

## 복개 터널구조물의 현장 시공에 따른 계측 분석 사례

이석원<sup>1)</sup>, 박시현<sup>2)</sup>, 최순욱<sup>3)</sup>, 배규진<sup>4)</sup>

### Analysis on the Field Measurements with the Construction of Cut and Cover Tunnel

Seok-Won Lee, Si-Hyun Park, Soon-Wook Choi, Gyu-Jin Bae

**Abstract.** Field measurements were carried out in this study to investigate the behavior of cut and cover tunnel such as the distribution and the magnitude of the earth pressure during back fill process. Three kinds of measuring instruments, such as the earth pressure load cell, the concrete strain gauge and the reinforcing bar meter of embedded type in concrete structure were installed and measured. Earth pressure load cells measured the outside forces acting on the tunnel lining with radial directions. Three load cells were installed at the crown, the right and the left shoulder of the tunnel, respectively. Three sets of reinforcing bar meter were installed in the double reinforcements of the tunnel lining and their locations were the same with the position of the earth pressure load cells. Concrete strain gauge was installed only one site of the upper compressive part at the tunnel crown. Based on the measurements, the deformation and the earth pressure acting on the tunnel lining were investigated with the back fill process. Considerations on the validity of the field measurements were paid.

**KeyWords:** Cut and cover tunnel, Field measurement, Earth pressure, Tunnel lining

**초 록.** 본 연구에서는 복개 터널구조물의 라이닝 설치 후 되메움 성토과정에서 라이닝에 발생하는 토압 크기 및 분포 등의 거동특성을 파악하기 위하여 실제 복개 터널구조물의 시공현장에서 현장 계측을 수행하였다. 현장 계측은 토압계, 콘크리트 응력계, 철근 응력계의 세 종류의 계측기를 매설하여 측정하였다. 토압계는 라이닝의 원주방향을 따라 매설하며 터널 라이닝에 작용하는 외부 하중을 측정하였다. 세 개의 토압계는 천단부와 터널 횡단면의 중심축을 기준으로 좌·우측 어깨부 45도 지점에 각각 설치하였다. 철근 응력계는 라이닝에 배근된 복철근에 한 셋트씩 세 곳에 설치하였으며 설치 위치는 토압계의 설치 위치와 동일하게 하였다. 콘크리트 응력계는 천단부 상단 압축측 단면의 한 곳에만 설치하였다. 현장 계측 결과를 이용하여 되메움 성토 과정에 발생하는 라이닝의 변형과 라이닝 외부 작용 토압의 거동 특성을 살펴보았으며, 이론적 추론으로 계측결과의 타당성을 검토하였다.

**핵심어:** 복개 터널구조물, 현장계측, 토압, 터널 라이닝

## 1. 서 론

본 연구에서는 복개 터널구조물의 되메움 성토 과정 중에 라이닝에 발생하는 토압분포 및 크기 등의 거동 특성 파악과 복개 터널구조물의 안정성에 영향을 미치는 외부 하중(배규진과 이규필, 2001) 및 라이닝 응력

을 측정하기 위하여 실제 복개 터널구조물의 시공현장에서 현장 계측을 실시하였다(佐藤 and 岩崎, 1981; Demetrious et al., 2000; Karl et al., 1999). 현장 계측을 실시하기에 앞서 현장 단면에 대한 개략적인 수치 해석을 수행하였으며(이규필등, 2002; 한국건설기술연구원, 1998), 수치해석 결과를 참조하여 계측기의 선정 및 설치 위치를 선정하였다(유건선, 1997; 한국지반공학회, 1999). 현장 계측은 세 종류의 계측기를 사용하였으며, 각각 토압계 세 곳, 철근 응력계 여섯 곳 그리고 콘크리트 응력계 한 곳을 선정하였다. 토압계는 라이닝의 원주방향을 따라 매설하며 터널 라이닝

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원  
<sup>2)</sup>한국시설안전기술공단 진단 1본부 지하시설설 과장  
<sup>3)</sup>한국건설기술연구원 지반연구부 연구원  
<sup>4)</sup>한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장  
접수일: 2003년 3월 24일  
심사 완료일: 2003년 4월 14일

의 콘크리트가 타설된 후 터널 상부 단면에 반경 방향으로의 토압을 측정하였다. 설치 위치는 천단부와 터널 횡단면의 중심축을 기준으로 좌·우측 어깨부 45도 지점에 설치하였다. 철근 응력계는 라이닝에 배근된 복철근에 한 셋트씩 세 곳에 설치하였으며 설치 위치는 토압계의 설치 위치와 동일하게 하였다. 한편, 콘크리트 응력계는 천단부 상단 압축측 단면의 한 곳에만 설치하였다.

현장 계측 결과를 이용하여 되메움 성토 과정에서 발생하는 라이닝의 변형과 라이닝 외부 작용 토압의 거동 특성을 살펴보았다(홍성완, 1986). 또한 계측 결과의 타당성에 대한 검증은 실시하였으며 이를 위해 되메움 성토 과정을 세 단계로 구분하여 각 단계에 있어서 터널 라이닝에 미치는 각종 요인들을 분석하였다.

## 2. 시공 현장 및 계측기 설치

### 2.1 시공 현장

현재 국내에서 시공중에 있는 복개 터널구조물의 시공상황을 우선 조사하였다. 그 결과 터널 입출구부, 계곡 및 저 토피구에서 뿐만이 아니라, 사면의 붕괴 위험성 및 취약 지반대로 인해 설계 변경에 의해 복개 터널을 시공하는 사례도 함께 발견되었다. 본 연구에서는 경부 고속철도 건설구간의 복개 터널시공 현장을 계측 대상으로 선정하였으며 선정된 구간의 터널 총 연장은 2,020m에 달한다. 그 중에서 1,530m는 NATM 공법에 의하여 터널을 구축하고 나머지 490m 구간은 개착식 공법에 의한 복개 터널구조물을 구축하게 된다. 복개 터널구조물을 구축하는 490m의 구간내 일부부분에서는 천단부 토피고가 터널폭(약 12m) 이상의 구간이 존재하였기 때문에 이 구간에서는 설계 당시 NATM 공법에 의해 터널을 구축하기로 예정되어 있었다. 그러나 시공 단계에서 조사된 지반 지질상황이 풍화정도가 심한 풍화토층으로 이루어져 있음으로 인해 실 시공에 있

어서는 설계 변경을 실시하여 490m 전구간에 걸쳐 복개 터널공법을 적용하였다. 본 연구에서 현장 계측을 실시한 단면은 바로 이러한 설계 변경이 이루어진 구간 내에 존재하며, 특히 그 중에서도 굴착 규모 및 임시 굴착 사면의 규모가 가장 크고 되메움에 의한 지표면의 형상이 좌·우 비대칭을 이루는 곳을 선정하였다. Fig. 1은 계측기 매설 위치에서의 터널 횡단면도를 나타낸 것이다.

### 2.2 되메움 작업 공정

라이닝 콘크리트는 터널 종방향으로 10m를 한 span으로 구분하여 콘크리트를 타설하게 된다. 라이닝 콘크리트의 타설은 복개터널의 출구부에서 NATM 종점부를 향하여 진행하였다. 터널 라이닝의 콘크리트 타설이 점차적으로 진행되면서 되메움 성토 작업도 역시 동일한 진행 방향으로 실시되었다. 되메움 성토 작업은 복개터널의 출구부에서부터 실시하며 천단부에서의 성토고 2~3m까지와 5~6m까지로 구분하여 실시하였다. 먼저 천단부 성토고 2~3m까지는 현재 되메움 작업을 실시할 span의 전 단계 span 상부에 성토된 되메움재를 천단부 성토고 5~6m만 남기고 그 이상 부분에 대해서 불도저와 백호우를 이용하여 앞부분으로 밀어가면서 되메움을 실시하였다. 그 후 천단부 성토고 2~3m 이상에 대해서는 덤프 트럭에 의해 운반된 성토재를 직접적으로 재하하였다. 라이닝 콘크리트의 양생 후 계측기가 매설된 지점에 되메움 성토 작업이 개시된 시점은 2001년 12월 7일경이며 이하에서 서술하게 될 계측 결과는 2001년 12월 5일을 기준으로 정리하였다.

Fig. 2는 현장의 되메움 작업을 지켜보면서 계측기 매설지점의 되메움 상황을 순차적으로 나타낸 것이다. 그림에 표시되어 있는 되메움 상황은 라이닝 천단부에 이르기 전과 천단부까지 되메움 되었을 때, 그리고 천단부에서의 성토고가 각각 2m, 3m, 6m, 10m일 때를 나타내고 있다. 계측기를 매설한 단면에서의 되메움 성토

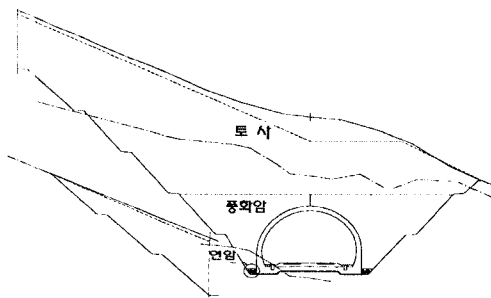


Fig. 1. Front view of cut and cover tunnel.

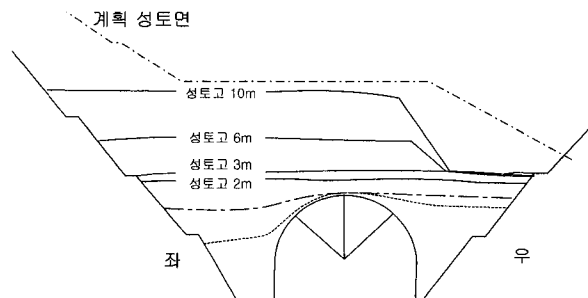


Fig. 2. Progress of back fill process.

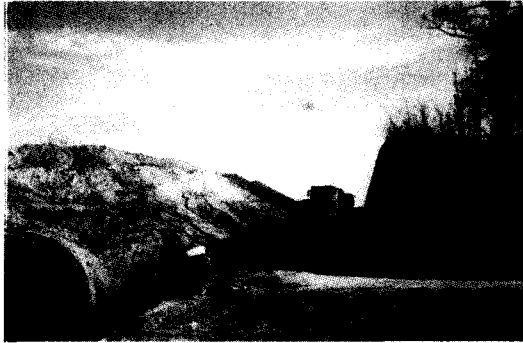


Fig. 3. Driveway for dump truck at the right side of lining.

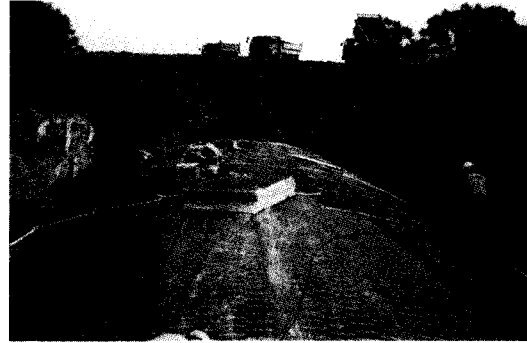


Fig. 4. Back fill process at the crown.

고는 천단부에서 13m로 예정되어 있으나, 본 연구에서는 10m 이상의 상부성토사면 형성으로 인한 편토압의 효과를 배제하여 논하고자 천단부 성토고 10m 때까지의 계측 결과만을 분석하였다. 터널 라이닝의 우측부에서는 천단부 성토고 약 3m지점에서 단을 두고 되메움을 실시하였는데 이는 현장의 작업여건을 반영한 것으로서 성토재의 운반 통로로 사용되었다(Fig. 3 참조). 라이닝 우측편을 통하여 운반되어온 되메움 성토재는 일단 라이닝 천단부 부근에 적재하게 되고 불도저는 이를 다시 전 되메움 구간에 걸쳐 펼쳐가면서 되메움 작업을 수행하였다(Fig. 4 참조). 한편, 백호우는 주로 터널 라이닝의 우측편에서 되메움 성토재를 정리하면서 운반 통로를 계속적으로 정비하는 역할을 수행하였다.

2.3 계측기 설치

현장 계측은 세가지 종류의 계측기를 사용하였으며 각각 토압계 세 곳, 철근 응력계 여섯 곳 그리고 콘크리트 응력계 한 곳을 선정하였다. 토압계는 허용범위가 5 kg/cm<sup>2</sup>인 일본 Tokyo Sokki사의 KDA-500KPA를 사

용하여 라이닝의 원주방향을 따라 매설함으로써 터널 라이닝의 콘크리트가 타설된 후 터널 상부 단면에 반경 방향으로의 토압을 측정하였다. 설치 위치는 천단부와 터널 횡단면의 중심축을 기준으로 좌·우측 45도 지점에 설치하였다. 철근 응력계는 허용범위가 3,000 kg/cm<sup>2</sup>인 일본 Tokyo Sokki사의 KS-22A 철근계를 사용하여 라이닝에 배근된 복철근에 한 셋트씩 세 곳에 설치하였으며 설치 위치는 토압계의 설치 위치와 동일하게 하였다. 한편, 콘크리트 응력계는 허용범위가  $\pm 5,000 \times 10^{-6} \mu$ 인 일본 Tokyo Sokki사의 KM-100B 콘크리트 응력계를 사용하여 천단부의 한 곳에만 설치하였다. Figs. 5 및 6은 각각 본 연구에서 사용한 각종 계측기의 매설 위치 및 설치전경을 보여주고 있다. 콘크리트 응력계 및 철근 응력계는 라이닝 콘크리트가 타설되기 전인 라이닝의 복철근이 조립된 상태에서 설치하였으며, 라이닝 토압계는 라이닝 콘크리트가 타설되고 라이닝의 강제 거푸짐을 해제한 후에 설치하였다. 철근 응력계와 콘크리트 응력계의 설치 시기는 2001년 10월 21일이며 토압계는 2001년 11월 12일에 설치하였다.

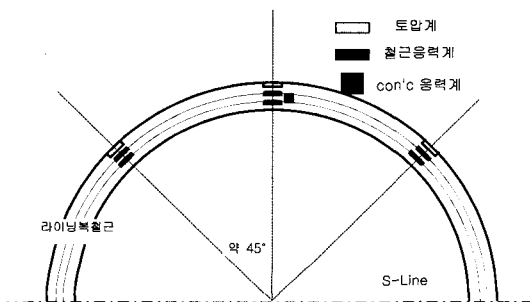


Fig. 5. Location of measuring instruments.

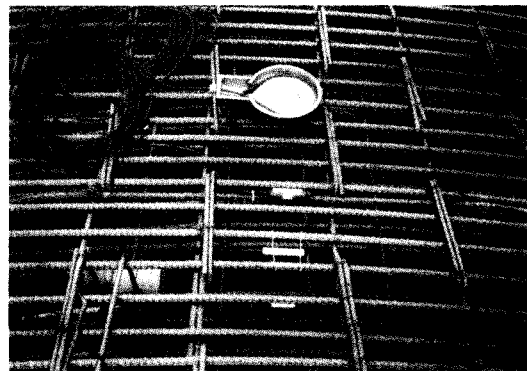


Fig. 6. Picture of measuring instruments.

3. 계측 결과

3.1 라이닝 토압계

Fig. 7은 되메움을 실시하면서 경과 시간별 라이닝 토압계의 변화를 나타낸 것이다. 그림에는 라이닝 천단부에서 되메움 성토고 2 m, 3 m, 6 m, 10 m의 시점을 각각 표시하였다. 라이닝 토압계의 계측값은 세 곳에 설치한 토압계의 증가량이 서로 다름을 알 수 있다. 천단부의 되메움 성토고가 약 3 m 지점에 이르기까지는 서로 다른 세 곳의 계측값이 거의 유사하게 증가하고 있으며 그 이후부터 증가량에 큰 차이를 보이고 있다. 라이닝 작용 토압은 라이닝 우측부에 설치한 토압계가 가장 크고 그 다음으로 천단부 토압계, 좌측부 토압계로 나타났다.

라이닝 천단부 토압계는 천단부 토피고 약 3 m 이후부터 일정하게 증가하다가 성토고 약 6 m 이후에서 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 현상을 보이고 있다. 그 후 다시 점차적으로 증가하다가 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 다시 일정한 값으로 수렴되었으며 이때의 작용 토압은 1.94 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

터널 라이닝 우측부 토압계는 천단부 토피고 약 3 m 이후부터 급격하게 증가하다가 성토고 약 6 m 이후에서 일시적으로 감소하는 현상을 보이고 있다. 그 후 다시 일정한 속도로 증가하기 시작하여 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 일정한 값으로 수렴하였다. 때 라이닝 우측부 토압계의 작용 토압은 3.67 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

한편, 터널 라이닝 좌측부 토압계는 천단부 토피고가 3 m에서 약 6 m에 이르기까지 거의 증가하지 않고 일정한 값을 보이고 있다. 그리고 천단부 성토고 6 m 지점에서 일시적으로 감소하는 현상을 보이고 있는데 이러한 현상은 라이닝 천단부 및 우측부 토압계의 거동과 동일한 경향임을 알 수 있다. 좌측부 토압계는 천단부 토피고 6 m 이후에서 그 거동이 천단부 및 우측부 토압계의 거동과 유사하기는 하나 계측값의 변화 폭은 훨씬

적은 것을 알 수 있으며 또한 천단부 토피고 10 m 이후에서는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 천단부 성토고 약 10m 부근에서 계측된 좌측부 작용 토압은 1.30 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

3.2 콘크리트 응력계

Fig. 8는 되메움을 실시하면서 경과 시간별 콘크리트 응력계의 계측값을 나타낸 것이다. 종축에서 부(-)의 값은 콘크리트 응력계가 압축력을 받는 상태임을 의미하며, 콘크리트 응력계의 계측값은 되메움 성토고가 높아지면서 압축력을 받는 것으로 나타났다. 한편, 천단부 되메움 성토고 2 m에서 3 m 사이, 그리고 6 m 이후 지점에서 계측값의 큰 변화가 발생하였다. 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 계측한 콘크리트 응력은 압축력 103 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

3.3 철근 응력계

Fig. 9는 되메움을 실시하면서 라이닝 좌측 어깨부, 천단부 및 우측 어깨부에 설치한 철근 응력계의 경과 시간별 계측값을 나타낸 것이며 종축에서 부(-)의 값은 철근 응력계가 인장력을 받는 상태임을 의미한다. 먼저, 라이닝 좌측부에 설치한 철근 응력계를 살펴보면, 되메움이 실시되는 2001년 12월 7일경에는 라이닝 상부 및 하부 철근계의 작용 응력이 거의 0 kg/cm<sup>2</sup>에 가까운 것을 알 수 있다. 그 후 되메움 공정이 점차적으로 실시되면서 라이닝의 하부에 배근된 철근 응력계는 부(-)의 값으로 인장 응력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 라이닝의 상부에 배근된 철근 응력계는 점차적으로 정(+)의 값으로 변화되어 압축 응력이 발생하는 것을 보여주고 있다. 한편, 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 상부 철근 응력계는 -439 kg/cm<sup>2</sup>, 하부 철근 응력계는 87 kg/cm<sup>2</sup>로 각각 나타났다.

라이닝 천단부에 설치한 철근 응력계를 살펴보면, 되메움을 실시하면서 전반적으로 상부 철근 응력계는 압

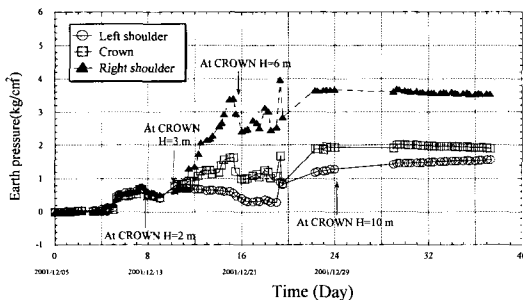


Fig. 7. Variation of earth pressure on lining.

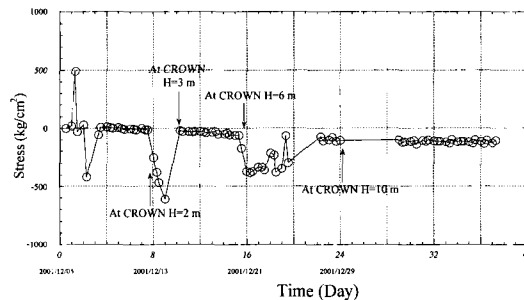


Fig. 8. Variation of stress in concrete.

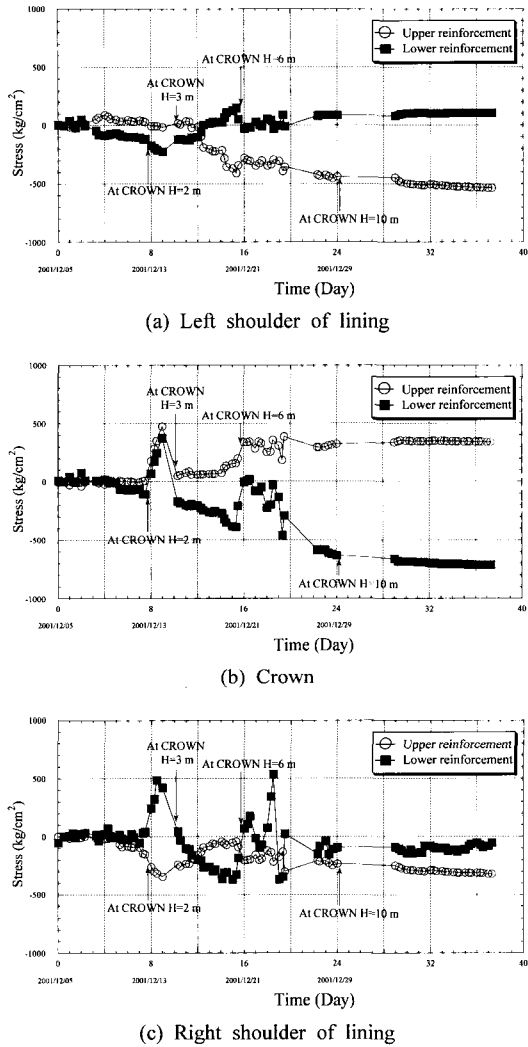


Fig. 9. Variation of stress in the reinforcing bar.

축력(정의 값)을 그리고 하부 철근 응력계는 인장력(부의 값)을 받고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 상부 철근 응력계는 324 kg/cm<sup>2</sup>, 하부 철근 응력계는 -633 kg/cm<sup>2</sup>로 각각 나타났다.

라이닝 우측부에 설치한 철근 응력계를 살펴보면, 라이닝 하부 철근 응력계 계측값이 전반적으로 큰 폭의 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 라이닝 상부에 배근된 철근 응력계는 되메움 공정 중 인장 응력이 지속적으로 발생하고 있는데 반하여, 하부에 배근된 철근 응력계는 천단부 성토고가 6 m 이후에 이르기까지 압축 응력과 인장 응력을 번갈아 가면서 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 천단부 성토고 약 10 m 부근에서 상

부 철근 응력계는 -236 kg/cm<sup>2</sup>, 하부 철근 응력계는 -91 kg/cm<sup>2</sup>로 각각 나타났다. 한편, 되메움 성토가 높아지면서 하부 철근 응력계의 계측값은 0 kg/cm<sup>2</sup>에 점차적으로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 복개 터널라이닝의 변형

현장 계측결과에 대한 분석을 실시하기 위하여 계측 데이터를 세 부분으로 나누어서 평가하였다. 즉, 현장의 되메움 작업의 지침과 공정을 고려하여 천단부 되메움 성토고가 약 3 m 지점까지를 초기 성토단계, 천단부 성토고 3~6 m 지점까지를 중간 성토단계, 그리고 천단부 성토고 6 m 이후를 마무리 성토단계로 구분하였다.

초기 성토단계는 천단부 성토고가 3 m 지점에 이르기 전인 2001년 12월 15일까지를 의미하며 계측 기준일로부터 약 10일에 이른 시점에서 발생한 철근 응력계의 계측값을 기준으로 라이닝의 변형을 유추해 보면, 라이닝의 천단부에서는 터널 내부로의 변형이 발생하여 상부 철근에서는 압축력이, 하부 철근에서는 인장력이 작용하는 것을 알 수 있다. 한편 라이닝 좌측부에서는 하부 철근이 인장응력을 그리고 우측부에서는 상부 철근이 인장응력을 받고 있는 것으로 계측되었으나 압축응력은 뚜렷하게 계측되지 않은 것으로 보아 어깨부에서의 라이닝의 변형은 크지 않은 것으로 짐작할 수 있다. 이는 되메움 성토가 아직은 초기 단계이기 때문에 천단부의 낮은 성토고로 인한 연직하중이 측벽부의 되메움 지반에 의한 구속력과 상대적인 차이가 크지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

중간 성토단계는 천단부 성토고가 3 m 지점에서부터 약 6 m 지점에 이르기까지를 의미하며 계측 기준일로부터 10일에서 15일까지의 시점이다. 천단부의 성토고가 3 m 지점을 넘어서는 중간 성토단계부터는 현장의 되메움 성토제의 다짐도가 달라진다. 그 이유로는, 초기 성토단계에서의 불도져에 의해 기존의 성토된 부분을 앞으로 밀어가면서 되메움을 실시하였으나, 중간 성토 단계에서는 덤프에 의한 직접적인 적재 및 운반 통로로 활용하였기 때문이다. 철근 응력계의 계측 결과를 토대로 라이닝의 변형을 유추해보면, 라이닝의 우측부에서는 터널 내부로의 변형이 발생하고 있으며, 라이닝 좌측부에서는 터널 외부로의 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 라이닝의 좌·우측부에서의 이러한 상반된 변형 양상은 라이닝 좌·우측부에서의 되메움 지반의 다짐 정도 및 성토 운반을 위한 덤프 트럭의 운반 통로에 의한 영향으로 생각되어 지며, 이는 뒷부분에서 자세히 서술하고자 한다.

마무리 성토단계는 천단부 성토고가 6 m 이후를 의미하며 계측 기준일로부터 15일인 2001년 12월 20일 이후 시점이다. 이 구간에서의 되메움 상황은 앞에서 언급하였듯이 성토고 6 m를 초과하는 성토량에 대해서는 되메움 진행의 앞부분(NATM 종점부)으로 이동시키기 위하여 불도저를 사용하면서 지표면 고르기 작업을 실시하였다. 따라서 2001년 12월 20일 이후 마무리 성토단계의 초기 부분에서는 천단부 성토고가 지속적으로 높아진 것이 아니라 성토고가 반복적으로 높아지기도 하고 낮아지기도 하였던 구간임을 추측할 수 있다. 이러한 계측 결과를 토대로 라이닝의 변형을 유추해보면, 라이닝의 천단부에서는 터널 내부로의 변형이 발생하고 있으며, 라이닝 좌·우측부에서는 터널 외부로의 변형이 발생하고 있는 것으로 유추할 수 있다. 라이닝 어깨부에서 좌측부의 변형이 우측부의 변형보다 더 크게 나타났는데, 이것은 계측 데이터를 참고로 하여 상부 및 하부 철근 응력계의 계측값의 차이에 기인한 것이다. 즉, 라이닝 우측부의 상부 철근 및 하부 철근의 응력값의 차이가 좌측부의 계측값에 비해 더 작으며 이는 곧 라이닝 우측 어깨부 주변의 되메움 지반의 구속에 의한 효과가 좌측 어깨부보다 더 큰 것을 반영한 것이다.

## 5. 토압계에 작용하는 응력에 대한 고찰

본 연구에서는 전술한 바와 같이 토압계의 설치위치에 따라 각기 다른 양상으로 토압의 증분이 발생하였다. 따라서, 이러한 토압이 발생하게 된 원인을 추론하여 보았다.

### 5.1 되메움 성토고에 의한 토압 평가

되메움 성토재의 단위중량을  $\gamma_s=1.8 \text{ g/cm}^3$ 로 보고 측압 계수를  $K_0=0.5$ 로 가정하여 라이닝 천단부로부터의 성토고에 의한 토압계 작용토압에 대한 평가를 실시하였다. 토압계의 설치 각도( $\theta$ )는 수평면을 기준으로 반시계 방향으로 잰 각도로 정의하여 설치각도가 0도인 경우는 천단부 토압계에 해당하며 어깨부 토압계의 설치각도는 +45도(우측부), -45도(좌측부)이다. 설치된 토압계에 작용하는 작용 토압(토압면에 법선 방향),  $\sigma_n$ 은

연직토압과 수평토압의 합력에 의해 계산되며 다음 식 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_n = \sigma_x \sin \theta + \sigma_y \cos \theta \quad (1)$$

여기서,  $\theta$  : 라이닝 토압계의 설치 각도

$\sigma_y$  : 연직토압

$\sigma_x$  : 수평토압

Table 1은 되메움 라이닝 천단부 토피고가 10m인 경우에 있어서 천단부 및 어깨부에 작용하는 토압을 계산한 것이다.

토피고에 의한 라이닝 작용 토압을 계산한 결과 라이닝 천단부 작용 토압은  $1.80 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 이를 현장 계측값( $1.94 \text{ kg/cm}^2$ )과 비교해 보면 약 8% 정도의 차이를 보이며 현장 계측값이 다소 큰 값으로 나타났다. 토압 추정시 성토재의 물성치에 대한 가정을 고려한다면 좋은 일치를 보여주는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 결과는 라이닝 작용 토압이 토피고에 의해 직접적으로 영향을 받고 있는 것을 의미하며 또한 복개 터널 상부의 전 토피고에 의한 영향이 그대로 터널 라이닝에 전달되고 있음을 알 수 있다.

한편, 라이닝의 어깨부에 설치한 토압계의 작용토압은  $2.33 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났는데, 이는 현장 계측값과 비교할 때 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 토피고에 의한 어깨부 작용 토압은 좌·우측부에 동일한 값으로 추정할 수 있으나, 계측 결과에 의하면 우측부의 작용토압( $3.67 \text{ kg/cm}^2$ )이 좌측부의 작용토압( $1.30 \text{ kg/cm}^2$ )보다 크게 나타났다. 라이닝 우측 어깨부에 설치한 토압계의 작용 토압은 추정치보다 58% 크며, 좌측 어깨부의 경우에서는 약 44% 작게 나타났다. 이렇듯 되메움 성토 과정에서 토압계의 매설 위치에 따라 작용 토압이 큰 차이를 보이고 있으며, 이러한 원인에 대한 규명을 실시하기 위하여 라이닝 작용 하중에 영향을 미치는 요인들에 대하여 검토하였다.

### 5.2 되메움 성토시 라이닝 작용 하중에 영향을 미치는 요인들

되메움 성토시 터널라이닝에 설치된 토압계의 작용

Table 1. Calculated earth pressure.

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_x$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_n$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
천단부	10.0	0.5	0°	1.80	0.90	1.80
어깨부	12.2	0.5	-45°	2.20	1.10	2.33
		0.5	+45°	2.20	1.10	2.33

Table 2. Coefficient of vertical load increment.

조 건	연직하중 계수 $\alpha$	
	$h/B_0 < 1$	1.0
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 양호한 지반위에 설치한 박스 및 아치형 컬버트 구조물로 토피고 10m 이상이며 내공높이 3m를 초과하는 경우</li> <li>■ 말뚝 기초등에서 성토의 침하에 컬버트 구조물이 저항하는 경우</li> </ul>	$1 \leq h/B_0 < 2$	1.2
	$2 \leq h/B_0 < 3$	1.35
	$3 \leq h/B_0 < 4$	1.5
	$4 \leq h/B_0$	1.6
상기 이외의 경우	1.0	

※ 여기서 h : 토피고, B<sub>0</sub> : 컬버트 구조물의 폭

토압에 영향을 미치는 요인들은 성토재의 단위중량(평균 단위중량 또는 극부적인 단위중량), 성토 지반의 측압계수, 설치된 토압계의 설치각도, 연직하중 증가 계수( $\alpha$ 계수), 성토 작업 장비에 의한 충격효과(백호우, 불도져, 덤프 트럭 등) 및 기타 작업 현장 여건 등 크게 여섯 가지로 구분하여 생각할 수 있다.

성토재의 단위중량은 다짐도에 의해 영향 받으며 다짐도가 양호한 경우와 불량한 경우로 나누어 생각할 수 있다. 본 현장에서의 되메움 작업은 원 지반을 취토장에 보관하였다가 다시 그대로 사용하였으며 지반 조사 시 토사 지반의 단위중량은  $1.8 \text{ g/cm}^3$ 로 조사되었다. 이 값을 기준으로 하여 다짐도가 양호한 경우에는 성토재의 단위중량을  $\gamma = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 로, 다짐도가 불량한 경우에는  $\gamma = 1.4 \text{ g/cm}^3$ 로 가정하여 검토하였다.

지반의 측압 계수는 성토 지반의 다짐 정도에 영향을 받기 때문에 성토재의 단위중량과 연관되는 것으로 생각할 수 있다. 되메움에 의한 측압계수는 최소 0.35(성토재의 단위중량  $\gamma = 1.4 \text{ g/cm}^3$ 인 경우), 최대 1.0(성토재의 단위중량  $\gamma = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 인 경우)으로 각각 가정하여 검토하였다.

라이닝 천단부의 경우는 토압계 설치시 충분한 작업 공간을 확보할 수 있기 때문에 설치각도를 0도로 맞추기가 비교적 용이하였으나, 좌·우측 어깨부에 설치한 토압계의 경우에는 라이닝이 곡면으로 이루어져 있기 때문에 토압계 설치시 다소 어려움이 발생하였다. 이러한 점을 감안하여 어깨부에 설치된 토압계의 경우는 최대  $\pm 15$ 도까지의 오차가 발생할 수 있다고 가정하여 작용토압에 대하여 검토하였다.

연직하중 증가 계수( $\alpha$ 계수)는 일본도로협회 도로토공 컬버트공지침서(阿部公一, 1994)에서 제시하는 값으로서 컬버트 구조물을 설치하고 성토를 실시하는 경우가 연직하중의 증분 정도를 의미하는 것이다. 컬버트 구조물의 상부와 그 주변부의 성토재는 되메움 토피고 증가함과 더불어 상대 변위가 발생하게 되고 이로 인해 컬버트 상부의 성토는 하향으로의 전단력이 작용

하게 된다. 이 전단력은 성토재의 하중과 함께 컬버트 구조물에 연직하중으로 작용하며 이들의 비를 연직 하중 증가 계수( $\alpha$ )라 한다. 이때의 상대 변위는 컬버트 구조물의 높이에 상당하는 컬버트 구조물 주변 성토재의 압축 변형에 의한 것으로서 컬버트 구조물의 높이에 비례하여 증가한다. 이 연직하중 증가 계수에 대해서는 각 기관에서 측정되었으며 그 중에서 일본도로공단이 중앙자동차도에서 측정한 결과에 의거하여 정리하면 Table 2와 같다. 본 연구에서는 Table 2를 참조하여 연직하중 증가계수를 1.0과 1.2로 각각 고려하여 측정한 토압치에 대한 평가를 실시하였다.

전술한 바와 같이 현장 특성상 라이닝 우측부에 작업로가 계속적으로 존재하였고, 따라서 성토 작업장비에 의한 충격 효과의 영향을 고려하여 토압 상승 범위를 추론하여 보았다. 측측기를 매설한 현장에서는 되메움 성토작업을 실시함에 있어서 세 종류의 중장비를 이용하였다. 성토재 운반을 위해서는 덤프트럭(적재 중량 24톤)을 사용하였으며, 운반된 성토재의 고르기 작업 및 운반을 위하여 불도져(차체 중량 25톤)와 백호우(차체 중량 28톤)를 사용하였다. 일반적으로 중장비 차량에 의한 활하중을 계산함에 있어서는 토피고 4m를 기준으로 연직하중의 증가량을 고려하는 방법이 서로 다

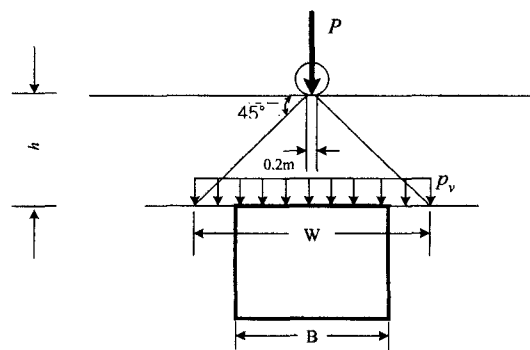


Fig. 10. Live load by automobile.

르다. 먼저 토피고( $h$ )가 4 m 미만인 경우에 있어서는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 차륜에 의한 차량 하중( $P_1$ )을 다음 식에 의해 구하게 된다.

$$P_1 = \frac{2 \cdot DB/A}{L_1} \cdot (1+i) \quad (2)$$

여기서,  $P_1$  : 차륜 하중 (ton/m)  
 $DB$ : 차량하중 (25 ton 사용)  
 $L_1$  : 차륜간 거리 (2.75 m 사용)  
 $i$  : 충격 계수 (0.3 사용)

이때, 차량 하중에 의한 연직 방향의 증분하중( $P_v$ )은 다음과 같다.

$$P_v = \frac{P_1}{W} = \frac{P_1}{2h + 0.2} \quad (3)$$

여기서,  $P_v$ : 연직 증분하중 (ton/m<sup>2</sup>)  
 $W$ : 증분하중의 영향 범위 (m)  
 $h$  : 토피고 (m)

연직방향의 증분하중( $P_v$ )에 의해 유발되는 수평방향의 증분하중( $P_h$ )은 다음과 같다.

$$P_h = P_v \cdot K_0 \quad (4)$$

여기서,  $K_0$  : 측압계수

한편, 토피고( $h$ )가 4 m 이상인 경우에 있어서는 연직 방향 활하중으로서 작용면에 대해 일률적으로 10 kN/m<sup>2</sup> (약 0.1 kg/cm<sup>2</sup>)의 연직응력을 고려하며 수평 방향에 대해서는 깊이 관계없이 연직 하중에 대해 측압 계수를 곱하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 토피고( $h$ )가 4 m 이상인 경우에 대해서도 상기 식을 그대로 사용하여 연직방향 및 수평방향의 응력 증분을 계산하였으며, 이때의 토피고는 6 m로 하였다.

### 5.3 라이닝 작용 토압

앞에서 살펴본 라이닝 작용 토압에 영향을 미치는 각종 영향 인자를 고려하여 라이닝 좌·우측에서 계측한 작용 토압에 대한 검토를 실시하였다. 라이닝 작용

토압에 대한 검토를 실시함에 있어서는 전술한 바와 같이 되메움 성토고를 세 단계로 구분하여 각각에 대하여 검토하는 방법으로 조사하였다. 먼저, Table 3에는 전술한 라이닝의 천단부 및 좌·우측 어깨부에 설치한 토압계에서 계측된 작용 토압을 각각의 단계별로 구분하여 그 증가량을 정리한 것이며 천단부 성토고 10 m에서 계측한 전체 작용합력도 아울러 표시하였다.

Table 3을 살펴보면 라이닝 토압의 증가량이 각 성토 단계에 따라 서로 다른 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 초기 성토단계에서는 천단부 작용토압이 가장 크며 좌측 어깨부, 우측 어깨부 순으로 토압이 작아지고 있다. 중간 성토 단계에서는 우측어깨부가 가장 큰 값을 보이고 있으며 좌측 어깨부에서는 부(-)의 값을 보이고 있다. 되메움 과정에서 이러한 부(-)의 값이 나타난 것은 계측값이 잘못되었거나 또는 국부적인 절토가 이루어 졌음을 의미하는 것이다. 한편, 마무리 성토단계에서는 천단부가 가장 큰 증가량을 보이고 있으나 증가량의 차이는 크지 않는 것을 알 수 있다.

초기 및 마무리 성토단계에서의 토압 증가량이 서로 큰 차이를 보이지 않는 것은 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 현장의 되메움 작업 상황에서 설명하였듯이 초기 성토단계에서는 되메움 지표면을 라이닝 좌우에서 가급적 동일한 형상을 유지시켰다는 점과, 마무리 성토 단계에서는 이미 천단부에서의 되메움 성토고가 어느 정도(6 m이상)를 유지하기 때문에 대체로 동일한 증가량을 보인 것으로 판단된다. 한편 중간 성토단계에서는 라이닝 우측 어깨부에서 상대적으로 큰 토압이 발생하고 있으며 이는 현장 작업 여건 중에서 덤프 트럭의 운반 통로 등에 기인하는 것으로 생각된다. 우측 어깨부에 작용하는 이러한 토압의 영향에 의해 전술한 바와 같이 터널 내부로의 변형이, 라이닝 좌측어깨부에서는 터널 외부로의 변형이 각각 발생하였음을 알 수 있다.

### 5.4 되메움 성토 단계별 라이닝에 작용하는 토압에 대한 추정

#### 5.4.1 초기 성토단계

초기 성토단계에서의 되메움 성토고를 살펴보면 천단부에서는 3 m, 좌·우측 어깨부에서는 5.2 m인 것을 알 수 있다. Table 4와 Table 5는 각각 성토재의 단위중

Table 3. Increment of earth pressure by each step of back fill process. (unit: kg/cm<sup>2</sup>)

설치 위치	초기 성토단계	중간 성토단계	마무리 성토단계	전체합력
좌측 어깨부	0.79	-0.18	0.69	1.30
천단부	0.86	0.38	0.74	1.94
우측 어깨부	0.67	2.29	0.71	3.67



Table 4. Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ .(first stage)

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	3.0	0.5	0°	0.54	-	0.54
어깨부	5.2	0.35	30°	0.94	0.33	0.97
			45°	0.94	0.33	0.89
			60°	0.94	0.33	0.75
		0.5	30°	0.94	0.47	1.04
			45°	0.94	0.47	0.99
			60°	0.94	0.47	0.87

Table 5. Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ (first stage).

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	3.0	0.5	0°	0.42	-	0.42
어깨부	5.2	0.35	30°	0.73	0.25	0.76
			45°	0.73	0.25	0.69
			60°	0.73	0.25	0.58
		0.5	30°	0.73	0.36	0.81
			45°	0.73	0.36	0.77
			60°	0.73	0.36	0.68

량이  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.4 \text{ g/cm}^3$ 일 때의 라이닝에 작용하는 토압을 나타낸 것이다. 어깨부에 대해서는 좌·우를 구분하지 않고 토압계의 설치 각도를 45도를 기준으로 ±15도의 범위까지 함께 검토하였으며, 설치 각도에 의한 영향을 파악할 수 있도록 하였다.

우선, 라이닝 좌·우측 어깨부에서의 작용 토압을 살펴보면, 전술한 바와 같이 계측값은  $0.67\sim 0.79 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났었다. 이들 계측값은 Table 5에서 정리하였듯이 성토재의 단위 중량이 비교적 낮은  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ 에서 측압계수 0.35~0.5에서 계측값과 유사한 토압을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 라이닝 천단부

에서의 계측값은  $0.86 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났으며, 추정값은 Table 4와 같이 성토재의 단위 중량이 비교적 높은  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ 에서  $0.54 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. 추정 값에 비해 약 37%의 차이를 보이며 계측값이 더 크게 나타났다. 라이닝 천단부에서의 이러한 계측값과 추정값의 불일치는 계측 시점에서의 라이닝 천단부의 추정 성토고의 차이 및 성토작업용 증장비에 의한 영향 등을 생각할 수 있다.

#### 5.4.2 중간 성토단계

중간 성토단계는 되메움 성토고가 천단부를 기준으로 3~6 m 구간을 의미한다. 따라서 중간 성토단계에서의

Table 6. Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ .(second stage)

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	3.0	0.5	0°	0.54	-	0.54
어깨부	3.0	0.35	30°	0.54	0.19	0.56
			45°	0.54	0.19	0.52
			60°	0.54	0.19	0.43
		0.5	30°	0.54	0.27	0.60
			45°	0.54	0.27	0.57
			60°	0.54	0.27	0.50

**Table 7.** Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ .(second stage)

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	3.0	0.5	0°	0.42	-	0.42
어깨부	3.0	0.35	30°	0.42	0.15	0.44
			45°	0.42	0.15	0.40
			60°	0.42	0.15	0.34
		0.5	30°	0.42	0.21	0.47
			45°	0.42	0.21	0.45
			60°	0.42	0.21	0.39

토압 증가분은 성토고 3 m에 해당하는 토압 증가분을 의미하며 이를 정리하면 다음 Table 6 및 Table 7과 같다. Table 6은 성토재의 단위중량이  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ , Table 7은 성토재의 단위중량이  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ 일 때의 증분 토압을 나타낸 것이다. 한편, 어깨부에 대해서는 좌·우를 구분하지 않고 토압계의 설치 각도를 45도를 기준으로  $\pm 15$ 도의 범위까지 함께 나타내었다.

우선, 라이닝 좌측 어깨부에서의 작용 토압을 살펴보면, 계측값은  $-0.18 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. 이는 성토과정에서는 나타날 수 없는 현상이며 현장의 작업 여건상 부분적인 절토에 의한 영향으로 판단된다. 실제 현장 되메움 작업시 터널 라이닝 좌측부분에 있어서, 라이닝과 굴착 사면 사이에 되메움 작업시 사용한 불도저를 이용하여 작업인부들의 장비 운반용 통로를 임시적으로 설치하기도 하였다. 이때 불도저를 이용하여 되메움된 성토재를 앞으로 이동시키며 장비 운반용 통로를 설치할때에 부분적인 절토가 이루어진 것으로 생각되어진다.

라이닝 천단부에서는 계측 토압이  $0.38 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다으며, Table 7에서 되메움 성토재의 단위중량을 약  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ 로 하여 추정된  $0.42 \text{ kg/cm}^2$ 와 유사한 결과임을 알 수 있다. 한편, 라이닝 우측 어깨부에서의 작용 토압을 살펴보면, 계측값은  $2.29 \text{ kg/cm}^2$ 로서 매우

큰 값을 보이고 있다. 이는 Table 6과 같이 되메움 성토재의 단위중량을  $1.8 \text{ kg/cm}^3$ , 측압계수를 0.5로 가정하였을 때 추정된 토압 증분인  $0.5 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^2$ 보다 약 4 배 정도 큰 값을 알 수 있다. 라이닝 우측 어깨부의 이러한 높은 하중의 원인을 규명하기 위하여 앞에서 언급한 사항들을 고려하여 보았다. 먼저, 성토재의 단위중량은 다짐도가 양호한 것으로 가정하여  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ 로 하며, 성토 지반의 측압계수는 1.0으로 가정하였다. 그리고 연직하중 증가 계수는  $\alpha=1.2$ 로 하며 성토 작업 장비에 의한 충격 효과를 고려하였다. 성토 작업 장비에 의한 영향을 평가함에 있어서는 토피고를 4 m와 6 m로 각각 고려하여 식 (2)와 식 (3)에 의해 증분 하중을 구하였다. Table 8은 이러한 토압에 영향을 미치는 각종 요인들을 고려하여 작용합력을 정리한 것이다.

Table 8의 토피고(h) 6m인 경우에서 라이닝 토압계의 설치 각도를 고려한 작용 토압은  $1.39 \sim 1.44 \text{ kg/cm}^2$ 이며 여기에 연직하중 증가계수를 고려하면  $1.67 \sim 1.73 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. 이 값과 Table 6에서 추정된  $0.5 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^2$ 를 합하면  $2.17 \sim 2.33 \text{ kg/cm}^2$ 가 된다. 따라서, 현장 계측에서 나타난 작용토압은  $2.29 \text{ kg/cm}^2$ 이며 이는 추정치의 범위 이내임을 알 수 있다.

성토 작업 장비에 의한 하중 증분 효과는 일반적으로 박스형 구조물의 설계시 적용되는 방법이기 때문에 현

**Table 8.** Earth pressure considering coefficient of vertical load increment.( $K_0=1.0$ ,  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ )

설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	작업장비 (kg/cm <sup>2</sup> )			작용합력 (kg/cm <sup>2</sup> )	$\alpha$ 고려 (kg/cm <sup>2</sup> )
			h(m)	$P_v$	$P_h$		
30°	0.54	0.54	4	0.72	0.72	1.72	2.07
45°	0.54	0.54	4	0.72	0.72	1.78	2.14
60°	0.54	0.54	4	0.72	0.72	1.72	2.07
30°	0.54	0.54	6	0.48	0.48	1.39	1.67
45°	0.54	0.54	6	0.48	0.48	1.44	1.73
60°	0.54	0.54	6	0.48	0.48	1.39	1.67

Table 9. Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ .(final stage)

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	4.0	0.5	0°	0.72	-	0.72
어깨부	4.0	0.35	30°	0.72	0.25	0.75
			45°	0.72	0.25	0.69
			60°	0.72	0.25	0.58
		0.5	30°	0.72	0.36	0.80
			45°	0.72	0.36	0.76
			60°	0.72	0.36	0.67

Table 10. Earth pressure on lining at  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ .(final stage)

장소	토피고(m)	측압계수	설치각도	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	합력 (kg/cm <sup>2</sup> )
천단부	4.0	0.5	0°	0.56	-	0.56
어깨부	4.0	0.35	30°	0.56	0.20	0.58
			45°	0.56	0.20	0.53
			60°	0.56	0.20	0.45
		0.5	30°	0.56	0.28	0.62
			45°	0.56	0.28	0.59
			60°	0.56	0.28	0.52

장 계측값과 동일하게 비교하기에는 다소 무리가 따를 것으로 사료된다. 그러나 성토 작업 장비의 진동 및 충격에 의한 효과는 반드시 라이닝에 작용하는 외력으로서 그 영향이 나타날 것으로 생각된다. 이상으로 중간 성토단계에서 성토 작업시 작용 토압에 영향을 미치는 각종 요인들을 고려하여 라이닝 작용 하중에 대한 추정을 실시하였다. 라이닝 우측 어깨부에서는 되메움재의 운반 통로에 의한 영향으로 다짐도 및 측압 계수가 높아지게 되고 성토 운반 장비의 충격 효과에 의한 영향을 고려한 경우 토압 계측값과 유사한 추정치를 얻을 수 있음을 확인하였다.

#### 5.4.3 마무리 성토단계

마무리 성토단계는 되메움 성토고가 천단부를 기준으로 6 m에서 10 m 구간을 의미한다. 따라서 성토고 4 m에 해당하는 토압 증가분에 해당하며 이를 정리하면 다음 Table 9 및 Table 10과 같다. Table 9는 성토재의 단위중량이  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ , Table 10은 성토재의 단위중량이  $\gamma_t=1.4 \text{ g/cm}^3$ 일 때의 증분 토압을 나타낸 것이다. 한편, 어깨부에 대해서는 좌·우를 구분하지 않고 토압계의 설치 각도를 45도를 기준으로  $\pm 15$ 도의 범위까지 함께 계산하였다.

되메움 성토고의 높이가 4 m 높아짐으로 인해 발생

하는 토압계의 증분은 0.69~0.74 kg/cm<sup>2</sup>로 계측되었다. 이를 상기 Table 9와 비교해보면 성토재의 단위중량이  $\gamma_t=1.8 \text{ g/cm}^3$ , 측압계수가 0.5일 때의 추정치와 유사한 것을 알 수 있다. 이상으로 라이닝 토압계의 작용 응력에 대해 되메움 성토를 세단계로 구분하여 각 단계별 증가량에 대한 상세한 검토를 실시하였다. 그 결과 전술한 철근 응력계의 계측값을 이용하여 라이닝의 변형을 유추한 결과와 상호 부합하는 것을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 복개 터널구조물의 시공 현장에 대하여 일정 단면을 선정하여 현장 계측을 실시하였다. 되메움 성토고가 높아짐에 따라 터널 라이닝에 발생하는 철근 응력계 및 콘크리트 응력계의 변화 양상을 계측하였으며 또한 라이닝 외벽에 작용하는 토압을 측정하였다. 현장 계측을 통한 복개 터널구조물의 역학적 거동을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매설된 계측기는 되메움 성토고가 높아짐에 따라 그 변형이 점차 증가하고 있으며 되메움 상황과 비교하였을 때 전반적으로 계측 값은 양호한 결과인 것

로 추정되었다. 터널 횡방향의 동일한 단면에 매설된 세 종류의 계측기는 되메움 작업시 현장의 작업 여건에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 각각의 계측기로부터 얻어진 계측값을 살펴본 결과, 계측 시점이 동일한 지점에서 각각의 계측값의 변화가 상호 연관되어 나타난 것으로 쉽게 알 수 있었다.

2. 천단부 성토고가 3 m에 이르기 전까지의 초기 성토 단계에서 라이닝의 변형을 추정하기 위하여 철근 응력계의 계측 결과를 살펴보았으며, 그 결과 라이닝 천단부는 터널 내부로의 변형이 발생하고 있으며 라이닝 좌·우측 어깨부에서의 변화는 뚜렷하지 않는 것으로 나타났다. 한편 초기 성토단계에서 계측된 라이닝 작용 토압의 계측 결과로부터도 유사한 라이닝 거동을 유추할 수 있었다.
3. 천단부 성토고가 3~6 m까지의 중간 성토단계에서 라이닝 천단부는 터널 내부로의 변형이 발생하고 있으며 라이닝 좌측 어깨부에서는 터널 외부로의 변형, 그리고 라이닝 우측 어깨부에서는 터널 내부로의 변형이 각각 발생하고 있는 것으로 나타났다. 한편 중간 성토단계에서 계측된 라이닝 작용 토압의 계측 결과로부터도 유사한 라이닝 거동을 유추할 수 있었다.
4. 천단부 성토고가 6~10 m까지의 마무리 성토단계에서 라이닝 천단부는 터널 내부로의 변형이 발생하고 있으며 라이닝 좌·우측 어깨부에서는 터널 외부로의 변형이 발생하고 있다. 라이닝 좌·우측 어깨부의 변형을 서로 비교한 결과 좌측부의 변형이 우측보다 다소 큰 것으로 나타났다. 이러한 계측결과도 역시 라이닝 작용 토압의 계측 결과로부터 유사한 결론을 유추할 수 있었다.
5. 라이닝 토압계의 작용 응력에 대하여 되메움 성토를 세 단계로 구분하여 각 단계별로 계측에서 측정된 증가량에 대하여 이론적으로 상세히 검토하여 본 결과, 계측값이 이론적 검토 범위 이내에서 확인되었으며 또한 철근 응력계의 계측값을 이용하여 라이닝의

변형을 유추한 결과와도 상호 부합하는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구의 수행에 적극적인 협조를 하여준 대림산업 주식회사, LG건설 및 이제이텍에 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

1. 배규진, 이규필, 2001, 복개 터널라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구, 터널공학회논문집, 3.2, 13-22.
2. 유건선, 1997, 실험 및 수치해석에 의한 복개 터널 주위의 지압 및 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
3. 이규필, 이석원, 박시현, 배규진, 2002, 복개 터널구조물의 역학적 거동 영향인자 분석을 위한 수치해석적 연구, 한국지반공학회 봄 학술발표회, 703-710.
4. 한국건설기술연구원, 1998, 국내 터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구, 수탁연구사업, 55-80.
5. 한국지반공학회, 1999, 복개식 개착터널 구조 안정 연구 보고서, 한국지반공학회.
6. 홍성완, 1986, 사질토내의 국부 침하에 따른 지반 변위의 무라야마 산정식에 대한 연구, 대한토질공학회지, 2-2, 47-58.
7. 佐藤 章平 and 岩崎 洋一郎, 1981, 高盛上下の剛性カルバートに作用する鉛直土壓の輕減工法について, 土と基礎, 12, 3-7.
8. 阿部 公一, 1994, トンネル工法カルバートの設計・施工とその評價, 高速道路と自動車, 37-11, 23-32.
9. Demetrious C. K., Peter F., Ching L. W., Daniel M., and Richard K., 2000, "Deformations during cut-and-cover construction of MUNI metro turnback project", ASCE, J. Geotech. and Geoenv. Eng., 126-4, 344-359.
10. Karl H. L., Carl H., and Cathy B. A., 1999, An arch-shaped culvert built by the inflatable form, Proc. of 13rd national conference, ASCE, 243-254.



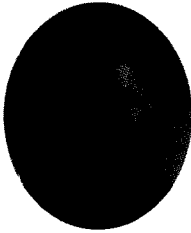
**이석원**

1989년 고려대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1991년 고려대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1998년 미국 조지아공과대학 토목공학과  
공학박사  
Tel: 031-910-0230  
E-mail: sleec@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
선임연구원



**박시현**

1995년 경북대학교 공과대학  
토목공학과 공학사  
1997년 경북대학교 공과대학  
토목공학과 공학석사  
2001년 일본 교토대학 공학연구과  
토목공학전공 공학박사  
Tel: 031-910-4085  
E-mail: tarksh@kistep.or.k  
현재 시설안전기술공단 진단1본부  
지하시설실 과장



**최순욱**

1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
Tel: 031-910-0231  
E-mail: soonugi@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구원



**배규진**

1980년 국립경북대학교 농공학과  
공학사  
1982년 연세대학교 대학원  
토목공학과 공학석사  
1990년 연세대학교 대학원  
토목공학과 공학박사  
Tel: 031-910-0162  
E-mail: gjbae@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구부장