한국방재안전학회 논문집 2014년 12월
제7권 제2호, pp. 9-16

(사) 한국방재안전학회
Korean Society of Disaster & Security

터널 유지관리 계측의 국내설계기준 개선 및 최신 기술동향

백경종* · 권영억**

Improvement of Domestic Design Criteria of Tunnel Maintenance Monitoring and Latest Technology Trend

Kyung Jong Baek* and Young Eok Kwon**

접수일자: 2014년 11월 15일/심사완료일: 2014년 12월 9일

요 약 공용 중인 터널 구조물의 구조적 취약부위를 대상으로 시행되는 유지관리 계측은 효과적인 관리를 위해서 터널의 굴착에 따른 지반 및 주변 구조물의 거동을 파악하기 위한 공사 중 계측과 연계하여 판단되어져야 하나 공사시기 및 유지관리 시점을 기준으로 공사 중 계측과 유지관리 계측을 별도로 시행하고 있어 연계성 및 관련 자료의 체계적 관리가 대부분 미흡한 상태이다. 본 논문에서 국내 설계기준의 터널계측 문제점을 분석하여 개선방향을 제시하였으며, 향후 유지관리에는 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용이 활발히 추진될 것으로 전망되므로 이와 관련된 유지관리 계측시스템의 개발·적용 및 국내 설계기준 및 시방기준의 개정이 필요하다.

핵심용어 공사 중 계측, 유지관리 계측, 첨단센서, 무선통신

ABSTRACT Though the maintenance monitoring of structurally weak parts of the tunnel structure in public service must be judged in connection with the monitoring during the construction period for analysis of the behavior of the ground and surrounding structures following the tunnel excavation for the effective management, the monitoring during the construction period and the maintenance monitoring are implemented separately on the basis of the periods of construction and maintenance, so the connectivity and systematic management of the related data are mostly inadequate. The improvement direction is suggested in this thesis, by analyzing the problems of tunnel monitoring in the domestic design criteria. And, it is anticipated that from now on the use of hi-tech sensors and wireless communications technology will proceed vigorously in the maintenance, so considering these situations, the development and application of the maintenance monitoring system and the revision of the domestic design criteria and specification are needed in the future.

KEYWORD monitoring during the construction period, maintenance monitoring, high-tech sensors, wireless communications

1. 서 론

일반적으로 도로 및 도로시설물은 도로를 비롯한 터널, 교량, 지하차도, 고가도로, 복개도로, 도로의 부속물을 지칭하며, 도로와 관련된 시설물을 포함한다. 도로와 관련하여 도로와 부속되거나 연관된 시설을 유지관리 대상으로 설정하는 경우가 대부분이며, 행정관리 주체에 따라 범위가 유지관리 대상이 한정되기도 한다. 시설물의 안전관리에 대한 특별법에 따르면 유지관리란 완공된 시설물의 기능을 보전하고 시설물 이용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 시설물을 일상적으로 점검·정비하고 손상된 부분을 원상복구하며 경과시간에 따라 요구되는 시설물의 개량·보수·보강에 필요한 활동을 하는 것으로 정의하고 있다. 도로시설물 유지관리는 포장 관리, 교량 관리, 터널 관리, 지하차도 관리, 배수시설 관리, 도로안전시설 관리, 부속시설 관리, 구조물 점검 등으로 구분되며 이중 터널 관리는 터널

*(주)다솔컨설턴트 사장(President, Dasol Consultant Co., Ltd., E-mail: aprilbaek@hanmail.net)
**(주)흥인E&C 대표이사(President, Heung-In Engineering & Construction Co., Ltd.)

유지관리 및 터널점검, 정밀안전진단, 보수 및 보강기법, 터널방재 설비, 터널 계측관리 등이 해당된다.

터널의 유지관리 항목인 계측관리는 관련 설계기준으로 국토교통부에서 제정한 터널설계기준, 도로설계기준, 철도설계기준 및 도로설계편람 등에 제시되어 있으며 관련 시방서는 국토교통부, 각 공단 및 지자체에서 제정한 도로공사표준시방서, 고속도로공사 전문시방서, 철도건설공사 전문시방서, 터널표준시방서 등에 제시되어 있다. 국내 각 기관별 설계기준 및 시방서에 제시된 터널계측은 동일하게 공사 중 계측과 유지관리 계측으로 구분하고 있으며 연계성에 대해서는 언급되어 있지 않다. 또한, 현재 시행되고 있는 터널의 계측관리는 대부분 공사 중 계측관리와 공용 중 유지관리 계측을 별도로 시행하고 있는 것이 현실이다. 건설공사 및 유지관리 계측표준시방서와 한국시설안전공단 터널 유지관리 계측 정보자료에서는 공사 중 계측관리와 공용 중 유지관리 계측의 연계성에 대해서 언급하고 있으나 관련 자료의 체계적 관리는 대부분 미흡한 상태이다. 따라서, 이와 같이 관련 기준의 차이가 나는 부분을 보완하여 현행 유지관리 계측의 관리기준에 대한 개선지침을 수립할 필요가 있다. 또한, 국토해양부에서 고시한 시설물 안전관리에 관한 특별법의 시설물 안전 및 유지관리 기본계획에서 향후 유지관리에는 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용이 유지관리 계측분야에 활발히 추진될 것으로 전망되므로 이와 관련된 유지관리 계측시스템의 개발·적용에 대하여 관심을 가질 필요가 있다.

2. 터널계측 정의

2.1 국내 설계기준

국내 설계기준에서 터널의 계측설계는 터널굴착에 따른 지반 및 주변 구조물의 거동을 파악하기 위하여 적용되며 터널 완공 후 주변여건 및 지반조건상 터널 및 주변에 악영향이 예상되는 경우에는 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 유지관리 계측계획을 수립하는 것으로 제시되어 있다. 각 기관별 설계기준에서 제시된 터널계측의 설계 내용은 다음과 같다.

2.1.1 터널설계기준(건설교통부, 2007)

터널의 계측설계는 계측항목, 계측위치, 배치간격, 계측기의 선정과 설치시기, 측정기간과 빈도, 결과정리 및 분석방법을 포함하여야 하며 계측항목은 터널의 굴착에 따른 지반 및 주변 구조물의 거동을 파악하고 각종 지보재의 지보효과 및 품질을 확인하는데 적합하도록 선정하여야 한다. 단. 터널시공이 인접 구조물에 영향을 미칠 가능성이 높은 경우, 특수한 구조의 터널인 경우, 산사태나 지반거동의 가능성이 있을 경우, 지하수위와 지질학적인 문제 예상지역 등 터널완공 후 주변여건 및 지반조건상 터널 및 주변에 악영향이 예상되는 경우에는 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 유지관리 계측계획을 수립해야 한다.

2.1.2 도로설계편람(국토해양부, 2011)

터널공사 중 계측목적은 터널굴착에 따른 지반의 거동과 각 지보재의 효과를 파악하고 공사의 안전성 및 경제성을 확보하는데 있다. 터널 유지관리 계측목적은 터널 구조물 완공 후 운영 중에 터널 주변의 영향으로 인하여 발생되는 배면 지반, 토압 및 수압의 변화와 콘크리트 구조물의 변화 양상, 환경조건 등을 측정하여 터널 구조물의 안전성을 확인하는데 있다. 터널은 대개 환경변화가 적은 지하에 건설되어 타 구조물에 비해 비교적 안전한 것으로 알려져 있어 유지관리에 대한 인식이 부족하였다. 그러나 터널 건설구간 중 지질 이상대와 기존 구조물 근접 통과구간 등의 근접시공이 예상되는 지역 등과 같은 취약구간은 배면지반의 이완 등으로 터널에 변위발생과 응력변화 등의 장기적 거동발생 가능성이 예상되어 터널에 대한 유지관리 계측의 중요성이 대두되고 있다.

굴착단계인 공사 중 계측에서 각종 변위, 침하, 지보재 응력 및 축력의 수렴여부를 확인한 후에 콘크리트 라이닝이 시공되므로 유지관리 계측 단계에서는 숏크리트에 근접된 원지반의 작용하중 측정, 콘크리트 라이닝의 철근응력과 콘크리트 응력 측정, 표면부착식 내공변위 측정을 통해 설계하중 이외의 추가 하중 작용여부를 조사하여야 한다. 대상 터널의 길이가 긴 경우는 원칙적으로 자동화 계측이 가능한 기기를 선정하여야 하며 유지관리 계측에는 필수이다.

2.1.3 도로설계기준(국토해양부, 2012)

도로설계기준은 터널설계기준을 따른다.

2.1.4 철도설계기준(노반편)(국토교통부, 2013)

철도설계기준은 터널설계기준과 동일하다.

2.2 국내 시방서 기준

터널계측과 관련된 국내 시방서는 대부분 터널굴착 시부터 콘크리트 라이닝 완료 시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 계측 및 분석 작업에 적용하며, 시공계측 뿐만 아니라 필요시 유지관리에 필

요한 계측기 설치도 공사에 반영하여야 한다고 제시되어 있다. 각 기관별 시방서에 제시된 터널계측의 내용은 다음과 같다.

2.2.1 도로공사표준시방서(국토해양부, 2009)

터널계측은 터널굴착 시부터 콘크리트 라이닝 완료 시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 계측 및 분석 작업에 적용한다. 계약상대자는 시공계측 뿐만 아니라 필요시 유지관리에 필요한 계측기 설치도 공사에 반영하여야 하며, 이에 필요한 자료를 정리하여 감독자에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

2.2.2 서울특별시 전문시방서(토목편)(서울특별시, 2009)

계측관리는 터널시공 중의 안전관리를 목적으로 한다. 제반 여건상 장기적인 안정관리가 필요한 경우에는 이를 위한 계측기를 설치하여야 하며 이에 대한 모든 사항은 준공시 발주자에게 서면으로 이관하여 시설물 운영시에도 정기적인 계측이 가능하도록 해야 한다.

2.2.3 고속도로공사 전문시방서(한국도로공사, 2012)

터널계측은 터널 굴착 시부터 콘크리트 라이닝 완료 시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 계측 및 분석 작업에 적용된다. 계약상자는 시공계측 뿐만 아니라 필요시 유지관리 계측도 공사에 반영하여야 하며, 이러한 자료를 정리한 후 감독원에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

2.2.4 행복도시건설공사 전문시방서(행정중심복합도시건설청, 2012)

터널계측은 터널 굴착 시부터 콘크리트 라이닝 완료 시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 계측 및 분석 작업에 적용한다. 수급인은 시공계측 뿐만 아니라 필요시 유지관리에 필요한 계측기 설치도 공사에 반영하여야 하며, 이에 필요한 자료를 정리하여 감리원에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

2.2.5 철도건설공사전문시방서(노반편)(국토교통부, 2013)

터널계측은 터널시공 중의 안전관리를 위한 계측기의 설치, 측정, 유지관리 및 자료 관리를 포함한다. 단, 제반 여건상 장기적인 안전관리가 필요하여 계측기를 설치하는 경우에는 이에 대한 모든 사항은 준공시 발주자에게 서면으로 이관하여 시설물 운영시에도 정기적인 계측이 가능하도록 해야 한다.

2.2.6 터널표준시방서(개정안)(국토교통부, 2014)

터널계측은 터널시공 중의 안전관리를 위한 계측기의 설치, 측정, 자료 관리를 포함한다.

3. 터널 유지관리 계측 기준

건설공사 및 유지관리 계측표준시방서(건설교통부, 2008)와 한국시설안전공단의 터널유지관리 계측 기술정보자료에 의한 터널 계측관리 내용은 다음과 같다.

3.1 건설공사 및 유지관리 계측표준시방서(안)(건설교통부, 2008)

계측관리는 공사 중인 시설물의 안전 및 품질관리와 준공되어 유지관리 중인 시설물의 안전을 목적으로 설계시의 불확정성 확인 및 안정성 평가 등의 안전관리 기본 자료를 취득하는 행위로 정의하고 있다. 본 시방서에서는 시설물의 계측을 계측목적, 계측기간, 계측시기, 계측자료의 수집방법 및 계측자료의 전송 방법에 따라 분류하고 있다.

계측시기에 따라서 공사기간 중 시공자 및 주변 시설물의 안전성을 확보하고, 시설물의 품질 및 초기 값을 확보하기 위하여 실시하는 공사 중 계측과 준공된 시설물에 대해서 안전성, 사용성 및 내구성을 파악하기 위하여 실시하는 유지관리 계측으로 구분하고 있다.

계측자료의 수집방법에 따라 계측기로 부터 자료를 인력으로 수집하고 별도의 컴퓨터로 실시하는 수동계측, 저장장치에 계측자료를 기록할 때 까지를 자동화하고 별도의 컴퓨터로 실시하는 반자동 계측 및 자료수집, 해석, 그래프화 까지를 유·무선으로 온라인화 된 시스템으로 일관하여 실시하는 자동계측으로 구분하고 있다. 계측자료의 전송방법에 따라서는 계측기로부터 측정된 자료를 케이블을 통하여 전송하여 데이터 로거 또는 컴퓨터로 직접 수집하는 유선계측, 계측기로부터 측정된 결과를 케이블을 통하지 않고 무선으로 전송하여 자료를 수집하는 무선계측 및 계측자료를 수집하는 과정에서 일부분은 무선에 의해 자료를 전송하고 일부분은 유선에 의해 자료를 전송하는 유·무선계측으로 구분하고 있다.

공사 중 계측은 터널시공 중의 안전관리를 목적으로 하고 있으며 계측 측정기간은 계측기 설치 후부터 계측 값의 수렴이 확인될 때까지로 하고 있다. 유지관리 계측은 터널 유지관리시의 안전관리를 목적으로 하며, 준공 후 터널 유지관리를 위한 시공과정에서의 계측관리도 포함하고 있으며 터널이 완공된 후 사용기간 중에 굴착면 주변지반의 변화와 영향으로 인하여 발생하는 콘크리트 라이닝의 변화

양상을 측정하는 행위로 정의하고 있다.

유지관리 계측의 목적은 터널이 완공된 후 터널 구조물의 변상여부에 관한 정보를 관리주체에 조기에 제공함으로서 그에 따른 대책을 세울 수 있도록 하여 터널의 안정성을 확보하는데 있다. 터널 구조물의 유지관리 계측은 공사 중 안전 및 품질관리뿐만 아니라 유지관리를 위해 설치한 계측기를 연속성 있게 활용하여 계측하는 것을 원칙으로 하고 있다.

유지관리 계측을 신규로 설치하고자 하는 터널은 대통령령이 정하는 1,2종 시설물 중 지반변형이 예상되는 터널, 터널 주변의 특정 건물로 인해 위해가 예상되는 터널, 하저터널, 해저터널, 장대터널 등에 설치하는 것을 원칙으로 한다. 유지관리 계측을 위한 단면선정은 터널의 용도, 규모, 지반조건, 시공이력 등을 고려하여 관련성을 파악할 수 있도록 하여야 하며, 지반이 취약하고, 지질변화가 심하여 과다변위가 예상되는 구간, 주요 구조물 인접지나 향후 구조물이 터널에 근접하여 신축이 예상되는 구간, 공사 중에 큰 범위로 붕락이 발생된 부위 등 현장 상황을 대표할 수 있는 단면, 큰 변형이 예측되는 단면, 붕괴시 가장 영향범위가 큰 단면을 선정하여야 하고 구조적으로 가장 위험한 단면을 주 계측단면으로 선정하고 있다. 공사 중 안전관리를 위하여 설치한 계측기가 유지관리 계측으로 이관된 경우 터널 구조체가 안정화되었다고 판단될 때까지 계측 관리하여야 한다.

3.2 한국시설안전공단 터널 유지관리 계측

한국시설안전공단에서 실시한 정밀안전진단, 연구개발 및 사고사례 조사 등에서 도출된 시설물별 안전취약 요소와 이에 대한 대책방안 중 터널 유지관리 계측기술 정보자료에 의하면 지하구조물은 환경변화가 적은 지하에 건설되고 구조적으로 비교적 안전한 것으로 알려져 있어 그 동안 다른 토목구조물에 비하여 유지관리에 대한 인식이 부족한 것으로 분석하였다. 그러나 최근 들어 국내외적으로 터널의 붕락 및 라이닝의 탈락, 지반의 변형 등의 사고로 인해 지하구조물의 안정성에 대한 문제를 재고하게 되었고, 변상 발생시 적극적인 대책강구가 요구되고 있는 실정이다.

특히, 터널은 지중에 묻혀있는 특수성으로 인해 라이닝 위주로 조사가 진행된다는 점과 진단에 필요한 지속적인 터널의 상태정보가 매우 부족해 지하구조물의 유지관리와 안전점검 및 정밀안전진단이 단편적으로 수행되고 있는 실정이다. 따라서 터널의 구조적 안전성 평가를 위한 정량화된 정보수집 방법인 유지관리 계측을 실시하여 라이닝의 변형, 침하, 이동과 변상의 진행성 등을 파악함으로서 합리적이고 정량적인 터널구조물의 유지관리가 이루어져야 한다고 제시하고 있다.

유지관리 계측은 터널 구조물의 시공 중 계측뿐만 아니라 구조물 완공 후에도 지속적으로 수행됨으로써 시간경과와 환경변화에 따른 구조물의 이상 및 변화추이를 파악할 수 있게 되고, 결과 분석단계를 거치면서 구조물의 안전유무도 판단할 수 자료를 제공하는 것이 유지관리 계측의 목적이다. 터널 유지관리를 위한 계측은 공사 중 계측과는 달리 장기간에 걸쳐 계측이 수행되어야 하며, 장기계측 과정에서 계측결과의 정확도와 일관성 등을 유지하기 위하여 계측 자동화에 용이한 계측설계가 이루어져야 한다. 그리고 유지관리를 위한 계측단면 결정은 지반이 취약한 구간이나 토피고가 얕고 인접구조물이 위치해 있는 구간뿐만 아니라 전체를 대표할 수 있는 터널단면들을 선정하여야 국부적인 터널의 안정성 평가뿐만 아니라 전체 터널의 거동경향을 파악하고 평가할 수 있는 계측설계가 이루어져야 한다.

3.2.1 국내 유지관리 계측현황

국내에서는 서울지하철 일부 터널 구간에 준공 후 유지관리를 위한 터널 구조물의 안전성, 사용성 및 내구성을 파악하기 위하여 NATM 터널구간을 대상으로 유지관리 계측을 적용한 사례가 있다. 대표단면 계측항목으로는 토압계, 간극수압계, 콘크리트 응력계, 철근 응력계 등을 설치하여 유지관리 계측을 수행 중에 있다. 일상관리 계측항목으로 내공변위계와 천단침하계를 설치하여 계측을 수행 중에 있으며 자동화 계측방법을 적용하고 있다.

하지만, 국내 터널현장의 유지관리 계측은 장기적인 계측에 적합한 계측기의 내구성 및 민감도를 크게 고려하지 않고 기존 매설식 계측기들을 사전점검 없이 사용한 구간이 있으며, 광섬유 센서 및 광파기 등 새로운 계측장비들이 도입되면서 터널의 변형 관찰만으로 유지관리 계측이 수행되고 있는 추세이다. 또한 계측 수행지침이나 기준이 없어 운영 중인 터널의 거동을 대표하면서 국부 중요 지점을 장기간(공용기간) 계측할 수 있는 단면선정과 터널특성을 고려한 계측항목 선정이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

3.2.2 해외 유지관리 계측현황

터널 설계단계에서 유지관리를 위한 계측설계가 이루어져 공사 중 계측 및 공사 완료 후에도 유지관리 계측에 의해 지속적으로 터널거동을 파악하고 있는 터널 구조물은 일본의 세이칸 터널이 해당된다. 세이칸 터널은 총연장 23.3 km에 이르는 장대 해저터널이라는 특성상 설계단계에서 안

전성 검토 및 유지관리 차원에서의 유지관리 계측을 수행하고 있으며 유지관리를 위한 영구계측 프로그램을 운영하고 있다. 세이칸 터널은 공용시 열차주행에 의한 진동 등에 의해 동적 정적으로 반복된 힘을 받아 변형한다거나, 라이닝 배면에 피압수가 발생하는 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 장기간 사용에 따른 터널의 안전성 등을 분석하기 위하여 종합적인 유지관리 대책을 수립하여 시행되고 있다.

4. 터널 계측관리의 문제점 및 개선방향

4.1 국내 설계기준 및 시방서의 문제점

터널계측과 관련된 국내 설계기준 및 시방서는 터널굴착 시부터 콘크리트 라이닝 완료 시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 공사 중 계측관리와 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 유지관리 계측으로 구분하고 있으며 연계성에 대해서는 언급되어 있지 않는 실정이다. 그러나 건설교통부 건설공사 및 유지관리 계측표준시방서에서는 유지관리 계측은 터널 유지관리시의 안전관리를 목적으로 하며, 준공 후 터널 유지관리를 위한 시공과정에서의 계측관리도 포함하고 있다. 공사 중 안전 및 품질관리뿐만 아니라 유지관리를 위해 설치한 계측기를 연속성 있게 활용하여 계측하는 것을 원칙으로 하고 있다.

효과적인 터널 유지관리 계측을 위해서는 터널계측 계획단계에서 공사 중 계측과 유지관리 계측을 연계하여 판단되어져야 하나, 현재 국내 설계기준 및 시방서는 공사 중 계측과 유지관리 계측을 공사시기 및 유지관리 시점을 기준으로 터널 굴착공사 중과 구조물 완공 후 공용기간 중으로 구분하고 있으며 별도의 계측관리로 시행되고 있는 실정이므로 국내 설계기준 및 시방서의 개정이 필요하다고 판단된다.

4.2 현행 터널 계측관리의 개선방향

터널은 특성상 원지반의 변위와 하중이 굴착된 터널 내부로 작용하므로 굴착단계인 공사 중 계측에서 각종 변위와 침하, 지보재의 응력 및 축력을 측정하여 굴착완료 후 각종 계측치의 수렴여부를 확인한 후에 콘크리트 라이닝이 시공되므로 시공 중에 원 지반 변위와 하중이 거의 수렴되었다고 판단하여 공용 중 유지관리 계측 단계에서는 추가적인 원 지반 변위와 작용하중은 크게 발생하지 않을 것으로 예상하여 이 시점을 기준으로 공사 중 계측관리와 유지관리 계측을 구분하여 시행하고 있다.

유지관리 계측시 단면선정은 지반이 취약하고, 지질변화가 심하여 과다변위가 발생된 구간, 공사 중에 큰 범위로 붕락이 발생된 부위 등 구조적으로 가장 위험한 단면을 주 계측단면으로 선정하여 시행하고 있으므로 계측관리시 지반조건, 시공이력 등을 고려하여 관련성을 파악할 수 있도록 공사 중 원 지반에서의 각종 변위와 침하 등 계측자료가 중요한 것으로 판단된다. 이와 같은 구조적 취약부위는 공사 중 계측관리 자료가 유지관리 계측 단계까지 연계하여 분석되어 공용 중인 터널 구조물이 유지 관리될 수 있도록 계획되어져야 하나 현실은 공사 중 계측과 유지관리 계측의 연계성 및 관련 자료의 체계적 관리가 대부분 미흡한 상태이다. 따라서 유지관리 계측은 터널 설계단계에서 유지관리를 위한 계측설계가 이루어져 공사 중 및 공사 완료 후에도 지속적으로 터널거동을 파악하고 위험상황에 대처하는 계측관리 계획으로 수립되어져야 한다. 또한, 장기적인 계측자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 일정시간 간격의 지속적인 계측자료 획득이 가능한 원격 자동화 계측으로 수행되어야 하며, 합리적인 계측자료 분석을 수행하기 위하여 계측과 관련된 시공관련 자료에 대하여 정리 보관하여야 한다.

5. 국토해양부 시설물 안전 및 유지관리 기본계획

국토해양부는 시설물 안전 및 유지관리 기본계획을 시설물의 안전관리에 관한 특별법으로 수립하여 고시하였으며 유지관리 계측과 관련된 기본계획을 정리하면 다음과 같다. 제2차 기본계획은 시설물 안전관리의 선진화를 위한 첨단센서 및 무선통신 기술을 활용하는 안전관리 시스템 구축과 IT기술을 활용한 점검·진단 지원시스템 개발 및 보급을 추진과제로 하고 있다. 제3차 기본계획은 ICT(Information and Communication Technology) 기반의 시설물 첨단 진단기술 확보, 보수·보강 등 유지관리 기술 선진화를 추진과제로 하고 있다. 고시된 기본계획에서 알 수 있듯이 향후 유지관리에는 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용, ICT 기반의 시설물 첨단 진단기술 등의 개발이 활발히 추진될 것으로 전망된다.

5.1 제2차 시설물 안전 및 유지관리에 의한 기본계획 (2008~2012) (국토해양부, 2007)

유비쿼터스 기술 활용에 의한 시설물 안전관리의 선진화를 위한 첨단센서 및 무선통신 기술을 활용하는 안전관리 시스템 구축과 IT기술을 활용한 점검?진단 지원시스템 개발 및 보급을 시설물 안전 및 유지관리의 추진과제로 하고 있다.

첨단센서 및 무선통신 기술을 활용하는 안전관리 시스

템의 구축과 관련하여 시설물 대형화 등에 따라 실시간 모니터링의 필요성이 점점 증대하고 있는 실정이므로 최근 첨단센서(광센서, 스마트 센서 등) 및 무선통신 기술을 활용하여 자연재해 또는 지진 등에 의한 인적?물적 피해를 예측하고 방지하는 기술이 발전함에 따라 동 기술을 활용하여 시설물 사고의 사전 예방체계를 확립할 필요성이 있다. 또한, 주요 시설물의 안전감시 모니터링을 통해 시설물의 변위, 거동 등의 안정 상태를 실시간으로 분석하고 안전조치가 필요한 개소는 긴급한 조치로 안전사고를 예방 조치할 필요성이 있다. 세부추진 과제로는 시설물의 변위, 거동 등의 자동 계측시스템 자료를 분석·평가할 수 있는 정량적 판정기준 마련 및 네트워크 구축을 기반으로 신속 정확한 시설물 정보공유를 위해 시설물 안전관리 자동화시스템 개발을 위한 첨단센서 및 무선통신 기술 활용 실시간 안전 모니터링 기술개발 및 시범구축이 해당된다. IT기술을 활용한 점검·진단 지원시스템 개발 및 보급 현황과 관련하여 선진국에서는 IT기술을 활용한 점검·진단 장비개발 및 업무 자동화 시스템에 관한 많은 연구가 진행 중이며, 국내에서도 첨단기술을 활용한 점검·진단 지원시스템 개발을 위해 산·학·연 등에서 신기술 개발에 노력하고 있다. 세부추진 과제로는 RFID, 모바일 시스템 등의 기술을 활용해 현장에서 시설물에 대한 정확한 식별과 데이터 수집 자동화가 가능하도록 지원시스템 개발 및 시설물의 상태평가 자동화 시스템의 개발·보급이 해당된다.

5.2 제3차 시설물 안전 및 유지관리에 의한 기본계획 (2013~2017) (국토해양부, 2012)

국가 주요자산인 SOC 장수명화와 효율적 활용을 유도하여 미래의 경제적 부담 완화시킬 수 있는 시설물 유지관리를 기본계획으로 수립·고시하였다. 중점 추진과제로 선진적 안전관리체계 확립, 국민과 함께 하는 안전관리 실현, 환경변화 선제 대응형 안전관리로 전환, 지능형 기술 촉진 및 효율화의 4대 전략을 제시하였다. 이중 지능형 기술 촉진 및 효율화는 융·복합형 진단 및 유지관리 핵심기술과 개발 시설물 정보 고도화 및 활용 증진이 중점과제이며 ICT 기반의 시설물 첨단 진단기술 확보, 보수·보강 등 유지관리 기술 선진화를 세부 추진과제로 하고 있다.

ICT 기반의 첨단 진단기술 확보추진 배경으로 현재 시설물 점검 및 진단 업무의 비효율성, 시설물 점검 및 진단과 ICT 기술의 접목 미흡, 진단장비 개발 및 효율적 활용이 부족한 실정이다. 추진 방안으로 모바일 점검·진단 시스템의 고도화, IT 등 기술 융복합화를 통한 첨단 진단기술 개발, 진단장비의 개발 및 효율적 활용방안 마련을 제안하였다.

6. 최근 유지관리 계측 기술동향

국토해양부에서 시설물의 안전관리에 관한 특별법으로 시설물 안전 및 유지관리 기본계획을 수립·고시한 내용과 같이 향후 유지관리에는 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용, ICT 기반의 시설물 첨단 진단기술 등의 개발이 활발히 추진될 것으로 전망된다. 현재 국내에서도 유지관리 계측시스템에 첨단센서 및 무선통신 기술이 개발·적용되어 운용 중에 있으며 무선통신 기술의 활용면에서 어느 정도의 수준에 도달한 상태이지만 지하구조물인 터널에서의 적용에 계측관리의 신뢰성과 관련된 문제점으로 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

이와 같은 계측관리의 신뢰성 문제점을 개선하고 첨단센서 및 무선통신 기술 등이 도입된 CST(Cable Sensing for Tunnel) 계측관리가 최근 개발되어 운용 중에 있다. 현재 시행되고 있는 공사 중 계측관리에서 노출형 계측핀은 막장과 근접 설치시 발파, 장비, 버력 등에 의한 손상이 발생되기 쉬우며 막장과 상당거리 이격 설치되므로 측정가능 변위가 적어 계측 초기치의 신뢰성이 낮은 문제점이 있다. 또한, 유지관리 계측은 콘크리트 라이닝 외벽에 계측기를 설치하므로 숏크리트 및 콘크리트 라이닝 및 부직포, 방수막이 더블 쉘(Double shell) 구조로 완충작용을 하므로 준공 후 발생하는 원지반의 발생변위를 파악하기 어려운 문제점이 있으며 열차진동 및 노후화로 인한 탈락 우려가 있다.

반면, CST 계측관리는 그림 1과 같이 케이블형 계측기로 불규칙한 발파단면에 대한 유연성이 확보되는 묻힘형 계측시스템으로 계측기를 숏크리트 내에 완전 매설함으로 손상 우려가 없으며 막장에 근접 설치로 신뢰도 높은 계측 초기치의 확보에 의해 안전시공 관리가 가능하다. 공사 중 계측기를 유지관리 계측기로 연계 사용에 의해 연속적인 원지반 변위의 모니터링이 가능한 컨버터블(Convertible)형 계측방식으로서 특히 시공 중 문제발생 지점을 연속적으로 관리할 수 있다. IoT(Internet of Things) 기술을 적용한 원격

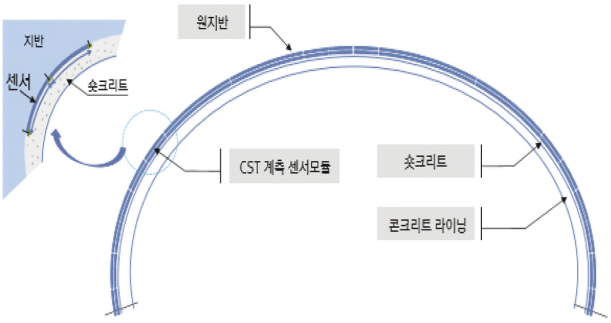

그림 1. CST 케이블형 계측시스템

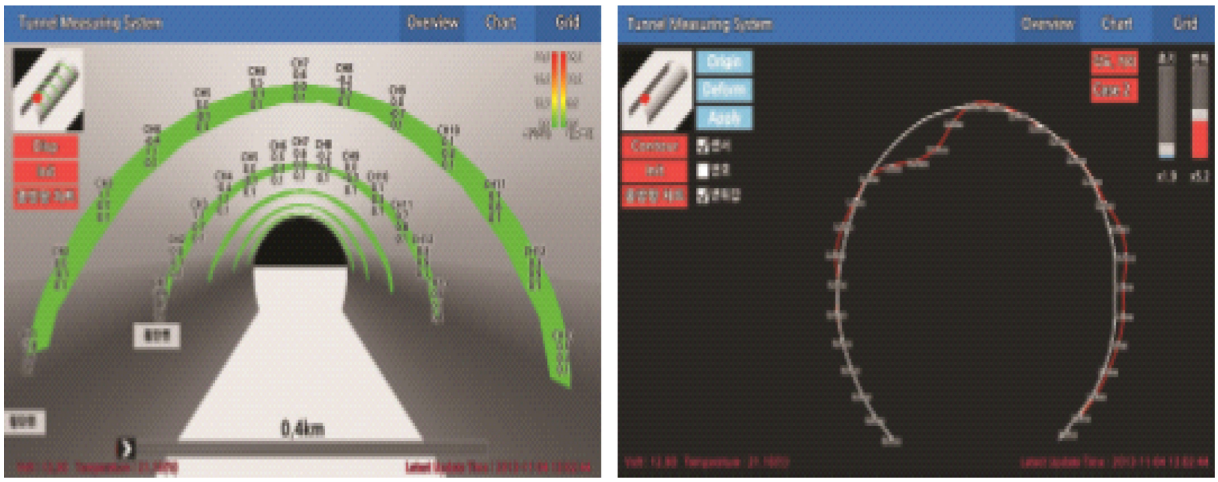

그림 2. CST뷰어 프로그램의 특정 위치 변위양상

전송으로 터널 내 악조건 속에서도 안정적인 통신이 가능하며 인터넷 기반 실시간 자동계측으로 담당자와 책임자간 동시에 계측정보를 공유하므로 위험징후 발생시 신속한 의사결정 및 대응을 할 수 있다. 그림 2는 CST뷰어 프로그램에 의한 계측관리 특정 위치에서 어느 시점의 변위양상을 나타내는 화면으로서 CST뷰어 프로그램을 이용하여 스마트 폰/스마트 패드, PC 등에서 실시간 변위를 파악할 수 있으며 이상 변위 발생시 SMS(Short Message Service) 등의 비상경보가 발생되어 즉시 센서 동작상황 및 과다 변위여부를 확인·분석할 수 있다.

7. 결 론

도로시설물인 터널의 유지관리 항목인 계측관리와 관련되어 국내 각 기관별 설계기준 및 시방서에 제시된 터널계측 자료를 비교하여 터널 유지관리 계측의 문제점을 분석하였다. 또한, 시설물 안전 및 유지관리 기본계획 추진과제인 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용과 관련된 최근 유지관리 계측 기술동향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내 설계기준의 터널계측은 터널의 굴착에 따른 지반 및 주변 구조물의 거동을 파악하기 위하여 적용되며 터널완공 후 주변여건 및 지반조건상 터널 및 주변에 악영향이 예상되는 경우에는 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 유지관리 계측계획을 수립하는 것으로 제시되어 있다.

(2) 터널계측과 관련된 국내 시방서는 대부분 터널 굴착시부터 콘크리트 라이닝 완료시까지 터널의 구조적 안정성 여부를 판단하기 위한 터널 내, 외부의 계측 및 분석 작업에 적용하며, 시공계측 뿐만 아니라 필요시 유지관리에 필요한 계측기 설치도 공사에 반영하여야 한다고 제시되어 있다.

(3) 터널 유지관리 계측기준의 공사 중 계측관리는 터널 시공 중의 안전관리를 목적으로 하고 있으며 계측 측정기간은 계측기 설치 후부터 계측 값의 수렴이 확인될 때까지로 하고 있다. 유지관리 계측은 터널 유지관리시의 안전관리를 목적으로 하며, 준공 후 터널의 유지관리를 위한 시공과정에서의 계측관리도 포함하고 있다.

(4) 효과적인 터널의 유지관리 계측을 위해서는 터널계측 계획단계에서 공사 중 계측과 유지관리 계측을 연계하여 판단되어져야 하나, 국내 설계기준 및 시방서는 공사 중 계측과 유지관리 계측을 공사시기 및 유지관리 시점을 기준으로 터널 굴착공사 중과 구조물 완공 후 공용기간 중으로 구분하고 있으며 별도의 계측관리로 시행되고 있는 실정이므로 국내 설계기준 및 시방서의 개정이 필요하다고 판단된다.

(5) 유지관리 계측은 터널 설계단계에서 유지관리를 위한 계측설계가 이루어져 공사 중 및 공사 완료 후에도 지속적으로 터널거동을 파악하고 위험상황에 대처하는 계측관리 계획으로 수립되어져야 하며 향후 유지관리 계측에는 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용이 활발히 추진될 것으로 전망된다.

(6) 첨단센서 및 무선통신 기술의 활용이 도입된 CST 계측관리 시스템은 공사 중 계측기를 유지관리 계측기로 전환하여 연계 사용이 가능하므로 연속적인 원 지반 변위의 모니터링이 가능하며 특히 시공 중 문제발생 지점의 연속적 관리가 가능하다.

참고문헌

1. 건설교통부, *건설공사 및 유지관리 계측표준시방서(안),* 2008.
2. 건설교통부, *터널설계기준*, 2007.
3. 국토교통부, *철도설계기준(노반편)*, 2013.
4. 국토교통부, *철도건설공사전문시방서(노반편)*, 2013.
5. 국토해양부 고시 제2007-660호, *제2차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(2008-2012)*.
6. 국토해양부 고시 제2012-945호, *제3차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(2013-2017)*.
7. 국토해양부, *도로공사표준시방서*, 2009.
8. 국토해양부, *도로설계기준*, 2012.
9. 국토해양부, *터널표준시방서(개정안)*, 2014.
10. 법률 제12254호, *시설물의 안전관리에 관한 특별법*, 일부개정 2014.01.14.
11. 서울특별시, *서울특별시 전문시방서(토목)*, 2009.
12. 한국도로공사, *고속도로 전문시방서 총칙편/토목편*, 2012.
13. 한국시설안전공단, *터널유지관리 계측 기술정보.*
14. 행정중심복합도시건설청, *행복도시건설공사 전문시방서*, 2012.
15. (주)흥인 E&C, *Cable sensing system*
16. Anton W. Ackermann, Christopher Hunt, *The role of digital monitoring technologies in the development of comprehensive tunnel maintenance strategies,* Tunnelling and Underground Space Technology, 2004.
17. HS Chung, BS Chun, BH Kim, YJ Lee, *Measurement and Analysis of Long-term Behavior of Seoul Metro Tunnels using the Automatic Tunnel Monitoring Systems,* Tunnelling and Underground Space, 2006.