터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제14권 제5호, 2004년 10월, pp. 381~390

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 14, No. 5, 2004, pp. 381-390
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구

김종우[1)]*, 박지용[2)]

A Study on the Deformation Behaviors around Twin Tunnels Using Scaled Model Tests

Jong-Woo Kim and Ji-Yong Park

Abstract In this study, scaled model tests were performed to investigate the deformation behaviors around twin tunnels. Eleven types of test models which had respectively different pillar widths, rock types and loading conditions were mode, where the modelling materials were the mixture of sand, plaster and water. The models with shallower pillar width were cracked under lower pressure than the models with thicker pillar width, and they showed the more tunnel convergences and the clear spalling failures. The models of hard rock were cracked under 50% higher pressure than the models of soft rock and they showed the less tunnel convergences. The failure and deformation behaviors of twin tunnels were also dependent on the loading conditions of models. Futhermore, the results of FLAC analysis were qualitatively coincident with the test results.

KeyWords Scaled model test, Twin tunnel, Deformation behavior, Modelling material, Stability

초 록 본 연구에서는 터널간 이격거리, 지반종류, 하중조건 등이 서로 다른 11가지 쌍굴터널 모형에 대한 축소모형실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였다. 이를 위해 모래, 석고, 물의 중량비를 달리한 모형재료에 대한 물성 실험을 통해 모형재료의 특성을 연구하였다. 쌍굴터널 사이의 이격거리가 좁은 모형일수록 낮은 압력 수준에서 균열이 개시되었고 필러의 spalling현상도 잘 발달하였으며 터널의 내공변형량도 증가하였다. 경암 모형은 연암 모형에 비해 평균 50% 이상 큰 하중에서 균열이 개시되었고 동일 하중하에서 내공변형량도 2배 정도 작게 나타났다. 모형터널의 파괴 및 변형양상은 측압 하중조건에 따라 매우 상이하게 나타났으며, FLAC을 사용한 수치해석 결과는 모형실험의 결과와 정성적으로 부합하였다.

핵심어 축소모형실험, 쌍굴터널, 변형거동, 모형재료, 안정성

1. 서 론

최근 용지매입의 제한과 도로의 선형, 환경훼손 등의 이유로 터널의 시공이 급격히 증가하고 있다. 특히 현재의 터널은 대단면화 되고 상행 및 하행 터널이 나란히 배열되는 쌍굴터널의 형태로 시공되는 경향이 많다.

쌍굴터널의 설계에 있어 터널상호간의 이격거리는 지반의 조건이나 시공법에 따라 달라지지만 지반이 완전탄성체일 경우에는 굴착 폭(D)의 2배이고 연약지층인 경우에는 5배, 통상의 경우에는 3배 이상으로 하는 것이 고전적인 개념으로 인식되고 있다. 그러나 현재 시공되는 쌍굴터널에서 터널간 이격거리는 보강공법의 발달로 인하여 2D 이하로 시공되는 경우가 많으며, 최근에는 쌍굴터널 중앙 필러(pillar)부의 지지기능을 강화하여 2arch터널이나 3arch터널을 시공함으로써 이격거리를 보다 감소시키는 공법이 적용되고 있는 실정이다(김도형 외, 2003).

이와 같은 터널간 이격거리가 매우 좁은 근접 쌍굴터널은 용지매입 면에서 유리한 장점이 있지만, 국내의 경우 쌍굴터널에 관한 시공이나 설계사례가 부족한 편이며 그에 관한 연구도 매우 미흡한 형편이다. 특히, 이에 관한 국내 연구는 주로 수치해석적인 방법을 동원하는 경향이 많은 실정이나(김학문, 1997, 이길재 외, 2002), 쌍굴터널 주변 지반의 변형거동을 직접 확인하기 위해서는 보다 실증적인 실험적 연구가 요구된다.

쌍굴터널에 관한 실험적인 방법으로서는 축소모형실험이 고려될 수 있다. 이 실험은 차원해석에 근거한

[1)] 청주대학교 토목환경공학과
[2)] (주)지오맥스 지반공학부
*교신저자(Corresponding Author): jwkim@chongju.ac.kr
접수일: 2004년 10월 18일
심사 완료일: 2004년 10월 27일

물리적인 실험법으로서(Hobbs, 1969), 수치해석에 비해 사진으로 실험결과를 가시적으로 관찰할 수 있는 장점이 있어 지반 구조물 설계의 보조자료로서 활용되고 있다(김종우 외, 2004).

본 연구에서는 터널간 이격거리, 지반종류, 하중조건이 서로 다른 11가지 쌍굴터널 모형에 대한 축소모형실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였다. 먼저, 연암 지반에 굴착된 쌍굴터널 모형에서 터널간의 이격거리를 1.5D, 1.25D, 1D, 0.75D, 0.5D, 0.25D 등의 6가지로 변화시켜 가면서 축소모형실험을 실시하였다. 다음으로, 연암 지반과 더불어 경암 지반을 재현하여 실험함으로써 지반의 물성 차이에 따라 어떠한 변화가 있는지 알아보았다. 마지막으로 수평응력과 수직응력을 달리한 모형실험을 실시함으로써 하중조건에 따른 변형거동의 차이점을 조사하였다. 또한, 지반해석용 프로그램인 FLAC을 사용하여 실험 결과를 검토하였다.

2. 실험 모형

2.1 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(전석원 외, 2003).

Fig. 1은 본 연구에서 고려된 실제 터널단면(12 m × 9 m)과 축소모형에서의 터널단면(6 cm × 4.5 cm)을 나타낸 것으로, 이와 같이 본 실험에서 길이[L]에 대한 축소율은 1/200로 하였다. 다음으로 중력가속도[LT^{-2}]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/14.14가 된다.

한편, 본 연구에서는 연암 및 경암 지반을 각각 모델링하였는데, 두 가지 지반의 물성치는 건설교통부 표준품셈을 감안하여 Table 1과 같이 가정하였다. 표에서 연암과 경암의 밀도는 각각 2.0 gf/㎤, 2.7 gf/㎤인데 비해 본 실험에서 실제로 사용한 모형재료의 밀도는 1.6 gf/㎤이었으므로 밀도[ML^{-3}]에 대한 축소율은 연암 1/1.25이고 경암 1/1.69이며, 이로부터 연암 및 경암의 질량[M]에 대한 축소율을 산정하였다.

이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 하여 두 가지 암반의 강도[$ML^{-1}T^{-2}$]에 대한 축소율을 구하면 연암의 경우는 1/250이고 경암의 경우는 1/338로 나타났다. Table 2는 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

2.2 모형재료의 특성

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 대상 암반의 물리적 특성을 충분히 대변할 수 있는 것이라야 한다. 본 연구 대상 암반의 단축압축강도는 Table 1에 제시한 바와 같은데, 여기에 연암 및 경암의 강도 축소율인 1/250, 1/338을 각각 적용하면 실제로 사용되어야 하는 연암용 및 경암용 모형재료는 각각 2.80 kgf/㎠ 및 4.44 kgf/㎠의 강도를 갖는 물질인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이러한 물성을 갖는 물질로서 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였는데, 이는 중량배합비 및 건조기간에 따라 다양한 강도를 갖는 재료를 구성할 수 있는 장점이 있다(Coquard, 1994, 김종우 외, 2004). 한편, 이 재료는 강도와 탄성계수의 비율이 실제 암반의 그것과는 약간 다른 문제점이 있으며 이는 주로 배합비에 의존한다. 즉, 암반의 강도와 탄성계수를 동시에 만족하는 축소 모형재료를 사용하는 것이 가장 바람직하나, 이러한 모형재료를 개발하는 것은 쉬운 일이 아니며 모형실험 분야의 중요한 연구과제로서 향후 이에 대

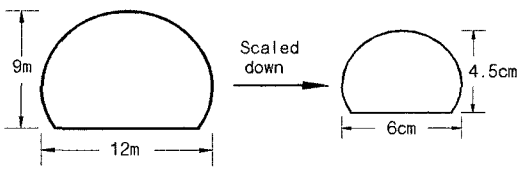


Fig. 1. Dimension of tunnel sections

Table 1. Assumed physical properties of rocks

Rock type	Bulk density (gf/㎤)	Compressive strength (kgf/㎠)
Soft rock	2.0	700
Hard rock	2.7	1500

Table 2. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors	
		Soft rock	Hard rock
Length	[L]	1/200	1/200
Time	[T]	1/14.14	1/14.14
Mass	[M]	1/1.0e7	1/1.35e7
Density	[ML^{-3}]	1/1.25	1/1.69
Strength	[$ML^{-1}T^{-2}$]	1/250	1/338

한 지속적인 연구가 요망된다.

한편, 모형재료의 강도 특성을 구하기 위하여 Table 3과 같이 모래, 석고, 물의 중량 배합비가 서로 다른 15가지 종류의 혼합물에 대해 각각 직경 5 cm, 길이 10 cm인 원주형 공시체를 6개씩 제작하고, 일정시간 건조시킨 후 시험편의 단위중량이 1.6 gf/㎤이 될 때 단축압축실험을 실시하였다. Fig. 2는 배합비에 따른 단축압축강도의 변화를 그림으로 나타낸 것으로, 석고/물(P/W)의 비율이 증가할수록 단축압축강도가 급속히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2에서 단축압축강도(S_c)와 P/W의 상관관계식은 다음과 같다.

$$S_c = 20.44\ (P/W)^{2.8051} \quad (1)$$

한편, 전술한 바와 같이 본 실험의 모형재료로 사용해야하는 물질은 연암의 경우 2.8 kgf/㎠, 경암의 경우 4.44 kgf/㎠의 강도를 갖는 물질이므로, 이에 적합한 P/W를 식 (1)로부터 구하면 각각 0.5와 0.6 정도이다. 이와 같이 P/W가 0.5와 0.6인 혼합물, 즉 모래, 석고, 물의 중량배합비가 각각 150:50:100과 140:60:100인 혼합물은 일정기간 건조 후 단위중량이 1.6 gf/㎤이 되면, 본 실험의 연암용 및 경암용 모형재료로 적합함을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 상기의 배합비를 갖는 혼합물을 본 실험의 모형재료로 사용하였으며, 이 재료에 대하여 압열인장시험, 직접전단시험 등을 추가로 실시하였다. Table 4는 모형재료의 제반 물성치를 요약 정리한 것으로, 이는 후술하는 수치해석의 입력자료로 활용되기도 한다.

Table 3. Modelling materials tested in this study

No.	Mix(proportion by weight) Sand : Plaster : Water	P/W*
1	170 : 30 : 100	0.30
2	165 : 35 : 100	0.35
3	160 : 40 : 100	0.40
4	155 : 45 : 100	0.45
5	150 : 50 : 100	0.50
6	145 : 55 : 100	0.55
7	140 : 60 : 100	0.60
8	135 : 65 : 100	0.65
9	130 : 70 : 100	0.70
10	125 : 75 : 100	0.75
11	120 : 80 : 100	0.80
12	115 : 85 : 100	0.85
13	110 : 90 : 100	0.90
14	105 : 95 : 100	0.95
15	100 : 100 : 100	1.00

* P/W : weight ratio of plaster to water

2.3 실험모형의 형태

본 연구에서는 터널간 이격거리, 지반종류, 하중조건 등이 쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 Fig. 3과 같은 11가지 모형 시험체를 제작하였다.

먼저, 쌍굴터널에 있어 터널간 이격거리의 영향을 연구하기 위하여 1 ~ 6번 모형과 같이 이격거리 또는 필러폭(pillar width)을 1.5D(90 mm)에서 0.25D(15 mm)까지 6단계로 변화시켜 실험을 실시하였고, 이때 터널의 파괴양상을 조사하여 터널 주변의 변형거동을 알아보고자 하였다. 다음으로 7, 8, 9번 모형은 모두 경암 지반의 모형으로서, 각각 1, 3, 5번 모형과 서로 비교하여 지반 종류의 차이에 따라 어떠한 변화가 있는지를 알아

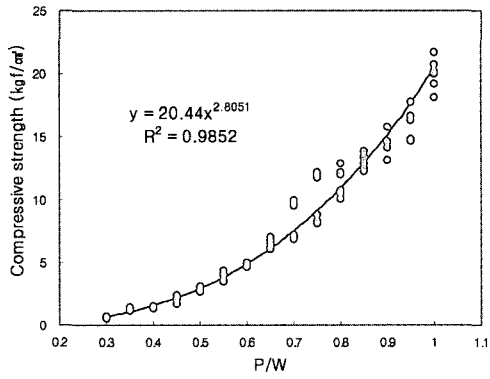


Fig. 2. Relation between compressive strength and plaster-water ratio when density is 1.6 gf/㎤

Table 4. Physical properties of modelling materials

Rock type	Mix (Sand : Plaster : Water)	Bulk density (gf/㎤)	Compressive strength (kgf/㎠)	Young's modulus (kgf/㎠)	Tensile strength (kgf/㎠)	Cohesion (kgf/㎠)	Friction angle (°)
Soft rock	150 : 50 : 100	1.6	2.89	2343	0.62	0.71	28
Hard rock	140 : 60 : 100	1.6	4.85	3846	1.18	1.29	31

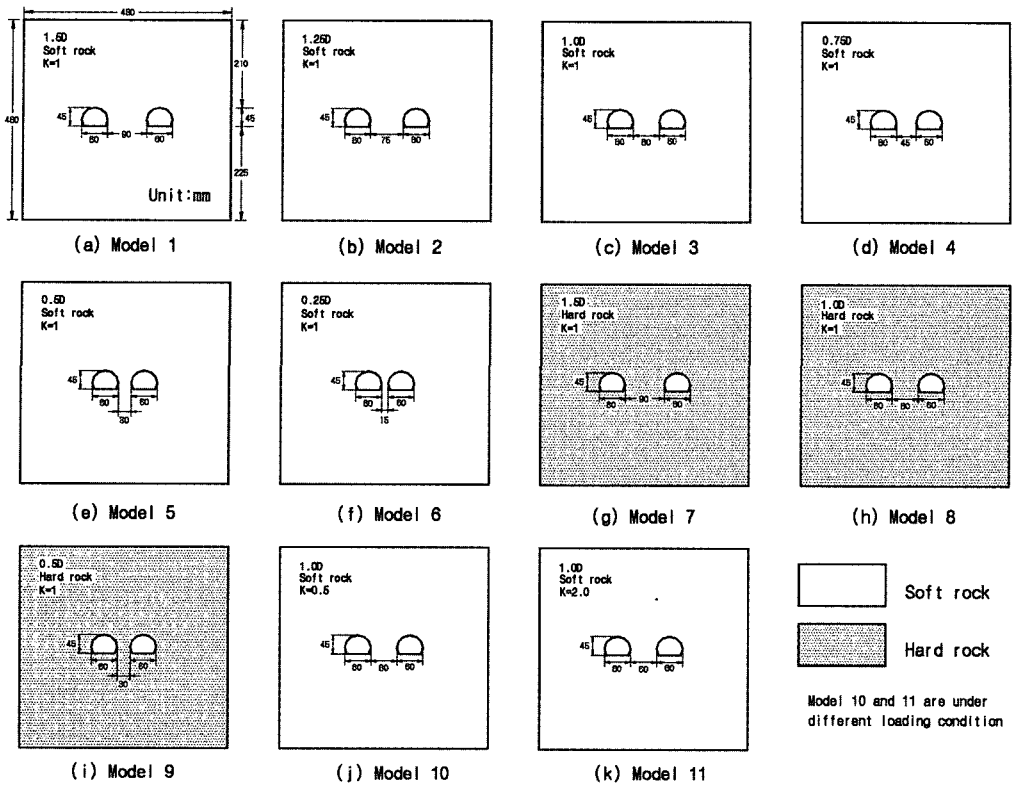


Fig. 3. Dimensions of eleven different models

보고자 하였다. 마지막으로 10, 11번 모형은 3번 모형과 비교하여 측압조건에 따른 쌍굴터널의 변형양상을 검토하기 위해 제작하였다.

2.4 모형 시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량비가 150:50:100인 혼합물과 140:60:100인 혼합물을 사용하여 모형 시험체를 제작하였으며, 사용한 모래는 주문진산 표준사이다. 모형시험체는 480 mm×480 mm×76 mm 규격이며 제작순서는 다음과 같다.

먼저 모래, 석고, 물을 골고루 혼합한 후 성형틀에 천천히 주입하였다. 다음으로 이 혼합물이 응결된 후에 탈형하여 대기중의 음지에서 약 12~20일간 건조시켰다. 건조 중에는 전자저울을 사용하여 계속적으로 단위중량을 측정하였으며 건조 후 단위중량이 1.6 gf/㎤가 될 때 모형실험을 실시하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 유압식 이축압축장치로서 25톤 용량의 램 4개와 압력조절용 핸드펌프 2개로 구성된다. 모형 시험체를 실험장치에 설치한 후 터널의 응력조건에 부합한 평면변형률 상태를 유지하면서 이축압축실험을 실시하였으며, 시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프의 압력계로부터 측정하였다. 또한, 모형터널 주변의 변위는 고성능 디지털 카메라를 사용하여 측정하였으며, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2 mm로 나타났다.

모형실험의 방법 및 순서는 다음과 같다.

① 모형 시험체를 실험장치에 설치하고 시험체의 모든 면을 정형한다.
② 모형 터널을 굴착하고 시험체의 윗면에 소정의 계측점들을 표시한다.
③ 평면변형률 상태를 유지하기 위한 부대장치 및 변위 측정용 장치를 설치한다. Fig. 4는 3번 모형의 실험전 모습을 나타낸 것이다.
④ 시험체의 상부와 좌우에 위치한 세 개의 램을 사용하여 하중을 단계적으로 증가시킨다. 이때 가압하중은 모형별로 정해진 측압조건에 부합하도록

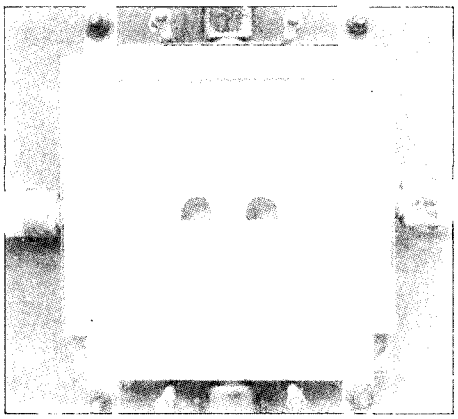


Fig. 4. A view of Model 3 before testing

하였다.

⑤ 가압 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 기록하였으며, 실험 후에는 촬영된 디지털 사진들을 분석하여 파괴양상 및 측점 변위를 정량적으로 구하였다.

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 터널간 이격거리, 지반의 종류, 측압조건이 서로 다른 11가지 모형에 대하여 축소모형실험을 실시하고, 이들 각 요소가 쌍굴터널 주변지반의 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 검토하였다.

4.1 터널간 이격거리에 따른 변형거동

쌍굴터널간 이격거리에 따른 터널의 변형거동을 알아보기 위하여 Fig. 3의 1~6번 모형을 실험하였다. 이들 6가지 모형에서 터널간 이격거리 또는 필러 폭은 모형별로 1.5D에서 0.25D까지 6단계로 구성되어 있으나, 모두 같은 종류의 지반(연암)과 하중조건(K=1)을 가지고 있다.

Table 5는 6가지 모형의 균열개시압력과 실험 최종압력을 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 터널간 이격거리가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 있어 터널간 이격거리가 커질수록 쌍굴터널의 안정성은 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 실험 최종압력은 6가지 모형의 변형양상을 동일한 압력에서 비교하기 위해 압력이 4.0 kgf/㎠될 때까지 하중을 가하였으나 4, 5, 6번 모형은 4.0 kgf/㎠의 압력이 가해지기 전에 완전파괴가 되어 도중에 실험을 중단하였다.

Fig. 5는 최종 압력상태에서 6가지 모형의 파괴사진, 변위백터도, 변형도 등을 순서대로 나타낸 것으로서, 이

Table 5. Testing pressures of models with different pillar widths

Model	Pillar width	Crack initiating pressure (kgf/㎠)	Final pressure (kgf/㎠)
1	1.5D	2.7	4.0
2	1.25D	2.6	4.0
3	1.0D	2.6	4.0
4	0.75D	2.5	3.5
5	0.5D	2.2	3.5
6	0.25D	2.2	3.5

를 검토하면 다음과 같다.

1번 모형의 경우 파괴사진에서 두 터널 사이의 필러에서는 큰 균열이 발생하지 않았으며, 변위백터도에서 터널 부근의 변형량도 다른 모형에 비해 가장 작게 나타났다. 또한, 변형도에서 파괴 후 터널의 면적은 초기 면적과 비교하였을 때 약 34% 축소되었다.

2번 모형은 필러를 관통하는 여러 개의 소규모 균열이 발생하였고, 파괴 후 터널의 면적은 초기와 비교하였을 때 약 35% 축소되었다.

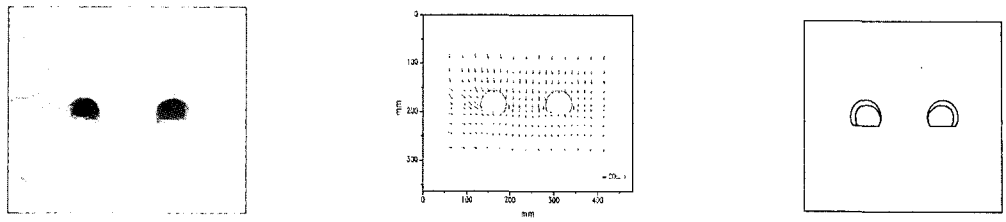
3번 모형은 두 터널 사이의 필러를 관통하는 비교적 큰 균열이 발생하였으며, 필러에서는 터널 내부 방향으로 변위가 발생하는 spalling 현상도 관찰되었다. 또한, 변위도 다소 커서 파괴 후 터널의 면적은 초기와 비교하여 약 45% 축소하였다.

4번과 5번 모형에서 spalling 현상은 더욱 뚜렷하게 나타났고, 파괴 후 터널 면적은 각각 46%, 48% 정도 축소하였다.

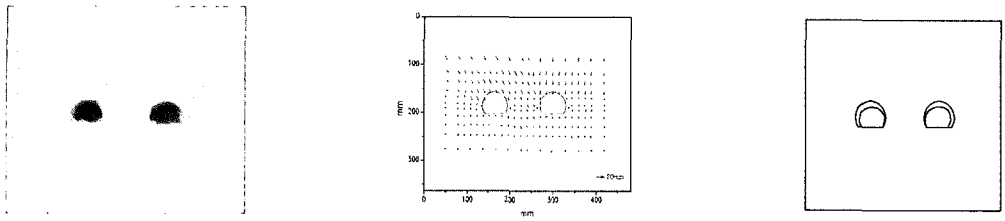
6번 모형의 경우는 필러부가 0.25D로서 매우 협소하기 때문에 필러 전체가 전단 파괴되었으며 spalling도 가장 발달하였다. 필러의 파괴로 인하여 터널 주변의 변형이 급속히 증가하였으며, 파괴 후 터널의 면적 감소량도 가장 커서 초기와 비교하였을 때 약 50% 축소하였다.

이와 같이 터널간 이격거리가 좁은 모형일수록 필러의 spalling 현상이 잘 발달하고, 터널의 내공변형량도 증가하는 것으로 나타났다. 만약 4, 5, 6번 모형에 1, 2, 3번과 같은 크기의 최대압력(4.0 kg/㎠)을 가할 경우 이러한 현상은 더욱 잘 나타날 것으로 판단된다. 한편, 필러부의 균열발생양상을 감안하면 터널간 이격거리가 1.5D인 1번 모형의 경우 두 터널 상호간의 영향이 크지 않는데 비해, 1.25D 이하인 경우에는 두 터널이 서로 직접적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

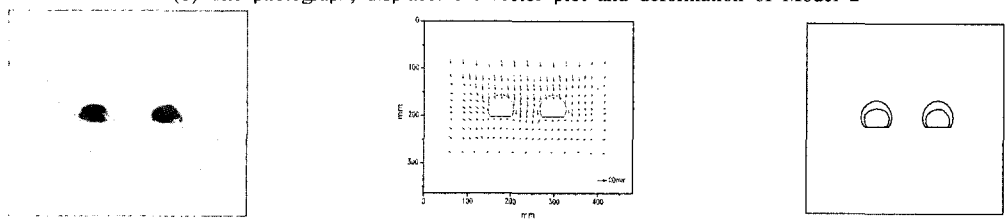
한편, 터널주변의 변형거동을 보다 정량적으로 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 두 터널의 천정 및 좌·우측



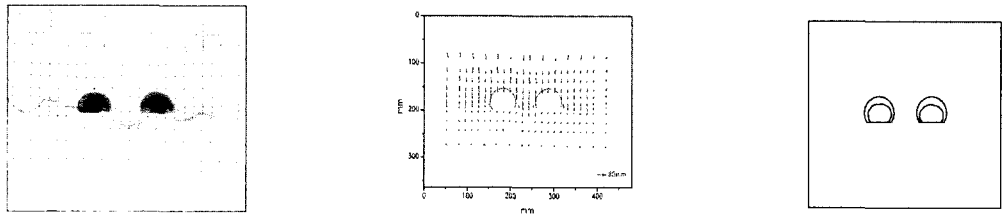
(a) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 1



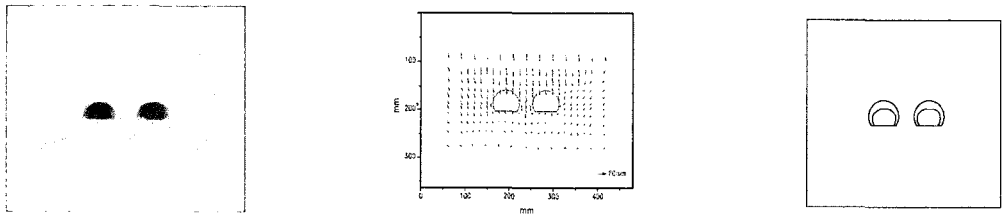
(b) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 2



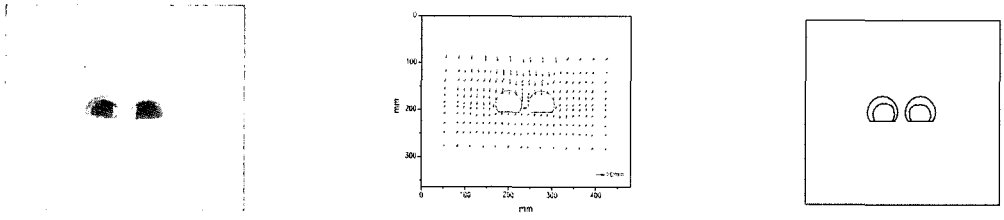
(c) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 3



(d) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 4



(e) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 5



(f) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 6

Fig. 5. Experimental results of models with different pillar widths

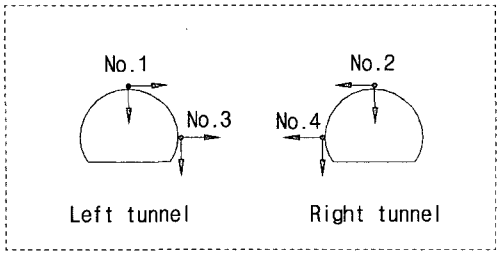


Fig. 6. Measuring points of twin tunnels

벽에 위치한 총 4개 측점을 이용하여 모형별 변위를 조사하였다. Fig. 7은 3번 모형에서 가해진 하중에 따라 발생한 변위량을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 좌·우측 터널 천정부의 변위를 수평(H) 및 수직(V) 방향으로 나누어 도시한 것이며, Fig. 7(b)는 필러 부근인 3, 4번 측점의 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 터널 천정부 및 측벽의 변위는 가해진 하중에 따라 증가하며, 천정부의 변위가 측벽부의 변위보다 다소 크게 나타났다. 또한, 모든 측점에서 수직방향 변위가 수평방향 변위보다 크게 나타났는데, 이는 실험 모형의 기하학적 형상에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 좌측 및 우측터널의 발생 변위는 완전 대칭이 아니지만 어느 정도 대칭적인 경향을 나타냄으로 인해 본 실험의 타당성을 알 수 있었다.

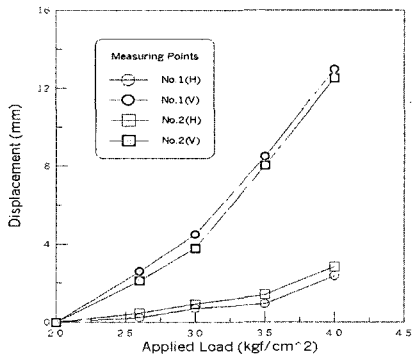
Fig. 8은 Fig. 6의 4개 측점중에서 1번 측점인 좌측터널 천정부에서 발생한 변위를 모형별로 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 필러 폭이 작은 모형일수록 천단 침하량이 증가하는 것을 알 수 있어, 쌍굴터널간 이격거리가 작아질수록 터널의 안정성이 감소하는 것을 다시 확인할 수 있었다.

4.2 지반의 종류에 따른 변형거동

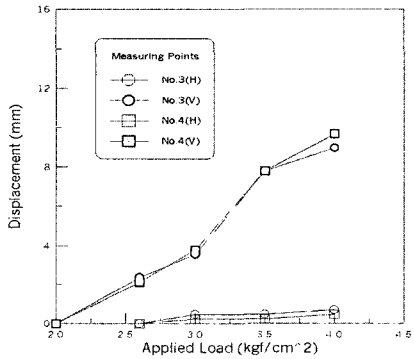
본 연구에서는 지반의 종류에 따른 터널의 변형거동을 알아보기 위해 연암 물성으로 제작된 1, 3, 5번 모형과 각각 같은 형태인 7, 8, 9번 모형을 경암 물성으로 제작하고 이들을 실험하여 그 결과를 비교 검토하였다.

Table 6은 모형별 균열개시압력과 실험 최종압력을 나타낸 것이다. 여기서 경암 모형인 7, 8, 9번 모형의 균열개시압력은 연암 모형인 1, 3, 5번 모형에 비하여 평균 50% 정도 더 크게 나타나 암반이 강할수록 쌍굴터널의 안정성은 커진다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 연암 모형과 마찬가지로 터널간 이격거리가 커질수록 균열개시압력은 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 9는 7, 8, 9번 모형의 파괴사진, 변위벡터도, 변형도 등을 나타낸 것으로서, 이들은 모두 비교대상인 Fig. 5의 1, 3, 5번 모형과 같은 크기의 하중이 작용할



(a) at crowns of twin tunnels



(b) at side walls of twin tunnels

Fig. 7. The load vs. displacement plot of Model 3

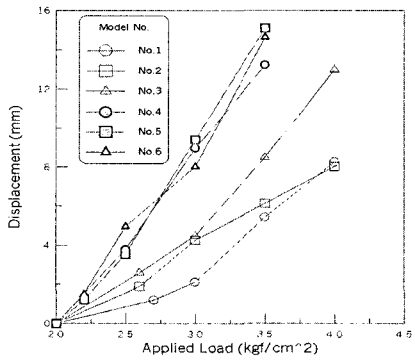


Fig. 8. Crown settlements of models with different pillar widths

경우에 해당한다.

Fig. 9의 자료들을 Fig. 5의 해당 자료와 비교하면 경암 모형은 연암 모형에 비해 균열 발생정도와 터널 변형량이 작은 것을 볼 수 있다. 특히, 그림의 가장 오른쪽에 위치한 모형별 변형도에서, 7, 8, 9번 모형은 터널 파괴 후 면적이 각각 15%, 21%, 24%로 축소된 반면에 1, 3, 5번 모형은 전술한 바와 같이 각각 34%, 45%,

Table 6. Testing pressures of models with different rock types

Model	Rock type	Crack initiating pressure (kgf/㎠)	Final pressure (kgf/㎠)	Pillar width
1	Soft rock	2.7	4.0	1.5D
7	Hard rock	3.9	5.0	
3	Soft rock	2.6	4.0	1.0D
8	Hard rock	3.8	5.0	
5	Soft rock	2.2	3.5	0.5D
9	Hard rock	3.5	4.5	

48%로 나타나, 내공변형량은 동일 하중하에서 약 2배의 차이를 보였다.

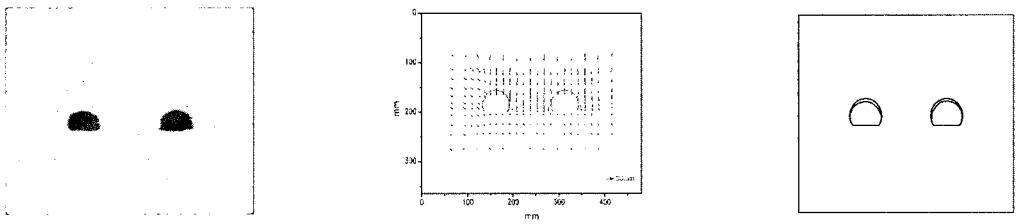
이와 같이 경암 모형의 터널은 연암 모형에 비해 균열개시압력도 작고 변형량도 작게 나타나, 암반의 강도가 클수록 쌍굴터널의 안정성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 하중조건에 따른 변형거동

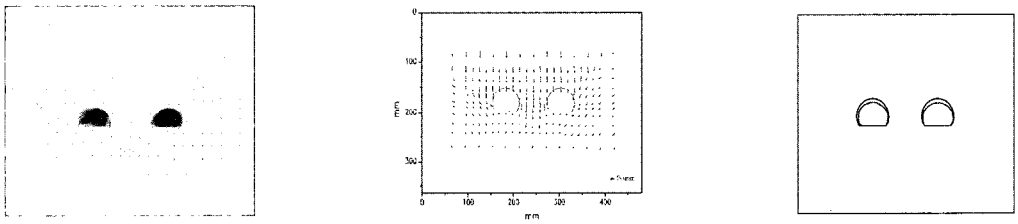
본 연구에서는 하중조건에 따른 터널의 변형거동을 알아보기 위해 동일한 형태를 가진 모형에 대해 측압계수를 달리 적용한 세 가지 실험을 실시하였다. 실험된 비교대상 모형은 3, 10, 11번 모형으로서, 이들은 터널간 이격거리가 1.0D로 동일하지만, 측압계수는 각각 1.0, 0.5, 2.0으로 상이하다. 즉, 11번 모형은 측압계수(K)가 2.0인 경우로서 수평압력을 수직압력에 비해 2배 크게 작용시키면서 이축압축실험을 실시하였다.

Fig. 10은 3, 10, 11번 모형의 파괴사진, 변위백터도, 변형도 등을 나타낸 것으로서, 각 모형에 작용된 수직 및 수평압력은 평균 4.0 kgf/㎠로 동일하다.

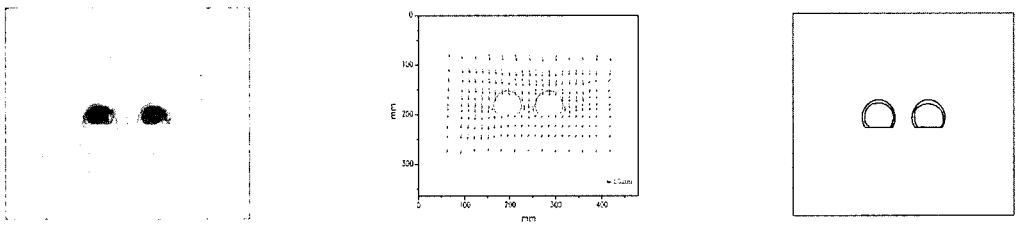
각 모형의 파괴사진에서 3번 모형(K=1)과 10번 모형



(a) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 7

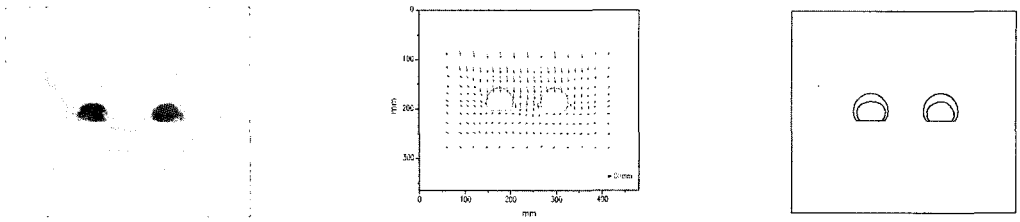


(b) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 8

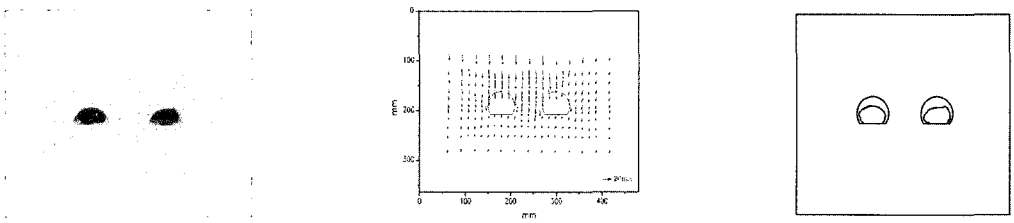


(c) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 9

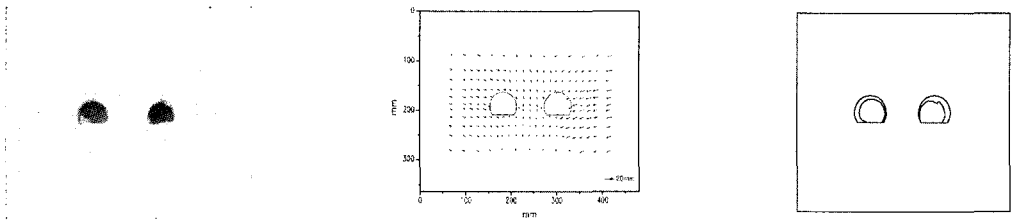
Fig. 9. Experimental results of models with different rock types



(a) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 3



(b) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 10



(c) The photograph, displacement vector plot and deformation of Model 11

Fig. 10. Experimental results of models with different loading conditions

(K=0.5)은 전반적으로 대각선 방향의 전단 파괴가 발생하였으나 11번 모형(K=2)은 수직 방향의 파괴가 우세하였는데, 이는 가해진 수직 및 수평 하중의 상대적 비율에 기인한 것으로서 판단된다.

또한, 변위 백터도를 비교해 보면 각 모형들의 변형양상이 매우 상이함을 알 수 있는데, 3번 모형에 비해 10번 모형은 수직방향 변위가 더 크게 발생하고, 11번 모형은 수평방향의 변위가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

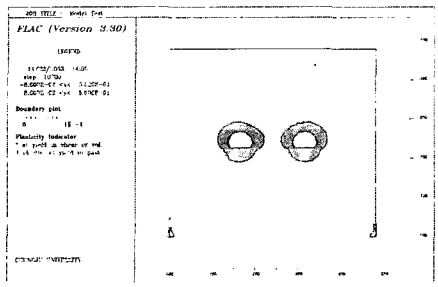
한편, 변형도를 비교해 보면, 3번 모형은 파괴 후 터널의 면적이 초기 면적과 비교하여 약 45% 축소되었고, 10, 11번 모형은 각각 49%, 34% 축소되었다. 즉, 측압계수가 0.5인 10번 모형에서 가장 큰 변형이 발생하였다. 그러나 이러한 결과는 터널의 형상(터널의 폭이 터널의 높이보다 큰 납작한 형태)과 쌍굴터널의 수평 배치로 인한 기하학적 형상에 기인한 것으로 생각되며, 여기에 관한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

5. 수치해석

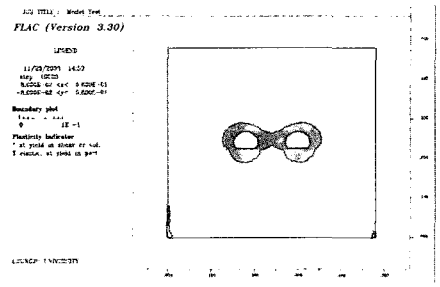
모형실험의 결과를 수치해석적으로 검토하기 위하여 FLAC을 사용한 탄소성 해석을 실시하였다. 실험모형과 동일한 11가지 해석 모델을 구성하였으며, 해석 모델의 물성과 경계조건 등은 실험치와 동일하게 적용하였다.

한편, FLAC은 연속체 해석기법의 일종으로서 파괴 후 요소가 모암으로부터 이탈하거나, 균열이 생성되는 것을 해석하지는 못한다. 즉, 실제 모형실험에서 가해진 정도의 큰 압력을 이 수치모델에 적용하면, 실제 모형실험의 사진이나 개별 요소법(DEM)과 같이 암반내의 일부 요소가 모암으로 부터 이탈하는 것이 아니라, 연속체를 유지하면서 변형하므로 실험 결과와는 다른 해석결과를 도출하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 실험결과의 정성적인 분석을 위해 실제 실험 하중보다는 작은 크기의 하중을 해석모델에 작용시켜 해석을 실시하였다.

Fig. 11(a), (b)는 각각 1번, 3번 모형에서 0.5 kgf/㎠의 하중이 작용할 때의 소성영역 분포도를 나타낸 것으로, 1번 모형에 비해 3번 모형은 필러부가 완전히 소성영역으로 전환되었음을 볼 수 있다. 이는 실험 결과와 부합한 것으로서 터널간 이격거리가 작을수록 쌍굴터널의 안정성이 저하됨을 나타내고 있다. 또한, 터널 주변의 변형양상도 모형별 실험 결과와 전반적으로 부합



(a) Model 1



(b) Model 3

Fig. 11. Plastic zone around twin tunnels

한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널간 이격거리, 지반종류, 하중조건 등이 서로 다른 11가지 쌍굴터널 모형에 대한 축소모형 실험을 통하여 터널 주변지반의 변형거동을 조사하였으며, 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 모래, 석고, 물의 중량비가 서로 다른 15가지 종류의 모형재료에 대한 일련의 물성 실험에서 석고/물의 비율이 증가할수록 단축압축강도는 급속히 증가하였다.
2) 쌍굴터널 사이의 이격거리가 좁은 모형일수록 낮은 압력 수준에서 균열이 개시되었고 필러의 spalling 현상도 잘 발달하였으며, 터널의 천단침하량을 비롯한 내공변형량도 증가하여 터널의 안정성은 감소하였다.
3) 경암 모형은 연암 모형에 비해 평균 50% 이상 큰 하중에서 균열이 개시되었고 동일 하중하에서 내공변형량도 2배 정도 작게 나타나 암반이 강할수록 쌍굴터널의 안정성이 증가하는 것을 확인하였다.
4) 측압 하중조건을 달리한 실험에서 각 모형의 파괴 및 변형양상은 매우 상이하였다. 측압계수가 0.5인 모형에서 가장 큰 변형이 발생하였으나, 이는 본 실험 터널의 기하학적 형상에 기인한 것으로 생각된다.
5) 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. 이길재, 유광호, 박연준, 채영수, 2002, 굴착단계를 고려한 2아치 터널의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 12.3, 179-188.
4. Hobbs, D.W., 1966, Scale model study of strata movement around mine roadways. Appratus, technique and some preliminary results, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 3., 101-127.
5. 김종우, 전석원, 서영호, 2004, 지하채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구, 터널과 지하공간, 14.1, 43-53.
6. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근, 2003, 석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구, 한국지구시스템공학회지, 40.3, 147-158.
7. Coquard, P. and R. Boistelle, 1994, Water and solvent effects on the strength of set plaster, Int. J. of Rock Mechanics and Min. Sci., 31.5, 517-524.

김 종 우

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

Tel: 043-229-8471
E-mail: jwkim@chongju.ac.kr
현재 청주대학교 토목환경공학과 부교수

박 지 용

2002년 청주대학교 지구환경시스템공학과 공학사
2004년 청주대학교 지구환경시스템공학과 공학석사

Tel: 031-713-7519
E-mail: batjy@geomax.co.kr
현재 (주)지오맥스 지반공학부