

터널구조물 유지관리계획의 개선방안 연구

A Study on the Improvement Plans of Maintenance Monitoring in Tunnel Structure

우종태*

Jong-Tae Woo*

Professor, Department of Construction and Environmental System, Kyungbuk University, Namyangju, Republic of Korea

*Corresponding author: Jong-Tae Woo, jtwoo@kbu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: Analyze the results of on-site inspection of the tunnel structure maintenance management monitoring and suggest improvement plans. **Method:** We investigate and analyze the problems of various items on maintenance monitoring of tunnel structure of 14 subway lines of Seoul subway in downtown area. **Result:** The maintenance monitoring items, measurement quantity and installation location are classified into open tunnel and excavation tunnel and improvement plans are suggested respectively. Various durability criteria of the measuring instruments were examined, and durability confirmation method suggested improvement measures such as approval, inspection, inspection and testing, calibration of monitoring sensors. **Conclusion:** Applying the improvement measures of the tunnel structure maintenance monitoring to the construction site will increase the efficiency of the maintenance monitoring and contribute to the development of construction monitoring technology.

Keywords: Tunnel Structure, Maintenance Monitoring, Period of Durability, How to Check Durability

요약

연구목적: 터널구조물 유지관리계획의 현장점검 결과를 분석하여 개선방안을 제시한다. **연구방법:** 도심지에서 건설되고 있는 서울지하철○호선 14개 공구의 터널구조물을 대상으로 유지관리계획에 대한 다양한 항목의 문제점을 조사하고 분석을 실시하였다. **연구결과:** 유지관리 계획 항목과 계측수량 및 설치위치는 개착터널과 굴착터널로 구분하여 개선방안을 제시하였다. 계측기기의 내구연한은 각종 기준을 검토하였고, 내구성 확인방법은 계측센서의 승인 및 검수, 검사 및 시험, 검정 및 교정 등의 개선방안을 제시하였다. **결론:** 터널구조물 유지관리계획의 개선방안을 건설현장에 적용하면 유지관리계획의 효율성이 증대되고 건설계측 기술발전에 기여할 것이다.

핵심용어: 터널구조물, 유지관리계획, 내구연한, 내구성 확인방법

서론

최근 들어 사회기반시설의 확충에 따라 지하철, 도로, 일반 및 고속철도, 전력구, 통신구, 공동구 등 국내 터널구조물의 건설이 증가되고 있으며, 공사계획 및 유지관리계획을 위한 정보화 시공 및 유지관리 분야의 연구도 활발하게 진행 되고 있다. 건설공사에서 계측이란

Received | 4 September, 2019

Revised | 11 October, 2019

Accepted | 23 December, 2019

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

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, 계측결과와 분석을 통하여 구조물의 특성과 연관성을 파악하고 구조물의 현 상태 및 발생 가능한 문제를 관측 및 예측하는 행위를 의미한다.

일반적으로 터널 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.

본 논문에서는 도심지에서 건설되고 있는 서울지하철○호선 14개 공구의 터널구조물을 대상으로 유지관리계측 항목, 계측센서의 수량 및 설치위치, 계측센서의 내구연한, 계측센서의 내구성 확인방법, 유지관리계측 관리기준 수립 등에 대한 현장점검 결과를 분석하고 각 항목별 터널구조물 유지관리계측의 개선방안을 제시하여 효율적인 유지관리계측과 건설계측기 술발전에 기여하고자 한다.

터널구조물 유지관리계측

터널구조물 유지관리계측의 목적

터널구조물에서 유지관리계측은 구조물 완공 후 공용기간 중에 주변지반의 변화와 영향으로 인하여 발생하는 배면 지반, 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 의미하며, 터널구조물에서 공사계측과 유지관리계측의 영역 구분은 Fig. 1과 같다.

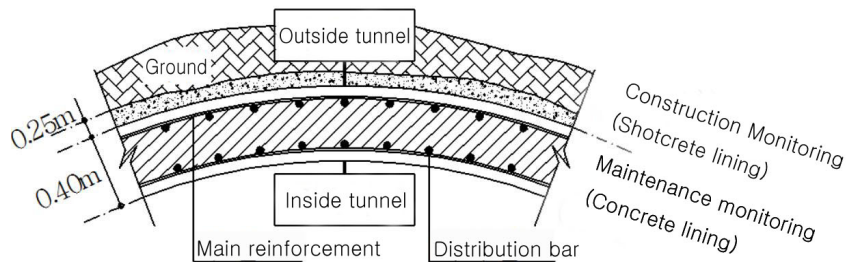


Fig. 1. Area classification of construction and maintenance monitoring in tunnel structure

터널구조물 유지관리계측의 필요성

개착터널인 박스구조물은 토공작업 시 다양한 형태의 흙막이구조물 계측이 수행되며, 굴착완료 후 콘크리트 구조물 시공 시는 공사 중 계측치의 수렴여부를 확인하고 후속공사를 진행하게 된다. 그러므로 개착구간은 토공작업 시 터널 구간에 비해

토목구조물 배면의 지반상태 확인이 용이하므로 개착 박스단면의 구조설계에 적용되는 각종 설계 입력정수의 변화가 적으므로 유지관리 시 불확정적인 요소가 터널구간 보다는 적다고 볼 수 있다(Woo, 2017a). 개착구조물은 공사 완료 후 지중에 있는 상태가 상재하중, 측압, 양압력 등의 외력의 평형으로 인하여 가장 안정된 상태가 되므로 이런 평형 상태의 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(Woo et al., 2000). 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, 근접 굴착에 따른 배면지반의 이완 등으로 터널구조물에 변위 발생과 응력 변동 등의 장기적 구조물 거동 발생 가능성으로 터널구조물에 대한 유지 관리계측의 중요성이 대두되어 1995년부터 서울지하철 5~8호선 터널구간에 극히 제한적으로 적용되어 계측 및 분석이 수행 중에 있으나, 단기간의 축적된 기술과 계측기기적인 문제 및 분석기술 수준의 부족 등으로 구조물 이상거동의 조기파악을 위해 많은 연구와 함께 유지관리계측 관리기준 제정이 필요한 분야이다(Back et al., 2002).

터널구조물 유지관리계측 항목

도심지터널에서 유지관리계측의 항목 선정에 있어서는 시공시의 현장여건이 매우 중요하므로 시공 시 터널의 함몰이나 붕괴가 발생한 구간, 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 선정 시 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 공사계측에서 내공변위, 지중변위, 록 볼트인발 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 유지관리 계측 단계에서는 시공 시에 원지반의 변위와 하중이 거의 수렴되었기 때문에 터널 공용 중에 추가적인 원지반의 변위와 작용하중은 크게 발생하지 않을 것으로 예상된다. 따라서 NATM의 지보 설계개념과 지반 특성곡선에 의해 유지관리계측은 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단되며, 터널에서 유지관리계측 적용 우선순위는 숏크리트에 근접된 원지반에 작용하는 토압 및 간극수압 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정, 그리고 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정의 순으로 계측이 수행되어야 한다.

Fig. 2는 터널에서 수행되는 각종 유지관리계측 항목들을 나타낸 것이며, 터널의 크기(단선, 복선, 유치선, 정거장 등), 터널연장이 긴 경우에는 시공 공구별로 유지관리계측의 중요 우선순위, 계측기기의 종류별 손상실 비율 등을 종합적으로 고려하여 합리적으로 단면당 계측항목별로 계측 측정수를 결정하여야 한다(Woo, 2018).

Table 1은 터널구조물 유지관리 시 수행되는 계측항목 및 계측결과로부터의 판단내용을 나타낸 것이다.

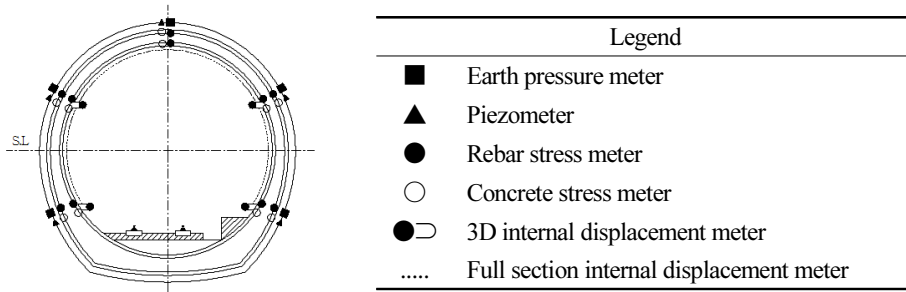


Fig. 2. Example of arrangement of maintenance monitoring in tunnel structure

Table 1. Tunnel structure maintenance monitoring items and contents

Monitoring items	Contents
Earth pressure	<ul style="list-style-type: none"> · Appropriateness evaluation of tunnel lining design · Investigation of the expansion of soil relaxation area and change of ground stress
Pore water pressure	<ul style="list-style-type: none"> · Residual water pressure and size measurement of drainage tunnel · Non-drainage tunnel lining water pressure measurement · Confirm lining stability according to water pressure
Ground water level & water volume	<ul style="list-style-type: none"> · Reliability evaluation in pore water pressure measurement · Evaluation of correlation with water content in tunnel
Concrete stress	<ul style="list-style-type: none"> · Stress measurement of concrete lining due to external load · Measuring the internal stress in the lining when the concrete lining is designed as a structure
Reinforcing stress	<ul style="list-style-type: none"> · Measuring the stress in a concrete lining due to external load · Verification of reliability of concrete lining stress measurement results
Internal displacement	<ul style="list-style-type: none"> · Determining the safety of tunnel structures by measuring displacement of concrete lining due to external load
Crack	<ul style="list-style-type: none"> · Determining the safety of a tunnel by measuring the progress of cracks in concrete lining
Building slope	<ul style="list-style-type: none"> · Measure the slope of the ground building due to the behavior of the tunnel structure to judge safety of the building
Earthquake and vibration	<ul style="list-style-type: none"> · Judgment of the safety of the tunnel structure at the time of earthquake and the influence of vibration of the surrounding structure due to train operation
Temperature	<ul style="list-style-type: none"> · Determining the effect of temperature on concrete lining

터널구조물 유지관리계측 현장점검 내용 및 개선방안

도심지에서 건설되고 있는 서울지하철○호선 14개 공구에 대한 터널구조물 유지관리계측의 현장점검 내용으로는 계측항목, 계측센서의 수량 및 설치위치, 계측센서에 대한 내구연한 검토, 계측센서에 대한 내구성 확인방법 검토, 계측 관리기준 수립 등이며, 이를 상세히 분석하여 제시한 개선방안은 다음과 같다.

터널구조물 유지관리계측 항목

터널구조물 유지관리계측 항목 점검결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 계측항목이 공구별로 차이가 많아 터널 구조물 유지관리계측 목적에 부합되도록 계측항목의 검토가 필요하다.

개착터널(Cut & Cover tunnel : 박스구조물)

개착터널은 매립식 변형률계에 의한 콘크리트응력 측정위주로 설치되어 콘크리트 응력과 철근 응력을 동시에 측정 하는 것이 바람직하며, 대부분 무응력 변형률계가 설치되지 않아 무응력 변형률계가 설치되어야 콘크리트 특성을 제외한 실 외력에 의한 응력변화를 확인할 수 있다. 콘크리트 라이닝의 응력 및 철근 응력 산출에서 변형률계로 측정되는 총변형률(ϵ_{total}) = 탄성변형률(ϵ_e) + Creep 변형률(ϵ_{cr}) + 건조수축(ϵ_{sh}) + 온도변화(ϵ_t) 로 표시되며, 외부하중에 의한 순수 변형률(ϵ_c) = $\epsilon_{total} - (\epsilon_{sh} + \epsilon_t)$ 로 표시된다. 여기서, ϵ_{sh} 와 ϵ_t 는 무응력 변형률계로 측정하며, 실내실험 결과 콘크리트 양생과정인 7일 이내에서 약 1MPa의 콘크리트 응력이 발생된다.

개착터널인 박스구조물은 공사완료 후 지중에 있는 상태가 상재하중, 측압, 양압력 등의 외력의 평형으로 인하여 안정된 상태가 되므로 박스구조물의 각 부재에 철근응력 및 콘크리트응력 위주의 유지관리계획이 중요하다.

굴착터널(Bored tunnel : 터널구조물)

굴착터널은 콘크리트응력과 철근응력 및 간극수압 측정위주로 설치되어 있으며, 터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 굴착단계인 공사계획에서 내공변위, 지중변위, 록볼트인발시 하중-변위 관계 등의 각종 변위와 지표, 천단, 지중침하와 지보재인 슛크리트응력 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 NATM의 지보 설계개념과 지반 특성곡선에 의해 유지관리계획은 원지반에서의 계측항목이 중요한 것으로 판단되며, 터널구조물에서 유지관리계획 적용 우선순위는 다음과 같다.

- (1) 슛크리트에 근접된 원지반에 작용하는 토압과 간극수압 측정
- (2) 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정
- (3) 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정

터널구조물 유지관리계획 센서의 수량 및 설치위치

터널구조물 유지관리계획 센서의 수량 및 설치위치 점검결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 계측센서의 수량 및 설치위치가 구구별로 차이가 많아 구조물의 특성과 구조적인 단면력에 부합되도록 하는 검토가 필요하다.

개착터널(Cut & Cover tunnel : 박스구조물)

개착터널에서는 박스 단면크기(본선, 정거장 등)에 대한 고려 없이 계측센서를 단면 당 2개에서 8개까지 설치하였으며, 도면에 구체적인 설치 지점이 표기되지 않고 바닥슬래브 등에도 설치가 되어 있다. 바닥슬래브는 부재중에서 휨모멘트가 가장 크게 작용하나, 두께 20cm이상의 도상콘크리트가 상부에 설치되어 단면이 증대되는 효과가 있으므로 벽체나 상부슬래브를 더 우선적으로 계측이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 박스구조물은 Fig. 3과 같이 구조계산상 휨모멘트가 큰 지점에 설치하는 것이 필요하며, 철근과 콘크리트에 각각 설치하되, 단면 외측철근과 내측철근에 별도 설치하여 압축응력과 인장

응력을 측정하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 박스구조물의 크기 및 구조형식(본선, 정거장 등)에 따라 적정 설치위치를 검토할 필요가 있다.

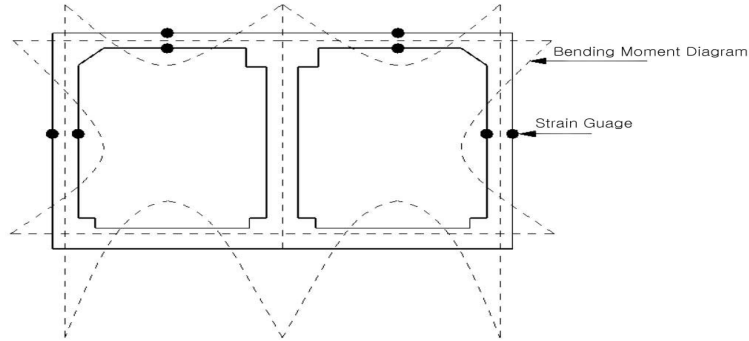


Fig. 3. Opening tunnel(main line box structure) monitoring location example

굴착터널(Bored tunnel : 터널구조물)

굴착터널에서는 콘크리트와 철근에 매립식 변형률계와 간극수압계 위주로 유지관리계측 센서를 설치하였으며, 일부 공구에서는 콘크리트 라이닝에 표면부착식 전단면 내공변위계만 설치된 공구도 있었다. 또한, 터널크기 및 구조형식(단선, 복선, 유치선, 정거장 터널 등)에 대한 설치위치를 고려하지 않고 단면당 콘크리트용 변형률계를 2개에서 6개, 간극수압계를 1개 설치한 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.

단선터널 이상의 단면인 경우 Fig. 2의 터널구조물 유지관리계측 센서 배치 예와 같이 계측기의 손망실 비율과 내구성 저하를 고려하여 철근 및 콘크리트의 응력을 측정하는 매립식 변형률계는 콘크리트 라이닝 외측과 내측에 단면당 5점[변형률계 총 20개: 철근용 10개=5점에 설치×2개(외측, 내측 각 1개), 콘크리트용 10개=5점에 설치×2개(외측, 내측 각 1개)]에 설치하고, 매립식인 토압계와 간극수압계는 3점인 천단부와 어깨부[토압계와 간극수압계 각 3개]에 설치 하는 것이 바람직하고, 콘크리트 라이닝 표면에 부착하는 전단면 내공변위계는 선택적으로 적용할 필요가 있다.

터널구조물 유지관리계측 센서에 대한 내구연한 검토

터널구조물 유지관리계측 센서에 대한 내구연한 점검 결과 및 분석내용은 다음과 같으며, 유지관리계측은 장기계측으로 계측센서의 내구연한 확보가 무엇보다도 중요하므로 계측센서에 대한 내구연한 검토가 필요하다(Woo, 2019).

2002년 2월 서울특별시 지하철건설본부에서 서울지하철6,7호선 유지관리 계측시스템 설치 및 분석 용역 시 유지관리 계측시스템의 무상보증기간을 최종설치 준공일로부터 최소 5년으로 적용한 예가 있고, 2002년 9월 서울지하철 9호선 시공계측관리 표준시방서(안)의 변형률계 센서의 내구연한은 3년 이상, 장기계측의 경우 통상적으로 2~10년 정도는 정상적인 기능을 유지해야 하는 것으로 제시된바 있다(Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, 2002).

2008년 터널표준시방서 개정 시 준공 후 계측시스템의 하자보수기간은 공동주택관리령에서 국내공동주택 전자장치들의 하자보수기간 2년 이후에도 정상적으로 작동해야 하는 것으로 제시하였다(Woo, 2017b).

2010년 건설계측 및 계측업의 현황분석과 발전방안 연구에서는 계측센서를 포함한 계측시스템의 무상하자보증 기간은 최종 설치준공일로부터 최소 3년 이상을 제시하였다(Woo, 2010).

2015년 서울특별시 도시기반시설본부에서 서울지하철 계측관리요령 개선(안)을 제정하면서 계측센서의 내구연한에 대해 최소 준공 후 3년 이상으로 계측기 자체의 하자보수기간내 망실될 경우 설치업체에서 재설치하는 하자보수기간을 제시하였으며, 하자보수 기간 및 책임범위는 다음과 같다(Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters, 2015).

- (1) 시공 중 계측기의 하자보수기간은 설치 후 3년 이내, 유지관리 계측기의 하자보수기간은 준공 후 최소 3년 이내로 관리하도록 한다.
- (2) 하자보수 기간 내에 발생하는 모든 하자에 대해서는 계측기 및 자동화 계측시스템을 구축한 업체 또는 기관에서 동일 위치에 재설치 또는 표면 노출형 계측기로 재설치 하여야 한다.

2017년 건설계측의 이론과 실무의 지하 건설시설물편(Woo et al., 2017) 터널의 유지관리 계측 실무시방서에서 터널의 유지관리를 위한 계측기기는 최소 5년 이상의 내구성이 보장되어야 하며, 설치 및 유지관리가 용이하고 계측 목적에 맞는 계측범위와 정밀도를 가져야 하며, 기기 특성에 대한 사전 검증을 실시하여야 하는 방안을 제시하였다.

따라서 앞에서 검토된 내용을 종합하여 건설계측센서를 포함한 계측시스템의 내구연한은 다음과 같이 결정하는 것이 합리적이다.

- (1) 계측시스템의 내구연한은 최소 3년 이상으로 하며, 이 기간을 최종 설치 준공일로부터 가산하면 장기 계속공사인 경우 차수별 공사 준공기간이 약 2~4년이 소요되므로 최종 내구연한은 5~7년 정도이다.
- (2) 하자담보책임기간동안 필요한 예비품과 고장수리부품, 소모품, 고장수리비용은 계측시스템 설치자 부담으로 하며, 이 기간 중 수리가 불가능한 물품의 경우 유지관리기관의 승인을 얻어 동등이상의 제품으로 교체하여야 한다.
- (3) 계측시스템의 보수기간 중에는 대체 장비를 사용하여 계측시스템 운영에 지장이 없도록 해야 한다.

터널구조물 유지관리계측 센서에 대한 내구성 확인방법 검토

터널구조물 유지관리계측 센서에 대한 내구성 확인방법 및 분석내용은 다음과 같으며, 유지관리계측은 장기계측으로 계측센서의 내구성 확보가 무엇보다도 중요하므로 계측센서에 대한 내구성 확인방법 검토가 필요하다.

건설공사에 사용되는 대부분의 계측기기는 계량 및 측정에 관한 법령에 규제받지 않아 의무적인 검 교정 대상이 아니며, 국가 표준 및 검인증 기준이 없어 국가 공인기관에서 검 교정이 곤란한 경우가 많으므로 생산업체나 계측업체에서 자체 마련한 검사 기준 및 교정 절차에 따라 검 교정이 수행되는 경우가 많아 대외적인 신뢰도가 낮은 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 아래에 제시한 터널구조물 유지관리계측 센서의 승인 및 검수, 검사 및 시험, 검정 및 교정을 실시하는 것이 내구성 확인의 효과적인 방법이다.

터널구조물 유지관리계측 센서의 승인 및 검수

(1) 건설 계측시스템 설치자는 계측시스템 상세 설치 계획서와 함께 사용될 계측센서, 계측장비 및 부속자재 등이 계측의 목적에 부합되도록 다음 사항을 포함하여 제출하고 승인을 얻어야 한다.

- ① 작동 이론: 계측기기의 목적, 계측기기의 기본 측정 원리, 기본적인 계측원리를 설명하기 위한 도해 및 도면, 시스템의 측정 범위, 설치 요령
- ② 설치 순서: 계측기의 설치 순서에 대한 상세 설명 자료, 설치 시 유의 사항
- ③ 작동 및 측정 순서: 측정 준비 및 측정 개시를 위한 세부적인 순서, 사용자 및 장비에 관련된 주의사항, 계측 설치 후 초기치를 얻는 방법 및 순서, 초기치 이후의 계측치를 얻는 순서, 측정치에 대한 원인 및 영향 분석에 사용될 수 있는 사항
- ④ 보수 및 유지관리: 계측기기 및 시스템의 유지관리에 관한 일반 및 세부사항, 필요시 건전지 교체시기에 관한 사항, 유지관리 시 현장 점검사항, 소모품을 포함한 예비 부품의 목록, 무상보수관련 대표자의 성명, 주소, 전화번호 등, 계측기기 보정시기 및 방법
- ⑤ 계측시스템 운영요원에 관한 교육
- ⑥ 부품별 교체 시기

(2) 계측시스템 검수를 위하여 다음 사항을 서류로 제출하여야 한다.

- ① 제작자 증명원
- ② 공급자 증명원
- ③ 제작자의 품질증명서
- ④ 검 교정 성과서(시험성적서): 공인인증기관(예: KOLAS 인증기관)으로부터 검 교정을 실시한 제조사의 측정 장비를 활용하여 검 교정을 실시한 성적서(Calibration sheet)로 대체
- ⑤ 사용자 설명서 및 유지관리 매뉴얼
- ⑥ 부속품 리스트
- ⑦ 계측기에 대한 시험성적서는 검 교정 장비에 의한 결과를 제출하여야 하며, 필요시 계측기 표본을 추출하여 공인 인증기관(예, 한국산업기술시험원 등)에 의뢰하여 성적서 제출

터널구조물 유지관리계측 센서의 검사 및 시험

(1) 건설 계측시스템에 사용되는 계측센서, 계측장비, 부속자재 등은 계측담당 건설사업관리기술자의 검사 및 시험을 거쳐야 한다.

- ① 현장에서 인도 시 규격 및 성능 검사
- ② 현장에서 조립완성 후 시험운영 실시 및 계측시험의 정확도 입증시험

(2) 현재 계측기기에 대한 검사 및 시험은 주로 제조회사 자체 검사 및 시험으로 이루어지고 있으므로 자체 검사 시 정밀도, 정확도, 내구성을 위주로 검사 및 시험을 실시하여야 한다. 그리고 계측기기의 시험 및 검사에 대한 체크리스트 원본은 각 계측기기와 함께 제출하여야 한다.

(3) 건설 계측시스템 설치자는 계측시스템 운영 중에 수행될 정기적인 검 교정 방법, 순서 및 주기 등에 관한 사항을 제출

하여야 하며, 필요시 각 계측 기기의 기종별 검 교정 시연을 실시하여야 한다. 또한 계측시스템 운영 중 유지관리 기관의 요청이 있을 때는 계측시스템 설치자는 직접 검 교정을 수행하여야 한다. 단, 검 교정에 필요한 비용은 운영주체에서 부담하여야 한다.

터널구조물 유지관리계측 센서의 검정과 교정

건설 계측센서는 정확한 측정을 위해 사용 전에는 반드시 검정을 받고, 사용 중에는 기계오차에 대비하여 주기적인 교정을 받아야 한다. 계측센서에 대한 검 교정 항목은 정밀도, 정확도, 내구성 등을 위주로 시험을 실시하여야 한다.

터널구조물 유지관리계측 관리기준 수립

앞의 점검결과에서 나타난 문제점을 종합적으로 검토하여 체계적으로 적용할 수 있는 터널구조물 유지관리계측 관리기준 수립이 필요하다. 기존의 터널구조물 유지관리계측 관리기준(Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters, 2015)은 NATM 터널에만 한정되어 있고, 개착터널과 기계화터널(Shield, TBM 등)은 관리기준이 없는 실정이며, 계측 센서 및 계측 시스템의 기술발전과 터널구조물 유지관리계측에 대한 지속적인 연구수행으로 인한 연구결과 등이 반영된 최근 기술 수준으로의 개정이 필요하다. 또한, 기 수행된 지하철 유지관리계측 세부지침(Woo et al., 2000)은 계측 시스템의 계획 및 설계, 설치 및 운영, 유지관리에만 국한되어 터널 유지관리계측 항목, 계측센서의 수량 및 설치위치, 계측 센서의 내구연한, 계측센서의 내구성 확인방법 등의 연구가 수행된 후에 관리기준 설정이 필요하다.

결론

본 논문은 도심지에서 건설되고 있는 서울지하철○호선 14개 공구의 터널구조물을 대상으로 유지관리계측 항목, 계측센서의 수량 및 설치위치, 계측센서의 내구연한, 계측센서의 내구성 확인방법, 유지관리계측 관리기준 수립 등에 대한 현장점 검 결과를 분석하고 각 항목별 터널구조물 유지관리계측의 개선방안을 제시하여 효율적인 유지관리계측이 되도록 수행한 연구결과는 다음과 같다.

첫째 터널 유지관리계측 적용 우선순위는 터널 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 숏크리트에 근접된 원지반에 작용하는 토압과 간극수압 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정, 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정 순으로 설치하여야 한다.

둘째 개착터널 계측항목은 매립식 변형률계에 의한 콘크리트응력 측정위주로 설치되어 콘크리트응력과 철근응력을 동시에 측정하는 것이 필요하며, 무응력 변형률계는 거의 설치되지 않아 무응력 변형률계가 설치되어야 콘크리트 특성을 제외한 실 외력에 의한 응력변화를 확인할 수 있다.

셋째 굴착터널 계측항목은 콘크리트응력과 철근응력 및 간극수압 측정 위주로 설치되었으나, NATM의 지보 설계 개념과 지반 특성곡선에 의해 터널의 특성을 고려하여 원지반에 작용하는 토압과 간극수압 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트응력 측정이 필요하며, 콘크리트 라이닝 표면의 부착식 내공변위 측정은 매립식으로 설치가 어려운 경우에 한하여 선택적으로 설치하여야 한다.

넷째 개착터널 계측센서의 수량 및 설치위치는 박스 단면에서 바닥슬래브가 부재중에서 휨모멘트가 크게 작용하나, 도상

콘크리트가 상부에 설치되어 단면이 증대되는 효과가 있으므로 벽체나 상부슬래브에 더 우선적으로 설치하여야 한다.

다섯째 굴착터널 계측센서의 수량 및 설치위치는 터널크기와 설치위치 및 손망실 비율과 내구성 저하를 고려하지 않고 설치되어 매립식 변형률계는 콘크리트 라이닝 외측과 내측에 단면당 5개[변형률계 총 20개: 철근용 10개=5점에 설치×2개(외측, 내측 각 1개), 콘크리트용 10개=5점에 설치×2개(외측, 내측 각 1개)]에 설치하고, 매립식인 토압계와 간극수압계는 3점인 천단부와 어깨부[토압계와 간극수압계 각 3개]에 설치하는 것이 효과적이다.

여섯째 계측시스템의 내구연한은 최소 3년 이상으로 하며, 이 기간을 최종 설치 준공일로부터 가산하면 장기 계속 공사인 경우 차수별 공사 준공기간이 약 2~4년이 소요되므로 최종 내구연한은 5~7년 정도는 되어야 한다.

일곱째 계측센서는 국가 공인기관에서 검 교정이 곤란한 경우가 많으므로 생산업체나 계측업체에서 자체 마련한 검사 기준 및 교정 절차에 따라 검 교정이 수행되는 경우가 많아 대외적인 신뢰도가 낮은 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 대안으로 제시한 터널구조물 유지관리계측 센서의 승인 및 검수, 검사 및 시험, 검정 및 교정을 실시하는 것이 내구성 확인의 효과적인 방법이다.

여덟째 기존의 터널구조물 유지관리계측 관리기준은 NATM 터널에만 한정되어 있고, 개착터널과 기계화터널(Shield, TBM 등)은 관리기준이 없는 실정이며, 계측센서 및 계측시스템의 기술발전과 터널구조물 유지관리계측에 대한 지속적인 연구수행으로 인한 연구결과 등이 반영된 최근 기술 수준으로의 개정이 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 2017년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학 개인기초연구(기본)지원 사업(과제번호 2017R1D1A1B03028842)으로 “건설 및 터널 계측센서의 최적 내구연한 연구”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

References

- [1] Back, K.H., Oh, Y.S., Kim, Y.J., Kim, Y.G. (2002). “A study on the efficient plan of maintenance monitoring for tunnel.” *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 4, No. 4, pp. 355-369.
- [2] Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (2002). *Seoul subway maintenance monitoring*, pp. 234-236.
- [3] Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters (2015). *Improvement plan of Seoul subway monitoring management*, pp. 70-90.
- [4] Woo, J.T. (2010). “A study of the present state analysis and development plans about construction monitoring and monitoring industry.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2D, pp. 163-169.
- [5] Woo, J.T. (2017a). “A study on behavior of the earth retaining structure by field measurement and numerical analysis.” *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 13, No. 3, pp. 286-295.
- [6] Woo, J.T. (2017b). “Theoretical study on the durability standard of construction monitoring sensors.” *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Fall Conference*, Vol. 2, No. 1, pp. 168-169.
- [7] Woo, J.T. (2018). “A study on the loss and damage ratio of railroad tunnel maintenance monitoring sensor.” *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 3, pp. 262-270.
- [8] Woo, J.T. (2019). “A Study on the Cause and Improvement Plans of Construction Monitoring Sensors Decline in Durability.” *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 1, pp. 28-38.

- [9] Woo, J.T., Lee, R.C. (2017). Theory and practice of construction monitoring-underground construction facilities, CIR Publishing Co., pp. 92-94.
- [10] Woo, J.T., Yhim, S.S. (2000). "Improvement of tunnel maintenance monitoring." Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference, pp. 33-36.
- [11] Woo, J.T., Yoo, C.S. (2000). Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, Details manual of subway maintenance monitoring, pp. 50-60.