

## 편토압 및 측압이 터널거동에 미치는 영향

안현호<sup>1</sup>, 서병욱<sup>1</sup>, 김동현<sup>2</sup>, 민동호<sup>3</sup>, 이선복<sup>4</sup>, 이석원<sup>5\*</sup>

### Influence of eccentric load and lateral earth pressure on the tunnel behavior

Hyun-Ho Ahn, Byung-Wook Suh, Dong-Hyun Kim, Dong-Ho Min, Sun-Bok Lee, Seok-Won Lee

**Abstract** Scaled model tests were performed to explore the influence of eccentric load and lateral earth pressure on tunnel behavior and their results were verified through numerical analyses. As a method for reducing the eccentric load acting on tunnel, an eccentric supporting system (ESS) was proposed and its applicability was investigated. Experimental results showed that displacement decreased overall and the load inducing initial cracks increased as the eccentric supporting system was applied. The maximum eccentric vertical load which impacted the stability of tunnel was also increased. The test results on the influence of lateral earth pressure on tunnel behavior showed that the general aspect of displacement and crack growth changed significantly depending on the coefficient of lateral earth pressure. In addition, the weak zone in view of stability varied as well.

**Keywords:** Eccentric load, lateral earth pressure, scaled model test, tunnel behavior

**요지** 본 연구에서는 축소모형실험을 통하여 편토압 및 측압이 터널 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 모형실험 결과의 타당성은 수치해석을 통하여 검토하였다. 터널에 작용하는 편토압을 감소시킬 수 있는 방안으로 편향 배치된 지보구조를 제안하고 이 방안의 적용성을 검토하였다. 실험 결과, 편향 배치된 지보구조를 적용함으로써 발생하는 변위가 전체적으로 줄어들었고, 초기 균열이 발생하는 하중도 증가되었다. 또한 터널의 안정성에 크게 문제가 되는 최대 편압 수직하중 역시 증가함을 알 수 있었다. 터널에 작용하는 측압의 영향을 검토한 결과, 측압계수의 변화에 따라 변위 발생 양상 및 균열 발생 양상이 매우 변화함을 알 수 있었다. 또한, 안정성 측면에서 취약점을 나타내는 부분도 변화함을 알 수 있었다.

**주요어:** 편토압, 측압, 축소 모형실험, 터널 거동

## 1. 서론

터널 건설 시 터널 갱구부 등 지형적인 원인으로 인하여 편토압을 받을 수 있는 위치에 터널을 건설할 경우 편토압으로 인하여 터널의 안정성에 문제가 될 수 있다. 또한 편토압 지형에서 측압계수가 커서 한쪽 방향으로 수평압을 크게 받는 지역에 터널을 건설할 경우 편토압 및 측압으로 인하여 터널의 안정성에 문제가 될 수 있다. 이렇게 터널의 안정성에 문제가 되는 경우, 터널에 작용하는 편토압 및 측압을 감소시킬 수 있는 방안을 강구하여야 하며, 여러 가지 방안중의 하나로 편향 배치된 지보구조를 고려할 수 있다.

본 연구에서는 편토압 및 측압이 터널의 안정성에 미

치는 영향과 편향 배치된 새로운 지보구조의 가능성을 검토하기 위하여, 편토압을 받는 지형에서 편향 배치된 지보구조의 적용 여부와 측압계수 조건을 달리하여 축소 모형실험을 수행하였다. 또한 갱구부의 거동을 파악하고자 편토압 및 측압의 영향을 고려한 3차원 갱구부 축소 모형실험을 수행하였다. 이러한 조건을 고려하여 본 연구에서 수행한 축소 모형실험은 다음의 5가지 경우에 해당한다. 또한 본 연구에서 수행한 실험결과의 정성적 경향이 타당한지를 검토하기 위하여 실험 자체에 대한 수치해석을 병행하였다.

- Model 1: 편토압 지역에서 편향 배치된 지보구조 없이  $k=1.0$ 으로 한 2차원 축소 모형실험
- Model 2: 편토압 지역에서 편향 배치된 지보구조 없이  $k=3.0$ 으로 한 2차원 축소 모형실험
- Model 3: 편토압 지역에서 편향 배치된 지보구조를 설치하고  $k=1.0$ 으로 한 2차원 축소 모형실험
- Model 4: 편토압 지역에서 3차원 갱구부를 측압계

<sup>1</sup>건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 삼보기술단 지반사업부 이사

<sup>3</sup>정회원, 동부건설 토목사업부 상무

<sup>4</sup>정회원, 동부건설 토목설계팀 차장

<sup>5</sup>정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 조교수

\*교신저자: 이석원 (swlee@konkuk.ac.kr)

- 수,  $k=1.0$ 으로 한 3차원 축소 모형실험
- Model 5: 편토압 지역에서 3차원 갱구부를 축압계 수,  $k=3.0$ 으로 한 3차원 축소 모형실험

## 2. 모형 실험

### 2.1 현장 조건 및 모형 재료

편토압의 영향을 받는 터널의 거동은 다양한 영향인에 의하여 변화할 수 있으며 따라서 현장조건에서 가장 중요한 영향인자를 식별하여 이를 축소 모형실험에 적용하여야 한다. 본 연구대상 현장의 시추조사 및 현장 시험 결과, 단면방향 축압계수,  $k$ 가 3.0을 상회하여 축소 모형실험에서는  $k=1.0$ 과  $k=3.0$ 의 두 경우 모두를 모사하였다.

축소 모형실험에 사용되는 재료는 연구대상 현장암반의 물리적 특성을 충분히 반영할 수 있어야 한다. 이를 위하여 암반역학 연구를 위한 모형재료로 많이 사용되는 모래+석고+물의 혼합물을 사용하였다(김중우 등, 2004; 양형식과 이희근, 1990). 본 연구에서 설정한 모형재료의 목표 강도는 500 kPa 이고, 이와 같은 모형을 만들기 위하여 각 재료의 배합비를 달리하여 일축압축강도 시험을 실시하였는데, 모래:석고:물의 배합비가 2:1:1.5인 공시체를 10일간 양생시켰을 때 원하는 강도를 얻을 수 있었다.

편향 구조를 갖는 지보재의 형상은 그림 1과 같이 먼저 터널 모양을 둘러싼 얇은 띠를 기준으로 왼쪽 부분은 짧은 록볼트만을 사용하였고 오른쪽 부분은 짧은 록볼트와 긴 록볼트를 번갈아 가며 설치하였다. 록볼트에 사용한 재질은 직경 2.5 mm의 강봉이다. 비록 2.2절에서 서술하듯이 재질에 대한 차원해석을 수행한다면 록볼트의 재질이 강봉보다는 연성의 재질을 사용하여야 한다.

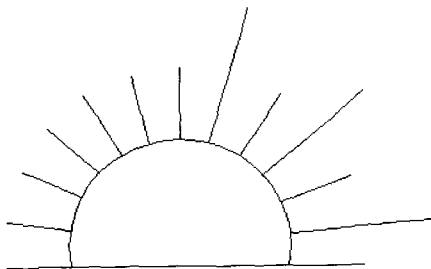


그림 1. 록볼트 형상

또한 직경에 대한 차원해석을 수행하면 일반적으로 사용되는 록볼트 SD 35 및 SD 40에 대하여 직경 0.5 mm를 사용하여야 한다. 그러나 2.3절에서 서술하는 바와 같이 록볼트를 설치하는 과정에서 연성의 재료는 성형 과정에서 휘어질 수 있는 가능성이 있다. 또한 얇은 띠에 13개의 록볼트를 용접하는 과정에서 직경 2 mm 이하의 강봉을 수직도를 유지하면서 설치하는 것은 기술적으로 어려운 상황이다. 따라서 록볼트가 성형과정에서 휘어지거나 용접과정에서 방향이 틀어지는 것을 방지하고자 현실적인 대안으로 직경 2.5 mm의 강봉을 선택하였다. 록볼트의 길이는 터널 크기의 축소율과 같게 1/75로 하여 짧은 록볼트는 7 cm, 긴 록볼트는 11 cm로 제작하였다. 록볼트의 설치간격은 좌·우가 대칭이 되도록 하였으며, 본 실험에 적용된 터널 단면 크기가 작은 관계로 록볼트 간의 중첩효과가 발생(즉, 록볼트 보강지반이 완전 강성지반으로 보강되는 효과)하는 것을 방지하도록 정성적으로 좌·우에 6개씩 총 13개를 배치하였다.

### 2.2 차원 해석

원지반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소 모형실험을 실시할 때 현장조건이 충분히 구현될 수 있도록 하기 위해서는 원지반과 축소 모형간의 상사성(차원 해석)을 실시해야 한다. 세 가지 기본 차원을 길이[L], 질량[M], 시간[T] 이라고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정한 후 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다(Hobbs, 1969; 전석원 등, 2003).

길이에 대한 축소율은 모형의 크기(100×100×10 cm)를 고려하여 터널의 상·하·좌·우로 2D만큼 지반이 존재할 수 있도록 모형 터널의 폭을 20 cm로 정한 후 현장 터널의 폭 1,500 cm를 고려하여 1/75로 하였다.

시간에 대한 축소율은 중력가속도 일정 원리가 사용된다. 즉, 중력가속도[ $LT^{-2}$ ]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식 (1)에 의하여 시간[T]의 축소율은 1/8.66이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \quad (1)$$

모래+석고+물의 혼합물의 밀도는 13.5 kN/m<sup>3</sup> 이고 연구 대상 원지반의 밀도는 21.4 kN/m<sup>3</sup> 이므로 식 (2)에

의하여 밀도[ $ML^{-3}$ ]에 대한 축소율은 1/1.58이 된다.

$$\frac{M}{L^3} = \frac{13.5}{21.4} = \frac{1}{1.58} \quad (2)$$

여기서 길이[L]의 축소율은 1/75이므로 식 (2)에서 질량[M]의 축소율은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M = \frac{1}{1.58} \times L^3 = \frac{1}{1.58} \times \left(\frac{1}{75}\right)^3 = \frac{1}{6.67 \times 10^5} \quad (3)$$

여기까지 기본 차원인 길이[L], 시간[T], 질량[M]의 축소율이 결정되었다.

따라서 응력, 탄성계수, 강도 등[ $ML^{-1}T^{-2}$ ]의 축소율은 식 (4)와 같이 1/118로 구하여진다.

$$\frac{M}{LT^2} = \frac{\left(\frac{1}{6.67 \times 10^5}\right)}{\left(\frac{1}{75}\right) \times \left(\frac{1}{8.66}\right)^2} = \frac{1}{118} \quad (4)$$

### 2.3 실험 방법 및 해석 프로그램

본 연구를 수행하기 위하여 그림 2와 같이 229×193×71 cm(가로×세로×폭) 크기의 모형 토조 실험 장치를 제작하였다. 하부면은 철판으로 고정되어 있고 전·후면은 아크릴을 먼저 대고 프레임을 추가로 설치하여 하중 가압에 따른 아크릴의 휨을 방지하였으며 좌·우 측면과 상부면은 가압판으로 하중을 주었다. 특히, 편토폰을 모사하기 위하여 상부에 5개, 좌·우 측면에 각각 1개씩,

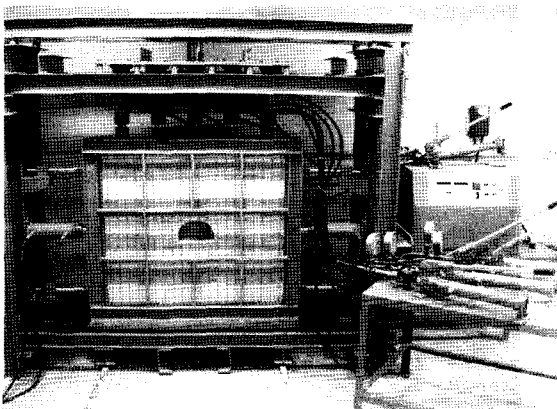


그림 2. 2차원 축소 모형실험 장치

총 7개의 유압 복동식 램을 설치하여 각각 다른 하중을 가하면서 실험을 수행하였다.

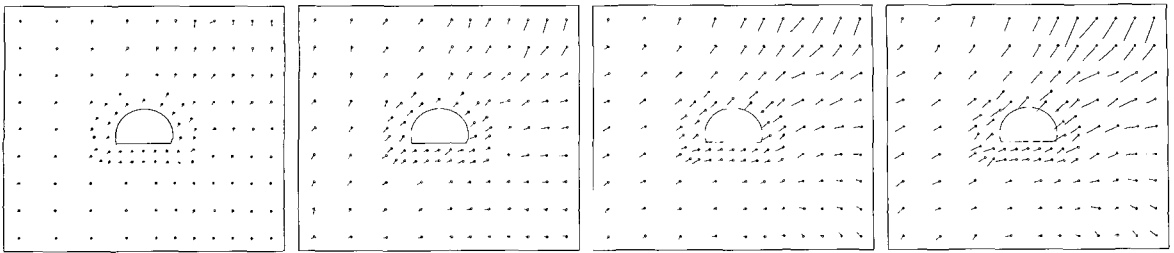
가장 먼저 모형을 배합비에 맞게 제작하여 10일간 양생시켰다. 이때 록볼트를 설치하는 경우는 모형 거푸집에 록볼트를 정확한 위치에 미리 설치하고 모형 재료를 배합한 후 거푸집에 부어 양생하였다. 전면의 프레임과 아크릴만을 제거한 후 토조장치에 모형을 거치시키고 변위를 측정하기 위하여 일정한 간격으로 포인트를 찍었다. 터널 주변과 같이 중요한 부분은 상황에 따라서 조금 더 조밀하게 포인트를 찍었다. 이는 사진측량 software인 PhotoModeler Pro 5를 이용하여 모형의 변위를 측정하기 위한 것이다. 이 작업이 완료되면 전면의 프레임과 아크릴을 조립하고 모형에 하중을 가압하게 된다.

상부의 하중 가압은 왼쪽으로부터 오른쪽으로 순차적으로 하중을 증가시켜 편토폰을 모사하였다. 측 방향 하중 가압은 왼쪽 실린더는 고정시키고 오른쪽 실린더만 단계별로 50 kPa씩 증가시켜 나갔다. 이와 같이 하중을 50 kPa씩 증가시키면서 각 단계마다 디지털 카메라로 사진촬영을 하여 PhotoModeler Pro 5로 변형 양상을 분석했다.

2차원 평면 변위를 추적하기 위해 기존의 변위계를 이용한 방법은 설치의 어려움과 좁은 계측 범위로 적용에는 한계가 있었다. 본 실험에서 상재 하중에 대해 각 부분의 정확한 변위와 거동 양상을 추적하기 위해 EOS Systems에서 개발한 사진측량 software인 PhotoModeler Pro 5를 사용하였다. PhotoModeler Pro 5는 삼각측량 원리를 이용하여 타겟의 위치를 추적해내는 프로그램으로써 일반적인 고해상도 카메라를 이용할 때 1/5000의 정확도를 보이며, 본 연구에서는 최소 계측한계를 0.01 mm로 설정하였다. 또한 AutoCAD는 물론 3D 렌더링 하는 대부분의 소프트웨어로 파일 전송이 가능해 그 적용 범위가 매우 넓다는 장점이 있다.

### 3. 모형실험 결과

실험 수행 결과는 벡터로 나타내었는데 실제 변위량이 다소 작아 8배로 확대하였다. 그림 3~7은 각 모델별 하중 단계에 따른 변위 벡터이다. 여기서 주목할 점은 동그란 점이 변형의 시작점이라는 것이다.



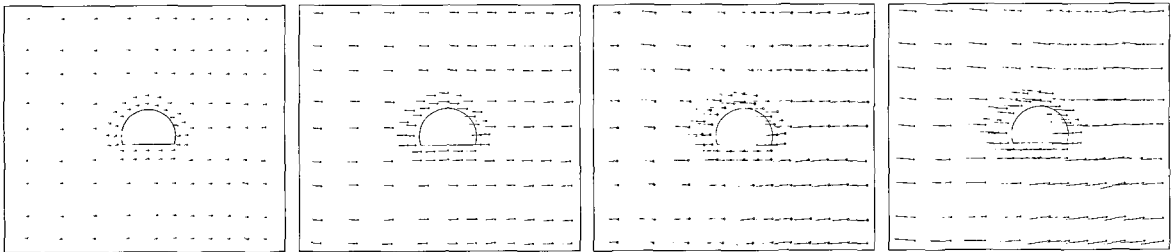
(a) 수직하중 = 100 kPa

(b) 수직하중 = 300 kPa

(c) 수직하중 = 400 kPa

(d) 수직하중 = 500 kPa

그림 3. Model 1의 변위벡터



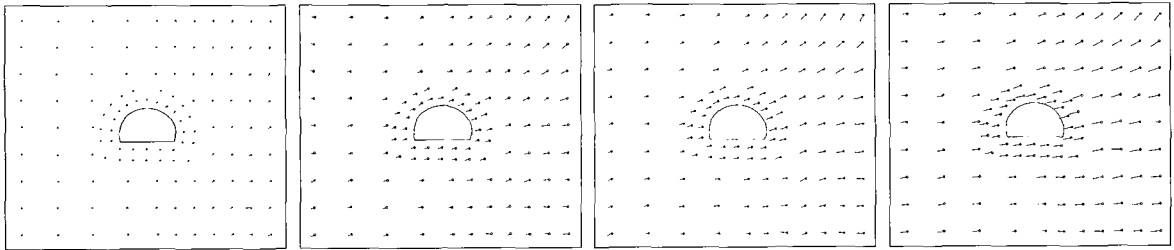
(a) 수평하중 = 200 kPa

(b) 수평하중 = 300 kPa

(c) 수평하중 = 400 kPa

(d) 수평하중 = 500 kPa

그림 4. Model 2의 변위벡터



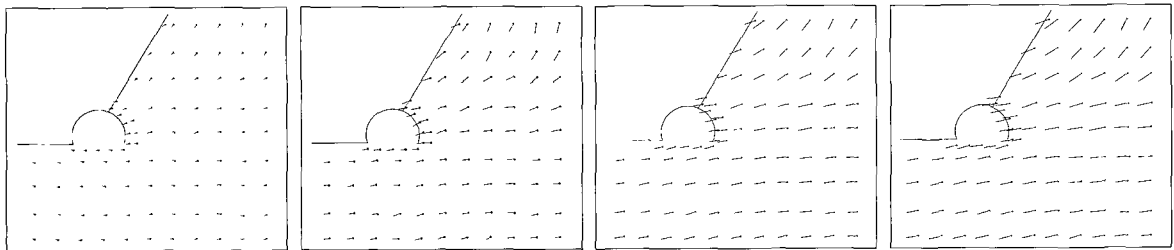
(a) 수직하중 = 100 kPa

(b) 수직하중 = 300 kPa

(c) 수직하중 = 400 kPa

(d) 수직하중 = 500 kPa

그림 5. Model 3의 변위벡터



(a) 수직하중 = 100 kPa

(b) 수직하중 = 300 kPa

(c) 수직하중 = 400 kPa

(d) 수직하중 = 500 kPa

그림 6. Model 4의 변위벡터

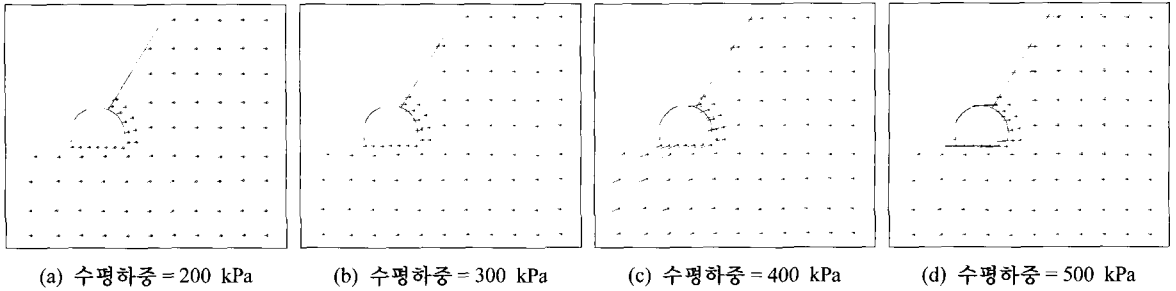


그림 7. Model 5의 변위벡터

### 3.1 편향 배치된 지보구조의 가능성 검토

편토압 지역에서 편향 배치된 지보구조의 가능성을 검토하기 위하여 Model 1과 Model 3의 결과를 비교·분석하였다.

Model 1의 초기 균열이 200 kPa의 최대 편압 수직하중에서 나타난 반면 Model 3은 400 kPa의 최대 편압 수직하중에서 초기 균열이 나타났다. Model 1의 파괴는 최대 편압 수직하중이 400 kPa일 때 일어났고, Model 3은 500 kPa의 최대 편압 수직하중에서도 적은 수의 균열만 일어나 Model 1보다 더 높은 지반압에서도 견딜 수 있어, 편향 배치된 지보구조가 편압을 받는 지형의 안정성을 증가시키는 하나의 방법임을 정성적으로

판단하였다.

또한, 그림 8에서 보는 바와 같이 터널 지보재를 편향 배치함으로써 변형량이 현저히 감소함을 알 수 있다. 예를 들어, 최대 편압 수직하중 500 kPa에서 편향배치를 하지 않은 Model 1의 천정부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 4.5 mm 및 4.1 mm인데 반하여 지보재를 편향 배치한 Model 3의 천정부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 0.3 mm, 3.0 mm로 나타나 변형량이 감소함을 알 수 있다. 또한, 최대 편압 수직하중 500 kPa에서 편향배치를 하지 않은 Model 1의 우측 어깨부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 4.7 mm 및 4.4 mm인데 반하여 지보재를 편향 배치한 Model 3의 우측

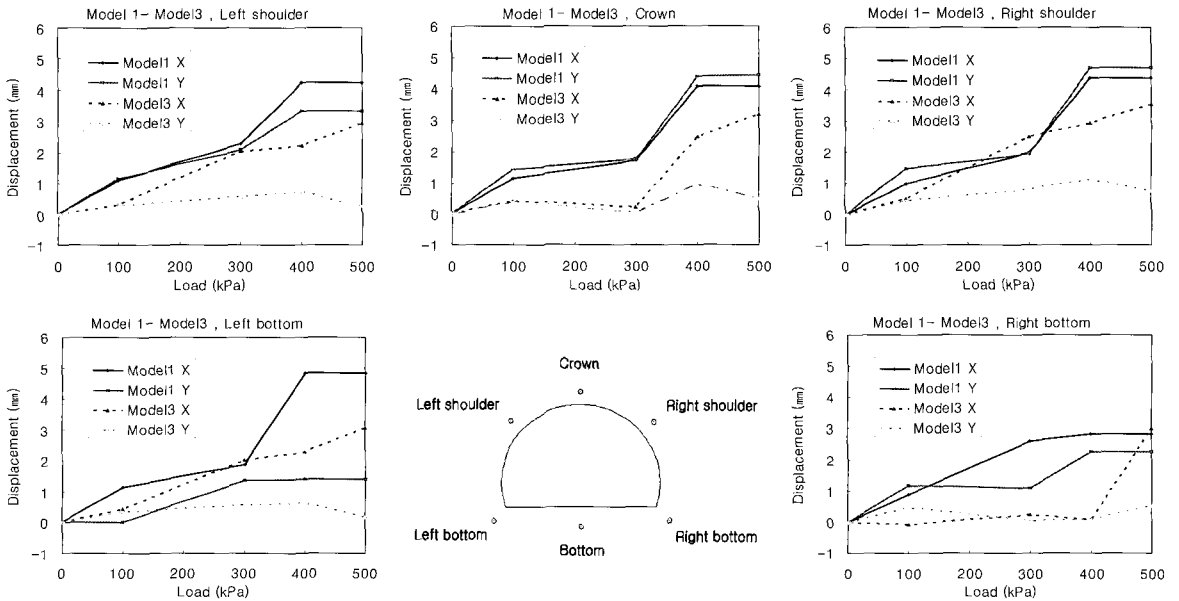


그림 8. Model 1과 Model 3의 위치별 변위 발생량 비교

어깨부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 0.7 mm, 3.7 mm로 나타나 변형량이 감소함을 알 수 있다.

상기한 바와 같이 지보구조를 편향 배치함에 따라 수평변위도 감소하나 무엇보다 수직변위가 크게 감소하여 전체적으로 터널 내공변위가 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 터널주변 다른 위치에서도 유사한 변형 양상을 나타내었다.

단, 모사재료를 사용한 모형실험결과는 일반적으로 산출되는 변위 및 하중을 실제 현장에 직접적으로 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 다만 몇 개의 모델에 대한 실험결과와 상대비교를 통하여 상호간의 정성적 비교만이 가능하다고 판단된다. 따라서 본 논문에서 제시되는 실험결과는 상호 비교 또는 정성적인 경향만을 나타내는 한계를 가지고 있음을 밝혀두고자 한다. 결국 편토압 지역에서 편향 배치 지보구조의 적용성 역시 정성적 판단으로 적용가능성이 있음을 제시하고자 한다.

한편, 축소 모형실험을 통하여 나타난 초기 균열은 두 모델 모두 터널 주변이 아닌 모형의 우측 상부에서 발생했지만 최종 파괴시에는 터널의 우측 상부와 균열이 이어졌다. 초기 균열이 모형의 우측 상부에서 먼저 발생한 이유는 편토압을 모사하기 위해 가입판을 5개로 나누게 되어 결국

가입판과 인접 가입판 사이에 1 cm 정도 공간이 생기게 되었고 이것이 이상 균열의 원인이 된 것으로 판단된다.

### 3.2 편토압 지역에서 측압 계수의 영향 검토

편토압 지역에서 측압계수가 큰 경우 한쪽 방향으로 수평압을 크게 받게 되어 이는 기존의 터널 거동 양상과 다르므로 측압계수,  $k=1.0$ 인 Model 1과  $k=3.0$ 인 Model 2의 결과를 비교·분석하였다.

먼저 Model 1의 경우 균열이 터널의 우측 어깨부에서 먼저 발생한 반면 Model 2의 경우에는 터널의 우측 바닥부에서 가장 먼저 균열이 발생하였다. 변형 양상은 측압계수,  $k=1.0$ 인 Model 1의 경우 터널 쪽으로 갈수록 백터의 방향이 수직에서 수평으로 변하고, 측압계수,  $k=3.0$ 인 Model 2의 경우 측압이 우세하여 처음부터 변위가 왼쪽으로 향하였다. 즉, 수평(x축) 방향 변위가 우세하여 그림 4에서 보는 바와 같이 백터가 전체적으로 누워있는 것을 알 수 있다. 따라서 측압계수가 커짐에 따라 x축 변형이 우세하고 터널의 측벽보다 바닥부가 안정성 면에서 더 취약함을 알 수 있다.  $k=1.0$ 인 Model 1의 경우는 최대 편압 수직하중이 200kPa에서 최초 균열이 발생하고, 400 kPa일 때 터널의 안정성에 크게 문제가 발생

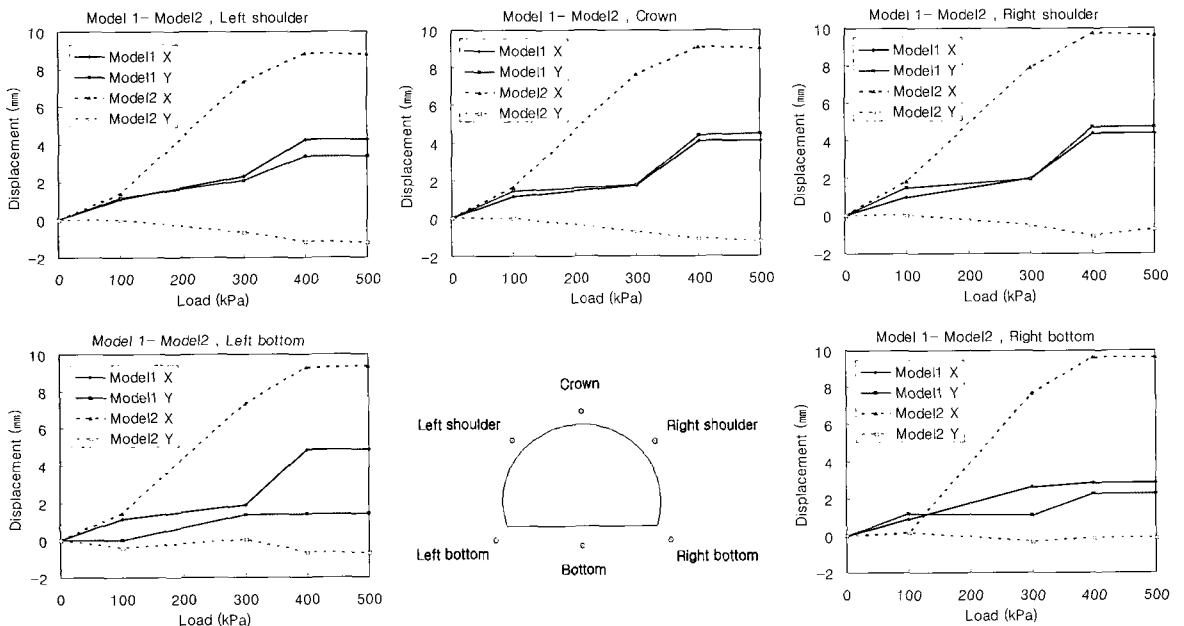


그림 9. Model 1과 Model 2의 위치별 변위 발생량 비교

하였으나,  $k=3.0$ 인 Model 2의 경우는 수평하중이 300 kPa에서 최초 균열이 발생하고, 550 kPa일 때 터널의 안정성에 크게 문제가 발생하였다.

또한, 그림 9에서 보는 바와 같이 축압을 증가시키기에 따라 터널 주변 모든 위치에서 수평방향 변위가 크게 증가함을 알 수 있다. 특히 축압이 작용하는 우측 어깨부 및 바닥부에서 수평방향 변위가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 그러나 수직방향 변위는 반대로 축압이 증가함에 따라 변형량이 감소함을 알 수 있다. 예를 들어, 최대 축압 수평하중 500 kPa에서  $k=1.0$ 인 Model 1의 천정부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 4.5 mm 및 4.1 mm인데 반하여  $k=3.0$ 인 Model 2의 천정부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 -1.1 mm(상방향 변위) 및 9.0 mm로 나타나 수평방향 변위와 수직방향 변위가 반대로 증가 또는 감소함을 알 수 있다. 또한 최대 축압 수평하중 500 kPa에서  $k=1.0$ 인 Model 1의 우측 어깨부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 4.7 mm 및 4.4 mm인데 반하여  $k=3.0$ 인 Model 2의 우측 어깨부에서의 수직 및 수평방향 변형량은 각각 -0.7 mm(상방향 변위), 9.5 mm로 나타나 수평방향 변위와 수직방향 변위가 반대로 증가 또는 감소함을 알 수 있다.

상기한 바와 같이 축압을 증가시키기에 따라 축압이 작용하는 우측 어깨부 및 바닥부에서 수평방향 변위가 매우 크게 증가하고 반대로 수직방향 변위는 축압이 증가함에 따라 변형량이 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 터널 주변 다른 위치에서도 유사한 변형 양상을 나타내었다.

### 3.3 3차원 갱구부의 거동 양상 검토

3차원 갱구부를 모사하기 위하여 이전의 2차원 실험 모델과 달리 그림 10과 같이 터널의 위치를 중앙으로부터 좌측으로 1D만큼 이동시켜 실험을 수행하였다. 이는 갱구부 뿐만 아니라 사면의 기울기를 고려하기 위한 결정이었다. 단, 본 연구에서의 3차원 실험은 하중관점에서 완전한 3차원실험은 아님을 밝히고자 한다. 그러나 전술한 2차원 실험과 조건이 다르고 일정부분 3차원의 실험결과를 유도할 수 있다는 판단에 전술한 다른 2차원 실험과의 구별을 위하여 3차원이란 용어를 사용하였다.

3차원 갱구부의 실험은 Model 4와 Model 5로서 동일한 조건에서 축압계수만을 달리하여 실험을 수행하였다. 축압계수,  $k=1.0$ 인 Model 4는 축압계수,  $k=1.0$ 으로 갈

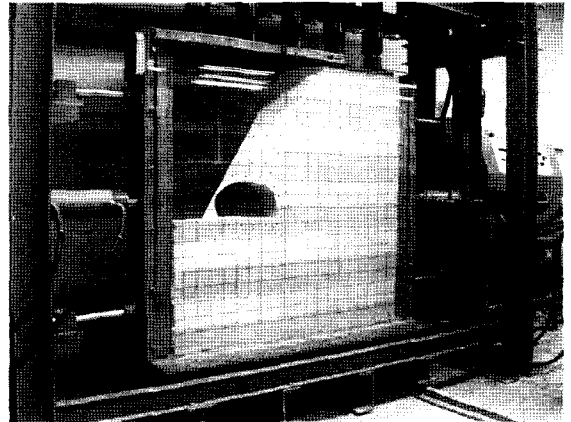


그림 10. 3차원 축소 모형실험

은 Model 1과 유사한 변형 양상을 나타내었고, 마찬가지로 축압계수,  $k=3.0$ 인 Model 5도 축압계수,  $k=3.0$ 으로 같은 Model 2와 유사한 변형 양상을 나타내었다. 축압계수가 1.0인 Model 4의 경우 터널의 우측 어깨부에 균열이 발생하였고, 축압계수가 3.0인 Model 5의 경우에는 터널의 우측 바닥부에 균열이 발생하여 2차원 모형이었던 Model 1과 Model 2와 각각 유사한 균열 양상을 보였다.

$k=1.0$ 인 Model 4의 경우는 최대 편압 수직하중이 250 kPa에서 최초 균열이 발생하고, 500 kPa일 때 갱구부의 안정성에 크게 문제가 발생하였으나,  $k=3.0$ 인 Model 5의 경우는 수평하중이 300 kPa에서 최초 균열이 발생하고, 550 kPa일 때 갱구부의 안정성에 크게 문제가 발생하였다.

본 연구에서 수행한 3차원 갱구부의 거동 양상 검토는 3차원 실험을 수행하였을 경우에 3.2절의 2차원 실험결과와의 차이점을 분석하기 위함이었다. 그러나 실험결과, 전술하였듯이 2차원 실험결과와 거의 유사하였으며 따라서 상세한 결과 서술은 생략하기로 한다. 이러한 본 실험 결과에서 나타난 바와 같이 2차원 실험결과를 3차원 실험결과에 일부 적용할 수 있음을 암시하고 있으나, 이를 검증하기 위해서는 본 연구에서 수행한 토조의 폭보다 큰 토조에서의 실험결과를 통하여 알 수 있다.

## 4. 수치해석

본 연구에서는 전술한 바와 같이 모형실험을 통하여 편토압 및 축압의 변화에 따른 터널 거동의 변화 양상을

변위관점에서 관찰하고자 하였다. 따라서 모형실험 결과의 정성적 경향은 검토되어야 하며, 이를 위하여 본 연구에서는 모형실험 자체에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과와 모형실험 결과의 정성적 경향 분석을 통하여 모형실험 결과의 타당성을 검토하였다.

#### 4.1 지반 모델 및 해석 조건

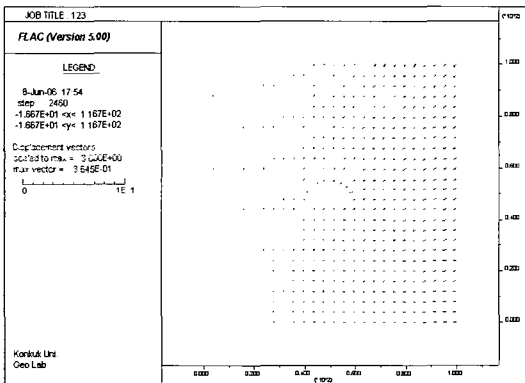
원지반의 물성치는 지반조사 결과를 통하여 설계사로부터 제공된 지반 물성치를 축소 모형실험 조건에 적합하도록 차원해석을 수행하여 사용하였으며, 결과적으로 수치해석에 사용된 원지반 물성치는 다음 표 1과 같다. 터널보강에 사용된 지보재는 표준형 록볼트로서 이는

표 1. 수치해석에 사용된 원지반 물성치

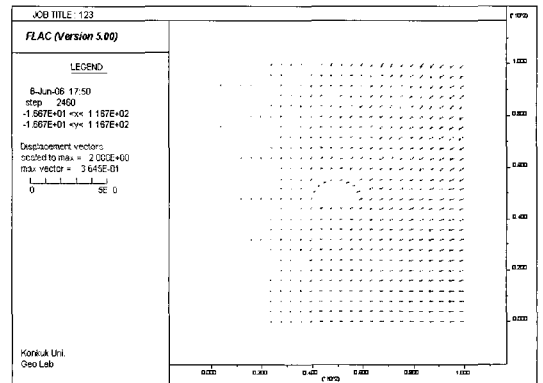
탄성계수	26,700 kPa	단위중량	1.33 kN/m <sup>3</sup>
포아송비	0.3	내부마찰각	30°
집착력	65 kPa		

표 2. 지보재 물성치

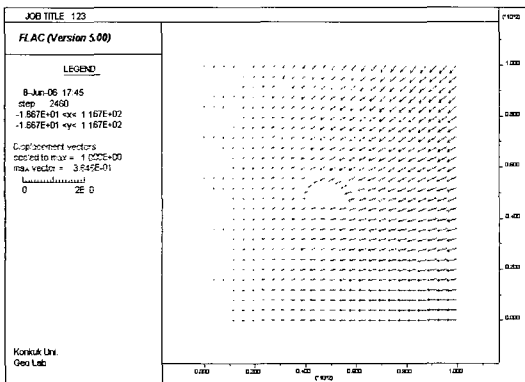
탄성계수	200,000 MPa	부착강성	15,000 MPa
단면적	5 cm <sup>2</sup>	부착강도	80 MPa



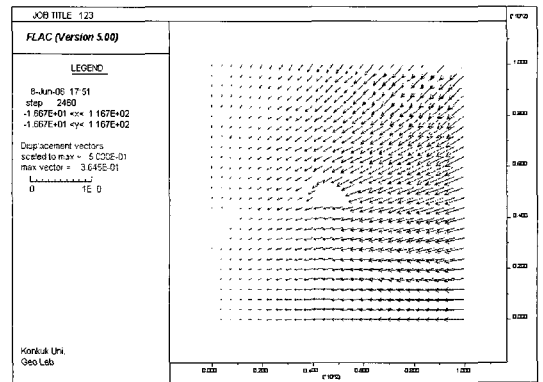
(a) 수직하중 = 100 kPa



(b) 수직하중 = 300 kPa



(c) 수직하중 = 400 kPa



(d) 수직하중 = 500 kPa

그림 11. 수치해석 결과 - Model 1



FLAC 에서 제공되는 록볼트 물성의 기본값을 사용하였다. 물성값은 다음 표 2와 같다.

모형 크기는 축소 모형실험의 조건과 같이 가로×세로의 길이를 각각 100×100 cm로 설정하였다. 또한 변위의 관측이 용이하도록 그리드의 간격을 다소 크게 하였으며, 결과 보정을 위하여 그리드 간격을 조밀하게 하여 수치해석을 실시한 결과와 비교하여 정성적인 부분에서 동일한 양상을 나타내는 것을 확인하고 최종 결과로 사용하였다. 또한 경계조건은 해석영역 하부와 좌측부를 각각 y와 x축 방향에 대하여 변위를 고정하여 수행하였다.

#### 4.2 수치해석 결과

대표적으로 Model 1의 수치해석 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 보인 바와 같이 수치해석 결과는 전술한 축소 모형실험의 결과와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 편토압을 받는 터널 주변지반의 변위 해석 결과, 해석영역 하부의 오른쪽에서 왼쪽방향으로 완만한 포물선을 그리며 발생하는 변위는 해석영역 하부와 좌측부의 경계조건에 의하여 변위가 구속됨으로 발생하는 반력이 원인인 것으로 판단된다. 그러므로 그와 같은 경계조건이 터널 주변지반의 변위 양상에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉, 축소 모형실험을 통한 변위 관측에서도 이와 동일한 구속조건을 사용하고 결과에서도 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다.

결론적으로 모형실험과 수치해석의 두 결과를 비교하여 보면, 변형 절대량에서는 다소의 차이가 있으나 정성적인 변위 양상은 거의 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 본 연구의 경우, 변형 절대량은 수치해석 시 사용되는 물성치(모형 재료의 물성치)의 조정에 의해서 조절이 가능함을 고려해 볼 때, 본 과업에서 수행한 축소 모형실험은 타당하게 이루어졌다고 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 축소모형실험을 통하여 편토압 및 측압이 터널 거동에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 모형실험 결과의 타당성은 수치해석을 통하여 검토하고자 하였다. 터널에 작용하는 편토압을 감소시킬 수 있는 방안으로 편향 배치된 지보구조를 제안하고 이 방안의 적

용성을 검토하고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 편향 배치된 지보구조의 가능성을 검토한 결과, 편향 배치된 지보구조를 적용함으로써 발생하는 변위가 전체적으로 줄어들었고, 초기 균열이 발생하는 하중도 증가되었다. 또한 터널의 안정성에 크게 문제가 되는 최대 편압 수직하중 역시 증가함을 알 수 있었다. 따라서 지형적인 요인 등으로 인하여 편토압이 작용하는 경우, 편향 배치된 지보구조와 같은 대책공법을 적용함으로써 터널의 안정성을 증가시킬 수 있다고 판단된다.
2. 편토압 지역에서 측압계수의 영향을 검토한 결과, 측압이 커짐에 따라 수평방향 변형이 우세해지고 초기 균열 발생 위치가 터널의 우측 어깨부에서 바닥부로 이동하여 터널의 측벽보다 바닥부가 안정성 면에서 더 취약함을 알 수 있다. 또한 측압이 커짐에 따라 측압이 작용하는 우측 어깨부 및 바닥부에서 수평방향 변위가 매우 크게 증가하고 반대로 수직방향 변위는 측압이 증가함에 따라 변형량이 감소함을 알 수 있다.
3. 3차원 갱구부의 거동 양상을 3차원 축소모형실험으로 검토한 결과, 2차원 축소 모형실험과 유사한 결과를 얻었다. 이는 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 2차원 실험결과를 3차원 실험결과에 일부 적용할 수 있음을 암시하고 있으나, 이를 검증하기 위해서는 보다 대규모의 3차원 모형실험이 필요하다고 판단된다.
4. 수치해석 결과, 축소 모형실험의 결과와 유사한 경향을 나타내어 본 연구에서 수행한 축소 모형실험이 타당하게 이루어졌다고 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(04 핵심기술 C01)과 삼보기술단 및 동부건설에 의하여 연구비가 지원된 연구로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김종우, 전석원, 서영호 (2004), “지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제14권 제1호, pp. 43-53.
2. 양형식, 이희근 (1990), “이방성 암반내 공동 굴착과정에서의 주위 암반거동에 대한 축척 모형실험 및 수치해석”, 한국자원공학회지, 제27권 제6호, pp. 390-411.
3. 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근 (2003), “석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지구시스템공학회지, 제40권 제3호, pp. 147-158.
4. 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.



안 현 호

건국대학교  
사회환경시스템공학과  
석사과정  
E-mail: nadans@daum.net



서 병 옥

건국대학교  
사회환경시스템공학과  
석사과정  
E-mail: kismar@hanmail.net



김 동 현

삼보기술단  
지반사업부  
이사  
E-mail: k7419@chol.com



민 동 호

동부건설  
토목사업부  
상무  
E-mail: dhmin@dongbu.co.kr



이 선 복

동부건설  
토목설계팀  
차장  
E-mail: leesb111@dongbu.co.kr



이 석 원

건국대학교  
사회환경시스템공학과  
교수  
E-mail: swlee@konkuk.ac.kr