

축소모형실험을 이용한 연약대층 근접 터널의 거동

이동석¹, 전재현¹, 박종덕¹, 이석원^{2*}

Behavior of tunnel adjacent to weak zone by using scaled model test

Dong-Seok Lee, Jae-Hyun Joen, Jong-Deok Park, Seok-Won Lee

ABSTRACT Recently, the construction of tunnel frequently involves neighboring weak ground conditions. In this case, the stabilized ground could be relaxed by the excavation of tunnel. This will create issues in terms of stability of tunnel. Major factors determining the stability of tunnel can be the direction (angle) of weak zone, the distance between tunnel and boundary of weak zone and so on. In this study, by quantifying the displacement and crack propagation during the excavation of tunnel constructed neighboring weak zone, the influence of the direction of weak zone and the distance between tunnel and boundary of weak zone on the mechanical behavior of tunnel is investigated. A series of experimental scaled model tests by changing the direction of weak zone and the distance between tunnel and boundary of weak zone, are performed and analyzed under the condition of homogeneous material. The results show that as the angle between ground surface and boundary of weak zone moves from horizontal to perpendicular plane, displacement near tunnel increases. An increased distance between tunnel and boundary of weak zone induces displacements near tunnel to decrease and stabilizes beyond a certain level of distance. These findings verify and extend the earlier studies quantitatively. Finally, an appropriate distance between tunnel and boundary of weak zone according to the angle of weak zone is justified. This fundamental insight provides the basis for a more rational design of tunnel neighboring weak ground conditions.

Keywords: Weak zone, scaled model test, tunnel behavior, separated distance

요 약 최근 터널 건설은 종종 연약대층을 인접하여 계획하게 된다. 이러한 경우 터널 굴착은 안정화되어 있던 지반을 이완시키고 따라서 터널의 안정성에 문제를 일으킬 수 있다. 안정성에 문제를 일으킬 수 있는 주요 영향인자들을 보면 연약대층이 지표면과 이루는 각도, 연약대층과 터널의 이격거리 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 연약대층을 인접하여 건설되는 터널의 굴착과정에서 발생하는 변위량과 균열발생 양상을 조사함으로써, 연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과 터널의 이격거리가 터널의 역학적 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과 터널의 이격거리를 변화시켜 가면서 균질한 재료를 가지고 실내 축소 모형실험을 수행하고 이를 분석하였다. 실험결과, 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 수평에서 수직으로 변화함에 따라 터널 주변의 변위 발생량이 증가하였다. 연약대층과 터널의 이격거리가 증가함에 따라 터널 주변의 변위 발생량이 감소하였고, 특정 이격거리 이상에서 안정화되었다. 이러한 발견들은 기존의 연구결과들을 정량적으로 검증하고 확장하는 것이라 판단된다. 최종적으로 연약대층이 지표면과 이루는 각도 변화에 따른 연약대층과 터널의 적정 이격거리를 정의하였다. 이러한 기초적인 연구는 연약대층을 인접하여 신설되는 터널 설계에 보다 합리적인 제안을 할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 연약대층, 축소모형실험, 터널거동, 이격거리

접수일(2012.04.30), 수정일(2012.05.10), 게재확정일(2012.05.14)

¹건국대학교 사회환경시스템공학과 석사

²건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

*교신저자: 이석원 (E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

1. 서론

도시의 발달 및 도로의 직선화 등에 의하여 새롭게 신설되는 터널 및 지하공간은 기존 지하 구조물을 근접하여 신설되거나 또는 연약지반을 근접하여 통과하게 된다(김도식, 김영근, 2007; 신영완, 김영근, 2010). 예를 들어 산악터널에서는 단층대 부근 또는 석회암 공동 지대 등과 같이 연약대층(불리한 지반 조건)을 근접하여 터널이 시공되어야 하는 경우가 발생하게 된다(전석원 등, 2003; 김종우, 2004; 김종우 등, 2004). 이러한 경우 기존의 연약대 층은 터널 건설의 안정성에 영향을 미치게 되며, 미치는 영향 정도는 연약대층과 원지반(터널이 통과하는 상대적으로 강한 지반)과의 이격거리, 기하학적인 요인 등에 의하여 결정될 수 있다(안현호 등, 2008). 따라서 영향을 미치는 인자들을 미리 파악하고, 각 영향인자들이 터널의 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 필요가 있다(김상균, 2008; 김상환, 2003; 유충식, 송아란, 2006; 이홍성 등, 2009).

본 연구에서는 여러 가지 영향인자 중에서 다음에 제시하는 두 가지 영향인자의 변화에 의한 터널의 안정성 변화(거동 변화)에 대한 검토를 실험적으로 수행하였다; ① 원지반과 근접하는 연약대층이 지표면과 이루는 각도의 변화, ② 터널의 중심으로부터 연약대층까지의 이격거리 변화. 그림 1 및 표 1에서 보인 바와 같이, 축소모형 실험은 총 20회 실시하였다. 모델 A, 모델 B, 모델 C 및 모델 D는 원지반과 근접하는 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 각각 30°, 45°, 60° 그리고 90°인 경우를 의미한다. 또한 각각의 모델에 있어서 1, 2, 3, 4 및 5는 터널의 중심으로부터 연약대층까지의 이격거리가 각각 0.0 D, 0.5 D, 1.0 D, 1.5 D 그리고 2.0 D를 의미한다. 여기에서 D는 터널의 직경을 의미한다. 예를 들어 모델 A-3은 원지반과 근접하는 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 30°이면서 터널의 중심으로부터 연약대층까지의 이격거리가 1.0 D인 경우를 의미한다. 단, 본 연구에서 정의하는 원지반이란 인접하는 연약대층과 비교하여 상대적으로 강한 강도를 지니는 지반조건을 의미한다. 그 상대적 정도는 다음 절에 서술되어 있다. 또한 모든 실험에서 측압계수는 1.0으로 설정하였다.

본 연구는 최종적으로 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 변화할 때, 각 각도에서 터널의 안정성을 확보할 수 있는 터널과 연약대층과의 적정 이격거리를 알아보고 이를 제시하는데 그 목적이 있다.

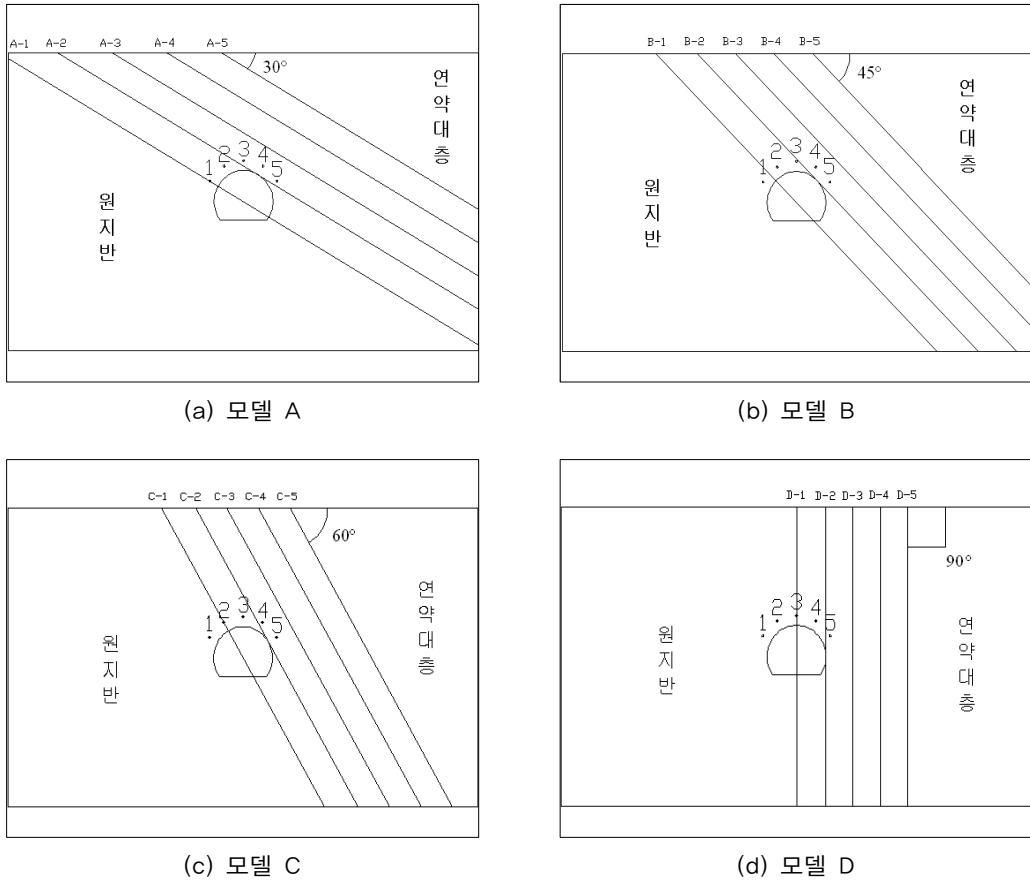


그림 1. 모델별 모식도

표 1. 모델별 실험조건

모델	지표면과 이루는 각도	이격 거리	모델	지표면과 이루는 각도	이격 거리
A-1	30°	0.0 D	B-1	45°	0.0 D
A-2		0.5 D	B-2		0.5 D
A-3		1.0 D	B-3		1.0 D
A-4		1.5 D	B-4		1.5 D
A-5		2.0 D	B-5		2.0 D
C-1	60°	0.0 D	D-1	90°	0.0 D
C-2		0.5 D	D-2		0.5 D
C-3		1.0 D	D-3		1.0 D
C-4		1.5 D	D-4		1.5 D
C-5		2.0 D	D-5		2.0 D

2. 축소 모형실험

2.1 모형 재료

지반을 모사하는 축소모형실험은 모래, 점토, slurry, 석고, 기타 혼합물 등의 재료를 이용하여 왔다. 특히 본 연구와 같이 암반을 모사하기 위해서는 암석 시료, 석고, talc powder 등을 사용하여 왔다. 국외의 경우 Adhikary 등(1997)은 암반사면에서의 토폴링 파괴 메커니즘을 규명하기 위하여 취성재료(brittle material)로서 모래와 석고의 혼합물을, 연성재료(ductile material)로서 fibre-cement sheeting을 사용하였다. Fossen과 Gabrielsen(1996)은 단층을 모사하기 위한 모형 재료로서 기존에 사용해왔던 점토나 모래 대신 성형시간이 빠르고 성형 후의 내구성이 좋은 석고를 사용한 바 있다. 국내의 경우도 모래와 석고의 혼합물을 사용한 축소모형실험에 관한 연구가 이미 진행된 바 있다(전석원 등, 2003; 김종우 등, 2004; 안현호 등, 2006). 이러한 문헌조사 결과를 토대로 암반 지반을 모사하기 위하여 본 연구에서도 모형재료로서 모래 : 석고 : 물의 혼합물을 사용하였다. 모래는 균일한 강도 발현을 위해 주문진 표준사를 사용하였고, 석고는 도자기형재용 석고를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 모형재료는 원지반(연약대층과 비교하여 상대적으로 견고한 지반)은 모래 : 석고 : 물의 중량비가 3 : 1 : 2, 연약대층은 1 : 1 : 3인 혼합물로 배합하였다. 모형제작은 일정 강도의 발현을 위해 목표 단위중량을 설정하고, 그 단위중량이 될 때까지 건조시켰는데 본 연구에서는 원지반 모형이 약 13.7 kN/m^3 의 단위중량을 가질 때 실험을 수행하였다. 연약대층의 경우, 같은 기간 동안 건조시킨 단위 중량을 목표 단위 중량으로 설정하였고, 약 9.6 kN/m^3 의 단위중량을 가질 때 실험을 수행하였다. 모형의 강도는 $\Phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 크기의 공시체를 제작하여 일축압축강도시험을 실시하여 측정하였고, 측정된 시편의 일축압축강도는 원지반이 0.31 MPa, 연약대층이 0.10 MPa이었다.

본 연구에서 강도를 설정함에 있어서 상사성의 법칙(Hobbs, 1969)을 적용하지 않았다. 그 이유는 본 연구의 목적은 모형실험을 통하여 실제 발생된 변위량의 절대적인 수치 값이 아닌 연약대층의 각도 변화 및 터널과 연약대층과의 이격거리 변화에 따른 모델간의 상대비교이다. 따라서 이를 통하여 연약대층을 인접하여 신설하는 터널의 적정 이격거리를 실험적으로 제시함에 있다.

2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 축소모형실험 장치는 그림 2에 보인 바와 같이 $2,290 \times 1,930 \times 710 \text{ mm}$ (가로×세로×폭) 크기로 제작되었다. 하부면은 고정되어 있고 전·후면은 아크릴을 대고 프레임용 추가로 설치하여 하중 가압에 따른 아크릴의 휨을 방지하여 평면 변형률 조건을 적용하였다.

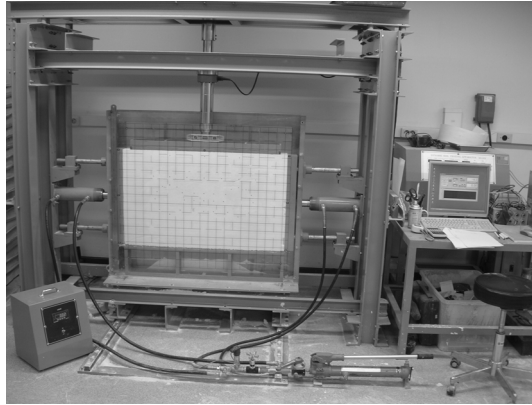
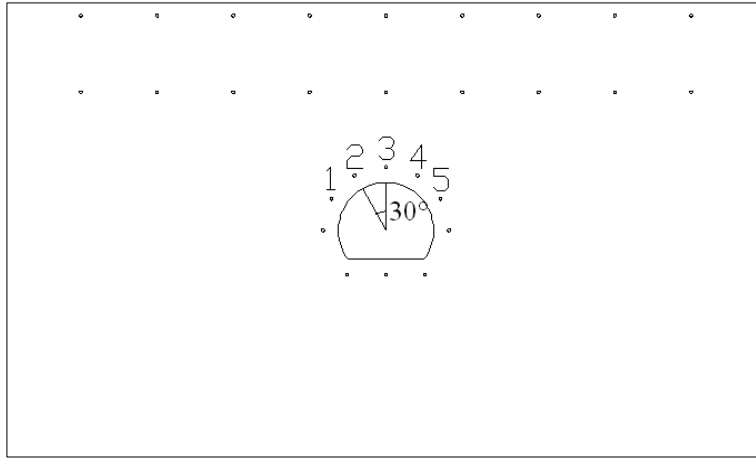


그림 2. 2차원 축소 모형실험 장치

단, 여기에서 서술한 평면 변형을 조건은 실제 시편의 폭이 10 cm로 작고 또한 상부 가압판이 폭 전체를 가압함으로써 최대한 평면 변형을 조건을 만족시켰음을 의미하고 정밀한 평면 변형 조건은 아님을 밝히고자 한다. 하중은 상부에 1개, 좌·우 측면에 각각 1개씩, 총 3개의 가압장치를 설치하여 가압하였다. 상부의 가압장치는 서보 컨트롤 시스템이고, 측면은 유압식인데 좌·우 실린더를 하나의 유압잭에 연결하여 하중 가압량이 동일하도록 하였다.

가장 먼저 모형을 배합비에 맞게 제작하여 목표 단위중량(원지반 모형: 13.7 kN/m^3 , 연약대층: 9.6 kN/m^3)에 도달할 수 있도록 약 10일간 양생시켰다. 양생된 모형을 그림 2의 축소모형실험 장비에 설치 한 후, 실험동안 변화되는 변위를 측정하기 위하여 그림 3과 같이 원형 포인트를 마킹하여 번호를 부여하였다. 가장 중요한 터널 주변은 터널 바깥쪽으로 2 cm 떨어진 지점에 포인트를 마킹하였으며, 그 이외의 부분은 중요도에 따라 일정한 기준으로 포인트를 마킹하였다. 최종 모형이 설치 된 후, 하중은 축압계수(K) 조건에 따라 상부와 좌·우측 방향으로 가압하였는데 최종 하중을 5단계로 나누어 각 단계 사이에는 일정 시간을 두고 단계별로 하중을 가압하였다. 본 실험에서는 모형의 강도 및 $K=1.0$ 인 조건을 고려하여 굴착 중 변위량을 측정하기 위한 최대 상재하중으로 상부에 6 kN, 그리고 측 방향하중 역시 6 kN으로 설정하였다. 상재하중 가압을 완료한 후 모형의 충분한 응력 전달을 위하여 5시간의 안정화 시간을 가졌다. 안정화 단계 후 터널을 굴착하였다. 굴착은 전단면굴착으로 수행하였다. 터널의 형상은 직경(환산직경) 12.5 cm, 높이 10 cm로 설정하였다. 터널 굴착이 완료된 후 다시 1시간 정도의 굴착 후 안정화 시간을 가졌다. 터널 굴착 단계가 완료된 후, 터널이 견딜 수 있는 최대 하중을 파악하기 위해 최종 파괴가 이루어 질 때까지 상부하중 가압량을 1 kN씩 단계별로 증가시켰다. 즉, 1분 동안에 1 kN이 증가하도록 하였고 증가 후에는 1시간의 변위수렴 기간을 둔 다음 1 kN을 증가시켰다.



1: 터널 좌측 측벽부, 2: 터널 좌측 상단부, 3: 터널 천단부, 4: 터널 우측 상단부, 5: 터널 우측 측벽부

그림 3. 변위 측정 지점

터널 굴착 과정 및 굴착 후 하중 가압단계에서 변화하는 변위를 측정하기 위하여 전술한 바와 같이 원형 포인트를 마킹하였는데, 이는 사진측량 프로그램인 PhotoModeler Pro 5를 이용하여 모형의 변위를 측정하기 위한 것이다. 즉 단계별로 하중을 가압하면서 각 단계마다 디지털 카메라로 사진 촬영을 하여 PhotoModeler Pro 5로 변형 양상을 분석하였다. PhotoModeler Pro 5는 삼각측량 원리를 이용하여 타겟의 위치를 추적해내는 프로그램으로써 일반적인 고해상도 카메라를 이용할 때 1/5,000의 정확도를 보이며, 사진촬영은 각 하중 단계마다 변위와 응력 전달을 위한 충분한 시간을 가진 뒤, 45° 간격으로 좌측, 정면, 우측 세장으로 저장하여 정밀도의 향상을 기하였다.

3. 축소 모형실험 결과

본 연구의 목적은 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 변화할 때, 각 각도에서 터널의 안정성을 확보할 수 있는 터널과 연약대층과의 적정 이격거리를 알아보고 이를 제시하는데 있다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 터널의 굴착단계에서부터 최종 파괴에 이르는 하중단계까지 연속적으로 유발되는 터널 주변의 변위를 측정하였으며 또한 이때의 균열양상도 파악하였다. 이러한 실험 결과 측정을 토대로 각 굴착단계별 변위량의 추이, 각도 변화에 따른 변위량의 추이 등을 조사하였다. 이때 최종 파괴에 이르는 하중단계는 각 모델마다 상이하다.

3.1 굴착 단계별 변위벡터

연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과 터널과의 이격거리에 따른 터널의 거동을 연구하기 위하여 발생하는 변위를 연속적으로 측정하였다. 그림 4 및 그림 5에서 보인 바와 같이 각 하중 단계마다 발생하는 변위를 벡터로 표시하였는데, 실제 변위가 상대적으로 작아 알아보기 편하도록 터널 굴착 직후(상재하중 6 kN 단계)에서는 16배, 상재하중 13 kN 단계에서는 8배로 확대하여 나타내었다. 대표적으로 그림 4 및 그림 5는 30°의 경사각을 갖는 모델 A 그리고 90°의 경사각을 갖는 모델 D를 각각 나타내고 있다. 각 그림에서 (i)는 상재하중 6 kN 단계, (ii)는 상재하중 13 kN 단계에서의 변위벡터를 의미한다.

지표면과 연약대층과의 각도가 30°인 모델 A의 경우, 터널에서 연약대층까지의 이격거리가 1.0 D까지는 원지반에서 발생하는 변위와 연약대층에서 발생하는 변위가 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 두 경계지역인 불연속면에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 지표면에 큰 상재하중이 있는 경우 이러한 불연속면에서의 미끄러짐 파괴를 주의하여야 할 것으로 판단된다.

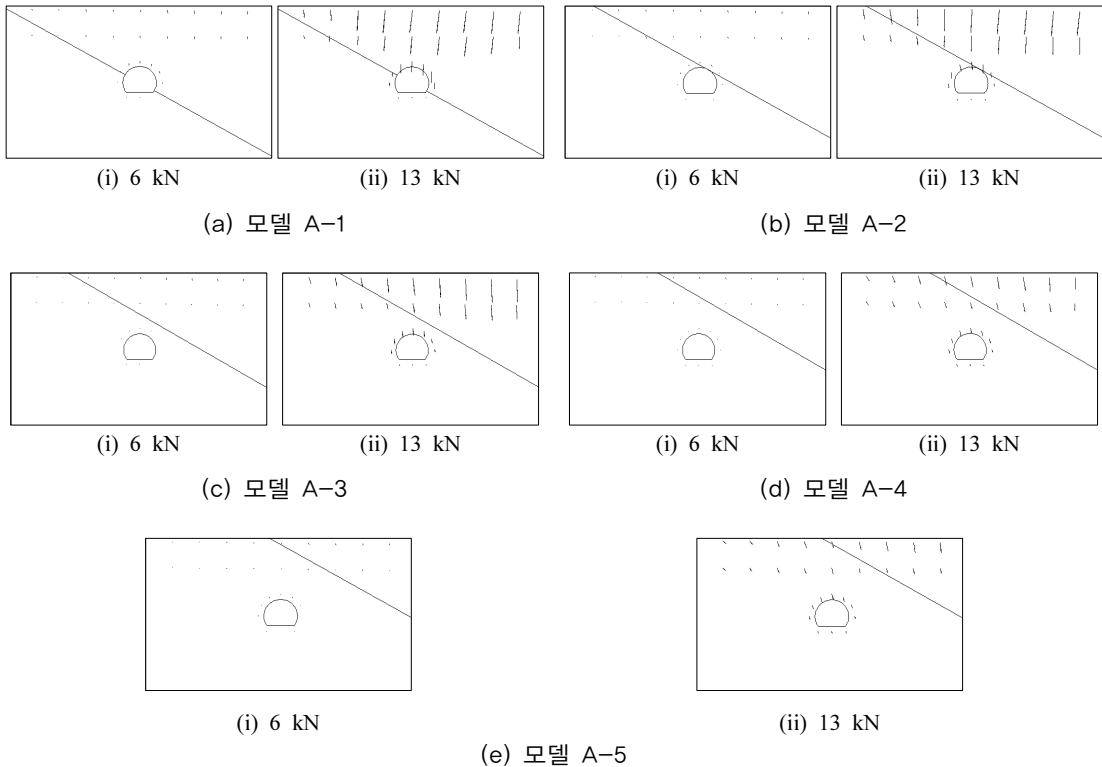


그림 4. 모델 A

그러나 지표면과 연약대층과의 각도가 90° 인 모델 D의 경우는 비슷하면서도 다소 다른 경향을 보이고 있다. 터널에서 연약대층까지의 이격거리가 $1.0 D$ 까지는 연약대층에서 발생하는 변위가 다소 많이 발생하는 현상은 모델 A와 유사하나, 그 차이가 $1.5 D$ 를 넘어서면서 매우 감소하고 따라서 모델 D인 경우 일정 이격거리를 확보하면 연약대층의 영향이 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 자세한 현상은 후술하고자 한다.

3.2 굴착 단계별 변위량

모델 A~D에 대하여 대표적으로 터널과 연약대층과의 이격거리가 $1.0 D$ 인 경우에서 굴착 단계별 주요 지점의 누적 변위량을 그림 6에 나타내었다. 주요 지점은 그림 3을 참조하여 터널 좌측 측벽부(1), 터널 좌측 상단부(2), 터널 천단부(3), 터널 우측 상단부(4), 터널 우측 측벽부(5)의 5개 지점으로 선정하였고, 터널 굴착 직후(상재하중 6 kN 단계)로부터 각 하중 단계별로 측정된 누적 변위량을 그래프로 나타내었다.

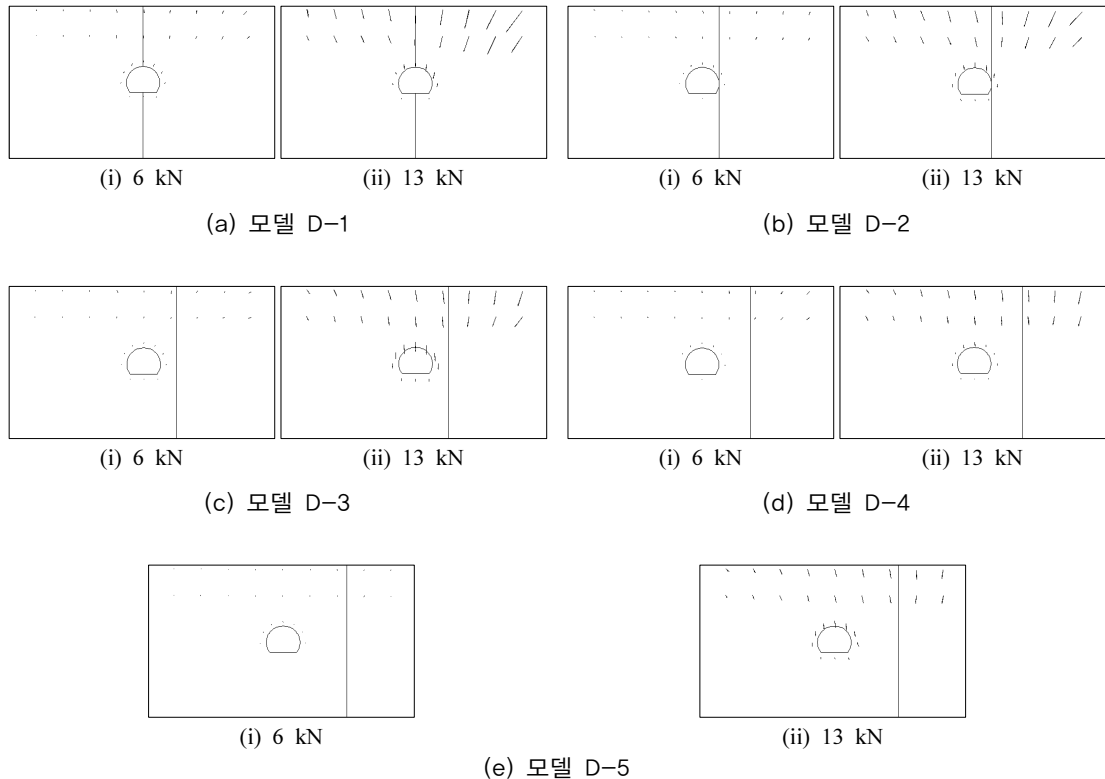
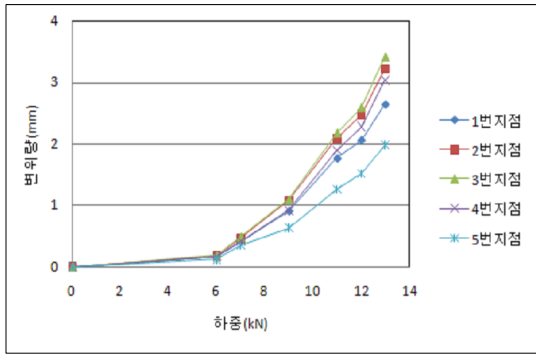
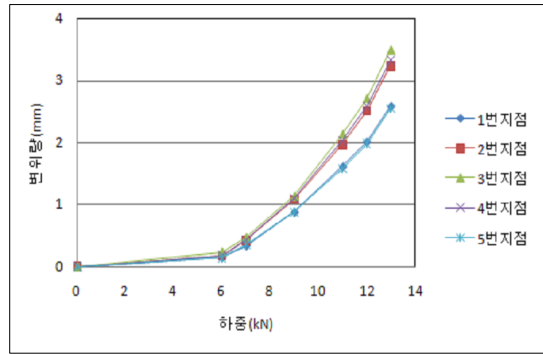


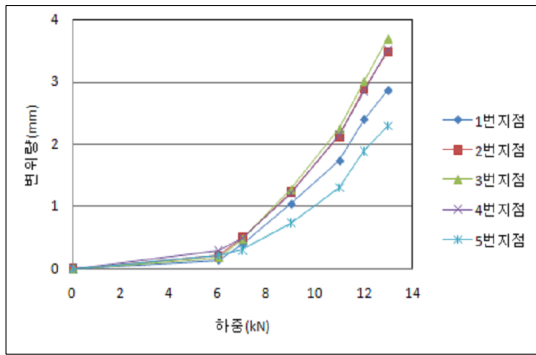
그림 5. 모델 D



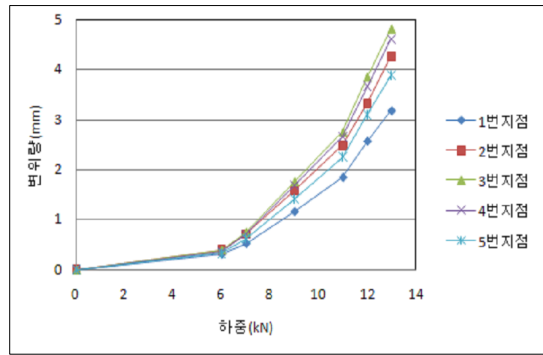
(a) 모델 A-3



(b) 모델 B-3



(c) 모델 C-3



(d) 모델 D-3

그림 6. 굴착 단계별 누적 변위량

굴착 단계별 변위량을 조사하여 본 결과, 터널 굴착 직후(상재하중 6 kN 단계)에서는 변위가 상대적으로 작아 지점(위치)별로 큰 차이를 보이지 않지만, 하중이 점차 증가하면서 모델에 따라 지점별로 변위량의 차이를 보였다. 모델 A는 3번 > 2번 > 4번 > 1번 > 5번의 지점 순으로, B와 C는 3번 > 4번 > 2번 > 1번 > 5번의 지점 순으로, 모델 D는 3번 > 4번 > 2번 > 5번 > 1번의 지점 순으로 변위량이 크게 나타났다. 모델 B와 C에서는 터널 천단부인 3번 지점이 가장 크고 터널 상단부인 4번 지점과 2번 지점은 비슷하게 나타났으나, 모델 D에서는 터널 상단부인 4번 지점과 2번 지점 역시도 큰 차이가 나타났고, 모델 A에서는 오히려 2번 지점이 4번 지점보다 크게 나타났다. 또한, 터널 측벽부인 1번 지점과 5번 지점은 모델 A, B, C에서는 1번 지점이 더 크게 나타났으나, 모델 D에서는 5번 지점이 더 크게 나타났다.

3.3 초기 균열 및 최종 파괴 양상

모델 A~D에 대하여 대표적으로 터널과 연약대층과의 이격거리가 1.0 D인 경우에서 초기 균열 및 최종파괴 양상을 각각 그림 7~그림 10에 나타내었다. 각 모델에 대하여 균열 및 파괴 양상을 분석해보면, 모델 A는 그림 7에 보인바와 같이 상재하중 15 kN 단계에서 연약대층으로부터 균열이 발생하였고, 상재하중 16 kN 단계에서 터널의 좌측 측벽부 방향으로 균열이 발생하며 파괴되었다. 모델 B는 그림 8에 보인바와 같이 상재하중 19 kN을 가한 후 15분 경과했을 때 연약대층에 균열이 발생하였고, 17분 뒤에 연약대층이 무너지며 터널 하부에 균열이 발생하여 파괴되었다. 모델 C는 그림 9에 보인바와 같이 상재하중 20 kN 단계에서 터널 우측으로부터 미세균열이 발생하여 상재하중 21 kN 단계에서 터널 우측의 균열이 연약대층 파괴와 연결되고, 터널 좌측에서도 균열이 발생하며 파괴되었다. 모델 D는 그림 10에 보인바와 같이 상재하중 19 kN 단계에서 터널 하부에 미세한 균열이 발생하였고, 상재하중 21 kN 단계에서 터널 우측의 균열이 연약대층 파괴와 연결되고, 터널 좌측의 상단부와 하단부에서 각각 균열이 발생하며 파괴되었다.

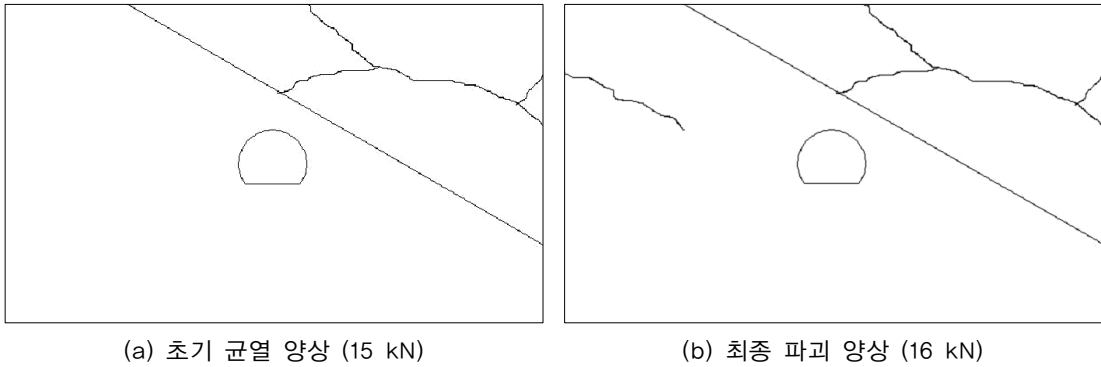


그림 7. 모델 A-3

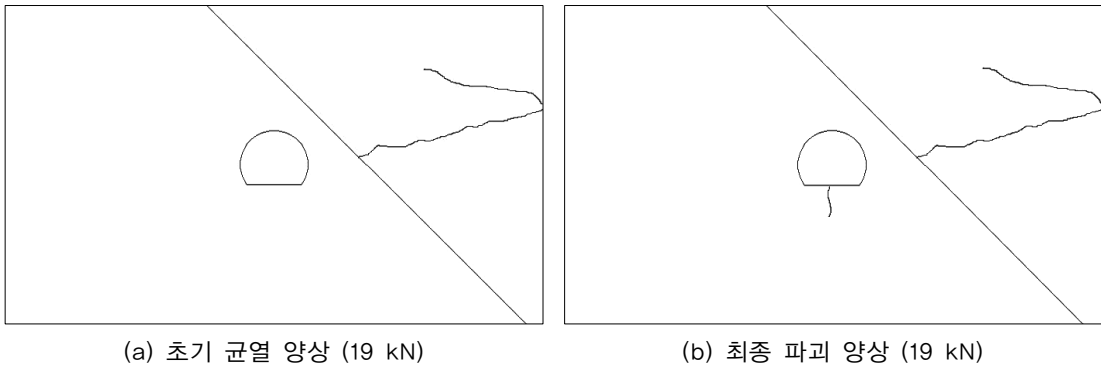


그림 8. 모델 B-3

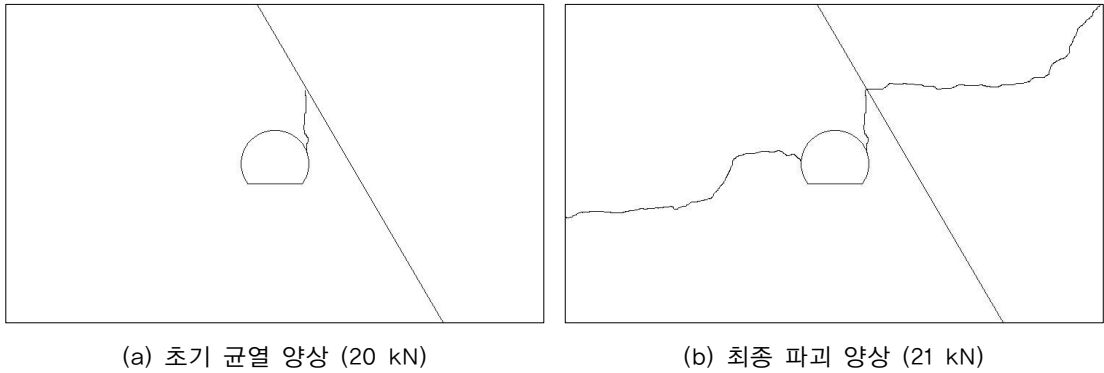


그림 9. 모델 C-3

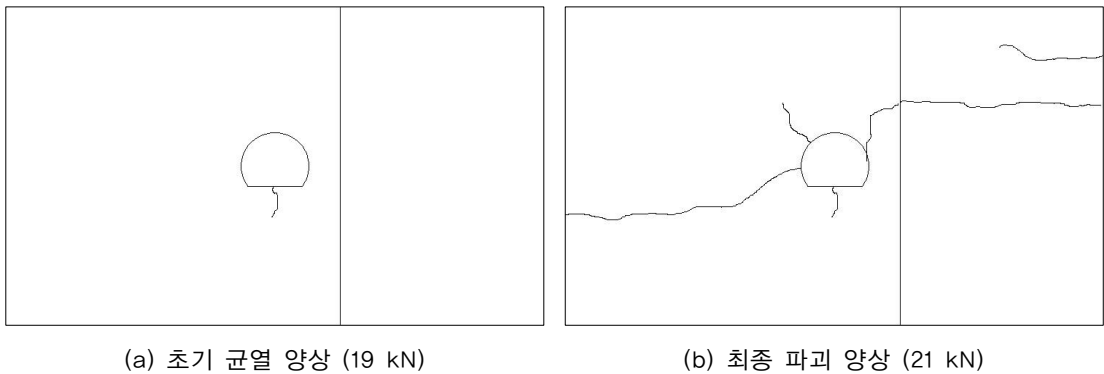


그림 10. 모델 D-3

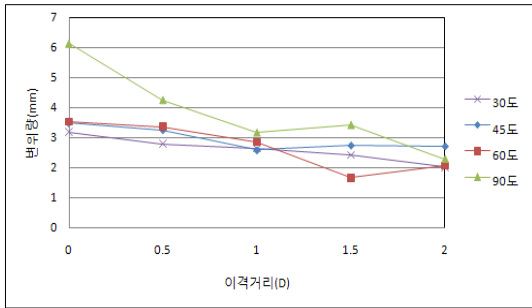
모델 A와 B는 연약대층에서 먼저 균열이 발생 한 후에 원지반(터널 주변)에서도 파괴가 이루어졌지만, 모델 C와 D는 원지반에서 먼저 미세균열이 발생한 후에 파괴되어 차이를 보였다. 이는 지표면과 연약대층이 이루는 경사각이 작을수록 하중을 가압하는 상부에서 보다 넓은 연약대층이 직접 하중을 받아 기인한 것으로 판단된다.

4. 축소 모형실험 결과 분석

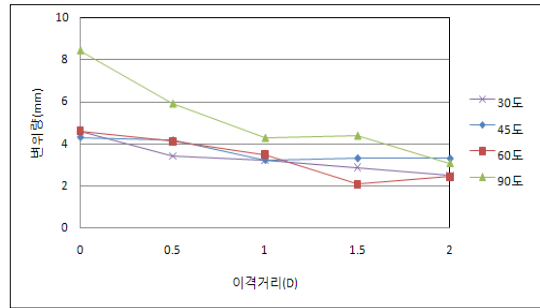
4.1 연약대층이 지표면과 이루는 각도 변화에 따른 터널 거동 분석

연약대층이 지표면과 이루는 각도 변화에 따른 터널 거동을 분석하기 위하여 각 하중단계에서 터널 주변의 주요 5개 지점(그림 3)의 변위량 변화를 조사·분석하였다. 본 논문에서는 여러 하중 단계 중에서 대표적으로 상재하중 13 kN 단계에서 각 지점별 변위량을 그림 11에 나타내었다.

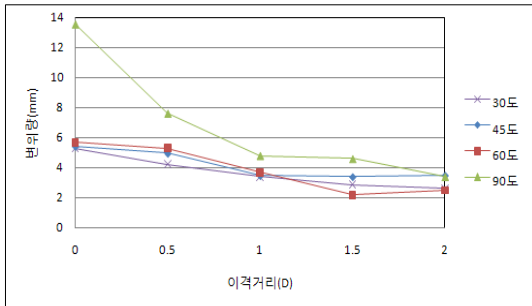
상재하중 13 kN 단계에서는 5개 지점 모두에서 공통적인 결과를 보여주고 있다. 이격거리 1.0 D를 기준으로 그래프의 기울기가 현저히 줄어들거나 변하는 양상이 나타났는데, 1.0 D의 이격거리 이전에서 각도에 따른 변위량을 비교해보면, 대체로 지표면과 수직을 이루는 90°의 경우 변위량이 가장 크고, 큰 차이는 보이지 않지만 60°, 45°, 30°의 순으로 나타났다. 이는 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 수직에서 수평으로 작아질수록 변위 발생량이 줄어드는 경향을 보여주는 것이라 할 수 있다.



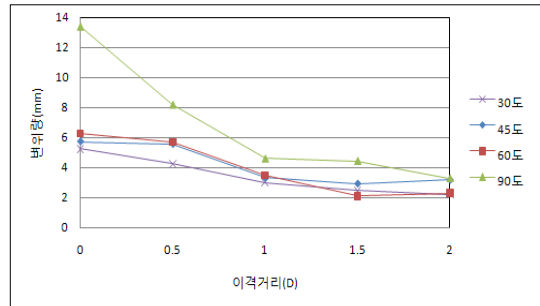
(a) 1번 지점



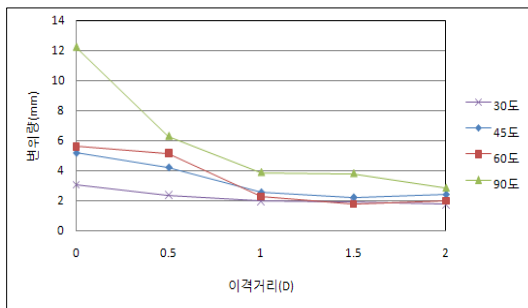
(b) 2번 지점



(c) 3번 지점



(d) 4번 지점



(e) 5번 지점

그림 11. 연약대층이 지표면과 이루는 각도 변화에 따른 변위량

각 지점별로 변위량을 분석한 결과, 연약대층과 근접한 지점인 3, 4 및 5번 지점은 대체로 연약대층이 지표면과 이루는 각도에 따라 유사한 경향을 나타냈으나, 연약대층과 비교적 떨어진 지점인 1, 2번 지점은 경향을 벗어나는 결과가 다소 나타났다. 가장 큰 변위량을 나타낸 터널 천단부인 3번 지점의 변위를 살펴보면, 30°의 경우 이격거리 0.0 D와 2.0 D에서 약 2.5 mm의 변위량 차이를 보였지만, 90°의 경우 이격거리 0.0 D와 2.0 D에서 약 10 mm의 변위량 차이를 보였다. 이 역시 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 수직에서 수평으로 작아질수록 연약대층의 영향을 덜 받는다는 근거로 볼 수 있다.

4.2 연약대층과의 이격거리 변화에 따른 터널 거동 분석

연약대층과의 이격거리 변화에 따른 터널 거동을 분석하기 위하여 각 하중단계에서 터널 주변의 주요 5개 지점(그림 3)의 변위량 변화를 조사·분석하였다. 본 논문에서는 여러 하중 단계 중에서 대표적으로 상재하중 13 kN 단계에서 각 각도별 변위량을 그림 12에 나타내었다.

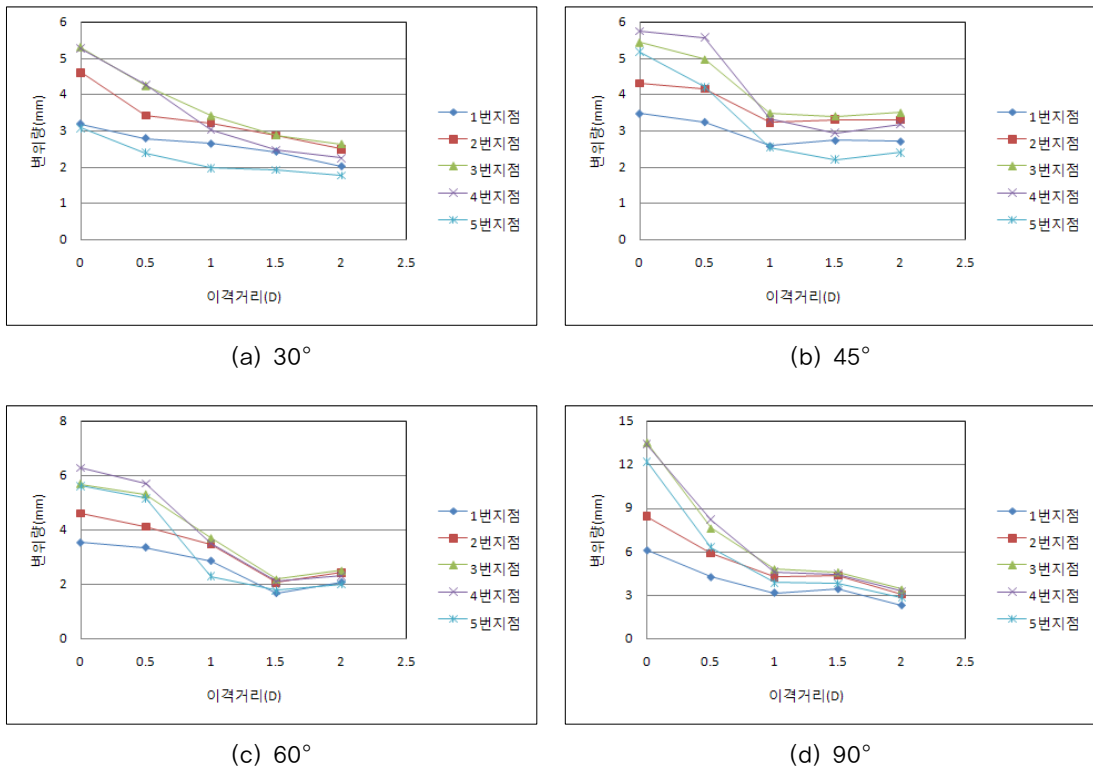


그림 12. 연약대층과의 이격거리 변화에 따른 변위량

상재하중 13 kN 단계에서의 변위 양상은 터널 굴착 직후(상재하중 6 kN 단계)와 유사하게 대체로 연약대층과의 이격거리가 커질수록 변위의 발생량이 감소하는 경향을 보였다. 특히 이격거리 1.0 D를 기준으로 그래프의 기울기가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 1.0 D를 기준으로 기울기는 줄어들었으나, 발생하는 변위량 관점에서 본다면 발생량이 더 감소하는 1.5 D의 이격거리 확보가 안정성 확보에 더 유리할 것으로 판단된다. 단, 60°의 경우를 살펴보면 1.5 D를 기준으로 그래프가 감소하다 증가하는 경향을 보이기도 하는데, 이는 실험상의 오차가 작용한 결과로 판단되지만 이 역시 1.5 D의 이격거리를 확보한다면 안정성을 확보할 수 있는 근거로 볼 수 있다.

각 지점별로 변위량을 분석한 결과, 연약대층과 근접한 지점인 3, 4 및 5번 지점은 대체로 연약대층과의 이격거리에 따라 유사한 경향을 나타냈으나, 연약대층과 비교적 떨어진 지점인 1, 2번 지점은 경향을 벗어나는 결과가 다소 나타났다. 이는 연약대층이 터널의 거동에 미치는 영향을 보여주는 결과로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과의 이격거리에 따른 터널의 거동을 파악하기 위하여 축소 모형실험을 수행하였다. 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 다른 네 가지 모형과, 연약대층과의 이격거리가 다른 다섯 가지의 모형, 총 20가지의 모형으로 실험을 진행하여 그에 따른 터널의 거동을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연약대층이 지표면과 이루는 각도 변화에 따른 터널의 거동을 분석한 결과, 대체로 지표면과 수직을 이루는 90°의 경우에서 변위량이 가장 크고, 큰 차이를 보이지는 않지만 60°, 45°, 30°의 순으로 변위량이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 수직에서 수평으로 변화할수록 발생 변위량이 줄어드는 경향을 보여주는 것이라 할 수 있다.
2. 연약대층과의 이격거리 변화에 따른 터널의 거동을 분석한 결과, 기대되듯이 대체적으로 연약대층과의 이격거리가 커질수록 변위의 발생량이 감소하는 경향을 보였다. 특히 이격거리 1.0 D를 기준으로 그래프의 기울기가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 1.0 D를 기준으로 기울기는 줄어들었으나, 발생하는 변위량 관점에서 본다면 발생량이 더 감소하는 1.5 D의 이격거리 확보가 안정성 확보에 더 유리할 것으로 판단된다.

3. 각 지점별로 발생 변위량을 분석한 결과, 연약대층과 근접한 지점에서는 연약대층의 영향을 받아 대체적으로 연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과의 이격거리에 따라 유사한 경향을 나타냈으나, 연약대층과 비교적 떨어진 지점에서는 연약대층의 영향을 받지 않는 결과를 보여주었다.
4. 본 연구의 결과는 본 연구에서 사용한 재료, 기반조건 및 실험조건에서 얻은 결론으로 현업에서 결과를 사용할 때는 현장조건과 실험조건과의 상세한 비교를 우선적으로 수행하여야 함을 밝히고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 10 기술혁신 E04). 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김도식, 김영근 (2007), “암반 필라를 포함한 비대칭 근접 병설터널의 안정성 평가에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 387-401.
2. 김상균 (2008), “확률유한요소 해석에 의한 근접터널 안정성 분석”, 한국터널지하공간학회논문집, 제10권, 제4호, pp. 349-360.
3. 김상환 (2003), “평행근접터널의 상호거동에 대한 실험 및 수치해석적 연구”, 한국지반공학학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 181-187.
4. 김종우 (2004), “축소모형실험과 수치해석에 의한 단층대 부근의 터널 안정성 연구”, 산업과학연구, 제22권, 제1호, pp. 131-138.
5. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), “지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제14권, 제1호, pp. 43-53.
6. 신영완, 김영근 (2010), “대단면 근접병설터널에서의 필러부 거동특성 검토”, 터널과 지하공간, 제20권, 제3호, pp. 131-144.
7. 안현호, 서병욱, 이석원, 김동현 (2006), “모형실험을 통한 편토압이 터널의 안정성에 미치는 영향”, 2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 554-557.
8. 안현호, 최정인, 심성현, 이석원 (2008), “축소모형실험을 통한 이격거리에 따른 근접터널의 거동”, 한국지반공학학회논문집, 제24권, 제7호, pp. 5-16.

-
9. 유충식, 송아란 (2006), “터널 근접시공이 기존터널 라이닝에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 307-324.
 10. 이홍성, 김대영, 천병식, 정혁상 (2009), “구조물 근접 터널시공 시 최적의 보강범위에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제11권, 제2호, pp. 199-211.
 11. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근 (2003), “석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지구시스템공학회지, 제40권, 제3호, pp. 147-158.
 12. Adhikary, D.P., Dyskin, A.V., Jewell, R.J., Stewart, D. P. (1997), “A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes”, Rock Mech. Rock Engrg., Vol. 30, No. 2, pp. 75-93.
 13. Fossen, H., Gabrielsen, R.H. (1996), “Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster”, Journal of structural geology, Vol. 18, No. 5, pp. 673-687.
 14. Hobbs, D.W. (1969), “Scale model study of strata movement around mine roadways. IV. roadway shape and size”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomech. Abstr, Vol. 6, pp. 305-404.