

계측에 의한 터널 라이닝의 안전성 분석

A Safety Analysis of Tunnel Lining for Monitoring

우 종 태* 이 송**
Woo, Jong-Tae Lee, Song

Abstract

Maintenance monitoring of the tunnel which offers continuous data during and after tunneling has been applying to tunnels in order to meet the maintenance of tunnel and to confirm continuous security of the tunnel after tunneling. But, the maintenance monitoring of tunnel results for long period is not easy to find, and moreover, the rational analysis method on tunnel monitoring has not been established yet.

In this study, the relationships between displacement and stress of the tunnel concrete lining using various analysis methods are compared with maintenance monitoring.

The tunnel behavior were measured in the subway tunnel passing comparative soft the weathering and analyzed both security and mechanical characteristics of the tunnel concrete lining. Also, analyzed relationship between residual water pressure applied on tunnel design and one obtained by monitoring.

keywords : Monitoring, Tunnel lining, Residual water pressure

1. 서 론

현재 국내에서 건설되는 많은 터널공사는 NATM공법으로 시공되었으며, 이 공법은 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 분석기법등의 연구성과 활용은 미미하며, 완공된 터널

* 정회원, 경북대학 토목설계과 교수
** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

E-mail : jtwoo60@chollian.net, 019-435-8736

•본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구조물의 공용기간중 지속적인 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 자료를 제공하는 유지관리 계측은 최근 들어 필요성이 부각되어 많은 터널현장에 적용하는 사례가 급속하게 증가되고 있으나, 장기간 측정된 계측 실적도 적고 합리적인 분석방법 연구도 거의 없는 실정이다.

터널현장에서 계측은 필수적인 사항이나 투자되는 계측비용과 기술자들의 노력에 비해 계측결과의 활용도는 전반적으로 낮은 실정인데 이는 합리적인 분석기법 및 관리기준이 정립되어 있지 않고 터널 시공관리와 계측관리가 별도로 수행되므로 인해 계측의 중요성보다는 시공관리 위주의 공사관리가 주된인 것으로 생각된다. 특히, 터널에서의 유지관리 계측은 대표단면 위주의 계측으로 계측지점 및 계측항목이 터널길이에 비해 소수의 단면에만 한정되므로 적은 단면의 계측결과로부터 콘크리트 라이닝의 전반적인 응력상태를 추정하거나 계산하는 것은 어려운 실정이다.

유지관리 계측에 의한 터널 라이닝의 역학적 거동 연구는 Eisentein & Nahhas가 캐나다 Edmonton 지역 우수처리용 터널에서 콘크리트 라이닝에 변형률계 등의 계측기를 설치하여 강지보재와 목재 보강재와 합성으로 만들어진 콘크리트 라이닝과 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 작용응력을 비교하였다.^{2),7)}

Leger & Roussel은 프랑스 Chamoise 터널에서 콘크리트 라이닝의 구속력과 변형에 대해 토압계와 변형률계를 설치해 경향분석을 하였고, Curtis & Spaul & Moore은 영국과 프랑스를 연결하는 Channel 터널에서 콘크리트 라이닝에 설치된 변형률계와 광탄성 응력계를 주기적으로 계측하여 이론치와의 비교로 터널의 안전성을 확인하고 보수 보강시기 등의 결정에 적용하였다.^{3),4),5)}

Maeda & Obata는 일본 Seikan 터널이 약 24 kgf/cm²의 큰 수압을 받는 해저부 장대터널의 항구적 기능 보존을 위해 콘크리트 라이닝의 변형을 주기적으로 계측하여 터널의 건전도를 파악하였으며, Feldman & Buechel은 미국 보스턴 Red Line 지하철 터널 콘크리트 라이닝에 변형률계와 균열측정계 등을 설치하여 계측기 종류별 성능을 평가하고 측정된 변위와 균열을 평가하여 터널 유지관리에 적용한 바 있

다.^{1),6),8)}

국내에서는 이 송, 우종태가 서울지하철 유지관리 계측결과를 분석하여 터널 라이닝의 역학적 거동을 분석한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 장기간 계측이 수행된 서울 지하철 풍화대 통과 터널의 유지관리 계측 결과인 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력을 단순한 방법으로 회귀 분석하여 콘크리트 라이닝의 응력과 철근응력의 상관관계를 파악하고, 콘크리트 라이닝의 응력을 허용응력과 비교하여 터널의 최종 지지부재인 콘크리트 라이닝의 안전성을 검토하고, 간극수압을 한강수위와 터널내 양수량과의 관계를 통해 설계시 적용하고 있는 잔류수압의 타당성의 검토를 통해 터널 라이닝의 안전성을 분석하고자 한다.

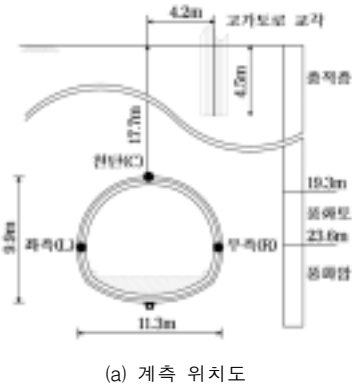
2. 계측 시행 현황 및 결과 분석

2.1 A 터널

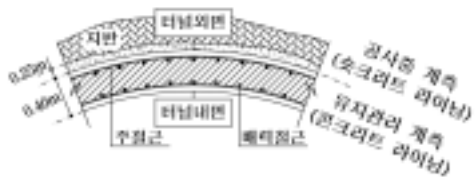
지하철 〇호선 〇〇〇교차로 횡단구간의 풍화대를 통과하는 마제형 복선터널로 토피는 17.7m, 터널 폭은 11.3m, 높이는 9.9m이며, 철근 콘크리트 라이닝은 40cm두께로 시공되었고, 터널 천단부 우측에 2차로의 고가도로가 위치해 있으며, 계측 위치도 및 계측 상세도는 Fig. 1(a), (b), 유지관리 계측도는 Fig. 2와 같다.

유지관리 계측 측정 중에 '95.8.24 홍수시 〇〇〇역 개착 정거장의 하수암거가 월류되어 지하철 〇호선 영등포에서 공덕동까지 약 4.5km가 침수되는 사고가 발생하여 '95.9.15까지 약 30~40m 높이의 수압작용으로 인해 일부 계측기가 망실되었다.

계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 응력은 외면에서는 압축응력, 내면에서는 초기에 인장응력을 보이다가 압축응력으로 전환되는 양상을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 38kgf/cm², 인장응력의 크기는 최대 6kgf/cm²를 보였다. 휨에 의한 아치단면의 콘크리트 응력분포는 일반적으로 외측단면에서는 압축응력, 내측단면에서는 인장응력이 발생되므로 허용응력 설계법으로 평가 할 경우 외측단면은 콘크리트의 허용 압축응력



(a) 계측 위치도



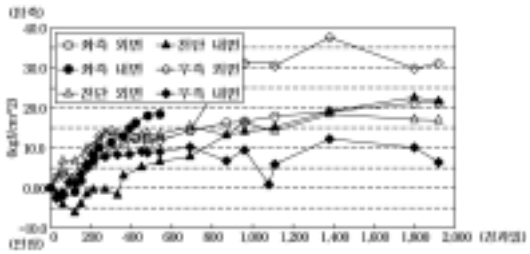
(b) 계측 상세도

Fig. 1 A 터널 유지관리 계측 위치도 및 상세도

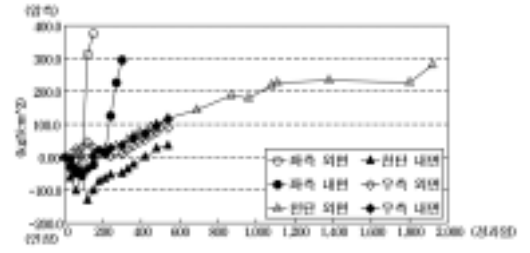
$f_{ca} = 0.4 f_{ck} = 0.4 \times 210 = 84 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 평가할 수 있으며, 내측단면은 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 $f_r = 2.0 \sqrt{f_{ck}} = 28.9 \text{ kgf/cm}^2$ 로 비교 평가할 수 있다.

철근의 응력은 콘크리트 라이닝 응력과 동일하게 외면에서는 압축응력, 내면에서는 초기에 인장응력을 보이다가 압축응력으로 전환되는 양상을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 375 kgf/cm^2 의 범위이며, 인장응력의 크기는 최대 132 kgf/cm^2 를 보였다. 초기부터 최근까지 약 60개월 계측이 실시된 천단 외면의 콘크리트 라이닝 및 철근은 압축응력이 작용하고 있으며, 최근 콘크리트 압축응력은 17.08 kgf/cm^2 로 월평균 0.29 kgf/cm^2 가 증가하였고, 철근의 압축응력은 226.39 kgf/cm^2 로 월평균 3.77 kgf/cm^2 가 증가하여 이론상의 탄성계수비 $n = E_s/E_c = 133/\sqrt{f_{ck}} = 9$ 보다 큰 값을 나타냈다.

허용응력 설계법으로 비교할 경우 콘크리트 라이닝의 허용 압축응력은 84 kgf/cm^2 로 이 값의 20%정도가 작용되고 있으며, 철근의 허용 압축응력 $f_{sa} = 0.5 f_y = 0.5 \times 3,000 = 1,500 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 이 값의 15%가 작용하고 있는 것으로 나타났다.



(a) 콘크리트 라이닝 응력



(b) 콘크리트 라이닝 철근응력

Fig. 2 A 터널 유지관리 계측도

2.2 B 터널

지하철 ○호선 ○○하저터널 여의도구간 풍화토를 통과하는 원형성 마계형 단선터널로 한강수위는 평상시 4m, 최고 홍수시 15m이며, 토파는 23.6m, 터널 굴착직경은 7.8m, 철근 콘크리트 라이닝은 50cm 두께로 시공되었으며, 계측 위치는 Fig. 3, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 4와 같다.

계측 경시도에서 콘크리트 라이닝은 외면에서 압축응력, 내면에서는 인장응력을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 18 kgf/cm^2 이며, 인장응력의 크기는 최대 6 kgf/cm^2 를 보였다.

철근의 응력은 콘크리트 라이닝과 동일하게 외면에서는 압축응력, 내면에서는 인장응력을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 54 kgf/cm^2 , 인장응력의 크기는 최대 115 kgf/cm^2 를 보였다.

최근까지 계측이 실시된 천단 내면의 콘크리트 라이

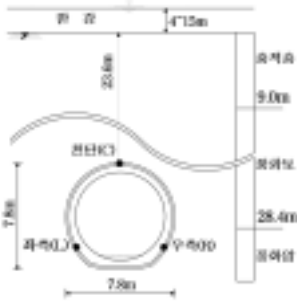


Fig. 3 B 터널 유지관리 계획 위치도

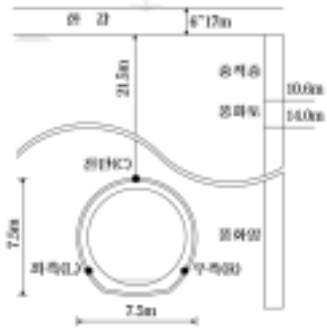
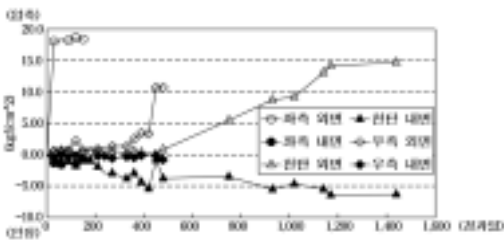
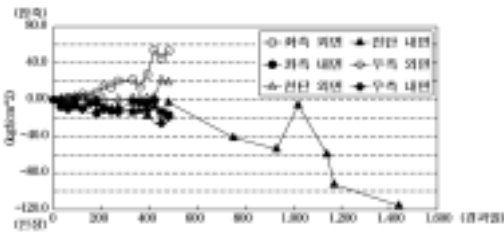


Fig. 5 C 터널 유지관리 계획 위치도



(a) 콘크리트 라이닝 응력



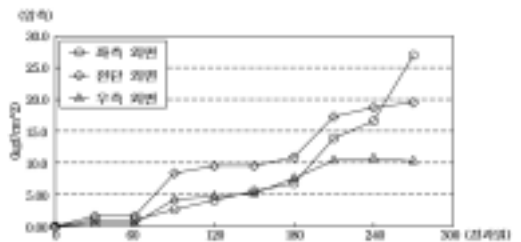
(b) 콘크리트 라이닝 철근응력

Fig. 4 B 터널 유지관리 계획 경시도

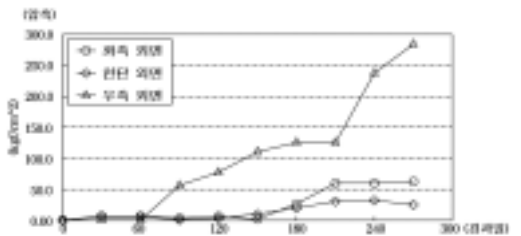
닝 및 철근은 인장응력이 작용하고 있으며, 콘크리트의 인장응력은 6.3kgf/cm^2 이며, 철근의 인장응력은 115.8kgf/cm^2 로 나타났다.

2.3 C 터널

지하철 ○호선 ○○하저터널 마포구간 풍화암을 통과하는 원형성 마제형 단선터널로 한강수위는 평상시 6m, 최고 홍수시 17m이며, 토피는 21.5m, 터널 굴착직경은 7.5m이고, 철근 콘크리트 라이닝은 50cm



(a) 콘크리트 라이닝 응력



(b) 콘크리트 라이닝 철근응력

Fig. 6 C 터널 유지관리 계획 경시도

두께로 시공되었으며, 계획위치는 Fig. 5, 유지관리 계획 경시도는 Fig. 6과 같다.

계획 경시도에서 콘크리트 라이닝 및 철근은 외면에서 모두 압축응력을 보였고, 콘크리트 라이닝의 압축응력의 크기는 최대 27kgf/cm^2 , 철근의 압축응력의 크기는 최대 285kgf/cm^2 를 보였다. 천단외면의 최근 콘크리트 압축응력은 10.3kgf/cm^2 이며, 철근 압축응력은 284.3kgf/cm^2 로 나타났다.

2.4 D 터널

지하철 ○호선 ○○○횡단구간 풍화암을 통과하는 마계형 단선 병렬터널로 토피는 18.9m, 굴착폭은 7.3m, 높이는 7.1m이고, 양 터널 중심간거리는 15m이나, 내면 이격거리는 7.7m이며, 철근 콘크리트 라이닝은 50cm두께로 시공되었으며, 계측위치는 Fig. 7, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 8과 같다. 계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 내면응력은 DA, DB터널에서 거의 인장응력을 보였고, 크기는 DA터널에서 최대 8kgf/cm², DB터널에서 최대 14kgf/cm²를 보였다. 철

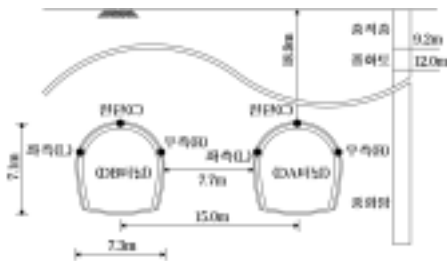
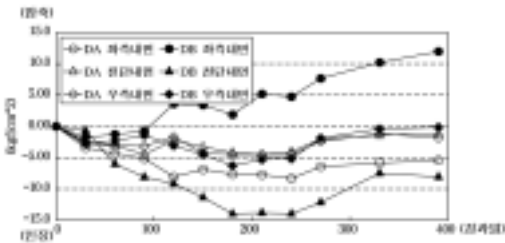
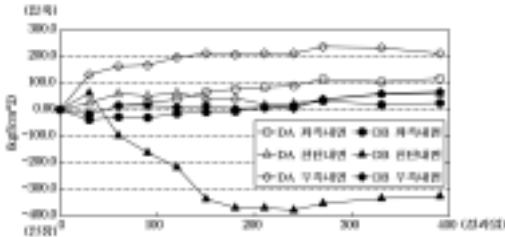


Fig. 7 D 터널 유지관리 계측 위치도



(a) 콘크리트 라이닝 응력



(b) 콘크리트 라이닝 철근응력

Fig. 8 D 터널 유지관리 계측 경시도

근응력은 DA터널에서 압축응력을 보였고, 크기는 최대 237kgf/cm²이며, DB터널에서는 압축응력이 최대 67kgf/cm²이며, 인장응력이 최대 378kgf/cm²로 나타났다.

본 터널은 단선 병렬터널로 내측터널 이격거리가 터널직경의 약 1.1배로 근접시공 완료 후 이로 인한 따른 상호간섭의 영향은 유지관리 계측에서는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

콘크리트 라이닝 응력은 각 터널 외측에서의 평균값이 DA터널에서 인장 2.8kgf/cm², DB터널에서 압축 6.1kgf/cm²를 보였고, 터널 내측에서 DA터널은 인장 5.8kgf/cm², DB터널은 인장 2.8kgf/cm²로 약간 상이한 값을 보였다.

콘크리트 라이닝 철근응력은 각 터널 외측에서의 평균값이 DA터널에서 압축 182.3kgf/cm², DB터널에서 압축 20.2 kgf/cm²를 보였고, 터널 내측에서 DA터널은 압축 60.0kgf/cm², DB터널은 압축 18.9kgf/cm²로 큰 차이를 보여 근접시공에 따른 상호간섭 영향은 유지관리 계측에서는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

2.5 터널에 작용하는 간극수압

A터널 및 B터널의 간극수압, 한강수위, 터널내 양수량과의 관계와 간극수압 회귀분석 곡선은 Fig. 12와 같다. 배수형 터널에서는 이론적으로 수압이 작용하지 않지만 시간의 경과에 따른 배수층의 기능저하를 고려하여 수압하중 설정시 잔류수압을 고려하는 것이 일반적이는데 잔류수압은 구조물 배후지반의 수위와 정면의 수위와의 차이에 의해 구조물에 작용하는 정수압을 말한다.

설계시 잔류수압은 터널높이 H_t 와 관계가 있으며 토사구간에서는 $1/2 H_t \gamma_w$, 암반구간에서는 $1/3 H_t \gamma_w$ 를 적용하고 있으나, 설정근거가 불명확한 실정이다.

A터널은 풍화토 구간으로 부분 방수식의 배수형 터널이며, 평균 최대 간극수압은 0.18kgf/cm²로 9.9m 터널높이 잔류수압 0.99kgf/cm²의 18.2%로 약 $1/5 H_t \gamma_w$ 의 값을 보이고 있다.

B터널은 풍화토 구간으로 전주 방수식의 수압조절

배수형 터널이며, 평균 최대 간극수압은 0.41kgf/cm^2 로 7.8m 터널높이 잔류수압 0.78kgf/cm^2 의 52.6%로 약의 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 수압 조절장치를 설치하여 인위적으로 조절함으로써 수압작용으로 인해 계측결과가 크게 나타난 것으로 판단된다.

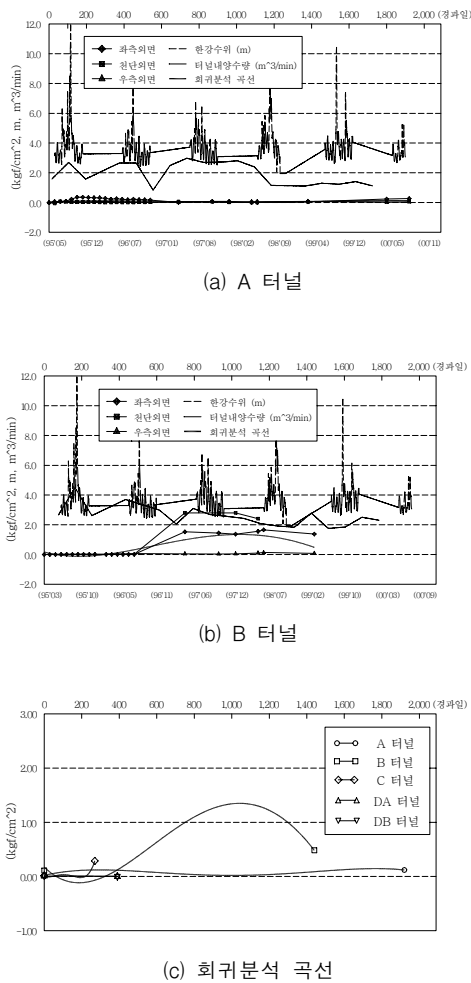


Fig. 9 간극수압, 한강수위, 터널내 양수량과의 관계도

3. 터널 라이닝의 안전성 분석

3.1 터널 콘크리트 라이닝의 응력

터널 천단외면 및 내면의 터널별 콘크리트 라이닝 응력과 계측결과의 단순한 경시 변화 파악을 위한 회귀분석 곡선은 Fig. 10과 같다.

천단 콘크리트 라이닝 응력 회귀분석 곡선에서 천단 외면은 압축응력이 최대 17kgf/cm^2 로 허용 압축응력 84kgf/cm^2 에 20% 정도로 수렴되는 형태의 회귀분석 곡선을 보이며, 천단내면은 인장응력이 최대 7kgf/cm^2

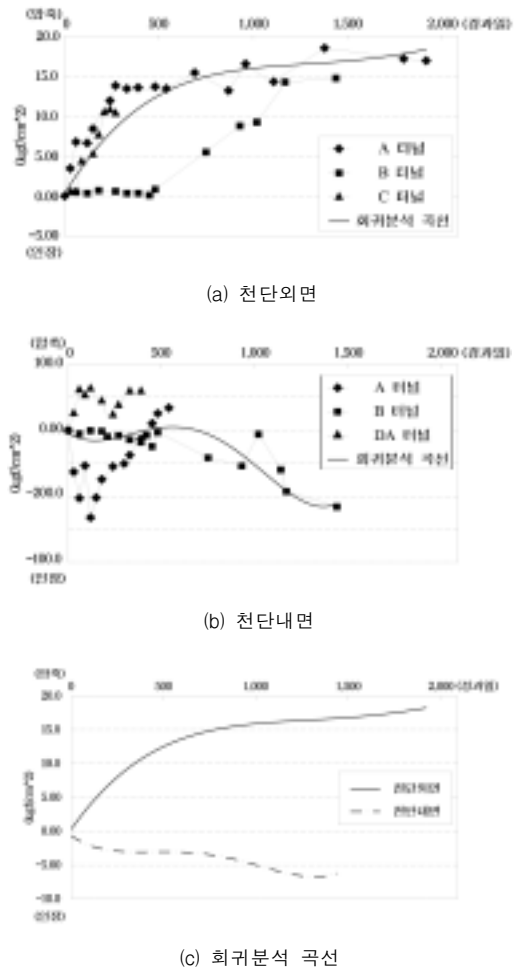


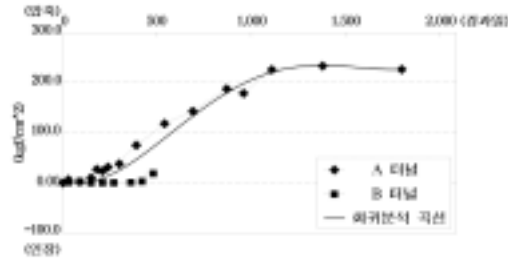
Fig. 10 천단 콘크리트 라이닝 응력도

로 수렴되는 형태의 회귀분석 곡선을 보여 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 28.9kgf/cm^2 에 24%정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

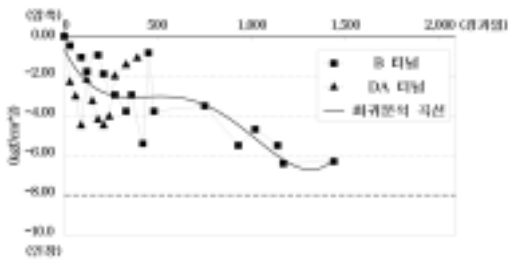
3.2 터널 콘크리트 라이닝의 철근응력

터널 천단외면 및 내면의 터널별 콘크리트 라이닝 철근응력과 계측결과의 단순한 경시변화 파악을 위한 회귀분석 곡선은 Fig. 11과 같다.

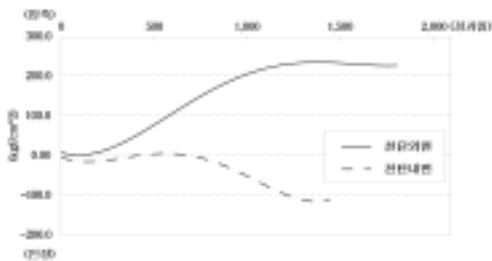
천단 콘크리트 라이닝 철근응력 회귀분석 곡선에서 천단외면은 압축응력이 최대 226kgf/cm^2 로 수렴되는



(a) 천단외면



(b) 천단내면



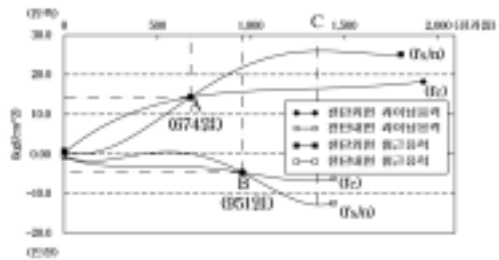
(c) 회귀분석 곡선

Fig. 11 천단 콘크리트 라이닝 철근응력도

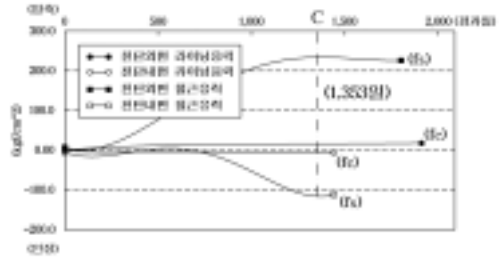
형태의 회귀분석 곡선을 보이며, 천단내면은 인장응력이 최대 115kgf/cm^2 로 수렴되는 형태의 회귀분석 곡선을 보여 철근의 허용응력인 $1,500\text{kgf/cm}^2$ 에 최대 15%정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

3.3 터널 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력 비교

앞에서 제시한 천단 콘크리트 라이닝 응력 회귀분석 곡선과 철근응력 회귀분석 곡선을 콘크리트 응력 기준값과 철근응력 기준값으로 표시하면 Fig. 12와 같다.



(a) 콘크리트 응력기준



(b) 철근응력 기준

Fig. 12 회귀분석 곡선 조합

콘크리트응력 기준 회귀분석 곡선에서 콘크리트 라이닝 응력의 천단외면의 압축응력과 천단내면의 인장응력은 시간경과에 따라 서서히 증가하는 추세를 보이나, 콘크리트 라이닝 철근응력의 천단외면의 압축응력과 천단내면의 인장응력은 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다.

천단외면의 압축응력은 674일 경과지점인 A점에서

철근응력과 콘크리트응력이 교차되어 14 kgf/cm²의 값을 보이나, 천단내면의 인장응력은 951일 경과지점인 B점에서 철근응력과 콘크리트응력이 교차되어 4.5 kgf/cm²의 값을 보여 경과시간은 약 1.4배이나, 인장응력은 압축응력에 비해 약 0.3배 인 것으로 평가되었으며, 지반 주변의 작용하중과 터널 지보부재의 상호 영향으로 지반과 가까이 있는 터널 콘크리트 라이닝의 외면에서 콘크리트응력과 철근응력이 먼저 교차되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하철 터널 계측 결과인 콘크리트 라이닝의 응력과 철근응력을 단순한 방법으로 회귀분석하고, 간극수압을 한강수위와 터널내 양수광과의 관계를 통해 터널의 최종 지보부재인 콘크리트 라이닝의 안전성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 터널 콘크리트 라이닝은 천단외면에서는 압축응력을 지속적으로 받아 최대 17kgf/cm²로 허용 압축응력 84kgf/cm²의 20% 정도에서 수렴하였고, 천단내면에서는 인장응력을 지속적으로 받아 최대 7kgf/cm²에서 수렴하여 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 28.9kgf/cm²에 24% 정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 판단된다.
- 2) 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력 회귀분석곡선을 콘크리트 응력 기준으로 환산 비교한 결과 콘크리트응력과 철근응력이 교차되는 시점은 천단외면에서는 674일 경과일에 압축응력이 14kgf/cm², 천단내면에서는 951일 경과일에 인장응력이 4.5kgf/cm²의 값을 보여 경과일은 약 1.4배이나 인장응력 값은 압축응력 값의 약 0.3배 인 것으로 평가되었으며, 지반 주변의 작용하중과 터널 지보부재의 상호 영향으로 지반과 가까이 있는 터널 콘크리트 라이닝의 외면에서 콘크리트 응력과 철근응력이 먼저 교차되는 것을 알 수 있었다.
- 3) 터널의 평균 최대 간극수압은 A터널이 0.18 kgf/cm², B터널이 0.40kgf/cm²로 모두 풍화도를 통과하는 터널이며, 일반적인 부분방수식 배수형 터널인

A터널에 비해 B터널이 큰 값을 보인 이유는 B터널은 전주 방수식의 배수형 터널로 수압 조절장치로 인해 수압이 더 작용되는 영향인 것으로 판단되었으며, A터널은 $1/5 H_t \gamma_w$, B터널은 $1/2 H_t \gamma_w$ 의 잔류수압 값을 보이고 있어 토사터널 설계에 적용되고 있는 $1/2 H_t \gamma_w$ 의 잔류수압은 타당성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 大貫富夫, 先山友康, 鎌田拓司, 及 川浩, “青函トンネルの保守・維持管理(最終回)”, トンネルヒ地下, 1994, pp.71-79.
2. Nahhas. F. EI, Kadi. F. EI and Ahmed. A. I, “Inter-acting of Tunnel Linings and Soft Ground”, Tunnelling and Underground space Technology, Vol, No.1, 1992, pp.33-43.
3. Leger. B, Roussel. J. C, “Ten years of Geotechnical Measurements through Chamoise Tunnel Marls”, 1995, pp.1309-1312.
4. Curtis. D. J, Spaul. J. A., “Monitoring of the UK Tunnel Linings”, Engineering Geology of The Channel Tunnel, 1996, pp.277-286.
5. Moore. D. R & A. Crease, “Tunnel Instrumentation”, Engineering Geology of the Channel Tunnel, 1996, pp.287-294.
6. Maeda, K. & Obata, T, “The Measurement of The Behavior at The Undersea Portion of The Seikan Tunnel”, ネル工學研究發表會 論文集2卷, 1992, pp.143-148.
7. Eisetein. Z, Nahhas. F. EI and Thomson. S, “Pressure Displacement Relations in Two system Tunnel Lining”, Proceedings of 6th PanAmerican Conference on Soil Mechanics, 1979, pp.85-948.
8. Feldman. A. I Buechel. G. J., “Instrumentation Program for Boston Red Line Subway Tunnel”, Field Measurements in Geomechanics, 1999, pp.95-100.

(접수일자 : 2001년 10월 8일)