

# 불연속면을 포함한 사질토 지반에서 터널 굴착에 따른 하중전이

## Load transfer mechanism due to tunnel excavation in the jointed sandy ground

이상덕<sup>1</sup>, 김양운\*<sup>2</sup>

Lee, Sang-Duk · Kim, Yang-Woon

### Abstract

This study is focused on the finding out load transfer mechanism in the ground near the tunnel during tunnel excavation in the jointed sandy ground. Laboratory model tests were performed on various cases of the overburden heights above tunnel crown, location, and degree of discontinuity planes. For model tests, a movable plate was installed in the midst of the bottom of sandy ground. This plate, moving downwards, was intended to model the stress relaxation during tunnel excavation. The load transfer was measured at the fixed separated bottom plates adjacent to the movable plate. As the result, the loosening zone and the load-transfer form around the tunnelling site were affected by the overburden height and the characteristics of discontinuous planes. And large loosening zone was developed along the discontinuous planes which were close to the tunnel.

**Keywords:** Trap door test, jointed sandy ground, load transfer, arching effect, loosening zone

### 요 지

본 연구에서는 활동성 불연속면을 포함하고 있는 모래지반에 터널을 굴착할 때에 터널 주변의 원지반에 발생되는 아칭을 규명하기 위하여 터널 상부의 토피고와 불연속면의 위치 및 각도를 변화시켜가며 모형실험을 수행하였다. 모형실험기의 중앙에 수직으로 이동이 가능한 가동판을 설치하고 모래지반 조성 후에 가동판을 강하시켜서 터널 굴착을 모형화 하였고, 토조의 바닥판에 로드셀을 부착하여, 아칭에 의한 하중전이를 측정하였다. 굴착에 의한 지표면의 침하거동은 변위측정센서를 지표면에 설치하여 측정하였으며, 실험 중에 연속사진촬영을 실시하고 지반조성시 일정한 간격으로 설치한 측정의 움직임을 관측하여 굴착에 의한 지반이완형태를 측정하였다. 본 연구 결과 터널굴착시 불연속면의 각도와 위치, 그리고 터널 상부의 토피고에 따라서 하중전이 형태와 이완영역이 변화하는 것을 확인하였으며 지반의 이완영역이 터널과 인접해 있는 불연속면을 따라 주변지반으로 점차 확대되어 가는 것을 알 수 있었다.

**주요어:** 트랩도어 실험, 활동성 불연속면, 하중전이, 아칭, 이완영역

1 정회원, 아주대학교 환경건설교통공학과 교수

\*2 태조엔지니어링 사원 (kywoon@hanmail.net)

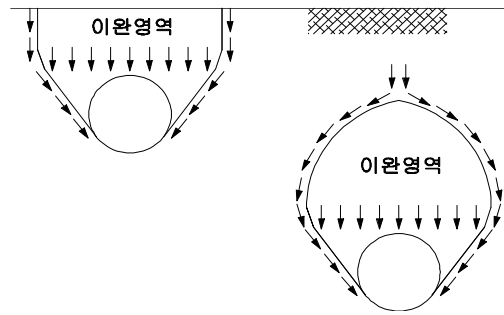
## 1. 서론

얕은 토사터널 설계시에 터널에 작용하는 토압으로 상부토피의 자중 즉, 전 토피압을 사용하는 경우와 흙의 아칭효과를 고려하여 이완토압을 사용하는 경우, 또는 그 중간 값을 사용하는 경우 등이 제시되어 있다. 현재까지 토사터널에 대해서 여러 가지 이론적·실험적 연구를 통한 설계법이 개발되고 있지만, 아직 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 토사터널의 역학적 거동을 규명하기 위해서는 불연속면을 포함한 원지반의 터널 굴착시 주변지반의 거동을 밝히는 것이 필수적인 과제라고 생각된다.

자연상태의 토사지반은 과거의 활동과괴면, 전단강도가 주변지반 보다 작은 얕은 지층 등 다양한 형태의 활동성 불연속면을 포함하고 있을 수 있으며 이 불연속면은 지반의 활동과괴 내지는 지하구조물이나 상부구조물의 거동과 안정성에 영향을 미치는 주요한 인자가 된다. 불연속면은 불규칙적인 형상과 성질을 가지고 있는 것 뿐만 아니라 과거의 활동과괴면과 같이 단조로운 형상과 성질을 갖고 있는 것 등 다양하다. 그러나 본 논문에서는 우선 직선으로 단순화시킨 불연속면이 포함된 토사지반에 터널을 굴착할 때 불연속면의 영향에 따른 아칭현상과 주변지반의 거동특성을 분석하였다.

## 2. 지반의 이완

터널을 굴착하면 터널 주변 원지반의 응력이 재분배되어 새로운 응력상태가 되며 부분적으로 응력이 증가되어 지반이 압축, 파괴되거나 혹은 인장응력이 발생되어 할렬되어 뒹어짐으로써 주위의 지반과 분리되기도 한다. 이렇게 주변지반과의 결합력을 상실한 압괴나 토사는 터널굴착 시에 터널 내공으로 미끄러져 나온다. 이러한 활동은 점차 원지반까지 영향을 미쳐서 이완영역이 확대되어 터널 주변 원지반 지지력이 기능성을 잃어서 결국은 터널의 붕괴로 이어질 수 있다. 이 영역 내의 원지반은 토압을 지지하지 못하고 그 자중이 지보공이나 라이닝에 하중으로 작용하게 된다. 토피가 작으면 이완영역은 지표면까지 도달하고, 거의 전토피 하중이 이완토압으로 작용하게 된다 (그림 1a). 반대로 토피가 충분히 크면



(a) 토피고가 작은 경우 (b) 토피고가 큰 경우

그림 1. 터널굴착에 따른 이완영역의 형성

이완영역은 지표까지 도달되지 않고 터널의 상부에서 폐합된 하나의 영역을 형성하게 된다. 이 때문에 이완영역 보다 상부에 있는 지반의 자중은 이완영역 외측의 지반 아칭에 의해 지지되고 이완영역 내의 지반의 자중만이 터널에 하중으로 작용한다 (그림 1b).

## 3. 모형실험

### 3.1 모형토조

모형토조는 300mm×1,200mm×900mm (폭×길이×높이)로 제작하였으며, 벽체는 실험지반의 전 과정을 외부에서 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴판을 이용하였다. 벽면과 아크릴판 사이의 마찰을 줄이기 위해 유리판을 지반과 아크릴판 사이에 부착하였으며 모형지반에 의한 재료의 변형을 방지하기 위해 외부에 16mm×80mm의 평철 (steel flat bars)을 이용한 프레임으로 단단히 구속하였다.

바닥판과 가동판은 시험하중 (최대 50kg)에 비하여 강성이 크고 성형이 쉬운 베이클라이트 판 (페놀수지의 재료로 단위중량 1.25~1.30ton/m<sup>3</sup>, 인장강도 490~560kgf/cm<sup>2</sup>, 압축강도 700~2,100kgf/cm<sup>2</sup>)을 사용하였다. 가동판의 크기는 30cm×20cm이며 바닥판은 하중의 변화를 측정하기 위해 30cm×3, 4, 5, 6, 8, 10cm 크기로 제작하였으며 가동판의 좌·우를 기준으로 크기가 작은 판부터 점차 크기가 커지는 순서로 배치하여 계

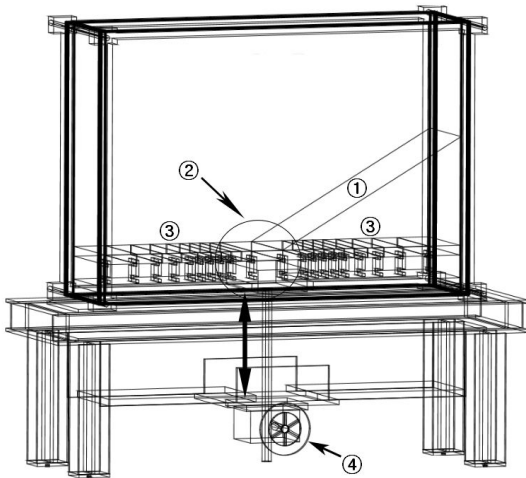
측하였다. 각 판에는 로드셀을 부착해 실험 중 하중의 변화를 측정할 수 있으며 주요 측정위치에서는 작은 크기의 판을 조밀하게 배치하여 미세한 하중변화 측정이 용이하도록 하였다. 가동판은 상하 이동시 마찰이 없도록 하였으며 일정한 속도 (1mm/min)와 변위를 유지할 수 있도록 기어박스와 톨을 제작하여 변위를 발생시켰다.

### 3.2 불연속면

불연속면은 마찰이 없고 충분히 유연하도록 아스테이지를 일정 크기로 잘라 그리스(Grease)와 오일(Oil)을 혼합하여 도포하여 각도 90와 30로 설치하였다.

### 3.3 모형지반

본 실험에서는 12번체를 통과하고 40번체에 잔류하는 주문진 자연사를 조제하여 모형지반을 조성하였다. 조성된 모형지반의 특성을 알기 위해 입도분포시험 (KS F 2301), 최대/최소 건조 단위 중량시험 (DIN 18126), 비중시험 (KS F 2343) 등의 물리시험을 수행하였으며, 그



- ① 불연속면 (아스테이지 3겹)
- ② 가동판 (300mm×200mm×25mm)
- ③ 바닥판 (300mm×30, 40, 50, 60, 80, 100mm×25mm)
- ④ 변위발생장치

그림 2. 모형토조

값은 표 1과 같다.

조성된 모형지반의 전단강도를 측정하기 위해서 직접 전단시험 (KS F 2348)을 실시하였으며 실험결과 점착력은 0이고 내부마찰각은 37°인 모래로 나타났다.

### 3.4 지반변위 측정

본 실험에서는 가동판 폭의 1, 2, 3배가 되는 토피고에서 터널을 굴착 했을 때 지반의 이완영역과 변위에 따른 이완영역의 확산을 측정하기 위하여 모형지반의 지표에 변위측정장치 (LVDT)를 10cm간격으로 설치하였으며 지중변위를 살피기 위해 지반 조성중에 일정한 간격으로 위치표시용 측정점을 설치하고 일정한 시간 간격으로 사진을 촬영하였다.

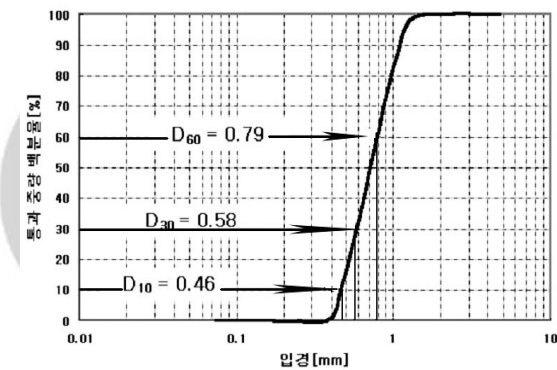


그림 3. 모형지반의 입경 가적 곡선

표 1. 모형지반의 기본 물성

물리적 특성	결과
입도분포	$D_{10} = 0.46, D_{30} = 0.68, D_{60} = 0.79$
최대·최소 단위중량	$\gamma_{dm\max} = 1.79\text{ton/m}^3$ $\gamma_{dm\min} = 1.46\text{ton/m}^3$
비중	$G_s = 2.61$
통일분류법에 의한 지반 분류	입도분포가 불량한 모래 (SP)

### 3.5 하중전이 측정

터널굴착으로 인하여 지중응력이 재분배됨에 따라 주변지반은 새로운 응력상태가 된다. 즉, 이완영역이 형성되고 이 영역 내의 전단강도가 작아지게 되고 굴착면의 변위가 지속되면 이러한 영역이 확대되고 변위가 더 계속되어 전단강도가 소멸된 상태가 되면 지보공에 하중으로 작용한다. 이 과정에서 이완영역의 상부경계는 아치(Arch)의 형태로 형성되며 그 상부하중은 주변지반으로 전이된다. 따라서 본 실험에서는 이러한 하중의 전이를 측정하기 위하여 가동판 좌·우의 바닥판을 세분화하여

하중변화를 측정하였다.

### 4. 결과 및 분석

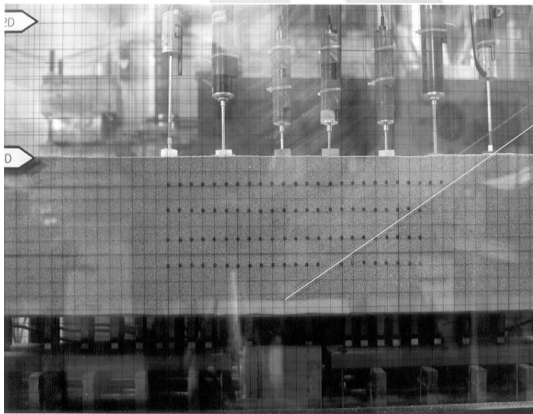
불연속면을 포함한 사질토 지반에서 터널 굴착에 의한 지반거동과 특성을 확인하기 위해 가동판 실험으로 굴착 효과를 구현하였다.

단순화한 불연속면의 위치, 토피고에 따른 지반의 응력전이와 이완영역을 규명하기 위하여 실험 중 연속촬영을 하였으며, 지표변위계(LVDT)를 설치하였고, 바닥

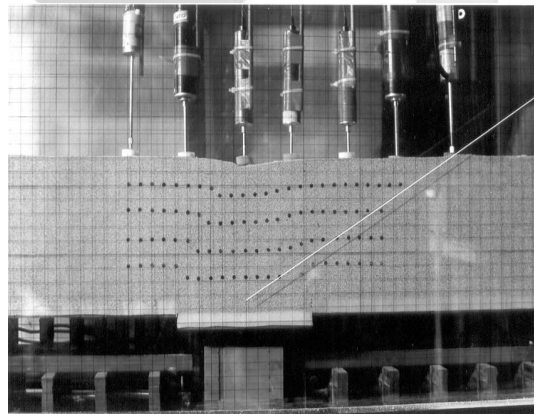
표 2. 실험변수 및 실험명

토피고	불연속면의 유무 및 위치		실험명칭
	유 (가동판 기준)	무	
2D (40cm)	-	○	NONJH40
	○ (가동판 중앙 90°)	-	CJD90H40
	○ (가동판 중앙 30°)	-	CJD30H40
	○ (가동판 우측 끝)	-	RJD30H40
	○ (가동판 좌측 끝)	-	LJD30H40
	○ (좌측 0.5D)	-	L2JD30H40
	○ (좌측 1D)	-	L3JD30H40

※ C : 가동판중심, L : Left, R : Right, J : 불연속면 D : Degree H : 토피고



(a) 실험전



(b) 실험후

사진 1. 지반변위 측정

판 및 가동판에 하중계 (Load cell)를 부착하여 사용하였다.

실험결과, 가동판의 수직변위에 따른 토압은 불연속면의 위치에 따라 각기 다른 분포 형상을 보였으며 바닥판에서의 압력은 가동판의 변위에 따라서 점차 인접영역으로 전파되어 가는 것을 볼 수 있었다. 또한 연속촬영한 사진을 분석하여 지반의 거동을 판독하였다.

#### 4.1 가동판의 압력변화

가동판의 강하에 따른 연직토압은 불연속면의 위치에 따라서 다양한 형태의 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

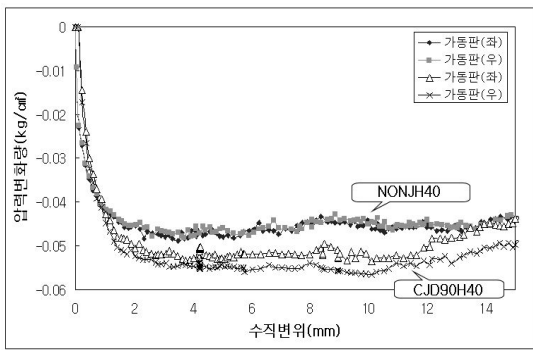


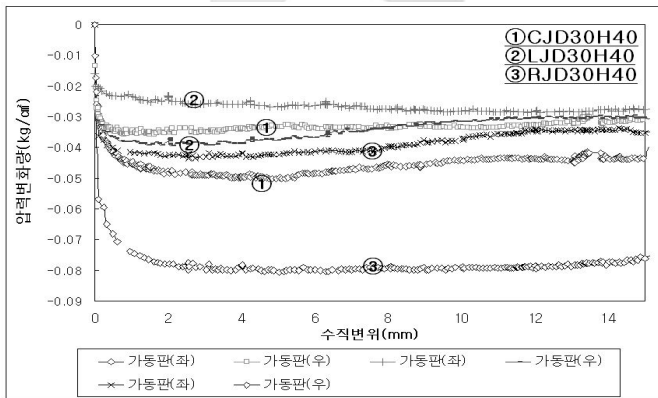
그림 4. 가동판의 수직하중

그림 4, 5는 토피고 40cm일 때 각 실험에서 가동판의 좌·우 토압변화를 나타낸 것이다. 토압은 가동판이 강하됨에 따라 급격히 감소하다가 점차 수렴하였으며, 가동판의 변위가 지속되면 약간 증가하였다. 가동판의 수직변위 1mm이내에서 초기값의 절반이하로 감소하였으며 실험에 따라 차이는 있으나 2~3mm의 변위에서 일정한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 수렴 후에도 가동판에 지속적인 변위를 주면 가동판의 연직토압이 증가하는 경향을 보이며 일정 변위 후 재차 수렴하는 것을 볼 수 있다.

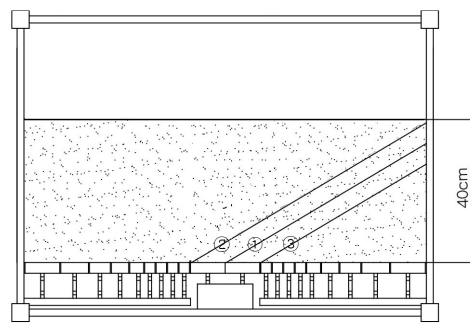
또한 불연속면이 없거나 (NONJH40), 연직 불연속면이 가동판 중앙에 있는 (CJD90H40) 경우에는 좌우 가동판에 같은 크기의 토압이 측정되었으나 (그림 4), 비대칭 불연속면이 있을 경우에는 좌우의 토압에 편차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 즉, 불연속면이 있는 쪽과 없는 쪽의 가동판에 작용하는 하중의 크기가 다르게 측정되었다. 불연속면이 있는 쪽은 하중이 크고 그 반대쪽에서는 하중이 작게 측정되는 것으로 보아서 불연속면 하부지반은 하중으로 작용하는 것을 알 수 있다.

가동판 중앙에 연직불연속면이 있는 경우에는 균질한 경우보다 가동판에 가해지는 하중이 크게 측정되었다.

이것은 불연속면의 전단저항이 작기 때문에 이완영역이 더 크게 형성되는 것을 보여주고 있다 (그림 4).



(a) 가동판의 좌우 압력변화



(b) 불연속면 (30)의 위치

그림 5. 불연속면 (30) 위치에 따른 가동판의 압력 (불연속면위치 ①,②,③)

## 4.2 주변지반으로의 하중전이

바닥판에 작용하는 연직토압은 실험 중 바닥판에 가해진 하중을 바닥판의 면적으로 나눈 값으로 하였다. 가동판이 강하되면 초기에는 가동판에 작용하는 토압이 급격히 감소하고 대체로 2.5mm 전후의 변위에서 최저점에 도달되는 경향을 나타내었으며, 반면에 가동판에 인접한 고정바닥판에서 토압은 가동판의 변위가 시작되면 급격히 증가하고, 가동판에 토압이 최저점에 도달되었을 때에 최대가 되었다.

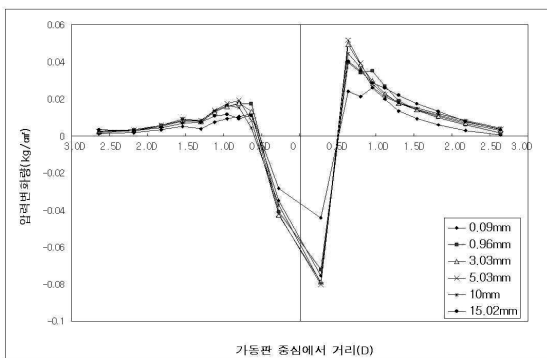
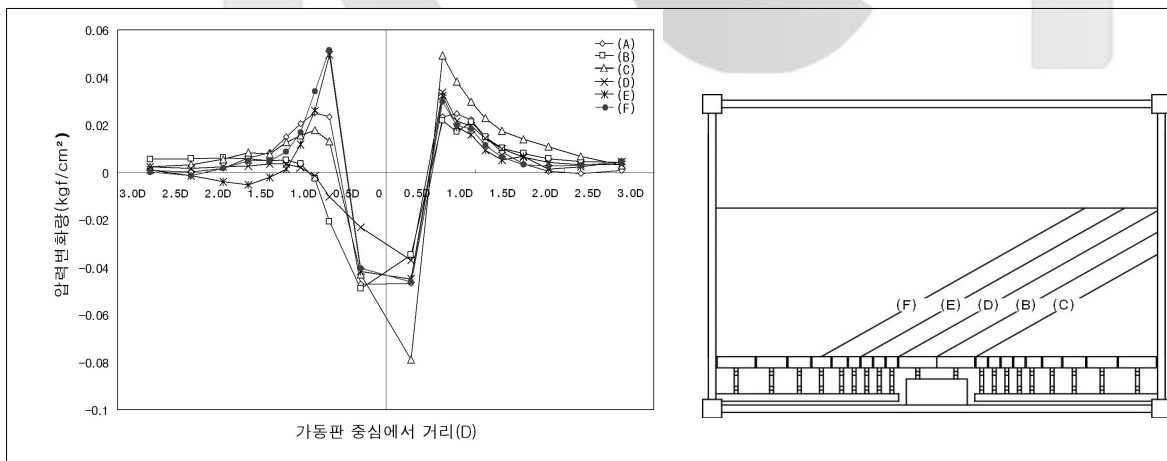


그림 6. 가동판의 변위에 따른 하중전이 (RJD30H40, 우측0.5D)

그림 7은 30°의 불연속면이 포함되어있는 토피고 2D인 지반에서 가동판의 토압이 최소값에 도달되었을 때의 주변지반의 하중전이를 나타낸다. 여기에서 불연속면의 존재로 인하여 지반의 토압분포 형태는 좌측가동판과 좌측바닥판으로 치우치는 형상을 보인다. 전반적으로 가동판이 강하되면 지반이완에 따른 아칭효과로 토압은 감소하고 주변지반에서 압력변화량은 증가하고 가동판에서 멀리 떨어질수록 상대적으로 적게 증가되었다. 균질한 지반에서는 가동판 끝으로부터 1.5D 범위까지 응력이 전이되며, 0.75D 범위 내에 집중되고 좌우 대칭된다. 따라서 지반 지지층의 두께가 0.75D로 되어 불팅의 최적 길이를 구할 수가 있다. 반면에 경사진 불연속면이 존재하면 불연속면의 영향에 의하여 비대칭으로 응력이 전이되며, 불연속면이 가동판과 만나면 불연속면이 있는 쪽으로 크게 집중된다.

이것은 불연속면 하부지반이 원지반과 분리되어 그 자중이 하중으로 작용하기 때문으로 추정된다. 불연속면이 터널 상부를 통과하여 가동판과 만나지 않을 때에는 반대로 불연속면의 끝이 있는 곳에 하중이 크게 집중되는데 이것은 불연속면 하부지반의 이완에 의해 상부지반의 응력이 불연속면 끝단 쪽으로 편중되었기 때문으로 추정된다. 또한 하중이 비대칭 전이되면서 크게 집중되는 쪽은 영향범위도 불연속면의 위치에 따라 1.5D~2.5D 사



(A)균질한 지반 (B)CJD30H40 (C)RJD30H40 (D)LJD30H40 (E)LJdD30H40 (F)LJ3D30H40

그림 7. 불연속면 위치에 따른 하중전이 (H=40, ∠ 30°)

이로 넓어졌다. 따라서 지반 지지력이 균일한 두께로 형성되지 않고 좌우 비대칭으로 형성되므로 볼트의 길이도 이에 맞도록 해야 할 것이다.

불연속면의 위치가 가동판의 오른쪽 끝에 위치한 (C)의 경우는 불연속면이 존재하는 우측 0.5D 이내에서 크게 증가하였고, 좌측에서는 불연속면이 멀리 떨어져 있음에도 불구하고 하중전이가 매우 적게 일어났다. 인접한 바닥판으로의 하중전이가 적으면 좁더 좁은 영향 범위를 나타냈다.

불연속면이 가동판 중심에서 시작하는 (B)의 경우에는 불연속면이 있는 우측에는 하중전이가 넓은 영역에서 일

어나지만 집중현상은 두드러지지 않은 반면에, 불연속면에서 멀리 떨어진 좌측에서는 집중현상이 뚜렷하게 일어나지 않고 넓은 영역에서 고르게 증가하였다. 이러한 현상은 불연속면이 가동판 좌측단에 있는 (D)의 경우에서도 볼 수 있었다. 이것은 가동판의 강하와 더불어 우측지반의 변형이 크게 발생하여 하중이 우측으로 크게 집중되었기 때문이다. 한편, 불연속면이 가동판에서 좌측으로 0.5D와 1.0D 떨어진 곳에 위치하여 불연속면이 가동판과 직접 만나지 않고 가동판 상부지반을 지나는 (E), (F)의 경우는 하중집중현상이 불연속면이 시작되는 좌측에 크게 일어났으나 0.5D 범위 내에 국한되었다. 반면에

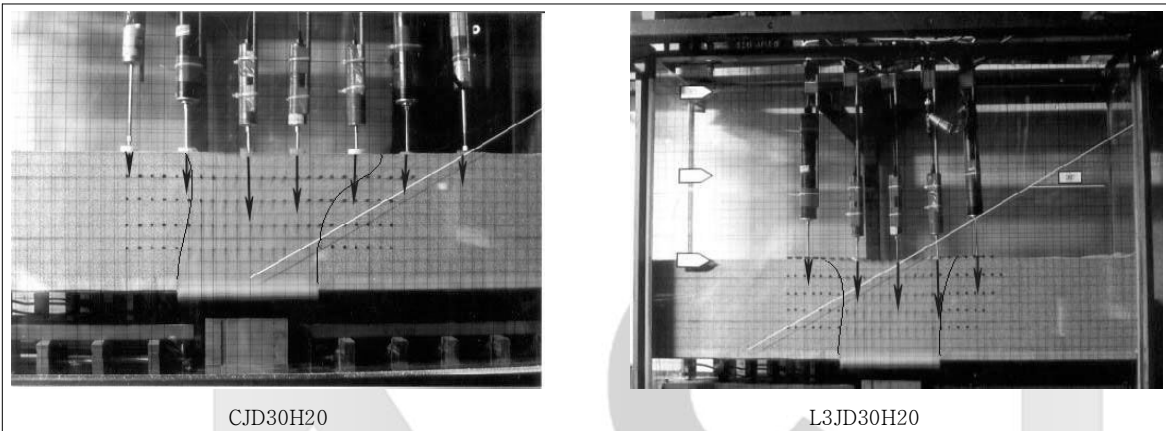


사진 2. 토피고 1D인 경우 불연속면 위치에 따른 이완영역

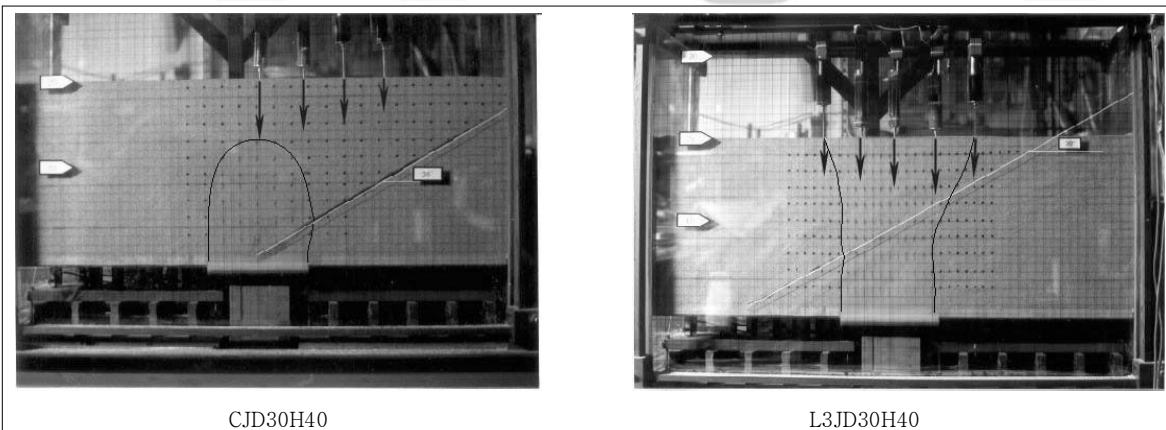


사진 3. 토피고 2D인 경우 불연속면 위치에 따른 이완영역

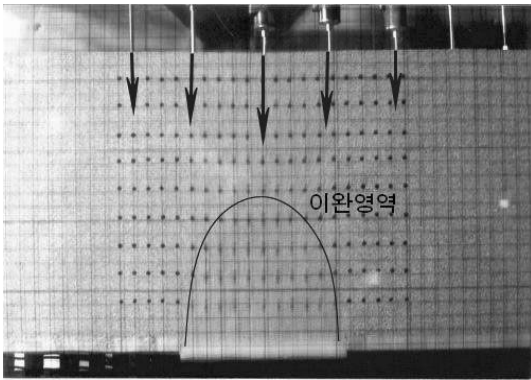


사진 4. 불연속면이 없는 경우의 이완영역 (토피고 2D)

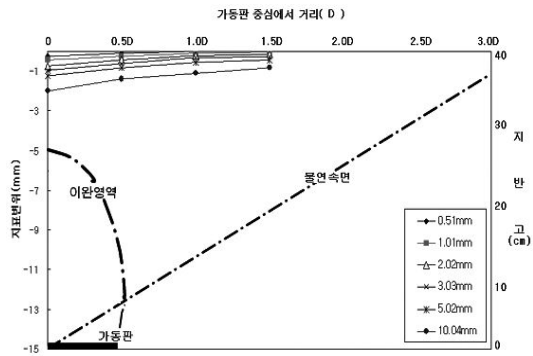
우측에는 균질한 경우에 비하여 약간만 증가하는 양상을 보였다.

### 4.3 지반변위

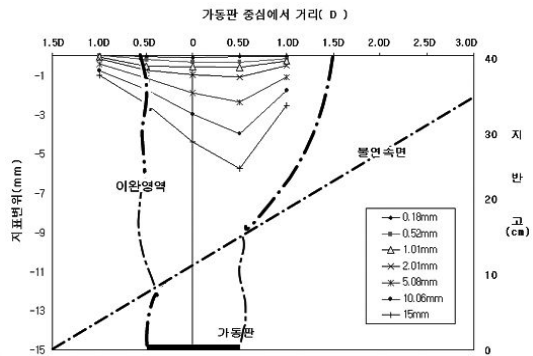
균질한 지반에서 지표의 일반적인 변위양상은 가동판의 강하에 따라 가동판의 연직상부지반에서만 침하가 발생하고, 가동판을 벗어난 구간은 미소한 변위만이 발생하며, 토피고가 높아짐에 따라 지표변위는 감소하는 경향이 있었다. 사진 2, 3의 경우는 연속촬영기법을 통해 실험 전반에 걸친 지반의 움직임을 관찰한 결과이다. 여기에서와 같이 불연속면의 존재는 이완영역의 형성에 영향을 주며 더 이상 특정한 형상을 이루지 않게 된다. 특히 가동판의 중앙에 위치한 경우 예상할 수 있는 영역을 초과한 형태로 존재하며 이는 가동판과 바닥판의 하중 분포로 확인 된다. 가동판의 강하에 따라 이완영역은 점점 상부지반으로 확대되며 그림 8과 같이 지표의 침하로 나타났다.

그림 8(a)에서 지표 침하량은 큰 기복 없이 가동판에서 멀어질수록 서서히 줄어드는 것을 보이며 불연속면이 없는 경우와 비슷한 변위양상을 보인다.

그림 8(b)는 불연속면이 가동판과 1.5D 떨어진 경우로 불연속면을 경계로 상부지반은 좌측으로 치우치는 경향을 보이며 이로 인해 지표변위는 우측에서 좀더 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다.



(a) CJD30H40



(b) L3JD30H40

그림 8. 지표변위와 이완영역

## 5. 결론

본 연구에서는 활동성 불연속면을 포함하고 있는 사질 토 지반에서 터널을 굴착할 때에 이완영역 형성과 아칭 효과에 의한 주변지반으로의 하중전이 양상이 불연속면에 의해 받는 영향을 파악하기 위하여 터널 상부 지반의 토피고와 불연속면의 위치를 변화시켜가며 실내모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연직불연속면이 터널의 중앙에 있는 경우에는 균질한 경우보다 더 큰 이완영역이 형성되었으며, 주변지반으로의 하중전이는 균질한 경우와 같이 대칭으로 일어났다.



2. 가동판이 강하되면 초기에는 가동판에 작용하는 토압이 급격히 감소하고 점차 수렴하였고 변위가 지속되면 약간 증가 하였다. 반면에 인접한 주변지반으로의 하중전이는 초기에는 급격히 증가하다가 가동판의 토압이 최저점에 도달되었을때에 최대가 되었다.
3. 이완토압은 불연속면이 없거나 가동판 중앙에 있는 경우에는 좌우에서 같은 크기가 되었으나, 불연속면이 있는 경우에는 불연속면의 경사나 위치에 따라 좌우에서 다르게 나타났다.
4. 가동판의 강하에 따른 주변지반으로의 하중전이 양상은 불연속면의 영향을 받아서 그 분포형태와 크기 및 집중도가 크게 달라졌다.
5. 지반에 경사진 불연속면이 있는 경우에는 좌우 대칭으로 하중이 전이되지 않고 불연속면을 따라 쐐기형태로 지반이 이완되었으며 불연속면의 위치에 따라 하중전이가 0.5D~1D에 집중되어 일어났다. 또한, 지중 및 지표의 변위도 불연속면의 영향을 받아 불연속면과 인접된 부분에 집중되어 형성되며 지표변위도 크게 발생하였다.
6. 불연속면이 가동판과 1.5D 떨어진 경우에는 가동판 강하에 따라 이완영역은 크게 발생하였으나 가동판에 직접적인 영향을 주지 않고 바닥판과 불연속면의 끝부분이 만나는 위치에서 집중적인 하중분포로 나타났으며 불연속면이 가동판 상부에 존재하는 경우도 불연속면이 없는 경우에 비해 많은 하중 집중형태를 보였다.

이상에서 원지반보다 전단강도가 작은 활동성 불연속면이 있는 경우에는 이완영역과 이완토압 및 주변지반으로의 하중전이가 불연속면의 형태나 위치 및 각도에 따

라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 실제 터널에 있어서 이를 고려한 지보공설계가 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 이상덕 외 2명 (1994), "안정된 지하구조물의 설계 및 시공", 도서출판 새론.
2. 이상덕 (1998), "토질역학", 도서출판 새론.
3. 이상덕 (1997) "기본토질실험 -원리와 방법-", 도서출판 새론.
4. 권혁민 (2001), "사질토 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이", 석사학위논문, 아주대학교.
5. 홍성완 (1986), "사질토내의 국부침하에 따른 지 변변위의 무라야마 (村山)산정식에 대한 연구", 대한토목학회지, Vol. 2.
6. 윤지선 (1991), "NATM 工法의 調査 · 設計 · 施工", 구미서관.
7. 한국철도기술연구원, 아주대학교 토목기술연구센터 (2000), "지반보강에 따른 터널 굴착시 지반거동에 관한 연구".
8. 건설교통부, 아주대학교 토목기술연구센터 (1998), "질리 암반터널의 설계 및 계측관리기법 개발".
9. 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.
10. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical soil mechanics", John Wiley & Sons, New York.
11. Karoly Szechy (1973), "The art of tunneling", Akademiai kiado Budapest,
12. Kouthabeloulis, N. C. & Griffiths, D. V. (1989), "Numerical modeling of the trap door problem", Geotechnique, Vol. 39, No. 1.



**이상덕**

아주대학교 환경건설교통공학과  
교수  
lsangduk@ajou.ac.kr



**김양운**

태조엔지니어링 사원  
kywoon@hanmail.net

---

K C I