

KR C-02050

Rev.2, ? January 2014

# 계 측

2014. 1. ?



한국철도시설공단



## 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. 용어의 정의 .....	1
2. 꺾기 비탈면 계측관리 .....	3
2.1 비탈면 안정성 계측 .....	3
3. 연약지반 .....	3
4. 흙막이 구조물 계측 .....	4
4.1 계측의 목적 및 계획 .....	4
4.2 계측의 위치선정 및 빈도 .....	4
4.3 계측의 결과 활용 .....	4
5. 터널계측 .....	5
 해설 1. 토사 비탈면 계측 .....	8
해설 2. 암반 비탈면의 계측계획 .....	9
해설 3. 연약지반 계측관리 .....	10
1. 현장계측 .....	10
2. 침하관리 .....	13
3. 안정관리 .....	15
해설 4. 흙막이구조물 계측관리 .....	20
1. 계측의 목적 및 계획 .....	20
1.1 계측목적 .....	20
1.2 계측계획 .....	20
1.3 계측항목 선정 .....	20
1.4 계측시스템의 선정 .....	21
2. 계측의 위치선정 및 빈도 .....	22
2.1 계측위치 선정 .....	22
2.2 계측빈도 .....	22
3. 계측의 결과 활용 .....	23
해설 5. 터널계측 .....	26
1. 계측일반 .....	26
1.1 계측의 역할 .....	26
1.2 계측의 분류 .....	26



2. 계측계획	28
2.1 계측계획의 수립	28
2.2 계측항목의 선정	30
2.3 계측기기의 선정	30
2.4 계측기의 배치	31
2.5 계측의 측정빈도 결정	33
2.6 계측관리 기준치설정	35
2.7 터널계측 관리기준 단계별 대응체계	38
3. 계측시행	38
3.1 지표 및 지중침하 측정	38
3.2 내공변위 측정	39
3.3 천단침하 측정	40
3.4 록볼트 인발시험	41
3.5 지중변위측정	41
3.6 지중 수평변위 측정	42
3.7 록볼트 축력측정	43
3.8 숏크리트 응력측정	43
3.9 터널내 탄성과 속도 측정	44
3.10 진동·소음 측정	44
3.11 기타	48
4. 계측결과의 분석 및 활용계획	50
4.1 계측결과의 분석방법	50
4.2 계측결과의 정리	51
5. 계기의 유지관리	57
6. 장기계측 계획의 수립	58
6.1 장기계측의 목적	58
6.2 계측시스템 구축방안	58
RECORD HISTORY	60

## 1. 용어의 정의

- (1) 비탈끝 : 비탈면의 아래 쪽 끝부분
- (2) 비탈면 : 지반의 경사진 면을 말하며 형성 기원에 따라 쌓기 또는 깎기로 만들어진 인공비탈면과 원래 지형이 경사진 자연비탈면으로 구분
- (3) 비탈어깨 : 비탈면의 최상부
- (4) 상부노반 : 시공기면으로부터 일정한 깊이(고속철도 3.0m, 일반철도 1.5m)
- (5) 소단 : 비탈면의 점검 및 유지관리를 위하여 비탈면 가운데 일정한 높이 간격으로 설치하는 수평단
- (6) 시공기면 : 철도노반 마무리면상 철도중심선의 연직방향 위치로, 일반적으로 설계도면에서 높이 기준면
- (7) 원지반 : 원래의 흐트러지지 않은 자연지반
- (8) 땅깎기 : 원지반면을 제거하여 확정된 선형, 기울기 및 치수나 공사시방서의 규정에 부합되도록 땅을 깎아 시공기면을 형성하는 작업
- (9) 땅깎기 비탈면 : 땅깎기에 의해 조성된 비탈면
- (10) 절리 : 갈라진 틈, 암석에서 볼 수 있는 좀 규칙적인 틈
- (11) 층리 : 퇴적암을 이루는 퇴적물의 겹쳐진 상태
- (12) 클리노미터 : 경사 측정기구, 경사계 또는 경사의라고도 함
- (13) 간극수압 : 흙의 간극 속에 존재하는 물의 압력
- (14) 관성력 : 운동하는 물체에 작용하는 힘으로 크기가 질량에 가속도를 곱한 것과 같고 방향이 가속도와 반대되는 힘
- (15) 단주(short column) : 세장비가 작아(강재기둥인 경우 약 100 이하) 좌굴이 발생하기 전에 압축응력이 허용응력을 초과하게 되는 기둥
- (16) 보일링(boiling) : 터파기 바닥면의 흙이 모래지반인 경우 상향의 침투수압에 의한 동수경사가 모래지반의 한계동수 경사보다 크게 되면 모래입자 사이의 유효응력이 상실되어 분사현상이 발생하는 것
- (17) 수동토압 : 흙막이벽이 횡방향 압력으로 흙을 뒤흔든 흙 쪽으로 밀 때 흙이 압축을 받아 파괴상태에 이를 때의 토압
- (18) 세장비 : 압축부재에서 부재의 길이를 단면회전반경으로 나눈 값으로 일반적으로 이 값이 100 이상이면 장주, 그 이하이면 단주로 구분
- (19) 엄지말뚝 : 흙막이벽 시공시에 수평나무뿔을 설치할 수 있도록 일정간격으로 설치하여 벽체를 형성할 수 있게 사용되는 H형강 또는 그와 비슷한 기능을 하는 부재
- (20) 임계파괴면 : 벽체가 움직여서 횡방향으로 팽창되거나 압축되어 파괴상태에 이를 때의 파괴면
- (21) 임계활동면 : 비탈면에서 활동파괴가 발생할 때에 최소안전율을 가지는 때의 파괴면



- (22) 양압력 : 중력방향의 반대방향으로 작용하는 연직성분의 수압
- (23) 정지토압 : 벽체의 횡이동이 전혀 없거나 있더라도 극히 적은 상태의 토압
- (24) 주동토압 : 흙막이벽이 횡방향 압력에 의해 뒷채움 흙 외측으로 변위가 발생하여 흙이 횡방향으로 팽창되어 소성극한상태에 이를 때의 횡토압
- (25) 측방유동 : 연약한 지반에서 쌓기 등의 재하하중에 의해 지반이 측방으로 변위 하는 것
- (26) 흙막이 구조물 : 흙막이벽, 옹벽 등 이에 준하는 구조물의 총칭
- (27) 흙막이벽 : 깎기 또는 쌓기에 의해 지지되면서, 토압, 수압 등 외력에 대하여 안정을 유지하는 구조물
- (28) 히빙 : 연약한 점성토 지반에서 터파기 외측의 흙의 중량으로 인하여 터파기된 저면이 부풀어 오르는 현상
- (29) 파이핑 : 흙막이벽의 모래지반 굴착시 배면의 수위가 높아지면 굴착저면에 상향의 침투류가 발생되고 유효중량보다 커지게 되면 보일링이 일어나 발전되어 물의 통로가 생기면서 세굴되어 가는 과정
- (30) 계측 : 터널굴착에 따른 주변지반, 주변구조물 및 각 지보재의 변위 및 응력의 변화를 측정하는 방법 또는 그 행위
- (31) 내공변위 : 터널굴착으로 발생하는 터널 내공형상의 변화를 말하며 통상 내공단면의 축소량을 양(+)의 값
- (32) 일상계측 : 일상적인 시공관리를 위해 실시하는 계측으로서 지표침하, 천단침하, 내공변위 측정 등이 포함된 계측
- (33) 정밀계측 : 정밀한 지반거동 측정을 위해 실시하는 계측으로서 주로 종합적인 지반거동 평가와 설계의 개선 등을 목적으로 수행
- (34) 지중변위 : 터널굴착으로 인해 발생하는 굴착면 주변지반의 변위로서 터널 반경방향의 변위
- (35) 지중침하 : 터널을 굴착할 때 인접된 원지반은 침하변위를 일으키며 터널 천장부를 기점으로 하여 지표로 갈수록 각 지층의 침하량은 깊이별로 서로 다르게 나타나는데 이때의 깊이별 침하
- (36) 지표침하 : 터널굴착으로 인하여 지표면이 침하되는 현상
- (37) 천단침하 : 터널 굴착으로 인해 발생하는 터널 천장의 연직방향의 침하를 말하며, 기준점에 대한 하향방향의 절대 침하량을 양(+)의 천단 침하량으로 정의
- (38) 허용편차 : 변형 여유량에 시공상 피할 수 없는 오차를 합한 값

## 2. 꺾기 비탈면 계측관리

### 2.1 비탈면 안정성 계측

- (1) 비탈면의 안정성을 주의 깊게 관찰하기 위해 필요한 개소에 계측을 수행하도록 설계해야 한다.
- (2) 암반 비탈면 변위에 대한 계측방법은 <표 1>과 같은 방법들이 있다.

표 1. 암반 비탈면의 변위에 대한 계측방법

계측방법	비고
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 단순한 기계적 변위측정</li> <li>- 광학적 측정</li> <li>- 측지학적 측정</li> <li>- 익스텐소미터(Extensometer)</li> <li>- 디플렉토미터(Deflectometer)</li> <li>- 기울기 측정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 지표의 암반변위를 기계적으로 직접계측(정밀도 : 0.01mm) : 다이알 게이지(Dial Gage), 크랙 게이지(Crack Gage) 등</li> <li>- 사진 촬영한 것을 일지형식으로 기록 : 광학사진 측정기</li> <li>- 기준선, 거리측량, 삼각법과 사진측량의 방식</li> <li>- 2점 사이의 길이 변화를 측정하여 지중변위 측정(정밀도 : <math>10^{-6}</math>mm) : 기계식, 전기기계식, 전기저항식, 음향식, 레이저 익스텐소미터 등</li> <li>- 시험중 시추공의 휨 변형량을 측정</li> <li>- 기울기 변화의 측정 : 경사계(Tiltmeter) 등</li> </ul>

## 3. 연약지반

- (1) 연약지반 처리공법 설계는 복잡한 토층 및 토질특성을 단순화, 설계 시 추정치와 지반조사 자료의 부족 및 불확실성을 감안하여 시공 중 현장관리 과정에서 계측을 통하여 관리·검토되어야 한다.
- (2) 계측관리를 통하여 다음 단계에서 발생할 수 있는 지반거동을 사전에 파악해야 하며 이를 토대로 당초 설계의 적합성 파악 및 대책이 강구되어야 한다.
- (3) 지반이 복잡하고 주요 구조물이 축조된 경우 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고 많은 계측기를 설치해야 하며, 이때 연약지반의 쌓기 재하시 지반거동을 고려해야 한다.
- (4) 목적에 맞는 계측기를 선정하여 배치해야 하고, 위치 선정은 측정 대상물의 규모나 주변 구조물의 영향 정도를 고려하여 결정해야 하며, 측정 개소의 지형, 지질, 토질 특성 등을 검토하여 판단해야 한다.





## 4. 흠막이 구조물 계측

### 4.1 계측의 목적 및 계획

#### 4.1.1 계측목적

지반을 굴착할 때 발생하는 흠막이 구조물, 주변지반 및 인접구조물의 거동을 파악하여 설계, 시공 및 유지관리에 활용토록하며 흠막이 구조물의 안정성과 경제성을 확보하고, 주변지반 및 인접구조물의 안전을 기한다.

#### 4.1.2 계측계획

- (1) 계측계획은 흠막이 구조물, 인접구조물, 지반, 시공 및 계측기기의 특성 등을 고려하여 계획한다.
- (2) 계측계획 시에는 발생 가능성이 있는 문제를 미리 예측하여 합리적인 지점을 선택, 계측기기를 배치한다.
- (3) 각종 계측기 센서의 작동방식을 가능한 한 같은 형식으로 선정하여 호환성이 양호한 시스템으로 구성한다.
- (4) 계측하고자 하는 현장의 규모, 계측기의 종류 및 수량, 실시간 모니터링의 필요성 등에 따라 수동, 자동 및 수동자동 혼합 시스템을 선택한다.

#### 4.1.3 계측항목 선정

계측항목의 선정은 터파기 규모 혹은 지반조건 등에 따라서 달라지기 때문에 구체적인 계측결과의 활용목적, 평가수법을 명확하게 수립한 후 필요한 계측항목을 선

### 4.2 계측의 위치선정 및 빈도

- (1) 계측위치 선정은 경제성, 시공성을 고려하여 흠막이 구조물 및 배면지반의 거동을 대표할 수 있는 최소한의 위치를 선정하여 최대효과를 얻도록 해야 한다.
- (2) 계측빈도는 굴착의 진행상태와 계측치의 변화속도에 따라 결정하며, 읽음치 간에 급격한 변화가 없도록 빈도를 정하여야 한다. 계측기 설치초기에는 계측치의 정상작동 여부와 초기치 설정을 위하여 빈도를 늘인다.

### 4.3 계측의 결과 활용

- (1) 계측 결과치와 비교 대상이 되는 관리기준치로써 허용치를 사용하는 방법과 설계치의 추정치를 사용하는 방법이 있으며 계측 항목에 따라 합리적으로 택한다.
- (2) 계측치와 관리기준치를 비교하여 정상, 주의 및 위험단계로 판정하며, 주의 및 위험 단계일 때는 필요한 대책을 수립한다.
- (3) 계측치는 관리기준치와 비교하여 안전하더라도 값의 변화속도가 클 때는 위험에 다다를 수 있으며 변화속도가 안전관리 기준이 될 때가 있다.
- (4) 계측결과는 절대치관리법 또는 예측관리법으로 관리한다.

## 5. 터널계측

(1) 터널의 계측설계는 계측항목, 계측위치, 배치간격, 계측기기의 선정과 설치시기, 측정기간과 빈도, 결과정리 및 분석 방법 등을 포함하며, 설계 시 다음 사항을 고려해야 한다.

- ① 계측항목은 터널의 용도, 규모, 지반조건, 육상, 하저 및 해저 등의 주변환경, 시공방법 등을 고려하여 터널의 굴착에 따른 지반 및 주변 구조물의 거동을 파악하고 각종 지보재의 효과 및 품질을 확인하는 데 적합하도록 선정해야 한다.
- ② 계측위치 및 배치간격은 터널의 규모, 지반조건, 시공방법 등을 고려하여 계측목적에 부합하고 각 계측항목 사이의 상호 관련성을 파악할 수 있도록 선정해야 한다.
- ③ 계측기기의 선정을 위하여 설계자는 터널 안정관리상 요구되는 기기의 정도와 내구연한을 제시해야 한다.
- ④ 계측기기의 설치시기, 측정빈도 및 측정기간은 터널굴착에 따른 지반 및 지보재의 거동을 파악할 수 있도록 인버트 굴착 및 라이닝 타설시기를 감안하여 계획해야 한다.
- ⑤ 측정 결과의 정리방법은 계측결과를 확인할 수 있도록 계측치와 경시변화를 함께 제시해야 하며, 분석방법은 계측항목별 측정치를 상호 비교하여, 지반거동과 지보재 효과의 상관성에 따른 터널의 안정성을 검토할 수 있도록 제시해야 한다.
- ⑥ 3차원 변위 계측시 결과는 기존 변위 분석방법과 아울러 터널의 3차원 거동 파악이 가능한 분석방법을 도입하여 터널 종단선상의 터널변형 거동 파악 및 굴진면 전방 선행변위 예측이 가능하도록 분석해야 한다.

(2) 계측은 일상적인 시공관리를 위한 일상계측과 지반거동의 정밀분석을 위한 정밀계측으로 구분하여 계획을 수립해야 한다.

일상계측은 일상적인 시공관리상 반드시 실시해야 할 항목으로서, 터널 내 관찰조사, 내공변위 측정, 천단침하 측정, 록볼트 인발시험 등을 포함하며, 토피가 얇은 도심지에서는 지표침하 측정을 일상계측에 추가할 수 있으며, 설계 시 다음 사항을 고려해야 한다.

- ① 터널 내 관찰조사는 매 굴진면마다 실시하는 것을 표준으로 하되, 지반상태에 따라 유지관리 시의 기초자료인 터널지질도를 작성하는데 필요한 최소한의 빈도로 조정할 수 있다.
- ② 내공변위 및 천단침하 측정 시 측정단면은 20m 간격을 표준으로 하되, 갱구부 50m 구간과 토피가 터널 직경의 2배 이하인 구간은 10m 간격을 표준으로 하며 현장조건에 따라 증감할 수 있으며, 설계 시 각 선구별 동일한 계측관리 및 대응체계를 적용하여 효율적인 철도건설공사 관리가 될 수 있도록 하여야 한다.
- ③ 지반조건이 불량한 구간이나 변화가 심한 구간에 대하여는 계측간격을 일반구간 간격보다 좁히고, 지반조건이 양호하고 구간 내에서 지반변화가 적을 때에는 사전 검토 결과를 토대로 계측간격을 일반구간 보다 넓히거나 계측을 생략할 수 있다.



내공변위의 측선 수는 <그림 1>을 기준으로 하여 배치하되 갱구 부근, 편압 예상 구간, 단층 및 파쇄대, 과도한 지하수 용출이 예상되는 구간 등은 측선 수를 조정할 수 있으며, 필요한 경우에는 3차원 거동을 파악할 수 있도록 계측계획을 수립해야 한다.

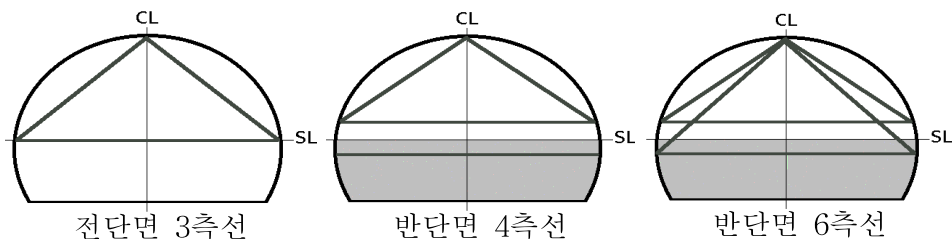


그림 1. 내공변위 계측의 측선 배치 예

- ④ 천단침하와 내공변위는 동일단면에서 측정되어야 하고, 이 측점은 가능한 한 굴진면에 근접하게 설치되어야 한다. 또한, 천단침하는 수준측량 등을 통하여 하향방향의 절대 침하량으로 측정하여야 한다. 터널이 전체적으로 침하하는지를 확인 할 필요성이 있는 경우 천단침하와 더불어 터널 바닥면의 침하도 측정하여야 한다.
  - ⑤ 일상계측으로서 지표침하 측정이 필요한 경우에는 측점을 내공변위 측정과 동일한 단면의 터널 중심선상의 지표면에 배치하고 터널 축에 직각 방향으로 여러 개의 측점을 거리별로 배치한다. 이때 가장 바깥쪽의 측점은 가능하면 터널 굴진의 영향을 받지 않는 부동점이 되도록 계획해야 한다.
  - ⑥ 록볼트 인발시험은 록볼트 종류의 선정 및 시공 후의 정착효과를 판정하기 위하여 굴착 초기단계에 실시해야 한다.
- (3) 정밀계측은 지반조건 또는 주변여건에 따라 지반 및 구조물의 거동을 보다 상세히 관찰할 목적으로 일상계측에 추가하여 선정하는 항목으로서, 현장조건을 고려하여 지중변위 측정, 록볼트 축력 측정, 슛크리트 응력 측정, 지중침하 측정 등을 포함하며, 갱구부 또는 특정 구조물 주변, 도심지 공공주택 또는 다중이용시설의 직하부에는 설계 시 다음 사항을 고려해야 한다.
- ① 정밀계측 측선의 간격은 500m 간격으로 배치하는 것을 표준으로 하되, 터널의 규모나 지반 및 주변 조건 등에 따라 조정할 수 있으며, 가능한 한 설계 시의 터널해석 구간에 설치하여 해석결과와 시공 시의 계측결과를 비교 검토할 수 있도록 해야 한다.
  - ② 지중침하 측정 위치는 터널 중심선상의 지표면 또는 측정해야 할 위치에 배치하고 깊이별로 여러 개의 측점을 계획해야 한다.
  - ③ 정밀계측 항목 중 계기를 터널 내에 설치하는 지중변위 측정, 록볼트 축력 측정, 슛크리트 응력 측정 등의 계측항목에 대해서는 1단면마다 3~5점을 기준으로 터널의 설계패턴에 따라 효과적인 계측이 가능하도록 적절한 위치에 배치해야 한다.

- ④ 설계자는 상기 항목 이외의 지반침하, 구조물 균열 및 경사도 등 터널공사에서 수반되는 제반 영향을 검토할 필요가 있는 경우에는 관련계측에 대한 계획을 제시해야 한다.
  - ⑤ 확폭부, 접속부, 단층파쇄 등의 연약지반 구간, 그리고 별도의 정밀계측이 필요한 구간에는 3차원 계측을 도입할 필요가 있으며, 필요 시 물리탐사나 선진수평시추를 함께 실시하여 계측의 신뢰도를 높일 필요가 있다.
  - ⑥ 터널공사로 인하여 환경피해 및 생태계 변화가 우려되는 구간에는 발파진동 및 소음, 지하수위 등의 환경영향 관련 계측계획을 수립해야 한다.
- (4) 설계자는 계측의 허용오차, 계측기기의 정도, 내구성, 설치시기, 측정기간 및 빈도, 계측기의 유지관리, 계측결과의 정리 및 분석방안, 계측관리 기준치 등 계측기기 선정, 계측수행 및 분석에 필요한 모든 사항을 포함한 공사시방서를 작성해야 한다.
- (5) 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 유지관리계측 계획을 수립해야 한다.



## 해설 1. 토사 비탈면 계측

- (1) 기존의 흙쌓기 또는 땅깍기 철도 비탈면의 대부분 준공된 지 상당한 시일의 경과로 인해 노후화 되어 있는 실정이며, 물류 수송량의 증대로 철도는 점점 고속화, 고밀화, 대형화, 중량화되고 있는 추세이기 때문에 열차 운행상의 안전성 및 신뢰성의 확보가 그 어느 때보다도 중요하다.
- (2) 근래 다발하는 경향을 보이고 있는 이상기후, 그리고 이로 인한 홍수, 지진 등으로 흙쌓기 또는 땅깍기 비탈면 재해를 미연에 예·검지하여 조치할 수 있는 비탈면 상시계측시스템 구축이 요구된다.
- (3) 상시계측시스템의 계측센서 및 장비는 그 특성과 용도에 맞게 설치할 수 있는 기준이 제시되어야 하며 주요 계측장비의 설치기준은 <표 2>에 제시하였다.

표 2. 주요 계측장비의 설치기준 「국토해양부, 2004」

구분	계측장비	계측기 설치기준
비탈면 및 토공시설물	지표침하계	◦ 연약지반 흙쌓기 시 흙쌓기 단면의 중앙에 설치
	층별 침하계	◦ 지층별 부등침하가 예상되는 지점 ◦ 장기적 관측이 가능한 노반 가장자리 ◦ 높은 흙쌓기로 상재하중이 많이 작용하는 지점 ◦ 하부 연약지반의 심도가 깊은 지점
	경사계	◦ 수평변위가 중요한 흙쌓기 선단부 ◦ 수평변위가 클 것으로 예상되는 흙쌓기 가장자리
	지표변위계	◦ 인장균열, 단차의 변위를 측정 (지표면 신축계) ◦ 암반비탈면의 붕괴형태에 따른 계측에 적합
	간극수압계	◦ 층별침하계와 인접한 위치 ◦ 층별침하계와 측정대상층과 같은 표고에 설치
	지하수위계	◦ 지하수위의 변화에 대한 검토가 필요한 지점 ◦ 간극수압계와 인접한 위치에 설치하여 과잉간극수압 검토
	측방변위 말뚝	◦ 흙쌓기 높이가 높아 측방변위 발생이 예상되는 지점 ◦ 흙쌓기 끝에서 약 20~30m 범위
낙석발생 예상지역	CCTV 시스템	◦ 낙석발생 유무를 화상으로 직접 인식 ◦ 대상지역 전체를 관찰할 수 있는 대표지점에 설치 ◦ 여러 개소의 동시계측 지원
	레이저거리 측정기	◦ 설치위치와 측정지점 간 장애물이 없는 지역에 설치 ◦ 팬틸트의 지원을 통한 다양한 지점의 측정 가능 ◦ 카메라의 측정위치와 동일한 각도로 설치
	적외선 센서	◦ 선로 방향과 평행하게 낙석발생 예상지점에 직접설치
	와이어 센서	◦ 낙석 발생으로 인한 선로의 직접적 피해유무 판단

- (4) 계측관리의 기준을 설정할 때에는 지질조건, 비탈면의 크기 및 형상, 주변구조물의 환경조건 등에 따라 차별적으로 설정한다. 계측관리기준의 설정방법은 절대치 관리기준의 설정방법과 예측치 관리기준의 설정방법으로 나뉘어진다. 절대치 관리기준의 설정은 시공전 설정된 관리기준치와 실측치를 비교, 검토하는 것으로 시공시의 안정성 확보에 목적이 있으며, 예측치 관리기준의 설정은 시공 후의 예측치와 관리기준치를 비교, 검토하여 비탈면 유지관리에 활용하는 것이 목적이다.

## 해설 2. 암반 비탈면의 계측계획

- (1) 암반 비탈면에서 변위가 진행중이거나 예상되는 것을 주의 깊게 관찰하기 위해 필요한 개소에 계측을 실시한다.
- (2) 비탈면에서 현장계측의 기본 조건은 주어진 모든 조건이나 붕괴형태를 정확히 예상하고 파악한 다음에 계측의 목적을 명확히 하여 그 목적에 맞는 계측기기의 선정이나 배치, 계측의 방법, 관리 기준치 등을 검토하여 계측의 실시계획을 작성할 필요가 있다.
- (3) 계측계획을 수립, 작성하는데 있어서 검토하여야 할 주요내용은 ㉠ 계측의 목적, ㉡ 계측 대상 범위, ㉢ 계측항목과 계측기기의 선정, ㉣ 계측기기의 배치, ㉤ 계측기간과 계측빈도, ㉥ 관리기준치, ㉦ 계측체제, ㉧ 계측데이터의 정의·평가방법, ㉨ 계측결과의 운용방법, ㉩ 계측기기의 유지관리가 포함되어야 한다.



### 해설 3. 연약지반 계측관리

#### 1. 현장계측

- (1) 연약지반처리의 설계는 복잡한 자연현상(토층 및 토질특성)을 단순화시켜 시행되므로 설계시 추정치의 불확실성과 설계단계에서의 지반조사자료의 부족 및 불확실성을 시공 중의 현장관리를 통해 보충하고 이를 통한 새로운 정보에 의해 적절히 관리·검토되어야 한다.
- (2) 연약지반의 침하와 변형특성 파악 및 개량효과 분석 등을 제반 계측관리를 통하여 연약지반 개량공법의 질적 향상 및 경제적이고 안전한 시공을 도모해야 하고, 나아가서 이러한 정보를 피드백(Feed-back) 시켜 다음 단계에서 발생할 수 있는 지반거동을 사전에 파악하여 이를 토대로 당초 설계의 타당성 파악 및 대책이 강구되어야 한다.
- (3) 계측관리는 연약지반에 성토를 함에 있어 대상지반의 주요지점에 침하 및 안정관리 등에 필요한 경사계, 침하판, 지하수위계, 간극수압계 등의 계측기를 설치하고 지반의 거동을 정량적으로 확인하는데 필요하며, 다음과 같은 목적이 있다.
  - ① 설계 시 지반조건의 정보부족으로 인한 설계시의 미비점을 시공 중에 발견하여 대책방안을 제시
  - ② 설계시 예측치 않았던 거동이 생기면 신속히 그 원인을 규명하고 그 대책을 수립
  - ③ 계측한 자료를 정리, 분석하여 자료를 축적하고 이를 피드백시켜 앞으로의 성토구조물의 설계시공에 적용하여 경제성, 안정성을 도모
  - ④ 설계이론 및 설계정수의 평가계측목적별 관리사항을 정리하면 다음과 같다.
  - 가. 긴급한 위험의 징후발견을 위한 계측 : 과대한 토압이나 수압이 작용하는 경우 히빙등의 징후를 사전 확인하여 안전관리를 수행하기 위한 계측
  - 나. 시공 중에 중요한 정보를 얻기 위한 계측 : 재하성토에 의한 지반의 거동을 예견하는데 필요한 정보를 얻기 위한 계측
  - 다. 시공법을 개선하기 위한 계측 : 선행단계의 계측 데이터는 다음단계의 설계정수로 사용되어 현장여건에 적합한 설계를 수행하기 위한 계측
  - 라. 공사지역의 특수한 경향을 파악하기 위한 계측
  - 마. 이론적 결과를 검증하기 위한 계측상기에서 언급한 바와 같이 현장계측은 여러가지 목적을 위해 실시되는 경우가 많으므로 계측을 성공적으로 실시하기 위해서는 각 목적 항목마다의 충분한 사전검토를 실시하여야 한다.

(4) 목적에 맞는 계측기를 선정한 후 그 계측기를 배치하는 것이 중요하며 계측위치의 선정이 측정대상물의 규모나 주변 구조물의 영향정도에 좌우된다는 것은 말할 나위도 없지만 측정 개소의 지형, 지질, 토질특성 등의 중요한 요소가 있다는 것도 간과할 수 없다. 일반적으로 계측기의 매설위치 선정기준은 아래와 같다.

- ① 대상지역 전체를 대표하는 지점
  - ② 취약지역
  - ③ 지반개량 효과분석 및 안정관리 대상지역
  - ④ 차량, 장비로부터 보호 및 관리가 용이한 지점
  - ⑤ 계측기의 상호 연계를 파악할 수 있도록 통합
  - ⑥ 사전자료 및 시추조사 등으로 지반조건이 충분히 파악된 지점
- (5) 계측내용에 따라 필요한 계측기를 설치해야 하겠으나, 통상의 압밀시공과 관련하여 지표면침하, 층별침하, 측방변위(경사), 간극수압 등이 수행되어야 한다. 이들 측정을 위한 계측기의 배치간격은 연약지층에 따라 달라질 것이다.
- (6) 지반이 복잡하고 주요 구조물이 축조된 경우에서 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고 많은 계측기를 설치하며, 이때 연약지반의 흠뻑기 재하시 지반거동을 고려하여야 한다. 각 계측기의 설치위치에 대해서는 지표침하판 및 층별 침하계는 철도노반의 중앙, 간극수압계는 흠뻑기단면 하부에 설치한다. 고성토구간에서는 흠뻑기단면 비탈끝에서 융기나 측방이동을 관측할 수 있도록 경사계나 변위말뚝을 설치해야 한다.(<그림 2> 참조)

계측기의 종류 및 배치기준은 <표 3>과 같으며 계측빈도 및 설치개소는 현장여건, 연약지반상태를 고려하여 조정하도록 한다.

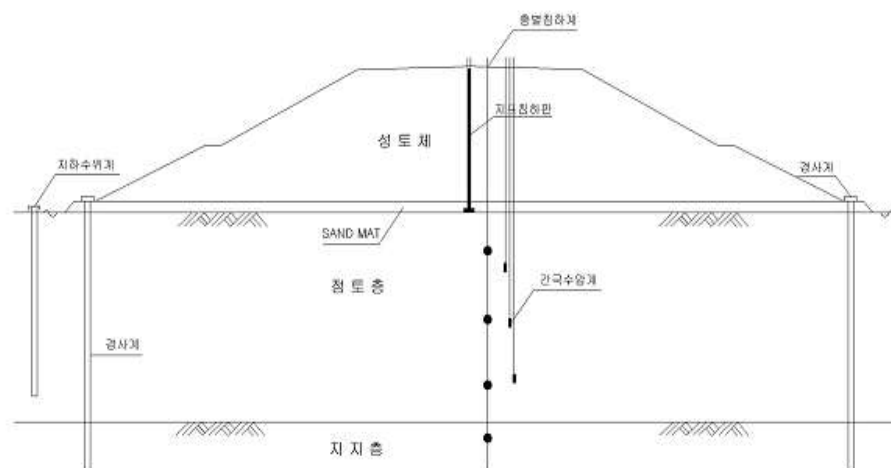


그림 2. 계측기 배치 단면도





표 3. 계측기의 종류 및 배치기준 「국토해양부, 2000」

계측기명	계측목적 및 검토사항	계측기 배치원칙
층별 침하계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 연약점토성의 심도별 압밀침하량 측정 및 지표면 침하량과의 비교 분석</li> <li>· 측정된 침하량을 이용하여 지반의 층별 압밀정수 추정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 연약심도가 깊거나 고성토지역에 간극수압계와 동일지점에 설치</li> <li>· 공당소자는 3개씩</li> </ul>

표 3. 계측기의 종류 및 배치기준 「국토해양부, 2000」 (계속)

계측기명	계측목적 및 검토사항	계측기 배치원칙
간극수압계 (piezometer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 흙쌓기 하중에 의한 지반내 간극수압의 변화측정</li> <li>· 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력증가량 유추</li> <li>· 압밀의 효과 확인</li> <li>· 압밀진행 및 강도증가상황 확인</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 연약심도가 깊거나 고 흙쌓기지역에 층별침하계와 동일지점에 설치</li> <li>· 공당소자는 3개씩</li> </ul>
경사계 (inclinometer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 흙쌓기 비탈면부의 지반내 수평방향의 변형량과 변형속도 측정</li> <li>· 흙쌓기 중앙부의 최대침하량과 함께 분석하여 흙쌓기 비탈면의 안정관리</li> <li>· 측방유동 토압에 의한 교대의 안정성확인</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전단파괴가 우려되는 고성토지역에 좌, 우 비탈면에 설치</li> <li>· 현장상황에 따라 교대전후면 또는 측면에 설치</li> </ul>
지하수위계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 흙쌓기에 의한 지하수위의 변화파악</li> <li>· 간극수압과 비교하여 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력 증가량 유추</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 간극수압계가 설치되는 지점에서 흙쌓기에 의해 자연 지하수위가 영향을 받지 않도록 흙쌓기 비탈면에 이격하여 설치</li> </ul>
지표침하판	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 설치지점의 전침하량 측정</li> <li>· 흙쌓기 속도 조절, 프리로딩 제거시기 판정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 연약지반 흙쌓기 시 100m간격으로 흙쌓기 단면 중앙에 설치</li> </ul>

(7) 계측기 설치시기는 샌드매트와 연약지반처리공법(연직배수공법 등) 완료 후 연약지반상에 성토를 하기 전에 대상지반의 주요지점에 침하 및 안정관리 등에 필요한 경사계, 침하판, 지하수위계, 간극수압계 등의 계측기를 설치하여야 하며, 설치준비 및 설치 후 시공 중 망실에 대비하여 계측기기 유지관리는 다음과 같이 시행 하여야 한다.

- ① 제조업자측이 제공하는 매뉴얼로 일상유지절차를 수립함
- ② 기기의 일상점검을 통해 기기오염 및 고장시 즉각적인 보수, 교체를 실시함
- ③ 섬세한 기기의 경우 운반 및 관리시 충격과 손상방지를 위해 패드와 같은 충격완화재를 설치함
- ④ 계측기는 시공 중에 파손되는 경우가 많으므로 시공장비에 의해 파손되지 않도록 보호시설과 눈에 띄는 표지를 설치하여 파손을 예방하고 중요 부위의 계측은 여분의 계측기를 매설하여 파손에 따른 자료손실에 대비한다.

한편, 연약지반상에 침하, 간극수압, 지중변위 등의 계측치는 초기치 및 성토시공이 개시되는 시점이 중요하다. 이는 계측관리를 통하여 침하 및 안정관리를 수행함에 있어 계측기설치 초기 계측값은 침하량, 압밀도 등의 예측과 시공 중 위험의 징후를 파악하는데 중요하며, 초기치 설정이 이루어져야 성토시공 중 과잉간극수압, 지중변위 등의 변화를 정확히 파악할 수 있다.

## 2. 침하관리

- (1) 연약지반 설계 시에는 복잡한 지층 구성상태를 대표화하고 대표적인 지반정수들을 적용하기 때문에 설계침하량과 실측침하량이 일치하지 않는 경우가 많다. 따라서 압밀이론에 관계없이 실측침하곡선에 적합한 곡선식을 도출하여 앞으로의 침하를 추정한후 당초설계를 검토하여 실측침하와 불일치할 경우 이를 시공 및 설계에 다시 반영한다.

### ① 쌍곡선법

쌍곡선법은 시간의 경과에 따른 침하의 진행이 쌍곡선으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측 침하량으로 부터 장래의 침하량을 예측하는 방법으로 <식 (1)>, <식 (2)>를 이용한다. 이 방법을 적용하여 추정한 침하량은 초기에는 실측치에 비하여 작고 후반부의 직선부분에서는 일치하는 경향이 있으므로 압밀도가 약 50% 정도 도달해야만 어느 정도 근사치에 접근할 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$S_t = S_o + \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \quad (1)$$

$$S_f = S_o + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

여기서  $S_t$  : 쌍기종료 후 경과시간  $t$ 에서의 침하량

$S_f$  : 최종침하량

$S_o$  : 쌍기종료 직후의 침하량

$t$  : 쌍기종료 시점으로부터의 경과 시간

$\alpha, \beta$  : 실측침하량 값으로부터 구한 계수

이때 쌍기 종료 후  $t$ 시간 동안의 실측침하량을 기초로 하여  $t/(S_t - S_o)$  를 계산한 다음  $t \sim t/(S_t - S_o)$ 의 관계를 <그림 2>와 같은 방법으로 도시하여  $\alpha, \beta$  값을 결정한다.

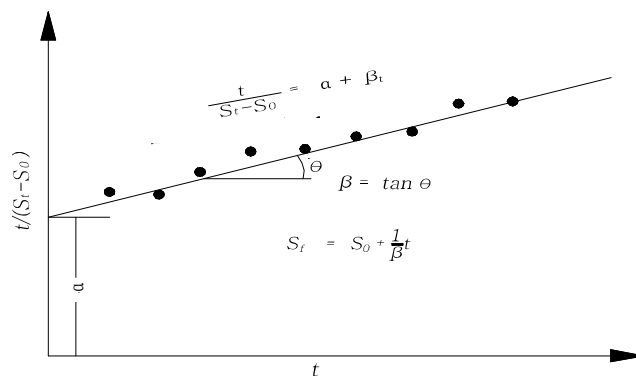


그림 3. 쌍곡선법에 의한 계수 결정법

## ② Hoshino법 ( $\sqrt{t}$ 법)

침하하는 현장에서의 전단에 의한 유동변형을 포함하며 시간의 평방근에 비례한다는 기본원리에서 장래의 침하량을 예측하는 방법으로  $\sqrt{t}$  법이라고도 한다.

$$S_t = S_o + S_d = S_o + \frac{A \cdot K \sqrt{t}}{\sqrt{1 + K^2 \cdot t}} \quad (3)$$

여기서,  $S_t$  : 쌍기종료 후 경과시간  $t$ 에서의 침하량

$S_o$  : 쌍기종료 직후의 침하량

$S_d$  : 시간의 경과와 더불어 증가하는 침하량

$t$  : 쌍기종료 시점으로부터의 경과시간

$A, K$  : 실측침하량 값으로부터 구한 계수

쌍기종료 후  $t$ 시간 동안의 실측침하량을 기초로 하여  $t/(S_t - S_o)^2$ 를 계산한 다음  $t \sim t/(S_t - S_o)^2$ 의 관계를 도시하여  $A, K$  값을 결정하며, 최종침하량 ( $S_f$ )는  $t = \infty$ 로 보고 <식 (3.4)>로 부터 산정한다.(<그림 4> 참조)

$$S_f = S_o + A = S_o + \sqrt{1/\beta} \quad (4)$$

여기서,  $S_f$  : 최종 침하량

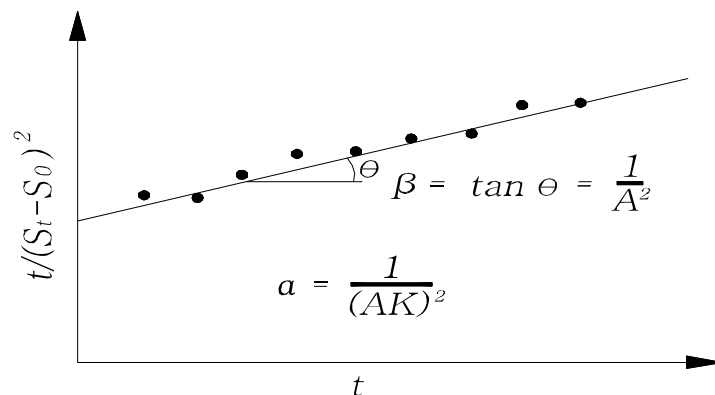


그림 4. Hoshino법에 의한 계수 결정법

#### 다. Asaoka 법

1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 <식 (5)>와 같은 간편식으로 장래 침하량을 예측하는 방법이다.

$$S_i = \beta_o + \beta_1 \cdot S_{i-1} \quad (5)$$

여기서,  $S_i$  : 시간  $t$ 를 이산화하여  $t_i = t \times i (i=1,2,3,\dots)$ 로 할 때 시간  $t_i$ 에서의 침하량

$S_{i-1}$  : 시간  $t_{i-1} = \Delta t \times (i-1)$ 에서의 침하량

$S_d$  : 시간의 경과와 더불어 증가하는 침하량

$\beta_o, \beta_1$  : 계측침하량으로 구한 계수

실측침하량 경시 변화도(<그림 5>)로부터 동일한 시간간격( $\Delta t$ )에 대응하는 침하량  $S_1, S_2, \dots, S_{i-1}, S_i$ 를 관측하여  $S_{i-1}$ 과  $S_i$ 를 축으로 하는 좌표상에  $(S_1, S_2), (S_2, S_3), \dots, (S_{i-1}, S_i)$ 를 도시(<그림 6>)한다. 이 경우 도시된 점은 거의 직선상에 위치한다.

도시최종침하량은 도시된 직선과  $S_{i-1} = S_i$  인 직선 ( $45^\circ$ )의 교점으로부터 도식적으로 <식 (6)>과 같이 산정된다.

$$S_f = \frac{\beta_o}{1 - \beta_1} \quad (6)$$

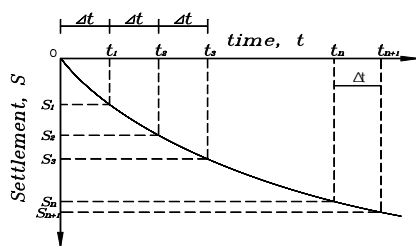


그림 5. 실측침하량 경시 변화도

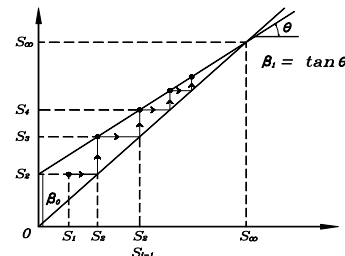


그림 6. 최종침하량 산정(Asaoka)

- (2) 연약지반 각층의 침하량을 측정하고, 장래침하량을 예측하여 압밀진행 상황을 파악한다. 이때 각층의 간극수압의 변화로부터 각 시점에서의 정확한 압밀도를 파악한다.
- (3) 연약지반 처리시 압밀축진 예상효과와 실제와의 차이를 비교하여 선하중(Preloading)의 재하기간과 제거시기를 결정한다.
- (4) 장래침하량 예측에 따라 잔류침하량을 추정하여 교대와 성토의 연결부 단차와 그 외의 침하에 대한 대책을 검토한다.

### 3. 안정관리

- (1) 연약지반에서 성토하중의 증가가 지반의 강도증가와 균형을 이루도록 성토속도를 조절하여 안정한 상태에서 시공할 수 있도록 성토속도를 설정하고, 시공진행과 함께 계측결과를 기초로 안정관리를 하며, 그것에 의해 성토속도를 조절한다. (<표 4> 참조)



표 4. 지반과 흙쌓기 속도 「국토해양부, 2000」

지반의 종류	흙쌓기 속도
두꺼운 점토지반 및 유기질토가 두껍게 퇴적된 이탄토지반	30mm/일
보통의 점토질지반	50mm/일
얇은 점토질지반 및 유기질토가 거의 끼지 않은 얇은 이탄토지반	100mm/일

- (2) 계측결과를 분석하여 불안정한 징후가 보이면 성토를 중단하고 방치기간을 갖는다. 방치에 의해 안정화 경향이 확인되면 쌓기를 속행하게 되지만, 방치해 두어도 불안정한 상태가 계속되어 파괴가 예측되는 경우에는 조속히 성토하중 경감등의 대책을 실시함과 동시에 필요에 따라 확인 시추조사나 안정해석 등을 실시해 본격적인 대책을 강구한다.반대로 안정관리에 의해 충분한 여유가 있다고 판단될 때에는 쌓기 속도를 높일 수 있다.
- (3) 기초지반의 변형량과 변형속도를 계속해서 상세측정, 안정성을 검토한다.
- (4) 지반 내 간극수압을 동시에 측정하여 간극수압의 경시변화로부터 압밀의 진행상황 분석한다.
- (5) 이상의 측정·조사결과에 의해 쌓기가 안정상태에서 진행되는지를 검토, 불안정한 경우 그 정도에 따라 쌓기속도의 지연, 중지 또는 일부 쌓기제거 조치강구한다.
- (6) 정성적방법은 성토중앙부 침하(S)와 성토측방의 수평변위( $\delta$ )의 측정결과를 가지고 연약지반이 안정 또는 불안정한지를 판단할 수 있다.지반이 안정한 경우 침하량이 어느정도 시간이 지남에 따라 일정해지는 경향을 보이고, 그렇지 않고 갑자기 증가하면 불안정한 상태라 할 수 있다. 즉, 수평·수직 변위가 거의 발생하지 않거나 성토 쪽으로 수평변위가 발생하면 안정하고 그렇지 않고 변위가 급격히 발생하거나 성토 밖으로 수평변위가 발생하면 불안정한 상태이다.(〈그림 7〉, 〈그림 8〉 참조)
- 지반파괴 및 불안정 상태의 정성적인 경향은 다음과 같다.
- ① 성토의 천단부나 사면에 원호균열(Arc-Crack) 모양의 발생
  - ② 성토 중앙부의 침하가 급격히 증가
  - ③ 성토사면 끝부분 지반의 수평변위가 성토 외측방향으로 크게 발생
  - ④ 성토사면 끝부분 지반의 수직변위가 상향으로 크게 발생
  - ⑤ 성토작업 중지 시에도 수평변위가 지속되며 간극수압 상승

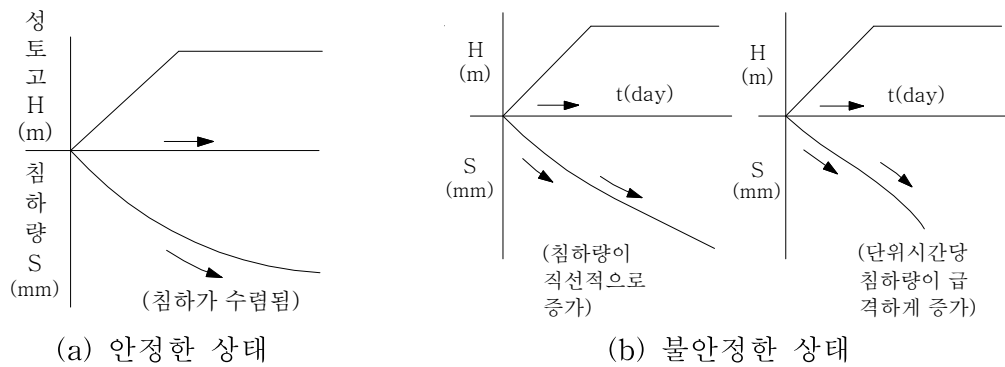


그림 7. 침하량 경시변화

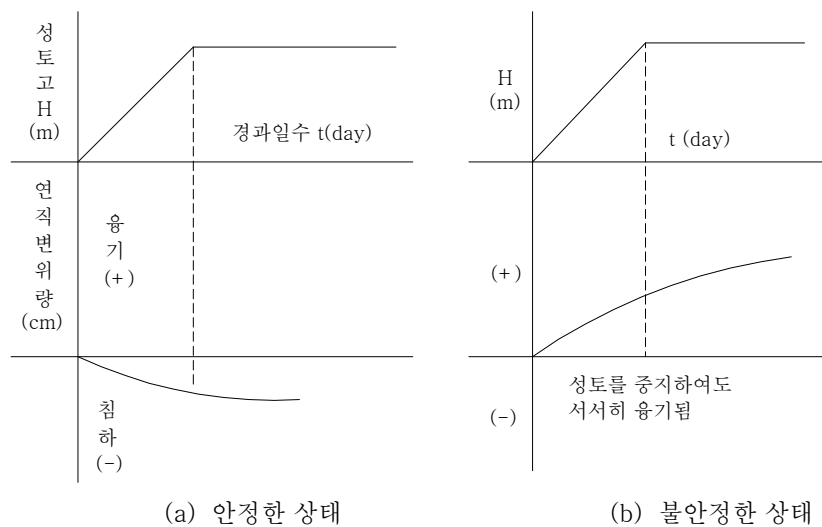


그림 8. 변위말뚝의 연직변위량 경시변화

(7) 정량적관리는 일반적으로 흙쌓기 중앙부의 침하량(S)과 흙쌓기 법면 끝부분의 수평 변위량( $\delta$ ) 및 성토하중(q)을 이용하여 안정관리 하며, S는 연약층이 매우 두꺼운 경우는 안정에 관계되는 상층부의 침하량으로 하고  $\delta$ 는 최대 변위값을 사용한다.

#### ① Matauo-Kawamura법

Matsuo는 많은 흙쌓기의 파괴사례를 조사하여 파괴시의 흙쌓기 중앙부의 침하량 S와 흙쌓기 비탈면의 수평변위량  $\delta$ 를 이용하여 관계가 일정한 파괴 기준을 정립하였다. 본 방법 S~ $\delta$ /S의 관계 그래프를 그려보면 파괴는 일정한 곡선에 근접하거나 접했을 때 파괴가 일어난다는 이론이며, <그림 9>에서 보는 바와 같이 지반파괴에 도달하는 성토하중을  $Q_f$ , 성토시공 하중을 Q라 하여 하중비로 나타내어 그 기준을 정한 것이다. Matsuo는 현장계측 결과를 이용한 회귀분석을 통하여 <식 (7)>을 제안하였다.

$$Q / Q_f = a \cdot \exp[ b(\delta/S)^2 + c(\delta/S) ] \quad (7)$$

여기서, a, b, c : 파괴기준에 따른 상수(<표 5> 참조)



표 5. 등치선의 종류에 따른 매개변수 값(Matsuo, 1978)

$Q/Q_f$	a	b	c	$\delta/S$ 의 범위	관리기준
1.0	5.93	1.28	-3.41	$0 < \delta/S < 1.4$	지반파괴
0.9	2.80	0.40	-2.49	$0 < \delta/S < 1.2$	시공중단
0.8	2.94	4.52	-6.37	$0 < \delta/S < 0.8$	시공속도지연

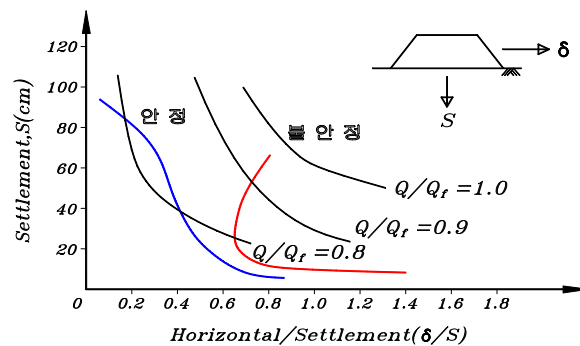


그림 9. Matsuo-Kawamura에 의한 안정관리도

## ② Tominaga - Hashimoto법

Matauo-Kawamura이론을 참고하여 S와  $\delta$ 를 측정하여 도시해보면 기울기  $\alpha$ 를 갖는 직선 선상에 있게 된다. 성토고가 낮아 안정된 구간은 직선이지만 불안정하면 S의 증가에 비해  $\delta$ 의 변화가 커진다.  $\Delta\delta/\Delta S = \alpha$ 라 할 때  $\alpha$ 값이 감소하면 안정된 상태로, 증가하면 불안정한 상태로 변할 때 변곡점이 생긴다. 이 변곡점 이전의 값 즉, 안정상태의  $\alpha$ 를  $\alpha_1$ , 변곡점 이후의 값 즉, 불안정한 상태의  $\alpha$ 값을  $\alpha_2$ 라 하고  $\alpha_2/\alpha_1$ 과  $\alpha_1$ 의 관계를 그래프로 나타내면 안정영역과 불안정영역으로 구분되어지는데 다음 두 방법으로 불안정기준을 정의할 수 있다.(<그림 10> 참조)

### 가. 제1방법

$\alpha_1 \geq 0.7$ ,  $\alpha_2 \geq \alpha_1 + 0.5$  이면 불안정

### 나. 제2방법

원점으로부터 현재까지 측정결과의 1/3시점에서 S- $\delta$ 의 기울기  $\alpha$ 와 판단하고자 하는 시점의 기울기를 비교하여 1.25이상이면 불안정

S- $\delta$ 관리도의 장점은 압밀 변형과 전단 변형 여부를 용이하게 파악할 수 있고 파괴의 징후를 조기에 발견할 수 있다는 것이지만 절대적이지 않기 때문에 주의해서 사용할 필요가 있다.

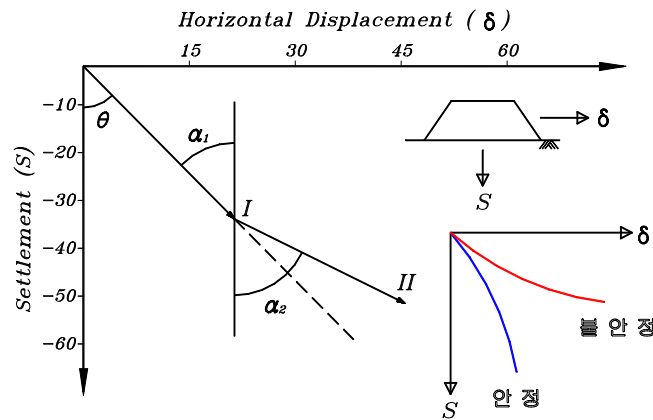


그림 10. Tominaga - Hashimoto에 의한 안정관리도

### ③ Kurihara법

흙쌓기 비탈면의 수평변위 속도에 착안하여 관리하는 방법으로 측정치에서  $\Delta\delta/\Delta t$ 와  $t$ 의 관계를 도시하여  $\Delta\delta/\Delta t$ 가 어느 한계치를 넘는 경우에 위험으로 판단한다. (<그림 11> 참조)

일반적으로 초기 관리값은 10~20(mm/day)로 하며, Kurihara는 불안정하게 되는 판단기준을 20~30(mm/day)으로 제안하였다. 그러나 표층이 매우 연약한 경우 성토초기에  $\Delta\delta/\Delta t$ 의 최고치가 매우 크게 나타나는 경우가 있으며, 성토 시 국부파괴가 발생하기도 하나 안정성에는 관계가 없을 수도 있어 이 방법은 주로 후반단계 공사에 권장한다.

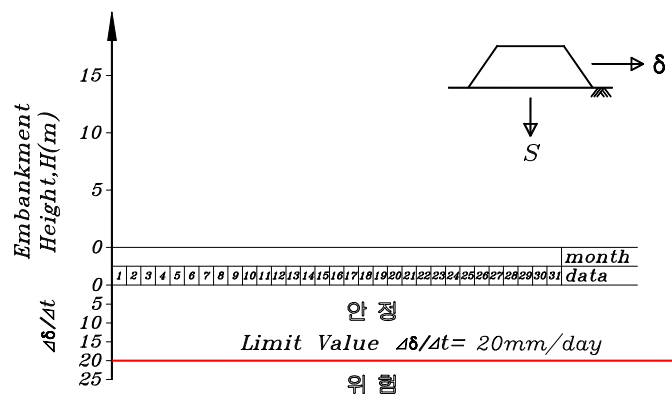


그림 11. Kurihara에 의한 안정관리도





## 해설 4. 흠막이구조물 계측관리

### 1. 계측의 목적 및 계획

#### 1.1 계측목적

지반을 굴착할 때 발생하는 흠막이 구조물, 주변지반 및 인접구조물의 거동을 파악하여 설계, 시공 및 유지관리에 활용토록하며 흠막이 구조물의 안정성과 경제성을 확보하고, 주변지반 및 인접구조물의 안전을 기한다.

#### 1.2 계측계획

- (1) 계측계획은 흠막이 구조물, 인접구조물, 지반, 시공 및 계측기기의 특성 등을 고려하여 계획한다.
- (2) 계측계획 시에는 발생 가능성이 있는 문제를 미리 예측하여 합리적인 지점을 선택, 계측기기를 배치한다.
- (3) 각종 계측기 센서의 작동방식을 가능한 한 같은 형식으로 선정하여 호환성이 양호한 시스템으로 구성한다.
- (4) 계측하고자 하는 현장의 규모, 계측기의 종류 및 수량, 실시간 모니터링의 필요성 등에 따라 수동, 자동 및 수동자동 혼합 시스템을 선택한다.

#### 1.3 계측항목 선정

계측항목의 선정은 터파기 규모 혹은 지반조건 등에 따라서 달라지기 때문에 구체적인 계측결과의 활용목적, 평가수법을 명확하게 수립한 후 필요한 계측항목을 선정해야 한다. <표 6>은 지하터파기 공사시 필요한 주요 계측항목과 계측기를 나타낸다.

표 6. 지하터파기 공사에 주요 계측항목 및 계측기기

계측 대상	계 측 항 목		계 측 기 기	육 안 관 찰	계 측 목 적
흙막이벽	측 압	토압, 수압	토압계, 수압계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 벽체의 휨</li> <li>· 연속성 확인</li> <li>· 누수</li> <li>· 주위지반의 균열</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실측치와 설계치와의 비교 검토</li> <li>· 주변수위, 간극수압, 벽면수압의 관련성 파악</li> </ul>
	변 형	두부변위, 수평변위	측량, 경사계		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 실측치와 허용수치와의 비교</li> <li>· 토압, 수압과 벽체변형과의 상관성 파악</li> </ul>
	벽체내 응력		변형계, 철근계		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 설계치와 실측치의 벽체내 응력 분포 비교</li> <li>· 벽체의 안정성 파악</li> </ul>
앵커 · 버팀보	축력, 변위량, 온도		하중계, 신축계, 상대변위계, 온도계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 버팀보의 평판성</li> <li>· 볼트가 죄어진 상태</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지보공의 토압분담을 파악</li> <li>· 작용하중과 허용축력과 비교에 의한 안전성 확인</li> </ul>
터파기 지반	굴착지반내의 수직 및 수평변위, 간극수압		간극수압계, 경사계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하터파기 바닥면의 과도한 용기 혹은 균열</li> <li>· 내부지반의 용수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 응력경감에 의한 터파기 지반의 변형이나 주변지반 거동파악</li> <li>· 배면지반, 흙막이벽, 굴착바닥면의 상관성 파악</li> </ul>
주변지반	지표 및 지중 연직변위, 간극수압, 지중수평변위		경사계, 지중침하계, 간극수압계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배면지반의 균열</li> <li>· 도로의 연석, 보도블럭등의 벌어짐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 허용변위량과 실측변위량과의 비교에 의한 안정성 확인</li> <li>· 지하터파기 및 배수에 따른 주변지반의 침하량 및 침하범위 파악</li> </ul>
근접구조물	연직변위, 경사량, 균열		침하계, 경사계, 균열측정기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구조물의 균열 및 기울어짐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하터파기 및 배수에 의한 가설구조물의 변형 파악</li> </ul>

## 1.4 계측시스템의 선정

### 1.4.1 데이터 획득 시스템

방식과 수동측정방식과 정해진 시간에 자동으로 측정되어 입력되는 방식이 있다. 수동측정방식은 초기설치비가 저렴하나 측정에 소요되는 비용이 높다. 계측점수와 계측빈도가 적은 경우에는 수동계측이 유리하다. 자동측정방식은 계측점수가 많고 위치적으로 비교적 집중되거나 야간에도 감시가 필요한 경우에 유리하다. 측정점수가 많지는 않지만 도로, 철도와 같이 연장이 긴 노선형의 현장과 광역매립공사와 같이 측정위치가 분산되어 있거나 계측 빈도가 그다지 많지 않은 경우는 두 가지 방식을 병행한 반자동 방식이 편리하다.

### 1.4.2 네트워크 시스템 구성

다수의 건설현장을 관리해야 하는 대규모 건설프로젝트의 경우는 계측 네트워크를 이용하여 계측업무 시행체계의 통합, 일원화의 효과를 높일 필요가 있다. 계측 네트워크를 활용하면 계측데이터 해석을 위한 고급기술자와 장비를 효율적으로 운영할 수 있고 감독의 입장에서는 각 공사의 계측상태를 총괄 감독할 수 있는 장점이 있다.



### 1.4.3 의사결정 시스템

얻어진 계측데이터로부터 의사결정을 하는 방식으로 다음과 같은 3가지 방식이 있다. 발주자 결정방식은 일반적인 예로서 정보는 발주처의 집중 관리센터에 수집 정보화 되며, 공단의 방침결정에 이용되어 시공업자에게 시공방침에 대한 지시가 내려진다. 이 방식에서 의사결정은 발주자측에 있다.

공동 결정방식은 발주자, 시공사 및 감리자가 공동으로 참여하는 기술관리위원회를 구성하여 의사결정을 하는 방식이다.

시공사 결정방식은 시공사측에 일괄책임을 주어 의사결정을 하고 발주자에 대해서는 요구되는 품질과 공기내에 완성품을 제공하는 방식이다.

## 2. 계측의 위치선정 및 빈도

### 2.1 계측위치 선정

계측기를 설치할 위치는 경제성, 시공성을 고려하여 흠막이 구조물 및 배면지반의 거동을 대표할 수 있는 최소한의 위치를 선정하여 최대효과를 얻도록 해야 하며 다음과 같은 개소를 우선적으로 선정한다.

- (1) 원위치시험 등에 의해서 지반조건이 파악되어 있는 곳  
(또는 비교적 단순하고 대표적인 지반상태를 갖는 지점)
- (2) 설계와 시공면에서 흠막이 구조물을 대표할 수 있는 장소
- (3) 중요 구조물이 인접한 곳
- (4) 우선적으로 굴착공사를 진행할 곳
- (5) 흠막이 구조물이나 지반에 특수한 조건이 있어 공사에 영향을 미칠 것으로 예상되는 장소(지반상태 및 재료가 변경되는 지점)
- (6) 교통량이 많은 장소
- (7) 하천주위 등 지하수의 분포가 다량이고 수위의 상승, 하강이 빈번한 곳
- (8) 가능한 한 계측기기의 훼손이 적은 곳(기기 설치와 측정이 용이한 지점)
- (9) 과다한 변위가 우려되는 지점
- (10) 현장작업에 용이한 곳에 설치해야 한다.
- (11) 각 계측항목별 측정결과는 상호 긴밀한 연관성을 갖기 때문에 계측위치를 선정한 후 가능한 한 계측기가 동일단면에 설치되도록 해야 한다.

### 2.2 계측빈도

계측빈도는 굴착의 진행상태와 계측치의 변화속도에 따라 결정하며, 읽음치 간에 급격한 변화가 없도록 빈도를 정해야 한다. 계측기 설치초기에는 계측치의 정상작

동 여부와 초기치 설정을 위하여 빈도를 늘인다. 계측빈도는 <표 7>을 기준으로 한다.

표 7. 흠막이 계측빈도

계측항목	측정시기	측정빈도	비고
지하 수위계	설치 즉시 공사진행 중 공사완료 후	1회/일 (1일간) 2회/주* (가) 1회/주*(1개월간)	초기치 선정 우천 이후 3일간 연속측정
하중계 축력계	설치 즉시 공사진행 중 공사완료 후	3회/일 (3일간) 2회/주* 1회/주*(1개월간)	초기치 선정 다음 단 설치시 추가 측정 다음 단 해체시 추가 측정
변위계	설치 즉시 공사진행 중 공사완료 후	3회/일 1회/일* 2회/주*	초기치 선정 다음 단 설치시 추가 측정 다음 단 해체시 추가 측정
지중 경사계	설치 4일후 공사진행 중 공사완료 후	1회/일 (3일간) (나) 2회/주* 1회/주*	초기치 선정 다음 단 설치시 추가 측정 다음 단 해체시 추가 측정
건물 경사계, 균열계	설치 즉시 공사진행 중 공사완료 후	1회/일 (3일간) 2회/주* 1회/주*(1개월간)	초기치 선정
지표 침하계	설치 즉시 공사진행 중 공사완료 후	1회/일 (3일간) 2회/주* 1회/주*	초기치 선정

- 주) 1. 공사 중은 굴착공사를 의미함.  
 2. 상기 측정빈도는 경우에 따라 (계측분석반에 승인을 득한 후) 조정, 수행할 수 있음.  
 3. (\*) 표시된 빈도는 외부하중 및 지반거동 변화시 추가측정을 실시하며 공사중단 중인 경우 측정 빈도를 재조정해야 함.  
 4. 계측기(특히 센서)는 강재 설치 전에 부착해야 하고, 말뚝위치에 설치해야 함

### 3. 계측의 결과 활용

- (1) 계측 결과치와 비교 대상이 되는 관리기준치로써 허용치를 사용하는 방법과 설계시의 추정치를 사용하는 방법이 있으며 계측 항목에 따라 합리적으로 택한다.
- (2) 계측치와 관리기준치를 비교하여 정상, 주의 및 위험단계로 판정하며, 주의 및 위험 단계일 때는 필요한 대책을 수립한다. 관리기준치의 예는 <표 8>과 같다.



표 8. 흙막이공사의 계측관리 기준치(예)

측정항목	안전, 위험의 판정기준치	판정법			
		지표 (관리기준)	위험	주의	안전
측압 (토압, 수압)	설계시에 이용한 토압분포(지 표면에서 각단계 근입 깊이)	$F_1 = \frac{\text{설계시에 이용한 토압}}{\text{실측에 의한 측압(예측)}}$	$F_1 < 0.8$	$0.8 \leq F_1 \leq 1.2$	$F_1 > 1.2$
벽체변형	설계시의 추정치	$F_2 = \frac{\text{설계시의 추정치}}{\text{실측의 변형량(예측)}}$	$F_2 < 0.8$	$0.8 \leq F_2 \leq 1.2$	$F_2 > 1.2$
흙막이벽 내응력	철근의 허용인장응력	$F_3 = \frac{\text{철근의 허용 인장응력}}{\text{실측의 인장응력(예측)}}$	$F_3 < 0.8$	$0.8 \leq F_3 \leq 1.0$	$F_3 > 1.0$
	흙막이벽의 허용 휨모멘트	$F_4 = \frac{\text{허용 휨모멘트}}{\text{실측에 의한 휨모멘트(예측)}}$	$F_4 < 0.8$	$0.8 \leq F_4 \leq 1.0$	$F_4 > 1.0$
STRUT 축력	부재의 허용축력	$F_5 = \frac{\text{부재의 허용축력}}{\text{실측의 축력(예측)}}$	$F_5 < 0.7$	$0.7 \leq F_5 \leq 1.2$	$F_5 > 1.2$
굴착저면의 히빙 (Heaving) 량	TW Lambe에 의한 허용 히빙량		실측결과 가 위험 영역에 저축(plot )되는 경우	실측결과 가 위험영역 에 저축되는 경우	실측결과 가 위험영역 에 저축되는 경우
침하량	각 현장마다 허용치를 결정	각 현장상황에 맞는 허용침하량을 지정하고, 그 허용침하량을 넘으면 위험 또는 주의 신호로 판단한다.			
부등침하량	건물의 허용부등침하 량	기둥간격에 대한 부등 침하 량의 비	1/300 이상	1/300 ~ 1/500	1/500 이하

주) 실측값은 말뚝위치에서 측정된 값을 기준으로 한다.

- (3) 계측치는 관리기준치와 비교하여 안전하더라도 값의 변화속도가 클 때는 위험에 다  
다를 수 있으며 변화속도가 안전관리 기준이 될 때가 있다.
- (4) 안전관리를 위한 계측관리기법으로는 절대치관리와 예측관리로 나눌 수 있다.
  - ① 절대치관리란 시공 전에 미리 설정한 관리기준치와 실측치를 비교, 검토하여 그 시  
점에서 공사의 안전성을 평가하는 방법이다.
  - ② 예측관리는 이전 단계의 실측치에 따라 예측된 잔여단계의 예측치와 관리기준치를  
대비하여 안전성 여부를 판정하는 기법이다. 잔여단계의 예측치를 추정하는 방법에는  
역해석 기법을 사용할 수 있다. 어느 단계까지 굴착했을 때의 실제 측정된 변위  
와 버팀보 축력은 설계시의 값보다 더 크게 나오거나 더 작게 나올 수 있으며, 설  
계시 사용한 입력데이터, 즉 지반의 점착력이나 내부마찰각 등을 바꾸어 가면서 반

복 계산하여 실제 계측된 결과와 같은 값이 얻어지도록 했을 때의 데이터가 현장상황과 일치되는 데이터라고 볼 수 있다. 이 데이터를 이용하여 잔여단계에 대한 해석을 하면 당초 설계시보다 더 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있으며 잔여단계 시공시 안전하지 않으면 보강대책을 세우고 너무 안전하여 비경제적이라면 설계를 변경하여 공사비를 절감할 수 있는 도구로 사용한다.



## 해설 5. 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, 지반 조건 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 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 9. 터널 구간 계측기

계측항목	사용계기	계측장소	계측목적	계측구분
지표침하측정	침하측정 핀과 측량장비	터널굴착영향권 지역 지표면	• 터널 굴착으로 인한 지표면 침하 상태 및 인접구조물 영향예측	정밀
내공변위측정	내공변위측정기	터널의 내공	• 막장부의 진행에 따른 내공변위를 각 지점별로 측정, 안정성 판단	일상
천단침하측정	Level, 천단침하 측정자 또는 내공변위측정기	터널의 천단부	• 막장부의 진행에 따른 내공변위를 터널 전단면과 하부 인버트 변화전체를 연속적인 선형(plot)으로 측정 터널전체의 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 위치까지의 지반거동 심도별 측정	정밀
지중변위측정	Probe 삽입식 또는 진동현식 침하센스	터널의 주변지반	• 터널주변의 이완영역 측정 • 안정성 검토	정밀
록볼트 측력측정	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 응력측정 • 수화열 및 양생과정 수축도	-
지중수평 변위측정	경사계 (Inclinometer)	인접구조물의 영향측선, 터널 인버트에서 최소 1D 깊이까지	• 터널 굴착으로 인한 주변지형의 횡적 거동 측정 • 인접구조물 영향예측	정밀





표 9. 터널 구간 계측기(계속)

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

## 2. 계측계획

### 2.1 계측계획의 수립

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

- 계측의 목적, 문제점 및 계측항목을 명확히 설정한다.
- 계측기기의 선정, 설치, 계측빈도 등을 신뢰도가 높도록 계획한다.
- 계측결과를 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 계측계획을 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

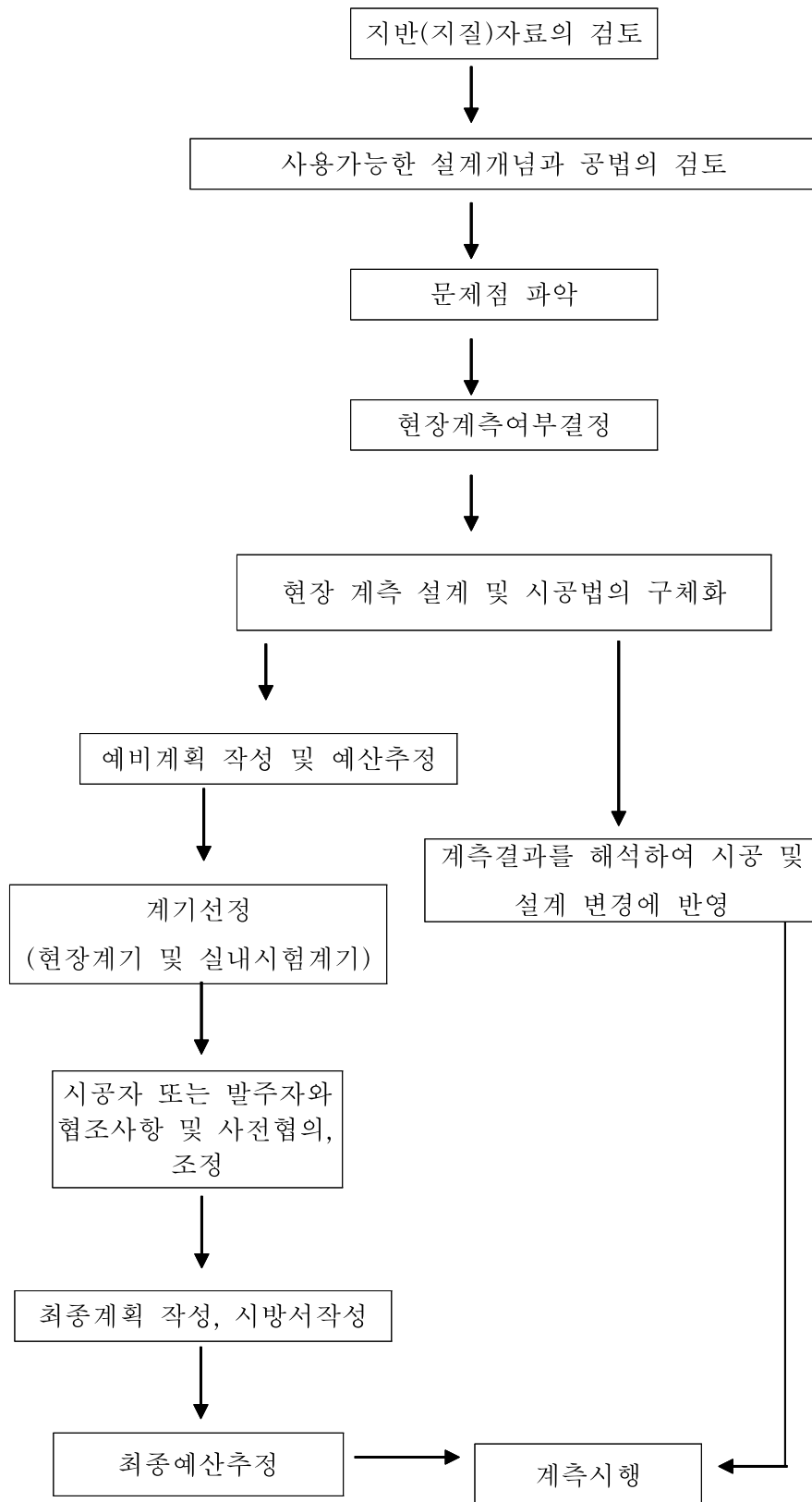


그림 12. 계측계획 흐름도



## 2.2 계측항목의 선정

계측항목 선정시는 다음과 같은 지반조건에 따라 계측항목을 선정해야 한다.

표 10. 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, 압편의 이완	· 터널내 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정	
연약지반 (팽창성지반 제외)	· 압괴, 압편의 이완, 붕괴	· 터널내 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 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정 · 지중변위 측정 · 록볼트 축력측정 · 숏크리트 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 관찰조사 · 내공변위 측정 · 천단침하 측정 · 지중변위 측정 · 지표침하 측정	· 지표(지반, 구조물) 관찰 조사 · 지중변위 측정 (경사계) · 록볼트 축력측정 · 숏크리트 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 계기 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 사전 정보획득과 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 유의해야 한다.

또한 기기의 이상, 고장을 항상 염두에 두어 한두개의 기기고장으로 전체 측정치가 무용지물이 되지 않도록 중요한 위치에는 기기의 수요에 항상 여유(Redundancy)가 있도록 해야 한다. 기기의 고장시, 또는 측정치가 계측범위를 초과할 것이 예상되지만 재조정(Resetting)이 불가능할 경우를 대비하여 예비기기도 준비해야 한다.

계측기기 선정시 일반적으로 유의해야 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 11>을 기준으로 해야 한다.

표 11. 내공변위측정의 측선수

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 <sup>주1)</sup>	4측선 또는 6측선 <sup>주2)</sup>	4측선 또는 6측선
분할 굴착	각 벤치마다 수평 1측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선 <sup>주1)</sup>	각 벤치마다 3측선 <sup>주2)</sup>	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 실시해야 한다.

이 표에서 제시한 측선수는 일반적인 경우이므로 각종 터널에 있어서 시공실적(계측자료)의 축적상황에 따라 측선수를 적절히 조정하는 것이 바람직하다. <그림 13>에는 측선배치의 예를 보여준다.

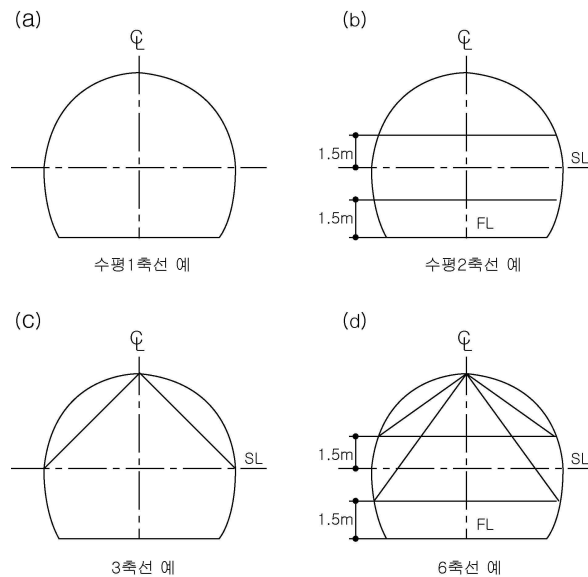


그림 13. 내공변위 및 천단침하 측정의 측선배치(복선터널의 경우)

#### 2.4.2 천단침하 측정

천단침하는 내공변위와 동일 단면에서 측정하고 그 측점은 가능한 한 굴진면에 근접하게 설치하는 것을 원칙으로 한다. 또한, 천단침하는 수평측량 등을 통하여 하향 방향의 절대 침하량으로 측정하여야 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 계측결과와 상호비교를 위하여 내공변위 측정, 천단침하 측정위치와 동일한 지점으로 하는 것이 바람직하다. 측정위치는 터널 중심선상의 지표면에 설치하여야 하나 현장 여건상 곤란할 경우에는 가급적 중심선에 근접하도록 설치해야 한다. 측정점의 배치는 터널의 규모, 시공방법, 토피두께 등에 따라 다르지만 일반적으로 지표침하의 경우 터널 축에 직각으로 거리별로 여러 개의 계기를 설치해야 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.

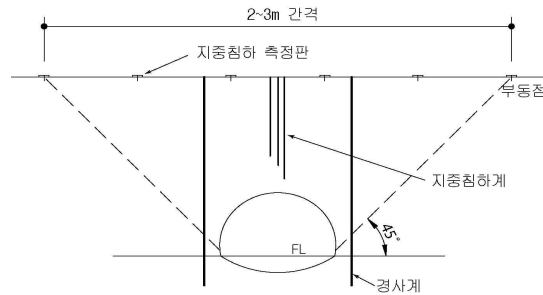


그림 14. 지표침하 및 지중침하 측정의 측정점배치 예

#### 2.4.4 정밀계측 중 터널내에 계기를 설치하는 항목

정밀계측의 여러 항목 중 계기를 터널내에 설치할 필요가 있는 항목(지중변위 측정, 록볼트 축력 측정, 숏크리트 응력 측정에 대해서는 1단면마다 3~5점을 표준으로 하지만, 그 배치는 여러 가지 터널의 적용 설계패턴에 의해 적정한 위치를 고려해야 한다. 단 록볼트의 타설 위치나 내공변위 측정용 핀의 위치에 가급적 가깝게 설치하는 것이 계측결과 해석에 유리하다. <그림 5.4>는 계기배치의 일례를 나타낸다.

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

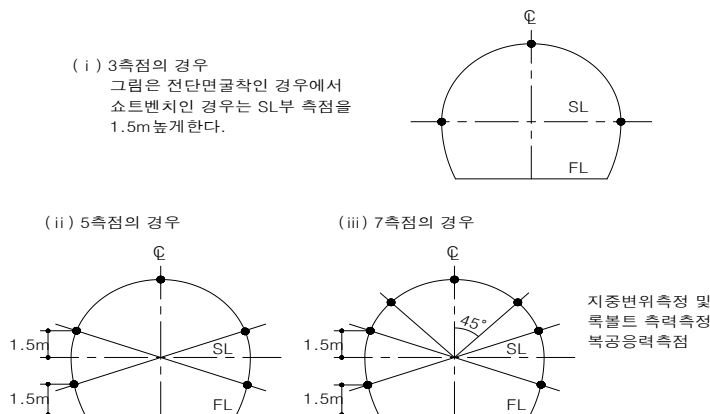


그림 15. 정밀계측의 계측기 배치(복선단면인 경우)

#### 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 중단해야 한다. 계측빈도는 아래 <표 12>를 표준으로 하여 실시하되 현장여건, 지질의 변화, 굴착방법, 작업시간, 설치간격 등을 감안하여 변경될 수 있다.

표 12. 계측간격 및 빈도의 표준

구분	계측항목	계측간격	배치	설치시기	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	수평2대각선4	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/50본)	1단면 5본	정착효과발생측시	-	-	-	
정밀 계측	지표 및 지중침하 측정	20~50m (200~500m)	터널상부 3~5개소	터널전방 (H+h <sub>1</sub> ) 혹은 2D	1회/일	1회/주	1회/2주	한단면 에 군 으로 설 치 계 측  · D : 터널굴착폭 · H : 토피고 · h <sub>1</sub> : 상반굴착고
	샷크리트 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	-	-	-	-	-	
	갱내탄성파 속도측정	500m	측선장 100~200m	-	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 15>과 같다

<표 12>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 13> 단계별 계측관리 기준(내공변위)은 지반 거동상태, 터널단면 크기, 시공 방법, 지보재량 등에 따라 결정되므로, 특정 기준치를 정확히 제시하기는 어렵기 때문에 상세 지반조사결과에 의한 설계 입력자료로 이론 및 수치해석과 혹은 유사 조건의 시공실적 결과를 참조하여 조정할 수 있으며, 내공변위의 수렴 후 측정기간은 변위가 클 경우는 2주간 측정하고 변위가 작은 경우는 1주간 정도 측정해야 한다.

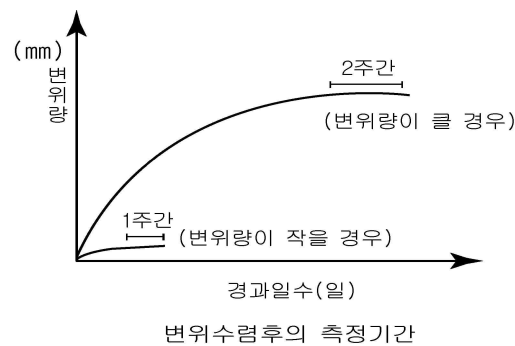


그림 16. 내공변위 수렴 후의 측정기간

표 13. 단계별 계측관리 기준

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 14> 일본 토비시마(飛島)건설(Tobishima corporation) 관리기준을 참조하여 대체할 수 있다.





표 14. 일본 토비시마건설 관리기준

지반조건 \ 관리기준		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	20 ~ 30mm	5mm/일 3일 계속	30 ~ 50mm
	점성토	30 ~ 50mm	10mm/일 3일 계속	50 ~ 70mm
팽창성지반		100mm	30mm/일 3일 계속	200 ~ 300mm
대응책		계측결과 현장의 상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정해야한다. 계측횟수를 많게 하고 주의해서 시공한다.		시공법의 변경, 보조공법의 추가, 지보재 추가 등의 대책을 세운다.

(3) 아래 <표 15>, <표 16>의 관리기준은 설계 시 참조 할 수 있는 값으로 제시된 것이다.

표 15. 오스트리아 Alberg터널의 관리기준

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

표 16. 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 17> 단계별 계측관리 기준(천단침하)은 지반 거동상태, 터널단면 크기, 시공 방법, 지보재량 등에 따라 결정되므로, 특정 기준치를 정확히 제시하기는 어렵기 때문에 상세 지반조사결과에 의한 설계 입력자료로 이론 및 수치해석과 혹은 유사 조건의 시공실적 결과를 참조하여 조정할 수 있다.

표 17. 단계별 계측관리 기준(천단침하)

주의레벨	관리기준	
	변위속도*	변위량
1 (주의단계)	• 변위속도가 5mm/일 이상	• 설계예상치
2 (경고단계)	• 변위속도가 10mm/일 이상	• 설계예상치 × 1.25
3 (보강단계)	• 변위의 가속	• 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 18> 천단침하의 관리기준(일본토질공학회, 1986.2)을 참조하여 대체할 수 있다.

표 18. 천단침하의 관리기준(일본토질공학회, 1986)

(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 수립해야 한다. 또한 횡방향의 지표침하곡선이 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 19. 터널계측 관리기준 단계별 대응체계

구 분	관리기준	계측관리	시공관리 및 대책
정상시	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 • 계측체제의 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(슛크리트 가인버트 설치 등)
주의레벨 3단계	3차 관리기준치 < 계측치	• 책임기술자에게 보고 • 계측체제의 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(슛크리트 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 변위를 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 천단부근의 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 측정해야 한다.

특히  $H < 2D$ 의 경우나 토피가 낮은 토사터널에서의 지표침하 측정은 터널의 내공 변위 측정보다도 중요한 계측이 된다.

지표에는 터널의 중방향 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 점검해야 한다.

## 3.2 내공변위 측정

### 3.2.1 측정

- 측정위치에 볼트를 매설하여 고정시킨 후 양 볼트에 내공변위측정기로 측정해야 한다.
- 측정시마다 볼트와의 접촉상태가 동일하고 일정 장력유지가 필요하다.
- 15~30m 간격으로 막장부후방 최소한 1m 후방에 설치하며 변위량에 따라 측정 빈도를 증감한다.
- 변질지반, 팽창성지반, 토피가 얇은 지반에서는 측정간격과 빈도를 조밀하게 측정해야 한다.
- 수평변위측정을 우선 시행하고 대각선 측정을 필요에 따라 시행해야 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 숏크리트를 추가 타설해야 한다. 지반구조물, 토피의 깊이, 굴착공법 등에 따라 평가기준



치와 변위허용량은 다르므로 정량적으로 정하는 것이 곤란하나 현장의 상황을 잘 고려한 후 안정성과 경제성의 일치점을 구하여 평가해야 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 20. 내공변위 측정 및 천단침하측정의 측선배치 예

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 측정해야 한다.

측정시기는 막장부 통과후 가급적 빠른 시간, 늦어도 1~2시간 이내인 초기에 측정을 시행해야 한다. 측정은 수준측량으로 레벨을 사용하여 수준점을 기준으로 절대고를 구하며 측정정밀도는  $\pm 1\text{mm}$  정도라야 하며, 측정시간은 변위가 수렴할 때까지 한다.

### 3.3.2 기록수집

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

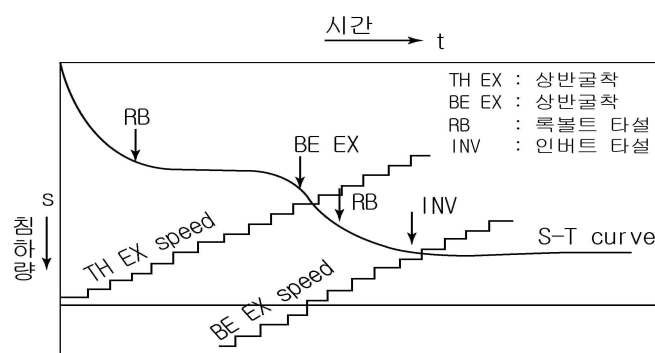


그림 17. 침하량의 경과시간 및 막장진행과의 관계

### 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 확인해야 한다.

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

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

#### 3.4.2 평가

하중-변위 곡선을 그려 인발내력을 구해야 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 사용해야 한다. 암반강도가 낮아서 소정의 인발 저항이 얻어지지 않으며 록볼트의 길이를 길게 할 필요가 있다.

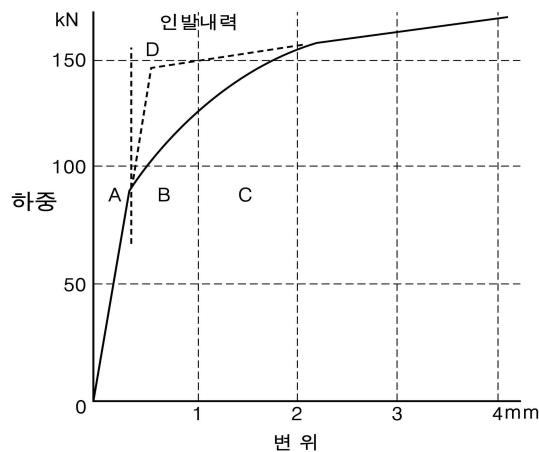


그림 18. 인발시험의 하중-변위곡선

### 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 파악해야 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 행해야 한다.

## 3.6 지중 수평변위 측정

### 3.6.1 설치

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

### 3.6.1 측정

- 경사계의 보호마개를 열고 Pully Assembly를 설치해야 한다.
- 감지기를 케이싱의 홈방향으로 하부까지 내린다.
- 지시계의 스위치를 켜고 0.5m씩 표시된 케이블을 올리면서 측정한다.
- 측정값은 조작자가 원거리 스위치를 누를 때마다 자동적으로 휴대용 컴퓨터에 기록해야 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 해야 한다.
- 진동현식인 경우는 케이블이 앵커에 직결되어 있어 삽입시 파손에 주의를 요하며 케이블 배선은 발파 및 기계작업 등을 고려하여 보호해야 한다.

#### 3.7.2 측정

- 기계식 앵커를 사용하는 경우 록볼트와 Extensometer의 조합으로 26mm의 앵커 루트 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 쏫크리트 응력측정

#### 3.8.1 측정

##### (1) 압력셀 사용시

쏫크리트를 타설전에 1개 단면에 각 방향으로 5조씩 매설한 후에 케이블을 터널 양측 하부의 연결장치에 연결시킨 후 쏫크리트를 타설해야 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 산정해야 한다.

##### (2) 진동현 방식 변형 게이지 사용시

쏫크리트 타설전에 센서(2개 1조)를 매설한 후 케이블을 터널 양쪽으로 유도한 다음 쏫크리트를 타설해야 한다.

측정방법은 진동현용 측정기로 측정하며 쏫크리트의 응력변화 상태는 변위로 측정된 값을 하중으로 환산해야 한다.

특히 센서 매설시 쏫크리트가 완전부착되도록 하여야 하며 보조장비를 활용하여 와이어메쉬 및 원지반에 부착시켜 정확한 각도로 유지토록해야 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 수집해야 한다.

### 3.8.3 평가

측정결과 해석은 내공변위, 지중변위 등의 결과와 종합 판단하는 것이 좋으며 일반적으로는 내공변위 결과와 종합하여 숏크리트 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 숏크리트를 제거한 터널벽에 부착시켜 파묻어야 하며 수진점 간격은 2~5m로 하는 것이 바람직하다.

### 3.9.3 측정 방법

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

측정시에는 터널내의 전력선, 동력선이나 환풍기 등의 진동에 의한 소음이 영향을 주지 않도록 하며 항상 동일한 조건의 측정이 되도록 세심한 주의를 해야 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 항타시에 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 물적 장애와 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 21>과 같다. 단, 현장의 적정주파수 대역 미파악시에는 보수적인 기준치를 적용해야 한다.

표 21. 구조물 손상기준 발파진동 허용치

구 분	구조물 형 식	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
	구조물 종 류	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 22. K값에 따른 인체의 감응 정도

K	분 류	일에 대한 영향
0.1	느낌 한계	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

K	분 류	일에 대한 영향
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 이들에 대한 종류와 크기는 <그림 19>과 같다.

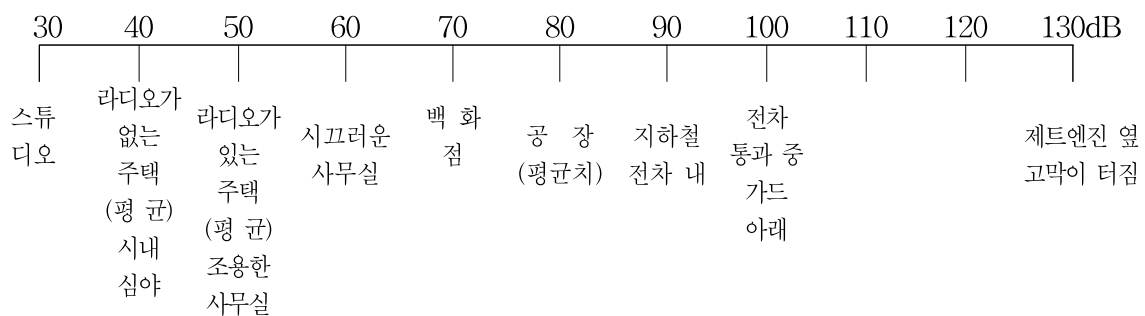


그림 19. 소음과 크기에 따른 대상의 상태

일반적으로 건설공사에 사용되는 기계의 소음레벨과 도달거리의 일레는 <표 23>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 24>과 같다.

표 23. 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(引上)	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 24. 소음보정표

항 목	내 용	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, 자연관경보전지역, 관광휴양지역, 취락지 역 중 주거지구	0
	다. 취락지구 중 주거지구외의 지구, 경지지역, 개발촉진지 역, 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 가치 있는 도구로서 특히 아주 어려운 지반공학적 건설을 수행할 때에 효과적이다.

3차원 변위 측정기는 주로 터널 굴착동안 계측단면 주변에 위치한 계측점들의 절대변위를 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 계측편(Target) 설치

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

###### ② 계측기의 설치위치

테오도라이트는 계측편(Target)을 계측하기 위해 가장 좋은 시계를 확보할 수 있

고 작업진행에 방해를 주지 않는 위치에 설치해야 한다.

### ③ 측량

데오도라이트를 정확히 거치하고 시차를 제거한 후 계측편(Target)에 맞추고 측량기 옆에 장착된 스포트라이트를 계측편(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  $\pm 2.0\text{mm}$  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 계측편(Target)의 좌표를 터널좌표계로 계산하며 계측점의 초기치와의 차이를 산정하여 출력해야 한다. 계측편(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 계측편(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 수행해야 한다. 소프트웨어는 자료 저장, 자료 수정, 자료 및 프로그램 전송, 결과의 편집, 요구하는 계측점의 좌표 및 이론상의 굴착선과의 반경방향 거리계산은 물론 관리계측 후 좌표변환을 처리해야 한다.

### ⑥ 결과의 출력

계측결과의 평가 및 출력은 IBM-PC 혹은 호환기종으로 가동되는 컴퓨터 프로그램으로 수행해야 한다. 계측결과는 그래프의 형태로 출력되며 시간 경과에 따른 계측편(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 Helium Neon 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 편차 조사, 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 형식이다.

#### (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 숙지해야 한다.

#### 4.2 계측결과의 정리

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

표 25. 계측결과 판단사항

구 분	계측항목	판단사항	계측 구분
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, 숏크리트 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, 측압계수( $K_0$ ) 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 막장부 사진을 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 해야 한다.

##### (6) 록볼트 인발시험기록

인발시험 위치도와 함께 “하중-변위”곡선을 그려서 정리해야 한다.

##### (7) 지중변위 측정기록

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

##### (8) 록볼트 축력측정 기록

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

##### (9) 숏크리트 응력측정 기록

데이터 기록지로 기록, 응력의 시간경과 변화와 막장진행에 따른 응력변화 그래프

를 각각 작성하여 정리해야 한다.

(10) 지중침하 측정기록

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

(11) 수평변위 측정

터널굴진에 따른 지중의 수평방향 변위를 측정일별로 도표와 그림으로 정리해야 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(-shotcrete 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, shotcrete, 록볼트, 강재지보공 등의 시공시기를 함께 기록해야 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 (대), (라)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 설정해야 한다. 이 설계조건 하에서 채택된 구조 모델이 어떤 거동을 하는가를 해석하여 변위, 변형률, 응력의 관점으로부터 설계의 적정성을 평가해야 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 지반 조건 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 연구되고 있다. 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 노력해야 한다.

### (1) 기본적인 고려 사항

계측결과를 시공관리 목적으로 활용하는 순서는 <그림 20>와 같다.

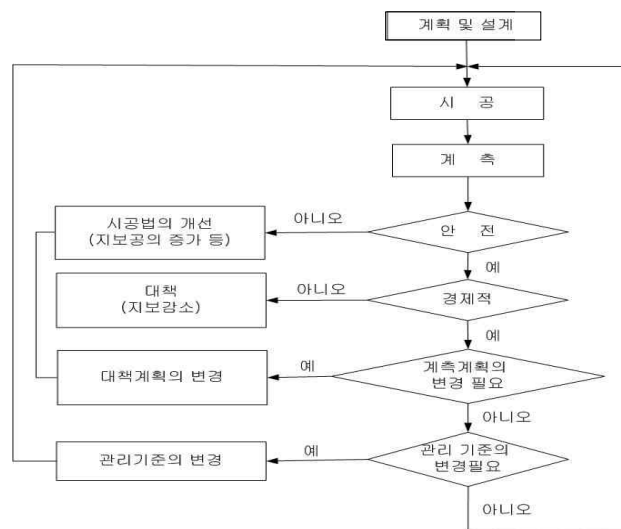


그림 20. 계측결과를 시공관리에 활용하는 순서

계측결과를 설계, 시공에 반영시키는 목적은 첫째, 시공의 안전성을 확인하고 둘째, 경제성을 확보하는데 있다. 이를 위해서는 계측 결과를 신속하고 정확하게 반영시키지 않으면 안된다. 신속한 반응을 위해서는 터널 진장에 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 20>에 나타낸 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 초기 단계의 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 1회굴착길이, 록볼트 길이 및 설치간격, 숏크리트 두께 및 종류, 강지보공 형상 및 방법, 복공시간 및 변형여유량, 인버트 폐합 콘크리트라이닝의 필요성과 효과

### ③ 지표침하 및 지중변위평가

토피가 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, 본수, 정착방법의 타당성, 숏크리트는 두께와 시공시기, 단면폐합 효과 등

### ⑤ 주변영향평가

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

## (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 계측결과와 차이가 클 경우, 실제 막장부의 관찰 결과를 경험적이고 정량적인 평가 후 시공전 설계의 입력자료를 수정하고 보완하여 재설계를 시도해야 한다. 또한 시공 중 변화된 지반의 강도 특성치 등 조건변화를 고려하기 위하여 필요한 별도의 지반시험을 수행하고 수치해석의 입력자료를 사용해야 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 시행해야 한다.

- 제조업자가 제공한 매뉴얼로부터 일상 유지관리 절차계획을 수립해야 한다.
- 터미널은 오염과 습기로부터 보호한다. 현장여건에 따라 보호방책을 설치해야 한다.
- 설치된 기기와 측정장치의 보정상태를 조사해야 한다.
- 배터리의 규칙적인 조사를 통해 충전 및 교체를 적기에 실시하고 기기의 일상 점검을 통해 기기오염 및 고장시 즉각 보수, 교체해야 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 설치해야 한다.
- 계측장비 운반시는 무거운 시공장비와의 구별을 위해 눈에 띄는 색깔로 칠을 한 후 시행하는 것이 바람직하다.



- 휴대용 장비의 경우, 청결성과 건조상태를 유지하도록 조치해야 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 수립해야 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 있을 경우, 지하수위와 지질학적인 문제 예상지역 등 터널완공 후 주변여건과 지반조건상 터널 및 주변에 악영향이 예상되는 경우에는 준공 후 유지관리시의 안전성 확보를 위한 장기 계측계획을 수립해야 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 센서위치 또는 현장에서 휴대용 장비를 이용하여 필요시마다 계측후 그 결과를 전산기에 입력하여 처리해야 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 수행되는 방식이다.

### 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 최소화 가능하다는 장점이 있다. 자동계측에서는 정적 자동계측과 동적 자동계측으로 구분되며, 공회 온라인 신호전달 체계하에서 스스로 모니터링하고, 평가하여 변화되는 상황에서도 예정된 자기기능을 지능적으로 수행할 수 있는 기능을 제공한다. 정적 자동계측시스템은 측정 및 제어장치, 기억 장치, 신호변환장치, 멀티플렉싱장치로 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 특성에 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





## RECORD HISTORY

Rev.0('12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

Rev.1('13.6.?) 감사원 “세출예산 구조조정 실태 감사” 과정에서 지적된 “계측기 설치개소”를 현장여건 및 연약지반상태를 고려하여 조정토록 문구를 삽입하고 “지표 침하판 등” 계측기 배치도 수정

Rev.2('14.1.?) 철도설계기준(국토교통부고시제2013-757호, '13.12.5)이 개정 고시됨에 따라 개정내용을 반영