

# 얕은터널에서 측벽파괴시 주변지반 거동에 대한 실험적 연구

박찬혁<sup>1\*</sup> · 이상덕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수

## Experimental study on the behavior of the adjacent ground due to the sidewall failure in a shallow tunnel

Chan Hyuk Park<sup>1\*</sup> · Sang Duk Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Dept. of Civil Systems Engineering, Ajou University

<sup>2</sup>Professor Dr-Ing., Dept. of Civil Systems Engineering, Ajou University

\*Corresponding Author : Chan Hyuk Park, parkch22222@naver.com

### Abstract

Nowadays, the construction of tunnels with a shallow depth drastically in urban areas increases. But the effect of sidewall displacement in shallow tunnel on its behavior is not well known yet. Most studies on the shallow tunnel have been limited to the stability and the failure of the tunnel and the adjacent ground in plane strain state. Therefore, the model tests were conducted in a model ground which was built with carbon rods, in order to investigate the impact of the tunnel sidewall displacement on the lateral load transfer to the adjacent ground. The lateral displacement of the tunnel sidewall and the load transferred to the adjacent ground were measured in model tests for various overburdens (0.50D, 0.75D, 1.00D, 1.25D). As results, if the cover depth of tunnel was over a constant depth (0.75D) in a shallow tunnel, the tunnel sidewall was failed with a constant shape not depending on the tunnel cover depth and also not affected by the opposite side of the wall. But, if the cover depth of tunnel was under a constant depth (0.75D), the failure of the tunnel sidewall could affect the opposite sidewall. In addition, if the displacement of tunnel sidewall with 50% of the critical displacement occurred, the tunnel failure was found to be at least 75%. However, additional studies are deemed necessary, since they may differ depending on the ground conditions.

**Keywords:** Shallow tunnel, Tunnel sidewall failure, Ground subsidence, Load transfer in tunnel, Load of tunnel crown

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
19(6)871-885(2017)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.6.871>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 15, 2017

Revised September 29, 2017

Accepted October 11, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

최근 도심지 등에서 활용도가 높아지고 있는 얇은터널은 구조물에 인접하여 얇은 심도에 건설하므로 그 거동에 따른 주변지반 변위에 대한 연구는 아직 충분하지 않다. 특히, 얇은터널의 측벽에서 변위가 일어나면 주변지반의 이완형태 및 주변지반으로 전이되는 하중의 분포와 크기가 영향을 받을 수 있다. 그러나 지금까지 터널의 측벽변위에 관련된 연구는 많지 않고 그나마 터널과 주변지반을 평면변형률조건(plane strain state)으로 단순화하고 터널 전체의 안정이나 파괴메커니즘 규명에 대한 연구에 국한되어 있고, 터널 측벽일부의 변위에 따른 영향을 연구한 사례는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 터널측벽의 변위가 터널 주변 횡방향 하중전이에 미치는 영향을 규명하였다. 이를 위하여 탄소봉으로 지반을 조성하고 알미늄으로 터널의 형상을 모형화하여 터널의 한쪽측벽에 수평으로 변위를 주어 토피(0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D)를 변화시키면서 모형시험을 수행하였고, 일부 측벽의 파괴에 따른 주변지반의 하중전이 거동을 분석하였다. 연구 결과, 얇은터널에서 토피가 일정깊이(0.75D) 이상이면 토피고에 무관하게 일정한 형태로 터널 측벽파괴가 발생하였고 반대측벽에 영향을 미치지 않았다. 그러나, 토피고가 일정깊이 이하일 경우에는 한쪽 측벽의 파괴가 반대쪽 측벽에까지 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 터널 굴착시 측벽변위가 예상변위량의 50% 발생하면, 터널 파괴는 75% 이상 진행되는 것을 발견하였다. 그러나, 지반조건에 따라 차이를 보일 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**주요어:** 얇은터널, 측벽파괴, 지표침하, 하중전이, 천단하중

## 1. 서론

터널시공시 굴착면 부근 지반은 굴착 직후 가장 불안정한 상태가 되었다가 점차 안정 되어간다. 무지보 상태의 터널 굴진면은 일시적으로 자립이 가능하여 터널을 굴착할 수 있는데, 이는 터널 주변지반의 응력이 재배치되는 하중전이 효과에 기인한 것이다. 터널의 하중전이는 종방향과 횡방향으로 발생되며, 이 중 터널 종방향 하중전이에 대한 연구는 보조공법을 통한 종방향 아칭 효과의 활용, 굴진면의 파괴거동, 안정성 평가 등 다양하게 이루어져 왔으나, 횡방향 하중전이에 대해서는 터널과 주변지반을 평면변형률조건으로 단순화한 해석(Terzaghi, 1936; Vardoulakis et al., 1981; Tanaka and Sakai, 1993; Adachi et al., 1995)이 주를 이루고 실제의 터널 형상을 이용한 굴착면의 측벽변위 등 세부적인 연구가 거의 없는 실정이다. 얇은터널에서 측벽 일부가 파괴되면 굴진면 파괴시와 유사한 상황이 되어 될 수도 있으나, 터널의 횡단면과 종단면의 응력상태가 다르기 때문에 하중전이 등의 차이를 보일 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 도심지 지하도로를 가정하여 토피별로 얇은터널 측벽 일부에 변위를 주어 이로 인한 지표변위 등은 물론 터널주변 거동에 대해 모형시험을 수행하여 터널 측벽 일부 파괴에 따른 주변지반의 거동을 규명하였다.

## 2. 터널 굴진면의 안정 및 파괴거동

Chambon and Corte (1994)는 원심모형시험으로 연약 지반 터널의 굴진면 안정성에 관한 연구를 수행하였다. 모형 터널의 본체는 금속 튜브, 굴진면은 얇은 라텍스 막으로 구성되고 시험 중 라텍스 막의 변위를 추적하여 굴진면의 변위를 계측하였다(Fig. 1). 이 연구에서 Chambon and Corte는 터널 굴진면 파괴에 대한 극한하중은 터널 직경에 비례하여 증가하고 파괴 시의 압력은 토피고, 지반조건에 큰 영향을 받지 않음을 증명하였다. 또한, 굴진면 파괴 시 전방의 파괴 형상을 제시하는 등 굴진면의 파괴 메커니즘에 대해 제시하였다.

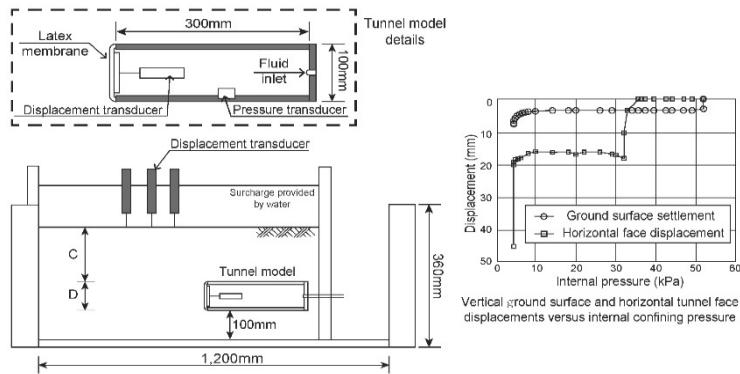


Fig. 1. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face (Chambon and Corte, 1994)

Idinger et al. (2011)은 비점착성 지반에서 원심모형시험을 통해 토피압력에 따른 터널 굴진면의 안정에 필요한 최소 지지압력을 구하였고 굴진면 파괴 시의 파괴형상과 활동면의 각도, 토피고에 따른 침하경향 등에 대해 제시하였다. 결과적으로 토피고 1.0D 이상에서는 토피고가 증가하더라도 침하형태가 유사하다는 사실을 통해 1.0D 이상이면 지반의 종방향 아칭이 발생하는 것을 발견하였다(Fig. 2).

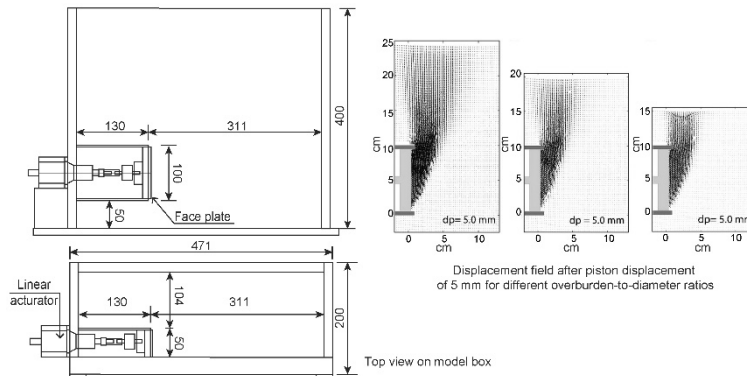


Fig. 2. Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel (Idinger et al., 2011)

또한, 터널 굴착으로 발생하는 아칭에 의한 하중전이 현상은 사질토 지반에서 2-Arch 터널의 거동(Lee and Cheon, 2004), 수평불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동(Cheon et al., 2005) 등에 의해 실험적으로 확인되었다.

이렇듯 기존의 연구는 굴진면의 안정, 파괴거동 및 메커니즘 규명 등 굴진면의 등체적 변형에 대한 거동분석이 대부분으로 터널 종방향 거동에 집중되어 있고, 굴착면의 변위형태 즉, 터널의 횡방향 거동특성에 대한 연구는 미흡하였다. 터널의 횡방향 거동특성은 터널굴착 시 굴착면의 변형과 관련이 크고, 굴착면이 파괴되기 이전부터 발생되고 있는 현상이므로 굴착면의 안정성 평가 이전에 그 거동 메커니즘의 파악이 우선되어야 한다.

본 연구에서는 횡방향의 측벽 일부 거동에 대한 기존 연구가 미흡하여 굴진면 변형에 따른 종방향 거동에 대한 연구(Kim and Lee, 2016)와 횡방향에서의 사각형 터널의 한쪽 측벽거동과 유사한 조건으로 보고 이를 참고하였다. 모형시험은 사각터널이 아닌 실제 터널과 유사한 형태로 모형터널을 제작하여 한쪽 측벽만 수평으로 내공변위가 일어나도록 하였다. 종방향 거동과 응력상태가 다른 횡방향 측벽 일부 파괴시 터널 주변지반의 거동을 규명하기 위하여 토피별로 지표침하, 천단 및 측벽하중, 하중전이 등을 측정하여 얇은터널의 측벽 일부 파괴시 주변지반 거동을 분석하였다.

### 3. 실험장치

#### 3.1 개요

모형시험은 터널 굴착단면을 형상화하여 평면변형률상태(plane strain state)로 수행하였다. 모형터널은 300 mm (width) × 200 mm (height) × 55 mm (length) 크기의 알미늄을 천단부 1개소, 측벽부(좌우측) 2개소로 3등분하여 제작하였고, 등속변위제어가 가능한 gear box와 베어링 장치를 이용하여 좌측벽만 수평방향으로 변형되는 구조로 구성되었다(Fig. 3).

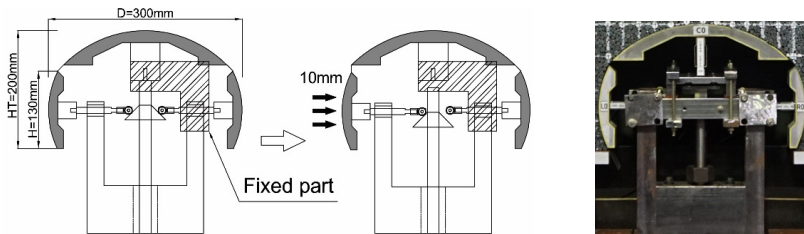


Fig. 3. Deformable tunnel model system

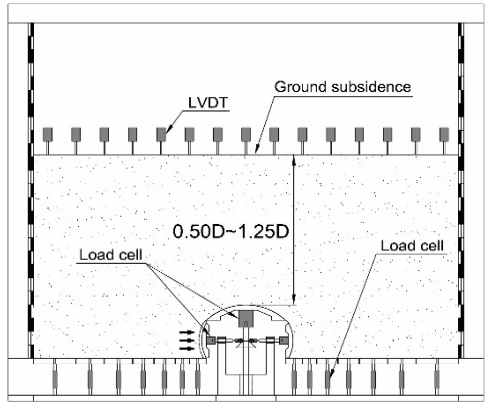
모형지반은 길이 55 mm이고 직경 4 mm, 6 mm, 8 mm인 3종류 탄소봉(단위중량 약 1.4 kN/m<sup>3</sup>, 내부마찰각 27°, 점착력 0)을 5:2:1 비율로 혼합하여 조성하였다. 모형지반은 강재프레임(□-100 × 50 × 5 × 7.5) 내에 조성하였으며, 강재프레임은 1,500 mm (width) × 1,200 mm (height)규격으로 제작하였다.

### 3.2 실험변수

모형시험은 터널의 토피고(cover depth)를 실험변수로 설정하였다. 터널중심을 지나는 연직축을 기준으로 토피 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D (D: 터널폭 300 mm)로 하여 총 4 case 토피고에 대해 수행하였다(Table 1).

Table 1. List of tunnel model tests

Test	Cover depth
A0LT050	0.50D (150 mm)
A0LT075	0.75D (225 mm)
A0LT100	1.00D (300 mm)
A0LT125	1.25D (375 mm)



### 3.3 계측

모형시험을 진행하는 동안 터널 내측 3개소(천단부 1개소, 좌·우 측벽부 2개소)에 하중측정장치인 load cell (0.5 kN)을 설치하여 터널 천단부와 측벽부의 하중변화를 측정하였고, 터널 주변지반 하중변화는 터널 좌·우측에 수평으로 배치된 바닥판(width = 60 mm, 50 mm, 75 mm, 75 mm, 100 mm, 100 mm, 150 mm) 14개소에 load cell (1.0 kN)을 이용하여 측정하였다. 지표침하는 터널 중심을 지나는 연직축을 중심으로 터널상부 지표 좌·우측에 100 mm 간격으로 변위측정 장치인 LVDT (50 mm)를 15개소에 설치하고 터널 변형에 따른 지표 침하량을 측정하였다. 계측기의 감도는 load cell 1/1,000N, LVDT 1/100 mm이며, 시험 중 측정된 data는 데이터 수집장치인 TDS301 data logger로 처리하여 저장하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

시험결과는 최초 지반조성시를 기준으로 지표침하, 천단하중, 측벽하중, 주변지반 연직하중 및 이완영역 순서로 분석하였다. 토피별로 측벽 변형 1~10 mm 발생시의 데이터를 측정하였다.

지표침하는 모형터널의 폭인 D (300 mm)를 분석기준으로 사용하였고, 터널 주변의 연직하중 변화는 가동되는 터널측벽 높이 H (130 mm)를 기준으로 사용하여 측벽부터의 거리로 정리하였다.

### 4.1 지표침하

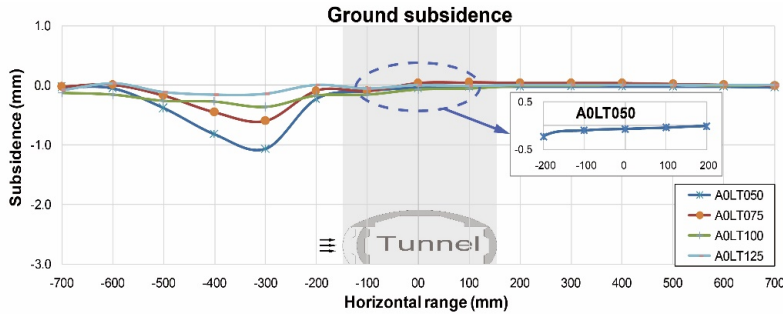


Fig. 4. Ground subsidence & horizontal range

터널 내 측벽 일부 변형에 따른 지표침하는 토피별로 분석하였고, 침하의 수평범위, 최대침하 위치, 최대침하량 순으로 정리하였다. 터널 좌측벽 파괴시 침하의 수평범위는 토피가 작을수록 터널 외측으로 이동하는 경향을 보였고, 토피고 0.5D에서만 좌측벽의 파괴가 우측에 영향을 미치는 것이 관찰되었다. 최대침하의 위치와 최대침하량은 토피가 작을수록 좌측벽 가까운 지점에 크게 발생하였다.

A0LT050일 때에는 좌측 1.5D, 우측 0.83D (중앙 기준 좌측 600 mm ~ 우측 100 mm) 범위에서 침하가 발생하였고, 좌측 0.50D (중앙 기준 좌측 300 mm)에 최대침하 1.07 mm가 발생하였다. A0LT075는 좌측 1.5D, 우측 0.5D (중앙 기준 좌측 600 mm ~ 중앙지점) 범위에서 침하가 발생하였고, 최대침하는 0.50D에 0.60 mm가 발생하였다. A0LT100과 A0LT125는 좌측 1.83D, 우측 0.5D 범위에 침하가 발생하였고, 최대침하는 A0LT100인 경우 좌측 0.50D에 0.37 mm가 발생하였고, A0LT125는 좌측 0.83D (중앙부터 400 mm)에 0.16 mm가 발생하였다 (Fig. 4).

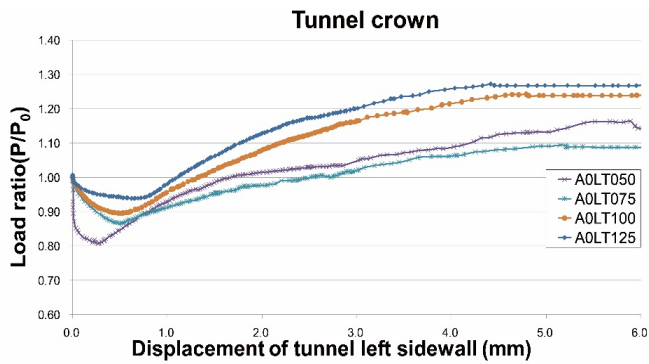
토피고 0.5~1.0D에서 최대침하가 좌측 0.5D (중앙 기준 좌측 300 mm)에서 가장 크게 발생하였고, 토피고 1.25D에서만 좌측 0.83D에 최대로 발생하였다. 토피가 클수록 변위가 일어나는 측벽에서 먼 곳에서 최대침하가 발생하는 경향을 보였다. 또한, 토피고 0.5D부터 토피고가 0.25D 증가할 때마다 최대침하량은 43~62% 범위로 감소하는 경향을 보였다.

측벽 변위에 대한 지표침하의 수평범위는 토피고 0.75D만 약간 좁은 경향을 보였으나, 전체적으로 비슷한 수평범위를 나타냈다. 토피가 작을수록 침하의 수평범위가 터널측벽의 외측(좌측)으로 이동하는 경향을 보였고, 토피고 0.5D는 터널 중앙보다 우측으로 지표침하 범위가 발생하여 좌측벽의 파괴가 우측에 영향을 미치는 것이 관찰되었다(Table 2).

**Table 2.** Maximum ground subsidence & horizontal range

Test	Ground subsidence		Horizontal range of subsidence	
	Maximum subsidence	Location	Left side	Right side
A0LT050	1.07 mm	Left (0.50D)	1.50D	0.83D
A0LT075	0.60 mm	Left (0.50D)	1.50D	0.50D
A0LT100	0.37 mm	Left (0.50D)	1.83D	0.50D
A0LT125	0.16 mm	Left (0.83D)	1.83D	0.50D

## 4.2 천단하중



**Fig. 5.** Relation of load ratio of tunnel crown & displacement of tunnel left sidewall

천단부에 작용하는 하중은 터널 측벽 변형이 시작되면 실험 초반에 하중이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 토피가 작을수록 하중감소가 급격히 발생하였으며, 하중증가가 시작되면 최초 조성 하중보다 크게 증가한 후 수렴하였다. Trapdoor 실험(Terzaghi, 1936)에서 하중-변위 관계와 유사하게 실험 초반 하중이 감소하였으며, 터널 측벽 배후지반의 변위에 따른 아칭에 의해 터널 천단하중이 증가하여 초기 하중보다 큰 하중에 수렴하였다.

천단하중의 최대감소지점(Maximum load reduction point,  $P_{mr}$ )은 A0LT050인 경우 측벽 변위 0.27 mm (최초 100% 기준 80.6% 지점)에 나타났고, 이후 하중이 증가하여 측벽 변형 4.5 mm (최초 100% 기준 115%)에서 수렴하였다. A0LT075와 A0LT100는 측벽 변위 0.51 mm (86.6%, 89.6%)에 최대감소지점이 발생하였고, 하중증가 이후 측벽 변위 4.5 mm (109%, 124%)에서 수렴하였다. A0LT125는 0.66 mm (93.9%), 4.5 mm (127%)에 최대 감소지점과 하중수렴을 보였다.

토피고 0.5~1.25D까지 모두 측벽 변위 1 mm 이내에서 최대하중감소지점이 나타났고, 최초 지반조성시 하중의 81~94% 범위에 분포하였다. 토피가 작을수록 하중감소가 급격히 발생하였으며, 감소하다가 다시 증가하여 측벽 변위 4.5 mm에서 109~127%의 범위로 수렴하였다. 토피고 0.75D와 1.0D는 측벽 변위 0.3 mm 이내에서 비슷한 하중감소 기울기를 보였다(Fig. 5).

측벽 변위에 대한 천단부 하중-변위 곡선은 모든 실험에서 오목곡선과 볼록곡선의 조합으로 이루어졌고, 두 곡선의 경계점을 최대경사지점(Curvature changing point,  $P_{cc}$ )으로 표현하였다. 최대경사지점은 토피고 0.5D인 경우 측벽 변위 0.53 mm에서 발생하였고, 0.75D, 1.0D, 1.25D는 각각 측벽 변위 0.63 mm, 0.77 mm, 0.91 mm에서 발생하였다. 최대경사지점은 토피고가 0.25D씩 높아질 때마다 측벽 변위가 18~22% 증가한 지점에서 발생하였다(Table 3). 최대경사지점( $P_{cc}$ )은 토피고와 지표경사에 따라 변화할 수 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

**Table 3.** Maximum load reduction point & curvature changing Point of tunnel crown

Test	Maximum load reduction point ( $P_{mr}$ )		Curvature changing point ( $P_{cc}$ )	
	Sidewall displacement	Load rate	Sidewall displacement	Increasing rate
A0LT050	0.27 mm	80.6%	0.53 mm	
A0LT075	0.51 mm	86.6%	0.63 mm	119%
A0LT100	0.51 mm	89.6%	0.77 mm	122%
A0LT125	0.66 mm	93.9%	0.91 mm	118%

또한, 좌측벽 파괴시 변위(Table 5)와 천단부 최대하중감소지점( $P_{mr}$ )의 변위를 비교하였다. 토피고 0.75D에서 만 측벽 파괴시까지 천단하중이 계속 감소되었으나, 토피고 0.5D, 1.0D, 1.25D에서는 측벽이 파괴되는 도중에 천단하중이 감소하다가 다시 증가하는 형태를 보였다. 0.75D보다 낮은 토피에서는 측벽파괴의 55.1% 발생시, 0.75D보다 높은 토피고에서는 측벽파괴 83.6~84.6% 발생시에 천단하중이 감소하다가 다시 증가하는 형태를 보였다(Table 4).

**Table 4.** Relation of tunnel crown & tunnel left sidewall on failure

Test	Displacement		Ratio (tunnel crown / tunnel sidewall)
	Tunnel sidewall (failure)	Tunnel sidewall ( $P_{mr}$ )	
A0LT050	0.49 mm	0.27 mm	55.1%
A0LT075	0.48 mm	0.51 mm	106.3%
A0LT100	0.61 mm	0.51 mm	83.6%
A0LT125	0.78 mm	0.66 mm	84.6%

### 4.3 측벽하중

터널의 측벽부에 작용하는 하중은 변위가 발생하는 측벽(좌측벽)과 변위가 발생하지 않는 측벽(우측벽)이 다른 양상을 보였고, 좌측벽 파괴시의 변위를 한계변위로 표현하였다. 여기에서 한계변위는 하중-변위 곡선의 곡률이 최대가 되는 지점의 변위를 말한다.



좌측벽은 토피가 작을수록 하중감소와 한계변위가 빠르게 발생하였고, 토피고 0.5D부터 토피가 0.25D씩 높아질 때마다 한계변위시 하중변화율( $P/P_0$ )이 7~9% 범위로 증가하였다. 토피고 0.5D와 0.75D는 측벽변위 0.48~0.49 mm에서 파괴가 발생하였다. 0.5D는 이완영역이 형성되기 어려운 낮은 토피고에 기인하고, 0.75D는 이완영역이 형성되는 도중 지반특성(탄소봉)에 의한 지표침하가 영향을 미치는 것으로 추정되었다.

우측벽은 토피고 0.5D에서만 측벽변위 0.04 mm까지 최초 조성 하중의 83%로 급격한 하중감소가 발생한 후 86%에서 하중이 수렴되었다. 토피고 0.75D 이상은 하중의 변화가 나타나지 않았다. 지표침하 분석시 토피고 0.5D만 침하의 수평범위가 중앙보다 우측으로 발생하였는데, 측벽부 하중변화에서도 이와 유사한 경향이 나타났다. 즉, 좌측벽 변위가 우측벽에 영향을 미칠 수 있다는 추정을 뒷받침하였다.

또한, 터널의 측벽변위시 파괴의 대부분이 측벽변위 초반에 발생함을 알 수 있어, 측벽변위가 발생하기 시작하면 터널파괴가 많이 진행되었을 가능성이 있음을 추정할 수 있었다(Table 6).

### 4.3.1 좌측벽(변위가 발생하는 측벽)

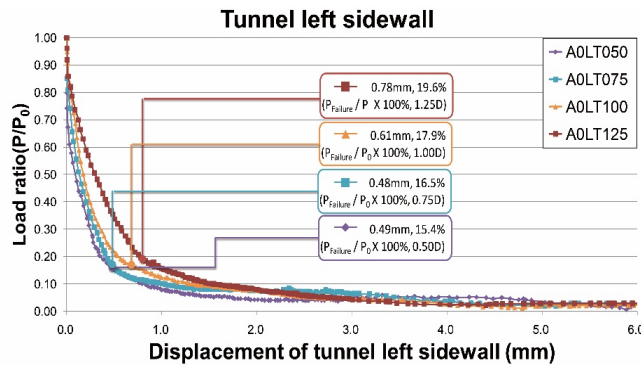


Fig. 6. Relation of load ratio of tunnel left sidewall & displacement of tunnel left sidewall

좌측벽은 토피가 작을수록 하중감소와 한계변위가 빠르게 발생하였고, 토피고 0.5D부터 토피가 0.25D씩 높아질 때마다 한계변위시 하중변화율이 7~9% 범위로 증가하였다. 최종 하중수렴은 측벽변위 4.5 mm에서 비슷한 하중변화율(2~4%)로 발생하였다.

AOLT050는 측벽변형 0.49 mm (최초 100% 기준 15.4%)에 한계변위(파괴)가 발생하였고, AOLT075는 0.48 mm (16.5%), AOLT100은 0.61 mm (17.9%), AOLT125는 0.78 mm (19.6%)에 한계변위가 발생하였으며, 최종 하중수렴은 모든 case에서 4.5 mm (2~4%)에 발생하였다(Fig. 6).

토피고 0.5D와 0.75D는 비슷한 측벽변위에서 파괴되었는데, 0.5D는 낮은 토피로 인한 지표침하 발생, 0.75D는 하중이완영역 형성중 지반(탄소봉)의 특성에 의한 지표침하 발생에 기인한 것으로 추정되었다. 토피고 0.75D부터는 0.25D씩 높아질 때마다 한계변위는 27%씩 증가하였다. 또한, 토피가 작을수록 한계변위시까지 하중감소가 빠르게 발생하였고, 토피고가 0.25D가 높아질 때마다 한계변위시 하중변화율은 7~9% 범위로 증가하였다(Table 5).

**Table 5.** Load ratio & displacement of tunnel left sidewall on failure

Test	Left sidewall displacement on failure (Increasing rate *)	Load ratio of left sidewall failure (Increasing rate *)
AOLT050	0.49 mm	15.4%
AOLT075	0.48 mm (↑ 100%)*	16.5% (↑ 107%)*
AOLT100	0.61 mm (↑ 127%)**	17.9% (↑ 108%)**
AOLT125	0.78 mm (↑ 127%)**	19.6% (↑ 109%)**

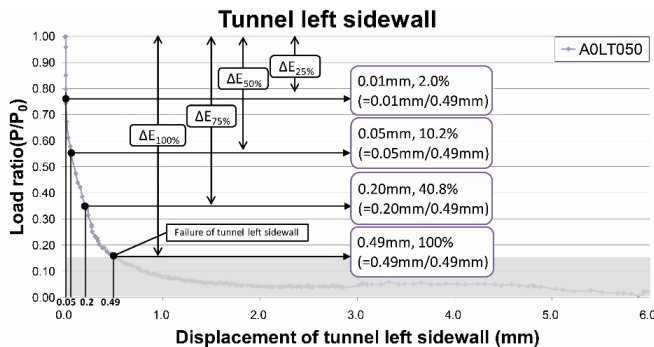
Increasing rate: (AOLT075/AOLT050 × 100%)\*, (AOLT100/AOLT075 × 100%)\*\*, (AOLT125/AOLT100 × 100%)\*\*\*

토피별로 한계변위(E)시 하중변화율을 100% ( $\Delta E_{100\%}$ )로 기준하여 이에 대한 하중변화율(25%, 50%, 75%, 100%)을  $\Delta E_{0\%}$  ( $\Delta E_{25\%, 50\%, 75\%, 100\%}$ )로 표현하여 터널 좌측벽의 변위( $D_{TS}$ )와 변위에 대한 비율( $\Delta E_f$ )을 정리하였다. 1.25D 이하의 얇은터널에서 파괴의 50% 진행은 측벽변위 예상량의 24.4% 이내에서 발생하고, 75% 파괴진행은 측벽변위 예상량의 52.6% 이내에서 발생하였다(Table 6). 파괴의 대부분이 측벽변위 초반에 발생하므로 측벽 변위가 발생하기 시작하면 터널파괴가 많이 진행되었을 가능성이 있음을 추정할 수 있었다. Table 6의 AOLT050 case (점선 구역)를 그래프로 표현하면 Fig. 7과 같다.

**Table 6.** Load variation ratio & tunnel left sidewall displacement on failure

Category	AOLT050 ( $E^* = 0.49\text{mm}$ )		AOLT075 ( $E = 0.48\text{mm}$ )		AOLT100 ( $E = 0.61\text{mm}$ )		AOLT125 ( $E = 0.78\text{mm}$ )	
	$D_{TS}^{**}$	$\Delta E_f^{***}$	$D_{TS}$	$\Delta E_f$	$D_{TS}$	$\Delta E_f$	$D_{TS}$	$\Delta E_f$
$\Delta E_{25\%}^{****}$	0.01 mm	2.0 %	0.02 mm	4.2%	0.05 mm	8.2%	0.04 mm	5.1%
$\Delta E_{50\%}$	0.05 mm	10.2%	0.09 mm	18.8%	0.13 mm	21.3%	0.19 mm	<b>24.4%</b>
$\Delta E_{75\%}$	0.20 mm	40.8%	0.23 mm	47.9%	0.26 mm	42.6%	0.41 mm	<b>52.6%</b>
$\Delta E_{100\%}$	0.49 mm	100.0%	0.48 mm	100.0%	0.61 mm	100.0%	0.78 mm	100.0%

$E^*$ : Tunnel sidewall displacement on failure (Limit displacement),  $D_{TS}^{**}$ : Displacement of tunnel sidewall  
 $\Delta E_f^{***}$ :  $\Delta E_{25\%, 50\%, 75\%, 100\%} / \Delta E_{100\%}$ ,  $\Delta E_{25\%, 50\%, 75\%, 100\%}^{****}$ : Percentage (25%, 50%, 75%, 100%) to failure



**Fig. 7.** Load variation ratio & displacement of tunnel left sidewall on failure (AOLT050 case)

### 4.3.2 우측벽(변위가 발생하지 않는 측벽)

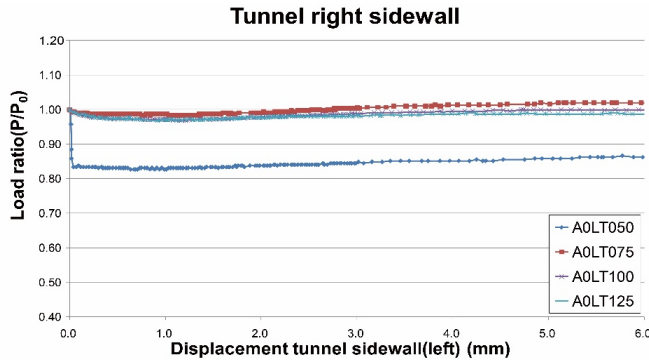


Fig. 8. Relation of load ratio of tunnel right sidewall & displacement of tunnel left sidewall

우측벽에 작용하는 하중은 좌측벽과 뚜렷한 차이를 보였고, 지표침하 분석결과와 유사한 경향이 나타났다. 우측벽에 작용하는 하중은 토피고 0.5D에서 실험 초반 아주 급격한 하중감소를 보이다가 좌측벽 변위 0.04 mm (최초 100% 기준 83.3%)에서 바로 수렴되었으며, 토피고 0.75~1.25D는 좌측벽 변위가 우측벽에 영향을 주지 않았다. 토피고 0.5D는 하중이완영역의 최고점 보다 낮은 토피고의 영향으로 터널 우측벽까지 좌측벽 변위의 영향이 있었음을 예상할 수 있었고, 토피고 0.5~0.75D 사이에 하중이완영역의 경계가 발생함을 추정할 수 있었다(Fig. 8).

### 4.4 터널 주변지반의 연직하중

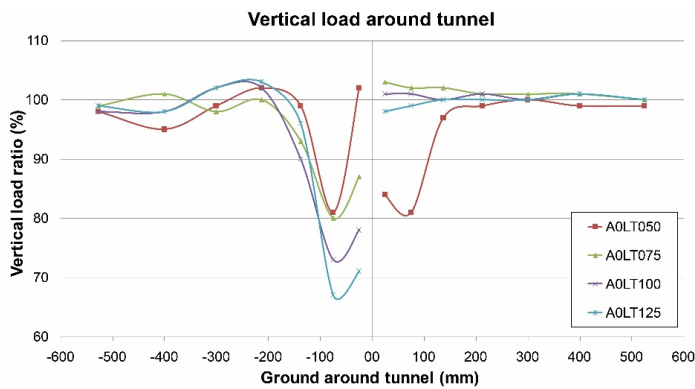


Fig. 9. Vertical load ratio of ground around tunnel on failure of tunnel left sidewall

터널 주변지반의 연직하중은 지표침하, 측벽하중(우측벽)의 분석결과와 유사한 경향을 보였다. 좌측벽 파괴시 토피고별 주변지반의 연직하중 분포를 도표화하였고, 가동되는 터널측벽 높이 H (130 mm)를 기준으로 정리하였다(Table 7).

좌측벽 주변 연직하중은 지표침하 분석결과와 유사하게 토피가 커질수록 하중전이 수평범위가 좌측(터널 외측)으로 이동하였다. 토피고 1.0D와 1.25D는 최대하중 발생지점부터 터널 외측방향으로 비슷한 경향을 보였다(Fig. 9).

우측벽 주변 연직하중은 우측벽 하중-변위 곡선과 유사한 경향이 나타났다. 토피고 0.5D에서만 측벽 근접구간에서 하중감소가 뚜렷하게 나타났고, 토피고 0.75~1.25D는 주변지반의 연직하중 변화가 거의 발생하지 않았다. 좌측벽의 파괴가 우측벽에 영향을 주는 것으로 추정되었다.

**4.4.1 좌측벽(변위가 발생하는 측벽) 주변 연직하중**

좌측벽 주변 연직하중은 지표침하 분석결과와 유사하게 나타났다. 토피고가 작을수록 하중증가 최대지점이 좌측벽에 가깝게 발생하였고, 최대하중의 크기는 모든 Case에서 유사하게 발생하였다. 즉, 토피고가 커질수록 하중전이 범위가 좌측(터널 외측)으로 이동하였다. 또한, 하중전이의 크기는 토피고의 영향이 크지 않았다. 토피고 1.0D와 1.25D는 하중증가 최대지점에서 터널 외측방향으로 거의 비슷한 경향을 보였다.

좌측벽 파괴시 측벽 근접구간에서 연직하중이 감소하였고, 토피별로 좌측벽부터 1.08~1.62H 범위에서 연직하중 변화가 없었다. 하중증가 최대지점은 1.62~1.77H 범위에 발생하였고, 이후 2.15~2.69H 범위에서 하중변화가 없었다. 다만, 토피고 0.75D는 측벽 근접구간의 하중감소 이후 최초 조성 하중의 100%를 회복하고 더 이상 증가되지 않았으며, 토피고 1.0D와 1.25D는 하중증가 최대지점부터 외측으로 비슷한 경향을 보였다.

**4.4.2 우측벽(변위가 발생하지 않는 측벽) 주변 연직하중**

우측벽 주변 연직하중은 우측벽 하중-변위 곡선과 유사한 경향을 보였다. 토피고 0.5D에서만 측벽 근접구간에서 하중감소가 뚜렷하게 나타났고, 토피고 0.75~1.25D에서는 주변지반의 연직하중 변화가 거의 발생하지 않았다. 좌측벽의 파괴가 우측벽에 영향을 주는 것으로 추정되었다.

우측벽에서는 A0LT050만 측벽 근접구간에서 연직하중 감소 후 2.31H 이격된 지점에서 연직하중 변화가 없었고 이후 구간에서는 하중변화가 거의 발생하지 않았다. A0LT075~A0LT125에서는 전 영역에서 뚜렷한 연직하중 변화가 발생하지 않았다(Table 7).

**Table 7.** Vertical load ratio on failure of tunnel left sidewall

Test	Tunnel left sidewall displacement (on failure)	Vertical load ratio around tunnel $\left(\frac{P}{P_o} \times 100\%\right)$							
		Left side of tunnel				Right side of tunnel			
		100%	Top point	100%	Tunnel adjacent area (left)	Tunnel adjacent area (right)	100%	Top point	100%
A0LT050	0.27mm	2.15H	1.62H	1.08H	Under 100%	under 100%	2.31H	-	-
A0LT075	0.51mm	-	-	1.62H	Under 100%	-	-	-	-
A0LT100	0.51mm	2.69H	1.77H	1.54H	Under 100%	-	-	-	-
A0LT125	0.66mm	2.69H	1.77H	1.31H	Under 100%	-	-	-	-

#### 4.5 이완영역 분석

터널 좌측벽 변위에 대한 사진을 분석한 결과 토피고 0.5D는 낮은 토피의 영향으로 하중이완영역이 형성되지 않았고, 토피고 0.75D는 하중이완영역 형성 도중 지표침하가 발생하였는데 이는 조성된 지반(탄소봉)의 특성에 기인 한 것으로 추정된다(Fig. 10).

토피고 1.0~1.25D는 하중이완영역이 형성되어 좌측벽 변위가 하중이완영역에만 영향을 주었고, 토피가 하중 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서, 얇은터널 측벽 파괴시 토피고 0.75D 부근에 하중이완영역 최고점의 경계가 발생하고, 토피고 0.75D 이하의 터널에서 한쪽측벽 파괴가 다른 측벽에 영향을 줄 수 있음을 추정할 수 있었다.

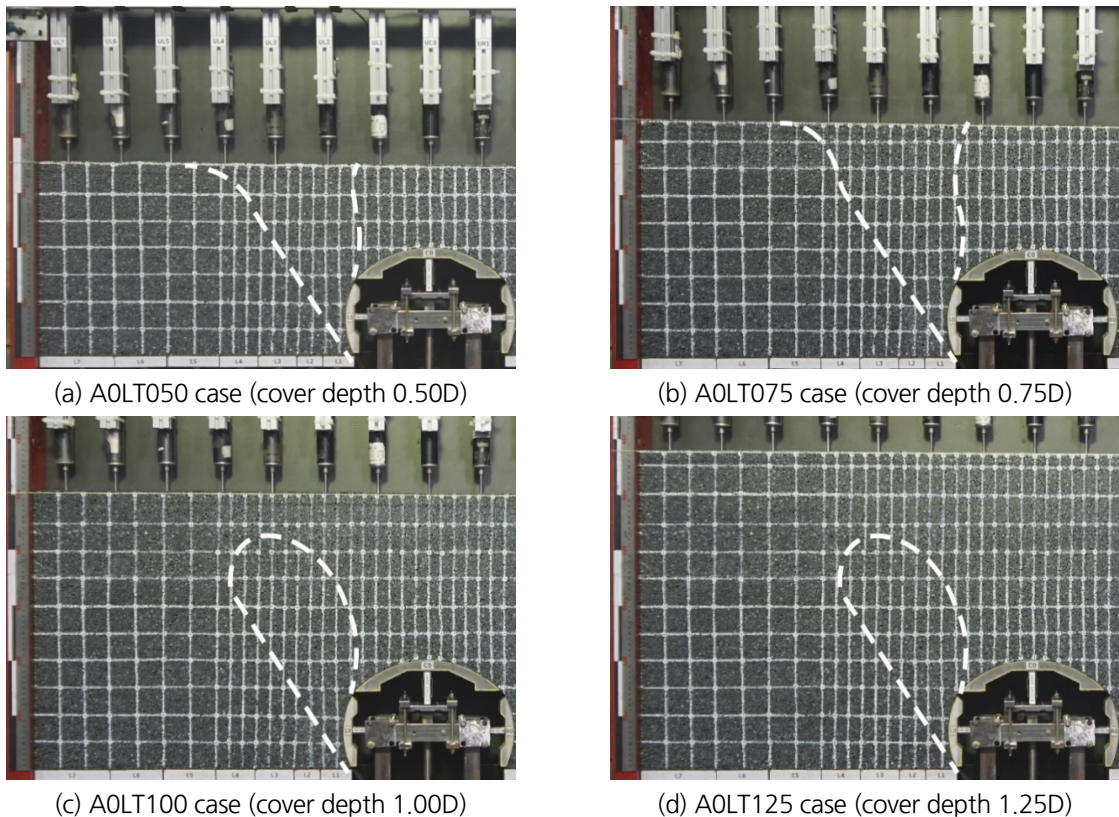


Fig. 10. Ground deformation shape (tunnel left sidewall displacement)

#### 5. 결론

본 연구에서는 얇은터널의 측벽파괴시 주변지반의 거동을 분석하기 위해 탄소봉으로 지반을 조성하고 평면변형률상태로 모형시험을 수행하였다. 터널의 토피고를 변화시키면서 모형터널의 좌측벽을 수평방향으로 내공변위되도록 제작시험하여 결과를 측정하였고, 다음과 같은 결론에 도달하였다.



1. 터널의 측벽 일부(좌측벽) 파괴시 침하의 수평범위는 토피가 작을수록 터널 외측으로 이동하는 경향을 보였고, 토피고 0.5D에서만 좌측벽의 파괴가 우측에 영향을 미치는 것이 관찰되었다. 최대침하의 위치와 최대침하량은 토피가 작을수록 좌측벽부터 가까운 지점에 크게 발생하였다.
2. 천단부에 작용하는 하중은 측벽 변형이 시작되면 시험초반에 하중이 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 토피가 작을수록 하중감소 곡선의 기울기가 컸다. 즉, 토피가 작을수록 실험 초반 하중감소가 급격히 발생하였다.
3. 측벽부에 작용하는 하중은 좌측벽과 우측벽이 전혀 다른 양상을 보였다. 좌측벽은 토피가 작을수록 하중감소와 한계변위가 빠르게 발생하였고, 우측벽은 토피고 0.5D에서만 급격한 하중감소가 발생하였다. 지표침하 분석시 토피고 0.5D만 침하의 수평범위가 중앙보다 우측으로 발생하였는데, 측벽부 하중변화에서도 이와 유사한 경향이 나타났다.
4. 터널 주변지반의 연직하중을 분석한 결과 좌측벽 주변은 지표침하 분석결과와 유사하게 토피가 커질수록 하중전이 수평범위가 좌측(터널 외측)으로 이동하였다. 우측벽 주변은 측벽하중 변화와 유사하게 토피고 0.5D에서만 측벽 근접구간에서 하중감소가 뚜렷하게 나타났고, 토피고 0.75~1.25D는 주변지반의 연직하중 변화가 거의 발생하지 않았다.
5. 사진분석 결과, 토피고 0.75D는 하중이완영역 형성 도중 지반특성에 의하여 지표침하가 발생하였고, 토피고 1.0~1.25D는 하중이완영역이 형성되었다.
6. 얕은터널의 측벽 파괴시 토피고 0.75D 부근에 하중이완영역 최고점의 경계가 발생하였고, 토피고 0.75D 이하의 터널에서 한쪽측벽 파괴가 다른 측벽에 영향을 줄 수 있음을 추정할 수 있었다. 또한, 하중이완영역이 형성되면 토피는 하중변화에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나, 지반특성에 따라 다른 결과가 발생할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

1. Adachi, T., Tamura, T., Kimura, K., Nishimura, T. (1995), "Axial symmetric trap door tests on sand and cohesion soil", Proceedings of the 30th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 1973-1976.
2. Chambon, P., Corte, J. F. (1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 7, pp. 1148-1165.
3. Cheon, E.S., Kim, H.M., Lee, S.D. (2005), "Behavior of shallow 2-Arch tunnel due to excavation under horizontal discontinuity plane", Tunnelling Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 227-237.
4. Idinger, G., Aklik, P., Wu, W., Borja, R. I. (2011), "Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel", Acta Geotechnica, Vol. 6, No. 2, pp. 105-117.
5. Kim, Y.W., Lee, S.D. (2016), "Experimental study on the longitudinal load transfer of a shallow tunnel depending on the deformation tunnel face (I)", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18,

- No. 5, pp. 487-497.
6. Lee, S.D. (2013), "Tunnel Mechanics", CIR publication, Seoul, pp. 253-360.
  7. Lee, S.D. (2014), "Soil Mechanics", CIR publication, Seoul, pp. 401-403.
  8. Lee, S.D., Cheon, E.S. (2004), "Behavior of 2 arch tunnel in sand", *Tunnelling Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 171-182.
  9. Tanaka, T., Sakai, T. (1993), "Progressive failure and scale effect of trap door problem with granular materials", *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, pp. 11-22.
  10. Terzaghi, K. (1936), "Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door", *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311.
  11. Vardoulakis, I., Graf, B., Gudehus, G. (1981), "Trap-door problem with dry sand: A statical approach based upon model test kinematics", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 5, No. 1, pp. 57-78.