Tunnelling Technology

지하철 터널 유지관리계측의 안전관리 운영기준

A safety Management & operation standard for maintenance monitoring of subway tunnel

우종태
경복대학교
건설환경디자인과
교수

1. 서론

서울특별시 지하철건설본부와 도시철도공사에서 1998년부터 2007년까지 단계별로 적용한 지하철6,7호선 유지관리계측의 안전관리 운영기준에 대하여 철근 및 콘크리트 응력계, 토압계, 간극수압계, 전단면 내공변위계 등의 계측목적에 따른 안전관리 운영기준을 서울특별시 도시철도공사, 한양대학교 토목공학과, (주)동우지오시스템, 계측기술자문단 등 산학연이 공동으로 참여하여 검토한 바 있다.

이 결과를 토대로 지하철9호선1단계구간 유지관리계측에 적용할 합리적인 안전관리 운영기준 설정을 위한 연구가 진행되고 있으며, 기존 산학연 공동연구에 의한 지하철 터널 유지관리계측의 안전관리 운영기준의 기술내용을 고찰하여 계측기술 관리수준 향상에 기여 하고자 한다.

2. 지하철6, 7호선 터널의 유지관리계측 항목

1998년부터 2007년까지 수행한 지하철6,7호선 터널의

표 1. 지하철6,7호선 터널의 유지관리계측 항목

구 분	계측 항목									계측 단면
	토압계	간극 수압계	콘크리트 응력계	철근 응력계	지중 변위계	하중계	전단면 내공 변위계	기타	계	
6호선	33	9	264	184	20	12	5	23	550	53
7호선	16	22	47	31	0	0	4	0	120	19
계	49	31	311	215	20	12	9	23	670	72
비율(%)	7.3	4.6	46.4	32.1	3.0	1.8	1.4	3.4	100	

유지관리계측 항목은 표 1과 같이 총 72단면에 총 670개이며, 주요 유지관리계측 항목은 콘크리트라이닝의 응력 및 철근응력계이며, 지하철9호선1단계구간과 상이한 계측 항목은 6,7호선에서는 부착식 전단면 내공변위계가 9단면이 있다.

3. 지하철6, 7호선 터널 유지관리계측의 안전관리 운영기준

3.1 철근 및 콘크리트 응력계

계측기기가 설치된 시기에 따라서 철근 및 콘크리트 응력계가 터널의 콘크리트가 타설되기 이전에 설치된 부분은 시공 중에 측정된 계측데이터가 설계보고서를 통해 예상되는 값과 계측치와 비교하여 정상적인 값을 보이면 안전성 검토의 기준치로 산정하고 정상적인 값을 보이지 않을 경우는 철근 및 콘크리트 응력계의 계측치를 분석하여 기준치로 정하였다.

계측기기 설치단면의 분석결과 산정된 철근 및 콘크리트 응력계의 기준치를 기준으로 실시간으로 측정되는 계측값의 변화량과 경시변화를 참조하여 안전관리 운영기준을 표 2와 같이 제시하였다.

구조물이 정상적인 상태에서 발생하는 응력이 허용응력에 가깝도록 설계되었다고 가정하여도, 주의관리치로 정한 15%의 응력이 더 발생한 경우에 압축강도의 46%가 되고 정밀분석치로 정한 30%가 더 발생한 경우에는 압축강도의 52%가 된다. 초기에는 이 범위를 10%, 20%로 제시하였는데 수동 계측치의 변화폭이 너무 심해 이 범위를 쉽게 초과하는 경향이 많아 이 범위를 15%, 30%로 상향조정하였고, 그 범위가 콘크리트 압축강도의 최대 52%이므로 안정성에는 큰 영향이 없을 것으로 판단하였다.

철근의 경우 일반적으로 허용응력을 항복강도의 50% 정도로 산정한다. 철근의 응력 역시 콘크리트 응력과 마찬가지로 구조물이 정상적인 상태에서 발생하는 철근응력이 허용응력에 가깝도록 설계되었다고 가정하여도, 주의관리치로 정한 15%의 응력이 더 발생한 경우에 항복강도의 57%가 되고 정밀분석치로 정한 30%가 더 발생한 경우에는 항복강도의 65%가 된다. 따라서 이 값도 수동 계측값의 변화폭이 너무 심해 그 범위를 5%씩 증가시킨 것인데, 이 또한 콘크리트와 마찬가지로 안정성에는 큰 영향이 없을 것으로 판단하였다.

3.2 토압계

터널에 작용하는 토압은 터널 주변의 상황을 관찰하기 위한 계측이고 이 값들은 갑자기 커지거나 적어지지 않는다. 그러므로 시공 중 계측데이터 및 계측치를 비교 분석하여 기준치를 산정하고 계측값들이 기준치와 다르게 변할 때는 변화량과 경시변화를 참조하여 토압계의 안전관리 운영기준을 표 3과 같이 제시하였다.

표 2. 철근 및 콘크리트 응력계의 안전관리 운영기준

안전관리 운영기준	안전여부	대처방안
기준치로부터 허용응력의 0~15% 사이의 변화	안 전	–
기준치로부터 허용응력의 15~30% 사이의 변화	주 의	• 관리자가 해당공구의 다른 계측기의 계측값과 더불어 상황을 주의 깊게 관찰하여야 함
기준치로부터 허용응력의 30% 이상의 변화	정밀분석	• 관리자는 전문기술자에게 해당공구에 대한 정밀분석을 요구하여야 함

3.3 간극수압계

터널에 작용하는 수압은 터널 주변의 상황을 관찰하기 위한 계측이고 이 값들은 갑자기 커지거나 적어지지는 않는다. 그러므로 시공 중 계측데이터 및 계측치를 비교 분석하여 기준치를 산정하고 계측값들이 기준치와 다르게 변할 때는 변화량과 경시변화를 참조하여 간극수압계의 안전관리 운영기준을 표 4와 같이 제시하였다.

3.4 전단면 내공변위계

터널 콘크리트 라이닝 표면에 설치된 전단면 내공변위계는 2차원 내공변위계로 천단침하에 의한 안전관리 운영기준과 P-M상관도에 의한 안전관리 운영기준으로 구분된다.

3.4.1 천단침하 안전관리 운영기준

지하철 유지관리를 위한 정밀분석치를 설정하는 목적은 관리자가 상황실 컴퓨터에 실시간으로 입력되는 계측값을 모니터링 하는 과정에서 이상 현상 발생 시 적절한 대응을 할 수 있도록 천단침하에 의한 안전관리 운영기준을 표 5와 같이 제시하였다.

표 3. 토압계의 안전관리 운영기준

안전관리 운영기준	안전여부	대처방안
기준치로부터 설계시 적용 토압의 0~25% 사이의 변화	안 전	-
기준치로부터 설계시 적용 토압의 25~50% 사이의 변화	주 의	• 관리자가 해당공구의 다른 계측기의 계측값과 더불어 상황을 주의깊게 관찰하여야 함
기준치로부터 설계시 적용 토압의 50% 이상의 변화	정밀분석	• 관리자는 전문기술자에게 해당공구에 대한 정밀분석을 요구하여야 함

표 4. 간극수압계의 안전관리 운영기준

안전관리 운영기준	안전여부	대처방안
기준치로부터 0~50KN/m^2 사이의 변화	안 전	-
기준치로부터 50~100KN/m^2 사이의 변화	주 의	• 관리자가 해당공구의 계측값과 상황을 주의 깊게 관찰하여야 함
기준치로부터 100KN/m^2 이상의 변화	정밀분석	• 관리자는 전문기술자에게 해당공구에 대한 정밀분석을 요구하여야 함

표 5. 천단침하 안전관리 운영기준

안전관리 운영기준	안전여부	대처방안
천단침하 정밀분석치의 0~90% 사이	안 전	-
천단침하 정밀분석치의 90~100% 사이	주 의	• 해당공구에 있는 다른 매립식 계측기기의 값과 해당단면의 변형형상 및 경시변화 그리고 P-M도를 통한 안정성 분석 등 상황을 주의깊게 관찰하여야 함.
천단침하 정밀분석치를 초과	정밀분석	• 전문기술자에게 해당공구에 대한 정밀분석을 요구하여야 함.

표 6. P-M 상관도에 의한 안전관리 운영기준

안전관리 운영기준	안전여부	대처방안
P-M상관도 상 안전영역에 있는 경우	안 전	-
P-M상관도 상 주의영역에 있는 경우	주 의	• 해당공구에 있는 다른 매립식 계측기기의 값과 해당단면의 변형형상 및 경시변화 그리고 수치해석을 통해 나온 콘크리트와 철근의 응력값을 통한 안정성 분석 등 상황을 주의 깊게 관찰하여야 함.
P-M상관도 상 정밀분석선 밖에 있는 경우	정밀분석	• 전문기술자에게 해당공구에 대한 정밀분석을 요구하여야 함.

3.4.2 P-M 상관도에 의한 안전관리 운영기준

1) P-M 상관도 이용 목적

서울지하철에서 터널의 콘크리트 라이닝을 포함하여 대부분의 콘크리트구조물은 극한강도설계법에 의하여 설계되었다. 이 설계법에서 구조물의 안전여부는 부재에 작용하는 축하중(P)와 휨모멘트(M)을 계산하고 이들 두 값을 P-M 상관도 상에 표시하여 부재의 안전여부를 판단한다.

2) P-M 상관도의 활용

전단면 내공변위계에서 터널의 변위가 계측되고 이 자료가 입력되면 이 자료가 저장된 기존의 터널자료와 합하여지고 2차원 유한요소법으로 다시 터널을 해석하여 이때 터널라이닝에 발생하는 축하중(P)와 휨모멘트(M)을 구하게 된다. 이 두 하중은 그 터널라이닝의 설계도로부터 구한 콘크리트 두께와 철근배치 및 철근량을 가지고 작성한 P-M 상관도 상에 표시되고 안전여부가 판단된다.

이러한 일련의 과정은 전산기에 의하여 거의 실시간으로 이루어지도록 프로그램 되어 있다. 따라서 전단면내공변위계가 설치된 단면에 대하여는 내부라이닝의 안전 여부를 실시간으로 판단할 수 있게 된다.

3) P-M 상관도에 의한 안전관리 운영기준

각 단면의 내공변위계에서 실시간으로 들어오는 변위데이터를 통해 2차원 수치해석프로그램이 실행된 후 터널라이닝의 천단부와 좌우스프링라인의 축하중(P)과 휨모멘트(M)가 P-M도 상에 어느 곳에 위치하는가에 따라 P-M 상관도에 의한 안전관리 운영기준을 표 6과 같이 제시하였다.

참고문헌

1. 김병홍, “터널 자동화계측시스템에 의한 메트로 NATM 터널의 장기거동분석”, 한양대학교 대학원 박사학위논문, 2007.08, pp.60-65.
2. 서울특별시 도시철도공사, “계측관리 최종 종합보고서 1권 (서울지하철2기2단계구간: 6,7호선구간 유지관리계측)”, (주)동우지오시스템, 한양대학교 토목공학과, 2006.12, pp.7-20.
3. 서울특별시 지하철건설본부, “서울지하철 유지관리계측(서울지하철2기2단계구간: 6,7호선)”, 2002.02. pp.374-382
4. 우종태, “지하철9호선 터널 유지관리계측 분석기법”, 한국터널지하공간학회지, Vol. 13, No. 2, 2011.04, pp.60-65.
5. 우종태, 이래철, “도시철도 토목구조물 변위계측 종합조사보고서”, 서울특별시 도시철도공사, 2003.03. pp.198-200.
6. 우종태, “터널계측의 이론과 실무”, 구미서관, 2006.07, pp.453-455.
7. 우종태, “지하구조물 안전계측 이론과 실무”, 한국구조물진단유지관리공학회, 구미서관, 2006.11, pp.335-337.
8. 우종태, “건설계측공학”, 구미서관, 2008.09, pp.760-763.