

유지관리 계측에 의한 터널 콘크리트 라이닝의 응력 분석

우종태¹⁾ · 이 송²⁾

¹⁾경북대학 토목설계과 ²⁾서울시립대학교 토목공학과
(2001년 10월 26일 원고접수, 2002년 3월 14일 심사완료)

Stress Analysis of Tunnel Concrete Lining for Maintenance Monitoring

Jong-Tae Woo¹⁾ and Song Lee²⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering Design, Kyungbuk College, Pocheon, 487-717, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

(Received October 26, 2001, Accepted March 14, 2002)

ABSTRACT

The purpose of maintenance monitoring is to offer the objective and continuous data in order to be lasting security affirmation and best fitted maintenance of tunnel structure. Though recently the examples of maintenance monitoring which is applied to tunnel are rapidly increasing, long-term measured monitoring actual results and rationally analysis method researches are wholly lacking.

In this study, it is analyzed that the relationship of stress and reinforcement stress of concrete lining, i.e., last support materials of tunnel through regression analysis based on the monitoring result of the subway tunnel, which was accomplished the monitoring for long period, passing the weathering.

Also, through the analysis of the stress and the safety of concrete lining, it is estimated that the frequency of maintenance monitoring and the in-situ application of the criteria value of management.

Keywords: maintenance monitoring, tunnel concrete lining, stress

1. 서 론

최근 들어 사회기반시설 확충의 필요성에 따라 제한된 지상환경을 보존하고 국토의 효율적인 활용을 위해 지하철, 도로, 국철 및 고속철도 공사 등에서 터널 건설이 급격히 증가되어 터널 구조물의 설계 및 시공기술 수준은 많이 향상되고 있다. 특히, 터널의 안전성 해석기술의 경우는 기존의 공사 시공실적 및 각종 정밀 수치해석 기술로 인해 설계단계에서 터널 구조물에 작용하는 외력 및 역학적 거동예측을 수행함으로써 터널공사의 시공관리 및 안전관리에 많은 도움을 주고 있다.

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 공법이다. 터널에서 계측은 공사중 계측과 유지관리 계측으로 구분하며, 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성과 경제성을 도모하기 위한 공사중 계측은 광범위하게 시행되고 있으나, 이에 대한 분석기법 등의 연

구성과의 활용도는 미미하다. 그리고, 완공된 터널 구조물의 공용기간 중 지속적인 안전성 확인과 최적의 유지관리 계측은 최근 들어 필요성이 부각되어 많은 터널현장에 적용하는 사례가 급속하게 증가되고 있으나, 장기간 측정된 계측실적도 적고, 합리적인 분석방법의 연구도 없는 실정이다. 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 어려움이 많은 실정이다.

유지관리 계측에 의한 터널 라이닝의 역학적 거동 연구는 캐나다 Edmonton지역 우수처리용 터널에서 콘크리트 라이닝에 변형률계 등의 계측기를 설치하여 강 지보재와 목재 보강재의 합성으로 만들어진 콘크리트 라이닝과 프리캐스트 세그먼트 라이닝과 작용응력을 비교하였으며¹⁾, 프랑스 Chamoise 터널에서 콘크리트 라이닝의 구속력과 변형에 대해 토압계와 변형률계를 설치하여 경향분석을 한 것이 보고되고 있다²⁾. 영국과 프랑스를 연결하는 channel tunnel에서는 콘크리트 라이닝에 설치된 변형률계와 광탄성 응력계를 주기적으로 계측하여 이론치와의 비교로 터널의 안정성을 확인하고 보수보강시기 등의 결

* Corresponding author
Tel : 031-539-5365 Fax : 031-539-5368
E-mail : jtwoo@kyungbok.ac.kr

정에 적용하였다^{4,5,6)}. 일본 Seikan 터널에서는 약 24 kgf/cm²의 큰 수압을 받는 해저부 장대터널의 항구적 기능 보존을 위해 콘크리트 라이닝의 변형을 주기적으로 계측하여 터널의 건전도를 파악하였으며^{7,8)}, 미국 보스턴 Red Line 지하철 터널에서는 콘크리트 라이닝에 변형률계와 균열측정계 등을 설치하여 계측기 종류별 성능을 평가하고 측정된 변위와 균열을 평가하여 터널 유지관리에 적용한 바 있다⁹⁾.

따라서, 본 연구에서는 장기간 계측이 수행된 지하철 풍화도와 풍화암을 통과하고, 터널 토피가 약 20m 전후 터널의 유지관리 계측 결과를 회귀분석하여 터널의 최종 지지부재인 콘크리트 라이닝의 응력과 철근응력의 상관관계를 파악하고, 안전성을 검토하여 터널 콘크리트 라이닝의 유지관리 계측 분석 기술을 제시하고자 한다.

2. 유지관리 계측 현황 및 결과 분석

유지관리 계측의 현황 및 결과 분석은 5개 터널을 대상으로 연구하였으며, 지반조건 및 터널심도가 유사한 터널을 선정하였으며, 터널별 현황비교는 Table 1과 같다.

2.1 A 터널

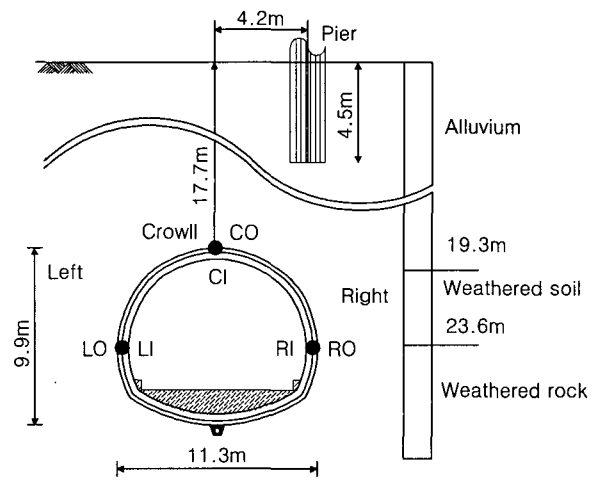
지하철 0호선 000교차로 횡단구간의 풍화도를 통과하는 마제형 복선터널로 토피는 17.7m, 터널 폭은 9.1m, 높이는 6.8m이며, 철근 콘크리트 라이닝은 40cm 두께로 시공되었고, 터널 지상 천단부 우측에 고가도로가 위치해 있으며, 계측위치는 Fig. 1, 유지관리계측 경시도는 Fig. 2와 같다.

유지관리 계측 측정 중에 '95. 8. 24 홍수시 000역 개착 정거장의 하수암거가 월류되어 지하철 0호선 영등포에서 공덕동까지 약 45km가 침수되는 사고가 발생하여 '95. 9. 15까지 약 30~40m 높이의 수압작용으로 인해 일부 계측기가 망실되었다.

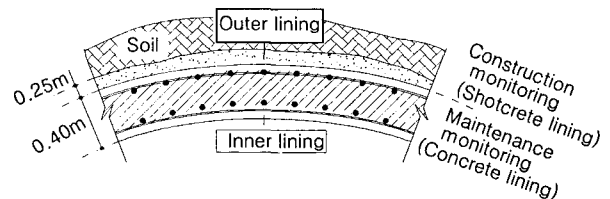
계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 응력을 분석한 결과 외면에서는 압축응력, 내면에서는 초기에 인장응력을 보

이다가 압축응력으로 전환되는 양상을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 38 kgf/cm², 인장응력의 크기는 최대 6 kgf/cm²를 보였다. 일반적으로 휨에 의한 아치단면의 콘크리트 응력분포는 외측단면에서는 압축응력, 내측단면에서는 인장응력이 발생되므로 허용응력 설계법으로 평가할 경우 외측단면은 콘크리트의 허용 압축응력 $f_{ca} = 0.4 f_{ck} = 0.4 \times 210 = 84 \text{ kgf/cm}^2$ 로 평가되며, 내측단면은 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 $f_r = 2.0 \sqrt{f_{ck}} = 28.9 \text{ kgf/cm}^2$ 로 비교 평가할 수 있다.

철근의 응력을 분석한 결과 콘크리트 라이닝 응력과 동



(a) Monitoring location



(b) Monitoring details

Fig. 1 Monitoring location and details of tunnel A

Table 1 Conditions of tunnels

Description	Tunnel A	Tunnel B	Tunnel C	Tunnel D	Tunnel E
Track	Double	Single	Single	Single	Single
Type	Horseshoe	Circular	Circular	Horseshoe	Circular
Size (m)	11.3×9.9	7.8×7.8	7.5×7.5	7.3×7.1	5.6×5.6
Soil	Weathered soil	Weathered soil	Weathered rock	Weathered rock	Soft rock
Thickness of lining (cm)	40	50	50	50	41
Soil cover (m)	17.7	23.6	21.5	18.9	40~100
Period of monitoring	'95.3~'00.9	'95.3~'00.9	'95.10~'96.7	'99.7~'00.8	'89.9~'91.5
Location	Seoul	Seoul	Seoul	Seoul	U.K~France

일하게 외면에서는 압축응력, 내면에서는 초기에 인장응력을 보이다가 압축응력으로 전환되는 양상을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 375 kgf/cm²의 범위이며, 인장응력의 크기는 최대 132 kgf/cm²를 보였다. 초기부터 최근까지 약 60개월 계측이 실시된 천단 외면의 콘크리트 라이닝 및 철근은 압축응력이 작용하고 있으며, 콘크리트 압축응력은 17.08 kgf/cm²로 월평균 0.29 kgf/cm²가 증가하였고, 철근의 압축응력은 226.39 kgf/cm²로 월평균 3.77 kgf/cm²가 증가한 것을 알 수 있다.

이를 허용응력 설계법으로 비교할 경우 콘크리트 라이닝의 허용 압축응력은 84 kgf/cm²로 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%정도가 작용하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 강도 설계법으로 비교할 경우 부재응력은 설계작용하중 ÷ 단면적 ≤ 강도 감소계수 × 설계기준강도로 표현되므로 콘크리트 라이닝 압축응력은 $0.85 \times 210 = 178.5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 계산되어 이 값의 10%정도가 작용되고 있으며, 철근응력은 3,000 kgf/cm²로 이 값의 8%정도가 작용되고 있는 것을 알 수 있다.

2.2 B 터널

지하철 0호선 00하저터널 여의도구간 풍화토를 통과하는 원형성 마제형 단선터널로 한강수위는 평상시 4 m, 최고 홍수시 15 m이며, 토피는 23.6 m, 터널 굴착직경은 7.8 m, 철근 콘크리트 라이닝은 50 cm 두께로 시공되었으며, 계측위치는 Fig. 3, 변형률계 설치는 Photo 1, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 4와 같다.

계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 응력을 분석한 결과 외면에서 압축응력, 내면에서는 인장응력을 보였고, 압축응력의 크기는 최대 18 kgf/cm²이며, 인장응력의 크기는 최대 6 kgf/cm²인 것을 알 수 있다.

철근 응력은 콘크리트 라이닝과 동일하게 외면에서 압축응력, 내면에서는 인장응력을 보였고 압축응력의 크기는 최대 54 kgf/cm², 인장응력의 크기는 최대 115 kgf/cm²인 것을 알 수 있다.

2.3 C 터널

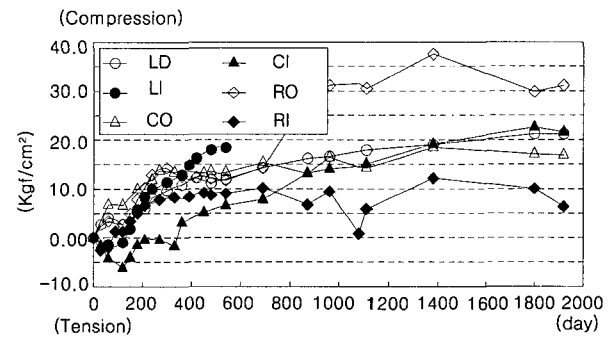
지하철 0호선 00하저터널 마포구간 풍화암을 통과하는 원형성 마제형 단선터널로 한강수위는 평상시 6 m, 최고 홍수시 17 m이며, 토피는 21.5 m, 터널 굴착직경은 7.5 m이고, 철근 콘크리트 라이닝은 50 cm 두께로 시공되었으며, 계측위치는 Fig. 5, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 6과 같다.

계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 및 철근을 분석한 결과 외면에서 모두 압축응력을 보였고, 콘크리트 라이닝의

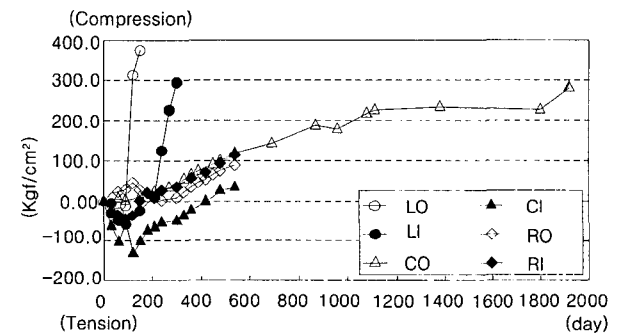
압축응력의 크기는 최대 27 kgf/cm², 철근의 압축응력 크기는 최대 285 kgf/cm²인 것을 알 수 있다. 천단외면의 최근 콘크리트 압축응력은 10.3 kgf/cm²이며, 철근 압축응력은 284.3 kgf/cm²인 것을 알 수 있다.

2.4 D 터널

지하철 0호선 000횡단구간 풍화암을 통과하는 마제형 단선 병렬터널로 토피는 18.9 m, 굴착폭은 7.3 m, 높이는



(a) Concrete lining stress



(b) Concrete lining reinforcement stress

Fig. 2 Graph of tunnel A maintenance monitoring

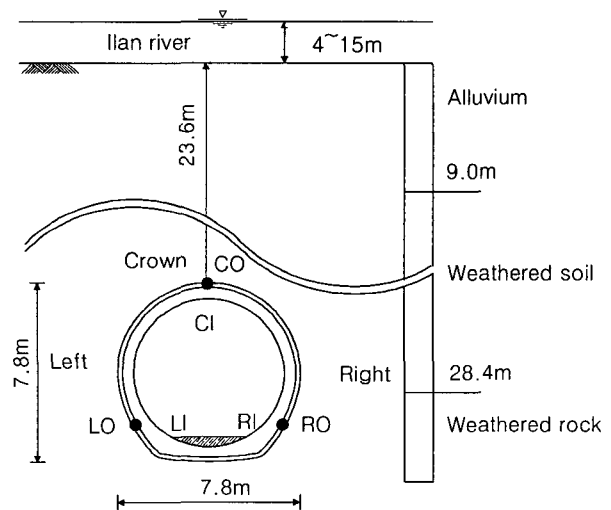
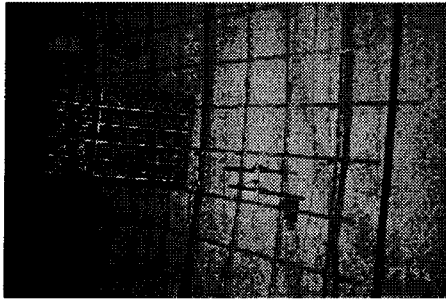
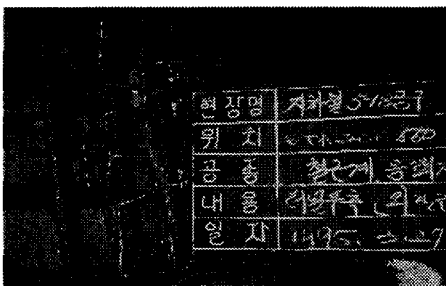


Fig. 3 Monitoring location of tunnel B

7.1 m이고, 양 터널 중심간거리는 15 m이나, 내면 이격거리는 7.7m이며, 철근 콘크리트 라이닝은 50cm두께로 시공되었으며, 계측위치는 Fig. 7, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 8과 같다.

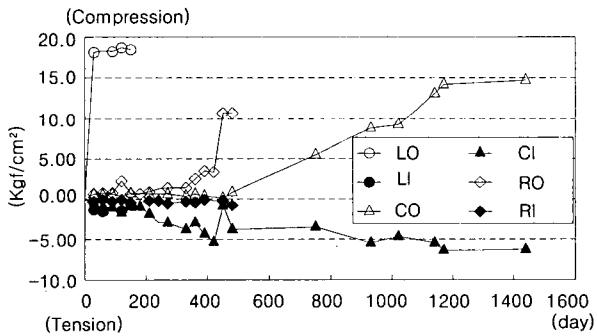


(a) Right-outside

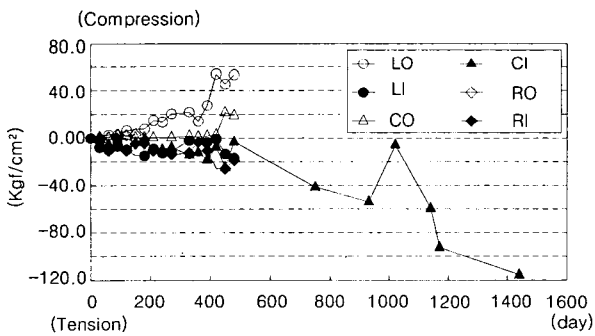


(b) Right-inside

Photo 1 Establishment of the strain gauge in tunnel B



(a) Concrete lining stress



(b) Concrete lining reinforcement stress

Fig. 4 Graph of tunnel B maintenance monitoring

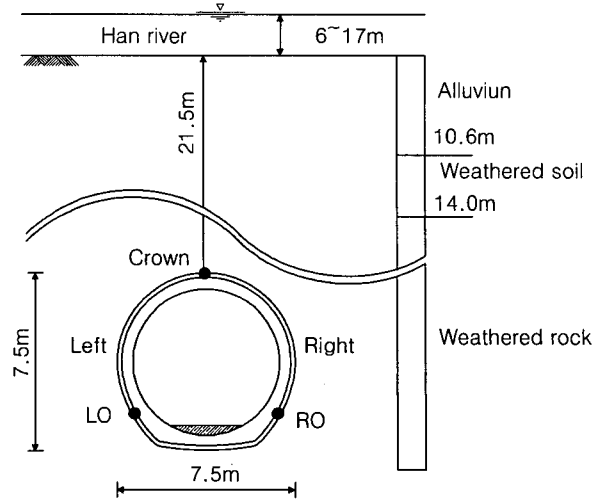
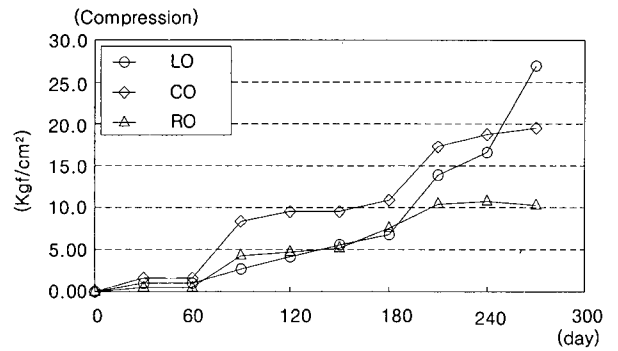
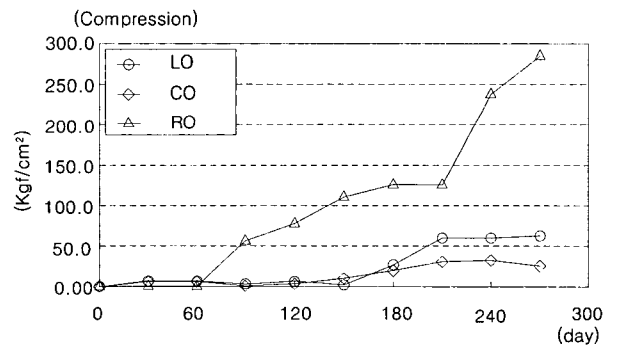


Fig. 5 Monitoring location of tunnel C



(a) Concrete lining stress



(b) Concrete lining reinforcement stress

Fig. 6 Graph of tunnel C maintenance monitoring

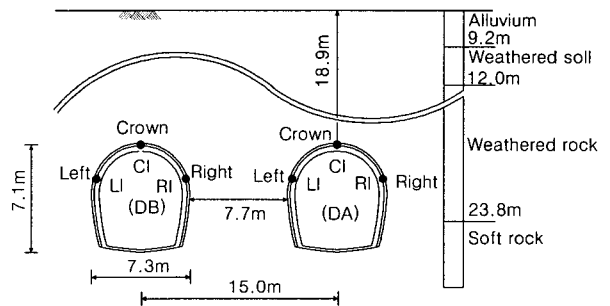


Fig. 7 Monitoring location of tunnel D

계측 경시도에서 콘크리트 라이닝 내면응력은 DA, DB 터널에서 거의 인장응력을 보였고, 크기는 DA터널에서 최대 8 kgf/cm², DB터널에서 최대 14 kgf/cm²인 것을 알 수 있다.

철근응력은 DA터널에서 압축응력을 보였고, 크기는 최대 237 kgf/cm²이며, DB터널에서는 압축응력이 최대 67 kgf/cm²이며, 인장응력이 최대 378 kgf/cm²인 것을 알 수 있다.

본 터널은 단선 병렬터널로 내측터널 이격거리가 터널 직경의 약 1.1배로 근접시공에 따른 상호간섭의 영향을 확인하기 위해 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력을 비교해 보았다. 콘크리트 라이닝 응력은 각 터널 외측에서의 평균값이 DA터널에서 인장 2.8 kgf/cm², DB터널에서 압축 6.1 kgf/cm²를 보였고, 터널 내측에서 DA터널은 인장 5.8 kgf/cm², DB터널은 인장 2.8 kgf/cm²로 약간 상이한 값을 보였다.

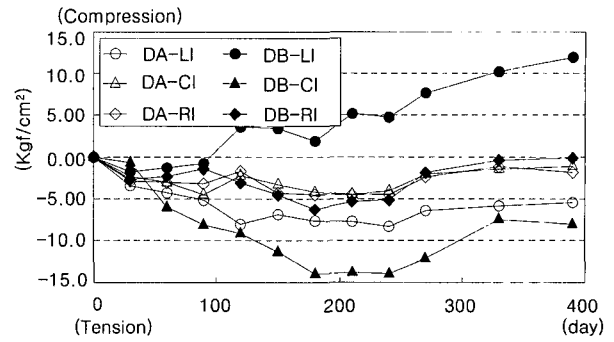
콘크리트 라이닝 철근응력은 각 터널 외측에서의 평균값이 DA터널에서 압축 182.3 kgf/cm², DB터널에서 압축 20.2 kgf/cm²를 보였고, 터널 내측에서 DA터널은 압축 60.0 kgf/cm², DB터널은 압축 18.9 kgf/cm²로 큰 차이를 보여 근접시공완료 후 이로 인한 상호간섭의 영향은 유지 관리 계측에서는 발생하지 않은 것으로 판단된다.

2.5 E 터널

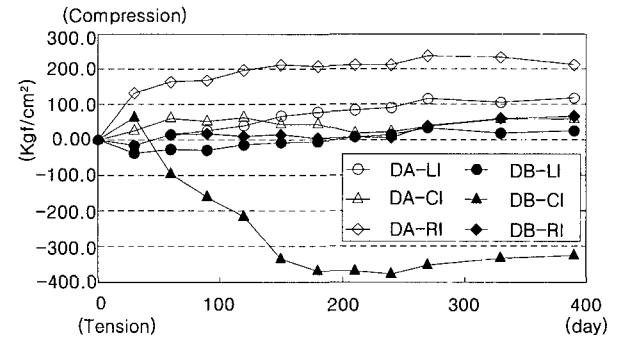
영국 Folkestone과 프랑스 Frethun을 연결하는 Euro tunnel로 안정된 지반인 청색 초크층인 chalk marl을 통과하는 원형 단선 병렬터널로 토피는 40~140 m, 해수면에서의 수심은 10~50 m, 주 터널은 직경 8.7 m, 보조터널은 5.6 m이며, 본 연구에서는 11 k 998지점 육지부 보조터널을 대상으로 하여 프리캐스트 콘크리트 라이닝은 41 cm 두께이며, 계측위치는 Fig. 9, 유지관리 계측 경시도는 Fig. 10과 같다.

E 터널인 육지부 보조터널 주변 터널공사는 북측의 주터널(RTN)이 '90.7.15 관통하였으며, 남측의 주터널(RTS)이 '90.10.2 관통하였다. 터널의 이격거리는 양 터널 중심 간 거리는 15 m이나, 실제 내면의 이격거리는 7.9 m로 5.6 m 터널 직경의 약 1.4배정도 이격되었다.

계측 경시도를 분석해 보면, 천단 콘크리트 라이닝 응력은 외면에서 압축응력이 초기부터 '90.7월 이전에는 최대 8 kgf/cm² 범위이며, 내면에서는 압축응력이 최대 13 kgf/cm² 범위를 보이다가 근접시공이 시행된 '90.7월 이후에는 인장 응력으로 전환되어 최대 122 kgf/cm²로 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 $f_r = 2\sqrt{f_{ck}} = 2\sqrt{280} = 33.5 \text{ kgf/cm}^2$ 를 크게 초과하여 천단 콘크리트 라이닝에 균열이 발생된 것을 알 수 있다. 또한, 우측 중앙벽체 콘크리트 라이닝 응력은 외면에서 압축응력이 '90.7월 이전에는 최대 29 kgf/cm²

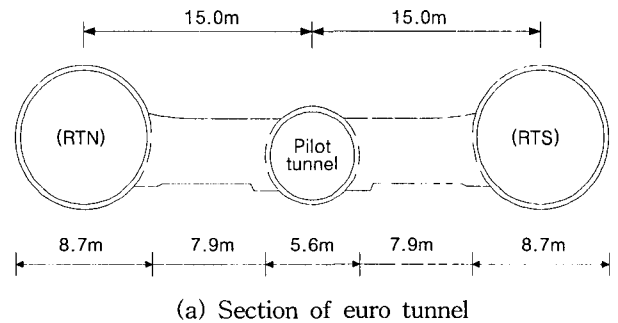


(a) Concrete lining stress

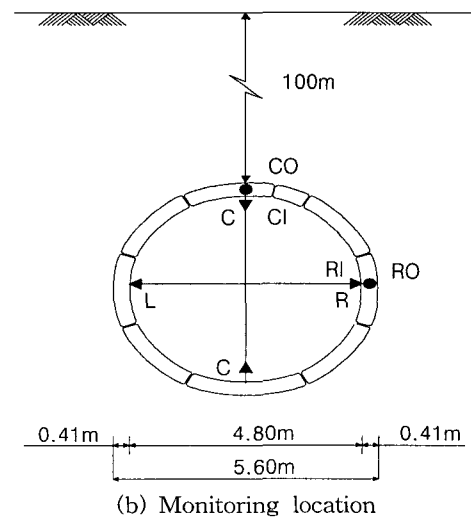


(b) Concrete reinforcement stress

Fig. 8 Graph of tunnel D maintenance monitoring



(a) Section of euro tunnel



(b) Monitoring location

Fig. 9 Monitoring location of tunnel E

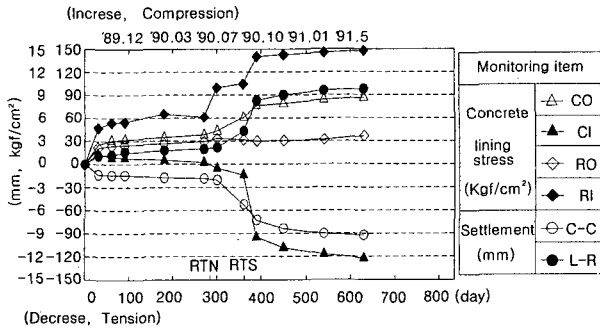


Fig. 10 Graph of tunnel E maintenance monitoring

이며, 내면에서는 압축응력이 최대 61 kgf/cm²를 보이다가 근접시공이 시행된 '90.7월 이후에는 최대 148 kgf/cm²로 급격하게 증가되어 근접시공의 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다.

콘크리트 라이닝의 변위를 분석해 보면, 천단은 최대 9.2 mm가 감소하였는데 근접시공이 시행된 '90.7월에는 2.0 mm에서 5.2 mm, '90.10월에는 5.2 mm에서 7.2 mm로 급격하게 감소하였으며, 중앙내공 변위는 최대 9.8 mm가 증가하였는데 근접시공이 시행된 '90.7월에는 2.2 mm에서 4.3 mm, '90.10월에는 4.3 mm에서 8.3 mm로 급격하게 증가되어 천단 변화량과 유사한 크기를 보였다.

콘크리트 라이닝에 균열 발생은 '90.10월 남측 주터널 (RTS) 통과시 E 터널 천단내면에서 발생하였는데, 이 때 천단외면의 콘크리트 라이닝 압축응력은 76.5 kgf/cm²로 설계기준강도 280 kgf/cm²의 27%정도이며, 천단내면의 인장응력은 94.3 kgf/cm²로 휨 인장강도 33.5 kgf/cm²의 282% 정도이고, 천단은 7.2 mm가 감소하였다. 우측중앙벽체 외면의 콘크리트라이닝 압축응력은 30.1 kgf/cm², 내면의 압축응력은 140.2 kgf/cm², 중앙내공변위는 8.3 mm가 증가하였다.

터널 건전도 평가를 위한 라이닝 모형실험결과 천단내면 균열발생시 12 mm의 천단침하가 발생되었다¹⁰⁾.

천단내면 균열 발생시 콘크리트 인장응력이 휨 인장강도의 282%인 94.3 kgf/cm²로 크게 나타난 이유는 철근 콘크리트 프리캐스트 라이닝으로 인한 보강효과가 균열을 크게 방지하는 것으로 보이며, 이 때 발생된 천단침하는 7.2 mm가 터널 안쪽으로 축소되었고, 중앙 내공변위는 8.3 mm가 터널 바깥쪽으로 증가되어 향후 철근 콘크리트 라이닝의 천단침하 및 내공변위 관리기준치 결정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 콘크리트 라이닝의 응력 분석

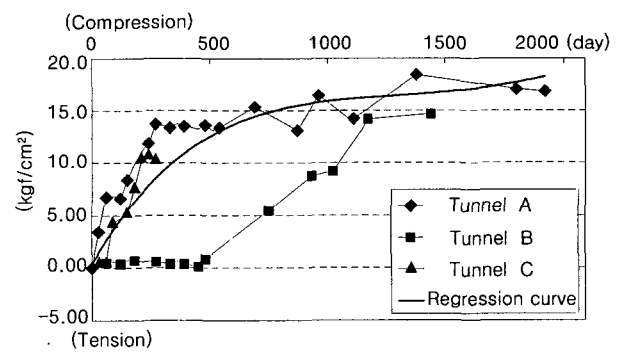
터널 콘크리트 라이닝의 역학적 특성 분석을 위해 근접시공으로 인한 영향을 크게 받는 E터널은 제외하고, 계속 결과가 순수하게 외력에 의한 것으로 판단되는 A, B, C, DA, DB터널을 대상으로 회귀분석을 실시하였다.

3.1 콘크리트 라이닝의 응력

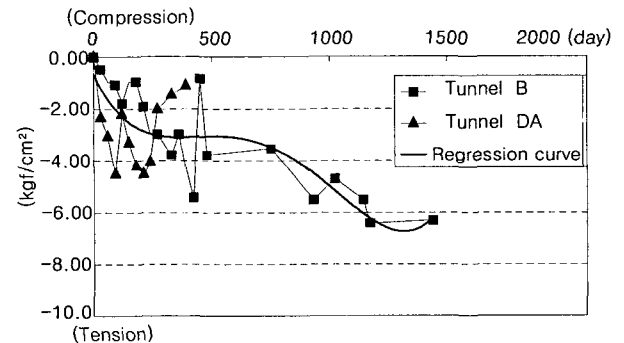
터널 천단외면 및 내면의 터널별 콘크리트 라이닝 응력과 회귀분석 곡선은 Fig. 11과 같다.

천단 콘크리트 라이닝 응력 회귀분석곡선에서 천단외면은 압축응력이 최대 17 kgf/cm²로 수렴되는 형태의 회귀분석곡선을 보이며, 천단내면은 인장응력이 최대 7 kgf/cm²로 허용 압축응력 84 kgf/cm²에 20%정도로 수렴되는 형태의 회귀분석곡선을 보여 콘크리트 휨 인장강도 28.9 kgf/cm²에 24%정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

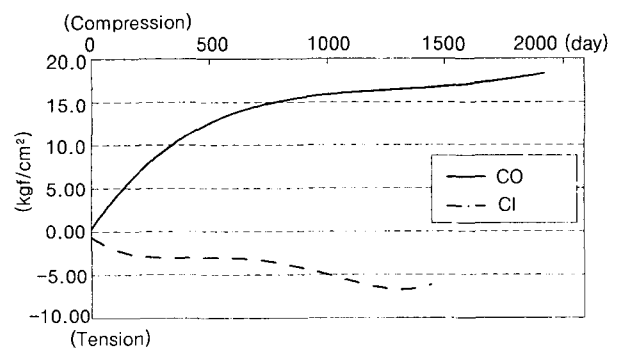
3.2 콘크리트 라이닝의 철근 응력



(a) Crown outside



(b) Crown inside



(c) Fitting curve

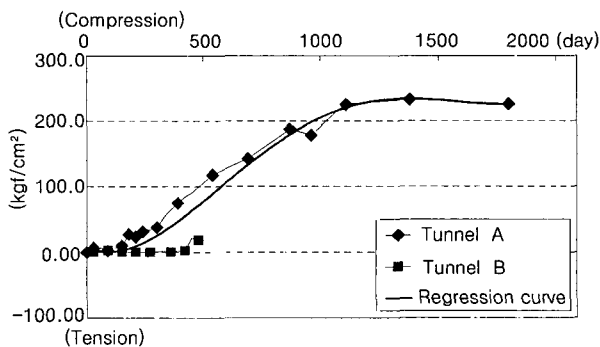
Fig. 11 Graph of crown concrete lining stress

터널 천단외면 및 내면의 터널별 콘크리트 라이닝 철근 응력과 회귀분석 곡선은 Fig. 12와 같다.

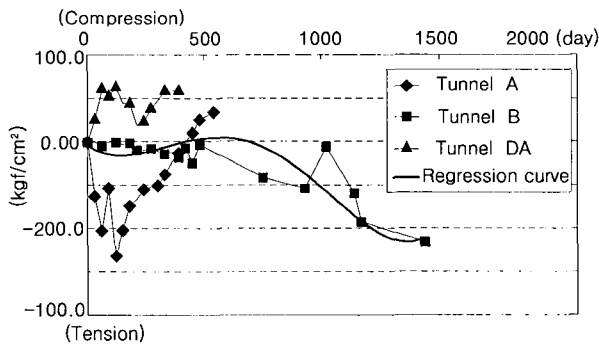
천단 콘크리트 라이닝 철근응력 회귀분석 곡선에서 천단외면은 압축응력이 최대 226 kgf/cm²로 수렴되는 형태의 회귀분석 곡선을 보이며, 천단내면은 인장응력이 최대 115 kgf/cm²로 수렴되는 형태의 회귀분석 곡선을 보여 철근의 허용응력인 1,500 kgf/cm²에 최대 15%정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

3.3 콘크리트 라이닝 응력과 철근 응력 비교

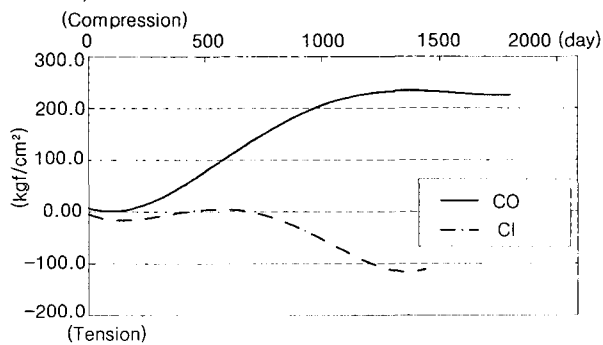
천단 콘크리트 라이닝 응력 회귀분석 곡선과 철근 응력 회귀분석 곡선을 콘크리트 응력 기준값과 철근 응력 기준값으로 표시하면 Fig. 13과 같다.



(a) Crown outside

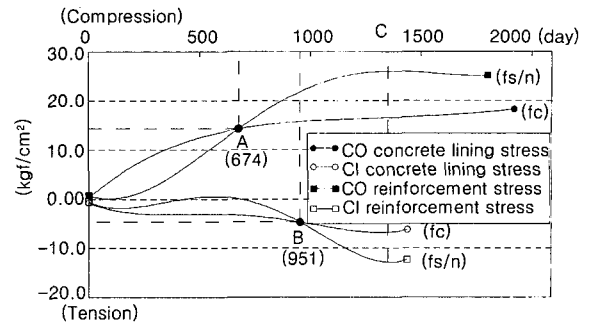


(b) Crown inside

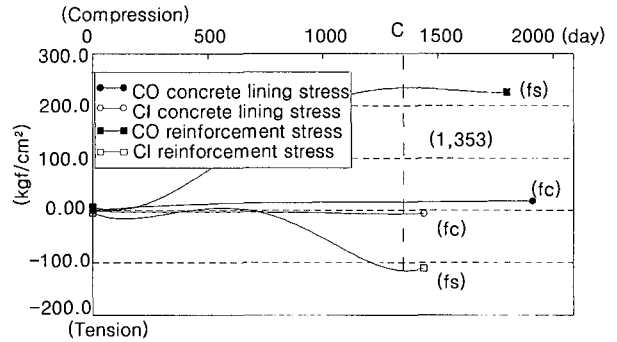


(c) Fitting curve

Fig. 12 Graph of crown concrete lining reinforcement stress



(a) Criteria of concrete stress



(b) Criteria of reinforcement stress

Fig. 13 Combination of fitting curve

천단외면의 압축응력은 674일 경과지점인 A점에서 철근응력과 콘크리트 응력이 교차되어 14 kgf/cm²의 값을 보이나, 천단내면의 인장응력은 951일 경과지점인 B점에서 철근 응력과 콘크리트 응력이 교차되어 45 kgf/cm²의 값을 보여 터널 주변의 작용하중과 터널 지보부재의 상호 영향으로 지반과 접한 터널 콘크리트 라이닝의 외면에서 콘크리트 응력과 철근응력이 먼저 교차되는 것을 알 수 있다.

철근 및 콘크리트 응력 기준에서 계측 경과일이 1,353일 인 약 45개월 경과지점인 C점에서 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력이 최대인 것으로 나타나, 콘크리트 라이닝 시공 후 45개월 동안은 서서히 응력이 증가하다가 그 이후에는 수렴하는 것으로 분석되어 터널 유지관리시 계측 빈도 및 계측 결과 분석시기 결정에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 장기간 계측이 수행된 풍화대를 통과 하는 지하철터널 유지관리 계측결과를 회귀분석하여, 터널의 최종 지보부재인 콘크리트 라이닝의 응력과 철근 응력의 상호관계를 파악하고, 안전성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터널의 최종 지보부재인 콘크리트 라이닝은 천단외면

에서는 압축응력을 지속적으로 받아 최대 17 kgf/cm²로 허용 압축응력 84 kgf/cm²의 20 % 정도에서 수렴하였고, 천단내면에서는 인장응력을 지속적으로 받아 최대 7 kgf/cm²에서 수렴하여 콘크리트의 휨 인장강도인 파괴계수 28.9 kgf/cm²에 24 % 정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 판단되며, 콘크리트 라이닝 철근 응력은 천단외면에서는 압축응력을 지속적으로 받아 최대 226 kgf/cm²에서 수렴하였고, 천단내면에서는 인장응력을 지속적으로 받아 최대 115 kgf/cm²에서 수렴하여 철근의 허용응력인 1,500 kgf/cm²에 최대 15 % 정도로 콘크리트 라이닝은 안전한 것으로 판단된다.

2) 콘크리트 라이닝 응력 기준과 철근 응력 기준 회귀분석 곡선에서 계측 경과일이 1,353일인 약 45개월 경과지점인 C점에서 콘크리트 라이닝 응력과 철근응력이 최대인 것으로 나타나, 콘크리트 라이닝 시공 후 약 45개월 동안은 서서히 응력이 증가하다가 그 이후에는 수렴하는 것으로 분석되어 터널 유지관리시 계측 빈도 및 계측결과 분석시기 결정에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 철근 콘크리트 프리캐스트 라이닝에서 천단내면 균열 발생시 천단침하하는 7.2 mm, 중앙 내공변위는 8.3 mm가 발생되었으며, 터널 건전도 평가를 위한 라이닝 모형 실험결과 천단내면 균열발생시 천단침하는 12 mm로 나타나 유지관리시 예방적인 관리를 위해 향후 철근 콘크리트 라이닝의 천단침하 및 내공변위 관리기준치 결정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Eisetin. 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.

2. Nahhas, F. EI, Kadi. F. EI, and Ahmed. A. I., "Interacting of Tunnel Linings and Soft Ground," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 1, No. 1, 1992, pp.33~43.

3. Leger, B. and Roussel. J. C., "Ten Years of Geotechnical Measurements Through Chamoise Tunnel Marls," 1995, pp.1309~1312.

4. Curtis, D. J. and Spaul, J. A., "Monitoring of the UK Tunnel Linings," *Engineering Geology of The Channel Tunnel*, 1996, pp.277~286.

5. Moore, D. R. & Crease, A., "Tunnel Instrumentation," *Engineering Geology of the Channel Tunnel*, 1996, pp.287~294.

6. Eurotunnel, Transmanche-Link, "Monitoring of Tunnel Lining Second Annual Report," Gage Technique Limited, 1991.

7. Maeda, K. & Obata, T., "The Measurement of the Behavior at the Undersea Portion of the Seikan Tunnel," *トンネル工学研究発表會 論文 集2卷*, 1992, pp.143~148.

8. 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," *トンネルと地下*, 1992, pp.71~79.

9. Feldman. A. I. and Buechel. G. J., "Instrumentation Program for Boston Red Line Subway Tunnel," *Field Measurements in Geomechanics*, 1999, pp.95~100.

10. 이대혁, "모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성에 관한 연구," 서울대학교 박사학위논문, 1998, pp.100~109.

요 약

유지관리 계측은 터널 구조물의 지속적인 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 자료제공을 목적으로 한다. 최근 들어 각종 터널에 적용하는 사례가 급속하게 증가되고 있으나, 현재까지 터널에서 장기간 측정된 계측실적도 적고, 합리적인 분석방법 연구도 전무한 실정이다. 본 연구에서는 장기간 계측이 수행된 지하철 풍화대 통과 터널의 계측결과를 회귀분석하여 터널의 최종 지보재인 콘크리트 라이닝의 응력과 철근응력의 상관관계를 파악하였다. 또한, 터널 콘크리트 라이닝의 응력과 안전성의 분석을 통하여 유지관리 계측 빈도 및 관리 기준치의 현장 적용성을 검토하였다.

핵심용어 : 유지관리 계측, 터널 콘크리트 라이닝, 응력