

고속철도용 터널의 상시계측 시스템 구축에 관하여



이준석
정회원, 한국철도기술연구원
책임연구원



최일윤
한국철도기술연구원



문도영
한국구조안전기술원



이희현
한국구조안전기술원

요 약

최근 구조물의 안전과 관련하여 계측기술에 대한 관심이 고조되고 있으며, 시공중 계측 뿐 아니라 시공후 유지관리를 위한 구조물의 계측 사례가 증대되고 있다. 본 고에서는 영구계측을 위하여 고속철도용 터널에 적용된 유지관리 계측시스템을 소개함으로써 추후 터널의 유지관리 계측시스템을 구축하는데 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

1. 개요

고속철도는 고속의 여객 기능을 감안할 때 구조물의 안정성 확보가 매우 중요한 관건이 된다. 이를 위하여 한국고속철도건설공단과 한국철도기술연구원 주관하에 터널, 교량, 정차장 및 토공구간 등 고속철도 노반 구조물 중 각 1개소에 대하여 계측시스템을 설치하고 시험운영 중에 있다. 이 들 상시계측 시스템은 각종 구조해석 결과와 축적된 계측데이터를 통해 제시된 관리기준과 실시간 계측데이터를 비교함으로써 구조물의 안정성을 확보하고 유지관리의 기초자료로 활용할 계획이다. 또한 구조물의 대표성을 감안하여 계측 대상구조물을 선정·운영함으로써 계측시스템이 설치되지 않은 구조물중 동일 형식에 대해서도 간접적인 관리가 가능하도록 배려하였다.

본 고에서는 고속철도 시험선 구간내 터널구조물에 설

치된 상시계측 시스템의 계측항목, 구축된 시스템의 상세, 관리기준 등을 제시하고, 이를 고찰함으로써 추후 터널의 상시계측시스템의 구축을 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 고속철도용 터널의 상시계측 시스템 구축 현황

기존의 문헌 고찰결과, 국내에서 운영되는 터널의 상시계측 시스템은 제2기 서울지하철에 적용된 경우가 대표적인 사례이다. 터널구간으로써 계측시스템 구축 연장은 14.0km, 총 129 단면으로 구성되어 있다. 계측은 크게 대표단면계측(B계측)과 일상관리계측(A계측)으로 나누어 수행되었으며, 대표단면 계측항목은 토압계, 간극수압계, 콘크리트 응력계, 철근응력계 등을 설치하여 운영 중이

다. 또한 일상관리 계측항목으로는 내공변위계와 천단침하계 등이 있다. 장기계측이므로 계측기의 내구성과 민감도에 대하여 특별히 고려하였으며, 유지관리원의 접근이 용이치 않은 점을 감안하여 자동화 계측시스템으로 설계·구축하였다.

국외의 사례를 살펴보면, 일본의 세이칸 터널은 터널 연장이 23km로 세계에서 가장 길 뿐 아니라 수중 터널이므로 안정성의 확보를 위하여 자동계측유지관리 시스템을 구축하였으며, 계측항목은 내공변위, 복공콘크리트의 변위량, 용수량 감지 등이다. 또한 프랑스는 지하철 역사의 계측을 실시하였으며 지하철구간의 특성상 고전압의 영향에 의한 자장의 형성에 대비하여 광섬유를 채택한 계측기를 적용한 후 장기계측을 수행한 바 있다. 또한 정적 및 동적인 계측을 동시에 수행하였으며, 관리기준과의 비교를 통하여 구조물의 방재시스템을 운영하고 있다.

3. 고속철도 터널의 상시계측 시스템

3.1 고속철도 터널의 계측모니터링 시스템

본 고에서 소개하고자 하는 고속철도용 터널의 상시계측 시스템은 현장의 계측점에서 실시간의 데이터를 전송 받고 이를 관리기준과 비교·분석하여 이상 징후 발생시 경고를 발생시키는 계측모니터링 모듈과 계측기 및 통신에 관련된 모든 기록, 사진, 시스템 계통도를 비롯하여, 대상구조물의 시공도면, 설계도면, 진단자료 등을 데이터베이스화하여 대상구조물의 계측결과를 종합적으로 판단하는데 도움을 줄 수 있는 정보제공 모듈로 나뉘어 있다. 이상과 같은 터널 상시계측 시스템을 구성함에 있어 고려된 사항과 전체 시스템의 상세한 설명은 다음과 같다.

(1) 개요

총연장이 720m인 계측대상터널은 NATM공법과 개착

식공법이 함께 적용되었으며 개착식 터널구간은 풍화토 및 풍화암층이 주로 나타나는 터널시점과 터널중점부에 위치한다. 본 터널은 고속철도 노선 중 가장 일반적인 터널형식 및 단면을 가지고 있으므로 대표적인 터널이라고 판단되어 자동화계측 대상구조물로 선정하였으며 터널의 단면 및 센서배치도는 다음의 그림 1과 같다.

본 시스템의 모니터링은 현장계측실과 중앙계측실에서 동시에 가능하도록 하였으며, 계측빈도와 계측기기의 이상 유무 등을 중앙계측실 컴퓨터에서 제어할 수 있도록 하였다. 또한 현장계측실에서는 계측데이터가 관리기준을 상회하는 등의 중요한 사건(Events) 발생시 triggering 기능과 경보기능을 보유하고 있으며, 센서의 자가진단을 수행하여 그 결과를 중앙컴퓨터에 제공한다.

터널은 장기적인 거동이 중요하므로 2~3년 혹은 그 이상의 기간동안 구조물의 거동을 살펴보기 위해서는 많은 양의 데이터를 비교·분석하여야 한다. 이를 위하여 일정한 기간의 데이터가 쌓이면 자동으로 백업을 실시하는 백업모듈을 추가하였으며, 사용자가 원하는 기간동안의 구조물의 거동추이를 보고서 형식으로 출력할 수 있도록 배려하였다.

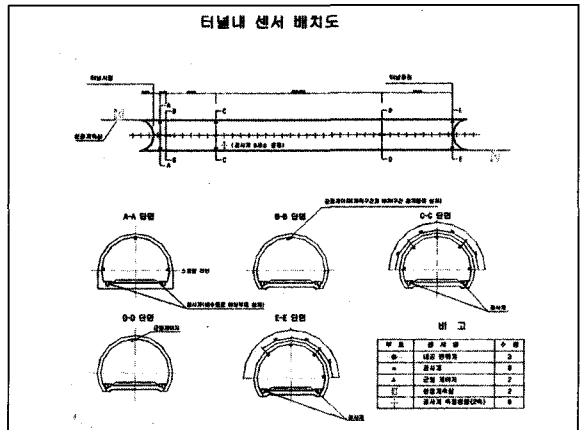


그림 1. 계측대상 터널의 단면 및 센서배치도

(2) 계측위치의 선정 및 주요 계측항목

계측위치의 선정은 기본적으로 구조물에 변형이 발생

하였을 때 고속철도의 운행에 가장 크게 영향을 미치는 단면과 구조적으로 중요한 단면을 고려하였으며, 시공 자료를 참고하여 시공 중 누수가 많이 발생한 곳과 균열이 발생할 가능성이 있는 개소 등을 선정하였다.

계측항목 선정시 해당 구조물의 대부분이 시공완료 되었다는 점을 감안하여 터널의 단면에 크게 손상을 미치지 않고 설치할 수 있으며 일상적인 자동계측이 가능하도록 고려하였다. 결과적으로 터널의 유지관리를 위해 자동계측이 가능하고 일상적으로 반복해서 측정가능한 내공변위, 균열의 발달 및 개착식터널과 NATM 구간의 연결부에서 발생하는 종방향의 경사를 계측항목으로 선정하였으며, 이를 다음의 표 1에 나타내었다. 일반적으로 터널의 계측에 사용되는 간극수압계, 토압계, 콘크리트 응력계 등은 계측시스템의 구축 시점이 본 터널의 시공완료 후이기 때문에 설치가 불가능하였다.

표 1. 주요 계측항목

계측항목	목적	계측위치	사 양	센서명
균열	· 균열발생, 성장여부 확인	· 균열이 발생되었거나 예상되는곳 · 시공이음부	· 범위: $\pm 2 \sim \pm 5$ mm · 정밀도: 0.01mm이하 · 분해능: 0.005mm이하	균열계이지
경사	· 콘크리트 바닥의 변형 및 터널 종방향의 경사	· 개착구간과 NATM구간의 연결부 · 콘크리트 바닥	· 범위: $\pm 0.5^\circ$ 이상 · 정밀도: 10μ rad 이하 · 분해능: 1μ rad 이하	경사계
내공 변위	· 라이닝의 변형	· 개착구간의 갱구부 및 대표단면	· 범위: 내 $\pm 10 \sim \pm 50$ mm/m · 분해능: 0.02mm 이내	공변위계

(3) 적용된 계측기 선정시 고려사항

본 시스템을 구성하면서 계측기의 선정을 두고 가장 중요하게 고려한 점은 계측기의 내구성 및 정밀도, 측정범위, 분해능, 노이즈의 영향 등이며, 이는 계측의 목적과 결과에 직접적으로 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다.

또한 고속철도의 특성상 22,000 볼트의 고전압에 의한 자기장의 형성(유도장애)에도 불구하고 데이터의 신뢰성을 확보해야 하므로 계측목적상 불가피하게 전기선로와 가깝게 설치해야 하는 내공변위계의 경우 광센서형식으로 선정하였으며 그 외의 경우에도 차폐 케이블 등을 사용하여 고전압의 영향을 최소화하였다.

(4) 관리기준

일반적으로 터널은 지층의 형태가 다양하고 분포가 일정하지 않은 지반내에 건설되므로 시공단계부터 시공의 안전성, 지반조건, 지보부재의 응력거동 및 안정성 등을 확보하기 위한 계측관리를 실시한다. 이와 같이 시공된 터널의 유지관리를 위한 계측관리기준은 시공단계부터 계측된 지반의 특성 및 거동 등을 고려하여 선정하는 것이 바람직하지만 현재의 현장여건에서는 관리기준의 선정이 어려운 상황이다. 그러나 터널은 교량구조물과 달리 이론적으로 매우 안정된 구조물로 평가되며 실제로 설계 조건과 크게 다르게 시공되지 않는다면 대체로 안전성을 확보하고 있기 때문에, 우선 국내의 문헌에서 제시된 값을 근거로 하여 일반적인 계측관리기준을 선정하였으며 향후 계측시스템이 가동되면 계측결과를 지속적으로 검토하여 수정·보완할 예정이다. 다음의 표 2~4는 터널의 각 계측항목에 대한 관리기준을 나타내고 있다. 또한 표 5는 각 관리기준 등급별 구조물의 성능평가 및 열차통제 방안(안)을 나타내고 있다.

표 2. NATM 및 개착식 터널 내공변위

등급	관 리 기 준	비 고
A	내공변위가 거의 발생하지 않은 경우 <천단부 처짐 3mm/년 이내>	일본철도총합기술 연구소 기준의 30%이내
B	내공변위가 발생할 가능성이 있다고 판단되는 경우 <천단부 처짐 3~7mm/년>	일본철도총합기술 연구소 기준의 30%이상 70%이하
C	내공변위가 발생하기 시작했다고 판단되는 경우 <천단부 처짐 7~10mm/년>	일본철도총합기술 연구소 기준의 70%이상
D	상당한 내공변위가 발생한 경우 <천단부 처짐 10mm/년 이상>	일본철도총합 기술연구소기준

표 3. 터널 천단 경사

등급	관리 기준	비고
A	경사가 1일 1/1000rad 이하로 측정되는 경우	거의 경사가 발생하지 않는 경우
B	경사가 1일 1/700~1/1000rad로 측정되는 경우	NAVFAC 기준의 약 70%이하
C	경사가 1일 1/500~1/700rad로 측정되는 경우	NAVFAC 기준의 약 70%이상
D	경사가 1일 1/500rad 이상으로 측정되는 경우	NAVFAC 기준

표 4. 균열변위

등급	관리 기준	비고
A	온도변위를 제외한 변위가 0.2mm이하인 경우	시설안전기술공단기준
B	온도변위를 제외한 변위가 0.2~0.3mm인 경우	시설안전기술공단기준
C	온도변위를 제외한 변위가 0.3~0.7mm인 경우	시설안전기술공단기준
D	온도변위를 제외한 변위가 0.7mm이상인 경우	시설안전기술공단기준

표 5. 구조물의 성능평가 및 열차통제방안 (안)

등급	구조물 상태	열차통제	조치 사항	비고
A	양호	정상	-	시험운영 후 수정·보완예정
B	보통	주의	관찰 후 문제점이 없으면 정상 상태로 복귀, 문제점 있으면 해결시까지 150km/h 이하로 서행시키고 유지·보수 요원을 현장에 보내어 외관조사 실시	
C	불량	서행	열차를 50km/h 이하로 서행시키고 전문가에 의한 상세한 외관조사를 실시하고 적절한 조치를 취한 후 보통상태로 복귀	
D	매우불량	운행정지	열차 운영을 통제시키고 적절한 보수·보강을 실시한 후 서행상태로 복귀	

3.2 계측데이터베이스 시스템 개발

터널내에 설치된 여러 종류의 계측센서로부터 장기간 동안 획득되는 데이터의 양이 매우 방대할 경우 이 자료들을 체계적으로 정리하고, 관계된 자료들간에 유기적인 연결 및 관리를 위해서는 특수한 대용량의 데이터베이스가 필요하다. 본 연구에서는 방대한 양의 계측자료를 관리자가 쉽게 확인·처리·분석할 수 있는 전용 계측데이터베이스 시스템을 개발하였다. 여기서 언급하는 계측데이터베이스 시스템이란 구조물의 유지관리를 위한 제반 수단, 방법 및 방침에 관한 의사결정을 체계적으로 지원하는 컴퓨터에 의한 정보시스템을 의미한다.

이를 위해 개발한 시스템의 모듈로는 데이터를 관리자가 쉽게 확인·처리·관리할 수 있도록 이력/자료 관리 모듈, 계측자료의 획득 처리 분석을 위한 모니터링/분석/평가 모듈 및 시스템에 대한 이해를 돕기 위한 데모 모듈로 구성되어 있다. 본 연구를 통해 개발된 계측데이터베이스 시스템의 개략적인 구성도는 그림 2와 같다.

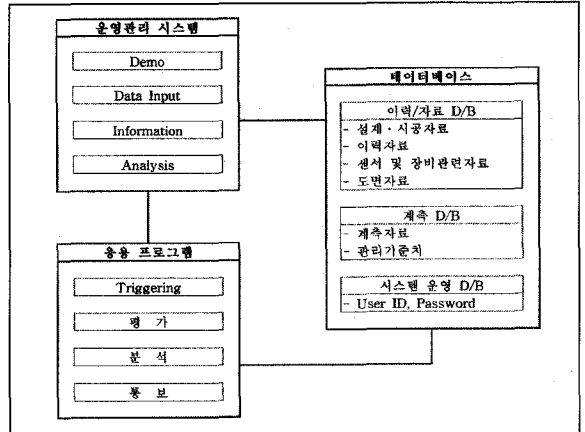


그림 2. 계측데이터베이스 시스템 구성도

4. 기대효과

이상으로 고속철도 시험선 구간의 터널에 구축된 상시

계측시스템의 개요를 살펴보았다. 이와 같이 고속철도 터널의 상시 계측모니터링 시스템을 도입함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

(1) 고속철도 설계시방서 및 각종 설계기준 검증자료 획득

고속철도 터널은 국내최초의 고속철도용 구조물이라는 점과 고속으로 인한 미기압파의 작용 등 그 특이성을 감안할 때, 각종 설계 및 시방기준의 검증이 매우 중요하다. 상기의 계측시스템의 운영을 통하여 구조물의 장기간의 거동을 분석함으로써 각종 설계시방서 및 기준을 검증하는 자료로 활용이 가능하다.

(2) 종합유지관리 시스템의 Sub-system으로 활용

본 계측시스템은 그 호환성을 확보하였으므로 고속철도의 종합유지관리 시스템의 하부 시스템으로써 활용이 가능할 것으로 생각된다.

(3) 효율적인 구조물의 관리

본 시스템을 운영함으로써 예방관리방식의 도입이 가능하며, 이를 통하여 손상의 초기단계에 적절한 조치를 함으로써 적은 비용으로 기능회복이 가능하며, 공용 수명을 연장할 수 있다.

(4) 안전감시 시스템의 도입으로 고속철도의 신뢰성 제고

구조물의 거동데이터와 관리기준의 비교를 통하여 터널의 거동을 상시 감시하므로 구조물의 안전을 확보할 수 있으며, 이를 통하여 고속철도에 대한 이용자의 신뢰를 확보할 수 있다.

5. 맺음말

이상으로 간략하나마 고속철도 시험선 구간에 구축된 유지관리 계측시스템 중에서 터널 계측시스템의 특징, 관리기준, 데이터베이스시스템 등을 살펴보았다. 위에서 언급한 바와 같이 장기간의 터널구조물의 거동 데이터는 설계상수와 시방의 검증 뿐 아니라 학술적으로도 의미가 있다. 하지만 아쉬운 점은 상기의 계측시스템이 구조물의 복공이 완료 된 후에 계획·구축되었으므로 구조물의 시공초기 데이터가 없으며, 구조물의 상태를 파악하는데 필수적인 간극수압이나, 복공의 응력 등을 계측할 수 없다는 것이다. 본 저자는 본 과업의 성공적인 결과도출을 통해 계측의 중요성과 효율성을 기술인들이 모두 공감할 수 있으며, 이를 계기로 구조물의 유지관리 계측기술이 구조물의 계획단계에서부터 적절히 사용되어 구조물의 수명을 연장하고 국민의 재산과 생명을 보호하는 등 소중하게 사용되기를 희망한다.

참고문헌

1. 배규진, 이성원, "지하구조물 유지관리 및 계측", 대한토목학회지, 대한토목학회, 1998. 11, pp. 43 ~ 54
2. 일본철도총합기술연구소, "터널 보수·보강 매뉴얼", 1990
3. 시설안전기술공단, "안전점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편)", 1997
4. 한국건설기술연구원, "고속전철 터널기술개발 (1차년도 연구보고서)", 건설교통부, 통상산업부, 과학기술처, 1997.
5. 한국철도기술연구원, "고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 성능평가시스템 개발 (Ⅲ)", 한국고속철도건설공단, 1999.
6. NAVFAC, "DesignManual", 1982