

제 11 장 계 측

11.1 계측 계획

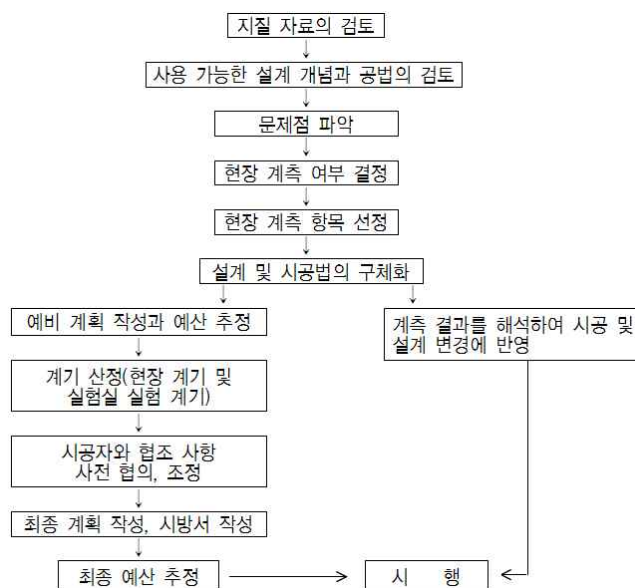
11.1.1 계측 일반사항

- (1) 터널 계측은 터널 굴착에 따른 주변 원지반, 주변 구조물 및 각 지보 부재의 변위와 응력의 변화를 알기 위한 방법 또는 그 행위를 말한다.
- (2) 터널에 발생하는 응력이나 지반 강도는 굴착 공법과 지보의 시공 방법에 의해서도 변화하므로 사전에 터널 및 지반의 거동 특성을 명확하게 파악, 예측한다는 것은 거의 불가능하다.
- (3) 따라서 터널 시공시 각종 계측을 실시하고 계측 결과를 종합적으로 분석, 평가하여 설계, 시공에 반영해 나가는 일은 공사의 안전성과 구체적인 계측 자료의 확보 차원에서 매우 중요하다.

11.1.2 계측의 목적

- (1) 안전성의 확인
 - ① 주변 지반의 거동 파악
 - ② 지보재의 효과 파악
 - ③ 반복적인 자동차 주행 구조물로서의 터널 안전성 확인
 - ④ 주변 구조물의 영향 파악
- (2) 경제성의 확보
 - ① 설계, 시공에 계측 결과를 반영하여 경제적인 공사 유도
 - ② 향후 공사 계획시의 기초 자료로 활용
 - ③ 소송, 보상을 위한 근거 자료로 활용

11.1.3 계측 계획의 수립



<그림 11.1.1> 계측 계획 절차 흐름도

11.1.4 계측 계획 수립시 유의 사항

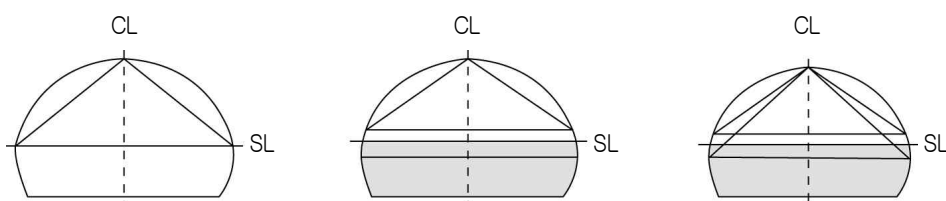
- (1) 계측의 목적, 문제점 및 계측 항목을 명확히 설정한다.
- (2) 계측 기기의 선정, 설치, 계측 빈도 등을 신뢰도가 높도록 계획한다.
- (3) 계측 결과는 신속히 분석하여 시공에 반영되도록 한다.
- (4) 긴급 사태에 신속히 대응하기 위해 계측 결과의 분석 후 취할 조치의 내용과 범위를 사전에 고려한다.

11.1.5 계측 항목

- (1) 계측 항목은 그 필요도에 따라 계측 A, 계측 B로 구분한다.
 - ① 당면한 시공 관리를 위하여 반드시 실시하여야 할 항목은 계측 A
 - ② 지반 조건을 고려하여 필요에 따라 추가하여 선택하는 항목을 계측 B로 정한다.
- (2) 계측 A(일상의 시공 관리상 반드시 실시해야 할 항목)
 - ① 갱내 관찰 조사
 - ② 내공 변위 측정
 - ③ 천단 침하 측정
 - ④ 지표 침하 측정
 - ⑤ 록볼트 인발 시험
- (3) 계측 B(지반 조건에 따라 계측 A에 추가하여 선정하는 항목)
 - ① 지중 변위 측정
 - ② 록볼트 축력 측정
 - ③ 라이닝 용력 측정
 - ④ 지중 침하 측정
 - ⑤ 갱외 측정
 - ⑥ 갱내 탄성파 속도 측정

11.1.6 계측기의 배치

- (1) 터널내 관찰 조사
 - ① 막장 관찰은 원칙적으로 각각의 막장에 대하여 실시하는 것으로 한다.
 - ② 관찰 기록 양식에 1회 진행 때마다 막장 상태를 기록하는 것으로 한다.
- (2) 내공 변위 측정, 천단 침하 측정
 - ① 내공 변위 측정과 천단 침하 측정은 동일 단면에 대하여 실시하는 것을 원칙으로 한다.
 - ② 두 항목 중 한 항목에 중점을 두어 여러 회 측정해야 할 경우는 예외로 할 수 있다.



<그림 11.1.2> 내공변위 계측의 측선 배치 예

(3) 지표 침하 측정

- ① 토피가 얇은 터널은 통상 토사 터널이나 연암 터널이 되는 경우가 많고, 큰 지표 침하가 발생하는 경우가 많다.
- ② 따라서, 터널 및 주변 지반의 안정성을 확보하기 위해 지표 침하 측정은 실시되어야 한다.
- ③ 토피를 기준으로 한 측정 간격(종단 방향)의 표준은 [표 11.1.4]와 같다.
- ④ 또 하나의 지표 침하 측정의 측점은 내공 변위 측정, 천단 침하 측정 위치와 동일한 지점으로 하는 것이 바람직하다.

[표 11.1.4] 지표 침하 측정의 터널 종단 방향 측정 간격

터널 h와 터널 굴착폭 D의 관계	측점 간격
$2D < h$	20~50m
$D < h < 2D$	10~20m
$h < D$	5~10m

주 1) 시공 초기 단계나 지질 변화가 심한 경우나 침하량이 큰 경우는 제시한 수치 중에서 작은 값을 취한다. (상황에 따라서는 더욱 좁게 한다.)

2) 영향을 받을 가능성이 있는 구조물의 주변에서는 간격을 좁게 한다.

3) 어느 정도 시공이 진행되고 지질이 양호하여 변화가 적고 침하량도 적은 경우에는 제시한 수치 중에 큰 값을 취한다. (상황에 따라서는 더욱 크게 할 수도 있다.)

(4) 계측 B

- ① 계측 B는 지반 거동의 파악과 함께 그 결과로부터 계획 설계의 타당성 혹은 초기 단계의 실시 설계를 확인하고 그 후의 설계, 시공에 반영하는 일을 주 목적으로 한다.
- ② 이를 위해 계측 B는 시공 초기 단계에서 실시하는 것이 바람직하다.
- ③ 계측 단면은 대표적인 지질 구간에서 설정하는 것을 원칙으로 한다.
- ④ 단층 등의 특수 구간에서 계측 B를 실시하는 것은 계측 결과의 운용상 바람직하지 않다.

11.1.7 측정 빈도

(1) 내공 변위와 천단 침하의 측정

- ① 기본적으로 변위 속도(1일당 변위량) 및 막장으로부터의 거리에 따라 정 한다.

[표 11.1.5] 내공변위, 천단침하 측정빈도 (D:터널 굴착폭)

측정 빈도	변 위 속 도	막장으로부터 거리
1~2 회/일	10 mm/일 이상	0~1 D
1 회/일	10~5 mm/일	1 D~2 D
1 회/2일	5~1 mm/일	2 D~5 D
1 회/주	1 mm/일 이하	5 D 이상

- ② 변위 속도에 의한 측정 빈도와 막장으로부터의 거리에 의한 측정 빈도 중에서 빈도가 많은

쪽을 택하는 것을 원칙으로 한다.

③ 변위의 경향이 일정한 경우에는 [표 11.1.5]에 나타낸 빈도에 따르지 않아도 좋다.

④ 내공 변위 측선을 측선의 경우

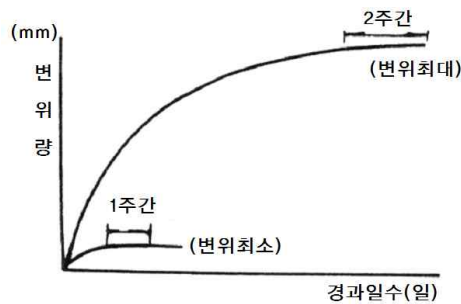
가. 변위 속도는 다르지만 변위 속도가 가장 큰 측선을 고려한 빈도에 맞추다.

나. 같은 단면 내에서는 전측선의 측정 빈도를 같게 한다.

⑤ 벤치 컷 공법의 경우

가. 막장의 접근에 따라 상반 측선의 측정 빈도를 높게 하여 변위의 변화를 파악할 필요가 있다.

나. 단선 병렬 터널의 경우나 측벽 도강 방식인 경우는 선진도강의 측정 빈도를 도강이 접근함에 따라 증가시킬 필요가 있다.



<그림 11.1.3> 측정 기간의 고려 방법

⑥ 변위량이 작은 터널의 경우

가. 일반적으로 변위의 수렴도 빠르다.

나. 변위량이 일정치에 수렴한 후 1주일 정도 1회/2일의 빈도로 안정 상태를 확인한다.

⑦ 반대로 변위량이 큰 터널(내공 변위량이 복선 단면에서 50mm 이상, 단선 단면에서 25mm 이상)의 경우

가. 변위량이 일정하게 수렴한 후

나. 2주간 정도 1회/2일 빈도로 측정하여 확인해야 한다.

⑧ 굴착 후 2개월 이상 경과해도 변위가 수렴하지 않는 것은 변위량 100mm이상의 터널이고, 1개월 이상에 수렴하는 것은 변위량이 대개 50mm 이하의 터널이다.

⑨ 팽창성 지반에서 장기간(굴착 후 2개월 이상) 변위가 수렴하지 않은 경우

가. 계측상 1mm/30일~3mm/30일을 수렴치로 간주한다.

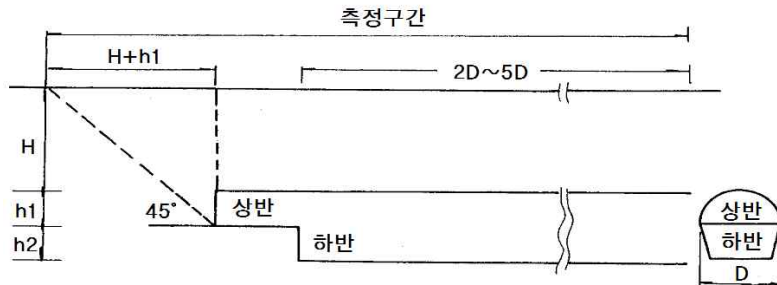
나. 단, 이 값을 콘크리트라이닝의 타설 기간으로 판단하기 위해 사용하는 경우 미리 설계상의 검토를 해둘 필요가 있다.

(3) 지표 침하 측정

① 지표 침하 측정은 막장 전방의 거리가 $H+h_1$ (H :토피, h_1 :상반의 높이) 또는 2D로 되는 시점 (큰 쪽을 택함)에서부터 측정을 개시한다.

② 굴착 진행에 따라 지표면 침하가 없을 때까지(일반적으로 막장으로부터 거리가 2D~5D) 측정한다.

- ③ 단, 시공 실적에 근거하여 측정 개시점에서 침하가 발생하는 것으로 판단되면 더욱 빨리 측정을 개시한다.
- ④ 측정 빈도는 1회/(1~2일)임을 원칙으로 한다.



<그림 11.1.4> 지표 침하의 측정 구간(종단 방향)

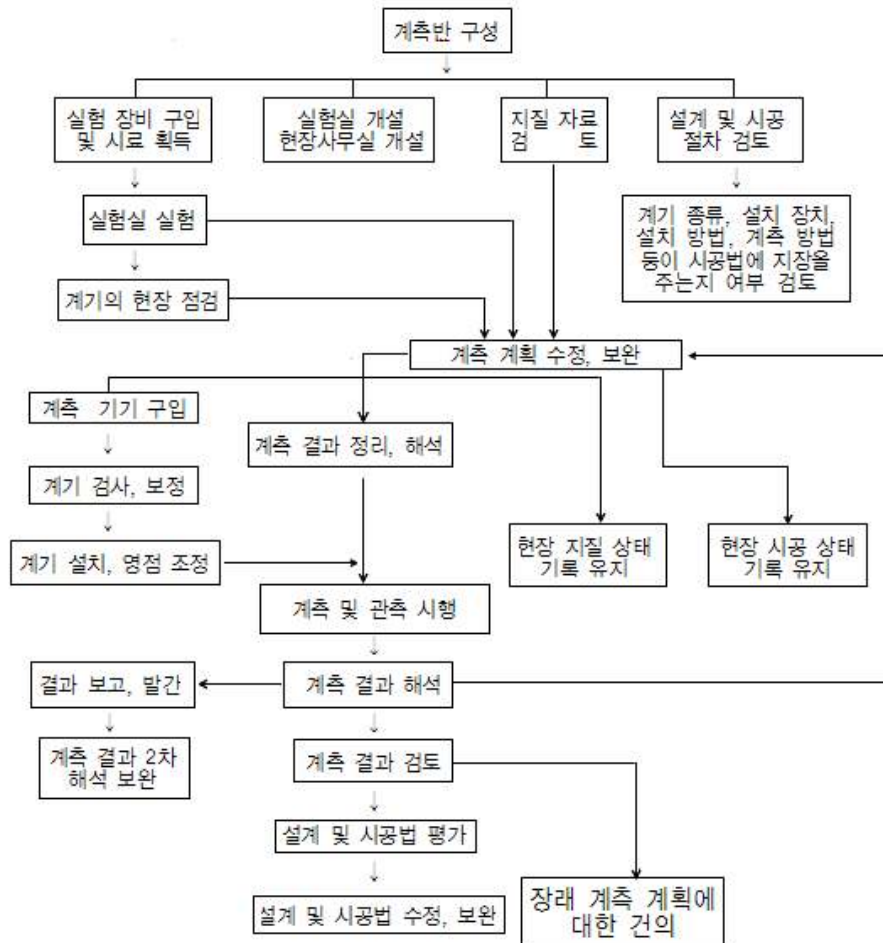
(4) 계측 B

- ① 3개 항목에 대해서는 동일 단면에서 측정되고 있는 계측 A의 내공 변위 측정, 천단 침하 측정의 측정 빈도와 같은 빈도로 측정한다.
- ② 계측 B중 지중 변위 측정, 록볼트 축력 측정, 라이닝 응력 측정이 해당된다.

11.2 계측 관리

11.2.1 계측 관리 체제

(1) 관측, 계측 관리의 시행 절차



<그림 11.2.1> 계측 관리의 시행 절차도

(2) 유의해야 할 사항

- ① 계측 결과는 반드시 공사의 진행 상태와 기온, 강우량 등 중요한 환경 상태와 함께 기록하며, 가급적 일목요연하게 도표로 정리한다.
- ② 유능한 기술자로 구성된 계측반이 계측을 전담해야 하며 계측요원은 현장에 상주한다.
- ③ 계측 결과는 즉각 검토, 정리, 분석한다.
- ④ 계측반 책임자의 보고 체계와 책임 한계를 분명하게 한다.

11.2.2 계기의 유지 관리

- (1) 제조업자 측에서 제공한 매뉴얼로부터 일상 유지 절차를 수립한다.
- (2) 터미널은 오염과 습기로부터 보호한다.

- (3) 현장 여건에 따라 보호방책을 설치한다.
- (4) 설치된 기기와 측정 장치의 보정 상태를 조사한다.
- (5) 고장수리지침에는 파괴 형상, 조짐, 수리 등에 대한 내용이 포함되어 있어야 한다.
- (6) 섬세한 기기의 경우 패드와 같은 충격 완화제를 설치한다.
- (7) 계측 장비 운반시는 눈에 띄는 색깔로 칠을 한 후 시행하는 것이 바람직하다.
- (8) 휴대용 장비의 경우, 청결성과 건조 상태를 유지하도록 조치해야 한다.
- (9) 기계식 등의 측정 장비는 주기적으로 기름칠을 하고, 전자식 측정 장치의 경우 청결하고 건조한 상태를 유지시킨다.

11.3 계측 시행

11.3.1 터널내 관찰 조사

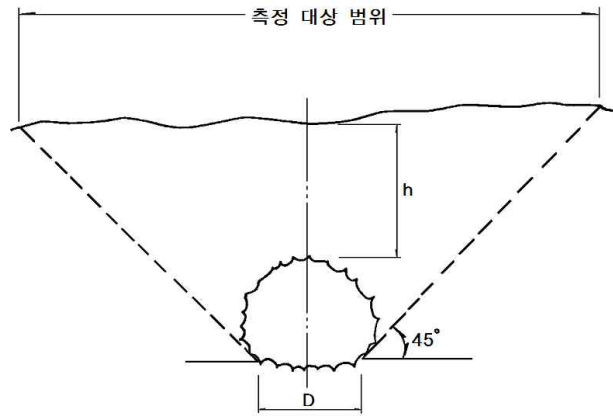
- (1) 막장 관찰
 - ① 막장 관찰은 원칙적으로 각각의 막장에 대해 실시한다.
 - ② 단, 지질 변화가 거의 없는 경우에는 1일에 1막장 정도면 좋다.
- (2) 기 시공 구간의 관찰
 - ① 록볼트
 - 가. 타설 위치, 방향
 - 나. 록볼트, 지지판의 이완
 - 다. 지지판이 지반에 묻힌 정도
 - 라. 두부의 파단
 - ② 슛크리트
 - 가. 두께, 지반과의 밀착
 - 나. 균열(발생 위치, 종류, 폭, 길이 등)
 - 다. 누수 발생 위치의 상태 및 누수량
 - ③ 강지보재
 - 가. 변형, 좌굴 위치, 상태
 - 나. 지반에 매입된 정도
 - 다. 가축(可縮) 지보공의 축소 상태

11.3.2 지표침하 측정

- (1) 적용범위
 - ① 천단침하 측정과 같이 지반의 안정확인 및 지보효과 파악
 - ② 인접 구조물에 대한 피해 발생의 사전 방지
 - ③ 침하 방지를 위하여 시공된 대책공의 확인
 - ④ 주변 지반의 이완영역을 추정시에 있어서의 유용한 자료 확보

(2) 측정방법

- ① Level로 측정한다.
- ② 기준점은 움직임이 없는 곳으로 선정한다.



<그림 11.3.1> 지표침하 측정 대상 범위

11.3.3 내공 변위 측정

(1) 측정 방법

- ① 목적에 맞는 정밀도를 보장할 수 있는 내공 변위 측정용 기기를 이용한다.
- ② 측점간 거리를 일정 장력을 주어 계측한다.

(2) 초기치

- ① 굴착 후 가능한 한 조기에 계측점을 설치한다.
- ② 초기 치는 12시간 이내, 늦어도 24시간 이내에 측정하거나 다음 굴착 때까지는 하여야 한다.

(3) 계측점

- ① 계측점은 계측 도중 장력에 의한 움직임이 없도록 설치한다.
- ② 인력, 장비 등에 손상되지 않도록 견고하게 설치해야 하며 두부를 보호한다.

11.3.4 천단 침하 측정

(1) 측점

- ① 내공변위 측선이 있는 경우, 천단의 내공변위용 측점을 이용하는 것이 좋다.
- ② 변위가 큰 지반의 경우와 편압이 현저한 경우에는 아치부에 좌우 측점을 설정하여 침하를 측정하는 것이 바람직하다.
- ③ 강지보재를 이용하는 경우에 침하가 크게 발생하면, 적당한 비율로 강지보재에도 측점을 설정하는 것이 바람직하다.
- ④ 팽창성 지반의 경우는 현장 기술자의 판단에 따라 위치를 선정하고 측점을 설치하여 계측한다.

(2) 측정법

- ① 측정은 수준 측량으로 시행한다.
- ② 갱외나 갱내에 설치한 수준점을 기준으로 절대 높이(표고)를 구한다.

(3) 평가시의 주의

- ① 토피가 얇은 경우는 지표 침하를 우선 좁은 간격(중단 방향)으로 측정한다.
- ② 막장 전방의 변위를 제어하도록 천단 침하 측정도 병행하여 관리한다.

(4) 계측 결과의 정리

- ① 천단 침하의 계측 결과는 내공 변위와 병행하여 기록한다.

11.3.5 록볼트 인발 시험

(1) 인발 시험은 다음의 항목을 변수로 하여 비교, 검토한다.

- ① 정착 재료 및 정착 재료의 재령
- ② 록볼트 형상 및 재질
- ③ 록볼트 길이
- ④ 기타의 볼트 직경, 천공경의 관계, 천공 방법, 프리스트레싱의 유무 등

(2) 인발 시험의 재하 속도

- ① 일반적으로 10kN/min로 한다.
- ② 시험은 록볼트 시공후 소정의 시간이 경과한 시점에서 실시한다.

(3) 록볼트 인발시험 기준¹⁾)

- ① 지반강도, 절리, 균열상태 등을 고려하여 사전에 인발내력시험을 실시한다.
 - 가. 인발내력의 80%에 달하면 합격
 - 나. 인발내력은 설계인발강도를 만족
- ② 암질이 불량하여 소정의 인발력이 얻어지지 않거나 과도한 변위가 발생하는 구간
 - 가. 인발내력시험을 재실시하고 충전재료의 적정성 검토
 - 나. 록볼트 길이 증가, 록볼트 추가 시공 등의 조치 시행
- ③ 인발시험시 발생 변위
 - 가. 5mm 이내가 좋음.
 - 나. 자체 변위관리 기준 설정

11.3.6 지중 변위 측정

(1) 적용범위

- ① 내공변위와 천단침하의 측정결과와 연관하여 최심부 앵커의 변위 여부를 판단
- ② 터널 굴착면 주변 지반의 심도별 반경 방향 변위를 측정
- ③ 계측 결과로부터 지반이완 영역의 범위를 구한다.

(2) 측정방법

- ① 통상 하나의 시추공에 여러 개의 측점을 측정할 수 있는 지중변위계를 이용하여 측정한다.
- ② 터널 측벽과 측정 앵커간의 상대변위로써 측정
- ③ 측정 앵커는 확실하게 지반에 정착되도록 한다.

1) 터널지보공 관련 품질기준 개정(잠정) 및 시공시 유의사항, 도연재 15404-31906, 2002.10.14

11.3.7 록볼트 축력 측정

(1) 측정 방법

- ① 변형 게이지를 록볼트에 부착하여 전기적으로 변형을 측정하고 축력을 구하는 방법이다.
- ② 충전 모르터 등의 경화열에 의한 영향을 제거하고 더미 게이지 (dummy gauge)를 내장하고 표면 부착 저하 방지를 위한 마무리가 필요하다.
- ③ 같은 장소에 측정점을 설치하고 로드 등에 의한 구간 길이의 변화를 기계적으로 측정하는 방법으로 실제 시공하는 패턴 볼트와 같은 모양으로 보링공에 변형이 생겨 휨응력이 발생하므로 이 같은 영향을 제거할 수 있다.
- ④ 긴 볼트를 계속하여 추가 설치하는 경우 계측 볼트도 이와 동일하게 타설할 수 있는 구조로 하는 것이 바람직하다.
- ⑤ 측정점은 볼트 길이에 따르지만 3~4m 길이에 5~7점 정도면 상세한 축력 분포를 얻을 수 있다.

(2) 계기 설치시 주의 사항

- ① 보링공 내의 모르타르는 선단까지 충분히 충전할 것
- ② 두부에서의 정확한 축하중 측정을 위해서는 압력 지지판과 계측 볼트가 직각이 되도록 한다.
- ③ 지반과의 간극은 돌이나 급결 모르타르로 정형시킨다.
- ④ 발파 등에 의한 계기 부주의 파손을 방지하기 위한 대책 수립 필요

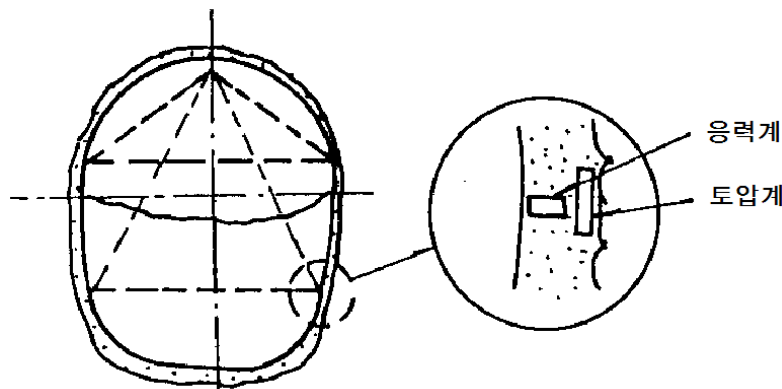
11.3.8 라이닝 응력 측정

(1) 1차 라이닝 응력을 측정하는 방법

- ① 슛크리트 시공시에 계기(응력계, 토압계 등)를 매설하는 방법
- ② 슛크리트 표면에 측정점을 설치하여 표면 변위로부터 응력을 산출하는 방법

(2) 계기 매설법

- ① 터널 주변 지반으로부터 슛크리트에 작용하는 배면 토압과 슛크리트 내에 발생하는 응력을 매설된 계기에 의해 직접 측정하는 방법이다.



<그림 11.3.2> 계기를 매설하는 방법

- ② 토압계는 슛크리트 시공전에 지반을 모르터, 석고 등으로 표면처리하고 여기에 밀착시켜 설치한다.

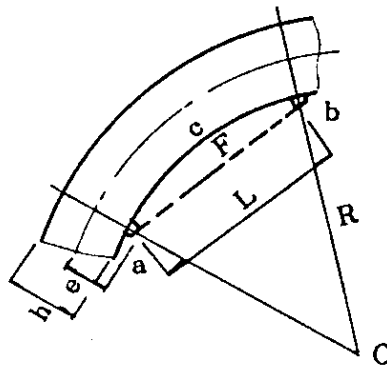
- ③ 응력계는 접선방향 응력을 측정할 수 있도록 금속류 등을 이용하여 소정의 위치에 고정 시킨다.
- ④ 쏘크리트는 계기를 설치한 후 공극이 생기지 않도록 신중하게 타설하여야 한다.
- (3) 표면 변위에 의한 방법

- ① 쏘크리트의 표면에 설치한 변위 측정점에 의해 쏘크리트의 축 변형과 휨 변형을 구하고 내부에 발생하는 축력(N)과 휨모멘트(M)를 산정하는 방법이다.

$$K = \frac{8f}{L^a} = \frac{l}{L} + \frac{8ef}{L^a} \quad [\text{식 11.3.1}]$$

$$N = \frac{lEA}{L}, \quad M = KEI$$

여기서, ℓ 은 L의 변화량, f는 F의 변화량



<그림 11.3.3> 표면 변위 측정점

- ② 쏘크리트 배면 토압은 식에서 제시한 휨모멘트와 축력의 분포 상황을 고려, 추정 한다.
- ③ 이 방법에서는 쏘크리트의 단면적(A), 탄성계수(E), 단면 2차 모멘트(I)를 정확하게 설정할 필요가 있다.

11.4 계측 결과의 활용

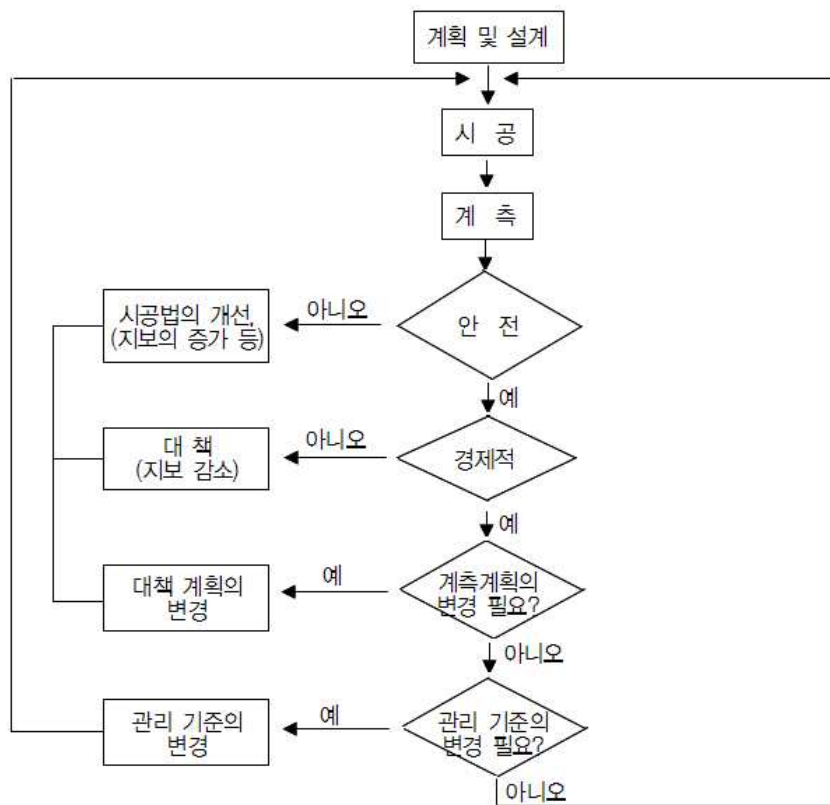
11.4.1 계측 결과의 설계·시공에의 반영

- (1) 계측 결과를 설계, 시공에 반영시키는 목적
- ① 시공의 안전성을 확인
 - ② 경제성을 확보
- (2) 계측 결과의 반영
- ① 신속한 반영을 위해서는 터널 전장에 대해 실시하는 계측 A을 적극적으로 활용한다.
 - ② 다른 항목의 계측 결과도 병행하면서 지반 조건, 설계(지보 형태), 시공법 등을 종합적으로 평가할 필요가 있다.
- (3) 계측 관리 기준과 이에 대응하는 대책(설계, 시공법의 수정)

- ① 이론 해석, 수치 해석 또는 유사 조건하에서 시공된 터널 실적 등을 참고한다.
- ② 계획 단계에서 준비하는 것이 바람직하다.

(4) 종합적인 판단

- ① 계획 단계에 설정된 관리 기준은 시공의 초기 단계의 표준이다.
- ② 시공중에는 여러 가지 단면에 대한 지반 조건, 계측치의 경사 변화, 계측 항목간의 상호 관계 등으로부터 지반 공학적인 검토를 추가하여 종합적으로 판단하는 것이 중요하다.
- ③ 아울러 계측 결과에 기초하여 계획 단계에서의 관리 기준 자체나 계측 계획을 개선시키는 것이 바람직하다.



<그림 11.4.1> 계측흐름 순서도