

터널의 계측결과 종합분석에 의한 지반의 거동 및 터널 구조체의 역학적 특성 연구

A Study on the Mechanical Characteristics of Tunnel Structures and Ground Behavior by Synthetic Analysis Method with Tunnel Monitoring Results used

우 종 태*
Woo, Jong-Tae

Abstract

In this study, the relationships between the displacement and stress of the tunnel using various analysis methods were compared with monitoring results carried out during construction and maintenance monitoring. The behavior of tunnel were measured in the subway tunnel passing comparative soft the weathering and analyzed both security and mechanical characteristics of the tunnel lining. With the results of simplified monitoring observed in top heading and bench excavation tunnel, it is confirmed that the crown settlement is larger than the surface settlement. it is interesting to note that the crown settlement and the crown shotcrete lining stress are widely used monitoring items for the back analysis. It is analyzed that the residual water pressure applied in the drainage type tunnel is reasonable.

요 지

본 연구에서는 공사중 계측 결과와 유지관리 계측 결과를 토대로 다양한 분석방법을 통하여 터널의 변위와 응력 등을 분석하였으며, 지반조건이 비교적 연약한 풍화대를 통과하는 지하철 터널의 거동을 분석하여 터널 라이닝의 역학적 특성을 분석하였다. 공사중 계측결과 상부 및 하부 반단면 굴착 완료시의 계측결과를 단순화하여 터널 굴착시 천단침하가 지표침하와 내공변위보다 크다는 것을 확인하였으며, 천단침하와 천단숫크리트 라이닝응력이 역해석 시에 가장 많이 사용되는 계측항목임을 알 수 있었다. 그리고, 간극수압 분석결과를 통해 배수형 터널에 설계시 적용되고 있는 잔류수압의 타당성을 분석하였다.

Keywords : Construction and maintenance monitoring, Behavior of ground and tunnel, Security and mechanical characteristics of the tunnel lining

* 정희원, 경북대학 토목설계과 교수

E-mail : jtwoo60@chol.com 019-435-8736

•본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

국내에서 건설되는 대부분의 터널공사는 NATM인 New Austrian Tunneling Method로 시공되었으며, 이 공법은 1980년대 초 서울지하철 3호선에 국내에 처음 도입되어 각종 터널공사에 적용되어 왔고, 이 공법은 터널의 안정성 해석기술, 작용 응력 및 변위 거동의 예측과 계측기술의 필요성을 부각시켰으며, 지속적인 터널공사 수행으로 인해 국내의 터널 기술수준이 향상되는 계기가 되었다.

NATM공법은 터널 지보재로 하여금 지반의 강도약화를 최대한 억제하여 지반이 가지고 있는 내하능력을 적극적으로 활용하면서 지속적인 계측관리가 바탕이 되는 공법으로 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성과 경제성을 도모하기 위한 공사중 계측은 광범위하게 시행되고 있으나, 이에 대한 분석방법 등의 연구와 활용도는 미미한 실정이다.⁽¹⁾⁽²⁾ 또한, 터널 현장에서 계측은 필수적인 사항이나 투자되는 계측비용과 기술자들의 노력에 비해 계측결과의 현장 적용 및 활용도는 낮은 실정인데 이는 합리적인 분석기법이 정립되어 있지 않고 터널 시공관리와 계측관리가 별도로 수행되므로 인해 계측의 중요성보다는 시공관리위주의 공사관리가 주원인인 것으로 판단된다.^{(3)~(6)}

따라서, 본 논문에서는 장기간에 걸쳐 비교적 계측이 잘 수행된 5개의 연약지반 터널인 풍화토와 풍화암을 통과하는 지하철 터널의 공사중계측 결과와 완공 후 공용기간 중에 수행되고 있는 유지관리 계측 결과를 토대로 다양한 분석방법으로 터널의 변위와 응력, 한강의 수위와 간극수압 등을 분석하여 터널의 계측결과 종합분석에 의한 지반의 거동 및 터널구조체의 역학적 특성과 터널의 계측 분석 기술을 제시하고자 한다.

2 공사중 계측 결과 분석

2.1 터널별 계측 결과

2.1.1 A 터널

A터널은 지하철 5호선 ○○○교차로 횡단구간 풍화토를 통과하는 복선터널이며, 토피는 17.7m, 지하수위는 GL-10.1m, 지층 구성은 매립층이 0.0~2.8m,

층적층이 2.8~19.3m, 풍화토층이 19.3~23.6m, 풍화암층이 23.6m 이하로 되어 있다. 굴착방법은 인력과 기계굴착, 굴착공법은 연직 분할굴착인 CD공법(Central Diaphragm Wall)으로 굴착되었다.

A터널의 공사중 계측 단면 중 대표단면인 18k012 구간의 계측 단면도는 Fig. 1, 계측결과 경시도는 Fig. 2와 같다. 계측결과와 경시도는 상부 및 하부 반단면 굴착 완료시의 계측결과를 단순화 한 것으로 지표침하와 천단침하는 거의 같은 선형의 기울기로 굴착 진행에 따라 증가하는 경향을 보였다.

상부 내공변위와 숏크리트응력들은 상부 반단면 굴착시 보다 하부 반단면 굴착시 오히려 계측치가 감소하는 경향을 보이는데 이는 지반보강과 다단 분할굴착에 따른 응력 재배치 효과의 영향인 것으로 판단되며, 숏크리트응력은 상부와 하부 좌우측 벽체가 거의 같은 결과인 것으로 분석되었다.

2.1.2 B 터널

B터널은 지하철 5호선 ○○하저터널 여의도구간 풍화토를 통과하는 단선터널이며, 토피는 23.6m, 상부한강수위는 평상시 4.3m, 최고 홍수위시 15.5m이며,

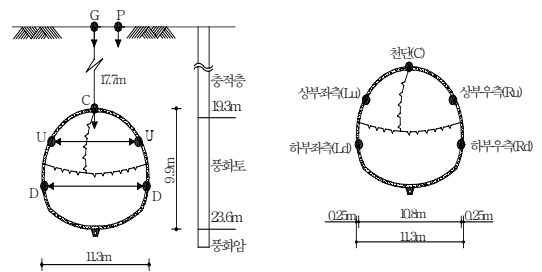


Fig. 1 A 터널 계측 단면도

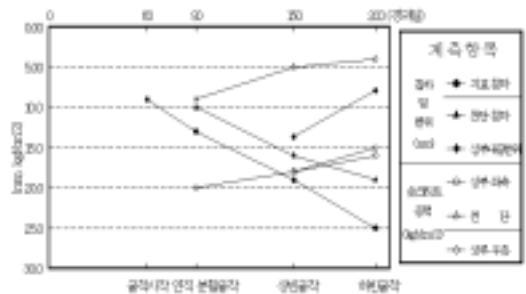


Fig. 2 A터널 공사중 계측 경시도

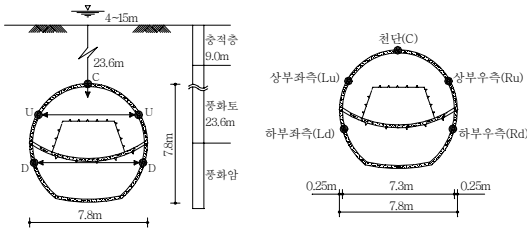


Fig. 3 B 터널 계측 단면도

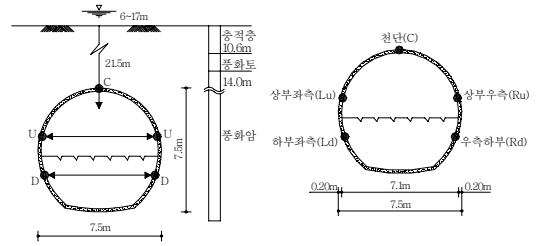


Fig. 5 C 터널 계측 단면도

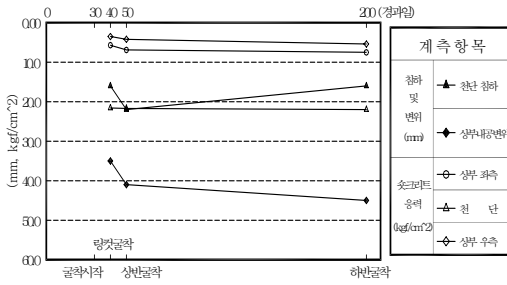


Fig. 4 B 터널 공사중 계측 경시도

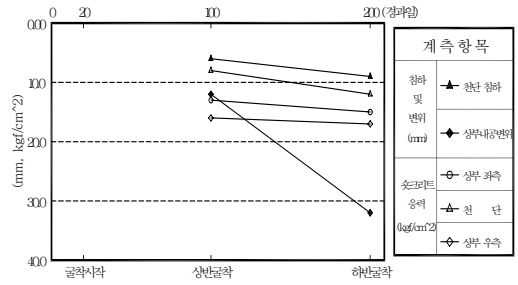


Fig. 6 C 터널 공사중 계측 경시도

지층구성은 총적층이 0.0~9.0m, 풍화토층이 9.0~28.4m, 풍화암층이 28.4m 이하로 구성되어 있다.

굴착방법은 인력과 기계굴착, 굴착공법은 상부링컷과 가인버트로 굴착되었다. B터널의 공사중 계측 단면 중 대표단면인 20k507 구간의 계측 단면도는 Fig. 3, 계측결과 경시도는 Fig. 4와 같다.

계측결과와 경시도에서 상부 내공변위와 숏크리트응력들은 굴착진행에 따라 거의 같은 선형의 기울기로 미소하게 증가하는 경향을 보이며, 숏크리트응력은 상부 좌우측 벽체가 유사한 것으로 분석되었다.

2.1.3 C 터널

C터널은 지하철 5호선 ○○하저터널 마포구간 풍화암을 통과하는 단선터널이며, 공사 개요는 터널연장이 약 60m, 토피는 21.5m, 상부 한강수위는 평상시 6.0m, 최고 홍수위시 17.2m이며, 지층구성은 총적층이 0.0~10.6m, 풍화토층이 10.6~14.0m, 풍화암층이 14.0m 이하로 구성되어 있다. C터널 공사중 계측 단면 중 대표단면인 21k470 구간의 계측 단면도는 Fig. 5, 계측결과 경시도는 Fig. 6과 같다. 계측결과와 경시도에서 천단침하와 숏크리트 응력들은 거의 같

은 선형의 기울기로 굴착진행에 따라 증가하는 경향을 보이며, 숏크리트 응력은 상부와 하부 좌우측 벽체가 유사한 것으로 분석되었다.

2.1.4 D 터널

D터널은 지하철 6호선 ○○○횡단구간 풍화암을 통과하는 단선 병렬터널이며, 공사 개요는 터널연장이 약 60m, 토피는 18.9m, 지하수위는 GL-4.5m, 지층구성은 매립층이 0.0~6.7m, 총적층이 6.7~9.2m, 풍화토층이 9.2~12.0m, 풍화암층이 12.0~23.8m, 연암층이 23.8m 이하로 구성되어 있다.

D터널의 공사중 계측 단면 중 대표단면인 15k480 구간의 DA터널, 15k485 구간의 DB터널의 계측 단면도는 Fig. 7, 계측결과 경시도는 Fig. 8과 같다.

계측결과와 경시도에서 DA, DB터널의 지표침하, 천단침하, 상부 내공변위는 거의 유사한 기울기로 굴착 진행에 따라 증가하는 경향을 보였다. 천단침하는 DA터널에서 11.8~14.5mm, DB 터널에서 12.2~14.0mm로 유사한 값을 보였다. 숏크리트응력은 각 터널 외측에서 DA터널은 22.5kgf/cm², DB터널은 20.0~22.0kgf/cm²로 거의 같은 값을 보였으며, 내측에서 DA

터널은 76.2~82.5kgf/cm², DB터널은 72.0~98.5kgf/cm²로 유사한 값으로 분석되었다. 따라서, 슛크리트응력은 단선 병렬터널 내측이 외측에 비해 3.3~4.5배 크게 발생하였는데 이는 터널 중심간 거리가 15m로 실제 터널 내면의 이격거리는 7.7m로 7.3m 터널직경의 약 1.1배 밖에 이격되지 않아 터널 근접시공에 따른 간섭의 영향인 것으로 분석되었다.

2.2 터널의 변위 및 응력 비교 분석

터널 주변지반의 거동상태를 잘 나타내 주는 계측 항목은 천단침하, 내공변위, 지중변위, 슛크리트응력 등으로 이러한 계측 항목을 위주로 터널의 침하와 변위 및 침하와 응력과의 관계를 비교 분석하였다.⁽⁷⁾

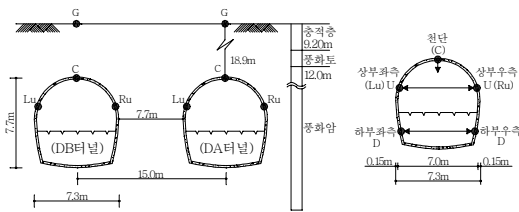


Fig. 7 D터널 계측 단면도

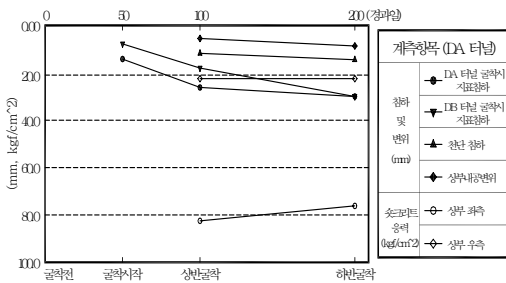


Fig. 8 D터널 공사중 계측 경시도

2.2.1 침하와 변위 비교 분석

1) 지표침하와 천단침하

지표침하와 천단침하가 측정된 3개 터널의 경시도는 Fig. 9와 같다. 지표침하와 천단침하가 측정된 현장에 대해 상부 및 하부 반단면 굴착완료시의 계측 결과를 단순화하여 비교 분석하였다. 대체적으로 3개 터널에서 상부 반단면 굴착 완료시 지표침하는 19.0~26.2mm로 평균 23.6mm, 천단침하는 11.8~16.0mm로 평균 13.3mm, 하부 반단면 굴착 완료시 지표침하는 25.0~50.0mm로 평균 35.0mm, 천단침하는 14.0~19.0mm로 평균 15.8mm가 나타난 것으로 분석되었다.

지표침하는 상부 반단면 굴착 완료시 계측된 전체 지표침하량의 67%, 천단침하는 상부 반단면 굴착 완료시 계측된 전체 지표침하량의 84%가 발생하여 천단침하가 상부 반단면 굴착 완료시 지표침하에 비해 17%정도 크게 발생한 것으로 분석되었다. 따라서, 압밀침하가 발생하지 않은 지반에서 천단침하가 지표침하에 비해 일반적으로 크다는 연구 결과를 확인할 수 있었다.

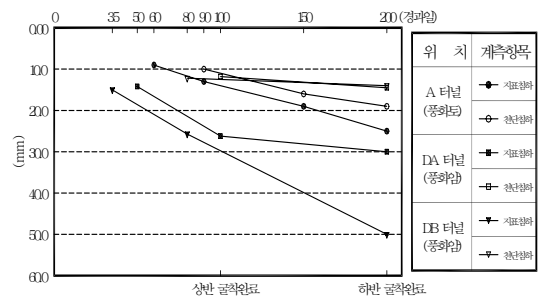


Fig. 9 지표침하와 천단침하 경시도

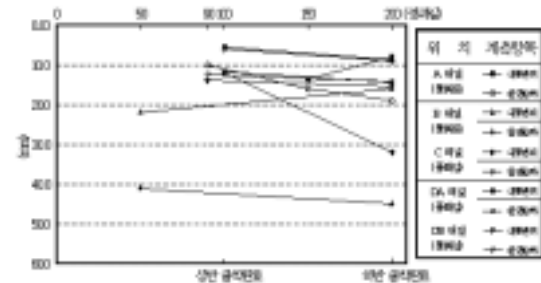
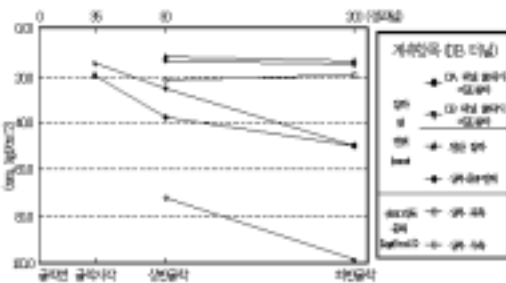


Fig. 10 내공변위와 천단침하 경시도

2) 내공변위와 천단침하

내공변위와 천단침하가 측정된 5개 터널의 경시도는 Fig. 10과 같다.

내공변위와 천단침하에 대해 상부 및 하부 반단면 굴착 완료시의 계측결과를 단순화하여 비교 분석하였다. 대체적으로 5개터널에서 상부 반단면 굴착 완료시 내공변위는 5.5~41.0mm로 평균 17.2mm, 천단침하는 6.0~22.0mm로 평균 13.6mm, 하부 반단면 굴착 완료시 내공변위는 7.9~45.0mm로 평균 21.8mm, 천단침하는 9.0~19.0mm로 평균 14.5mm가 나타난 것으로 분석되었다.

내공변위는 상부 반단면 굴착 완료시 계측된 전체 내공변위량의 79%, 천단침하는 상부 반단면 굴착 완료시 계측된 전체 천단침하량의 94%가 발생하여 천단침하가 내공변위에 비해 15% 크게 발생한 것으로 분석되었다. 따라서, 지표침하와 천단침하 및 내공변위와 천단침하의 관계에서 상부 반단면 굴착 완료시 계측된 전체 변위량의 비는 천단침하가 지표침하에 비해 17%가 크게 발생하였으며, 천단침하가 내공변위에 비해 15%가 크게 발생하여 천단침하는 거의 같은 크기의 증가율인 것으로 분석되었다.

2.2.2 침하와 응력 비교 분석

1) 지표침하와 숏크리트 라이닝 응력

지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력이 측정된 3개 터널의 경시도는 Fig. 11과 같다. 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력이 측정된 현장에 대해 상부 및 하부 반단면 완료시의 계측결과를 단순화하여 비교 분석하였다.

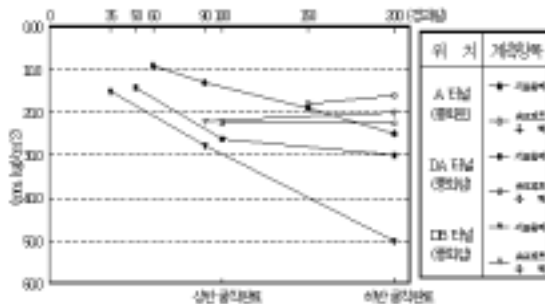


Fig. 11 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력 경시도

대체적으로 3개터널에서 상부 반단면 굴착 완료시 지표침하는 19.0~26.2mm로 평균 23.6mm, 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력은 18.0~22.5kgf/cm²로 평균 20.8kgf/cm²로 나타났으며, 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력의 비는 1.13으로 분석되었다. 하부 반단면 굴착 완료시 지표침하는 25.0~50.0mm로 평균 35.0mm, 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력은 16.0~22.5kgf/cm²로 평균 19.5kgf/cm²로 나타났으며, 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력의 비는 1.85로 분석되어 상부 반단면 굴착 완료시 보다 크게 나타났다. 따라서, 숏크리트의 허용응력 $f_{ca} = 0.4$, $f_{ck} = 84 \text{ kgf/cm}^2$ 로 계측치는 허용응력의 약 25%로 숏크리트 라이닝은 안전한 것으로 평가되었다.

2) 천단침하와 숏크리트 라이닝 응력

천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력이 측정된 5개 터널의 경시도는 Fig. 12와 같다. 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력에 대해 상부 및 하부 반단면 굴착완료시의 계측결과를 단순화하여 비교 분석하였다.

대체적으로 5개터널에서 상부 반단면 굴착 완료시 천단침하는 6.0~22.0mm로 평균 13.6mm, 천단 숏크리트 라이닝 응력은 5.0~22.5kgf/cm²로 평균 15.8kgf/cm²로 나타났으며, 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력의 비는 0.86으로 분석되었다. 하부 반단면 굴착 완료시의 천단침하는 9.0~19.0mm로 평균 14.5mm, 천단 숏크리트 라이닝 응력은 4.0~22.5kgf/cm²로 평균 16.1kgf/cm²로 나타났으며, 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력의 비는 0.90으로 분석되어 상부 반단면 굴착 완료시와 거의 같은 크기

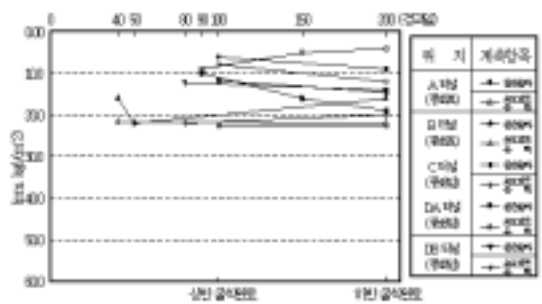


Fig. 12 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력 경시도

로 나타나 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력은 터널내 다른 위치의 값보다 정확한 값을 보이고 있어 터널 주변의 변위와 응력 추정을 위한 수치해석시 정확도가 가장 우수할 것으로 판단된다.

따라서, 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력은 상부 반단면 굴착 완료시와 하부 반단면 굴착 완료시 거의 같은 비율로 변화하는 것을 알 수 있었으며, 상부 반단면 굴착 완료시 천단침하는 전체 천단침하의 94%가 발생하였고, 천단 숏크리트 라이닝 응력은 98%가 발생한 것으로 분석되었다.

2.2.3 회귀분석 결과

각 계측 항목별 경시도를 로그 그래프에 표시하고 회귀분석 곡선을 구하면 Fig. 13~16과 같으며, 회귀 분석 곡선을 종합하면 Fig. 17과 같다.

지표침하와 천단침하 회귀분석 곡선은 상반 굴착 완료시 12mm에서 하반굴착 완료시 26mm로 증가하는 경향을 나타냈으며, 천단침하와 내공변위 회귀분석 곡선은 상반 굴착 완료시 22mm에서 하반 굴착 완료시 17mm로 감소하는 경향을 나타냈다. 지표침하와 상부

측벽 숏크리트 라이닝 응력 경시도에서 회귀분석 곡선은 상반 굴착 완료시 14kgf/cm(mm)에서 하반 굴착 완료시 26kgf/cm(mm)로 증가하는 경향을 나타냈으며, 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력 경시도에서 회귀분석 곡선은 상반 굴착 완료시 18kgf/cm(mm)에서 하반 굴착 완료시 14kgf/cm(mm)로 감소하는 경향을 나타냈다. 계측 항목별 회귀분석 곡선에서 지표침하와 천단침하는 하반 굴착 완료시가 상반 굴착 완료시에 비해 2.17배(26/12)크며, 지표침하와 숏크리트 라이닝 응력은 하반 굴착 완료시가 상반 굴착 완료시에 비해 1.86배(26/14)큰 것으로 나타났다.

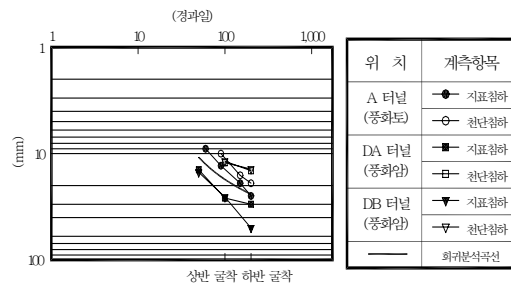


Fig. 13 지표침하와 천단침하 로그 경시도

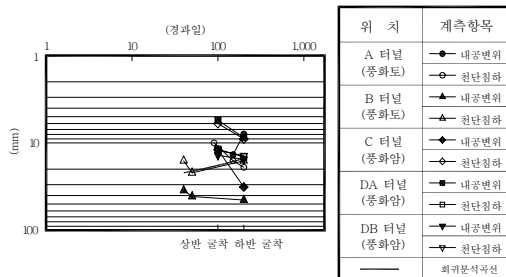


Fig. 14 내공변위와 천단침하 로그 경시도

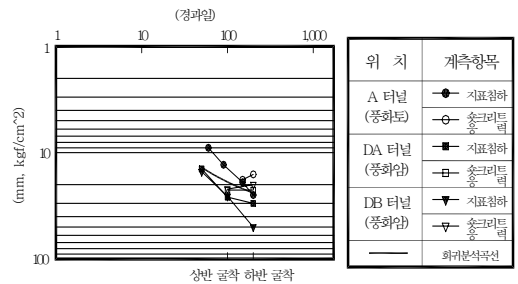


Fig. 15 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력 로그 경시도

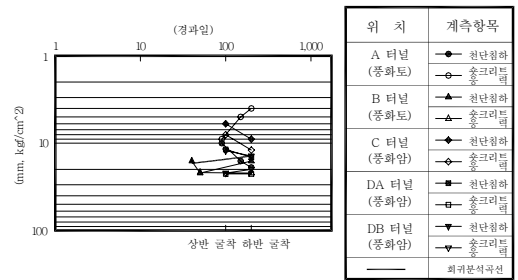


Fig. 16 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력 로그 경시도

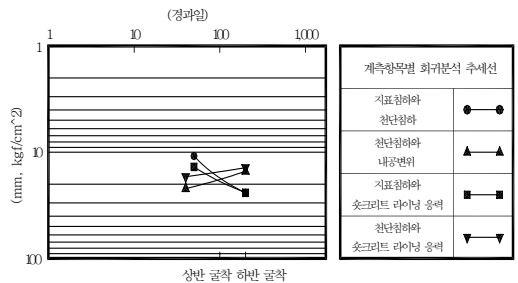


Fig. 17 계측 항목별 회귀분석 곡선

천단침하와 내공변위는 하반 굴착 완료시가 상반 굴착 완료시에 비해 0.77배(17/22)작으며, 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력은 하반 굴착완료시가 상반 굴착 완료시에 비해 0.77배(14/18)작은 것으로 나타났다. 따라서, 굴착단계에 따라 지표침하와 천단침하 및 지표침하와 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력은 거의 같은 값으로 증가하는 경향을 보여 지표침하, 천단침하, 상부측벽 숏크리트 라이닝 응력은 서로 비례관계인 것으로 분석되었다.

또한, 천단침하와 내공변위 및 천단침하와 천단 숏크리트 라이닝 응력은 거의 유사한 값으로 감소하는 경향을 보여 내공변위, 천단침하, 천단 숏크리트 라이닝 응력은 서로 비례관계에 있는 것으로 분석되었다.

3. 유지관리 계측 결과 분석

3.1 터널에 작용하는 수압 비교 분석

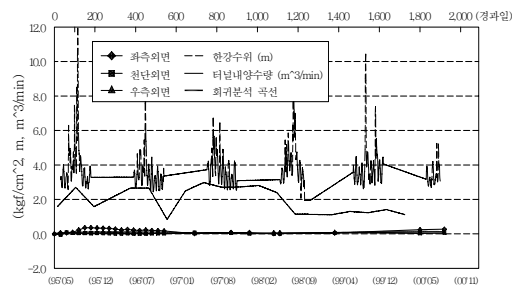
A터널 및 B터널의 간극수압, 한강수위, 터널 양수량과의 관계와 간극수압 회귀분석 곡선은 Fig. 18과 같다. 간극수압은 흙의 간극속에 존재하는 물의 압력으로 정수압 또는 과잉 간극수압을 말한다. A터널의 간극수압은 0~0.36kgf/cm²의 범위로 계측 초기부터 최근까지 거의 일정한 값을 보여 한강수위와 직접적인 관계는 없는 것으로 판단되며, 측정 위치별 평균 간극수압의 크기는 좌측벽체 0.18kgf/cm², 천단 0.04kgf/cm², 우측벽체 0.04kgf/cm²의 값을 보였다.

B터널의 간극수압은 계측초기부터 약 500일 경과 시까지는 거의 간극수압이 작용하지 않다가 그 이후부터 최대 2.80kgf/cm²로 증가하는 양상을 보여 시간경과에 따라 한강수위의 영향을 받는 것으로 판단되며, 측정 위치별 평균 간극수압의 크기는 좌측벽체 0.41kgf/cm², 천단0.41kgf/cm², 우측벽체 0.04kgf/cm²의 값을 보였다. 간극수압 회귀분석 곡선에서 한강수위의 영향권에 있는 A터널과 B터널 및 C터널의 회귀분석 곡선은 변화를 보이는 반면, 지하수위 영향이 적은 DA, DB 터널에서는 거의 변화량이 없는 것으로 나타났다.

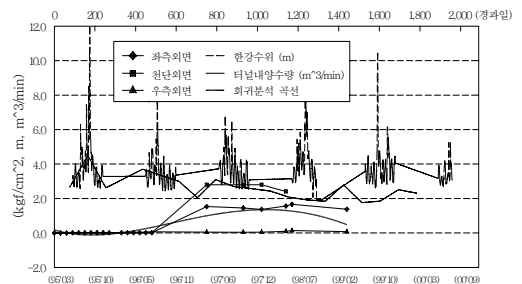
각 터널의 평균 최대 간극수압은 A터널은 0.18kgf/cm², B터널은 0.41kgf/cm²로 B터널의 평균 최대 간극수

압이 A터널에 비해 2.3배 크게 나타났는데, 이는 A터널의 방수형식이 배수식의 부분 방수형이며, B터널은 수압조절 배수식의 전주 방수형의 차이인 것으로 판단된다.

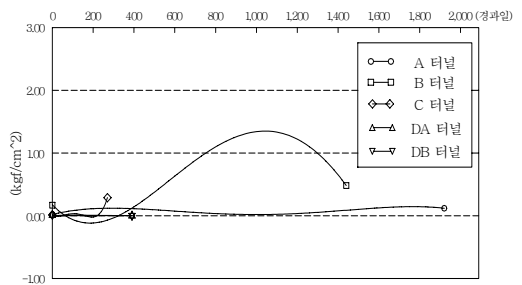
배수형 터널에서는 이론적으로 수압이 작용하지 않지만 시간의 경과에 따른 배수층의 기능저하를 고려하여 수압하중 설정시 잔류수압을 고려하는 것이 일반적이므로 잔류수압은 구조물 배후지반의 수위와 정면의 수위와의 차이에 의해 구조물에 작용하는 정수압을 말한다.



(a) A 터널



(b) B 터널



(c) 회귀분석 곡선

Fig. 18 간극수압, 한강수위, 터널내 양수량과의 관계도

설계시 잔류수압은 터널높이 H_t 와 관계가 있으며, 토사구간에서는, 암반구간 $1/2H_t\gamma_w$ 에서는를 적용하고 있으나, 설정근거가 불명확한 실정이다. A터널은 풍화토 구간으로 부분 방수식의 배수형 터널이며, 평균 최대 간극수압은 0.18kgf/cm^2 로 9.9m 터널높이 잔류수압 0.99kgf/cm^2 의 18.2%로 약 $1/5H_t\gamma_w$ 의 값을 보이고 있다.

B터널은 풍화토구간으로 전주 방수식의 수압조절 배수형터널이며, 평균 최대 간극수압은 0.41kgf/cm^2 로 7.8m 터널높이 잔류수압 0.78kgf/cm^2 의 52.6%로 약 $1/2H_t\gamma_w$ 의 값을 보이고 있어 일반적인 부분 방수식 배수형 터널인 A터널보다 큰 값을 보인 이유는 당초 전주 방수식 비배수형 터널에서 유지관리시 예상되는 과다수압의 영향을 해소하기 위해 전주 방수식의 배수형 터널로 변경 시공하면서 수압조절장치를 설치하여 인위적으로 조절하므로써 수압작용으로 인해 계측결과가 크게 나타난 것으로 판단된다.

따라서, 배수형 및 수압조절 배수형 터널에서의 잔류 수압이 $1/2 \sim 1/5H_t\gamma_w$ 로 측정되어 토사구간에 설계시 적용되고 있는 잔류수압 $1/3H_t\gamma_w$ 는 타당성이 있는 것으로 판단된다.

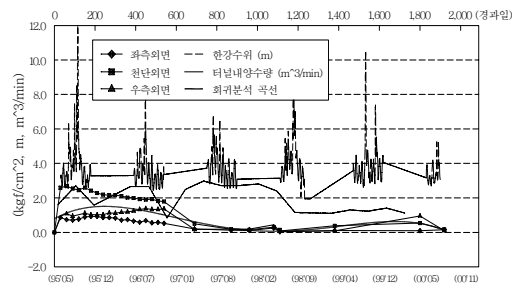
3.2 터널에 작용하는 토압 비교 분석

A터널 및 B터널의 토압, 간극수압, 한강수위, 터널내 양수량과의 관계와 토압 회귀분석 곡선은 Fig. 19와 같다. A터널은 한강지류인 여의도 샛강에서 약 500m 떨어진 지점으로 한강수위 상승에 의한 직접적인 영향은 적은 위치이며, B터널은 한강 밀을 통과하는 하저터널로 한강수위 의 직접적인 영향을 받는 곳이다.

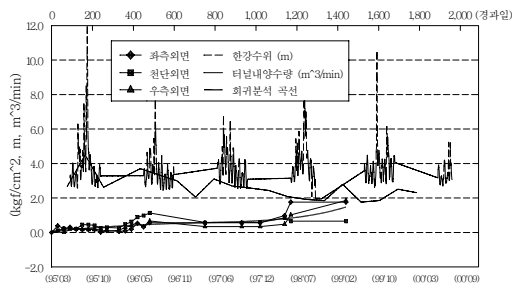
A터널의 토압은 측정초기에 급격히 증가하여 $0.9 \sim 2.6\text{kgf/cm}^2$ 의 크기를 보였으나, 그 이후에는 서서히 감소하여 최대 $0.1 \sim 0.2\text{kgf/cm}^2$, 측정 위치별 평균토압의 크기는 좌측벽체 0.50kgf/cm^2 , 천단 1.55kgf/cm^2 , 우측벽체 0.85kgf/cm^2 를 보였는데 천단 및 우측벽체의 평균토압이 좌측벽체에 비해 큰 것은 천단부 우측 지상에 있는 고가도로 교각의 집중하중에 의한 영향인

것을 알 수 있었다.

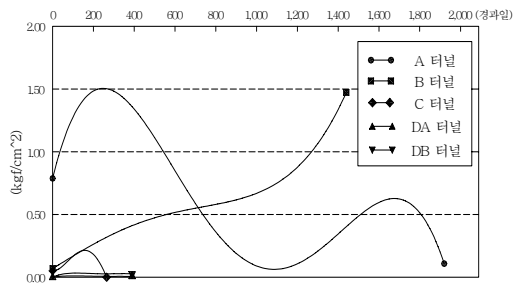
B터널의 토압은 시간경과에 따라 서서히 증가하는 양상을 나타내며, 최근에는 $0.7 \sim 1.8\text{kgf/cm}^2$ 의 범위를 보이고 있으며, 측정 위치별 평균토압의 크기는 좌측벽체 0.44kgf/cm^2 , 천단 0.49kgf/cm^2 , 우측벽체 0.36kgf/cm^2 를 보였는데 천단 및 좌우측 벽체가 거의 같은 값을 나타내어 균등한 토압을 받는 것으로 판단된다.



(a) A 터널



(b) B 터널



(c) 회귀분석 곡선

Fig. 19 토압, 한강수위, 터널내 양수량과의 관계도

각 터널의 평균토압 범위를 보면, A터널은 0.50~1.55kgf/cm², B터널은 0.36~0.49kgf/cm²로 A터널의 평균토압이 1.4~3.2배 크게 나타났는데 이는 A터널 천단부 우측에 있는 고가도로 교각의 집중하중의 영향으로 천단과 우측벽체의 토압이 크고, 좌측벽체의 토압이 작은 것으로 나타났으며, B터널은 한강수위 이외의 외부영향 요인이 없어 각 위치에서 거의 균등한 토압을 받고 있다. 토압 회귀분석 곡선에서 한강수위의 영향권에 있는 A터널과 B터널 및 C터널의 회귀분석 곡선은 큰 변화를 보이는 반면, 수위 영향이 적은 DA, DB 터널에서는 거의 변화량이 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 장기간에 걸쳐 비교적 측정이 잘 수행된 5개의 연약지반 터널 인 풍화도와 풍화암을 통과하는 지하철 터널의 공사중 측량 결과와 유지관리 측량 결과를 토대로 다양한 분석방법으로 터널의 변위와 응력, 한강의 수위와 간극수압, 토압 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지표침하와 천단침하의 관계에서 지표침하는 상부 반단면 굴착 완료시 예측된 전체 지표침하량의 67%, 천단침하는 84%가 발생하여 천단침하가 지표침하에 비해 17%가 크게 발생한 것으로 분석되었다. 이는 압밀침하가 발생하지 않은 지반에서 천단침하가 지표침하에 비해 일반적으로 크다는 연구결과를 확인할 수 있었다.
- 2) 내공변위와 천단침하의 관계에서 내공변위는 상부 반단면 굴착 완료시 예측된 전체 내공변위량의 79%, 천단침하는 94%가 발생하여 천단침하가 내공변위에 비해 15%가 크게 발생한 것으로 분석되었다.
- 3) 지표침하와 천단침하 및 내공변위와 천단침하의 관계에서 상부 반단면 굴착 완료시 예측된 전체 변위량의 비는 천단침하가 지표침하에 비해 17%가 크게 발생하였으며, 천단침하가 내공변위에 비해 15%가 크게 발생하여 천단침하는 거의 같은 크기의 증가율인 것을 알 수 있었다.

- 4) 상부 반단면 굴착 완료시 천단침하와 천단 슛크리트 라이닝 응력과의 비는 0.86, 하부 반단면 굴착 완료시 천단침하와 천단 슛크리트 라이닝 응력과의 비는 0.90으로 상부 반단면 굴착시와 유사한 값을 보여 터널주변의 변위와 응력 추정을 위한 수치해석시 천단침하 및 응력을 사용하면 정확도가 가장 우수할 것으로 판단된다.
- 5) 터널의 평균 최대 간극수압은 A터널이 0.18 kgf/cm², B터널이 0.40kgf/cm²로 모두 풍화도를 통과하는 터널이며, 일반적인 부분 방수식 배수형 터널인 A터널에 비해 B터널이 큰 값을 보인 이유는 B터널은 전주 방수식의 배수형 터널로 수압 조절장치로 인해 수압이 더 작용되는 것으로 판단되었으며, A터널은 잔류수압이 $1/5H_t\gamma_w$, B터널은 $1/2H_t\gamma_w$ 의 값을 보이고 있어 토사 터널 설계에 적용되고 있는 $1/3H_t\gamma_w$ 의 잔류수압은 타당성이 있는 것으로 판단된다.
- 6) 터널의 평균 토압은 A터널이 0.50~1.55kgf/cm², B터널은 0.36~0.49kgf/cm²로 A터널의 평균토압이 1.4~3.2배 크게 나타났는데 이는 A터널 천단부 우측에 있는 고가도로 교각의 집중하중 영향으로 천단과 우측벽체의 토압이 크고, 좌측벽체는 작은 것으로 나타났으며, B터널은 한강수위 이외의 외부영향 요인이 없어 각 위치에서 거의 균등한 토압을 받고 있다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-003-D00373)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sinha, R.S., "Underground Structures-Design and Instrumentation", Developments in Geotechnical Engineering, 59A, Elsevier, 1989, pp.33-82.
2. Hoek, E. and Brown, E.T., "Underground Excavation in Rock", 1980, pp.351-362.

-
3. Curtis, D. J. and Spaul, J. A., "Monitoring of the UK Tunnel Linings", Engineering Geology of The Channel Tunnel, 1996, pp.277-286.
 4. Moore.DR & A. Crease, "Tunnel Instrumentation", Engineering Geology of the Channel Tunnel, 1996, pp.287-294.
 5. Feldman.AI Buechel.G.J, "Instrumentation Program for Boston Red Line Subway Tunnel", Field Measurements in Geomechanics, 1999, pp.95-100.
 6. Leger.B, Roussel.J.C, "Ten years of Geotechnical Measurements through Chamoise Tunnel Marls", 1995. pp.1309-1312.
 7. 우종태, "지하철5호선 한강하저터널의 시공중 및 유지관리 계측결과 종합분석", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 2002. 11, pp.93-99.

(접수일자 : 2003년 1월 15일)