

현장 계측의 중요성과 기본 방향

이 승 호

(상지대학교 토목공학과)

1. 터널 계측의 중요성

터널은 공공 시설이면서 사회 기반 시설의 일부를 차지하고 있고, 수명이 50~100년으로 반영구적이기 때문에 품질관리에 안전을 기하지 않으면 안 된다. 한편, 터널 공사는 대부분 열악한 시공 조건에서 이루어진다. 왜냐하면 터널이 축조될 환경이 복잡하고 다양해 많은 불확실성이 내재되어 있기 때문이다. 아울러, 시공시에는 경제성·안정성을 확보해야 함은 물론이고, 교통·토목구조물·지하매설물·장해물·주변 주민의 민원등이 시공을 어렵게 만든다.

이 열악한 환경조건 밑에서 구조물을 건설하는 엔지니어의 역할에 대해 영국의 지반공학전문가 Lambe는 다음과 같이 주장하고 있다.

“엔지니어의 역할은 장차 발생할 현상을 예측하는 것이다. 예측은 A·B·C 세 등급으로 나누어지는데 그 대상은 현재 발생하고 있는 현상과 장차 발생할 현상이다. C급은 과거의 실적이나 경험을 토대로 예측하는 방법으로 현장감독이 실시한다. B급은 토질공학적으로 해석하고 예측하는 방법을 현재 대부분의 엔지니어가 이 수준에서 예측한다. A급은 현상을 컴퓨터로 시뮬레이션하여 구조물과 지반이 외력을 받으면 어떻게 거동하는지 그 양상을 검토하고 예측하는 방법으로 엔지니어는 이 A급 방법을 사용하지 않으면 안 된다.”

현실적으로는 열악한 공사 환경에 기인하는 불확실성이 문제를 더욱 복잡하게 만들고 있으며, 예측된 거동이 현실과 다르게 나타나는 경우가 많다. 이론적 예측과 실제, 설계와 시공이라는 이 간격을 해결하는 방법으로 Terzaghi는 ‘현장계측’을 주장하였다.

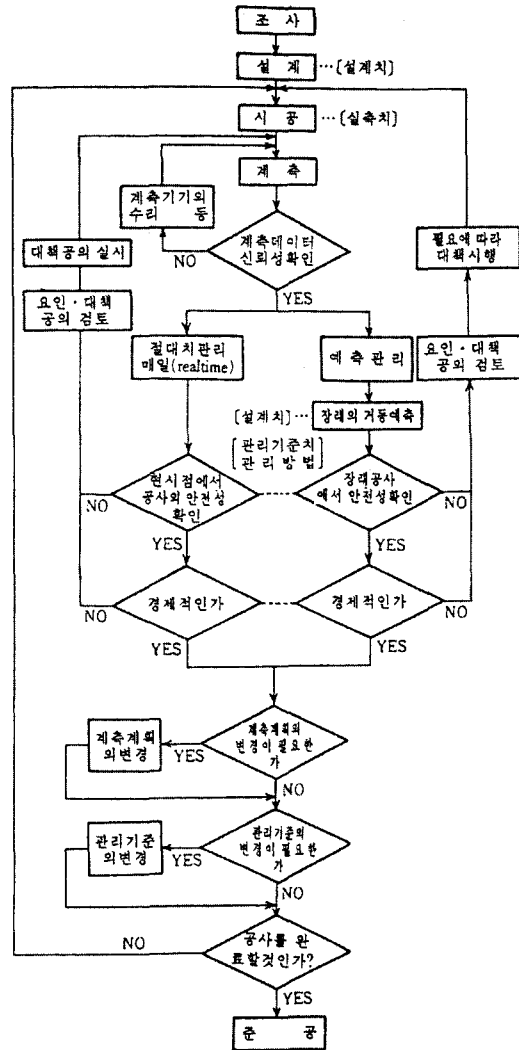


그림 1 터널공사에서의 계측흐름도

터널은 땅 속에 존재하는 선형(線形) 구조물로, 전 길이에 대해 모든 조건을 사전에 조사한다는 것은 경제적 또는 기술적으로 한계가 있다. 그리고 사전 설계단계에서 입수된 정보 역시 질과 양

적인 면에서 한계가 있을 수밖에 없다. 게다가 지반의 거동은 지반 조건뿐만 아니라 굴착방법이나 복공구조와 같은 설계조건, 그리고 시공조건에 따라 좌우되기 때문에 매우 복잡한 양상을 갖고 있다. 따라서, 설계단계에서는 사전조사 결과와 시공경험을 기초로 대세를 그려치지 않을 정도의 표준을 정하는 데 머무른다.

그리고 시공 단계에서는 막장에 대한 관찰에 의거하는 종래의 경험적 판단 외에, 해당 공사의 지반 조건에 걸 맞는 복공구조를 확인하고 시공 표준을 정하는 과정이 필요하다. 그림 1에 나와 있듯이, 터널 공사에서 계측은 설계 및 시공을 직접 좌우하는 극히 중요한 위치를 차지하고 있다 해도 과언이 아니다.

1.1 NATM터널에서의 계측의 중요성

계획 단계에서 실시되는 조사 및 시험은, 터널을 안전하고 경제적·합리적으로 설계·시공하기 위해, 지반지질 구조와 물성(物性)을 모델화 하는데 필요한 자료를 입수할 목적으로 실시된다. 그러나 지질 상황 혹은 구조의 복잡성에 따른 역학적 특성치의 변화, 단층·절리·편리 등에 의한 역학적 불균일성·이방성·초기 지압의 크기·방향 등을 정확히 예측하기란 쉽지 않다.

한편, 설계에서는 하중으로 작용하는 지반 재료의 특성이 복잡하다는 점이 슛크리트와 록볼트 등의 지보용 재료의 거동에 영향을 준다. 즉, 불분명한 하중 조건에다 역학적으로 특성이 명확치 않은 재료를 사용하여 구조물을 설계하기 때문에, 터널을 설계할 때 그 거동에 관한 예측은 대체로 정확도가 낮을 수밖에 없다.

그리고, 설계 단계의 해석은 당연히 실제의 거동과 다를 것인 바, 시공하면서 터널을 관찰·계측하고 여기서 얻어진 정보를 토대로 설계와 시공법의 타당성을 검토하고 필요에 따라 이를 변경·수정한다. 즉, 현장 계측의 결과를 설계·시공에 정확하게 반영하면 경제적이고 합리적인 터널을 안전하게 축조할 수 있다는 것이다.

이상으로부터 NATM에서 실시되는 계측의 목적은

- ① 주변 지반의 변형 거동·상황을 파악한다.
- ② 잠정적 지보(스�크리트 두께, 록볼트의 타설 길이·간격 등) 효과를 확인한다.
- ③ 최종 복공 시기를 결정한다.
- ④ 구조물로서 터널의 안전성을 확인한다.

- ⑤ 인접·중요구조물 등 주변 환경에 미치는 영향을 파악한다.
- ⑥ 지보 및 복공 구조의 설계·시공의 최적화를 이룬다.
- ⑦ 설계 및 시공에 계측 결과를 반영한 성과 등을 비롯하여 향후 공사 계획의 참고 자료로 삼는다.

1.2 쉴드 터널에서의 계측의 중요성

쉴드 터널은 지반이 복잡 다양한 충적(沖積) 평야 위의 과밀 도시에서 시공되는 경우가 많다. 따라서, 지반이 많은 불확실성을 안고 있는데다가 각종 제약에 얽매어 있는 열악한 시공 조건에 놓여 있기 때문에, 안전하고 원활하게 그리고 주변 지반 및 구조물에 해로운 영향을 미치지 않도록 시공하는 것이 최우선 과제이다. 지반의 변형은 적절한 막장 제어로 상당한 정도까지 제어할 수 있기 때문에, 이에 따라 공사의 성패가 달려 있다고 해도 과언은 아니다.

밀폐형 쉴드에서는 막장을 눈으로 확인할 수 없으므로 간접적인 방법으로 제어하게 된다. 즉, 시공 중에는

- ① 막장에 작용하는 압력
- ② 막장 안정제의 성상(性狀)·품질
- ③ 굴진 속도, 회전수
- ④ 뒷채움 주입(back fill grouting)량·압력 등, 막장을 제어하는 굴진 표준 항목과
- ⑤ 굴착 토사량
- ⑥ 지반 변형량(지표면 침하량, 지반 내 변형량)
- ⑦ 세그먼트의 변형·응력·변형률

등, 굴착 결과 항목을 동시에 계측하여 굴착 표준의 타당성을 검토하고 필요한 경우 변형·수정함으로써 공사의 안전성과 경제성을 동시에 만족하도록 해야 하는 것이다. 이 공법에서는 세그먼트를 조립하여 복공하는 것이 일반적이므로 NATM와 같이 복공의 최적화(지반 변형의 억제, 굴진 속도의 확보·향상, 문제의 감소, 복공의 안전성 확인, 환경 보전, 품질 관리)가 가능하기 때문에 쉴드 공법에서는 이를 계측의 제일 목적으로 설정한다.

또한, 쉴드에서는 막장 제어, 굴착토의 반출 및 처리, 그라우팅, 복공, 쉴드자체의 제어 작업을 개별적으로 혹은 복합적으로 자동화 할 수 있어 현재 상당부분 자동화가 이루어지고 있다. 이 과정에서도 계측이 반드시 필요한데 이것이 계측의

둘째 목적이다.

2. 현장 계측의 기본 방식

셸드 공사에서 수집되는 데이터는 그림 2와 같이

- ① 1차 데이터 : 수집 직후의 처리되지 않은 데이터
- ② 2차 데이터 : 간편하게 처리되어 매일 매일 관리 수단으로 사용하고 나아가 일지로서 보존되는 데이터
- ③ 3차 데이터 : 도표화되어 현장 상황을 용이하게 파악할 수 있는 데이터
- ④ 4차 데이터 : 해석적 또는 통계적으로 처리되어 관리 방침을 결정하는데 사용되는 데이터

한편, 관리의 기본은 그림 3과 같은 process feedback system으로, 그 자체에는 아무 문제가 없다. 그러나 공사규모의 대형화, 공사 환경의 복잡화, 해석 내용의 고도화에 따라 계측 항목이 많아지기 때문에, 종류 및 양면에서 방대한 데이터의 계측/수집/기록/간이처리/도표화/해석처리/통

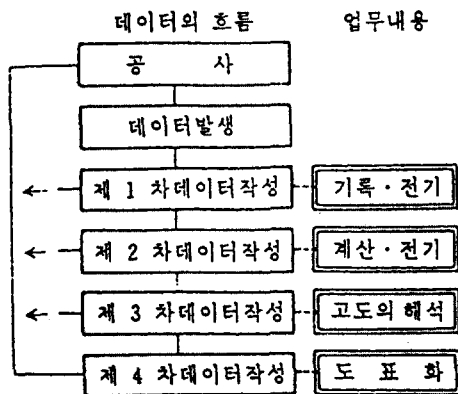


그림 2 데이터의 흐름과 처리 내용

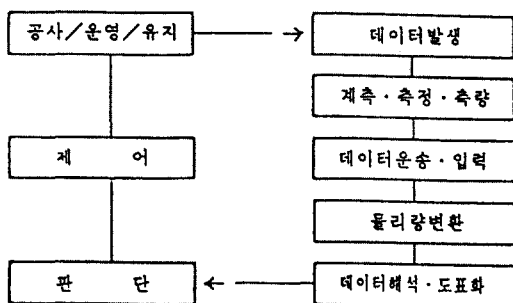


그림 3 Process feed back

계처리/시뮬레이션/유사 사례의 대책 검토/관련 부문으로서의 정보전달을 인간의 손에 맡기는 기존 방법에서는 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- ① 막장이 이동함에 따라 발생하는 방대한 양의 데이터에 대해 피이드백의 신속성을 확보할 수 없다. 그렇다고 피이드백 시간을 단축하면 불완전하게 처리된 정보에 기초하여 판단하는 결과가 됨에 따라 관리의 엄밀성이 상실된다.
- ② 상관 해석(相關解析), 분산 해석(分散解析), 시계열 해석(時系列解析), LP등의 통계적 처리 및 역해석과 같은 구조적 해석 처리가 불가능해, 관리 최적 인자를 발견하기 곤란하다. 또한, 정보가 데이터 베이스화되지 않아 유의미하게 활용되지 않는다.
- ③ 데이터를 정량적으로 파악하기가 곤란해 기술자나 감독자의 경험에 의존하는 부분이 많기 때문에, 기술자의 데이터 분석 능력, 감독자, 인부의 기능이 터널의 품질을 좌우한다.

이 문제를 해결하기 위해서는 계측 계획을 입안할 때, 관리 방법을 사전에 고려해 두고 신뢰성이 높은 데이터를 시공에 신속하게 반영해야 한다. 이 기본 정책에 기초하여

- ① 데이터의 발생~수집~처리 시간을 단축하여 즉응성(即應性)을 향상시킨다. 또한, 자동 계측을 통해 장기간에 걸친 데이터와 야간 데이터를 용이하게 입수할 수 있도록 해야한다.
- ② 공사중인 구조물 및 주변 환경을 침해하지 않고 정량적으로 파악한다. 옮겨 적거나, 계산 착오가 없는 정확한 데이터에 기초하여 정보를 분석한다.
- ③ 보편적인 정보를 통계적인 데이터 처리 방법으로 얻는다.
- ④ 데이터를 매순간 파악하고 정리·집약·조합하여 시간별 변화를 볼 수 있도록 함으로써 현상을 용이하게 파악하고 예측의 정확도도 향상시킨다.
- ⑤ 기술자를 단순 작업에서 해방시켜 해석·예측을 위한 시간 확보를 가능케 한다.

와 같은 사항들이 가능하도록 현장 계측을 책정하여 고도로 간소화되고 상용이 간단한 시스템을 구축하는 것이 바람직하다.

2.1 NATM

NATM은 쉴드 공법에 비해 작업이 복잡하다. 그리고 몇 가지 이유로 인해 지하 발전소 공사와 같은 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 자동 계측 시스템을 채택하지 않는다. 그 이유란, 첫째 발파 공법을 병용할 경우 데이터 전송 케이블의 유지·관리가 곤란하고, 둘째 일상적인 시공 관리로서 실시되는 내공 변위(convergence)·천단침하측정의 자동화가 곤란하며 셋째, 경제적인 측면에서 맞지 않는다는 것이다.

그러나, 계측 데이터를 공사에 반영하는 데 있어, 그 정확성과 적응성은 쉴드 공법과 마찬가지로 중요하기 때문에 컴퓨터를 사용하여 계측과 데이터 처리의 신속화와 합리화를 도모하는 것이 좋다.

2.2 쉴드 공법

이 공법은 그 자동화 수준에 비추어 볼 때 상당 정도까지 현장 계측을 자동화할 수 있다. 문제는 기술적인 측면이 아니라 경제성과 계측장소의 확보이다. 도시 터널공사에서는 엄밀한 시공관리

가 더욱 더 요망되고 있기 때문에, 경제성을 비롯한 눈앞의 이익에 좌우되지 않고 A급 계측을 목표로 한 계획을 수립해야 한다.

3. 계획시 검토 항목과 계측 계획 입안시의 유의점

계측 계획은 다음과 같은 순서로 입안한다.

3.1 시공 계획 시점에서 계측 목적을 명확히 한다.

이 단계에서는 그림 4에 나와 있는 각종 조건을 숙지하고, 공사·공법의 특질과 막장의 이동에 따른 예측의 빗나감이 주변 지반이나 구조물 혹은 환경 및 공사기일에 미치는 영향을 고려하여, 계측의 필요성을 인식함과 동시에 결과를 반영하는 개략적인 방법을 머리 속에 그려보는 것이 중요하다.

터널 공사에서는 아래와 같은 이유들 때문에 측 정치가 계산치 예측치와 반드시 일치한다고는 할 수 없다.

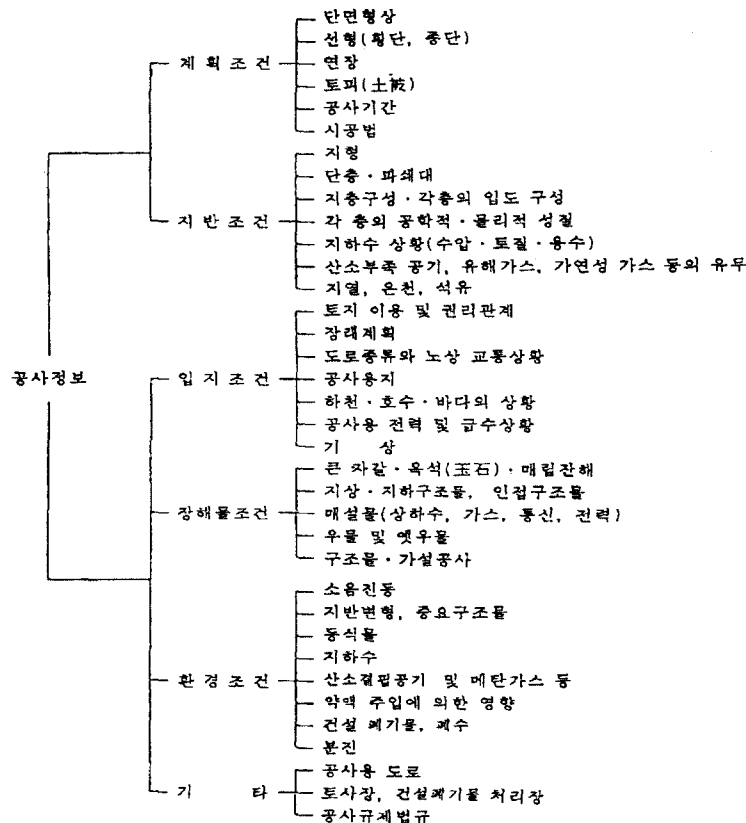


그림 4 계획시 입수되는 현상

표 1 산악터널에서 발생하는 문제현상

원지반조건·계획조건	원지반의 거동 및 문제현상
경암 및 중경암	조인트를 비롯한 불연속면에서 암괴의 이탈(fall of locks)·붕락, Rock burst, 슛크리트의 균열 등
연암(원지반강도가 비교적 크다)	암괴의 이탈·붕락, 슛크리트의 균열 등
연암(원지반강도가 비교적 작다) 및 팽창성 원지반	막장의 자립성 부족, 지표의 붕괴 붕락, 터널면의 압출, 침하, 허빙, 강대한 지압의 작용, 장기에 걸친 변형 및 지압의 증가, 슛크리트의 균열, 전단파괴 등, 록볼트의 파단, Plate의 변형, 강성 지보공이 좌굴과 같은 변형, 이차 복공의 변형·파괴
토사	막장의 자립성 부족, 지표의 붕괴·붕락, 터널 벽면의 압출, 침하, 지내력 부족, 토사유출, 지보공의 변형, 침하, 파괴, 이차복공의 변형·침하·파괴
극히 작은 토피(土被)	위 항목 외에 지표면 침하, 함몰, 인접 구조물 등의 변형
갱구 부근에서 활동·붕괴 가능성이 높은 경우	사면의 활동 붕괴, 편압의 작용, 막장의 자립성 부족, 지표의 붕락·붕괴, 터널 벽면의 압출, 침하지내력 부족, 지보공의 변형, 침하, 파괴, 이차 복공의 변형·침하·파괴

주) 위와 같은 조건에서 용수가 발생하게 되면 원지반 성상 및 시공성에 큰 영향을 미치기 때문에 충분한 주의를 기울인다. 단층, 파쇄대는 별도로 유의한다.

표 2 쉘드 터널에서 발생하는 문제 현상

복공구조에 관한 것	터널 형상의 편원(진원이 유지될 수 없다), 외압에 의한 복공 본체 및 이음부의 변형·균열 볼트 조임력의 완화, 세그먼트가 맞지 않음, 지하수의 침투·누수, 사용 재료의 침식, 세그먼트의 파손, 쉘드의 파손
막장(굴착면)에 관한 것	막장의 붕괴, 과소 굴착, 여굴·과대굴착, 굴착면의 압축 변형, 니수의 분출, 굴착 첨가재의 누출 장애물, 유해가스의 용출·분출
주변지반·구조물에 관한 것	주변지반의 변형(함몰·융기·침하), 주변 구조물 매설물의 침하·경사·변형·손상
주변환경에 관한 것	소음·진동·분진의 발생, 지하수 오염(니수·굴착 첨가재의 침투)·지하수위 저하, 산업폐기물(처리흙, 굴착 첨가재, 갱내 배수, 처리수)의 현장 외 유출, 유해가스의 용출·분출
시공관리에 관한 것	굴착도 수송의 설비의 고장·가동률 저하, 굴착도 및 갱내수 처리 설비의 고장·가동률 저하, Back fill grouting 설비의 고장 가동률 저하, 쉘드 기계 설비의 고장·가동률 저하, 터널 선형의 오차·사행

a) 사전 조사의 오차, b) 지반의 불균일성에 따른 오차, c) 사상 모델화에 따른 오차, d) 시공 오차, e) 계측오차 따라서, 계측 목적을 명확히 할 때는 표 1 및 표 2에 나와 있는 문제 사례를 참고로

① 어디서, ②무엇이, ③언제 위험해지는가에 유의하고, 문제가 발생하기 전에 그 징후를 파악하기 위해서는 ④무엇을 대상으로, ⑤어떤 항목을, ⑥어떻게 계측해야 좋은가라는 점에 유의한다.

3.2 문제점의 추출과 문제예측

공사 조건과 공법의 조합을 통해 문제점을 추출하고 문제 내용과 발생 장소를 예측한다. 또한 현장 계측을 통해 미연에 문제를 방지할 수 있을

지, 혹은 발생하더라도 그 영향을 최소화할 수 있는지 알아본다.

(1) NATM

NATM에서는 지반조건별로 굴착에 따른 지반 거동(표 1 참고)을 예측해 둘 필요가 있다.

(2) 쉘드 공법

그림 4에 나와 있는 정보를 토대로 공사 중 막장·주변 지반의 거동, 제반 설비의 부하 상태, 복공 거동, 터널 선형(線形)에 대해 최악의 상태를 예측하고 이러한 상태를 위한 대표적인 항목을 설정한다. 즉, 막장 붕괴 시 막장에 작용하는 압력, 굴착 토사량, 쉘드기와 여타설비의 부하 상태 등은 어떻게 변하는지, 막장 주변의 지반과 구조물은 어떻게 변형·파괴되는지, 복공에 예상 밖

의 하중이 작용할 경우 복공의 변화된 상태는 어떤 것인지 나아가 어떤 과정을 거쳐 이러한 최악의 상태에 도달하는지 미리 생각해 보는 것이다.

3.3 계측 지점 · 위치 · 항목의 선정

계측 계획을 입안할 때 미리 빠지기 쉬운 약습 가운데 하나로, 계측할 수 있는 것은 모두 하고 싶은 기분에 사로잡히는 것을 들 수 있다. 그러나 앞 뒤 가리지 않고 데이터를 수집하면 처리 보존량이 방대해져 피이드백에 많은 시간이 걸릴뿐더러 정보의 홍수 속에서 무엇이 문제인지 그 소재를 파악하지 못해 소기의 목적을 달성할 수 없다. 더욱이 계속해서 막장이 진행되기 때문에 모든 지점에서 지반내 계측을 할 수 없는 바, 계측 지점에 제한이 있기 마련이다. 따라서, 시공 중 유

의해야 할 사항과 입수되는 데이터의 상관성을 고려하여, 먼저 계측 데이터를 통해 공사의 상황 · 안전성을 파악할 수 있고 공사 및 관리의 최적화를 이룰 수 있는 방법을 염두에 두고, 이어 시공조건 및 지질 조건을 감안하여 가장 대표적인 지점, 현상이 가장 드러나기 쉬운 곳에서 염선된 항목을 계측한다.

(1) NATM

NATM에서 계측해야 할 항목은 표 3과 같다. 계측 항목은 터널 전체에 걸쳐 정기적으로 하는 항목과 보조 자료를 얻기 위한 항목으로 나누어 설정한다. 지반 조건에 따른 계측 항목별 중요도를 표 4와 같이 정리하여 계측 항목 선정의 기준으로 삼고 있다.

(가) 계측 A(일상적인 시공 관리를 위해 반드시

표 3 NATM의 계측항목

분류	명칭	내용	측정계기·방법	측정을 통해 얻어지는 사항
갱내관찰	갱내관찰 조사	맞장의 안정성, 지진상화, 용수, 시공구간의 상황	Clinometer해머, 천공속도	지반구분의 재평가, 지반상황과 지반거동의 상관성, 지반상황 이후의 추정
내공변위	내공변위의 측정	터널벽면간 거리변화, 변화속도	Convergence measure tape extensiometer micro	주변지반의 안정, 지보부재의 효과, 변위속도로부터 변위량 추정, 복공콘크리트 타설시기판정
		천단의 침하	레벨	천단지반의 안정, 주변지반의 안정
		저반의 융기	레벨	Invert rock bolt타설의 필요성 Invert콘크리트의 필요성, 타설시기의 판정
지중변위	지중변위 측정	터널 갱내에서 측정하는 상대변위	Load extensiometer Sliding micrometer Inclimetal extensiometer	터널주변의 이완영역, 록볼트 길이의 타당성 지중변형도 분포
		지상 등 갱 외로부터 측정하는 수평변위, 연직변위	Load extensiometer, 총별침하계, 경사계, 삼입식 수평경사계, 삼입식 연직경사계, Sliding Micrometer, Inclimetal extensiometer	굴착 이전부터 진행된 지반의 거동, 터널 앞 뒷쪽 지반의 안정, 지중변형도분포
지중응력	초기지압 측정	초기지압의 크기, 방향	Stress meter, Over coring법, Flat jact법, 수압파쇄법	초기지압상태, 지압계수, 습곡 등의 영향
	지중응력 변화 측정	굴착에 따른 주변 지산내 응력 변화	Gradual boring법 공재용 응력 cell(다성분) Island stressmeter	접선방향 응력의증가, 반경방향 응력의 감소 지반의 강도저하 유무
	간극수압 측정	지중 간극수압 상태	간극수압계	용수, 지반주변의 지하수위변화, 각극수압의 변화, 피압수의 변화, 활동발생의 예지
지보재에 작용하는 하중과 응력	록볼트 축력 측정	록볼트의 축력 분포	Mechanical측정 앵커 변형 게이지 측정 록볼트,	록볼트 길이, 개수, 위치, 정착방법의 타당성
		좌금부분의 축력	Disk load cell, Center hole 하중계	록볼트 개수의 타당성, 판단시기의 추정
	콘크리트 응력측정	숫크리트 응력	Gradule 콘크리트 응력	숫크리트의 두께 · 시공 시기의 타당성 판단단면 폐합에 의한 효과
		복공콘크리트 응력	Gradule 콘크리트 응력 cell 철근응력계, 콘크리트 응력계	조기 타설에 의한 구속효과, 구조변화시의 거동, 복공콘크리트의 안정성

분류	명칭	내용	측정계기·방법	측정을 통해 얻어지는 사항
지보공에 작용하는 하중과 응력	강 아치 지보공응력	지보공응력, 부재력	변형도 게이지, 표면 변형도 게이지	지보공의 피치, 치수의 타당성 숏크리트의 하중 분담
	원지반하중측정	복공에 작용하는 원지반하중	Gradule 콘크리트 응력 cell 토압계, total pressure cell	숏크리트의 두께 시공 시기의 타당성, 단면폐합, 복공 콘크리트의 타설에 의한 고속효과
배면수압		감극수압계	복수 후의 하중증가(터널근처의 간극수압 측정을 통해 추정가능)	
주변에 미치는 영향	지표면 및 구조물의 거동 측정	지표면의 침하, 융기	레벨, 레이저, 수성식 침하계, 침하계	터널굴착 영향범위, 터널 앞 위쪽 원지반의 안정
		구조물의 침하, 융기, 경사	레벨, 레이저, 수성식 침하계, 침하계, 경사계	구조물의 미치는 영향, 안정성
	활동변위의 측정	지표면의 이동, 경사	신축계, 활동계	활동발생의 예지
		지중의 수평 이동, 연직이동	파이프 변형도 게이지, 삽입식 연직 경사계, 삽입식 수평 경사계	활동면의 위치와 방향
지하수위 측정	지하수위의 변동	측침식수위계 간극수압계	온수, 복수 배수압 수두	
원지반 물성	원지반시료 시험	물리시험, 역학시험	단위체적중량, 일축압축 강도 삼축압축강도, 초음파전파 속도 시험(제2장 참고)	원지반구분의 재평가, 변형특성, 강도특성의 파악, 팽창성의 파악, 막장의 안정성 파악
	원위치시험	갱내탄성과 속도측정	탄성과파탐사기	터널주변의 강도저하영역, 변형계수의 추정
공내재하시험, 평판재하시험, 직접전단시험 외		플레시오 미터, 에라스트 미터 세라티플로파티미터, 유압잭	변형특성, 강도특성의 파악	

표 4 원지반조건에 따른 계측 항목·중요도

항 목	계 측 A			계 측 B						
	갱내관찰조사	중공변위측정	천단침하측정	원지반시료 시험	지중변위측정	록볼트축력측정	록볼트인발 시험	복공응력측정	지표면의 지중침하측정	갱내탄성과 속도측정
경암원지반(단층과 같은 파쇄대를 제외한다)	◎	◎	◎	△	△*	△*	△	△	△	△
연암원지반(큰 소성지압은 발생하지 않는다)	◎	◎	◎	△	△*	△*	△	△*	△	△
연암원지반(큰 소성지압이 발생한다)	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	○	△	△
토사원지반	◎	◎	◎	◎ 토질 시험	○	△*	○	△*	◎	△

◎ : 반드시 실시하는 항목 ○ : 실시해야 할 항목

△ : 필요에 따라 실시하는 항목(* 측정결과 설계량을 줄일 수 있다고 판단하는 경우에는 유용성이 높아진다)

시 실시하는 항)

- 1) 갱내 관찰 조사
 - 2) 내공 변위(內空變位) 측정
 - 3) 천단 침하(天端沈下) 측정
- (나) 계측 B(원지반 조건에 따라 추가로 선정하는 항목)

- 1) 원지반 시료 시험 및 원 위치 시험
- 2) 지중 변위 측정
- 3) 록볼트 축력 측정
- 4) 록볼트 인발 시험

- 5) 복공 응력 측정
- 6) 지표면, 지중의 침하측정
- 7) 갱내 탄성과 속도 측정

표 5는 '특히 주의해야 할 지반조건'에서 필요한 계측항목과 계측이다.

규모에 따라 일반적으로 선정되는 계측항목을 나타낸 것이다. 이 표를 참고로 지반조건에 따라 지반 및 지보공이 어떻게 거동하는, 설계와 관련하여 문제가 되는 현상은 무엇인지, 이를 파악하기

표 5 계측 항목의 선정

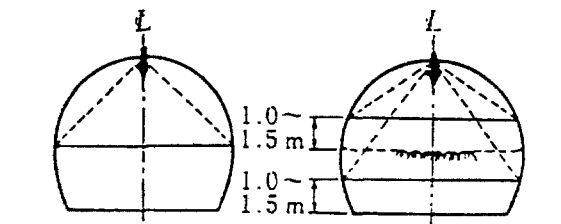
조사·계측·시험			㉔ 특히 주의해야 할 계측지점				㉕ 계측의 규모			비 고	
대 상	항 목	세 목	평항성 원지반	함수 미분 고결 원지반	토피가 작은 원지반	갱구부근에서 활동·붕괴할 가능성이 있는 원지반	시험 시공	상세 계측	간이 계측		
원	경내지질 관찰	암질, 지질구조(단층, 습곡, 주향, 경사 등) 풍화, 변질, 파쇄상황, 용수상황	○	○	○	○	○	○	○		
	내공변위 측정	벽면간	○	○	○	○	○	○	○		
		천단침하	○	○	○	○	○	○	○	부동점을 기준으로 한 터널천단의 연직방향	
	지중변위 측정	상대변위	○	○	○	○	○	○	○	계측단면 굴착후 부터의 변위	
절대변위				○	○				계측단면 굴착전부터의 변위		
지 보 · 복 공	지 보 · 복 공에 작용하는 하중 측정	강재 지 보 공	기초반력	○ ^S	○ ^S	○ ^S	○ ^S	○ ^S	○ ^S		
			췌기점에 작용하는 하중								재래 공법에서는 경우에 따라 실시
		용력·변형률								재래공법에서는 경우에 따라 실시	
		복공콘크리트	배면의 저항	○	○ ^S	○	○ ^S	○ ^S	○ ^S	○ ^S	
			용력의 변형률	○	○ ^S	○	○ ^S	○ ^S	○ ^S	○ ^S	
				Rock bolt의 축력	○ ^N		○ ^N		○ ^N	○ ^I	경우에 따라 휨, 전단용력을 측정하기도 한다.
			숏크리트용력	○ ^N		○ ^N		○ ^N	○ ^I	반경방향, 축방향 용력의 측정	
	지 보 · 복 공의 강도특성시험		Rock bolt의 인발내역	○ ^N	○ ^N	○ ^N	○ ^N	○ ^N	○ ^I		
			숏크리트의 강도특성	○ ^N		○ ^N		○ ^N	○ ^I		
			복공콘크리트의 강도 특성	○		○					
용 수	갱내용수	양	○	○	○	○	○	○	○		
		수 질 시 험		○							
		간 극 수 압		○		○					
	지 하 수 조사	선진보오링	수 압 · 양		○						선진은 주로 단층·파쇄대의 조사를 목적으로 한다.
			특 수 시 험		○						
		지 질 시 험		○							
		하 천 시 험		○	○						
	지 표	지 하 수 위		○	○	○					
강 우 · 적설량			○	○	○				다른 기상조사도 함께 실시하는 경우도 있다.		
수 위 시 험			○								
근접한 구조물	구조물의 관찰	변형·균열			○	○					
		경사			○	○					
	구조물의 변위이동측정	이동·침하			○	○					
		균열			○	○					

표 6 천단침하·내공변위의 계측간격

지반등급	조건	갱구부근 (갱구에서 50m사이)	토피 5D이하 (D : 터널굴착폭)	※시공초기단계	어느정도 시공이 진척된 단계
A, B, C		10m	10m	20m	30m
D		10m	10m	20m	30m
C		10m	10m	20m	30m

표 7 쉴드공법의 계측항목

목적	대상	주계측 항목	부계측 항목	육안 관찰 항목
복공 구조의 안전성	1차복공의 손상·파괴	복공응력·변형률 링의 변형·진원도	토압·수압, 복공변형 균열 폭, 복트 축력, 전달추진력, 누수량, 강재 부식량	균열방향, 누수위치 강재 부식 상황
	2차복공의 손상·파괴	복공응력·변형률	측압·수압, 균열 폭 콘크리트 량·충진도 부재온도, 누수량	균열방향, 누수위치
복공기능의 확보	건축한계의 침해유해한 선형 오차누수	내공, 진원도 기선 오차, 사행 누수량	균열폭	누수위치 모양새
굴착면의 안전성	과대굴착·막장붕괴	막장 제어 압력 배토line 압력 안정보조재주입 압력 굴착도량	여굴량, Chamber폐쇄 배토 line 폐쇄 Cutter torque, 추진력 니수·니토 처리설비 부하 지반 침하량	굴착도사, 니수 분출 니장·포 투출 지표침하·함물상황
	과소굴착	막장, 굴착도량	Cutter torque 추진력 지반용기량	굴착도사 지표 용기범위
	굴착면 압출	추진력, Cutter torque	뒤채움 주입량, 압력, 누수량	충진도, 니토위치
주변지반·주변 구조물의 안전성	지반침하·함물	지반침하·경사량 간극수압 뒷채움 주입량·압력	박장제어압력, 굴착도량여굴량, Chamber폐쇄 배토 line 폐쇄 Cutter torque, 추진력 니수·니장·포 품질 니수·니토처리설비부하 쉐드기자세	굴착도사, 니수분출 니장·니토누출 지반변형의 영향 범위
	지반용기	지반용기·경사량 간극수압 뒷채움 주입량·압력	막장 제어 압력, 굴착 도량 cutter torque, 추진력 쉐드기 자세	굴착도사 지반변형의 영향 범위
	구조·배설물의 침하·경사·변형손상	상대·절대 침하량 구조물의 응력·변형도 뒷채움 주입량·압력	지반변형, 균열 폭	균열 방향·위치
주변 환경의 안전성	소음, 진동, 분지 지하수 오염 지하수위 지하 산업 폐기물 유출	음원·진동원 높이 분진량·수질 간극수압 유출성분량	영향·비산·확산범위 유출범위 PH·SS·BOD·COD 유해·메탄가스	



(a) 전단면 굴착공법 (b) Bench cut 공법
(1 또는 3 축선의 예) (2,4 혹은 6 축선의 예)

- 주1) 수평축선(실선)은 반드시 실시하지만, 경사 축선(점선)은 필요에 따라 실시하는 것이 좋다.
- 주2) 경사 축선(점선)은 갱구 부근, 토피가 작은 구간, 편도 압 및 팽창성 토암이 예상되는 곳에서 실시한다. 또한, 그밖의 구간에서도 해석과 더불어 계측 결과를 종합적으로 판단하는 위치에서는 실시하는 것이 바람직하다.

그림 5 천단 침하·내공 변위의 측정을 위한 계기 배치 사례

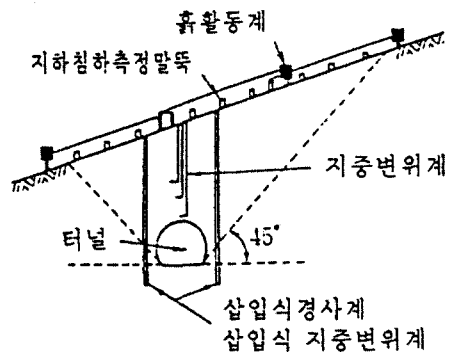
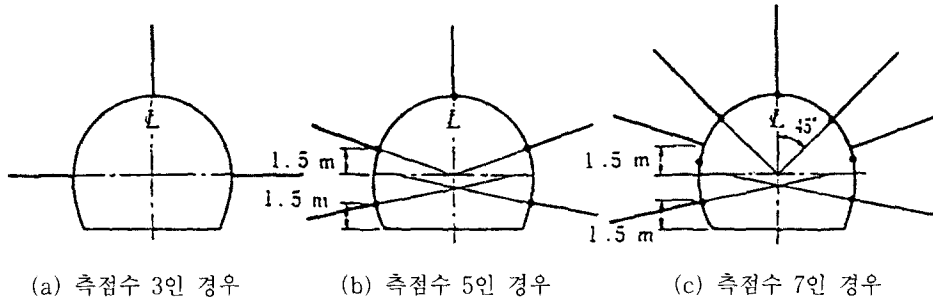


그림 6 지표면 침하 측정 및 지중변위 측정 배치 예



(a) 측점수 3인 경우
 그림은 전단면 굴착의 경우로,
 bench cut공법의 경우에는
 spring line부의 측정률 1.5m
 높게 한다.

(b) 측점수 5인 경우
 지중변위 측정 및 록볼트 축력 측정 슛콘크리트·
 복공응력 측정 및 작용하중 측정

(c) 측점수 7인 경우

그림 7 각종 계측의 계기 배치 사례

위해서는 무엇을 측정해야 하는지, 나아가 측계측 결과를 어떻게 이용할 것인지에 대해 충분히 검토하여 설계 및 시공에 반영하는 것이 중요하다.

계기를 설치할 위치는 터널규모, 지반조건, 시공법을 고려하여 계측목적에 합치하도록 선정하며 아울러 계측 상호간의 연관성이 파악될 수 있도록 배려한다. 계측 간격의 경우, 일반적인 공사에서는 계측 A에 대해 표 6을 제시하고 있다. 지표면 침하는 토피(土被)가 극히 얇은 터널 및 갱구부(坑口部)에서 매우 중요한 계측항목이므로 일반적으로 5~10 m 간격으로 실시된다. 계측 B는 지반 조건에 따라 계측 A에 추가로 실시되는 것이기 때문에 일상적인 계측관리의 보조 자료에 불과하지만, 계측 결과의 활용이라는 측면에서 볼 때, 대표적인 구간에서 가능한 한 시공 초기 단계에 실시하는 것이 중요하다. 실시단계에서는, 지반상황의 변화 및 지보공의 변형상태에 따라 수시로 계측항목 및 측정단면을 변경하여 임기응변식 계측을 실시함과 동시에 그 태세를 정비해두는 것이 중요하다. 계기의 일반적인 배치는 그림 5~7과 같다.

(2) 쉴드 공법

이 공법에서는 지질 조건, 공사의 난이도·규모, 쉴드형식, 복공 구조, 매설물과 인접 구조물의 중요도·안정성·기초 형식·인접 정도에 대해 중요하다고 판단된 사항을 중심으로 비용 및 계측관리 방법을 고려하여 계측 항목을 선정한다.

쉴드공법에서 일반적인 계측항목은 표 7과 같은데, 이 점에서는 계측 항목을 다음과 같이 세 가지로 분류하고 있다.

- ① 현상을 직접 파악하기 위해 계측하는 주제

측 항목

- ② 현상을 간접적으로 파악하거나 현상을 파악하기 위한 보조 자료로서 계측하는 부계측 항목
- ③ 계기를 사용하지 않고 인간의 오감(五感)에 의존하는 항목
 계기를 선정할 때는 다음과 같은 유의점을 고려하여 계기의 종류 및 성능을 충분히 인식한 바탕 위에서 적절한 수량을 배치한다.

- ④ 측점수, 측정 빈도, 측정기간
- ⑤ 측정 정확도
- ⑥ 측정 시스템
- ⑦ 측정 환경

아울러, 계기만에 의존하지 않고 육안 관찰 등 인간의 오감을 이용한 관측도 관리 요소에 포함시키는 것이 중요하다.

계기의 설치 장소는

- ① 표준적·일반적으로 다른 부분에 참고가 될 것(복공)
- ② 굴진 초기에 이후의 굴진 표준을 얻을 수 있을 것(시공 관리)
- ③ 이상의 징후를 조기에 파악할 수 있을 것(매설물, 근접 구조물)
- ④ 공사에 의한 영향의 유무를 판정할 수 있을 것 그리고 가능한 한 동일 단면에서 각 계기의 측정 결과를 상호 체크할 수 있을 것, 아울러 작업 순서 및 방법까지도 고려하여 결정한다.

계기를 설치하는 방법은 측정의 정밀도를 좌우하는 바, 계기의 성질, 기구 및 토질 적응성을 이해하는 것은 물론이고, 계기의 손상 방지 방법을 비롯하여 습기·침투수에 의한 절연저하(絶緣低下) 방호(防護) 방법에 주의를 기울여야 한다. 아

올려, 신뢰성 높은 데이터가 입수될 수 있도록 측정 환경에 걸맞는, 올바른 방법으로 설치한다.

3.4 계측 시스템의 설계

계측 시스템을 설계하는 기본 이론은 NATM이나 쉴드 공법 모두 동일하다. 설계를 할 때는,

- (1) 데이터의 수집~input~처리에 이르는 과정 가운데 어느 부분을 자동화할 것인가?
- (2) 자동 시스템에 어느 정도의 대화 기능을

부여할 것인가?

(3) 자동/수동 시스템을 연동할 것인가, 별도로 할 것인가?

등이 항상 문제가 되는데 다음과 같은 사항에 유의한다.

- ① 요구되는 데이터가 정량적인가? 정성적(定性的)인가? 정성적인 데이터는 자동화할 수 없다.
- ② 데이터의 중요도가 높은가? 다른 데이터

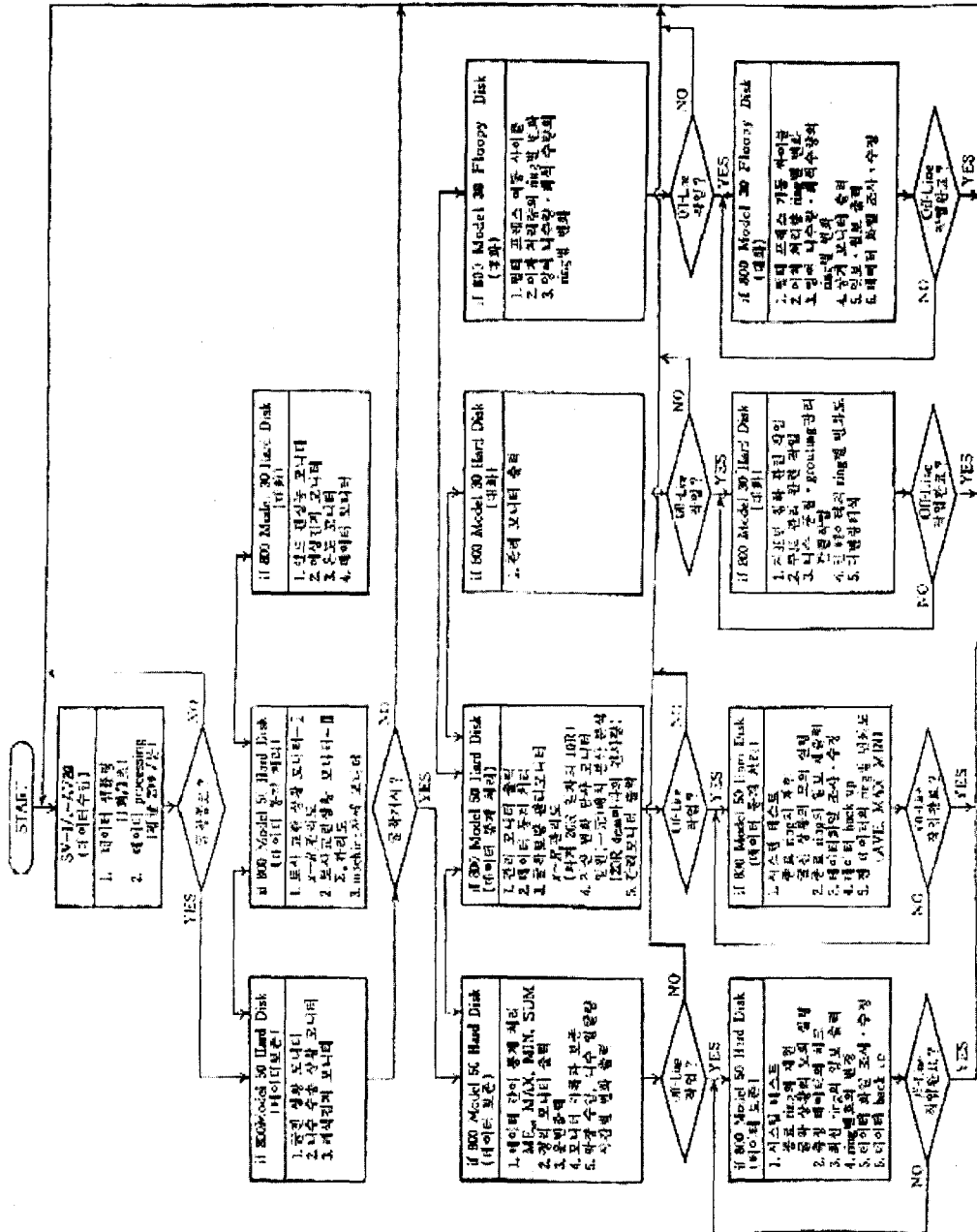


그림 8 쉴드 공법에서 채택된 계측 사례

의 신뢰성을 검증하는 데이터라면 자동화할 필요가 없다.

- ③ 데이터의 수집 빈도가 높은가? 일반적으로 수집 빈도가 낮은 데이터는 자동화할 필요가 없다.
- ④ 요구되는 설치 장소 및 수집 시간 때문에 계측이 곤란한가? 일반적으로 데이터 수집이 곤란한 것은 자동화하지 않는 편이 좋다.
- ⑤ 데이터는 자동적으로 수집할 수 있는가?
- ⑥ 수동/자동 시스템을 연동시켜 수동으로 수집되는 데이터를 자동 시스템을 집어넣는가? 수동용 컴퓨터는 자동용에 비해 용량·능력 모두 하위 기종으로도 가능하지만, 연동시킨 경우 시스템 전체의 능력은 하위 기종으로 규정되기 때문에 기본적으로 집어넣지 않는 것이 바람직하다.
- ⑦ 자동화의 수준을 어느 정도로 설정하는가? 현시점에서 전자동화는 문제가 많다.
- ⑧ 하드웨어와 소프트웨어를 어떻게 조합시키는가? 사용할 수 있는 소프트/하드웨어의 능력과 적합성은? 피이드백에 요구되는 신속성은? 시스템의 능력·수준은 미리 규정된 관리 방법에 합치하고 있는가?
- ⑨ 시공 표준화와 데이터 베이스 구축을 어느 정도까지 요구하는가?

그림 8은 쉘드 공법에서 사용된 바 있는 계측 시스템의 일례이다.

3.5 하드웨어의 선정

(1) NATM

현재, NATM에서 사용되고 있는 계기는 판독 방식에 따라 기계식과 전기식으로 크게 구별된다. 어느 것을 사용할 것인가는

- (가) 터널 단면
- (나) 시공법
- (다) 굴착 속도
- (라) 측정 위치·빈도·기간
- (마) 예상 측정량

등을 고려하여 결정한다.

기계식은 물리량을 직접 읽어 내기 때문에 신뢰성이 높고 경제적으로 설치 할 수 있어 유지 관리가 용이한 반면, 대부분의 측정 위치에 받침대가 있어야 하기 때문에 불편하다. 전기식은 원격, 자동 측정이 가능하지만, 값이 비싸고 설치하

는 데 시간이 많이 들 뿐 아니라 절연 저하 방지와 같은 유지 관리가 필요하다.

(2) 쉘드 공법

하드웨어를 선정할 때는 다음과 같은 점에 유의한다.

(가) 센서의 정밀도는 변환기·컴퓨터 등의 하드웨어의 정밀도와 균형을 맞춘다. 즉, 센서의 정밀도는 너무 높거나 반대로 너무 낮아도 의미가 없다.

(나) 센서·변환기·발신기·송신기는 외부 교란(고압 전류, 강한 전파, 강한 전자파)·진동·습기·분진·기름·염소 이온·유산(硫酸) 이온·염분·세균 박테리아 등 거친 환경에 대해 둔감할 것. 그리고, 필요한 경우에는 이러한 거친 환경에 대해 적절한 방호(防護) 조치를 취해야 한다.

(다) 변환기는 영점(零點) 이동·계수 변화에 대해 안정적인 것, 영점보정, 렌즈보정 순서에 관한 서류를 상비해 두고 끊임없이 변동 유무를 체크할 것.

(라) 스캐너는 채널 용량이 크고 고속이면서 간단한 데이터 처리 기능을 보유한 것이 좋다.

(마) 컴퓨터는 데이터 처리 속도·기억 용량에 여유가 있는 것을 선택한다. 경제성을 고려하여 수집·처리 업무와 데이터 축적 업무를 분할하고 기종을 잘 맞추어 네트워크를 짜도 좋다. 최근, 멀티잡(multijob)기능을 가진 컴퓨터의 입수가 비교적 용이해져 이후 컴퓨터를 사용하는 경우에는 전원 안정 장치 및 무정전장치를 설치하여 양호한 작동 환경이 유지 될 수 있도록 조치를 취한다.

3.6 소프트 웨어의 선정·구축

NATM이나 쉘드 공법 모두 스캔 점수(占守)·속도, 계측기간으로부터 수집·보존한 데이터량을, 데이터 해석 내용으로부터 처리량을 정확하게 산정하여, 소프트웨어 설계시 작업·기억에 여유가 있도록 파일을 설계하는 것이 중요하다. 또한, 측정코자 하는 현상과 무관한 데이터로 인해 시스템의 작동이 정지되지 않도록 에러처리(자기 회복 기능)가 필수 불가결하다. 시스템 자동화에서는 계측 빈도(고정과 가변)와 막장위치의 관계, 계측의 난이도, 요구되는 피이드백 속도를 고려한다.

- (1) 계측, 데이터 정리·처리, 관리 방법의 유의점

(가) 계측은 NATM, 쉴드 공법 모두 기본적인 이론은 동일하다. 주변 지반·지표면·인접 중요 구조물·주변 환경의 측정에서는, 막장에 도달하기 1개월~반년 전부터 예비 계측을 실시하여 첫째, 데이터의 신뢰성 체크 둘째, 터널 공사와 관계없는 event(事象)에 의한 데이터 변동량 확인 셋째, 온도 계절변화에 의한 데이터 변동량의 확인에 필요한 기간을 확보한다. 특히, 주변환경이나 구조물의 경우에는 온도의 시간적 변화(일변화, 계절적 변화)에 따라 상태가 변하기 때문에, 해당 위치의 온도까지 동시에 계측하고 데이터를 통계 처리하여 그 영향을 확인함으로써 온도에 따른 변화량을 소거한다. 또한, 주변 지반·지표면은 압밀 침하·활동(滑動)·단층 등에 영향을 받아 상태가 변하기 때문에, 미리 그 양과 경향을 확인해 두거나, 아니면 그 양을 크로스체크 할 수 있는 데이터까지 함께 계측하는 것이 바람직하다. 측정 빈도는 데이터의 중요성 및 막장과의 위치 관계를 고려하고 뒤에 나오는 계측 사례를 참고하여 알맞게 설정한다. 계측 종료는 해당데이터를 시계열(時系列) 처리하여 공사의 영향에 의한 변화가 치우치게 나타나지 않는 시점까지로 한다.

복공에 관한 계측의 경우에는 복공 직후 가능한 한 신속히 계측을 개시한다. 온도의 시간적 변화에 따른 복공 상태의 변화는 앞서 말한 요령으로 처리한다. 계측 종료도 마찬가지이다.

막장 및 설비에 대한 계측의 경우에는 굴진을 개시한 후 곧바로 신뢰성 높은 데이터가 입수 될 수 있도록, 굴진을 개시하기 적어도 일주일 전에 계기의 영점(零點)·범위를 조정하고 계수를 확인하는 업을 마쳐야 한다.

또한, 계기의 보정을 정기적으로 시행하여 데이터의 신뢰성을 체크 유지하는 것이 불가결한데, 이는 모든 계측에 공통적으로 해당된다.

(나) 데이터의 정리와 해석

1) NATM: 계측 결과는 굴착에 따른 주변 지반 및 지보공의 거동을 나타내는 것으로, 현장 기술자가 현장 상황을 파악하여 정확한 판단을 내리기 위한 자료이다. 따라서 측정 후 곧바로 시간별 변화도와 분포도, 막장 진행과의 관계(경로 변화도) 계측 위치·시기, 단면 폐합 등의 특기 사항을 기입하여 알기 쉽게 정리하고 계측 항목 상호간의 관련성을 파악한다. 계측항목에 따른 정리 항목의 사례는 표 8과 같다.

관찰을 통해 입수된 정성적(定性的) 데이터는

「터널 표준 시방서(산악편)·동 해설」의 ‘갱내 관찰 조사의 기록 양식 사례 및 시공 실적 총괄표’를 참고하여 각각의 목적에 부합하는 방법으로 정리한다.

계측 결과를 정량적으로 처리하는 첫 번째 방법으로, 그림 9의 내공 변위량(內空變位量)의 시간별 변화도와 같은 시간별 계측데이터로부터 시계열(時系列) 해석을 통해 굴착에 따른 단면의 변위를 예측하여, 굴착 과정의 지보공 및 지반의 안정성을 확인하고 대책공법을 세우는 방식이 있다.(제 1정량적 처리). 두 번째 방법은, 계측으로 얻어진 구조계의 변위·변형률·응력 등을 통해 지반 및 시공 상태와 기타 영향 인자를 포괄한

표 8 관찰·계측결과 정리 항목 사례

계측항목	정리 항목			
	시간 및 거리별 변화	횡단 분포	중단 분포	기타
갱내 관찰 조사		○	○	
공재 변위측정	○		○	
천단 침하측정	○		○	
지중 변위측정	○	○		
록볼트축력측정	○	○		
숏크리트·복공응력측정	○	○		
작용 하중측정	○	○		
지표·지중의 침하측정	○	○	○	
갱내탄성 파속도측정			○	
록볼트인발시험				○
시료시험 및 원위치시험				○

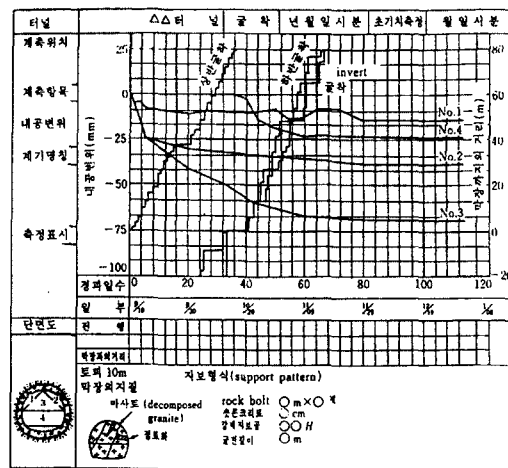


그림 9 시간에 따른 내공변위량 변화도의 양식 예

형태로, 현상을 가장 잘 설명할 수 있는 최적 구조 모델을 구해, 같은 지질조건에서 계속 시공할 경우의 지반 거동을 예측하거나 그 안정 상태를 평가한다.(제 2정량적 처리).

2) 쉘드 공법: 쉘드 공법에서 역해석은 이론적으로는 가능하지만 실제 사용하는 경우는 드물다. 이는, 쉘드 공법이 통상 연약 지반에 적용되어 굴착에 따른 지반 거동이 탄소성적·점탄성적으로 구조 모델화되기 곤란할 뿐만 아니라 설사 된다 하더라도 실용성이 없기 때문이다. 그래서 이 공법에서는 시간에 따른 변화 혹은 링(ring)에 따른 변화를 토대로 데이터를 시계열적으로 정리하거나 또는 통계적으로 처리하는 방법을 이용한다.

쉘드 공법에서 사용되는 '통계 해석 방법'은

- ① 데이터 자체의 특징을 조사하는 경우-평균, 분산, 히스토그램 등, 기초 통계량
- ② 데이터를 분류하는 경우-추정, 검정
- ③ 데이터의 상호관계를 조사하는 경우-중회귀분석(重回歸分析), 분산 분석(分散分析)
- ④ 데이터의 시간에 따른 경향을 조사하는 경우-이동 평균법, 성장곡선(成長曲線)분석, 계절 변동 분석을 비롯한 시계열해석
- ⑤ 데이터의 이상 유무를 조사하는 경우-일점관리도, 결점 관리도 등의 관리도법
- ⑥ 관리를 위한 최적치를 구하는 경우-선형계획법, Big M Method 등의 OR방법이 있다.

주변지반, 지표면, 인접 구조물, 주변환경에 관한 데이터는 시계열 해석을 통해 기존 데이터로부터 미래를 예측하거나, 중회귀 분석을 통해 다른 데이터가 관리 목적 데이터에 미치는 영향도를 조사하고 OR방법을 이용하여 관리 최적치를 결정한다.

막장이나 설비에 관한 데이터는 분산분석을 통해 지반의 변화를 감지하거나 설정된 굴진 상태를 관리한다. 또한 관리도를 통해 데이터의 이상 유무를 조사한다. 아울러 중회귀 분석을 통해 다른 데이터가 관리목적 데이터에 미치는 영향도를 조사하고 OR방법을 이용하여 관리 최적치를 결정한다.

복공 데이터는 시계열 해석으로 미래를 예측하거나 '2 ring beam~스프링 모델'과 같은 구조계를 가정하고 역해석하는 방법으로 복공의 안정성

을 확인하거나 이후 설계에 보탬이 될 자료로 삼는다.

(다) 피이드백(결과의 반영) 완전한 정보화 시공을 이루는데 가장 중요한 것은

- ① 측정 데이터를 어떻게 처리할 것인가
- ② 처리된 데이터를 어떻게 사용할 것인가

라는 해석 방법, 관리 항목·한계·대책으로 구성되는 관리 프로그램(그림 10참고)을 미리 결정해 두는 것이다.

또한, 데이터를 평가할 때는 다음 사항을 유의한다.

- ① 온도, 압밀 침하, 다른 공사 비롯한, 해당공사와 관계없는 현상 및 거동의 영향을 측정 데이터로부터 분리시킨다.
- ② 계측 데이터는 정밀도, 오차의 영향을 많이 받기 때문에 오차의 종류 및 요인과 그 정도·크기·경향을 파악해 둔다.
- ③ 계측으로 파악되지 않는 거동도 있다는 사실, 모든 현상이 계측을 통해 드러나지는 않는다는 사실을 인식한다.

또한, 자동화·AI화가 진행되고 있는 지금의 추세에 무작정 따라가지 않고, 계측·제어 시스템의 하드 및 소프트웨어의 현황을 파악하는 것, 특히 결과를 반영할 때는 안정성을 첫째로 삼는 것이 중요하다.

1) NATM : 계측결과를 설계 및 시공에 반영하는 데는 앞서 말한 계측 A 및 계측 B에 대응하는 두가지 경우가 있다. 계측 A의 대상은 매일 매일의 작업에서 안전관리와 설계 및 시공의 합리화를 목표로 하는 것이기 때문에, 막장 및 후속 굴착 구간의 지반상황을 판단하고, 동시에 선행 시공 구간의 지반과 지보공의 거동을 감시·확인하여 해당구간의 설계 및 시공의 타당성을 평가한다. 계측 B의 대상은 당초의 설계 및 시공 계획이 지반 조건에 적합한지 확인하고 지반의 특성, 지보공·복공 부재 기능을 포함한 총괄적인 검토를 실시하는 것이다. 전자에서는 미리 설정해 둔 관리 기준치를 가지고 판단하는 것이 일반적이다. 관리 기준 항목에는 시공 중인 지반 및 지보의 거동(내공 변위, 천단 침하 등), 지표면을 비롯한 주변 지반의 변화 상태, 인접 구조물, 환경 기준치 등이 있다.

그러나 실제로는, 이에 대해 표준적 관리 기준치를 정량적으로 표시하기 곤란한 경우가 많으며 또한 하나의 관리 기준 항목만으로 판단하는 것

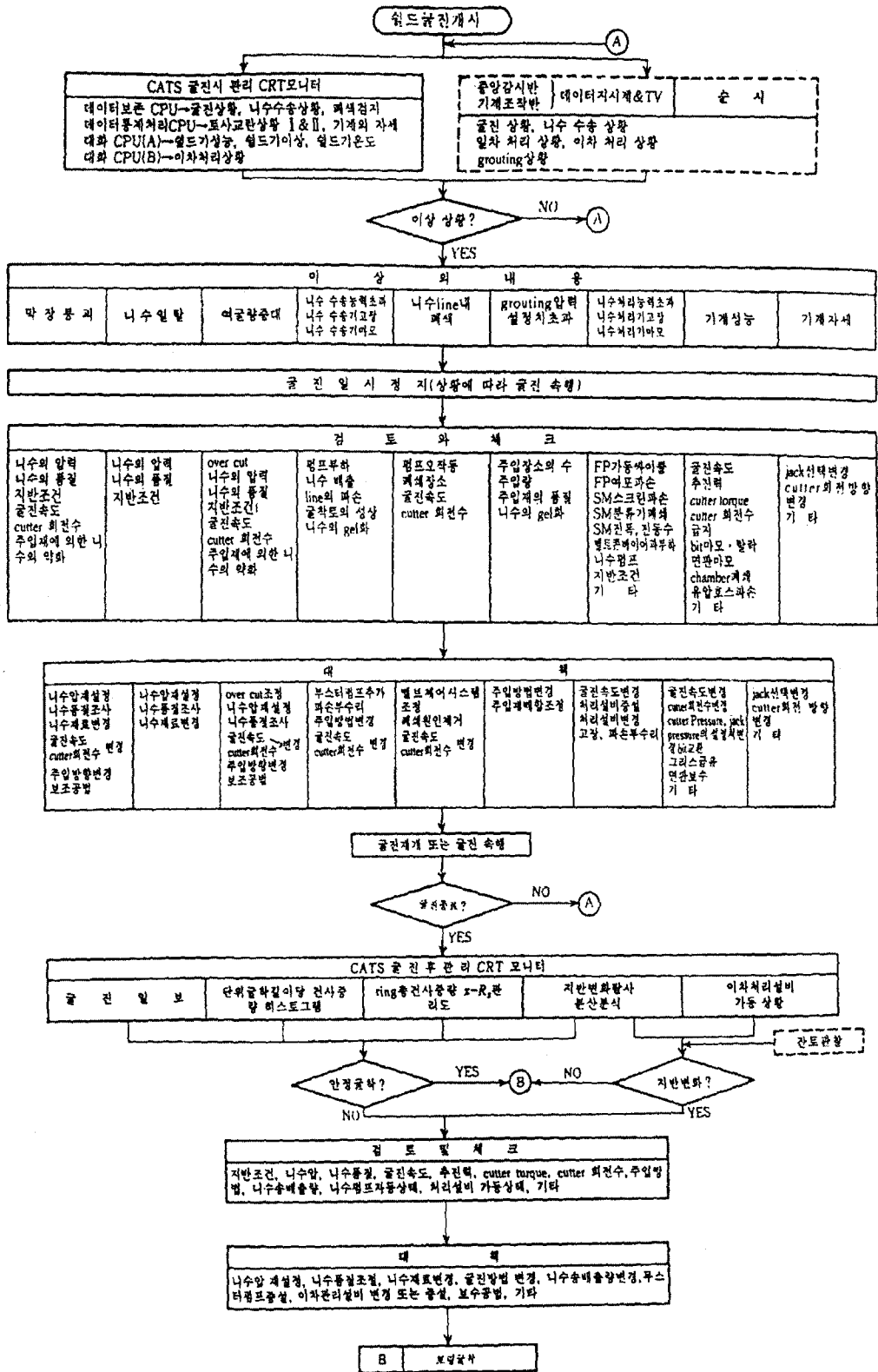


그림 10 관리 프로그램 예⁽²⁾

표 9 위험도에 대한 주의 수준(level)과 대응책의 사례(J·Franklin)

	기 준	대 응 책
주의 수준 I	어느 한군데 측정에서 변위가 0mm 이상이 된다	관리자에게 보고한다.
주의 수준 II	인접한 두 군데의 측정에서 변위가 0mm 이상이 된다. 혹은 어느 한군데 측정의 속도가 0mm/월을 넘는다.	구두로 보고 보고서가 가능해진 시점에서 검토 회의를 연다.
주의 수준 III	변위가 0mm 이상이 되고, 나아가 어느 한 군데의 측정에서 변위가 가속된다.	곧바로 주입기술자가 현지로 가 현장에서 검토 회의를 연다. 그리고 긴급 대응책을 강구한다. (이상이 생겼을 경우의 대응책에 따라 실시)

* 지질에 따라 적절히 실시 S : 재래 공법에서 특히 필요 N : NATM 공법에서 특히 필요

은 한계가 있다. 그러므로 계측 결과의 평가 및 설계·시공에의 반영은 몇 가지의 관리 기준 항목을 종합적으로 검토하여 판단하는 것이 중요하다.

참고로, 표 9에 J·Franklin이 제시한 주의 수준(level)과 대응책의 일례를, 그림 11에는 변위 속도와 지보공 하중의 관계를 소개하였다.

후자에서는 관찰, 내공 변위 및 천단 침하의 계측 외에 필요에 따라 지반 시료 시험, 갱내 단성과 속도 시험이나 혹은 재하 시험 등의 원위치 시험을 병용하여 종합적으로 평가·검토함으로써

당초 조사 결과에 기초한 지반 특성을 재평가하고 지반 특성에 대응하는 지보 유형의 타당성을 검토하는데 이바지하는 것이다. 그러므로 시공 초기 단계에서 지반을 대표하는 지점에서 계측을 실시, 평가하여 후속 구간의 설계·시공의 합리화에 반영될 수 있도록 하는 것이 일반적이다.

2) 쉴드 공법 : 이 공법에서 실측치, 계측치, 관리 기준 및 예측치에 관한 키워드(key word)의 정의와 관리 방법은 다음과 같다.

- ① 실측치 → 주계측 항목·보조 계측 항목에서 입수되는 데이터로서, 육안관찰에 의한 비 수치 데이터는 포함하지 않는다.
- ② 설계치 → 설계 단계에서 부재, 공법을 결정하는 값으로서 아래와 같은 세 가지로 분류된다.
 - A) 복공 응력을 비롯한 각종 설계 기준·지침에 기초한 계산치
 - B) 측압, 수압 등 설계 단계의 조사 결과에 기초하여 설계자의 판단으로 결정되는 값(입력 항목, 설계 조건)
 - C) 기타 검토치
- ③ 관리 기준치 → 공사의 안정성을 판정하는 기준치로서 다음과 같은 세 가지로 분류된다.
 - A) 복공응력, 주변 구조물의 침하 등, 부재 및 구조물의 허용치로부터 결정되

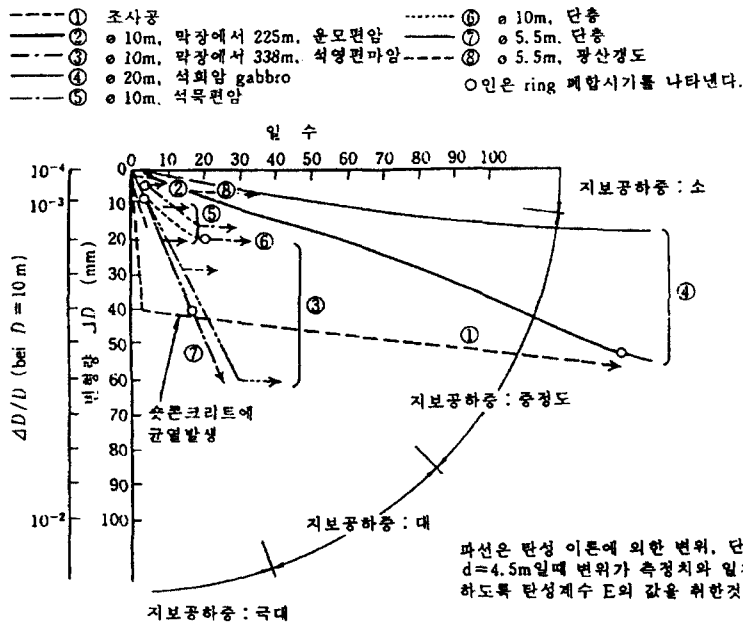


그림 11 터널에서 변위 속도를 측정 한 사례

는 값

B) 측압, 수압, 지반 침하량 등, 설계자의 판단에 따라 결정되는 값

C) 기타 보조적으로 결정되는 값

④ 예측치 → 실측치에 기초하여 현재까지의 단계에 대해 역해석하여 얻어진 각종 정수를 토대로 다음 단계 예측 계산을 실시하여 얻어지는 값. 또는, 시계열 해석 및 관리도를 이용하여 기존 실측치를 토대로 향후의 예측 계산을 실시하여 구하는 값. 그리고 중회귀 분석을 실시하여 관리 대상 항목(목적 함수)과 관계된 항목(설명 함수)으로 이루어지는 회귀식(回歸式)에 의한 LP방법으로 구하는 최적 굴진 표준으로서 다음과 같은 2가지로 분류된다.

A) 예측관리에서 직접 이용되는 값.

B) 예측관리에서 간접적으로 이용되는 값으로 실측치에 기초하여 설계자의 판단에 따라 결정되는 값

⑤ 절대 관리치 → 보통 일상적인 관리로서 행해지며, 사전에 설정한 관리 기준치와 실측치의 비교를 통해 현행 공사의 안정성을 확인하는 것으로 다음 두 가지로 분류한다.

A) Rank I : 복공응력·균열·주변 구조물의 침하 등 부재 및 구조물의 허용치를 관리 대상으로 하거나 혹은, 막장 제어 압력·굴착 토사량·선형·환경치와 같은 굴진 기준치를 관리 대상으로 하는 것으로, GO·CARE·STOP의 삼단계 정도로 관리한다. 예를들면, 제 1차 관리 기준치는 허용치의 60%

~80% 또는 $\pm 2 \sim 2.56 \sigma$, 제 2차 관리 기준치는 100% 혹은 $\pm 3 \sigma$ 로 한다.

B) Rank II : 지반의 변형량, 설비 가동 상황, 주변환경 상황등, 설계자의 판단이나 보조적으로 결정되는 관리 기준치로, 제 1차 관리 기준치로서 GO·CARE의 2단계로 관리한다.

⑥ 예측관리 → 예측치와 관리 기준치의 비교에서, 다음 단계 공사의 안전성을 사전에 확인하는 것으로, 굴착 종료 시 및 절대 관리에서 CARE수준에 도달한 시점에서 실시한다.

예측관리에서는 정확도 높은 정보를 얻는 것과 그 정보의 정확도를 판단하는 것이 중요하기 때문에 사용기기의 특성과 사용방법, 오차의 정도·원인을 파악해 두지 않으면 안 된다. 아래와 같은 사항에 대해 유의한다.

㉠ 계기 검정

㉡ 초기치 설정

㉢ 준비 계측기간의 확보

㉣ 외부 교란 변동 보정

㉤ 측정치의 Smoothing과 측정치간의 관련성 체크

준비 계측이란, 계기의 설치에서 본 계측을 개시할 때까지 계기의 작동확인 및 측정치의 판정, 초기치 설정 등을 목적으로 실시하는 것으로 측정치의 신뢰성을 높이는 데 극히 중요한 사항이다. 측정치 상호간의 관련성을 체크하는 것은 개개의 데이터로부터 전체 모습을 파악하기 위해 특히 중요하며, 전체를 올바르게 파악하는 것은 곧, 각 측정치의 가치를 높이는 것으로 이어진다.