TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 23, No. 2, 2013, pp. 130-140
http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2013.23.2.130
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

근접병설터널의 안정성 평가를 위한 모형실험 연구

김평기, 김종우*

Scale Model Studies for Stability Estimation of Twin Tunnels with Small Clearance

Pyoung Gi Kim, Jong Woo Kim*

Abstract In this study, scaled model tests were performed to investigate the stability of twin tunnels with small clearance, where the pillar widths were 0.5D and 0.25D, respectively. The tunnels were supposed to be constructed in anisotropic weathered rocks with 30° inclined bedding planes, and the model tests were conducted under the condition of lateral pressure ratio, 1. Six types of test models which had respectively different pillar widths and support conditions were experimented, where crack initiating pressures, maximum pressures, failure modes of pillar and deformation behaviors around tunnels were investigated. The models with wider pillar were cracked under higher pressure than the models with shallower pillar. The models with lining support were cracked under higher pressure and showed less tunnel convergence than the unsupported models. The models with both lining and pillar reinforcement were proved to be most stable among the tested models. In particular, as the model of 0.25D pillar width with only lining support showed shear failure of pillar according to the existing bedding planes, so both lining and pillar reinforcement were thought to be indispensable in that case of tunnel.

Key words Scaled model test, Twin tunnels, Anisotropic rocks, Twin tunnels, Stability, Pillar

초 록 본 연구에서는 30° 경사진 층리면을 가진 풍화암 물성의 이방성 암반에서 필러 폭이 0.5D와 0.25D로 매우 작은 근접병설터널을 시공할 경우에 대한 터널 안정성을 조사하였다. 이를 위해 터널간 이격거리와 지보조건이 서로 다른 6가지 모형을 제작하고 측압계수 1의 하중조건으로 축소모형실험을 실시하였다. 모형별 균열개시압력, 최대압력, 필러 및 터널의 변형거동을 조사하였으며, 복공지보와 필러보강 여부가 터널의 안정성에 미치는 영향을 알아보았다. 필러 폭이 큰 모형일수록 균열개시압력이 더 크게 나타나 터널 안정성은 증가하였으며, 복공지보를 설치한 모형은 무지보 모형에 비해 균열개시압력와 최대압력이 더 크고 내공단면의 변형량은 적어 풍화암 근접병설터널에서 복공지보의 필요성을 확인하였다. 복공지보와 더불어 필러보강을 실시한 모형은 다른 모형에 비해 터널 안정성이 더 크게 나타났으며, 특히 필러 폭 0.25D인 근접병설터널은 복공지보뿐 아니라 필러 보강도 실시해야 터널 안정성이 확보됨을 알 수 있었다.

핵심어 축소모형실험, 병설터널, 이방성 암반, 안정성, 필러

1. 서 론

근래에 들어 터널은 대부분 상·하행 터널이 나란히 배열되는 병설터널의 형태로 시공되고 있다. 병설터널에서 단일 터널 상호간의 이격거리는 지반의 조건이나 시공법에 따라 달라지지만, 최근에는 보강공법의 발달로 인해 터널 굴착 폭의 2배 이하로 시공되는 경우가 많다. 특히 도심지 터널의 경우에는 용지매입의 제한이나 지장물 배치 등의 이유로 터널간 이격거리가 매우 작은

Received: Feb. 20, 2013
Revised: Mar. 7, 2013
Accepted: Mar. 8, 2013
***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

근접병설터널의 형태로 시공되는 경우가 있으며, 보통의 병설터널이라 할지라도 확폭부에서는 필러 폭이 매우 작은 근접병설터널의 형태가 나타난다.

이와 같은 근접병설터널은 필러부 암반 자체의 강도를 이용하기 어렵기 때문에 터널 안정성을 확보하기 위해서는 터널 지보뿐 아니라 필러부의 보강도 필요하다. 그러나 아직까지 국내에서의 시공실적 및 설계사례의 부족으로 체계적인 검토가 이루어지지 않은 실정이며, 또한 근접병설터널의 역학적인 거동에 대한 연구는 미흡한 실정이다(신영환과 김영근, 2010).

한편, 병설터널과 관련한 국내 연구는 주로 수치해석적인 방법을 동원한 연구들(김학문, 1997, 황정순 외, 2005, 신영환과 김영근, 2010, 강창규 외, 2010)이 많지만, 필러 및 터널 주변 지반의 변형거동과 터널 안정성 여부를 가시적으로 직접 확인하기 위해서는 보다 실증적인 실험적 연구가 필요하다.

터널의 축소모형실험은 Hobbs(1966), Goodman(1972) 등에 의해 소개되었고 국내에서도 병설터널에 대한 물리적인 모형실험을 실시한 연구 사례가 몇 차례 보고된 바 있다. 이중에서 김종우와 박지용(2004)은 등방성 암반내 위치한 쌍굴터널 주변지반의 변형거동을 조사하였고, 장부식 외(2006)는 병설터널간 보강필러의 거동에 대해 연구하였다. 정용진 외(2007)는 근접병설터널에 대한 모형실험과 수치해석을 통해 어느 현장터널에 대한 보강방법을 제안하였으며, 김종우와 김명균(2012)은 이방성 암반내 쌍굴터널의 안정성에 대한 연구에 있어서 30° 경사진 층리면을 가진 이방성 암반내 필러 폭 0.5D인 모형에서는 기존 층리면을 따라 필러의 전단파괴가 발생하며 필러 보강의 필요성을 보고하였다.

본 연구에서는 30° 경사진 층리면을 가진 풍화암 물성의 이방성 암반에서 필러 폭이 0.5D와 0.25D로 매우 작은 근접병설터널을 시공할 경우에 대한 터널 안정성을 조사하였다. 이를 위해 터널간 이격거리와 지보조건이 서로 다른 6가지 모형을 제작하고 측압계수 1의 하중조건으로 축소모형실험을 실시하였다. 이방성 암반을 모형실험에 적용하기 위하여 적층체 모형을 제작하였고 가압실험을 통해 모형별 균열개시압력, 최대압력, 필러 및 터널의 변형거동을 조사하였으며, 복공지보와 필러보강 여부가 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다.

2. 실험 모형

2.1 차원해석

본 연구에서는 Fig. 1의 왼쪽 그림과 같이 폭 2.6 m인 소규모 반원아치형 터널을 필러 폭이 매우 작은 근접병설터널의 형태로 굴착하는 경우를 모사하였다. 본 연구의 대상이 되는 현장 암석은 매우 풍화된 상태로서 밀도는 2.1 g/cm^{3}이고 일축압축강도는 33 MPa이며 현장 암반은 30° 경사진 층리면을 가진 이방성 암반으로 나타났다. 이와 같은 근접병설터널의 안정성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 축소모형실험을 실시하였다

축소모형실험에서 현장성을 충분히 재현하기 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(김종우와 박지용, 2004).

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 현장 터널의 단면과 축소모형에서의 터널단면을 나타낸 것으로, 현장터널의 폭은 2600 mm이고 모형터널의 폭은 61 mm이므로 본 실험에서의 길이[L]에 대한 축소율은 1/42.6이다. 다음으로 중력가속도[LT^{-2}]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 시간[T]의 축소율은 1/6.5이 된다.

한편, 현장 암반의 밀도는 전술한 바와 같이 2.1 g/cm^{3}인데 비해 본 실험에서 실제로 사용한 모형재료의 밀도는 1.4 g/cm^{3}이었으므로 밀도[ML^{-3}]에 대한 축소율은 1/1.5이며, 이로부터 질량[M]에 대한 축소율을 산정하

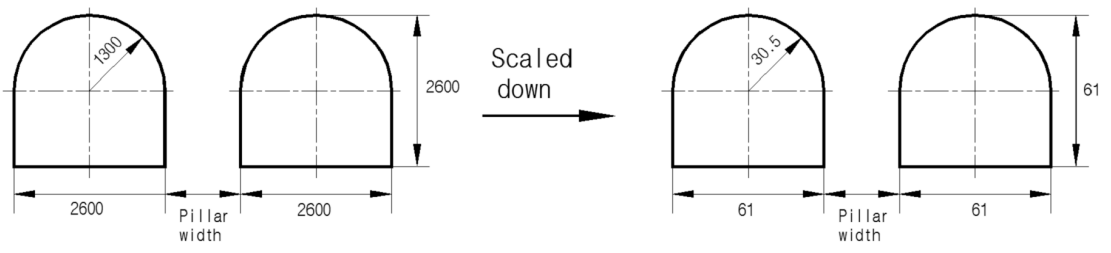
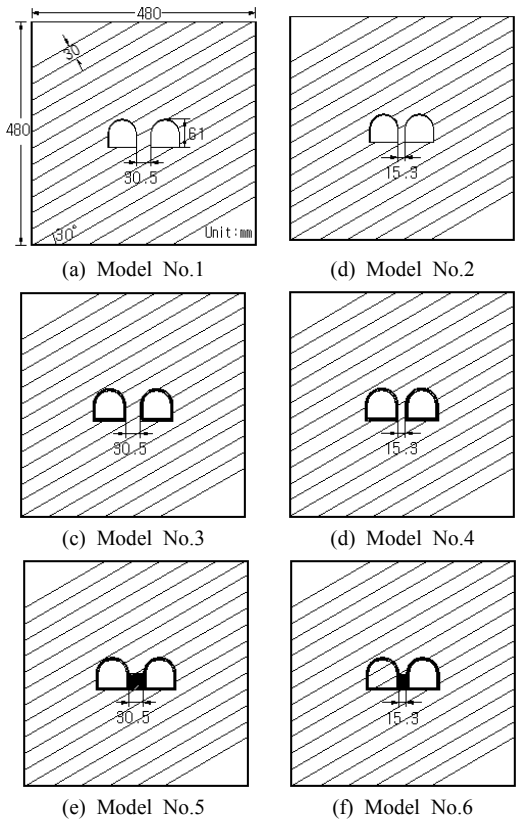


Fig. 1. Dimension of tunnel section (Unit:mm)

Table 1. The scale factors of models

Physical properties	Dimension	Scale factors
Length	[L]	1/42.6
Time	[T]	1/6.5
Mass	[M]	1/116151
Density	$[ML^{-3}]$	1/1.5
Strength	$[ML^{-1}T^{-2}]$	1/64



(a) Model No.1 (d) Model No.2

(c) Model No.3 (d) Model No.4

(e) Model No.5 (f) Model No.6

Fig. 2. Dimensions of six different models

면 1/116151로 나타났다. 이와 같이 산정된 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율을 근거로 하여 현장 암반의 강도$[ML^{-1}T^{-2}]$에 대한 축소율을 구하면 1/64로 나타났다. Table 1은 본 실험의 축소율을 정리한 것이다.

2.2 실험모형의 종류

본 연구에서는 층리면이 30° 경사진 이방성 암반에 위치하는 근접병설터널에서 터널간 이격거리와 지보조건이 터널 안정성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같은 6가지 실험모형을 제작하였다. 각 실험모

Table 2. Comparison of six different models

Model No.	Pillar width	Support condition
1	0.5D[1)]	Unsupported
2	0.25D	
3	0.5D	Lining only
4	0.25D	
5	0.5D	Lining and pillar reinforcement
6	0.25D	

[1)] D indicates the width of tunnel

형은 단면 크기 480 mm × 480 mm이며 여기에 Fig. 1의 오른쪽 그림에 표시된 규격과 같이 폭과 높이가 61 mm인 반원아치형 근접병설터널이 각 모형의 중앙에 위치하도록 배치하였다. 또한 각 모형에서 층리면 사이의 간격은 30 mm로 하였다.

Table 2는 6가지 모형들을 비교한 것으로서 이들은 서로 다른 터널간 이격거리와 지보 조건을 가지고 있다. 각 모형의 특징을 설명하면 다음과 같다. 먼저 1, 2번 모형은 터널간 이격거리 또는 필러 폭이 각각 0.5D, 0.25D이면서 터널을 무지보 상태로 한 모형인데, 여기서 D는 터널 폭(61 mm)을 의미한다. 다음으로, 이러한 근접병설터널은 필러 폭이 매우 작아 안정성이 결여되므로 암반이 연약할 경우에는 보강이 필수적이라고 생각되어 지보를 설치한 다른 나머지 모형들을 구성하였다. 즉 3, 4번 모형은 병설터널에 두께 5 mm의 모형복공을 각각 설치한 모형이며 5, 6번 모형은 복공뿐 아니라 필러부를 보강한 모형이다. 한편, 모형복공 두께 5 mm는 본 연구에서의 길이 축소율 1/42.6을 감안하면 실제 현장에서는 213 mm 두께의 복공에 해당한다. Table 3은 모형터널 부근의 규격을 명확하게 표시한 것이다.

2.3 모형재료

축소모형실험에 사용되는 모형재료는 대상 암반의 물리적 특성을 충분히 대변할 수 있어야 한다. 본 연구 대상 암반의 일축압축강도는 전술한 바와 같이 33 MPa인데, 여기에 Table 1에 나타난 강도 축소율인 1/64을 적용하면 실제로 사용되어야 하는 모형재료는 0.52 MPa의 일축압축강도를 갖는 물질인 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 이러한 물성을 갖는 모형 재료를 만들기 위하여 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하였는데, 이는 중량 배합비와 밀도에 따라 다양한 강도를 가지기 때문에 수많은 모형실험 연구의 재료로 활용되고 있다(Hobbs, 1966, Goodman, 1972, 김종우와 김명

Table 3. Dimensions of twin tunnels showing different pillar widths and support conditions

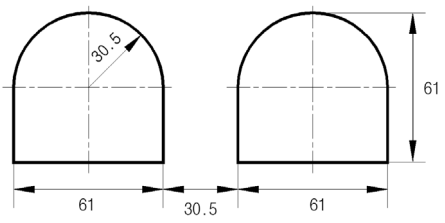
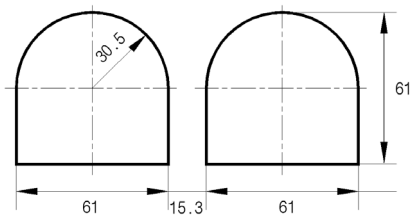
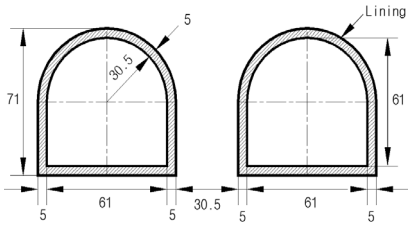
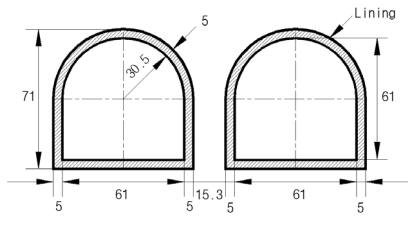
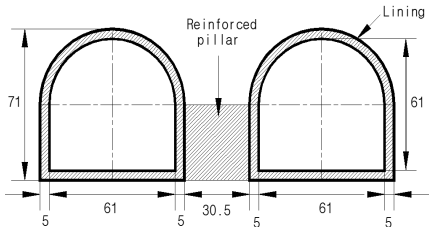
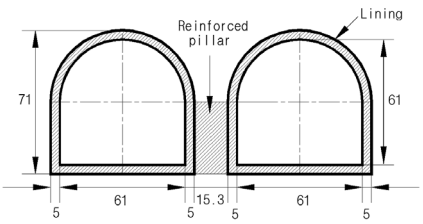
Support condition	Pillar width, 0.5D	Pillar width, 0.25D
Unsupported	 (a) Model No.1	 (b) Model No.2
Lining only	 (c) Model No.3	 (d) Model No.4
Lining and pillar reinforcement	 (e) Model No.5	 (f) Model No.6

Table 4. Results of uniaxial compressive tests when density is 1.4 g/cm^3

Weight ratio(S:P:W)[1)]	P/W	UCS[2)](MPa)
160 : 40 : 100	0.40	0.13
155 : 45 : 100	0.45	0.17
150 : 50 : 100	0.50	0.20
145 : 55 : 100	0.55	0.27
140 : 60 : 100	0.60	0.38
135 : 65 : 100	0.65	0.47
130 : 70 : 100	0.70	0.59
125 : 75 : 100	0.75	0.66
120 : 80 : 100	0.80	0.76
115 : 85 : 100	0.85	0.93
110 : 90 : 100	0.90	1.20
105 : 95 : 100	0.95	1.52
100 : 100 : 100	1.00	1.73

1) S : Sand, P : Plaster, W : Water
2) UCS indicates uniaxial compressive strength

균, 2012).

한편, 본 모형실험에 부합하는 0.52 MPa의 일축압축강도를 갖는 혼합물의 중량 배합비를 결정하기 위하여, 우선적으로 모형재료에 대한 물성 시험을 실시하였다. 즉, Table 4와 같이 물의 비율을 일정하게 둔 상태에서 모래와 석고의 혼합 비율을 달리한 13가지 종류의 혼합물에 대해 직경 50 mm, 길이 100 mm인 원주형 시험편을 제작한 후 이들을 일정기간 건조로에서 건조시킨 다음 밀도가 1.4 g/cm^{3}가 될 때 일축압축시험을 실시하였다.

Table 4는 배합비에 따른 시험 결과를 나타낸 것으로 물에 대한 석고의 중량비(P/W)가 증가할수록 일축압축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 시험 결과를 그림으로 나타낸 것으로 회귀식과 상관계수를 함께 표시하였다. 이와 같이 이 혼합물은 중량배합비에 따라 강도가 변화하는데 혼합물의 밀도가 1.4 g/cm^{3}일 경우 이 혼합물의 일축압축강도는 식 (1)과 같다.

$$UCS = 1.59\,(P/W)^{2.85} \quad (1)$$

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

식 (1)에 의해 0.52 MPa의 강도를 가지는 혼합물의 배합비를 구하면 P/W는 0.67로 나타났다. 즉 모래, 석고, 물의 중량배합비가 133:67:100인 혼합물이 본 모형실험에 적합한 모형재료인 것으로 판단되었으며, 이 혼합물을 사용하여 Fig. 2의 6가지 모형시험체를 제작하였다.

한편, 6가지 모형시험체 중에는 복공지보와 필러보강을 포함한 모형도 있기 때문에 복공 및 필러보강을 모사하는 모형재료도 필요하였다. 이러한 보강은 실제 현장 터널에서 복공 설치 및 필러 타이로드 또는 그라우팅 보강 등에 의해 실시되지만, 보강영역의 강도가 원지반에 비해 증가하는 정도는 시멘트 배합비나 각종 시공조건에 따라 다양하게 변화하는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서 실험의 일관성을 기하기 위하여 보강영역이 원지반에 비해 강도가 2배 증가되는 것으로 가정하여 1.04 MPa의 강도를 가지는 물질을 보강영역의 물질로 선택하여 실험을 실시하였다.

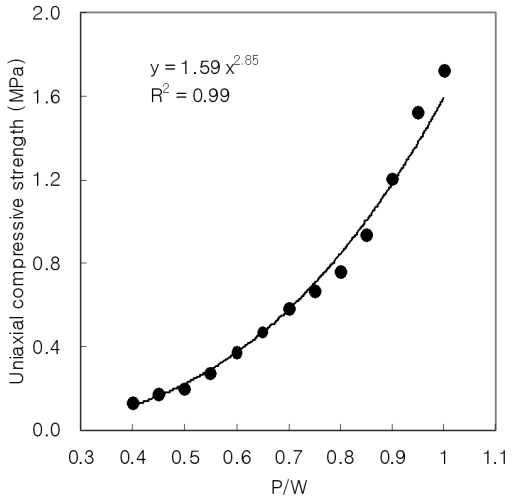


Fig. 3. Relation between uniaxial compressive strength and plaster-water ratio

한편, 석고, 모래, 물의 굳은 혼합물인 암반 모형재료와 완전히 접착되면서 1.04 MPa의 일축압축강도를 가지는 물질을 구하기 위해 수많은 시행착오를 거듭한 끝에 시멘트와 물의 혼합물을 보강영역 물질로 선정하였다. 석고, 모래, 물의 혼합물과 마찬가지로 시멘트와 물의 혼합물을 사용하여 직경 50 mm, 길이 100 mm인 원주형 시험편을 여러 개 제작한 후, 자연 상태에서 경화시간에 따라 강도의 변화를 추적하였다. 그 결과 이 혼합물이 1시간 경화되면 소정의 강도를 가지는 것으로 나타났으며, 실제 모형실험에서는 모형시험체 내에서 이 혼합물을 사용하여 복공설치 및 필러보강을 실시한 다음 1시간이 경과한 시점에서 모형실험을 실시하였다.

2.4 모형시험체의 제작

모래, 석고, 물의 중량비가 133:67:100인 혼합물을 사용하여 Fig. 2와 같은 6가지 모형시험체를 제작하였다. 본 실험에서 사용한 모래는 주문진산 표준사이고 석고는 ㈜문교산업의 도자기 형재용 석고이다.

모형시험체의 제작 과정을 모식적으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 먼저 모래, 석고, 물을 정해진 중량비에 따라 골고루 혼합한 후 합판과 철판으로 구성된 성형틀에 천천히 주입한 다음 탈형하여 Fig. 4(a)와 같이 30 mm 두께의 슬랩(slab)들을 여러 개 제작하였다. 다음으로 이 슬랩들을 결합하고 재단하여 최종적으로 Fig. 4(d)와 같이 480 mm × 480 mm × 76 mm 규격의 시험체를 완성하였다. 여기서 Fig. 4(d)의 중앙에 점선으로 표시한 터널 모양은 실제 모형실험을 실시할 때 굴착할 모형터널의 위치를 예를 들어 표시한 것이다.

한편, Fig. 5는 모형시험체를 제작하는 모습을 나타낸 것이다. 이와 같이 완성된 모형시험체를 건조로에서 일정기간 동안 건조시켰으며 시험체의 단위중량이 1.4 gf/cm^{3}가 될 때 실험 장치에 설치하여 모형실험을 실시하였다.

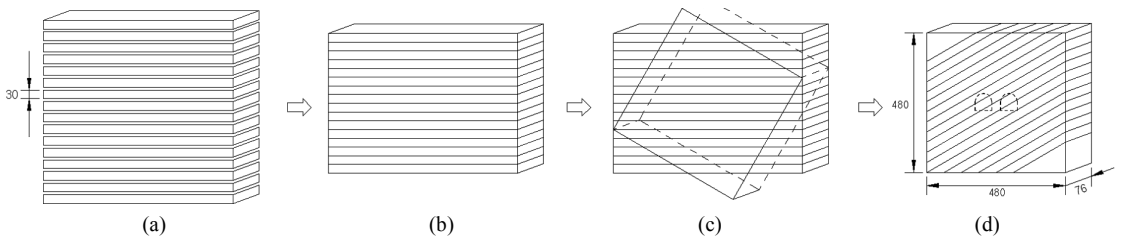
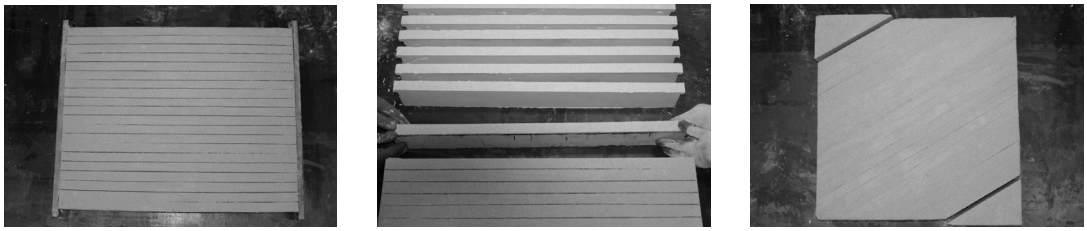
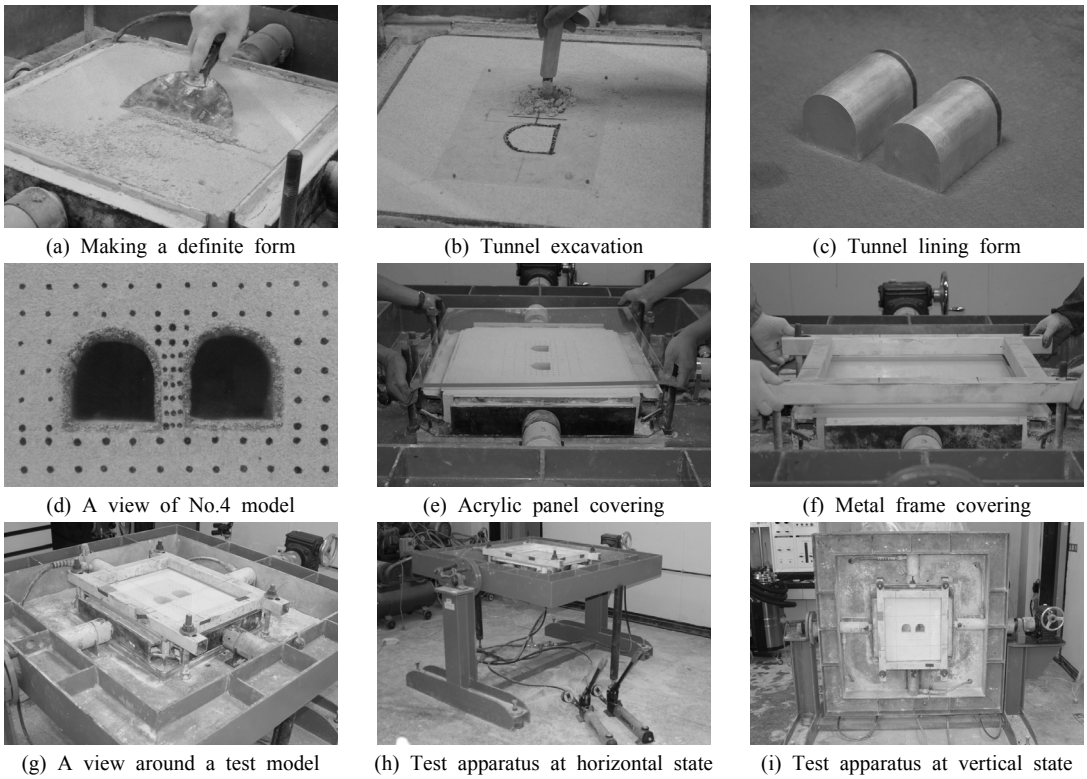


Fig. 4. A process of manufacturing a test model



(a) Pouring mixture into a mold (b) Making slabs (c) Assembling a test model

Fig. 5. A view of manufacturing a test model



(a) Making a definite form (b) Tunnel excavation (c) Tunnel lining form

(d) A view of No.4 model (e) Acrylic panel covering (f) Metal frame covering

(g) A view around a test model (h) Test apparatus at horizontal state (i) Test apparatus at vertical state

Fig. 6. Procedures of the scaled model tests of this study

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치는 수직하중과 수평하중을 각각 조절할 수 있는 유압식 이축압축장치로서 직교하는 네 방향에 25톤 용량의 램이 부착되어 있다(김종우와 김명균, 2012). 수직 및 수평 하중은 각각의 핸드펌프에 의해 작동되며, 모형시험체에 가해지는 하중의 크기는 핸드펌프에 부착되어 있는 디지털 압력계로부터 측정된다.

한편, 현장 암반은 일반적으로 삼축압축응력 상태에 놓여있으나, 본 실험과 같은 평면 변형률 조건에서는 수직응력과 수평응력만 존재하는 이축응력 상태로 단순화 할 수 있다. 수직응력과 수평응력의 상대적 크기는 장소에 따라 매우 다르지만, 본 연구에서는 실험의 일관성을 기하기 위하여 모든 모형에 대해 측압계수(K)를 1로 가정하였다. 즉, 본 실험에서는 6가지 모형시험체에 수직하중과 수평하중을 같은 크기로 하여 이축압축실험을 실시하였다.

실험의 방법 및 순서는 다음과 같으며 Fig. 6은 실험 장면들을 타나낸 것이다.

(1) 모형시험체를 실험장치에 설치하고 Fig. 6(a)와 같이 시험체의 윗면과 측면을 정형한다.
(2) 시험체에 미량의 하중을 가하여 시험체를 실험장치에 고정한 후 Fig. 6(b)와 같이 모형 터널을 Fig. 2의 규격대로 굴착한다.
(3) 폭과 높이가 61 mm인 반원아치형 근접병설터널과 두께 5 mm인 모형 복공의 규격을 정확히 모사하기 위하여 Fig. 6(c)와 같은 금속 보조기구를 이용하여 모형터널을 완성한다. Fig. 6(d)는 이 단계에서의 모형터널 부근 모습을 예를 들어 나타낸 것으로 4번 모형의 경우이다. 여기서 터널 주변에 보이는 수많은 점들은 하중에 따른 터널 주변의 변위를 측정하기 위한 계측점이다.
(4) Fig. 6(e), (f)와 같이 두께 10 mm인 투명 아크릴판과 견고한 프레임을 사용하여 모형시험체를 터널 축방향으로 고정시킴으로써 평면 변형률 조건을 구현한다. Fig. 6(g)는 이 단계에서의 모형시험체 모습을 보여준다.
(5) 이상의 과정은 Fig. 6(h)와 같이 실험장치를 수평으로 둔 상태에서 실시하였지만, 현장 상태를 그대로 적용하기 위하여 Fig. 6(i)와 같이 실험장치를 수직으로 회전시킨다.
(6) Fig. 6(h)에 나타난 두 개의 핸드펌프를 사용하여 모형시험체의 상, 하, 좌, 우에 위치한 네 개의 램에 하중을 작용시키되, 측압계수(K) 1을 만족하도록 수직하중과 수평하중을 같은 크기로 작용시킨다. 이와 같이 모형시험체에 연속적인 하중을 재하하면서 하중 증가에 따른 모형터널 주위의 변형거동을 관찰하였다. 한편, 가압 실험 중에는 수시로 사진을 촬영하고 균열 발달 상황을 조사하였는데, 이때 변위의 측정오차는 1화소당 0.2 mm로 나타났다.

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 터널간 이격거리와 지보조건이 서로 다른 6가지 근접병설터널 모형에 대해 축소모형실험을 실시하여 하중에 따른 각 모형의 변형과 균열발생양상을 조사하였다. 이 절에서는 각 모형별 변형거동의 특징을 살펴보고 터널간 이격거리 및 지보조건이 터널 안정성에 어떠한 영향을 미치는가를 검토한다.

4.1 모형별 변형거동

각 모형은 터널간 이격거리와 지보조건이 서로 다르기 때문에 하중에 따른 변형거동도 다른 형태로 나타났다. Table 5는 각 모형별 변형거동을 비교하여 나타낸 것으로, 표 안의 사진은 각 모형의 초기 모습, 중간 모습, 최종 모습을 나타낸 것이다. 여기서 초기 모습은 각 모형에 하중이 가해지기 이전의 최초 형태이고 중간 모습은 하중에 의해 균열이 발생된 후 터널 부근이 어느 정도 변형된 상태에서의 모습이며 최종 모습은 각 모형에 최대 하중이 작용할 때의 변형 양상을 나타낸 것이다.

이격 거리가 0.5D이면서 무지보 조건인 1번 모형은 0.44 MPa의 이축압축력이 작용할 때 병설터널 사이의 필러에 존재하던 30° 층리면을 따라 최초로 균열이 발생하였으며, 연이은 하중 증가에 따라 좌우측 터널의 파괴가 진행되었다. 특히 1번 모형은 좌측 터널의 천반에서 쐐기 모양의 낙반이 발생하기도 하였으며 최대 압력은 0.48 MPa이었다.

이격 거리가 0.25D이면서 무지보 조건인 2번 모형 역시 필러의 균열로부터 터널 파괴가 진행되었다. 2번 모형의 균열개시압력과 최대압력의 크기는 1번 모형과 동일하였지만 1번 모형에 비해 필러의 완전한 파괴가 발생함에 따라 전체적인 터널 파괴양상은 다르게 나타났다.

3, 4, 5, 6번 모형은 두께 5 mm의 복공 또는 필러보강을 실시한 모형들로서 지보의 영향으로 인해 균열개시압력과 최대압력은 무지보 모형인 1, 2번 모형에 비해 다소 크게 나타났다. 이격거리가 0.25D이면서 복공만 설치한 4번 모형의 경우는 필러의 균열로부터 터널 파괴가 진행되었지만, 나머지 3, 5, 6번 모형은 필러에 존재하던 30° 층리면을 따른 균열이 발생하지 않았다.

4.2 터널간 이격거리의 영향

근접병설터널에서 터널간 이격거리 또는 필러 폭이 터널의 변형거동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 필러 폭이 0.5D인 1, 3, 5번과 0.25D인 2, 4, 6번 모형의 실험결과를 비교 검토하였다.

Table 6은 각 모형의 균열개시압력과 최대압력을 나타낸 것이다. 여기서 균열개시압력은 전반적으로 필러 폭이 커질수록 증가하는 경향을 보이고 있어 터널간 이격거리가 커질수록 병설터널의 안정성은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 등방성 암반내 쌍굴터널(김종우와 박지용, 2004)과 호층 암반내 쌍굴터널(김종우, 2012), 이방성 암반내 쌍굴터널(김종우와 김명균, 2012)에서 얻어진 모형실험의 결과와 부합하며, 이로부터 터널간 이격거리 또는 필러 폭의 증가는 대부분의 암반 조건에서 터널 안정성을 증가시키는 요인이 됨을 알 수 있었다.

그러나 Table 6에서 볼 수 있듯이 무지보 조건인 1, 2번 모형의 균열개시압력과 최대압력은 차이를 보이지 않았는데, 이는 필러 폭이 0.5D 이하인 근접병설터널이

Table 5. Comparison of test results of six different models

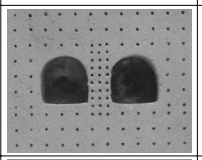
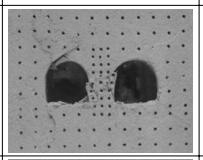
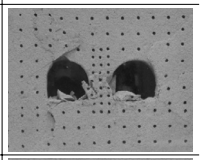
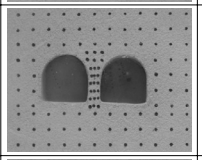
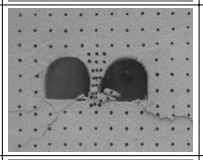
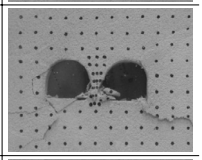
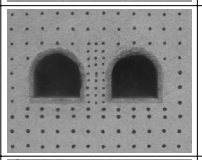
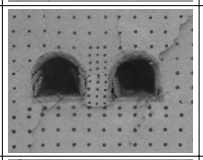
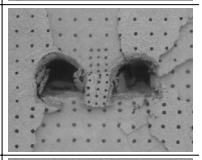
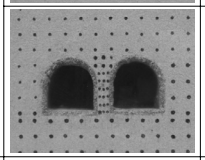
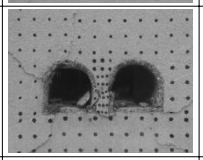
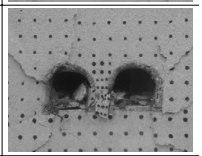
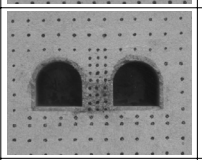
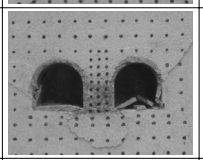
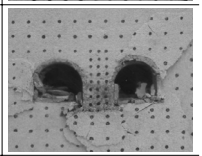
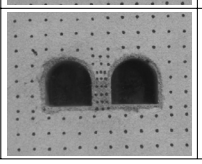
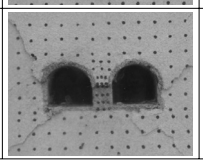
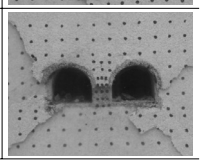
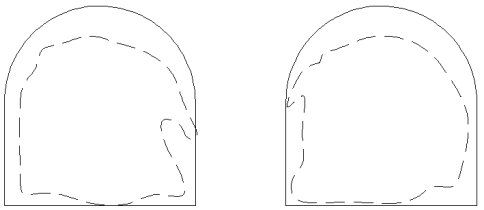
Model No.	Pillar width	Support condition	Initial stage	Interim stage	Final stage
1	0.5D	Unsupported			
2	0.25D				
3	0.5D	Lining only			
4	0.25D				
5	0.5D	Lining and pillar reinforcement			
6	0.25D				

Table 6. Testing pressures of models with different pillar widths

Pillar width	Model No.	Crack initiating pressure (MPa)	Maximum pressure (MPa)
0.5D	1	0.44	0.48
	3	0.48	0.58
	5	0.53	0.70
0.25D	2	0.44	0.48
	4	0.44	0.53
	6	0.50	0.65

무지보 상태이면 필러의 내하능력이 현저히 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 풍화암 지반에 시공되는 근접병설터널의 경우에는 복공설치 및 필러부의 보강을 포함한 체계적인 터널 지보 시스템 구축이 필수적이라 판단된다.

한편, Fig. 7은 1, 2번 모형에서 최대 압력이 작용할 때의 변형거동을 비교한 것이다. 여기서 두 가지 모형에 작용한 압력의 크기는 0.48 MPa로 동일하며, 실선과 점선은 각각 실험 전후 터널의 내공 단면 모습을 나타낸 것이다. 이축압축력에 의해 두 가지 모형은 모두 병설터널 사이의 중앙 필러 방향으로 변형하였지만, 필러 폭이 상대적으로 큰 1번 모형에 비해 필러 폭이 작은 2번 모형은 필러의 완전한 파괴에 따라 터널의 수직변형이 수평변형보다 더 크게 나타났다. 실제로 동일한 하중 조건에서 1번 모형은 초기 굴착면적과 비해 내공단면이 38% 축소되었지만 2번 모형은 43% 축소되어, 필러 폭이 작을수록 터널은 큰 변형을 보였으며 터널 안정성은 감소함을 알 수 있었다.



(a) Pillar width, 0.5D (Model No.1)

(a) Pillar width, 0.25D (Model No.2)

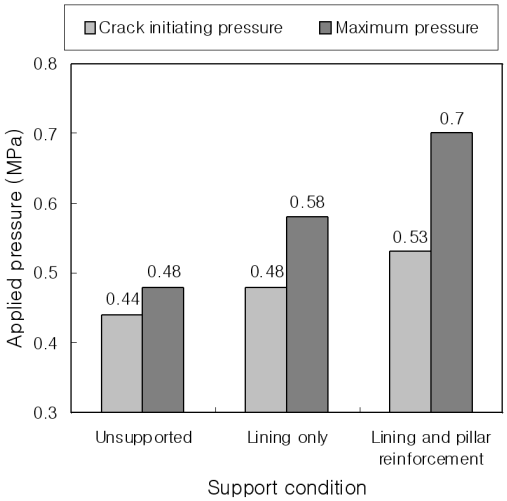
Fig. 7. Deformation behaviors around twin tunnels under unsupported condition

4.3 지보조건의 영향

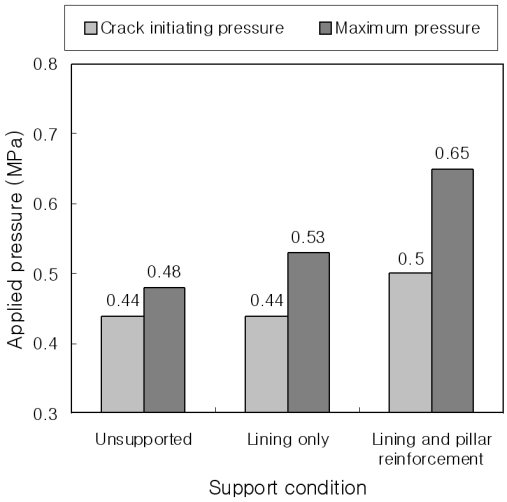
필러 폭이 매우 작은 근접병설터널은 필러의 내하능력이 작기 때문에 안정성을 확보하기 위해서는 터널 보강이 필수적이다. 본 연구에서는 지보조건이 터널의 변형거동 및 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 필러 폭이 0.5D와 0.25D인 경우에 대하여 각각 복공지보만 설치한 경우와 복공지보와 더불어 필러 보강도 실시한 경우에 대해 모형실험을 실시하였다.

Fig. 8은 필러 폭이 0.5D와 0.25D인 경우에 대하여 각 모형의 균열개시압력과 최대압력을 비교하여 나타낸 것으로 Table 6을 활용하여 만든 것이다. 여기서 균열개시압력은 전반적으로 무지보, 복공지보, 복공지보+필러보강의 순서로 증가하여 지보량에 따른 터널의 안정성 증가를 확인할 수 있었으며, 특히 터널간 이격거리가 0.25D로서 필러 폭이 매우 작은 근접병설터널의 경우에는 복공지보뿐 아니라 필러보강도 반드시 실시해야 터널 안정성이 확보됨을 알 수 있었다.

Table 7은 필러 폭이 0.5D이면서 지보조건이 서로 다른 1, 3, 5번 모형의 실험 결과를 보여주며, 각 모형에서 최대압력이 작용할 때의 변형거동을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 무지보인 1번 모형은 필러에 존재하던 30° 경사진 층리면을 따라 필러 파괴가 발생한 이후 병설터널 사이의 중앙 필러 방향으로 변형하였지만, 지보가 설치된 3, 5번 모형에서는 필러에 존재하던 층리면의 영향이 나타나지 않았다. 또한 터널 주변의 변형을 실선과 점선으로 나타낸 변형도를 분석하면, 무지보인 1번 모형은 0.48 MPa의 압력이 작용할 때 내공단면은 초기 굴착면적과 비해 38% 축소되었다. 한편 복공지보



(a) In case of pillar width, 0.5D



(b) In case of pillar width, 0.25D

Fig. 8. Testing pressures of models with different support condition

가 설치된 3번 모형은 0.58 MPa의 압력이 작용할 때 내공단면이 29% 축소되었으며, 복공지보와 더불어 필러 보강을 실시한 5번 모형은 0.70 MPa의 상대적으로 큰 압력이 작용할 때에도 내공단면은 24% 축소되어 변형량이 가장 작았으며 필러부의 파괴는 발생하지 않아 세 가지 모형 중에서 가장 안정한 것으로 나타났다.

Table 8은 필러 폭이 0.25D이면서 지보조건이 서로 다른 2, 4, 6번 모형의 실험 결과를 비교한 것이다. 여기서 무지보인 2번 모형은 30° 경사진 기존 층리면을 따라 필러의 완전한 파괴가 발생하였으며, 필러 파괴 이후 병설터널 사이의 중앙 필러 방향으로 변형함과 더불

Table 7. The experimental results of model No. 1, 3, 5 with different support condition

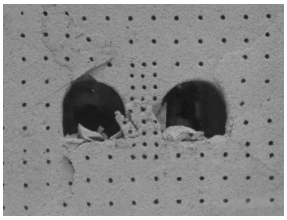
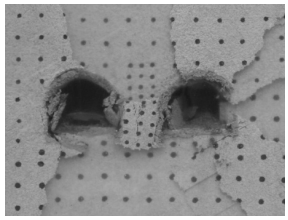
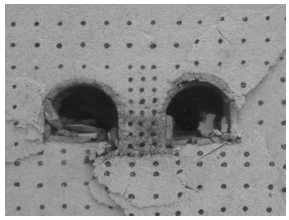
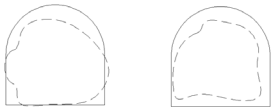
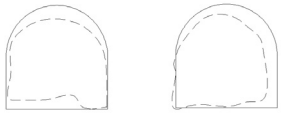
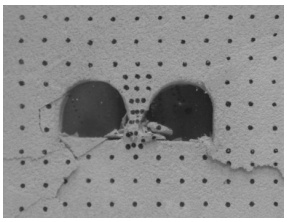
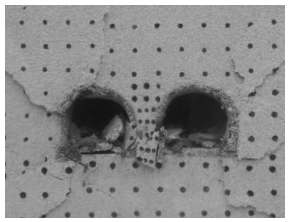
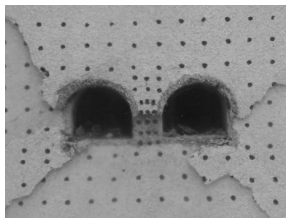
Items	Model No.1	Model No.3	Model No.5
Pillar width	0.5D	0.5D	0.5D
Support condition	Unsupported	Lining only	Lining and pillar reinforcement
Applied pressures	0.48 MPa	0.58 MPa	0.70 MPa
Failure photograph			
Deformation around tunnels			

Table 8. The experimental results of model No. 2, 4, 6 with different support condition

Items	Model No.2	Model No.4	Model No.6
Pillar width	0.25D	0.25D	0.25D
Support condition	Unsupported	Lining only	Lining and pillar reinforcement
Applied pressures	0.48 MPa	0.53 MPa	0.65 MPa
Failure photograph			
Deformation around tunnels			

어 터널의 수직방향 변형이 수평방향 변형보다 더 크게 나타났다. 또한 최대 압력인 0.48 MPa이 작용할 때 내공단면은 초기 굴착면적과 비해 43% 축소되었다. 한편 복공지보만 설치된 4번 모형도 필러에 존재하던 층리면을 따라 필러 파괴가 발생한 이후 중앙 방향으로 변형하였지만 터널의 수직방향 변형은 2번 모형에 비해 작았으며 최대 압력인 0.53 MPa이 작용할 때 내공단면은 35% 축소되었다. 이에 비해 복공지보와 더불어 필러보강을 실시한 6번 모형은 최대 압력인 0.65 MPa이 작용할 때 내공단면은 28% 축소되어, 내하능력은 가장 크고 변형량은 가장 작아 세 가지 모형 중에서 가장 안정한 것으로 나타났다. 또한 6번 모형은 병설터널의 바깥쪽 측벽에서 중앙 필러 방향으로의 변형이 우세하였고, 필러에서의 균열은 매우 적었으며 특히 30° 경사진 기존 층리면이 필러 파괴에 미치는 영향은 거의 없었다.

이와 같이 필러 폭과 지보조건이 서로 다른 6가지 모형의 실험 결과를 전체적으로 분석하면 필러 폭이 작을수록 터널 안정성은 감소하며 지보량이 증가하면 터널 안정성은 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 Table 8의 4번 모형과 6번 모형의 실험결과를 감안하면, 필러 폭이 0.25D로 매우 작은 근접병설터널의 경우에는 복공지보뿐 아니라 필러보강도 실시해야 터널 안정성을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 30° 경사진 층리면을 가진 풍화암 지반에서 필러 폭이 0.5D와 0.25D로 매우 작은 근접병설터널을 시공할 경우에 대한 터널 안정성을 조사하기 위하여, 터널간 이격거리와 지보조건이 서로 다른 6가지 모형에 대해 측압계수 1의 하중조건으로 축소모형실험을 실시하였다. 이를 통해 모형별 균열개시압력, 최대압력, 필러 및 터널의 변형거동을 조사하였으며, 이 조건들이 터널의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 이로부터 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 하중이 증가함에 따라 근접병설터널의 변형은 중앙 필러 방향으로 주로 발생하였고, 필러 폭이 매우 작은 무지보 터널의 경우에는 필러의 완전한 파괴에 따라 터널의 수평방향 변형보다는 수직방향 변형이 더 크게 발생하였다.
2. 필러 폭이 큰 모형일수록 균열개시압력와 최대압력은 더 크게 나타나 터널간 이격거리가 커질수록 병설터널의 안정성은 증가하였다.
3. 복공지보를 설치한 모형은 무지보 모형에 비해 균열개시압력와 최대압력은 더 크고 내공단면의 변형량은 적어 풍화암 근접병설터널에서 복공지보의 필요성을 확인하였다.
4. 복공지보와 더불어 필러보강을 실시한 모형은 무지보 모형 및 복공지보만 설치한 모형에 비해 터널 안정성이 더 크게 나타났다.
5. 필러 폭 0.25D인 근접병설터널에서 복공지보만 설치한 모형에서는 필러에 존재한 기존 층리면을 따라 필러의 파괴가 발생하였기 때문에 이 경우에는 복공지보뿐 아니라 필러보강도 실시해야 터널 안정성이 증가함을 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 2012년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Young-Wan Sin, Young-Geun Kim, 2010, Review of mechanical behaviors of pillar in large parallel tunnel, Tunnel and Underground Space, 20.3, 131-144.
2. Hak-moon Kim, 1997, Effect of interferences and gound movement by twin tunnelling, Tunnel and Underground Space, 7.2, 136-142.
3. Jung-Soon Hwang, Hong-Gyu Lee, Suk-Ho Park, Eung-Ki Lee, 2005, Suggestion of stability estimation method for pillar during twin-tunnel excavation, proc. of Korean Society of Civil Engineers, 5610-5613.
4. Chang-Kyu Kang, Young-Su Kim, Chil-Yong Choi, 2010, The characteristics of displacement according to the diagonal parallel tunnel excavation on weathered rock, proc. of KSEG Conference, 165-169.
5. D.W. Hobbs, 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.
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. Jong-Woo Kim, Ji-Yong Park, 2004, A study on the deformation behaviors around twin tunnels using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 14.5, 381-390.
8. Bu-Sik Jang, Jeong-Soon Hwang, Sang-Oh Lee, Bae-Sik Yoon and Hong-Taek Kim, 2006, A study on the estimation of the behaviors of the reinforced pillar between twin tunnels by small-scale model test, Proc. of Korean Geotechnical Society, 789.
9. Yong-Jin Jeong, Han-Chan Song, Seong-Hoon Lee, Seong-Ho Shin, 2007, A study on the stability estimation of rock pillar and reinforcement method in the twin tunnels with small clearance, proc. of KSRM Conference, 487-500.
10. Jong-Woo Kim and Myeong-Kyun Kim, 2012, A Study on the stability of twin tunnels in anisotropic rocks using scaled model tests, Tunnel and Underground Space, 22.3, 203-213.

김 평 기

2011년 청주대학교 토목환경공학과 공학사

Tel: 043-229-8466
E-mail: dounut2@nate.com
현재 청주대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

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
청주대학교 토목공학과 교수