

건설공사에서의 계측관리(Ⅲ)

관리기준 및 분석

곽규식 / 토목기술부 대리

연재 순서

- I. 현장 계측을 위한 이론
- II. 계측관리 계획
- III. 계측항목 및 기기
 - 토류공사
 - 터널공사
- IV. 계측결과 관리기준 및 분석

터널공사

1. 갱내 관찰 조사

터널 시공에서 갱내 지질조사는 매우 중요하며 주로 막장부근에서 행한다. 지질상태에 따라 적절한 지보방법이 결정되고 계측위치가 선정되어야 한다.

또한 계측결과는 지질 관찰결과와 함께 정리해둘 필요가 있다.

다음 사항은 매일 관찰하는 것이 원칙이며, 지보공 설치사항도 관찰하여 두는 것이 좋다.

(1) 지질 관찰사항

- 지질(암석명)과 분포성향
- 고결도, 균열방향, 지질정도 등
- 단층의 분포와 방향, 경사, 점토화, 연약화 상태 등
- 암색, 점도, 특수광물 함유상태 등
- 용수위치, 용수량과 그 상태

(2) 지보공 관찰사항

- Rock Bolt : 타설위치, 방향, Bolt의 정착 여부
- Shotcrete : 두께, 파괴여부, 용수의 장소와 위치
- 강재 지보공 : 변형 여부

2. 지표 침하 측정

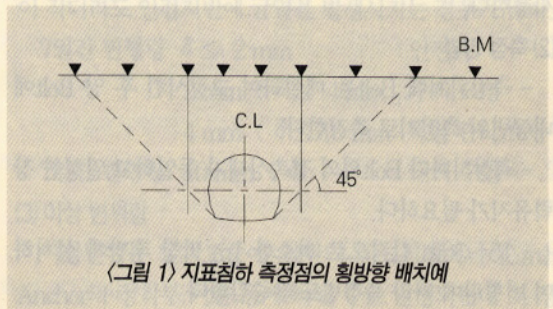
토피가 얇은 터널공사에서는 터널 및 주변지반의 안정성을 확인하기 위하여 지표침하 측정을 반드시 실시하여야 한다. 지표면의 침하량은 지질, 지하수위, 토피, 주변 구조물의 유무 또는 시공법 등에 따라서 그 결과가 달라진다. 측정간격은 횡방향으로는 2~5m 간격, 종방향으로는 터널의 토피를 고려하여<표 1>과 같은 기준으로 설정한다.

그러나 시공의 초기단계 혹은 지질의 변화가 큰 경우, 침하량이 크거나 주변에 중요 구조물이 있는 경우에는 간격을 좁히고, 시공이 어느정도 진행되고 지질이 양호하며 침하량이 작게 나타나는 경우에는 간격을 넓게 설정하여야 한다.

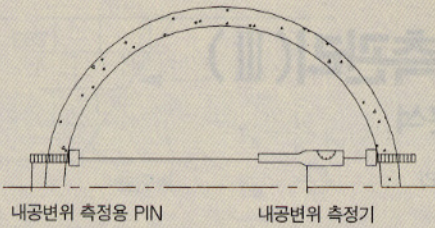
그리고 지표 침하 측정의 측선은 내공변위 측정, 천단침하 측정의 위치와 동일 지점으로 하는 것이 바람직하다.

(표 1) 지표 침하 측정시 터널 종단방향의 측정간격

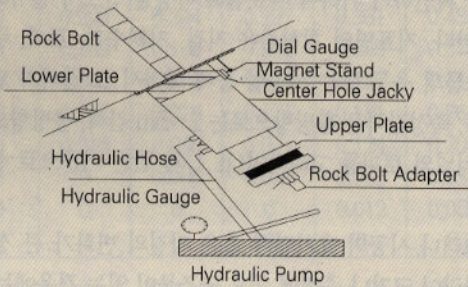
토피(h)와 터널폭(D)와의 관계	측점 간격
$2D < h$	20 ~ 50 m
$D < h < 2D$	10 ~ 20 m
$h < D$	5 ~ 10 m



(그림 1) 지표침하 측정점의 횡방향 배치에



〈그림 2〉 내공변위 측정



〈그림 3〉 Rock Bolt 인발 시험

3. 내공변위 측정

내공변위 측정은 터널시공의 안정성, 지보의 효과, 지보의 시공시기, 방법 등을 검토하기 위한 가장 기본적인 계측이다.

(1) 목적

- 막장 굴착후 가능한 초기에 최종 변위량을 예측하고 안정성을 검토하여 1차 복공의 추가여부를 판단한다.

- 하반굴착 등에 의한 1차 복공의 안정성 판단자료로 사용한다.

(2) 측정 방법

- 측정위치에 Bolt를 매설하여 고정시킨 후 양 Bolt에 내공변위 측정기로 측정한다.

- 측정시마다 Bolt와의 접촉상태가 동일하고 일정한 장력유지가 필요하다.

- 15~30m 간격으로 최소한 1m 막장 후방에 설치하며 변형량에 따라 측정빈도를 증감한다.

- 변질지반, 팽창성 지반, 토피가 얇은 지반에서는 측정 간격과 빈도를 조밀하게 하며, 하부 Bench 굴착이나 Invert 폐합보다 조밀하게 측정한다.

- 수평변위 측정을 우선 시행하고 필요에 따라 대각선 측정을 시행한다.

4. 천단침하 측정

(1) 목적

내공변위 측정과 함께 주변지반의 확인 및 NATM의 경우 Rock Bolt 및 Shotcrete의 지보 효과를 파악하기 위한 계측이다.

천단침하의 측정은 특히 지형, 지질적으로 고결도가 낮은 지층이나 토피가 얇은 경우 및 단층 등의 붕괴가 일어나기 쉬운 장소에서 중요한 계측항목이다.

(2) 설치와 측정요령

Tunnel의 천단부근 Shotcrete에 Concrete 못을 박거나 내공변위 측정용 천단 Bolt를 박아 Level로 측정한다.

측점의 위치는 막장통과 후 가능한 한 빠른 시간(1-2시간 이내)에 초기측정을 시행한다.

측정은 Level을 사용하여 수준점을 기준으로 절대고를 구하고, 측정 정밀도는 $\pm 1.0\text{mm}$ 이하로 유지하며, 변위가 수렴할 때까지 측정을 계속한다.

5. Rock Bolt 인발시험

목적 및 측정방법

Rock Bolt 시공후의 정착효과를 확인하기 위해 Center Hole Jack 등을 사용하여 행하는 계측으로 가능한 한 불량한 암반을 골라서 행하며, Bolt의 머리부분에 인발력 P를 가하여 Dial Gauge로 측정하여 하중과 변위의 관계에서 인발력을 확인한다.

인발하중의 평균재하 속도는 1t/min을 표준으로 하여 충분한 정착효과가 얻어진 후에 가능한 빨리 실시한다.

ϕ -25mm 정도의 Bolt에서는 인발하중 12Ton에 도달

하면 합격으로 보아도 좋다.

암반강도가 낮아서 인발저항이 얻어지지 않으면 Rock Bolt의 길이를 길게 할 필요가 있다.

6. 지중변위 측정

(1) 목적

터널의 반경방향으로 변위를 측정하여 터널주변의 느슨해진 영역을 파악하고 Rock Bolt의 적정길이를 판정한다.

(2) 설치 및 측정방법

터널의 반경방향으로 여러 시추공을 굴착하여 1개소마다 심도가 다른 Anchor가 부착된 Extensometer를 투입하여 각 Anchor와 터널 벽면변위를 Dial Gauge 또는 Digital Meter로 측정하여 느슨해진 영역을 파악한다.

시설중에 공내에서의 Anchor를 고정시키는 것이 가장 중요하며 이는 Mortar로 하는 방식과 가압 Anchor로 고정시키는 방식이 있다.

전구간이 Mortar로 고정될 경우 데이터가 부정확할 가능성이 많아 가압 Anchor 방식이 Anchor 부분만 고정시킬 수 있고 설치작업이 간단하여 정확한 데이터를 기대할 수 있다.

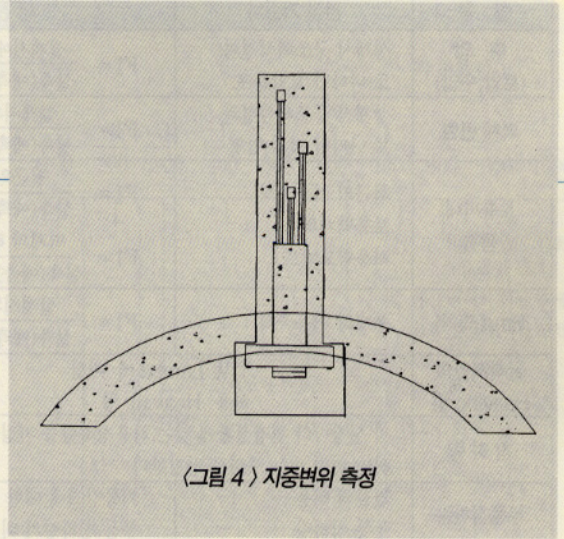
계측결과 관리기준

계측결과에 대한 분석은 관리기준을 근거로 하여 안전과 위험에 대한 판정이 이루어져야 하는데, 관리기준은 현장에 따라 선정방법이 다양하므로 시공전에 감리자 및 감독관과 협의하여 정하는 것이 바람직하다.

또한 관리기준은 계측기별로 허용한계치를 설정하게 되는데 실제로 계측기에서 나타나는 결과는 그 발생원인이 상당히 복잡적이므로 경우에 따라서는 시공상태를 고려하여 허용한계치를 계속 조정할 필요가 있다.

1. 지중경사계

토류벽의 변형을 측정하는 지중경사계의 경우 토류벽



(그림 4) 지중변위 측정

의 강성, 굴착지반의 특성, 굴착심도, 지지구조 및 지하수 등에 따라 계측결과에 상당한 차이가 있으므로 허용한계치를 설정하는데 어려움이 있다. 따라서 허용한계치는 다음과 같이 여러 항목별로 정하여 둘 필요가 있다.

(1) 최대 변위량

최대 변위량은 토류벽의 강성 및 굴착심도를 기준으로 설정하는 것이 바람직하다.

- 강성 토류벽 ($t \geq 60\text{Cm}$ 인 콘크리트 연속벽): $0.002 H$
- 보통 토류벽 ($t \approx 40\text{Cm}$ 정도인 콘크리트 연속벽) : $0.0025 H$
- 연속 토류벽 (H-Pile + 토류판) : $0.003 H$

* H : 굴착심도

(2) 최대 변위량(진행)

최대 변위량이 크더라도 변위의 크기가 완만하게 증가하는 경우에는 별다른 하자가 발생되지 않는 예가 많은데, 연속 증가량이 크게 나타나는 경우에는 최대 변위량이 작더라도 인접지반에 균열을 발생시키는 경우가 많다.

- 7일간 변형량 $\delta \leq 2\text{mm}$: 안전측
- $2\text{mm} < \delta \leq 4\text{mm}$: 주의 요망
- $4\text{mm} < \delta \leq 10\text{mm}$: 특별 관리 요망
- 7일간 변형량 $10\text{mm} < \delta$: 대책 수립

(3) 이상 변위량

이상변위는 굴착도중에 암반의 미끄러짐이나 Earth Anchor의 정착부 이완 등에 의해 주로 발생되는데 이 경

〈표 1〉 개착구간의 관리기준치

측 정 항목	안전, 위험의 판정 기준치	판 정 법			
		안전율	위험	주의	안 전
측 압 (토압,수압)	설계시 구조해석결과 로 나타난 토압분포	$F1 = \frac{\text{설계시에 이용한 토압}}{\text{실측(예측)에 의한 토압}}$	$F1 = F1 < 0.8$	$0.8 < F1 < 1.2$	$F1 > 1.2$
벽체 변형	설계시 구조해석결과 로 나타난 벽체 변형	$F1 = \frac{\text{설계시의 벽체 변형}}{\text{실측(예측)에 의한 변형}}$	$F2 < 0.8$	$0.8 < F2 < 1.2$	$F2 > 1.2$
토류벽내 응력	철근의 허용응력, 토류벽체의 허용휨모멘트	$F1 = \frac{\text{철근의 허용 응력}}{\text{실측(예측)에 의한 응력}}$ $F1 = \frac{\text{벽체의 허용 휨모멘트}}{\text{실측(예측)에 의한 모멘트}}$	$F3 < 0.8$	$0.8 < F3 < 1.2$	$F3 > 1.2$
Strut 축력	부재의 허용축력	$F1 = \frac{\text{설계시의 벽체 변형}}{\text{실측(예측)에 의한 변형}}$	$F4 < 0.8$	$0.8 < F4 < 1.2$	$F4 > 1.2$
굴착저면의 Heaving 량	T.W Lambe 에 의한 허용 Heaving 량		$F5 < 0.8$	$0.8 < F5 < 1.2$	$F5 > 1.2$
침 하 량	각 현장마다 현장상황에 맞는 허용침하량을 지정하고, 그 허용침하량을 초과 하면 위험 또는 주의로 판정한다.				
부등침하량	건물의 허용 부등 침하량	기둥간격에 대한 부등 침하량의 비	1/300 이상	1/300 - 1/500	1/500 이하
진 동	지하철 기준	1.0 Kine 이하	1.0 Kine 이상	0.5-1.0 Kine	0.5Kine 이하
소 음	환경 보전법	70 dB 이하	70 dB 이상	55-70 dB	55dB 이하

우 1일간 변위 증가량이 크게 나타난다. 또한 이러한 변위는 일정한 위치에서만 계속되는데 이것은 연속 증가량의 관리보다 훨씬 위험한 것으로 관측되고 있다.

- 1일간 변위량 $\delta \leq 1 \text{ mm}$: 안전측
- $1 \text{ mm} < \delta \leq 2 \text{ mm}$: 주의 요망
- $2 \text{ mm} < \delta \leq 4 \text{ mm}$: 특별 관리 요망
- $4 \text{ mm} < \delta$: 대책 수립

(4) 미 공병대 허용 수평변위 기준

NAVFAC DM-7.2 (1982)

Soil Type And Condition	Rotation Y/H	
	Active	Passive
Dense Cohesionless	0.0005	0.002
Loose Cohesionless	0.002	0.006
Stiff Cohesive	0.01	0.02
Soft Cohesive	0.02	0.04

Y : Horizontal Displacement
H : Height Of The Wall

2. 개착구간의 관리기준치 〈표 1 참조〉

3. 침하 및 구조물 기울기

굴착으로 인해 배면지반의 응력상태가 불안정하게 되

면서 지반은 부등침하를 일으켜 상부에 축조된 구조물의 기울어짐이 발생한다. 지반조건 및 구조물의 강성, 기초 상태에 따라 정도의 차이는 있으나 굴착공사시 이러한 부등침하는 불가피한 것으로 알려져 있다.

다음은 구조물의 허용 침하량과 허용 각변화를 나타낸 것이다.

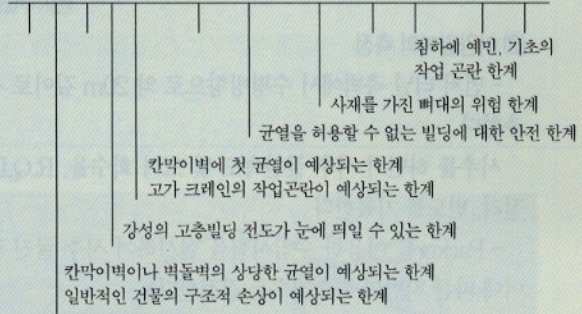
〈표 2〉 구조물의 허용 침하량

침 하 형태	구조물의 종류	최대허용 침하량
전 체 침 하	배수 시설	15.0 - 30.0 Cm
	출입구	30.0 - 60.0 Cm
	석적 및 조적 구조	2.5 - 5.0 Cm
	빠대 구조	5.0 - 10.0 Cm
	굴뚝, 싸이로 매트	7.5 - 30.0 Cm
전 도	탑, 말뚝	0.004 S
	물품 적재	0.04 S
	크레인 레일	0.003 S
	빌딩의 조적 벽체	0.0005 S - 0.002 S
부 등 침 하	철근 콘크리트 빠대 구조	0.003 S
	강 빠대 구조 (연속)	0.002 S
	강 빠대 구조 (단순)	0.005 S

(주) S : 기둥사이의 간격 또는 임의 두점사이의 거리

각 변위 (δ/L)

1/100 1/200 1/300 1/400 1/500 1/600 1/700 1/800 1/900 1/1000



구조물의 각 허용기준

계측결과 분석

1. 개착구간의 측정 Data 분석 및 활용

계측의 목적은 계측을 통하여 시공관리나 안전관리 등에 유용한 Data를 얻어 그것을 이용하는데 있는만큼, 계측관리에서 얻어진 Data를 어떻게 효과적으로 이용하는가의 여부로 계측의 효과가 판명된다.

측정결과치가 설계치에 대해 다소 작은 값을 나타내면 문제는 없지만, 설계치에 비해 과다한 경우 우선 긴급대책을 강구하고 그 이후의 공사를 어떻게 진행할 것인가의 재설계가 요구된다.

현재 현장관리나 안전관리를 위한 계측관리 방법으로서는 절대치관리와 예측관리로 대별할 수 있다.

절대치관리란 시공전에 설정한 관리기준치와 실측치를 비교, 검토하여 그 시점에서 공사의 안정성을 확인하는 방법이다.

예측관리는 다음 단계 이후의 예측치와 관리기준치를 비교, 검토하고 사전에 공사의 안정성을 확인하거나 시공 방법을 검토하는 것으로 여기서 예측치란 현 단계까지의 굴착상태를 실측치에 기초해서 Simulation한 결과 얻어진 토질정수에 의해서 다음 단계 이후 토류구조물의 거동을 추정한 값을 말한다.

절대치관리는 계측결과에 대해서 즉각적으로 대처할수 있다는 점에서 통상의 안전관리에 이용되고 있다. 또 예측관리는 초기에 토류구조물의 거동을 추정할수 있고 이에따라 대응책을 검토할 시간적 여유가 충분하다는 장점이 있지만 계측 System이 대규모가 되어 경제적인 면에서 부담이 크므로 이 방법은 주로 대규모 토류공이나 중요한 계측에 이용된다.

2. 터널구간의 측정 Data 분석 및 활용

계측에 의한 변위 및 응력의 관리기준은 토피, 지질조건, 단면의 크기 및 형상, 굴착공사, 터널주변의 환경조건에 따라 각각 달라지므로 일정한 기준을 설정한다는 것은

곤란한 일이지만 FEM 해석결과나, 비슷한 지질 및 단면에서의 계측결과를 토대로 하여 터널 또는 주변구조물의 안전성 및 터널설계의 경제성을 평가할 수도 있다.

관리기준은 계측단계 때부터 고려하는 것이 바람직하며, 일단 계측단계에서 설정된 관리 기준은 시공 초기단계의 판단기준으로 활용하도록 하고 시공중에는 각 단계에 있어서의 지반조건 및 시간경과에 따른 변위상태와 계측항목간의 상호관계를 고려하여 종합적으로 판단하여야 한다.

(1) 계측결과와의 판독

- 계측 종류별로 최종변위의 크기를 결정한다.
- 계측 종류별로 변위속도를 계산한다.
- 계측 종류별로 최대 변위속도와 최종 변위의 크기관계를 파악한다.
- 최종 변위와 토목공학적 암반 분류관계를 파악한다.
- 지중변위와 Rock Bolt 축력, 내공변위에 의하여 이완깊이를 추정하고 Rock Bolt 길이에 대하여 검토한다.
- Shotcrete 응력분포에 의하여 Shotcrete 두께의 적절 여부를 판단한다.
- 필요시 라이닝 시기를 결정한다.
- 계측치의 판독결과를 Back Analysis에서 구한 결과와 비교한다.

계측의 목적은 계측을 통해 얻어진 Data를 시공관리나 안전관리 등에 이용하는 데 있는 만큼, 계측관리에서 얻어진 Data를 어떻게 효과적으로 이용하는가의 여부로 그 효과가 판명된다.

(2) 이완깊이의 측정

- 먼저 터널 측벽에서 수평방향으로 약 20m 깊이로 시추한다.

시추를 하면서 시추 굴진속도 및 코아 회수율, R.Q.D, 절리, 빈도를 기록한다.

- Packer를 이용한 수압시험을 실시하여 시추 굴진 깊이에 따른 지반의 투수계수를 결정한다.

- 시추공을 이용하여 시추공내에서 재하시험을 하고 지반의 탄성계수를 구한다. 탄성계수 측정점을 수압시험 위치와 동일한 곳에서 하며, 여기서 구한 탄성계수는 암석 코아에서 구한 탄성계수와 비교한다.

- 시추공에서 얻은 암석코아를 이용하여 일축압축강도, 탄성계수, 포아슨비와 단위중량, 탄성과 통과속도를 측정한다. 여기서 암석코아의 한계 변형률을 구하여 Back Analysis의 결과와 지중변위 계측치와 비교한다.

- 터널내에서 탄성과 굴절법에 의하여 이완범위와 이완 깊이를 개략적으로 구한다.

각 층의 탄성과속도를 Down Hole Test 탄성과속도, 암석코아의 통과속도와 비교한다.

여기서 구한 이완범위와 변위 계측결과와 분석치와 Back Analysis 결과에 의하여 이완영역의 분포를 결정하고 Rock Bolt의 길이, 간격, Shotcrete 두께 등 시공방법을 결정한다.

(3) 역해석

계측변위를 이용하여 암반의 탄성계수와 암반내 초기 응력을 구하고 안정성해석에 이용하도록 한다.

- 내공변위, 천단침하 및 지표침하의 결과를 입력하고 재분석하여 지반의 탄성계수와 지반내 초기응력을 구한다.

- 지중변위와 지표침하를 입력, 분석하여 지반의 탄성계수와 지반내 초기응력을 구한다.

- 지중변위, 지표침하, 내공변위 및 천단침하를 함께 입력, 분석하여 지반의 탄성계수와 지반내 초기응력을

구한다.

- 분석에 의해 구한 지반의 탄성계수와 암석코아의 탄성계수, 동탄성계수, 지반의 토목공학적 분류에 의한 탄성계수, 지반내 시추공에서 재하시험에 의해 구한 탄성계수를 비교하여 지반의 탄성계수를 결정한다.

- 분석을 통한 지반내 초기응력상태를 이용하여 터널단면 형성의 적합성에 대하여 검토함으로써 이완영역이 발달될 방향도 예측한다. 또한 분석에서 미리 구한 지반의 탄성계수와 초기응력을 이용하여 지하철 터널의 안정성을 검토한다.

(4) 안정성 해석 및 평가

Back Analysis에서 구한 지반의 탄성계수와 지반내 초기응력을 이용하여 터널의 역학적 안정성을 검토한다.

- 지반의 물성과 지하철 터널의 형상 및 경계조건을 입력하고 유한요소법에 의하여 응력해석을 실시한다.

- 응력해석결과 터널을 굴착하는 경우의 변위분포, 즉 지표침하, 내공변위 및 천단침하, 지중변위를 구하고 실제 계측치와 비교하여 계측의 신뢰도를 검토한다.

- 응력해석결과 터널주변의 재분포된 응력을 구하여 이완영역을 판단한다.

- 터널굴착후 시공에 이용한 Rock Bolt와 Shotcrete의 시공효과를 검토하기 위하여 실측 Rock Bolt 축력, Shotcrete 응력과 비교한다.

- 응력해석결과 나타난 이완영역을 실측한 이완깊이와 비교하여 간격, 이완영역을 결정한다.

- 응력해석결과 나타난 이완영역을 검토하여 시공된 Rock Bolt 길이와 간격, Shotcrete 두께 등의 적절성을 검토하고 시공방법을 합리적으로 조절하여 시공의 안정성을 높이고 공사비를 절약한다. SS