

수평경사계와 천단침하계에 의한 터널막장 전후방의 천단침하 계측 김치환*

Measurement of Tunnel Arch Settlements Ahead of and Behind the Tunnel Face Using a Horizontal Inclinometer and Settlement Pins

Kim Cheehwan*

Abstract It is important to measure the displacement behind and ahead of a tunnel face during construction for evaluating mechanical stability by comparing it to a displacement criteria set by tunnel designers. The 30 m long horizontal inclinometer was installed frontward from the tunnel face and the displacement occurred ahead of a tunnel face during excavation was measured by using it. Tunnel arch settlements behind tunnel face were surveyed using a settlement pins on the arch. So total settlement and longitudinal displacement curve were obtained combining settlement measured by both the horizontal inclinometer ahead of tunnel face and the settlement pins behind the tunnel face.

Key words Horizontal inclinometer, Settlement of tunnel arch, Behind and ahead of tunnel face, Longitudinal tunnel arch settlement curve

초 록 터널시공 중 발생한 변위를 설계단계에서 설정한 계측관리 기준변위와 비교하여 터널의 안정성을 평가할 때에는 터널막장 후방뿐만 아니라 전방에서 발생하는 변위를 포함한 총변위를 이용하여야 한다. 터널 시공 중 발생하는 총변위를 알기 위하여 터널막장에서 전방을 향해 수평경사계를 설치하여 지중침하를 계측하였고 터널 막장 후방에서는 천단침하계를 이용하여 터널의 천단침하를 계측하였다. 이를 통하여 터널시공 중 발생하는 총천단침하를 계측할 수 있었고 터널막장 전후방 종단선상의 침하곡선 특성도 분석하였다.

핵심어 수평경사계, 터널천단침하, 터널막장 전후방, 터널 종단상 침하곡선

1. 서 론

터널 시공 중 터널의 역학적 안정성은 계측을 통하여 확인하는 것이 일반적이다. 계측값으로는 응력과 변위가 있으나 터널 시공에서는 주로 변위를 계측한다. 터널설계 단계에서 제시하고 있는 터널 시공 중에 적용할 터널 안정성 평가방법은 변위에 대한 관리기준을 설정

하고 계측한 변위를 이 기준과 비교하여 터널의 안정여부를 판단하는 것이다. 이와 같은 터널의 안정성 평가 방법을 이용하여 터널 완공 후의 안정성을 미리 판단하기 위하여 터널 시공 중 계측한 변위로부터 터널 완공 후 발생할 최종변위를 예측하기도 한다(Kim, 1990; 2011). 때로는 터널 시공 중 예측한 최종변위를 이용한 역해석 과정을 거쳐 터널의 안정성을 재평가하고 터널 시공방법을 개선하기도 하였다(Kim, 1990). 이와 같은 방법을 적용하기 위하여 터널 시공 중 수행하는 계측의 종류는 천단침하와 내공변위 등 여러 가지가 있는데 대부분의 계측기들은 터널을 굴착한 후 그 내부에서 계측기를 설치하고 계측을 수행한다. 이 경우 굴착이 종료된 터널 막장 후방에서 발생하는 변위만을 계측할 수 있으며 터널막장 전방에서 발생한 변위는 계측하지 못하고 있다.

그런데 터널을 시공할 때 터널의 역학적 안정성에 영

Received: Oct. 30, 2012

Revised: Nov. 22, 2012

Accepted: Mar. 18, 2013

***Corresponding Author:** Kim Cheehwan

Tel) +82632901468, Fax) +82632901465

E-Mail) kimcheen@korea.com

Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 565-701, Korea

향을 주는 응력의 변화는 터널막장으로부터 멀리 떨어진 전방에서부터 시작되므로 아직 굴착하지 않은 터널막장 전방에서도 변위가 발생한다. 연구에 의하면 터널굴착 중 발생한 총변위의 약 50%가 터널막장 전방에서 발생할 수 있는 것으로 보고되어 있다(Kim, 1990; Lo, 1989; Einstein et al., 1984). 그러므로 설계단계에서 설정한 터널의 관리기준 변위와 터널 시공 중 예측한 변위를 비교할 때는 터널막장 후방에서 발생한 변위뿐만 아니라 터널막장 전방에서 발생하는 변위도 포함하여야 터널의 안정성에 대해 합리적 판단을 할 수 있다. 따라서 터널막장 전방에서 발생하는 변위를 예측하는 것은 터널의 안정성 평가에 있어 대단히 중요하다.

터널막장 전방에서 발생하는 변위를 예측하는 여러 가지 방법이 있으나 그 중 한 방법으로 수평경사계를 이용할 수 있다. 수평경사계는 터널 막장에서 굴진할 방향으로 수평공을 천공한 후 예측기기를 설치하고 터널을 굴진할 때 터널막장 전방에서 발생하는 지중침하를 측정할 수 있는 예측기이다. 국내에서도 터널 시공 중 수평경사계를 이용하여 지중침하를 예측한 사례가 있다(Kim et al., 2003; Jang et al. 2007; 2008; Kim et al., 2009; Kim, 2009; 이희성 등, 2009). 터널막장 전방에 있는 파쇄대에서의 변위를 터널 굴진 전에 미리 예측하는 경우, 수평경사계를 이용하는 것이 효과적이다. 또 다른 경우로 지표로부터 터널까지의 심도가 얇고 연약한 지반으로 터널 시공 중 지중침하가 크게 발생할 것으로 예상되는 경우에는 수평경사계에 의한 지

중침하 예측이 더욱 효과적이다.

본 연구에서는 심도가 얇은 연약한 지반에서 터널을 굴착하면서 수평경사계와 천단침하계를 이용하여 예측한 터널의 변위로부터 터널 굴착 후 발생한 총변위와 터널막장 전후에서의 변형특성을 분석하였다. 지표에서 연구대상 터널까지의 심도는 약 10 m 내외로 터널은 층적층과 풍화암층을 통과하고 있다. 따라서 터널 심도가 얇고 지반의 강도가 약하여 터널의 역학적 안정성을 확보하는 것이 어려웠다. 즉 터널의 폭은 약 11 m 내외로 터널까지의 심도가 터널 폭과 거의 같아 터널 천단과 지표면에서 연직하향의 변위가 크게 발생할 것으로 예상되었다. 이와 같은 터널의 변형특성을 고려하여 시공 중 발생하는 변위를 줄이고 터널의 안정을 확보하기 위하여 터널막장 전방의 터널 아치부를 굴착하기 전에 강관대단그라우팅으로 미리 보강하는 시공방법을 적용하였다. 그런데 터널막장 전방의 아치를 미리 보강한 효과를 굴착 전에 확인하기 위하여 터널막장 전방에서 발생하는 터널의 변형을 예측하는 것 또한 필요하였다. 더욱이 시공할 터널 상부 지상에는 오래된 빌딩이 있는 구간이므로 지상 빌딩의 안정성을 유지하면서 터널을 굴착해야 하는 어려운 상황이었다. 따라서 터널막장이 지상 빌딩 하부에 접근하기 전부터 터널과 지상 빌딩의 안정을 지속적으로 평가하는 것도 매우 중요하였다. 이를 위해서도 터널막장 전방의 터널 아치부에 거의 수평방향으로 수평경사계를 설치하여 터널 굴진에 따라 터널막장 전방에서 발생하는 침하를 예측하였다. Fig. 1은



Fig. 1. Location of tunnel site

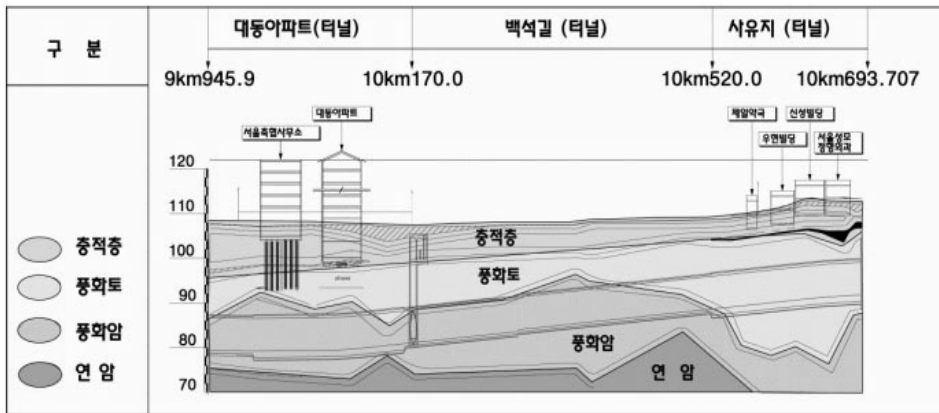


Fig. 2. Geological section of the tunnel site

연구 대상 터널의 위치를 보인 것이다. Fig. 1에서 수평 경사계를 설치한 곳은 909정거장 왼쪽 서울성모정형의 과 부근이다.

2. 지형 및 지질

본 지역은 서울시 지형의 특징인 노·장년기적 지형특성을 나타내고 있다. 완만한 지형특성으로 선구조는 뚜렷하지 않으나 산계와 수계가 유사한 방향으로 발달하고, 한강을 중심으로 충적 저지대가 넓게 분포하는데 특히 이곳은 한강 하류지역으로서, 북안으로는 불광천, 남안으로는 안양천이 합류한다. 본 지역에서 한강으로 유입되는 하천이 현재 백석길과 일치한다.

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암류인 경기편마암 복합체, 중생대의 화성암류, 그리고 이들 기반암을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있으나 최소한 3회 이상 변성작용으로 지층이 매우 복잡하다. 암상은 주로 편암, 호상편마암, 규암과 이를 관입한 소규모의 화성암류로 구성되며, 상부는 매립층과 충적층으로 피복되어 있다. 시추조사 결과에 의하면 본 지역의 지반은 생성기원 및 층상에 따라 매립층, 충적층, 풍화대층(잔류토 및 풍화암층) 및 기반암인 연암, 보통암, 경암층 등으로 구성되어 있으며, 현 지반고는 매립에 의해 형성된 것이다. Fig. 2는 터널이 시공된 부분의 지반상태를 보인 것이다(대림산업주식회사, 2003a).

3. 터널단면과 보강방법

터널 굴착 시에 나타나는 지반의 변형은 막장전방에서 시작하여 터널 축을 따라 굴착된 막장후방으로 발달

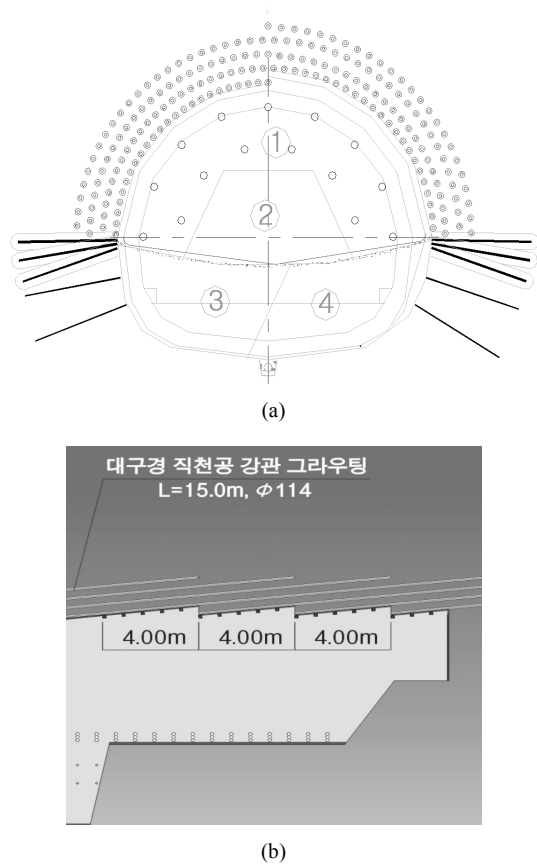


Fig. 3. Supporting pattern for the tunnel (a) sectional view (b) longitudinal view

하며 또 터널 내공이 축소되는 변형뿐만 아니라 지반이 연약한 경우에는 막장의 압출변위도 발생한다. 그러므

로 풍화토와 같은 연약한 지반에 터널을 시공하는 경우 막장전방의 선형변위와 압출변위를 억제한다면 터널의 내공변위 및 천단침하까지 억제시키면서 터널의 역학적 안정성을 높일 수 있다.

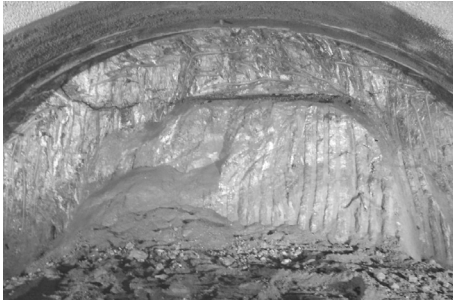


Fig. 4. Supporting pattern and geological condition of the tunnel

연약한 지반에 시공되어 터널막장 전방에서의 변위가 클 것으로 예상되는 이번 연구대상 터널에서도 막장전방의 변위가 최소화 되도록 시공하였다. 이를 위하여 여러 가지 막장전방 보강방법(Nam, 2002; Nam et al., 2002) 중 막장전방을 보강하는 강관다단그라우팅공법을 적용하였다. 적용한 강관다단그라우팅 보강도와 터널단면도는 Fig. 3과 같다(대림산업주식회사, 2003b).

이 강관그라우팅 공법은 터널을 굴진하기 전에 막장전방 터널 주변에 강관을 적절한 간격으로 설치하고 그 강관을 통하여 그라우트재를 다단계로 주입하는 방법이다. 강관다단그라우팅공법의 주요 효과는 굴진면의 안정성 향상, 굴착주변 지반의 이완 방지, 지표침하의 억제로 나타난다. Fig. 3은 보강된 터널의 횡단면과 종단면을 보인 것이다. 터널 아치부에 지름 114 mm, 길이 15 m의 강관을 4 m 굴진할 때 마다 설치하였으므로 결과적으로 4겹의 강관으로 터널 아치부를 보강한 것이

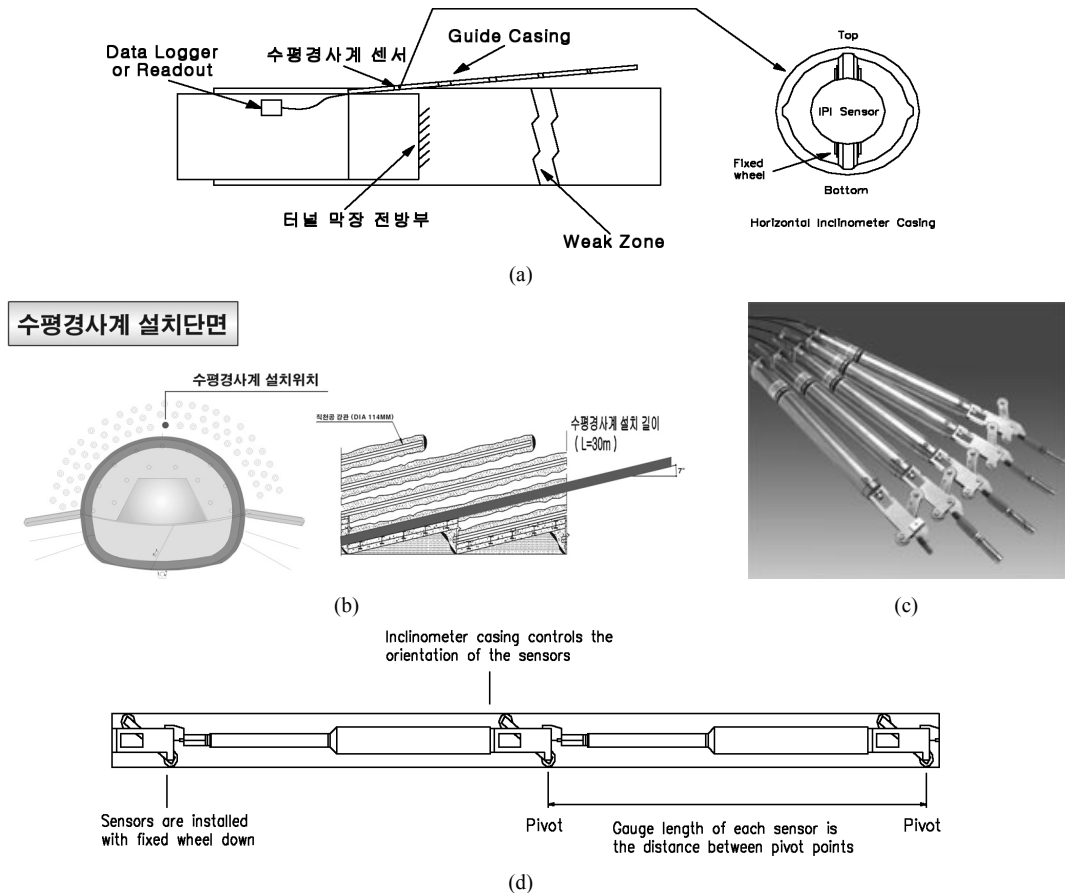


Fig. 5. Horizontal inclinometer (a) Schematic view of installation (b) Schematic view of location and direction (c) Sensors (d) Connection of sensors

다. 터널 횡단면도 중 번호는 굴착순서이고 1과 2는 터널상반부를, 3과 4는 약 30 m 후방에서 뒤따라 굴착해 오는 터널하반부를 표시한 것이다. Fig. 4는 터널 시공 중 보강상태와 터널막장의 지질을 보인 것이다.

4. 계측 계획

연구 대상 터널은 심도가 얇고 지반의 강도가 약하여 터널의 역학적 안정성을 확보하는 것이 어려웠다. 즉 터널의 폭은 약 11 m 내외로 터널까지의 심도가 터널 폭과 같아 터널천단과 지표면에서 연직하향의 변위가 크게 발생할 것으로 예상되므로 연직침하를 계측하는 것이 무엇보다 중요하다. 이와 같은 계측 목적에 맞추어 계측 종류는 터널의 연직변위를 계측하는 천단침하 계측, 지표침하계측, 터널막장 전방 지중의 침하에 중점을 두고 계측하였다. 그 외 내공변위, 록볼트 축력, 슛크리트 응력 등도 계측하였다.

이 중 이번 연구에 이용한 수평경사계 관련 사항은 다음과 같다. 터널막장 전방에서의 변위를 계측하기 위하여 터널 막장전방의 터널 아치부에 거의 수평방향으로 계측기를 설치하고 굴착에 따른 막장 전방 아치부의 연직방향 변위를 계측하였다. 수평경사계는 터널 막장에서 전방으로 수평에 가까운 상향 약 7°로 천공하고 수평경사계관을 삽입한 후 그라우팅으로 주변지반과 일체가 되도록 한다. 수평경사계의 길이는 30 m 이고 3 m 간격으로 10개의 측정점이 설치되어 있으며 연장된 1 m 끝단은 지중에 고정시킬 수 있도록 되어 있다(대림산업주식회사, 2006a). Fig. 5(a)는 터널막장으로부터 전방을 향하여 설치된 수평경사계와 측정센서를 보인 것이고 Fig. 5(b)는 터널막장 전방에 보강한 다단그라우팅용 강관과 평행하게 길이 30 m를 정밀하게 천공한 후 설치한 수평경사계를 보인 것이다. Fig. 5(c)는 수평경사계에서 변위를 감지하는 센서로 미국 Spectron 사의 모델 IPI-16804223센서 이다. Fig. 5(d)는 수평경사계에서 측정수에 따라 여러 개의 센서를 연결한 모식도 이다.

5. 계측결과와 분석

5.1 수평경사계 계측과 터널천단침하

수평경사계에서의 측정은 일정한 시간 간격으로 자동으로 이루어지고 계측치는 컴퓨터에 저장된다. 1일 1시간 간격으로 24회 측정된 수평경사계 침하의 측정 때마다 변동이 심하여 시간별 측정치보다는 1일 평균값 분석에 활용하였다. 수평경사계로 계측한 지중침하값에

변동이 생기는 원인은 여러 가지가 있겠지만 그 중 주요한 원인으로는 시공방법으로 추정된다. 본 터널의 시공방법은 강관다단그라우팅으로 터널막장 전방을 보강한 후 굴진하는 방법인데 약 100개의 강관을 삽입하기 위하여 천공을 해야 하고, 길이 15 m의 강관을 여러 짧은 구간으로 나누고 각 구간마다 높은 압력으로 그라우팅하여 주변 지반을 보강한 후 터널막장을 브레이커와 굴삭기로 굴착하고 슛크리트와 록볼트로 보강하는 것이다. 따라서 천공에 의한 반복진동과 다단그라우팅 압력 등에 의해 인접한 수평경사계 센서도 민감하게 반응한 것으로 판단된다.

수평경사계를 설치한 곳은 Fig. 2의 10674(10 km674)에서 10647(10 km647)까지의 구간이고 측정센서는 3 m 간격으로 총 10개가 연결되어 있다. 수평경사계로 계측을 시작하였을 때 터널막장의 위치는 10668이었고 터널막장이 10648에 도달하였을 때 수평경사계를 이용한 계측을 종료하였다(대림산업주식회사, 2006b).

수평경사계 측정법 계측치는 천단위치의 침하로 변환이 필요하다. 수평경사계는 터널의 막장 천단에서 약 7° 상향으로 천공하여 설치하였다. 수평경사계의 길이가 약 30 m이므로 터널막장으로부터 30 m 떨어진 곳의 측정점은 터널 천단보다 약 3.65 m 상부 지중에 위치하게 된다. 그러면 수평경사계의 측정점은 터널천단보다 위의 지중에 있기 때문에 여기서 계측된 지중침하를 측정 직하부 터널천단에서의 침하량으로 환산하여 마치 터널천단핀을 이용한 천단침하량이 되도록 하여야 한다. 이를 위하여 역해석으로 구한 터널천단 주변의 연직방향 변위를 터널천단으로부터 연직상향 거리에 따라 분석하였고 그 결과를 이용하여 수평경사계 각 측정점에서 발생한 지중침하를 터널천단에서의 침하로 환산 표시하였다. 터널 굴착면으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 반경방향 변위는 그 거리의 제곱에 반비례하므로 (Goodman, 1980) 역해석 결과 중 터널천단으로부터 거리가 다른 여러 위치에서의 지중연직변위를 내삽하고 추세를 분석하였다. 이에 따라 수평경사계의 각 측정점에서 측정된 침하에 각 측정점의 심도에 따른 환산비율을 곱하여 터널천단에서의 침하로 변환할 수 있었다. 터널천단으로부터 수평경사계 측정점까지의 연직거리 x 에 따른 터널 천단침하로의 환산비율식은 $(1 + 0.0813x - 0.0039x^2)$ 과 같다.

지중의 수평경사계에서 계측한 지중침하를 터널에서의 천단침하로 환산하였으나 수평경사계 계측치는 수평경사계의 가장 끝단의 측정점과 임의의 측정점 사이의 상대변위이다. 만약 터널의 막장이 수평경사계 끝단에 가까워지면 끝단 측정점에서의 침하가 다른 측정점에서의 침

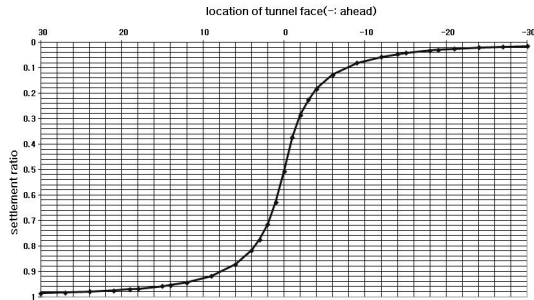


Fig. 6. Characteristic of tunnel arch settlement ratio both ahead of and behind the tunnel face

하에 비하여 더 크게 되면서 침하형상이 왜곡될 수 있다. 본 연구에서는 수평경사계 측점 중 터널막장에 가까운 10671측점에서의 침하를 10672에 설치한 천단침하판에서 측정한 천단침하와 같은 것으로 간주하였다. 그러면 수평경사계의 10671 측점들을 기준으로 수평경사계 내 기타의 측점들에서의 침하를 구할 수 있다. 이 경우 천단침하판에서 측정한 천단침하는 절대변위이므로 수평경사계에서 측정한 침하도 절대변위로 변환된다.

5.2 종단상 터널천단침하의 특성

터널 원주방향의 변위와 마찬가지로 터널막장 전방 종단상에서의 변위도 터널막장으로부터 거리의 제곱에 반비례하여 감소하는 분포를 보인다. 지반 내에 터널을 굴착할 때 발생하는 총변위의 50%의 내외의 변위가 터널막장 전방에서 발생한다고 보고되어 있다(Kim, 1990; Lo, 1989; Einstein et al., 1984). 수평경사계를 터널막장 전방에 설치하고 연직방향의 변위를 측정한 결과로부터 터널막장 전방에서의 변위특성을 분석하였다.

터널의 막장이 10660에 위치할 때 막장이 10660에서의 천단침하 약 45 mm, 전방의 수평경사계 측점인 10659에서의 천단침하 약 36 mm, 10656에서의 천단침하 약 19 mm, 10653에서의 천단침하 약 6 mm, 10650에서의 천단상향변위 약 1 mm, 10647에서의 천단상향 변위 약 0.3 mm, 10646에서의 천단침하 약 7 mm를 막장으로부터 거리의 제곱에 반비례하는 변위함수를 구하였다. 또 이미 굴착이 이루어진 터널막장 후방에서의 침하형태는 터널막장 전방의 침하형태와 동일해되 수평과 연직 축에 대칭인 것으로 가정하였다. 이 변위 함수에 따라 구한 터널막장 전후방에서 발생하는 천단 침하비율은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에 의하면 터널막장 전후 약 3 m에서 총침하의 약 55%가 발생하고 6 m 전후에서 약 75%, 터널 폭의 1 배인 약 12 m 전후에서 89%의 천단침하가 발생하였다.

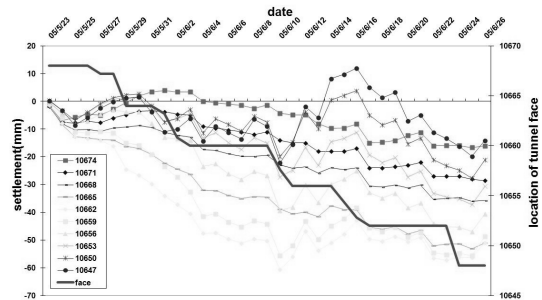


Fig. 7. Relation between date and settlement of tunnel arch measured using horizontal inclinometer

5.3 시간경과와 터널굴진에 따른 터널 천단침하

터널을 10674에서 10647 방향으로 굴착하면서 수평 경사계로 측정한 침하를 경과시간에 따라 표시한 것이다. 터널을 굴착함에 따라 막장의 위치가 변하게 되고 수평경사계도 지중변형에 따라 침하하게 되는데 이를 터널천단침하로 변환하여 분석하였다. 최대 천단침하가 발생한 측점은 10662로, 설치된 수평경사계의 길이 30 m 중 중간 부근이었고 최대침하는 약 61 mm이었다. 수평경사계 종점 끝단에 가까운 10647, 10650에서는 침하가 각각 약 22 mm, 28 mm로 막장의 지지효과로 10662의 침하보다 작았다.

터널막장과 측점 사이의 거리에 따라 발생하는 변위를 표시한 Fig. 6의 변형특성곡선에 의하면 터널 굴착에 따라 발생하는 총변위에 대한 측정한 변위의 비율을 알 수 있다. 수평경사계의 10662측점에서 측정을 시작할 때 터널막장은 10668에 있었으며 이 측점들은 터널막장으로부터 전방 6 m에 있는 것이다. 또 터널막장이 이 측점으로 부터의 14 m 떨어진 10648 지점에 도달하였을 때 측정을 종료하였다. 변형특성곡선에 따르면 터널막장 전방 6 m에서 후방 14 m까지 측정한 변위는 총변위의 약 83%이다. 그리고 수평경사계 10647측점에서 측정을 시작하였을 때 이 측점은 터널막장 전방으로부터 21 m 떨어진 지점에 있었고 측정을 종료하였을 때 측점은 터널막장으로부터 1 m 전방에 있었다. 측점과 터널막장과의 거리에 따른 변형특성곡선으로부터 총변위에 대해 측정한 변위의 비율은 약 35%이었다. 또 수평경사계 끝단 중 시점에 가까운 10671측점은 측정을 시작할 때 터널의 막장이 측점을 3 m 지났던 상태였고 측정을 종료하였을 때 터널막장과 측점 사이의 거리는 23 m로 변형 특성곡선에 따른 측정비율은 약 20%이었다.

Fig. 7은 시간경과에 따라 변하는 터널막장의 위치와 수평경사계의 여러 측점에서 발생한 천단침하를 보인 것이다. 측정한 천단침하는 민감한 계측기센서의 영

향으로 부분적으로 진동하는 구간이 있으나 전체적으로는 시간에 지남에 따라 침하가 증가하는 추세를 보이고 있다. 또 수평경사계 양 끝단보다 중앙부 계측점 10662, 10659, 10656에서 천단침하가 크게 발생하였다. Fig. 7에서 시간경과에 따른 터널막장의 위치를 보일뿐만 아니라 굴착이 진행되지 않아 터널막장이 정지된 상태와 터널막장을 굴착하여 터널막장이 전진한 상황도 알 수 있다. 터널을 굴진하지 않아 터널막장이 정지된 경우에는 터널침하도 크게 발생하지 않았으나 터널막장을 굴착하면 터널침하도 증가하는 경향을 보였다. Fig. 8은 터널막장 위치에 따라 변하는 수평경사계로 계측한 천단침하를 보인 것이다.

5.4 시간경과에 따른 터널중단침하

Fig. 9는 수평경사계에 의한 터널 중단침하의 경시 중단변화도로 수평경사계 측정위치에서 시간이 경과함에 따른 중단침하를 터널 중단 상에 표시한 것이다. 시간의 경과와 함께 굴진이 진행되면서 터널의 중단침하도

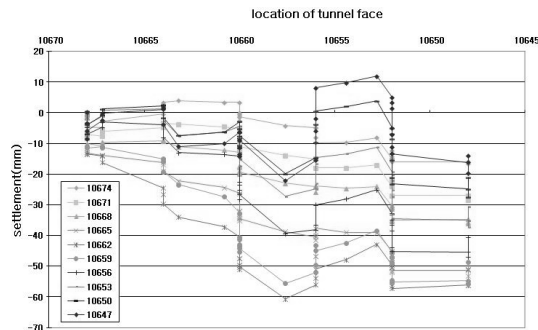


Fig. 8. Relation between location of tunnel face and settlement of tunnel arch measured using horizontal inclinometer

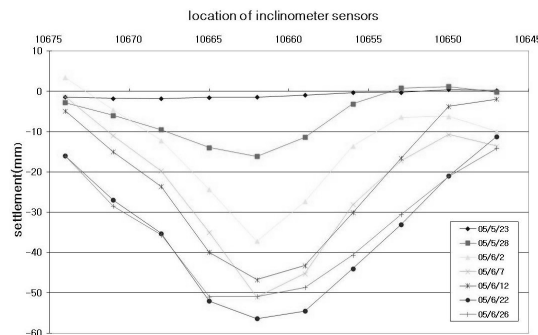
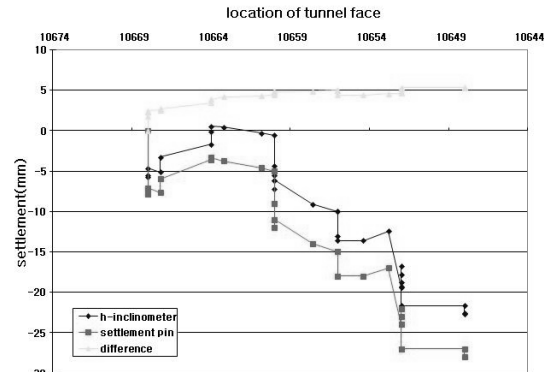


Fig. 9. Relation between longitudinal settlement of tunnel arch at sensing points of the horizontal inclinometer and elapse of time

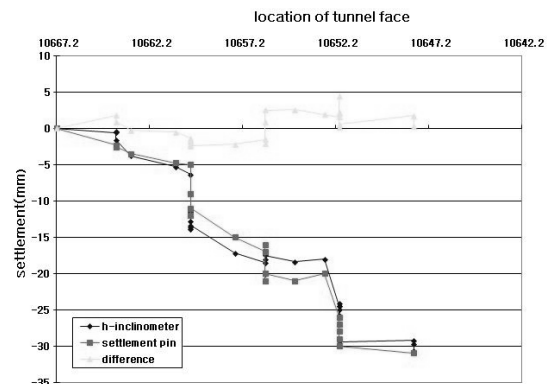
증가하였다. 수평경사계를 설치하고 2005년 5월 23일 첫 번째로 계측한 결과, 터널막장 전방쪽으로 가장 멀리 떨어져 있는 계측점인 10647에서 침하가 거의 발생하지 않았고 터널막장 후방의 계측점인 10674에서 가장 큰 침하가 발생하였다. 그러나 터널 굴착이 진행됨에 따라 수평경사계의 양쪽 끝단 계측점에서 발생하는 침하의 증가량은 감소하나 수평경사계 중간 부분의 계측점인 10662 전후에서 침하량이 크게 증가한 후 2005년 6월 22일 계측치가 10662에서 최대침하량을 보였다. 이는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 계측 시작과 종료 시의 터널막장 위치를 고려할 때 수평경사계 양 끝단에 비하여 계측점 10662에서 총변위에 대한 계측변위의 비율이 가장 크기 때문이다.

5.5 터널 천단침하핀과 수평경사계에 의한 침하

Fig. 10은 터널의 천단에 측정핀을 설치하고 계측한



(a)



(b)

Fig. 10. Comparison of settlements of tunnel arch from the tunnel settlement pin and the horizontal inclinometer (a)10672 (b)10667

천단침하를 수평경사계로부터 환산한 천단침하와 비교한 것이다. ‘h-inclinometer’는 수평경사계를, ‘settlement pin’은 터널천단침하핀을, ‘difference’는 수평경사계와 터널 천단침하핀으로 측정한 측정값 차이를 보인 것이다. 터널 굴착 후 천단침하핀을 이용해 천단침하를 측정하기 시작한 시점과 동일한 일시로부터 증가한 수평경사계에서의 침하를 천단침하핀에서 측정한 침하와 비교한 것이므로 터널막장 전방에서 발생한 침하는 제외된 것이다. 터널의 천단침하핀이 설치된 위치와 수평경사계 측정점의 위치가 일치하지 않는 경우에는 터널 천단침하핀에 가까운 두 개의 수평경사계 측정점에서 측정한 침하를 터널 천단침하핀 위치에 맞추어 내삽하였다. 수평경사계에 의한 측측을 터널 막장이 10648에 도달하였을 때 종료하였으므로 터널 천단침하핀을 이용한 천단침하도 그때까지 측측한 결과를 비교한 것이다.

터널 위치 10672와 10667에서 천단침하핀을 이용한 천단침하와 수평경사계로 구한 천단침하는 같은 추세를 보였다. 그러나 측측방법이 서로 다르므로 침하량은 약간의 차이를 보이고 있다.

5.6 터널 천단침하핀과 수평경사계에 의한 침하의 결합

Fig. 11은 터널막장 전방의 침하는 수평경사계로 측측하고 터널막장 후방에서 발생한 터널 천단침하는 천단침하핀을 이용하여 측측한 결과를 덧붙인 것이다. 즉 터널 굴착 중 발생하는 터널막장 전방과 후방에서의 침하를 연결하여 총천단침하를 보인 것이다. 수평경사계에 의한 측측을 터널 막장이 10648에 도달하였을 때 종료하였으나 터널 천단침하핀을 이용한 측측은 터널을 약 130 m 더 굴착한 후 10520에서 터널이 관통될 때까지 계속된 결과이다. 터널 천단침하계 10672지점에서의 천단침하는 Fig. 11(a)와 같다. 이 지점에서 측측을 시작하였을 때 터널막장은 이 지점을 4 m 지나 10668에 위치하였으므로 수평경사계와 터널 내 천단침하핀에서 측측된 침하는 터널막장 후방에서 발생한 것이다. 즉 10672에서는 수평경사계를 이용하여 측측하려던 터널막장 전방의 침하는 측측할 수 없었다. 수평경사계는 회수하여 다른 곳에 설치하고 재사용할 수 있는데, Fig. 11(a)에서 수평경사계를 회수하기 전까지 측측한 천단침하는 수평경사계와 터널 천단침하핀 모두에서 유사한

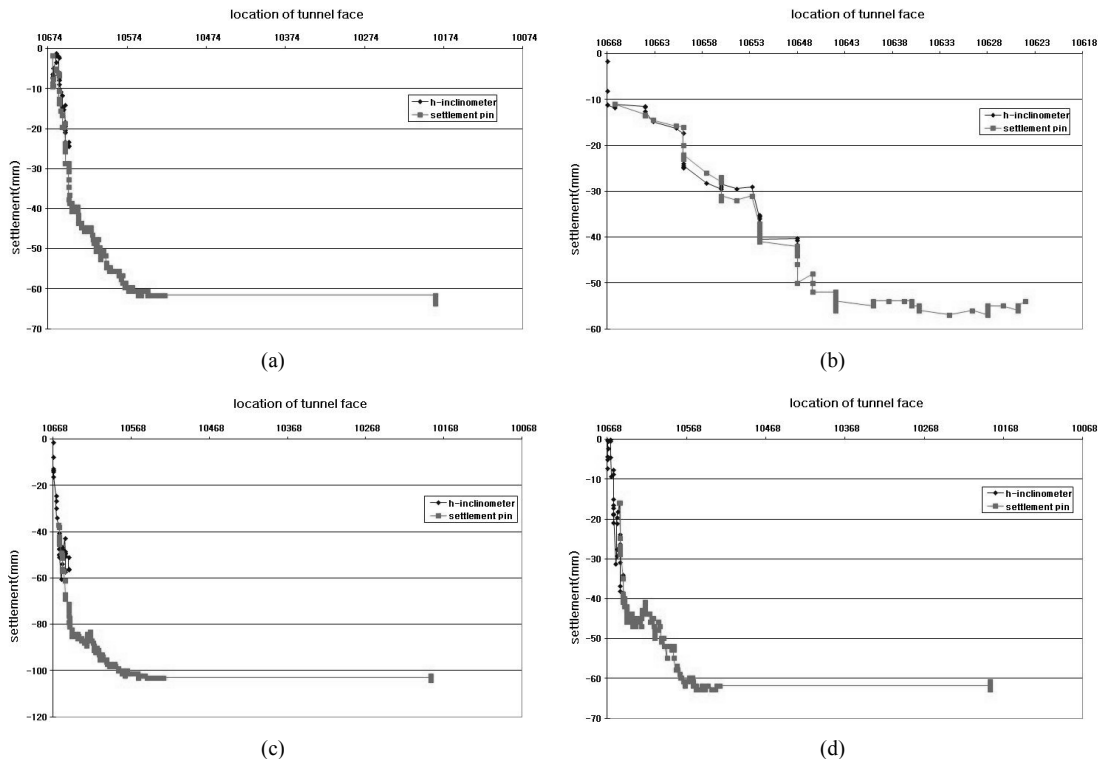


Fig. 11. Settlement of tunnel arch measured combining settlement pin and horizontal inclinometer (a) 10672 (b) 10667 (c) 10662 (d) 10654

침하량을 보이고 있다. 수평경사계를 제거한 후 10672 터널 천단침하핀으로 부터 약 150 m 떨어진 터널 관통점 10520에 도달할 때까지 발생한 천단침하핀에서의 최종침하는 약 62 mm가 되었다.

또 10667의 터널 천단침하 계측핀은 10668에 수평경사계를 설치한 다음 약 1 m 굴착한 후 설치되었다. 터널 천단침하핀으로 계측을 시작하기 전에 수평경사계를 이용한 터널 막장전방의 침하가 약 11 mm 계측되었다. Fig. 11(b)에서 터널막장 전방의 침하를 제외하고 수평경사계를 제거하기 전까지 계측한 천단침하는 수평경사계와 터널 천단침하 계측핀 모두에서 역시 유사한 침하량을 보이고 있다. 터널막장이 10648일 때 수평경사계를 제거한 후 터널을 10624까지 굴진하여 터널 천단침하핀의 위치 10667로부터 약 43 m 떨어지는 동안 천단침하핀에서 약 45 mm의 침하가 발생하였고 터널막장 전방에서 발생한 침하 약 11 mm를 더하면 약 56 mm의 천단침하가 터널막장 전후에서 발생하였다.

또 10662의 터널 천단침하 계측핀은 10668에 수평경사계를 설치한 다음 약 7 m 굴착한 후 설치되었다. 터널 천단침하 계측핀으로 천단침하 계측을 시작하기 전에 수평경사계로 계측한 터널막장전방에서의 침하가 약 37 mm이었다. Fig. 11(c)에서 터널 막장후방에서 수평경사계와 터널 천단침하 계측핀으로 중복 계측한 부분은 유사한 침하량을 보이고 있다. 수평경사계를 제거한 후 터널 천단침하핀의 위치 10662로부터 약 142 m 떨어진 터널 관통점 10520까지 굴진하는 동안 10662 천단침하핀에서 약 66 mm의 침하가 발생하였으므로 터널막장 전방에서 계측된 침하 약 37 mm를 더하면 약 103 mm의 총천단침하가 발생한 것이다.

또 다른 10654의 터널 천단침하 계측핀은 10668에 수평경사계를 설치한 다음 약 16 m 굴착한 후 설치되었다. 터널 막장전방에서 발생한 침하가 약 16 mm 계측되었다. Fig. 11(d)에서 수평경사계 제거 후 터널 천단침하핀에서 계측된 침하는 약 47 mm이었고 터널막장 전방에서 계측된 침하 약 16 mm를 더하면 약 63 mm의 총천단침하가 발생하였다.

6. 결론

터널막장 전방 지중에 수평방향으로 길이 30 m의 경사계를 설치하고 터널 굴착으로 인해 터널막장 전방에서 발생하는 지중침하를 계측하였고 굴착된 터널막장 후방에는 터널 천단침하핀을 이용하여 터널의 천단침하를 계측함으로써 터널굴착으로 인한 총천단침하를 계측할 수 있었다. 본 연구의 계측대상 터널은 지표에

서 터널까지의 심도가 약 10 m 내외로 층적층과 풍화암층을 통과하고 있고 터널의 폭은 약 11 m로 터널천단침하가 크게 발생할 것으로 예상되었다. 결론은 다음과 같다.

1. 수평경사계로 계측한 침하를 터널막장 전후를 중심으로 종단상에서 분석한 결과 터널의 천단침하는 터널막장 전후 약 3 m에서 총침하의 약 55%가 발생하고 6 m 전후에서 약 75%, 터널 폭의 1 배인 약 12 m 전후에서 89%의 천단침하가 발생하였다.
2. 수평경사계 설치 후 굴착이 진행됨에 따라 수평경사계의 측점이 터널막장 후방에 위치하게 되고 터널 천단침하 계측핀을 이용한 천단침하도 계측할 수 있으므로 두 가지 방법의 계측이 중복되는 구간이 있었다. 이 중복계측 구간에서 수평경사계와 터널 천단침하핀을 이용하여 계측한 천단침하는 유사한 값을 보였다.
3. 수평경사계로 계측한 터널막장 전방의 침하와 터널막장 후방에서 터널 천단침하핀을 이용하여 계측한 터널 천단침하를 더하여 터널 시공 중 터널막장 전후방에서 발생하는 총천단침하를 계측할 수 있었다. 터널 천단침하 계측핀에서 천단침하 계측을 시작하기 전 수평경사계로 계측한 천단침하는 약 16-37 mm이었고 이어서 터널 천단침하핀으로 계측한 천단침하는 약 47-66 mm로 총천단침하는 약 63-103 mm이었다.

사 사

이 논문은 우석대학교 산학협력선도대학(LINC) 사업단의 지원을 받은 논문임.

참고문헌

1. 대림산업주식회사, 2003a, 지하철 9호선 6공구 지질조사 보고서.
2. 대림산업주식회사, 2003b, 지하철 9호선 6공구 설계보고서.
3. 대림산업주식회사, 2006a, 지하철 9호선 6공구 계측분석 보고서.
4. 대림산업주식회사, 2006b, 지상건물 하부통과 터널구간의 계측치 추세예측 및 역해석.
5. 이희성, 박연준, 채영수, 김주화, 2009, 도심지 터널굴착에 따른 선행변위 예측에 대한 연구, 2009 한국암반공학회 학술발표회, pp. 99-104.
6. Jang Won Yil, Yang Hyung Sik, Chung So Keul, 2007, Analysis for measuring displacement of tunnel face using horizontal inclinometer. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17,

- No. 5, pp. 428-434.
7. Jang Won Yil, Yang Hyung Sik, Chung So Keul, 2008, Longitudinal deformation profile in tunnel using measured data. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 3, pp. 338-342.
 8. Kim Cheehwan, 1990, Stress analysis and deformation behaviour of rock around underground cavern by back analysis of field measurements. Ph.D Thesis, Seoul National University.
 9. Kim Cheehwan, 2010, Forecasting final displacement with displacement function using deformation measurements while constructing a tunnel. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 20, No. 6, pp. 408-420.
 10. Kim Chuhwa, Chae Youngsu, Park Yeonjun, 2009, Prediction of preceding displacement of a soil-tunnel by displacement monitoring using horizontal inclinometer. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 355-365.
 11. Kim Chuhwa, 2009, A study on the prediction of preceding displacement and damage assessment of adjacent structures due to tunnel excavated in a soft ground using horizontal inclinometers. Ph.D Thesis, Suwon University.
 12. Kim Kwang Yeom, Kim Chang Yong, Hong Sung Wan, Bae Gyu Jin, Seo Yong Seok, Jeon Jae Sung, 2003, A study on the measurement of tunnel pre-displacement using horizontal inclinometer, 2003 KSCE Annual Conference, pp. 4878-4883.
 13. K.Y. Lo, 1989, Recent advances in design and evaluation of performance of underground structures in rocks, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 171-183.
 14. Nam Kee Chun, Heo Young, Kim Chi Whan, You Kwang Ho, 2002, The behavior of soil tunnels reinforced with RPUM and fiber glass. Tunnel Technology, Korean Tunnelling Association, Vol. 4, No. 3, pp. 185-193.
 15. Nam Kee Chun, 2002, A study on the reinforced protection to control extrusion at the face of shallow tunnels. Ph.D Thesis, Suwon University.
 16. Richard E. Goodman, 1980, Introduction to rock mechanics.
 17. Zdenek Einstein, Heinrich Heinz, Arsenio Negro, 1984, On three dimensional ground response to tunnelling, ASCE, N.Y., pp. 107-127.



김치환

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com

현재 우석대학교 토목공학과 교수
