

터널구조물 유지관리계측의 개선방안

Improvement of maintenance monitoring in tunnel structures



우중태
경북대학
건설환경디자인과
교수

1. 머리말

최근 들어 사회기반시설의 확충에 따라 지하철, 도로, 일반 및 고속철도, 전력구, 통신구, 공동구 등 국내 터널 구조물의 건설이 증가되고 있으며, 공사계측 및 유지관리 계측을 위한 정보화 시공 및 유지관리 분야의 연구도 활발하게 진행되고 있다.

건설공사에서 계측이란 인간의 능력과 계측기기의 성능을 조합해서 공학적인 정보를 정확하게 수집하여 분석하는 행위로 이론과 기법, 통찰과 경험, 측정기술과 기기를 조합해서 공학적인 문제해결에 필요한 정량적, 정성적인 정보를 얻는 행위이며, 계측기를 통하여 측정된 자료를 검토하여 정량적인 판단기준을 제시하며, 계측결과와의 분석을 통하여 구조물의 특성과 연관성을 파악하고 구조물의 현 상태 및 발생 가능한 문제를 관측 및 예측하는 행위를 의미한다.

일반적으로 건설공사에서의 계측은 공사계측과 유지관리계측으로 구분되며, 공사계측은 주로 설계의 불확정성

요소 등을 보완하고 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성과 경제성을 제공하는 반면, 유지관리계측은 공사계측 단계에서 계측치가 어느 정도 수렴된 상태를 확인하고, 목적물인 철근 콘크리트 구조물이 시공되므로 이미 완공된 구조물에 대하여 공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 공학적 판단자료를 제공하여 효율적이고 경제적인 구조물 유지관리에 기여하는 것을 목적으로 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 도심지에서 건설되고 있는 지하철 ○호선의 유지관리계측 항목, 계측 수량 및 설치 위치, 계측기기의 내구성 검증 등에 대한 점검결과를 분석하여 효율적인 유지관리계측에 기여하고자 한다.

2. 터널에서 유지관리계측

2.1 터널에서 유지관리계측의 목적

터널에서 유지관리계측은 구조물 완공 후 공용기간 중

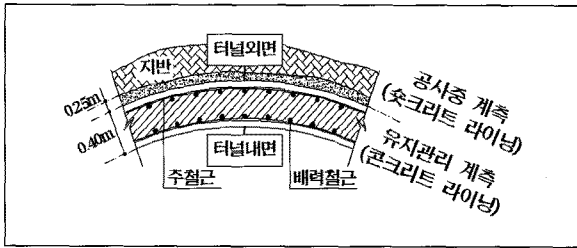


그림 1. NATM터널에서 공사계측과 유지관리계측의 수행영역 구분

에 주변지반의 변화와 영향으로 인하여 발생하는 배면지반, 토압 및 수압의 변화와 콘크리트 구조물의 변화 양상, 환경조건 등을 측정하여 터널의 안전성을 확인하는데 있다. 또한, 예방적인 유지관리를 실현하기 위한 기본전제 조건으로서 구조물의 안정성 및 건전성을 분석 평가하고 구조성능을 제어하며 공용상태의 실 거동 분석을 통한 구조성능의 개선을 목적으로 수행하는 정기적 또는 상시적 조사행위를 의미한다.

NATM터널에서 공사계측과 유지관리계측의 수행영역 구분은 그림 1과 같다.

2.2 터널에서 유지관리계측의 필요성

개착터널인 박스구조물은 토공작업시 다양한 형태의 흙막이계측이 수행되며, 굴착완료후 콘크리트 구조물 시공 시는 공사 중 계측치의 수렴여부를 확인하고 후속공사를 진행하게 된다. 그러므로 개착구간은 토공작업시 터널구간에 비해 토목구조물 배면의 지반상태 확인이 용이하므로 개착 박스단면의 구조설계에 적용되는 각종 설계입력정수의 변화가 적으므로 유지관리시 불확정적인 요소가 터널구간 보다는 적다고 볼 수 있다.

개착구조물은 공사완료 후 지중에 있는 상태가 상재하중, 측압, 양압력 등의 외력의 평형으로 인하여 가장 안정된 상태가 되므로 이런 평형상태의 균형이 변할 수 있는 곳에 콘크리트응력 및 철근응력 위주의 유지관리계측을 계획하는 것이 바람직하다.

터널은 대개 환경변화가 적은 지중에 건설되어 구조적으로 타 구조물에 비해 비교적 안전한 것으로 알려져 있어 그동안 다른 토목구조물에 비해 유지관리에 대한 인식이 부족하였다. 그러나 터널 건설구간 중 지반 취약지점, 하천 횡단지점, 기존 지하철, 도시철도, 국철 등의 터널 통과지점, 고가도로 및 교량 교각 직 하부 통과지점, 도시개발 및 재개발 등으로 근접시공이 예상되는 지역 등과 같은 취약구간은 과대한 지하수위 및 외부하중의 변화, 근접굴착에 따른 배면지반의 이완 등으로 터널구조물에 변위 발생과 응력 변동 등의 장기적 구조물 거동 발생 가능성으로 터널구조물에 대한 유지관리계측의 중요성이 대두되어 1995년부터 서울지하철 5~8호선 터널구간에 극히 제한적으로 적용되어 지금까지 계측 및 분석이 수행중에 있으나, 단기간의 축적된 기술과 계측기기적인 문제 및 분석기술 수준의 부족 등으로 구조물 이상거동의 조기 파악을 위해 많은 연구와 함께 유지관리계측 관리기준 제정이 필요한 분야이다.

2.3 터널에서 유지관리계측 항목

도심지터널에서 유지관리계측의 항목 선정에 있어서는 시공시의 현장여건이 매우 중요하므로 시공 시 터널의 함몰이나 붕괴가 발생한 지역, 1차 지보재의 품질관리가 불량하여 지보재의 재시공이 이루어진 구간, 과다변위 및 응력 발생으로 인해 지보재를 추가로 설치한 구간, 성토 절토 등 외력조건이 크게 변화하는 구간, 인접구조물과 근접 시공구간, 장기변형이 예측되는 지반 등에 주로 유지관리 계측기기가 설치된다.

계측항목 선정시 터널의 용도 및 크기, 방수와 배수 형식, 터널 지보재의 재료적 특성, 지질상태 및 지하수 조건, 하중재하 조건 및 응력 상태, 주변 환경 및 유지관리여건 등을 고려하여 결정하고, 내구성이 검증 또는 확인된 경우 공사 시 계측기기를 유지관리 계측기기로 전환하여 지속적으로 장기계측이 수행되도록 하는 것이 가장 바람직하다.

터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 굴착단계인 공사계획에서 내공변위, 지중변위, 록볼트인발 시 하중-변위 관계 등의 각종 변위와 지표, 천단, 지중에서의 각종침하와 지보재의 응력 및 축력을 측정하여 굴착완료 후 각종 계측치의 수렴여부를 확인한 후에 표면 정리 및 방수작업, 콘크리트 라이닝이 시공되므로 유지관리계획 단계에서는 시공 시에 원지반의 변위와 하중이 거의 수렴되었기 때문에 터널 공용 중에 추가적인 원지반의 변위와 작용하중은 크게 발생하지 않을 것으로 예상된다. 따라서 유지관리계획은 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단되며, 터널에서 유지관리계획 적용 우선순위는 숏크리트에 근접된 원지반에 작용하는 토압 및 간극수압 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정, 그리고 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정의 순으로 계획이 수행되어야 한다.

태가 되므로 박스구조물의 각 부재에 철근응력 및 콘크리트응력 위주의 유지관리계획이 중요하다.

2) 굴착터널(Bored Tunnel : 터널구조물)

굴착터널은 콘크리트응력과 철근응력 및 간극수압 측정위주로 계획되어 있으며, 터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 굴착단계인 공사계획에서 내공변위, 지중변위, 록볼트인발 시 하중-변위 관계 등의 각종 변위와 지표, 천단, 지중침하와 지보재인 숏크리트응력 및 록볼트축력을 측정하여 굴착 중 및 완료 후 각종 계측치의 수렴여부를 확인한 후에 면정리 및 방수작업, 콘크리트 라이닝이 시공되므로 유지관리계획 단계에서는 시공 중에 원지반의 변위와 응력이 거의 수렴되었기 때문에 크게 발생되지는 않을 것으로 예상된다. 따라서 유지관리계획은 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단되며, 터널에서 유지관리계획 적용 우선순위는 다음과 같다.

- ① 숏크리트에 근접된 원지반의 작용하는 토압, 간극수압 측정
- ② 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트 응력 측정
- ③ 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정

3. 터널구조물 유지관리계획의 개선방안

3.1 유지관리계획 항목

도심지에서 건설되고 있는 지하철 ○호선 14개 공구에 대한 유지관리계획 항목 점검결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 계측항목이 공구별로 차이가 많아 터널 유지관리계획 목적에 부합되도록 계측항목의 조정이 필요하다.

1) 개착터널(Cut & Cover Tunnel : 박스구조물)

개착터널은 콘크리트응력 측정위주 (매립식 변형률계)로 계획되어 있어 콘크리트 응력과 철근 응력을 동시에 측정하는 것이 바람직하며, 무응력 변형률계만 계획된 공구도 있다.

박스구조물은 공사완료 후 지중에 있는 상태가 상재하중, 측압, 양압력 등의 외력의 평형으로 인하여 안정된 상

3.2 유지관리계획 센서의 수량 및 설치위치

도심지에서 건설되고 있는 지하철 ○호선 14개 공구에 대한 유지관리계획 센서의 수량 및 설치위치 점검결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 계측센서의 수량 및 설치위치가 공구별로 차이가 많아 구조물의 특성과 단면력에 부합되도록 조정이 필요하다.

1) 개착터널(박스구조물)

개착터널에서는 박스 단면크기 (본선, 정거장 등) 고려 없이 단면 당 2~8개를 계획하였으나, 도면에 구체적인

설치지점이 표기되지 않고, 바닥슬래브 등에 설치하도록 계획되어 있다.

바닥슬래브는 부재중에서 휨모멘트가 가장 크게 작용하나, 도상콘크리트(두께 20cm이상)가 상부에 설치되어 단면이 중대되는 효과가 있으므로 벽체나 상부슬래브를 더 우선적으로 계측이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 박스구조물은 구조계산상 휨모멘트가 큰 지점에 설치하는 것이 바람직하며, 철근과 콘크리트에 각각 설치하되, 단면 외측과 내측에 별도 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 박스구조물의 크기 및 구조형식(본선, 정거장 등)에 따라 적정 설치위치를 검토할 필요가 있다.

2) 굴착터널(터널구조물)

굴착터널에서는 콘크리트와 철근에 매립식 변형률계와 간극수압계 위주로 유지관리계측을 계획하였으며, 일부 공구에서는 표면부착식 전단면 내공변위계만 계획된 공구도 있었다. 또한, 터널크기 및 구조형식(단선, 복선, 유치선, 정거장 터널 등)에 대한 설치위치를 고려하지 않고 단면당 변형률계 2~6개, 간극수압계 1개가 계획된 공구도 있으나, 관리 중요도에 따라 변형률계, 토압계, 간극수압계 등의 매립식 계측기는 필히 설치하고, 선택적으로 콘크리트 라이닝 표면에 부착식 내공변위계를 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

3.3 유지관리계측 기기에 대한 내구성 검증

도심지에서 건설되고 있는 지하철 ○호선 14개 공구에 대한 유지관리계측 기기에 대한 내구성 검증 점검 결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 유지관리계측은 장기계측으로 계측기기의 내구성 확보가 무엇보다도 중요하므로 계측센서에 대한 내구성 검증이 필요하다.

건설공사에 사용되는 대부분의 계측기기는 계량 및 측정정에 관한 법령에 규제가 되지 않아 검 교정 대상이 아니며, 국가 표준 및 검인증 기준이 없어 국가 공인기관에서

검교정이 곤란하므로 생산업체나 계측업체에서 자체 마련한 검사 기준 및 교정 절차에 따라 검교정이 수행되므로 대외적인 신뢰도가 낮은 것이 현실이며, 또한 유지관리계측 센서에 대한 내구년한이 구체적으로 제시되지 않아 이에 대한 검토가 필요한 실정이다.

2001년 11월에 작성된 지하철 유지관리계측 세부지침(안)의 계측시스템 하자담보책임기간은 매립식의 경우 30년 이상을 내구년한으로 보증하도록 하였으며, 부착식 또는 노출형인 경우는 10년 이상을 내구년한으로 보증하도록 하였고, 계측시스템의 하자담보책임기간은 3년 이상이며, 이 기간은 최종 설치 준공일을 기준으로 결정한 바 있다. 또한, 2002년 9월에 작성된 지하철 ○호선 시공계측관리 표준시방서(안)의 계측센서 수명은 변형률계가 3년 이상으로 규정되어 있다.

따라서 각 계측센서에 대해 동일기종의 센서가 기 설치되어 정상적인 계측치를 보이고 있는 현황의 실적증명을 업체로부터 제출받아 확인하는 방법이 효과적인 방법인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 도심지에서 건설되고 있는 지하철 ○호선의 유지관리계측 항목, 계측수량 및 설치위치, 계측기기의 내구성 검증 등에 대한 점검결과를 분석하여 효율적인 유지관리계측이 되도록 다음과 같은 내용을 제안하였다.

- 1) 유지관리계측 항목 점검 및 분석결과 계측항목이 공구별로 차이가 많아 터널 유지관리계측 목적에 부합되도록 계측항목의 조정이 필요한 것으로 판단된다. 특히, 개착터널은 매립식 변형률계로 콘크리트응력만을 측정하도록 계획되어 있어 콘크리트 응력과 철근 응력을 동시에 측정하는 것이 바람직한 것으로

판단된다. 또한, 박스구조물은 공사완료 후 상재하중, 측압, 양압력 등 지중에 있는 상태가 외력의 평형으로 인하여 안정된 상태가 되므로 박스구조물의 각 부재에 철근응력 및 콘크리트응력 위주의 유지관리계측이 중요하다.

굴착터널은 콘크리트응력과 철근응력 및 간극수압 측정위주로 계획되어 있으며, 터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단된다.

- 2) 유지관리계측 센서의 수량 및 설치위치 점검 및 분석결과 계측센서의 수량 및 설치위치가 공구별로 차이가 많아 구조물의 특성과 단면력에 부합되도록 조정이 필요하다.

개착터널에서는 박스 단면에서 바닥슬래브가 부재중에서 휨모멘트가 가장 크게 작용하나, 도상콘크리트가 상부에 설치되어 단면이 증대되는 효과가 있으므로 벽체나 상부슬래브를 더 우선적으로 계측이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

NATM터널인 경우 관리 중요도에 따라 변형률계, 토압계, 간극수압계 등의 매립식 계측기는 필히 설치하고, 선택적으로 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위계를 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

- 3) 건설공사에 사용되는 대부분의 계측기기는 계량 및 측정에 관한 법령에 규제가 되지 않아 검교정 대상이 아니며, 국가 표준 및 검인증 기준이 없어 국가 공인기관에서 검교정이 어려우므로 생산업체나 계측업체에서 자체 마련한 검사 기준 및 교정 절차에 따라 검교정이 수행되므로 대외적인 신뢰도가 낮은

것이 현실이다.

따라서 각 계측센서에 대해 동일기종의 센서가 기 설치되어 정상적인 계측치를 보이고 있는 현장의 실적증명을 업체로부터 제출받아 확인하는 방법이 효과적인 방법인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 서울특별시 지하철건설본부(2002), "서울지하철 9호선 시공 계측 관리 표준시방서(안)", pp. 1-60.
2. 서울특별시 지하철건설본부(2002), "서울지하철 9호선에 적용할 시공계측관리기준(안) 검토보고서", pp. 1-179.
3. 우종태(2006), "터널계측의 이론과 실무", 구미서관, pp. 1-730.
4. 우종태(2007), "도심지터널에 적용되고 있는 유지관리 계측 시스템과 안전관리기준", 한국지반공학회, 지반, pp. 7-19.
5. 우종태외(2006), "지하철9호선 유지관리계측 현장평가결과", 서울특별시 지하철건설본부.
6. 우종태, 유충식(2001), "지하철 유지관리계측 세부지침(안)", 서울특별시 지하철건설본부, pp. 1-66.
7. 우종태, 이래철(2003), "도시철도 토목구조물 변위계측 종합 조사 보고서", 서울특별시 도시철도공사, pp. 1-250.
8. 우종태, 이래철(2008), "건설계측공학", 구미서관, pp. 1-730.
9. 한국구조물진단유지관리공학회(2007), "건설 공사중 및 시설물 유지관리 계측시방 기준 연구개발 계획서", 한국시설안전공단.
10. 한국구조물진단유지관리공학회(2007), "건설 공사중 및 시설물 유지관리 계측시방기준 연구 연차보고서", 건설교통부, 한국건설교통기술평가원.
11. Eurotunnel, Transmanche-Link (1991), "Monitoring of Tunnel Lining Second Annual Report", Gage Technique Limited.
12. Dunicliff, J. (1993), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance", pp. 39-40.
13. Moore, D. R., Crease, A. (1996), "Tunnel Instrumentation, Engineering Geology of the Channel Tunnel", pp. 287-294.