호층암반내 비대칭 쌍굴터널의 안정성에 관한 모형실험 연구

김종우^{1)*}

A Study on the Stability of Asymmetrical Twin Tunnels in Alternating Rock Layers Using Scaled Model Tests

Jong-Woo Kim

Abstract In this study, scaled model tests were performed to investigate the stability of an asymmetrical twin tunnels constructed in rock mass comprising alternating layers of sandstone and shale. Each of tunnels had a differently shaped section, where the one was already constructed tunnel including lining structure but the other was planned to be under construction. Four types of test models which had respectively different pillar widths and loading conditions were experimented, where both crack initiating pressures and deformation behaviors around tunnels were investigated. The cracks of pillar mainly began to appear at the interfaces of alternating layers, following additional shear displacement between layers was confirmed as one of the most important factors of pillar failure in case of the model of pillar width 0.5D. The models with shallower pillar widths proved to be unstable because of lower crack initiating pressures and more tunnel convergences than the models with thicker pillar widths. The failure and deformation behaviors of tunnels were also dependent on the loading conditions, where the model of coefficient of lateral pressure 1.0 was more stable than the other model. Furthermore, the results of FLAC analysis were qualitatively coincident with the experimental results.

Key words Scaled model test, Asymmetrical twin tunnels, Stability, Deformation behavior, Alternating rock layers

초 록 본 연구에서는 사암과 셰일이 교대로 반복되는 호층 지질구조를 가진 암반에서 복공이 설치되어 운영 중인 기존 터널의 인근에 단면 형태가 다른 신설 터널을 건설할 경우, 신설 터널의 시공중 안정성을 검토하기 위하여 축소모형실험을 실시하였다. 이러한 비대칭 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 하중조건이 서로 다른 네 가지 모형을 제작하였고 실험을 통해 모형별 균열개시압력과 변형거동을 조사하였다. 터널간 이격거리가 0.5D인 모형의 경우 필라에서 발생한 균열은 모두 호층 지질구조상 지층 경계면에서 발생하였고 지층간 전단변위가 필라 파괴의 중요한 인자로 작용하였다. 터널간 이격거리가 작은 모형일수록 낮은 압력수준에서 균열이 발생할 뿐 아니라 같은 압력 수준에서 터널의 내공변형량은 더 크게 나타나 터널의 안정성이 상대적으로 작은 것으로 평가되었다. 또한 하중조건을 달리한 경우에는 측압계수가 1.0일 때 터널 안정성이 우수한 것으로 나타났으며, FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

핵심어 축소모형실험, 비대칭 쌍굴터널, 안정성, 변형거동, 호층 지질구조

1. 서 론

도로의 확포장사업이나 철도의 복선화사업에 있어서 기존 터널을 그대로 유지한 채로 기존 터널 인근에 신

설 터널을 건설하면 선형이 개선되지는 않지만 경비 측면에서는 매우 유리하기 때문에 최근 고려의 대상이 되고 있다. 이때 과거 시공된 기존 터널의 단면에 비해 신설 터널의 단면은 그 형태가 다르게 설계될 수 있는데 이 경우 비대칭 쌍굴터널이 만들어진다.

일반적으로 쌍굴터널에서 터널상호간의 이격거리는 지반 조건이나 시공법에 따라 달라지지만 최근에는 보강공법의 발달로 인하여 2D 이하로 시공되는 경우가 많으며, 필라(pillar)의 지지기능을 더욱 강화하여 2arch

¹⁾ 청주대학교 토목공학과

* 교신저자 : jwkim@cju.ac.kr

접수일 : 2012년 1월 27일

심사 완료일 : 2012년 2월 15일

게재 확정일 : 2012년 2월 15일

터널이나 3arch 터널을 시공함으로써 이격거리를 보다 감소시키는 공법도 적용되고 있다(김도형 외, 2003). 국내의 경우 쌍굴터널에 관한 시공이나 설계사례는 아직도 부족한 편이며 그에 관한 연구도 미흡한 형편이다. 특히, 이에 관한 국내 연구는 주로 수치해석적인 방법을 동원한 연구들(김학문, 1997, 황정순 외, 2005, 백승철 외, 2009)이 많으며, 실제 쌍굴터널의 설계에서도 이 방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 쌍굴터널 주변 지반의 변형거동을 가시적으로 직접 확인하기 위해서는 보다 실증적인 실험적 연구가 요구된다. 축소모형실험은 Hobbs(1966), Goodman(1972) 등에 의해 소개되었고 국내에서도 쌍굴터널에 대한 물리적인 모형실험을 실시한 연구 사례(김종우와 박지용, 2004, 장부식 외, 2006, 김종우와 배우석, 2008)도 보고된 바 있다. 그러나 비대칭 쌍굴터널에 관한 실험적 연구는 찾아보기 어려우며 특히 국내 암반에서 흔히 발견되는 호층(alternation of strata) 지질구조를 반영한 터널 연구 사례는 없는 실정이다.

본 연구에서는 사암과 셰일이 교대로 반복되는 호층 지질구조를 가진 암반에서 복공이 설치되어 운영 중인 기존 터널의 인근에 단면 형태가 다른 신설 터널을 시공하여 비대칭 쌍굴터널이 만들어지는 경우에 대한 모형실험을 실시하였다. 여기서 신설 터널의 시공중 안정성을 검토하기 위하여 기존 터널에는 복공을 설치한 반면에 신설 터널은 무지보 상태로 둔 상태에서 터널간 이격거리와 하중조건이 서로 다른 네 가지 비대칭 쌍굴터널 모형에 대한 실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였다. 먼저, 신설터널의 폭이 D일 때 터널간의 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.5D 등의 세 가지로 변화시켜 가면서 축압계수가 1.5인 조건으로 모형실험을 실시함으로써 필라 폭이 터널 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 다음으로, 터널간의 이격거리가 1.0D인 모형에 대해서는 축압계수가 1.0인 모형실험을 추가적으로 실시함으로써 하중조건에 따른 변형거동의 차이점을 조사하였다. 또한, 지반해석용 프로그램인 FLAC을 사용하여 실험 결과를 검토하였다. 이와 같은 모형실험과 수치해석적인 접근은 비대칭 쌍굴터널의 설계 및 시공에 있어서 유효한 보조자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험 모형

2.1 현장 조건

본 연구에서는 호층 지질구조를 가진 암반에 비대칭 쌍굴터널이 굴착되는 경우를 모사하였다. 기존 터널 단

Table 1. Physical properties of rocks

Rocks	Density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)
Sandstone	2.66	144
Shale	2.66	103

면의 크기는 폭 6.30 m, 높이 6.90 m인 말발굽형 터널이고 두께 50 cm의 콘크리트 복공이 설치되어 있으며, 이 기존 터널과 인접하여 쌍굴 터널의 형태로 시공되는 신설 터널은 폭 7.36 m, 높이 7.42 m이다. 이 터널은 사암과 셰일이 교대로 반복되는 호층 지질구조를 가진 암반에 위치하는데, 여기서 채취된 암석의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 여기서 각 물성은 7개 시추공에서 채취된 암석들로부터 시험편을 제작하여 실내 실험한 결과들의 평균값이며, 일축압축강도를 기준으로 하면 사암이 셰일보다 약 1.4배 강한 것으로 평가되었다. 한편, 각 지층은 터널단면의 횡축을 기준으로 평균 15° 정도 경사져 있으며, 현지 초기지압 측정의 결과 축압계수(K)는 1.5로 나타났다.

2.2 차원해석

현지암반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때 현장성을 충분히 재현할 수 있도록 하기 위해서는, 현장의 모든 제반요소들에 대한 차원해석을 실시하여 축소율을 산정하고 이에 따른 적합한 모형재료를 사용하여 축소모형을 제작해야한다. 세 가지 기본 차원을 길이[L], 시간[T], 질량[M]이라고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정하고 나서 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 현장 터널단면과 축소모형에서의 터널단면을 나타낸 것으로, 이와 같이 본 실험에서는 길이[L]에 대한 축소율을 1/123로 하였다. 다음으로 중력가속도[LT⁻²]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/11.08이 된다.

한편, 현장에서 채취한 암석의 밀도는 Table 1과 같이 2.66 g/cm³인데 비해 본 실험에서 실제로 사용한 모형재료의 밀도는 1.6 g/cm³이었으므로 밀도[ML⁻³]에 대한 축소율은 1/1.66이며, 이로부터 질량[M]에 대한 축소율을 산정하면 1/3068608로 나타났다. 이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 하여 현장 암반의 강도[ML⁻¹T⁻²]에 대한 축소율을 구하면 1/204로 나타났다. Table 2는 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

Fig. 1. Dimension of tunnel sections

Table 2. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/123
Time	[T]	1/11.08
Mass	[M]	1/3068608
Density	[ML ⁻³]	1/1.66
Strength	[ML ⁻¹ T ⁻²]	1/204

Fig. 2. Relation between compressive strength and plaster-water ratio when density is 1.6 g/cm³

2.3 모형재료

호층 지질구조를 보이는 사암과 셰일의 일축압축강도는 Table 1과 같이 각각 144 MPa, 103 MPa이며, 여기에 강도 축소율인 1/204를 각각 적용하면 사암과 셰일

의 모형재료는 각각 0.71 MPa, 0.50 MPa의 강도를 가져야 한다. 본 연구에서는 이러한 물성을 갖는 물질로서 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였다. 한편, 김종우와 박지용(2004)은 이 재료의 강도 특성을 구하기 위하여 모래, 석고, 물의 중량 배합비를 달리하여 제작한 원주형 시험편이 일정시간 건조 후 밀도가 1.6 g/cm³이 될 때 일축압축실험을 실시함으로써 Fig. 2와 식 (1)과 같이 석고/물(P/W)의 비율이 증가할수록 일축압축강도가 지수함수적으로 증가하는 것을 보였다.

$$S_c = 2.01 (P/W)^{2.81} \quad (1)$$

여기서, S_c : Uniaxial compressive strength(MPa)
 P/W : Weight ratio of plaster to water

본 연구에서는 식 (1)을 근거로 하여 0.71 MPa와 0.50 MPa의 강도를 가지는 물질로서 모래, 석고, 물의 중량배합비가 각각 131:69:100과 139:61:100인 혼합물을 사용하였으며, 이 혼합물로 원주형 시험편을 제작한 후 일정 기간 건조 후 밀도가 1.6 g/cm³일 때 일축압축실험을 실시하여 소정의 강도를 나타내는 것을 다시 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 이 두 가지 혼합물을 사용하여 호층 구조를 나타내는 사암과 셰일을 각각 모델링하였으며, 추가적인 실내 물성실험을 통해 이 재료는 Table 3과 같은 물성을 가지는 것을 알 수 있었다.

또한, 호층 암반의 이방성 특성을 구하기 위하여 Table 4의 그림과 같이 가로 175 mm, 세로 175 mm, 두께 76 mm인 육면체 시험편에 대해 일축압축실험을

Table 3. The physical and mechanical properties of modelling material

Rocks	Mixture Sand : Plaster : Water	Density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
Sandstone	131 : 69 : 100	1.6	0.71	559	0.11	28
Shale	139 : 61 : 100	1.6	0.50	382	0.08	27

Table 4. Results of uniaxial compression tests for anisotropic properties

Specimens	Photograph	Loading condition	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Horizontal layers			0.61	424
Vertical layers			0.63	465

추가로 실시하였다. 여기서 흰색 슬랩은 사암 모형(배합비 131:69:100)이고 빨간색 슬랩은 셰일 모형(배합비 139:61:100)이다. Table 4의 오른쪽 부분은 시험 조건에 따른 결과를 나타낸 것으로 이 호층 모형은 약간의 이방성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

2.4 실험모형의 종류

본 연구에서는 호층 지질구조를 가진 암반에 건설되는 비대칭 쌍굴터널에서 터널간 이격거리와 하중조건이 신설 터널의 시공중 안정성이나 주변지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 Fig. 3과 같은 네 가지 실험모형을 제작하였다. 여기서 왼쪽의 기존 터널은 장기간 운영 중인 터널로서 복공이 설치된 것인데 비해 오른쪽의 신설 터널은 시공중 상태를 반영하기 위하여 복공을 설치하지 않는 것으로 하였다. 또한 현장의 지반 조건과 초기지압 조건을 모형실험에 반영하기 위해 사암과 셰일 지층은 터널단면의 횡축을 기준으로 15° 경사지게 하였으며, 대부분의 모형에서 축압계수(K)는 1.5로 하였다. Fig. 3은 실험모형들의 구역을 나타낸 것이다.

네 가지 실험모형의 세부사항은 다음과 같다. 먼저,

Fig. 3. Dimensions of four different models

터널간 이격거리의 영향을 조사하기 위하여 1, 2, 3번 모형과 같이 이격거리 또는 필라 폭을 0.5D(30 mm), 1.0D(60 mm), 1.5D(90 mm)로 변화시킨 모형들에 대해 가압실험을 실시하였고, 이때 터널의 파괴양상과 터널 주변지반의 변형거동을 알아보았다. 다음으로, 4번 모형과 같이 터널간의 이격거리가 1.0D인 모형에 대해서는 측압계수가 1.0인 모형실험을 추가적으로 실시함으로써 하중조건에 따른 변형거동의 차이점을 조사하였다.

2.5 모형 시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량배합비가 각각 131:69:100인 혼합물과 139:61:100인 혼합물을 사용하여 Fig. 3의 네 가지 모형시험체를 제작하였으며, 사용한 모래는 주문진산 표준사이다. 모형시험체는 480 mm × 480 mm × 76 mm 규격이며, 정형래와 김종우(2006)와 같이 얇은 슬랩들을 겹겹이 포개어 쌓아올리는 방법으로 적층체 모형시험체를 만들었다. 단, 사암과 세일이 교대로 반복되는 호층 지질구조를 재현하기 위하여 두 가지 혼합물로 만든 25 mm 두께의 슬랩들을 교대로 쌓아가면서 시험체를 제작하였으며, 세일층(배합비 139:61:100)에는 빨간색 염료를 약간 투입하여 색깔을 줌으로써 사암층과 구별하기 쉽도록 하였다.

한편, 이와 같이 완성된 시험체를 일정 기간 건조시켜 밀도가 1.6 g/cm³이 될 때 비로소 실험을 실시하였다. Fig. 4는 모형시험체를 실험장치에 설치하기 전의 모습을 나타낸 것이다.

Fig. 4. A view of the model before testing

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 수직하중과 수평하중을 각각 조절할 수 있는 유압식 이축 압축장치로서 김종우와 배우석(2008)에 의해 소개된 바 있다. 여기에는 25톤 용량의 램 4개가 서로 마주보며 배치되어 있으며, 모형시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 디지털 압력계로부터 측정된다.

실험의 방법 및 순서는 다음과 같다.

- (1) 모형시험체를 실험장치에 설치하고 시험체의 모든 면을 정형한다.
- (2) Fig. 5(a)와 같이 모형 터널을 Fig. 3의 규격대로 굴착한다.
- (3) 두 개의 터널 중 왼쪽에 위치한 기준 터널에는 두

Fig. 5. Procedures of the scaled model tests of this study

Fig. 6. Deformation behaviors of model No.1 in biaxial loading condition (Values indicate vertical and horizontal pressures, respectively)

께 4 mm의 콘크리트 복공을 설치한다. Fig. 5(b)는 복공 모형재료를 주입하고 있는 모습이고 Fig. 5(c)는 주입후의 모습이다. 여기서 복공두께 4 mm의 품질관리를 위하여 특수 제작한 모형 거꾸집을 사용하였으며 복공재료가 모형시험체에 침투하는 것을 방지하기 위하여 시험체의 윗면에 OHP 필름을 설치하였다.

- (4) 하중 증가에 따른 터널 주변의 변위를 측정하기 위하여 모형시험체의 표면에 계측점들을 표시한다. 이때 계측점을 명확히 표시하기 위하여 시험체의 표면에 스프레이 락카를 얇게 도포하였는데, 2, 3, 4번 모형은 투명 락카를 사용하였기 때문에 시험체에서 복공 및 호층 구조를 잘 볼 수 있었는데 비해 1번 모형의 경우는 실험착오로 인해 백색 락카를 사용하였기 때문에 이들을 볼 수는 없다. 이는 후술하는 Fig. 6~9의 사진에 나타나있다.
- (5) Fig. 5(d)와 같이 두께 10 mm인 투명 아크릴판을 모형시험체 위에 덮고 나서 모형시험체를 터널 축방향으로 고정시킴으로써 평면 변형률 조건을 구현한다. Fig. 5(e)는 이 단계에서 2번 모형의 모습을 나타낸 것으로 터널 주변에는 위 (4)항에서 언급한 계측점이 나타나있다.
- (6) 모형시험체의 상하, 좌우에 위치한 네 개의 램에 하중을 연속적으로 작용시키면서 모형터널 주위의 변형거동을 관찰한다. Fig. 5(f)는 실험장치의 전체 모습을 나타낸 것이다. 한편, 가압 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 조사하였는데, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2 mm로 나타났다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 터널간 이격거리의 영향

터널간 이격거리 또는 필라 폭이 터널의 변형거동 및

Fig. 7. Cracks of model No.1

안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3의 1, 2, 3번 모형에 대한 실험을 실시하였다. 여기서 각 모형의 터널간 이격거리는 0.5D, 1.0D, 1.5D 등이며 축압계수는 모두 1.5를 유지하도록 하였다.

Fig. 6은 1번 모형의 실험결과로서, 하중 증가에 따라 발생한 터널 주변의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 수직압력 0.22 MPa와 수평압력 0.33 MPa가 가해질 때로서, 최초의 균열이 발생한 시점에 촬영한 사진이다. 여기서 좌측터널 우측벽과 우측터널 왼쪽 모서리 부분에서 미세한 균열이 발견되었다. Fig. 6(b)는 수직압력 0.25 MPa와 수평압력 0.38 MPa가 가해질 때로서, 기존 균열이 더욱 확장됨과 동시에 좌측터널 우상부와 우측터널 좌측벽을 연결하는 두 번째 균열이 발생하였다. 한편, Fig. 7은 이 하중단계에서 필라 부분을 확대하여 나타낸 것으로서 첫 번째와 두 번째 균열은 모두 15° 경사진 호층 지질구조상 지층 경계면에서 발생하였고 지층간 전단변위가 파괴균열로 발전하였음을 볼 수 있다. 이는 호층 지질구조에서 지층 경계면이 파괴의 핵으로 작용할 수 있다는 것을 의미하며, 필라 파괴는 불연속면의 방향에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8. Deformation behaviors of model No.2 in biaxial loading condition (Values indicate vertical and horizontal pressures, respectively)

하중을 더욱더 증가시켜 1번 모형에 수직압력 0.28 MPa와 수평압력 0.42 MPa가 가해질 때는 Fig. 6(c)와 같이 필라 균열이 더욱 발전하였고 터널 복공도 파괴되었을 뿐 아니라 좌측터널 좌측 모서리와 우측터널 우측 모서리에서도 균열이 발생하였다. 더욱이 수직압력 기준으로 0.29 MPa일 때는 Fig. 6(d)와 같이 변형되었으며 더 이상의 하중을 지지하지 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었다. 이와 같이 1번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 0.22 MPa, 0.29 MPa로 나타났다.

Fig. 8은 2번 모형의 실험결과이다. Fig. 8(a)는 수직압력 0.24 MPa와 수평압력 0.36 MPa가 가해질 때로서, 우측터널 천정부에서 수직방향의 미세균열이 최초로 발견되었다. Fig. 8(b)는 수직압력 기준으로 0.27 MPa가 가해질 때로서, 우측터널 천정부에서 낙석이 발생하여 터널바닥으로 낙하하였고 우측터널 상부와 하부에서 지층간 변위가 발생하였다. 더욱이 0.29 MPa일 때는 Fig. 8(c)와 같이 기존 균열이 더욱 발전하였으며, 0.31 MPa일 때는 Fig. 8(d)와 같이 좌측터널의 왼쪽 모서리에서도 15° 층리면을 따라 전단 균열이 발생하였다. 이 모형은 더 이상의 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, 이와 같이 2번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 0.24 MPa, 0.31 MPa로 나타났다.

한편, 3번 모형의 균열발생양상은 2번 모형과 대체로 유사하게 나타났다. 그러나 이 모형은 터널간 이격거리가 다른 모형에 비해 큰 관계로 2번 모형과 마찬가지로 왼쪽 터널의 복공은 파괴되지 않았고 필라부에서 좌우측터널을 연결하는 전단파괴도 발생하지 않았으며, 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 수직압력 기준으로 0.25 MPa, 0.32 MPa로 나타났다.

Table 5는 세 가지 모형의 균열개시압력과 최대압력을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 터널간 이격거리가 0.5D, 1.0D, 1.5D인 1, 2, 3번 모형에서 균열개시압력

Table 5. Testing pressures of models with different pillar widths

Model No.	Pillar width	Crack initiating pressure ¹⁾ (MPa)	Maximum pressure ²⁾ (MPa)
1	0.5D	0.22, 0.33	0.29, 0.44
2	1.0D	0.24, 0.36	0.31, 0.47
3	1.5D	0.25, 0.38	0.32, 0.48

^{1),2)} 1st and 2nd values indicate vertical and horizontal pressures, respectively

은 수직압력 기준으로 각각 0.22, 0.24, 0.25 MPa로 증가하는 것으로 나타나, 터널간 이격거리가 커질수록 균열개시압력은 증가하는 경향을 보이고 있어 필라 폭이 커질수록 본 연구 대상 비대칭 쌍굴터널의 안정성은 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 일반적인 쌍굴터널에 대해 김중우와 박지용(2004)에 의해 보고된 바 있는데, 이를 비대칭 쌍굴터널에서도 확인할 수 있었다.

한편, 이 세 가지 모형들을 정량적으로 비교하기 위해서는 같은 하중조건에서의 변형거동을 비교할 필요가 있으며, Table 6은 세 가지 모형 모두 수직압력 0.29 MPa와 수평압력 0.44 MPa가 가해질 때를 나타낸 것이다. 여기서 1번 모형은 필라부의 파괴로 인해 대규모 변형이 발생하였으며 2번 모형은 비록 필라부의 파괴는 일어나지 않았으나 신규 시공중 터널인 우측터널에서 큰 변형이 발생하는 반면에 3번 모형의 변형은 가장 작게 나타났음을 볼 수 있다. 실제로 Table 6 하단의 변형도에서 1번 모형은 터널의 변형 후 내공단면적(점선)이 초기 단면적(실선)에 비해 약 22% 축소되었지만, 2번 모형과 3번 모형은 각각 약 15%, 9% 축소되었다. 따라서 필라 폭이 커질수록 쌍굴터널의 안정성은 증가하는 것을 다시 확인할 수 있었다. 또한 모든 모형에서 터널

Table 6. Comparison of model No.1, 2, 3 at the same loading condition($\sigma_v=0.29\text{MPa}$, $\sigma_h=0.44\text{MPa}$)

Items	Model No.1	Model No.2	Model No.3
Pillar width	0.5D	1.0D	1.5D
Failure photograph
Deformation around tunnels

(a) 0.32, 0.32 MPa

(b) 0.37, 0.37 MPa

(c) 0.41, 0.41 MPa

(d) 0.47, 0.47 MPa

Fig. 9. Deformation behaviors of model No.4 in biaxial loading condition (Values indicate vertical and horizontal pressures, respectively)

의 수평방향 변형량이 수직방향 변형량보다 크게 나타난 것은 실험조건인 축압계수 1.5에 기인한 것으로 판단된다.

4.2 하중조건의 영향

평면 변형을 조건에서 현장 터널에 작용하는 하중은 수직응력(σ_v)에 대한 수평응력(σ_h)의 비율인 축압계수에 의해 특정된다. 본 연구에서는 터널간의 이격거리가 1.0D인 모형에 대해 축압계수가 1.5인 상태(2번 모형)와 1.0인 상태(4번 모형)를 가정하고 각각 모형실험을 실시함으로써 하중조건에 따른 변형거동의 차이점을 조사하였다. 이 중에서 2번 모형의 하중단계별 변형거동은 Fig. 8에 나타낸 바 있으며, 마찬가지로 4번 모형의 실험결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9(a)는 수직압력과 수평압력이 모두 0.32 MPa일 때로서, 우측터널의 바닥부에서 최초의 미세균열이 발견되었다. Fig. 9(b)는 0.37 MPa일 때로서, 우측터널 바

닥부의 균열은 15° 층리면을 따라 더욱 확장되었으며, 좌측터널 우측벽의 복공 일부는 파괴되어 터널 바닥부로 낙하되었다. Fig. 9(c)는 0.41 MPa 상태로서 좌우측 터널을 연결하는 필라부 전단파괴가 발생하였으며, 우측터널 우상단과 바닥부에서 대규모 균열이 발생하였다. 이 모형은 0.47 MPa 이상의 하중을 지지하지는 못하면서 계속적인 파괴가 진행되었는데, Fig. 9(d)는 이 압력단계에서의 변형 모습이다. 이와 같이 4번 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력은 각각 0.32 MPa, 0.47 MPa로 나타났다.

한편, 축압계수가 1.5인 2번 모형과 축압계수가 1.0인 4번 모형의 균열개시압력과 최대압력을 비교하면 Table 7과 같다. 여기서 4번 모형의 균열개시압력 0.32 MPa는 2번 모형의 균열개시압력 0.24, 0.36(평균 0.30) MPa에 비해 크게 나타났다. 또한, 4번 모형의 최대압력 0.47 MPa도 역시 2번 모형의 최대압력 0.31, 0.47(평균 0.39) MPa에 비해 약 1.2배 커서 본 연구 대상 터널의 경우에

Table 7. Testing pressures of models with different loading condition

Model No.	Geostatic stress ratio	Crack initiating pressure ¹⁾ (MPa)	Maximum pressure ²⁾ (MPa)
2	1.5	0.24, 0.36	0.31, 0.47
4	1.0	0.32, 0.32	0.47, 0.47

^{1),2)} 1st and 2nd values indicate vertical and horizontal pressures, respectively

Fig. 10. Deformation of Model No.1 by FLAC

는 축압계수가 1.0에 가까울수록 터널의 안정성은 증가하는 것으로 나타났다.

4.3 수치해석을 통한 실험결과 검토

본 연구에서 실시한 모형실험의 결과를 검토하기 위하여 실험모형과 동일한 네 가지 해석 모델을 구성하고 FLAC을 사용한 이방성 해석을 실시하였다. 여기서 모델의 물성은 실제 모형재료에 대한 이방성 실험 결과 (Table 4)와 15°의 호층 경사를 적용하였으며, 경계조건은 모형실험에서의 조건과 동일하게 적용하였다. 한편, FLAC은 연속체 해석기법의 일종으로서, 해석 모델은 가해진 하중에 따라 연속체를 유지하면서 변형하기 때문에 파괴된 후 요소가 모암으로부터 이탈하는 경우를 해석하지는 못한다(정형래와 김종우(2006)). 따라서 본 연구에서는 모형실험 결과의 타당성을 정성적으로 조사할 목적으로, 네 가지 모형별로 균열개시압력보다 작은 수준의 하중을 가하고 이때 발생하는 터널의 변형을 조사하였다.

Fig. 10은 1번 모형에 균열개시압력보다 작은 수준인 수직압력 0.1 MPa와 수평압력 0.15 MPa를 가할 경우에 발생한 변형을 200배 확대하여 나타낸 것으로, 여기서 좌우측 터널은 각각 필라 방향으로 변형하는 것을

Fig. 11. Comparison of deformation between model test and numerical analysis **Fig. 12.** Plastic zone around tunnels

볼 수 있다. 한편, Fig. 11은 이를 Table 6에 나타낸 모형실험 결과와 비교한 것으로 빨간색 실선으로 표시된 해석결과는 점선으로 표시된 실험결과와 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 이와 같은 유사성으로 인해 본 연구에서 실시한 모형실험 결과는 타당성이 있다고 생각된다.

한편, 터널 주위 소성영역의 변화를 알아보기 위하여 Table 3의 물성을 사용하여 탄소성 해석을 추가로 실시하였다. Fig. 12는 1번 모형의 균열개시압력 수준인 수직압력 0.22 MPa와 수평압력 0.33 MPa를 1, 2, 3번 모형에 각각 가할 경우와 수직 및 수평압력 0.28 MPa를 4번 모형에 가한 경우에 나타난 소성영역을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 터널간 이격거리가 가장 작은 1번 모형은 필라부가 소성영역으로 전환되어 필라 파괴가 발생하는데 비해 나머지 모형은 필라 파괴 이전 상태를 보여준다. 이 역시 실험결과와 부합한다.

5. 결론

본 연구에서는 사암과 셰일이 교대로 반복되는 호층 지질구조를 가진 암반에서 복공이 설치되어 운영 중인 기존 터널의 인근에 신설 터널을 건설할 경우, 신설 터

널의 시공중 안정성을 검토하기 위하여 터널간 이격거리와 하중조건이 서로 다른 네 가지 비대칭 쌍굴터널 모형에 대한 축소모형실험을 실시하였다. 이를 통해 모형별 균열개시압력과 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였으며, 이 조건들이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 터널간 이격거리가 0.5D인 모형에 대해 축압계수 1.5인 하중조건으로 가압실험을 하였을 때 필라에서 발생한 균열은 모두 호층 지질구조상 지층 경계면에서 발생하였고, 지층간 전단변위가 필라 피피의 중요한 인자로 작용하였다.
2. 터널간 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.5D로 변화시킨 세 가지 모형들에 대한 실험에서 터널간 이격거리 또는 필라 폭이 작은 모형일수록 낮은 압력수준에서 균열이 발생하였고 같은 압력 수준에서 터널의 내공변형량은 더 크게 나타나 터널의 안정성은 상대적으로 작은 것으로 평가되었다.
3. 터널간 이격거리가 1.0D이면서 축압계수를 1.5와 1.0으로 변화시킨 두 가지 모형들에 대한 실험에서 얻어진 균열개시압력과 최대압력을 검토한 결과, 축압계수 1.0인 모형에서의 터널 안정성이 더 큰 것으로 나타났다.
4. FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

참고문헌

1. 김도형, 박준경, 김영근, 오세준, 이두화, 2003, 대단면 근접병설터널의 설계 및 안정성 평가기법에 관한 연구, 한국암반공학회 춘계학술발표회논문집, 51-66.
2. 김학문, 1997, 쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과, 터널과 지하공간, 7.2, 136-142.
3. 황정순, 이흥규, 박석호, 이용기, 2005, 병설터널 굴착에 따른 필라의 안정성 평가기법 제시, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 5610-5613.
4. 백승철, 장부식, 이태규, 이성민, 황정순, 2009, 병설터널 보강 필라의 안정성 평가방법에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 10.7, 81-91.
5. D. W. Hobbs, 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3., 101-127.
6. R. E. Goodman, H. E. Heuze and G. J. Bureau, 1972, On modelling techniques for the study of tunnels in jointed rock, Fourteenth Symposium on Rock Mechanics, pp. 441-479.
7. 김종우, 박지용, 2004, 쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구, 터널과 지하공간, 14.5, 381-390.
8. 장부식, 황정순, 이상오, 윤배식, 김홍택, 2006, 축소모형실험을 통한 병설터널 보강필라의 거동특성평가에 관한 연구, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 789.
9. 정형래, 김종우, 2006, 이방성 암반의 방향성과 축압조건을 고려한 터널 모형실험 연구, 터널과 지하공간, 16.4, 313-325.
10. 김종우, 배우석, 2008, 삼병렬 터널의 안정성 검토를 위한 모형실험 연구, 터널과 지하공간, 18.4, 300-311.

김 종 우

1986년 서울대학교 자원공학과 공학사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 043-229-8471

E-mail: jwkim@cju.ac.kr

현재 청주대학교 토목공학과 교수