

불연속면이 존재하는 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이

Load-transfer mechanism in the ground with discontinuity planes
during tunnel excavation



이상덕*¹
Lee, Sang-Duk



변광욱*²
Byun, Gwang-Wook



유건선*³
Yoo, Kun-Sun

Abstract

In this study, the influence of the presence of discontinuity planes on the load transfer mechanism and the pattern of loosening zone was studied based on the laboratory test. The trap-door and the reaction plates are installed as the bottom plane of the model box. The vertical discontinuity plane is installed in the dry sand. Various overburden heights and locations of discontinuity planes are applied as major factors in this study. The results show that at higher overburden heights over about 1.5 times the excavation width, the ratio of the transferred stress to the insitu stress converges to a certain value even if the overburden height increases further. The results also show that the discontinuity plane gives relatively larger influence on the load transfer mechanism, that produces the unsymmetrical load concentration, when the discontinuity plane locates within the tunnel width. When the discontinuity plane locates outside the tunnel width, the unsymmetrical load concentration is reduced considerably.

Keywords: Load transfer, Loosening zone, Discontinuity plane, Trap-door, Reaction plate, Overburden ratio, Earth pressure ratio

*¹ 아주대학교 건설교통공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Transport Eng, Ajou University

*² 아주대학교 건설교통공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Transport Eng, Ajou University

*³ 한라대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, Halla University

요 지

본 연구에서는 지반내에 뚜렷한 불연속면의 존재로 인한 하중의 비대칭 전이특성과 이완영역의 형상을 실내실험에 기초하여 고찰하였다. 가동판(trap-door)과 바닥판(reaction plates)을 토조바닥에 설치하고, 건조한 모래지반에 연직의 불연속면을 설치하여 불연속성 지반을 형성하였다. 다양한 토피고와 불연속면의 위치를 실험변수로 적용하였다. 연구결과, 토층비(=토피고/가동판의 폭)가 1.5 이상이 되면, 토압비(전이응력/초기지반응력)는 일정한 값에 수렴되는 것으로 나타났다. 불연속면이 터널 폭 내에 위치하면 불연속면의 영향이 상대적으로 커져서 비대칭성 하중집중이 두드러지게 나타났으며, 터널폭 외부에 존재하면 비대칭성 하중집중이 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

주요어: 하중전이, 이완영역, 불연속면, 가동판(trap-door), 바닥판(reaction plate), 토층비, 토압비

1. 서론

터널의 설계 방법에는 이완하중의 개념에 의거하여 터널에 작용하는 하중을 추정해 이를 지지하는 지보공 및 라이닝을 구축하는 방법과 터널 굴착에 따라 터널 주변지반이 응력 재분배에 의해 지반 자체가 안정하도록 지보공이나 라이닝공을 설치하는 방법이 있다. 이 두 방법에서는 모두 터널에 작용하는 외력을 정확히 정량적으로 파악할 수 있는지가 매우 중요한 인자가 된다. 일반적으로 터널 굴착대상인 지반은 불균질하고 절리, 단층 등의 불연속면이 존재하는 경우가 많으며 이러한 지반에서의 터널 및 주변지반의 거동은 불연속면의 분포형태 및 특성에 의해 지배된다. 하지만 불연속면을 포함한 지반거동에 관한 연구는 시료 구성 및 실험의 경계조건 설정 등의 어려움 때문에 현재의 터널 거동 연구는 일반적으로 원지반을 연속체로 고려하여 시행되고 있다.

본 연구에서는 불연속면이 존재하는 지반 내에서 터널 굴착시 비대칭 아칭효과에 의한 주변지반의 하중전이 현상을 규명하기 위하여, 사질토 모형지반 내에 연직방향으로 활동이 일어나기 쉬운 불연속면을 형성하고 불연속면의 위치와 토피고를 변화시켜가며 지반내 하중전이형태 및 이완영역을 구하였다.

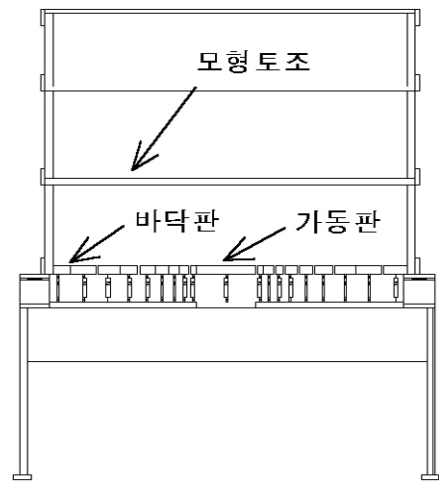


그림 1. 모형 실험 장치

2. 실내모형실험

2.1 실험개요

본 실험은 사질토 지반에서 터널 굴착시 지반의 아칭효과에 의한 하중전이 현상을 파악하기 위한 것이다. 그러므로, 사질토 지반의 하중전이 형태를 측정할 수 있도록 바닥판(reaction plate)과 사질토 지반 및 연직변위가 발생하는 가동판(trap-door)을 모델링하여 모형실험을 수

표 1. 실험지반의 기본물성

입도분포	$D_{10} = 0.41$ $C_u = 1.95$ $C_c = 0.86$
최대 건조단위중량 최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 1.81$ $\gamma_{dmin} = 1.52$
비중	$G_s = 2.65$
통일분류법에 의한 분류	SP

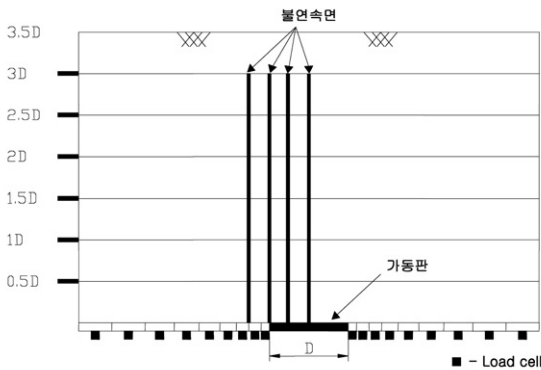


그림 2. 토피고와 불연속면

행하였다.

모형실험 토조의 크기는 30cm(B)×115cm(L)×75cm(H)로서 실험시 지반의 거동을 외부에서 관찰하기 위하여 아크릴판과 유리를 부착하였다. 가동판의 크기는 30cm(B)×20cm(D)이며 바닥판은 지반의 이완토압을 측정하기 위하여 30cm×2~8cm로 변화하였다. 모형 실험 장치의 모식도는 그림 1과 같으며 지반내에 불연속면을 조성하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험지반 및 실험종류

모형지반은 주문진 표준사를 사용하였으며 통일분류법에 의해 미세입자가 적고 입도분포가 불량한 모래인 SP로 분류되었다. 실험지반의 기본물성은 표 1과 같으며 수직 불연속면과 토피고에 따른 실험종류는 그림 2와 같

표 2. 실험종류

	실험명	실험 특징
불연속면을 고려하지 않은 실험 (7종류)	PH10	토피고 10cm
	PH20	토피고 20cm
	...	생략
불연속면을 고려한 실험 (12종류)	PH70	토피고 70cm
	JL0H20	불연속면 0cm이격, 토피고 20cm
	JL5H20	불연속면 5cm이격, 토피고 20cm
...	생략	
JL15H60	불연속면 15cm이격, 토피고 60cm	

다.

불연속면을 고려하지 않은 실험의 경우, 토피고를 0.5D에서 3.5D까지 0.5D(10cm)씩 증가시켜 실험을 수행하였다. 또한 불연속면을 고려한 실험에서는, 토피고를 1.0D, 2.0D, 3.0D까지 1.0D(20cm)씩 증가시키며 불연속면의 위치를 가동판 중심에서 0.0D, 0.25D, 0.5D, 0.75D 등으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 불연속면은 두장의 아세테이트지 사이에 그리스(grease)를 얇게 펴 발라 매우 미끄러운 면으로 구성하였다. 표2는 실험종류에 따른 실험 명칭에 대한 설명을 보여주고 있다.

2.3 실험 계측

2.3.1 하중전이 계측

본 실험에서는 가동판의 강하에 따른 지중의 하중전이 형태를 측정하기 위하여 가동판 및 모든 바닥판의 하부에 Load cell을 설치하였다. 또한 가동판의 연직변위를 측정하기 위하여 가동판의 하단에 LVDT를 2개 설치하였다.

2.3.2 이완영역 계측

본 실험에서는 바닥판 끝 부분에서 $45^\circ + \phi/2$ 의 예상파괴면을 기준으로 계측위치를 선정하였다. 또한 지중변위는 가동판 상부 0.5D(10cm), 1D, 1.5D로 결정하였고, 지표변위는 지중변위와 동일한 위치의 상부와 예상파괴면 밖의 변위도 계측을 하였다. 불연속면을 고려한 실험은

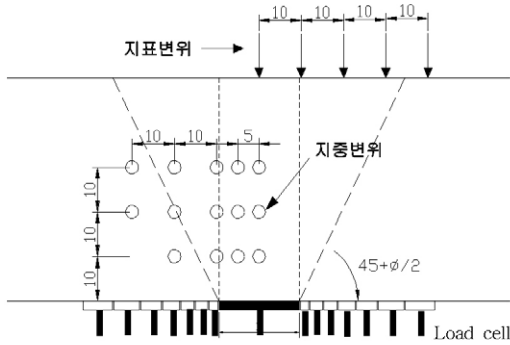


그림 3. 계측기 위치도(토피고 실험, 단위:cm)

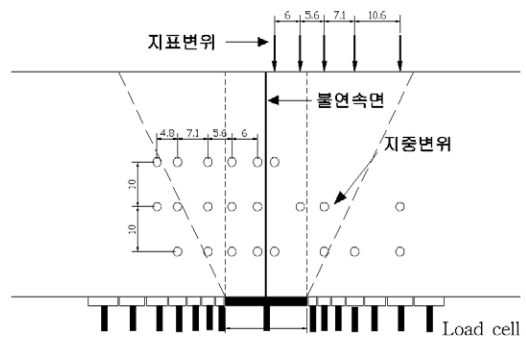


그림 4. 계측기 위치도(불연속면 실험, 단위:cm)

표 3. 계측기의 제원 및 수량

계측 항목	계측 센서	용량	수량	계측 장비
가동판의 하중	Load cell	100kg	2	TDS-302
바닥판의 하중		50~100kg	18	
가동판 변위	LVDT	50mm	2	UPC-601
지중 변위		30~50mm	14	
지표변위		50mm	5	

불연속면을 기준으로 좌·우 대칭된 변위와 가동판 중심 및 가동판 끝 부분의 연직선상에서 변위를 계측하였다.

힘의 경우에 가동판의 연직토압은 가동판의 강하 초기에 급격히 감소한다. 그러나 가동판의 연직토압이 수렴후 증가하는 단계에서 연직토압의 기울기는 토피고 30~40cm를 기준으로 낮은 토피고의 경우가 높은 토피고 보다 큰 기울기로 증가하는 것을 보여 주고 있다. 이는 가동

3. 실험결과 및 분석

3.1 균질한 지반 조건에서의 하중전이

3.1.1 가동판(Trap-door)의 연직토압 변화

가동판의 강하에 따른 가동판의 연직토압은 모든 실험에서 동일한 양상을 보여주고 있다. 가동판 강하 초기에는 급격한 토압의 감소를 보이며 강하량이 약 1mm에서 일정한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 수렴구간을 지나 가동판을 계속 강하하면 가동판의 연직토압은 증가하는 경향을 보인다. 그림 5는 원지반의 토압(P_v)과 가동판의 강하에 따른 토압(P_v')의 비로서 무차원화한 토압 비를 가동판의 강하량에 대하여 나타낸 것이다. 모든 실험

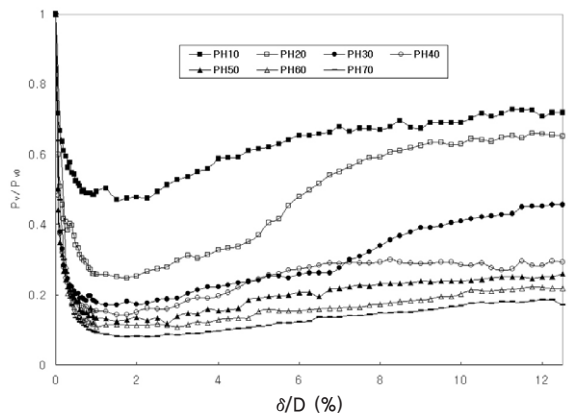


그림 5. 토피고에 따른 가동판의 토압비와 강하량

판이 강하됨에 따라 원지반에는 이완영역이 형성되며 가동판은 이완영역의 토압을 받게 되어 가동판의 토압은 감소한다. 이때 이완영역 상부의 지반은 주변지반으로 하중전이가 되어 가동판 주변의 바닥판은 토압이 증가한다.

3.1.2 가동판 주변 연직토압 변화

그림 6의 바닥판 압력은 가동판의 강하시 순수한 토압의 변화량만을 검토하기 위하여 가동판의 강하에 따른 압력의 변화량만을 도시하였다. 바닥판의 연직토압은 실험시 측정한 하중을 바닥판의 면적으로 나누어 각각의 압력을 비교한 결과, 가동판이 강하됨에 따라 가동판의 압력은 감소하고, 가동판에 근접한 바닥판은 큰 폭의 압력증

가를 보인다. 반면 가동판에서 멀리 떨어진 바닥판의 압력은 상대적으로 적은 양의 증가를 보였다. 토피고가 낮은 경우의 실험에서는 가동판에서 멀리 떨어진 바닥판의 압력은 미소한 증가 혹은 원지반의 압력과 동일한 수치를 나타내고 있다. 반대로 토피고가 높아질수록 이완영역 상부의 지반은 아칭효과에 의하여 가동판에서 멀리까지 전이가 되며 이로 인하여 전체 바닥판의 압력이 증가한다.

3.2 불연속면이 존재하는 경우의 하중전이

3.2.1 가동판(Trap-door)의 연직토압 변화

가동판 강하 시 가동판에 작용하는 연직토압은 가동판

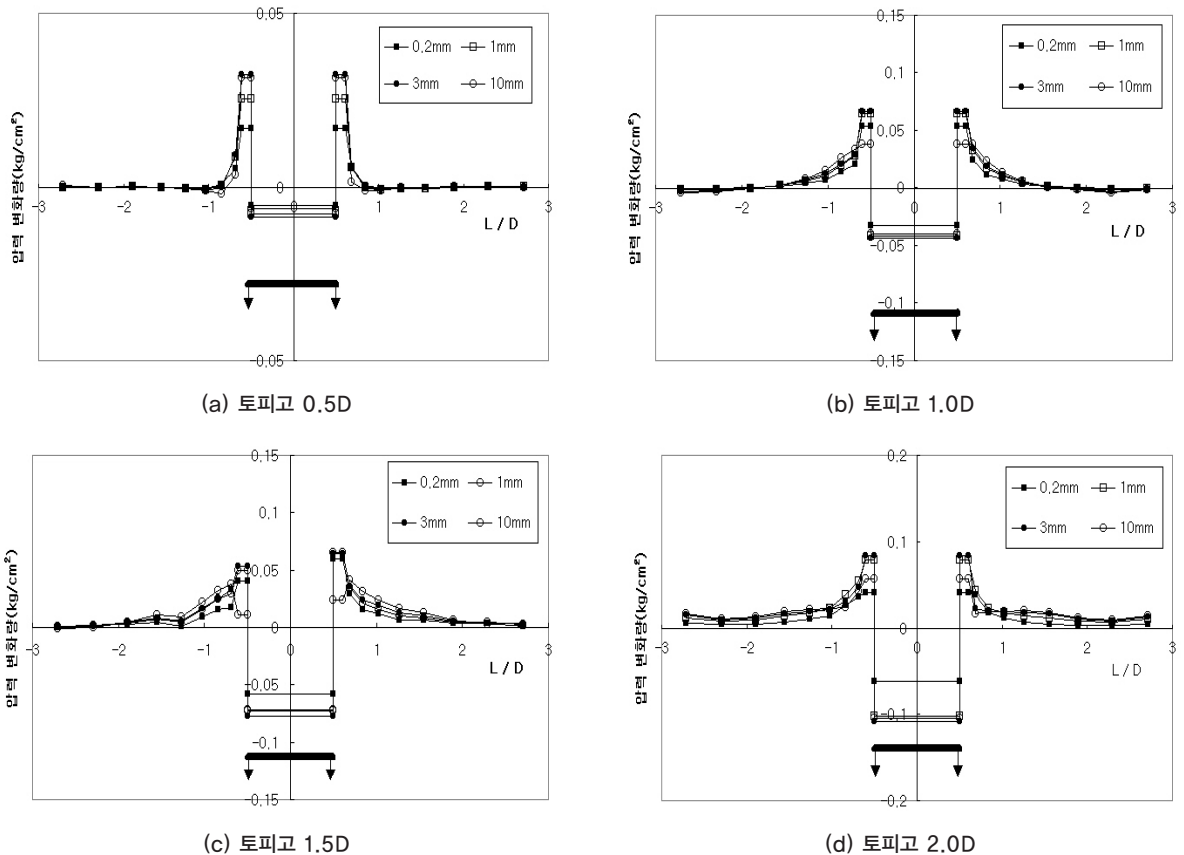
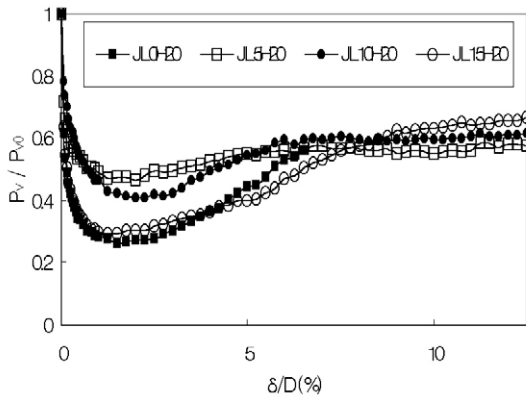
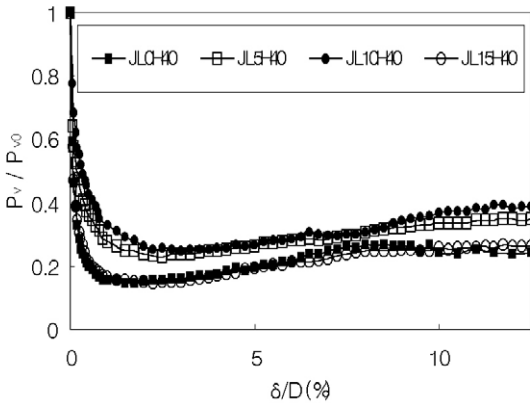


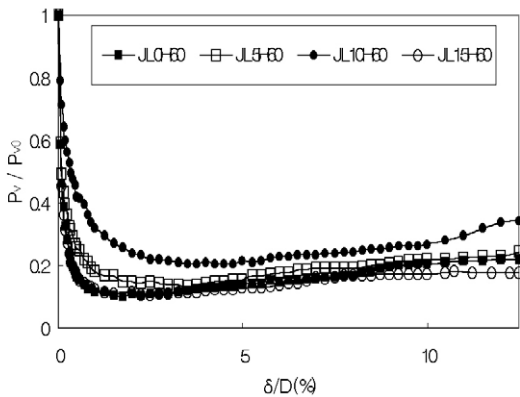
그림 6. 토피고에 따른 가동판의 강하와 바닥판 압력



(a) 토피고 1.0D



(b) 토피고 2.0D



(c) 토피고 3.0D

그림 7. 불연속면이 존재하는 경우 가동판의 토압비와 강하량

강하 초기에는 급격한 감소를 보이며 강하량이 약 1mm에서 일정한 값에 수렴한다. 수렴구간을 지나 가동판의 강하가 계속되어짐에 따라 가동판의 연직토압은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 불연속면이 가동판 중심으로부터 0.25D, 0.5D에 위치하는 경우가 상대적으로 큰 연직토압을 나타내고 있다. 이는 불연속면의 위치에 따라 지반의 이완영역은 각각 다르게 형성되며 불연속면의 위치가 가동판 중심에서 0.25D, 0.5D에 존재하는 경우가 더 큰 이완영역을 형성하기 때문인 것으로 판단된다. 가동판을 계속하여 강하함에 따라 토압비가 증가하는 것은 초기에 형성된 이완영역이 상부 지반으로 확대되고 있음을 보여주는 것으로 판단되며 이러한 이완영역의 확대현상은 불연속면에 집중되어 발생한다.

3.2.2 가동판 주변의 연직토압 변화

그림 8의 바닥판 압력은 가동판의 강하시 순수한 토압의 변화량만을 검토하기 위하여 가동판의 강하에 따른 압력의 변화량만을 도시하였다. 그림 8은 각 실험에 대한 대표적인 예로서 토피고는 2D로서 불연속면의 위치에 따른 바닥판의 압력을 나타낸 것이다.

가동판이 강하됨에 따라 가동판의 압력은 원지반의 압력($\sigma_v = \gamma \cdot z$)에서 감소한 후에 다시 서서히 증가를 하는 양상을 보이는데 반하여 가동판에 근접한 바닥판의 압력은 큰 폭의 증가를 보인 후에 감소한다. 불연속면이 가동판 중심에 위치하는 경우는 좌·우 바닥판의 압력이 대칭을 이루고 변화한다. 불연속면이 가동판 중심으로부터 0.25D(5cm), 0.5D(10cm), 0.75D(15cm)에 위치한 경우, 불연속면으로 인해 하중이 전이되지 못하고 수직 불연속면을 따라 활동하여 연직하중으로 작용한다. 그리하여 가동판과 수직 불연속면 사이의 바닥판 압력이 증가한다.

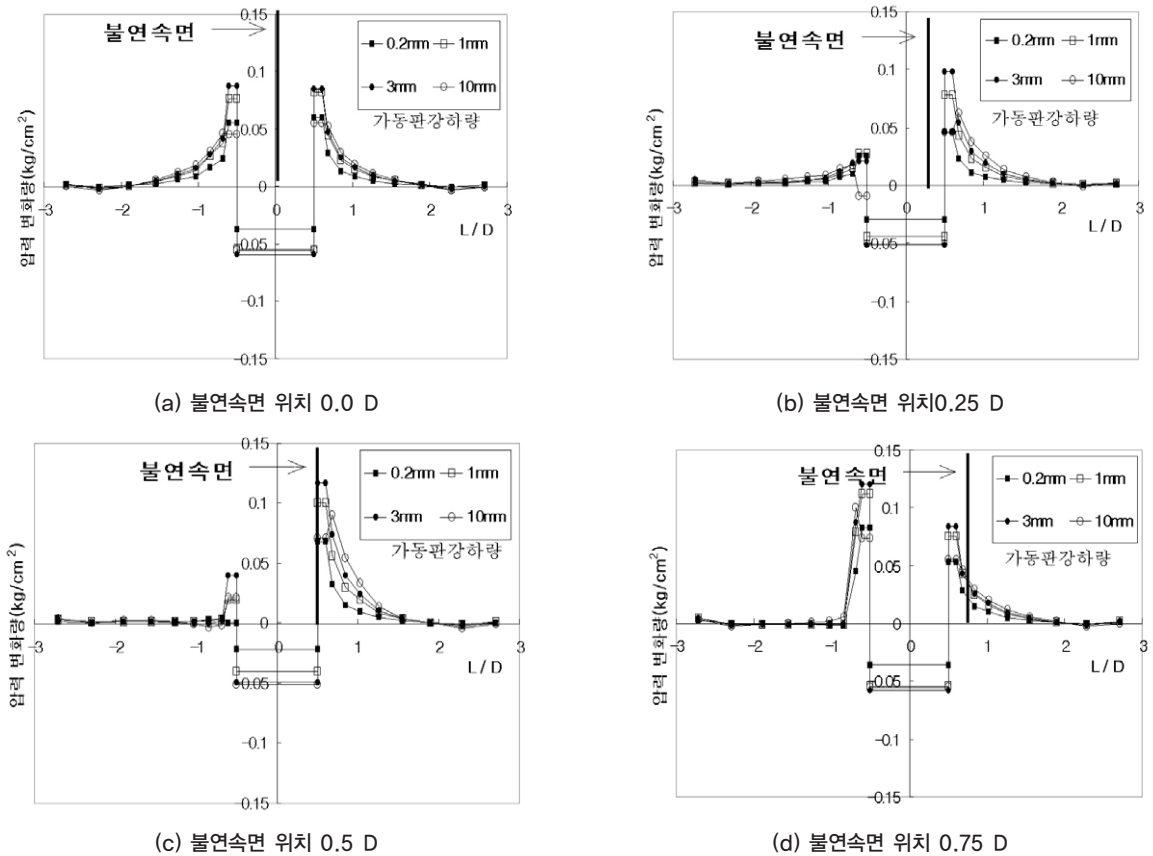


그림 8. 불연속면이 존재하는 경우 가동판의 강하에 따른 바닥판 압력(토피고 2D)

4. 결론

본 연구에서는 사질토 지반에서의 터널 굴착시 아칭효과에 의한 주변지반으로의 하중전이 현상을 규명하기 위하여 지반의 토피고 및 불연속면의 위치를 변화시키며 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가동판의 연직토압은 토층비(H/D) 1.5를 기준으로 얕은 토피고에서는 상대적으로 큰 토압비를 나타내고 있으나 그 이상의 높은 토피고에서는 일정한 토압비에 수렴하는 경향을 보였다. 또한 가동판을 계속 강하시키면 점차 이완영역이 확산되어 가동판의 토

압비는 지속적으로 증가한다.

- 2) 가동판의 강하에 따라 형성된 이완영역의 대부분의 토압이 가동판에 작용하게 되며, 이완영역의 외부의 상부 하중은 아칭효과에 의해 주변지반으로 등분포 하중전이가 이루어져 주변 바닥판은 균등한 토압의 증가를 보인다.
- 3) 연직의 불연속면이 존재하는 경우, 불연속면이 가동판 중심에서 0.25~0.5D의 거리에 위치하면(즉, 터널 폭 내에 위치하면) 주변지반으로의 하중전이를 보이지만, 0.75D의 거리에 불연속면이 위치하면(즉, 터널 폭 외부에 위치하면) 가동판에 작용하는 하중은 균질한 지반조건과 유사한 값을 보인다.

4) 연직의 불연속면이 존재하는 경우, 불연속면의 위치가 가동판 중심에서 0.25~0.5D 떨어진 실험에서 지반의 이완높이가 상대적으로 높게 형성되었다. 이 부분은 터널의 어깨부와 측벽부에 해당하므로 이부분에 불연속면이 위치하면 상대적으로 큰 이완영역과 응력집중을 예상할 수 있다.

참고문헌

- 1) 이상덕 외 2명, “안정된 지하구조물의 설계 및 시공”, 도서출판 새론, 1994
- 2) (사)한국지반공학회, “지반공학시리즈 7터널”, 구미서관, 1996
- 3) 김영근, “터널에 작용하는 지압의 추정방법에 관한 고찰”, 한국암반공학회 터널과 지하공간, Vol. 9, 1999
- 4) Terzaghi, K., “Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door”, Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Cambridge, Vol. 1, 1936
- 5) Ono, K., Yamade M., “Analysis of the arching action in granular mass”, Geotechnique, Vol. 43, No. 1, 1993
- 6) 장석부, “절리의 기하학적 특성과 역학적 특성을 고려한 절리암반의 개별요소모델링에 관한 연구”, 석사학위논문, 1992
- 7) Karoly Szechy, “The art of tunneling”, Akademiai kiado Budapest, 1973