

KR C-12150

Rev.1, 09. March 2026

터널 계측

2026. 03. 09.



국가철도공단

경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.

목 차

1. 일반사항	1
2. 조사 및 계획	2
3. 재료	2
4. 설계	2
해설 1. 터널계측	4
1. 계측일반	4
1.1 계측의 역할	4
1.2 계측의 분류	4
2. 계측계획	6
2.1 계측계획의 수립	6
2.2 계측항목의 선정	8
2.3 계측기기의 선정	8
2.4 계측기의 배치	9
2.5 계측의 측정빈도 결정	11
2.6 계측관리 기준치설정	13
2.7 터널계측 관리기준 단계별 대응체계	16
3. 계측시행	16
3.1 지표 및 지중침하 측정	16
3.2 내공변위 측정	17
3.3 천단침하 측정	18
3.4 록볼트 인발시험	19
3.5 지중변위측정	19
3.6 지중 수평변위 측정	20
3.7 록볼트 축력측정	21
3.8 슛크리트 응력측정	21
3.9 터널내 탄성과 속도 측정	22
3.10 진동·소음 측정	22
3.11 기타	26
4. 계측결과의 분석 및 활용계획	28
4.1 계측결과의 분석방법	28
4.2 계측결과의 정리	29



5. 계기의 유지관리	35
6. 장기계측 계획의 수립	36
6.1 장기계측의 목적	36
6.2 계측시스템 구축방안	37
7. 전 생애주기 계측 계획	38
7.1 계측기 선정	38
7.2 계측기 통신 및 데이터 표준화.....	39
RECORD HISTORY	40

1. 일반사항

1.1 목적

- (1) 이 기준의 목적은 철도 터널의 설계 시 고려하여야 할 계측에 관한 사항을 제시하는 것이다.

1.2 적용 범위

- (1) KDS 27 50 10(1.2)를 따른다.

1.3 참고 기준

1.3.1 관련 법규

- (1) KDS 27 50 10(1.3.1)을 따른다.

1.3.2 관련 기준

- (1) KDS 27 50 10(1.3.2)를 따른다.

1.4 용어의 정의

- (1) 원지반 : 원래의 흐트러지지 않은 자연지반
- (2) 절리(Joint) : 암반에 존재하는 비교적 일정한 방향성을 갖는 불연속면으로서 상대적 변위가 단층에 비하여 크지 않거나 거의 없는 것을 말하며, 절리의 생성 요인은 암석 자체에 의한 것과 외력에 의한 것이 있음.
- (3) 층리(Stratification, Bedding) : 퇴적암이 생성될 때 퇴적조건의 변화로 퇴적물 속에 생기는 층상 구조.
- (4) 계측(Monitoring) : 터널굴착에 따른 굴착면, 주변 지반, 주변 구조물 및 각 지보재의 변위 또는 응력 등의 절댓값이나 시간대별 변화를 측정하는 방법 또는 그 행위.
- (5) 내공변위(Internal displacement) : 터널굴착으로 발생하는 터널 내공의 변화량을 말하며, 통상 내공단면의 축소량을 양(+)의 값으로 정함.
- (6) 일상계측(Daily monitoring) : 일상적인 시공관리를 위하여 실시하는 계측으로서 지표 침하, 천단침하, 내공변위 측정 등이 포함됨.
- (7) 정밀계측(Precision monitoring) : 정밀한 지반거동 측정을 위하여 실시하는 계측으로서 계측항목이 일상계측보다 많고 주로 종합적인 지반거동 평가와 설계의 개선 등을 목적으로 수행.
- (8) 지중변위(Ground displacement) : 터널 굴착으로 인하여 발생하는 굴착면 주변 지반의 터널방향 변위.



- (9) 지중침하(Ground settlement) : 터널을 굴착할 때 굴착면 인접지반에는 침하가 발생하며 터널 천장부를 기점으로 하여 지표로 갈수록 각 지층의 침하량은 깊이별로 서로 다르게 나타나는데 이때의 깊이별 침하.
- (10) 지표침하(Surface settlement) : 터널굴착으로 발생하는 지표면의 침하.
- (11) 천단침하(Crown settlement) : 터널굴착으로 인하여 발생하는 터널 천장의 연직방향 침하를 말하며 기준점에 대한 하향방향의 절대 침하량을 양(+)의 천단침하량으로 정의함.
- (12) 허용편차(Permissible deviation) : 변형 여유량에 시공상 피할 수 없는 오차를 합한 값.
- (13) 전 생애주기 예측 : 공사 중 설치하는 예측기 중 유지관리 단계까지 지속적으로 운영하여 구조물의 거동을 모니터링하는 예측 체계

1.5 기호의 정의

- (1) KDS 27 50 10(1.5)를 따른다.

2. 조사 및 계획

2.1 조사 및 계획 일반

- (1) KDS 27 50 10(2.1)을 따른다.

2.2 조사

- (1) KDS 27 50 10(2.2)를 따른다.

2.3 계획

- (1) KDS 27 50 10(2.3)을 따른다.

3. 재료

3.1 재료 일반

- (1) KDS 27 50 10(3.1)을 따른다.

3.2 재료 특성

- (1) KDS 27 50 10(3.2)를 따른다.

3.3 품질 및 성능시험

- (1) KDS 27 50 10(3.3)을 따른다.

4. 설계

4.1 설계 일반

(1) KDS 27 50 10(4.1)을 따른다.

4.2 일상계측

(1) KDS 27 50 10(4.2)를 따른다.

4.3 정밀계측

(1) KDS 27 50 10(4.3)을 따른다.

4.4 공사시방서 작성

(1) KDS 27 50 10(4.4)를 따른다.

4.5 유지관리계측

(1) KDS 27 50 10(4.5)를 따른다.

4.6 하·해저터널의 계측

(1) KDS 27 50 10(4.6)을 따른다.

4.7 도심지터널의 계측

(1) KDS 27 50 10(4.7)을 따른다.

4.8 TBM 터널의 계측

(1) KDS 27 50 10(4.8)을 따른다.

(2) TBM 굴착 시 지반붕괴로 인한 장비의 함몰이나 과굴착으로 인한 과다 지반침하 등이 우려되는 경우에는 굴진면 관찰 또는 조사장비에 의한 굴진면 전방예측, 과굴착 측정 등을 사전에 계획하여야 한다.

4.9 연직갱, 확폭부, 접속부 터널의 계측

(1) KDS 27 50 10(4.9)를 따른다.

4.10 전 생애주기 계측 계획 수립

(1) KR C-02050 계측 (4.3)을 따른다.



해설 1. 터널계측

1. 계측일반

1.1 계측의 역할

터널 시공시 굴착에 따른 지반 및 지보재의 거동은 지반 구조의 불균일성, 조사 및 시험의 한계성, 모델 및 이론의 단순성 등에 따라 설계시 예상 거동과 현저한 차이를 보이는 이상 거동을 나타내는 경우가 있다. 따라서 실제의 지반 거동을 정확하게 파악할 수 있도록 각종 계측을 실시하고 계측결과를 종합적으로 분석 평가한 후 설계·시공에 반영하여 안전하고 경제적인 터널시공이 되도록 한다.

1.1.1 안전성 확인

- 설계시 가정 및 설계 제상수 검증
- 주변 지반거동 관찰로 안정성 판정
- 추가 보강 여부 결정
- 주지보재의 적정성 여부 판정

1.1.2 경제성 확보

- 설계·시공에 계측결과를 반영하여 경제성 유도

1.2 계측의 분류

계측항목의 선정에 있어 시공관리를 위하여 실시하여야 할 계측을 일상계측, 지반조건 및 주변여건을 고려하여 설계를 심도있게 보완하고 향후의 자료획득을 위해 실시하는 계측을 정밀계측으로 분류한다. 다만, 정밀계측 중 토피가 얇을 경우와 주변 구조물에 미치는 영향이 문제가 되는 터널에서는 지표침하 측정을 일상계측에서도 반드시 실시하도록 한다.

1.2.1 일상계측

- 터널내 막장면(굴진면) 관찰조사
- 내공변위 측정
- 천단침하 측정
- 록볼트 인발시험

1.2.2 정밀계측

- 지표침하, 지중침하 측정
- 지중변위 측정
- 지중 수평변위 측정
- 록볼트 축력측정

- 숏크리트 응력 측정
- 지반진동 측정
- 터널내 탄성과 속도 측정

표 1. 터널구간 계측기

계측항목	사용계기	계측장소	계측목적	계측구분
지표침하측정	침하측정 핀과 측량장비	터널굴착영향권 지역 지표면	• 터널 굴착으로 인한 지표면 침하상태 및 인접구조물 영 향예측	정밀
내공변위측정	내공변위측정기	터널의 내공	• 막장부의 진행에 따른 내공 변위를 각 지점별로 측정, 안정성 판단	일상
천단침하측정	Level, 천단침하 측정자 또는 내공변위측정기	터널의 천단부	• 막장부의 진행에 따른 내공 변위를 터널 천단면과 하부 인버트 변화전체를 연속적 인선형(plot)으로 측정 터널 전체의 안전성 판단	일상
록볼트 인발시험	Center Hole Jack & Pump, 변위측정기	록볼트 설치지점	• 록볼트의 인발내력 • 정착효과 및 적정길이 판단	일상
지중침하측정	Magnetic Probe Extensometer	터널 상부기층	• 지표면으로부터 터널 위치 까지의 지반거동 심도별 측 정	정밀
지중변위측정	Probe 삽입식 또는 진동현식 침하센스	터널의 주변지반	• 터널주변의 이완영역측정 • 안정성 검토	정밀
록볼트 축력측정	기계식 앵커 혹은 진동현식 록볼트	록볼트 설치 지점	• 록볼트내의 응력 • 록볼트의 적정길이 판단 • 록볼트 추가설치 여부	정밀
숏크리트 응력측정	압력 셀	터널굴착면과 숏크리트 사이	• 배면토압 및 부재응력 측정 • 지반응력 및 지보재 평가	정밀
변형률/응력 측정	온도계 내장형 변형율계	숏크리트의 내부	• 배면토압 측정 • 숏크리트 변형율 및 응력측 정·수화열 및 양생과정 수 측도	-
지중수평 변위측정	경사계 (Inclinometer)	인접구조물의 영향축선, 터널 인버트에서 최소 1D 깊이까지	• 터널 굴착으로 인한 주변지형 의 횡적거동 측정 • 인접구조물 영향예측	정밀



표 1. 터널구간 계측기(계속)

계측항목	사용계기	계측장소	계측목적	계측구분
터널내 탄성과 측정과 지보공 비파괴시험	탄성과 측정기와 지보공 비파괴 시험기	발파막장부로부터 터 일정축선 및 일정간격의 지점	<ul style="list-style-type: none"> • 발파로 인한 터널 내 지반전반의 영향 범위측정 • 절리층 등의 느슨한 영역계측과 지보공(숏크리트)의 시험 	정밀
작업진동/소음 또는 발파진동 소음	진동/소음 측정기와 소음 음압측정용의 각각 별도의 마이크로폰	작업환경 영향권내의 우선순위에 따름	<ul style="list-style-type: none"> • 환경영향을 고려한 제어 발파와 작업 중장비 동원조절을 통하여 작업장 인접 시설물의 위해방지 및 민원 사전관리 	-
구조물 또는 숏크리트 균열	크랙 게이지 또는 진동현식 변형율계	크랙선 기준 좌·우 대칭점	<ul style="list-style-type: none"> • 작업영향으로 인한 인근 구조물의 균열 및 지보공의 변형 균열 측정 	-

2. 계측계획

2.1 계측계획의 수립

계측계획은 계측 목적을 보다 효율적으로 달성하기 위하여 수행하는 사전 준비로써 다음과 같은 사항에 유의하여야 한다.

- 계측의 목적, 문제점 및 계측항목을 명확히 설정한다.
- 계측기기의 선정, 설치, 계측빈도 등을 신뢰도가 높도록 계획한다.
- 계측결과는 신속히 대응하여 분석하고 그 결과를 시공에 반영한다.
- 긴급사태에 신속히 대응하기 위해 계측결과 분석후의 조치 내용과 범위를 사전에 고려한다.
- 설계 시 각 선구별 동일한 계측관리 및 대응체계를 적용하여 효율적인 철도건설 공사관리가 될 수 있도록 하여야 한다.

설계단계에서 사전조사결과, 터널의 위치와 규모를 고려해서 시공에 적용할 계측 계획을 세워야 한다. 아울러 효과적이고 경제적인 계측항목, 방법, 기기를 선정하여 공사에 가급적 지장이 없도록 계획되어야 한다.

단계별 계획항목은 다음과 같다.

- 계측항목 설정 : 산악지형, 저토포 천층터널(계곡부), 갱구부 개착터널
- 계측단면 결정 : 터널의 용도, 지반조건, 시공방법, 기시공구간의 계측결과 고려
- 계측항목의 결정 : 계측목적에 부합, 터널규모 고려, 주변영향 평가
- 측정빈도 결정 : 막장부의 진행, 지반과 지보의 거동 등을 고려
- 계측기 사양 결정 : 계기의 용량, 정밀도, 검출기 형식
- 관리기준 설정 : 변위기준 결정, 근접구조물 허용변형
- 설치위치 결정 : 계기의 배치

- 계기의 유지관리 : 계기 성능보존 및 계측결과의 신뢰성 확보
- 계측시행 : 현장여건 및 시공상태 확인

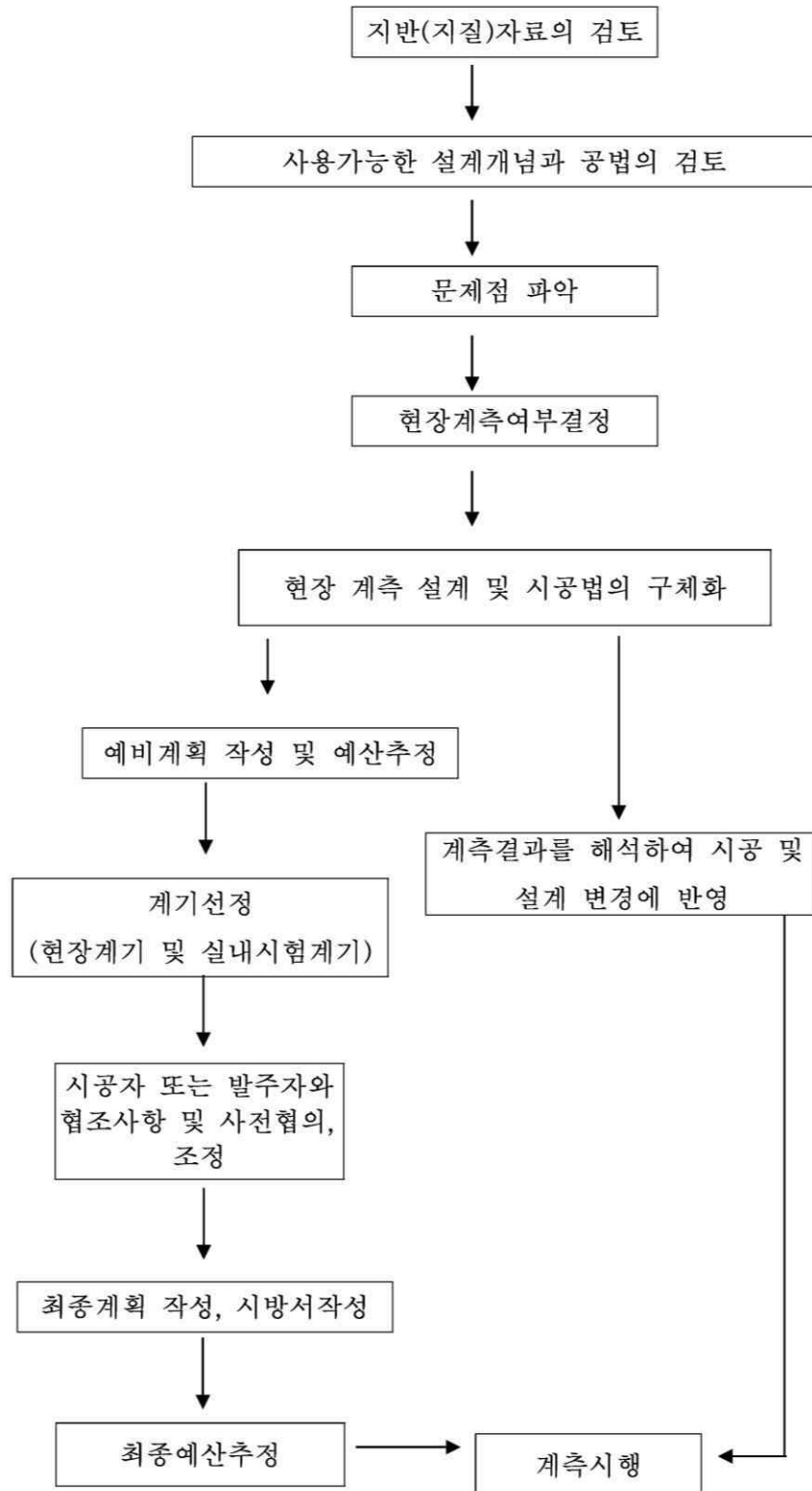


그림 1. 계측계획 흐름도



2.2 계측항목의 선정

계측항목 선정시는 다음과 같은 지반조건에 따라 계측항목을 선정하여야 한다.

표 2. 지반조건에 따른 계측항목 선정

지반조건	시공시 문제가 되는 현상 (관찰, 계측의 대상 현상)	필요한 관찰·계측항목	경우에 따라 추가되는 계측항목
경암 지반	· 균열 등의 붕괴면으로부터 터 압괴, 암편의 이완	· 터널내 막장면(굴진면) 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정	
연약지반 (팽창성지반 제외)	· 압괴, 암편의 이완, 붕괴	· 터널내 막장면(굴진면) 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정	· 지중변위측정 · 록볼트 축력측정 · 암석시료 시험 · 지표침하 측정 (토피가 작은 경우)
팽창성지반 또는 편압이 작용하는 지반	· 측벽의 압출 · 지반팽창 · 막장면 압출	· 터널내 막장면(굴진면) 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정 · 지중변위 측정 · 록볼트 축력측정 · 슛크리트 응력측정 · 작용하중 측정	· 단면측정 · 지보재 침하 측정 · 지반팽창성 측정 · 초기변위측정 · 암석시료 시험 · 라이닝 응력 측정
토사지반	· 지반의 이완과 이에 따 른 지표침하 · 막장부유출 · 인접구조물에의 영향	· 터널내 막장면(굴진면) 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정 · 지중변위 측정 · 지표침하 측정	· 지표(지반, 구조물) 관찰 조사 · 지중변위 측정 (경사계) · 록볼트 축력측정 · 슛크리트 응력 측정 · 작용하중 측정 · 토질시료 시험

2.3 계측기기의 선정

계측기기는 전 세계적으로 수많은 종류가 개발, 보급되고 있기 때문에 용도에 따른 적정 계측기기를 선정한다는 것은 용이한 문제가 아니다. 따라서 적정 계측기기를 선정하기 위해서는 각별한 주의와 함께 기기 특성에 대한 사전정보가 요구되며, 경우에 따라서는 계측기기의 검증이 필요하다. 일반적으로 계측기기는 계측의 목적에 부합되는 기능과 정밀도를 갖는 것으로 선정하는 것이 중요하다. 터널 계측기기는 현장에서 사용할 수 있도록 내구성을 가지고 설치 및 유지관리가 용이하며 계측목적에 맞는 계측범위와 신뢰성을 가져야 한다. 또한 기기특성에 대한 사전정보 획득과 신뢰성 확보를 위해 사전검증이 필요하다.

계측기기는 복잡한 것보다는 간단한 것, 전기식 보다는 기계식 기기, 가동부분이 많은 것보다는 적은 쪽이 사용, 보정, 보수에 편리하다. 기기 자체에 이상이 있으면 측정과 결과분석을 아무리 잘하여도 정확한 결과를 얻을 수 없으므로 기기의 보정과 유지관리에도 유의하여야 한다.

또한 기기의 이상, 고장을 항상 염두에 두어 한두개의 기기고장으로 전체 측정치가 무용지물이 되지 않도록 중요한 위치에는 기기의 수요에 항상 여유(Redundancy)가 있도록 하여야 한다. 기기의 고장시, 또는 측정치가 계측범위를 초과할 것이 예상되지만 재조정(Resetting)이 불가능할 경우를 대비하여 예비기기도 준비하여야 한다. 계측기기 선정시 일반적으로 유의하여야 할 사항은 다음과 같다.

- 구조가 간단하고 견고하며 설치가 용이할 것
- 계측기기의 가격이 저렴할 것
- 온도, 습도 등의 제반 영향인자에 대한 자체 보정이 되거나 보정이 간단할 것
- 측정치에 대한 계산과정이나 분석절차가 간단할 것
- 가급적 측정치의 자체검증이 이루어질 것
- 기기와 터미널간의 연결 케이블이 물리적, 화학적 작용에 견딜 수 있을 것
- 지상부 터미널이 기후 변화나 물리적 피해에 견딜 수 있을 것
- 부식이나 전기적 방해요인을 극복할 수 있을 것

2.4 계측기의 배치

2.4.1 내공변위 측선의 배치

내공변위 측선수는 <표 3>을 기준으로 하여야 한다.

표 3. 내공변위 측선의 수

구간 굴착공법	일반구간	특수구간			
		갱구구간	토피 2D 이하	팽창압이나 편압 예상되는 구간	정밀계측을 실시하는 위치
전단면굴착	수평 1측선	-	3측선 또는 6측선	-	3측선 또는 6측선
반단면굴착	수평 2측선	4측선 또는 6측선	4측선 또는 6측선 주1)	4측선 또는 6측선 주2)	4측선 또는 6측선
분할 굴착	각 벤치마다 수평 1측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선 주1)	각 벤치마다 3측선 주2)	각 벤치마다 3측선

주1) 지표 및 지중 침하측정 등 지상부 계측이 충분히 실시되는 경우에는 경사 측선을 생략해도 무방하다.

주2) 변위량이 클 경우(내공 변위량이 복선 단면에서 200mm, 단선단면에서 100mm를 초과하는 경우), 혹은 편압현상이 현저할 경우에는 측량 등에 의해 절대변위 측정도 병행해서 실시하여야 한다.

이 표에서 제시한 측선수는 일반적인 경우이므로 각종 터널에 있어서 시공실적(계측자료)의 축적상황에 따라 측선수를 적절히 조정하는 것이 바람직하다. <그림 2>에는 측선배치의 예를 보여준다.

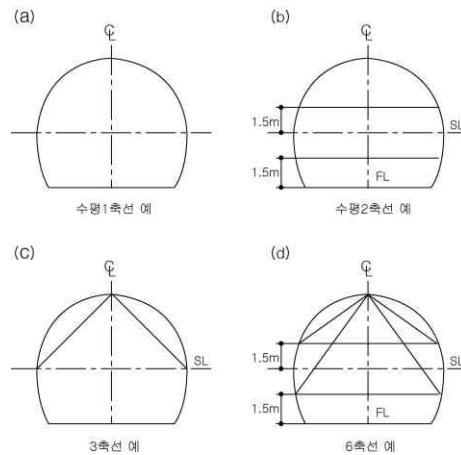


그림 2. 내공변위 및 천단침하 측정의 축선배치(복선터널의 경우)

2.4.2 천단침하 측정

천단침하는 내공변위와 동일 단면에서 측정하고 그 측점은 막장면(굴진면)에 근접하게 설치하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 천단침하는 수준측량 등을 통하여 하향 방향의 절대 침하량으로 측정하도록 설계하여야 한다. 터널이 전체적으로 침하하는지를 알아보기 위해서는 천단침하와 더불어 터널 바닥면의 침하도 측정하는 것이 바람직하다.

2.4.3 지표 및 지중침하

토피가 얇은 터널은 통상 토사터널이나 연약한 암반터널로 되는 경우가 많으며 큰 지표침하가 발생하는 경우가 많다. 이와 같은 이유로 지표침하측정은 터널 및 주변 지반의 안정성을 확보하기 위해 실시되어야 한다. 침하량은 일반적으로 지질, 지하수위, 주변구조물의 유무 등이나 시공법에 의해 크게 다르게 된다. 침하의 측정은 계측 결과의 상호비교를 위하여 내공변위 측정, 천단침하 측정위치와 동일한 지점으로 하는 것이 바람직하다. 측정위치는 터널 중심선상의 지표면에 설치하여야 하나 현장 여건상 곤란할 경우에는 가급적 중심선에 근접하도록 설치하여야 한다. 측정점의 배치는 터널의 규모, 시공방법, 토피두께 등에 따라 다르지만 일반적으로 지표침하의 경우 터널 축에 직각으로 거리별로 여러 개의 계기를 설치하여야 한다. 이때 가장 바깥쪽에는 부동점을 설치해 두는 것이 바람직하다. 지표, 지중침하계를 터널 굴착 전에 미리 지표에 설치, 계측함으로써 굴착에 따른 전체 변위를 측정할 수 있다. 또한 지중변위 양상을 보다 상세히 파악하기 위해서는 공내 경사계를 함께 사용할 수도 있다.

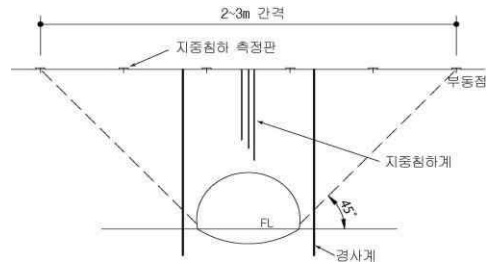


그림 3. 지표침하 및 지중침하 측정의 측정배치 예

2.4.4 정밀계측 중 터널내에 계기를 설치하는 항목

정밀계측의 여러 항목 중 지중변위 측정, 록볼트 축력측정, 숏크리트 응력측정과 같이 터널 내에 계측기를 설치할 필요가 있는 항목에 대해서는 1단면마다 3~5점을 표준으로 하지만, 그 배치는 여러 가지 터널의 적용 설계패턴에 의해 적정한 위치를 고려하여야 한다. 단 록볼트의 타설 위치나 내공변위 측정용 핀의 위치에 가급적 가깝게 설치하는 것이 계측결과 해석에 유리하다. <그림 4>는 계기배치의 일례를 나타낸다.

또한 단면내의 연속정보를 알고자 하는 경우에는 9점 정도의 측정점이 필요하게 된다. 또 지반상황이나 그때까지의 계측결과로부터 편압, 변위의 편기가 분명하게 되는 경우는 전체 단면 측정이 아닌 부분적인 측정을 행하여도 좋다.

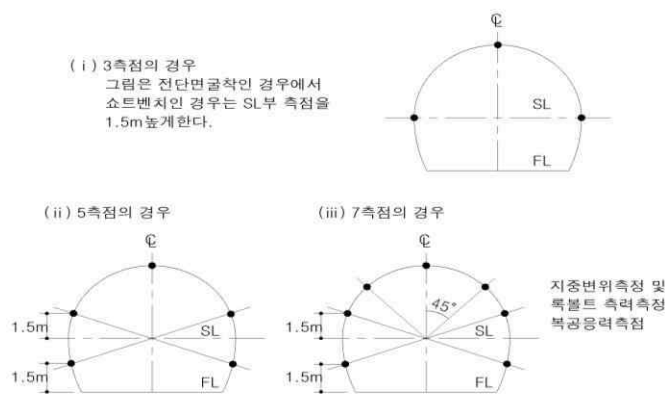


그림 4. 정밀계측의 계측기 배치 (복선단면인 경우)

2.5 계측의 측정빈도 결정

측정빈도는 계획시에 지반조건과 시공조건을 함께 고려하여 설정한 뒤 시공과정에서 지반 및 지보의 거동상황 등 계측결과를 참조하여 적절한 수정을 가하는 것이 중요하다. 일반적으로 변위와 응력의 변화는 굴착 직후에 크지만 시간이 경과하고 막장부가 멀어짐에 따라 감소하는 경향이 있기 때문에 막장부에 접근하여 측정하는 초기 단계에서 측정빈도를 조밀하도록 정한다.



계측의 측정빈도는 매일 2회부터 주 1회까지 계측항목과 계측시기에 따라 실시하며 측정값이 일정값에 수렴되어 더 이상 변동이 없으면 그 이후 9일간만 더 계측을 실시한 후 중단하여야 한다. 계측빈도는 아래 <표 4>를 표준으로 하여 실시하되 현장여건, 지질의 변화, 굴착방법, 작업시간, 설치간격 등을 감안하여 변경될 수 있다.

표 4. 계측간격 및 빈도의 표준

구분	계측항목	계측간격	배치	설치 시기	측정빈도			비고
					0~15일 (0~7)	15~30일 (8~14)	30일 (15일)	
일상 계측	터널내 (막장부) 관찰조사	전연장	전막장부	-	1회/일	1회/일	1회/일	
	내공변위 측정	10~30m	수평2 대각선4	막장부후방 1m	1~2회/ 일	2회/주	1회/주	
	천단침하 측정	10~30m	1개소	막장부후방 1m	1~2회/ 일	2회/주	1회/주	
	록볼트인발 측정	3개소/20m (1개/50분)	1단면 5본	정착효과발 생즉시	-	-	-	
정밀 계측	지표 및 지중침하 측정	20~50m (200~500m)	터널상부 3~5개소	터널전방 (H+h1) 혹은 2D	1회/일	1회/주	1회/2주	
	숏크리트 응력 측정	200~500m	수평, 수직방향 3~5개	막장부후방 1 3m	1회/일	1회/주	1회/2주	
	지중변위 측정	200~500m	3~5개의 다른심도	막장부후방 1 3m	1~2회/ 일	1회/주	1회/주	
	록볼트축력 측정	200~500m	3~5개의 다른심도	막장부후방 1 3m	1~2회/ 일	1회/주	1회/주	
	지반시료 시험	200~500m	-	-	-	-	-	
	갱내탄성과 속도측정	500m	측선장 100~200	-	1회	1회	1회	
	지중수평 변위측정	200~500m	터널상부 양측	터널전방 15~30m	1회/일	1회/주	1회/2주	

- 1) 측정 빈도란중 ()은 변위의 수렴이 빨리 진행되는 경우의 빈도임
- 2) 일상계측에서 측정빈도와 변위속도 및 막장부까지의 거리는 <표 12>와 같다.

<표 4>의 계측간격 및 빈도의 표준에서 다음의 경우는 계측간격, 계측횟수를 변경할 수 있다.

- 팽창성지반에서 장기간 지반이 안정되지 않을 경우
- 굴착의 진행이 현저히 빠르거나 늦은 경우

- 터널의 연장이 길거나 혹은 많은 경우
- 양호하게 같은 형의 지질이 연속될 경우
- 지층(지반)의 변화가 현저한 경우
- 변위가 대단히 빨리 수렴해 버리는 경우

2.6 계측관리 기준치설정

2.6.1 내공변위

<표 5> 단계별 계측관리 기준(내공변위)은 지반 거동상태, 터널단면 크기, 시공방법, 지보재량 등에 따라 결정되므로, 특정 기준치를 정확히 제시하기는 어렵기 때문에 상세 지반조사결과에 의한 설계 입력자료로 이론 및 수치해석과 혹은 유사 조건의 시공 실적 결과를 참조하여 조정할 수 있으며, 내공변위의 수렴 후 측정기간은 변위가 클 경우는 2주간 측정하고 변위가 작은 경우는 1주간 정도 측정하여야 한다.

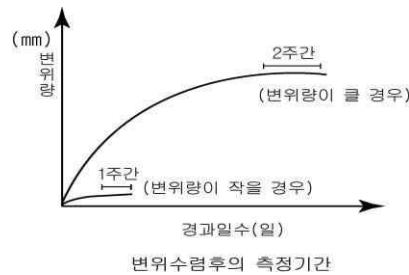


그림 5. 내공변위 구렴후의 측정기간

표 5. 단계별 계측관리

주의레벨	관리기준		
	변위속도*	변위량	상태
1 (주의단계)	• 내공변위 속도가 5mm/일 이상	• 설계예상치	• 숏크리트에 부분적으로 균열이 발생한다. • 지하수가 침투한다.
2 (경고단계)	• 내공변위 속도가 막장부 근처에서 10mm/일 이상이고 후방에서 5mm/일 이상	• 설계예상치 ×1.25	• 숏크리트에 전체적으로 균열이 발생한다. • 지하수가 침투한다.
3 (보강단계)	• 변위가 가속	• 설계예상치 ×1.5	• 균열이나 지하수침투가 레벨 2의 경우를 초과한다.

* Franklin 기준(ASCE pp. 556~596, 1996)

- (1) 설계예상치는 설계단계에서 지반조사결과에 따라 대표단면 별 수치해석을 통해 산정된 계측관리기준으로서 시공 중 계측결과와는 상이할 수 있다.
- (2) 설계예상치가 없는 경우에는 <표 6> 일본 토비시마(飛島)건설(Tobishima corporation)관리기준을 참조하여 대체할 수 있다.



표 6. 일본 토비시마 건설관리기준

관리기준 지반조건	주의레벨 I		주의레벨 II
	내공변위	변위속도	내공변위
경암지반	20 ~ 30mm	5mm/일 3일 계속	30 ~ 50mm
연암지반	20 ~ 30mm	5mm/일 3일 계속	50 ~ 70mm
토사지반	사질토	5mm/일 3일 계속	30 ~ 50mm
	점성토	10mm/일 3일 계속	50 ~ 70mm
팽창성지반	100mm	30mm/일 3일 계속	200 ~ 300mm
대응책	<ul style="list-style-type: none"> 계측결과 현장의 상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정하여야한다. 계측횟수를 많게 하고 주의해서 시공한다. 		<ul style="list-style-type: none"> 시공법의 변경, 보조공법의 추가, 지보재 추가 등의 대책을 세운다.

(3) 아래 <표 7>, <표 8>의 관리기준은 설계 시 참조 할 수 있는 값으로 제시된 것이다.

표 7. 오스트리아 Alberg터널의 관리기준

항 목	평 가 기 준
최대허용 내공변위량	<ul style="list-style-type: none"> 터널반경의 10% 이내 사용된 록볼트 길이의 10% 이내
이상적인 내공변위량	<ul style="list-style-type: none"> 터널반경 및 록볼트길이의 3~4% 이내
록볼트의 증가설치기준	<ul style="list-style-type: none"> 굴착 후 10일의 상대변위가 150mm 이상 10일째의 변위속도가 10mm/일 이상
콘크리트라이닝 타설시기	<ul style="list-style-type: none"> 굴착후 100일 이내 경과후 30일간의 상대변위가 7mm이하 변위속도는 0.23mm/일 이하
내공변위속도에 따른 콘크리트라이닝 강도기준	<ul style="list-style-type: none"> 0~1mm/30일 혹은 0~0.03mm/일 : 20MPa 1~3mm/30일 혹은 0.03~0.1mm/일 : 24MPa 3~5mm/30일 혹은 0.1~0.19mm/일 : 32MPa

표 8. 프랑스 공업성 관리기준

토피(m)	천단최대허용 변위량(mm)	
	경암지반	소성지반
10~50	10 ~ 20	20 ~ 50
50~100	20 ~ 60	100 ~ 200
100 이상	60 ~ 120	200 ~ 400

2.6.2 천단침하

<표 9> 단계별 계측관리 기준(천단침하)은 지반 거동상태, 터널단면 크기, 시공방법, 지보재량 등에 따라 결정되므로, 특정 기준치를 정확히 제시하기는 어렵기 때문에 상세 지반조사결과에 의한 설계 입력자료로 이론 및 수치해석과 혹은 유사 조건의 시공 실적 결과를 참조하여 조정할 수 있다.

표 9. 단계별 계측관리 기준(천단침하)

주의레벨	관리기준	
	변위속도	변위량
1 (주의단계)	변위속도가 5mm/일 이상	· 설계예상치
2 (경고단계)	변위속도가 5mm/일 이상	· 설계예상치 ×1.25
3 (보강단계)	변위속도가 5mm/일 이상	· 설계예상치 ×1.5

* Franklin 기준(ASCE pp. 556~596, 1996)

- (1) 설계예상치는 설계단계에서 지반조사결과에 따라 대표단면 별 수치해석을 통해 산정된 계측관리기준으로서 시공 중 계측결과와는 상이할 수 있다.
- (2) 설계예상치가 없는 경우에는 <표 10> 천단침하의 관리기준(일본토질공학회, 1986.2)을 참조하여 대체할 수 있다.

표 10. 천단침하의 관리기준(일본토질공학회,1996)

(터널 반경 : 5m)(단위 : mm)

주의레벨	A(경암)	B(연암)	C(풍화암)
I	3 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 30
II	1 ~ 15	15 ~ 40	40 ~ 95
III	30 ~ 40	40 ~ 110	110 ~ 270

- 주의레벨 I : 지반은 안정해 있지만 이완영역의 발생한계에 달하기 때문에 굴착에 약간의 주의를 요함
- 주의레벨 II : 이완영역이 발생하는 것으로 생각됨
- 주의레벨 III : 명확하게 이완 영역이 발생하기 때문에 시공의 곤란이 예상되므로 굴착공법, 지보공법 등의 선택에 주의를 요함

2.6.3 지표침하

천단침하 측정결과와 함께 평가하며 주변구조물에 미치는 영향은 허용변형각을 설정하여 침하가 이를 넘을 경우 대책을 수립하여야 한다. 또한 횡방향의 지표 침하 곡선이 좌우 비대칭이거나 침하량이 비정상적으로 크게 되면 편압지형, 근접터널의 영향, 슬라이딩(Sliding)에 기인되는 경우가 많으므로 지형, 지질구조를 검토하여 적절한 계측을 추가하여 시행한다.



일본 건축기초 설계기준에는 다음과 같은 변형각에 대한 허용치가 있다.

- 철근 콘크리트 구조물 : 1/1,000~2/1,000
- 콘크리트 블럭 구조물 : 0.5/1,000~1/1,000

2.7 터널계측 관리기준 단계별 대응체계

표 11. 터널계측 관리기준 단계별 대응체계

구 분	관리기준	계측관리	시공관리 및 대책
평상시	계측치 ≤ 1차 관리기준치	• 일상 계측 및 보고	• 갱내 막장 및 지보관찰
주의레벨 1단계	1차 관리기준치 < 계측치 ≤ 2차 관리기준치	• 책임기술자에게 보고 • 계측기기의 점검 및 재측정 • 요인분석 ⇒ 막장관찰 결과비교	• 작업주의 지시 • 막장관찰의 강화 • 대책공의 검토
주의레벨 2단계	2차 관리기준치 < 계측치 ≤ 3차 관리기준치	• 책임기술자에게 보고 • 계측체계의 강화 ⇒ 측정빈도의 증가 • 요인분석 ⇒ 막장관찰 결과비교 • 관리기준치 적정성 검토 • 해당구간의 측정추가	• 현장상황의 점검 강화 • 대책공의 실시 (지보패턴의 변경)(주) ⇒ 슛크리트 및 록볼트 증설 ⇒ 막장면 슛크리트 ⇒ 막장면 록볼트 ⇒ 상반폐합 (스�크리트 가인버트 설치 등)
주의레벨 3단계	3차 관리기준치 < 계측치	• 책임기술자에게 보고 • 계측체계의 강화 • 요인분석 ⇒ 막장관찰 결과비교 • 관리기준치 적정성 검토 • 해당구간의 측정 추가 • 대책공 실시 후 확인	• 작업중지 및 막장 후방의 점검 • 대책공의 실시 ⇒ 슛크리트 및 록볼트 증설 ⇒ 막장면 슛크리트 ⇒ 막장면 록볼트 ⇒ 상반폐합 (스�크리트 가인버트 설치 등) ⇒ 지반보강 (주입 등)

- 1) 막장관찰 결과가 해당 지보패턴과 상이할 경우 막장관찰 결과에 준한 지보패턴으로 변경하여 시공관리를 하여야 한다.
- 2) 책임기술자는 현장대리인, 감독자 및 감리원 등을 말한다.

3. 계측시행

3.1 지표 및 지중침하 측정

3.1.1 측정

지표침하 측정의 기계설치방법은 좌우 터널의 상부 및 그 사이의 지표에서 91.6mm (4인치)의 시추공을 굴착후 심도가 다른 1~5조의 룯드(앵커 부착)를 공내에 삽입하여 모르타르로 고정시킨다. 원래 앵커 부분과 헤드부분만을 고정시켜야 정확한 변위

를 측정할 수 있어 Triple Extensometer의 경우, 3개의 앵커 부분만 모르타르로 고정시키고 나머지 부분은 모래로 채워야 하므로 이 방법은 설치방법이 까다롭다. 그것을 보완하기 위해서는 가압 앵커로 고정하는 기종을 선택하거나 심도가 다른 Single Extensometer를 0.5m 이내 간격으로 3개를 설치할 수 있다. 이 측정의 특징은 터널 천단 부근의 선행침하(막장부 통과되기 전에 생긴 침하)를 파악하기 위해 유용한 것으로 터널 전방에 터널이 통과되기 약 3주전에 설치하여 터널 깊이 만큼의 전방에서 측정하기 시작하여 터널이 상당한 거리를 굴착(터널폭 D의 2~5배)될 때까지 측정하여야 한다. 특히 $H < 2D$ 의 경우나 토피가 낮은 토사터널에서의 지표침하 측정은 터널의 내공변위 측정보다도 중요한 계측이 된다.

지표에는 터널의 종방향 및 횡방향으로 여러 곳에 기준점을 설치하여 터널 진행에 따른 지표 및 각 앵커 지점의 침하를 게이지에 따라 측정한다.

3.1.2 기록

측정결과는 막장부로부터의 거리, 시간경과에 따른 변화 및 터널 횡방향, 진행방향의 침하량을 점검하여야 한다.

3.2 내공변위 측정

3.2.1 측정

- 측정위치에 볼트를 매설하여 고정시킨 후 양 볼트에 내공변위측정기로 측정하여야 한다.
- 측정시마다 볼트와의 접촉상태가 동일하고 일정 장력유지가 필요하다.
- 15~30m 간격으로 막장부후방 최소한 1m 후방에 설치하며 변위량에 따라 측정빈도를 증감한다.
- 변질지반, 팽창성지반, 토피가 얇은 지반에서는 측정간격과 빈도를 조밀하게 측정하여야 한다.
- 수평변위측정을 우선 시행하고 대각선 측정을 필요에 따라 시행하여야 한다.

3.2.2 기록

- 데이터 기록지에 측정기록
- 변위량의 시간경과 그래프
- 변위 정도의 시간경과 그래프

3.2.3 평가

(1) 변위량

최대변위량이 평가 기준치 또는 허용치를 넘으면 즉시 록볼트 추가보강이나 슛크리트를 추가 타설하여야 한다. 지반구조물, 토피의 깊이, 굴착공법 등에 따라 평가기준



치와 변위허용량은 다르므로 정량적으로 정하는 것이 곤란하나 현장의 상황을 잘 고려한 후 안정성과 경제성의 일치점을 구하여 평가하여야 한다.

(2) 변위속도

변위속도가 일정하거나 증가하는 경우는 위험하다. 그리고 2차복공 타설은 변위가 수렴한 후 행하는 것이 바람직하다. 평균변위속도가 허용치에 미달한 경우도 가능하다.

(3) 내공변위 천단침하의 측정빈도

표 12. 내공변위 측정 및 천단침하측정의 측선배치

측정빈도	변위속도	막장부까지의 거리
1~2회/1일	100mm/일 이상	0~1D
1회/일	10~5mm/일	1~2D
1회/2일	5~1mm/일	2~5D
1회/1주	1mm/일 이상	5D 이상

3.3 천단침하 측정

3.3.1 측정

터널의 천단부근 슛크리트에 콘크리트못을 박거나 내공변위 측정용의 천단 볼트를 박아 레벨(Level)로 측정하여야 한다.

측정시기는 막장부 통과후 가급적 빠른 시간, 늦어도 1~2시간 이내인 초기에 측정을 시행하여야 한다. 측정은 수준측량으로 레벨을 사용하여 수준점을 기준으로 절대고를 구하며 측정정밀도는 ±1mm 정도라야 하며, 측정시간은 변위가 수렴할 때까지 한다.

3.3.2 기록수집

측정결과는 내공변위와 동일하게 기록 정리하며 측정기간은 변위가 수렴될 때까지 측정하여야 한다.

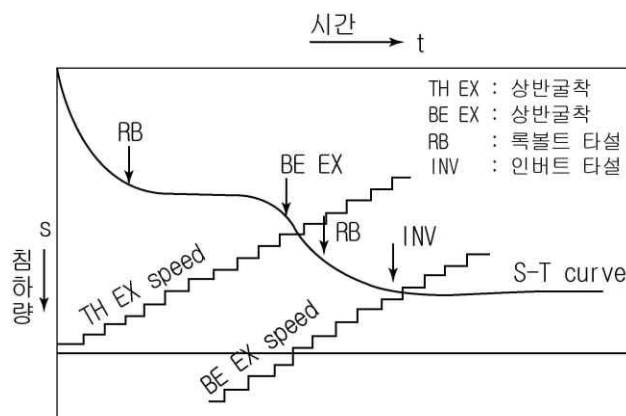


그림 6. 침하량의 경과시간 및 막장진행과의 관계

3.4 록볼트 인발시험

3.4.1 측정

록볼트 시공후의 정착효과를 확인하기 위해 센터 홀 잭(Center Hole Jack) 등을 사용하여 행하는 계측으로 가급적 불량한 암반을 골라서 행하며 볼트의 머리부분에 인발력 P를 가하여 다이얼 게이지로 변위를 측정하고 하중과 변위의 관계에서 인발력을 확인하여야 한다.

인발하중의 평균재하 속도는 10kN/min을 표준으로 하여 충분한 정착효과가 얻어진 후에 가급적 빨리 실시하여야 한다.

ø25mm 정도의 볼트에서도 인발하중 120kN에 도달하면 합격으로 보아도 좋다. 암반 강도가 낮아서 인발저항이 얻어지지 않으면 록볼트의 길이를 길게 할 필요가 있다.

3.4.2 평가

하중-변위 곡선을 그려 인발내력을 구하여야 한다. 인발내력은 하중-변위 곡선에서 A영역 직선부의 접선과 C영역 접선과의 교점(D)이다. 즉, C영역은 볼트의 정착효과를 기대할 수 없는 영역으로 기대할 수 있는 영역은 D점까지이다. 일반적으로 록볼트의 인발하중은 170kN 이상 나오는 록볼트를 사용하여야 한다. 암반강도가 낮아서 소정의 인발 저항이 얻어지지 않으면 록볼트의 길이를 길게 할 필요가 있다.

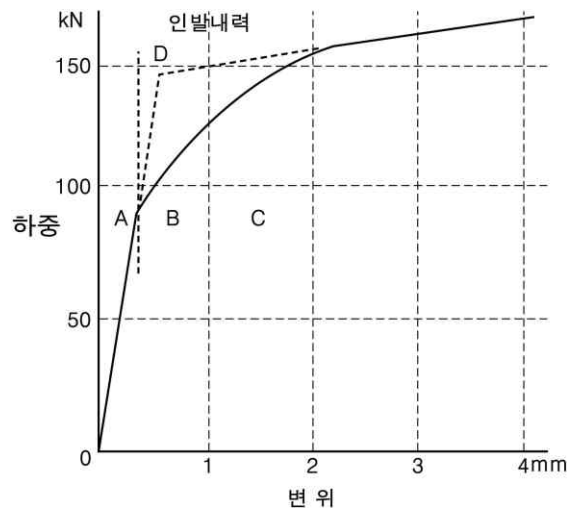


그림 7. 인발시험의 하중-변위곡선

3.5 지중변위측정

3.5.1 측정

터널의 반경방향으로 여러 시추공을 시추하고 1개구멍 마다 심도가 다른 앵커가 부착된 Extensometer를 투입하여 각 앵커와 터널 벽면변위를 다이얼 게이지 또는 다이얼 메타로 측정하여 느슨해진 영역을 파악하여야 한다.



시설 중에 공내에서의 앵커를 고정시키는 것이 가장 중요하며 이는 모르타르로 하는 방식과 가압 앵커로 고정시키는 방식이 있다.

전구간이 모르타르로 고정될 경우, 데이터가 부정확할 가능성이 많고 가압 앵커방식이 앵커 부분만 고정시킬 수 있고 설치작업이 간단하여 정확한 데이터를 기대할 수 있다.

3.5.2 평가

경과일수별로 변화되는 그래프와 앵커의 심도별 변위를 그래프화 하면, 심도의 불연속선이 나타나며 이로써 각 기점의 변위를 알 수 있다. 이에 따라 변위영역을 판단하여 록볼트의 적정길이를 파악할 수 있다.

해석은 록볼트 축력측정 및 내공변위 측정과 연관시켜 행하여야 한다.

3.6 지중 수평변위 측정

3.6.1 설치

현장의 특성과 상황에 따라 시추와 그라우팅의 방법은 현장마다 차이가 있으나 일반적으로 다음과 같이 설치하여야 한다.

- 굴착공의 지름 100~200mm로 암반까지 시추 한다.
- 시추하는 동안 케이싱 한쪽 끝을 보호마개로 씌우고 리벳건을 사용하여 리벳팅 한다.
- 케이싱을 커플링으로 리벳팅하여 조립하고 테이프로 실링 한다.
- 굴착공으로 조립된 케이싱을 내리고 상부를 보호마개로 막고, 설정된 측정방향으로 케이싱의 홈방향을 맞춘다.
- 하부 암반에 1m 내지 1.5m 정도 결합재 그라우팅을 하고 토질에 따라 결합재와 벤토나이트를 적당한 비로 혼합하여 그라우팅 한다.
- 케이싱 상단 주위에 보호장치를 하고 충전재가 침하한 부위에 다시 채운다.

주의) 그라우팅을 하는 도중 측정방향과 케이싱의 홈방향이 변경되지 않도록 유의하여야 하며 설치도중 지하수에 의한 부력이 발생하면 케이싱내로 깨끗한 물을 넣어 부력을 제거 한다.

3.6.2 측정

- 경사계의 보호마개를 열고 Pully Assembly를 설치하여야 한다.
- 감지기를 케이싱의 홈방향으로 하부까지 내린다.
- 지시계의 스위치를 켜고 0.5m씩 표시된 케이블을 올리면서 측정한다.
- 측정값은 조작자가 원거리 스위치를 누를 때마다 자동적으로 휴대용 컴퓨터에 기록하여야 한다.

3.7 록볼트 축력측정

3.7.1 설치

- 록볼트 축력을 측정하고자 하는 장소에 측정방향으로 천공한 후 공내에 모르타르를 완전히 충전하고 앵커를 삽입하며 상향방향은 모르타르 주입에 주의를 요하며 벽면과 플레이트 사이에 요철이 없고 축력이 플레이트에 직각으로 작용하도록 하여야 한다.
- 진동현식인 경우는 케이블이 앵커에 직결되어 있어 삽입시 파손에 주의를 요하며 케이블 배선은 발파 및 기계작업 등을 고려하여 보호하여야 한다.

3.7.2 측정

- 기계식 앵커를 사용하는 경우 록볼트와 Extensometer의 조합으로 26mm의 앵커못드 내부에 Mini Extensometer를 부착하여 길이변화를 기계적으로 측정한다.
- 진동현식 록볼트의 경우는 록볼트의 측정위치마다 진동현 변형게이지를 부착하여 진동현으로 측정하는 것으로 측정위치의 변형을 직접 측정한다.

3.7.3 평가

- 록볼트가 유효하게 작용할 경우에는 인장응력이 발생하며 이 인장응력의 분포로 느슨한 영역과 볼트의 개수 및 길이의 과부족을 판단하고 결과의 해석은 지중변위 측정과 내공변위의 변화를 함께 연관시켜 행하는 것이 바람직하다.

3.8 숏크리트 응력측정

3.8.1 측정

(1) 압력셀 사용시

숏크리트를 타설전에 1개 단면에 각 방향으로 5조씩 매설한 후에 케이블을 터널 양측 하부의 연결장치에 연결시킨 후 숏크리트를 타설하여야 한다(정밀계측(MMS)에만 설치).

측정방법은 구형 셀인 경우, 유압식 펌프로 압력을 가하여 셀과 외부압력의 평행상태에서의 게이지를 측정하나 최근에는 압력셀 자체에 수압을 가한 상태로 압력변화에 따른 유압의 변화가 측량장치에 전달되고 이를 다이알 게이지로 측정하여 응력으로 산정하여야 한다.

(2) 진동현 방식 변형 게이지 사용시

숏크리트 타설전에 센서(2개 1조)를 매설한 후 케이블을 터널 양쪽으로 유도한 다음 숏크리트를 타설하여야 한다. 측정방법은 진동현용 측정기로 측정하며 숏크리트의 응력변화 상태는 변위로 측정한 값을 하중으로 환산하여야 한다.

특히 센서 매설시 숏크리트가 완전부착되도록 하여야 하며 보조장비를 활용하여 와이어메쉬 및 원지반에 부착시켜 정확한 각도로 유지토록하여야 한다.



3.8.2 기록

막장부의 진행상황과 지보공 시공상황과의 연관성을 검토하여 기록을 수집하며, 막장부의 진행에 따른 응력의 변화관계 및 각 단면에 작용하는 응력의 분포상황의 시각적 변화를 수집하여야 한다.

3.8.3 평가

측정결과 해석은 내공변위, 지중변위 등의 결과와 종합 판단하는 것이 좋으며 일반적으로는 내공변위 결과와 종합하여 슛크리트 타설시기, 두께, 강도 등을 설계하는 것이 바람직하다.

3.9 터널내 탄성과 속도 측정

3.9.1 원리

암층의 탄성적 성질의 차이에 의해 지진파의 전파속도가 다른 것을 이용하여 탄성과 속도로부터 지층의 고결 정도, 균열 정도, 변질 정도 등을 추정하는 것으로 이를 터널 내에서 실시하여 굴착으로 인한 암층의 느슨한 영역을 추정하는 방법이다.

3.9.2 설치 방법

수진기는 슛크리트를 제거한 터널벽에 부착시켜 파묻어야 하며 수진점 간격은 2~5m로 하는 것이 바람직하다.

3.9.3 측정 방법

발전원에서 화약 폭파를 이용하거나 타격을 되풀이하여 각 수진기까지의 탄성과의 속도를 동시에 측정하는 것이며, 여러 번 반복함으로써 시간 경과에 따른 느슨한영역 변화를 추정할 수 있다.

측정시에는 터널내의 전력선, 동력선이나 환풍기 등의 진동에 의한 소음이 영향을 주지 않도록 하며 항상 동일한 조건의 측정이 되도록 세심한 주의를 하여야 한다.

3.10 진동·소음 측정

3.10.1 진동

도시 내에서 실시되는 지하굴착 작업시에는 말뚝의 항타나 인발, 중장비의 주행, 발파 등이 원인이 되어 진동과 소음이 발생하게 된다. 이중 진동은 인접구조물에 예기치 못한 손상을 입히거나 인근 주민에게 불쾌감을 주게 된다. Wiss는 건설공사에 의한 진동을 다음과 같은 세 가지로 구분하였다.

- 충격 진동(Transient or Impact Vibration)
- 정상상태 진동(Steady-State or Continuous Vibration)
- 준정상상태 진동(Pseudo Steady-State Vibration)

충격 진동은 발파, 말뚝 향타시에 발생하는 진동이며 정상상태 진동은 진동해머, 콤프레셔 등에 따라 발생된다. 또한 준정상상태 진동은 잭 해머, 포장파쇄기, 트럭, 불도저, 크레인 등에 따라 발생하며 일련의 충격진동으로 짧은 기간에서는 정상상태 진동에 접근하는 진동이다. 진동의 장애로는 건물에 파손을 유발시키는 물적장애와 인체에 대한 정신적 부담을 들 수 있다.

(1) 건물에 미치는 영향

사람이 진동에 감응하는 정도는 진동가속도에 따라 변하고 건물이 받는 피해의 정도는 진동속도 성분과 직접 관련이 있는 것으로 밝혀졌다. 진동의 범위를 고려할 경우는 주파수가 동시에 고려되어야 한다.

현재 진동 허용기준치는 각 국가, 대상 구조물에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 발파진동의 피해 여부를 가리는 대상이 건물 등의 시설물인 경우 국내외의 여러 연구결과 및 측정결과를 종합하여 볼 때 1.0kine의 발파진동 기준이면 충분한 안전발파가 이루어질 수 있다고 하였다.

발파설계시 주변에 발파진동으로부터 보호하여야 할 시설물이나 구조물이 있는 경우 대상 시설물 위치에서의 발파진동 허용치는 <표 13>과 같다. 단, 현장의 적정주파수 대역 미파악시에는 보수적인 기준치를 적용하여야 한다.

표 13. 구조물 손상기준 발파진동 허용치

구분	구조물 형식	문화재 및 지반진동 예민 구조물	조적식 벽체 (벽돌, 석재등) 와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건물	철근콘크리트, 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형 건물
	구조물종류	문화재 등	재래가옥, 저층 일반가옥 등	저층 양옥, 연립주택 등	중·저층아파트, 중소상가 및 공장	내진구조물 고층아파트, 대형 건물 등
주파수 대역별 허용치 (cm/s)	50Hz 이상	0.75	1.5	2.5	4.0	5.0
	50Hz 미만	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

(2) 인체에 미치는 영향

인체는 구조물보다 훨씬 민감하게 진동에 대하여 반응을 보이므로 건물이 피해를 입지 않는 진동이라 하더라도 불안감, 불쾌감, 위압감을 느끼거나 고통을 호소하게 된다.

K값에 따른 인체의 감응 정도를 DIN 4025에서는 다음과 같이 분류하고 있다.



표 14. K값에 따른 인체의 감응정도

K	분 류	일에 대한 영향
0.1	느낌한계	영향 없음
0.1~0.3	겨우 느낌, 1시간 이상 지속시 불쾌	영향 없음
0.3~1	쉽게 느낌, 1시간 이상 지속시 불쾌	영향 없음
1~3	강하게 느낌, 1시간 이상 지속시 매우 불쾌	영향 있음, 그러나 가능
3~10	불쾌, 1시간 이하면 참을 수 있으나 그 이상은 안됨	매우 크게 영향 있음, 그러나 아직 가능
10~30	매우 불쾌, 10분 이상 참을 수 없음	겨우 가능
30~100	극도로 불쾌, 1분 이상 참을 수 없음	불가능
100~	참을 수 없음	불가능

(3) 소음 영향

일반적으로 너무 큰 음, 음질이 불쾌한 음, 사고, 작업, 수면 등 생활에 방해가 되는 음, 감정적으로 혐오감을 주는 음, 소리가 나서는 안되는 곳에 나는 음 등을 소음이라 할 수 있다. 우리 주변에는 각종 소음 혹은 일상적인 소리에 둘러싸여 있으며 이 들에 대한 종류와 크기는 <그림 8>과 같다.

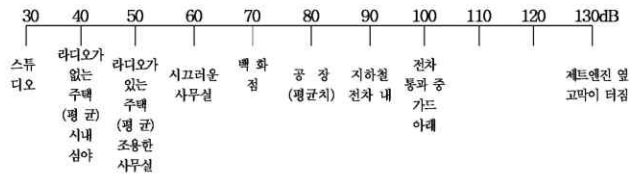


그림 8. 소음과 크기에 따른 대상의 상태

일반적으로 건설공사에 사용되는 기계의 소음레벨과 도달거리의 일례는 <표 15>와 같다.

소음은 환경보전법 제 14조에 따라 규제되고 있으며 동시행규칙 제 15조에서는 소음에 대하여 대상 소음도를 다음에 따라 보정하고, 보정된 소음도가 50dB(A) 이하가 되도록 규정하고 있다.

측정된 소음에 대한 시간별, 지역별 소음보정치는 <표 16>과 같다.

표 15. 건설장비의 소음

건설장비명	소음레벨(단위 : dB(A))			소음도달거리(m)	
	음원에서 10m	음원에서 30m	음원에서 50m	소음도달거리	평균
디젤 해머	93~112	90~103		70~150	105
드롭 해머	97~108	88~98		70~150	91
스팀 해머	83~86	90~92			
바이브로 해머	84~91	74~80		40~100	63
어스 오거(엔진 포함)	66~72	58~64	58(54~64)	40	40
어스 오거(리士)	70~74	65~73			
어스 드릴	68~83	57~76	70(55~73)	40~50	43
베노트 시추기계	79~85	66~74			
스크류 드릴	73~78	63~66			
콘크리트 브레이커	80~92	74~80		40~80	56
콘크리트 펌프카(피스톤)	78~81	72~74			
콘크리트 펌프카(엔진)	73~76	62~67			
폭파(콘크리트 기둥)	98~108	90~97			

표 16. 소음보정표

항목	내용	보정치
충격율	충격의 성분이 있을 경우	+5
관련시간대에 대한 측정소음 발생시간의 백분율	50% 이상	0
	25% 이상 50% 미만	-5
	12.5% 이상 25% 미만	-10
	12.5% 미만	-15
시간별	(낮) 06 : 00~18 : 00	0
	(저녁) 18 : 00~24 : 00	+5
	(밤) 24 : 00~익일 06 : 00	+10
지역별	가. 주거지역	
	1) 주거전용지역, 녹지지역, 의료법에 의한 종합병원 및 교육법에 의한 학교의 부지경계에서 50m 이내의 지역	0
	2) 주거지역, 준주거지역	-5
	3) 상업지역, 준공업지역	-15
	4) 공업지역, 전용공업지역	-20
	나. 산림보전지역, 자연환경보전지역, 관광휴양지역, 취락지역 중 주거지구	0
다. 취락지구 중 주거지구외의 지구, 경지지역, 개발촉진지역, 유보지역	-10	
라. 공업지역	-20	



3.11 기타

3.11.1 광학 변위 측정(3차원 변위 측정기, 3D-PKM)

현재 많이 적용되고 있지는 않으나 장비의 효율성 측면이나 공사 안전관리 측면에서 가치가 있다고 판단되어 발췌 수록한다(원전 : 서울지하철 NATM 적용 터널 설계지침(안)).

(1) 개요

3차원 변위 측정기는 지하굴착시 3차원적 변위를 산정하기 위한 계측이다. 3차원 변위 측정기는 어떤 형태의 터널 굴착 프로젝트에도 사용될 수 있기 때문에 가치있는 도구로서 특히 아주 어려운 지반공학적 건설을 수행할 때에 효과적이다.

3차원 변위 측정기는 주로 터널 굴착동안 계측단면 주변에 위치한 계측점들의 절대 변위를 계측하기 위해 사용된다. 이 방법은 응력 재분포로 야기되는 변위를 연구하는 것을 가능하게 하므로 NATM 공법에서 안전을 담당하는 중요한 구성요소가 될 수 있다.

(2) 계측 원리

터널 라이닝의 3차원 절대변위는 절대 영좌표계(Absolute Zero- Based Coordinate System)에 있는 내공변위 볼트들의 삼각측량(Opto-Trigonometrical Measurement)에 의해 결정된다. 모든 계측단면에 대해 사용자가 변위 계측볼트의 수를 결정할 수 있으며 계측단면간의 거리는 지반조건을 토대로 결정된다.

계측은 전자거리 계측장비를 장착한 고정밀 테오도라이트로 수행된다. 고정 측정대는 필요하지 않으며 1인의 측량사만으로 전 측량을 수행할 수 있다. 3~6개의 정해진 계측점의 위치만을 알고 있으면 된다. 계측순서가 정해져 있는 것이 아니기 때문에 터널 내에서 있을 수 있는 다양한 시각상의 문제점들을 쉽게 대처할 수 있다. 모든 계측자료들은 측량기에 연결되어 있는 자료기록 모듈 속에 기록되어진다. 자료관리, 계산 및 도식화 작업은 소프트웨어가 수행한다.

(3) 계측빈도

① 계측핀(Target) 설치

플라스틱 어댑터를 기준 변위계측 볼트(Standard Convergence Bolts)에 장착시키면 회전이 가능한 계측핀(Target)을 부착시킬 수 있다. 단거리에서는 삼각프리즘(Triple prism)이 사용되지만 15m 이상 되는 거리에서는 저렴한 Bireflex 계측핀(Target)이 사용된다. 크라운부와 하반굴착 후 상반에 설치하는 계측핀(Target)들은 영구적으로 장착시킬 수가 있다. 계측단면간의 거리는 지반조건에 달려있으며 5~30m 사이에서 설치할 수 있다.

② 계측기의 설치위치

테오도라이트는 계측핀(Target)을 계측하기 위해 가장 좋은 시계를 확보할 수 있고

작업진행에 방해를 주지 않는 위치에 설치하여야 한다.

③ 측량

데오도라이트를 정확히 거치하고 시차를 제거한 후 계측핀(Target)에 맞추고 측량기 옆에 장착된 스포트라이트를 계측핀(Target)을 향해 비춘다.

측량은 양방향으로 80m까지 가능하며 주로 터널노선과 시야조건에 달려있다. 계측자료, 즉 거리, 수평각 및 수직각은 기록장치에 입력된다. 부수적인 정보, 즉 날짜 및 시간, 측정번호, 측정유형, 굴착 공정에 관한 정보는 키보드로 입력할 수 있다.

이 정보 중 일부는 기록장치에 의해 자동으로 입력될 수도 있다. 계측정밀도는 ± 2.0 mm 이하이다.

④ 자료전송

컴퓨터로의 자료전송은 인터페이스를 설치하면 가능하다. 자료관리 소프트웨어로 자료전송을 확인하고 추가정보를 계측치와 연계시키고 저장된 자료들을 출력할 수 있다.

⑤ 자료의 분석 및 평가

3차원 변위 측정기 소프트웨어는 계측핀(Target)의 좌표를 터널좌표계로 계산하며 계측점의 초기치와의 차이를 산정하여 출력하여야 한다. 계측핀(Target) 좌표의 정밀도는 계측기 설치좌표의 정확도에 달려있다. 계측기 설치좌표는 3~6개의 고정계측점을 계측함으로써 계산된다. 좌표를 아주 정밀하게 계산하기 위해서는 소프트웨어 필터, 조정알고리즘 및 오차보정기법들이 사용된다.

3차원 변위 측정기 소프트웨어는 자동으로 계측핀(Target)을 식별하고 새로운 초기치를 인식한다. 소프트웨어는 굴절작용과 같은 물리적인 현상으로 비롯되는 대부분의 오차를 감지할 수 있으며 여러 계측간의 잘못된 방위를 나타내어 주고 보정이 가능한 부분은 보정을 수행하여야 한다. 소프트웨어는 자료 저장, 자료 수정, 자료 및 프로그램 전송, 결과의 편집, 요구하는 계측점의 좌표 및 이론상의 굴착선과의 반경방향 거리계산은 물론 관리계측 후 좌표변환을 처리하여야 한다.

⑥ 결과의 출력

계측결과의 평가 및 출력은 IBM-PC 혹은 호환기종으로 가동되는 컴퓨터 프로그램으로 수행하여야 한다. 계측결과는 그래프의 형태로 출력되며 시간 경과에 따른 계측핀(Target)의 변위 양상과 굴착 및 시공공정과의 관계를 보여준다.

⑦ 장점

- 계측에 소요되는 시간이 짧아 작업진행에 지장이 적고 계측단면들의 거리를 짧게 설정하는 것이 가능하므로 변위 진행을 보다 더 자세하게 예측할 수 있으며 과대 변위에 대해 신속히 대처할 수 있음



- 계측점들의 절대변위가 결정되면 두 점간의 어떠한 종류의 상대변위 계산도 가능함
- 초기치 계측이 볼트설치 즉시 가능
- 케이블 및 동력선이 필요하지 않음
- 계측종료 후 1~3시간 내에 최종 결과를 얻을 수 있음
- 추가 계측점에 대해 고도의 정도로 신속한 좌표 계산 가능

3.11.2 레이저 형상 측정기(Tunnel Profiler)

(1) 개요

레이저 형상 측정기는 기존의 테이프식 내공변위 측정기가 대공동인 경우 계측을 위하여 조명시설과 중장비의 동원이 어려운 단점을 해결하고 설계에 설정된 일상계측 및 정밀계측의 많은 단면을 조속한 시간 내에 계측하며 그 자료를 시각적으로 판단하기 쉬운 그림화 형식으로 전산관리하기 위한 방안으로 채택되고 있다. 현재 건설 및 공학분야에 사용되고 있는 레이저광선은 그 제원에 따라 대개 HeliumNeon 레이저와 Galium Arsenide 레이저로 대별된다. Helium Neon 레이저는 일명 Continuous Wave 또는 줄여서 CW 레이저라고도 하며, 레이저광선이 지속적으로 투사되어 시각으로 분별할 수 있으며 방향설정 및 광선투사에 따른 피사체의 편차조사, 또는 목표물의 조준이 용이하기 때문에 토목현장에서 널리 쓰이는 형식이다.

Galium Arsenide 레이저는 거의 모든 Pulsed 레이저에 쓰이고 있으며 레이저광선이 일정의 순간적인 짧은 시간 간격으로 끊어져 투사되며 시각적으로 구별할 수가 없다. 이 종류의 레이저광선은 그 출력에 따라 등급이 구분되며 때로 광선이 강한 경우는 시각보호 장치가 필요하다. 주로 군관계의 장비에 많이 적용되고 있는 형식 이다.

(2) 적용가능 범위

- 내공변위의 측정(인버트 포함)
- 터널 내공의 용적계산과 설계상의 동공과 실제 비교
- 여굴 및 미발파지점 그림화 비교
- 숏크리트, 라이닝 등 각 지보공의 시공두께 그림화, 시공효과 계측

4. 계측결과의 분석 및 활용계획

4.1 계측결과의 분석방법

계측결과에 대한 분석은 계측결과를 통하여 터널의 안정성을 파악하고 필요한 경우 시공에 Feed Back 하여 보다 경제적이고 안전한 터널 시공을 도모하는 과정이다. 현재 대부분의 계측결과 분석은 단편적인 수치의 의미 파악 정도에 그치고 있으나 계측결과 분석의 원칙은 계측결과로부터 터널의 지보재 및 주변 지반에서 발생하는 응력

-변형을 거동에 대한 종합적 예측을 떠올리는 것이다. 따라서 검토 가능한 모든 자료 및 관리 기준을 참고하여야 하며, 설계 및 시공 사항도 충분히 숙지하여야 한다.

4.2 계측결과의 정리

계측결과는 일상의 시공관리와 장래의 공사 계획에 반영할 자료활용 등을 고려하여 정리, 기록하고 보관하여야 한다. 관찰·계측이 완료되면 그 결과는 즉시 도표와 그림화 작업을 수행하여 경향을 파악하고 이상이 있을 시는 즉시 재측정하여야 한다. 결과정리는 터널내 관찰기록, 측정결과의 시간변화, 막장부와의 거리 및 지보시공시기를 명기하여 계측결과와 지반상황이 상호 비교되도록 모든 계측관련 자료를 정리하여야 한다. 계측결과는 일상 시공관리의 지표로 설계, 시공에 반영시키는 것이 기본으로 이를 위해서는 원칙적으로 측정당일에 정리하여 필요한 판단을 내려야 한다.

표 17. 계측결과 판단사항

구분	계측항목	판단사항	계측구분
계측	내공변위	변위량, 변위속도, 변위수렴상황 등 단면의 변형상태에 의해 ① 주변원지반의 안정성 ② 1차지보의 설계, 시공의 타당성 ③ 2차 라이닝의 타설시기 등 판단	일상
	천단침하	터널천단의 절대침하량을 감시하고 단면의 변형상태를 알며 터널 천단의 안정성 판단	일상
	지중변위	터널주변의 느슨한 영역 변위량을 알고 록볼트의 길이 및 설계 시행의 타당성 판단	정밀
	록볼트 축력	록볼트 내의 응력을 알 수 있고 록볼트의 적정길이와 추가 설치에 대한 판단	정밀
	록볼트 인발시험	록볼트의 인발내력에서 적정 정착방법, 적정 록볼트량 등 판단	일상
	라이닝 응력	1차 라이닝의 배면토압, 슛크리트 내 응력	정밀
	지표 및 지중 침하	터널 굴착에 의한 지표에의 영향과 침하 방지대책의 효과 판정, 터널에 작용하는 하중 범위의 추정	정밀
	강지보공 응력	강지보공 응력에 의해 지보공의 크기 및 필요성 판단 강지보공에 작용하는 토압크기, 방향, 축압계수(K0) 추정	-
	암부풀음	인버트 폐합 콘크리트라이닝의 필요성 효과 판정	-

시공실적 총괄표를 위한 관찰·계측의 정리항목은 다음과 같다.



4.2.1 기록항목

(1) 터널 시공 기록의 총괄표

주로 터널 전체에 대한 정보를 지질 종단면과 관련시켜 정리한다.

(2) 터널내 막장부 관찰기록

측정공구, 막장부보호 일시, 작성자를 기록하고 다음의 상황들을 포함시킨 데이터 기록지로 정리한다. 막장부 관찰기록은 표준 양식에 기록하며 필요에 따라 막장부사진을 첨가하는 것도 효과적이다.

- 지층, 암석분포, 지층의 주향 및 경사
- 암석강도, RQD, 절리간격 및 상태, 지하수조건
- 단층의 위치, 주향, 경사, 파쇄상태
- 붕괴위치 및 형태
- 터널과 절리면의 범위와 관계

(3) 기시공구간의 관찰기록

- 록볼트 : 시공 위치, 방향, 설치상태, 변형
- 숏크리트 : 두께, 균열, 누수상태
- 강지보공 : 변형, 좌굴, 지반매입 및 상태

(4) 지표면 침하기록

공구, 설치번호, 위치, 측정치를 기록하고 측정일자, 경과일수, 막장이격거리(상반, 하반), 초기치, 금회침하, 누계침하를 도표화한 데이터 기록지로 정리한다. “시간(경과일수)-변위”와 “막장이격거리-변위”를 그래프화하여 적절한 관리가 되도록 한다.

(5) 내공변위 및 천단침하 기록

데이터 기록지로 정리하며 그 결과를 매일 그래프화하여 “시간(경과일)-변위”, “막장이격거리-변위”를 그래프화하여 적절한 관리가 되도록 하여야 한다.

(6) 록볼트 인발시험기록

인발시험 위치도와 함께 “하중-변위”곡선을 그려서 정리하여야 한다.

(7) 지중변위 측정기록

데이터 기록지로 정리하며 그 결과를 시간경과와 막장이격거리에 따른 지중변위 그래프와 지중변위의 심도별 그래프 등으로 정리하여 굴착에 따른 터널 주변지반의 거동을 파악하여야 한다.

(8) 록볼트 축력측정 기록

데이터 기록지로 측정된 결과를 수집하고 축력의 시간경과와 심도별 분포도를 각각 그래프로 작성하여 정리하여야 한다.

(9) 숏크리트 응력측정 기록

데이터 기록지로 기록, 응력의 시간경과 변화와 막장진행에 따른 응력변화 그래프를

각각 작성하여 정리하여야 한다.

(10) 지중침하 측정기록

데이터 기록지로 기록, 시간경과 변화와 막장이격거리에 따른 지중침하 그래프를 각각 작성하고 심도별 침하분포 그래프로 표시하여 정리하여야 한다.

(11) 수평변위 측정

터널굴진에 따른 지중의 수평방향 변위를 측정일별로 도표와 그림으로 정리하여야 한다.

4.2.2 계측 측정결과에 대한 변화기록

내공변위 측정 등 경시변화를 기록하는 양식은 다음과 같은 항목이 기입되어야 한다.

- (1) 터널명, 터널길이, 토피
- (2) 막장부 지질
- (3) 굴착일, 시, 분 및 초기치 측정 일, 시, 분
- (4) 계측항목
- (5) 계기 명칭
- (6) 측정 기록 표시 범례
- (7) 계기 배치도
- (8) 지보패턴(숏크리트 두께, 록볼트 길이, 본수, 강지보재, 변형 여유량, 1굴진 길이 등)
- (9) 날짜 기록, 진행, 막장부와의 거리
- (10) 막장부 통과, 인버트 굴착, 록볼트 추가설치 등에 관한 특기 사항

계측결과의 정리는 원칙적으로 다음에 나타난 내용을 갖출 필요가 있으며 필요에 따라 공사관계자가 공람할 수 있어야 한다.

- ① 데이터 기록지에 의한 측정기록
- ② 변위량 경시변화 그래프
- ③ 변위속도 경시변화 그래프
- ④ 막장진행에 따른 변위량 변화 그래프

위의 그래프에는 굴착, 숏크리트, 록볼트, 강재지보공 등의 시공시기를 함께 기록하여야 한다. 내공변위데이터의 표시는 변위량 경시변화 그래프, 막장진행에 따른 변위량 변화 그래프가 가장 기본이 되는 것이지만 변위의 수렴상황을 판정하는 데에 효과적인 것을 대수눈금으로 표시해도 좋다.

이때 변위속도의 변화와 막장부와의 위치관계가 쉽게 나타나도록 작성하고 변위량 경시변화 그래프가 있는 경우에는 (ㄷ), (ㄹ)의 그래프를 반드시 별도로 정리하지 않아도 좋다.



4.2.3 계측 결과의 시공 반영을 위한 역해석(Back Analysis)

계측 결과로부터 터널 시공에 대한 종합적인 예측을 떠올리는데 있어 가장 유용한 방법 중의 하나가 역해석이다. 그러나 역해석은 일반적으로 그 과정이 복잡하고 난이도가 높은 경우가 많으며 터널 내에서의 계측자료가 초기 변형의 반영에 어려움이 있어 널리 적용되고 있지 못하다.

(1) 역해석의 개념

일반적으로 구조물을 설계할 경우 우선 하중, 재료 특성 등의 설계조건을 설정하여야 한다. 이 설계조건 하에서 채택된 구조 모델이 어떤 거동을 하는가를 해석하여 변위, 변형률, 응력의 관점으로부터 설계의 적정성을 평가하여야 한다. 이와 같은 해석의 진행방법을 순해석이라고 한다. 한편, 계측된 실제 구조물의 변위, 변형률, 응력 등에 의거해서 채택된 구조 모델에 대해서 불명확하던 설계조건을 구하는 해석을 일반적으로 역해석이라고 한다.

터널을 비롯한 지하 구조물 설계시 조사 결과의 보정들을 통하여 입력자료를 가급적 정확히 구하려는 노력에도 불구하고 해석 결과와 실제 거동에는 차이가 있다. 이는 실험실 및 현장 시험에서 측정된 암반의 특성치와 초기 지압 등이 주로 측정지반 주변의 국부적인 영역에 대한 대표값이고 암반에 발달한 절리, 균열 등 불연속면의 영향과 암반의 불균질성, 이방성 등 암반 고유의 특성에서 기인하는 영향을 정확히 고려할 수 없기 때문이다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 현장계측 결과를 이용해서 실시하는 역해석법은 암반상태, 시공상태, 기타 영향인자를 포괄한 해석 모델의 입력정수를 산정할 수 있게 한다. 이것에 의해 얻어지는 입력정수는 결코 암반의 참값은 아니지만 같은 지반조건 하에서 계속해서 시공이 실시되는 경우에 암반 거동을 예측한다든지 또는, 시공된 지점의 암반의 안정상태를 평가하기 위해서는 유리하다.

(2) 역해석 기법

현재 이용되는 역해석 기법으로는 해석적 방법과 수치해석적 방법을 이용한 직접법(Direct Calibration Approach)과 역순법(Inverse Approach)이 많이 연구되어 왔고 그 외에 통계학적 방법인 Bayesian 방법과 Kalman Filter 방법이 연구되고 있다. 직접법은 순해석 방법을 이용하는 것으로, 입력 자료를 변경하면서 해석을 반복하여 해석 결과와 계측치간의 오차가 최소화될 때까지 수행하는 방법이다. 따라서 직접법은 수학적인 바탕 없이도 기존의 유한요소 프로그램에 수정을 가하여 사용할 수 있고 적용성이 광범위하여 비선형 문제에도 적용이 가능하나, 미지변수를 변화시키면서 반복계산에 의해 최적치를 구하여야 하므로 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다.

한편, 역순법은 Kavanagh가 구조 문제를 풀기 위하여 제안한 방법을 변형시킨 것으로 일반적인 응력 해석방법의 역으로, 해석시 사용된 입력 자료들이 미지변수가 되고

해석 전 미지변수인 변위 및 응력들을 입력자료로 이용하는 방법이다.

따라서 구성방정식을 역으로 하여 전산프로그램을 다시 만들어야 하므로 프로그램을 작성하는데 많은 시간을 소요하여야 하나 일단 프로그램이 완성되면 계산시간을 절약할 수 있다. 역순법은 탄성 문제에만 적용이 가능한 제한성을 가지고 있다.

직접법이나 역순법에서는 계측에서 발생하는 측정 오차를 고려할 수는 없다. 이를 보완하기 위하여 통계를 이용한 Bayesian 기법과 Kalman Filter 기법이 연구되고있다. 그러나 각 방법에 따라 장단점 및 연구 결과들도 상이하여 아직까지 암반의 특성을 충분히 고려한 역해석 기법이 확립되지 않은 실정이다.

(3) 설계, 계측, 역해석의 상관 관계

일반 구조물 설계시에는 필요한 입력자료들을 거의 알 수 있기 때문에 구조물의 응력 분포 및 거동을 비교적 정확히 예측할 수 있으나 터널 설계시에는 많은 조건들을 가정하여 수행되기 때문에 결과에 대한 높은 신뢰도를 부여하기가 어렵다. 뿐만 아니라 시공 중 시공순서와 지보패턴 변경으로 인하여 해석시 결과와는 상이한 지반거동 및 응력분포가 발생할 수 있기 때문에 설계의 적합성 여부를 평가하기란 더욱 쉬운 일이 아니다.

따라서 설계시의 가정 조건들을 확인하고 설계의 적정성 여부를 분석하고 평가하는 일련의 작업이 필요하다. 이러한 작업들을 역해석이라 하며 이는 계측으로부터 출발한다.

과다 설계의 경우는 해석모델 및 입력자료에 대한 가정조건들을 조정함으로써 경제적인 설계를 유도할 수 있다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 계측 결과에 대한 신뢰도가 떨어질 경우 역해석을 통해 구한 자료들은 무용지물이 될 수 있기 때문에 정확한 계측이 될 수 있도록 최선을 기울여야 한다.

4.2.4 계측결과의 활용계획

계측결과는 신속하게 설계·시공에 반영시켜 공사의 안전성, 경제성을 확보하도록 노력하여야 한다.

(1) 기본적인 고려 사항

계측결과를 시공관리 목적으로 활용하는 순서는 <그림 9>와 같다.

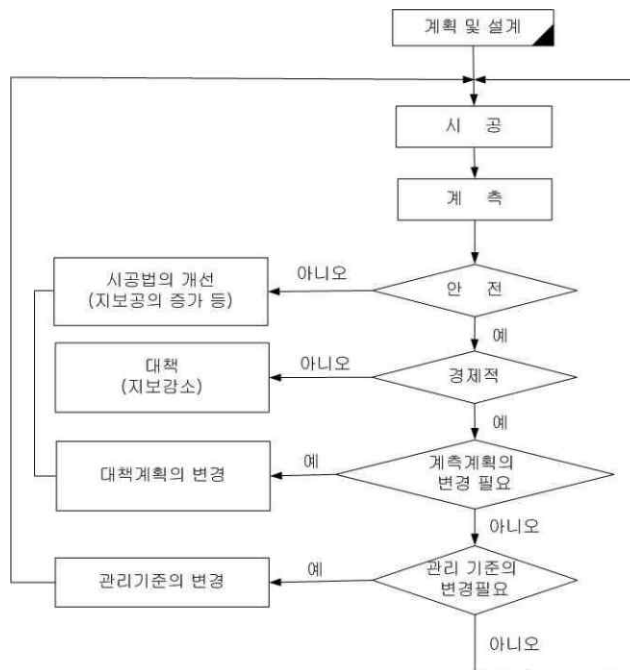


그림 9. 계측결과를 시공관리에 활용하는 순서

계측결과를 설계, 시공에 반영시키는 목적은 첫째, 시공의 안전성을 확인하고 둘째, 경제성을 확보하는데 있다. 이를 위해서는 계측 결과를 신속하고 정확하게 반영시키지 않으면 안된다. 신속한 반영을 위해서는 터널 전장에 대해 실시하는 계측 A항목(터널 내 관찰 조사, 내공변위 측정, 천단침하 측정)을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 토피가 얇은 터널에서는 지표 침하 측정을 상기 항목에 부가시킨다. 물론 정확하게 설계·시공에 반영시키기 위해서는 계측 A항목을 숙지하고 다른 항목의 계측 결과도 병행하면서 지반조건, 설계(지보형태), 시공법 등을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

<그림 9>에 나타난 관리 기준과 이에 대응하는 대책(설계, 시공법의 수정)은 이론 해석, 수치해석 또는 유사 조건하에서 시공된 터널 실적 등을 참고하여 계획단계에서 준비하는 것이 바람직하다. 그러나 계획단계에 설정된 관리 기준은 시공의 초기단계의 표준이기 때문에 시공 중에는 여러 가지 단면에 대한 지반조건, 계측치의 경시변화, 계측 항목간의 상호관계 등으로부터 지반공학적인 검토를 추가하여 종합적으로 판단하는 것이 중요하다. 아울러 계측결과에 기초하여 계획단계에서의 관리 기준 자체나 계측 계획을 개선시키는 것이 바람직하다.

(2) 계측기술과 터널공학 관점에서 평가

① 막장부관찰 및 기시공 구간 관찰

지반구분 및 암반분류의 재평가, 지반상황과 지반거동의 상관관계, 시공의 적합성 평가, 금후 지반의 상황 추정, 안정성 점검

② 내공변위 및 천단침하 평가

굴착방법, 시공순서 및 1회굴착깊이, 록볼트 길이 및 설치간격, 숏크리트 두께 및 종류, 강지보공 형상 및 방법, 복공시간 및 변형여유량, 인버트 폐합 콘크리트라이닝의 필요성과 효과

③ 지표침하 및 지중변위평가

토폴이 얇은 경우 위험방지 효과 점검, 터널 주변지반의 이완영역 및 지반거동, 록볼트길이의 타당성, 지중변위 분포

④ 지보재의 평가(록볼트, 숏크리트, 강지보공, 라이닝)

종류와 재료검토, 록볼트는 길이, 위치, 분수, 정착방법의 타당성, 숏크리트는 두께와 시공시기, 단면폐합 효과 등

⑤ 주변영향평가

지표면 침하 영향범위, 주변 구조물의 경사 및 안정성 평가, 지하수 변동 및 영향분석

(3) 설계·시공에 반영

관리기준은 지반의 거동상태, 인접구조물의 안전한계와 암반역학적인 조건에 따라 결정되므로 기준적인 수치를 정확히 제기하기가 어렵기 때문에 이론 해석 및 수치해석, 혹은 유사조건하의 시공실적을 참고하여 초기 시공실적을 토대로 관리기준을 수시로 수정해 가는 방법이 합리적이고 실질적이다.

시공 중 기존설계와 계측결과의 차이가 클 경우, 실제 막장부의 관찰 결과를 경험적이고 정량적인 평가 후 시공전 설계의 입력자료를 수정하고 보완하여 재설계를 시도하여야 한다. 또한 시공 중 변화된 지반의 강도 특성치 등 조건변화를 고려하기 위하여 필요한 별도의 지반시험을 수행하고 수치해석의 입력자료를 사용하여야 한다.

5. 계기의 유지관리

계기의 경우, 그 형태에 따라 유지관리 방법에 차이가 있으나 일반적으로 유지관리 사항으로는 다음과 같은 것을 들 수 있으며 계측 수행자는 이를 숙지한 후 시행하여야 한다.

- 제조업자가 제공한 매뉴얼로부터 일상 유지관리 절차계획을 수립하여야 한다.
- 터미널은 오염과 습기로부터 보호한다. 현장여건에 따라 보호방책을 설치하여야 한다.
- 설치된 기기와 측정장치의 보정상태를 조사하여야 한다.
- 배터리의 규칙적인 조사를 통해 충전 및 교체를 적기에 실시하고 기기의 일상 점검을 통해 기기오염 및 고장시 즉각 보수, 교체하여야 한다.



- 제조업자가 제공하는 고장 수리 지침에는 파괴 형상, 조짐, 수리 등에 대한 내용이 포함되어 있어야 한다.
- 섬세한 기기의 경우, 운반 및 관리시 충격과 손상 방지를 위해 패드와 같은 충격 완화재를 설치하여야 한다.
- 계측장비 운반시는 무거운 시공장비와의 구별을 위해 눈에 띄는 색깔로 칠을 한 후 시행하는 것이 바람직하다.
- 휴대용 장비의 경우, 청결성과 건조상태를 유지하도록 조치하여야 한다.
- 기계식 등의 특정한 측정 장비는 주기적으로 기름칠을 하고 전자식 측정장치의 경우, 청결하고 건조한 상태를 유지시키며 주기적으로 측정 장치 상자의 내부를 건조시켜야 한다.

6. 장기계측 계획의 수립

일반적으로 터널의 시공이 완료되면 지반거동 및 지하수 등에 의한 영향이 어떻게 변화하고 있는지를 육안으로 알아내기가 매우 힘들게 된다. 따라서 시공시 설치한 계측시스템의 일부가 시공이 완료된 이후에도 지속적으로 그 역할을 수행할 수 있도록 계획하는 것이 바람직하다. 이 경우에는 지반조건과 지하수 조건 등이 열악한 지역이나 인접 구조물에 영향을 미칠 가능성이 있는 구간 등에 우선적으로 선택하여 관리하는 것이 좋다. 이렇게 시공시와 유지관리시의 계측 시스템을 연계하는 방안이 최상이지만 이것이 여의치 않을 경우에는 시공후 별도의 안전관리 차원의 장기계측(유지관리 계측) 계획을 수립하는 것이 바람직하다. 장기계측 항목으로는 지하수의 거동특성, 지보재에 작용하는 응력 및 변위상태를 감시할 수 있는 체계적이고 지속가능한 장기계측 시스템을 수립하여야 한다.

6.1 장기계측의 목적

유지관리 계측은 구조물의 안전관리와 안전진단을 위해 필요한 각종 정량화된 현장 정보를 지속적으로 얻을 수 있는 현장계측방법이다. 이러한 계측은 터널구조물의 시공 중 계측뿐만 아니라 구조물 완공후에도 지속적으로 수행됨으로써 시간경과와 환경변화에 따른 구조물의 이상 및 변화추이를 파악할 수 있게 하며, 결과 분석단계를 거쳐 구조물의 안전유무를 판단할 수 있다.

터널시공이 인접 구조물에 영향을 미칠 가능성이 높은 경우, 특수한 구조의 터널인 경우 산사태나 지반거동의 가능성이 있는 경우, 지하수위와 지질학적인 문제가 예상되는 지역과 같이 터널완공 후에 터널과 터널주변에 위대한 영향이 예상되는 경우에는 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 장기 계측계획을 수립하여야 한다.

6.2 계측시스템 구축방안

계측시스템은 모든 계측값을 정확하게 측정·파악할 수 있어야 하며, 수집된 자료는 기술자가 분석하기에 용이하도록 체계있게 정리·축적되어야 한다.

계측시스템 구축을 위한 계획은 계측대상에 대한 공사개요 및 규모, 지반 및 환경조건, 구조물특성, 설계특성, 시공특성 등을 사전파악한 후 진행되어야 한다.

장기계측의 시스템구축과 계측방법으로는 다음과 같다.

6.2.1 수동 및 자동계측

계측방법은 측정방식에 따라 수동 및 자동계측으로 구분되며, 수동계측은 계측요원이 쉽게 접근할 수 있는 경우나 계측빈도에 비해 자동계측하기에 비용투자가 많은 경우 또는 육안에 의한 확인이 요구되는 경우에 적용하는 방식으로 기술자가 직접 센서 위치 또는 현장에서 휴대용 장비를 이용하여 필요시마다 계측후 그 결과를 전산기에 입력하여 처리하여야 한다. 자동계측은 계측빈도가 짧으며 실시간 계측이 요구되거나 수동으로 주기적으로 빠짐없이 측정하기에는 많은 시간과 경비가 소요되며 측정위치까지 접근이 용이하지 않은 경우에 적용하는 방식으로 센서-계측기-전산기로의 온라인 신호체계로 구성되어 전체 정보처리과정이 자동으로 수행되는방식이다.

6.2.2 정적 및 동적 자동계측

장기적인 계측시스템 구축에 있어서 계측대상에 인위적인 충격이 필요하거나 측정수가 적은 경우 외에는 자동계측이 바람직하며, 이러한 자동계측 시스템의 구축은 주기적인 측정의 편리성 이외에도 데이터의 획득, 분류 및 보관에서 발생할 수 있는 문제를 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 자동계측에서는 정적 자동계측과 동적 자동계측으로 구분되며, 공히 온라인 신호전달 체계하에서 스스로 모니터링하고, 평가하여 변화되는 상황에서도 예정된 자기기능을 지능적으로 수행할 수 있는 기능을 제공한다. 정적 자동계측시스템은 측정 및 제어장치, 기억 장치, 신호변환 장치, 멀티플렉싱 장치로 구성되며, 동적 자동계측시스템은 다수의 센서출력을 동시에 측정이 가능하도록 채널 수와 동일한 수의 A/D 변환장치를 탑재하고 있고 측정 및 제어장치, 기억장치, 신호변환장치와 계측대상에 따라 필요시 정확한 시각 측정을 위한 GPS장치로 구성된다.

6.2.3 통합계측시스템

장기계측을 목표로 여러종류의 센서로부터 계측시스템을 구축할 때, 자동계측을 원칙으로 시스템을 구성하고, 여러종류의 센서로부터 계측자료를 통합하여 수집, 전송, 처리하는 체계가 필요하며 이를 “통합계측시스템”이라 한다. 통합계측시스템은 센서의 데이터를 수집, 처리, 전송하는 현장의 데이터로거와 계측자료를 취합하여 분석, 저장, 관리하는 계측사무소의 정보시스템이 있으며 현장과 계측사무소간의 원거리 데이터 전송을 위한 전송망체계로 구성된다. 통신망 구축 방안은 장기계측시스템의 특



성에 맞게 다음중 하나를 선택할 수 있으며 특별한 경우는 별도의 시스템을 선정하여 구성할 수도 있다.

- 모뎀을 이용한 통신망 구성
- 광모뎀 이용한 광통신망 구성
- Hub를 이용한 LAN통신망 구성

7. 전 생애주기 계측 계획

7.1 계측기 선정

(1) 계측기의 선정 및 배치기준

표 18. 터널 계측기 선정

구분	기본 계측기	선택 계측기	비고
대상 터널	전단면 내공변위계	간극수압계, 라이닝 응력계, 철근응력계	지중변위계, 지표침하계 등의 계측기는 지반조건, 주변환경 등을 고려하여 설계자, 발주자, 운영기관에서 필요하다고 판단되는 계측 항목 추가 또는 생략 가능

표 19. 터널 계측 목적에 따른 계측기 배치 기준

계측기명	계측 목적	배치 기준	비고
전단면 내공변위계	터널 내공변형 발생 여부를 계측하여 구조물 안전성을 파악	<ul style="list-style-type: none"> · 공사 중 함몰 또는 붕괴가 발생한 지역 · 지보재 재시공이 이루어지거나 지보재 추가 설치 구간 · 성토/절토가 크게 변화하는 구간 · 장기 변형이 예측되는 지반 · 지반침하가 예측되거나 이력이 있는 구간 · 공사 중 터널 내부의 궤도 및 노반의 침하, 융기량이 기준치를 초과한 이력이 있는 구간 	지반조건, 주변환경 등을 고려하여 위치 조정 및 추가 배치 가능
간극수압계	터널 라이닝에 작용하는 수압을 측정하여 지반안전성 확인	<ul style="list-style-type: none"> · 수압에 따른 라이닝의 안정성 확인이 필요한 구간 · 관리기준치 초과 이력이 있는 단면에 설치 	
라이닝응력계	라이닝에 작용하는 응력(토압, 수압, 지중변위)을 확인하여 구조안전성 확인	<ul style="list-style-type: none"> · 콘크리트 라이닝 타설 이전에 철근 조립 후 설치 · 관리기준치 초과 이력이 있는 단면에 설치 	
철근응력계	라이닝 철근에 발생하는 응력 변화를 계측하여 내력 확보 여부 확인	<ul style="list-style-type: none"> · 구조적 응력이 집중될 것으로 예상되는 구간 · 지반조건 변화가 크거나 상재하중 변화가 예상되는 구간 	

(2) 계측기 사양

표 20. 터널 계측 항목에 따른 사양 및 측정 빈도

구분	계측기	환경조건	최소사양	측정빈도 (측정방식)	비고
터널	전단면 내공변위계	내구성: (매설형) IP68 (그 외 환경) IP67	(경사값 기준) · 측정범위 : ± 5 deg 이내 · 정밀도 : 0.001 deg 이하 또는 (변위값 기준) · 측정범위 : ± 50 mm 이내 · 정밀도 : 0.1 mm 이하	10분 (자동계측)	변위값의 측정범위는 일반적 내공변위 관리기준치의 5배이며 정밀도는 관리기준치의 1/100 수준임 경사값 기준은 변위값 기준을 근거로 터널 반경을 고려하여 측정범위와 정밀도를 산정함.
	간극수압계	작동온도: (태양광 노출형) -40 ~ 80°C	· 측정범위 : 20~700kPa (매설심도 및 예상압력을 고려하여 결정) · 분해능 : 0.1% FS 이하 · 정확도 : 0.5% FS 이하	10분 (자동계측)	급경사지 계측기기 성능검사 기준에 관한 규정(행정안전부) 준용
	라이닝응력계	(그 외 환경) -30 ~ 70°C	· 측정범위 : $\pm 5,000 \mu\epsilon$ 이내 · 정밀도 : $1\mu\epsilon$ 이하	10분 (자동계측)	콘크리트의 항복 변형률 범위(약 3,000 $\mu\epsilon$ 내외)를 감안하여 측정범위를 설정
	철근응력계		· 측정범위 : $\pm 5,000 \mu\epsilon$ 이내 · 정밀도 : $1\mu\epsilon$ 이하	10분 (자동계측)	철근의 항복 변형률 범위(약 2,500 $\mu\epsilon$ 내외)를 감안하여 측정범위를 설정

※ 측정 빈도는 운영 과정에서 현장 여건 및 운영 조건을 고려하여 조정할 수 있다.

7.2 계측기 통신 및 데이터 표준화

KR C-02050 계측 해설5 “2. 계측기 통신 및 데이터 표준화”를 참고한다.



RECORD HISTORY

- Rev.0('24.06.04) 상위기준(KDS 등)과 체계일치, 현행화 등 시행을 위한 건설기준 고도화
용역 검토사항 등을 반영한 KR CODE 체계 개편 및 개정(심사기준처-715호,
'24.06.04) * 철도계획 계측(KR C-02050)의 터널 내용을 분야별 코드를 신설하여 이관
- Rev.1('26.03.09) 「철도구조물 유지관리를 위한 공사중 계측기 설치 및 관리기준 수립 연구
용역」 결과 반영(심사기준처-680, '26.03.03)