

쌍굴터널 간 이격거리가 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구

김종우*

Influence of Pillar Width on the Stability of Twin Tunnels Using Scaled Model Tests

Jong-Woo Kim*

Abstract Scaled model tests were performed to investigate the influence of pillar width, rock strength and isotropy/anisotropy on the stability of twin tunnels. Test models had respectively different pillar widths, uniaxial compressive strengths of modelling materials and model types, where both the deformation behaviors around tunnels and the biaxial pressure data at a time of pillar cracking were analysed. The cracking pressures of the higher strength models were higher than the lower strength models, whereas the percentage of cracking pressure to uniaxial compressive strength of modelling materials showed an opposite tendency. The cracking pressures of the shallower pillar width models were lower than the thicker models, moreover the percentage of that showed a same tendency. It has been found that the pillar width was one of the main factors influencing on the stability of twin tunnels. Model types such as isotropy/anisotropy also influenced on the stability of twin tunnels. The anisotropic models showed lower values of both cracking pressures and the percentage of that than the isotropic models, where the pillar cracks of anisotropic models were generated with regard to the pre-existing joint planes.

Key words Scaled model test, Twin tunnel, Stability, Pillar width, Cracking pressure

초 록 본 연구에서는 필러 폭과 모형재료의 강도가 서로 다른 등방성 및 이방성 암반 내 쌍굴터널의 모형실험을 통해 얻어진 터널의 변형과 필러부 균열이 발생한 이축압력 자료를 이용하여 터널 간 이격거리, 지반 강도, 등방성 및 이방성이 터널 안정성에 미치는 영향을 알아보았다. 모형재료의 일축압축강도에 대한 균열개시압력의 백분율을 균열개시압력비율이라고 정의할 경우, 강도가 큰 지반에 시공되는 쌍굴터널은 강도가 작은 지반에 비하여 균열개시압력 값은 크지만, 균열개시압력비율은 작게 나타났다. 이에 비해 필러 폭이 큰 쌍굴터널은 필러 폭이 작은 경우에 비하여 균열개시압력 값이 클 뿐 아니라 균열개시압력비율도 크게 나타나, 필러 폭은 쌍굴터널 안정성에 영향을 미치는 주된 요소로 판단된다. 지반의 등방성과 이방성 여부도 터널 안정성에 영향을 미쳤는데, 이방성 모형은 등방성 모형에 비해 균열개시압력과 균열개시압력비율이 작을 뿐 아니라 필러부에 존재한 기존 불연속면을 따라 균열이 발생하였다.

핵심어 축소모형실험, 쌍굴터널, 안정성, 필러 폭, 균열개시압력

1. 서 론

국내의 교통터널은 대부분 상행 및 하행 터널이 나란히 배열되는 쌍굴터널의 형태로 시공되는데, 쌍굴터널은 양쪽 터널 간에 역학적 상호간섭이 발생하기 때문에 터널 안정성을 확보하기 위해서는 적절한 이격거리가 필요하다. 쌍굴터널 간 이격거리 또는 필러 폭(pillar

Received: Sep. 17, 2015

Revised: Oct. 1, 2015

Accepted: Oct. 5, 2015

*Corresponding Author: Jong-Woo Kim

(Tel) +82432298471, (Fax) +82432298466

E-Mail) jwkim@cju.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, 289 Daeseong-no, Cheongju, Chungcheongbuk-do, 360-764, Korea

width)은 지반의 조건이나 시공법에 따라 달라지는데, 이를 결정하기 위해서는 경험적인 방법(Peck, 1969, Matsuda et al., 1998), 실험적인 방법, 그리고 각종 수치 해석적인 방법이 설계에 주로 적용되고 있다.

Hobbs(1966), Goodman et al.(1972) 등에 의해 소개된 축소모형실험은 평면변형을 조건을 만족하는 터널 모형시험체에 이축압력을 가할 때 터널 주변 지반의 변형거동과 균열발생 상태를 조사하여 터널의 안정성을 연구하는 실험적인 방법으로서, 국내에서도 수차례 시도되었지만 아직도 미약한 실정이다. 그러나 이 방법은 차원해석에 근거한 물리적인 실험법으로서, 실험의 노력이 필요하지만 수치해석에 비해 터널 거동을 실제로 관찰할 수 있는 장점이 있기 때문에 꾸준한 연구가 요구된다.

국내에서도 쌍굴터널에 대한 모형실험 연구사례가 몇 차례 보고된 바 있다. 각 연구사례에서 쌍굴터널이 위치한 지반은 등방성 암반(Kim and Park, 2004, Ahn et al., 2008, Kim, 2011)과 이방성 암반(Kim et al., 2008, Lee and Lee, 2010, Kim, 2012, Kim and Kim, 2012)으로 모사되었으며, 모든 경우에서 있어서 터널 간 이격거리가 작아질수록 터널 안정성은 낮아짐을 보여주었다.

본 연구에서는 필러 폭과 모형재료의 강도가 서로 다른 등방성 및 이방성 암반 내 쌍굴터널의 모형실험을 통해 얻어진 터널의 변형과 필러부 균열이 발생한 이축압력 자료를 이용하여 터널 간 이격거리, 지반 강도, 등방성 및 이방성이 터널 안정성에 미치는 영향을 알아보았다. 이를 위해 쌍굴터널 관련 모형실험 연구사례들을 5가지 그룹으로 나누고, 총 19가지 모형실험 결과를 정량적으로 분석하였다. 여기서 인용된 연구사례들은 저자에 의해 기발표된 것이지만, 본 논문은 기발표되지 않은 세부적인 실험 자료를 다수 포함하며, 모형터널의 파괴거동과 균열개시압력 자료를 이용하여 터널 안정성에 초점을 맞춘 분석을 실시하였다. 이 연구의 결과는 쌍굴터널 간 적절한 이격거리를 결정하는 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

2. 쌍굴터널 간 이격거리와 필러의 안정성

2.1 설계기준과 현황

쌍굴터널 간 이격거리가 매우 커지면 터널 상호 간의 역학적인 간섭은 없어지므로 쌍굴터널은 단일터널과 유사하게 거동한다. 따라서 쌍굴터널의 안정성을 증가시키기 위해서는 터널 간의 이격거리를 크게 하는 것이 유리하다. 그러나 이는 용지보상이나 환경적인 측면에서 불리하며, 특히 도로터널 분기부와 같은 선형 변경

구간에서는 충분한 터널 간 이격거리를 확보할 수 없는 경우가 많다.

건설교통부의 터널설계기준(2007)에서는 “터널을 2개 이상 병렬 또는 인접하여 계획하는 경우에는 터널단면의 크기, 굴착대상 지반의 공학적 특성, 발파진동영향, 터널 전·후 구간의 용지보상 규모, 지장물 및 민원물건 등을 감안하여 터널굴착공사로 인한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다.”라고 표현되어 있다.

한편, 국토교통부의 국토건설공사 설계실무 요령(2013)에서 쌍굴터널의 중심간격은 “터널 단면크기와 지반의 공학적 특성을 감안하여 상호 충분히 이격”하는 설계기준이 제시되어 있다. 또한 여기서는 지반조건에 따라 중심간격을 설정하되, 완전탄성체일 경우는 굴착 폭의 2배, 연약지반일 경우는 굴착 폭의 5배, 일반적인 경우는 굴착 폭의 2~3배로 하는 설계요령을 제시하고 있다. 그리고 국내의 시공사례로 보아 2차선 쌍굴터널의 중심간격은 굴착 폭의 약 2.5배인 경우가 많은데, 이 경우 필러 폭은 터널 폭의 약 1.5배에 해당한다. Fig. 1은 터널의 폭을 D 라고 할 때, 터널 간 이격거리를 표시하는 두 가지 방법인 쌍굴터널의 중심간격과 필러 폭을 각각 나타낸 예이다.

쌍굴터널 간 이격거리에 대한 국내 설계기준은 이와 같이 다소 불명확한 편이지만, 실제로 터널의 거동은 지반조건이나 굴착방법에 따라 달라지기 때문에, 일반적으로는 해당 터널에 대한 별도의 세부적인 해석을 통해 적절한 이격거리를 결정하고 있다. 또한 터널 간 이격거리가 작은 구간에 대해서는 tension bolt, grouting 등의 필러 보강공법을 적용하는 것이 일반적이다. Fig. 2는 필러 보강공법의 개념도를 보여준다(Baek et al., 2009).

2.2 필러의 안정성 평가

쌍굴터널 사이에 존재하는 암반 필러의 안정성을 평

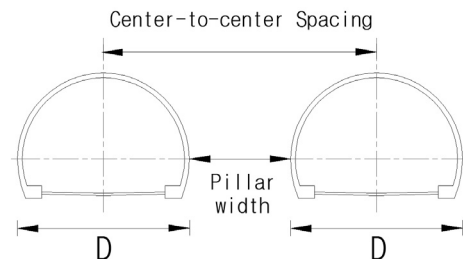


Fig. 1. Definition of distance between twin tunnels

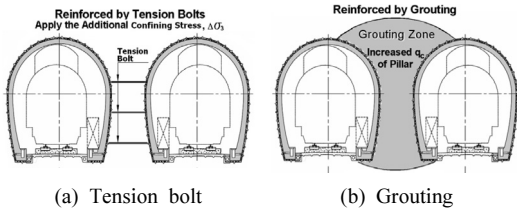


Fig. 2. Typical pillar reinforcement methods (Baek et al., 2009)

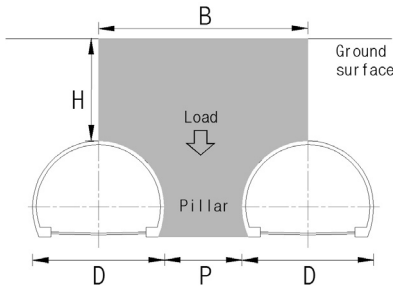


Fig. 3. Load acting on pillar between twin tunnels

가하는 방법은 고전적인 지류론(tributary theory), Peck의 방법, Matsuda의 방법 등과 같은 경험적인 방법과 Mohr-Coulomb 파괴조건에 의해 필러부의 파괴접근도와 강도/응력비를 조사하는 해석적인 방법으로 나누어진다.

먼저, 경험적인 방법 중의 하나인 지류론은 쌍굴터널 사이의 필러에서의 응력전달을 교각 사이를 통과하는 물의 흐름과 유사하게 보는 것으로, 필러 응력은 필러가 지지하는 암반의 중량을 필러의 단면적으로 나눈 값으로 한다(Hoek and Brown, 1980). 또한, Peck의 방법은 쌍굴터널 굴착 시 필러부에서 발생하는 평균응력을 필러부 암반의 일축압축강도와 비교함으로써 필러 안정성을 평가하는 방법이다(Peck, 1969).

한편 Matsuda의 방법은 쌍굴터널의 폭(D)과 토피고(H)의 상대적인 크기를 고려한 방법이다(Matsuda et al., 1997). 여기서는 Fig. 3과 같이 H가 1D보다 작은 경우는 음영 표시된 이완대의 전하중이 필러부에 작용하는 것으로 보며, 필러부에서 생기는 평균응력은 식 (1), (2)와 같이 계산된다. 또한, Peck의 방법과 마찬가지로 필러부에서 생기는 평균응력이 필러부 암반의 강도보다 작으면 필러는 안정성을 확보한 것으로 취급한다.

- 토피고(H)가 터널 폭(D)보다 작은 경우(H<D)

$$S_p = \gamma \times H \times \frac{B}{P} \quad (1)$$

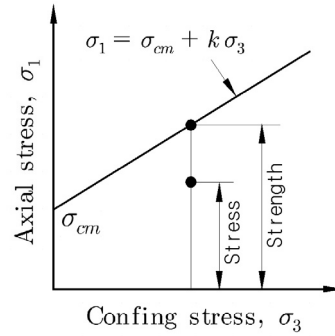


Fig. 4. Strength/stress ratio at pillar

- 토피고(H)가 터널 폭(D)보다 큰 경우(H>D)

$$S_p = \gamma \times D \times \frac{B}{P} \quad (2)$$

여기서, γ 는 암반의 단위중량, D 는 터널 폭, B 는 이완대 폭, P 는 필러 폭, H 는 토피고이다.

다음으로, 해석적인 방법은 암반의 파괴조건에 따라 필러부 암반의 안정성을 수치해석적으로 평가하는 방법이다. 여기서는 Mohr-Coulomb 파괴조건이 주로 사용되며, 필러부에 작용하는 주응력을 이용하여 파괴조건에 근거한 강도/응력비(strength/stress ratio)를 구함으로써 해당 암반조건에서의 필러 안정성을 조사한다. 즉, 필러의 소성파괴는 Fig. 4와 식 (3)과 같은 파괴조건에 따라 발생한다고 가정하며, 이때 암반의 일축압축강도(σ_{cm})와 기울기(k)는 (4)식과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k \sigma_3 \quad (3)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \quad k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

여기서, σ_1 은 축응력, σ_3 은 구속응력, c 는 점착력, ϕ 는 마찰각이다. 또한, 강도/응력비는 식 (5)와 같다.

$$\text{Strength/stress ratio} = \frac{\sigma_{1s}}{\sigma_1} \quad (5)$$

여기서, σ_{1s} 는 주어진 σ_3 에서 필러부 암반의 강도이다. 강도/응력비는 안전율 개념에 해당하는 것으로, 이 값이 1보다 작으면 필러부 전체가 불안정하고, 1보다 크면 안정하다고 볼 수 있지만, 필러부의 지속적인 안정을 위한 안전율은 1.5 이상이 요구된다(Hoek and Brown, 1980).

3. 쌍굴터널 모형실험

3.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 쌍굴터널의 안정성을 조사하기 위하여 축소모형실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 5와 같은 유압식 이축압축장치로서 25톤 용량의 램 4개와 압력조절용 핸드펌프로 2개로 구성된다. 모형실험의 방법과 순서는 다음과 같다.

- ① 모형시험체를 실험장치에 설치한다.
- ② 모형 터널을 굴착하고 계측점들을 표시한다.
- ③ 평면변형률 상태를 유지하기 위한 부대장치 및 변위 측정용 장치를 설치한다.
- ④ 터널에 작용하는 지압을 모사하기 위해 모형시험체에 이축압축력을 증가시키면서 균열의 발생 여부를 관찰하며 사진촬영을 통해 터널 주변의 거동을 조사한다.

3.2 모형재료와 모형시험체

본 연구에서는 특정한 중량배합비를 가진 모래, 석고,

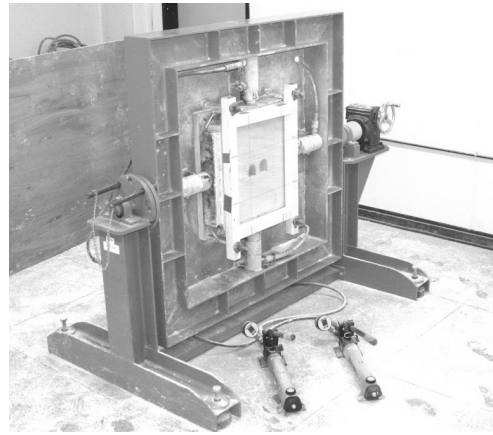


Fig. 5. Test apparatus (Kim, 2012)

물의 혼합물을 모형재료로 사용하였다. 이는 중량배합비와 건조기간에 따라 다양한 강도를 나타내는 성질이 있으므로 모형실험의 재료로 널리 사용된다.

Table 1은 모형시험체를 제작하는 과정을 나타낸 것이다. 등방성 및 이방성 모형시험체를 각각 만들어 시

Table 1. Manufacturing process of two kinds of test models

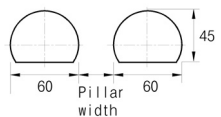
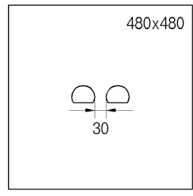
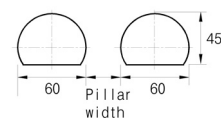
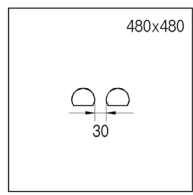
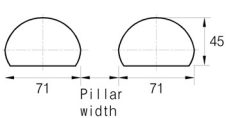
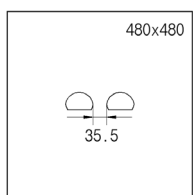
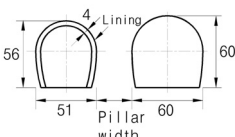
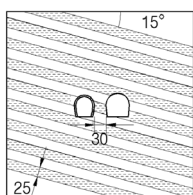
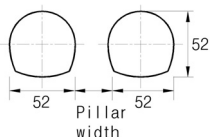
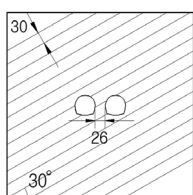
Type	Manufacturing process
Isotropic model	
Anisotropic model	

협하였는데, 시험체의 규격은 모두 480×480×76 mm이다. 등방성 시험체는 모래, 석고, 물의 혼합물을 소정의 거푸집에 넣은 후 탈형하고 건조하는 단순한 제작과정을 거치지만, 이방성 시험체는 일정한 두께를 가진 슬랩(slab)들을 먼저 제작한 후 이를 재단하여 적층체 형태로 만들어 제작하였다. 여기서 슬랩간의 틈새는 암반의 불연속면을 모사한다.

3.3 실험모형의 종류

본 연구에서는 필러 폭과 모형재료의 강도가 서로 다른 등방성 및 이방성 암반 내 쌍굴터널의 모형실험 연구사례(Kim and Park, 2004, Kim, 2011, Kim, 2012, Kim and Kim, 2012)에서 터널 주변지반의 변형과 필러부 균열이 발생한 이축압력 자료를 총괄적으로 분석함으로써, 터널 간 이격거리, 지반 강도, 등방성 및 이방성이 터널 안정성에 미치는 영향을 알아보았다. Table 2

Table 2. Details of test models considered in this study

Type	Group	Tunnel size (D×H, mm)	Tunnel shape (mm)	Model shape in case of 0.5D model (mm)	Kinds of pillar width	Loading condition	References
Isotropic model	A	60×45			0.25D, 0.5D, 0.75D, 1.0D, 1.25D, 1.5D	K=1	Kim and Park, 2004
	B	60×45			0.5D, 1.0D, 1.5D	K=1	Kim and Park, 2004
	C	71×45			0.5D, 0.9D, 1.1D, 1.5D	K=1.5	Kim, 2011
Anisotropic model	D	51×56			0.5D, 1.0D, 1.5D	K=1.5	Kim, 2012
	E	52×52			0.5D, 1.0D, 1.57D	K=2	Kim and Kim, 2012

는 모형실험 연구사례들을 5가지 그룹으로 나누는 것으로, 각 그룹별 모형터널의 규격, 터널 모양, 필러 폭이 0.5D일 때 모형시험체의 모양, 시험 필러 폭의 종류, 하중조건 등을 나타낸 것이다. A, B, C, D, E그룹에 속한 실험모형의 개수는 각각 6, 3, 4, 3, 3개로서 본 연구에서는 총 19가지 모형실험 결과를 분석하였다.

5가지 그룹 중에서 A, B, C그룹은 등방성 모형이고 D, E그룹은 이방성 모형이다. 또한, A, B그룹은 하중조건에서 축압계수(K)를 1로 적용한 것으로, 모형시험체에 가해지는 수직하중과 수평하중을 동일하게 하였는데 비해, C, D, E그룹은 축압계수가 1이 아닌 경우이다. 한편, 각 그룹별로 터널 모양과 모형재료의 배합비가 서로 달랐기 때문에 쌍굴터널의 단면적과 모형재료의 강도는 그룹별로 서로 다른 값을 가지는데, 이에 대해서는 후술하는 Table 3, 4에 나타내었다.

4. 모형실험의 결과 및 검토

4.1 등방성 터널모형

현지 암반은 불균질하고 이방성을 나타내는 경우가 많지만, 단순한 해석을 위해서는 암반을 등방성 물체로 취급하는 경우도 많다. 이 경우 모형시험체는 Table 1의 상부 그림과 같이 제작된다. Fig. 6은 등방성 모형 중 하나인 A그룹에서 필러 폭이 0.5D인 모형(모형번호 A2)의 실험 결과로서, 하중 증가에 따라 발생한 터널 주변의 변형과정을 파노라마 사진의 형태로 나타낸 것이다. 여기서 쌍굴터널의 변형은 터널 내공방향으로 주로 발생하고, 필러에 균열이 생겨 파괴된 후에는 변형이 대폭 발생하였다.

본 연구에서 분석한 등방성 터널모형은 Table 2의 A, B, C그룹으로서, 이들은 터널 모양, 필러 폭, 하중조건, 모형재료의 강도 등이 서로 다른 총 13가지 모형이다. Table 3은 그룹별, 모형별 균열개시압력을 나타낸 것으

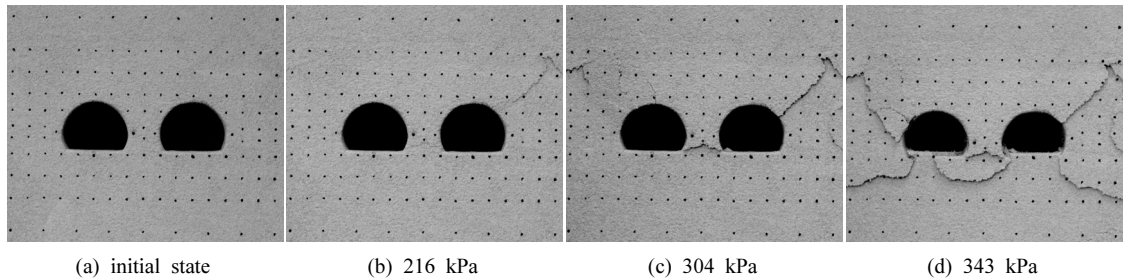


Fig. 6. Deformation behaviors of model No. A2 in biaxial loading condition

Table 3. Experimental results of the isotropic models

Group	Loading condition	Sectional area of twin tunnels (mm ²)	UCS ¹⁾ (kPa)	Model No.	Pillar width	Cracking pressure ²⁾ (kPa)	Average pressure (kPa)
A	K=1	4528	284	A1	0.25D	216, 216	216
				A2	0.5D	216, 216	216
				A3	0.75D	245, 245	245
				A4	1.0D	255, 255	255
				A5	1.25D	255, 255	255
				A6	1.5D	265, 265	265
B	K=1	4528	476	B1	0.5D	343, 343	343
				B2	1.0D	373, 373	373
				B3	1.5D	383, 383	383
C	K=1.5	5342	650	C1	0.5D	250, 375	313
				C2	0.9D	290, 435	363
				C3	1.1D	300, 450	375
				C4	1.5D	320, 480	400

1) UCS means uniaxial compressive strength of modelling material

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

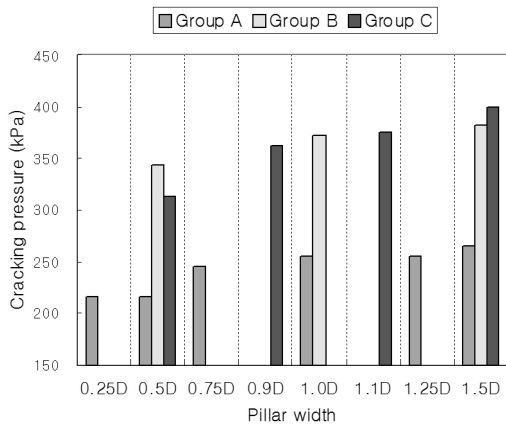


Fig. 7. Cracking pressures of isotropic models

로, 그룹별 쌍굴터널의 단면적과 모형재료의 강도를 함께 표시하였다. 또한 C그룹은 K=1 조건이 아니므로 균열이 발생할 때 가해진 수직압력과 수평압력을 각각 표시하였으며, 표의 우측에는 평균압력을 표시하였다. 또한, A, B, C그룹 모형시험체에 사용한 모형재료는 모래, 석고, 물의 중량 배합비가 각각 150:50:100, 140:60:100, 127:73:100으로서, 모형재료의 일축압축강도는 순서대로 284, 476, 650 kPa이었다.

Fig. 7은 Table 3의 그룹별, 모형별 균열개시압력을 히스토그램으로 나타낸 것이다. 모든 모형에서 필러 폭이 클수록 균열개시압력은 크게 나타나 터널 안정성은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 당초 각 모형재료의 강도는 A, B, C그룹의 순서대로 컸는데, 균열개시압력도 대체로 이 순서대로 크게 나타나 터널 주변암반의 강도가 클수록 터널 안정성은 증가함을 알 수 있다.

한편, Fig. 7에서 A, B그룹 간의 균열개시압력은 서로 큰 차이를 보이지 않지만, B, C그룹을 서로 비교하면 C그룹의 균열개시압력이 B그룹에 비해 그다지 크지 않은 것을 볼 수 있다. 특히 0.5D 모형에서는 모형재료 강도

가 상대적으로 큰 C모형이 B모형보다 오히려 균열개시압력이 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 B, C그룹의 터널 단면모양이 Table 2의 그림과 같이 서로 다른 것에 기인하는데, 실제로 B그룹 모형의 터널단면적(4528 mm²)은 C그룹 모형의 터널단면적(5342 mm²)의 85% 정도로 작기 때문이다. 따라서 터널단면적이 작을수록 균열개시압력은 커지는 경향이 있어 이 경우 터널 안정성은 증가하는 것으로 생각된다. 단, B, C그룹은 하중조건이 서로 다르기 때문에 더 이상의 정량적인 비교를 하기에는 다소 무리가 있으며, 이에 대해서는 추가적인 실험연구가 요구된다.

4.2 이방성 터널모형

이방성 터널 모형시험체는 Table 1의 하부 그림과 같이 제작하여 실험하였으며, 실험결과와 분석대상은 Table 2에 나타난 D, E그룹의 6가지 모형이다. D그룹은 지층경사 15°, 두께 25 mm인 암반모형에 5152 mm² 단면적의 쌍굴터널을 굴착하는 경우이고, E그룹은 지층경사 30°, 두께 30 mm인 암반모형에 4484 mm² 단면적의 쌍굴터널을 굴착하는 경우이다. 한편, D그룹은 사암과 셰일이 번갈아 나타나는 호층 지질구조를 모델링한 것으로, 여기서 사용한 모형재료의 일축압축강도는 각각 710, 500 kPa이며 평균값은 605 kPa이다. 또한, E그룹은 단일 암종의 층상지반을 모델링한 것으로, 모형재료의 일축압축강도는 600 kPa이다.

Fig. 8은 E그룹에서 필러 폭이 0.5D인 모형(모형번호 E1)의 실험결과이다. 여기서 쌍굴터널의 변형은, 등방성 모형과 마찬가지로 터널 내공방향으로 주로 발생하고, 필러가 파괴된 후에는 변형이 대폭 발생하였다. 그러나 등방성 모형과는 달리 필러부의 균열은 모형시험체의 기존 불연속면을 따라 발생하였다.

Table 4는 D, E그룹의 6가지 모형별 균열개시압력을 나타낸 것이며, Fig. 9는 히스토그램으로 표시한 것이다. 등방성 모형과 마찬가지로 필러 폭이 클수록 균열

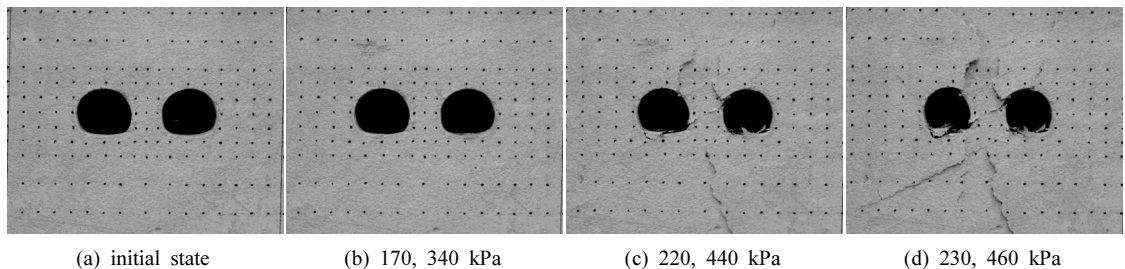


Fig. 8. Deformation behaviors of model No. E1 in biaxial loading condition (Values indicate vertical and horizontal pressures, respectively)

Table 4. Experimental results of the anisotropic models

Group	Loading condition	Sectional area of twin tunnels (mm ²)	UCS ¹⁾ (kPa)	Model No.	Pillar width	Cracking pressure ²⁾ (kPa)	Average pressure (kPa)
D	K=1.5	5152	605	D1	0.5D	220, 330	275
				D2	1.0D	240, 360	300
				D3	1.5D	250, 375	313
E	K=2.0	4484	600	E1	0.5D	170, 340	255
				E2	1.0D	190, 380	285
				E3	1.57D	210, 420	315

1) UCS means uniaxial compressive strength of modelling material

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

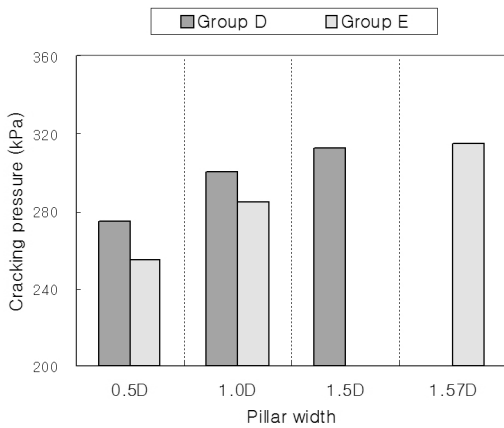


Fig. 9. Cracking pressures of anisotropic models

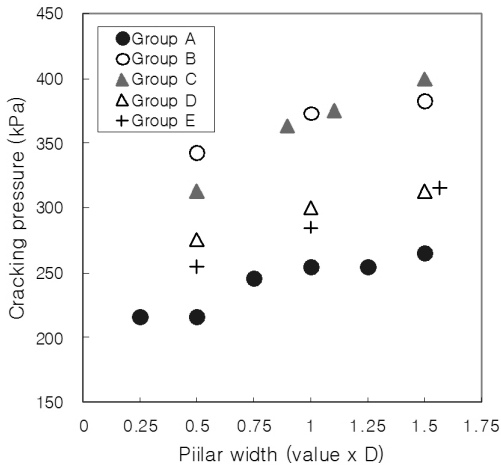


Fig. 10. Variation of cracking pressures with pillar widths

개시압력은 크게 나타났으며, 모형재료의 강도가 상대적으로 큰 D그룹이 E그룹보다 균열개시압력이 다소 컸

다. 그러나 D, E그룹은 지질구조, 터널단면적, 지보조건, 하중조건 등이 서로 다르기 때문에 더 이상의 정량적인 비교를 하기에는 다소 무리가 있으며, 이에 대해서도 추가적인 실험연구가 요구된다.

한편, Fig. 10은 5가지 그룹, 19가지 실험모형의 균열개시압력을 필러 폭에 따라 표시한 것으로, 쌍굴터널의 균열개시압력은 필러 폭이 클수록 등방성과 이방성 모형에서 모두 증가하였다.

4.3 쌍굴터널 안정성에 영향을 미치는 요소

4.3.1 균열개시압력비율

서로 다른 일축압축강도를 가진 모형재료로 제작된 등방성 및 이방성 모형에 대해 이축압력을 가할 때, 필러 폭과 모형재료의 강도가 클수록 균열개시압력은 증가함을 알 수 있었다. 한편, 필러부에서는 횡방향의 구속응력이 발생하므로 균열개시압력은 모형재료의 일축압축강도보다는 작기 마련이다. 따라서 터널 안정성에 영향을 미치는 요소를 상세히 알아보기 위해서는 해당 모형에서 필러부 균열이 모형재료의 일축압축강도에 비해 얼마나 작은 압력 수준에서 발생하였는지 조사할 필요가 있다.

예를 들어, Table 3의 A1모형은 일축압축강도 284 kPa인 모형재료로 만든 것인데, 216 kPa의 이축압력이 가해질 때 균열이 생겼으므로 재료강도의 76% 수준에서 균열이 발생하였다. 또한, Table 3의 C1모형은 일축압축강도가 650 kPa인데, 수직압력 250 kPa, 수평압력 375 kPa로서 평균압력 313 kPa이 가해질 때 균열이 생겼으므로 재료강도의 48% 수준에서 균열이 발생하였다.

본 연구에서는 이와 같이 구해지는 모형재료의 일축압축강도에 대한 균열개시압력의 백분율을 균열개시압력비율(percentage of cracking pressure to UCS)이라고 정의한다. Table 5는 5가지 그룹, 19가지 실험모형에 대해 균열개시압력비율을 구한 것이다.

Table 5. Percentage of cracking pressure to UCS in five different model groups

Group (UCS)	Model No.	Pillar width	Percentage of cracking pressure to UCS (%)
A (284)	A1	0.25D	76
	A2	0.5D	76
	A3	0.75D	86
	A4	1.0D	90
	A5	1.25D	90
	A6	1.5D	93
B (476)	B1	0.5D	72
	B2	1.0D	78
	B3	1.5D	80
C (650)	C1	0.5D	48
	C2	0.9D	56
	C3	1.1D	58
	C4	1.5D	62
D (605)	D1	0.5D	45
	D2	1.0D	50
	D3	1.5D	52
E (600)	E1	0.5D	43
	E2	1.0D	48
	E3	1.57D	53

4.3.2 지반 강도의 영향

Fig. 7과 관련하여 전술한 바와 같이 모형재료의 강도가 클수록 필러부의 균열개시압력은 크게 나타났다. 즉, 암반을 강도에 따라 연암, 보통암, 경암으로 구분할 경우, 경암지반에 시공되는 쌍굴터널이 상대적으로 안정하다고 볼 수 있다.

한편, A, B, C그룹은 모형재료의 강도가 284, 476, 650 kPa로 다르기 때문에 이를 순서대로 연암, 보통암, 경암이라고 가정하고 수치적인 예를 들어보면, 필러 폭 1.5D인 모형(각 모형번호 A6, B3, C4)의 균열개시압력은 Table 3에서 265, 383, 400 kPa로 나타나 이를 입증해준다. 그러나 경암 지반이라 하더라도 지압이 필러부 암반강도를 초과하면 균열이 생겨 파괴되기 마련이며, 이 경우 균열발생 시점에서의 암반 강도에 대한 지압의 비율(균열개시압력비율)을 고려할 필요가 있다.

Table 5에 나타난 A, B, C그룹 모형의 균열개시압력 비율을 모형재료의 강도에 따라 도시하면 Fig. 11과 같은데, 여기서 모형재료의 강도가 클수록 균열개시압력 비율은 점차 작아지는 현상을 볼 수 있다. 수치적인 예를 들어 보면, 모형번호 A6, B3, C4의 균열개시압력비

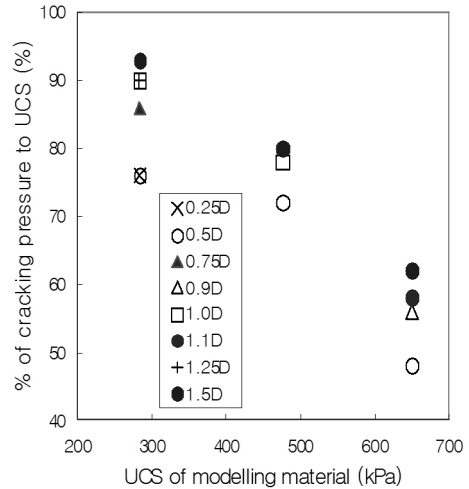


Fig. 11. Percentage of cracking pressures to UCS vs. UCS of modelling materials

율은 각각 93, 80, 62%이다. 다시 말해서, 강도가 작은 A그룹 모형(연암 모형)에서는 강도의 93%에 해당하는 지압이 작용할 경우 필러부 균열이 생겼지만, 강도가 큰 C그룹 모형(경암 모형)에서는 강도의 60%에 해당하는 지압만 작용하더라도 필러부 균열이 발생하였다.

이와 같이 강도가 큰 지반에 시공되는 쌍굴터널은 강도가 작은 지반에 비하여 균열개시압력 값은 크지만, 균열개시압력비율은 작았다. 따라서 경암지반에 시공되는 쌍굴터널은 연암지반에 비하여 상대적으로 큰 지압을 견딜 수는 있지만, 암반 자체 강도에 비해서는 그다지 큰 지압에 대응하지는 못한다고 생각된다.

4.3.3 필러 폭의 영향

전술한 바와 같이 필러 폭이 클수록 필러부의 균열개시압력은 크게 나타났지만, 이 절에서는 균열개시압력 값이 아니라 균열개시압력비율에 대해 알아보았다.

Table 5에 나타난 A, B, C그룹 모형의 균열개시압력 비율을 필러 폭에 따라 나타내면 Fig. 12와 같은데, 여기서 필러 폭이 클수록 균열개시압력비율도 점차 크게 나타났다.

이와 같이 필러 폭이 큰 쌍굴터널은 필러 폭이 작은 경우에 비하여 균열개시압력 값이 클 뿐 아니라 균열개시압력비율도 크기 때문에, 필러 폭이 클수록 터널 안정성은 증가함을 알 수 있다. 이는 전술한 모형재료의 강도가 터널 안정성에 미치는 영향과는 다른 현상인데, 이로부터 지반의 강도보다는 필러 폭이 터널 안정성에 더 큰 영향을 미치는 요소로 보인다.

4.3.4 등방성과 이방성의 영향

본 연구에서 분석한 5가지 그룹 중에서 A, B, C 그룹은 등방성 모형이고 D, E 그룹은 이방성 모형이다. Fig. 9에서 언급한 바와 같이 이방성 기반에서도 필러 폭이 클수록 필러부의 균열개시압력은 크게 나타났지만, 이 절에서는 균열개시압력 값이 아니라 균열개시압력비율에 대해 알아보았다.

이방성 모형인 D, E 그룹은 모형재료의 일축압축강도가 각각 605, 600 kPa로서 Fig. 12에 나타난 모형재료의 강도 추세를 감안하면, D, E 그룹의 균열개시압력비율 데이터는 Fig. 12에서 B, C 그룹 사이에 놓일 것으로 예상되었다. 그러나 실제 실험결과인 Table 3의 균열개시압력비율을 도시하면 D, E 그룹의 데이터는 Fig. 13과 같이 C 그룹 아래에 표시되었다. 즉, 이방성 모형의 균열개시압력비율은 등방성 모형에 비해 작게 나타났다.

수치적인 예를 들어보면, 필러 폭 1.5D인 등방성, 이방성 모형(각 모형번호 C4, D3)의 균열개시압력비율은 각각 62, 52%로서, 등방성 모형은 강도의 62%에 해당하는 지압이 작용할 때 균열이 생겼지만, 이방성 모형은 강도의 52%에 해당하는 지압만 작용하더라도 균열이 발생하였다. 이와 같이 이방성 암반은 등방성 암반에 비해 큰 지압에 대응하지는 못하는데, 이는 이방성 암반에서 필러부에 존재하는 불연속면의 영향으로 판단된다.

Fig. 14는 필러 폭이 0.5D인 등방성 모형과 이방성 모형의 필러부 균열 발생 상태를 비교한 것이다. Fig. 14(a), (b), (c)의 등방성 모형은 필러부를 관통하는 횡방향 균열이 주로 발생하였지만, Fig. 14(d), (f)의 이방성 모형은 필러부에 정해진 각도로 미리 존재하였던 불연속면을 따라 균열이 발생하였다.

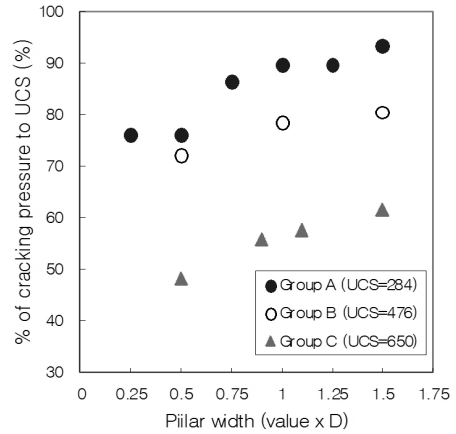


Fig. 12. Percentage of cracking pressures vs. pillar width

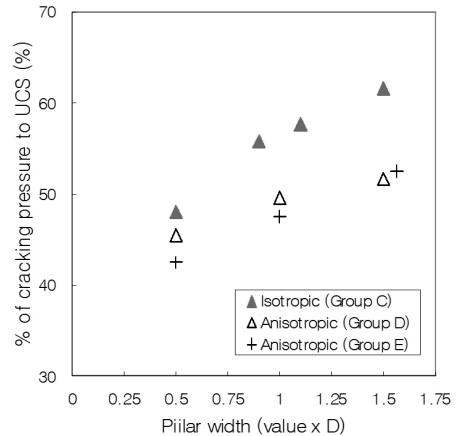


Fig. 13. Comparison between isotropic and anisotropic models

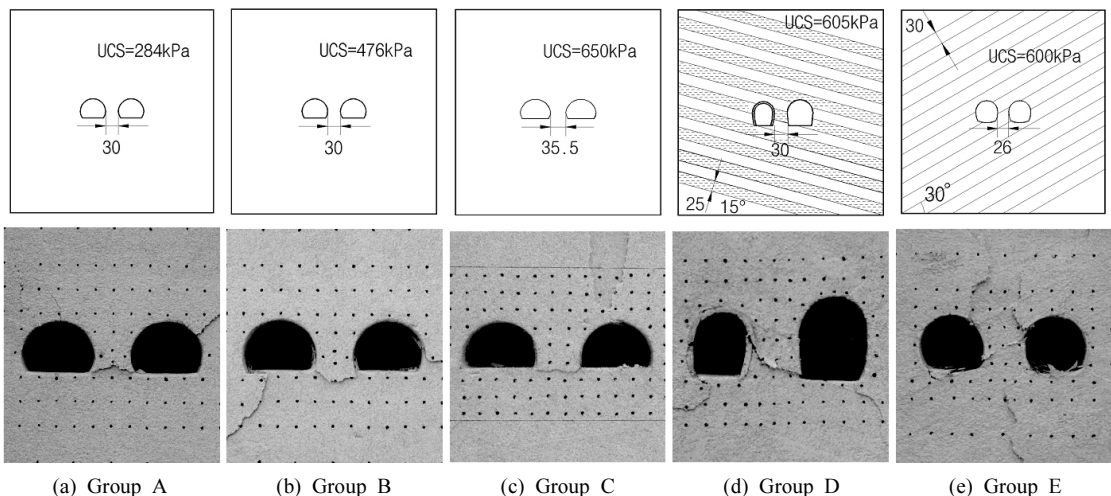


Fig. 14. Pillar cracks of five different model groups in case of pillar width, 0.5D

이와 같이 이방성 모형은 등방성 모형에 비해 균열개시압력과 균열개시압력비율이 작을 뿐 아니라 필러부에 존재한 기존 불연속면을 따라 균열이 발생하므로 터널 안정성은 떨어진다. 따라서 이방성이 현저한 암반에서 쌍굴터널을 시공할 경우에는 필러 폭을 더욱 증가시켜야 터널 안정성을 담보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 5가지 그룹, 19가지 쌍굴터널 모형에서 필러부 균열이 발생한 압력수준을 분석하여 필러 폭, 모형재료의 강도, 등방성과 이방성이 터널 안정성에 미치는 영향을 알아보았다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 쌍굴터널의 변형은 터널 내공방향으로 주로 발생하고, 필러에 균열이 생겨 파괴된 후에는 터널 변형이 대폭 발생하였다.
2. 모든 모형에서 필러 폭과 모형재료의 강도가 클수록 균열개시압력은 크게 나타났으며, 필러 폭과 지반 강도는 쌍굴터널의 안정성에 영향을 미치는 주된 요소임을 알 수 있었다.
3. 모형재료의 일축압축강도에 대한 균열개시압력의 백분율을 균열개시압력비율이라고 정의할 경우, 강도가 큰 지반에 시공되는 쌍굴터널은 강도가 작은 지반에 비하여 균열개시압력 값은 크지만, 균열개시압력비율은 작게 나타났다.
4. 필러 폭이 큰 쌍굴터널은 필러 폭이 작은 경우에 비하여 균열개시압력 값이 클 뿐 아니라 균열개시압력 비율도 크게 나타나, 필러 폭은 쌍굴터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 생각된다.
5. 지반의 등방성과 이방성 여부도 쌍굴터널 안정성에 영향을 미쳤는데, 이방성 모형은 등방성 모형에 비해 균열개시압력과 균열개시압력비율이 작을 뿐 아니라 필러부에 존재한 기존 불연속면을 따라 균열이 발생하므로, 이방성이 현저한 암반에서 쌍굴터널을 시공할 경우에는 특별한 주의가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었습니다.

References

1. Ahn, H.H., J.I., Choi, S.H., Shim and S.W., Lee, 2008, Behavior of closely-spaced tunnel according to separation distance using scaled model tests, J. of the Korean Geotechnical Society, 24.7, 5-16.
2. Baek S.C., B.S., Jang, T.G., Lee, S.M, Lee and J.S., Hwang, 2009, A study on the stability estimation procedure for reinforced pillar of twin tunnel, J. of the Korean Geoenvironmental Society, 10.7, 81-91.
3. Design guideline for construction works of national highway, 2013, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 395.
4. Goodman, R.E., H.E Heuze and G.J. Bureau, 1972, On modelling techniques for the study of tunnels in jointed rock, Fourteenth Symposium on Rock Mechanics, 441-479.
5. Hobbs, D.W., 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. Hoek, E. and E.T., Brown, 1980, Underground excavation in rock, Institution of mining and metallurgy, London.
7. Kim, J.W., 2011, A case study on the stability analysis of twin tunnels using scaled model tests, J. of Industrial Science Research, Cheongju Univ., 28.2, 45-51.
8. Kim, J.W., 2012, A study on the stability of asymmetrical twin tunnels in alternating rock layers using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 22.1, 22-31.
9. Kim, J.W. and M.K., Kim, 2012, A Study on the stability of twin tunnels in anisotropic rocks using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 22.3, 205-213.
10. Kim, J.W. and J.Y. Park, 2004, A study on the deformation behaviors around twin tunnels using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 14.5, 381-390.
11. Kim, H.T., C.H., Yoo, J.S., Hwang and H.D., Yoon, 2008, Evaluation on tunnel in uncontinuous rock mass by small-scale model tests. Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference, 181-188.
12. Lee, Y.J. and S.D., Lee, 2010, Pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock using large scale model tests, Tunnel and Underground Space, 20.5, 352-359.
13. Matsuda, T., E. Toyosato, M. Igarashi, Y. Nashimoto and T. Sugiyama, 1997, 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.
14. Matsuda, T., K. Terada, M. Igarashi, K. Miura, 1998, Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground, Tunnels and Metropolises, 2, 1193-1198.
15. Peck, R.B., 1969, Deep excavations and tunnelling in soft grouting, Proc. 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-art Report, 225-290.
16. Tunnel design criteria, 2007, Ministry of Construction and Transportation, Korea, 17.

**김종우**

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
