

# 터널계측 및 주변지반의 거동평가

배 규 진 / 한국건설기술연구원 수석연구원



# 터널계측 및 주변지반의 거동평가

## 1. 계측일반

### 1.1 계측의 정의

#### 1.1.1 현장계측

계측이란 인간의 재능과 계측기기의 수행력(capability)을 조합시켜 공학적인 정보를 수집하는 행위이다. 즉, 이론과 기법, 통찰과 경험, 측정기술과 측정기기를 이용하여 공학적 문제해결에 필요한 정량적, 정성적인 정보를 얻는 것을 말한다. 이러한 계측은 흙, 암석, 콘크리트 등과 같은 재료의 물성치를 현장에서 얻기 위한 계측, 실험실에서 재료의 물성치 또는 모형의 거동특성을 규명하기 위한 계측, 구조물 시공 또는 유지관리시 현장지반과 구조물의 장단기 거동특성을 규명하기 위하여 지하수압, 전 응력, 하중, 변형, 변형율 등을 측정하는 계측 등 3가지로 크게 분류할 수 있으며, 본 항에서의 현장계측은 전술한 3번째 항에 속하는 것으로써 협의의 계측으로 볼 수 있다.

현장계측은 각 프로젝트별 계측수행 목적의 정의에서부터 계측 데이터 해석이 이르는 기술적인 수행과정의 조합으로 볼 수 있기 때문에 각 단계가 계측프로그램의 성패를 좌우하게 된다. 따라서, 계측을 계측기기의 선택, 설치 및 측정의 단순 행위로만 간주하고 누구나 계측을 손쉽게 할 수 있는 것으로 여기는 것은 매우 잘못된 일이라 하겠다.

#### 1.1.2 계측과 관측

관측이란 육안을 통하여 현상을 측정하는 방법이며, 계측이란 계측기기를 이용하여 측정하는 방법을 뜻한다. 계측기를 이용하여 측정하는 방법도 결국은 계측자의 육안관측을 통하여 측정결과가 얻어질 뿐만 아니라 계측기 내에서 측정 분석되어 나온 결과치 역시도 같은 방법으로 얻어지기 때문에 광의의 관측은 계측을 포함하고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 관측과 계측은 개념상에 약간의 차이가 있을 뿐 궁극적인 목적에 있어서는 일치한다.

일반적으로 관측은 계측의 목적을 크게 ①, 합리적인 설계, ② 시공관리, ③ 유지관리의 세가지로 분류해 볼 때, ②, ③의 두가지 목적에 직접적으로 연관된다고 볼 수 있다. 계측이란 계측기기를 통하여 측정한 계측데이터를 검토, 분석함으로써 수치적인 개념의 판단기준을 제시해 주는데 비해, 관측은 관측적인 방법을 이용하여 현상변화를 개략적으로 판단함으로써 시공안전관리, 시설 구조물의 안정성 평가 등을 수행할 수 있기 때문에 정량적인 것이

라기 보다는 경험을 바탕으로 한 정성적인 판단방법이라 할 수 있다. 따라서, 관측은 위의 ②, ③의 항목을 수행하는 데 있어서 계측에 비해 간결, 신속하고 경제적이지만 모든 면에서 정확한 판단방법이라 할 수는 없다.

관측에 의한 판단은 일반적인 상황판단과 계측결과를 통한 계측과의 연관성에 의한 판단으로 구분할 수 있다. 전자의 경우 예를 들면 터널, 기타 구조물 등에 발생된 균열을 육안으로 관측하였을 때 균열의 폭, 길이, 발생부위 등의 관측된 여러 상황을 고려하여서 구조물의 안정성을 판단함과 동시에 사고예방조치를 취하거나 정밀계측을 통해 구조물의 안전성을 평가하는 등의 조치를 취하는 것이라 할 수 있다. 후자의 경우는 계측결과를 정밀하게 분석하여 관측하고자 하는 상황과의 연관성을 파악한 후에 계측을 수행치 않고서도 관측만으로 계측의 역할을 수행할 수 있는 것을 말한다. 이러한 관점에서 볼 때 관측수행자는 계측에 대한 전문적인 지식과 대상구조물의 설계 및 시공에도 폭넓은 식견을 가진 사람이어야 한다.

일반적으로 관측계획 수립에 필요한 사항은 다음과 같다.

- (1) 전체적인 관측과 국부적인 관측의 구분 및 관측구간 설정
- (2) 관측결과의 판단기준 수립(계측결과와의 비교분석으로 연관성 도출)
- (3) 관측결과에 따른 조치사항 사전 설정
- (4) 관측주기 설정

관측은 토목구조물의 상황판단에 매우 큰 역할을 수행하게 되며, 현장여건에 따라서는 필수적인 요소가 될 수도 있다. 관측을 통한 판단은 한계성이 있고 개략적이라는 단점이 있지만 신속하게 상황판단을 할 수 있으므로 현장기술자들은 관측과 계측을 상호 보완적인 관계를 유지하도록 계획, 시행하여야 할 것이다.

## 1.2 계측의 목적

현장계측의 일반적인 수행목적은 다음과 같다.

- (1) 설계 및 시공법의 적합도에 대한 평가와 설계변경 가능성의 모색 : 설계시 채택한 각종 계수들을 평가하고 구조물의 특성, 지반상태 등에 적합하도록 설계와 시공법을 변경하기 위함이다.
- (2) 기존이론, 설계법 등의 정확도와 적용범위에 대한 평가 및 새로운 이론 또는 보다 나은 설계법의 개발 : 설계에 사용된 이론과 설계법을 계측결과와 비교, 평가함으로써

적절한 이론 및 설계법을 찾아내기 위함이다.

- (3) 시공관리 및 조기경보 계통으로 사용 : 전술한 (1), (2)의 목적은 주로 연구자, 설계자의 관심대상이고 (3)은 주로 시공자, 유지관리자가 관심대상이다. 연약지반에 성토를 하면서 간극수압계, 침하계, 경사계의 측정결과에 따라서 성토속도를 조절한 광양제철소의 예는 계측을 시공관리에 사용한 좋은 예이며, 각종 댐의 계기매설 및 계측수행은 시공관리 뿐만 아니라 완공 후 유지, 관리면에서 계측을 이용한 대표적인 예라 할 수 있다.

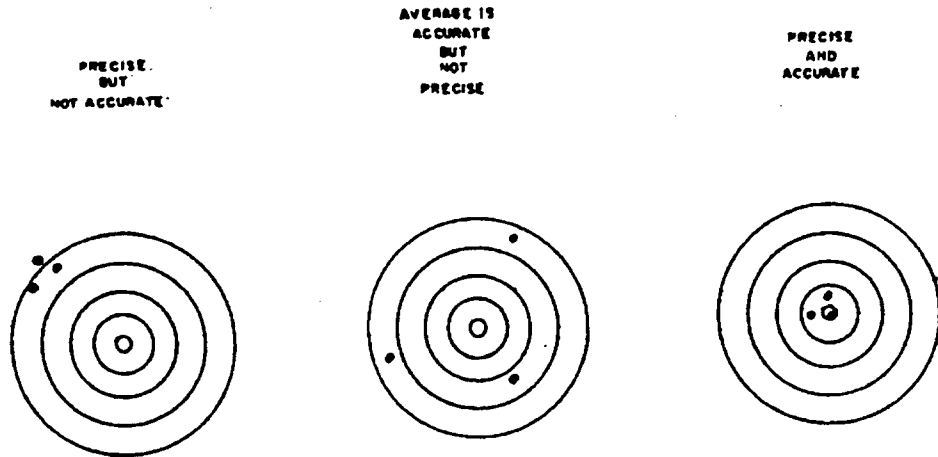
### 1.3 계측용어 정의

계측용어들을 명확하게 정의해 두는 것은 계측 수행자들간의 의사 및 정보 전달상의 오류요인을 없애는 것이 되므로 계측수행자들은 사전에 계측용어를 정확히 숙지하여 용어혼돈 및 오기로부터 오는 제반문제들을 방지할 수 있어야 한다. 따라서 계측용어들 중 많이 이용되고 있는 용어와 의미의 명확한 구분이 요구되는 용어들을 중심으로 다음과 같이 정의하였다.

#### (1) 정확도, 정밀도, 감도

정확도(accuracy)란 측정치가 참값에 근사한 정도를 나타내는 기준이며, 정밀도(precision)는 같은 조건에서 동일한 대상을 여러 번 측정한 실측치들의 상호유사 정도를 말하여 반복정밀도(repeatability)라고도 한다. 감도(sensitivity)란 계측기기로 측정할 수 있는 최소단위를 말하는 것으로 보통 계측기기의 최소측정단위보다 작거나 같다. 일반적으로 정확도, 정밀도, 감도는 측정단위 또는 계측기기로 측정할 수 있는 전체 측정범위의 백분율로 나타낸다.

그림 1.3.1은 정확도와 정밀도의 개념을 설명하는 것으로 제일 안쪽의 원은 참값을 의미한다. 첫번째 경우의 측정치들은 정밀하지만 정확한 결과는 아니며 계측기기에 영점이 동이 발생하거나 시스템 오차(systematic error)가 발생한 경우에 나타나는 결과이다. 두번째 그림은 정밀하지 않고 정확하지도 않은 결과로써 무작위 오차(random error)가 발생한 경우이며 반복하여 읽으면 평균치들은 참값에 접근한다. 세번째 그림은 정확하고 정밀한 측정결과를 보이고 있다.



[그림 1.3.1] 정확도와 정밀도

(2) 오차

오차란 측정치와 참값간의 차이이며 측정단위나 백분율로 표시한다.

(3) 신뢰도(reliability)

신뢰도란 지반변위, 압력, 온도, 습도, 충격, 시간경과, 먼지, 녹 등 환경변화에 영향을 적게 받는 정도를 의미하며 신뢰도를 향상시키기 위해서는 계측기기의 선정, 설치 및 유지 관리에 관해 상당한 신경을 써야 한다. 일반적으로 계기의 신뢰도는 정확도나 감도보다 훨씬 중요한 것으로 인식되고 있다.

측정대상의 변형량보다도 변형의 유무 또는 변형율을 알고자 하는 경우에는 그리 큰 정확도가 요구되지 않는다. 예를 들어 불안정한 사면에 경사계를 설치했을 때 사면은 이미 어느 정도 변화를 일으킨 상태이므로 추가되는 변위만을 측정할 수 있고 이러한 측정치로부터 변위가 증가 또는 감소되는 추세를 알 수 있다. 반면, 측정치의 변화추세를 짧은 시간 내에 알아내야 하거나 예상 거동량이 상당히 작은 경우에는 감도가 좋은 기기를 선택해야 한다. 그러므로 경사계를 이용하여 암반사면을 측정하는 경우 기기의 감도는 흙사면에 보통 사용되

는 기기보다 감도가 더 좋은 기기를 조심스럽게 사용해야 한다. 이 경우 사면이 파괴되기 이전에 미세한 거동을 감지할 수 있기 때문에 대응책을 마련할 수 있는 충분한 시간을 갖게 된다.

#### (4) 선형도

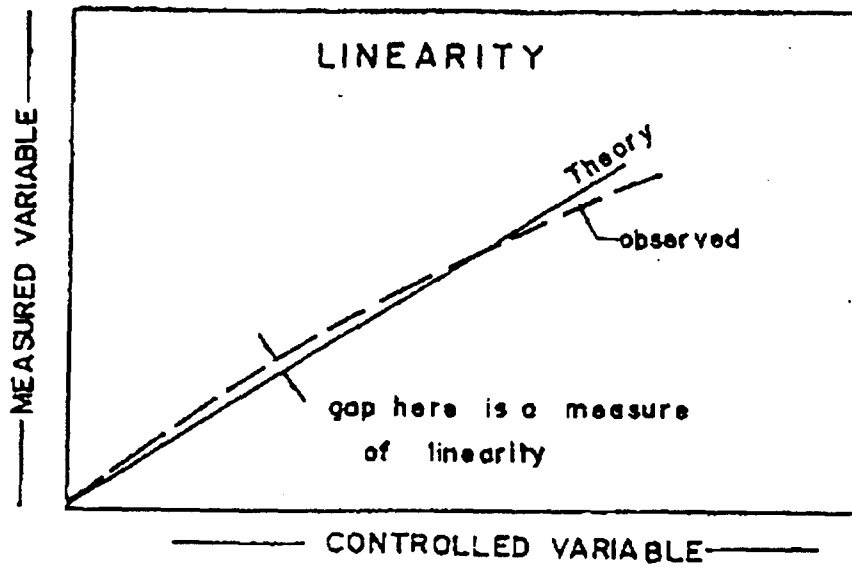
일반적으로 기기보정시 제어변수(controlled variable)와 측정시간의 관계를 이론적 근거에 의해 선형(linear)으로 설정한다. 그러나, 실제로 보정을 실시하여 도시해 보면 그림 1.3.2처럼 약간의 곡선형태를 이루는 경우가 많다. 이 때 실측치 곡선에 가장 일치하는 직선을 그어 두 선간의 최대 차이를 전체 측정범위에 대한 백분율로 나타낸 것을 선형도라고 한다. 그러므로 선형도가 1% F. S(1% full scale)라 함은 선형 보정관계를 이용할 경우 최대 오차가 전체 측정범위의 1%까지 발생한다는 의미이다.

#### (5) 이력 (hysteresis)

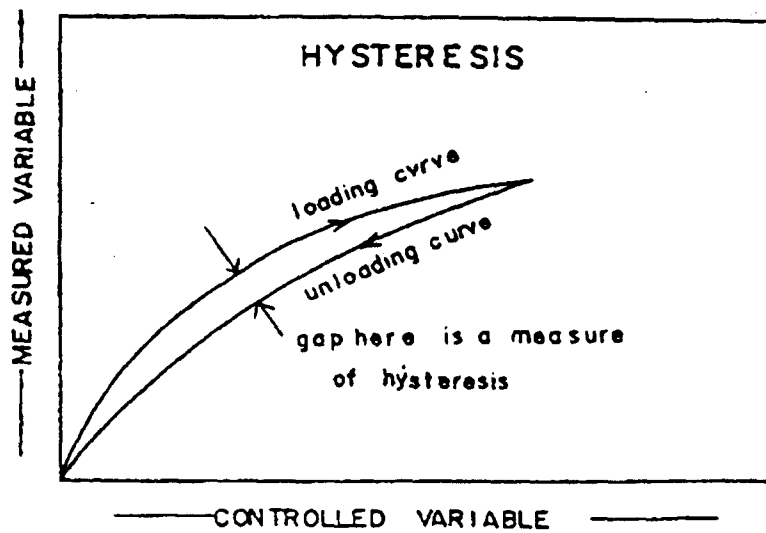
만약 조절변수를 증가시켰다가 감소시키면서 측정을 실시하면 이들간의 관계가 그림 1.3.3처럼 이력곡선(hysteresis loop)으로 나타나기도 한다. 이런 경우 제어변수 증가시와 감소시 측정곡선의 최대 차이를 전체 측정범위에 대한 백분율로 나타낸 것으로 이력이라고 정의한다. 이력이 큰 계측기기는 빠르게 변화하는 동적인 힘이나 거동의 측정에 사용할 수 없다.

#### (6) 설치 영향성(conformance)

때로는 측정시 매설된 계측기기의 존재만으로도 측정치에 영향을 줄 수 있다. 이상적인 경우라면 측정시 얻은 값이 계측기기를 매설하지 않았을 때의 값과 동일해야 한다. 그러므로 거동을 측정하기 위한 기기는 매설되거나 부착된 대상물이 자유스럽게 움직이는 것을 방해하지 않아야 한다. 예를 들면 개방식 간극수압계의 경우 투수성이 작은 점토에 매설하면 배수로의 역할을 할 수도 있으므로 다른 형의 간극수압계를 사용해야 한다.



[그림 1.3.2] 선형도



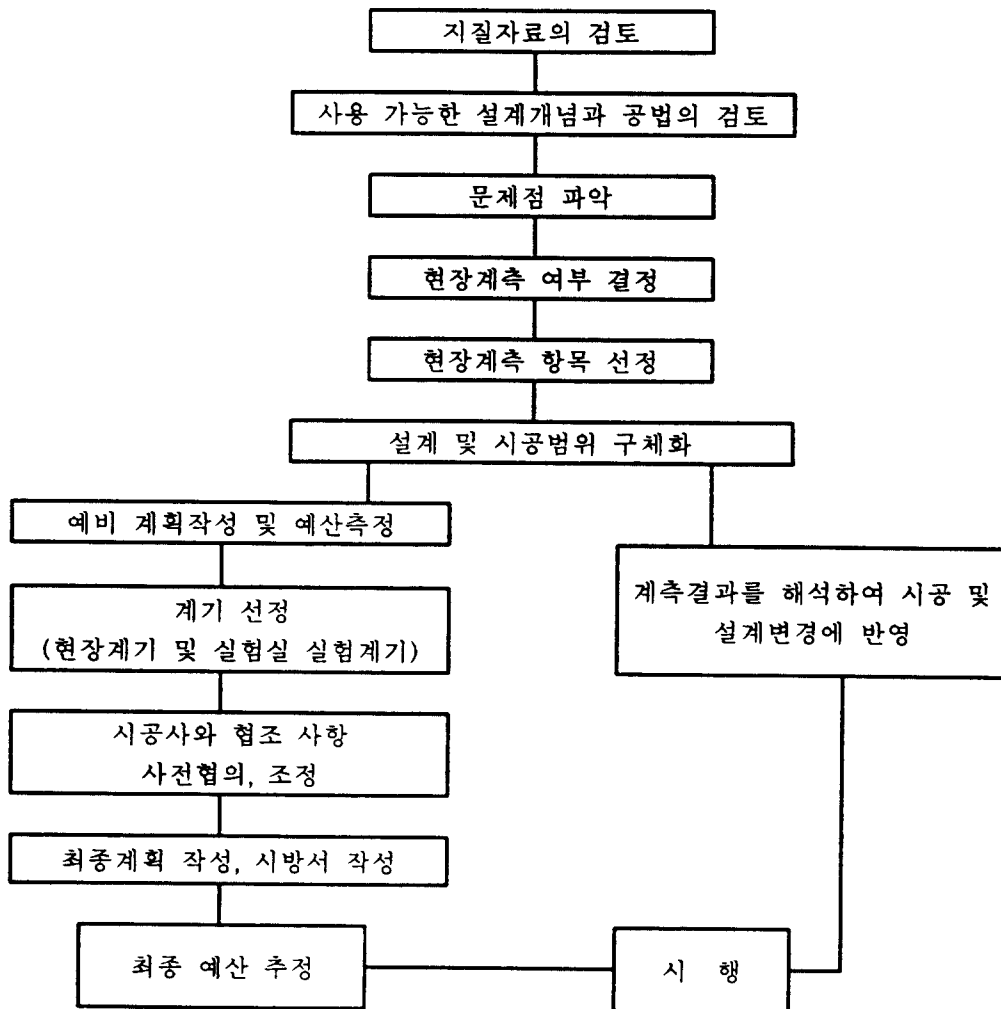
[그림 1.3.3] 이력



## 2. 계측 계획

### 2.1 개요

사전조사 및 해석결과를 기초로 하여 설계 및 시공에 적합하도록 계측의 목적, 터널의 용도, 규모, 원지반 조건, 주변환경, 시공방법 등을 충분히 고려한 체계적인 계측계획을 사전에 수립하여야 한다. 계측계획은 계측목적보다 효율적으로 달성하기 위하여 수행하는 사전 준비이며, 이를 위해서는 체계적인 계획절차가 강구되어야 한다. 일반적인 계측 계획절차는 그림 2.1.1의 흐름도와 같다.



[그림 2.1.1] 계측 계획 절차 흐름도

계측계획 수립시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 대상터널의 용도, 규모, 원지반 조건, 설계개념, 주변환경, 시공방법, 사전해석 결과, 유사터널의 시공자료 등을 검토하여 예상되는 문제점을 도출하고 이에 따라 계측의 목적을 명확히 설정한다.
- (2) 설정한 계측목적에 맞도록 계측항목, 계측위치, 계측빈도 등을 결정한다.
- (3) 계측목적과 공사현장에 적합한 계측기기를 선정하여 계측의 신뢰도를 높일 수 있도록 계획한다.
- (4) 계측결과는 현장에서 신속히 분석하여 시공에 반영할 수 있도록 그 관리기준을 설정한다.
- (5) 긴급사태에 신속히 대응하기 위해 계측결과의 분석 후 취할 조치의 내용과 범위를 사전에 고려한다.

첫번째 항목인 “왜 계측하는가” 하는 계측의 목적과 “무엇을 계측할 것인가?” 하는 계측 대항(계측항목)을 분명히 하는 것이 무엇보다도 중요하다. 또한, 계측결과를 보고 나서 “무슨 조치를 취할 것인가?” 또는 “언제 조치를 취할 것인가?”를 생각하는 것은 거의 불가능한 일이므로 여섯번째 항목은 사전에 이론적, 해석적 방법으로 결정이 되어 있어야 한다.

## 2.2 계측항목의 선정

터널 계측항목은 터널굴착 중 또는 굴착후 터널의 안정성과 경제성을 파악할 수 있고 주변환경의 영향을 평가할 수 있는 적정항목을 선정하여야 한다. 일반적으로 터널구조물의 관측, 계측항목은 육안관찰, 하중, 응력, 변위, 변형율, 간극수압, 침투수 및 누수량, 진동 등과 같은 다양한 항목들로 구성되며, 또한 그 항목별로 수많은 세부 항이 분류될 수 있으므로 경제적, 기술적인 측면을 고려하여 구조물 종류별 계측목적에 부합하는 적정항목을 선택하는 것이 바람직하다.

계측항목을 선정하는데 고려하여야 할 주요사항들은 다음과 같다.

- (1) 계측수행 목적
- (2) 구조물의 용도, 형태
- (3) 구조물의 구조적, 재료적 특성
- (4) 지질상태 및 지하수 조건

(5) 외부작용 하중

(6) 주변환경 및 시공 여건

시공중 터널 계측은 일상관리 계측과 대표단면 계측으로 구분할 수 있으며 일상 관리 계측은 시공대상 전구간에서 시행하는 주로 터널 시공안정성을 확인을 위한 계측이며, 대표단면 계측은 대표적 지반조건이나 초기 굴착구간에서의 소성영역의 분포 및 지보재(Shotcrete, Rockbolt)의 응력 등의 거동을 파악하여 지보부재의 안정성과 설계타당성 및 미 굴착구간의 시공을 위한 계측으로 볼 수 있다.

일상관리 계측과 대표단면 계측의 종류는 각각 표 2.2.1 및 2.2.2에 나타낸 바와 같다.

<표 2.2.1> 일상관리계측(A 계측) 종류

계측항목	조사항목
갱내 관찰 조사	<ul style="list-style-type: none"><li>• 막장의 자립성, 암질, 단층파쇄대, 구조 변질대의 성상 파악</li><li>• 지보공의 변상 파악</li><li>• 설계시 지반구분의 평가</li></ul>
내공 변위 측정	<ul style="list-style-type: none"><li>• 변위량, 변위속도, 변위수렴상태를 파악하여 주변지반의 안정성 확인</li><li>• 1차 지보에 대한 설계 및 시공의 타당성 평가</li><li>• 2차 복공의 실시 시기 등을 판단</li></ul>
천단 침하 측정	<ul style="list-style-type: none"><li>• 터널 천정부 지반 및 지보재의 안정성 판단</li></ul>
지표 침하 측정	<ul style="list-style-type: none"><li>• 터널 굴착에 따른 지표침하 영향파악</li><li>• 주변 구조물의 안전도 분석, 침하방지대책 수립 및 효과 파악</li></ul>
R/B 인발시험	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rockbolt의 인발내력, 정착상태 판단</li></ul>

<표 2.2.2> 대표위치계측(B 계측) 종류

계측항목	조사항목
Shotcrete 응력측정	• Shotcrete의 배면토압 및 축방향응력 측정
Rockbolt 축력측정	• Rockbolt에 작용되는 축력을 심도별로 측정 • Rockbolt의 지보효과, 유효설계길이 판단
지중 침하 측정 (지상 설치)	• 심도별 지중 수직변위량을 측정, 터널 이완영역의 범위 등을 판단 • 지중매설물 안전성 파악
지중 변위 측정 (터널 내부 설치)	• 터널 주변의 이완영역의 범위, 지반 안정도 판단 • Rockbolt 길이의 타당성 등을 판단
지중수평변위측정	• 수평방향의 지반이완영역 및 절리 경사 방향 등을 판단
지하수위 측정	• 굴착에 따른 지하수위 변동 파악(차수 Grouting 효과 등)
간극수압 측정	• 지중에 작용하는 수압측정(차수 Grouting 주입 압력 판단)

## 2.3 계측위치 및 측선계획

### 2.3.1 개요

계측위치는 구조물의 구조적, 재료적 취약부, 구조물 및 지반의 거동특성 등을 사전에 조사, 분석하여 가장 큰 응력 및 변위가 발생하는 부위나 외력 및 내부응력 변화에 따른 영향 범위를 명확하게 파악한 뒤, 계측목적에 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 그러나, 지중선, 지하철 등과 같이 연장이 긴 구조물 공사에서는 시험구간(test section)을 설정하여 집중적인 계측을 수행하는 경우가 많다. 일반적으로 계측위치는 중요한 지점, 예를 들어 교차로 부근, 중요한 구조물 부근, 지반상태와 설계가 변화되는 지점, 재료가 변경되는 지점, 과도한 변위가 우려되는 지점 등에 선정하는 것이 보통이나 공사현장이 광범위한 경우에는 전체 시공현장의 대표적인 장소를 시험구간으로 선정하고 집중적으로 계측, 관리하여 그 결과를 잔여구간에도 적용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 시험구간은 아래와 같은 지점에 선정하는 것이 좋다.

- (1) 비교적 단순하고 대표적인 지반상태를 갖는 지점
- (2) 주위에 특수시설이 없는 지점

(3) 설계와 시공면에서 대표적인 지점

(4) 기기의 설치와 그 계측이 용이하며 공사에 지장을 적게 주는 지점

### 2.3.2 계측위치

지반과 지보재의 거동을 종합적으로 파악하고 계측의 신뢰성 향상을 도모하기 위해서는 각 계측항목 상호간의 연관성을 분석하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 터널의 용도, 규모, 지반조건, 시공방법, 기 시공구간의 계측결과 등 터널의 여러 상황을 고려하고 계측목적에 부합하도록 터널의 종단 및 횡단 방향별로 계측위치 및 배치간격을 적절히 선정하여야 한다.

일반적으로 계측항목별 계측위치는 다음 사항들을 고려하여 계획할 수 있다.

#### (1) 갱내 관찰조사

막장관찰은 각각의 막장에 대하여 실시하는 것을 원칙으로 하여 1막장 진행 때마다 막장상태를 관찰 기재양식에 기록하는 것으로 한다. 단 지질의 변화가 거의 없는 경우는 1일에 대표적인 1~2 막장에 대해서만 기록한다. 기 시공구간에 대한 관찰조사는 적어도 1일에 1회 정도 관찰하여 그 사항을 기록하는 것으로 한다.

#### (2) 내공변위 및 천단침하

내공변위 및 천단침하 측정은 동일 단면에 대하여 실시하는 것을 원칙으로 한다. (두 항목 중 한 항목에 중점을 두어 여러 회 측정해야 할 경우는 예외로 할 수 있다.)

계측간격은 시공초기단계와 갱구부근 또는 토피가 얇은 경우에는 계측간격을 좁혀 시공패턴과 변위량과의 관계를 세밀히 조사하고, 지질정보, 지보패턴, 시공방법 및 다른 계측항목들과의 관련성 등에 관한 자료가 축적되면 점차적으로 계측간격을 넓히는 것이 좋다. 지질 변화 측면에서는 지질이 양호하고 균질한 경우에는 표준간격을 넓히고 지질의 변화가 심한 경우는 표준간격을 좁힌다. 또한 계측 B가 실시되는 단면에서는 내공변위 및 천단침하를 반드시 측정하여 계측결과를 상호 비교할 수 있도록 한다.

#### (3) 지표침하

토피가 낮은 터널은 통상 토사터널 혹은 연약한 암반터널이 되는 경우가 많고 큰 지표침하가 발생하는 경우가 많다. 따라서 지표침하 측정은 터널 및 주변지반의 안정성을 평가하기 위해 실시되어야 한다. 침하량은 일반적으로 지질, 지하수위, 주변 구조물의 유무 등이나 시공법에 의해 크게 변화하게 된다. 또한, 지표침하 측정 중 최소한 1개는 내공변위 측

정, 천단침하 측정 위치와 동일한 지점으로 하는 것이 바람직하다.

#### (4) 계측 B

계측 B의 실시목적은 A 계측결과와 연계하여 지반거동을 파악하고 그 결과로부터 원설계의 타당성 혹은 초기단계의 실시설계를 검토하여 그 결과를 차후의 설계 및 시공에 반영하는데 있다. 이를 위해 계측 B는 시공초기단계에서 실시하는 것이 바람직하며 계측단면은 대표적인 지질구간에 설정하는 것을 원칙으로 한다.

터널길이가 길어 터널이 여러종류의 지반층을 통과하는 경우는 지반종류별로 각 굴진초기 단계에 B계측을 실시하여 설계의 적정성을 평가, 보완해 나가는 것이 필요하다. 특히 이러한 경우 터널설계단계에서 수행된 FEM 해석단면과 계측단면을 일치시켜 해석의 적합성을 함께 검토하는 것이 보다 유리하다.

터널의 길이가 짧고(보통 약 200m 이하) 유사지반 조건하의 터널이 근접하여 시공되고 있는 혹은 지반이 안정하여 시공상의 문제가 없는 경우에는 계측 B를 생략하는 경우도 있다.

계측 B는 일반적인 지반의 경우 1단면/200~500m 정도로 실시하는 것을 표준으로 하지만 터널의 규모나 지반조건 등 각종의 터널상황에 따라 정할 필요가 있다.

### 2.3.3 계측선 배치

#### (1) 내공변위 측정의 배치

내공변위의 측정수는 표 2.3.1을 기준으로 한다.

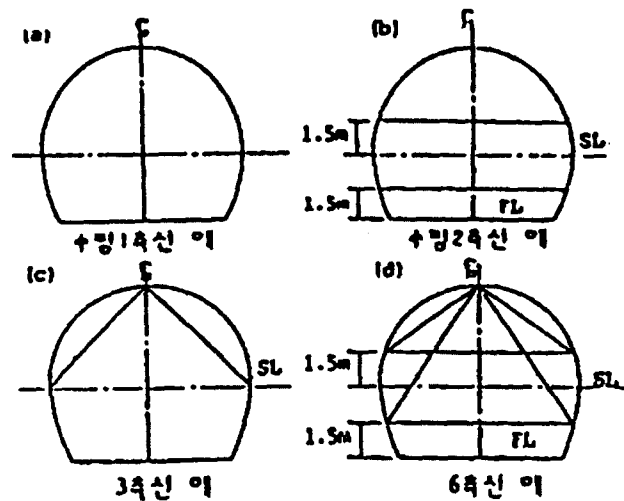
<표 2.3.1> 내공변위 측정의 측정 수

구 간 굴착공법	일반구간	특수구간			
		갱구부근	토피 2D 이하	팽압이나편압이 예상되는 구간	계측 B를 실시하는 위치
전단면 굴착	수평 1측선	-	3측선 또는 6측선	-	3측선 또는 6측선
반단면 굴착	수평 2측선	4측선 또는 6측선	4측선 또는 6측선 주1)	4측선 또는 6측선 주2)	4측선 또는 6측선
분 할 굴 착	각 벤치마다 수평 1측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선 주1)	각 벤치마다 3측선 주2)	각 벤치마다 3측선

주 1) 지표 및 지중침하 측정 등, 지상부 계측이 충분히 실시되는 경우에는 경사측선을 생략해도 무방하다.

주 2) 변위량이 큰 경우(내공 변위량이 복선 단면에서 200mm, 단선단면에서 100mm를 초과하는 경우), 혹은 편압현상이 현저할 경우에는 측량 등에 의해, 절대변위 측정도 병행해서 실시한다.

이 표에서 제시한 측선수는 일반적인 경우이므로 각종 터널에 있어서 시공실적(계측자료)의 측정상황에 따라 측선수를 적절히 조정하는 것이 바람직하다. 그림 2.3.1에는 측선배치의 한 예를 보여주고 있다.



[그림 2.3.1] 내공변위 및 천단침하 측정의 측선배치 예(복선터널의 경우)

### (2) 천단침하의 측정 설치

천단침하는 내공변위와 동일 단면에서 측정하고 그 측점은 터널의 천단부 중심점에 설치하는 것을 원칙으로 한다. 터널이 전체적으로 침하하는지를 알아보기 위해서는 천단침하와 더불어 터널의 하단부 침하량을 측정하는 것이 바람직하다.

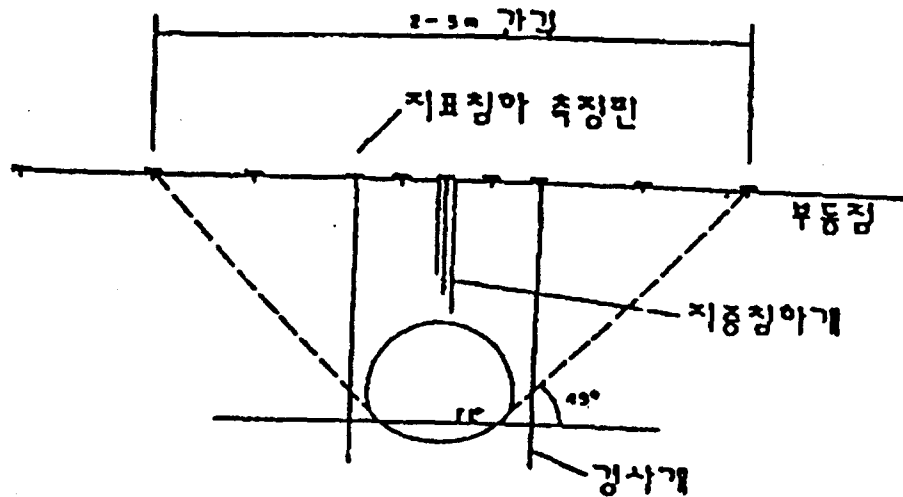
### (3) 지표 및 지중침하

토피가 얇은 터널은 통상 토사터널 혹은 연암반터널이 되는 경우가 많고 큰 지표 및 지중침하가 발생하는 경우가 많다. 따라서 지반침하측정은 터널 및 인접구조물의 안정성을 확보하기 위해 실시되어야 한다. 침하량은 일반적으로 지질, 지하수위나 시공법에 의해 크게 다르며, 침하 발생 영역도 변화하는 것이 일반적이다.

침하의 측점은 계측결과의 상호 비교를 위하여 내공변위 측정, 천단침하 측정 위치와 동

일한 지점으로 하는 것이 바람직하다. 측정위치는 터널 중심선상의 지표면에 설치하여야 하나 현장 여건상 곤란할 경우에는 가능한 한 중심선에 근접하도록 설치한다. 측정점의 배치는 터널의 규모, 시공방법, 토피 등에 따라 다르지만, 일반적으로 지표침하의 경우 터널축에 직각으로 거리별 여러 개의 계기를 설치한다. 이 때 터널 저부에서 45° 각도로 올린 지표면의 바깥쪽에는 부동점을 설치해 두어야 한다.

지표 및 지중침하계를 터널 굴착전에 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 2.3.2] 지표침하 측정대상 및 지중침하 측정의 측정배치 예

(4) 계측 B 중 터널내에 계기를 설치하는 항목

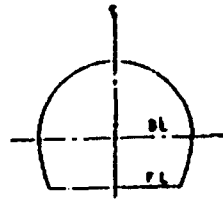
계측 B의 여러 항목 중, 계기를 터널내에 설치할 필요가 있는 항목(지중변위 측정, 록볼트 축력측정, 슛크리트 응력측정)에 대해서는 1단면마다 3~5점을 표준으로 하지만, 그



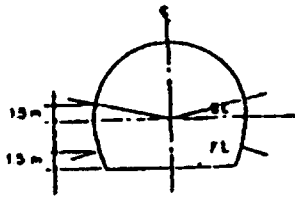
배치는 여러가지 터널의 실시 설계패턴에 의해 적정한 위치를 고려하여야 한다. 단, 록볼트의 타설위치나 내공변위 측정용 핀의 위치에 가능한 한 가깝게 설치하는 것이 계측결과 해석에 유리하다. 그림 2.3.3은 계기배치의 일례를 나타낸다.

또한, 단면내의 연속적 정보를 알고자 하는 경우에는 7점 정도의 측정점이 필요하게 된다. 또, 지반상황이나 그때까지의 계측결과로부터 편압, 변위의 편기가 분명하게 되는 경우는 전체 단면 측정이 아닌 부분적인 측정을 행하여도 좋다.

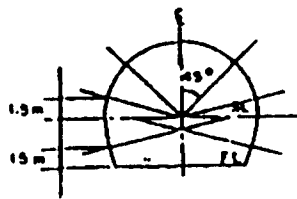
(i) 3측점의 경우  
 그림은 진단민감착인 경우에서  
 쇼트변치인 경우는 SL 부 측정용  
 1.5m 높게 한다.



(ii) 5측점의 경우



(iii) 7측점의 경우



지중변위측정  
 록볼트 후립측정  
 보강용핀측정

[그림 2.3.3] 계측 B의 계기 배치(복선단면인 경우)

### 2.3.4 측정빈도

측정빈도는 막장의 진행속도와 지반 및 지보재의 거동 등을 고려하여 결정한다. 측정빈도는 계획시에 지반조건이나 시공조건을 동시에 고려하여 설정하고 시공과정에서 계측에 의한 지반 및 지보재 거동의 변화를 파악하여 적절한 수정을 가하는 것이 중요하다. 일반적으로 변위나 응력의 변화는 굴착직후에 가장 크고 시간의 경과와 막장이 멀어짐에 따라 감소하는 경향이 있고 초기 측정치는 이후 측정치의 기준이 되므로 시공상황과 주변 여건이 허락한다면 막장에 가장 근접한 곳에서 굴착직후부터 계측을 실시하는 것이 중요하다. 측정시 시공조건 등의 제약 때문에 각 계측항목, 위치에 따라 측정시간이 달라진다면 계측결과의 평가에 지장을 초래할 수 있으므로 측정시기에 주의하여 각 계측항목간의 계측시기를 동일하게 유지해야 한다. 또한, 동일 단면 내에서의 측정빈도는 변화의 정도가 가장 큰 항목의 계측에 필요한 횟수에 맞추어 측정빈도를 같게 한다.

#### (1) 내공변위 및 천단침하의 측정빈도

내공변위 및 천단침하의 측정빈도는 수렴할 때까지의 기간, 변위량, 폐합시기, 굴착방법 등에 따라 다르지만 기본적으로는 변위속도(변위량/1일) 및 막장과의 간격으로 정하는 것으로 한다. 측정빈도는 변위경향이 파악될 수 있도록 설정해야 하며, 초기단계에서는 대략 1~2회/일 정도가 표준이고 변위속도가 감소하거나 계측지점에서부터 막장까지의 거리가 증가함에 따라 순차적으로 감소시키는 것이 일반적이다.

<표 2.3.2> 내공변위, 천단침하의 측정빈도

측정빈도	변위속도	막장으로부터의 거리	비 고
1~2회/일	10mm/일 이상	0D~1D	
1회/일	10~5mm/일	1D~2D	
1회/2일	5~1 mm/일	2D~5D	
1회/주	1mm/일 이하	5D 이상	

위 도표와 같이 변위속도에 의한 측정빈도와 막장으로부터의 거리에 의한 측정빈도 중에서 빈도가 많은 쪽을 선택하여 측정한다. 변위경향이 일정한 경우에는 위 표에서 나타난 빈도에 반드시 따르지 않아도 좋다.

상부 반단면 굴착공법에서는 하반 막장의 접근에 따라 상반측선의 빈도를 다시 높여 하반 굴착에 의한 영향을 파악할 수 있도록 해야 한다. 단선 병렬 터널 또는 측벽 도강공법의 경우에는 후속 터널의 접근에 의한 영향을 알기 위해서는 선진터널의 측정빈도를 증가시킬 필요가 있다.

### (2) 지중변위, 록볼트 축력, 콘크리트 및 복공용력의 측정빈도

이들 항목들에 대한 측정은 동일단면에서 측정되는 내공변위, 천단침하 측정과 동시에 하는 것을 원칙으로 하지만 변위나 응력변화의 상황에 따라 측정빈도를 증감할 수도 있다. 예를 들어 슛크리트 응력의 경우 초기단계에서부터 허용응력에 가까워질 때까지의 측정이 중요하므로 이 시기에는 측정빈도를 높일 필요가 있다.

### (3) 지표침하 및 지중침하의 측정빈도

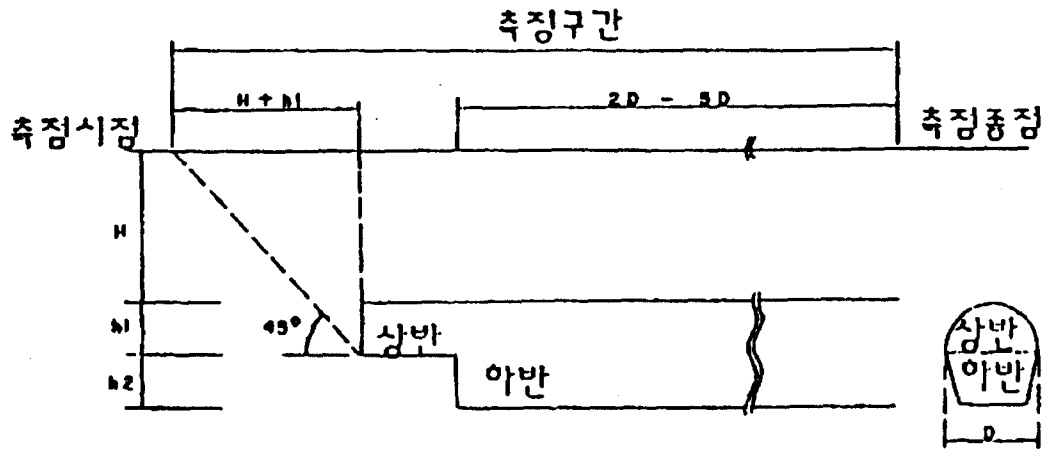
지표침하, 지중변위 등의 측정은 그림 2.3.4에 나타난 바와 같이 일반적으로 막장으로부터 계측기 설치단면 위치까지의 거리가  $H+h_1$ ( $H$ :피복두께,  $h_1$ :터널의 높이) 또는  $2D$ ( $D$ :터널폭) 정도 될 때까지 막장이 접근한 시점(둘중 큰 쪽을 택함)에서 시작하여 굴착이 진행되면서 발생한 변위가 수렴할 때까지 측정한다.(일반적으로 계측단면에서 막장까지의 거리가  $2D-5D$  정도) 이 기간의 측정빈도는 1회/1-2일 정도가 일반적이지만 막장이 계측지점을 통과하는 전후에는 1-2회/일, 또는 1굴진장마다 1회 정도로 행하는 것이 바람직하다. 단, 토피의 두께, 지반조건, 시공방법, 주변구조물의 유무와 그 중요도 등에 따라서 측정빈도를 적절히 조정해야 한다.

전술한 내용들을 요약하면 다음 표와 같다.

<표 2.3.3> 일반계측 계획

계측항목	계측간격	배치	빈도				설치시기	
			-20일 (-3D)	0-15일 (0-2D)	15-30일 (2D-3D)	30일- (3D이상)		
일상 계측 (A계측)	갱내관찰 조사	전연장	각막장	-	1회/일	1회/일	1회/일	-
	지표침하 측정	20~40m	터널상부 3~5개소	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D 이상
	내공변위 측정	20~40m	터널상부 단면 및 하부단면	-	1-2회/일	1회/2일	1회/주	막장후방 s/c타설 후, 굴진 전설치및 초기치 측정
	천단침하 측정	20~40m	천단부	-	1-2회/일	1회/2일	1회/주	초기치 측정
	Rock Bolt인발 시험	50본당 1본 정도	1단면 · 5본	-	-	-	-	정착효과 발생후 측시
대표 계측 (B계측)	지중침하 측정	200~300m	터널상부 3~5개소	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D이상
	지중수평 변위측정	200~300m	터널상부 양측	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D이상
	Shotcrete 응력측정	200~300m	접선, 반경방향 의 3~5개소	-	1회/일	1회/2일	1회/주	막장후방 굴진 전설치 및 초기치 측정
	지중변위 측정	200~300m	3~5개소 /단면(3~ 5개소의 다른 심도)	-	1회/일	1회/2일	1회/주	
	Rock Bolt축력 측정	200~300m	3~5개소 /단면(3~ 5점이상 /개소)	-	1회/일	1회/2일	1회/주	

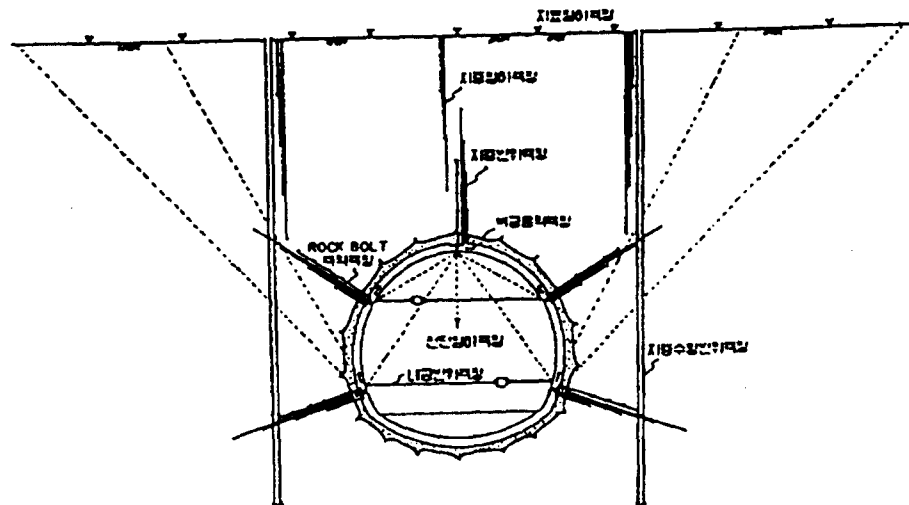
\* 빈도란중 ( )은 계측기 설치 위치로부터 터널 막장까지 거리임 (D : 터널직경)



[그림 2.3.4] 지표침하의 축징구간(종단방향)

(4) 터널계측 표준단면도

일상 관리계측 및 대표단면 계측의 기본배치에 대한 표준단면도는 그림 2.3.5와 같다.



[그림 2.3.5] 터널계측 표준단면도

## 2.4 계측기기의 선정

계측기기는 전 세계적으로 수많은 종류가 개발, 보급되고 있기 때문에 용도에 따른 적정계측기기를 선정한다는 것은 용이한 문제가 아니다. 따라서, 적정계측기기를 선정하기 위해서는 각별한 주의와 함께 기기특성에 대한 사전정보가 요구되며, 경우에 따라서는 계측기기의 검증이 필요하게 된다.

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 위한 사전검증이 필요하다.

계측기기는 복잡한 것보다는 간단한 것, 전기식보다는 기계식 기기, 가동부분이 많은 것보다는 적은 쪽이 사용, 보정, 보수에 편리하다. 기기 자체에 이상이 있으면 측정과 결과분석을 아무리 잘하여도 정확한 결과를 얻을 수 없으므로 기기의 보정과 유지관리에도 유의하여야 한다. 또한, 기기의 이상, 고장을 항상 염두에 두어 한 두개의 기기 고장으로 전체 측정치가 무용지물이 되지 않도록 중요한 위치에는 기기의 수요에 항상 여유(redundancy)가 있도록 하여야 한다. 기기의 고장시, 또는 측정치가 계측범위를 초과할 것이 예상되지만 재조정(resetting)이 불가능할 때를 대비하여 예비기기도 준비하여야 한다.

계측기기 선정시 일반적으로 유의해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 계측기기의 정밀도, 계측범위 및 신뢰도가 계측목적에 부합할 것.
- (2) 구조가 간단하고 견고하며 설치가 용이할 것.
- (3) 계측기기의 가격이 저렴할 것.
- (4) 온도, 습도 등의 제반영향 인자에 대해 자체 보정이 되거나 보정이 간단할 것.
- (5) 측정치에 대한 계산과정이나 분석절차가 간단할 것.
- (6) 가능한 한 측정치의 자체검증이 이루어질 것.
- (7) 기기-터미널간의 연결관 또는 케이블이 물리적, 화학적 작용에 견딜 수 있을 것.
- (8) 지상부 터미널의 기후변화나 물리적 피해에 견딜 수 있을 것.
- (9) 부식이나 전기적 방해요인을 극복할 수 있을 것.

## 2.5 측정시스템의 구성형식

측정시스템은 계측항목에 따른 정도와 측정의 편리성, data의 양, 경제성 등을 고려하여 최적의 측정시스템을 구성하는 것이 중요하다. 측정시스템은 다음과 같이 분류할 수 있다.

### (1) 수동측정

다이얼 게이지나 포터블 측정 Unit를 사용하여 직접 측정·수록하며, 계측요원이 안전하고 쉽게 접근할 수 있는 곳, 측정빈도가 많지 않은 곳에 사용한다. 비용이 적게 드나 번거롭다.

### (2) 장기기록계

한달 또는 1년 동안 자동 기록되는 Mechanical Recorder를 사용하여 측정한다. 장점으로서는 태엽에 의한 장력을 사용하여 Power 및 유지관리가 없어도 가능하며, 원거리 측정, 구조적 운동의 기록, 특히 지진의 기록에 유리하다.

### (3) 전기식 원격측정

포텐서미터나 진동현센서를 이용하여 측정하는 것으로 근접할 수 없는 곳에서도 측정이 가능하다. 리드선의 길이에 따른 보정이 필요 없다. 데이터로거를 이용하여 여러 진동현센서를 설치하여 동시에 원하는 빈도로 자동 측정할 수 있으며, 수동측정도 가능하다.

### (4) 전자식 원격측정

Inductive 센서를 이용하여 측정하며, 감도가 높은 분석용량이 크다. 여러기기의 측정을 동시에 할 수 있으며, 특히 지반진동, 지진 등 동적현상 점검에 적용된다. 접근하기 힘든 곳에 가능하고 자동, 수동측정이 가능하다.

## 2.6 계측기기의 보정

계측기기는 정확한 계측결과의 획득을 위하여 설치 전 및 설치 후에 작동성 검사(보정)가 필요하다.

(1) 일반적으로 제조업자로부터 공급받은 기기는 운송단계에서 손상받을 가능성이 크므로 설치 전에 반드시 기기작동성 검사가 필요하다. 제조업자는 기계판매시 보정표(Calibration charts) 또는 보정계수를 사용업자에게 제공하게 되어 있으며, 이러한 보정표와

기기의 영점이동은 간단한 기구를 사용하거나 간편한 시험으로 검증할 수 있고 제조업자로부터 제공받은 표준척 즉, 다이알 지시계, 심도 마이크로미터, 기계식 스트레인게이지 등으로부터 조사할 수 있다.

(2) 예를 들면, 간극수압계의 경우, 일정한 수심 하에 수침시켜 정확성을 평가할 수 있고 경사계의 경우 실험실에서 일정한 각도로 고정된 케이싱 속에 경사계를 설치, 작동시켜 조사할 수도 있다. 계측기가 설치된 후에 현장보정이 필요한 때는 기기종류와 설치상태에 따라 다른 보정방법을 적용할 수 있으나, 주로 많이 쓰이는 방법으로는 수압잭을 사용하여 단계별 하중제거를 통해 적합성을 검증하는 방법이 있다.

(3) 휴대용 장치의 경우 참고용 표준척이나 무하중 게이지를 이용하여 보정할 수 있으나, 전문보정업체에 보정을 의뢰하는 것이 바람직하다. 따라서 기기에 부착된 스티커에는 반드시 최근 보정한 일자와 다음 보정일자가 명기되어 있어야 한다.

### 3. 터널계측자료 분석

#### 3.1 막장 관찰

##### (1) 목적

- 1) 지반조사의 불확실성 보완
- 2) 지반변화 예측
- 3) 지반 붕락 가능성 예측
- 4) 굴진장 및 지보재 설계변경 자료
- 5) 계측 분석 및 시공 안정성 확인의 기초자료

##### (2) 관찰내용

- 1) 막장, 두께, 측벽의 관찰
  - 가) 암종, 암반등급, 파쇄대
  - 나) 주요절리의 주향/경사, 간격
  - 다) 절리의 폭, 변질도
  - 라) 지하수 상황

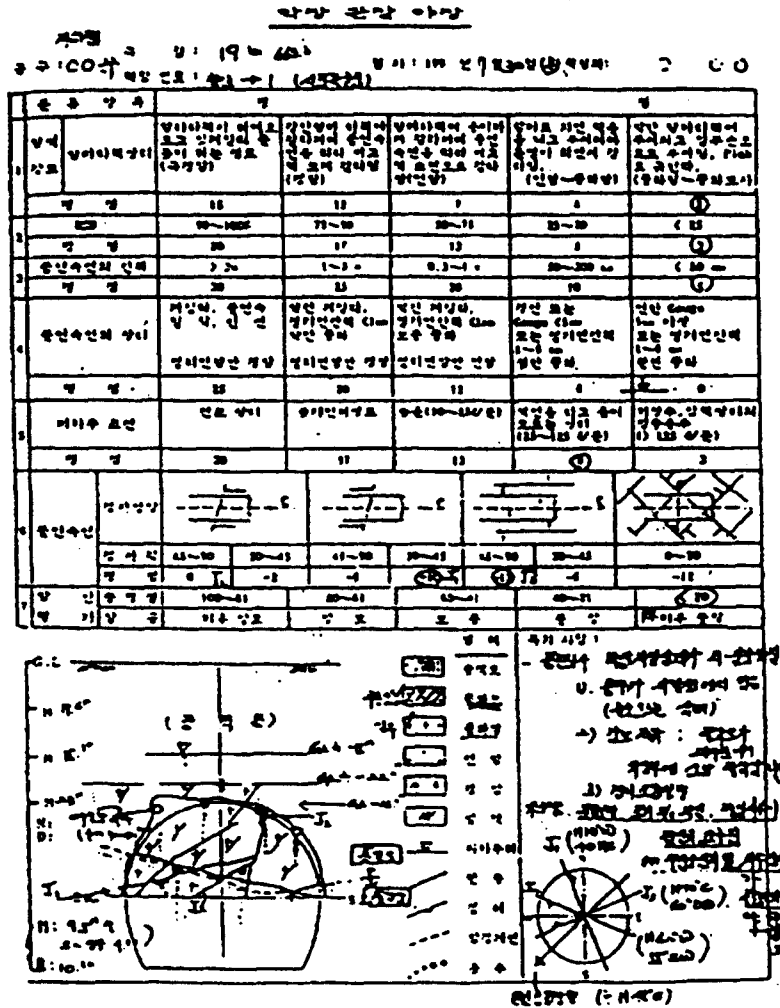


2) 기시공구간 관찰

가) Shotcrete 및 Rockbolt 상태

나) 용수개소 및 용수량

(3) 막장 관찰 사례



[그림 3.1.1] 막장 관찰 사례

3.2 지표침하

터널거동에 관한 연구는 많은 학자들에 의하여 이론적, 실험적, 현장계측방법 등을 통하여 이루어져 왔다. 이들 연구결과들이 대체로 지반거동 문제를 명확하게 규명하지는 못하

고 있으나, 지표침하에 대하여는 침하형상에 있어서 거의 일치하는 결과들을 보이고 있다. 즉, 지표의 횡방향으로는 Gauss 확률분포곡선에, 종방향으로는 Error function곡선에 잘 일치하는 형상의 침하가 일어나는 것으로 밝혀지고 있으며, 일반적으로 다음과 같이 표시할 수 있다. (그림 3.1.1, 그림 3.1.2 참조)

$$S_x = S_{\max} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\alpha)^2}{2i^2}\right\} + \gamma_1$$

$$S_y = S_{\max} \cdot \operatorname{erf}\left\{-\frac{(y-\beta)}{i}\right\} + \gamma_2$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{y-\beta}{i}\right) = \int_{-\infty}^{\frac{y-\beta}{i}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

$S_x(S_y)$  : 터널의 횡방향(종방향)침하량

$S_{\max}$  : 최대침하량

$i$  : 최대경사가 일어나는 위치

$x(y)$  : 터널 축에 직각방향으로의 거리

$\alpha(\beta)$  :  $x(y)$  방향으로의 편차

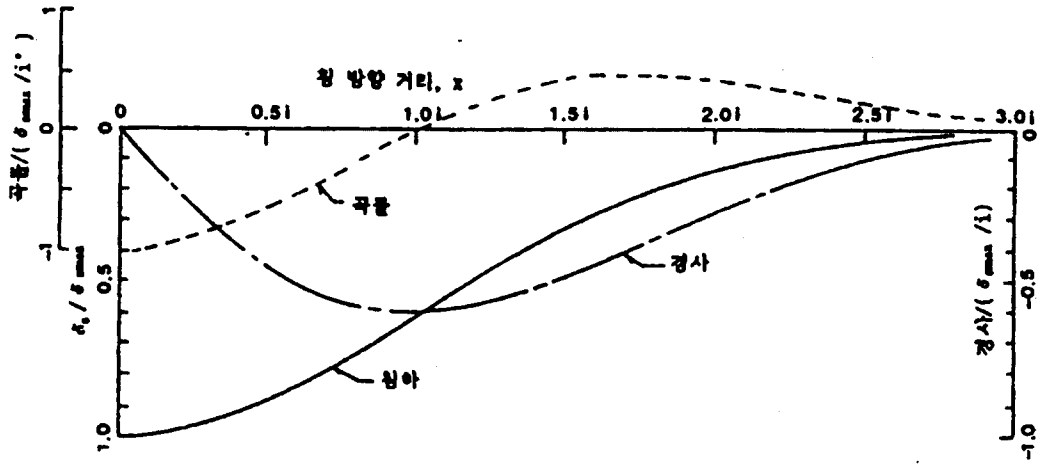
$\gamma_1(\gamma_2)$  : 터널 깊이 방향으로의 편차

이러한 지표침하형상과 관련해서 Peck은 광범위한 계측자료를 토대로, 터널의 기하학적 요소와 지반조건에 따라 최대경사가 일어나는 위치의 변화를 규명하고자 하였으며

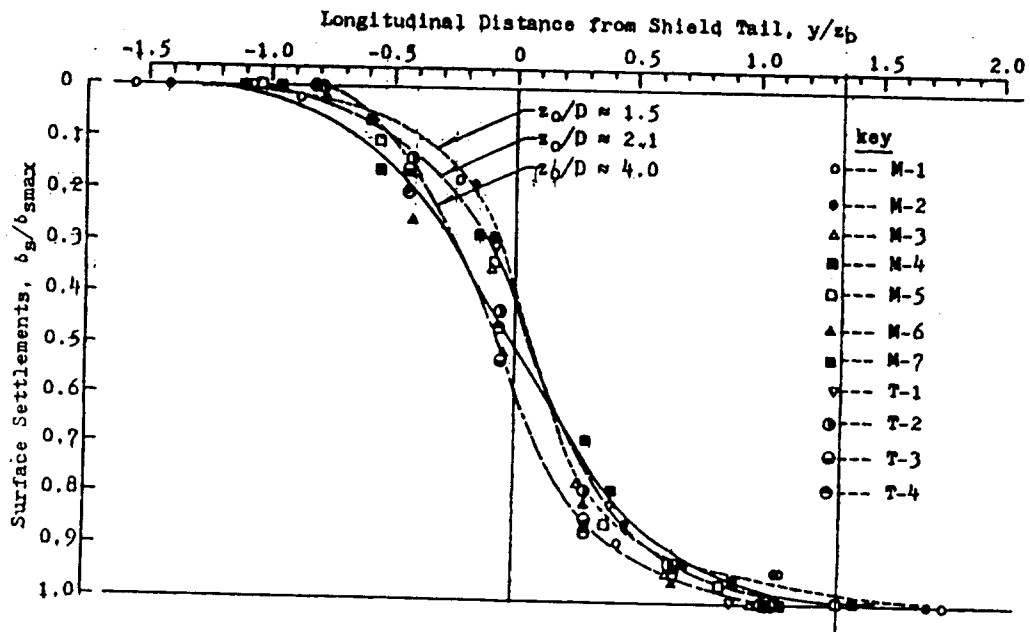
$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{D}\right)^n$ 의 관계로 그 경향을 분석하였다. 여기서 R은 터널반경, D는 터널직경,  $Z_0$ 는

터널 깊이이며 n은 상수이다. 그러나 NATM 터널에서의 종방향 지표침하의 경우는 터널굴착이 다단계로 이루어지므로 Error Function이 몇 개 반복되는 형태로 나타나게 된다.

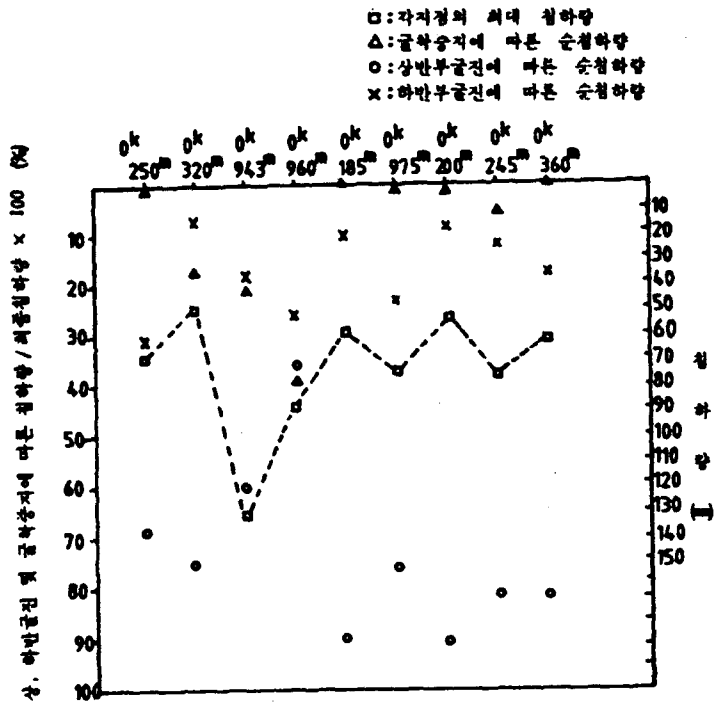
지표침하는 시공안전관리를 위하여 경시변화에 따른 지표침하량의 변화추이를 파악하여야 함과 동시에 터널굴진에 따른 침하량 예측을 위해서는 막장거리별 침하량 변화추이도 함께 분석·평가하여야 한다. 다음의 그림(그림 3.2.3 ~그림 3.2.5)들은 부산지하철 1호선 계측 Data와 일본 신간선 구간의 지표침하 자료들을 분석·도시한 것이다. 이러한 그림은 터널굴진에 따른 침하량 예측에 활용될 수 있다.



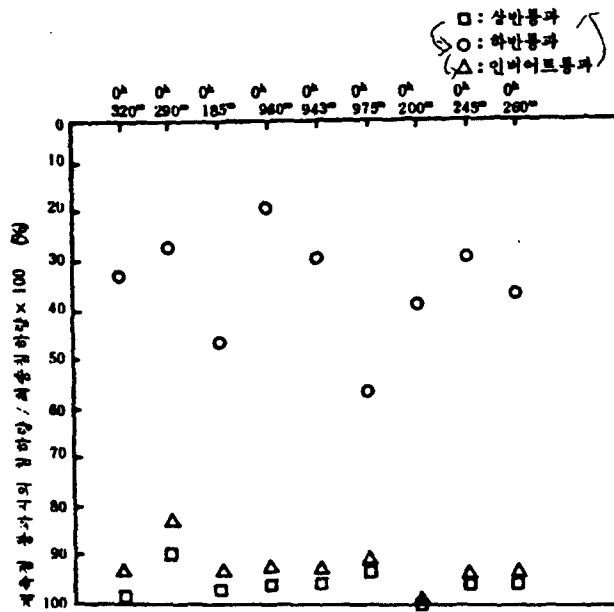
[그림 3.2.1] 침하 트라프의 형태, 경사 및 곡률



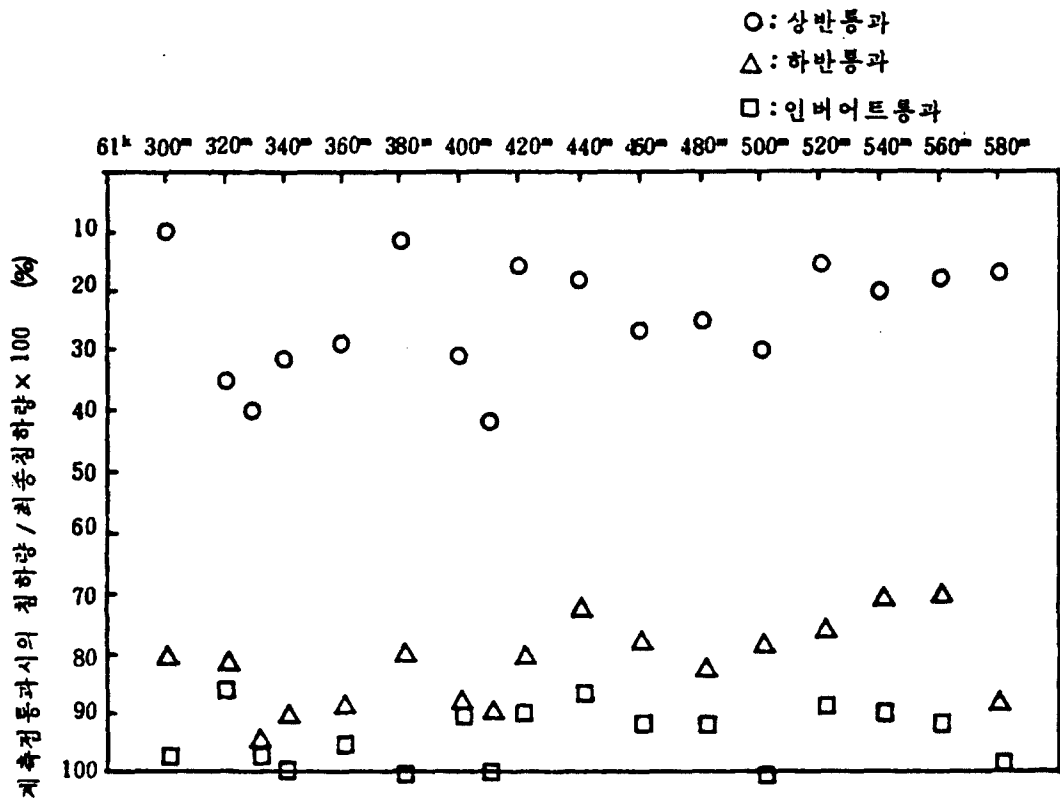
[그림 3.2.2] 전단면 굴착시의 증방향 지표침하 곡선



[그림 3.2.3] 굴착단계에 따른 지표침하 크기 (부산지하철 1호선)



[그림 3.2.4] 계측점 통과시 지표침하 크기 (부산지하철 1호선)

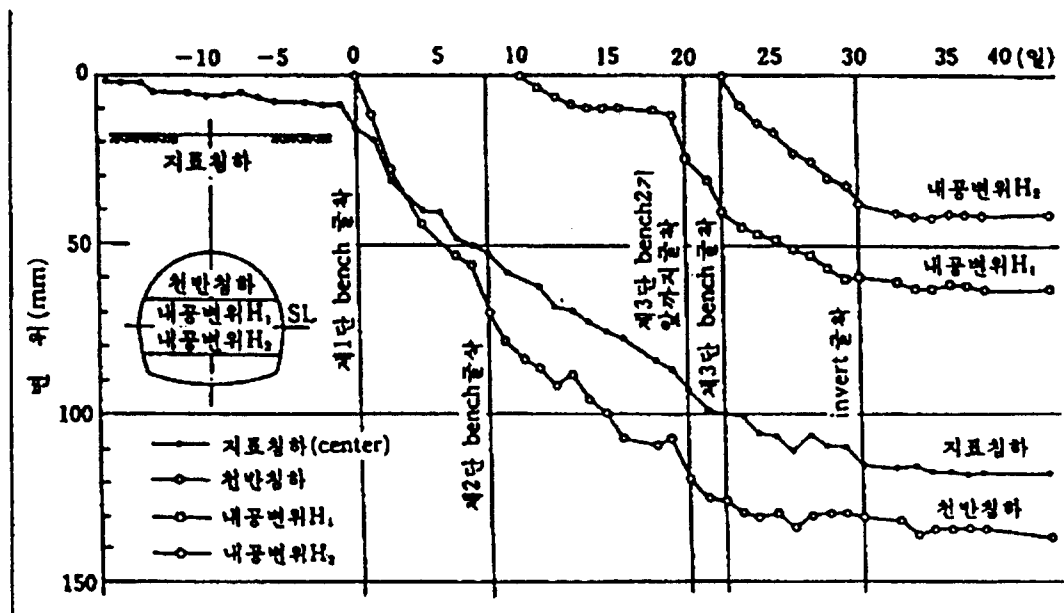


[그림 3.2.5] 일본의 성전 신간선 61km 지점의 지표침하 자료

### 3.3 천단/내공변위

천단침하, 내공변위 등은 지표침하와 종합적인 상관관계를 분석하여 터널의 안정과 함께 지반거동 특성을 규명하여야 한다. 이러한 변위계측들의 경우, 초기치 속도시기가 매우 불규칙하며, 또한 막장 굴착 정지시에도 변위는 발생할 수 있으므로 굴착정지시 발생한 변위량의 분석과 함께 초기치 속도시기에 대한 분석이 있어야 한다. 서울지하철 터널현장의 계측사례를 살펴보면,

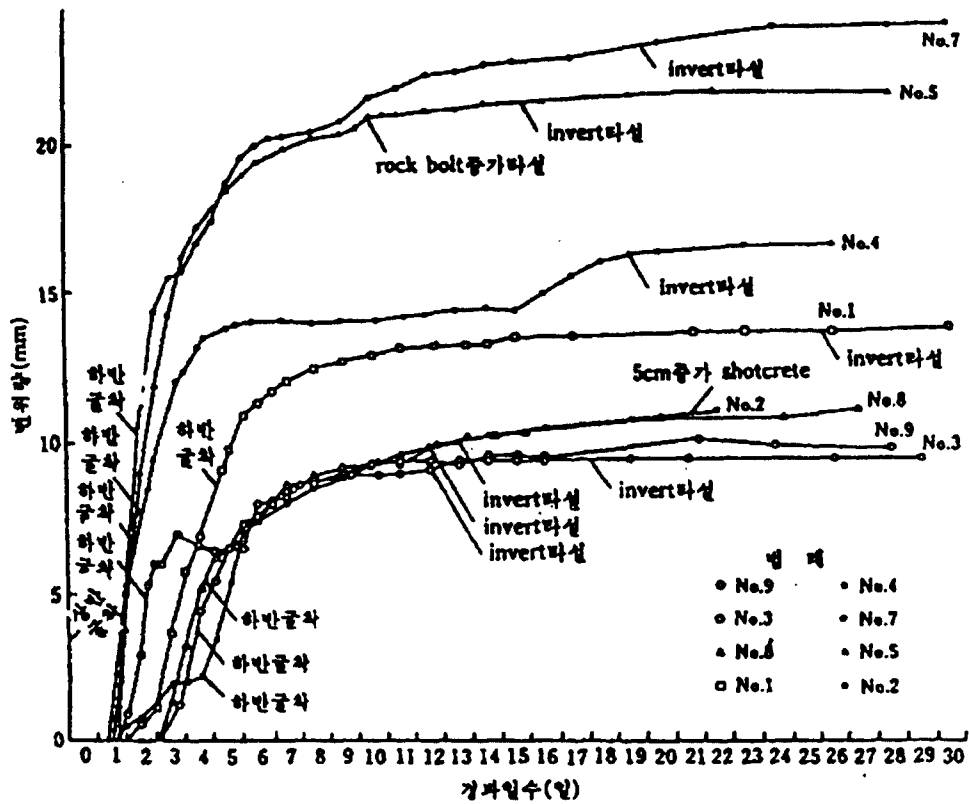
- (1) 하기 계측사례에서 천단침하 및 내공변위는 각 Bench 굴착마다 일단 수렴되기 시작한 변위가 다음 Bench 굴착에 의하여 다시 증가하고 최종적으로는 Invert 시공에 의하여 수렴한다.
- (2) 내공변위와 천단침하는 모두 Invert 시공까지의 기간 및 거리가 짧은 쪽이 변위량이 적다.



[그림 3.3.1] 지표침하 및 내공 경시변화 측정 사례

또 다른 계측사례로부터 내공변위의 경시 영향을 살펴보면

- (1) No.1, 4, 5, 7 : 피복두께가 터널 굴착폭의 2~2.5배이며 지표침하하는 약 10~15mm 발생
- (2) No.2, 3, 8, 9 : 피복두께가 2.5배 이상이며 지표침하량이 작게되는 경향을 보임
- (3) 각 경우 내공변위 수렴은 막장통과후 약 15일(2.5D 거리임)이며, 막장 굴진영향은 약 8일 정도로 나타남.



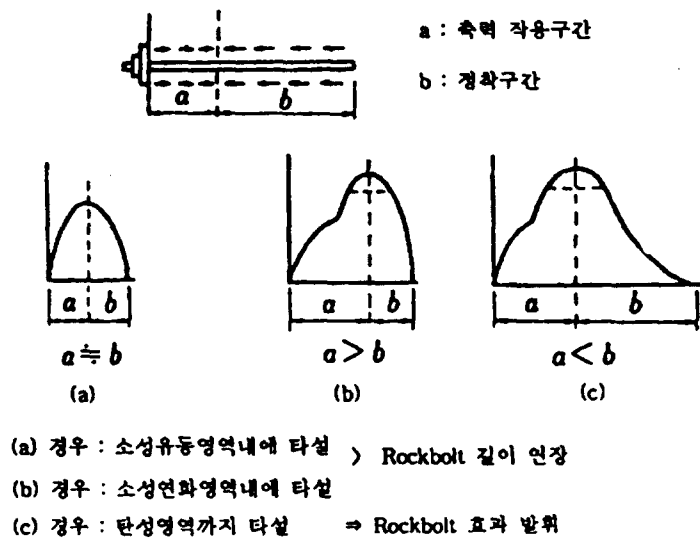
[그림 3.3.2] 지반 조건별 내공변위 특성

### 3.4 Rockbolt 축력

#### 3.4.1 분석내용

- (1) 내공변위, 지중변위, S/C응력 측정치와 종합적인 분석 필요
- (2) Rockbolt 길이 타당성 확인
  - ⇒ 축력분포가 R/B 중앙에서 터널측으로 존재
- (3) Rockbolt 길이의 축소
  - ⇒ 축력분포가 터널측에서 선단측까지 거의 0인 경우
- (4) Rockbolt 길이의 증가
  - ⇒ 축력분포가 선단까지 존재하면서 지반과 함께 변형하는 경우
- (5) 내공변위, 천단침하가 증가하여도 R/B 축력이 변화하지 않는 경우
  - ⇒ R/B 정착부 파손 또는 이완 영역내 존재

#### 3.4.2 축력평가 방법

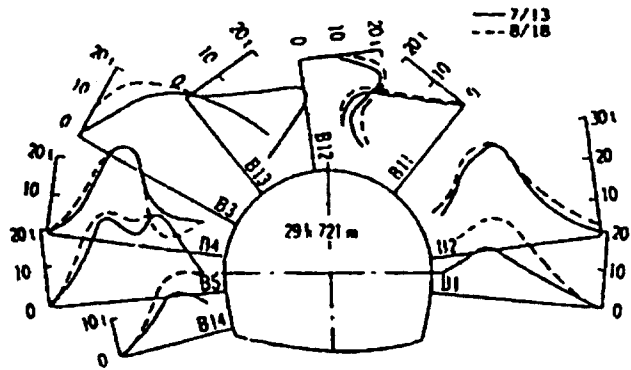


[그림 3.4.1] Rockbolt 축력 평가방법



### 3.4.3 Rockbolt 축력 분석 사례

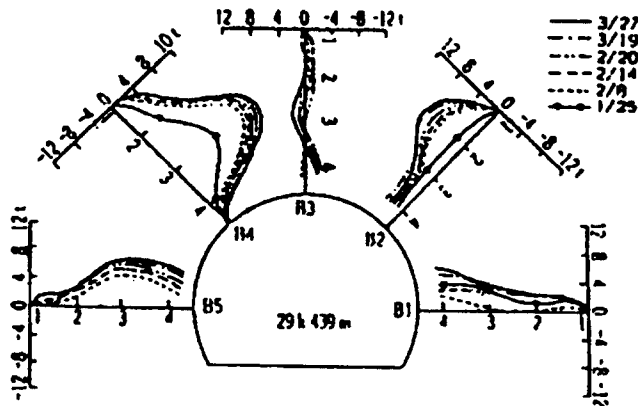
#### (1) 대심도 터널의 Rockbolt 축력 분포



[그림 3.4.2] Rockbolt 축력 분포 사례 I

- B3, B4, B5, B13은 Rockbolt 길이의 연장 필요
- Rockbolt 축력은 대부분 20ton 내외 ⇒ D25 사용 불가

#### (2) 얕은심도 터널의 축력분포



[그림 3.4.3] Rockbolt 축력 분포 사례 II

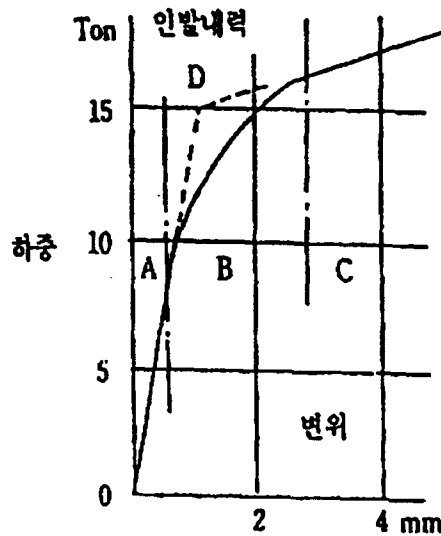
- B2 및 B4는 Rockbolt 길이의 연장 필요
- B3는 Rockbolt 축력이 거의 없는 상태
- Rockbolt 축력은 대부분 10ton 이하

### 3.5 Rockbolt 인발시험

#### 3.5.1 목적

- (1) Rockbolt 정착효과 확인 (시공성 확인용)
- (2) 대표적 위치에서 사전 시험후 시공 개소 인발내력 확인
- (3) 최대 인발내력의 80% 정도에서 R/B 인발시험 시행

#### 3.5.2 인발내력 결정방법



[그림 3.5.1] 인발내력 산정 시험 예

### 3.6 Shotcrete 응력

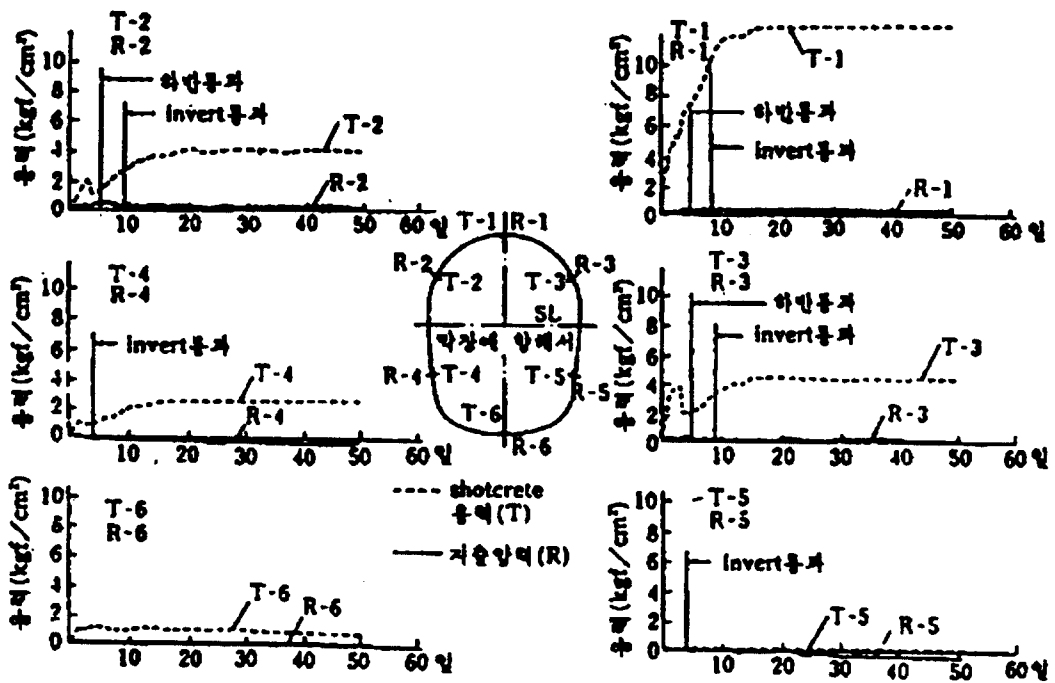
#### 3.6.1 분석내용

- (1) 내공변위, 지중변위, R/B 축력 측정치와 종합분석
- (2) 타설된 S/C 강성과 측정 응력 상관성 숙지
- (3) 막장 진행과 내공변위 증가시 S/C 응력 변화없는 경우

⇒ Shotcrete가 파괴된 경우

⇒ 지반과 S/C 부착상태 불량으로 개별 활동

### 3.6.2 Shotcrete 응력 분석사례



[그림 3.6.1] Shotcrete 응력 측정 사례

- (1) 대부분  $10\text{kg/cm}^2$  이하의 원주방향의 응력으로 나타나고, 반경 방향 지압이 거의 없는 것을 볼 때 주변 암반의 지보효과가 충분히 발휘되고 있음을 나타냄
- (2) 인버트 통과후 응력 수렴을 볼 때 막장굴진 영향은 약 10일 정도로 나타냄.

### 3.7 지중변위

#### 3.7.1 분석내용

(1) Rockbolt 축력 및 Shotcrete 응력과 종합분석

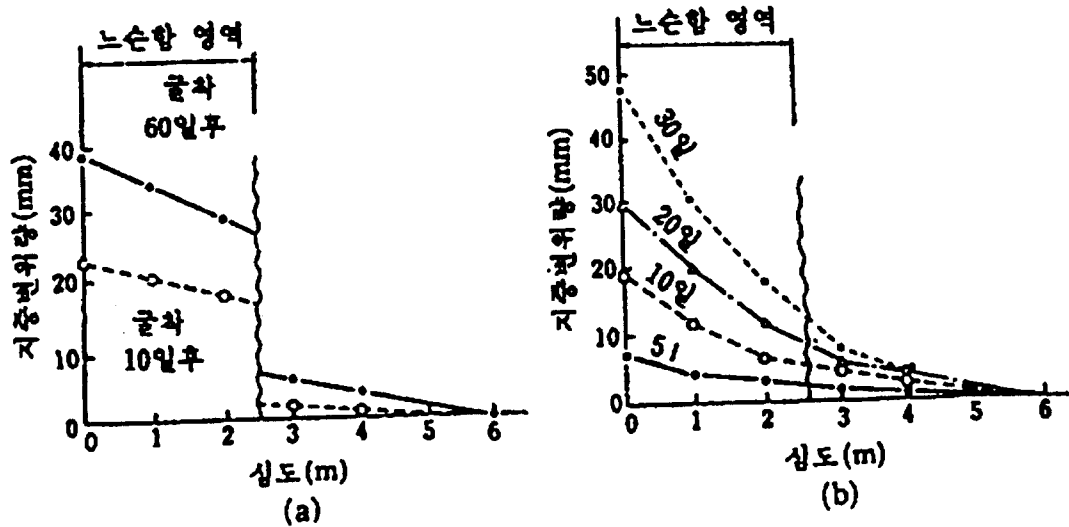
(2) 지반의 이완영역 정도 및 분포 예측

(3) 지보재 설계 타당성 확인

⇒ Rockbolt 시공길이 적합성

⇒ Shotcrete 두께 적합성

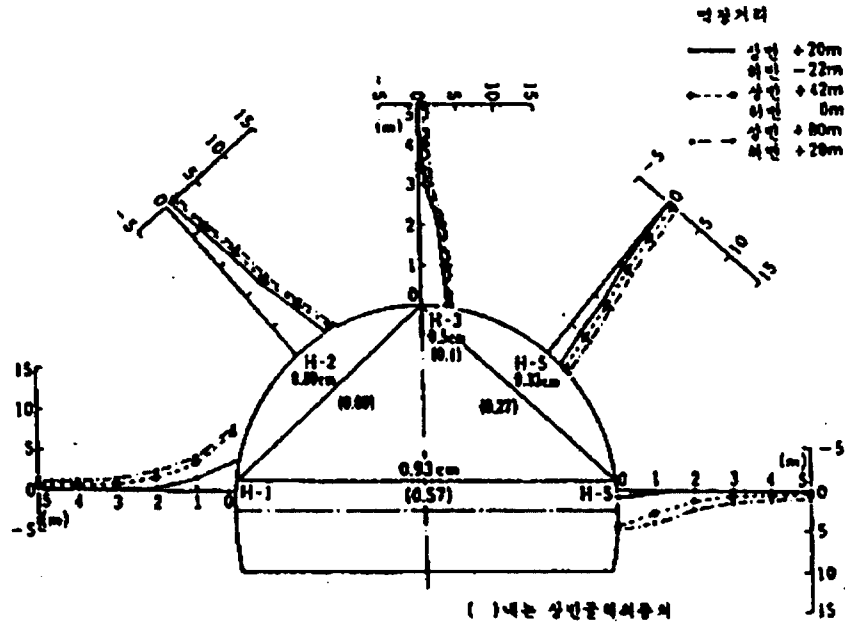
#### 3.7.2 평가방법



[그림 3.7.1] 이완 영역 추정예

(1) 일반적으로 이완 영역에서는 암반내에 균열이 발생한다든지 균열이 열리게 되어 그림 3.7.1(a)에 제시하는 바와 같이 이완되어 있지 않은 암반과의 사이에서 지중변위 분포가 불연속으로 되고 있는 경우나 또는 그림 3.7.1(b)와 같이 dilatancy 등에 의해 변위가 급격한 증가를 나타내고 있는 경우를 생각할 수 있다. 따라서 지중변위 분포의 불연속성이나 급격한 증가 경향 등에 착안해서 이완 영역의 추정이 가능하다.

### 3.7.3 지중변위 분석사례



[그림 3.7.2] 지중변위 경시변화 측정사례

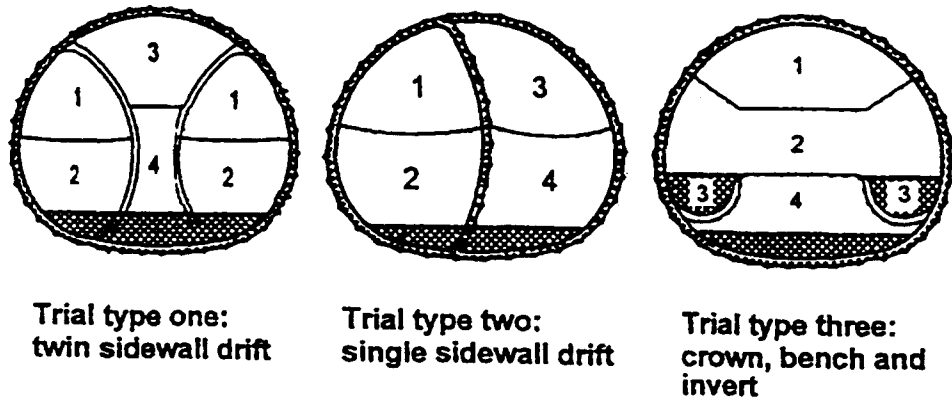
- 천단부 및 좌, 우측 측벽부는 약 3m 깊이에서 이완대 형성하고 하반부에서는 약 2m 정도의 이완대를 형성하고 있음.

## 4. 계측에 의한 터널 거동 분석

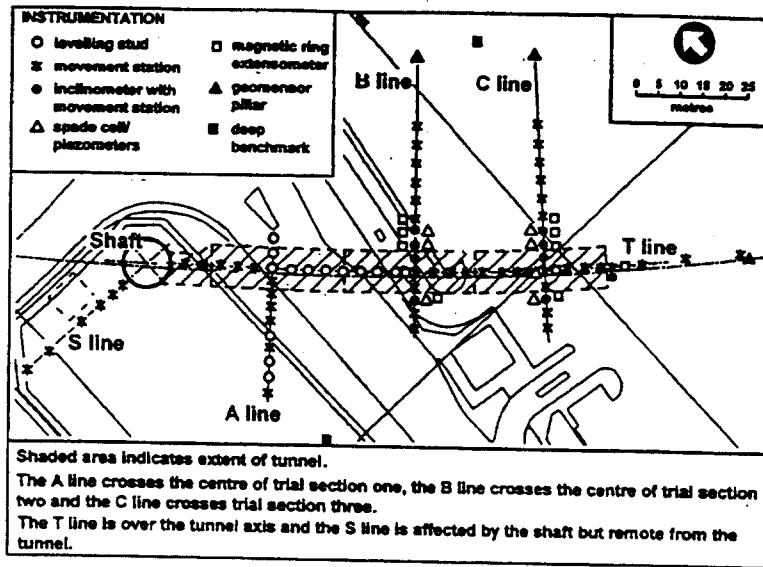
### 4.1 굴착방법에 따른 터널 거동

- (1) 시험터널명 : Heathrow Express Trial Tunnel (London, 1994)
- (2) 터널규모
  - 1) 터널 face area : 59m<sup>2</sup>
  - 2) 터널길이 : 30m

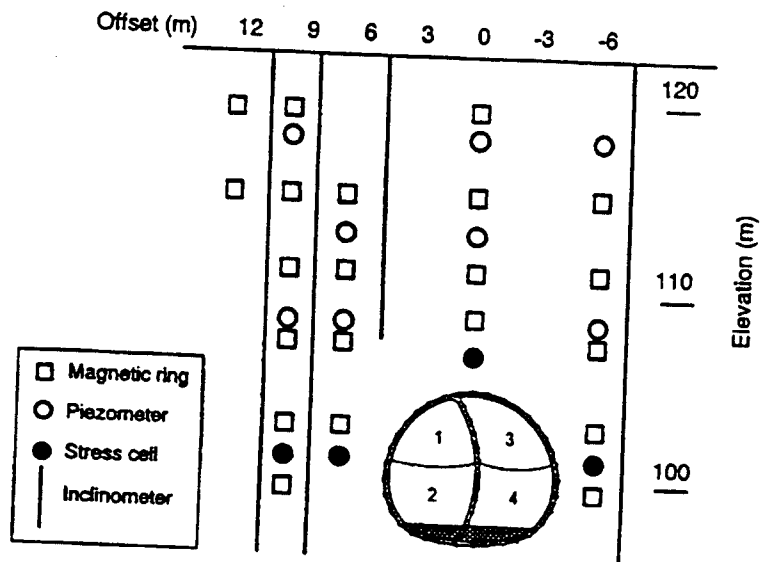
- 3) 터널깊이 : 25m
  - 4) 지반조건 : London Clay
  - 5) 시험굴착기간 : 1992년 1월~5월
  - 6) 굴착방법 : 그림 4.1.1과 같이 3 Type
  - 7) 굴착장비 : Liebherr 902, back-hoe excavator
- (3) 특기사항 : London Clay 지반에 처음으로 NATM 적용한 현장임
- (4) 시험목적 : 지반침하를 억제할 수 있는 굴착방법을 찾기 위함



[그림 4.1.1] 3종류의 굴착방법 적용



[그림 4.1.2] 계측기기 설치 현황



[그림 4.1.3] B line의 계측기기 설치도

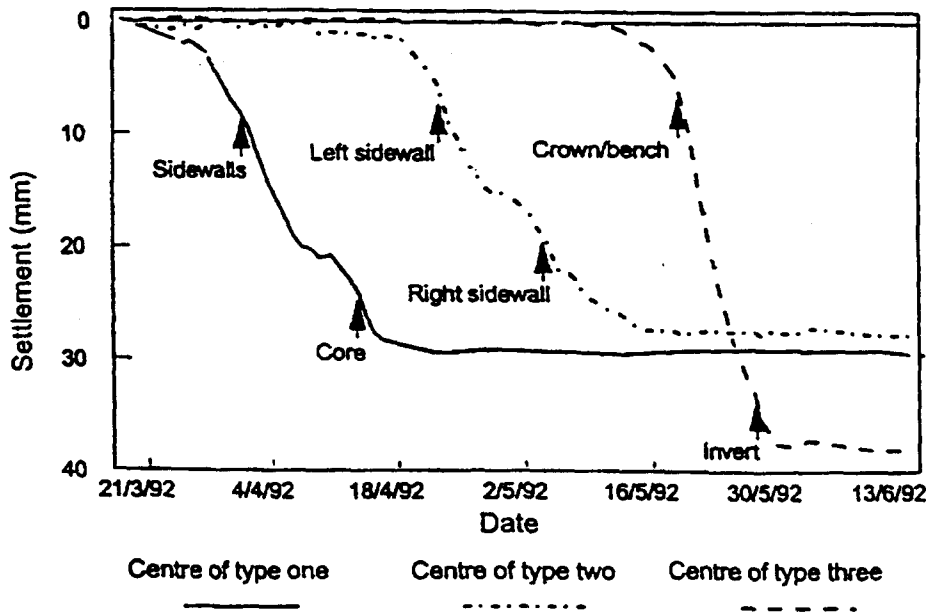
(5) 지표침하 계측 결과 비교

1) Type 1, 2 : 1st side wall 굴진시 rapid settlement 발생. heading 굴진시 재침하 현상을 보이거나 곧 수렴하게 됨.

2) Type 3 :

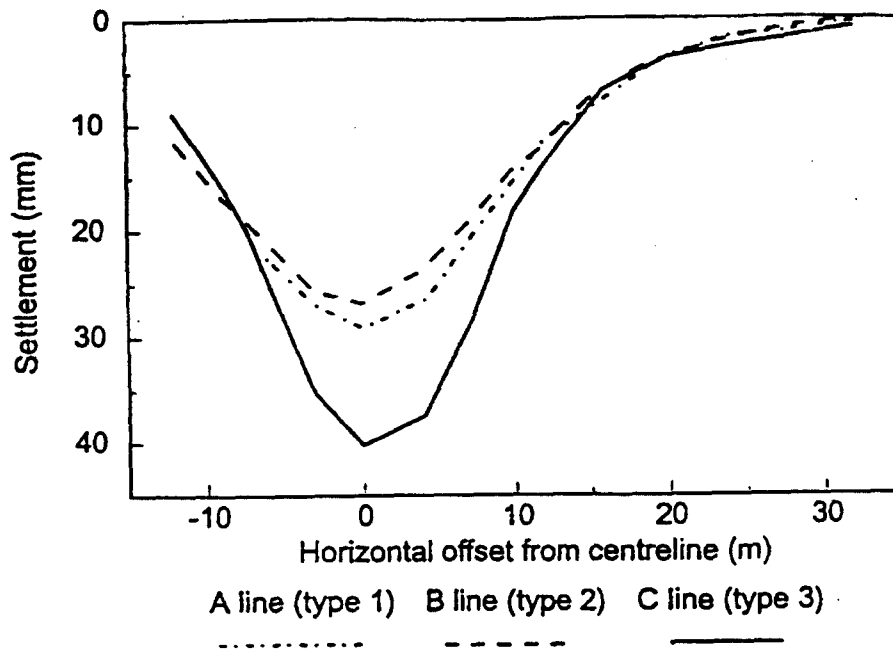
가) 터널 crown과 invert 굴착 후에 많은 량의 침하가 발생하며, invert 폐합후에도 장기침하가 발생하는 형태를 보임(15~25%).

나) 횡방향 침하형태에서는 좀 더 깊은(가우스 분포곡선에 의한 해석시 사용되는  $i$  값의 감소) 트라프를 보이고 있으므로 큰 horizontal ground strain(structure의 damage 평가 요소)을 예상할 수 있음.



[그림 4.1.4] 지표침하의 경시변화





[그림 4.1.5] 횡방향 지표침하 비교

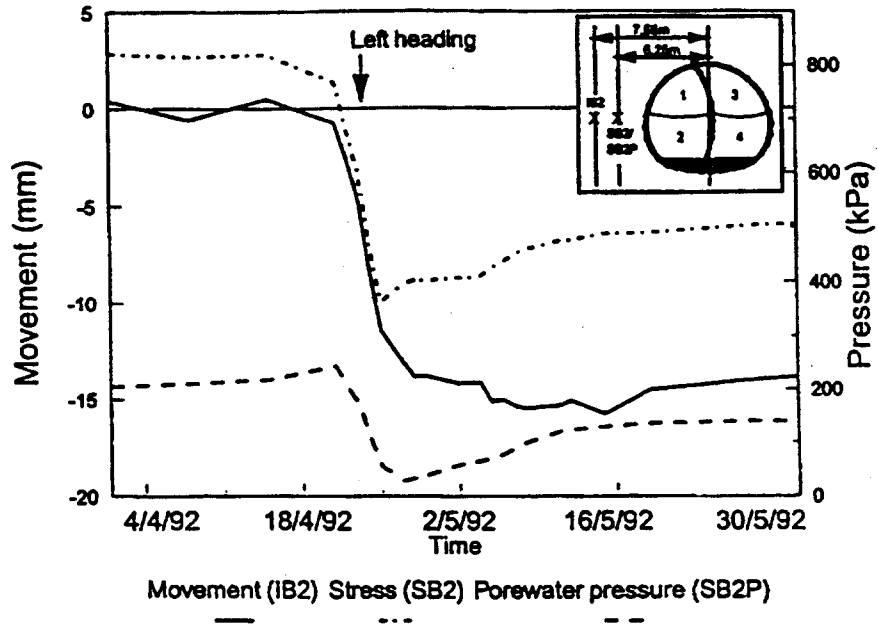
<표 4.1.1> Summary of settlement troughs two weeks after end of tunnelling

Tunnel section	Max.settlement (mm) $S_{max}$	Volume loss(%) $V_s$	Trough width parameter(K)
Type one, sidewalls only	20.6	1.17	0.43
Type one complete	27.9	1.15	0.45
Type two, sidewall only	14.5	1.24	0.48
Type two complete	26.8	1.05	0.45
Type three complete	40.3	1.26 (1.37*)	0.35

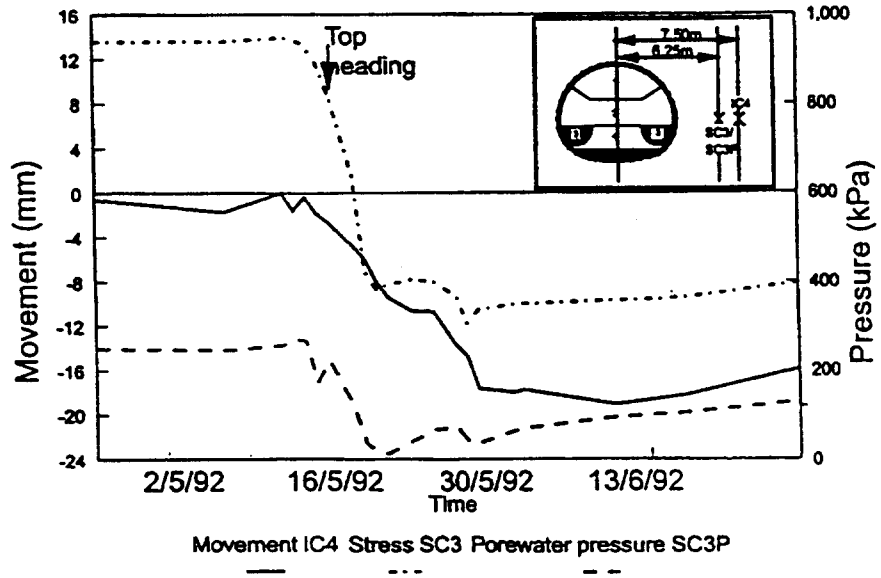
<표 4.1.2> Summary of settlement troughs thirteen months after end of tunnelling

Tunnel section	Max.settlement (mm) $S_{max}$	Volume loss(%) $V_s$	Trough width parameter(K)
Type one complete	33.1	1.38	0.48
Type two complete	31.9	1.41	0.50
Type three complete	43.2	1.33 (1.53*)	0.35

(6) 지중변위 계측결과 비교

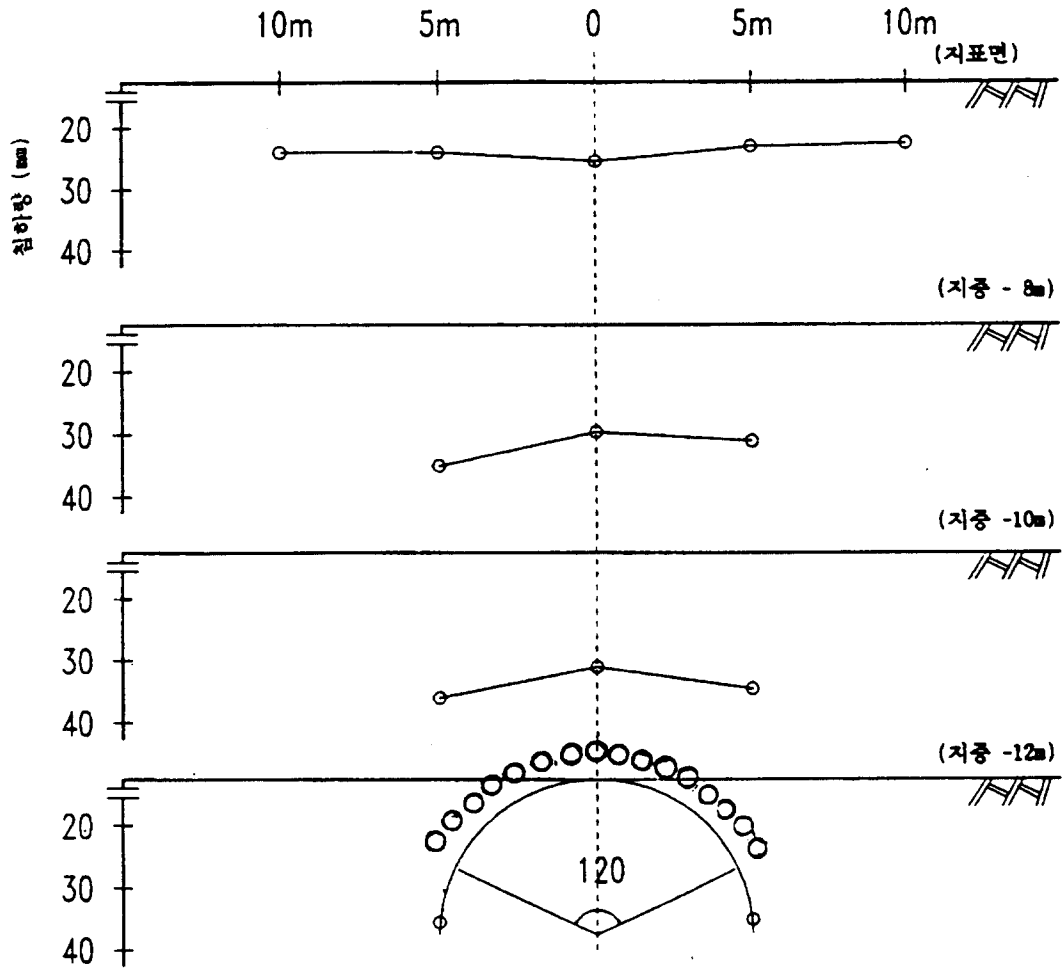


[그림 4.1.6] Type 2의 지반거동 특성

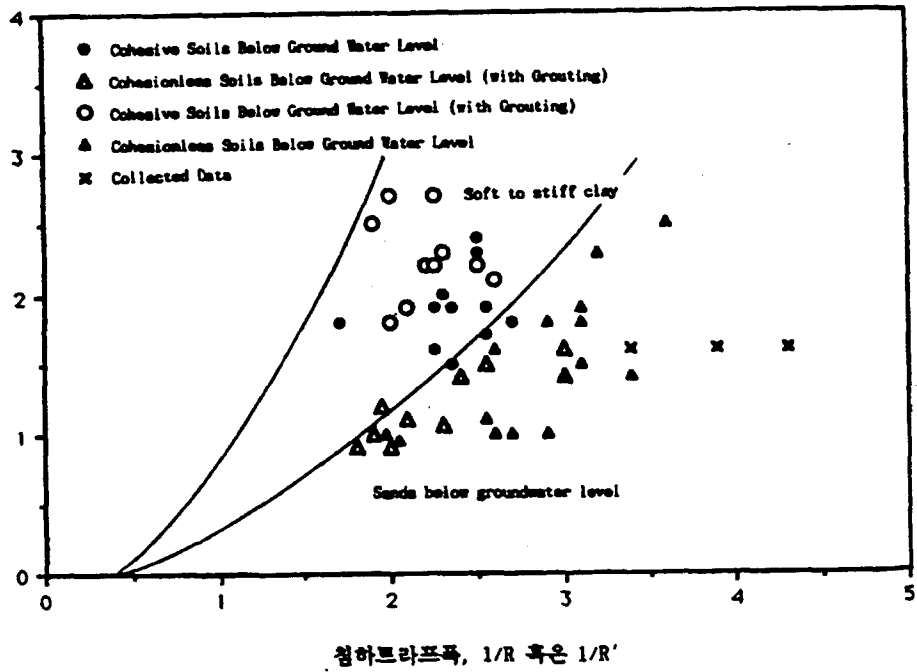


[그림 4.1.7] Type 3의 지반거동 특성

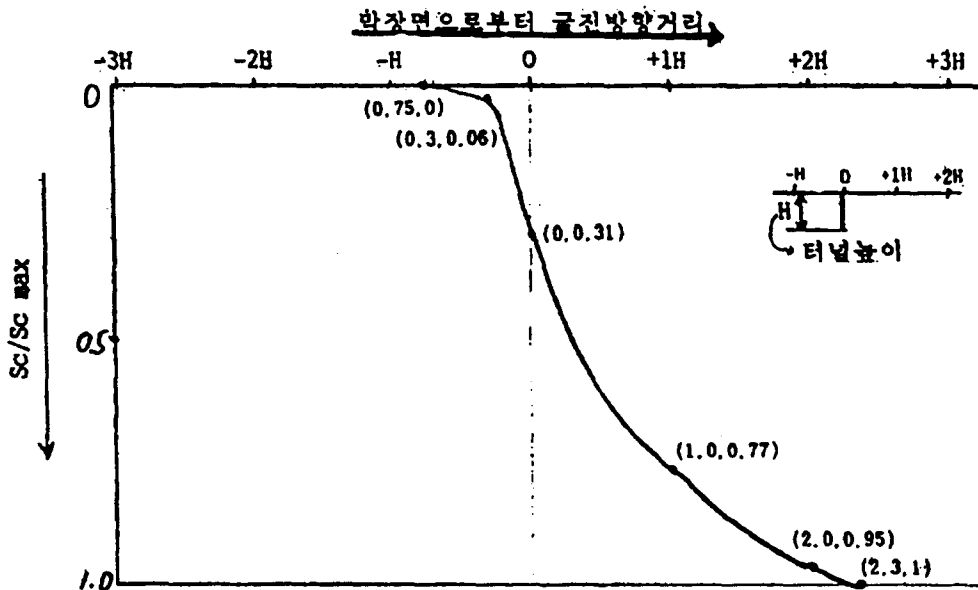
## 4.2 Umbrella Arch Method 적용시의 지반거동



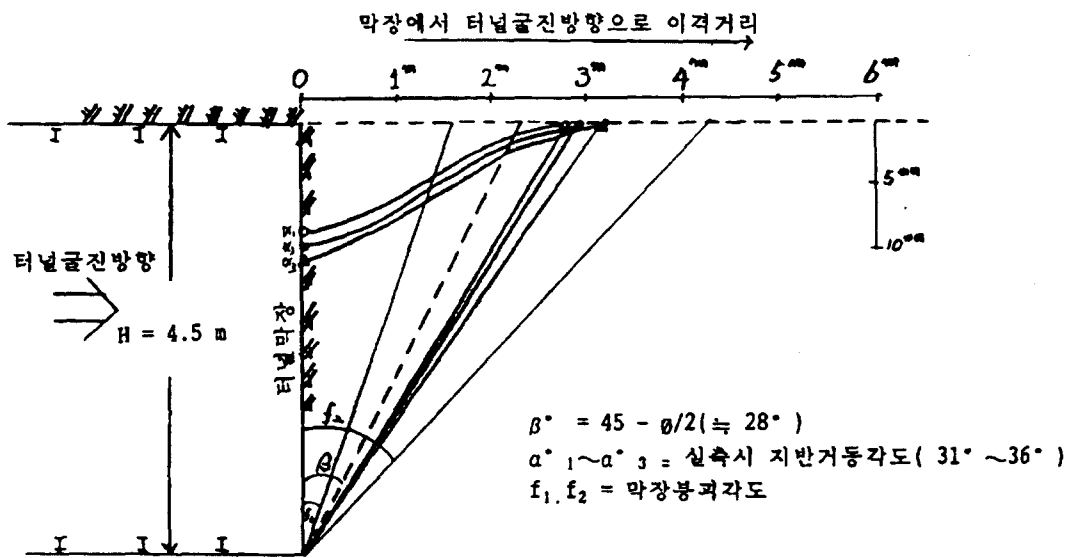
[그림 4.2.1] 지표 및 지중침하량 분포(OK 310지점)



[그림 4.2.2] Peck의 지반침하 해석도표

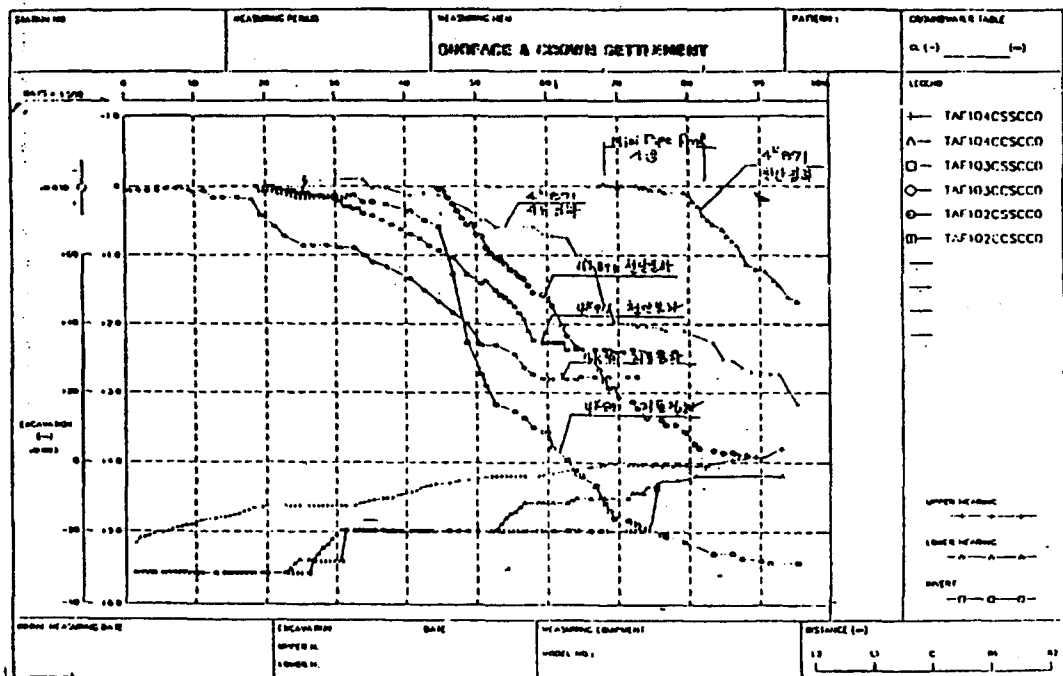


[그림 4.2.3] 막장 굴진거리별 천단침하량 변화 추이



[그림 4.2.4] 터널막장의 거동 영역

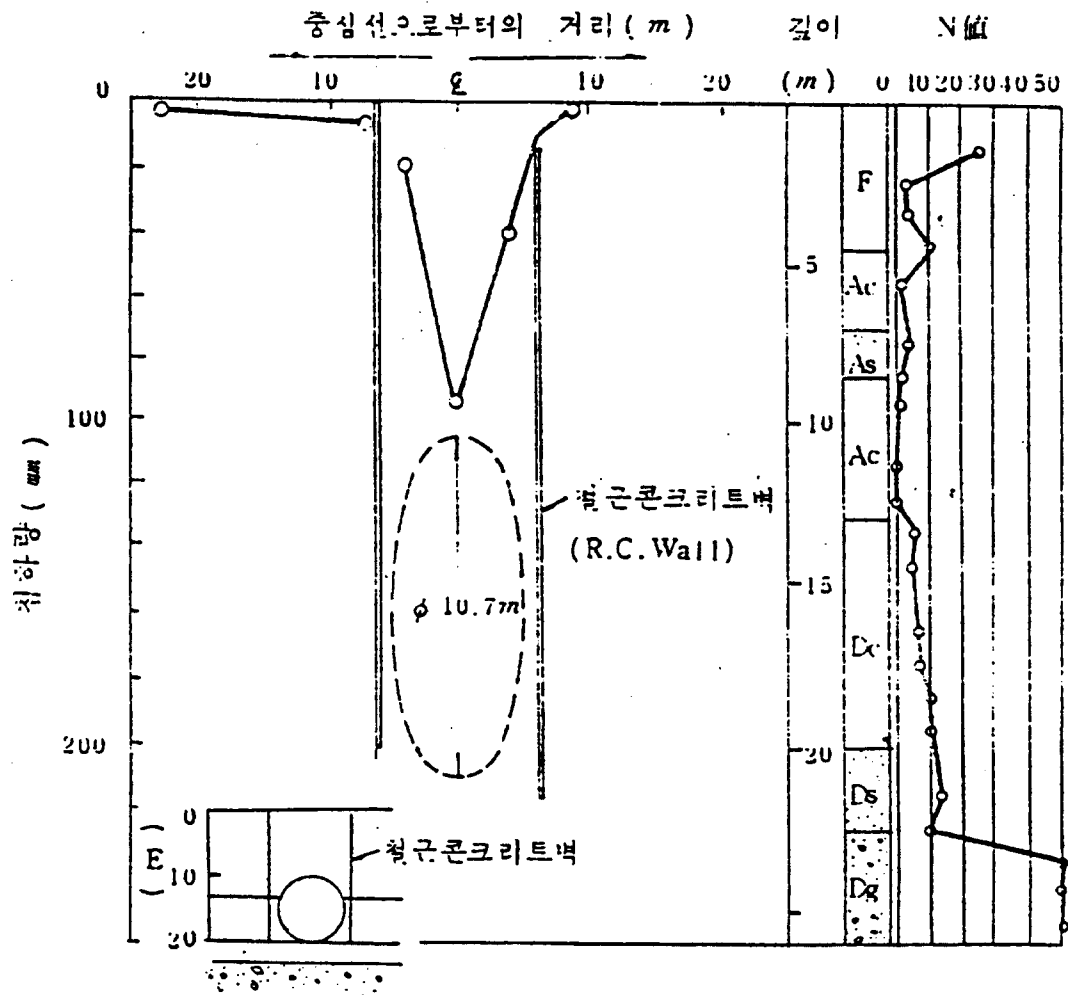
### 4.3 Mini Pipe Roof 시공법 적용시의 지반거동



[그림 4.3.1] Mini Pipe Roof 시공현장의 지반거동

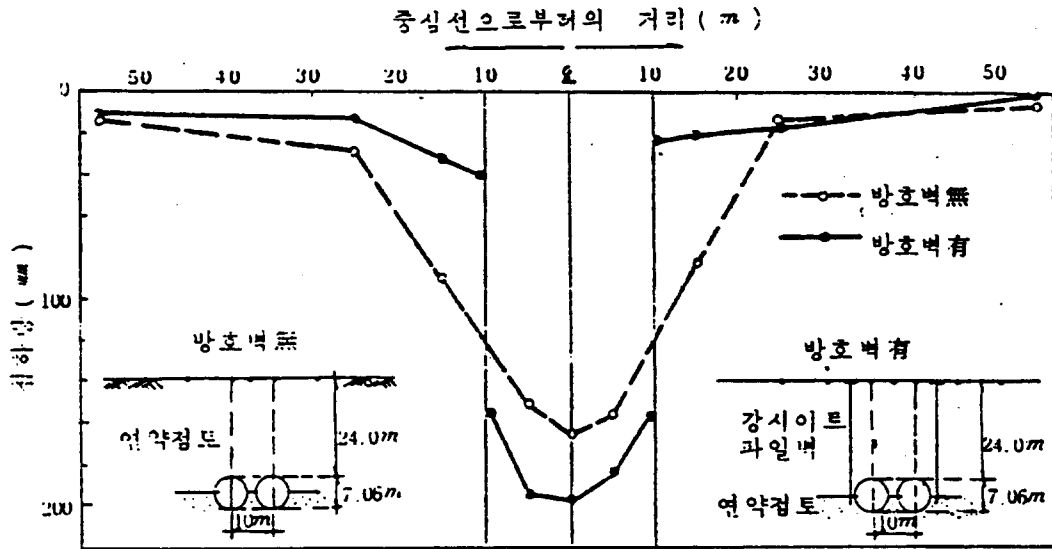
## 4.4 차단 Wall 시공법 적용시의 지반거동

### 4.4.1 R.C. Wall 시공법 적용

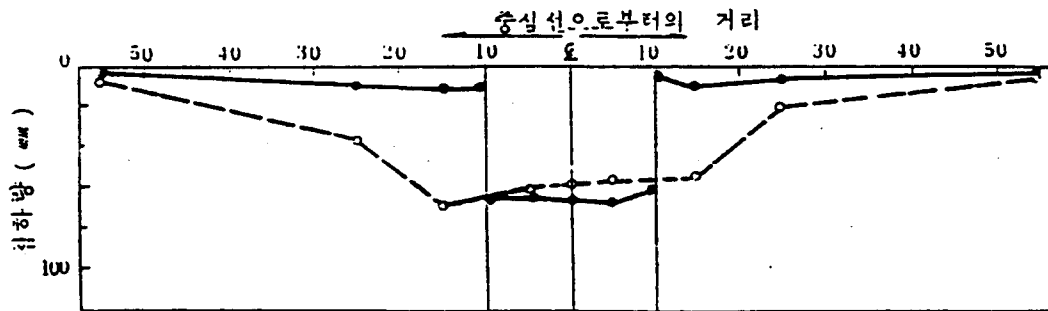


[그림 4.4.1] RC Wall 시공시의 지표침하 형태변화

#### 4.4.2 Sheet pile 시공법 적용



(a) 압기가 감소되기전의 침하

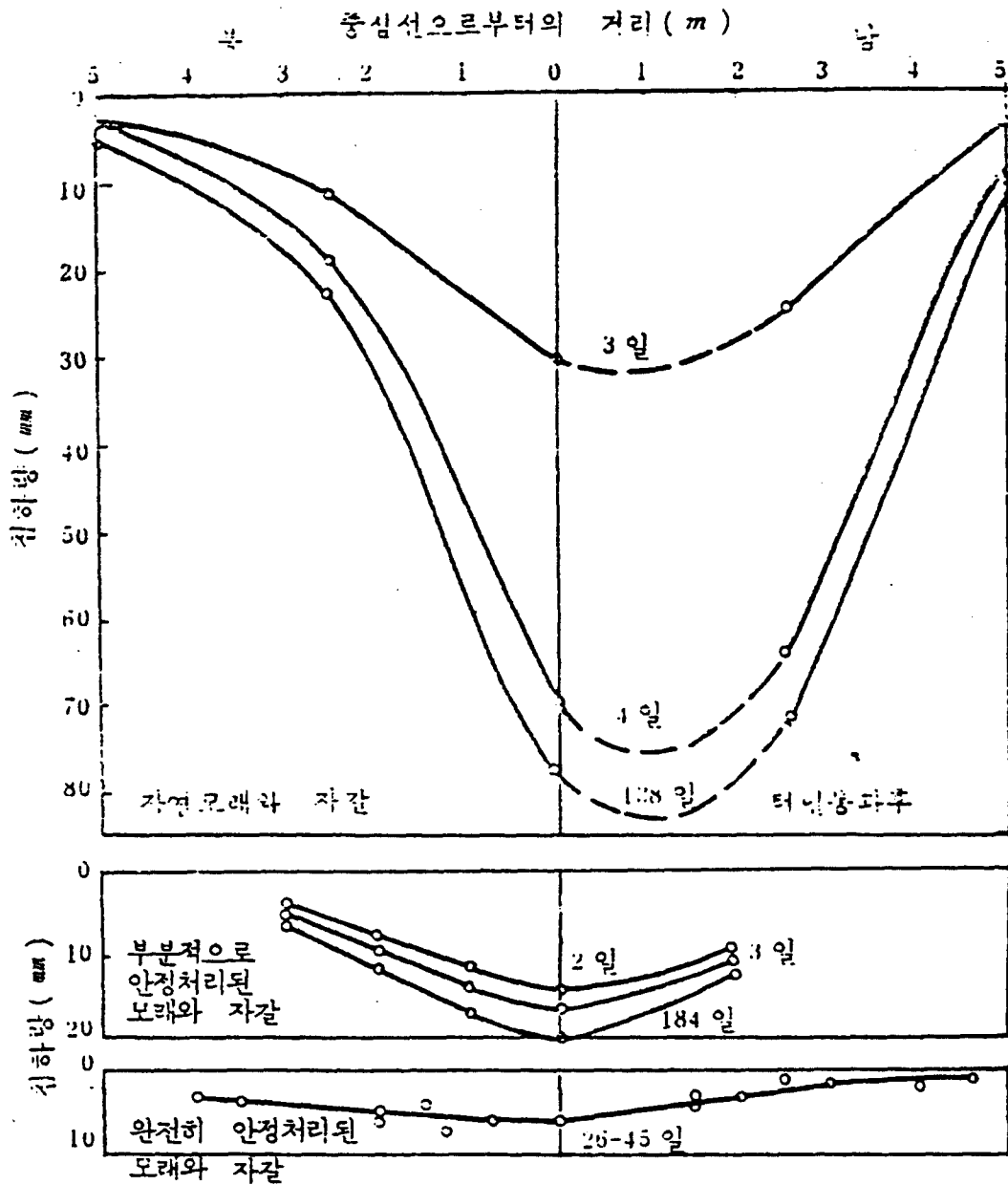


(b) 압기 감소 후의 침하

[그림 4.4.2] Cut-Off Wall 시공에 따른 지표침하의 형태변화



## 4.5 Grouting 공법 적용시의 지반거동



[그림 4.5.1] 주입공법 적용시 지표침하의 형태변화 (Lumb Brook 터널)

## 5. 터널 유지·관리용 자동화 계측

### 5.1 터널 유지관리용 자동화 계측기기 설치 현황

자동계측 유지관리 시스템은 터널 구조물의 거동을 정확히 계측하여 구조물의 성능과 안전도를 평가하는 시스템으로서, 구조물의 상태를 24시간 상시 파악하고 이상상태가 관측 되면 내부진단 프로그램에 의하여 관리자에게 현상황에 대한 정보와 경보를 제공함으로써 그에 상응하는 조치를 유도한다. 또한 적당한 주기로 관련 계측데이터를 영구적으로 저장 관리할 수 있으며 필요시, 설계자와 시공사 혹은 유지·보수 관리자에게 제공함으로써 구조물 노후화에 따른 관리기법 채택과 아울러 시민들의 안전에 대한 인식향상에도 도움을 줄 수 있다.

현재, 국내에 터널 유지관리용 자동화 계측시스템이 도입된 구간은 지하철 2기 5호선 한강 하저터널구간을 비롯하여 7, 8호선에 적용되었다. 각 노선당 설치연장은 5호선 NATM공법 터널구간 10.5 km, 7호선 2 km, 8호선 1.5 km 연장에 적용·계측 진행중에 있다. 자동화 계측을 위하여 적용된 계측장비로는 기존 매설식 계측기기외에도 광파기, 광섬유 센서 등의 최신 계측기기들이 적용 및 운용 되고 있다.

#### (1) 서울지하철 5호선

공구명	설치지점	설치 계측기기 및 수량	비고
5-4 (송정역)	5K+530,550,580,630,680,730	광파기 반사경 : 15 EA	운행중
5-10 (까치산역)	11K+603,720,820,920, 12K+000	광파기 반사경 : 14 EA	운행중
5-12 (오목역)	14K+600,620,680,760,860,890,960, 15K+060,080,160,200	광파기 반사경 : 19 EA	운행중
5-13 (양평역)	15K+240,250,310,360,380,485,560,570,6 40,650,720,740,800,840,885,930,980 16K+030,080,130,150	광파기 반사경 : 39 EA	운행중
5-14 (영등포구청역)	16K+380,425,471,490,510, 600,780,830,850,900	광파기 반사경 : 24 EA	운행중
5-15 (영등포시장역)	17K+060,080,200,280,300,360,400,440, 510,570,630,670,750,780,880,930,960 18K+014,030	광파기 반사경 : 36 EA	운행중

## 5.2 국내 영구계측 적용 문제점 및 대책 (안)

### 5.2.1 문제점 분석

#### (1) 영구계측 계획 기술 미흡

##### 1) 계측항목의 결정 : 터널 내공변위 측정 위주

가) 터널 배수 형식에 따른 항목 선정

나) 인접 주요구조물의 존재 유무에 따른 항목 선정

다) 이상 조기 징후 발견후 추가 계측항목 선정

##### 2) 계측 위치의 선정 : 소수의 취약구간 위주

가) 대표성을 갖는 일반구간

나) 팽창성 지반 및 loosening Zone 존재 구간

다) 주요구조물 인접구간

라) 시공 및 품질관리 우려 구간

마) 터널 취약부 (갱구부, 분기부, 확폭부 등)

바) 터널선형 변화부

##### 3) 계측기기의 선정 : 광파기에 주로 의존

가) 전기식/기계식 병용설치 (기기 고장을 고려)

나) long term 유지가 가능한 기기의 선정 (온도, 습도, 진동, 먼지에 대한 내구성)

다) 유지관리 용이한 자동화 계측기기 선정

#### (2) 시공중 계측과의 연계성 및 관련 Data의 체계적 정리·보관 문제

##### 1) 매설식 기기의 설치 방법 미흡

##### 2) 시공중 계측 Data의 신뢰성 문제

##### 3) 시공관련 자료의 정리·보관 문제

#### (3) 영구계측 소요비용 책정 문제

#### (4) 운용 및 계기상의 문제

현재 ○○터널 구간을 대표적으로 들어 문제점을 살펴보면 터널내에 설치되어 있는 대표단면계측 34개소중 12개소는 계측측정이 곤란한데, 그 원인을 크게 5가지로 추정할 수

있다.

#### 1) 침수후 계측불가

계측불가 사유로는 여러 가지를 추정할 수 있으나 이 경우에는 수동계측 수행도중 터널의 침수로 인해 센서케이블 이음부 및 외부 Read케이블 측정부위로 하천수가 유입되어 케이블내의 자극부와 측정부가 서로 합선되거나 하천수 유입으로 인한 과다 잡음발생 또는 자극 및 입력조건의 변화로 인한 실질적인 계측데이터의 획득이 불가능하다고 판단된다.

#### 2) 측정값 불안정

자동계측기에서 값을 읽어낼 수는 있으나, 계측값 자체가 일정한 증폭 내지는 흐름을 보이다가 일관성 있는 움직임 추세를 보이는 경우와 증가 또는 감소하지 않고 변칙적인 움직임을 보이다가 진폭이 센서의 사용범위를 벗어난 수치를 나타내는 경우이다.

이런 경우는 계측 Read케이블의 자극부 또는 측정부중 어느 한선이 단락되거나 센서자체의 사용범위를 넘어선 경우 또는 센서 및 케이블 주변의 과전압, 전류가 작용하여 동일조건에서의 자극과 측정이 원활하게 이루어지지 않을 경우에 발생할 수 있다.

#### 3) 측정범위 벗어남

이 경우는 측정값 불안정과 거의 유사한 형태를 나타내나 자동계측기에서 값 자체를 읽어내지 못하고 'error messages'를 나타내는 경우로, 초기 데이터상에 'E11-input(S) out of range'로 나타나며 측정값이 자동계측기로 읽어낼수 없는 수치이거나 측정값이 zero인 경우를 의미한다.

이런 경우는 계측값이 자동계측기 측정범위를 넘어선 경우이거나 계측 Read케이블의 자극부와 측정부 두선 모두 단락되었을 경우에 발생할 수 있다.

#### 4) 연결전(자동계측시스템 구축전) 단선

자동계측기 시스템 구축전 수동계측을 통해 센서의 이상유무 확인시, 계측값이 변칙적인 움직임을 보이며 진폭이 센서의 사용범위를 벗어난 수치를 나타내었을 경우이다.

이런 경우는 자동계측 시스템 구축전, 이미 계측 Read케이블중 자극부 또는 측정부의 어느 한선이 단락되었거나 혹은 두선 모두 단락되었을 경우에 발생할 수 있다.

#### 5) 개인오차

기술자의 실수로 인해 발생하는 경우로 자동계측기 시스템 구축시, 센서의 자극부와

측정부들 자동계측기와 연결을 하지 않았을 경우 내지는 자동계측기 시스템 구축후 자동계측기내 해당센서에 대한 명령 입력을 하지 않았을 경우에 발생할 수 있다.

## 5.2.2 대책 (안)

- (1) 유지관리용 계측설계 기술의 개발 추진
- (2) 유지관리용 자동화 계측기기 및 계측시스템들의 종류별 특성조사 연구 추진
- (3) 시공중 계측과 유지관리 계측과의 연계기술 개발 추진
- (4) 유지관리용 계측 시행 지침의 수립
- (5) 유지관리 계측비용의 합리적인 산출 및 배정

## 참고문헌

1. 배규진 (1987) , “지하구조물의 설계·시공시 현장계측의 역할”, 한국건설기술연구원, 건설기술정보, 통권 43호.
2. 배규진 (1990) , “토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위예측에 관한 연구”, 연세대학교, 토목공학과, 박사학위논문, 1990, pp. 160.
3. 한국지반공학회 (1995) , “터널구조물의 시공관리를 위한 계측 및 품질관리 방법”, 1995, pp. 203.
4. 한국지반공학회 (1996) , ‘터널’ , 지반공학시리즈 7, p 663.
5. Atkinson, J.H. and Potts, D.M. (1977) , “Subsidence Above Shallow Tunnels in Soft Ground”, Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol.103, No.GT4, pp.307-325.
5. Cording, E. J., Hendron, A. J., Hansmire, W. H., O'Rourke, T. D., et al. (1975) , “Methods for Geotechnical Observations and Instrumentation in Tunnelling”, Dept. of Civil Eng. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, Vol. 1, 2.
6. Dunicliff, J. (1982) , “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 98, Transportation Research Board, April.
7. Hong, S.W. (1984) , “Ground Movements Around Model Tunnels in Sand”, Ph. D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, pp. 419.
8. Peck, R.B. (1969) , “Advantages and Limitations of the Observational Methods in Applied Mechanics”, *Geotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 171~187.
9. Schmidt, B. (1969) , “Settlements and Ground Movements Associated with Tunnelling in Soil”, Ph. D Thesis., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, p. 224.
10. S. W. Hong and G. J. Bae. (1994) . “Ground Movement Associated with Subway Tunnelling in Korea, Proc. of the Int. Symp. on Underground Construction in Soft Ground”, New Delhi.