 이격거리가 0.25D 이내에서는 지표변위가 수렴하지 못하였다. 연약대 폭이 1.0D, 1.5D인 경우 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.5D 이상에서 하반 굴착시 지표 침하가 수렴하는 양상이 나타나지만, 이격거리가 0.25D 이내에서는 지표침하가 수렴하지 못하고 계속 증가하였다. 따라서 연약대 폭에 상관없이 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.25D 이내에서는 굴진 시 연약대의 영향을 받아 굴진면이 자립하지 못한다. 연약대와 굴진면의 이격거리별 최대 지표침하는 Fig. 6과 같다.

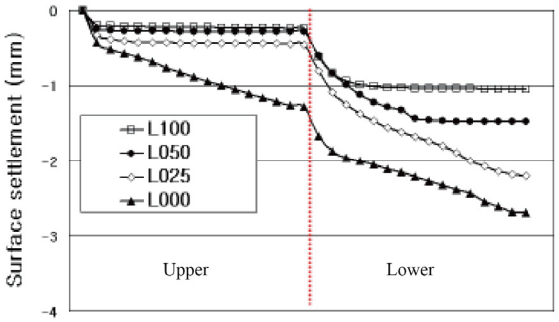
www.kci.go.kr



(a) Weak zone 0.5D



(b) Weak zone 1.0D



(c) Weak zone 1.5D

Fig. 5. Maximum settlement of Surface depending on the weak zone width and distance between tunnel face and weak zone

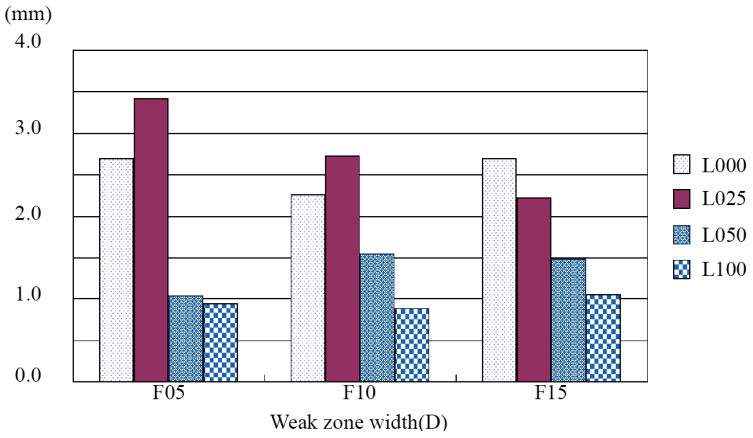
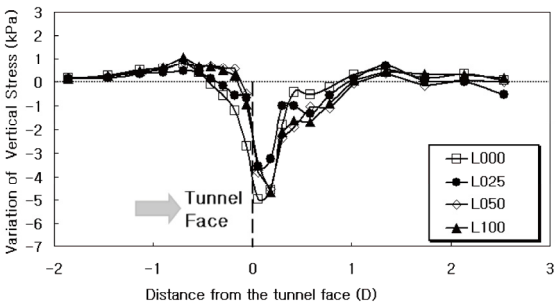


Fig. 6. Comparison of maximum surface settlements

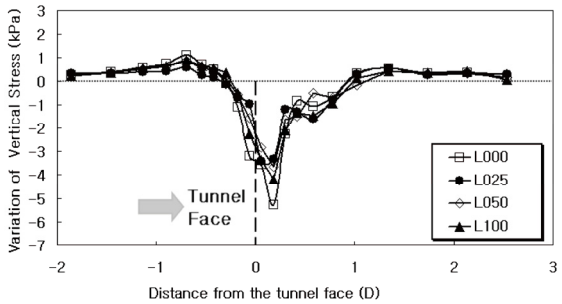
www.kci.go.kr

4.2 종방향 연직응력

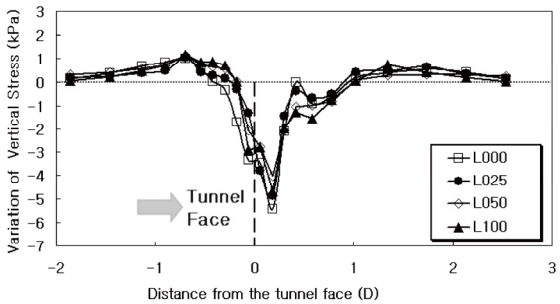
상하반 굴착이 완료 된 후의 연직응력과 굴착 전 지반의 연직응력과의 변화는 Fig. 7과 같다. 터널굴착에 따른 연직응력은 굴진면 전방에 분포하는 연약대의 폭과 연약대에 근접할수록 감소하였다. 굴진면 전방 터널직경 만큼의 범위에서 연직응력이 변화하는 것으로 나타났다. 연약대 폭이 넓어질수록 굴진면 전방의 응력이 감소하였으며, 연약대 폭이 넓어질수록 응력의 감소하는 양도 증가하였다. 그러나 연약대 폭에 상관없이 굴진면 전방 약 1.0D 범위까지는 응력이 감소하였고, 그 이후에는 다시 응력이 증가하는 경향이 나타났다.



(a) Weak zone width 0.5D



(b) Weak zone width 1.0D



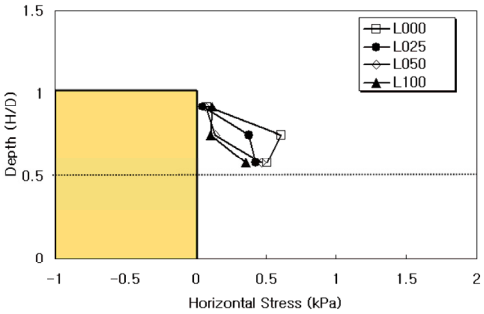
(c) Weak zone width 1.5D

Fig. 7. Longitudinal stress of tunnel

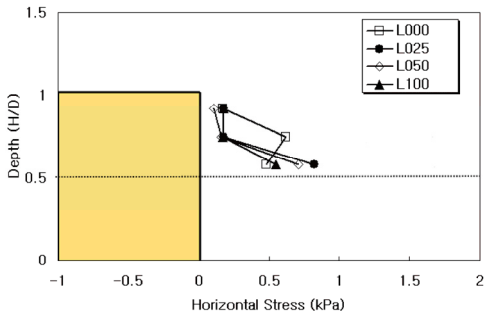
4.3 굴진면 수평응력

본 실험은 응력해방 조건을 이용하여 모사하여 하반은 굴착시 응력이 해방되며, 선 굴착된 상반은 수평응력이 작용하며 하반 굴착이 완료된 후 상반에 작용하는 수평응력에 대하여 분석하였다. 하반 굴착이 완료된 후에 굴진면 상반에 작용하는 수평응력은 굴진면과 연약대의 이격거리가 근접될수록 증가하였다(Fig. 8). 연약대 폭이 큰 경우 굴진면과 이격거리가 가까워짐에 따라 수평응력의 증가도 더 뚜렷한 것으로 나타났다. 굴진면에 작용하는 수평응력은 연약대와 굴진면의 이격거리가 0.25D일 때 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 지표변위에서 나타난 것처럼 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.25D 이내가 되면 굴진면과 연약대 사이의 지반은 자립하지 못하는 것으로 판단된다.

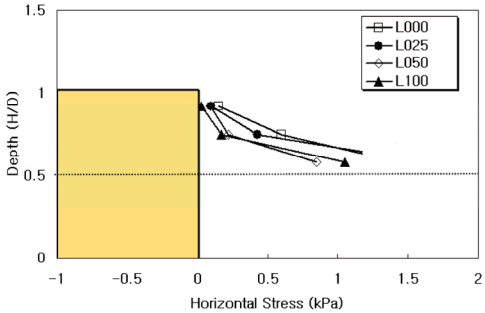
www.kci.go.kr



(a) Weak zone width 0.5D



(b) Weak zone width 1.0D



(c) Weak zone width 1.5D

Fig. 8. Horizontal stress of tunnel face

Fig. 9는 굴진면과 연약대 폭의 이격거리에 따른 굴진면 수평응력의 합을 나타냈다. 최대 지표변위와 마찬가지로 굴진면에 작용하는 수평응력은 연약대가 근접할수록 크게 나타났다. 지표변위에서 나타난 것과는 다르게 연약대의 이격거리가 0.25D에서 굴진면에 작용하는 수평응력이 크게 증가하지는 않았지만 이격거리 0.5D, 1.0D 보다는 이격거리 0.25D에서 많은 증가를 보여 연약대가 굴진면에 근접한 것을 판단할 수 있다. 또한 연약대 폭이

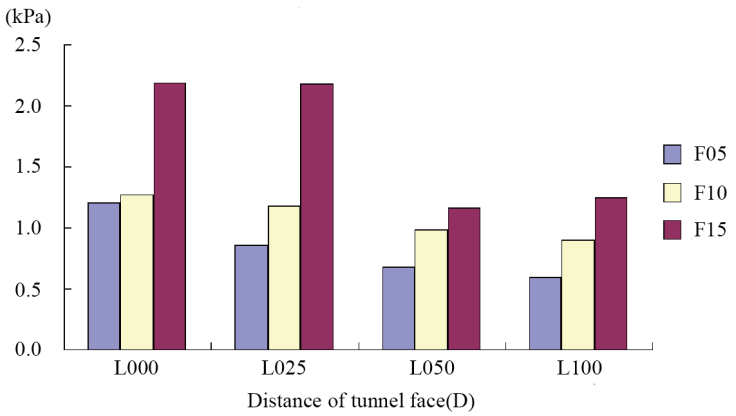


Fig. 9. Comparison of horizontal stress of tunnel face

www.kci.go.kr

1.5D인 경우는 이격거리가 0.25D일 때 급격한 증가를 보여 폭이 연약대의 폭이 넓은 경우 굴진 시 주의해야 할 것으로 판단된다.

연약대 폭이 1.0D인 경우보다 폭이 1.5D일 때에는 굴진면과 이격거리가 가까워짐에 따른 굴진면에 작용하는 수평응력은 뚜렷하게 증가하였으며, 폭 0.5D일 때 보다 80% 증가한 수평응력이 굴진면에 작용하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약대를 통과하여 터널을 굴착하기 위하여 연약대의 폭과 이격거리에 따른 터널 및 주변지반의 거동을 파악하기 위하여 토사지반을 이용하여 실내모형실험을 수행하여 분석하였다.

1. 터널 굴진면 전방에 연약대가 존재 시 터널을 굴착할 때에 지표침하는 굴진면 전방 연약대 폭이 좁을수록 크게 발생하며, 연약대 폭이 넓어질수록 감소하지만 발생하는 범위는 증가하였다.
2. 터널 굴진면 전방에 연약대가 존재 시 터널을 굴착할 때에 지표침하는 연약대의 폭에 상관없이 굴진면과의 이격거리가 0.25D 이내에서 급격하게 증가하였다. 따라서 굴진면 전방에 연약대가 존재하여 터널을 보강할 경우 원지반 자립이 가능한 굴진면 전방 0.5D에서 수행되어야 한다고 판단된다.
3. 굴진면이 연약대에 근접하게 되면 굴진면에 작용하는 수평응력이 증가하며, 그 크기가 연약대 폭이 클수록 증가하였다. 굴진면에 작용하는 수평응력은 굴진면과 연약대의 이격거리가 0.5D에서 0.25D로 근접 할 때 연약대 폭에 따라 0.5D는 연약대 폭이 0.5D인 경우는 26.47%, 폭 1.0D인 경우는 20.41% 폭이 1.5D인 경우는 87.93%로 증가하였다.
4. 연약대와 굴진면과의 이격거리가 좁은 경우(0.25D 이내)는 굴진면 전방에서 연직응력이 감소하고 응력이 회복 되다가 연약대를 지나면서 연직응력이 다시 한 번 감소와 회복이 반복되었다. 좁은 지반에서 아칭이 발생하다 초기응력으로의 회복되는 현상이 한 번 더 반복되어 나타났다.
5. 터널을 굴착한 경우 굴진면 전방 1.0D 이내의 범위에 작용하는 연직응력은 감소하는 것으로 나타났으며, 이로부터 판단하면 종방향아칭의 영향이 굴진면 전방 1.0D부터 형성된다고 판단된다.

References

1. Bang, J.H., Kim, K.Y., Jong, Y.H. (2007), “Development of 3D absolute displacement monitoring system and its application at the stage of tunnel construction”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 3, pp. 229-240.
2. ITA Working Group No.2 Report (2011), Monitoring and Control in Tunnel Construction, pp. 23.
3. ITA-CET (2009). Training Course Material - Tunnelling in Hot Climate Country, Monitoring of Tunnels, Riyadh.
4. Kim, Y.S., Kim, C.D., Jung, Y.C., Lee, J.S., You, K.H. (2004), “A study on analysis method for the

www.kci.go.kr

prediction of changes in ground condition ahead of the tunnel face", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 6, No. 1, pp. 71-83.

5. 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 face-reinforcement", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 9, pp. 133-144.
6. Lee, S.D. (2017), Soil mechanics, CIR Publication, Seoul, pp. 77-92.
7. Lee, S.D. (2013), Tunnel mechanics, CIR publication, Seoul, pp. 826.
8. Ribeiro e Sousa, L. (2004), "Learning with accident and damage associated to underground works", Geotechnical Risk in Rock Tunnels, Campos e Matos, A., Ribeiro e Sousa, L, Kleberger, J., and Lopes Pinto, P. (Editors), Talyor & Francis.
9. Schubert, W., Steindorfer, A. (1996), "Selective displacement monitoring during tunnel excavation", Felsbau, Vol. 14, No. 2, pp. 93-98.
10. You, C.S., Park, J.G. (2014), "Deformation behavior of tunnels crossing weak zone during excavation - numerical investigation", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 4, pp.373-386.

www.kci.go.kr