

불연속성 암반에 위치한 2-아치 터널에서 지표면 하중 작용시 필러에 전달되는 응력 특성

The Characteristics of Stress Distribution on Two-arch Tunnel's Pillar due to Surface Loads in the Discontinuous Rock Mass

김 홍 문¹ Kim, Hong-Moon

이 상 덕² Lee, Sang-Duk

Abstract

Large scale model tests and numerical analyses are performed to investigate the stress distribution of pillar due to surface loading nearby two-arch tunnel which is constructed in the regularly jointed rocks. It is observed that the influence of discontinuities on the stress distribution in the discontinuous rock mass and the underground stresses induced by surface loading are greater than those of linear elastic theory. Especially, lines of equal stresses are developed to the direction of inclination according to the inclined grade. In cases of discontinuities imbedded in parallel with or vertical to the ground, the pressure bulbs are formed symmetrically, however, the inclined ones result in stress distribution in parallel with and vertical to the planes of discontinuities. Results indicated that stress distribution is seriously affected by the angle of discontinuity. When stresses propagating to the pillar need to be estimated, relative location of surface loading, grade of discontinuous plane, and location of two-arch tunnel should be carefully considered.

요 지

불연속성 암반에 건설된 2-아치 터널 지표면에 외력이 작용할 경우 지중응력의 분포 특성을 파악하기 위하여 대형 모형실험과 수치해석을 수행하였다. 분석결과, 불연속면이 존재하는 경우에는 선형 탄성론에 근거한 응력보다 큰 지중응력이 분포하며, 불연속면의 경사도에 따라 압력구근의 형상이 달라지는 것을 확인하였다. 불연속면이 수평이거나 연직인 경우에는 지중응력의 분포가 대칭적 이지만, 경사져 있으면 경사에 대해 수직과 평행한 양방향으로 나뉘어 분포되었다. 또한 불연속면의 경사가 고각일수록 불연속면에 평행인 방향의 지중응력이 더 크게 증가하였다. 연구결과, 불연속성 암반에서는 불연속면의 경사가 응력분포에 지대한 영향을 미치며, 필러에 전달되는 응력을 추정할 경우에는 재하위치와 불연속면의 경사 및 터널 구조물간 상호위치를 고려하는 것이 중요함을 확인하였다.

Keywords : Discontinuous rock mass, Pillar, Stress distribution, Two-arch tunnel

1. 서 론

2-아치 터널은 두 개의 터널이 중앙기둥에서 서로 접

하는 형상이므로 중앙부 기둥이나 벽체에 응력이 집중하게 된다. 2-아치 터널은 도심지 지하철 정거장이나, 도로터널에서 병렬터널 설치에 필요한 용지확보가 어

1 정회원, (주)평화엔지니어링 지반공학부 이사 (Member, Senior engineer, Dept. of Geotechnical & Tunnel Engrg., Pyung Hwa Engrg. Consultants Ltd., iguakim@naver.com, 교신저자)

2 정회원, 아주대학교 건설교통공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Transportation Engrg., Ajou Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

려운 경우에 주로 건설된다. 두 경우 모두 터널형성에 필요한 토피가 부족한 경우가 많으며, 대체로 지반조건이 불리하기 때문에 터널중앙부에 기둥이나 벽체를 설치하여 지반하중을 분산하여 지지하는 구조이다. 이러한 터널에서 지표면에 인위적인 외력이 작용할 경우에는 외력이 지반을 통하여 터널주변에 전달되므로 터널 구조물의 안정성을 판단하기 위해서는 지중응력의 분포 경향 및 그 크기를 예측하는 것이 중요하다.

외력에 의한 지중응력의 크기는 탄성론에 근거한 이론식이나 실측자료 및 수치해석을 통하여 파악할 수 있다. 그러나 지층 형상이 복잡하고, 지반 내에 층리나 절리 등 불연속면이 존재하는 경우에는 선형 탄성이론만으로는 지중응력 전달 경향을 예측하기가 어렵다.

본 연구에서는 불연속면이 존재하는 지층에 건설된 2-아치 터널에 인위적인 지표면 하중이 작용할 경우에 지중응력 분포 경향을 파악하기 위하여 대형 모형실험을 수행하였다. 실험은 불연속면 경사, 토피 및 지표면 재하위치를 변수로 실시하였고, ‘필러(pillar)’로 불리는 중앙부 지지체에 전달되는 응력의 크기를 측정하였다. 불연속면 특성을 고려한 수치해석으로 실험결과와 비교하였고, 외력 작용시 필러에 전달되는 응력 특성을 분석하였다.

2. 외력에 의한 지중응력 증가

지표면의 상재하중에 의하여 발생된 지중응력은 지반 변형의 원인이 된다. 이러한 지중응력의 크기는 Boussinesq식을 이용하거나, 경험치 또는 수치해석을 통하여 구할 수 있다. Boussinesq 이론은 연직 집중하중에 대하여 지반이 선형탄성 거동한다는 가정 하에 성립되며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_z = qI_z \quad (1)$$

여기서, σ_z 는 심도 z 에서의 응력이며, q 는 단위면적당 외력이다. I_z 는 영향계수로서 지반의 탄성계수(E)와 프와송비(ν)의 함수이며, 재하판 형상 및 하중형태에 따라 달라진다.

지표면에 원형단면 하중이 작용할 경우 지중응력 분포는 심도가 깊어짐에 따라 급격히 감소하며, 반지름의 2배 깊이가 되면 지표면 응력의 1/3, 반지름의 4배 깊이가 되면 1/10로 급격히 줄어든다(Lambe & Whitman, 1979). 사각형 단면하중인 경우에도 재하 폭의 2배가 되는 깊이에서는 지표면 응력의 1/10로 감소한다(Budhu, 2007).

불연속면을 포함하는 암반에서는 외력 작용시 불연속면 방향과 불연속면간 마찰력에 의하여 지중응력의 분포 경향과 범위가 특정영역에 제한되어 발생한다. 외력의 작용방향과 불연속면이 수직인 경우에는 압력구근의 형상이 대칭이 되고, 재하면 직하부로 응력이 분배되는데 반해, 불연속면이 경사져 있는 경우에는 경사각에 따라 불연속면에 나란한 방향과 수직인 방향으로 나누어져 응력이 분배된다(Wyllie, 1999). 따라서 불연속면이 지배적인 지반에 건설된 터널의 경우에는 지표면에 외력이 작용할 경우 터널 주변의 응력분포 경향은 매우 불규칙하게 나타날 것이 예견된다. 특히 비교적 얇은 심도에 건설되는 2-아치 터널의 경우에는 필러에 응력이 집중되는 형상이고, 지반하중을 지지하는 중요한 구조체이므로 안정성 판단이 필요할 경우 필러에 전달되는 하중의 크기를 예측하는 것은 매우 중요하다.

3. 대형 모형실험

3.1 실험장치 및 모형지반

모형실험은 대형 이축 실험기에서 수행하였으며, 실

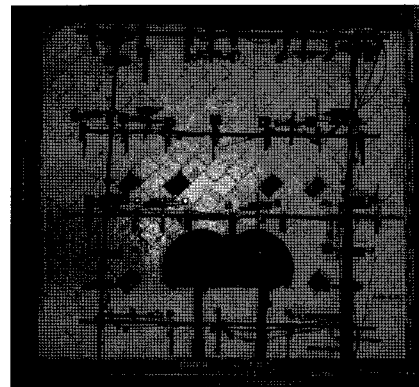
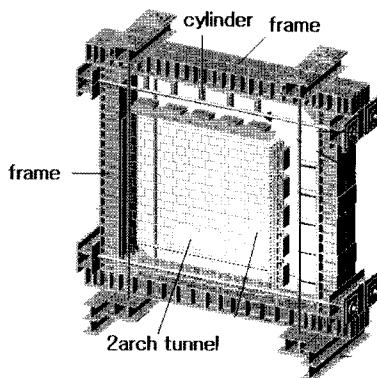


그림 1. 대형 이축실험장치 모식도(좌), 모형지반 전경(우)

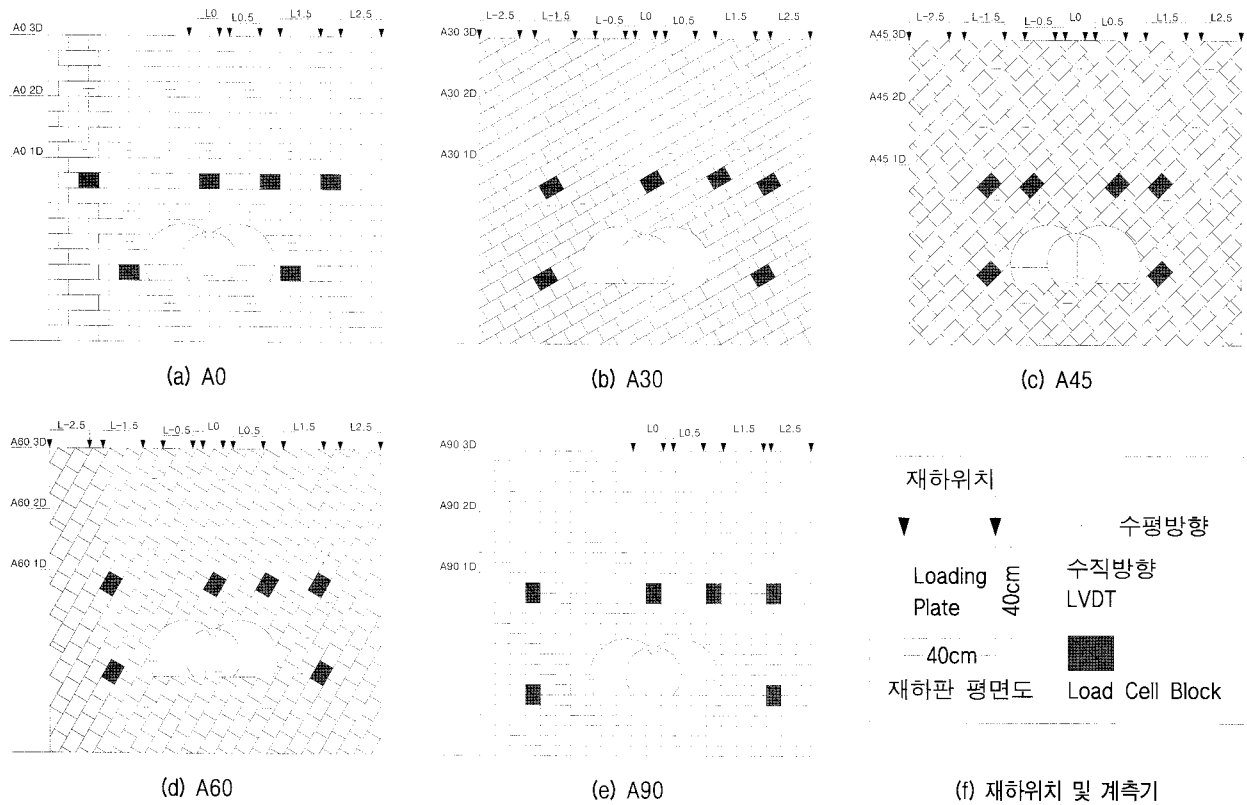


그림 2. 실험변수별 모형지반 형상, 재하 및 계측 위치

험기의 크기는 폭 6m, 높이 6.5m, 길이 2.4m이다. 모형 터널은 원래(prototype)터널에 대하여 축소율 1/20을 적용하여 1.2m로 하였고, 모형지반은 블록(폭 0.2m, 높이 0.15m, 길이 0.45m)을 이용하여 폭 3.3m, 높이 3m, 길이 0.45m로 조성하였다(그림 1). 경계조건은 좌우로는 수평 방향 변위를 구속하였고 바닥부분은 연직방향 변위를 구속하였다. 모형실험 장치는 평면변형을 조건이 유지되도록 제작하였으며, 블록은 표면을 처리하여 거칠기가 일정하게 유지되도록 하였다. 모형지반은 두 개의 불연속면(two discontinuities)을 갖는 지반으로, 제1불연속면은 연속적인 불연속면을 갖도록 하였고, 제2불연속면은 90° 교차되게 불연속으로 형성되도록 하였다(그림 2).

3.2 실험변수 및 실험방법

실험변수는 일방향 터널 직경(D)을 기준으로 토피(터널심도) 조건 3개와 불연속면 경사조건 5개를 조합하여 정하였다(표 1).

실험순서는 일반적인 2-아치 터널 굴착순서에 따라 터널을 굴착한 후, 변위와 지반하중이 수렴된 다음 지표면에 재하판을 설치하고 재하 하였다. 재하판 규격은 가로, 세로 각각 40cm이며, 하중은 유압펌프를 이용하여

표 1. 실험변수 및 실험명

실험 변수	토피			
	1D*	2D	3D	
불연속면 경사(°)	0°	A0 1D	A0 2D	A0 3D
	30°	A30 1D	A30 2D	A30 3D
	45°	A45 1D	A45 2D	A45 3D
	60°	A60 1D	A60 2D	A60 3D
	90°	A90 1D	A90 2D	A90 3D

*D=1/2W, W: 2-아치 터널 폭, D: 일방향 터널 직경(여기서 W=1.2m, 1D=0.6m)

4.9kN씩 단계별로 재하하여 최대 98kN까지 재하하였다. 재하위치는 터널중심인 필러 직상부(L0)와 우측 3개소(L0.5, L1.5, L2.5) 및 좌측 3개소(L-0.5, L-1.5, L-2.5)에 재하하였고, 대칭단면인 A0와 A90 경우는 필러부와 우측만 재하 하였다. 매 단계 하중은 재하판 상단 로드셀과 필러 바닥면에 설치된 로드셀을 통하여 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 지표면 재하위치에 따른 필러하중

동일한 하중이 지표면에 작용하면 토피가 증가할수

록 지중에 전달되는 하중의 크기는 심도가 깊어짐에 따라 크게 감소하며, 측정지점 직하부의 지중응력이 크고 반경방향으로 이격되면 크게 줄어드는 것이 일반적인 경향이다. 그러나 모형실험 결과 필러에 전달되는 하중은 토피(터널심도)와 재하위치에 따라 크게 달라졌다. 필러에서 측정된 최대하중의 크기와 분포 특성에 따라 크게 3가지 경향으로 구분되었다.

4.1.1 불연속면 경사 0° 및 30° 경우

불연속면 경사가 0°와 30°인 경우에는 터널심도가 증가함에 따라 필러에 전달되는 하중은 감소하며, 터널 중심부에 재하시(L0) 최대 필러하중이 나타났다.

불연속면 경사가 0°인 그림 3(a)에서 토피가 1D인 경우(A0 1D)에는 지표면 하중의 65%가 필러에 작용하였고, 토피가 3D조건이 되면 30%가 전달되어 1/2로 감소하였다. 재하위치가 필러 직상부에서 1.5D 이격되면 필러에 작용하는 하중은 급격히 감소하여 10% 미만의 하중이 필러에 작용하였다.

불연속면 경사가 30°인 경우(그림 3(b))는 0°인 경우와 같이 토피가 증가 할수록 필러에 전달되는 하중은 감소하였다. 0°인 경우보다 필러에 전달되는 하중 또한 크게 감소하였고, 좌측으로 0.5D 이격된 위치(L-0.5)에 재하한 경우와 필러 직상부 위치(L0)에 재하시 필러하

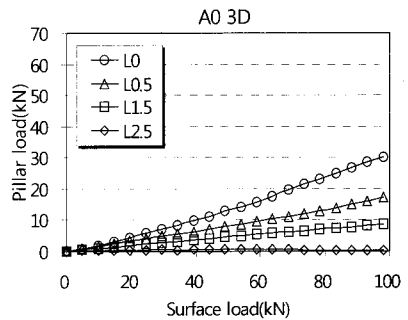
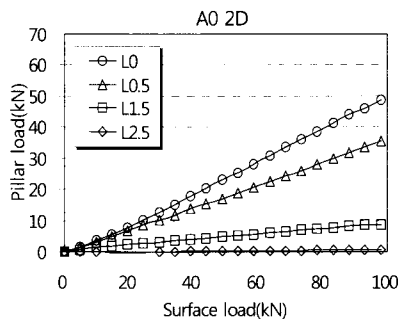
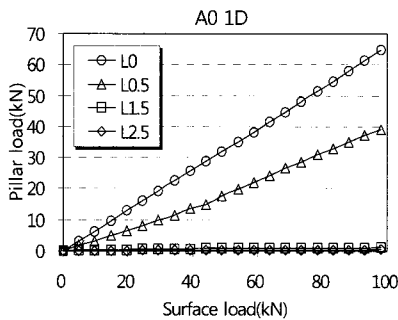
중이 유사한 크기로 측정되었다.

4.1.2 불연속면 경사 45° 및 60° 경우

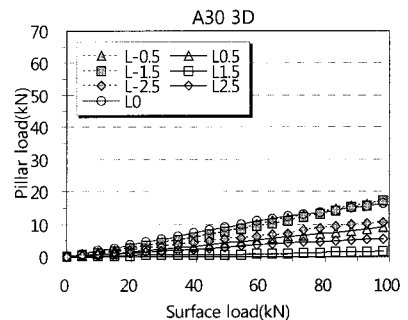
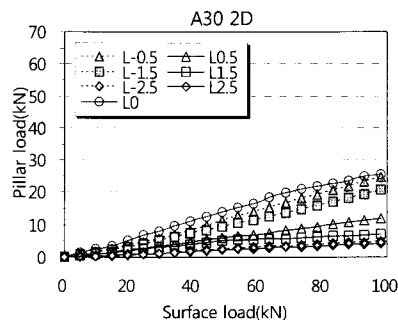
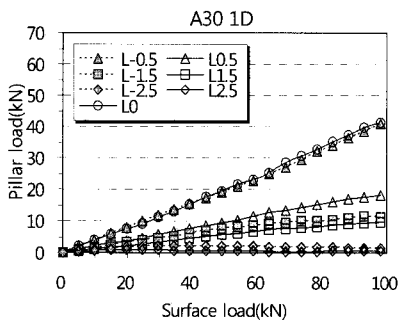
불연속면 경사가 45°와 60°인 경우에는 토피가 증가하여 터널심도가 깊어지더라도 필러에 전달되는 최대하중이 오히려 증가하였다. 특히 최대 필러하중은 터널 중심 직상부가 아닌 좌우 특정 지점에 재하시 발생하였다.

불연속면 경사가 45°인 경우(그림 4(a))는 터널심도가 1D에서 3D로 증가시 필러하중이 약간 증가하였다. 터널심도가 2D이내인 경우 터널 중심 좌측으로 0.5D 이격된 지점(L-0.5)에 재하시 최대 하중이 작용하였고, 터널심도가 3D인 경우에는 좌측으로 1.5D이격된 지점(L-1.5)에 재하시 최대하중이 측정되었다. 전반적으로 터널 중심부보다 좌측에 재하시 더 큰 필러하중이 측정되었다.

불연속면 경사가 60°인 경우(그림 4(b))는 터널 심도가 1D에서 3D로 증가함에 따라 45°에 비하여 더 큰 필러하중 증가율을 보였다. 45° 경우와는 반대로 터널 중심부에서 우측으로 이격된 위치에 재하시 최대하중이 작용하였다. 1D 심도인 경우에는 우측터널 직상부인 L0.5 위치에 재하시 최대하중이 관측되었고, 2D와 3D 심도인 경우에는 L1.5위치에 재하시 최대하중이 작용하였다.

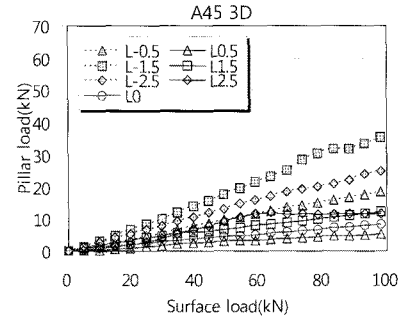
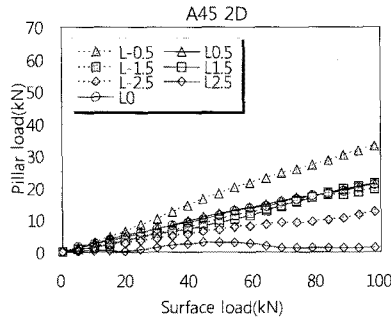
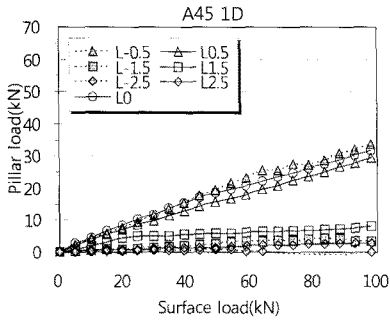


(a) 불연속면 경사 0°

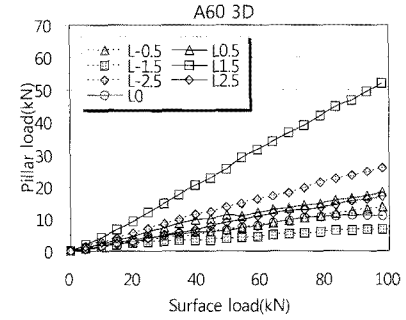
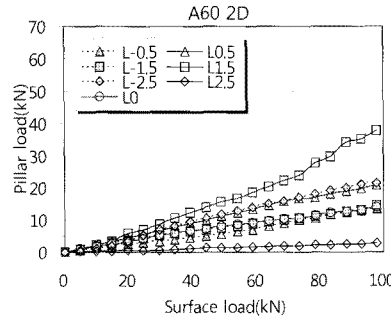
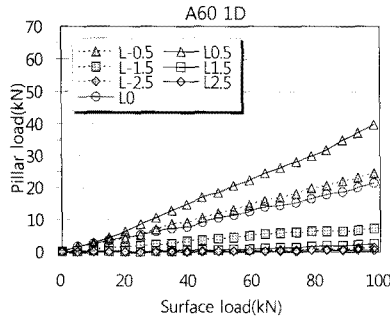


(b) 불연속면 경사 30°

그림 3. 불연속면 경사 0° 및 30° 필러하중



(a) 불연속면 경사 45°



(b) 불연속면 경사 60°

그림 4. 불연속면 경사 45° 및 60° 필러하중

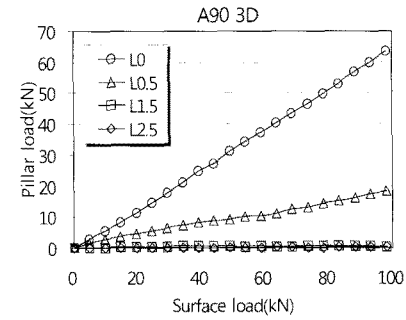
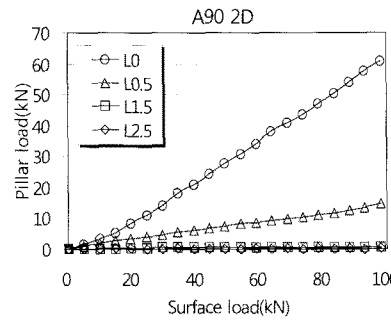
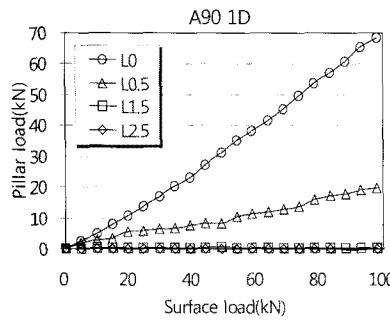


그림 5. 불연속면 경사 90° 필러하중

4.1.3 불연속면 경사 90° 경우

불연속면 경사가 90°인 경우(그림 5)는 필러 직상부 재하시 필러에 하중이 집중되며, 토피에 따른 필러하중 차이가 크지 않았다. 터널 중심 직상부(L0) 지표면에 재하시 필러에 전달되는 하중이 절대적으로 크며, 재하위치가 터널중심에서 좌우로 조금만 이격되어도 필러에 전달되는 하중은 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 지표면 하중의 작용방향과 불연속면의 경사가 일치하기 때문에 나타나는 것으로 분석된다.

4.2 토피별 하중전달 특성

실험결과 지표면에 작용하는 하중과 필러에서 측정

된 하중이 양호한 선형성을 보이므로 각 직선의 기울기는 하중 전달 비율이 된다. 지표면 재하 하중의 25%와 75%구간에 해당하는 하중의 증분으로 대표성을 갖는 기울기를 정하여 토피별 하중 전달비를 산출하였다.

$$\text{하중 전달비} = \frac{L_p}{L_s} \quad (2)$$

(여기서, L_p : 필러하중, L_s : 지표면 하중)

토피가 1D인 경우(그림 6(a))는 터널 폭 범위 내에 재하시(L-0.5 ~ L0.5) 필러에 전달되는 하중이 절대적으로 크며 재하위치가 터널 폭 범위를 벗어나면 필러에 전달되는 하중의 크기는 급격히 감소하였다. 토피가 증가하면 필러에 전달되는 하중은 전반적으로 감소하지만, 45°

와 60° 경사의 경우에는 좌우 특정위치에서 터널심도가 증가함에도 필러하중이 오히려 증가하며, 90°의 경우에는 터널심도에 관계없이 필러 직상부에 재하시(L0) 필러에 집중적으로 작용하였다. 터널 폭 범위인 L-0.5, L0 및 L0.5위치에 재하시 필러에 전달되는 하중비율은 평균적으로는 토피가 1D인 경우 36%, 2D인 경우 28%,

3D인 경우 19%로 나타났다.

5. 개별요소법에 의한 수치해석

5.1 수치해석 개요

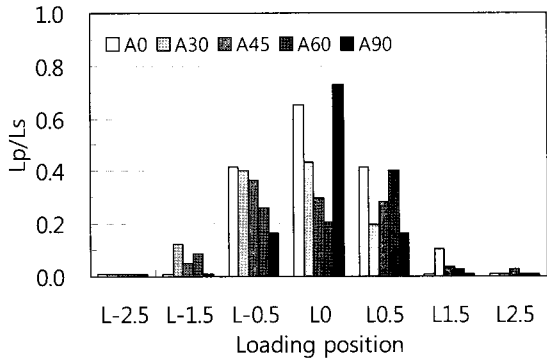
수치해석은 실험과 근접한 해석을 위하여 불연속체 해석 방법중 개별요소법(DEM)으로 실시하였으며, 범용 코드인 UDEC를 이용하였다. UDEC코드의 기본공식은 2차원 평면 변형률 조건을 가정하고 있으며, 따라서 불연속면들은 해석면에 수직한 방향인 평면이 되므로 모형실험 조건과 같다. 해석에 적용한 구성모델은 블록은 Mohr-Coulomb, 절리면 거동은 Coulomb slip모델을 적용하였다. 블록과 절리면의 지반물성은 표 2와 같다. 경계조건은 좌우 측면의 X변위를 고정시켰고, 바닥면은 Y변위를 고정시켰다. 축압은 실험기의 경계조건과 블록의 포와송비를 고려하여 기본 탄성이론으로부터 산정하여 $K_0=0.25$ 를 적용하였다. 해석결과 연직응력 등압선(압력구근)의 분포 형태를 통하여 지중응력 전달 경향을 파악하였고, 필러부에 작용하는 응력을 실험결과와 비교하였다.

5.2 불연속면 경사에 따른 압력구근의 형상

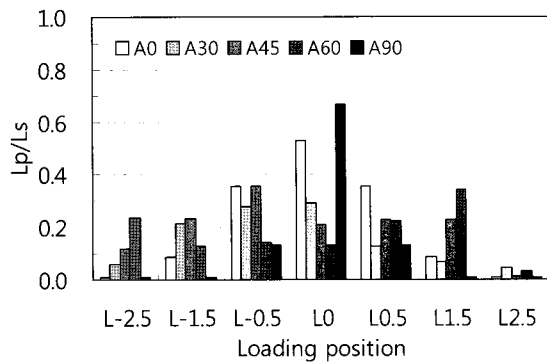
지표면에 재하시 지중에 전달되는 응력분배 경향은 압력구근으로 표현하면 파악이 용이하다. 불연속면이 있을 경우 압력구근의 형상은 불연속면간 마찰력의 영향으로 등방 탄성지반인 경우보다 좁고 깊게 분포한다 (Goodman, 1989).

대칭인 지반에서는 응력분포 또한 대칭성을 보이며, 수평 불연속면인 경우 재하판 면적보다 폭이 약간 넓고 깊은 형태를 보인다. 수직 불연속면인 경우에는 폭이 좁고 깊은 골짜기 형태의 응력분포를 보이며 중심에 집중된다.

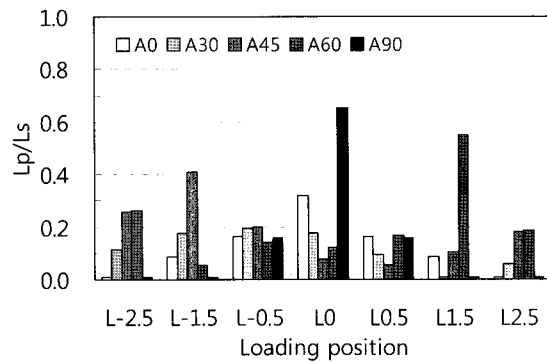
불연속면이 경사진 지반에서는 압력구근이 비대칭이며, 경사정도에 따라 두 방향으로 응력이 나뉘어 전달된다. 비교적 저각인 경우에는 절리면에 수직인 방향으로 우세하게 분포하지만, 경사가 급해질수록 불연속면에 나란한 방향으로 응력이 크게 증가한다. 그림 7에서 불



(a) 토피 1D 경우



(b) 토피 2D 경우



(c) 토피 3D 경우

그림 6. 토피별 재하위치에 따른 하중 전달비(Lp/Ls)

표 2. 수치해석에 적용한 지반 물성

블록	탄성계수 (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각(°)	포아송비(v)	단위중량(MPa)
	15,000	2.45	45	0.2	0.02
불연속면	수직강성 (MPa/m)	전단강성 (MPa/m)	마찰각(°)	점착력 (MPa)	
	5,000	519	28	0.005	

연속면의 경사 α 는 수직면에서 측정한 경사이므로 $\alpha = 90^\circ$ 경향은 실험결과 0° 의 경우이며, $\alpha = -69^\circ$, $\alpha = -20^\circ$ 는 수평면으로부터 각각 21° 와 70° 에 해당하는 경사로 실험결과의 30° 및 60° 결과와 비교할 수 있다.

모형실험 조건 가운데 터널심도가 3D이고 터널 직상부 지표면(L0)에 재하 될 경우 연직응력 분포 형태는 그림 8과 같이 나타났다. 불연속면 경사가 0° 인 경우(그림 8(a))에는 재하판 직하부로 응력이 좁고 깊은 곳까지 전달되어 필러부에 집중되며, 압력구근(bulb of pressure)이 대칭으로 형성되었다. 30° 경우(그림 8(b))는 불연속면에 수직인

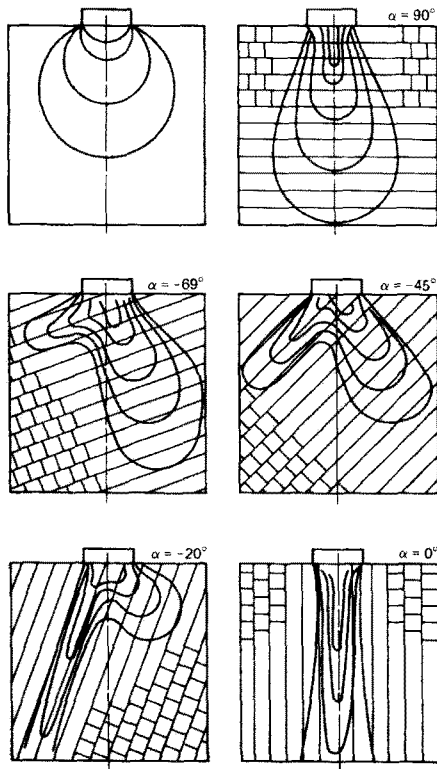


그림 7. 불연속면 경사에 따른 압력구근 형상(Goodman, 1989)

방향으로 우세한 압력구근이 형성되며, 일부는 불연속면을 따라 응력이 분산되는 형태를 보였다. 필러 주변의 응력 집중도는 0° 인 경우보다 낮게 나타났다. 60° (그림 8(c))인 경우는 불연속면을 따라 지중 깊은 곳까지 압력구근이 길게 형성되었다. 압력구근의 폭이 넓지 않고 재하 폭 범위 내에 집중되어 깊은 곳까지 전달되었다. 불연속면에 평행한 방향의 압력구근 형성이 절대적으로 우세하게 나타났다.

이와 같은 수치해석 경향은 그림 7의 선행연구 경향과도 유사한 결과이다. 이러한 경향을 실험결과와 비교하기 위하여 수치해석 조건에 해당하는 하중전달비를 그림 9에 표시하였다.

불연속면 경사가 0° 인 경우(A0)는 터널 직상부 재하시 가장 큰 하중이 필러에 전달되며, 30° 인 경우(A30)는 터널 중심에서 좌측으로 이격된 위치에 재하한 경우가 우측에 재하한 경우보다 좀 더 큰 필러하중이 측정되었다. 이 경향은 수치해석의 결과에서 확인할 수 있듯이 재하판 우측으로 전달되는 하중이 상대적으로 크기 때문에 터널 좌측 지표면 재하시 좀 더 큰 하중이 측정된 것으로 분석된다. 60° 경우는 30° 와는 다르게 터널 우측에 재하시 더 큰

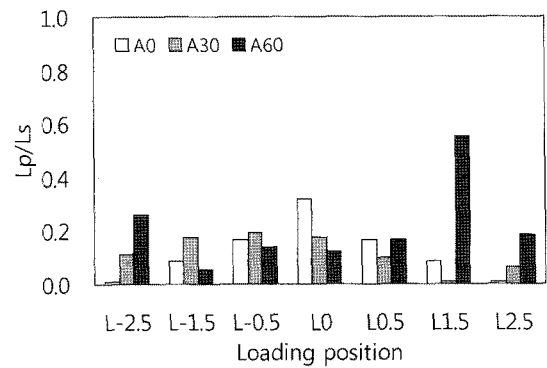
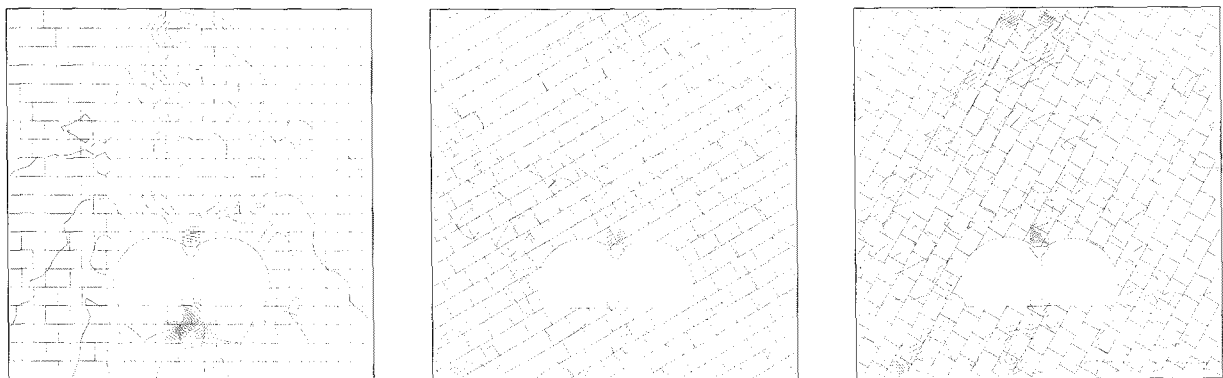


그림 9. 불연속면 경사 0° , 30° 및 60° 조건에 대한 실험결과 필러에 전달되는 하중비(토피조건 3D)



(a) 불연속면 경사 0°

(b) 불연속면 경사 30°

(c) 불연속면 경사 60°

그림 8. 터널심도 3D조건에서 필러 직상부 지표면에 재하시(L0) 연직응력 분포

하중이 필러에 전달되는데 이는 수치해석에서 나타난 바와 같이 불연속면을 따라 하중이 전달되므로 중심부 우측에 재하시 더 큰 하중이 필러에 전달된 결과로 분석된다.

이러한 응력분포 현상을 추가로 확인하기 위하여 터널 중심에서 우측으로 1.5D 이격된 위치의 지표면에 하중이 작용하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다(그림 10). 0°인 경우에는 지표면 하중의 상당부분이 필러에 전달되는 반면 30°의 경우에는 지표면 하중의 대부분이 불연속면의 수직인 방향(우측으로) 전달되므로 필러에 작용하는 하중은 미미하다. 60°의 경우에는 지표면 하중이 불연속면을 따라 필러에 집중적으로 작용하며, 이 경향은 그림 9의 실험결과와 같다.

5.3 필러 응력 비교

모형실험 결과 가운데 불연속면의 경사가 0°인 경우(A0)와 60° 경사를 갖는 경우(A60)에 대하여 각각 3D의 토피조건을 수치해석하여 비교 하였다(그림 11). 지표면 재하위치는 필러 직상부(L0)와, 좌우로 각각 1.5D 이

격된 위치(L-1.5 및 L1.5)를 비교하였다. 실험에서는 지표면에 하중을 작용시켰으므로 하중비(L_p/L_s)로 표현하였고, 수치해석에서는 지표면에서 경계면 응력으로 작용시켰으므로 응력비(S_p/S_s)로 표현하였다.

모형실험 결과와 수치해석에서 재하위치에 따른 하중 전달 경향은 유사하게 나타났지만 수치적인 값은 차이를 보였다. 불연속면의 경사가 0°인 경우(그림 11(a)) 필러 직상부 재하시 실험에서는 32%의 하중이 전달되는데 비하여 수치해석에서는 65%의 응력이 전달되어 약 2배 차이를 보였다. 재하위치에 따른 두 지점 간 하중비 감소율(L1.5/L0)은 실험결과가 0.28, 해석결과가 0.24로 나타나 유사한 경향을 보였다. 불연속면의 경사가 60°인 경우(그림 11(b))도 재하위치에 따른 하중비 경향은 유사하게 나타났지만 각 재하위치의 하중비는 실험과 해석간 차이를 보였다. 필러 직상부 재하시(L0) 하중비는 약 3배 차이를 보이는 반면 우측으로 1.5D 이격된 위치의 하중비는 유사한 결과를 보였다. 실험결과 및 수치해석에서 재하위치에 따른 하중비 경향성은 유사하지만 수치적으로 상당한 차이를 보인 것은 실험에

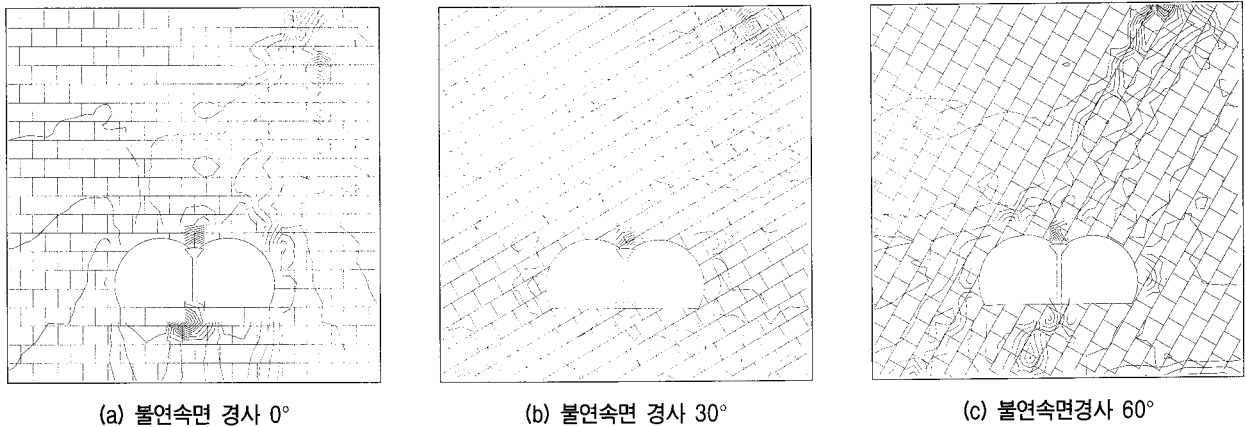


그림 10. 터널 중심으로부터 우측으로 1.5D 이격된 지표면 재하시(L1.5 재하조건)

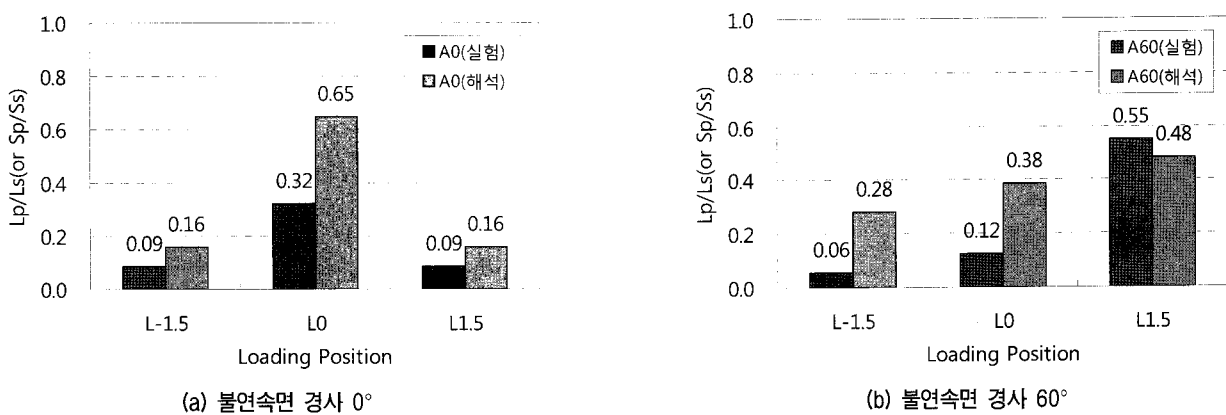


그림 11. 실험 및 해석결과 필러에 전달되는 하중 전달비(토피 3D 조건)

서 부분적으로 나타나는 불연속면 사이의 벌어짐 현상과 블록마찰에 의한 미세한 분진 등에 의한 영향을 해석 기법상 고려하기 못한 것이 원인으로 분석된다.

한편, 이와 같은 하중비(응력비)는 탄성이론에 근거한 Boussinesq이론에서 영향계수(I_z)와 같은 의미로 볼 수 있다. 기존 탄성이론(Winterkorn and Fang, 1975)에 의하여 영향계수를 산정하면, 재하판을 등가 원형단면(equivalent circular dimension)으로 환산할 경우 $I_z=0.03 \sim 0.05$ 이고, 정사각형 모서리 하부의 지중응력 영향계수 산정방법에 의한 경우 $I_z=0.03 \sim 0.04$ 로 산정되었다. 영향계수가 범위값으로 산정되는 것은 터널 천장부와 바닥부간의 심도 차이를 고려하였기 때문이며, 이 값은 지표면 응력의 3~5%만이 터널위치 심도에 전달된다는 의미이므로 탄성이론에 의한 영향계수와 불연속면이 있는 경우의 하중전달 비율은 큰 차이가 있음이 확인되었다.

6. 결론

2-아치 터널은 비교적 얇은 심도에 건설되므로 지표면으로부터 외력이 작용하게 되면 지중응력이 지반을 통하여 터널구조물에 전달되게 된다. 특히 해당 지층에 불연속면이 분포하는 경우에는 외력에 의한 지중응력 분포 경향이 매우 복잡하다. 본 연구에서는 대형 모형실험과 수치해석을 통하여 불연속면을 통하여 전달되는 지중응력의 분포 특성과 필러부에 전달되는 응력의 크기를 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 불연속면 경사가 0°와 30°인 경우에는 토피가 증가하면 최대 필러하중이 감소하며, 터널 중심부에 재하시(L0) 최대 필러하중이 나타났다. 불연속면 경사가 45°와 60°인 경우에는 토피가 증가하면 최대 필러하중이 오히려 증가하였고, 직상부가 아닌 좌우측 특정 지점에 재하시 최대 필러하중이 작용하였다. 45° 경사인 경우 터널 중심에서 좌측으로 1.5D 이격된 지표면에 재하시 최대 필러하중이 작용하였고, 60°인 경우에는 터널 중심에서 우측으로 1.5D이격된 지표면에 하중 작용시 최대 필러하중이 측정되었다. 90°인 경우에는 터널 직상부에 재하시 하중이 필러에 집중적으로 전달되었으며, 토피의 영향은 크지 않았다.
- (2) 지표면 재하시 지중응력 분포경향을 압력구근의 형상으로 파악한 결과, 불연속면의 경사가 0°인 경우에는 재하판 직하부 방향으로 필러 기초부까지 긴

주머니 모양으로 분포하였으며, 대칭적으로 나타났다. 불연속면이 경사져 있는 경우에는 불연속면에 평행한 방향과 수직인 두 방향으로 형성되었으며, 30°인 경우에는 불연속면에 수직방향의 응력분포가 우세하였고, 60°인 경우에는 불연속면에 평행한 방향으로 더 큰 응력이 분포하였다.

- (3) 실험결과와 수치해석의 필러하중 분포는 경향성은 일치하지만 수치적인 값은 차이를 보였다. 실험과정에서 일부 나타나는 불연속면간 벌어짐 등 부분적인 현상을 해석기법상 구현하지 못한 것이 원인으로 분석되었다.
- (4) 탄성이론에 의한 영향계수보다 더 큰 응력이 필러에 전달되었다. 이는 불연속면의 영향과 불연속면 경사 및 재하판과 필러의 상대적인 위치가 하중 전달에 큰 영향 요인으로 분석되며, 2-아치 터널 특성상 필러부에 응력이 집중되기 쉬운 형상도 원인으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김홍분, 김찬용, 홍용희, 이상덕 (2004), "라이닝 강성에 따른 2-Arch 터널 필러부의 거동", *대한토목학회 전문학회세미나*, Vol.4H.
2. 이상덕 (2007), "절리암반에서 2-Arch 터널의 필러하중과 지반변위", *한국터널공학회 논문집*, Vol.9, No.1.
3. 전은숙, 김홍분, 이상덕 (2005), "수평불연속면 하부 2-Arch 터널의 거동특성", *한국터널공학회 논문집*, Vol.7, No.3.
4. 조태진 외 (2007), "21C 암반역학", 건설정보사, pp.269-271, 309-311.
5. Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (1988), "Rock mechanics for underground mining (second edition)", pp.118-137.
6. Budhu, M. (2007), "Soil Mechanics and foundations", John Wiley & Sons, pp.138-143.
7. Goodman, R. E. (1989), "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley & Sons, pp.352-361.
8. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), "Underground Excavations in Rock", pp.113-116.
9. Itasca Consulting Group (2004) "UDEC manual"
10. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), "Soil Mechanics, SI Version" pp.100-105.
11. Matsumoto, Y. and Nishioka, T. (1991), "Theoretical tunnel mechanics", University of Tokyo Press, pp.3-37.
12. Matsuda, T. et al., "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", *Proceeding of Studies on Tunnel Engineering*, Vol.7.
13. Soliman, E. et al. (1993), "Two-and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.8, No.1, pp.13-18.
14. Timoshenko, S. P. and Goodier J. N. (1970), "Theory of Elasticity", pp.15-33.
15. Wyllie, D. C. (1999), "Foundations on Rock (Second Edition)", E&FN SPON, pp.166-173.
16. Winterkorn, H. F. and Fang, H-F. (1975), "Foundation Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, pp.148-166.

(접수일자 2009. 3. 11, 심사완료일 2009. 5. 23)