

연직 불연속면이 존재하는 얇은 심도의 사질토 지반에서 2-Arch 터널 단계별 굴착에 따른 하중전이에 관한 실험적 연구

오범진¹, 이상덕²

An experimental study on the load transfer mechanism of shallow 2-Arch tunnel excavation sequence with vertical discontinuity planes in sandy ground

Bum-Jin Oh, Sang-Duk Lee

ABSTRACT In this study, the behavior of a shallow 2-Arch tunnel during the excavation in the sandy ground containing vertical discontinuity plane was experimentally studied. Load transfer mechanism in the pillar caused by a 2-Arch tunnel excavation was observed. The position of the vertical discontinuity plane was varied. Model tests were carried out in the normal construction sequence of 2-Arch tunnel.

Test results, showed that the load transfer caused by the 2-Arch tunnel excavation was concentrated in the discontinuity plane, and was cut by the discontinuity plane, so no load transfer took place above the discontinuity plane. It was also shown that the effect of adjacent tunnel excavation on the pillar load and the ground deformation was greater when excavating the upper half-face of the main tunnel, more than when excavating the lower half-face.

Keywords: 2-Arch tunnel, vertical discontinuity plane, load transfer, loosening area

요약 본 논문에서는 연직 불연속면을 포함하는 지반에서 얇은 심도 2-Arch 터널 굴착에 따른 거동특성을 실험적으로 연구하였으며, 2-Arch 터널 굴착에 따른 필러부 하중전이 특성을 관찰하였다. 연직 불연속면의 위치를 변화시키고, 2-Arch 터널 시공단계별로 모형실험을 수행하였다. 실험결과, 2-Arch 터널 굴착에 따른 이완하중이 불연속면이 위치한 곳에 집중되었고, 불연속면에 차단되어 불연속면을 넘어서까지 하중이 전이되지는 않았다. 또한 인접한 터널의 하반을 굴착할 때 보다 상반을 굴착할 때에 필러부와 지반변형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어: 2-Arch 터널, 연직 불연속면, 이완하중, 하중전이, 이완영역

접수일(2011.4.11), 수정일(2011.4.18), 게재확정일(2011.5.3)

¹정희원, 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

²정희원, 아주대학교 환경건설교통공학부 건설시스템공학과 교수

*교신저자: 오범진 (E-mail: balkema@empal.com)

1. 서론

터널의 단면이 커지면 공사비가 증가하고 안정성 확보가 어렵기 때문에 대단면 터널을 건설하는 대신에 작은 단면을 병설하는 경우가 증가하고 있다. 그러나 병설터널에서는 굴착 영향권의 상호간섭이 일어나므로 안정성을 확보하기 위하여 일정한 거리만큼 이격시키는 것이 일반적이다. 그러나 터널을 이격하여 병설하면 외부 접촉도로도 마찬가지로 서로 이격시켜야 하고, 이에 따른 주변 자연환경 훼손이 커질 우려가 있기 때문에 2-Arch 터널로 설계하는 경우가 많다. 터널의 간격이 작아지면 터널굴착에 의한 영향이 중첩되어 굴착에 의한 이완하중이 터널과 터널사이의 지반에 증가하게 된다. 2-Arch 터널은 굴착으로 인해 발생하는 이완하중을 필러부가 지지하기 때문에 필러부의 안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 2-Arch 터널의 필러부는 역학적 거동이 매우 복잡하고 필러에 작용하는 하중 및 단면 제원 등에 대한 설계방법도 명확하게 확립되어 있지 않아서 최근 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 2-Arch 터널은 굴착시공 순서에 따라서 하중이 주변지반으로 전이되는 특성이 달라진다. 특히 터널 상부지반에 불연속면이 존재할 경우에는 균질한 지반과 매우 다른 특성을 보이고 있다. 균질한 사질토 지반과 수평 및 경사 불연속면이 존재하는 사질토 지반에서 2-Arch 터널 하중전이 특성은 이상덕(2002, 2003, 2004)등과 전은숙(2005)등이 연구하였으나 연직 불연속면이 지반 내에 존재할 경우에 대한 연구는 아직 부족하다. 따라서 본 연구에서는 2-Arch 터널 상부에 연직 불연속면이 존재할 경우에 터널 굴착단계(중앙부 pilot 터널 굴착, 선형·후행터널 굴착)에 따라 이완하중의 범위 및 분포 특성을 파악하고자 실내모형실험을 수행하였다.

2. 기존 연구동향

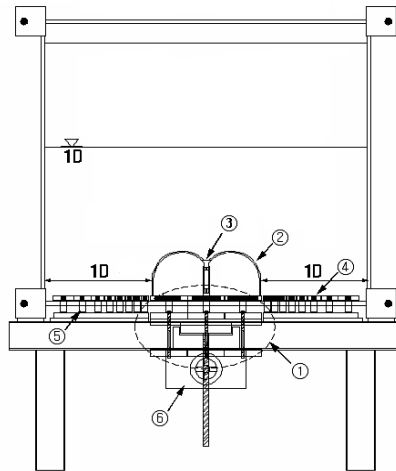
터널 굴착으로 인해 발생한 하중은 아칭효과에 의해 주변지반으로 전이된다. 이러한 하중전이는 터널간 이격거리가 가까워지면서 필러부에 집중되는데, Goodman(1989)은 “2-Arch 터널에서 필러부는 굴착에 따라 전이된 하중의 대부분을 부담한다”고 하였다. Terzaghi(1936)는 균질한 사질토에서 굴착을 모사한 Trap door 실험을 통하여 굴착으로 인한 이완하중의 크기를 연구하였다. 그러나 지반 내에 불연속면이 존재하면 필러부의 역학적 특성이 매우 복잡해진다. 이상덕(2002, 2003)등은 불연속면의 위치 및 각도를 변화시키면서 모형실험을 수행하여 “불연속면의 각도와 위치 및 터널상부 토피고에 따라서 하중전이 형태와 이완영역이 변화되며, 터널과 인접해 있는 불연속면을 따라 주변지반으로 점차 확대되어 간다고” 하였다. 또한 이상덕(2004)등은 사질토에서 2-Arch 터널의

시공순서를 고려하고 중앙필러 및 터널 주변지반의 거동을 연구하여 “2-Arch 터널 굴착으로 인한 하중전이는 터널 측벽에서 0.5D 이내에 집중되고 0.75D보다 멀리 떨어진 곳에서는 하중전이가 거의 일어나지 않는다”라고 하였다. 전은숙(2005)등은 수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동 연구에서 “수평 불연속면이 터널 상부에 존재함에 따라 필러부 작용하중이 증가하였으며 수평 불연속면이 터널에 근접할수록 필러부에 집중되며, 이러한 경향은 토피고 1.5D에 비하여 얇은터널 조건인 1D에서 더욱 뚜렷하였다.”라고 하였다. 지금까지의 연구를 살펴보면 터널이 굴착되는 지반 내에 불연속면이 존재하면 불연속면 위치에 따라서 이완영역의 분포 및 범위가 달라진다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 지금까지의 연구를 바탕으로 아직까지 연구된 바가 적은 연직 불연속면이 존재하는 지반에서 굴착하는 2-Arch 터널 시공순서에 따른 하중전이 분포 특성을 파악하고자 하였으며, 이를 위해 얇은터널(1D)조건에서 실내모형실험을 수행하였다.

3. 실내모형실험

3.1 실험개요

터널을 굴착하면 상부지반에 이완영역이 발생하고, 이완된 지반의 하중은 주변지반으로 전이되어 응력의 재배치가 이루어진다. 터널간 간격이 작아서 굴착에 따른 영향이 중첩되어 역학적 거동이 매우 복잡한 2-Arch 터널의 필러부는 상부 지반상태에 따라 작용하는 하중이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 연직 불연속면이 존재하는 사질토에서 2-Arch 터널 굴착으로 인한 주변지반의 이완에 따른 하중전이 현상을 규명하기 위하여 1/50 크기로 축소한 모형 2-Arch 터널을 제작하고 모형 토조 바닥판을 Pilot 터널 굴착을 위한 Pilot 터널부(trap door: 가동판 -132 mm×300 mm)와 본선터널에 해당하는 Right 및 Left 터널부(각각 132 mm×300 mm)의 세 개의 분리된 시스템(전체 가동판 길이 400 mm, 1D)으로 제작하여 실험하였다. 터널 주변 바닥판은 하중의 민감한 변화를 측정할 수 있도록 30, 40, 50, 65, 80 mm×300 mm의 폭으로 제작하고 하중측정용 로드셀(load cell)을 조밀하게 배치하여 터널 굴착에 따른 이완하중의 분포와 범위를 측정하였다. 모형실험 토조는 크기 30 cm(B)×120 cm(L)×110 cm(H)(폭×길이×높이)로 실험 시 지반의 거동을 외부에서 관찰할 수 있도록 아크릴로 벽체를 제작하고 벽면과 아크릴판 사이에 유리를 부착하여 마찰을 최소화 하였다. (그림 1)



- ① Trap door 시스템(pilot, right, left 터널부/ 134 mm×300 mm)
 - ② 모형터널 라이닝
 - ③ 중앙필러(load cell 2EA, 100 kgf)
 - ④ 하중측정용 바닥판(30, 40, 50, 65, 80 mm×300mm)
 - ⑤ 하중측정용 Load Cell(100 kgf)
 - ⑥ 기어박스
- ※ D : Diameter(400 mm)

그림 1. 모형터널 및 모형토조

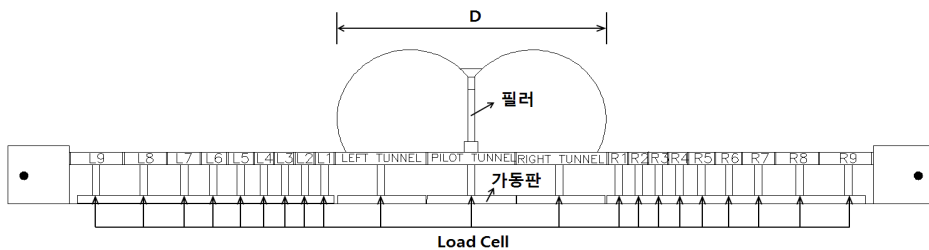


그림 2. 모형터널 하부 하중측정용 압력판

3.2 모형지반

모형지반은 입경이 0.42~1.70 mm인 주문진 자연사를 사용하여 샌드커튼(sand curtain) 방식으로 균질하게 조성하였다. 모형지반의 물리적 특성 및 역학적 특성은 입도분포시험(KS F 2301), 최대·최소 건조단위중량시험(DIN 18126), 비중시험(KS F 2343) 등의 기본 물성시험을 수행하여 파악하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 모형지반의 강도정수는 변형률 제어방식(strain control)으로 직접 전단시험을 실시하여 구하였다. 실험결과, 모형지반의 단위중량은 16.9 kN/m^3 , 내부마찰각은 37.5° , 점착력은 0 kN/m^2 로 나타났다.

표 1. 실험지반의 기본물성

물리적 특성	결 과
입도분포	$C_u = 1.72, C_c = 0.93$
최대·최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 17.9 \text{ kN/m}^3, \gamma_{dmin} = 14.6 \text{ kN/m}^3$
비 중	$G_s = 2.61$
통일분류법에 의한 지반 분류	SP

3.3 모형터널

축소 모형실험(reduced model test)에서 정량적인 결과를 도출하기 위하여 지반상태와 터널구조물의 축소율을 결정하는 것은 매우 중요한 과정으로 모형실험상에서 실제 지반상태 및 터널구조물을 모사함에 있어 상사성 원리를 충족시켜야 한다. 본 연구에서는 식 (1)과 같이 지반상태와 터널구조물의 제원이 고려된 ‘상대강성비’를 도입하여 모형터널 라이닝의 두께를 결정함으로써 상사성 원리를 충족시키고자 하였다.

$$\alpha = \frac{E_K \times R^3}{E_B \times I} \quad (1)$$

α : 상대강성비

E_K : 지반의 탄성계수

E_B : 라이닝의 탄성계수

R : 터널의 반경

I : 라이닝의 단위길이당 단면 2차 모멘트

터널 단면의 크기는 2-Arch 1 Pilot 표준단면을 1/50로 축소하여 결정하였으며, 터널라이닝 재료는 굴착에 따른 변형특성이 용이하도록 S41 강철판(탄성계수 : $1.96 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$)으로 하였다. 실제 터널과 모형터널의 지반상태 및 라이닝에 따른 상대강성비를 표 2에 나타내었다.

표 2. 상대강성비

	α	$E_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$E_B \text{ (kN/m}^2\text{)}$	R (m)	I (cm ⁴)	비 고
실제 터널	27,000	140,000	1.50×10^7	10	3.41×10^{-4}	풍화암, 슛크리트
모형 터널	25,000	52,000	1.96×10^8	0.2	8.33×10^{-11}	사질토, 강철

모형지반은 단위중량을 측정하여 구한 상대밀도로부터 ‘조밀한(dense)’ 정도의 지반으로 판단하였으며(이상덕, 2010), 상대강성비를 만족시키는 모형터널 라이닝 두께를 계산한 결과, 1.0 mm 두께로 결정하였다.

3.4 불연속면

모형지반 내 불연속면은 충분히 유연한 폴리에틸렌 필름을 세 겹으로 겹쳐서 필름 사이에는 그리스(grease)와 오일(oil)이 혼합된 윤활제를 도포하여 마찰이 작용하지 않고, 전단저항력이 원 지반보다 작은 불연속면의 특성을 잘 반영되도록 하였다. 불연속면은 모형토조와 같은 길이와 폭(1,200 mm×300 mm)의 크기로 제작하여 지반조성 중에 연직으로 설치하였고, 터널굴착 시 시공순서에 따른 영향을 관찰하기 위하여 그림 4와 같이 여러 위치에 설치하였다.

3.5 실험 방법 및 종류

본 연구에서 모형실험은 각 Case 별로 2-Arch 터널 시공단계에 맞추어 진행하였으며, 각 시공단계별로 Pilot 터널 굴착 후, 본선터널(선행터널 상반굴착 → 후행터널 상반굴착 → 선행터널 하반굴착 → 후행터널 하반굴착) 굴착 순으로 각 단계별 연직도압 변화량을 측정하였다(그림 3).

- ① 좌·우측 터널라이닝을 가동판과 중앙필러가 지지하도록 설치.
- ② 정해진 위치에 연직 불연속면을 설치.

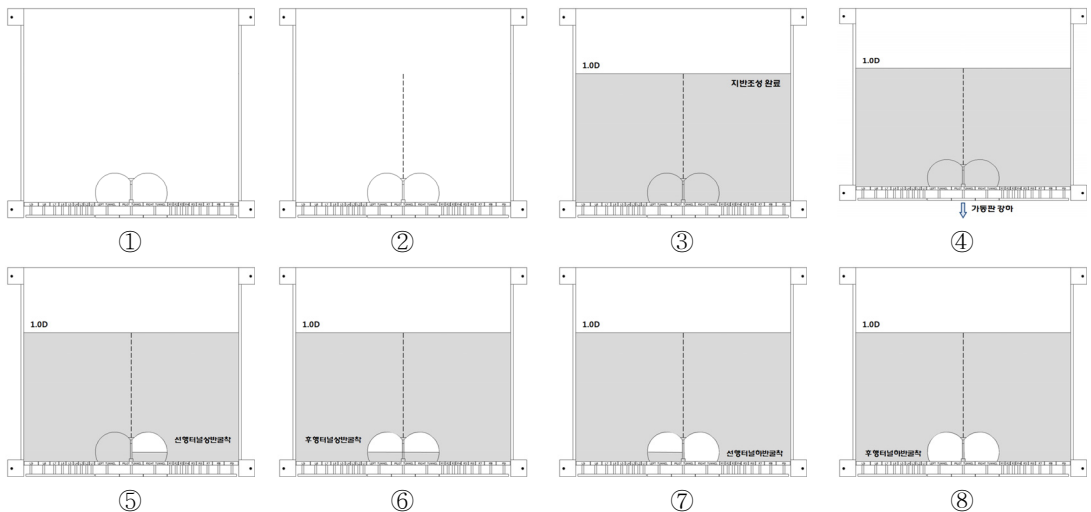


그림 3. 실험진행순서

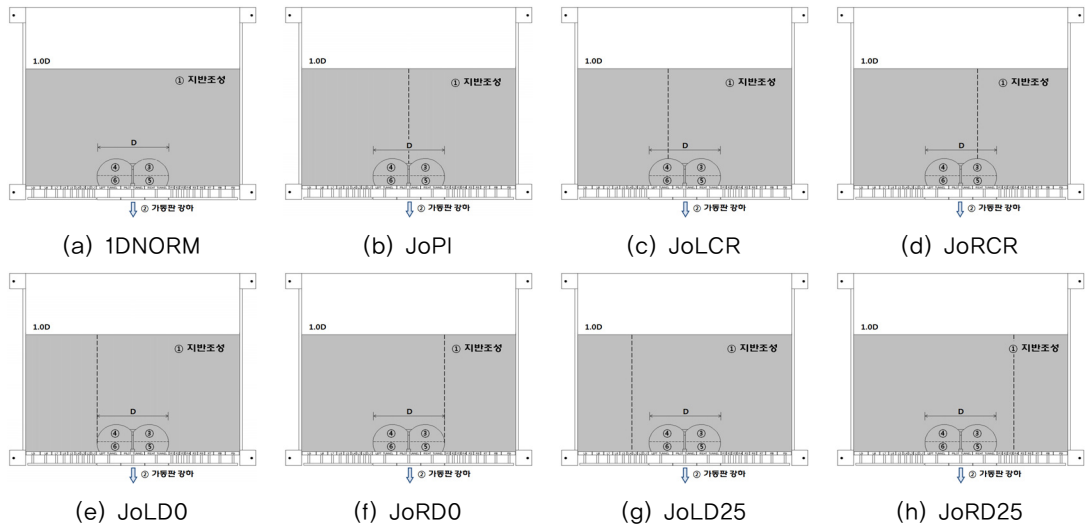


그림 4. 연직 불연속면 위치

- ③ 모형토조 뒷면 벽체의 작업구를 이용하여 좌·우측 터널 내부지반 조성 후 샌드커튼(sand curatin) 방식으로 모형지반을 조성.
- ④ 모형지반 조성 완료 후 Pilot 굴착(필러부 강하판을 중앙필러 작용하중이 ‘0’에 수렴할 때까지 강하).
- ⑤ 선행터널(우측터널) 상부 반단면 굴착
- ⑥ 후행터널(좌측터널) 상부 반단면 굴착
- ⑦ 선행터널(우측터널) 하부 반단면 굴착
- ⑧ 후행터널(좌측터널) 하부 반단면 굴착

4. 실험결과 및 고찰

2-Arch 터널에서는 Pilot 터널과 본선터널의 굴착이 진행됨에 따라 각 시공단계 별로 지반이 변형되므로 단일터널이나 병렬터널과는 다른 하중전이 양상을 나타낸다. 본 연구에서는 연직 불연속면의 위치를 변화시키면서 각 시공 단계별로 필러부와 주변지반의 굴착에 따른 변화를 관찰하였다. 지반조성 전에 중앙 가동판위에 설치한 중앙 필러부에 작용하는 하중이 “0”에 수렴할 때까지 가동판을 강하하여 Pilot 터널 굴착을 모사하였다. 실험결과는 2-Arch 터널 굴착 시공단계별 굴착에 따라 주변지반 이완하중과 연직도압 변화량을 도시하였다(그림 5~그림 19).

4.1 터널 굴착에 따른 하중전이

4.1.1 균질한 지반 내 굴착된 2-Arch 터널

균질한 지반 내에서 굴착한 2-Arch 터널의 경우(1DNORM), Pilot 터널 굴착으로 인하여 주변 지반으로 하중이 전이되어 Pilot 터널 좌·우측 지반에서 서로 유사한 양상으로 연직토압이 증가하였다(그림 5). 그림 6은 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포를 나타낸 것으로, 본선터널 굴착 시 선행터널 우측지반에서의 연직토압이 후행터널의 좌측지반의 연직토압보다 더 크게 나타났다. 이후 굴착면에서 멀어질수록 감소하였고, 그 영향범위가 약 0.8D로 나타났다. 그림 7과 같이 각 시공 단계별로 연직토압 변화량을 나타내보면, 선행터널과 후행터널 상반굴착 시 필라부의 하중이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 선행터널 상반 굴착시에는 우측 주변지반에서, 후행터널 상반 굴착시에는 좌측 주변지반에서의 연직토압 더 크게 나타났다. 그러나 상반 굴착 후의 주변지반 연직토

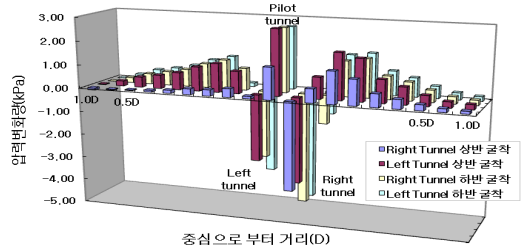
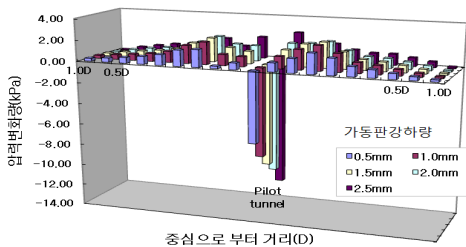
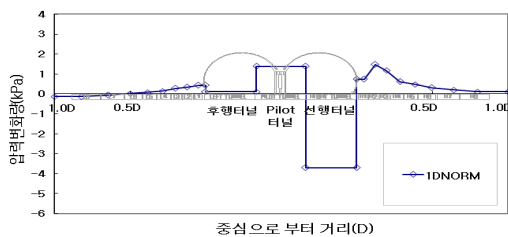
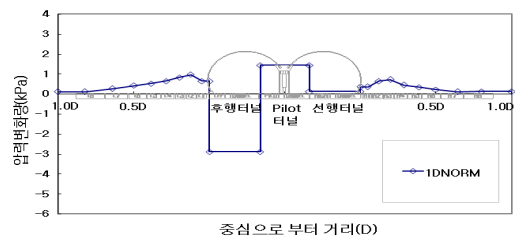


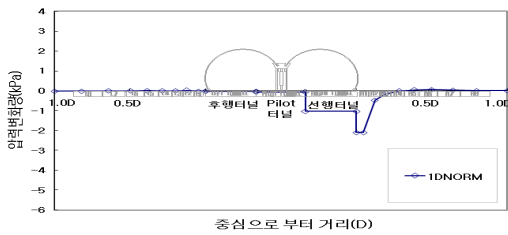
그림 5. 필러강하에 따른 이완하중 분포 (1DNORM) 그림 6. 본선굴착에 따른 이완하중 분포 (1DNORM)



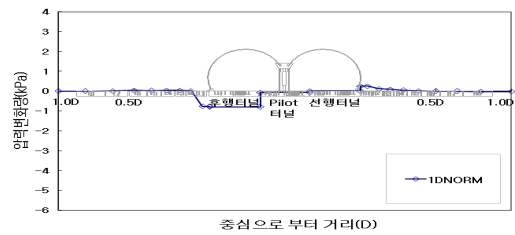
(a) 선행터널 상부 반단면 굴착



(b) 후행터널 상부 반단면 굴착



(c) 선행터널 하부 반단면 굴착



(d) 후행터널 하부 반단면 굴착

그림 7. 시공단계별 연직토압 변화량(1DNORM)

압의 양상은 유사하였다(그림 7(a), (b)). 하부 반 단면 굴착 시에는 굴착에 따른 필러부와 주변지반으로 전이된 하중은 상대적으로 작게 나타나서 하반굴착시보다 상반 굴착 시 필러부나 주변지반에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 7(c), (d)).

4.1.2 연직 불연속면의 영향을 받는 지반 내 굴착된 2-Arch 터널

(1) 연직 불연속면이 중앙필러에 위치

연직 불연속면이 중앙필러부에 위치하는 경우(JoPI), Pilot 터널 굴착에 따라 증가되는 연직토압의 분포는 불연속면이 없는 지반과 유사하게 나타났지만, 필러부에 더 크게 집중되어 발생하였다(그림 8). 주변지반으로 전이된 하중은 터널측벽 인접부에서는 감소하다가 거리가 멀어지면 증가되는 양상을 보였으며, 영향범위는 약 0.8D까지로 나타났다. 그러나 불연속면의 영향으로 후행터널

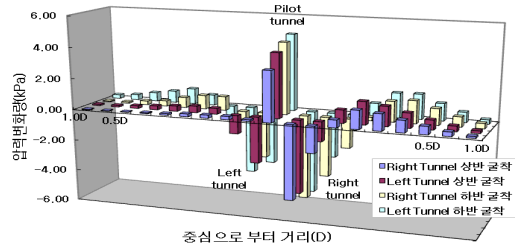
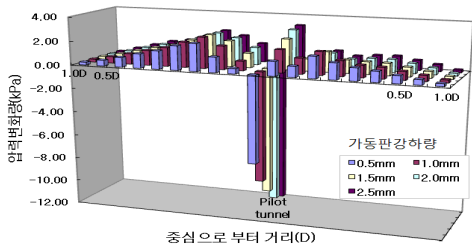
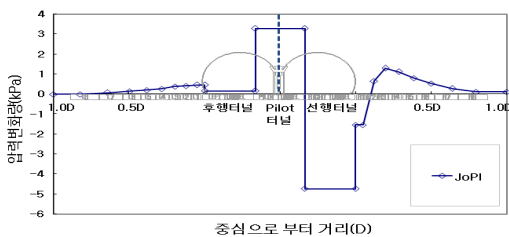
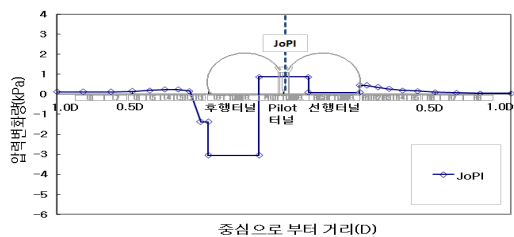


그림 8. 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoPI)

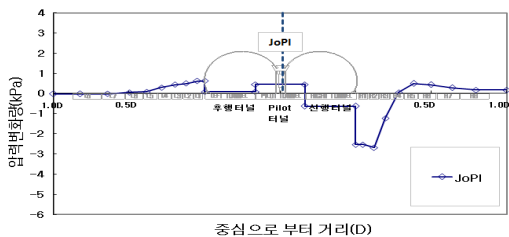
그림 9. 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoPI)



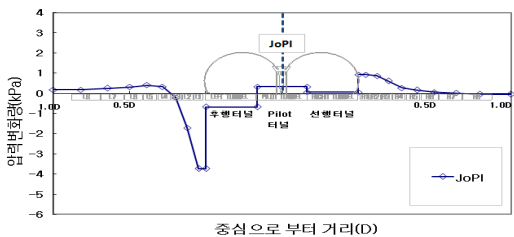
(a) 선행터널 상부 반단면 굴착



(b) 후행터널 상부 반단면 굴착



(c) 선행터널 하부 반단면 굴착



(d) 후행터널 하부 반단면 굴착

그림 10. 시공단계별 연직토압 변화량(JoPI)

주변지반으로는 하중변화가 거의 나타나지 않았다(그림 9). 불연속면이 없는 경우에 비해 필러부에 더 큰 하중이 발생하는 이유는 하중전이가 불연속면에 의해 차단되어 하중이 주변지반으로 전이되지 않고, 불연속면을 따라 필러부에 집중되기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10은 필러부의 하중분포를 각 시공단계별로 나타낸 것으로 후행터널 상부 굴착 시 보다 선행터널 상부 굴착 시에 필러부에 더 큰 하중이 집중되는 것을 알 수 있다(그림 10(a), (b)). 하부굴착 시에도 필러부의 하중변화가 발생하였지만 상부굴착에 비해서 매우 작았고, 굴착순서와는 무관하게 경향이 유사하게 나타났다(그림 10(c), (d)).

(2) 연직 불연속면이 본선터널 중앙에 위치

연직 불연속면이 본선터널의 중앙에 위치할 경우(JoRCR, JoLCR), Pilot 터널 굴착에 따른 하중전이가 불연속면에 차단되어 비대칭 형태로 발생하였다(그림 11(a), (b)). 그림 12는 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포를 나타낸 것으로 하중전이가 불연속면에 차단되어 상반 굴착 시에는 불연속면 이후로는 전이되지 않았지만, 굴착이 계속 진행되면서 불연속면 이후로도 하중이 전이되어 주변지반의 연직토압이 증가하였다(그림 12(a), (b)). 본선터널 굴착이 진행되면서 본선터널의 굴착순서와 불연속면의 상대적 위치에 따른 하중 변화를 보면, 선행터널 상부 반 단면 굴착 시 불연속면의 영향에 의해 하중이 필러부에 집중되었지만, 불연속면에 차단되어 후행터널 주변지반으로는 거의 전이되지 않았다(그림 13(a)). 그러나 후행터널 상부 반 단면 굴착 시에는 선행터널 굴착 시에 우측 주변지반으로 전이되었던 연직토압은 감소하고 좌측 주변지반으로는 증가하는 것으로 나타났다(그림 13(b)). 또한 연직 불연속면의 위치와는 상관없이 선행터널 상반굴착 시에는 필러부에 작용하는 하중의 크기가 유사하였지만(그림 13(a)), 후행터널 상반굴착 시에는 불연속면의 위치에 따라서 필러부에 작용하는 하중의 크기에서 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(그림 13(b)). 하부굴착 시에도 필러부의 하중변화가 발생하였지만 상부굴착에 비해서 매우 작았고, 굴착순서와는 무관한 경향을 나타냈다(그림 13(c), (d)).

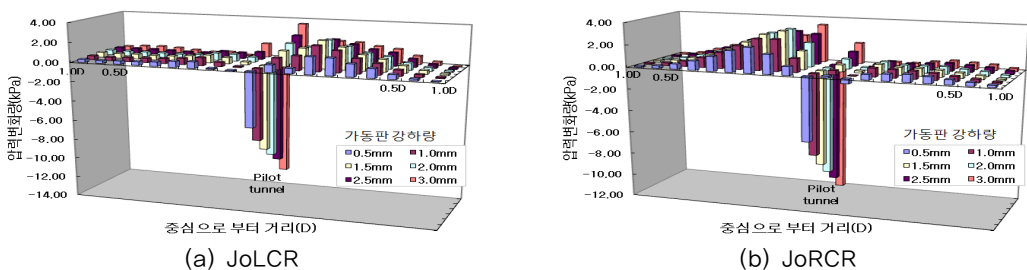


그림 11. 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoLCR, JoRCR)

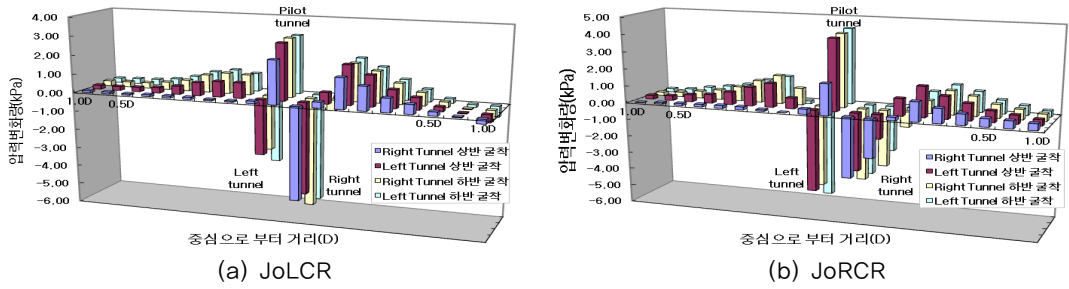


그림 12. 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoLCR, JoRCR)

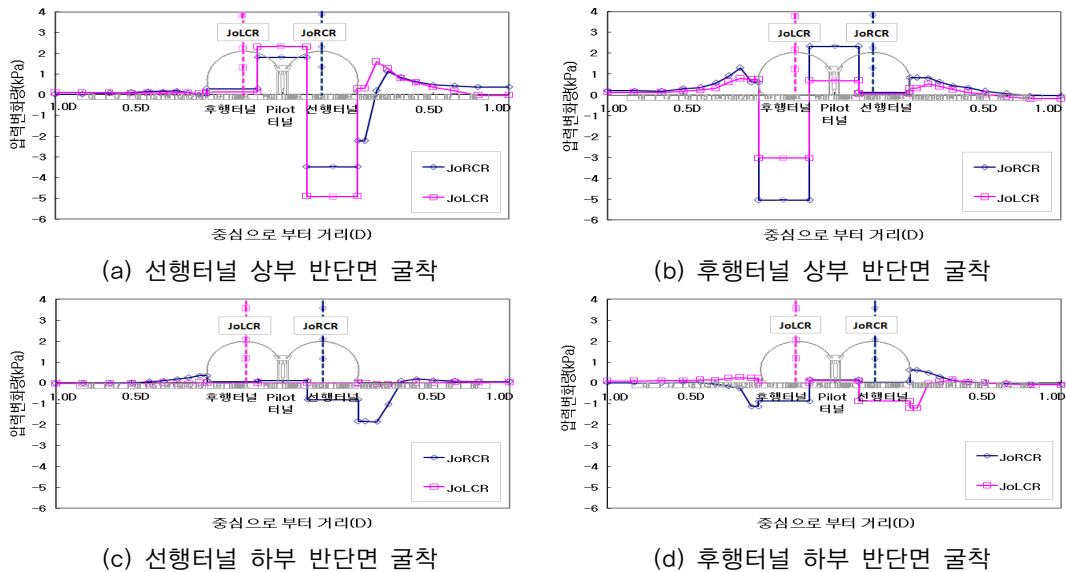
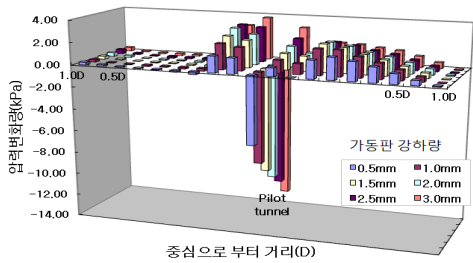


그림 13. 시공단계별 연직토압 변화량(JoRCR, JoLCR)

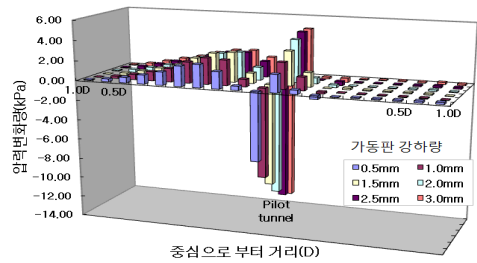
(3) 연직 불연속면이 터널 측벽에 위치

연직 불연속면이 터널 외측 측벽에 위치할 경우(JoRD0, JoLD0), Pilot 터널 굴착으로 인한 하중 전이가 불연속면에 차단되어, 하중전이 양상이 JoRCR, JoLCR의 경우와 유사하였고(그림 14(a), (b)), 본선터널 굴착 시 JoRCR, JoLCR 경우의 후행터널 상부 굴착 시(그림 13(b))와 JoRD0, JoLD0 경우의 선행터널 상부 굴착 시(그림 16(a)) 하중분포 양상이 유사하였다. 그러나 불연속면 인접부에서의 연직토압이 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 불연속면이 선행터널 외측 측벽부에 위치할 경우에 후행터널 외측 측벽부에 위치할 경우보다 상부 굴착 시 필러부에 작용하는 하중이 더 큰 것으로 나타났다(그림 16(a)). 후행터널 상부 굴착 시에는 불연속면의 위치와는 무관하게 유사한 형태를 보였다(그림 16(b)). 그림 15는 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포를 나타낸 것으로 JoLD0의 경



중심으로 부터 거리(D)

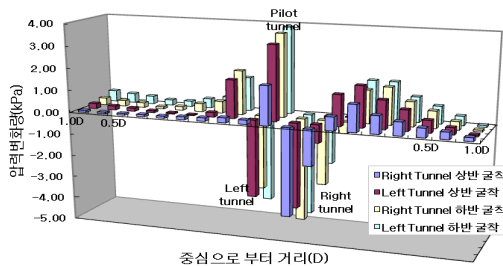
(a) JoLDO



중심으로 부터 거리(D)

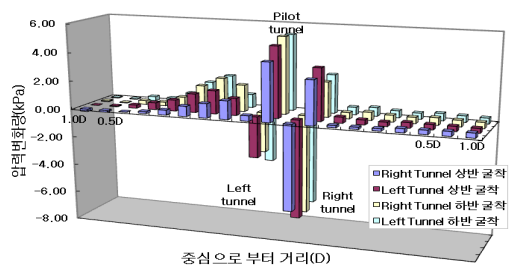
(b) JoRDO

그림 14. 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoLDO, JoRDO)



중심으로 부터 거리(D)

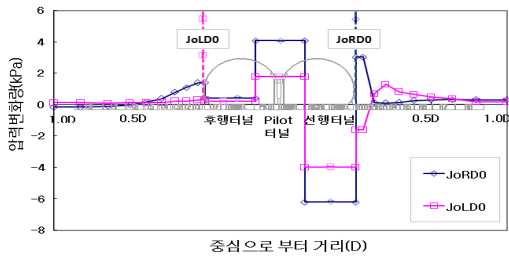
(a) JoLDO



중심으로 부터 거리(D)

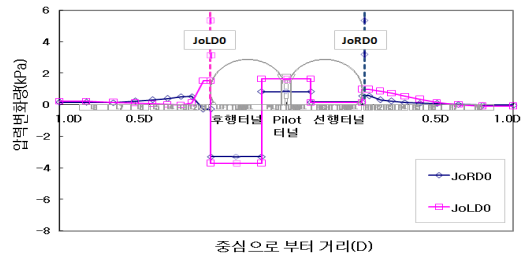
(b) JoRDO

그림 15. 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoLDO, JoRDO)



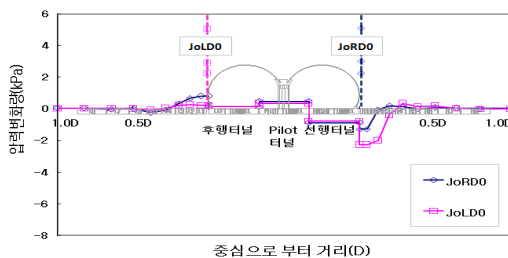
중심으로 부터 거리(D)

(a) 선행터널 상부 반단면 굴착



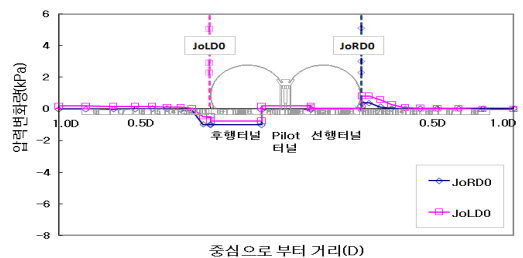
중심으로 부터 거리(D)

(b) 후행터널 상부 반단면 굴착



중심으로 부터 거리(D)

(c) 선행터널 하부 반단면 굴착



중심으로 부터 거리(D)

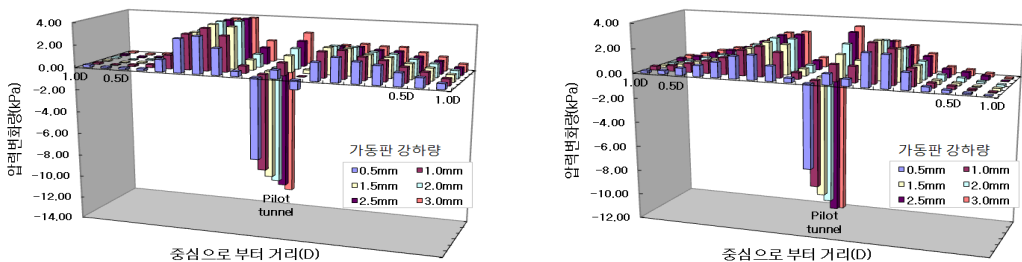
(d) 후행터널 하부 반단면 굴착

그림 16. 시공단계별 연직토압변화량(JoRDO, JoLDO)

우는 필라부 굴착 시 불연속면 인접부에 증가되었던 연직토압이 상반굴착 시에는 감소된 후 본선터널 굴착이 계속 진행되면서 불연속면 인접부의 연직토압이 다시 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 JoRD0의 경우에는 필라부 굴착 시에는 주변지반(우측)으로는 전이되지 않았던 하중이 본선터널 굴착이 진행되면서 불연속면 인접부의 연직토압이 소폭 증가되었다(그림 15(a)). JoRD0의 경우의 상부굴착 인한 주변지반 하중전이 양상은 JoRCR의 경우와는 다르게 측벽 인접부에서 더 크게 증가하는 것으로 나타났다(그림 15(b)). 이러한 경우와 같이 터널 측벽 인접부에서 증가되는 하중은 터널 측벽의 안정성을 감소시키는 요인이 되므로 이를 고려할 필요가 있다고 판단된다. 하부굴착 시에도 필라부의 하중변화가 발생하였지만 상부굴착에 비해서 매우 작았고, 굴착순서와 무관한 경향으로 나타났다(그림 16(c), (d)).

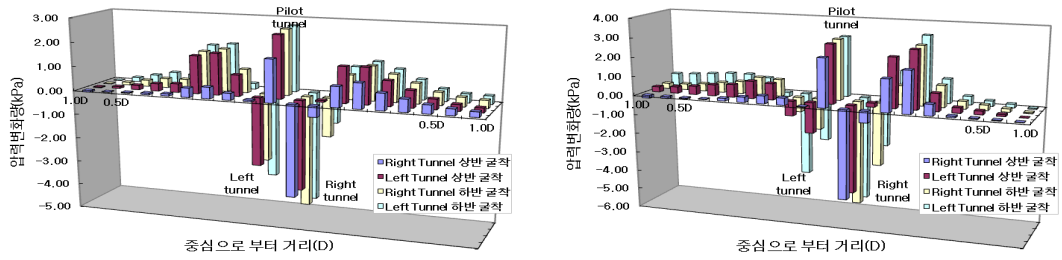
(4) 연직 불연속면이 측벽에서 1/4D 위치

연직 불연속면이 외측 측벽에서 1/4D만큼 이격된 위치에 있는 경우(JoRD25, JoLD25)에는 Pilot 터널 굴착 시 불연속면에 의해 차단되어 불연속면 외곽으로 하중전이가 이루어지지 않은 점을 제외하고는 불연속면이 없는 지반에서와 유사한 경향을 보였다(그림 17(a), (b)). 그림 18은 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포를 나타낸 것으로 불연속면의 위치와는 무관하게 선행터널 상반 굴착시 JoLD25의 경우에 비해서 JoRD25의 경우에 터널 우측 측벽부에서 연직토압이 감소하였으며 이후 크게 증가하다가 급격히 감소하였다. 후행터널 상부 굴착시에는 좌측 측벽부에서의 연직토압이 JoLD25의 경우 증가하였지만 JoRD25의 경우는 감소하였다(그림 18(a), (b)). 본선터널 상반굴착 시 JoLD25의 경우보다 JoRD25의 경우에 필라부에 작용하는 하중의 크기가 더 큰 것으로 나타났지만(그림 19(a)), 하반굴착 시에는 불연속면의 위치와 상관없이 유사하게 나타났다(그림 19(b)). 그리고 하반굴착 시에는 굴착순서와 무관한 경향을 보였다(그림 19(c), (d)).



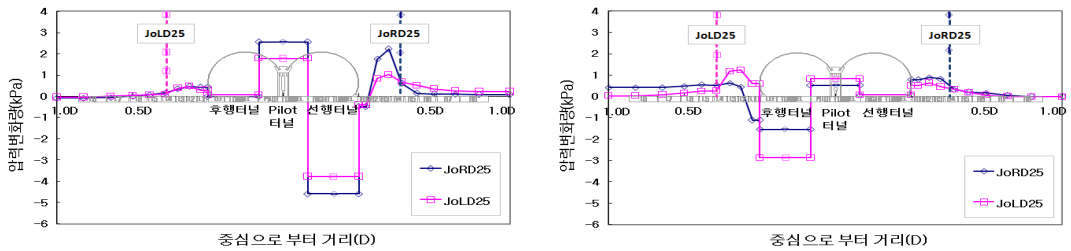
(a) 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoLD25) (b) 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoRD25)

그림 17. 필러 강하에 따른 이완하중 분포(JoLD25, JoRD25)



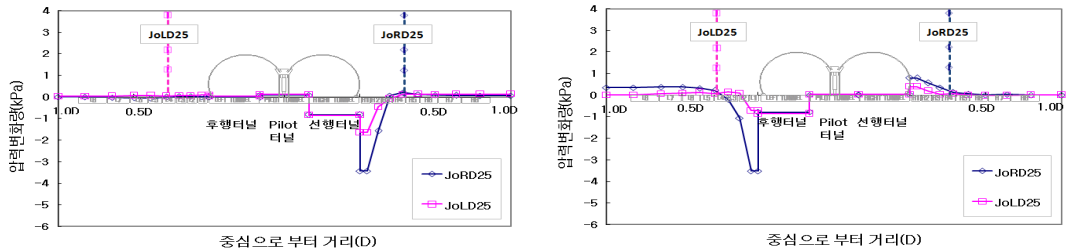
(a) 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoLD25) (b) 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoRD25)

그림 18. 본선터널 굴착에 따른 이완하중 분포(JoLD25, JoRD25)



(a) 선행터널 상부 반단면 굴착

(b) 후행터널 상부 반단면 굴착



(c) 선행터널 하부 반단면 굴착

(d) 후행터널 하부 반단면 굴착

그림 19. 시공단계별 연직토압 변화(JoRD25, JoLD25)

4.2 시공단계에 따른 중앙필러의 작용하중

연구결과, 본선터널 시공단계에 따라 중앙 필러에 작용하는 하중이 서로 다른 특성을 보이고 있으며, 불연속면의 존재 여부와 위치에 따라 굴착에 따른 하중전이 양상이 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 20은 원 지반 조성 후 Pilot 터널의 굴착이 완료된 시점(가동판을 강하하여 원 지반의 연직토압이 “0”이 될 때)에서 본선터널의 시공단계별 필러부의 하중 변화를 나타낸 것이다. 본선터널 굴착에 의한 영향에 의해 필러부에 작용하는 하중이 연직 불연속면의 존재여부와 위치에 따라서 다르게 나타났다. 불연속면이 없는 경우(1DNORM)와 연직 불연속면이 터널 폭 외부에 있는 경우(JoRD25, JoLD25)에서는 본선터널 상반 굴착 시 필러부에 작용하는 하중이 완만하게 증가하

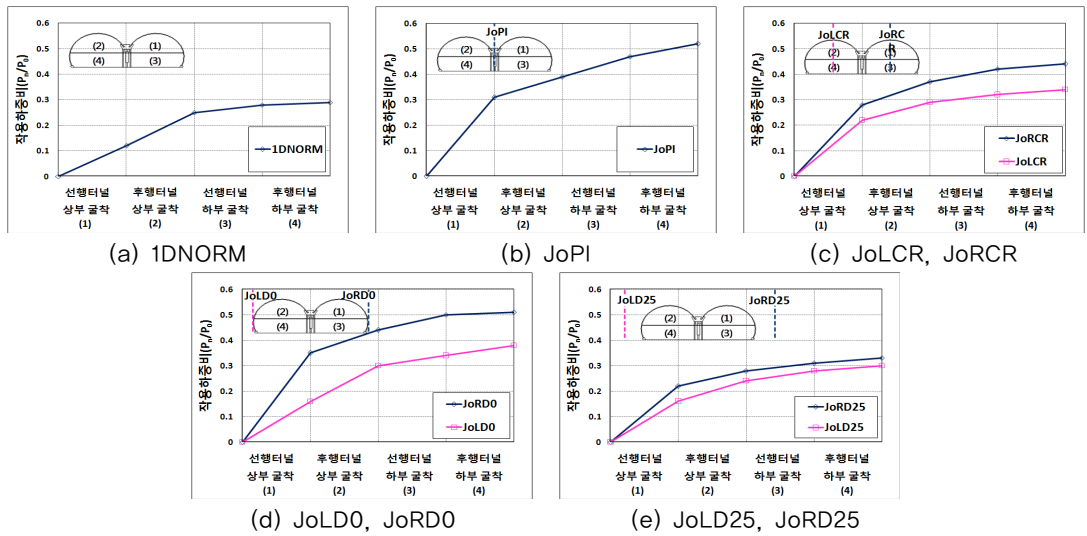


그림 20. 본선터널 굴착에 따른 중앙필러의 거동

였고, 하반굴착 완료후의 필러부 작용 하중의 크기가 서로 유사한 것으로 나타났다(그림 20(a), (e)). 연직 불연속면이 터널 영역 내에 있는 경우에는 본선터널 상반굴착 시 필러부 작용하중이 증가하였으며, 연직 불연속면이 필러부에 위치한 경우(JoPI)에 하반굴착 완료후의 필러부 작용하중이 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 하반굴착 시에는 하중이 완만한 기울기로 증가하고 있어 하반굴착에 따른 영향은 적은 것으로 나타났다(그림 20(b), (c), (d)).

5. 결론

본 연구에서는 연직 불연속면이 존재하는 사질토 지반에서 2-Arch 터널의 단계별 굴착에 따른 하중전이 특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. 이를 위하여 연직 불연속면의 위치를 변화시키고 2-Arch 터널의 시공순서에 따라 굴착하면서 실내 모형실험을 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같았다.

1. 연직 불연속면이 없는 균질한 지반인 경우(1DNORM)에는 Pilot 터널 굴착 시 굴착에 따른 하중이 주변지반으로 좌·우 대칭으로 전이되었다.
2. 연직 불연속면이 터널영역 내에 있는 경우에는 전이된 하중이 불연속면을 따라서 집중되어 필러부에 집중되었지만 연직 불연속면에 차단되어 그 외측에서는 하중이 증가하지 않았다.

3. 주변지반으로 전이되는 하중은 0.5D이내에 집중되었으며, 굴착에 따른 하중전이가 발생하는 영향범위가 약 0.8~1.0D로 한정되었다.
4. 터널굴착으로 인하여 주변으로 전이되는 하중의 분포 및 크기가 불연속면의 위치에 따라서 다르게 나타났지만, 본선터널 하반굴착 시 보다 상반 굴착시에 필러부 및 주변지반에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 하중전이 양상은 근접하여 있는 쪽의 본선터널에서 상반을 굴착할 때 더욱 뚜렷하게 나타났다.
5. 연직 불연속면이 터널 측벽에 위치할 경우(JoLD0, JoRD0)에 Pilot 터널을 굴착하면 연직 불연속면이 위치하는 터널측벽의 인접부에서 하중이 크게 증가되는 것으로 나타났다. 이와 같은 터널 측벽 인접부의 하중증가는 터널 측벽의 안정성을 감소시키는 요인이 되므로 설계 시에 고려할 필요가 있다고 판단된다.
6. 불연속면이 없는 경우(1DNORM)와 불연속면이 터널 영역 외부에 있는 경우(JoRD25, JoLD25)에는 상반 굴착 시 필러부의 작용하중이 완만하게 증가하였지만, 불연속면이 터널 내부에 있는 경우(JoPI, JoLCR, JoRCR, JoLD0, JoRD0)에는 상반굴착 시 필러부의 작용하중이 큰 기울기로 급격히 증가하였다. 특히 불연속면이 필러부에는 위치한 경우(JoPI)에 하반굴착 완료 후 필러부 작용하중의 크기가 가장 큰 것으로 나타났다.

본 연구결과, 지반 내 연직 불연속면의 위치, 수평, 연직, 경사도에 따라 다소 차이는 있지만 불연속면의 존재여부가 굴착에 따른 이완영역 형성에 영향을 미친다는 것이 확인되었다. 특히 단면적이 크고 시공단계가 복잡한 2-Arch 터널에서는 시공단계에 따라 불연속면의 영향이 크게 발생하며, 이로 인하여 필러부에 가해지는 연직하중의 변화량도 크게 달라진다. 2-Arch 터널에서는 필러부의 안정성이 터널 전체의 안정성과 직결되기 때문에 불연속면을 따라 하중이 집중되는 하중전이가 양상을 세심하게 고려해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이상덕, “토질역학” 3판, 도서출판 새론, 2010.
2. 이상덕 외 2명, “안정된 지하구조물의 설계 및 시공”, 도서출판 새론, 1994.
3. (사)한국지하공간터널학회, “터널공학시리즈 1, 2”, 구미서관, 2004, 2007.
4. 권혁민(2001), “사질토 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이”, 석사학위 논문, 아주대학교 대학원.
5. 이상덕외 2명(2002), “불연속면이 존재하는 지반에서 터널굴착에 의한 하중전이” 한국터널공학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 71~78.

6. 이상덕 외 1명(2003), “불연속면을 포함한 사질토 지반에서 터널 굴착에 따른 하중전이” 한국터널공학회 논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 217~226.
7. 이상덕 외 1명(2004), “사질토 지반에서 2 Arch 터널의 거동”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 171~182.
8. 이상덕 외 2명(2004), “라이닝 강성에 따른 2 Arch 터널 필러부의 거동”, 대한토목학회 전문학회세미나, Vol. 4H.
9. 이정상(2004), “사질토지반에 건설한 2Arch 터널의 거동”, 석사학위 논문, 아주대학교 대학원.
10. 전은숙(2005), “수평 불연속면 하부에 굴착한 얇은 심도의 2-Arch 터널의 거동” 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 3, pp. 227~236.
11. Good, R. E. (1989), “Introduction to Rock Mechanics”, John Willy & Sons, pp. 352~361.
12. Terzaghi, K. (1936), “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.
13. Terzaghi, K. (1943), “Theoretivcal soil mechnics” John Willy & Sons, New York.