

경전철 터널의 강지보 지보압을 고려한 콘크리트라이닝 최적 설계 방법 연구

A Study on Concrete Lining Design Method considering Steel Rib Supports in Light-Rail Tunnel

김운수*[†], 사공명** , 박용걸*

Oun Su Kim*[†], Myung Sagong** , YG Park*

Abstract The purpose of this paper is to determine the reduction effects of the member forces of the concrete lining considering the steel rib supports in design. Since member forces of the steel rib supports were usually ignored, quantitative investigation on the reduction of member forces on the steel rib is required. In this study, member forces of steel rib supports have been calculated for various size of tunnel cross section. The results show that the tunnel with small cross section for light train exhibits largest support pressure. In addition, the member force is highest when the ground condition is poor. Under such condition, bending capacity of concrete liner and steel reinforcement are reduced about 40%, and 43%, respectively. In consequence reduction of construction cost is possible.

Keywords : Light rail tunnel, Steel rib supports, ground loosening loads, Concrete lining

초 록 본 논문의 목적은 콘크리트 라이닝설계시 보수적으로 생각하여 무시하고 있는 강지보 지보압을 고려하여 설계시 콘크리트 라이닝의 부재력 감소효과를 확인하기 위함이다. 이를 위해 터널 단면크기에 따른 강지보 지보압을 산정한 결과 가장 단면이 작은 경전철 터널단면에서 지보압이 가장 크게 작용하는 것으로 나타나 경전철 단면에서 패턴별 강지보 지보압을 산정하였다. 그 결과 지반조건이 가장 불량한 구간의 지보패턴에서 강지보 지보압의 능력이 가장 크게 나타나 콘크리트 라이닝의 휨인장응력이 최대 40%이상 감소하는 것으로 나타났고 또한 보강 철근량도 최대 43%감소하여 공사비절감효과도 큰 것으로 판단된다.

주요어 : 경전철 터널, 강지보 지보압, 지반이완하중, 콘크리트라이닝

1. 서 론

현재 터널설계에 있어서 주 지보재인 숏크리트, 강지보, 록볼트는 장기 지반이완하중을 받는 콘크리트라이닝이 타설되기 전까지 시공시에만 지지하는 임시 지보재로 설계하고 있다. 또한 장기 지반이완하중의 과다한 평가로 인하여 콘크리트 라이닝의 설계가 보수적으로 이루어 지고 있다.

*[†] 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정(kjchul5@seoul.go.kr)

** 한국철도기술연구원 신교통연구본부 연구단장/과학기술연합대학원대학교 교수

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(ygpark@seoultech.ac.kr)

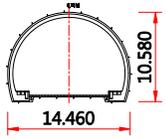
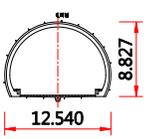
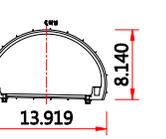
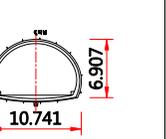
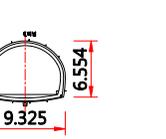
그러나 최근 콘크리트라이닝 설계를 위한 지반이완하중 산정시 지지보재가 지지하는 지보압의 평가를 통하여 저감된 이완하중으로 산정하고자 하는 연구가 활발히 이루어 지고 있다. 전상현(2011)은 1차지보재의 지보압을 고려하여 저감된 지반이완하중을 적용한 콘크리트라이닝의 응력변화에 관한 연구를 수행하였고, 박기환(2013)은 시공중인 터널의 계측결과를 이용한 지지보재의 역해석을 통하여 지반이완하중을 산정하여 콘크리트라이닝을 설계하는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 일본의 신간선 이야마터널에서는 숏크리트와 강지보를 고려하여 잔류변위를 콘크리트라이닝이 부담하는 것으로 설계한 사례가 있다(中村 郭 등, 2007). 그러나 저감된 지반이완하중 산정시 숏크리트의 지보압은 열화 및 장기내구성의정량적 평가 기준이 없어 장기지반이완하중을 지지하지 어려운 것으로 가정하였다. 지반강관 말뚝 및 항만 구조용 강재에서는 부식대 공제값 또는 부식속도를 산정하여 강구조물의사용수명까지 기능적 역할을 다 할 수 있도록 부식을 고려한 설계를 수행하고 있다. 터널의강지보재는 숏크리트로 충분히 피복되어 쉽게 부식되지 않을 것으로 가정하여 장기적으로 지반이완하중을 지지할 수 있는 영구 지보재로써의 설계가 가능할 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 경전철 터널에 대하여 강지보가 지지하는 지보능력을 평가하고 이를 반영한 콘크리트라이닝 설계를 통하여 강지보 지보압을 고려한 콘크리트라이닝의 최적 설계 방법에 대하여 검토하고자 한다.

2. 터널 단면크기에 따른 강지보 지보압 해석

2.1 해석조건

터널 단면의 크기에 따른 강지보의 지보압 영향을 비교하기 위하여 고속철도, 복선전철, 고속도로, 지하철, 경전철 각각의 터널단면을 이용하였으며 터널 형상 및 단면적은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Applicable sections and features

구분	고속철도	복선전철	고속도로	지하철	경전철
단면 형상					
단면적	124.66m ²	93.20m ²	91.89m ²	65.22m ²	55.35m ²
강지보 길이	29.53m	25.00m	24.37m	20.20m	18.60m

각각의 강지보의 지보압을 이론식에 의한 방법 및 수치해석에 의한 방법 두가지 방법으로 산정하였다. 이론식에 의한 방법으로 산정한 강지보재의 최대 지보압은 다음 식(1)으로 구할 수 있다(이인모, 2007).

$$P_{s(set)}^{\max} = \frac{\sigma_{st,y} \times A_{set}}{d \left[a - \frac{h_{set}}{2} \right]^2} \quad (1)$$

여기서, a 는 터널의 반경, A_{set} 는 강지보재의 단면적, h_{set} 는 강지보재의 높이, d 는 강지보재의 간격, $\sigma_{st,y}$ 는 강재의 항복강도를 의미한다.

수치해석에 의한 방법에 적용된 프로그램은 구조해석 프로그램인 MIDAS Civil이며, 주변 지반은 풍화암으로 변형계수 250MPa로 적용하였다. 검토 방법은 재료선형 구조계산을 수행하여 지보압의 크기에 따른 강지보재(H-125×125×6.5×9)의 발생응력을 평가하고 허용응력에 도달하는 지보압을 산정하였다. 강지보는 토압만 받는 것으로 가정하여 이완하중은 연직토압 및 수평토압만 적용하였다

터널설계기준(2007)에서는 H형강 강지보재의 재질을 KS D3503에 규정하여 SS400을 표준으로 함을 원칙으로 하며, 이와 동등 이상의 성능을 발휘하는 구조용 강재로 하여야 한다고 제시하고 있다. 또한 강지보재의 허용응력은 도로교 설계기준(2010)의 구조용 강재의 허용응력에 따라 140MPa로 선정하였다.

2.2 터널 단면크기에 따른 강지보 지보압 해석결과

터널이 풍화암에 위치할 때 선정된 각각의 터널 단면에 적용된 강지보재 H-125×125×6.5×9가 허용응력에 도달 할때의 지보압은 Fig. 1와 같이 나타났다.



Fig. 1 Steel rib supports according to the size of the tunnel

터널 단면의 크기가 클수록 강지보재가 받을 수 있는 지보압은 작은 것으로 나타났으며 단면의 크기가 가장 작은 경전철 단면의 경우 강지보의 지보압이 가장 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이론식에 의한 강지보 지보압은 수치해석에 의한 방법보다 약 2배 이상 크게 나타났으며, 이는 터널의 형상을 원형으로 가정함으로써 강지보로 폐합된 지보압이 산정되었기 때문인 것으로 판단된다.

3. 강지보재 지보압을 고려한 경전철 터널 라이닝 설계검토

3.1 검토조건

기존 설계 콘크리트 라이닝과 강지보재 지보압을 고려한 콘크리트 라이닝의 응력변화를 검토하기 위하여 ○○~○○ 도시철도(경량전철) 민간투자사업을 대상으로 하였다. 검토에 적용된 지보패턴은 강지보재가 적용된 PD-2B, PD-3, PD-4이며 아래의 Table 2과 같다.

Table 2 tunnel pattern

구 분	PD-2B	PD-3	PD-4
주변지반	풍화암	풍화암	연암
shotcrete 두께(mm)	200	150	120
라이닝 두께(mm)	350	300	300
적용 강지보	H-125×125×6.5×9	LG-70×20×30	LG-50×20×30
강지보 설치간격(m)	0.8	1.0	1.2
이완하중 산정	0.4(B+Ht)	0.3(B+Ht)	0.2(B+Ht)
이완하중(kPa)	112.05	74.64	59.87

3.2 패턴별 강지보 지보압 산정

2장에서 제시한 방법과 같은 재료선형 구조계산을 수행하여 각 패턴에 적용된 강지보재의 이완하중에 따른 지보압은 아래 Fig. 2과 같이 나타났으며, 강지보재가 허용응력에 도달했을 때의 지보압을 산정하였다.

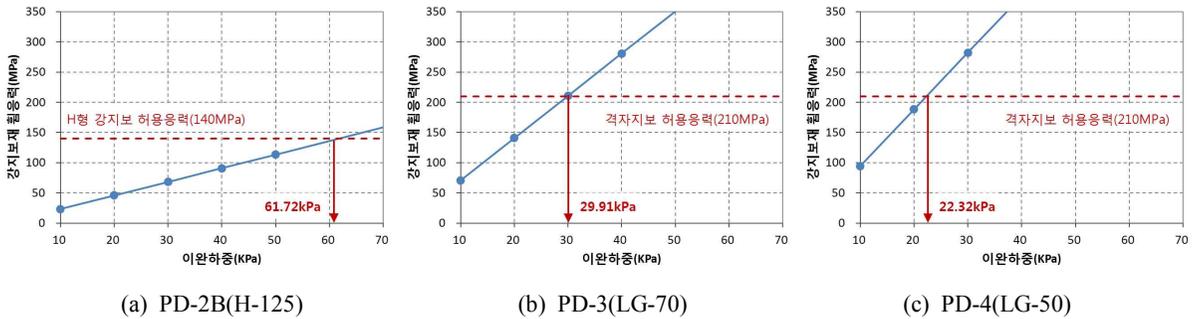


Fig. 2 Steel rib supports according to the size of the tunnel

하중조합이 반영되는 하중계수는 각각의 하중에 대하여 모두 1.0을 고려하여 강지보재는 순수 토압에만 저항하는 것으로 가정하였으며, 강지보재가 부담하는 허용지보압 만큼 지반 이완하중에서 제거한 후 나머지 이완하중이 콘크리트라이닝에 작용하는 것으로 하중을 산정하였다. 아래의 Table 3는 강지보 지보압이 고려된 콘크리트 라이닝 작용하중을 산정한 것이며, 가장 불량한 지반의 지보패턴인 PD-2B에서 강지보 지보압을 고려함으로써 라이닝에 작용하는 하중이 최대 55.1%가 저감되는 것으로 나타났다.

Table 3 Tunnel relaxed rock loads Considering Steel Rib Supports

구 분	PD-2B	PD-3	PD-4
지반 이완하중(kPa)	112.05	74.64	59.87
강지보 지보압(kPa)	61.72	29.91	22.32
강지보 고려 라이닝 작용하중(kPa)	50.33	44.73	37.55
이완하중 저감율(%)	▼55.1%	▼40.1%	▼37.3%

3.3 강지보를 고려한 라이닝 설계

강지보 지보압을 고려한 라이닝 작용하중을 적용하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 부재력의 변화를 수치해석을 통하여 검토하였다. 기존 설계시의 콘크리트 라이닝의 발생응력 및

철근량과 강지보 지보압을 고려한 라이닝 작용하중에 의한 라이닝 발생응력 및 철근량을 비교하여 라이닝의 응력변화 및 경제성을 분석하였다. 아래의 Fig. 3는 철근보강에 가장 큰 영향을 미치는 패턴별 콘크리트라이닝 휨인장응력을 나타낸 것이다.

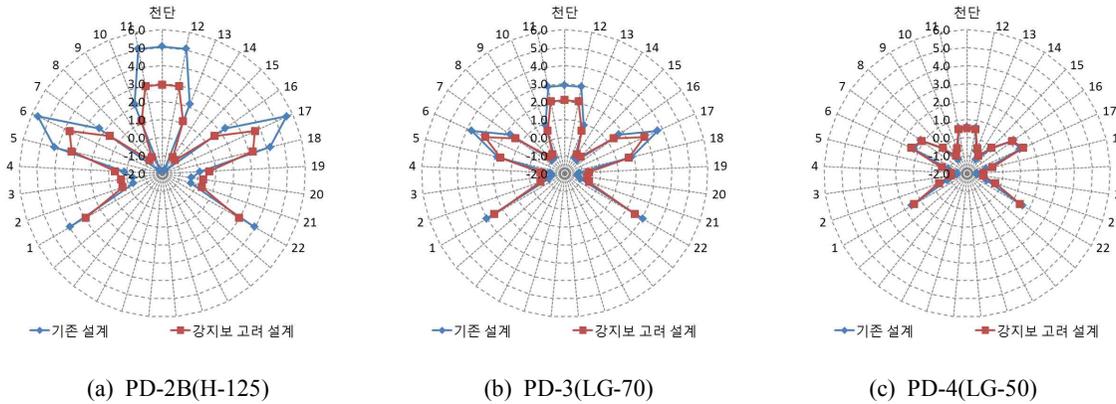


Fig. 3 Flexural tensile stress of concrete lining

허용응력설계법에 따른 무근콘크리트라이닝의 휨인장응력 검토결과 PD-2B의 천단부에서 최대 40%이상 응력감소가 나타났으나 콘크리트의 허용휨인장응력을 초과하여 철근콘크리트 라이닝 계획이 필요하다. 아래의 Table 4은 강도설계법에 의한 콘크리트라이닝 설계에 의하여 보강 주철근량을 산정한 결과이며, 기존 주철근 보강에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

Table 4 Calculation results of reinforcement

구 분	PD-2B		PD-3		PD-4	
	기존 설계	강지보 고려	기존 설계	강지보 고려	기존 설계	강지보 고려
천단부	D25@150	D19@150	D22@150	D19@150	D16@150	D13@150
아치부	D25@150	D19@150	D22@150	D19@150	D16@150	D16@150
측벽부	D25@150	D19@150	D22@150	D19@150	D16@150	D13@150
바닥부	D29@150	D22@150	D22@150	D19@150	D16@150	D13@150
바닥중앙	D29@150	D22@150	D22@150	D19@150	D16@150	D13@150
총 철근량	2.716ton	1.535ton	1.811ton	1.312ton	0.902ton	0.902ton

실제 콘크리트라이닝 구조설계에 의한 철근 배근으로 보강 철근량을 검토한 결과 PD-2B에서 최대 43.5% 감소되는 것으로 나타났으며, PD-4의 철근량은 아치부의 보강철근으로 인하여 실제 배근시 모든 철근이 D16으로 배근되어 동일한 철근량으로 나타났다.

4. 결 론

일반적으로 NATM 터널의 콘크리트라이닝 설계시 숏크리트, 강지보재 및 록볼트 등의 지지보재는 장기적으로 기능을 상실하는 것으로 간주하고 장기적인 지반이완하중은 콘크리트라이닝이 모두 지지하는 것으로 설계한다. 본 연구에서는 지지보재의 장기 내구성이 우수한 강지보재의 지보압을 고려하였을 경우의 콘크리트라이닝의 부재력 감소효과를 수치해석을 통하여 비교·분석하였으며, 실제 보강철근량을 산출하여 경제성을 검토한 결론은 다음과 같다.

1. 단면크기에 따른 강지보재의 지보압을 이론식 및 수치해석방법(MIDAS Civil)으로 산정하고 비교한 결과 단면적이 가장 적은 경전철 터널에서 가장 큰 지보효과가 나타났으며, 타 터널에 비해 경전철 터널의 콘크리트 라이닝 설계시 강지보를 고려하였을 경우 가장 큰 경제적 효과가 발생할 것으로 판단된다.

2. 경전철 터널에서 패턴별 강지보재의 지보압을 고려하여 콘크리트라이닝 설계를 수행한 결과 지반조건이 가장 불량한 구간의 지보패턴(PD-2B)에서 강지보 지보압의 능력이 가장 크게 나타나 콘크리트라이닝의 휨인장응력이 천단부에서 최대 40%이상 감소한 것으로 나타났다. 또한 보강철근량 검토시 철근량이 최대 43%이상 감소하여 공사비 절감효과도 클 것으로 판단된다.

본 연구에서는 강지보의 지보압을 재료선형해석에 의해 강재가 허용응력에 도달하였을 때의 지보압으로 산정하였으나, 실제 시공시 숏크리트와 강지보재의 부착정도에 따라 장기적인 내구성에 문제가 있을 것으로 판단된다. 그러므로 차후 숏크리트 장기 내구성에 대한 정량적 평가 방법 및 강지보재의 방식도막, 또는 부식을 고려한 설계 등 더 많은 연구를 통하여 경제적이고 안전측 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 전상현, 신영완, 유한규(2011), NATM 터널에서 1차지보재의 지보압을 고려한 콘크리트라이닝 응력변화에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제31권, 제4 C호, pp147 - 154
- [2] 박기환(2013), 역해석을 이용한 콘크리트라이닝 지반이완하중 산정방법 연구, 석사학위논문, 한양대학교 대학원
- [3] 中村 郭 등(2007), 팽창성지반에서의 이차복공의 현상평가와 설계방법의 제안, 일본터널협회지, 터널과 지하
- [4] 이인모(2007), 터널의 지반공학적 원리, pp.33 - 64
- [5] 한국터널공학회(2007), 건설교통부 제정 터널설계기준, pp 47 - 56
- [6] 한국도로교통협회(2010), 국토해양부 제정 도로교 설계기준, pp2-30 - 3-32
- [7] 신휴성, 김동규(2007), 터널 숏크리트 라이닝의 장기 화학적 열화 손상 평가를 위한 수치모델링 기법 개발, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp.299 - 307