

## 불연속성 암반에서 2-아치 터널 굴착시 필러 기초부 응력 분포에 대한 연구

김홍문<sup>1)\*</sup>, 이상덕<sup>2)</sup>

### A Study on the Stress Distribution of Pillar Basement during Two-arch Tunnel Excavation in Discontinuous Rock Mass

Hong-Moon Kim, Sang-Duk Lee

**Abstract** Large scale model tests and numerical analyses were performed in order to investigate the stress distribution on the base of pillar during two-arch tunnel excavation in the regularly jointed rocks. It was observed that the stress was irregularly distributed on pillar and the angle of discontinuities seriously influenced on the stress distribution on the pillar base in the discontinuous rock mass. In the numerical analyses results, It was shown that the stress level of pillar was greatly changed depending on the excavation sequences of two-arch tunnel. It was also observed that stress distributed eccentrically at the pillar as well as at the base of pillar. It is necessary to consider this point for the design of two-arch tunnel.

**Key words** Two-arch tunnel, Pillar, Stress distribution, Discontinuous rock mass

**초 록** 불연속성 암반에 2-Arch 터널을 건설할 경우, 필러에 작용하는 응력분포 특성을 파악하기 위하여 대형 모형실험과 수치해석을 수행하였다. 분석결과, 불연속면이 존재하는 경우에는 필러에 작용하는 하중이 매우 불규칙적으로 발생하였으며, 불연속면 경사의 영향이 큰 것을 확인하였다. 수치해석 결과 필러부에는 굴착단계에 따라 위치별로 큰 응력 차이가 확인되었다. 주목할 점은 터널 굴착시 벽체뿐만 아니라 필러 기초부에도 큰 응력 차이가 발생하였다. 필러 설계시 이러한 응력편차 현상을 신중하게 고려할 필요가 있다.

**핵심어** 2-아치 터널, 필러, 응력 분배, 불연속성 암반

## 1. 서 론

2-아치 터널은 두 개의 터널이 중앙기둥에서 서로 접하는 형상이며, 도심지 지하철 정거장이나 도로터널에서 선형계획상의 이점이나 병렬터널 설치에 필요한 용지확보가 어려운 경우에 주로 건설된다. 두 경우 모두 터널형성에 필요한 토피가 부족한 경우가 많으며, 대체로 지반조건이 불리하기 때문에 터널중앙부에 기둥이나 벽체를 설치하여 지반하중을 지지하는 구조이다. 이 중앙 지지체를 필러(Pillar)라 부르며, 터널 굴착시 재분

배되는 응력이 필러에 집중되므로 응력분배 경향과 규모를 아는 것이 중요하다.

필러부에 적용하는 하중은 대부분 매우 근접한 쌍굴 터널의 응력중첩 이론으로 설명되는 경우가 많다. 터널 굴착시 원지반의 일부를 남겨서 필러로 활용하는 경우, 필러 형상에 따라 평균 필러응력(Average pillar stress)을 구하는 방법이 제안 되었으며, 평행한 원형터널에서 근접도에 따른 리브필러(Rib pillar)에 작용하는 응력을 규명하기 위한 연구도 있었다(Hoek and Brown, 1980). 두 터널 사이의 이격거리가 매우 작은 터널에서 터널중앙부 지지형태에 따라 필러하중의 크기를 파악하고자 하는 연구가 유한요소 해석에 의하여 수행되었으며(Kamimura 외, 2002), 토사지반에서 필러와 지반의 탄성계수비를 변화시켜 현장 계측자료와 연계한 필러하중 규모산정에 대한 연구도 있었다(Matsuda 등, 1998).

국내에서 수행된 연구로는 유한요소 수치해석에 의하

<sup>1)</sup> (주)평화엔지니어링 지반공학부 이사

<sup>2)</sup> 아주대학교 건설교통공학과 교수

\* 교신저자 : iguakim@naver.com

접수일 : 2009년 3월 19일

심사 완료일 : 2009년 4월 10일

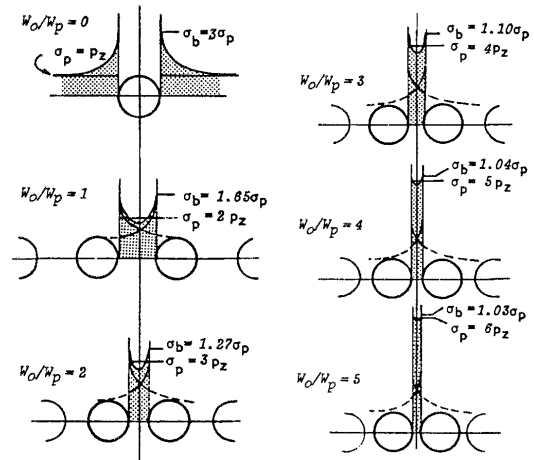
게재 확정일 : 2009년 4월 20일

여 2-아치 터널의 중앙터널 크기 변화와 굴착순서 변경 등에 따른 거동을 관찰한 연구가 있었고(김상균과 박동욱, 2003), 모형실험을 통하여 사질토 지반에서 2-아치 터널 굴착시 필러하중과 지반변위를 파악하고자 하였다(이상덕과 전은숙, 2004). 또한 라이닝 강성이 필러하중에 미치는 영향을 모형실험을 통하여 확인하였고(김홍문 외, 2004), 지반 내에 불연속면이 있는 경우 필러하중의 변화를 파악하기 위한 실험도 수행 되어, 수평 불연속면 하부에서의 2-아치 터널 거동을 확인하기 위한 연구(전은숙 외, 2005) 및 절리암반에서 필러하중과 지반변위를 파악하고자 하는 연구도 진행되었다(이상덕, 2007). 최근에는 터널시공 과정을 수치해석으로 모사하여 필러부에 적용하는 응력의 크기를 지반등급에 따라 파악하고, 필러부에 작용하는 불평형 응력에 대한 상세한 해석도 수행되었다(오규철 외, 2007).

이러한 이론적, 실험적 및 수치 해석적 방법으로 2-아치 터널 필러에 작용하는 응력분포를 규명하고자 연구가 진행되고 있으나, 터널 굴착시 응력분배에 관계되는 영향요소가 많고 상호작용이 복잡하기 때문에 정량적으로 필러 응력을 규명하기는 여전히 곤란한 실정이다. 본 연구는 모형실험의 규모를 확대하고 불연속성 지반 조건을 모사하여 다양한 응력분배 조건을 적용하였으며, 수치해석과 연계하여 보다 구체적으로 필러하중 분포 경향을 파악하고자 하였다. 또한 최근 2-아치 터널 건설과정에서 문제점으로 대두되었던 필러 기초부 응력집중 및 손상과 관련하여 수치해석 결과로부터 상세한 응력분포 경향을 분석하였다.

**2. 터널 굴착시 필러에 작용하는 응력 분포**

2-아치 터널은 한 개의 터널이지만 필러가 설치되므로 매우 근접한 쌍굴 터널로 간주하여 필러부 응력분포 특성을 파악할 수 있다. 두 개의 터널을 근접시켜 굴착하게 되면 응력장이 겹치게 되므로 쌍굴 터널 사이에

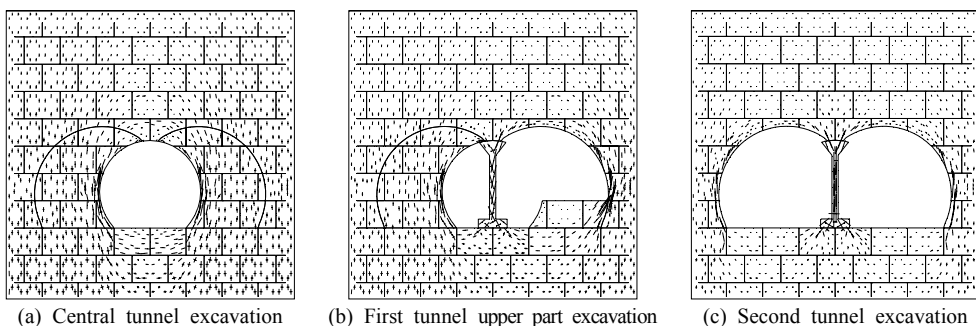


**Fig. 1.** Stress in rib pillars between parallel circular tunnels (Hoek and Brown, 1980).

응력이 집중된다.

필러(Pillar)로 불리는 두 터널사이 부분은 리브형(Rib pillar), 정사각형, 직사각형, 불규칙형 등 다양하다(Hoek and Brown, 1980). 이 가운데 리브형 필러가 2-아치 터널의 중앙 지지체와 유사한 형태이며, 응력은 Fig. 1과 같은 경향으로 분포한다. 터널이 근접할수록 필러에 작용하는 평균연직응력(Average pillar stresses)은 증가하며 필러에 응력이 집중적으로 발생한다. 또한 터널이 근접 할수록(Fig. 1에서  $W_0/W_p$ 가 증가할수록) 점선응력과 필러응력비( $\sigma_b/\sigma_p$ )는 감소한다(Hoek and Brown, 1980).

Fig. 2는 2-아치 터널 굴착 과정을 수치해석으로 모사하여 주응력 분포현황을 텐서로 표시한 것이다. Fig. 2a와 같이 중앙터널 굴착단계에서는 점선응력이 크게 증가하여 Fig. 1 좌측상단의 단일터널과 같은 응력이 분포한다. 다음단계로 터널 중앙에 필러를 설치한 다음 선행터널을 굴착하게 되면 필러부 응력과 우측터널 점선응력이 증가한다. 좌측터널이 굴착되어 양측 터널 굴



**Fig. 2.** Principal stress distribution during tunnel excavation (1/20scaled,  $K_0=0.5$ ).

착이 완료되면 추가된 응력이 필러에 전달되어 중앙 벽체에는 연직방향의 큰 압축력이 주응력으로 작용하게 된다. 중앙지지체의 기둥이나 벽에는 굴착단계에 따라서 주로 압축응력이 작용하게 되며, 일부 부재에는 인장응력이 작용하기도 한다. 또한 좌우 분할굴착에 따른 불평형 응력이 작용한다. 이 불평형력은 선형터널 상반 굴착시 가장 크게 나타나며, 필러 중간부에서 가장 큰 응력이 발생되고, 필러 기초부를 통하여 지반에 전달된다.

### 3. 대형 모형실험

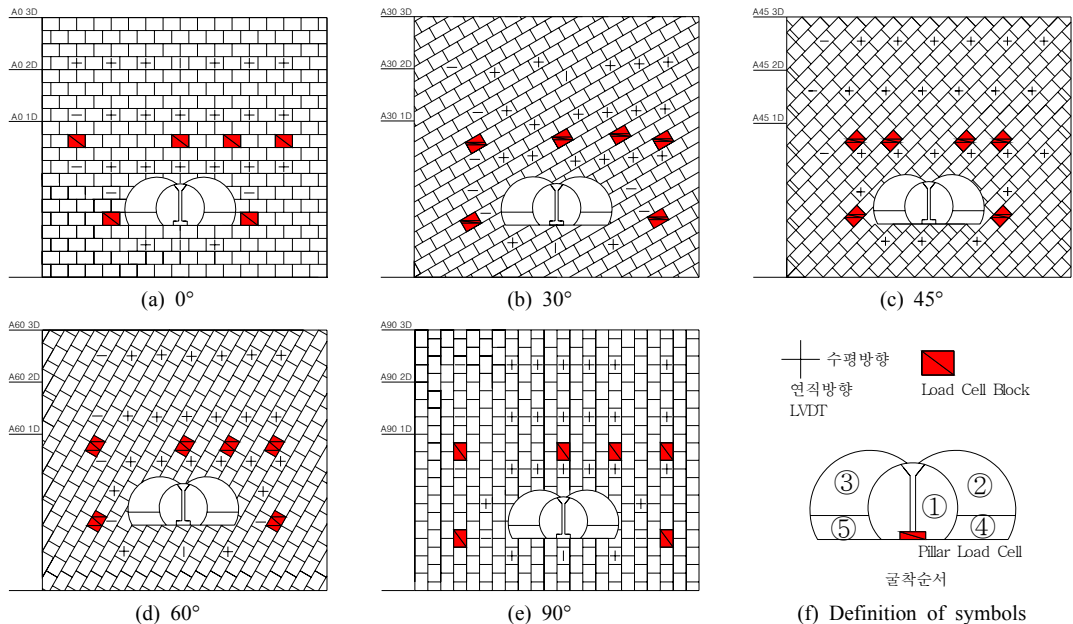
모형실험은 대형 이축 실험기에서 수행하였으며, 실험기의 크기는 폭 6 m, 높이 6.5 m, 길이 2.4 m이다. 모형터널은 원래(Prototype)터널 24 m에 대하여 축소

율 1/20을 적용하여 1.2 m로 하였고, 모형지반은 블록(폭 0.2 m, 높이 0.15 m, 길이 0.45 m)을 이용하여 폭 3.3 m, 높이 3 m, 길이 0.45 m로 조성하였다. 경계조건은 좌우로는 수평방향 변위를 구속하였고 바닥부분은 연직방향 변위를 구속하였다. 모형실험 장치는 평면변형률 조건이 유지되도록 제작하였으며, 블록은 표면을 처리하여 거칠기를 일정하게 유지되도록 하였다. 모형지반은 두 개의 불연속면(Two discontinuities)을 갖는 지반으로, 제1불연속면은 연속적인 불연속면을 갖도록 하였고, 제2불연속면은 90도 교차되게 불연속으로 형성되도록 하였다. 실험변수는 일방향 터널 직경(D)을 기준으로 토피조건 3개와 제1불연속면의 경사(수평면을 기준으로 반시계 방향의 경사각)조건 5개를 조합하여 15개 조건을 실험하였다(Table 1 및 Fig. 3a~e).

**Table 1.** Variables and cases of large scale model test.

Classification		Cover depth		
		1.0D*	2.0D	3.0D
Angle of discontinuity	0°	A0 1.0D	A0 2.0D	A0 3.0D
	30°	A30 1.0D	A30 2.0D	A30 3.0D
	45°	A45 1.0D	A45 2.0D	A45 3.0D
	60°	A60 1.0D	A60 2.0D	A60 3.0D
	90°	A90 1.0D	A90 2.0D	A90 3.0D

\*D≡W/2, W : Tunnel-width, prototype tunnel-width is 24 m, model tunnel width is 1.2 m



**Fig. 3.** Layout of cases of model test (a~e), instruments and excavation sequence (f).

실험순서는 일반적인 2-아치 터널 굴착순서에 따라 Fig. 3(f)와 같이 굴착하였으며, 하중은 필러 바닥면에 설치된 로드셀을 통하여 측정하였고, 매 단계 하중이 수렴된 후에 다음 단계를 굴착하였다.

4. 실험 결과

4.1 필러에 작용하는 하중

모형실험 결과, 굴착 단계별 필러에 작용하는 하중의 크기는 Fig. 4와 같이 나타났다. 그림에서 X축은 굴착 순서를 표현한 것으로 필러설치(pillar set), 선행터널 상반굴착(up1), 후행터널 상반굴착(up2), 선행터널 하반굴착(low1), 후행터널 하반굴착(low2)을 의미한다.

전반적인 경향은 토피가 증가할수록 필러하중도 증가하였다. 불연속면의 경사가 0도인 경우와 60도인 경우는 토피증가에 비례하여 필러하중이 증가하였으나, 30도, 45도 및 90도인 경우에는 토피 증가에 따른 필러하중 증가율이 일정하지 않았다.

최종 굴착단계 지반하중 대부분이 좌·우측 터널 상반 굴착시 발생되었으며, 상반굴착 이후의 하중 증감은 미미하였다. 상반터널 굴착시 대부분의 필러하중이 작용하는 경향은 기존 연구에서도 확인되었다(이상덕, 2007). 또한 선행터널 상반 굴착단계의 하중 증가가 후행터널 상반 굴착시보다 하중 증가보다 더 컸다. 이는 불연속

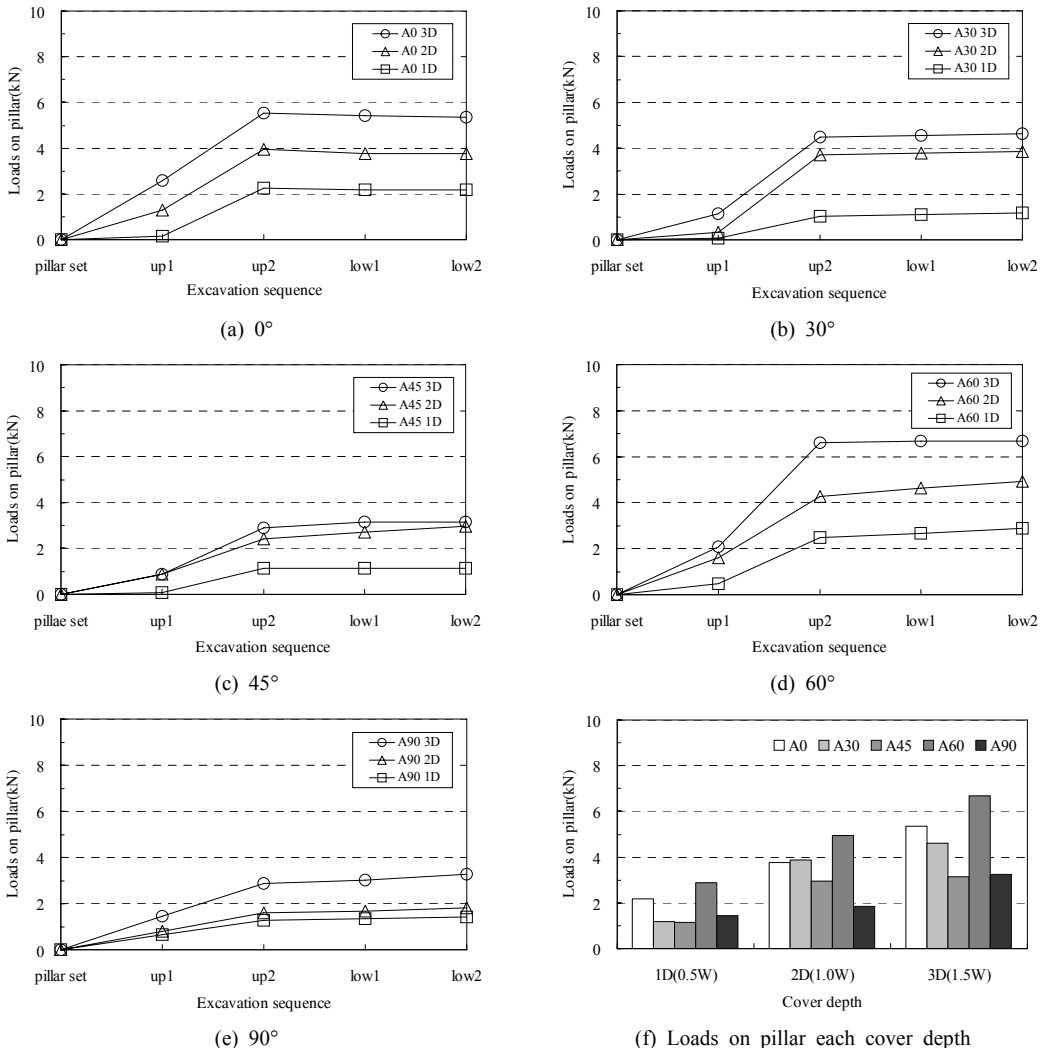


Fig. 4. Loads on pillar, measured values through the model test.

성 지반에서 불연속면의 경사에 수직인 방향으로 변위가 증가하므로 하중도 이 방향으로 증가되므로 하중이 증가한 것으로 분석되었다.

4.2 필러 하중비

기존연구에서 널리 인용되고 있는 필러하중 평가방법으로는 Hoek and Brown (1980)의 평균 필러응력(Average pillar stress) 산정법과 Matsuda (1997) 하중비(Load ratio) 산정법이 있다(Fig. 5). 두가지 방법 모두 필러가 양측 터널 폭 절반에 해당하는 범위의 지반하중을 분담하는 개념이다. 2-아치 터널은 필러 폭에 비해 터널 폭이 매우 크기 때문에 Hoek and Brown (1980)방법 적용시 매우 큰 필러응력이 산정되므로 실험결과와 비교하기에는 부적당한 것으로 판단되었다. 따라서, Matsuda (1997)의 필러하중 평가 방법인 하중비를 산정하였다(Fig. 5b).

Matsuda (1997)는 필러에 작용하는 하중을 좌우터널 중심간 거리에 해당하는 토피하중을 기준으로 하중비를 산정하였으며(Fig. 5b), 토피가 터널 전체 폭 이하인 경우는 식(1)에 의하여, 토피가 터널 전체 폭을 초과할 경우는 식(2)에 의하여 하중비를 산정한다.

토피(H) ≤ 1W 인 경우,

$$\text{하중비} = \frac{\text{필러에 작용한 하중}(P)}{\text{토피하중}} \tag{1}$$

토피(H) > 1W 인 경우,

$$\text{하중비} = \frac{\text{필러에 작용한 하중}(P)}{1W \text{에 해당하는 토피하중}} \tag{2}$$

하중비는 H=0.5W 및 H=1.0W는 식(1)에 의하여, H=1.5W인 경우는 식(2)에 의하여 산정하였다. 산정결과 H=0.5W의 하중비는 0.33~0.85, H=1.0W는 0.27~0.72였고, H=1.5W인 경우에는 0.46~0.98로 산정되었다(Fig. 6). 특히, 불연속면의 경사가 60도인 경우는 큰 하중비가 산정되었는데 이는 불연속면 경사가 고각으로 형성되어 터널 굴착 시 여러 개의 불연속면이 일시에 개방되므로 큰 하중이 필러에 전달된 것으로 분석되었다.

실험에서 측정된 토피 조건별 필러하중을 평균하여 해당 조건의 터널 중심간 거리의 토피하중으로 환산하면 Fig. 7과 같다. 토피 H가 0.5W 조건인 경우(Fig. 7a)는 터널 중심간 거리의 0.52배에 해당하는 토피하중이,

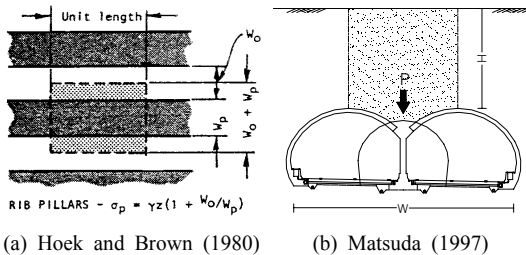


Fig. 5. Definitions of average pillar stresses (a) and load ratio (b).

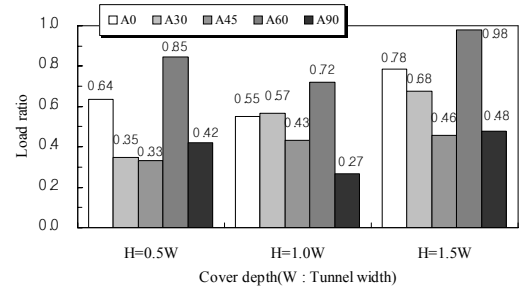


Fig. 6. Load ratio subject to cover depth.

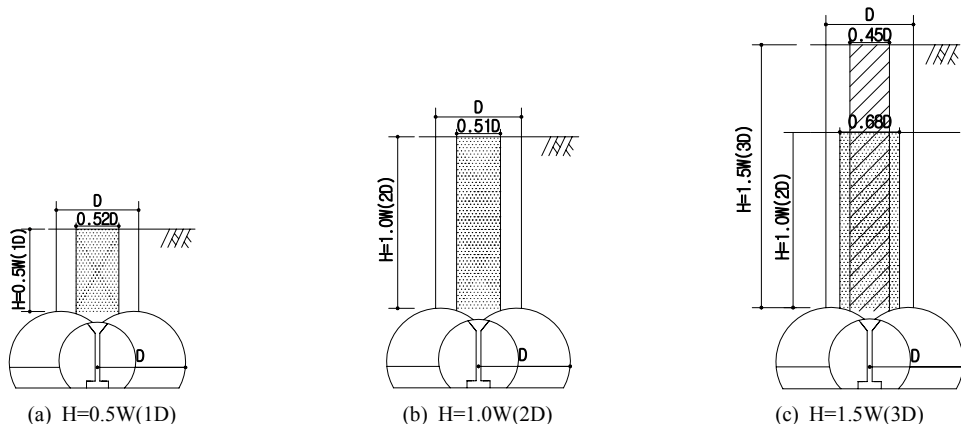


Fig. 7. Overburden loads with conversion tunnel diameter "D" from average loads each cover depth.

토피 H가 1.0W인 경우(Fig. 7b)는 0.51배에 해당하는 토피하중이 필러에 작용하는 것으로 산정되었다. Fig. 7c와 같이 토피가 터널 전체 폭의 1.5배(H=1.5W)인 경우에는 전체 토피(H=1.5W)로 환산할 경우에는 0.45배, H=1.0W의 토피로 환산할 경우 평균 0.68배의 토피하중이 필러에 작용하는 것으로 산정되었다.

## 5. 개별요소법(DEM)에 의한 수치해석

### 5.1 수치해석 개요

모형실험 결과와 비교하기 위하여 축소모델에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 실험과 근접한 해석을 위하여 불연속체 해석 방법중 블록이론에 근거한 개별요소법(DEM)으로 실시하였으며, 범용 코드인 UDEC를 이용하였다. UDEC코드의 기본공식은 2차원 평면 변형률 조건을 가정하고 있으며(Itasca UDEC manual, 2004), 따라서 불연속면들은 해석면에 수직한 방향인 평면이 되므로 모형실험 조건과 같다.

구성모델은 블록은 Mohr, 절리면 거동은 Coulomb Slip 모델을 적용하였다. 블록과 절리면의 지반물성은 Table 2와 같다. 경계조건은 좌우 측면의 X변위를 고정시켰고, 바닥면은 Y변위를 고정시켰다. 축압계수는 실험의 경계조건과 블록의 포와송비를 고려하여 기본 탄성이론(조태진 외 2007, Matsumoto and Nishioka, 1991, Timoshenko

and Goodier 1970)으로부터  $K_0=0.25$ 를 적용하였다.

### 5.2 해석결과

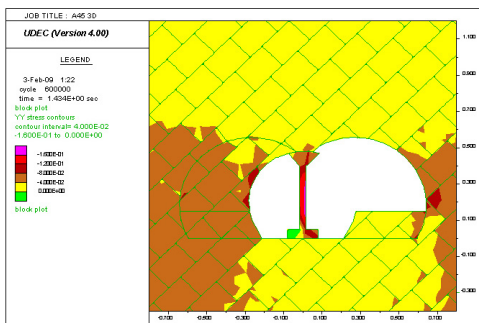
터널 굴착시 필러부 응력은 중간 부분에서 가장 큰 응력이 발생하였고, 주로 압축응력이 발생하였다. 좌·우측 터널이 교대로 굴착되므로 필러응력이 불평형하게 발생하였으며 굴착단계에 따라 집중부위도 달라졌다(Fig. 8). 실제터널은 선행터널과 후행터널 간 종방향 이격거리를 두고 굴착이 이루어지므로 본 연구의 2차원 해석과는 차이가 있다. 선행연구(오규철 외, 2007)에서는 3차원 수치해석으로 중앙벽체 시공 후 선행터널 굴착으로 인해 중앙벽체에 나타나는 응력집중 정도를 검토한 결과 최종응력의 79~86%수준으로 보고되었다.

모형실험에서 측정된 필러부 하중을 응력으로 환산하여 수치해석 결과와 비교하였다. 수치해석에서 나타난 응력은 필러부 위치에 따라 큰 차이를 보이므로 모형실험과 같은 비교 조건이 되도록 필러기초부의 응력을 평균하였다. 굴착단계별 필러 기초부 응력분포는 실험과 해석결과가 유사한 경향을 보였다. 두 결과 모두 상반 굴착시 최종단계 응력의 거의 대부분이 발현되었다. 응력발생 경향성은 실험 및 해석결과가 부합되지만, 그 값은 상당히 큰 차이를 보였다(Fig. 9).

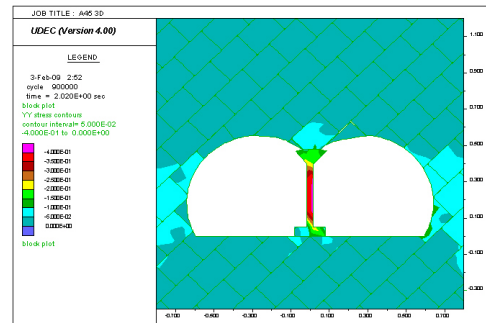
특히 불연속면의 경사가 45도 이상인 고각의 지층조건일수록 더 큰 차이를 보였다. 이는 수치해석에서는

Table 2. Mechanical properties for numerical analysis.

Block	Young's modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle $\phi$ (°)	Poisson's ratio $\nu$	Mass (MPa)
		15,000	2.45	45	0.2
Joint	Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)	Friction angle $\phi$ (°)	Cohesion (MPa)	
	5,000	519	28	0.005	



(a) 1st tunnel upper part excavation



(b) 2nd tunnel excavation

Fig. 8. Computed figures of vertical stress (case of A45 3D,  $K_0=0.25$ ).

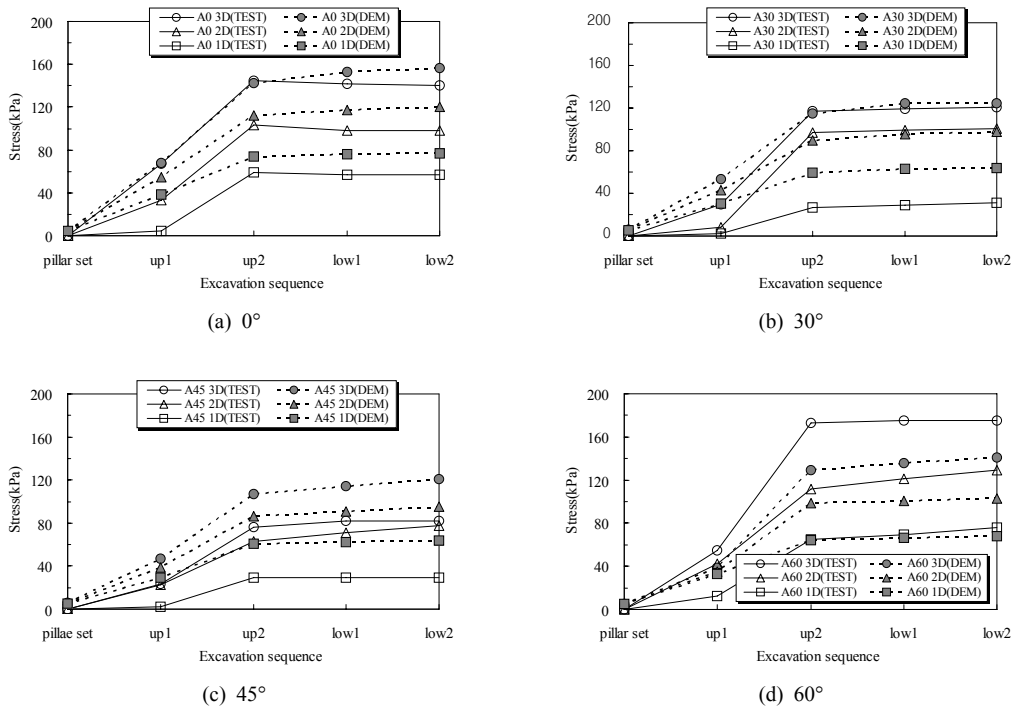


Fig. 9. Comparison of vertical stresses in the basement of pillar, measured values (TEST) and analyzed values (DEM).

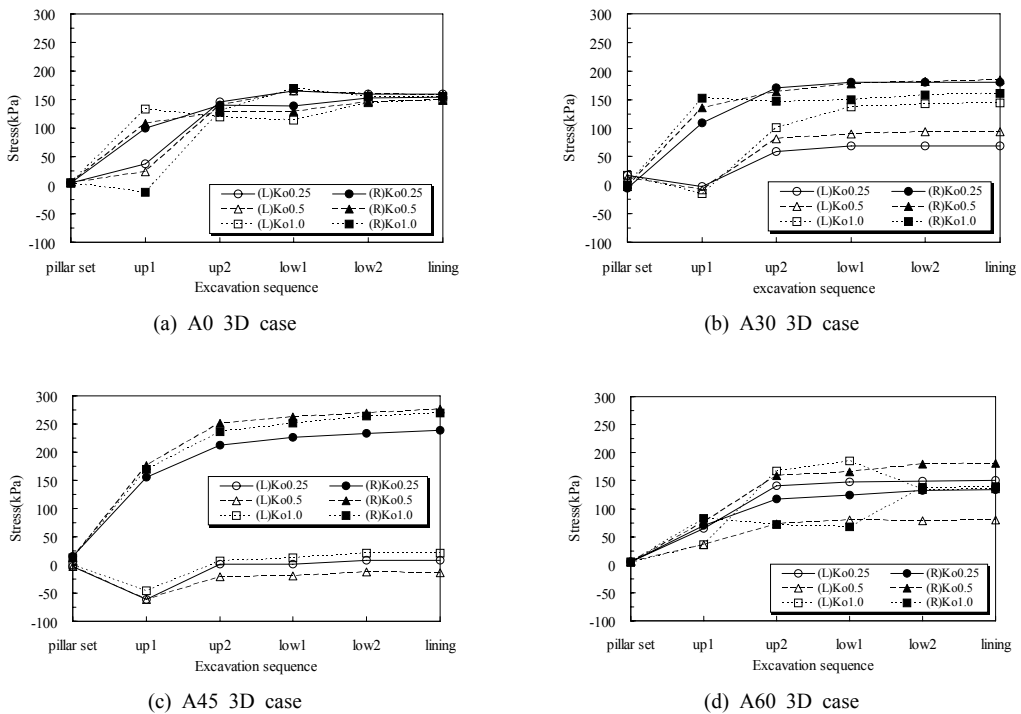
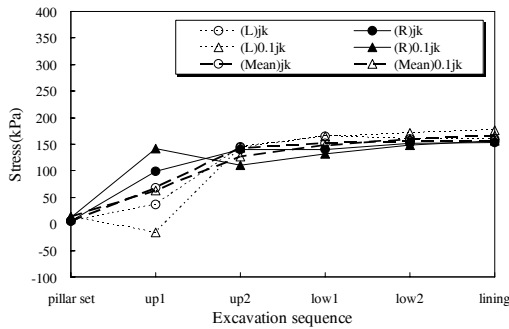
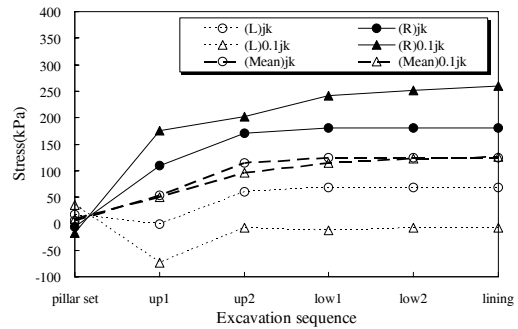


Fig. 10. Comparison of vertical stress in the basement (Left side vs Right side) of pillar subject to variations of Ko (ratio of horizontal stress to vertical stress).



(a) A0 3D case



(b) A30 3D case

Fig. 11. Comparison of vertical stress in the basement(Left side vs Right side) of pillar subject to variations of joint stiffness.

불연속면의 전단강도와 강성이 일정한 조건이 되므로 토피 증가에 따라 일정한 증가율을 보인 반면, 모형실험은 별도의 가압이 없는 낮은 축압조건에서 굴착시 일부 블록사이의 벌어짐 현상과, 블록사이의 상대적인 거동에 따른 마모에 의한 것으로 추정되는 분진이 발생하는데, 이런 현상을 해석기법상 구현하지 못한데 기인한 것으로 분석되었다.

수치해석 결과, 필러 기초부 발생응력이 좌·우측 부재위치에 따라 큰 차이를 보였다. 불연속면 경사조건 4가지에 대하여 축압계수 변화시켜 수치해석을 추가하였고, 굴착단계별 필러 기초부 좌·우측 부재응력을 비교하였다(Fig. 10). 여기서 압축응력을 양(+)의 값으로, 인장응력을 음(-)의 값으로 표현하였다.

불연속면 경사가 0도인 경우(Fig. 10a)는 좌우 응력편차가 선행터널 상반 굴착시 일시적으로 발생하지만, 불연속면이 경사져 있는 해석조건에서는 좌·우측 응력차이가 더 크게 발생하였다(Fig. 10b~d). 특히 45도 경사를 가지는 조건(Fig. 10c)에서는 터널굴착 전 과정에서 좌·우 바닥면 응력차이가 크게 발생하였고, 굴착이 완료된 후에도 불평형 응력이 해소되지 않았다. 수평 불연속면 조건에서는 축압계수 변화에 따른 필러 기초부 응력편차가 크지 않았으나, 불연속면 경사도에 따라서는 특정 축압조건에서 응력편차가 크게 발생하였고, 라이닝 설치 후에도 응력편차가 지속되었다.

Fig. 11은 절리면의 강성을 1/10로 축소하여 기준강성 적용시와 비교하였다. 불연속면이 경사져 분포하는 경우에는 강성변화에 따라 기초부 응력차이가 크게 변하는 것으로 확인되었고, 평균응력으로 산정한 최종단계 응력은 절리면 물성이 같기 때문에 유사한 값을 나타내었다.

이러한 필러 기초부 응력차이는 지반에 전달되는 접지압 분포에도 큰 차이를 유발할 수있으며, 필러 기초부의 기초지반 지지력이 부족한 경우에는 부등침하가 발생하게 되고, 실규모 하중조건에서는 부재강도를 초과하는 응력이 일부에 집중될 경우 필러손상의 원인이 될 수 있다.

## 6. 결론

블록을 이용한 모형실험을 통하여 2-아치 터널 굴착시 필러에 작용하는 하중의 크기를 측정하였고, 개별요소에 의한 수치해석으로 필러에 발생하는 응력을 비교하였다. 굴착단계별 필러에 발생하는 응력 가운데 기초부에서의 응력을 중점적으로 분석하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2-아치 터널 굴착시 필러에 작용하는 하중은 토피가 증가함에 따라 증가하였으며 터널 상부 반단면 굴착시 최종단계 하중의 대부분이 발생하였고, 하부 반단면 굴착단계의 하중 증감은 미미하였다.
- 2) 모형실험 결과, 불연속면이 존재하는 지반에서는 필러하중이 불규칙적으로 발생하였으며, 경사도의 영향이 큰 것으로 확인되었고, 실험조건 가운데 불연속면 경사가 60도인 경우에 필러하중의 가장 크게 발생하였다.
- 3) 실험결과와 수치해석 결과를 비교하면 응력분포 경향은 유사하게 나타났으나 응력의 수치적 크기는 차이를 보였다. 이는 축압이 낮은 조건에서 모형터널 굴착시 일부 블록사이의 벌어짐 현상과, 블록사이의 상대적인 거동에 따른 마모에 의한 것으로 추정되는



분진이 발생하는데, 이런 현상을 해석기법상 구현하지 못하는데 기인한 것으로 분석되었다.

- 4) 굴착단계별 필러 기초부에서 좌우 부재응력 차이가 크게 발생하였으며, 불연속면의 경사도 영향과 지반강성 차이가 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

## 참고문헌

1. Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, "Underground Excavations in Rock", pp.113~116.
2. Kamimura, M., Sugiyama, T., Ishikawa, S., Yoneda, H., and Nakagawa, K., 2002, "Discussion on the behaviours of parrell tunnel with a small clearance", *AITES-ITA DOWNUNDER 2002 Congress and Abstract Book* Vol. 1, pp. 898~906.
3. Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M., and Miura, K., 1998, "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground", *Tunnels and Metropolises*, Negro Jr & Ferreira(eds), pp. 1193~1198.
4. 김상균, 박동욱, 2003, "수치해석적 접근을 통한 2Arch 터널의 거동양상 고찰", *한국지반공학회 봄 학술발표회*, pp. 225~232.
5. 이상덕, 전은숙, 2004, "사질토 지반에서 2Arch 터널의 거동", *한국터널공학회 논문집*, Vol. 6, No. 2.
6. 김홍문, 김찬용, 홍용희, 이상덕, 2004, "라이닝 강성에 따른 2-Arch 터널 필러부의 거동", *대한토목학회 전문학회 세미나*.
7. 전은숙, 김홍문, 이상덕, 2005, "수평불연속면 하부 2-Arch 터널의 거동특성", *한국터널공학회 논문집* Vol. 7, No. 3.
8. 이상덕, 2007, "절리암반에서 2-Arch 터널의 필러하중과 지반변위", *한국터널공학회 논문집* Vol. 9, No. 1.
9. 오규철, 도종남, 천병식, 2007, "2-Arch 터널 중앙벽체 작용하중 산정에 관한 연구", *한국지반공학회 논문집* Vol. 23, No. 11.
10. Matsuda, T., Toyosato, E., Igarashi, M., Nashimoto, Y., and Sugiyama, T., 1997, "A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method", *Proceedings of Studies on Tunnel Engineering* Vol. 7.
11. Itasca Consulting Group, 2004, "UDEC manual"
12. 조태진 외, 2007, "21C 암반역학", 건설정보사, pp. 269~271, 309~311.
13. Matsumoto, Y. and Nishioka, T., 1991, "Theoretical tunnel mechanics", University of Tokyo Press, pp. 3 ~37.
14. Timoshenko, S. P. and Goodier J. N., 1970, "Theory of Elasticity", pp.15~33.



### 김 홍 문

1993년 건국대학교 토목공학과 공학사  
2001년 아주대학교 건설교통공학과 공학석사  
2004년 아주대학교 건설교통공학과 박사과정

Tel: 031-420-7280  
E-mail: iguakim@naver.com  
현재 평화엔지니어링 지반공학부 이사



### 이 상 덕

1980년 서울대학교 토목공학과 공학사  
1982년 서울대학교 토목공학과 공학석사  
1987년 독일 Stuttgart대학교 공학박사

Tel: 031-219-2503  
E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr  
현재 아주대학교 환경건설교통공학부 교수