

절리암반에서 2-Arch 터널의 필라하중과 지반변위

이상덕^{1*}

Pillar load and ground deformation in 2-arch tunnel in the jointed rock mass

Sang-Duk Lee

Abstract Loads on the pillar and ground deformation in 2-arch tunnel, which is excavated in the rock mass with regular discontinuities, depending on the dips of discontinuities and the construction sequences were experimentally studied. Large scale model tests in the biaxial test facility were performed. Tested model (width 3.3m, height 3.0m, and length 0.45m) for 2-arch tunnel in 1/10 scale were built with various dips. Test results show that discontinuities have great effects on the behavior of the 2-arch tunnel, especially on the pillar loads and ground deformation.

Keywords: 2-Arch tunnel, construction sequences, pillar loads, ground deformation

요 지 절리가 존재하는 암반에서 2-Arch 터널을 굴착할 때 절리방향과 굴착단계에 따른 필라하중의 변화를 실험적으로 연구하였다. 이를 위해, 대형 모형 실험기(폭 3.3m, 높이 3.0m, 길이 0.45m)에 1/10 크기의 2-Arch 모형터널을 갖는 다양한 각도의 절리를 포함한 지반을 조성하고, 실제 시공과정을 따라 굴착하면서 터널굴착으로 인한 터널 주변지반의 변형을 측정하고, 굴착단계에 따라 필라에 작용하는 하중을 측정하였다. 계측된 데이터로부터 2-Arch 터널의 굴착에 따른 거동을 분석한 결과 절리의 각도에 따라 굴착단계별로 터널 주변지반의 변형 및 필라에 작용하는 하중이 크게 영향을 받는 것을 확인하였다.

주요어: 2-Arch 터널, 절리암반, 터널굴착단계, 필라하중, 터널주변지반변형

1. 서 론

터널건설이 보편화되면서 시공의 안정성 문제뿐만 아니라 공사 부지를 줄이고, 자연환경 훼손을 최소화시키며, 출·입구 구조물과의 연계성 확보에 관심을 가지게 되었다. 따라서 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 2-Arch 터널의 건설이 점차 증가되고 있고, 시공에 따른 역학적 거동을 규명하기 위한 연구가 계속되고 있다.

Matsuda(1997, 1998)는 현장 측정 사례와 수치해석을 통하여 균질한 지반에 대해서 중앙필라에 작용하는 하중을 산정하기 위한 경험식을 제시하였고, 이 등(2003)은 Terzaghi(1936)와 Vardoulakis(1981) 등이 모래에서 실시했던 단일터널에 대한 trap-door 실험의 원리를 응용하여 2-Arch터널의 시공단계에 따른 응력전이와 중앙필라에 작용하는 하중을 측정하였고, 이 등(2004)은 모형 실험을 통하여 중앙필라에 작용하는 하중이 토피고 뿐

만 아니라, 지반과 라이닝의 상대강성도에 따라 다르게 나타남을 확인하였다. Kouthabeloulis 등(1989)은 수치 해석하여 trap-door 문제를 해결하고자 노력하였다. 그러나 Lee 등(2002)이 토사지반에서 불연속면의 영향을 실험적으로 구하고자 시도한 경우는 있으나 절리를 포함하는 암반에서 2-Arch터널의 거동에 대한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 절리가 존재하는 지반에 2-Arch 터널을 굴착할 때에 절리의 영향을 굴착단계별로 알아보기 위하여 터널 축에 평행한 방향으로 규칙적으로 분포하는 절리가 존재하는 경우에 대해 대형 모형시험을 실시하였다. 시험에서 절리가 수평에 대해 0°, 30°, 60°, 90°의 각도로 분포하는 경우에 2-Arch 터널을 굴착함에 따라 굴착단계별로 터널과 주변지반의 거동과 필라에 작용하는 하중을 측정하였다. 그리고 시공을 완료한 후에 연직 및 수평하중을 작용시켜서 필라의 거동과 라이닝의 부재력 및 주변지반의 거동을 측정하여 2-Arch 터널 완공 후에 주변 경계조건의 변화에 따른 영향을 분석하였다.

¹정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
*교신저자: 이상덕 (lsangduk@ajou.ac.kr)

2. 대형모형실험

2.1 개요

실험을 실시한 대형 모형시험 장치는 폭 3.3m, 높이 3.0m, 길이 0.45m로 지반을 조성할 수 있고, 연직 및 수평재하가 가능한 재하시스템을 갖추고 있으며 그림 1과 같다.

모형지반은 콘크리트블록을 제작하여 조성하였으며, 한 방향으로 0°, 30°, 60°, 90°의 연속절리를 형성하였고, 각각의 직각방향으로는 절리가 연속되지 않도록 하였다.

모형지반의 상부와 우측에 설치된 유압실린더로 경계하중을 가하여 지반의 초기응력상태를 구현할 수 있도록 재하시스템을 제작하였고, 모형지반의 바닥면과 측면에는 롤러를 설치하여 마찰을 최소화시켰다. 이렇게 조성된 모형지반은 그림 3과 같다.

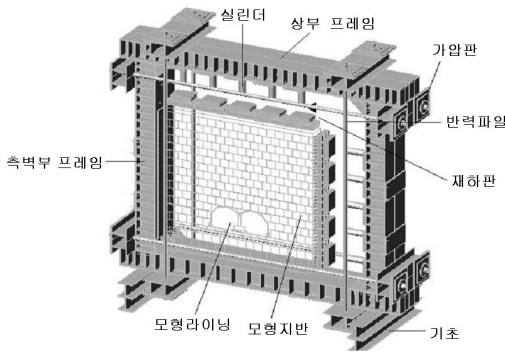


그림 1. 대형 모형실험장치 전경

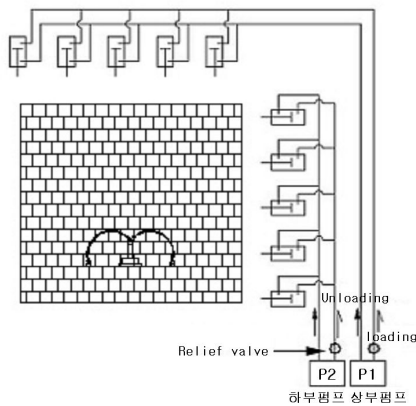


그림 2. 재하시스템

2-Arch 모형터널의 크기는 실제 터널의 1/10 크기로 하여 좌우 폭이 1.2m, 높이 0.6m이고, 실시공과 같은 공정으로 파일럿터널 굴착, 본선터널 우측상반 굴착, 좌측상반 굴착, 우측하반 굴착, 좌측하반굴착의 순서로 굴착하였다. 필라 하부에는 작용하중을 측정할 수 있도록 로드셀을 설치하였다. 굴착완료 후에는 측압조건을 달리하여 연직 및 수평하중을 작용시켜서 2-Arch 터널완공 후에 경계하중의 변화에 따른 영향을 모사하였다.

2.2 모형지반과 터널모델

모형지반은 크기 0.2m×0.15m×0.45m, 무게 0.28kN의 블록을 제작하여 RMR 값이 67이 되도록 조성하였다. 터널 축에 평행하고 수평에 대해 0°, 30°, 60°, 90°의 각도를 갖는 규칙적인 연속절리와 이에 대해 직각방향으로 불연속절리를 형성하였다. 모형터널의 라이닝은 Duddeck & Erdmann(1985)의 방법에 따라 지반의 상대강성을 고려한 상사율을 적용하여 두께 4mm의 강판으로 제작하였다. 터널 주변지반에 변위계를 설치하여 각 시공단계별 지중변위 양상을 계측하였다. 실험조건과 계측위치는 그림 4와 같다.

2.3 실험방법

모형지반을 조성한 후에 가압장치를 이용하여 연직 198kN/m², 수평 102kN/m²의 하중을 가해 초기압력(측압계수 0.4)을 구현하고, 파일럿 터널굴착, 선형터널 상반굴착(우상반), 후행터널 상반굴착(좌상반), 선형터널

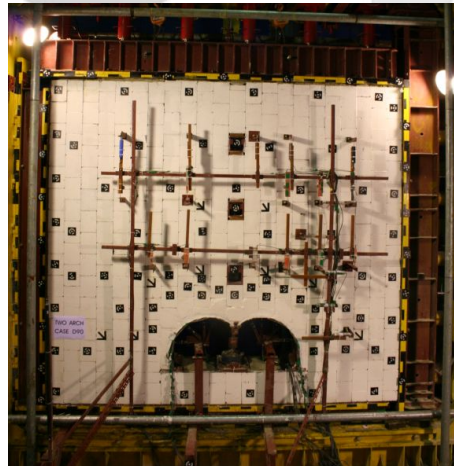


그림 3. 모형지반조성

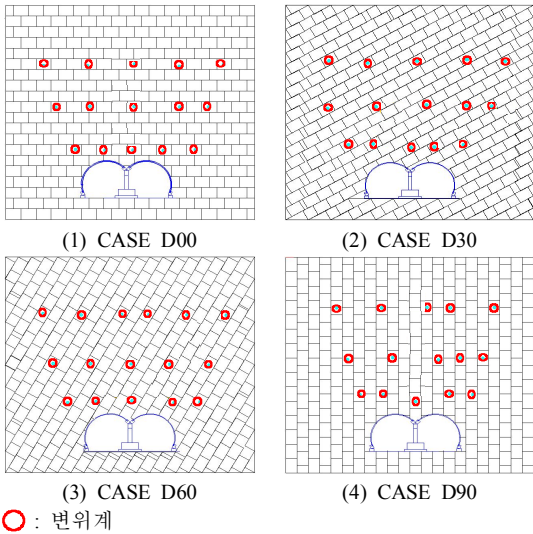


그림 4. 실험변수 및 계측위치

하반굴착(우하반), 후행터널 하반굴착(좌하반)의 순서로 터널굴착시공을 모사하였다. 필라는 강봉을 사용하여 기둥모양으로 제작하였고 하부에 로드셀을 설치하여 작용하중을 측정하였다. 절리가 발달된 지반에 굴착한 터널에서 경계하중의 변화에 따른 터널과 주변지반의 거동을 확인하기 위하여 터널굴착을 완료한 이후에 수평하중을 고정하고 연직하중을 284kN/m²까지 증가시키고 그리고 그 이후에는 연직하중을 유지하면서 수평하중을 690kN/m²까지 점차적으로 증가시키면서 절리각도에 따른 필라의 하중과 터널 및 주변지반의 거동을 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 지중변위

지중변위는 변위계(LVDT)를 설치하여 직접 측정하였다. 굴착완료까지 발생한 변위를 등고선으로 표시하고, 최대변위발생 지점의 굴착단계별 변위이력을 추적하였다. 그 결과 파일럿 및 본선터널 상부단면을 굴착할 때에 대부분의 변위가 발생하였고 하부단면을 굴착할 때에는 변위가 거의 발생하지 않았다. 이러한 현상은 절리의 각도에 상관없이 동일하게 나타났으나 상부굴착시의 거동은 절리각에 따라 큰 차이를 보였다.

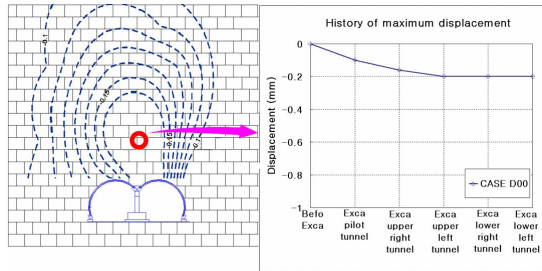


그림 5. 지중변위 등고선 및 최대변위이력 (CASE D00)

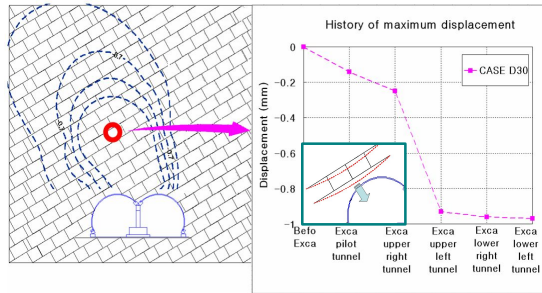


그림 6. 지중변위 등고선 및 최대변위이력 (CASE D30)

3.1.1 CASE D00

절리각도 0°인 지반에서는 2-Arch 터널 굴착에 의해 발생된 터널 주변의 지중변위는 필라를 중심으로 좌우가 거의 대칭으로 나타났고, 최대변위발생지점에서 굴착단계별 변위이력은 그림 5와 같았다. 지중변위는 파일럿 터널 굴착시 가장 크게 발생하였고, 다음으로 우측상반굴착, 좌측상반 굴착의 순서로 크게 발생되었으며, 하반을 굴착할 때에는 거의 발생하지 않았다.

3.1.2 CASE D30

수평에 대해 30°의 각도로 절리가 존재하는 지반에서는 터널굴착으로 인한 지중변위가 그림 6과 같이 필라의 좌측 즉, 절리의 골짜기 측에서 크게 나타났고, 좌측터널 상부에서 최대변위가 발생하였다. 특히 좌측터널의 상반굴착 시에 매우 큰 변위가 발생하였다. 파일럿터널 및 우측터널의 상반굴착 시에 최대지중변위는 수평절리(즉, 0° 절리) 지반에서 발생된 최대지중변위보다 약 1.5배 크게 나타났으나, 좌측터널의 상반굴착 시에는 20배 이상 큰 변위가 발생하였다.

3.1.3 CASE D60

수평에 대해 60°의 각도로 절리가 발달된 터널에서 터널굴착으로 인한 지중변위는 그림 7과 같이 좌측터널에서 크게 발생하였으나, 최대변위는 우측터널 천단부에서 발생하였다. 우측터널의 상반 굴착시의 변위가 다른 경우에 비해 3배 이상 크게 발생된 것으로 보아 굴착선과 절리가 이루는 각도와 측압조건이 변위에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 좌측터널의 상반굴착시의 변위도 수평 또는 연직절리(즉, 0° 또는 90° 절리)에서 보다 크게 발생하였다.

3.1.4 CASE D90

연직절리(즉, 절리각 90°)가 발달된 지반에서 터널굴착으로 인한 변위는 그림 8과 같이 좌우대칭으로 발생되었고 필라 상단에서 가장 크게 발생되었다. 변위등고선을 보면 양쪽 터널 천단사이 상부블록이 절리면을 따라 흐른 듯 중앙부에 집중되어 발생된 것을 알 수 있다. 최대변위이력은 수평절리(즉, 절리각 0°)에서 보다 다소 크지만 변화양상은 유사하게 나타났다.

3.2 필라하중 및 필라하중비

2-Arch 터널의 시공순서에 따라 초기지압상태(K0=

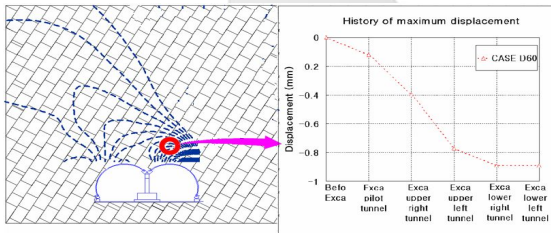


그림 7. 지중변위 등고선 및 최대변위이력 (CASE D60)

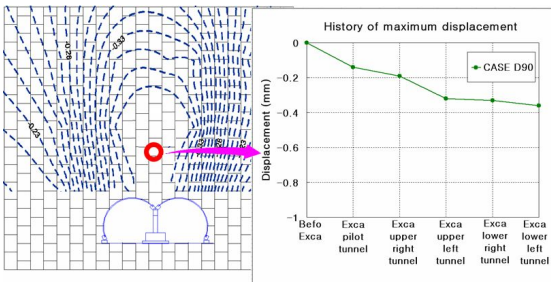


그림 8. 지중변위 등고선 및 최대변위이력 (CASE D90)

0.4)에서 파일럿 터널을 굴착하고 필라를 설치한 후에 본선터널을 우측상반-좌측상반-우측하반-좌측하반의 순서로 굴착하면서 시험하였다. 이때에 필라에 작용하는 하중을 굴착단계별로 나타내면 표 1 및 그림 9와 같다. 여기에서 필라하중비는 각 굴착단계별 필라하중을 굴착 완료시의 필라하중에 대한 백분율로 나타낸 값이며 절리의 각도에 따라 매우 다른 것을 알 수 있다.

절리가 없는 지반에 대한 Matsuda(1997)의 경험식을 적용하여 모형실험조건에 대해 계산한 필라하중은 6.67 kN이었다. 이를 실험치와 비교하면 수평절리(즉, 절리각 0°) 지반(CASE D00)에서의 필라하중은 Matsuda식의 0.62배에 해당하고, 절리각이 30°(CASE D30), 60°(CASE D60), 90°(CASE D90)인 지반에서는 각각 4.53, 3.30, 1.69배 크게 측정되었다(표 2).

3.2.1 CASE D00

수평절리 지반(절리각 0°)에서 2-Arch 터널 굴착완료시 필라하중은 Matsuda식의 계산치(6.67kN)보다 작게 (4.13kN) 측정되었다. 지반조성에 사용된 블록의 무게가 0.28kN이고, 이완된 블록의 무게가 전부 필라에 하중으로 가해진다고 가정하면 15개의 블록이 이완되어 필라에 하중으로 작용한 것이 된다. 필라하중비는 우측상반 및 좌측상반을 굴착할 때에 각각 53, 25%로 상반을 굴착할 때에 약 80%의 하중이 발생하였다(그림 10).

표 1. 굴착단계에 따른 필라하중(kN)

절리각 (°)	우상반 굴착단계	좌상반 굴착단계	우하반 굴착단계	좌하반 굴착단계
0	2.21	3.19	3.83	4.13
30	8.28	29.66	29.99	30.23
60	6.51	20.34	20.98	22.02
90	3.13	10.28	11.01	11.24

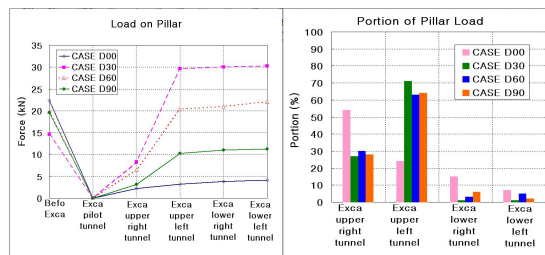


그림 9. 절리각에 따른 필라하중과 필라하중비

표 2. 필라하중과 Matsuda식 비교

절리각도	필라하중(P_p)	P_p/P_M
0°	4.13	0.62
30°	30.23	4.53
60°	22.02	3.30
90°	11.24	1.69

* P_p : 굴착완료후 필라에 작용하는 하중
 * P_M : Matsuda 식으로 계산한 하중(6.67kN)

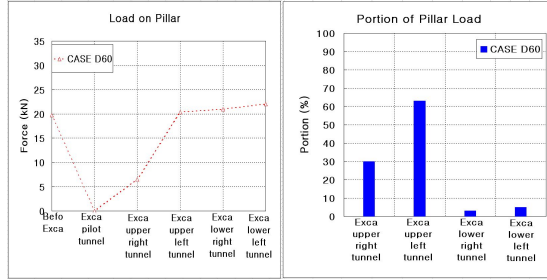


그림 12. 필라하중 및 필라하중비 (CASE D60)

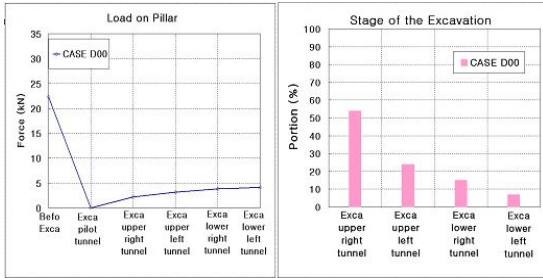


그림 10. 필라하중 및 필라하중비(CASE D00)

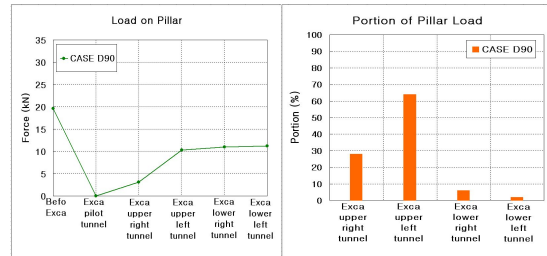


그림 13. 필라하중 및 필라하중비 (CASE D90)

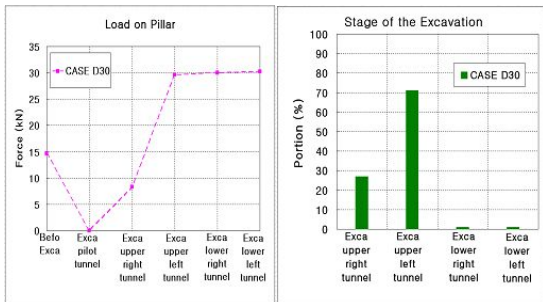


그림 11. 필라하중 및 필라하중비 (CASE D30)

3.2.2 CASE D30

절리각 30°에서는 터널 굴착완료시 필라에 작용하는 하중은 30.23kN으로 Matsuda의 계산치보다 4.53배 크게 나타났고, 블록의 개수로 환산하면 108개에 해당하는 하중으로 절리가 수평인 경우(CASE D00)보다 7배 이상 크게 나타났다. 좌우측상반굴착 단계별 필라하중을 절리가 수평인 경우와 비교해보면 우측상반 굴착시의 3.75배, 좌측상반 굴착시의 21.8배로 매우 크게 나타났다. 필라하중비도 우측상반 굴착시의 70% 이상으로 매우 크게 나타났다. 그림 11에서 필라하중의 변화추이를 살펴보면 최대변위이력과 잘 부합함을 확인할 수 있다.

3.2.3 CASE D60

60° 절리에서는 터널굴착완료시 필라에 작용하는 하중은 22.02kN으로 Matsuda의 계산치보다 3.3배 크게 나타났고, 이는 78개 블록의 무게에 해당되는 크기이다. 필라하중의 변화양상은 절리각 30°와 유사하나 굴착단계별 하중의 크기가 약간 작게 나타났다. 그림 12에서 좌측상반 굴착시의 필라하중비가 크게 증가한 것으로 보아 굴착선이 절리면과 평행할 때에 필라하중이 크게 증가하는 것으로 사료된다.

3.2.4 CASE D90

연직절리(절리각 90°)에서 굴착완료시 필라의 작용하중은 절리가 수평인 경우보다 2.72배 크고, 그림 13과 같이 필라하중비는 좌측상반을 굴착한 경우 60%이상으로 크게 나타났다. 터널굴착에 따른 필라하중의 크기는 30°절리에서 가장 크고, 60°, 90°, 0° 순서로 크게 나타났다.

3.3 연직 및 수평재하에 따른 필라하중

초기 연직 및 수평하중이 각각 198kN/m²과 102kN/m²인 상태에서 터널굴착을 완료한 후에 수평하중을 초기하중 102kN/m²으로 유지하고 연직하중을 초기하

표 3. 재하단계별 필라하중 (kN)

절리 각도	연직재하(kN)				수평재하(kN)			
	323 (K0=0.375)	353 (0.35)	382 (0.325)	421 (0.30)	225 (0.5)	461 (1.0)	637 (1.4)	931 (2.0)
D00	1.23	1.48	3.73	4.93	4.58	3.70	7.88	12.19
D30	2.24	5.38	9.48	14.14	16.07	27.00	35.68	48.47
D60	4.95	14.48	21.24	28.70	26.13	23.96	22.28	21.63
D90	5.32	7.21	11.55	14.05	11.35	5.88	9.94	12.12

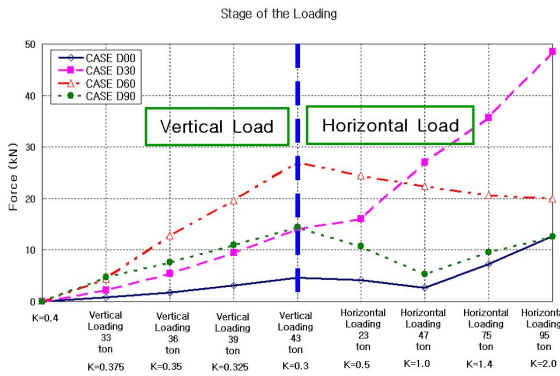


그림 14. 재하단계별 필라하중 증가량

중 198kN/m²에서 218, 238, 257, 284kN/m²으로 증가시켜서 축압계수(K)가 각각 0.375, 0.35, 0.325, 0.3이 되도록 하였고, 이어서 연직하중이 198kN/m²인 상태에서 수평하중을 초기하중 102kN/m²에서 167, 341, 472, 690kN/m²으로 증가시켜 축압계수(K) 0.5, 1.0, 1.4, 2.0가 되도록 하여 터널과 주변지반 및 필라의 하중을 측정하였다.

필라하중은 절리각도에 따라 표 3과 같고, 굴착완료시를 기준으로 증가량을 도시하면 그림 14와 같다. 필라하중은 시공완료시에는 CASE D30에서 가장 컸으나, 연직재하시에는 CASE D60에서 가장 커서 CASE D00보다 4배 이상 크게 나타났다. 한편, 수평재하시에는 절리의 각도에 따라 완전히 다른 거동을 나타냈는데, CASE D00 및 CASE D90에서는 수평하중 461kN(K=1.0)까지는 수평하중이 증가하여도 필라하중이 감소하였고, 이후에는 다시 증가하였다. 그리고 CASE D60에서는 축압조건에 무관하게 필라하중이 계속 감소하고, CASE D30에서는 계속 증가하였다.

4. 결 론

주절리의 각도가 각각 0°, 30°, 60°, 90°의 절리를 포함하는 모형지반을 길이 폭 3.3m, 높이 3.0m, 길이 0.45m로 조성하고 축압계수 K0=0.4에서 2-Arch 터널굴착 및 재하 시험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 굴착에 따른 지중변위는 절리각 0°, 90°에서는 필라에 대칭으로 유사하게 나타나고, 30°, 60°에서는 굴착선과 절리각이 평행한 좌측에서 크게 발생하였다.
- (2) 중앙필라 설치 후에는 굴착단계에 따라 필라에 작용하는 하중은 30°, 60°, 90°, 0° 순으로 크게 나타났다.
- (3) 실험을 통해 얻은 필라하중을 Matsuda(1997)식과 비교하면 절리각 0°에서는 다소 작게 나타났고, 30°, 60°, 90°에서는 크게 나타났고, 특히 30°에서는 Matsuda식 보다 4배 이상 큰 것으로 나타났다.
- (4) 필라의 하중비는 절리각 0° 지반에서는 선행터널 상반굴착시에, 그리고 절리각 30°, 60°, 90° 지반에서는 후행터널 상반굴착시에 가장 크게 나타났다.
- (5) 연직하중의 증가로 축압계수가 감소하면 필라하중은 절리각에 무관하게 점차 증가하나, 수평하중의 증가로 축압계수가 커지면 절리각에 따라 거동이 상이하게 나타났고, 하중의 크기도 큰 차이를 보였다.

감사의 글

이 논문은 저자의 연구년 동안에 이루어 졌으며, 실험에 참여한 아주대학교의 이일우 군을 비롯한 IGUA 대학원생들, 연구년 동안에 지원해준 아주대학교 당국 그리고 미국체류 동안에 연구여건을 제공해준 Virginia Tech 의 Gutierrez 교수에게 진심으로 감사한다.

참고문헌

1. 이상덕, 전은숙 (2003), “사질토 지반에서 2-Arch 터널의 거동”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 171~182.
2. 이상덕, 김홍문, 김찬용, 홍용희 (2004), “라이닝 강성에 따른 2-Arch 터널 필라하중의 거동”, 대한토목학회 전문학회세미나, Vol. 4H.
3. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), “On structural design models for tunnels in soft soil”, *Underground Space*, Vol. 9. Pergamon Press, pp. 246~259.
4. Lee, S. D. (2002), Influence of the discontinuity planes on the Shallow Tunnel, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, ITA, pp. 217~225.
5. Kouthabeloulis, N. C., Griffiths, D. V. (1989), “Numerical modeling of the trap door problem”, *Conf. Soil Mech. Found. Engng.*, Cambridge, Vol. 39. No. 1.
6. Matsuda, T. (1997), “A study on design methods for twin tunnel constructed by the single drift and central pier method”, *Proceedings of Studies on Tunnel Engineering*, Vol. 7.
7. Matsuda, T. (1998), “Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground”, *Tunnels and Metropolises*, pp. 1193~1198.
8. 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.
9. Vardoulakis, I. (1981), “Trap-door problem with Dry Sand: A statical approach based upon model test Kinematics”, *Int. J. Num. Analy. Meth. Geomech.*, Vol. 5.



이 상 덕

아주대학교
환경건설교통공학부
교수

E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr